中华人民共和国国家军用标准

FL 0110

GJB/Z 25A－2023
代替 GJB/Z 25－1991

电子设备和设施的接地、搭接和屏蔽设计指南

Grounding, bonding, and shielding for electronic equipments and facilities

2023－07－17 发布

2023－10－01 实施

中央军委装备发展部　颁 布

正版人发布
服务热线：4006 618 301

目　　次

前言……XXVII
1　范围……1
2　引用文件……1
3　术语和定义……1
4　概述……3
4.1　接地系统的作用……3
4.2　设施接地系统的组成……3
4.2.1　概述……3
4.2.2　大地电极分系统……4
4.2.3　雷电防护分系统……4
4.2.4　故障保护分系统……4
4.2.5　信号参考分系统……4
4.3　接地与配电系统……5
4.3.1　概述……5
4.3.2　交流电源……5
4.3.3　直流电源……5
4.4　系统内的电磁噪声……5
4.5　接地与搭接、屏蔽的相互影响……5
4.6　安全接地的注意事项……6
5　大地电极分系统……6
5.1　目的……6
5.1.1　概述……6
5.1.2　雷电防护……6
5.1.3　故障保护……6
5.1.4　降低噪声……7
5.2　电阻要求……7
5.2.1　概述……7
5.2.2　对地电阻……7
5.2.2.1　典型金属管和金属件的对地电阻……7
5.2.2.2　故障保护分系统的对地电阻要求……8
5.2.2.3　雷电防护的对地电阻要求……8
5.2.3　电子设备和设施的对地电阻要求……8
5.3　土壤电阻率……8
5.3.1　概述……8
5.3.2　典型的电阻率范围……8
5.3.3　环境的影响……9
5.4　土壤电阻率的测量……10
5.4.1　概述……10

5.4.2 测量方法……10
5.4.2.1 单电极法……10
5.4.2.2 四电极法……12
5.5 大地电极分系统的类型……13
5.5.1 概述……13
5.5.2 接地棒……13
5.5.3 埋设的水平导体……13
5.5.4 格栅……13
5.5.5 板状电极……14
5.5.6 建筑物的金属结构框架……14
5.5.7 水管……14
5.5.8 附属的金属物体……14
5.5.9 井架……14
5.6 电阻特性……14
5.6.1 简单孤立电极的电阻……14
5.6.1.1 打入地下的接地棒……14
5.6.1.2 其他通用的电极……17
5.6.2 多根电极的电阻……18
5.6.2.1 概述……18
5.6.2.2 两根并联的垂直接地棒……18
5.6.2.3 方阵垂直接地棒……19
5.6.2.4 水平的格栅(网络)……20
5.6.2.5 由格栅所连接的垂直接地棒……21
5.6.3 电极的瞬态阻抗……21
5.6.4 非均一土质(分层的土壤)的影响……21
5.6.4.1 概述……21
5.6.4.2 半球体电极……22
5.6.4.3 垂直接地棒……22
5.6.4.4 格栅……23
5.7 电极对地电阻的测量……23
5.7.1 概述……23
5.7.2 电位降法……23
5.7.2.1 试验布置……23
5.7.2.2 测量棒的间隔……24
5.7.2.3 延伸型电极分系统……27
5.7.2.4 试验设备……28
5.7.3 两电极法……28
5.7.4 三点(三角)法……29
5.8 其他考虑……29
5.8.1 在大地电极上面的土壤表面电位……29
5.8.1.1 概述……29
5.8.1.2 跨步电压的安全极限……30
5.8.1.3 实际电极的跨步电压……30

5.8.1.3.1　概述……30
5.8.1.3.2　顶端与地面齐平的垂直接地棒……30
5.8.1.3.3　顶端埋入地下的垂直接地棒……31
5.8.1.3.4　埋设的水平格栅……32
5.8.1.4　降低跨步电压伤害的方法……33
5.8.2　电极的发热……33
5.8.2.1　概述……33
5.8.2.2　稳态电流……33
5.8.2.3　瞬态电流……34
5.8.2.4　电极的最小尺寸……34
5.9　提高电极周围土壤电导率的方法……35
5.9.1　概述……35
5.9.2　保持水分……35
5.9.3　施加降阻剂……35
5.9.3.1　概述……35
5.9.3.2　电解质溶液……36
5.9.3.3　化学降阻剂……37
5.9.3.4　物理降阻剂……37
5.9.4　电极包套……37
5.9.5　施加电解质的处理方法……37
5.10　阴极保护……37
5.10.1　概述……37
5.10.2　保护技术……38
5.10.3　牺牲阳极……38
5.10.4　腐蚀性大气……38
5.11　高寒地区的接地……38
5.11.1　土壤电阻……38
5.11.2　改善冻土地区的接地……40
5.11.2.1　概述……40
5.11.2.2　电极接地电阻……41
5.11.2.3　装配和测量方法……41
5.11.2.3.1　电极装配……41
5.11.2.3.2　回填料……41
6　雷电防护分系统……43
6.1　雷电现象……43
6.2　雷电的形成……44
6.3　结构物高度的影响……45
6.4　雷击的可能性……45
6.5　吸引面积……46
6.5.1　概述……46
6.5.2　高度低于100m的结构物……46
6.5.3　保护圆锥区……48
6.6　雷电效应……49

6.6.1 闪电的参数……49
6.6.2 机械和热效应……50
6.6.3 电效应……50
6.6.3.1 概述……50
6.6.3.2 导体阻抗的影响……51
6.6.3.3 感应电压效应……51
6.6.3.4 容性耦合电压……52
6.6.3.5 接地电阻……53
6.7 基本防护要求……55
6.7.1 要求……55
6.7.2 措施……55
6.8 防护要求的确定……55
6.8.1 概述……55
6.8.2 雷击的可能性……55
6.8.3 结构类型……55
6.8.4 设施性质……55
7 故障保护分系统……56
7.1 故障保护……56
7.1.1 概述……56
7.1.2 电力系统的故障……56
7.1.3 线路接地故障断路器……56
7.2 接大地……57
7.3 交流电力线路的接地……57
7.4 试验设备……58
8 信号参考分系统……58
8.1 概述……58
8.2 导体的考虑……58
8.2.1 直流电阻……58
8.2.2 交流阻抗……59
8.2.2.1 趋肤效应……59
8.2.2.2 交流电阻……60
8.2.2.3 电抗……61
8.2.2.4 邻近效应……63
8.2.3 电阻特性与阻抗特性的关系……63
8.2.4 几何效应……64
8.2.4.1 概述……64
8.2.4.2 绞合电缆……64
8.2.4.3 矩形导体……64
8.2.4.4 管状导体……65
8.2.4.5 钢结构件……65
8.3 信号参考分系统网络的配置……66
8.3.1 概述……66
8.3.2 悬浮接地……67

8.3.3 单点接地(适用于低频，0kHz～30kHz，某些场合可高至 300kHz)……67
8.3.4 多点接地(适用于高频，＞300kHz，某些场合可低至 30kHz)……69
8.3.4.1 概述……69
8.3.4.2 电位参考面……70
8.3.4.3 电位参考面的类型……70
8.3.5 悬浮接地系统……70
8.4 应用场合……71
8.4.1 概述……71
8.4.2 低频网络(DC～30kHz，某些场合可高至 300kHz)……71
8.4.3 高频网络(＞300kHz，某些场合可低至 30kHz)……71
8.4.4 频率分界线……72
9 干扰的耦合方式及其降低的措施……72
9.1 概述……72
9.2 耦合机理……74
9.2.1 概述……74
9.2.2 传导耦合……74
9.2.3 自由空间耦合……75
9.2.3.1 概述……75
9.2.3.2 近场耦合……75
9.2.3.2.1 概述……75
9.2.3.2.2 感性耦合……75
9.2.3.2.3 容性耦合……76
9.2.3.3 远场耦合……78
9.3 共模噪声……80
9.3.1 概述……80
9.3.2 共模耦合的基本理论……80
9.3.3 差分放大器……82
9.4 降低干扰的方法……82
9.4.1 概述……82
9.4.2 减小耦合……82
9.4.2.1 概述……82
9.4.2.2 减小参考面的阻抗……82
9.4.2.3 增大空间距离……82
9.4.2.4 减小电路的环路面积……82
9.4.2.5 屏蔽……83
9.4.2.6 平衡线路……83
9.4.3 替代方法……83
9.5 设施和设备的要求……84
10 搭接……84
10.1 概述……84
10.2 搭接的目的……84
10.3 搭接电阻的要求……85
10.4 直接搭接……86

10.4.1 概述……86
10.4.2 接触电阻……87
10.4.2.1 概述……87
10.4.2.2 表面杂质……87
10.4.2.3 表面硬度……87
10.4.2.4 接触压力……88
10.4.2.5 搭接面积……88
10.4.3 直接搭接的方法……88
10.4.3.1 概述……88
10.4.3.2 熔焊……89
10.4.3.3 硬钎焊……90
10.4.3.4 软钎焊……90
10.4.3.5 螺栓搭接……90
10.4.3.6 铆接……90
10.4.3.7 导电粘合剂……91
10.4.3.8 搭接方法比较……91
10.5 间接搭接……92
10.5.1 概述……92
10.5.2 电阻……92
10.5.3 频率影响……93
10.5.3.1 趋肤效应……93
10.5.3.2 搭接电抗……93
10.5.3.3 杂散电容……95
10.6 搭接表面处理……97
10.6.1 概述……97
10.6.2 固态杂质……97
10.6.3 有机化合物……97
10.6.4 电镀层和表面保护层……97
10.6.5 腐蚀产物……97
10.7 搭接实施……98
10.8 搭接点的腐蚀……98
10.8.1 腐蚀的化学原理……98
10.8.1.1 概述……98
10.8.1.2 电化序……98
10.8.1.3 腐蚀电位序……99
10.8.2 阳极的相对面积……102
10.8.3 保护涂覆层……102
10.9 工艺及人员要求……102
10.10 搭接导则小结……103
11 屏蔽……103
11.1 电磁屏蔽的作用……103
11.2 屏蔽的基本理论……104
11.2.1 屏蔽效能……104

11.2.2 反向感应场……104
11.2.3 传输线模型……104
11.2.4 非均匀屏蔽……104
11.3 单层连续厚屏蔽体的屏蔽效能……105
11.3.1 概述……105
11.3.2 吸收损耗……105
11.3.3 反射损耗……107
11.3.3.1 概述……107
11.3.3.2 低阻抗场……108
11.3.3.3 平面波场……109
11.3.3.4 高阻抗场……110
11.3.4 多次反射修正项……110
11.3.5 总屏蔽效能……113
11.3.5.1 概述……113
11.3.5.2 测量数据……115
11.3.5.3 小结……116
11.4 其他屏蔽体的屏蔽效能……116
11.4.1 多层实心屏蔽体……116
11.4.2 镀层和薄膜屏蔽层……117
11.4.3 屏蔽网和穿孔的金属板屏蔽层……118
11.5 屏蔽体不连续(孔眼)的影响……123
11.5.1 概述……123
11.5.2 无衬垫接缝……124
11.5.3 有衬垫的接缝……125
11.5.4 贯通孔……128
11.5.4.1 概述……128
11.5.4.2 截止波导式贯通孔……128
11.5.4.3 屏蔽网和导电玻璃……129
11.6 屏蔽材料的选择……131
11.7 常规建筑材料的使用……131
11.7.1 概述……131
11.7.2 混凝土……131
11.7.3 钢筋……131
11.8 电缆和连接器的屏蔽……132
11.8.1 概述……132
11.8.2 电缆屏蔽……132
11.8.3 电缆端接方式及连接器……135
11.9 屏蔽室……136
11.9.1 概述……136
11.9.2 模块式的可拆式屏蔽室……137
11.9.3 按传统方式建造的屏蔽室……138
11.9.4 用金属箔贴面的屏蔽室……139
11.10 屏蔽测试……139

11.10.1 概述……139
11.10.2 小环法低阻抗磁场测试……141
11.10.3 补充测试方法……141
11.11 人员的防护屏蔽……141
11.12 屏蔽要求的确定……141
11.12.1 概述……141
11.12.2 分析设备干扰的耦合种类……141
11.12.3 电磁环境的测量……141
11.12.4 设备的电磁干扰特性……142
11.13 屏蔽系统设计的要点考虑……142
11.13.1 概述……142
11.13.2 尺寸……142
11.13.3 配置……142
11.13.4 信号特性……143
11.13.5 费用……143
12 人员防护……143
12.1 电击……143
12.1.1 概述……143
12.1.2 电击的电平……143
12.1.3 电击的预防……143
12.2 静电防护……144
12.3 射频辐射危害及其防护……145
13 核电磁脉冲效应……146
13.1 概述……146
13.2 电磁脉冲的产生……146
13.2.1 高空电磁脉冲……146
13.2.1.1 概述……146
13.2.1.2 早期高空电磁脉冲……146
13.2.1.3 中期高空电磁脉冲……146
13.2.1.4 晚期高空电磁脉冲……147
13.2.2 地面爆炸电磁脉冲……147
13.3 高空电磁脉冲与系统的相互作用……147
13.3.1 概述……147
13.3.2 长线中的电流……148
13.3.2.1 架空长线……148
13.3.2.2 埋地长线……148
13.3.2.3 垂直结构件……149
13.3.3 高空电磁脉冲与局部结构的相互作用……149
13.3.3.1 屏蔽体……149
13.3.3.2 贯穿导体……150
13.3.3.3 孔缝……150
13.4 高空电磁脉冲的防护……150
13.4.1 概述……150

13.4.2 高空电磁脉冲屏蔽层……151
13.4.2.1 屏蔽体……151
13.4.2.2 贯穿导体……151
13.4.2.3 孔缝……152
13.4.3 防护配置……152
13.4.3.1 防护量值的确定……152
13.4.3.2 设置防护的场所……152
13.4.3.3 端子防护装置……153
13.4.3.3.1 概述……153
13.4.3.3.2 火花隙放电器和气体放电管……153
13.4.3.3.3 金属氧化物压敏电阻器……153
13.4.3.3.4 半导体保护器件……153
13.4.3.3.5 滤波器……154
13.4.3.4 贯穿设施屏蔽层的波导……154
13.4.3.4.1 概述……154
13.4.3.4.2 波导的准直连接……154
14 高功率微波(HPM)及其加固技术……156
14.1 HPM概述……156
14.2 HPM加固策略……157
14.3 HPM加固技术……158
14.3.1 前门加固技术……158
14.3.2 后门加固技术……159
14.3.2.1 概述……159
14.3.2.2 屏蔽……159
14.3.2.3 贯穿导体的加固……160
15 新设施设计准则……160
15.1 概述……160
15.2 大地电极分系统……160
15.2.1 概述……160
15.2.2 场地参数的勘测……161
15.2.2.1 概述……161
15.2.2.2 土壤电阻率……161
15.2.2.3 地理影响……161
15.2.2.4 物理特征……162
15.2.2.5 当地气候……162
15.2.3 设计程序……162
15.2.3.1 电极配置的选择……162
15.2.3.2 大地电阻的计算……164
15.2.3.3 其他配置……165
15.2.4 设计指南……165
15.2.5 装配方法……168
15.3 结构物的雷电防护……169
15.3.1 防护原理……169

15.3.2 整体防护系统……169
15.3.2.1 概述……169
15.3.2.2 接闪器……170
15.3.2.2.1 概述……170
15.3.2.2.2 尺寸和材料……170
15.3.2.2.3 位置……170
15.3.2.3 接地导体……172
15.3.2.3.1 概述……172
15.3.2.3.2 屋顶导体……175
15.3.2.3.3 引下线……176
15.3.2.4 紧固件……176
15.3.3 独立安装的防护系统……176
15.3.3.1 杆塔……176
15.3.3.2 架空接地导线……177
15.3.3.3 波导安装和接地……177
15.3.3.4 电缆安装和接地……180
15.3.3.5 雷电产生的瞬态浪涌防护……181
15.3.3.5.1 概述……181
15.3.3.5.2 瞬态源和设备损坏……181
15.3.3.5.3 减少损坏……181
15.3.3.5.4 敏感元件……181
15.3.3.5.5 瞬态发生的频次……182
15.3.3.5.6 交流供电线路中瞬态的定义……182
15.3.3.5.7 交流供电线路中瞬态的防护方法……184
15.3.3.5.8 黑色金属导管的使用……184
15.3.3.5.9 架空防护导线的使用……185
15.3.3.5.10 埋地电缆的保护……185
15.3.3.5.11 埋设的保护导线……185
15.3.3.5.12 次级交流浪涌保护器……185
15.3.3.5.13 浪涌保护器的安装……186
15.3.3.5.14 现有的浪涌保护器类型……187
15.3.3.5.15 浪涌保护器的特性参数……188
15.3.3.5.16 浪涌保护器的理想工作特性……190
15.3.3.5.17 几类浪涌保护器的特性……190
15.3.3.5.18 设备外露线路的瞬态防护……196
15.3.3.5.19 瞬态发生频次的预测……197
15.3.3.5.20 瞬态的幅值和波形……197
15.3.3.5.21 设备耐受电平……197
15.3.3.5.22 防止瞬态的保护方法……197
15.3.3.5.23 在黑色金属导管内走线……198
15.3.3.5.24 瞬态抑制……198
15.3.3.5.25 瞬态抑制器的封装设计……199
15.3.3.5.26 同轴电缆贯通入口板时屏蔽层的连接……199

15.3.3.5.27　电缆中备用导线的接地……199
15.3.3.5.28　射频同轴线的瞬态抑制……199
15.3.3.5.29　设备级瞬态抑制……199
15.3.3.6　雷电瞬态防护的评定……199
15.3.3.7　设备级瞬态防护……200
15.3.3.7.1　防护要求……200
15.3.3.7.2　瞬态的定义……200
15.3.3.7.3　设备损坏(耐受)电平的确定……201
15.3.3.7.4　瞬态防护要求的认定……202
15.3.3.7.5　减少瞬态损坏……202
15.3.3.7.6　交流电源输入……202
15.3.3.7.7　直流电源输出端的瞬态抑制……204
15.3.3.7.8　陆上线路的瞬态抑制……205
15.3.3.8　腐蚀控制……210
15.3.3.9　接头……211
15.3.3.10　物理防护……211
15.4　故障保护分系统……211
15.4.1　目的……211
15.4.2　设备故障保护分系统的组成……211
15.4.3　设备故障保护分系统的配置……211
15.4.4　管道和管子……212
15.4.5　电气支撑结构物……213
15.4.5.1　概述……213
15.4.5.2　金属导管……213
15.4.5.3　电缆桥架……213
15.4.5.4　壳体……213
15.4.5.5　电缆铠装……213
15.4.5.6　旋转式机械……213
15.4.6　配电系统……213
15.4.7　备用交流发电机……214
15.4.8　可移动设备的故障保护分系统……214
15.4.9　故障保护分系统的评定……214
15.4.9.1　测量……214
15.4.9.2　符合性检查……214
15.4.9.2.1　供电引入口……214
15.4.9.2.2　分隔的电源系统……215
15.4.9.2.3　电源转换和分路开关……216
15.4.9.2.4　电源配电板……216
15.4.9.2.5　导线槽、电缆槽、电缆桥架……217
15.4.9.2.6　设备……217
15.4.9.2.7　中线的隔离……218
15.4.9.3　缺陷的纠正……218
15.5　新设施的信号参考分系统……219

15.5.1 高频信号参考网络……219
15.5.1.1 概述……219
15.5.1.2 多点接地系统……221
15.5.1.2.1 概述……221
15.5.1.2.2 等电位接地平面类型……222
15.5.2 低频信号参考网络……228
15.5.2.1 概述……228
15.5.2.2 配置……228
15.5.2.3 组成元件……229
15.5.2.3.1 主接地板……229
15.5.2.3.2 主干接地电缆……229
15.5.2.3.3 支路接地板……229
15.5.2.3.4 支路接地电缆……230
15.5.2.3.5 馈电接地板……230
15.5.2.4 多网络配置……230
15.5.2.5 布局和走线……230
15.5.2.6 标志及其保护……230
15.5.3 信号参考面及设施电源的混合接地……230
15.6 处理有关国家安全信息的设备(红/黑设备)的接地原理……231
15.7 搭接实施……233
15.7.1 概述……233
15.7.2 应用指南……234
15.7.3 表面准备……235
15.7.4 搭接头保护规程……235
15.7.4.1 概述……235
15.7.4.2 搭接条紧固件……237
15.7.5 典型搭接……237
15.7.5.1 电缆桥架……237
15.7.5.2 敷设管道和导管……238
15.7.5.3 其他搭接实例……238
15.8 屏蔽……239
15.8.1 概述……239
15.8.2 要求的确定……239
15.8.3 设计指南……241
15.8.4 材料选择……242
15.8.5 施工导则……244
15.9 共模噪声抑制和仪表安装……246
15.9.1 概述……246
15.9.2 设计实施……246
15.9.3 仪表安装……246
15.10 高空电磁脉冲防护……247
15.10.1 概述……247
15.10.2 接大地……247

15.10.3　对电磁脉冲的屏蔽……247
15.10.4　防电磁脉冲的搭接实施……248
15.10.5　结构指南……248
15.11　军用移动设施……249
15.11.1　战术接地通用要求……249
15.11.1.1　设施接地系统……249
15.11.1.1.1　概述……249
15.11.1.1.2　大地接地系统……249
15.11.1.1.3　电源接地……250
15.11.1.1.4　雷电和 HEMP 防护分系统……251
15.11.1.1.5　信号参考分系统……251
15.11.1.1.6　故障保护分系统……252
15.11.1.2　在战术环境中接地电阻的测量……252
15.11.1.3　在战术环境中降低接地电阻……252
15.11.1.3.1　概述……252
15.11.1.3.2　现有接地设施……252
15.11.1.3.3　多电极系统……252
15.11.1.3.4　大地电极分系统……252
15.11.1.3.5　降阻剂……253
15.11.2　详细的战术接地要求……253
15.11.2.1　概述……253
15.11.2.1.1　适用范围……253
15.11.2.1.2　培训……253
15.11.2.1.3　试验……253
15.11.2.2　独立设备……253
15.11.2.2.1　概述……253
15.11.2.2.2　接地程序……253
15.11.2.3　独立掩蔽体……254
15.11.2.3.1　概述……254
15.11.2.3.2　分系统的互连……254
15.11.2.4　并置军用移动设备……254
15.11.2.4.1　概述……254
15.11.2.4.2　接地程序……254
15.11.2.5　并置掩蔽体……255
15.11.2.5.1　概述……255
15.11.2.5.2　接地程序……255
15.11.2.6　固定的预制式掩蔽体……256
15.11.2.6.1　概述……256
15.11.2.6.2　电气连接……256
15.12　栅栏……256
15.12.1　概述……256
15.12.2　接地……257
15.12.3　安装……257

15.13　新设施的验收和试验程序……257
15.13.1　概述……257
15.13.2　大地电极分系统……257
15.13.3　雷电防护网络……257
15.13.4　信号参考及故障保护分系统……258
15.13.5　搭接点和搭接电阻……258
15.13.6　设施检查表格……259
16　现有设施……261
16.1　概述……261
16.2　改造……261
16.2.1　概述……261
16.2.2　图纸……262
16.2.3　设施勘测……262
16.2.3.1　概述……262
16.2.3.2　勘测步骤……262
16.2.3.3　勘测程序……263
16.2.3.3.1　概述……263
16.2.3.3.2　大地电极分系统……263
16.2.3.3.3　搭接……265
16.2.3.3.4　雷电防护网络……266
16.2.3.3.5　安全接地……266
16.2.3.3.6　信号接地实施……267
16.2.3.3.7　接地系统噪声勘测……268
16.2.3.3.8　屏蔽……268
16.2.3.4　试验程序……268
16.2.3.4.1　搭接电阻……268
16.2.3.4.2　接地系统噪声电流……269
16.2.3.4.3　差模噪声电压……269
16.2.3.4.4　勘测表格……270
16.2.4　改造指南……275
16.2.5　现有设施的扩建……276
16.2.6　现有设施接地向高频的扩展……276
16.3　维护……276
16.3.1　概述……276
16.3.2　维护周期和记录……277
16.3.3　维护程序……277
16.3.3.1　概述……277
16.3.3.2　设施大地电极分系统的维护程序……277
16.3.3.2.1　技术资料引用……277
16.3.3.2.2　相关的维护程序……278
16.3.3.2.3　适用的测量程序……278
16.3.3.2.4　试验设备……278
16.3.3.2.5　试验器材……278

16.3.3.2.6 程序……278
16.3.3.3 设施雷电防护分系统维护程序……279
16.3.3.3.1 技术资料引用……279
16.3.3.3.2 相关的维护程序……279
16.3.3.3.3 适用的试验程序……279
16.3.3.3.4 试验设备……279
16.3.3.3.5 程序……279
16.3.3.4 设施搭接维护程序……279
16.3.3.4.1 技术资料引用……279
16.3.3.4.2 相关的维护程序……279
16.3.3.4.3 适用的试验程序……279
16.3.3.4.4 所需要的试验设备……279
16.3.3.4.5 程序……279
16.3.3.5 设施安全接地(故障保护)分系统维护程序……280
16.3.3.5.1 技术资料引用……280
16.3.3.5.2 相关的维护程序……280
16.3.3.5.3 适用的试验程序……280
16.3.3.5.4 所需要的试验设备……280
16.3.3.5.5 程序……280
16.3.3.6 设施信号参考(信号接地)分系统维护程序……280
16.3.3.6.1 技术资料引用……280
16.3.3.6.2 相关的维护程序……280
16.3.3.6.3 适用的试验程序……280
16.3.3.6.4 所需要的试验设备……280
16.3.3.6.5 所需要的器材……281
16.3.3.6.6 程序……281
16.3.3.7 设施屏蔽维护程序……281
16.3.3.7.1 技术资料引用……281
16.3.3.7.2 相关的维护程序……281
16.3.3.7.3 适用的试验程序……281
16.3.3.7.4 所需要的试验设备……281
16.3.3.7.5 所需要的器材……281
16.3.3.7.6 程序……281
16.3.4 设施维护报告……281
16.3.5 性能评定要点……285
16.3.5.1 目的……285
16.3.5.2 引用文件……285
16.3.5.3 接地、搭接和屏蔽的评定……285
16.4 现有保密信息处理设备(红/黑设备)的接地考虑……287
16.4.1 概述……287
16.4.2 现有设施……287
16.4.3 保护接地……287
16.4.4 信号参考分系统……288

16.4.5　信号滤波器接地……290
16.4.6　接地注意事项……290
17　设备设计准则……290
17.1　概述……290
17.2　接地程序……290
17.2.1　信号接地……290
17.2.1.1　概述……290
17.2.1.2　低频设备……290
17.2.1.2.1　信号接地网络的配置……290
17.2.1.2.2　信号接地接线端……291
17.2.1.2.3　颜色标识……291
17.2.1.2.4　机柜汇流母线……291
17.2.1.2.5　隔离……292
17.2.1.2.6　信号互连线……292
17.2.1.2.7　屏蔽层的接地(仅适用于黑色设备)……294
17.2.1.3　高频设备……295
17.2.1.3.1　概述……295
17.2.1.3.2　信号互连线……295
17.2.1.3.3　电缆连接器……295
17.2.1.4　兼有低频和高频电路的设备……296
17.2.2　故障保护……296
17.2.3　机柜接地……297
17.3　搭接实施……297
17.4　屏蔽设计指南……300
17.4.1　概述……300
17.4.2　元件选择……300
17.4.3　布局和结构……300
17.4.4　设备壳体……301
17.4.4.1　概述……301
17.4.4.2　缝隙……301
17.4.4.3　贯通孔和孔洞……302
17.5　共模噪声抑制和仪表接地……304
17.5.1　共模噪声抑制……304
17.5.2　仪表接地……304
17.5.2.1　概述……304
17.5.2.2　模拟系统……304
17.5.2.2.1　概述……304
17.5.2.2.2　接地式传感器……305
17.5.2.2.3　不接地的传感器……306
17.5.2.2.4　放大器……306
17.5.2.3　数字数据系统……306
17.6　高空电磁脉冲防护考虑……307
17.7　设备验收和检查程序……307

17.7.1 概述……307
17.7.2 低频设备……307
17.7.3 高频设备……309
17.7.4 混合设备……310
17.7.5 已安装的设备……310
17.7.6 故障保护系统……310
17.7.7 搭接……310
17.7.8 屏蔽……310
17.7.9 仪表系统……310
17.7.10 电磁脉冲设计……310
17.7.11 其他检查……311
17.7.12 验收表格……311
附录 A （资料性附录） 世界雷暴日和全国主要城市平均雷暴日数信息……313
附录 B （资料性附录） 射频搭接阻抗测量方法……321
附录 C （资料性附录） 搭接条尺寸的设计……323
附录 D （资料性附录） 电导率、体积电阻率、表面电阻率及表面阻抗的概念……325
附录 E （资料性附录） 公制螺栓最小力矩要求及计算方法……327
参考文献……332

图

图 1 由不等的大地电极电阻和不等的杂散电流所引起的电位差……7
图 2 由杂散地电流在两个建筑物之间所引起的电位差……7
图 3 土壤电阻率随湿度、温度和含盐量变化的典型曲线……10
图 4 土壤电阻率单电极测量法……11
图 5 土壤电阻率四电极测量法……12
图 6 接地棒的长度对电阻的影响……15
图 7 接地棒的直径对电阻的影响……15
图 8 垂直大地电极周围的土壤壳体电阻……15
图 9 埋设的水平导体对地电阻……18
图 10 埋设的圆形平板对地电阻……18
图 11 并联接地棒……19
图 12 接地棒方阵实际电阻与 N 根接地棒并联的理想电阻的比率(系数 K)……20
图 13 大地电极分系统的瞬态阻抗与辐射状导线数量的关系……22
图 14 在非均一土壤中电流的分布……22
图 15 电位降法测量大地电极电阻……24
图 16 电极间隔对电压测量的影响……24
图 17 电位降法中电阻随着电位测量棒位置变化的关系……26
图 18 延伸型电极分系统的对地电阻曲线……28
图 19 适用于大型电极分系统的对地电阻曲线……28
图 20 相对于图 18 的交叉曲线族……28
图 21 两电极法对地电阻测量配置示意图……28
图 22 测量大地电极电阻的三点法……29
图 23 电流流入单根孤立接地棒所产生的地面电位……32

图 24　沿格栅地面的电位变化……33
图 25　电解质处理对接地电阻的影响……36
图 26　土壤接地电阻随季节的变化……36
图 27　土壤处理的挖沟法……37
图 28　接地棒化学处理的另一种方法……37
图 29　陆地松散结构的相对深度……39
图 30　含有永冻土地面层的典型断面……40
图 31　图解显示底层结构的近似变化……40
图 32　在电极装配过程中回填盐－土壤混合物……42
图 33　两种土壤在各种湿度和含盐量时的电阻率测量结果……42
图 34　在融化活性层中水平电极的配置……42
图 35　打入冰冻的肥沃泥沙中的电极接地电阻曲线……42
图 36　用饱和泥沙包围的电极接地电阻曲线……43
图 37　用水－饱和盐－土壤回填料包围的 3 号电极接地电阻曲线……43
图 38　用水－饱和盐－土壤回填料包围的 4 号电极接地电阻曲线……43
图 39　三个电极放置在用炮眼装药法形成的孔眼内并填满盐水溶液后的接地电阻曲线……43
图 40　雷雨云中的电荷分布……44
图 41　世界年平均雷暴日……46
图 42　全国年平均雷暴日分布图……47
图 43　矩形结构物的吸引面积……48
图 44　结构物的有效高度……48
图 45　由垂直杆塔和水平架空电线所提供的保护区……49
图 46　某些常用的保护角……49
图 47　一次对地闪电时间内发生的电流放电及其过程示意图……49
图 48　雷电能量与邻近电路的感性耦合……52
图 49　单匝环路中由雷电电流所感应的归一化电压……52
图 50　雷电能量的容性耦合……53
图 51　雷电能量通过互联装置的耦合……54
图 52　雷电感应电压在地面形成的电压梯度……54
图 53　故障保护接地……56
图 54　单相交流电源的接地连接……57
图 55　三相交流电源系统的接地连接……57
图 56　三相“之”字形接地变换器的接地法之一……58
图 57　常用金属的表面电阻和趋肤深度……60
图 58　孤立圆导线的电阻比……62
图 59　确定铜导线趋肤效应修正系数的计算图表……62
图 60　低频自感量与导线长度的关系……62
图 61　直圆导体的高频自感量……62
图 62　矩形导体的电阻比……65
图 63　几种尺寸铜管直流电阻与长度的关系……65
图 64　铜管的交流电阻与频率的关系……65
图 65　非磁性管状导体的电阻比……66
图 66　铜管的电感与频率的关系……66

图 67　悬浮信号接地……67
图 68　单点信号接地(低频)……68
图 69　采用独立接线排的单点接地母线系统(低频)……68
图 70　采用公共母线的单点接地母线系统……68
图 71　采用单点接地减小设备接地系统中地电流的影响……69
图 72　多点接地的配置……69
图 73　在多点接地中结构钢架的应用……69
图 74　推荐的低频设备信号耦合方法……71
图 75　接地网络用作信号回流通路(通常不推荐)……71
图 76　理想的能量传输回路……73
图 77　接地系统中有噪声源的能量传输回路……73
图 78　非理想的能量传输回路等效电路……73
图 79　信号源－负载组的实际组合……73
图 80　由共阻抗引起电路间的耦合……74
图 81　外界噪声经传导耦合进入互连电缆……74
图 82　载流导体周围的磁场……75
图 83　感性耦合示意图……75
图 84　容性耦合示意图……77
图 85　图 84 所示网络的等效电路……78
图 86　容性耦合的电压传递特性曲线……78
图 87　辐射偶极子附近的电场分布图……79
图 88　传导耦合共模噪声示意图……80
图 89　在不平衡系统中的共模噪声……82
图 90　平衡系统中的共模噪声……82
图 91　扁平线的截面图及其屏蔽效果……83
图 92　不良搭接对电源线滤波器性能的影响……85
图 93　流过直接搭接处的电流……86
图 94　搭接件之间的接触状态……87
图 95　搭接电阻随紧固力矩变化的曲线……88
图 96　典型的放热焊接头……89
图 97　采用放热焊工艺完成的典型搭接结构……89
图 98　螺栓力矩的计算图表……91
图 99　由铆钉所建立的搭接通路……91
图 100　不正常的铆接缝隙……91
图 101　导线和搭接条的感抗……94
图 102　扁平搭接条的相对电抗与长宽比的关系曲线……95
图 103　简单导体的阻抗随频率变化的曲线……95
图 104　搭接条的等效电路……95
图 105　搭接系统的真正等效电路……95
图 106　24cm 长的搭接条搭接效能的测量值……96
图 107　6cm 长的搭接条搭接效能的测量值……96
图 108　腐蚀过程的原理图……98
图 109　不同尺寸的阳极－阴极连接方式……102

图 110　不同金属间搭接点的防护技术……102
图 111　电磁波通过狭缝……105
图 112　屏蔽的传输线模型……105
图 113　1mm 厚屏蔽体的吸收损耗……108
图 114　空气波阻抗随场源距离变化的曲线……108
图 115　铁、铜、铝对低阻抗场源的反射损耗……109
图 116　低阻抗场源反射损耗的通用曲线……109
图 117　对平面波的反射损耗($r>2\lambda$)……110
图 118　对平面波反射损耗的通用曲线……110
图 119　高阻抗场反射损耗的通用曲线……110
图 120　铁、铜、铝对高阻抗场的反射损耗……110
图 121　铜在磁场中的多次反射修正项 B……112
图 122　吸收损耗和 $\Gamma=1$ 的多次反射修正项 B……112
图 123　高磁导率材料屏蔽效能的测量值……116
图 124　高磁导率材料 AMPB－65 的屏蔽效能测量值与测量线圈间距的关系……116
图 125　实测的两层高磁导率金属薄板的屏蔽效能……117
图 126　铜屏蔽网对低阻抗场屏蔽效能的测量值和计算值……121
图 127　AMPB－65 材料的穿孔薄金属板屏蔽效能与孔洞尺寸的关系……123
图 128　AMPB－65 材料的穿孔金属板屏蔽效能与孔洞间距的关系……123
图 129　缝隙辐射(泄漏)……124
图 130　铝表面防护层对屏蔽效能的影响……124
图 131　螺钉间距对屏蔽效能的影响……125
图 132　叠合接缝屏蔽效能与螺钉间距的关系……125
图 133　叠合接缝屏蔽效能与重叠尺寸的关系……125
图 134　射频衬垫的典型安装方法……126
图 135　编织金属丝网的放大图……127
图 136　导电玻璃对高阻抗波的屏蔽效能……130
图 137　导电玻璃对平面波的屏蔽效能……130
图 138　导电玻璃光学透射率与表面电阻率的关系……131
图 139　几种建筑材料的屏蔽效能……132
图 140　4.5m 高的单层钢筋建筑中心区域感应电压的衰减值……132
图 141　表面转移阻抗……133
图 142　各种类型射频电缆的屏蔽衰减与频率的关系……134
图 143　屏蔽壳体内的屏蔽连接器……136
图 144　射频屏蔽连接器……136
图 145　弹性指形簧片改进连接器的屏蔽衰减……136
图 146　采用梳形簧片使门实现搭接……138
图 147　用共轴环测量屏蔽效能……140
图 148　用共面环测量屏蔽效能……140
图 149　高空核爆炸的电磁脉冲……146
图 150　高空电磁脉冲的图解说明……147
图 151　HEMP 早期电场波形图……147
图 152　地面爆炸的康普顿电子及净电流密度 $J_{\mathrm{net}}^{\mathrm{c}}$ ……147

图 153　指数脉冲在无限长架空线上感应的终端短路电流……148
图 154　归一化电流波形与深度参数 τ_d 的关系(指数脉冲)……149
图 155　垂直极化波在垂直结构件底部感应的短路电流……149
图 156　屏蔽室隔离电磁场……150
图 157　电磁场由小孔穿入……150
图 158　载有外部干扰的导体在屏蔽壁上的接地……151
图 159　孔口的电磁场防护……152
图 160　防止波导管电流进入设施内部……154
图 161　波导管馈通安装……154
图 162　波导管用带开槽套筒的波纹管安装……155
图 163　波导管用编织袋套夹持……155
图 164　利用填料管安装波导管……155
图 165　窄带高功率电磁环境信号的归一化电场时域波形及其频谱……156
图 166　宽带高功率电磁环境信号的归一化电场时域波形及其频谱……157
图 167　电子设备 HPM 加固方案……158
图 168　HPM 加固流程……158
图 169　典型前门通路加固……159
图 170　土壤电阻率的测量……162
图 171　小场地电阻率的测量……162
图 172　矩形设施大地电极分系统的最小配置……164
图 173　确定单根接地棒接地电阻的计算图……164
图 174　并联接地棒的相对电阻……165
图 175　多根接地棒与单根接地棒电阻的比率……165
图 176　不规则形设施的电极配置……166
图 177　毗邻结构物的电极位置……166
图 178　相邻结构物的电极配置……166
图 179　雷达装置的典型接地系统……167
图 180　接地棒或大地电极分系统装配详图……167
图 181　混凝土地井……168
图 182　典型的地井装配……168
图 183　大地电极分系统的连接(俯视图)……168
图 184　雷电防护接地方法……169
图 185　一般屋顶上接闪杆的位置……170
图 186　在缓坡屋顶上接闪杆的位置……170
图 187　平顶结构物上接闪杆的位置……171
图 188　确定需要附加接闪杆的图解法……171
图 189　确定凸出天窗保护的简便目视方法……171
图 190　确定接闪杆所提供的平屋顶表面保护区域的图示……172
图 191　接闪杆覆盖准则……175
图 192　推荐的雷电综合防护系统的常用结构……175
图 193　由两个垂直杆塔提供的防护区域……177
图 194　架空接地线雷电防护系统……177
图 195　波导入口板详图……178

图 196　椭圆波导的接地主视图……178
图 197　椭圆波导的接地左视图……179
图 198　椭圆波导接地搭接条详图……179
图 199　椭圆波导接地条剪切详图……179
图 200　电缆入口安装示例……180
图 201　接地条详图……180
图 202　电缆的接地步骤……181
图 203　地下电缆的雷电防护……185
图 204　带中线供电系统次级交流浪涌保护器的安装(从单个电源至单个建筑物)……186
图 205　不带中线供电系统的次级交流浪涌保护器的安装……187
图 206　串联有非线性电阻的火花隙浪涌保护器典型工作曲线……191
图 207　典型的 MOV 和 SAS 工作曲线示意图……195
图 208　设施和设备级瞬态抑制器的典型安装……198
图 209　设备电源线浪涌和瞬态防护典型配置图(带有中线)……203
图 210　设备电源线浪涌和瞬态防护典型配置图(不带中线)……204
图 211　防止设备经陆上线路导入瞬态的典型线路……206
图 212　同轴线典型的瞬态抑制装置(DC～3MHz)……208
图 213　屏蔽双线瞬态抑制(DC～3MHz)……208
图 214　天馈系统射频同轴线瞬态抑制(高于 3MHz)……209
图 215　典型的设备故障保护分系统……212
图 216　判定存在不适当中线接地连接的方法……218
图 217　多层建筑物的典型等电位接地面……219
图 218　典型建筑物的地面图……220
图 219　典型多层建筑物图……220
图 220　带接地格栅的设施接地系统的各种构件……222
图 221　新建的典型等电位接地面(用于高频或混合频率设施的安装)……223
图 222　在水泥地板中的等电位接地平面接地连接件……223
图 223　典型的接地连接器……223
图 224　电缆连接至接地汇流条示例……223
图 225　刚性格栅高架地板系统详图……225
图 226　刚性格栅与柱架螺栓连接示例……225
图 227　刚性格栅与柱架的夹持连接……225
图 228　格栅与柱架间不可接受的搭接示例……225
图 229　镶嵌式格栅地板结构示例……226
图 230　仅有柱架的地板结构示例……227
图 231　典型的设备机柜接地详图……227
图 232　低频信号接地网络示意图……228
图 233　典型的低频信号网络配置……228
图 234　主接地板和支路接地板……229
图 235　高频/低频信号设施的混合参考系统……231
图 236　典型的红/黑信号参考分系统(高电平信号)……232
图 237　典型的红色信号屏蔽接地母线布线系统……232
图 238　典型的中间配线架(配线架中的屏蔽接地母线)……232

图 239　典型的中间配线架(数据集中机架)……233
图 240　设施电源和交流地线布线图……233
图 241　螺栓连接的组装顺序……235
图 242　电缆桥架的搭接……237
图 243　设备外壳与电缆桥架的搭接……237
图 244　软电缆及导管的搭接图……238
图 245　硬导管的搭接……238
图 246　搭接条与扁平表面的搭接……238
图 247　扁平裸露表面的螺栓搭接……238
图 248　支架的安装(铆接或熔焊)……239
图 249　搭接条用于结构件互连……239
图 250　结构件的直接搭接……239
图 251　大地电极引线与结构柱的搭接……239
图 252　在典型建筑物外墙内侧 1.9m 处测得的电磁屏蔽效能……240
图 253　在典型建筑物外墙内侧 13.7m 处测得的电磁屏蔽效能……240
图 254　格栅屏蔽效能与导线直径、导线间距及波长的关系……241
图 255　屏蔽吸收损耗……244
图 256　磁场反射损耗……244
图 257　电场反射损耗……244
图 258　平面波反射损耗……244
图 259　永久搭接缝的形成图……245
图 260　良好的拐角缝设计……245
图 261　不同材料用于屏蔽通风孔洞时的压降……245
图 262　典型的外部贯通集中布置……247
图 263　刚性电缆、导管及管子的贯通入口板……248
图 264　棒长对接地电阻的影响……250
图 265　三相五线 Y 形配电系统的接地……250
图 266　单相三线制电源系统的接地……251
图 267　直流 28V 二线制电源的接地……251
图 268　并置掩蔽体间隔大于 8m 时的接地分系统……252
图 269　栅栏接地方法……256
图 270　发射机房扩建图……262
图 271　通信中心/接收机房扩建图……262
图 272　典型设施中的大地电阻测量……264
图 273　电阻测量工作单……264
图 274　完成的电阻测量工作单示例……265
图 275　确定中线接地有无不正确连接的方法……267
图 276　电子设施中搭接电阻和杂散电流的典型测量位置……267
图 277　直流搭接电阻测试简图……269
图 278　杂散电流的测量配置图……269
图 279　接地系统差模噪声电压的测试配置……270
图 280　等电位接地平面与多点接地的例子……277
图 281　主要差异报告表格……278

图 282　典型的分区接地配置(单点接地网络)……287
图 283　典型的信号线屏蔽层接地母线及其单点接地配线系统……289
图 284　典型的设施接地系统(单点接地网络)……289
图 285　密码设备接地系统(单点接地网络)……289
图 286　低频设备的接地……291
图 287　机架或机柜中低频信号接地母线的安装……292
图 288　用平衡线防止形成地环路……293
图 289　不平衡电缆对单点接地的影响……293
图 290　设备两根不平衡互连电缆都在源端随意接地的影响……294
图 291　低频屏蔽长电缆上屏蔽层的分段接地方法……294
图 292　电缆总屏蔽层与连接器的接地处理……295
图 293　电缆总屏蔽层在贯通壁上的接地处理……295
图 294　在高频设备之间建立连续的屏蔽……296
图 295　兼有低频和高频电路的设备接地方法……296
图 296　典型设备机柜的接地详图……297
图 297　搭接条允许和不允许使用的方法……298
图 298　组件与设备底板的搭接……299
图 299　设备与安装表面的搭接……299
图 300　设备法兰与底座或机架的典型搭接方法……299
图 301　采用导钉安装的设备在机柜上的搭接方法……299
图 302　机箱内有效搭接的推荐方法……299
图 303　铰链的跨接搭接方法……300
图 304　连接器与安装表面的搭接……300
图 305　用射频衬垫构成永久接缝……302
图 306　设备门和面板铰链侧衬垫的安装……302
图 307　正确和不正确的屏蔽贯通孔示例……303
图 308　截止波导用于控制轴的屏蔽贯通口……303
图 309　在大孔洞上安装屏蔽网的方法……303
图 310　屏蔽面板仪表的安装方法……304
图 311　单端放大器的接地方法……305
图 312　差分放大器的接地方法……305
图 313　桥式传感器的接地方法……305
图 314　隔离式差分放大器与平衡桥式传感器配套使用……305
图 315　推荐的悬浮传感器接地方法……306
图 316　单个设备上的信号接地接线端子绝缘电阻的测量……308
图 317　齐套设备上信号接地接线端子绝缘电阻的测量……309
图 318　连接器搭接电阻的测量……309

表

表 1　设施接地系统的目的、要求和设计要素……4
表 2　土壤的近似电阻率……9
表 3　土壤的电阻率范围……9
表 4　垂直电极的电阻分布……16

表 5　简单孤立电极及其对地电阻……17
表 6　电阻测量准确度与电极 C_2 和 C_1 间隔的关系……27
表 7　顶端与地面齐平的垂直接地棒的跨步电压……31
表 8　降低跨步电压伤害的方法……33
表 9　水分含量对土壤电阻率的影响……39
表 10　温度对土壤电阻率的影响……39
表 11　雷电参数的数值范围……50
表 12　退火铜导线的特性……59
表 13　导体材料的参数……60
表 14　电缆在 50Hz 时的阻抗特性……63
表 15　电缆在直流和 1MHz 时的阻抗特性……64
表 16　直径 1.8mm 与直径 8mm 导线的阻抗之比……64
表 17　导线的每米扭绞数最小值……83
表 18　金属之间搭接的直流电阻……87
表 19　选用搭接方法的等级……92
表 20　15cm 长的矩形搭接条的计算电感……93
表 21　1.5mm 厚的搭接条的计算电感……94
表 22　部分导线的计算电感……94
表 23　标准电化序……99
表 24　普通金属和合金在海水中的腐蚀电位序……99
表 25　在一般条件下使用时允许和不允许的金属及其镀层间的搭接(配)关系……100
表 26　在恶劣条件下使用时允许和不允许的金属及其镀层间的搭接(配)关系……101
表 27　在海上条件下使用时允许和不允许的金属及其镀层间的搭接(配)关系……101
表 28　屏蔽材料(1mm 厚)在 150kHz 时的吸收损耗……106
表 29　1mm 厚金属板的吸收损耗……107
表 30　计算磁场反射损耗的系数……108
表 31　金属板两个表面反射损耗的计算值……111
表 32　多次反射修正项 B 所用到的系数 m、Γ 计算式……111
表 33　单层金属板的多次反射修正项 B……112
表 34　屏蔽效能的计算值……113
表 35　实心薄板材料的实测屏蔽效能……115
表 36　屏蔽效能计算公式汇总……116
表 37　磁性材料的特性……117
表 38　铜薄膜对平面波场的屏蔽效能计算值……118
表 39　非实心屏蔽材料对低阻抗场和平面波场的屏蔽效能……121
表 40　非实心屏蔽材料对高阻抗场的屏蔽效能……122
表 41　22 目，0.38mm 铜屏蔽网屏蔽效能测量值与计算值之比较……123
表 42　导电衬垫材料的特性……126
表 43　根据机械适用性选择射频衬垫类型的指南……127
表 44　钢结构六角形蜂窝状通风板的屏蔽效能(孔径为 0.32cm，孔长为 1.27cm)……129
表 45　电缆屏蔽层的比较……133
表 46　射频连接器应用概要……135
表 47　屏蔽室的性能举例……136

表 48　各类 ESD 的发生条件与特点……144
表 49　由散射产生的屏蔽作用……149
表 50　高功率电磁环境依据带比的分类……156
表 51　窄带 HPM 电磁环境……157
表 52　宽带 HPM 电磁环境……157
表 53　典型大地电极的相对优缺点……163
表 54　高度不超过 23m 的结构物上屋顶导体和引下线的最低要求……173
表 55　高度超过 23m 的结构物上屋顶导体和引下线的最低要求……173
表 56　铜线的重量、断裂强度和直流电阻……174
表 57　瞬态发生的频次……182
表 58　直击雷电流参数……182
表 59　直接雷击引起的峰值电流……183
表 60　交流供电引入线路上的瞬态浪涌幅值及其百分率……184
表 61　各类浪涌保护器的综合特性……187
表 62　强雷区的瞬态发生率……188
表 63　少雷区的瞬态发生率……188
表 64　与碳化硅块串联的火花隙浪涌保护器的典型最大钳位电压……191
表 65　气体放电管的典型性能参数……192
表 66　MOV 的典型特性……193
表 67　高能量 MOV 的典型特性……194
表 68　5 个 MOV 并联连接的试验结果……194
表 69　某承受功率为 400W 的系列瞬态电压抑制器参数……195
表 70　强雷区 10 年内在外露线路中预计要发生的瞬态次数……197
表 71　预计 10 年期间由次级交流浪涌抑制器施加到设备上的线对地瞬态浪涌……201
表 72　预计 10 年期间由次级交流浪涌抑制器施加到设备上的线对线瞬态浪涌(仅不带中线设施)…201
表 73　预计 10 年期间在外露的陆地线路上发生的瞬态浪涌……201
表 74　接大地电极的导体规格……215
表 75　设备接地导线最低要求……217
表 76　设备接地电缆的要求……220
表 77　英制螺栓搭接的最小力矩要求……226
表 78　不同接地系统的搭接要求……234
表 79　普通金属的相容组合……235
表 80　搭接头防护的要求……236
表 81　搭接零件的表面防护涂覆层……236
表 82　铝或铜搭接条与金属结构物的连接……237
表 83　加强钢筋的屏蔽效能修正系数……240
表 84　常用金属的相对电导率和相对磁导率……243
表 85　典型培训要求……253
表 86　典型蜂窝屏蔽窗的频率特性……303

前　言

本指导性技术文件代替 GJB/Z 25－1991《电子设备和设施的接地、搭接和屏蔽设计指南》。

与 GJB/Z 25－1991 相比，主要有下列变化：

a) 增加了图和表的目录。

b) “雷电保护”改为“雷电防护”，“电磁脉冲保护”改为“电磁脉冲防护”。

c) 修改了“接闪器”、“共模抑制”等术语的定义，补充了杂散电流、电流脉冲、核电磁脉冲、高空电磁脉冲、雷电电磁脉冲等术语。

d) 增加了“系统内的电磁噪声”条款。

e) 修改了“接地与搭接、屏蔽的相互影响”条款。

f) 修改了“提高电极周围土壤电导率的方法”条款，增加了有关常用降阻剂的内容。

g) 修改了“雷击的可能性”条款，增加了世界雷暴日的内容，更新了我国的雷暴日信息。

h) 删除了 8.2.3 中表格“某些电缆的直流参数”。

i) 增加了导线扭绞数的最小推荐值。

j) 增加了扁平线的截面图及其屏蔽效果。

k) 修改了有关搭接电抗的内容。

l) 删除了 11.3.5.1 中图“薄铜箔的理论衰减值”和“薄铁板的理论衰减值”。

m) 增加了射频衬垫选择指南。

n) 射频连接器改为常用的英制连接器。

o) 修改了电击的电平，引用 GB/T 13870.1《电流对人和家畜的效应　第 1 部分：通用部分》；修改了射频辐射危害的暴露限值和测量方法，暴露限值引用 GJB 5313《电磁辐射暴露限值和测量方法》；删除了激光的危害；删除了射线的辐射。

p) 增加了 HEMP 早期电场时域波形。

q) 修改了高空电磁脉冲的防护，引用 GJB 3622《通信和指挥自动化地面设施对高空核电磁脉冲的防护要求》。

r) 增加了 HPM 加固技术，主要为 HPM 的基本概念、HPM 加固策略和 HPM 加固技术。

s) 增加了“各类浪涌保护器的综合特性”。

t) 根据相关标准和厂家的产品资料，将“反向平衡电压”改为“最大持续工作电压”。根据国内典型产品的性能更新了气体放电管、金属氧化物压敏电阻器和瞬态抑制器的性能参数。

u) 由于目前已有适用频率超过 1GHz 的信号线用瞬态抑制器件，修改了射频同轴线(高于 3MHz)的瞬态保护内容。

v) 修改了“设备接地导线规格最低要求”，增加了设备电路中自动过流装置的标称或设定电流在 2000A 以上的数据。

w) 修改了“螺栓搭接的最小力矩要求”，仅保留英制螺栓的最小力矩要求。增加了公制螺栓的最小力矩要求。

x) 增加了“不同接地系统的搭接要求”。

y) 删除了 15.8.4 中图“铝箔屏蔽室的屏蔽效能”和“铜箔屏蔽室的屏蔽效能”。

z) 搭接电阻的测量仪器修改为微欧计。

aa) 目前示波器已具备存储测量结果的能力，接地系统噪声电流、差模噪声电压、信号参考分系统的维护所用测量设备中删除示波器摄影机、示波器摄影机用胶卷。

bb） 增加了 5 个资料性附录。附录 A 提供了世界雷暴日和全国主要城市平均雷暴日数信息；附录 B 提供了射频搭接阻抗测量方法；附录 C 提供了搭接条尺寸设计；附录 D 提供了电导率、体积电阻率、表面电阻率及表面阻抗的概念；附录 E 提供了公制螺栓最小力矩要求及计算方法。

本指导性技术文件附录 A、附录 B、附录 C、附录 D 和附录 E 是资料性附录。

本指导性技术文件由军委装备发展部综合计划局提出。

本指导性技术文件起草单位：东南大学、工业和信息化部电子第四研究院、中国人民解放军第 92728 部队、中国航空综合技术研究所。

本指导性技术文件主要起草人：周忠元、胡景森、周　香、景莘慧、汤仕平、王伟科、蒋全兴。

GJB/Z 25 于 1991 年首次发布。

电子设备和设施的接地、搭接和屏蔽设计指南

1 范围

本指导性技术文件为电子设备和设施的接地、搭接和屏蔽提供基础理论与实施方法，为设备和设施的设计、制造、安装、维护和改造等提供基本指导。

本指导性技术文件适用于地面电子设备和设施，其他电子设备和设施也可参考使用。

2 引用文件

下列文件中的有关条款通过引用而成为本指导性技术文件的条款。凡注日期或版次的引用文件，其后的任何修改单(不包括勘误的内容)或修订版本都不适用于本指导性技术文件，但提倡使用本指导性技术文件的各方探讨使用其最新版本的可能性。凡未注日期或版次的引用文件，其最新版本适用于本指导性技术文件。

GB/T 12190 电磁屏蔽室屏蔽效能的测量方法

GB/T 13870.1 电流对人和家畜的效应 第1部分：通用部分

GB 14050 系统接地的形式及安全技术要求

GB 50169 电气装置安装工程接地装置施工及验收规范

GB 50343－2012 建筑物电子信息系统防雷技术规范

GJB 72 电磁环境效应术语

GJB 151B－2013 军用设备和分系统电磁发射和敏感度要求与测量

GJB 3622 通信和指挥自动化地面设施对高空核电磁脉冲的防护要求

GJB 5313 电磁辐射暴露限值和测量方法

GJB/Z 150.1－2007 军用电子设备安全设计指南 第1部分：电击防护

3 术语和定义

GJB 72 确立的以及下列术语和定义适用于本指导性技术文件。

3.1 接闪器 air terminal

直接拦截和引导雷击的金属物体和金属结构。

注：接闪器包括：接闪杆、接闪带(线)、接闪网，以及用作接闪的金属屋面和金属构件等。

3.2 平衡线路 balance line

利用两根导线来代替一根导体和地线(公共导体)的线路或电路，这两根导线相对于地线是对称的，沿线各对应点上对地的电位和线路电流幅值相等，相位相反。

3.3 建筑物 building

固定式或可移动式结构物。

注：建筑物可以住人和安装设备，能对内部所安装设备的可靠运行提供所需的某种程度的环境保护。

3.4 共模抑制 common-mode rejection

抑制共模信号的能力。

3.5 传导耦合 conducted coupling

通过导体进行的电磁能量转移。

3.6 引下线 down conductor

将接闪器或架空接地导体连接至大地电极分系统的导体。

3.7 大地电极分系统 **earth electrode subsystem**

为实现与大地的低阻接触而装设的由电气互连棒、互连板、互连网或互连格栅所构成的网络。

3.8 电气支撑结构件 **electrical supporting structure**

靠近带电导体的非带电导电结构件。

注：电气支撑结构件包括：管道和有关附件、接线盒和开关盒、电缆桥架、电气或电子设备机柜、配线架和电缆金属护套等。

3.9 电磁耦合 **electromagnetic coupling**

场地、导线、电路、设备或系统之间的电磁能量转移。

3.10 电磁脉冲 **electromagnetic pulse; EMP**

强瞬态电磁场。

注：电磁脉冲通常指发生在空中或地面的核爆炸所产生的强瞬态电磁场，但也可以指其他源产生的强瞬态电磁场，如：雷电、静电等。

3.11 设施 **facility**

自身具有服务设备、接地网络和电气支撑结构件的建筑物或其他结构。

注：设施可以是固定的或可移动式的。在合同条款中要求提供的连线或电缆是设施的一部分，由生产方提供和装配的所有电气和电子设备也是设施的一部分。

3.12 设施接地系统 **facility ground system**

由导体和导电单元构成，提供多条到大地电流通路的电气互连系统。

注：设施接地系统包括大地电极分系统，雷电防护接地分系统，信号参考分系统，故障保护分系统，以及建筑物构件、设备的机架、机柜、金属导管、接线盒、电缆管道、风管、水管、其他通常不载流的金属单元等。

3.13 故障 **fault**

在带电导体与地之间形成的一种非人为的短路或部分短路(通常是电源线路的短路)。

3.14 故障保护分系统 **fault protection subsystem**

为确保人员免受电击伤害和受保护设备不因电气设备发生故障而损坏所设置的接地分系统。

3.15 自由空间耦合 **free-space coupling**

通过自由空间以电场、磁场或电磁场形式进行的电磁能量转移。

3.16 高空电磁脉冲 **high-altitude electromagnetic pulse; HEMP**

地球大气外层核爆炸产生的脉冲电磁场。核爆炸高度一般高于 30km。

注：高空电磁脉冲的主要特点是场强高、频率范围宽，作用范围大，主要威胁电子系统的工作。

3.17 高频接地网络 **higher frequency grounding network**

预定用作频率超过 300kHz(某些场合可低至 30kHz)的信号电流和电压公共参考的金属互连网络。

注：上升和下降时间小于 1μs 的脉冲和数字信号被称为高频信号。

3.18 高功率微波 **high power microwave; HPM**

频率在 100MHz～300GHz、脉冲峰值功率在 100MW 以上(一般大于 1GW)或平均功率大于 1MW 的强电磁辐射。

3.19 接口 **interface**

在两台或两台以上的设备或系统之间的任何电气连接，包括用于电源传输、信号传输或控制等的连接。

3.20 等雷暴 **isokeraunic**

雷暴活动的频率或强度相等。

3.21 雷电电磁脉冲 **lightning electromagnetic pulse; LEMP**

与雷电放电相关的强瞬态电磁场。

注：雷电电磁脉冲可耦合至电力、电子系统产生破坏性的电流浪涌和电压浪涌。

3.22 雷电防护接地分系统 **lightning protection ground subsystem**

引导雷电放电大电流离开敏感元件的非破坏性的接地分系统。

注：雷电防护接地分系统的作用是把大电流所产生的电位梯度限制在安全电平以下。

3.23 低频接地网络 **lower frequency grounding network**

预定用作频率从直流至 30kHz(某些场合可高至 300kHz)的信号、控制或电源电压和电流公共参考的专用单点网络。

注：上升和下降时间大于 1μs 的脉冲和数字信号被认为是低频信号。

3.24 中线 **neutral line**

单相交流电路中在电源端接地的导线，或者是三相 Y 型配电系统中处于低电位的第四根导线。

注：中线为交流电电流提供返回通路。中线需在供电断路装置的电源侧接地。

3.25 核电磁脉冲 **nuclear electromagnetic pulse; NEMP**

核爆炸释放的 γ 射线、X 射线等与周围介质相互作用产生的脉冲电磁场。

3.26 射频密封 **RF-tight**

采用射频衬垫填充孔缝，提供高性能电磁屏蔽的技术措施。

3.27 信号参考分系统 **signal reference subsystem**

为电子设备提供公共的参考点或参考面，以使各设备之间的电位差尽可能小的分系统。

注：信号参考分系统可以是多点、单点接地系统或等电位接地平面。

3.28 杂散电流 **stray current**

通过设计或规定回路以外的路径流动的电流。

3.29 结构物 **structure**

固定式或可移动式的建筑物、掩蔽体、塔体或杆塔。

注：结构物的用途是安装电气、电子设备，或保障电子设备，或者其本身就是电子系统整体的一部分。

3.30 雷暴日 **thunder storm day**

能听到雷声的当地日历日。

4 概述

4.1 接地系统的作用

一个良好的接地系统应经过正确的设计、材料选择和完善的装配技术才能实现，并且应进行定期检查和维修，以确保接地网络能耐受预期的使用环境，使接地系统在设施的全寿命期内保持有效。接地系统起着下列三方面的作用：

a) 人身安全保护。人身安全需依靠供电系统、保护器件、设备和其他导电物体之间的低阻接地和搭接来保障。这种低阻接地和搭接，使得由故障或雷电所产生的电流不致引起可造成电击危害的电压。

b) 设备和设施的保护。设备和设施的保护也要依靠供电系统、保护器件、设备和其他导电物体之间的低阻接地和搭接来获得。低阻搭接可防止故障电流和雷电电流在设施内引起危险电压。同时，过流保护器件的正确动作也往往依赖于故障电流的低阻抗通路。

c) 降低电气噪声。通信电路电气噪声的降低，依赖于整个通信设施各信号接地点到大地的接地阻抗的减小。这将使设备之间的电位差最小，从而防止将骚扰源产生的噪声引至通信电路中。

4.2 设施接地系统的组成

4.2.1 概述

所有电信和电子设施必然与大地有关，这是由于容性耦合、偶然接触或有意连接所形成的。在各个接地分系统组成设施总接地系统的情况下，应从系统整体的角度考虑接地问题。设施接地系统在大地与各种电源、通信设备和其他设备之间形成低阻抗通路，该通路在整个设施中扩展为一个有效的接地参考。

设施接地系统由大地电极分系统、雷电防护分系统、故障保护分系统和信号参考分系统组成。

表1综合了雷电防护分系统、故障保护分系统、信号参考分系统以及大地电极分系统的目的、要求和设计要素[1]。

表1　设施接地系统的目的、要求和设计要素

分系统	目的	要求	设计要素
雷电防护	把雷电的能量消耗在大地中	与大地电极分系统多路连接，强幅值功率传递能力、低瞬态阻抗，以减少瞬态电位的幅值	应把雷电防护分系统做得足够大，以便在一次雷电脉冲(在最坏的情况下)时，消耗的能量不致于产生危险电压或损坏保护分系统本身
故障保护	提供故障电流的回路，以使设备的断路器、熔断器等工作	在故障电流的回路通路中提供低电阻，使设备外壳的电压接近大地电位	电阻应足够低，以便发生故障时设施的过流器件能动作
信号参考	降低信号电路的噪声，提供静电电荷的泄放通路，建立电位参考点	确立信号电压的参考电位，提供静电电荷泄放通路	故障电流和雷电防护系统的电流不应流入信号参考网络；与大地的连接不应降低信号质量
大地电极	提供至大地的低阻抗通路	提供雷电防护、故障保护和信号参考分系统对大地的连接	沿被保护的建筑物或杆塔周围安装

4.2.2　大地电极分系统

大地电极分系统由大地电极棒、电极板、电极网、电极格栅以及它们之间的互连导体网络组成。通常把这种网络延伸至建筑物内的主接地点，以便与该设施中的设备接地分系统相连接。接地电阻取决于土壤、大地中的电极及其装配方式等因素。大地电极分系统包括下列装置：

a)　用裸导线互连起来的埋入或打入大地的接地棒系统，它们通常围绕建筑物形成一个环。

b)　金属管道系统，例如，水管、气管和燃料管等，这些管道互相连接处应确保不绝缘。金属管道系统仅能作为辅助的大地电极分系统使用。它们的接地电阻应有数据说明或者经试验确定。

c)　由埋设的水平导线所构成的接地面。

4.2.3　雷电防护分系统

雷电防护分系统提供一条不受破坏的通路，以便使设施结构遭受的直接雷击能量或感应的雷电能量泄入大地。为了有效地保护建筑物，应对杆塔或容易受到雷电损坏的类似结构物提供一种具有适当机械强度和导电性能，并且能经受雷击的接闪器。接闪器要拦截闪电，以防止放电电流穿透结构物上非导电的外部覆盖层，并防止放电电流流过设施造成损伤或破坏。此外，还应提供一条从接闪器到大地的低阻抗通路。可以采取下列措施之一来满足这些要求：

a)　将接闪器、屋脊导体可靠地互连在一起构成整体系统，提供一条通至大地的最短的实际可行通路；

b)　独立安装的遮蔽系统，例如一个金属杆塔或导线(它们起着接闪器的作用)，经引下线连接至大地电极分系统。

4.2.4　故障保护分系统

故障保护分系统不仅要确保人员免受电击的伤害，还应确保被保护设备不会因电气设备发生故障而受到损伤或破坏。故障保护分系统包括预先准备的工程接地导体。为了获得足够容量的电气通路，在整个配电系统中都要配备这种工程接地导体，以确保保护器件(熔断器和断路器)可快速动作。直到连接至大地电极分系统之前，故障保护分系统的导体应与信号参考接地系统在物理上分开。设备的故障保护分系统要为通风系统的管道、信号线的导管以及设备中所有其他的金属结构件(包括设备的机柜和机架)提供接地。

4.2.5　信号参考分系统

信号参考分系统在设施内建立电压参考点以减少噪声电流，保持相对的低电平，使信号的支路或电

路中不致产生不可接受的噪声电压。在一台设备内，信号的接地点可能是一根接地母线或导体，这种母线或导体在该设备内对某些信号电路起着参考点的作用。在设备之间，信号地是一个由若干根互连导体组成的网络。不管信号参考网络是在一台设备内供各电路汇集用，还是在一个设施内供几个设备共用，在大多数情况下信号参考网络为多点地(等电位接地平面)，在某些情况下也可以是单点地，具体根据设备的结构、设施的性质以及所涉及的频率而定。

4.3 接地与配电系统

4.3.1 概述

为了安全起见，需将配电系统和电子设备接地。因此，设施的接地系统直接受配电系统的装配、维护的影响。配电系统的有意接地，减小了电路上过电压的幅值和持续时间，进而减少了人员伤害、绝缘失效或着火以及系统、设备或建筑物损坏的可能性。

4.3.2 交流电源

接地系统中的交流电流主要是由于不正确的电源布线或配电系统装配中的差错引起的。为保证人员安全和减少设备损坏，固定和移动设施的三相 Y 形线采用五线制，即：三根相线、一根中线和一根故障保护地线。单相电源采用三线制，即：一根相线、一根中线和一根故障保护地线。应采用 GB 14050 中的 TN－S 接地系统，见 7.3。电源端有一点直接接地，中线和故障保护地线在供电电源处(变压器、发电机)接地，整个系统的中线和故障保护地线是分开的，电子设备和设施的外露可导电部分通过故障保护地线与电源端的接地点相连。故障保护地线除了在电源侧接地外，也接到设施的大地电极分系统，其目的是降低漏电设备金属外壳的对地电压，减少中线发生断路故障时的触电危险，减少中线、相线接错时的触电危险，缩短短路持续时间，并改善雷电防护性能。对于由独立电源供电的单一建筑物，交流中线应在引入第一个供电断路装置或电源进线配电板的电源侧接到大地电极分系统。为了降低噪声或交流声，由同一个电源供电的多个设施的中线应仅在供电电源处接地，不能搭接到电源进线处的大地电极分系统。中线不应在电源进线配电板的负载侧或建筑物内的任何一点接地。

从交流电源的干线引入至最终交流负载的所有环节，交流电源线(交流相线、中线和设备故障保护地线)的次序都应正确，不能把它们的次序弄错，亦不能把中线和故障保护地线互连起来。中线多点接地，或者交流中线和故障保护地线的次序接反，往往会导致接地导体中出现不同大小的交流电流。当设施中配置交流电源线滤波器时，由于有交流电流流过滤波器中的滤波电容器，会在接地系统中引起交流电流。电源线滤波器对故障保护分系统的漏电流应符合相应的标准规范要求。

4.3.3 直流电源

直流电源设备是主要电气噪声源之一，这种噪声可通过设施的正确配置，把直流电源设备与通信设备进行结构和电气的隔离以及对输出进行滤波来减小。某些采用交直流变换电源的设备，亦会在直流供电引线和交流输入电源引线上引起噪声，可在设备入口处或其内部配置滤波器降低该噪声。直流参考地线的位置、数量和端接方式，对于保护直流系统、降低电磁噪声和减小接地系统的直流电流，都有重要影响。

4.4 系统内的电磁噪声

电磁干扰信号与时变电磁场有关，并且与电流随时间的变化率直接相关。变化的电流产生周期性的信号、脉冲信号或随时间随机变化的信号。潜在的干扰信号只有从源传播到敏感设备才会造成干扰。噪声的传播途径有多种(如：辐射、传导、感性耦合和容性耦合)，噪声可通过一条或多条途径传播。

4.5 接地与搭接、屏蔽的相互影响

接地的目的是为电路、设备和设施与等电位参考点之间建立有效的低阻抗通路，是获得某种所希望的保护或实现电气噪声抑制所采取的技术之一，搭接是金属物体之间获得低阻抗互连的工艺方法。接地的作用应通过搭接把各种导体、电极、设备和其他金属物体连接在一起才能实现。接地系统的机械和电气性能不仅与互连的搭接点的性能有关，还受各个被连接组件性能的影响。另一方面，搭接点的性能应在很长的时期内保持不变，防止因搭接点的腐蚀或机械松动而导致搭接性能逐渐衰退。

对敏感电路进行屏蔽是保障系统和设备获得可靠工作能力的基本措施。电场屏蔽通过泄放感应电荷抑制电场的影响；磁场屏蔽通过形成足够的反向电流抵消干扰磁场的影响；电磁屏蔽通过屏蔽体的反射损耗、吸收损耗抑制电磁干扰。可采用铅、铝、铜、铁或其他金属的实心板材、金属网、箔片或编织层制成屏蔽壳体。设备或组件屏蔽壳体的屏蔽效能取决于多种因素，例如：干扰信号的频率、屏蔽材料的特性以及屏蔽壳体中不连续性(开口处)的数量和形状以及屏蔽壳体的装配等。如果屏蔽壳体在装配过程中所采用的接地和搭接技术不当，其屏蔽效能可能达不到预期。在设计中如能把接地和屏蔽正确地配合使用，将起到事半功倍的作用。

4.6 安全接地的注意事项

安全接地的注意事项如下：

a) 所有从事通信电子设备、辅助系统和设施研制及施工的人员，都应严格遵守设备和设施的装配、操作、维修规程及注意事项。所有工作人员都应时刻警惕可能出现的高压伤害和危险，并采取一切可能的措施来减少或避免事故。

b) 应将各安全注意事项以明确的条文形式公布，并将危险或警告标志醒目地张贴在显眼的地方，以防止工作人员偶然触及高压源，如电力线、天线、电源或其他可能引起电击或短路事故的非绝缘件。对于存在辐射危害、酸类和化学剂危险以及其他高压电源危险的各种场所，也应配备警告标志。安装在设备内的电源保护装置应严格按照预定用途使用。

c) 在设备装配期间，要采用警告牌通报正在进行检测的各个电路或环节所存在的高压危险。警告牌应包含适当的内容，以便使所有工作人员对存在的危险有所警惕，并了解使用设备的具体限制。应按照现场安全工作人员、设备制造商或其他负责部门的要求，为正在装配的设备挂警告牌。

d) 操作带有高压装置的设备时，装配的工作人员应把高压装置接地，并且确保高压电路已被脱开或切断，不能完全依赖原有的互锁开关防止电击。

5 大地电极分系统

5.1 目的

5.1.1 概述

接大地是指与大地进行电气连接的过程。大地电极分系统是指在设施各单元与大地之间建立电气连接的接地棒、导线、管道或其他金属结构联接构成的网络。该系统应达到下列目的：

a) 为雷击提供一条到大地的放电通路，以保护建筑物及建筑物内的人员和设备；

b) 在工作人员能接近的区域内，将跨步电压限制在可能造成伤亡的电平以下，即使在雷击放电或电源故障的条件下亦应如此；

c) 减少各独立设施信号参考分系统之间电位差，抑制信号电路和控制电路的噪声。

5.1.2 雷电防护

一次闪电意味着典型峰值电流为20kA或更大的一次或多次电流冲击。在冲击电流入地位置的附近，沿大地的表面可能存在危险的电压。有大量的资料指出，这种电位梯度可超过足以引起致命伤害的电压值。因此，以适当的方式构成大地电极分系统，从而降低电位梯度是极其重要的。接地电阻越小，峰值电压越低，因此，大地表面电压梯度的危险程度就越低。但是，即使对于低电阻的大地电极系统，也应合理配置电流通路，使工作人员可能到达的区域内的地面电位梯度降至最小。

5.1.3 故障保护

如果变压器出现故障(例如，相线至地的故障)或者设施的相线和接地系统之间出现故障，大地电极分系统就成为故障电流回流通路的一部分。虽然低电阻有助于消除故障，但它不能确保人身安全，因为大电流故障会在大地表面形成危险的电位梯度。足够的保护往往需要使用接地栅网或格栅，使电流在足够大的区域内分散流动，把电位梯度降低到安全电平以下。应将配电变压器上的中线导体连接至大地电

极分系统，以获得低的回路电阻。

5.1.4　降低噪声

大地电极分系统对于减小信号电路内杂散电流引起的电磁噪声具有重要作用。假设系统内两个装置需要采用如图 1 所示的大地电极分系统。如果杂散电流(例如，可能是由于交流系统接地不当、介质漏电、高阻故障、错误的直流电流回流等引起的杂散电流)在不同的位置流入大地，在设施内的两个接地网络之间会存在电位差。

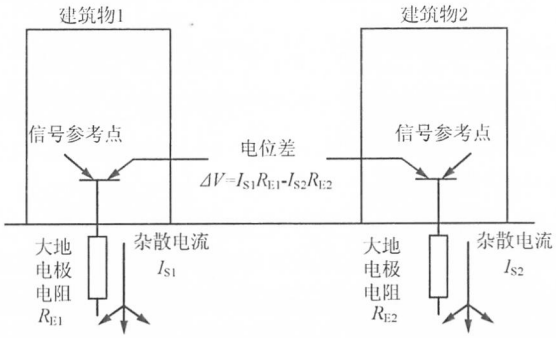


图 1　由不等的大地电极电阻和不等的杂散电流所引起的电位差

来自于装置外部噪声源的电流同样可以引起噪声电压。例如，高压配电站是最常见的大功率电流源。噪声地电流可由绝缘子的漏电、或通过电缆绝缘层及电源线路与大地间的杂散电容而产生。该电流流过大地，就会以图 2 所示的方式在两个建筑物间的大地通路上产生电位差。

任何互连导线或互连电缆之间一旦出现电位差，就会在电缆的屏蔽层和其他各导体上引起电流。正如第 9 章所述，场地之间的电流可在互连的大地电极分系统内感应出共模噪声电压。

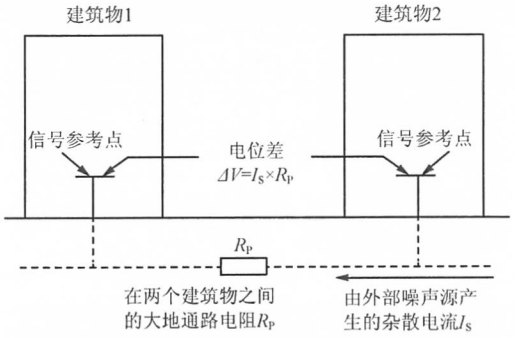


图 2　由杂散地电流在两个建筑物之间所引起的电位差

5.2　电阻要求

5.2.1　概述

表征大地电极有效性的基本参数是电极的输入连接处对大地的电阻值。由于电流流入大地的分布情况与大地自身的特性有关，所以电极对大地的电阻是从连接点到大地上一个无穷远处之间的电阻。大地电极分系统理论上可在大地和连接点之间获得零值电阻。然而，任何实际可实现的结构，都对大地呈现出一定的电阻。大地电极分系统设计的经济性包含获得低电阻所必需的费用与满足系统最低要求之间的折衷。为此，应把打入大地的电极与设施(其中包括备用应急电源设备)的所有地下金属物体进行互连，包括把引入设施的地下金属管道连接至大地电极分系统。

5.2.2　对地电阻

5.2.2.1　典型金属管和金属件的对地电阻

地下金属水管对大地所呈现的电阻，其典型值小于 3 Ω。其他与土壤接触的金属件，例如，建筑物的金属框架、地下气体管道系统、井架、其他管道系统、埋设的罐筒，以及埋在地下底层或地基的混凝

土钢筋，通常所呈现的电阻远小于25Ω。

5.2.2.2　故障保护分系统的对地电阻要求

对于故障保护分系统，对地电阻应不大于 25 Ω。对于由一根接地棒、一根管子或一块接地板组成的单一电极，如果其对地电阻大于25Ω，应另外增加电极使其电阻小于等于25Ω[1]。

5.2.2.3　雷电防护的对地电阻要求

对于雷电防护，很难确定一个保证人身安全必需的接地电阻值。在发生直击雷时，流过的电流可能从几百安培到三十万安培。该电流即使流过1Ω的电阻，理论上也可以产生危险的电位，仅通过降低设施的对地电阻不可能绝对避免产生危险电位。除了降低电极的对地电阻，还应采用其他方法防止建筑物内的工作人员和设备遭受直击雷。实践表明，10Ω的接地电阻，可对建筑物、变压器、输电线、杆塔和其他外露的结构物提供相当可靠的雷电防护。

5.2.3　电子设备和设施的对地电阻要求

综合权衡电源故障保护、雷电防护和电磁脉冲防护与成本之间的关系，大地电极分系统的对地电阻要求为不大于 10 Ω。在设计的大地电极分系统中包含一个接地圈，围绕着需要保护的设施。凡由于土壤的高电阻率、岩层结构或其他地层结构的原因而高于10 Ω的地方，应考虑采用降低电阻的方法，具体方法见5.9。

5.3　土壤电阻率

5.3.1　概述

埋设电极分系统的土壤和岩石的电阻率，是限制对地低电阻接触的基本因素。一个大地电极分系统的对地电阻，通常可以用式(1)计算。

$$R=\frac{\rho_m \cdot l}{S}=\frac{V}{I} \quad \cdots\cdots (1)$$

式中：

R ——大地电极分系统的对地电阻，Ω；

ρ_m ——材料的电阻率，Ω·cm 或Ω·m；

l ——大地中电流流动的通路长度，cm 或 m；

S ——导电通路的横截面积，cm^2 或 m^2；

V ——相对于无限远处所测得的电极电压，V；

I ——流入电极的电流，A。

如果土壤电阻率已知，由较常用的电极配置所提供的连接电阻很容易确定。土壤是由固体、液体和气体三相组成的。电流流过大地主要是以离子运动的形式流动，土壤水分中盐的浓度和种类对离子导电性有很大影响。盐溶解后生成的离子在电位的影响下发生运动，离子运动的结果使介质导电。

电阻率可由一立方体均质材料的电阻所确定。当跨接在相对的两个面进行测量时，一立方体均质材料的电阻正比于电阻率，而反比于该立方体的边长，见式(2)。

$$R=\frac{\rho_m \cdot l}{S}=\frac{\rho_m \cdot l}{l^2}=\frac{\rho_m}{l} \quad \cdots\cdots (2)$$

式中：

R ——电阻，Ω；

ρ_m ——材料的电阻率，Ω·cm 或Ω·m；

l ——立方体的边长，cm 或 m；

S ——立方体一个面的面积，cm^2 或 m^2。

5.3.2　典型的电阻率范围

由于土壤类型的不同，电阻率差异很大。因此，设计者需要确定拟设置大地电极的场地周围的土壤

类型。根据表 2 可以很快地估计土壤的电阻率[2]，而表 3 则列出了从各种成分的土壤中所测得的电阻率的数值[3][4][5]。表 2 和表 3 说明对于某一给定类型的土壤，其电阻率数值在 1～2 个数量级的范围内变化。

表 2　土壤的近似电阻率

土壤类型	电阻率	
	Ω·m	Ω·cm
湿的有机土	10	10^3
潮湿土壤	10^2	10^4
干土壤	10^3	10^5
基岩	10^4	10^6

表 3　土壤的电阻率范围

单位为欧姆米

介质	最小	平均	最大
表层土壤、肥土等	1	－	50
粘土	2	－	100
砂砾	50	－	1000
表层石灰石	100	－	10000
石灰石	5	－	4000
页岩	5	－	100
砂岩	20	－	2000
花岗石、玄武岩等	－	10000	－
分解的片麻岩	50	－	500
板石等	10	－	100
淡水湖	－	200	200000
自来水	10	－	50
海水	0.2	1	2
海岸线村庄的平坦干燥沙地	300	500	5000
城市工业区	－	1000	10000
回填土、灰、渣、盐水的废杂物	6	25	70
粘土、页岩、肥粘土、肥土	3	40	200
有不同砂砾比例的上述土壤	10	150	1000
有小量粘土或肥土的砂砾、砂石、花岗岩	500	1000	10000
苏打盐土(黑龙江)[a]	1	－	10
滨海盐土(江苏)[a]	0.5	－	5
内陆盐土(新疆)[a]	0.6	－	6
黑土(黑龙江)[a]	10	－	100
紫色土(四川)[a]	25	－	250
黄棕壤(江苏)[a]	5	－	150

表 3(续)　　单位为欧姆米

介质	最小	平均	最大
红壤(江西)[a]	15	－	200
赤红壤(广东)[a]	30	－	500
砖红壤(广东)[a]	10	－	300
[a] 为 25℃下之数据，由中国科学院南京土壤研究所电化室提供。有关土壤电阻率的详细资料见参考文献[6]。			

5.3.3　环境的影响

除了土壤的类型不同之外，同一类型土壤的电阻率也由于水分含量、盐的浓度和土壤温度的微小变化相差几个数量级。土壤环境条件变化很大时，将引起表 2 和表 3 所列的每种土壤电阻率发生很大的变化。图 3 给出某一土壤在温度、盐分和湿度变化时所观察到的电阻率变化趋势[7]。对其他类型的土壤，可以得出形状类似但数值不同的曲线。

图 3 b)中温度与电阻率曲线的不连续性说明，低于冰点温度时土壤电阻率增长得很明显。可以通过把大地电极系统埋设在冰冻线以下减小这种不希望的温度效应。

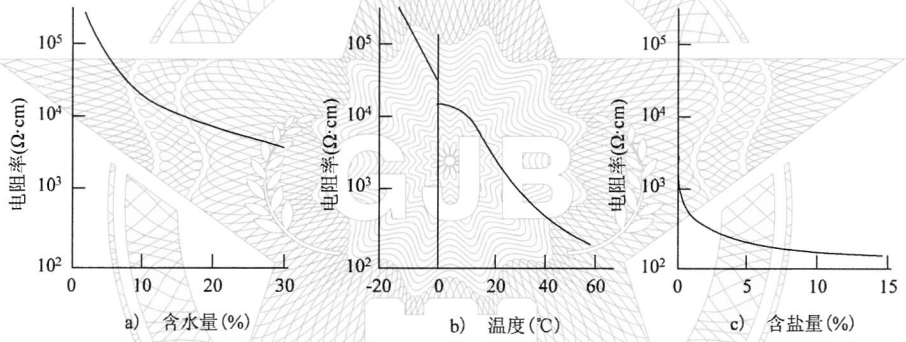


图 3　土壤电阻率随湿度、温度和含盐量变化的典型曲线

5.4　土壤电阻率的测量

5.4.1　概述

对于实际场地，有时难以确定土壤类型。土壤具有相当的不均匀性，一般都不是单一类型，在大部分地方会遇到多种类型土壤的混杂。即使借助于钻孔取样，再利用表 3 估计其电阻率，仍然很可能偏离 2～3 个数量级。再考虑温度、湿度变化和土壤类型的变化，很明显，根据表 3 的估计值并不能满足设计要求的精度。在具体现场，准确地确定土壤电阻率的唯一办法是进行实地测量。

确定土壤电阻率最常用的现场方法是：在给定体积的土壤内注入已知电流，然后测量此电流流过土壤时所产生的电压降，再由此确定土壤电阻率。

5.4.2　测量方法

5.4.2.1　单电极法

为了说明这种方法的原理，首先观察埋设在地下的金属半球，如图 4 所示。在均匀土壤中，所注入的电流从此半球形电极开始沿径向流动。等电位面是以电极为圆心，并以垂直于电流流动的径向方向确立的。不管电极的形状如何，如果从足够远的地方观察，电极可以近似于一个半球形电极。当电流从此半球流过时，其电流密度将随着离开电极距离的增大而减少，这是因为逐渐远离的壳体面积变得越来越大。在大地内距离电极中心 x 处的电流密度见式(3)：

$$i_x = \frac{I}{2\pi x^2} \quad \cdots\cdots (3)$$

式中：

i_x——电流密度，A/m^2；

I——注入电极的电流，A；

$2\pi x^2$——半径为 x 的半球壳体的面积，m^2。

在 x 点上，其电场强度可由欧姆定律获得，见式(4)：

$$e_x = \rho_s i_x = \frac{\rho_s I}{2\pi x^2} \quad \cdots\cdots (4)$$

式中：

e_x——电场强度，V/m；

ρ_s——土壤的电阻率，Ω·m；

i_x——电流密度，A/m^2；

I——注入电极的电流，A；

$2\pi x^2$——半径为 x 的半球壳体的面积，m^2。

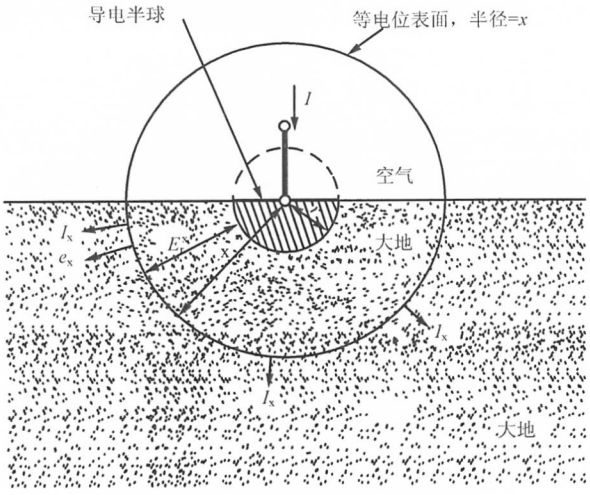


图 4　土壤电阻率单电极测量法

从电极表面至 x 点的电压为 e_x 的线积分，积分下限等于球体半径 r，而上限等于距离 x，见式(5)。

$$V_r^x = \int_r^x e_x dx = \frac{\rho_s I}{2\pi}\int_r^x \frac{dx}{x^2} = \frac{\rho_s I}{2\pi}\left(\frac{1}{r} - \frac{1}{x}\right) \quad \cdots\cdots (5)$$

当 x 变得很大时，V 就趋于式(6)：

$$V = \frac{\rho_s I}{2\pi r} \quad \cdots\cdots (6)$$

电极对大地的电阻是电极和一个很远处的点之间的电阻，按式(7)计算：

$$R = \frac{V}{I} = \frac{\rho_e}{2\pi r} \quad \cdots\cdots (7)$$

式中：

R——电阻，Ω；

V——电极和一个无限远处的点之间的电压降，V；

I——注入电极的电流，A；

ρ_e——大地的电阻率，Ω·m；

r——半球的半径，m。

将式(7)改写为式(8)：

$$\rho_e = 2\pi rR = 2\pi r\frac{V}{I} \quad \cdots\cdots (8)$$

式(8)表明，当已知 r、V 和 I 时，电阻率是可以确定的。

5.4.2.2 四电极法

在四电极法[8]中，把四个电极以相等间隔排成直线，插入土壤中，将一个已知电流通过两侧的电极注入土壤，在内侧两个电极之间测量电压降。

以四个深埋的球体为例，将球体排成直线，相邻球体球心之间的距离为 a，如图 5 所示。利用带绝缘护套的导线将球体引出地面。如果把电流 I_i 注入最左侧的一个球体(1 号球体)，使电流流过大地到达最右侧的球体(4 号球体)。中间的两个球体(2 号和 3 号)之间的电压可以看成由于电流流至无限远，并且电流又从无限远处流回来所形成的。由此产生的两个电位分别按式(9)和式(10)计算[8]：

$$V_1 = \frac{\rho_s I_i}{8\pi a} \quad \cdots\cdots (9)$$

$$V_2 = \frac{\rho_s I_o}{8\pi a} \quad \cdots\cdots (10)$$

式中：

ρ_s——土壤电阻率，Ω·m；

I_i——输入电流，A；

I_o——输出电流，A；

a——4 个等间距、直线排列的电极之间的距离，m。

但因为 $I_i = I_o = I$，所以中间两个球体之间的电压可以按式(11)计算：

$$V = V_1 + V_2 = \frac{\rho_s I}{4\pi a} \quad \cdots\cdots (11)$$

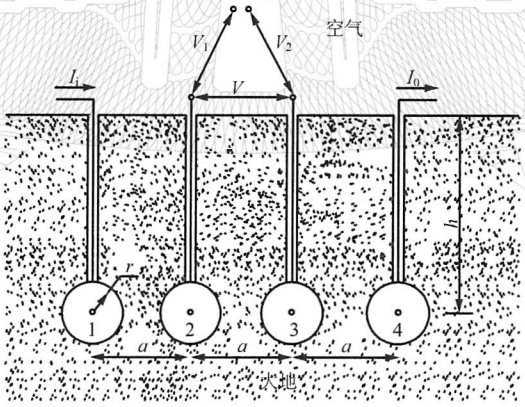


图 5 土壤电阻率四电极测量法

如果电极的深度 h 小于电极间的距离 a，可用内侧两电极之间测得的电压除以外侧一个电极处测得的流入(或流出)电流，得到电极对大地的电阻[8]，如式(12)所示：

$$R = \frac{V}{I} = \frac{\rho_s}{4\pi}\left(\frac{1}{a} + \frac{2}{\sqrt{a^2+4h^2}} - \frac{1}{\sqrt{a^2+h^2}}\right) \quad \cdots\cdots (12)$$

式中：

R ——电阻，Ω；

ρ_s ——土壤的电阻率，Ω·m；

a ——4 个等间距、直线排列的电极之间的距离，m；

h ——电极的埋设深度(由带绝缘护套的导线引至地面)，m。

如果 $h<<a$，式(12)可以简化为式(13)：

$$R=\frac{\rho_s}{2\pi a} \quad \cdots\cdots(13)$$

或式(14)：

$$\rho_s=2\pi aR \quad \cdots\cdots(14)$$

短接地棒的效果近似于埋设的球体，当短接地棒之间的距离远大于埋入深度时尤其如此。

典型的大地电阻测量设备，含有一个手摇发电机，此发电机可以产生一个频率为 40Hz～100Hz 左右的交流信号。不应使用 50Hz 的信号，因为在此频率下，可能会因土壤中存在工频的杂散电流而产生误差。直流通常亦不使用，这是因为直流电流有极化效应。通过调节双平衡电桥内的电阻，该仪器就会直接指示一个与式(14)所对应的 R 值。

5.5 大地电极分系统的类型

5.5.1 概述

大地电极分系统通常可以分成两种类型。首选接地圈，接地圈中每 4.5m 至少有一根 3m 长的接地棒；其次选择辐射状接地系统，当土地是岩石或具有极高的电阻率时才使用该类型。在土壤的电阻率为高到非常高或者经常发生频繁雷击的区域，推荐将这两类接地系统组合使用。也就是说，在建筑物的滴水线以外 0.6m～1.8m 的周围(在最坏的情况下，在建筑物下面格栅周围)设置接地圈，再用辐射状系统或水平导体将它延伸到 38m 以外。无论采用哪种系统，只要把该区域内所有大的金属物体就近接至大地电极分系统，就可以减小对地电阻并大大降低电弧放电的危险。这些大的金属物体包括金属管道、燃油罐、埋入地下的金属格栅和井架。

5.5.2 接地棒

垂直打入地下的接地棒或接地管是最普通的人工电极。在土层厚度超过 3m 的地方，往往使用接地棒或接地管。推荐使用的接地棒直径为 1.2cm、1.6cm、1.9cm 和 2.5cm，长度为 1.5m～12m。在大多数情况下，使用直径为 1.9cm、长度为 3m 的接地棒。要求使用铜包钢，这是因为钢芯具有机械强度，以耐受敲打力，而铜既可提供防腐保护，又能与铜电缆和铜包钢连接电缆相容，避免电偶腐蚀。

5.5.3 埋设的水平导体

在基岩接近地面的地方，使用打入式接地棒是不现实的，在这种情况下可以采用水平金属带、实心电线或编织电缆，并把它们埋设 0.48m～0.86m 深。在采用长金属带的情况下，其感抗会随着长度的增加而增大。为了减小雷电的浪涌电压，希望获得低阻抗。因此，把几条导线、金属带或电缆以设施为中心排列成星状，比使用一条长导体效果更好。

5.5.4 格栅

格栅系统由埋设在地下约 15cm 深的铜电缆组成，并形成一个矩形网络。为使这种格栅在整个设施区域内构成等电位接地平面，通常将其延伸至整个设施。格栅导体的间隔可根据装配要求调整。通常间隔为 0.6m～1.2m。应把这些格栅的各个交叉点焊接在一起。

通常，仅在下列情况下才采用格栅系统：天线场地、变电站用房以及其他可能有大量故障电流流入大地并形成危险跨步电压(见 5.8.1.3.4)的场合，或者土壤条件不适合装配其他接地系统的地区。天线的地网系统应按照制造厂家的要求装配。

5.5.5　板状电极

矩形或圆形板状电极应与土壤至少形成 $0.1m^2$ 的接触面。铁板或钢板的厚度应至少为 6mm，而有色金属板的厚度应至少为 1.5mm。板状电极的埋设深度应保持在地平面以下 1.5m～2.4m。这种板状电极系统的造价很高，一般不推荐采用。

5.5.6　建筑物的金属结构框架

建筑物金属结构框架的对地电阻，可能小于 10Ω，具体取决于建筑物的规模、地基型式及地基下土壤的类型。尤其是建造在钢桩上的建筑物，可呈现出很低的对地连接电阻。为了有效地利用这种低电阻，应把结构框架的所有构件都焊接起来。

5.5.7　水管

传统上已经将地下金属管道用作接地电极。由管道系统所产生的接地电阻往往是十分低的，这是因为它与土壤形成了大面积的接触，尤其是市政水管系统。为了使水管的接地有效，在任何可能的不连续处，都应采用搭接条进行搭接。任何水表设备和分流的管接头都要采用符合接地导体要求的搭接条进行跨接。

通过管道网络进入大地的杂散电流或故障电流，可能会对进行维修或改装水管系统的工作人员造成伤害。例如，由于某些原因，供给一个建筑物的管道与整个系统一旦断开，则连接至该建筑物的管道部分相对于整个系统的其余部分可能会出现危险电压。同时，还可能相对于大地出现危险的电压电平。尤其是，如果管道与建筑物附近土壤的接触电阻恰好又很大，那么在管道的断开处，即使与建筑物有一定的距离，也可能对工作人员构成危险。有些公用水管的干线在进入建筑物的入口处有意插入不导电的连接件，无法用作接地电极。正是由于这些原因，不应单纯依靠水管系统作为设施的大地电极，至少应采用一种其他的接地系统作为补充。

5.5.8　附属的金属物体

在大地电极分系统的附近，可能有许多附属的、埋入地下的金属物体。应将这些物体与电极系统互连，以便在出现雷电或电源故障时降低电位差所造成的危险。这些物体与电极系统的连接，还可降低大地电极分系统的对地电阻。附加的大地电极分系统包括混凝土地基中的钢筋、埋入地下的罐筒和管道。

5.5.9　井架

井架可以提供较低的大地接触电阻。在某些地区，可以利用井架的钢管作为接地电极。当场地内或场地附近有井时，应对井架的对地电阻进行测量。如果此电阻低于10Ω，就可把井架用作接地电极。

5.6　电阻特性

5.6.1　简单孤立电极的电阻

5.6.1.1　打入地下的接地棒

在均一土质的大地中，垂直入地的接地棒，可近似看作一系列埋入地下的球体单元[2]。把这些单元球体的对地电阻值沿接地棒的长度及其镜像积分，可算得垂直接地棒的对地电阻如式(15)所示：

$$R=\frac{\rho_e}{2\pi l}\ln\frac{4l}{d} \quad \cdots\cdots(15)$$

式中：

ρ_e——大地电阻率，Ω·cm；

l——接地棒的长度，cm；

d——接地棒的直径，cm。

在此推导的结果中，误差之一是由于假设各个微分段球体流出的电流相等而产生的。实际上，接近大地表面处每单位长度流入土壤中的电流比接地棒的较下端流入土壤中的电流要大。根据经验，利用式(16)计算一根垂直打入地下的接地棒的对地电阻更准确。由式(15)和式(16)所给出的电阻偏差约为 10%：

$$R_0=\frac{\rho_e}{2\pi l}\ln\frac{3l}{d}=\frac{0.159\rho_e}{l}\ln\frac{3l}{d}=2.303\times\frac{0.159\rho_e}{l}\times\lg\frac{3l}{d}=\frac{0.366\rho_e}{l}\times\lg\frac{3l}{d}\quad\cdots\cdots(16)$$

接地棒接地电阻主要受接地棒的长度影响，直径的变化在式(15)和式(16)中仅反映出微弱的对数关系。图 6 和图 7 给出了实测接地电阻随接地棒长度和直径变化的曲线[4]。很明显，接地棒长度的影响远比直径的影响明显。

接地棒周围的土壤，可以简单地看作是由均匀厚度的土壤壳体组成，如图 8 所示。每个土壤壳体的增量电阻(沿电流流动的方向)由式(17)给出：

$$\frac{\mathrm{d}R}{\mathrm{d}x}=\rho_s\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}x}\left(\frac{l}{S}\right)\quad\cdots\cdots(17)$$

式(17)是式(1)的偏微分形式。其中 ρ_s 为土壤的电阻率，而 dx 是沿电流流动方向的通路的变化。最靠近电极的土壤壳体具有最小的面积，因此它呈现出最大的增量电阻。由此可以得出两个实用的结论：一是应采用与大地有尽可能大接触面积的电极，以获得尽可能低的接地电阻；二是靠近导体的土壤所发生的变化对电极与大地的接触电阻有显著的影响。例如，雷电的放电电流可能会把靠近导体的土壤加热，使土壤干燥或把土壤变为土渣，从而增大电极接地的电阻。加大电极与土壤接触面积的原因之一就是为了减小电极附近土壤中的电流密度，降低土壤的温升。

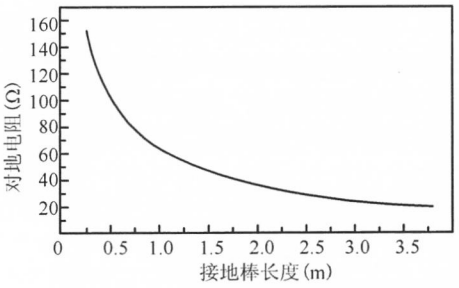


图 6　接地棒的长度对电阻的影响

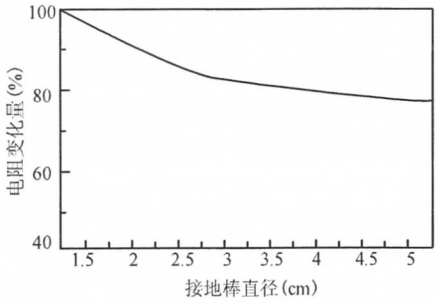


图 7　接地棒的直径对电阻的影响

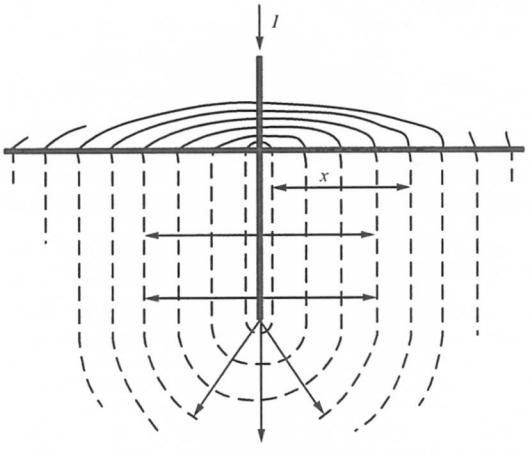


图 8　垂直大地电极周围的土壤壳体电阻

流入接地棒的电流，会通过每个等电位土壤壳体向外流动，因此，距离接地棒为 x 处的土壤壳体表面的电位如式(18)所示[2]：

$$V_x=\frac{0.366\rho_e I}{l}\times\lg\left[\frac{l}{x}+\sqrt{1+\left(\frac{l}{x}\right)^2}\right]\quad\cdots\cdots(18)$$

V_x 与 I 之比等于 R_x，这是接地棒对地电阻的一部分，它发生于点 x 和无限远处之间，按式(19)计算：

$$R_x=\frac{V_x}{I}=\frac{0.366\rho}{l}\lg\left[\frac{l}{x}+\sqrt{1+\left(\frac{l}{x}\right)^2}\right] \quad \cdots\cdots (19)$$

R_x 与 R_0 之比如式(20)所示：

$$\frac{R_x}{R_0}=\frac{\lg\left[\frac{l}{x}+\sqrt{1+\left(\frac{l}{x}\right)^2}\right]}{\lg\frac{3l}{d}} \quad \cdots\cdots (20)$$

其中，l、d、x 的单位相同。

可以根据式(20)确定单个接地棒的作用面积。例如一根 3m 长、直径为 2.5cm 的接地棒，在 $x=l$ 处的电阻比如式(21)所示：

$$\frac{R_l}{R_0}=\frac{\lg(1+\sqrt{2})}{\lg 360}=0.15 \quad \cdots\cdots (21)$$

0.15 的比值说明，对于一根 3m 长的接地棒来说，其总接地电阻的 85%是在接地棒周围 3m 范围内建立的。对于一根 30m 长的接地棒来说，其接地电阻的 89%是在接地棒周围 30m 范围之内获得的。

在等于 2 倍接地棒长度的距离上，即在 $x=2l$ 处的电阻比如式(22)所示：

$$\frac{R_{2l}}{R_0}=\frac{\lg(0.5+\sqrt{1.25})}{\lg 360}=0.08 \quad \cdots\cdots (22)$$

可见，一根 3m 长、直径为 2.5cm 的接地棒，其 92%的接地电阻是在一个半径为 6m 圆筒区内获得的。同样，一根 30m 长、直径为 2.5cm 的接地棒，其 94%的接地电阻在一个半径为 60m 的圆筒内获得。对于典型的垂直电极，其电阻的分布见表 4。

表 4　垂直电极的电阻分布

电极的类型	总电阻的百分数 %	与接地棒的大致距离 m
Φ1.9cm 的管子，打入 0.9m 深	90	1.8
	95	3.6
	98	9.3
	99	18.3
Φ1.9cm 的管子，打入 1.5m 深	90	2.7
	95	5.4
	98	13.8
	99	27.6
Φ3.2cm 的管子，打入 5.7m 深	90	5.4
	95	10.5
	98	26.4
	99	52.8

表 4(续)

电极的类型	总电阻的百分数 %	与接地棒的大致距离 m
Φ6.4cm 的管子，打入 6m 深	90	7.5
	95	20.7
	98	51.9
	99	103.5

5.6.1.2 其他通用的电极

表 5 列出了若干简单孤立的接地电极及其对地电阻的近似计算式。平板和球形电极是沿面积延伸的，而垂直接地棒、水平棒(或线)、十字形和环性接地系统是沿长度延伸的。表 5 中的电极顺序，是依据与大地接触表面积相等的原则修正后排列的，对地电阻最低的电极(最有效的)排在表的前面。例如，放在大地表面的圆形平板比埋设的水平棒电极更有效(具有较低的接地电阻)。上述结论是在假设水平棒的埋设深度小于其长度的 40%，且水平棒和圆形平板与大地的接触面积相同的条件下得出的。

表 5 简单孤立电极及其对地电阻

顺序	类型	排列的条件	对地电阻
R_1	垂直接地棒	－	$R_1=0.366\times\frac{\rho}{l}\times\lg\frac{3l}{d}$
R_2	埋设的球体	$h>16d$, $r_s=\frac{\sqrt{dl}}{2}$	$R_2=0.08\frac{\rho}{r_s}\left(1+\frac{r_s}{2h}\right)$
R_3	埋设的圆形平板	$h>3.2r_p$，$r_p=\sqrt{2}r_s$	$R_3=0.125\frac{\rho}{r_p}\left(1+\frac{r_p}{2.5h+r_p}\right)$
R_4	埋设的半球体	$h>1.1r_s$，$r_s=\sqrt{\frac{2}{3}}r_p$	$R_4=0.16\frac{\rho}{r_s}$
R_5	在土地表面的圆形平板	－	$R_5=0.25\frac{\rho}{r_p}$
R_6	埋设的直棒	$h<0.4l$，$r_p=\sqrt{dl}$	$R_6=0.366\frac{\rho}{l}\left(\lg\frac{l}{d}+\lg\frac{l}{4h}+0.34\right)$
R_7	直角布置的埋设棒	$h>0$	$R_7=0.366\frac{\rho}{l}\left(\lg\frac{l}{d}+\lg\frac{l}{4h}+0.5+0.38\frac{h}{l}\right)$
R_8	埋设的导线环	$h<0.8l$	$R_8=0.366\frac{\rho}{l}\left(\lg\frac{l}{d}+\lg\frac{l}{4h}+0.81\right)$
R_9	十字形布置的埋设棒	$h<0.12l$	$R_9=0.366\frac{\rho}{l}\left(\lg\frac{l}{d}+\lg\frac{l}{4h}+1.26-3.72\frac{h}{l}\right)$
注：r_s——球体的半径；r_p——圆形平板的半径；l——所埋设的接地棒或电线的总长度，cm；d——接地棒或线的直径，cm；h——埋设深度，cm；ρ——电阻率，Ω·cm；排列顺序时假定各个电极与大地的接触面积相等。			

水平导体对地电阻随长度变化的曲线示于图 9，图中给出了两种埋设深度的曲线。注意，当长度增加一倍时，电阻约为原来的一半。图 9 中的曲线假设各导体以直线状态放置。如果各导体卷成圆圈形或弯曲，则其电阻势必增大，因为此时的有效土壤截面积变小。

接地平板的电阻取决于平板的面积。电阻随圆形平板半径变化的曲线示于图 10，图中给出三种埋设深度的曲线，这些曲线是按一块平板埋在电阻率为 10kΩ·cm 的均匀土壤中计算得出的，对于矩形平板情况相同。应认为图 10 所示的曲线给出了电阻与面积的函数关系，而不是预测给定面积平板的接地电阻。

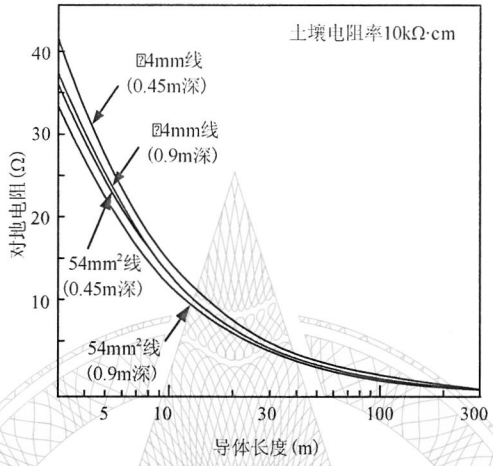


图 9　埋设的水平导体对地电阻

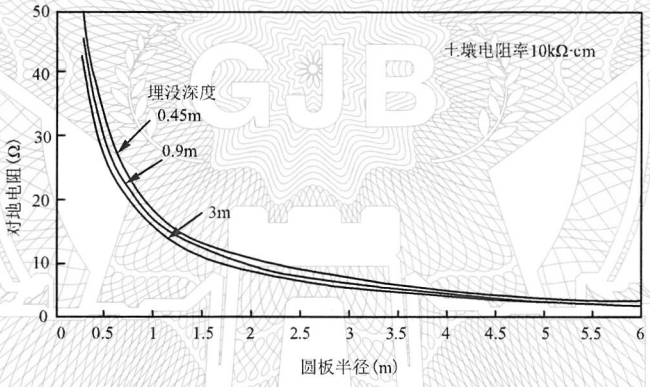


图 10　埋设的圆形平板对地电阻

5.6.2　多根电极的电阻

5.6.2.1　概述

单根电极的对地电阻计算见式(16)，仅在离电极无限远处才能获得。然而，正象 5.6.1.1 所述，单根电极的大部分电阻可以在离电极适当远的一点获得(对于一根垂直接地棒，90%的电阻可在两倍于接地棒长度的范围内获得)。然而，如果两根或两根以上的电极靠得很近，均不能获得其总的有效电阻。电极之间的相互影响使得 N 根电极并联连接所获得的电阻不能成为一根电极电阻的 $1/N$。因此，采用多根密集的垂直电极，若用每欧姆接地电阻的费用来衡量，其效费比并不如间隔适当、但根数较少的接地棒。对于多电极配置，适当增加电极间距，上述互相作用的影响会减至最小。在一组接地棒中，垂直打入的接地棒之间的距离至少应不小于单根接地棒长度的两倍。

5.6.2.2　两根并联的垂直接地棒

多根电极电阻的表达式要比孤立电极的表达式复杂得多。为了说明这种情况，以图 11 所示两根打入大地后顶端与地面齐平的接地棒为例。这两根接地棒在电气上是并联的，但一根接地棒的存在，对另一根接地棒的电阻有影响。

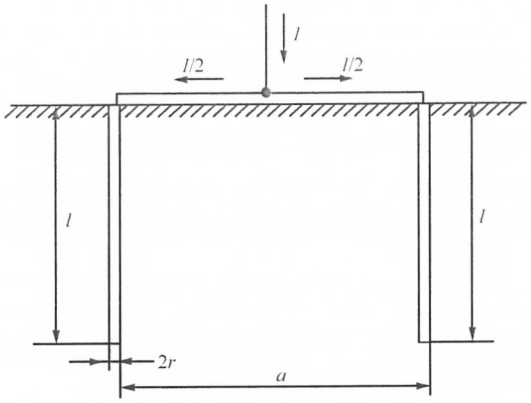


图 11　并联接地棒

两根接地棒的接地电阻按式(23)计算[9]：

$$R=\frac{\rho}{4\pi l}\left[\ln\left(\frac{2l+\sqrt{a^2+4l^2}}{a}\right)+\frac{a}{2l}-\frac{\sqrt{a^2+4l^2}}{2l}+\ln\frac{4l}{r}-1\right] \quad \cdots\cdots (23)$$

式中：

ρ ——大地电阻率，Ω·cm；

l ——接地棒的长度，cm；

a ——接地棒之间的间隔，cm；

r ——每根接地棒的半径，cm。

在 $a>>l$ 时，接地电阻按式(24)计算：

$$R=\frac{\rho}{4\pi l}\left(\ln\frac{4l}{r}-1\right)+\frac{\rho}{4\pi a}\left(1-\frac{l^2}{3a^2}+\frac{2l^4}{5a^4}+\cdots\right) \quad \cdots\cdots (24)$$

在 $a<<l$ 时，接地电阻按式(25)计算：

$$R=\frac{\rho}{4\pi l}\left(\ln\frac{4l}{r}-2+\ln\frac{4l}{a}+\frac{a}{2l}-\frac{a^2}{16l^2}+\frac{a^4}{512l^4}+\cdots\right) \quad \cdots\cdots (25)$$

在 $a=l$ 时，接地电阻按式(26)计算：

$$R=\frac{\rho}{4\pi l}\left(\ln\frac{4l}{r}-0.18\right) \quad \cdots\cdots (26)$$

如果有 N 根长度相等的垂直接地棒(其顶部与地面齐平)沿一条直线等间隔分开，并且利用一根带绝缘套的导体把这些接地棒的顶部连接在一起，则其综合的电阻将比单根孤立接地棒电阻的 $1/N$ 稍大一些。对于 N 根接地棒，棒长为 l，间隔为 a 时，其总电阻 R_N 由式(27)给出：

$$R_N=\frac{1}{N}\frac{\rho}{2\pi l}\left(\ln\frac{4l}{r}-1+\frac{2l}{a}\ln\frac{2N}{\pi}\right) \quad \cdots\cdots (27)$$

5.6.2.3　方阵垂直接地棒

方阵接地棒的电阻由式(28)给出：

$$R_r=\frac{R_0}{N}K \quad \cdots\cdots (28)$$

式中：

R_0——一根接地棒的电阻，Ω；

N——方阵中接地棒的数量；

K——电阻系数。

图 12 给出了 N 根接地棒方阵的 K 值，这 N 根接地棒是等长度、等间距排列的，而其间距最大可达接地棒长度的 10 倍。在方阵中从一根接地棒至其最靠近的接地棒的距离为 a。图 12 中，对应各条曲线的 a 值是按接地棒长度的整数倍给出的。为了说明图 12 的用途，考虑由 25 根接地棒组成的 5×5 方阵，每根接地棒与其最靠近的接地棒之间的间隔为单根接地棒的长度。从 $a=l$ 的曲线可以发现，对于 25 根接地棒的组合，其电阻系数为 2.8。因此，25 根棒的并联电阻是 2.8 乘以单根接地棒电阻的 1/25(1/N)，此单根接地棒的电阻是指接地棒孤立存在时所呈现的对地电阻。

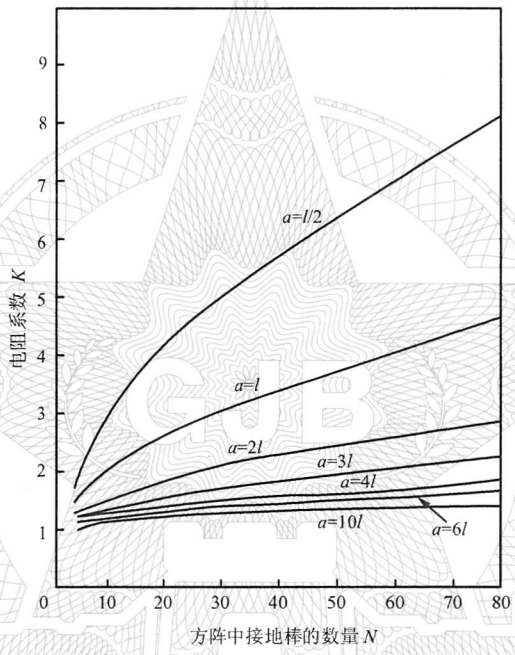


图 12　接地棒方阵实际电阻与 N 根接地棒并联的理想电阻的比率(系数 K)

5.6.2.4　水平的格栅(网络)

电站和变电站的大地电极分系统应设计成既要具有低的对地电阻又要减少地表面的电位梯度(见 5.8.1)，适合这种用途的通用电极被设计成一个格栅或网络。格栅中，将各水平的接地棒或导线在每个交叉处都搭接起来。一个方形或矩形格栅的对地电阻，可以由式(29)计算：

$$R_w = \rho_e\left(\frac{1}{2d_e}+\frac{1}{l_{tot}}\right) \quad \cdots\cdots (29)$$

式中：

ρ_e——大地的电阻率，Ω·cm；

d_e——格栅的有效直径，cm；

l_{tot}——所用导体的总长度，cm。

例如，考虑一个方形格栅，此格栅的尺寸为 30m×30m，其导体的间隔为 3m。这样，就会有 100 个网眼，其导体总长度为 660m。此方阵的面积为 900m^2，有效直径按式(30)计算：

$$d_e = \sqrt{\frac{4S}{\pi}} = 3386\text{cm} \quad \cdots\cdots (30)$$

式中：

S——格栅所覆盖的面积，cm^2。

因此，根据式(29)，其对地电阻由式(31)给出：

$$R_w = \frac{\rho_e}{2\times 3386} + \frac{\rho_e}{66000} = 1.48\times 10^{-4}\rho + 0.15\times 10^{-4}\rho = 1.63\times 10^{-4}\rho\,\Omega \quad \cdots\cdots (31)$$

5.6.2.5 由格栅所连接的垂直接地棒

一组垂直接地棒利用导线格栅互连在一起后的接地电阻按式(32)计算[10]：

$$R_t = \frac{R_w R_r - R_m^2}{R_w + R_r - 2R_m} \quad \cdots\cdots (32)$$

式中：

R_w——由式(29)所给出的格栅的电阻，Ω；

R_r——由图 12 所求出的格栅下面一组接地棒的电阻，Ω；

R_m——考虑到格栅与接地棒之间互相作用的附加电阻，Ω。

R_m 由式(33)或式(34)给出：

$$R_m = \frac{0.73}{l_{tot}}\rho\left(\lg\frac{2l_{tot}}{\sqrt{2r_g h}} - 1\right) \quad \cdots\cdots (33)$$

$$R_m = \frac{0.73}{l_{tot}}\rho\lg\left(\frac{2l_{tot}}{l}\right) \quad \cdots\cdots (34)$$

式中：

R_m——考虑到格栅与接地棒之间互相作用的附加电阻，Ω；

l_{tot}——格栅导体的总长度，cm；

r_g——格栅导线的半径，cm；

h——格栅埋设的深度(假定格栅埋在地下)，cm；

l——接地棒的长度(假定格栅贴近地面)，cm。

5.6.3 电极的瞬态阻抗

以上所给出的电极电阻表达式，是假设电极导体呈现纯阻性。该假设在计算电极的直流电阻时非常准确。但是当电极应耗散雷击的脉冲能量时，则应把电极阻抗看作时间的函数。一个由 305m 长的导体所组成的孤立星形电极受到雷电浪涌电流冲击时，其有效阻抗的起始值，约为直流电阻的 10 倍[11]，这个起始值被称为瞬态阻抗。当能量通过电极系统传播时，通过较多的电极导体可实现与耗散能量的媒质之间的有效接触。很明显，对于给定长度的导体，以星形配置的多根导体比单根导体能更有效地把雷电的能量泄入大地，这种情况表示在图 13 中。图 13 还给出当能量冲击一个电极时(其速度约为 100m/μs)，电极的瞬态阻抗随时间而下降并逐渐接近直流电阻值。

5.6.4 非均一土质(分层的土壤)的影响

5.6.4.1 概述

前面的推导都假设大地为均一土质。有关非均一土质对电阻率的影响，可由图 14 获得定性了解。图 14 给出当大地电极是一个小的半球体时，其等电位面和电流流过分层土壤的情况。从大地电极向外辐射的线表示电流的流向。毫无疑问，如果较深一层的电阻率远大于较上一层，那么，几乎所有的电流都将被限制在较上一层的土壤中。

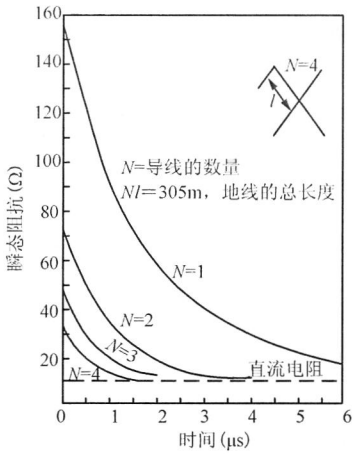


图 13　大地电极分系统的瞬态阻抗与辐射状导线数量的关系

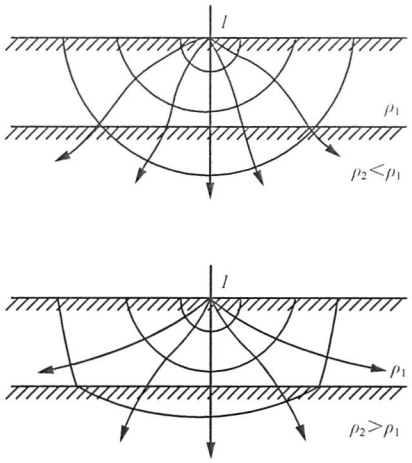


图 14　在非均一土壤中电流的分布

5.6.4.2　半球体电极

一个在分层土壤中的小半球体电极，其对地电阻的近似表达式如式(35)所示[2]：

$$R=\frac{\rho_1}{2\pi r}+0.366\times\frac{\rho_1}{h}\times\lg\frac{\rho_1+\rho_2}{2\rho_1} \quad \cdots\cdots (35)$$

式中：

R ——对地电阻，Ω；

ρ_1 ——表层土壤的电阻率，Ω·cm；

r ——半球体的半径($r<h$)，cm；

h ——表层土壤的厚度，cm；

ρ_2 ——下层土壤的电阻率，Ω·cm。

例如当一层低电阻率的表层土壤($\rho=10^3$ Ω·cm)覆盖在花岗岩($\rho=10^6$ Ω·cm)上时，对地电阻由式(36)计算给出：

$$R=\frac{10^3}{6.3r}+\frac{366}{h}\lg(0.5+500)=\frac{160}{r}\left(1+\frac{6.2}{h/r}\right) \quad \cdots\cdots (36)$$

如果 $h<6.2r$，下层花岗岩电阻率对其对地电阻有很大影响；如果 $h>>6.2r$，则其对地电阻就近似于具有表层土壤电阻率的均一土质的大地电阻。

5.6.4.3　垂直接地棒

当一根垂直的接地棒从高电阻率的表层(上层)打入到电阻率较低的下层时，可以将均一土质的对地电阻表达式作一些修改，修改的方法是代入该接地棒的缩小了的“有效长度”。令 l' 为有效长度，如式(37)所示[2]：

$$l'=l-h\left(1-\frac{\rho_2}{\rho_1}\right) \quad \cdots\cdots (37)$$

式中：

l ——接地棒的物理长度，m；

h ——表层土壤的深度，m；

ρ_2 ——下层土壤的电阻率，Ω·m；

ρ_1 ——表层土壤的电阻率，Ω·m。

注意，如果 $\rho_1 >> \rho_2$，接地棒的有效长度降至 $(l-h)$。当下层土壤的电阻率比表层土壤的电阻率高（$\rho_2 >> \rho_1$）时，通过一根长度等于表层土壤厚度的细长的垂直接地棒泄放的电流，将势必保持在表层土壤中。表层电流的“平均路径”，就是一半放电电流进入深层土壤的径向距离，如式(38)所示[2]：

$$x = \frac{\rho_2}{\rho_1} h \quad \cdots\cdots (38)$$

如果大地电极分系统的尺寸比表层土壤的厚度大得多，则表层土壤的作用就不显著了。这时，可以把土壤当作具有下层土壤电阻率 ρ_2 的均一土质来计算其接地电阻。

5.6.4.4 格栅

对于水平延伸的电极系统的对地电阻，一种有实用价值的估算式由式(29)得出。

如果表层土壤电阻率为 ρ_1，而下层的电阻率为 ρ_2，则在土壤表层的格栅接地电阻由式(39)给出[2]：

$$R = \frac{\rho_2}{2d_e} + \frac{\rho_1}{l_{tot}} \quad \cdots\cdots (39)$$

当 $\rho_2 >> \rho_1$ $(2d_e/l_{tot})$ 时，接地电阻按式(40)计算：

$$R = \frac{\rho_2}{2d_e} \quad \cdots\cdots (40)$$

当 $\rho_1 >> \rho_2$ $(l_{tot}/2d_e)$ 时，接地电阻按式(41)计算：

$$R = \frac{\rho_1}{l_{tot}} \quad \cdots\cdots (41)$$

例如，若格栅的直径 d_e 等于 500m，表层土壤的电阻率 ρ_1 等于 10000Ω·m，下层土壤的电阻率 ρ_2 等于 200Ω·m，格栅的导体长度 l_{tot} 等于 4000m，接地电阻 R 为 2.7Ω。若把格栅埋设在电阻率较低的下层土壤中时，其对地电阻约降低至 0.4Ω。相反，如果 ρ_2 =10000Ω·m，而 ρ_1 =200Ω·m，R 约为 10Ω。这时的接地电阻与格栅埋设的深度无关。

5.7 电极对地电阻的测量

5.7.1 概述

对于某一给定电极系统所计算的电阻，是以各种假设和近似法为基础的。计算所得的电阻可能与实际电阻值有差异。因为在建造或扩建中，可能出现不可预料的、无法控制的情况。所以，应对所装配的电极进行测量，以便确定是否符合设计准则。在一个现有的设施中，电极系统的电阻应予以测量，以便确定是否需要维修或加固。对于电极的对地电阻测量，常用的方法有电位降法、两电极法和三点法。

5.7.2 电位降法

5.7.2.1 试验布置

为了测量受试电极的接地电阻，需要在距离受试电极一定距离处设置辅助电流电极，以便使由受试电极向大地注入的电流形成回路，并且需要在电位降为零的区域设置辅助电位电极，用于测量与受试电极之间的电压。该测量方法共用到受试电极、辅助电流电极和辅助电位电极三个电极，因此又称为“三电极法”。本方法试验布置如图 15 a)所示，在受试电极 P_1 和电流电极 C_2 之间通过一个已知的电流，然后测量受试电极和电位电极 P_2 之间的电位降(电位电极布置在受试电极和辅助电流电极之间)；电位降与已知电流的比值就给出了电阻的度量。电位电极 P_2 应与受试电极 P_1 采用同种材料，以免引入测量误差。电位电极的接触电阻应不对测量结果产生显著影响。采用移动电位电极 P_2 的方法，选取几个电阻的测量值。电位电极移动的方式是按直线从受试电极所在位置 P_1 的一侧向位于右边的电流电极 C_2 方向移动。然后把所测得的数据绘成如图 15 b)所示的曲线。这种试验方法推荐用于测量单根或多根接地棒构成的电极分系统。

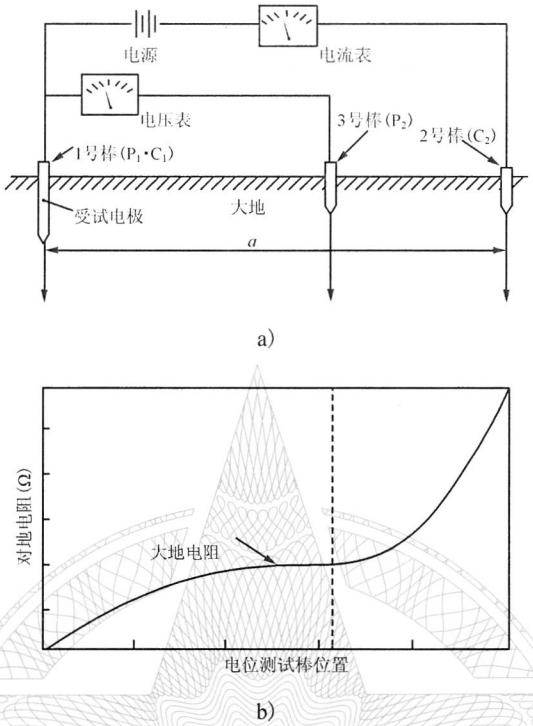


图 15　电位降法测量大地电极电阻

5.7.2.2　测量棒的间隔

电流流入电极周围的土壤时就会沿着该电极产生一些等电位的面(见图 8)。在受试电极 P_1 和电流电极 C_2 的周围都会出现一组等电位面。这些面的作用范围，正比于相应的电极尺寸(见 5.6.1.1)。图 15 中电位电极 P_2 的电压，是由于这两组面的组合影响在大地表面形成的。如果受试电极与电流电极的间距较小，以致使它们的等电位面互相重迭，那么当利用 P_2 进行测量时，表面电压的变化将如图 16 a)所示。由于对于每次电压测量，在这两电极之间的电流是常数，电阻曲线和电压曲线的形状相同。因此，当受试电极非常靠近电流电极时，利用连续变化的电阻曲线并不能准确地确定所要测量的电阻。

如果把电流电极 C_2 放置在离受试电极足够远处，使各组等电位面不互相重迭，这样就可以获得像图 16 b)所示的电压曲线，进而得出如图 15 b)所示的电阻曲线。

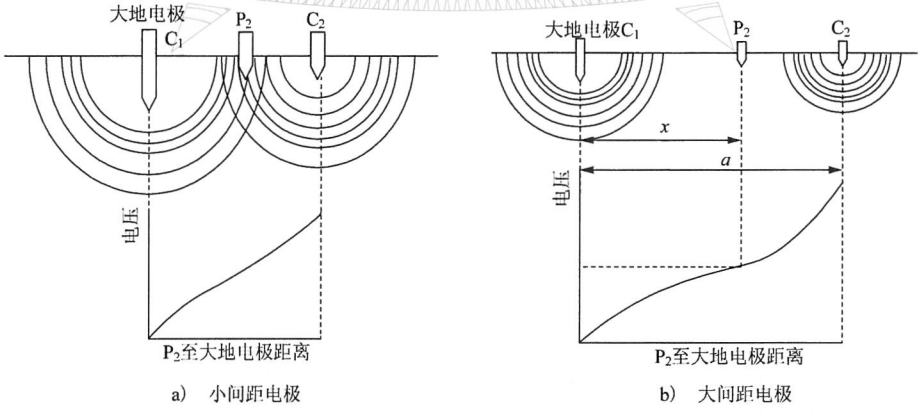


图 16　电极间隔对电压测量的影响

当受试电极和电流电极之间的距离 a 比受试的大地电极分系统的尺寸大得多时，受试的大地电极分系统可以近似地看作一个半球体，两个电极之间的互相作用则可忽略。当满足这些假设时，与受试电极

距离为 x 处的电位由式(42)给出：

$$V_x = \frac{\rho_e I}{2\pi x} - \frac{\rho_e I}{2\pi(a-x)} = \frac{\rho_e I}{2\pi}\left(\frac{1}{x} - \frac{1}{a-x}\right) \cdots\cdots (42)$$

式中：

ρ_e——土壤平均电阻率，Ω·m，负号表示 I 流入 C_1 并从 C_2 流出；

I——注入电极的电流，A。

假设受试电极等效为半径为 r 的半球体，则在此半球体表面上的电位，可令 $x=r$，按式(43)求出：

$$V_0 = \frac{\rho I}{2\pi}\left(\frac{1}{r} - \frac{1}{a-r}\right) \cdots\cdots (43)$$

C_1 和 P_2 之间的电位差就是所测得的电压，如式(44)所示：

$$V_0^x = V_0 - V_x = \frac{\rho I}{2\pi}\left(\frac{1}{r} - \frac{1}{a-r} - \frac{1}{x} + \frac{1}{a-x}\right) \cdots\cdots (44)$$

当 $x=r$ 时，式(44)计算结果如式(45)所示：

$$V_0^x = 0 \cdots\cdots (45)$$

如果 r_2 是电流电极 C_2 的等效半球半径，而 r 是受试电极的等效半球半径，则当 $x=a-r_2$ 时，式(44)计算结果如式(46)所示：

$$V_0^x = \frac{\rho I}{2\pi}\left(\frac{1}{r} - \frac{1}{a-r} - \frac{1}{a-r_2} + \frac{1}{r_2}\right) \cdots\cdots (46)$$

如果 $a>>r_2$ 且 $a>>r$，式(46)计算结果如式(47)所示：

$$V_0^x = \frac{\rho I}{2\pi}\left(\frac{1}{r} + \frac{1}{r_2}\right) \cdots\cdots (47)$$

但是电阻的正确值如式(48)所示：

$$V_0^x = \frac{\rho I}{2\pi r} \cdots\cdots (48)$$

这是当 $0<x<(a-r_2)$ 时所求得的电压。

为了使 V_0^x 的测量值正确，式(44)中的误差项应是零，即满足式(49)、式(50)、式(51)所示条件：

$$\frac{1}{a-x} - \frac{1}{x} - \frac{1}{a-r} = 0 \cdots\cdots (49)$$

$$x(a-r) - (a-r)(a-x) - x(a-x) = 0 \cdots\cdots (50)$$

$$ax\left(1-\frac{r}{a}\right) - a(a-x)\left(1-\frac{r}{a}\right) - x(a-x) = 0 \cdots\cdots (51)$$

又，如果 $a>>r$，则可得式(52)所示方程：

$$x^2 + ax - a^2 = 0 \cdots\cdots (52)$$

此方程的解如式(53)所示：

$$x = \frac{-a}{2} \pm \frac{1}{2}\sqrt{a^2+4a^2} = \frac{a}{2}(\sqrt{5}-1) = 0.618a \text{（舍去负值）} \cdots\cdots (53)$$

因此，当 x 为受试电极到电流电极 C_2 距离 a 的 62%时，其对地电阻的正确值就对应于测量电位与测量电流的比值。应当注意，a 是从受试电极中心至电流电极中心的距离，而且 a 远大于受试电极的等效球体半径。

图 17 示出了利用电位降法获得对地电阻数据的一个例子[12]。13 Ω 的正确电阻值对应的电位电极位置为 27.4m，此位置是受试电极至电流电极距离的 62%。

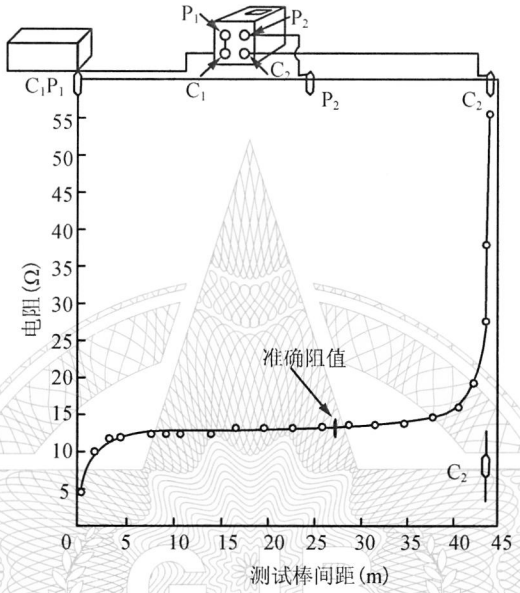


图 17　电位降法中电阻随着电位测量棒位置变化的关系

受试电极相对于无限远点的电阻(对地电阻的真正定义)由式(54)给出：

$$R=\frac{V_0}{I}=\frac{\rho}{2\pi}\left(\frac{1}{r}-\frac{1}{a-r}\right) \quad \cdots\cdots (54)$$

因此，任何小于无限远的 a 值，都会使得所测得的电阻存在误差。这种误差可估算。

当 $a>>r$ 时，式(54)可近似为式(55)：

$$R\approx\frac{\rho}{2\pi r} \quad \cdots\cdots (55)$$

显然，如果 $a=5r$，误差将是 25%；$a=11r$，误差为 10%；如果 $a=26r$，误差则为 4%。一个大型的电极系统的有效半径，可以由式(56)来确定：

$$r_e=\sqrt{\frac{S}{\pi}} \quad \cdots\cdots (56)$$

式中：

S ——电极系统所覆盖的面积，m^2。

例如 10m×10m 矩形格栅的有效半径按式(57)计算为：

$$r_e=\sqrt{100/\pi}=5.64\text{m} \quad \cdots\cdots (57)$$

为了获得 90%的测量准确度，按式(58)计算，其电流电极 C_2 离受试电极 C_1 的距离应为：

$$a=11\times 5.64=62\text{m} \quad \cdots\cdots (58)$$

能够保证一定精度的保守估算方法是，有效半径等于方阵最长的对角线尺寸(a_d)的一半。因此，为了获得 90%的精度，按式(59)计算，C_2 的位置应该是：

$$11\times(0.5a_d)=5.5a_d \quad \cdots\cdots(59)$$

这就是经常引用的 5 倍于受试电极面积最长对角线经验法则的基础。表 6 给出了电极位置在 50 倍最长对角线尺寸以下所获得的准确度。

表 6　电阻测量准确度与电极 C_2 和 C_1 间隔的关系

测量准确度 %	电极间隔 受试电极对角线长度的倍数
90	5
95	10
98	25
99	50

5.7.2.3　延伸型电极分系统[13]

当大地电极分系统采用延伸方式时，往往很难把电流电极正好定在 5 倍最大尺寸的距离，这样，对地电阻的测量值误差很大。另外，对电极分系统电气中心的连接也许是不可能的。图 18 示出一种延伸式大地电极分系统的电阻曲线，C_k≤305m。图中每条曲线都对应于一个特定的距离 C_k，而 C_k 是电流电极与大地电极分系统连接点之间的距离。电位电极与大地电极的间距 P_i 是自变量。

在每条曲线中，已把对应于离受试电极为 C_k 的 62%的这些点连接起来。显然，当电流电极的位置往远处移动时，对应于 62%的电阻值是下降的。其电阻的正确值可以借助于将连接迹线外推至其渐近值来估算。在图 18 中没有一条曲线是水平伸展的，甚至电流电极与受试电极的最大间隔也显得太小而不能直接读出其电阻值。电位降测量法在这里应作如下假设：(1)要测量的电极可近似为一个半球体；(2)对大地电极的连接是在其电气中心进行的。鉴于电气中心的位置是不知道或不可接近的，因此，与大地电极的连接往往是在离电气中心 D 距离为 y(见图 19)的某一适合连接的点上进行的。从真正电极中心至电流电极的距离(设测量是在从电气中心出发的一条径向线上进行)为 C_k+y。利用图 18 曲线上“62%”的点来确定大地电极的电阻时，实际上应该取离真正中心(D)为 $0.62(C_k+y)$ 处作为电位电极的位置。这就意味着，从系统的实际连接点(O)到出现正确对地电阻的位置距离 P_i 将由式(60)确定：

$$P_i=0.62(C_k+y)-y=0.62C_k-0.38y \quad \cdots\cdots(60)$$

式中：

P_i ——为测得电极对地电阻的正确值，应选取的电位电极到电极连接点的距离，m；

C_k ——第 k 组电极中电流电极到测试连接点的距离，m；

y ——从电极系统电气中心到测试连接点的距离，m。

为了确定大地电极的正确电阻，允许 y 在 0～C_k 之间取适当的增量(间隔)。对于每个 C_k 值，按式(60)计算对应之 P_i，再根据 P_i 值在图 18 的曲线上读出电阻测量值。以 y 为横坐标，画出电阻曲线。例如，设 y 和 C_k 均为 305m 时，只要考虑图 18 中右边的一根曲线，这时 P_i 值为 73m，对应的 R 为 0.08Ω。其次，保持 C_k 不变，取 y 为 244m，对应的 P_i 值为 96m，而 R 为 0.1Ω。如此继续，便可由图 18 得出对应“62%”的一组电阻估算值。将它们相对于 y 重新画成“正确的”电阻图，如图 20 所示。在图 20 中曲线交会的区域，y=122m 的数值对应于电极的电气中心，而相应的电阻值(0.13Ω)则是电极系统对地电阻的正确值。电流电极 C_2 与大地电极连接点(O)的推荐距离(见图 19)为电极系统最大一边长度的 1～2 倍。此外，如果电位降的测量不是沿电气中心的径向线进行，可能不会获得十分明显的曲线交会区。在这种情况下，需要重新确定辅助电极的排列方向。

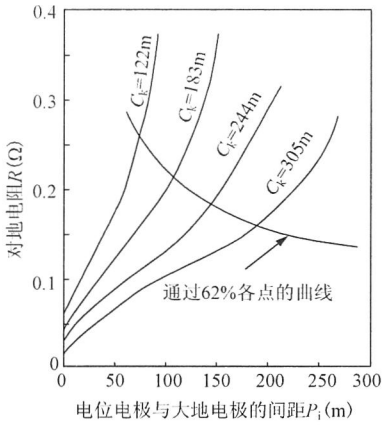


图 18　延伸型电极分系统的对地电阻曲线

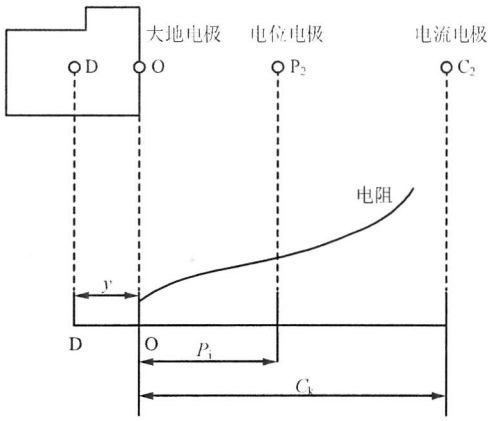


图 19　适用于大型电极分系统的对地电阻曲线

5.7.2.4　试验设备

现有试验设备可在 0.01Ω～20kΩ的范围内精确地测量大地电极分系统的接地电阻。用来进行这些测量的大多数设备，设计中接地试验电流不宜采用直流或 50Hz 的频率，以避免或降低大地中杂散交流及直流电流的影响。

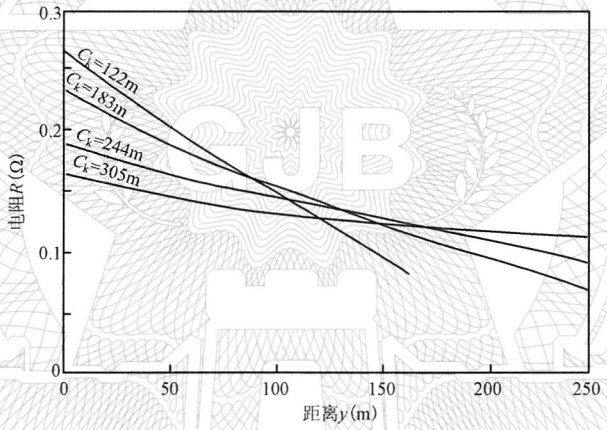


图 20　相对于图 18 的交叉曲线族

5.7.3　两电极法

在该方法中，辅助电流电极和辅助电位电极合二为一，测量结果是受试电极和辅助电极的接地电阻之和。因此，该方法在原理上存在一定的缺陷，只用于难以采用三电极法的场合。两电极法的测量配置示意图见图 21。采用两电极法进行接大地电阻测量时，依照如下步骤进行：

a)　测量设备通电预热，使其达到稳定工作状态，并对仪器进行校准；

b)　按图 21 和测量仪器规定的要求连接测试电路；

c)　调整接地电阻测量仪，读取并记录测量电阻值。

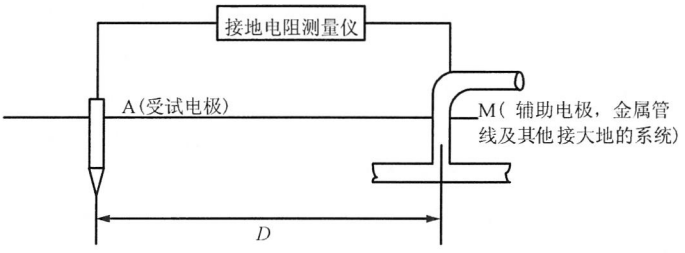


图 21　两电极法对地电阻测量配置示意图

5.7.4　三点(三角)法

采用该方法时，要对图 22 中受试电极的电阻(R_x)和辅助电极的电阻(R_a，R_b)全部测量两次。然后按式(61)计算未知(待测)的电阻。

$$R_x = \frac{(R_x + R_a) + (R_x + R_b) - (R_a + R_b)}{2} \quad \cdots\cdots (61)$$

式中括弧内的各项，是经下列式(62)、式(63)和式(64)测量所得的电阻：

$$(R_x + R_a) = \frac{V_x^a}{I_x} \quad \cdots\cdots (62)$$

(受试电极 X 至辅助电极 A 的电压降除以注入受试电极 X 的电流)

$$(R_x + R_b) = \frac{V_x^b}{I_x} \quad \cdots\cdots (63)$$

(受试电极 X 至辅助电极 B 的电压降除以注入受试电极 X 的电流)

$$(R_a + R_b) = \frac{V_a^b}{I_a} \quad \cdots\cdots (64)$$

(辅助电极 A 至辅助电极 B 的电压降除以注入辅助电极 A 的电流)

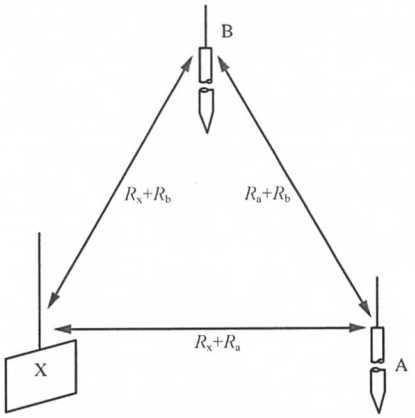


图 22　测量大地电极电阻的三点法

为了提高测量精度，所用辅助电极的接地电阻应与未知(受试)电极具有同一数量级的电阻。其串联电阻可用电桥进行测量，或者用电压表和电流表法进行测量，既可以利用交流也可以利用直流电流源。对于三点测量法来说，各电极相互应保持一定的距离，否则在计算中可能会出现诸如零值之类的不合理现象。在测量一根仅为 3m 长的打入式接地棒时，三个接地电极之间的距离应大于 5m，最好能为 8m 或更大。对于较大面积的接地系统，可以设想这种系统的接地电阻是较低的，因此要求电极的间隔至少与接地现场尺寸同一量级。该方法对于单根接地棒的测量是最有效的，但该方法并不建议用于多根接地棒的大地电极分系统对地电阻的测量。

5.8　其他考虑

5.8.1　在大地电极上面的土壤表面电位

5.8.1.1　概述

当电力线发生故障或遭受雷击时，可能会有很大的电流注入大地电极中。因此，在电极附近的土壤表面会形成相当高的电位，此电位将随着与电极连接点距离的增加而发生显著的变化。在大地表面相隔 0.9m 的两点间的电位差称为跨步电压，是在该地面上站着或走着的人一步之间的电压电平。

5.8.1.2　跨步电压的安全极限

最大安全跨步电压取决于接触该电压的时间和该地面土壤的电阻率。对于电击持续时间为 0.03s～3s 的情况来说，最大安全跨步电压按式(65)计算[2]：

$$V_s = \frac{165 + \rho_s}{\sqrt{t}} \quad \cdots\cdots (65)$$

式中：

ρ_s——表层土壤的电阻率，Ω·m，最小值为 10Ω·m；

t——电击时间，s。

对于 30ms 或更短的时间来说，最大安全跨步电压是 1000V，而对于时间大于 3s 的电击来说，最大安全跨步电压为 100V。

5.8.1.3　实际电极的跨步电压

5.8.1.3.1　概述

在均一土质的土壤中，不管是顶端与地面齐平的垂直接地棒、顶端埋入地下的垂直接地棒以及埋设的格栅电极，其跨步电压的估算表达式依次在 5.8.1.3.2～5.8.1.3.4 中给出。但应当注意，跨步电压既取决于电极的几何尺寸，又取决于土壤电阻率和电流的幅度。

5.8.1.3.2　顶端与地面齐平的垂直接地棒

在大地表面，离开单一、孤立的齐平打入式垂直接地棒顶端 x 的某点电位按式(66)计算[2]：

$$V_x = \frac{0.366\rho_e I}{l} \lg\left(\frac{l}{x} + \sqrt{1 + \frac{l^2}{x^2}}\right) \quad \cdots\cdots (66)$$

式中：

ρ_e——大地电阻率，Ω·cm；

l——接地棒的长度，cm；

I——注入接地棒的电流，A。

而接地棒本身的电位由式(67)给出：

$$V_0 = \frac{0.366\rho_e I}{l} \lg\frac{3l}{d} \quad \cdots\cdots (67)$$

式中：

ρ_e——大地电阻率，Ω·cm；

d——接地棒的直径，cm。

设人的步距或跨步长度为 l_p，则在接地棒处的跨步电压按式(68)计算：

$$V_0 - V_p = \frac{0.366\rho I}{l}\left[\lg\frac{3l}{d} - \lg\left(\frac{l}{l_p} + \sqrt{1 + \frac{l^2}{l_p^2}}\right)\right] \quad \cdots\cdots (68)$$

当跨步远小于接地棒长度时，也就是说，当 $l_p << l$ 时，跨步电压可以近似为式(69)：

$$V_0 - V_p = \frac{0.366\rho I}{l} \lg\left(\frac{3l_p}{2d}\right) \quad \cdots\cdots (69)$$

可以把跨步电压表示成与接地棒电位的比值，如式(70)所示：

$$\frac{V_0 - V_p}{V_0} = \frac{\lg\left\{3l_p \Big/ \left[d\left(1 + \sqrt{\frac{l_p^2}{l^2} + 1}\right)\right]\right\}}{\lg(3l/d)} \quad \cdots\cdots (70)$$

表7中给出了不同长度的接地棒的跨步电压与接地棒电位的比值。表中假定接地棒的直径是2.5cm，而一步的距离为0.9m。

表7　顶端与地面齐平的垂直接地棒的跨步电压

接地棒的长度 m	跨步电压与电极电位的比值
1.5	0.75
3	0.68
6	0.61
15	0.53
30	0.48

在电阻率为1000Ω·cm的土壤中，3m×Φ2.5cm的接地棒附近的跨步电压，约为接地棒到无限远一点之间电压的68%。接地棒附近的跨步电压将在接地棒电位的90%(对于短的接地棒)和50%(对于非常长的接地棒)之间。

在一根直径2.5cm，长度3m的孤立接地棒周围，当接地棒承载20kA雷电电流时，大地(ρ=1000Ω·cm)表面的跨步电压将会产生致命的危险，这个电压值按式(71)计算为：

$$V_0 - V_p = \frac{0.366\times1000\times20000}{300}\left[\lg\frac{3\times3}{0.025} - \lg\left(\frac{3}{0.9}+\sqrt{1+\frac{3\times3}{0.9\times0.9}}\right)\right] \quad \cdots\cdots (71)$$

$$= 24400\times(2.556-0.833) = 42\text{kV}$$

这个数值是安全电压的42倍。

在1000Ω·cm的土壤中，3m×Φ2.5cm的接地棒的对地电阻按式(72)计算为：

$$R = \frac{0.366\times1000}{300}\lg\left(\frac{3\times300}{2.5}\right) = 3.1\Omega \quad \cdots\cdots (72)$$

当土壤电阻率更高时，在接地棒附近所引起的跨步电压甚至会比上面计算的42kV还要高。对于持续时间为3s的电击来说，要求跨步电压不超过100V。这意味着，对于3m×Φ2.5cm的单根接地棒，即使土壤的电阻率较低(1000Ω·cm)，在故障电流大于50A时也会产生不安全的跨步电压。

5.8.1.3.3　顶端埋入地下的垂直接地棒

如果把单一孤立的垂直接地棒打入地下使其顶端低于地面，则在大地表面的最大跨步电压将会降低。图23给出了跟地面齐平的打入式接地棒与顶部低于地面的埋设接地棒在地面形成的电位梯度。齐平的打入式接地棒的最大电位梯度出现在接地棒的附近，而埋入大地深度为h的接地棒，其最大电位梯度则发生在与接地棒的距离为$3h$～$4h$的地方[2]。打入地下，顶端低于地面h的接地棒，其跨步电压按式(73)计算：

$$V_x - V_{x+l_p} = \frac{0.366\rho I}{l}\lg\left\{\frac{\left[\sqrt{(h+l)^2+x^2}+h+l\right]\left[\sqrt{h^2+(x+l_p)^2}+h\right]}{\left[\sqrt{(h+l)^2+(x+l_p)^2}+h+l\right]\left[\sqrt{h^2+x^2}+h\right]}\right\} \quad \cdots\cdots (73)$$

设ρ=10Ω·m，I=20kA，l=3m，x=3h(单位m)，l_p=0.9m。则式(73)重写为式(74)：

$$V_x - V_{x+l_p} = 2.4\times10^4\lg\left\{\frac{\left[\sqrt{(h+3)^2+(3h)^2}+h+3\right]\left[\sqrt{h^2+(3h+0.9)^2}+h\right]}{\left[\sqrt{(h+3)^2+(3h+0.9)^2}+h+3\right]\left[\sqrt{h^2+(3h)^2}+h\right]}\right\} \quad \cdots\cdots (74)$$

如果 h=0.9m，其最大跨步电压按式(75)近似计算为：

$$V_x - V_{x+l_p} = 2.4\times10^4 \times \lg\left(\frac{8.64\times4.61}{9.21\times3.75}\right) = 2.4\times10^4 \times \lg1.16 = 1547\text{V} \quad \cdots\cdots (75)$$

此值比齐平打入地下的接地棒所呈现的 42kV 要小得多。

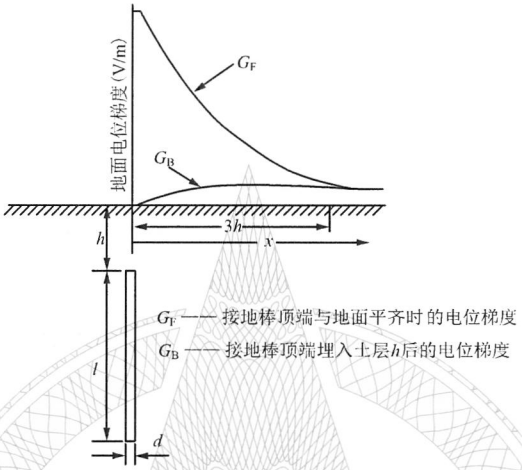


图 23　电流流入单根孤立接地棒所产生的地面电位

5.8.1.3.4　埋设的水平格栅

埋设格栅对地电阻的表达式已在 5.6.2.4 给出。式(29)是一块平板的电阻($\rho/2d_e$)与大地土壤材料的单位扩散电阻(ρ/l_{tot})之和。电压($\rho I/l_{tot}$)正比于从格栅导体流入大地的单位平均电流，它代表格栅导体和每个网格空隙中心之间电位差的近似值。图 24 粗略图示了格栅剖面上的电压分布。注意，图 24 中 V 是格栅边缘上的最小电压(相对于无限远)，按式(76)近似计算：

$$V = \frac{\rho_e I}{2d_e} \quad \cdots\cdots (76)$$

式中：

ρ_e——大地的电阻率，Ω·m；

I——输入电流，A；

d_e——格栅的有效直径，cm。

可见此格栅把危险的电位梯度简单地转移到了格栅的外围[2]。

如果大地电阻率适中，比如为 10^4 Ω·cm，并且雷电电流为 20kA，对于 5.6.2.4 例子中的格栅，在 1.5m 距离范围内呈现出的电压按式(77)计算给出：

$$\frac{\rho_e I}{l_{tot}} = \frac{(10^4)\times(2\times10^4)}{6.6\times10^4} = 3000\text{V} \quad \cdots\cdots (77)$$

这个电压将超过前面所提到的 1000V 的安全跨步电压。

如果格栅间隔为 0.3m，导体总长为 6060m，在 900m^2 范围内将有 10000 个网格。其有效直径仍然只有 33.86m，按式(78)计算的电阻将是：

$$R = \rho_e\left(\frac{1}{2\times3385} + \frac{1}{100\times6060}\right) = 1.48\times10^{-4}\rho_e + 1.65\times10^{-6}\rho_e \quad \cdots\cdots (78)$$

在后一种格栅上，最大跨步电位差(仍然假设ρ=10^4 Ω·cm，而一次有效的雷电电流为 20kA)按式(79)计算为：

$$\frac{\rho_e I}{I_{tot}} = \frac{(10^4)\times(2\times10^4)}{6.06\times10^5} = 330\text{V} \quad \cdots\cdots (79)$$

如果线路的瞬态或浪涌阻抗并不是远大于稳态电阻，对小于 30ms 的瞬态，这将是跨步电压的安全值。

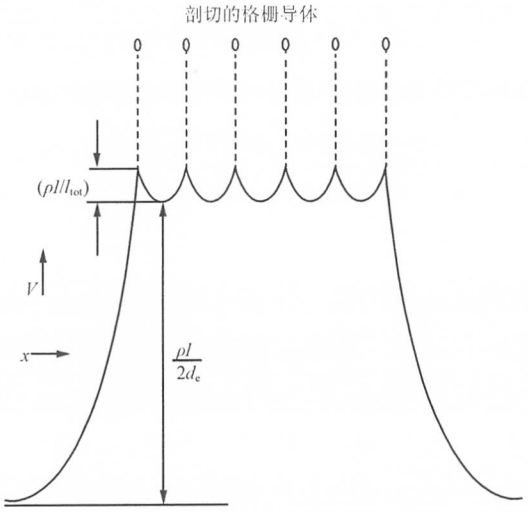


图 24　沿格栅地面的电位变化

5.8.1.4　降低跨步电压伤害的方法

表 8 列出了降低跨步电压伤害的几种设计方法。最有效的方法是把大地电极系统的对地电阻降至经济可行的最低值。

表 8　降低跨步电压伤害的方法

设计方法	备注
1. 减小电极系统的对地电阻	对地电阻直接正比于土壤的电阻率
2. 埋设大地电极，以便降低地面的最大电压梯度	接大地电极的连接线绝缘应能承受 $5\times10^4 R_0$V
3. 把格栅埋入大地，并将其设置在接地电极周围	在整个格栅范围内，尽力把大地电位均衡
4. 围一个栅栏，使工作人员不能进入危险区	栅栏应接地

5.8.2　电极的发热

5.8.2.1　概述

大地电极应使用截面积足够大的材料，以免当大电流流过电极时产生局部过热现象。

5.8.2.2　稳态电流

应限制大地电极系统中所出现的故障电流，为保证不致使土壤的温度升到沸点以上，允许流入大地电极的稳态交流电流由式(80)给出[2]：

$$I_{ss} = \frac{1}{R}\sqrt{0.024\rho_s \Delta T} \quad \cdots\cdots (80)$$

式中：

I_{ss}——稳态电流，A；

R——电极对地电阻，Ω；

ρ_s——土壤电阻率，Ω·cm；

ΔT ——允许的温升，℃。

若ΔT ＝60℃，当ρ＝10^6 Ω·cm 时所允许的稳态电流由式(81)给出：

$$I_{ss}<1200/R \quad \cdots\cdots (81)$$

当ρ＝10^3 Ω·cm 时所允许的稳态电流由式(82)给出：

$$I_{ss}<38/R \quad \cdots\cdots (82)$$

因为在大地电极上的电压等于 I 和 R 的乘积，所以对应的电压限值分别由式(83)和式(84)给出：

$$V_{ss}<1200\text{V}\ (\rho = 10^6\ \Omega\cdot\text{cm 时}) \quad \cdots\cdots (83)$$

$$V_{ss}<38\text{V}\ (\rho = 10^3\ \Omega\cdot\text{cm 时}) \quad \cdots\cdots (84)$$

5.8.2.3 瞬态电流

温升不超过 60℃的允许瞬态电流密度，可由瞬态温度时间的表达式(85)求出[2]：

$$i_d = \sqrt{1.75\times\Delta T/(\rho t)} \quad \cdots\cdots (85)$$

式中：

i_d ——电流密度，A/cm^2；

ΔT ——温升，℃；

ρ——土壤的电阻率，Ω·cm；

t ——瞬态持续时间，s。

设ΔT ＝60℃，则电流密度最大值由式(86)给出：

$$i_{d\max} = 10\sqrt{1/(\rho t)} \quad \cdots\cdots (86)$$

短接地棒表面的电流密度 i_d 在整个接地棒的长度上接近于常数，并且由式(87)给出：

$$i_d = \frac{I}{\pi dl} \quad \cdots\cdots (87)$$

式中：

I ——输入电流，A；

d ——接地棒的直径，cm；

l ——接地棒的长度，cm。

例如一根 3m×Φ2.5cm 的接地棒，在温升不大于 60℃的情况下，它能传输的峰值瞬态电流按式(88)计算为：

$$I_{\max} = \pi i_{d\max} dl = \pi\times 2.5\times 300\times 10\sqrt{1/(\rho t)} = 2.36\times 10^4\times\sqrt{1/(\rho t)} \quad \cdots\cdots (88)$$

5.8.2.4 电极的最小尺寸

应将电极表面温度限制在沸点以下，根据对表面温度的这一限制要求确定电极尺寸的最小值。

单根孤立接地棒的最小长度(cm)由式(89)确定：

$$l \geqslant \frac{I\sqrt{\rho t}}{10\pi d} \quad \cdots\cdots (89)$$

对雷击电流和电力系统故障电流而言，数值 $I\sqrt{t}$ 约为 1000。为了满足能量耗散要求，接地棒的最小长度(cm)由式(90)确定：

$$l \geqslant \frac{32}{d}\sqrt{\rho} \quad \cdots\cdots (90)$$

如果大地为潮湿的土壤，电阻率ρ约为$10^4\ \Omega \cdot \mathrm{cm}$，则接地棒长度(cm)的限值由式(91)确定：

$$l \geqslant \frac{3200}{d} \quad \cdots\cdots (91)$$

在ρ约为$10^6\ \Omega \cdot \mathrm{cm}$的花岗岩的条件下，其长度(cm)限值由式(92)确定：

$$l \geqslant \frac{32000}{d} \quad \cdots\cdots (92)$$

如果使用直径2cm的接地棒，为在花岗岩上安全耗散热量，至少需要80根2m长的接地棒。对于潮湿的土壤来说，耗散同样热量仅需要8根2m长的接地棒。

5.9 提高电极周围土壤电导率的方法

5.9.1 概述

在有些场地上虽然允许，而且实际也打入许多接地棒，并埋设了电缆和其他合适的材料，但对专用的通信系统，即对于高频发射机来说，仍不能获得所希望的低接地电阻。在这种情况下，可能需要提高电极周围土壤的电导率，将电阻降至所希望的数值。提高电导率虽然可降低接地电阻，但是会降低大地电极分系统的寿命，因此应谨慎采用。

电极的对地电阻，正比于土壤电阻率而反比于它与土壤的总接触面积。对于一定的场地面积来说，增加垂直接地棒或水平电缆，虽然也能降低接地电阻，但由于增加了互相耦合的作用会降低其效果。最直接的降低对地电阻的方法是降低土壤的电阻率。对土壤电阻率影响显著的因素是土壤的水分含量、可溶盐的含量和土壤孔隙率，而孔隙率决定土壤的保水性。因此，推荐两种降低土壤电阻率的方法：保持水分和施加降阻剂。

5.9.2 保持水分

土壤过量的排水会把盐分冲走，这些盐分对维持高电导率是必需的。此外过量的排水会使深层的土壤变干、电阻率增加。地面表层的适当植被，例如种植豆类，会减缓土壤中盐类的流失并促进盐的自然生成，这是很有用的。地表排水系统应保持大地电极分系统潮湿。维持大地电极分系统周围的土壤潮湿，这样可以保持土壤盐溶液的导电离子浓度。含盐量较高的排水有助于大地电极分系统周围土壤的持续盐化。

多孔粘土以及膨润土(钻探泥浆)能够从周围的泥土中吸收水分并具有保水性。用膨润土包裹在接地棒及其连接电缆周围，可以大大增加接地棒及其连接电缆的有效面积，从而降低大地电极分系统与大地之间的电阻[14]。膨润土通常是干燥(粉末状)的，在首次使用时须加水并在顶部覆盖约30cm厚的普通土壤。在最终需要铺平的区域使用膨润土需要特别注意，因为膨润土在浸润饱和后的体积会膨胀为干燥时的数倍。根据湿润程度而高度膨胀或收缩也是膨润土的一大缺点，水分缺失时膨润土可能会与接地棒和周围泥土脱离。比膨润土更好的回填料是由75%的石膏、20%的膨润土以及5%的硫酸钠构成的混合物。石膏(硫酸钙)可以吸收并保持水分，增加该混合物的活性和导电性，其在干燥时收缩很小而不会与接地棒和周围土壤脱离。膨润土由于其良好的膨胀性使该混合物更好接触接地棒和周围土壤，而硫酸钠则通过消除因电流从接地棒流入大地所产生的气体阻止接地棒的极化。这种混合物由阴极保护经销商作为标准阳极回填料出售，并相对便宜。使用时应在该回填混合物上覆盖约30cm厚度的普通土壤。该回填混合物的耐久性较好。

5.9.3 施加降阻剂

5.9.3.1 概述

为了降低电极电阻，也可通过在紧靠电极的周围土壤中添加可电离出离子的降阻剂。降阻剂根据其降阻方式不同可分为电解质溶液、化学降阻剂、物理降阻剂三种类型。

5.9.3.2　电解质溶液

这是一种靠电解质溶液中的离子渗透到土壤的孔隙中来降低土壤电阻率的方法。较常用的电解质依次是：

a)　硫酸镁($MgSO_4$)——泻盐(七水硫酸镁)；

b)　硫酸铜($CuSO_4$)——蓝矾(五水硫酸铜)；

c)　氯化钙($CaCl_2$)；

d)　氯化钠(NaCl)——普通盐；

e)　硝酸钾(KNO_3)——硝石。

硫酸镁电导率高，而且对于接地电极和接地板的腐蚀作用弱。不推荐使用普通盐或硝酸钾，因为使用这两种材料时都需要特别注意防腐问题。电解质处理时，那些虽与接地无关，但在电极附近的金属物体也应作防腐蚀处理，以防损伤。因此，食盐或硝酸钾仅在十分必要的场合方可使用。

在电解质处理土壤之后，单根接地电极的对地电阻可大大降低。土质较为疏松的地方，电解质处理的初期效果最显著，这是因为溶液可以渗入相当大区域的土壤，增加电极的有效尺寸。在密实的土壤中，电解质处理并不立即见效，这是因为在相当长的时期内，电解质仍然留在其原来的地方。

电解质处理降低接地电阻的效果如图 25 和图 26 所示，处理初期使接地电阻获得显著的下降，然后在较长的时期内使电阻稳定而变化不大。处理后，还会减少电阻随季节的变化，并降低接地电极周围土壤的冰点。

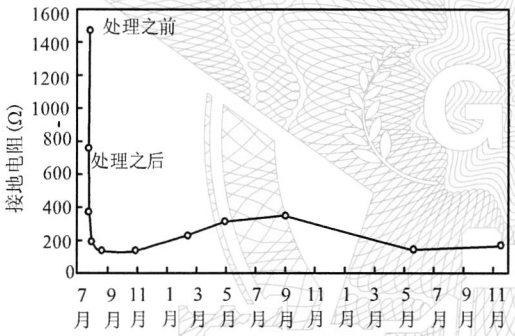


图 25　电解质处理对接地电阻的影响

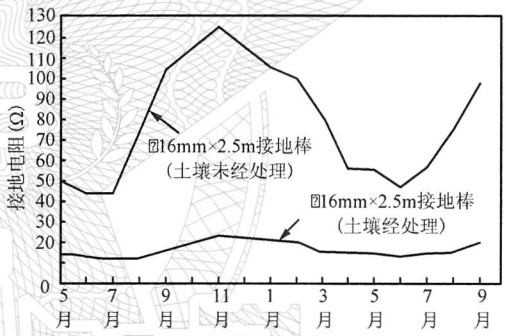


图 26　土壤接地电阻随季节的变化

然而，电解质处理的效果也是有限的。例如，一个设有 100 根接地棒的方阵，接地棒的长度为 l，间隔为接地棒长度的两倍，则其对地电阻(利用图 12，查得 K 为 3)依据式(16)和式(28)，由式(93)给出：

$$R=\frac{3\times0.366\rho}{100l}\lg\frac{3l}{d} \quad \cdots\cdots (93)$$

设$\rho=10^6\ \Omega\cdot\mathrm{cm}$，(砂砾、砂石)；$l$=30m(每根棒长)；$d$=2.5cm。

那么对地电阻按式(94)计算为：

$$R=\frac{3\times0.366\times10^6\times3.56}{100\times30\times100}=13\Omega \quad \cdots\cdots (94)$$

电解质处理效果的上限，可以借助于单根金属电极对地电阻的计算方法确定。假定电解质材料完全充满由上述接地棒方阵所占有的体积$(540\times540\times30)\ \mathrm{m}^3$，其等效平板的有效直径 d_e 是 609m，对地电阻将按式(95)计算为[2]：

$$R_e=\frac{\rho}{2d_e}=\frac{10^6}{2\times609\times10^2}=8.2\Omega \quad \cdots\cdots (95)$$

电解质处理最多只能将此大型方阵的对地电阻降低到原来的 63%。

5.9.3.3　化学降阻剂

化学降阻剂以电解质为导电材料。有机化学降阻剂是一种电解质与胶凝材料结合组成的凝胶状导电物质，即用脲醛树脂、丙烯树脂之类的高分子有机化合物作为主要胶凝材料加上食盐等盐类物质作为电解质，在引发剂的作用下，发生聚合反应生成的一种具有网状分子结构的高分子共聚物。无机化学降阻剂由导电性能较好的无机化合物加上适当的水溶性电解质与固化剂组成。

5.9.3.4　物理降阻剂

物理降阻剂是一种以石墨为导电材料，加上石灰、水泥、石膏或水玻璃等无机材料用水调制后固结而成的导电物质。

5.9.4　电极包套

在计算大地电极的接地电阻时，总是假设电极与土壤之间的接触电阻为零。然而，实际上接地棒和土壤表面之间的界面并不一致，除非土地是夯实的粘土或进行过等效处理。砾质土壤(砂砾等)的接触特性很差，降低这种接触电阻将对降低接地电阻具有显著的影响，因为紧靠着电极的土壤中电流密度很大。把电极包套在导电的胶泥或导电的三合土中，是改善电极与土壤之间接触的方法之一。如果这种包套材料能吸收和保持水分，包套就会减小水分含量局部变化对接触电阻的影响。

5.9.5　施加电解质的处理方法

处理一根打入式电极周围土壤的挖沟法如图 27 所示。环绕电极周围挖一个深约 0.3m 的环形壕沟。利用土壤处理材料把此沟道填满，然后用土覆盖。电解质材料不应与接地棒直接接触，以便使填充材料既能良好扩散又不致有太大的腐蚀作用。

处理打入式电极周围土壤的另一种方法可利用硫酸镁和水。这种方法如图28所示，把一个长约0.6m、直径为20cm 的陶管套围着接地电极埋入地下。装配之后在陶管内填充硫酸镁，直至离地面不足0.3m，并把它浇透水。应使陶管的管口与地面平齐，再用盖子盖紧。

任何一种电解质处理都不能永久改善大地电极的接地电阻。电解质会逐渐被雨水冲走和自然排走，根据土壤的疏松度和雨量的多少，电解质的更换时间也有所不同。为了使电解质处理的有效期为两到三年，第一次需要用 18kg～40kg 的电解质。以后每次补充的电解质会把有效期延长至更长的时间，以致后续进行处理的时间间隔也越来越长。

还有其他的土壤处理和降低接地电阻的方法，包括使用空心电极，并用盐类材料填满空心电极，盐类材料会吸收外部大气中的水分。这些电极通常为 2.4m 长，放置在用地钻钻成的土壤孔洞内，并使其顶部开设的通气孔露出地面。空气中的水分转变为电解液，再通过电极上的孔渗入周围的土壤，就可保持土壤的潮湿性，从而降低电极的接地电阻。这些电极每年应进行检修，保证有足够数量的盐类材料，而且接地棒与连接电缆间的结合状况保持良好。

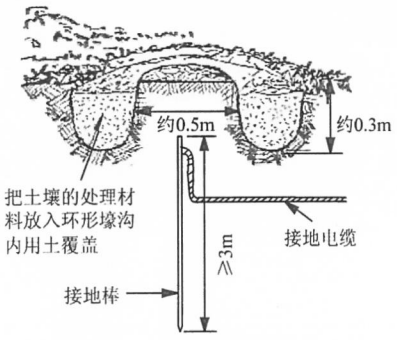


图 27　土壤处理的挖沟法

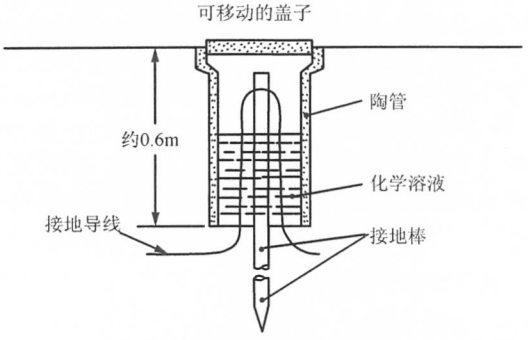


图 28　接地棒化学处理的另一种方法

5.10　阴极保护

5.10.1　概述

当两种不同类型的金属浸入水里或埋入潮湿的土壤中时，就可构成电偶电池。该电池两个电极之间

所形成的电压，就等于两种金属的腐蚀电位差。如果通过一条低阻通路把这对电极连接在一起，电流就流过电极，使这对电极的阳性元件受到腐蚀。不幸的是，有助于降低接地电阻的措施也促进腐蚀作用。具有高湿度和高无机盐的低阻土壤，形成一种具有低内阻的腐蚀电池，在短路电极之间，可能流过相当大的电流(例如铜的接地棒与建筑物的钢地基或钢筋搭接时)，并很快的把电池中较活泼的金属腐蚀掉(见 10.8.1.3)。在高阻电池中，流动的电流比较小，因而比低阻电池的腐蚀程度轻。

5.10.2 保护技术

可以采用三种基本方法来降低埋设金属的腐蚀速率。最简单的方法是采用保护性涂层把金属与土壤隔离(绝缘)。绝缘涂层会阻断电解电流的通路并阻止阳性腐蚀。但绝缘法并不是防止大地电极腐蚀的最好办法。第二种方法是在一个场地内避免使用不同的金属，如果所有与土壤接触的金属是同一类金属(如铁、铅或铜)，则原电池腐蚀作用最小。然而，每种材料在使用中各有其独特的性能要求，例如：重量、经济性、电导率、延展性、强度等等。因此，不应简单地排除研究其中任何一种材料在土壤中的应用。铜是大地电极分系统的合适材料，不仅它的电导率高，而且它的标准电极电位也高，相当耐腐蚀。相对于多数普通结构材料来说，铜是阴极，它的耐腐蚀性将以消耗其他金属为基础。铁电极虽然可与水管、污水管、钢筋、钢柱以及人员出入孔盖板等部件相容，但即使在没有其他金属的情况下铁也极易被腐蚀；另外，铁的电导率也差。由于铜有较高的电导率，因此，铜通常用于建筑物与配电站的接地。有些设施可能会出现很大的故障电流或雷电电流，为了降低电位梯度以保障人身安全，也要用铜材接地。

第三种是阴极保护法。阴极保护可以采用牺牲阳极的办法，或者利用外部电流源抵消氧化电压的办法。牺牲阳极包括镁、铝、锰或其他更活泼的金属，可以把它们埋设在电极附近的土壤中并将它们搭接至钢桩、钢管或电缆的铅屏蔽层上。这些活泼的阳极比铁或铅更容易氧化，因此相对于牺牲阳极，铁和铅都是阴极。阴极保护所需的直流电流，一般是通过交流电流整流获得，但是在特殊场合，可由光电池、蓄电池组、温差电池或者其他直流电源供给。由于输出电压可调，所以任何金属都可以作为阳极使用，但是经常使用的是石墨和高硅铁，因为它们具有低的腐蚀速率，成本低。阴极保护无论对裸露金属，还是带有涂层的金属都有效。如果能在适当的时间周期内补充牺牲阳极，则被保护的构件寿命就会大大延长。

5.10.3 牺牲阳极

牺牲阳极只在有限范围内提供保护。外加电流阴极保护系统要采用长期耐久的阳极材料，如石墨、高硅铁，少数场合采用镀铌的铂或钛。对于长电缆或敷设管道的保护，可以对被保护金属施加一个相对于周围土壤为－0.7V～－1.2V 的偏压来实现。通常由交流电整流获得直流偏压，在特殊场合，则由物理电源、蓄电池组、温差电池或其他直流电源供电。应在金属上覆盖一层绝缘层(如氯丁二烯橡胶)，以防止金属与周围土壤直接接触。因此，本方法并不适用于保护地基、出入孔或其他通常与土壤相接触的结构件。这种方法容易产生漏电电流，绝缘层往往由于装配、调节的失误或雷电击穿等原因形成裂口，这时漏电流就会通过绝缘层的裂口进入土壤。

5.10.4 腐蚀性大气

在土壤呈现出低电阻率的地区，往往可能会遇到腐蚀性的大气(例如在海岸附近或者在大直流电源，如电镀设施的附近)，这时可能需用阴极保护来延长地基、地下电缆设施或其他与土壤接触的设施构件的寿命。一般常用金属的电化序资料，见 10.8.1.2。

5.11 高寒地区的接地

5.11.1 土壤电阻

在高寒地区，接地的主要问题是要实现与高电阻率土壤的良好接触。在遇到高电阻率土壤的地方，只有对地表和地下岩层一并认真处理，才能实现电源和通讯电路的良好接地。事实上，冰冻土壤的电阻率可能比非冰冻土壤的电阻率高十到一百倍，温度和湿度的季节性变化也会明显影响土壤的电阻率，表 9 列出了土壤中水分含量对土壤电阻率的影响，表 10 列出了温度对土壤电阻率的影响[15][16]。

许多高寒地区都有不同厚度的永冻土。永冻土是陆界(地球外壳的表层)的一部分，其自然温度将在二年或多年持续在 0℃以下。“年冻层”是一年一次冻结和融化的地区。存在永冻土的地区，其表层的厚度因地区而不同，从寒冷地区的不足 0.3m 到高寒地区的超过 3.66m。季节性融化地区仅在短暂的夏季有不冻土，则在此期间地貌可以识别。如未被冰雪覆盖，在春、秋季节也可以确定接地位置。

表 9　水分含量对土壤电阻率的影响

水分含量 (重量百分数) %	电阻率 Ω·m	
	表层土	砂壤土
0	100000	10000000
2.5	2500	1500
5	1650	430
10	530	185
15	170	105
20	120	63
30	64	42

表 10　温度对土壤电阻率的影响

温度℃	电阻率 Ω·m
20	72
10	99
0(水)	138
0(冰)	300
−5	790
−15	3300
注：水分含量 15.2%的砂壤土。	

生长柳树或者杨树的地方，一般表明没有冻土层且存在地下水，地下水即使冰冻也是暂时的。河底和湖底通常不结冰。一般来说，缓慢流动的河水与溪流从表面向下结冰(表面冰)，而快速流动的河水显然从底部向上结冰(底冰)。高山、低谷、湖底、河底、树木覆盖的坡地、冻土层、沼泽地、冰河、淤泥、河口，以及永久冻土和季节性冻土，都会影响土壤的电阻率。因此，不难发现一个地区可能比另外地区更适合接地。图 29、图 30、图 31 是对岩层土壤结构及地貌变化的基本图解说明。

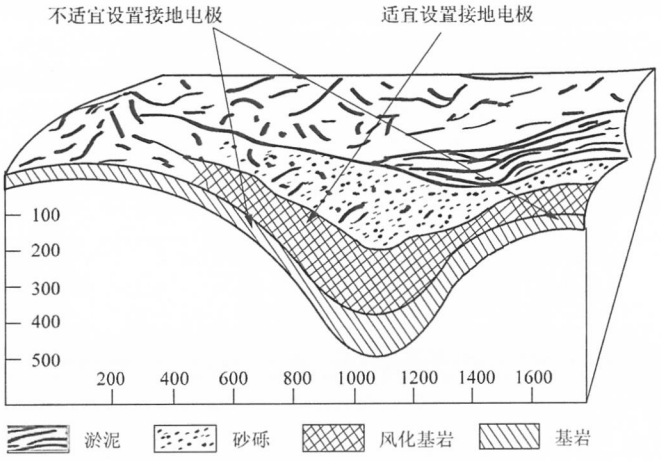


图 29　陆地松散结构的相对深度

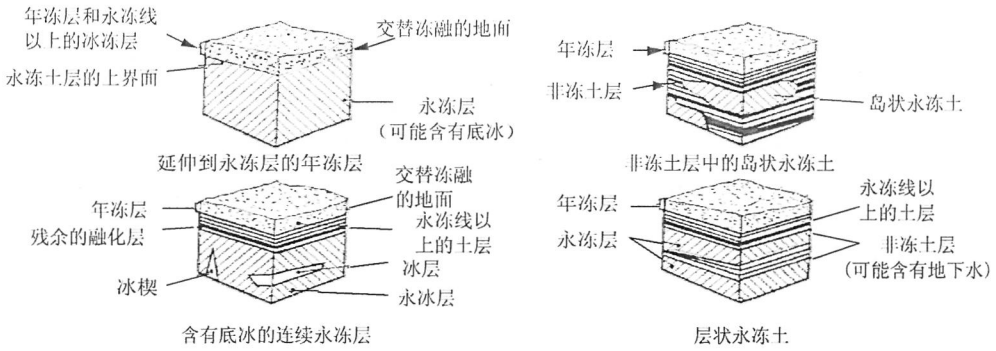


图 30　含有永冻土地面层的典型断面

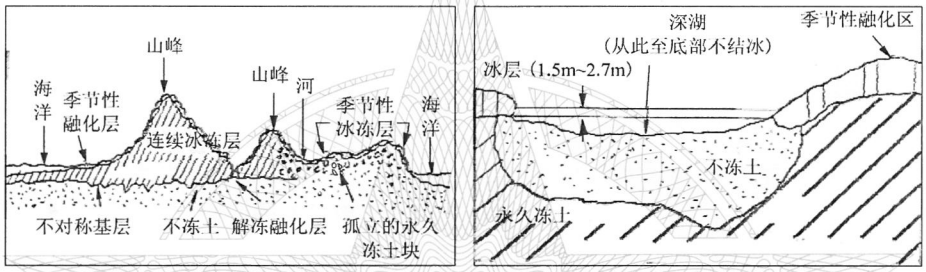


图 31　图解显示底层结构的近似变化

电极的配置也是应予以重视的一个问题。与大地相比较，电缆和架空线系统有较高电导率。如果没有矿物质、可溶盐类和水分，纯净而干燥的土壤可以归入绝缘体，具有中等非良导体的特性。

由表 10 可知，季节性结冰会引起电导率下降。如果冰冻的土壤或大地的电导率极低，那么，设置较大的有效电极才可以减小接地电阻。在高寒地区，可能只有非常浅的融化层，因此设置水平接地棒或导体比设置打入式接地棒更容易，而且还有可能获得最佳接地电阻值。是设置深埋的并联电极或打入式单个接地棒，还是设置水平导线，这主要取决于土壤的类型和经济性。

5.11.2　改善冻土地区的接地

5.11.2.1　概述

土壤冰冻地区的共性是接地场地的电阻率高。然而，常常可以通过选择场地和配置各种不同的电极来改善设施的接地性能，改善程度取决于导电性场地所处位置及其可用性。导电性场地通常是与融化地带或肥沃粘土土壤相毗邻的区域，而接地最困难的地方通常是基岩、砾质土壤，或地表存在低温冰冻层的地区。

在温带地区，通常可以采用向土壤中打入简单垂直电极的方法解决小型野外设施的接地问题。但是，在永冻层地区，上述方法行不通，有如下原因：

a)　打入电极困难；

b)　冰冻的土壤具有高电阻率；

c)　在接地棒周围会形成薄的冰层，从而在接地棒和冻土之间产生高接触电位差。

在一些冻土地区，可以改变接地装置的配置方法，部分解决上述问题，以降低接地电阻。不管怎样，在高寒地区，永冻土的电阻率极高，采用部分改变或处理电极周围土壤的方法不可能有效地改善接地效果，往往需要把场地选在导电性较好的区域才能获得电阻低于几欧姆的低电阻接地，这一点在 5.11.1 已有介绍。

有时出于其他考虑，诸如为靠近水源、电源、道路、现有用房以及建设规划和电磁兼容性要求等，仍然要把场地选在土壤电导率低的地方。这就导致出现这样一种情况，即如果不花费很高的成本并通过

极大的努力，就不能获得低的对地电阻。为在高电阻率的土壤中获得低的或者令人满意的接地电阻，需研究以下补充问题：

a) 地温、土壤类型和不冻水含量的变化对接地装置的性能影响？

b) 土壤类型及其渗透性和饱和度的差异对电极周围土壤中施加的盐溶液有何影响？

c) 使用多个电极降低对地电阻的效果如何？

d) 导电性回填料的长期效果如何？装在电极周围坑中的各种回填料的适宜性如何？

降低对地电阻的主要方法是在敞开式地坑内放置接地棒或电极。坑的直径应大于电极的直径，以便放置电极和使用导电性回填料。坑可以用钻孔法开挖，或者用空心炸药爆炸成型。另一种方法是把一组水平接地棒敷设或打入活性层，这种方法的使用场所受限。

5.11.2.2 电极接地电阻

一根长度为 l(cm)、有效半径为 r_e 的单一电极放置在电阻率为 ρ (Ω·cm)土壤中，其接地电阻 R 由式(96)计算：

$$R=\frac{\rho}{2\pi l}\left[\ln\frac{4l}{r_e}-1\right] \quad \cdots\cdots (96)$$

式(96)可以用来估算一些导电性盐溶液在处理过的回填料外围土壤中的渗透深度。因为回填料是导电的，所以电极半径并不是该金属电极的半径。但是，一开始孔洞直径范围内将被处理过的回填料所填满，这个大的组合电极被称为“有效电极”。在地温不变的条件下，充满冰冻土壤的电极接地电阻，随时间增加而有所下降，这与电极有效半径的增大有关。由于盐的迁移所造成的电极有效半径的增大值可以这样来确定：安装电极时先测出其有效半径，并利用试验电极的接地电阻计算式(96)得出土壤电阻率 ρ。在装配以后，应定期地测量接地电阻，并且可以利用式(97)和前面计算出的土壤电阻率来计算有效电极半径。

$$r_e=\frac{4l}{\exp(1+2\pi lR/\rho)} \quad \cdots\cdots (97)$$

5.11.2.3 装配和测量方法

5.11.2.3.1 电极装配

可以使用专门为冻土层设计的螺旋钻钻孔，孔眼直径为 4cm～90cm，深度很少超过 2m。手动打眼设备包括电动和汽油机钻机，适用于大部分浅的、孔径较小的孔眼。上述两种装置都可以借助于取土样的螺旋钻在冰冻的细颗粒土壤中钻孔，孔径最大可达 11cm。一般车载的螺旋钻可用于在粗颗粒土壤中钻大直径的垂直孔眼。水平电极可以用手动方式推进并打入浅层的季节性解冻层。

还可以用成型炸药来成型垂直孔眼。在冰冻地区，将这类炸药填入接近标准电极长度的钻孔内，便可炸出一个适合于电极安装尺寸的孔洞。也可以使用块状炸药扩大某些已钻成的孔眼的容积。

5.11.2.3.2 回填料

为建立良好的电气接地，降低接触电位是很重要的。冰冻土壤中，在电极周围会结冰，因而产生高接触电阻。冰可能直接在接地棒表面形成，因为接地棒上部暴露在低温空气中。在高寒环境中，向电极周围注入未处理的水，只能收到短期效果。因此，使用低冰点导电性填料就成为实现良好接地和良好对地接触的最佳方法。

可以利用混合盐和当地土壤配置回填料，或者用饱和盐水溶液和回填土配置填料，如图 32 所示。也可以使用不含土壤的填料，因为有时从一些钻成或炸成的孔眼中取回原土壤并非易事，此外在冬季也难以找到不冻的土壤。将吸水性的纸充分浸透盐溶液并压实在电极周围的孔眼内可以代替土壤使用。

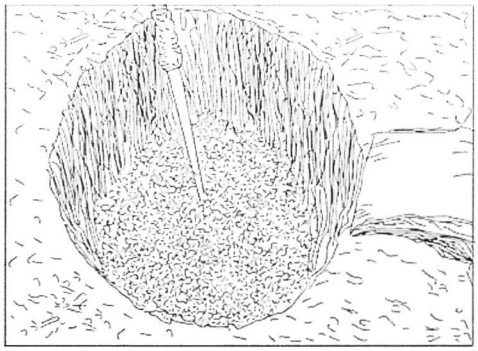


图 32　在电极装配过程中回填盐－土壤混合物

可以通过试验事先测量不同比例的盐－土壤混合物的导电性，以确定填料中盐的添加量。把盐加到泥沙或加到细砂中，以获得 0～20%的含盐量，这是以自然干燥土壤为基础的重量百分数。再把蒸馏水加到盐－土壤混合物中，以获得不同的土壤含水率，直至达到饱和状态。应该把一些土壤压入一个圆形有机玻璃环内，这个有机玻璃环夹紧在两个电极之间，以便在 1kHz 下测定电阻率。图 33 给出了几种体积含水率条件下两种土壤的电阻率与含盐量的关系。含盐量为 1%的盐－土壤混合物，电阻率明显高。在大多数含水率条件下，含盐量超过 5%以后土壤电阻率几乎不受含盐量的影响。因此，填料推荐使用 5%的含盐量(以重量计算)，因为它能构成含盐量最少而导电良好的盐－土混合物。

还可以把盐溶液灌注在浅埋的水平电极周围，以降低结冰期间的接触电阻，这些盐溶液浓度一般可为 50%～100%。图 34 给出了融化活性层中的水平电极配置。

金属电极采用不同回填料的接地电阻示于图 35～图 39，图中电极的具体特性见文献[15]。电极特性随季节呈现出很大的变化，这是由于在融化和冰冻的两种状态下不冻水含量的变化造成的。在一些地区，通过使用导电性填料的方法可以改善融化期间的接地效果，低冰点的填料可降低由于金属电极周围结冰所引起的电极接触电阻。经过一段时间后，填料中的盐很可能扩散到靠近电极回填料的土壤中去，增大该接地电极的有效范围，使电阻值进一步减小。每年都应检查填料，补充由于渗透造成的填料流失，以维持其足够的量。

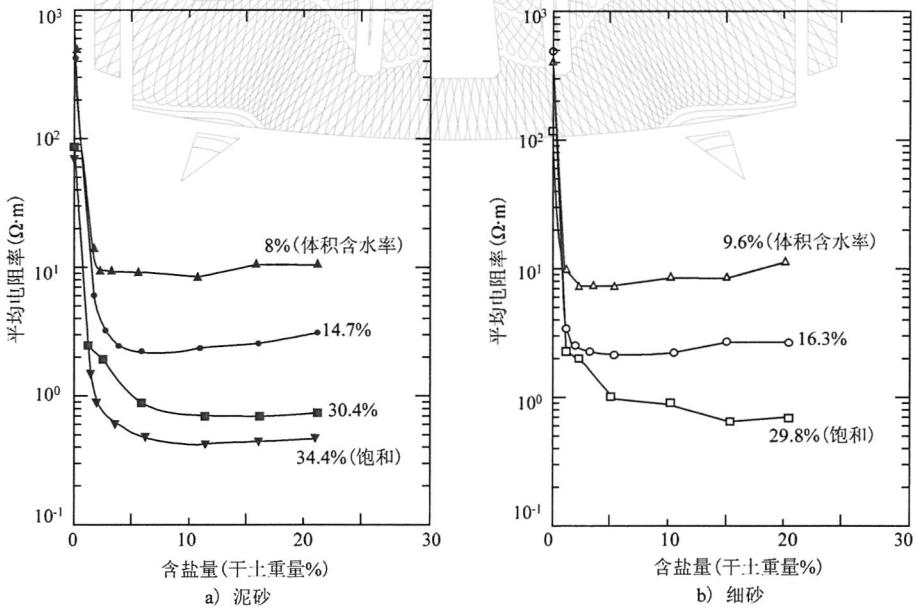


图 33　两种土壤在各种湿度和含盐量时的电阻率测量结果

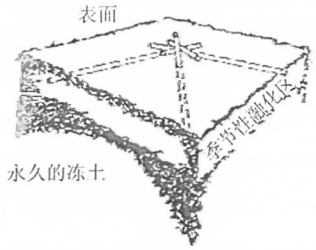


图 34　在融化活性层中水平电极的配置

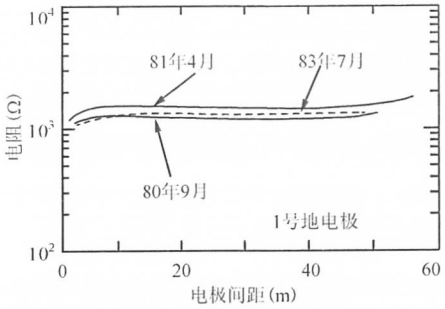


图 35　打入冰冻的肥沃泥沙中的电极接地电阻曲线

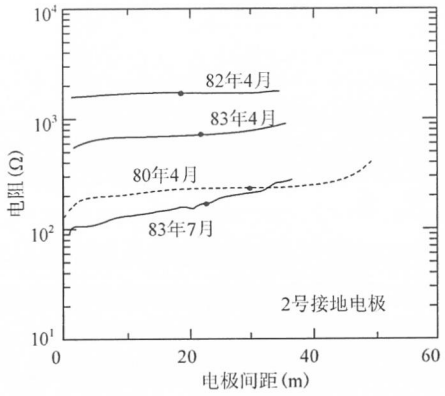


图 36　用饱和泥沙包围的电极接地电阻曲线

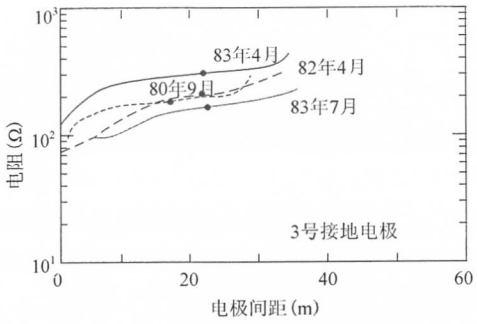


图 37　用水－饱和盐－土壤回填料包围的 3 号电极接地电阻曲线

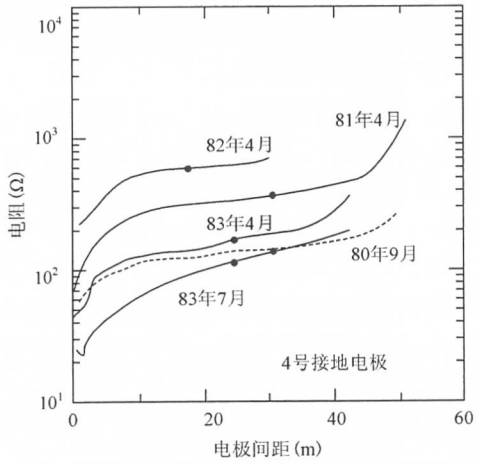


图 38　用水－饱和盐－土壤回填料包围的 4 号电极接地电阻曲线

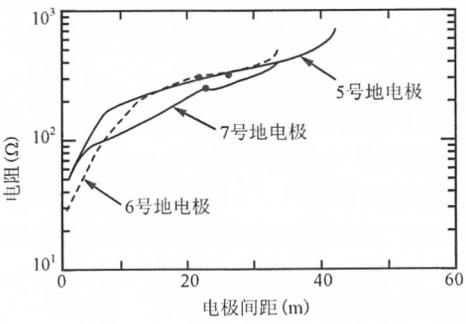


图 39　三个电极放置在用炮眼装药法形成的孔眼内并填满盐水溶液后的接地电阻曲线

6　雷电防护分系统

6.1　雷电现象

与雷电有关的积雨云是巨大、汹涌的气团，它可扩展到大气上层，高达 15km～20km。通过某些方式，这种气团内会产生具有强静电荷分布的区域。这些荷电区之间可形成几百甚至几千兆伏的电场梯度。当电场强度超过空气介电击穿极限时（$\approx 3\times10^{6}$ V/m），则发生闪电，从而使正负电荷获得中和。

电场的测量表明，典型的雷雨云中的电荷分布方式如图 40 所示。负电荷集中在云的下部，而在云的上部则存在着与负电荷相均衡的正电荷。除了这些主要的电荷中心之外，在云的底部还存在一个较小的正电荷区。由于大量的负电荷集中在云的较低部分，所以相对于大地而言，云层呈现负电荷。但是在特别靠近地面的云底部又有较少量的正电荷集中。

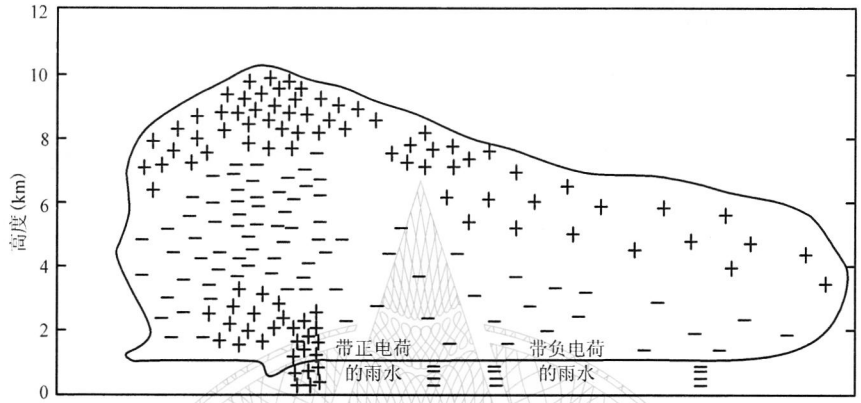


图 40　雷雨云中的电荷分布

在云内荷电区之间可能发生击穿，结果产生云内闪电。同样在各个云块的荷电区之间亦会发生击穿，产生云对云的闪电。云内闪电和云对云闪电，并不会对地面的人员或设备构成直接威胁，因此在设计或实施地面设施雷电防护系统时可不考虑这种威胁。然而，计算表明，由云内闪电及云间闪电放电感应出来的电压，可能会对跨地区的各种电缆和信号及控制设备构成一定的威胁，当设备采用固态器件时尤其严重。

云对地的闪电则是地面设施最应关心的问题之一。如上所述，这种闪电发生在云的电荷中心和大地某一点之间。地面上的这一点可能是平地、水域、山峰、树木、旗杆、输电线、住宅房屋、雷达或通信天线、航空指挥塔台或其他高层建筑。在某一地区，某些设备或物体也许比其他物体更容易遭受雷击；但是，任何物体，不管是人造的还是天然的，都不能认为它们不会受到雷击。

在闪电的电荷平衡过程中要产生强大的电流，这种电流可能会熔融导体、产生火花或加热金属，甚至引起火灾。这种烧蚀或电压应力还可使元件、设备受到损伤或破坏。此外，强电流还会产生远远超过导致人和其他生物死亡的电压。因此，所有雷电防护系统的作用是将这些强大的电流引离敏感的元件，或把这种强大电流所形成的电压梯度降低到安全电平以下。

6.2　雷电的形成

当在一团乌云中形成电荷集中区时，在其电荷中心的邻近区就形成电场，电场达到一定强度时将使空气产生电离。被称为先导流光的一团柱状电离空气开始以大约每小时 160km 的速度向大地移动，在先导流光移动约 30m～45m 后，就产生一种被称为梯级先导的更强烈的放电。这种放电把补充的负电荷注入先导流光周围的区域，并使先导流光能够再推进 30m～45m，而在先导流光推进之后整个循环又重复发生。梯级先导以一系列梯级向大地推进，推进的梯级时间间隔为 50μs 数量级。

在云对地的闪电中，先导流光并不是沿直线向着大地推进，而是通过最容易电离的空气通路窜动，虽然总的方向是向着大地，但是相继发生的先导流光会与原先流光的端部偏离某一个角度，这个偏离的角度颇难预测。因此，放电大约以每一梯级 30m～45m，从不同的角度向大地接近。这种推进方向角度的变化，使整个闪电形成蜿蜒曲折的形状。

在形成一个高度电离化气体柱状团之后，梯级先导的电位基本上与产生该梯级先导的电荷区电位相同。因此，当梯级先导接近大地时，大地和梯级先导端部之间的电位梯度随即增大。增大的电压梯度又进一步促使大地与梯级先导端部之间的空气击穿。

最终的梯级先导桥接向下推进的柱状气团和大地之间的气隙，也可以桥接向下推进的柱状气团和大

地延伸物之间的气隙，如树木、建筑物或与大地等电位的金属结构物之间的气隙。当梯级先导向大地推进时，在此梯级先导下方的整个地面区域聚集正电荷，正电荷量等于云端上的负电荷量。梯级先导一旦与大地(或大地延伸物之一)接触，在大地上所积聚的正电荷就通过由梯级先导所建立起来的电离化柱状气团迅速向上移动，以中和云中的大量负电荷。这种反向电流构成通常所谓的雷击现象。如果云中尚存在附加的电荷团，这些电荷团可能通过原先雷击所建立的电离通道继续放电。因此，连续的直窜先导将使其余的电荷团通过这条通路冲向大地。直窜先导一旦到达大地，则另一个正电荷的回击就流向通道，以中和云里的再生电荷。这种循环可能要重复几次，直到把云中相继产生的电荷全部中和为止。

6.3 结构物高度的影响

对地闪电通常是由云中的先导流光开始的。当电荷的梯级先导向地面推进时，地面上的电压梯度也在增大。最后电压变得足够高，以致感应出上行的梯级先导。在整个平坦开阔地带内，在上行梯级先导与下行梯级先导结合、开始回击之前，上行梯级先导的长度不会超过几米。然而从地面延伸的结构物或其他物体会把较强的电场集中在其顶端。接着，就产生上行梯级先导。此时，与下行梯级先导尚有一段距离，在两者相遇之前，上行梯级先导可能有几百米之长。对于很高的建筑物来说，甚至在云中开始形成下行梯级先导之前，它就可能开始形成上行的梯级先导，这种事件通常被称之为激发闪电。对于高度小于 150m 的结构物来说，激发闪电并不是很普遍的；当高度超过这个界限时，激发闪电的比例将迅速增加。

6.4 雷击的可能性

结构物遭受雷击的总次数主要与当地雷暴雨的活动有关。地区的雷雨活动情况，可以利用图 41 所示的世界年平均雷暴日地图来预测[17]。此图给出了从 1995 年 4 月到 2003 年 2 月的世界年平均雷暴日的信息。附录 A 给出了根据 1956 年出版的文献[18]和[19]绘制的世界平均雷暴日等势线图以及 2005 年发布的全国主要城市平均雷暴日数信息。图 42 为国家气象信息中心 2005 年发布的全国年平均雷暴日分布图。

一个雷暴日定义为可以听到雷声的当地日历日，不管雷电发生在附近还是远处。对于特定地点的观察者，可以看到闪电或听到雷声的平均距离约为 10km。所以，一个雷暴日就意味着在观察者所处位置周围约三百平方公里的地区内至少发生过一次闪电。在观察者所处位置附近所发生的实际雷击次数，可能明显大于或小于所预测的雷暴日的数字，因为前者取决于具体的雷暴持续时间和强度。

不管所预计雷击的相对误差如何，对于以雷电等级为基础的具体对象来说，雷暴日仍是有关雷击事件必不可少的信息，因为雷暴日图是根据多年的实际情况记录下来的，其主要价值就在于可以提供定量的信息。在对是否需要进行雷电防护存在疑虑的情况下，该资料可以用来帮助确定是否应提供雷电防护。例如，某一具体设施对于飞机安全来说可能并不是关键的，但没有这种设施可能会延误飞机计划。在雷雨频繁的地区，在没有雷电防护的场区停止飞行的次数可高达不能接受的地步；而在雷雨很少的地区，由雷电所引起的停飞次数也许每隔几年才出现一次，这与常规维修的停飞相比是相当少的。

每单位地表面面积的闪电次数，即闪电密度，将随着每年的雷暴日天数的增加而增加，尽管两者之间并不成线性关系。经验数据表明，每年每平方公里的闪电次数σ_y可由式(98)合理地进行预测[20]：

$$\sigma_y = 0.007 T_Y^{\ 2} \quad \cdots\cdots (98)$$

式中：

T_Y ——每年的雷暴日数。

对地闪电次数除与每单位面积的总闪电次数相关外，还随地理纬度增加而增加[21]。地理纬度(∧)对对地闪电次数的影响系数可以由式(99)表示为[22]：

$$P = 0.1 \times [1 + (\wedge / 30^\circ)^2] \quad \cdots\cdots (99)$$

因此，在某一给定地区的对地闪电密度σ_{yq}，即每年每平方公里对地闪电的次数由式(100)给出：

$$\sigma_{yq} = P\sigma_y \quad \cdots\cdots (100)$$

对于某一场地，为了计算 σ_{yq}，首先要从图 41 和图 42 雷暴日地图上确定 T_Y。利用这个 T_Y 值，按式(98)计算闪电密度。然后根据场地的地理纬度，用式(99)计算 P 值。最后用式(100)确定对地闪电密度。

注：数据统计时间为 1995 年 4 月至 2003 年 2 月。

图 41　世界年平均雷暴日

6.5　吸引面积

6.5.1　概述

吸引面积的概念反映下述现象，即：一个高出周围物体的对象，它受到的雷击可能比按实际横截面积所预估的雷击次数要多。例如，诸如旗杆、灯塔、天线等细长的金属结构物，相对于周围区域，尽管它们的横截面积非常小，但大量的数据表明，这类结构物明显地吸引雷电。

6.5.2　高度低于 100m 的结构物

对高度低于 100m 的结构物而言，虽然该高度并不会激发闪电，但是雷击的次数却按照结构物高度 h 的某种幂次增加。结构物的吸引半径 r_a 按式(101)计算[20]：

$$r_a = 80\sqrt{h}(e^{-0.02h} - e^{-0.05h}) + 400(1 - e^{-0.0001h^2}) \quad \cdots\cdots (101)$$

式中：

r_a ——吸引半径，m；

h ——结构物高度，m。

对于一个 10m 高的结构物，式(101)给出的吸引半径为 57.7m；同理，100m 高的结构物的吸引半径为 356m。其吸引面积 S_a 为 πr_a^2。因此，一个 10m 高的结构物 S_a 约为 0.01km^2，而 100m 高的结构物吸引面积为 0.4km^2。

式(101)适用于描述高度不足以达到激发闪电的结构物上的雷击次数。对于更高的结构物，应将式(102)所示的倍乘因子[20]加到式(101)中：

$$F_T = 1 + 2^{(9-1500/h)} \quad \cdots\cdots (102)$$

经验数据表明，将式(102)应用到高于 400m 的结构物时，计算的结果是粗略的。但由于接近这个高度的结构物并不是主要关心的，所以式(101)和式(102)可满足大多数设计应用。

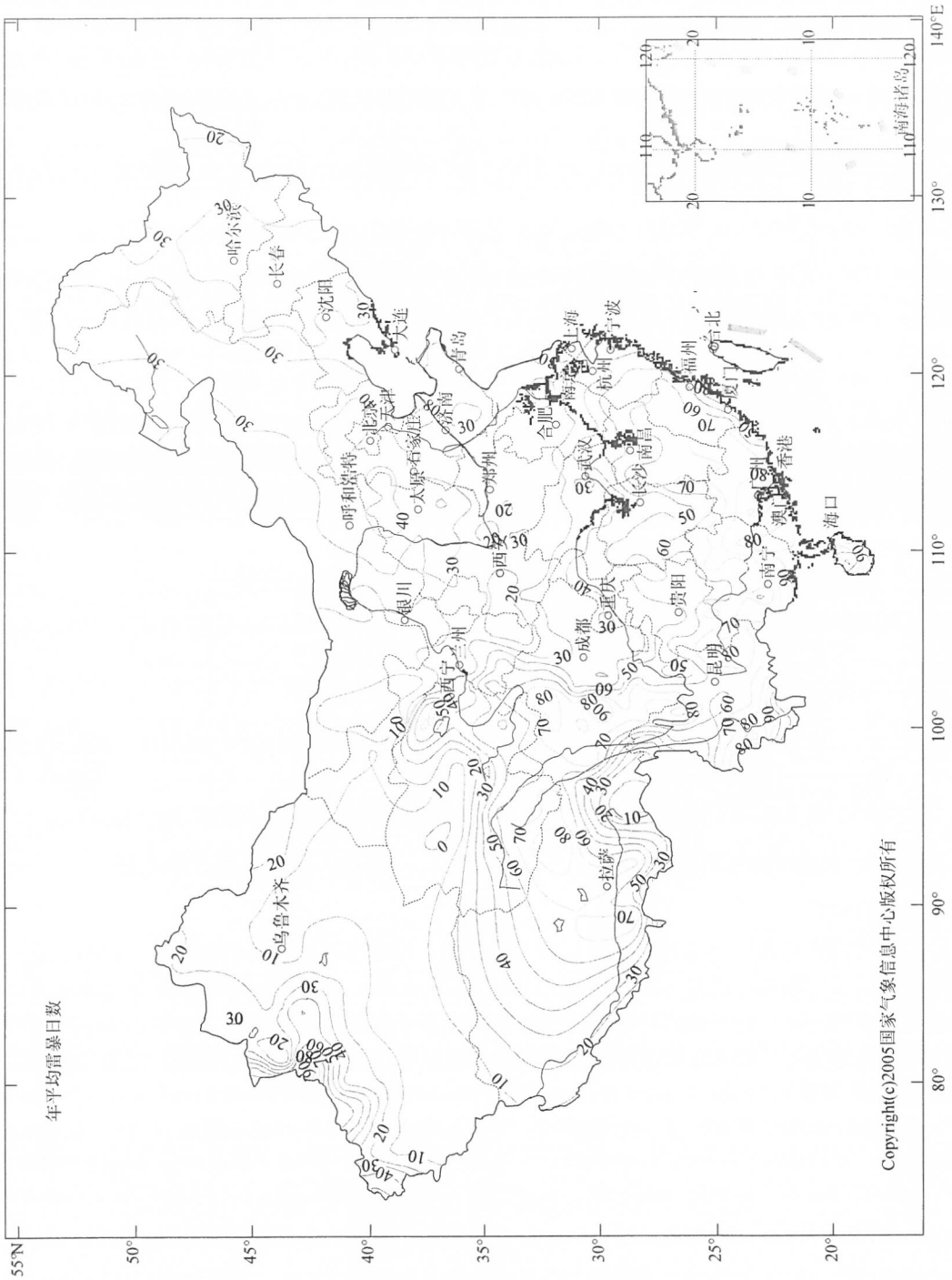


图 42　全国年平均雷暴日分布图

对于一般大型平顶建筑物来说，当它的高度不超过中等树木的顶部时，它的吸引面积实际上就是其屋顶的面积(假设该屋顶覆盖整个结构物)。如果建筑物有几层楼高，以致使它明显地高出其所在地带的其他建筑物，那么它的有效吸引面积是它的屋顶面积加上屋顶以外的那部分吸引面积。图 43 表示了一个长为 l，宽为 w 的矩形结构物吸引面积的计算方法。屋顶面积为 $l\times w$。由建筑物的高度产生的附加吸引面积由下述方法很容易确定，即：建筑物的四个角所造成的吸引面积等于半径为 r_a 的圆；结构物两端(尺寸为 w)所造成的吸引面积为 $2wr_a$；两边所造成的吸引面积为 $2lr_a$。因此，总的吸引面积是屋顶面积与附加面积之和，按式(103)计算：

$$S_a = wl + \pi r_a^{\,2} + 2r_a(l + w) \cdots\cdots (103)$$

由图 44 可见，用来计算高结构物吸引面积的高度应为结构物高出地平面的有效高度，也就是说该建筑物不在此地时，大地电荷会上升到的高度。在开阔水平地带，高度 h 应是从平地到屋顶的整个高度。

可以预计，某一结构物遭受雷击的次数，等于对地闪电密度与该结构物吸引面积的乘积。例如：为预测一个位于郑州附近的、每边长为 100m 的平顶结构物遭受雷击的相对可能性，可以从图 42 中首先确定 T_y 约为每年 30 个雷暴日；由式(98)确定的闪电密度为 6.3 次/平方公里/年；该地的纬度约为 35°；由式(99)可算出对地闪电的比例为 23.6%。因此，可以预料对地闪电约为 1.5 次/平方公里/年。在此结构物的面积(0.01km^2)之内，平均每年仅有 0.015 次雷击，或者说在某一年内 66 次雷击中有一次落到此结构物上。

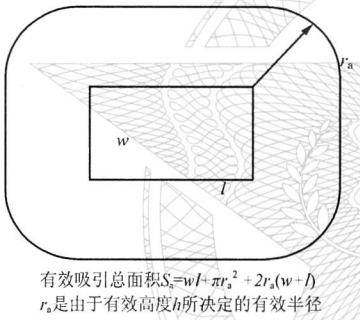


图 43　矩形结构物的吸引面积

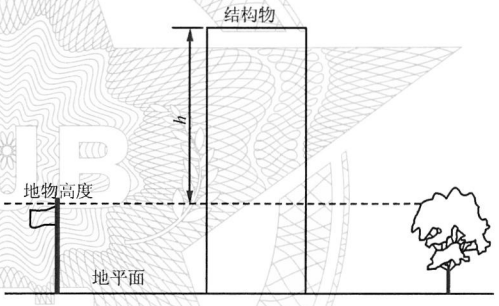


图 44　结构物的有效高度

6.5.3　保护圆锥区

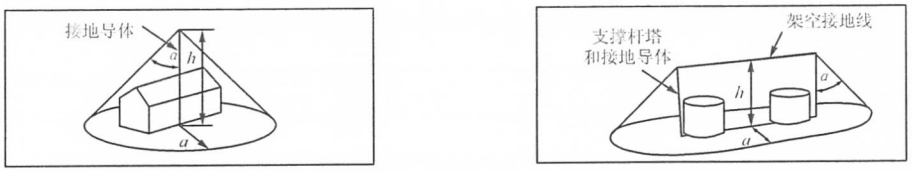
高的结构物或物体具有将雷电吸引到其自身的能力，可用来保护较矮的物体或结构物。实际上，一个较高的物体可在它的周围建立一个保护区，在这个保护区内，其他结构物或物体可免受直接雷击。当周围物体的高度增高时，高的物体对这些较矮的物体所形成保护程度将减小。同样，当高结构物与矮结构物之间的距离增大时，高的结构物所提供的保护作用亦减小。接闪器导体周围附近的受保护空间称为保护区(或保护圆锥区)。

由一个垂直接地棒或杆塔所提供的保护区，习惯上规定为由一个圆锥体所包含的空间，圆锥体的轴线与杆塔重合，而圆锥的顶点就是杆塔的端点，如图 45 a)所示。同样，由水平架空接地导线所提供的保护区，规定为三棱体，此三棱体的上边缘则是此架空导线，如图 45 b)所示。在这两种情况下，保护区(或保护圆锥区)用水平保护距离 a 与杆塔或架空导线的高度 h 之比表示。这个比值是保护角 α 的正切。保护角定义为圆锥体的表面和通过圆锥体顶点的垂直线之间的角度，或三棱体的侧边和包含水平导线的垂直平面之间的角度。某些推荐的保护区及其保护角如图 46 表示。

对于重要场合，应提供 1:1 的保护区(α=45°)，而对于不太重要的场合则允许采用 2:1 的保护区(α=63°)。但是，对于贮存易爆或高可燃物品的结构物来说，其保护角不宜超过 30°。

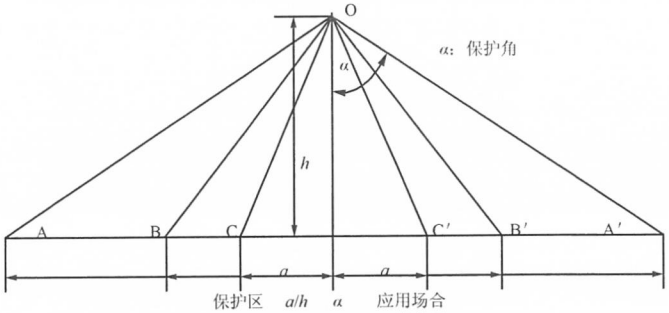
虽然现有的 1:1 的保护区并不能绝对消除雷击危险，但是记录到的危害实例很少。因此除了与贮存燃料有关的设施之外，对于所有的其他设施，可安全地以 1:1 的保护区作为雷电防护系统的设计基础。如果使用多根接地棒或多条架空接地导线，则总的保护区稍大于单独考虑这些接地棒或接地导线时的 1:1 保护区的和。对于相邻的结构物来说，结构物之间的区域可以采用 2:1 的保护区。

具有平顶或缓坡顶的大型结构物，并不适于直接采用 1:1 或 2:1 保护区的原理。在大型建筑物中，即使只建立 2:1 的保护覆盖面，也需要架设特别高的接闪器。然而，实践表明，提供有效保护并不需要架设极高的接闪器。接闪器一般只需高出受保护物体 25cm～90cm。



a) 高度为 h 的垂直接地导体所提供的圆锥保护区　　b) 高度为 h 的水平架空接地线所提供的保护区

图 45　由垂直杆塔和水平架空电线所提供的保护区



保护区	a/h	α	应用场合
AOA′	2/1	63	一般地区
BOB′	1/1	45	重要地区
COC′	0.58/1	38	关键结构物

图 46　某些常用的保护角

6.6　雷电效应

6.6.1　闪电的参数

在一次雷击闪电的短暂时间内，会发生几次放电。图 47 示意给出了一次雷击的一系列过程。其初始放电通路在 50μs 之内建立，形成首次回击。首次回击之后会有约 1kA 的过渡电流，其持续时间为几毫秒。后续回击的时间间隔典型值为 50ms～60ms。后续回击期间可能出现约 100A 的持续电流，该电流持续几毫秒或至下一个后续回击开始为止。

雷击闪电包含着云层和大地之间大量的电荷传送。典型的闪电可传送 15C～20C(库仑)的电荷量(1 库仑等于 6.24×10^{18} 个电子所带电荷量)，而某些闪电包含高达 400C 的电荷传送。有人曾估算过每次雷击闪电的能量值高达 10^8J，表 11 总结了雷电参数的数值范围[20]。

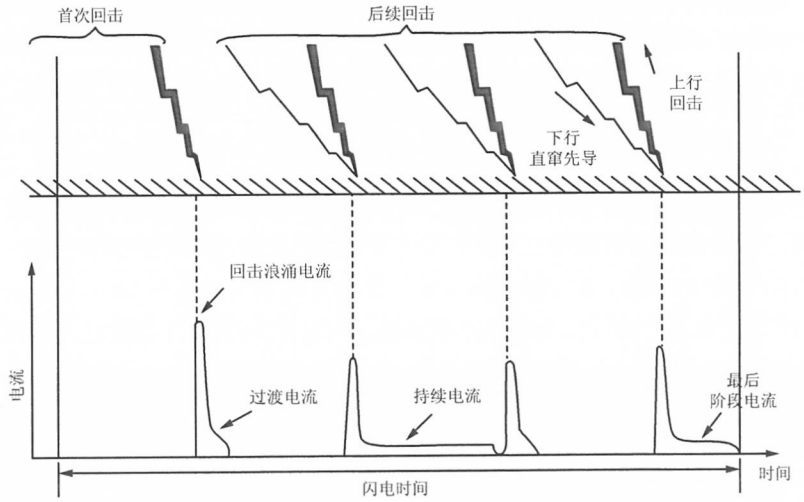


图 47　一次对地闪电时间内发生的电流放电及其过程示意图

表 11　雷电参数的数值范围

参数	最小值	典型值	最大值
每次闪电回击次数	1	2～4	26
闪电持续时间(s)	0.03	0.2	2
回击时间间隔(ms)	3	40～60	100
每次回击的峰值电流(kA)	1	10～20	250
每次闪电电荷量(C)	1	15～20	400
到达峰值电流的时间(μs)	＜0.5	1.5～2	30
上升速率(kA/μs)	＜1	20	210
到达半峰值的时间(μs)	10	40～50	250
持续电流的持续时间(ms)	50	150	500
持续电流峰值(A)	30	150	1600
持续电流的电荷量(C)	3	25	330

6.6.2　机械和热效应

上升时间快、峰值高的雷击电流，可产生严重的机械、热及电效应。这种电流在放电通路上对物体所引起的损坏程度与该物体所传导的功率密切相关，例如金属通常可接受放电而丝毫不受损坏。在大多数情况下，甚至像电话线和输电电缆之类的细长金属导体，也可以传输这种电流而不被熔断(熔化)，但不包括电流进入或流出的点(在这些点上可能发生严重的损坏)。然而，非常高的峰值电流(＞40kA)和大于 200C 的强烈放电，可在实心金属板上熔穿或烧出一些孔洞。这种烧蚀效应，对于典型的建筑物或结构物来说，通常并不是主要关心的问题。因为，只要配置一个适当的防护系统，这种效应仅在接闪器尖端造成很小的损坏或在载流的电缆上造成一个小熔融区。在飞机发生闪电时这种效应的影响是更令人关心的。因为这种烧蚀可以穿透机身而引起机舱失压或穿透燃油箱点着燃油。这种穿透或熔穿也会对地面上外露的易挥发气体或燃料的储藏罐构成威胁。

由于在回击期间电流持续时间较长，这种电流往往会由于熔化或点燃固体材料而造成危害。相反，短时间的大电流峰值则通过电磁应力造成金属零件的破裂或弯曲，这种电磁力与瞬时电流的平方成正比。虽然存在机械力的潜在危险，但在大多数情况下，金属导体内由机械力所引起的损坏通常是次要的。然而，由于这些机械力的存在，应把接闪器、引下线和其他防护系统的元件可靠地紧固。

另一方面，当绝缘或半绝缘的材料遭受雷击时，可能会发生爆炸而造成严重损坏。例如，不管是干枯的还是活着的树木，出现树皮开裂或剥落的情况很多，并且这种损坏可能延伸到地下树根。对于未加保护的其他木质结构物，例如旗杆、电灯杆、电线杆和电话杆，也可能会发生类似的损坏。当雷电击中木质建筑物时，冲击电流所寻找的最低阻抗通路可能是导线或水管。为了到达这些金属通路，放电电流往往应穿越某些木质障碍。在穿越这些障碍时，通常会引起更大范围的爆炸损坏。

砖墙、混凝土、大理石或其他砖石材料往往在放电电流通过之处被炸碎或断裂松动。这种损坏可能发生在埋有型钢支撑件或钢筋的混凝土处，或在包覆金属保护层的砖墙或大理石处，甚至会发生在没有适当防护系统的结构物中。爆炸效应能以相当大的作用力击飞一些材料(此力足以把相当大块的材料抛出几米远)。这种爆炸力的一种解释是由于木材或砖石材料中的水分发生瞬时气化造成的。

6.6.3　电效应

6.6.3.1　概述

雷电对建筑物和结构物放电，或靠近它们放电，往往会引起电气和电子设备的损坏。导体的熔化和烧蚀发生在雷击点上。由快速上升的大幅值电流脉冲所形成(感应)的电压，往往高得足以击穿绝缘层或造成人员伤亡，并引起元器件失效。这些电压是由下列原因产生的：

a) 雷电脉冲传播至电力线、信号线或架空接地线时，在结构件与引下线或接地线的连接电阻上产生压降；

b) 磁感应；

c) 容性耦合。

在电力、信号和控制电路中的雷电浪涌，往往是由这三种因素造成的。

6.6.3.2 导体阻抗的影响

由于雷电放电所产生的电流脉冲具有快速上升(1μs～2μs)和大幅值(10kA～20kA)的特性，所以即使是相当短的导体，其电感和电阻就会造成极高的电压。这些电压往往超过空气或其他绝缘材料的击穿电压，引起对其他导体的闪络或绝缘层的击穿。在一根 30m 长(电阻 $2.88\times10^{-4}\ \Omega/m$)的引下线上，通过 20kA 电流时所产生的阻性欧姆压降按式(104)计算：

$$V=2\times10^{4}\times2.88\times10^{-4}\times30=173\text{V} \quad \cdots\cdots(104)$$

此电压不足以引起闪络或对人身安全构成严重威胁。

对于一根直径为 0.894cm、长度为 30m 的直的铜引下线，其电感可由式(105)确定(见 8.2.2.3)：

$$L=0.002l\left[2.303\lg\left(\frac{4l}{d}\right)-0.75\right] \quad \cdots\cdots(105)$$

式中：

L ——总电感量，μH；

l ——长度，cm；

d ——直径，cm。

30m 长的导线，将呈现出 52.5μH 的电感量。

在一个电感两端所产生的电压 V，由式(106)确定：

$$V=L\frac{\mathrm{d}i}{\mathrm{d}t} \quad \cdots\cdots(106)$$

式中：

L ——电感，H；

$\mathrm{d}i/\mathrm{d}t$ ——流过电感器的电流的变化速率，A/s。

从表 11 中可以看出，典型雷击电流的上升速率为 20kA/μs，此值即对应于 $\mathrm{d}i/\mathrm{d}t$ 值为 2×10^{10} A/s。因此，放电脉冲通过 30m 长的引下线所产生的电压按式(107)计算为：

$$V=5.25\times10^{-5}\times2\times10^{10}=1.05\times10^{6}\text{ V} \quad \cdots\cdots(107)$$

虽然，此电压的持续时间一般小于 2μs，但由于电压幅值很高，足以对远离引下线 35cm 处的导体引起闪络。这就是要求在距离接闪器引下线 1.8m 范围之内的金属物体应与引下线搭接的原因。

6.6.3.3 感应电压效应

除了上述阻抗效应之外，与雷电放电通路并无直接接触的电路，即使排除了闪络连接，仍可能损坏。由于电流大且变化速率很快，在邻近的导体上会产生电磁感应电压。试验和分析数据表明，由此感应出来的浪涌电压，很容易超过许多元件，特别是固态器件所允许的电平。浪涌电压可以由下列方式感应出来，即：雷电对埋设的长电缆感应耦合，雷电电流流入引下线或结构件，或者云对云放电的电流与地上或埋地的长电缆敷设方向平行。

以一个平行于雷电引下线的单匝环路为例，如图 48 所示。在环路中磁感应所产生的电压 V 与引下线中的电流变化所产生的磁通变化率有关(见 9.2.3.2)。环路中的感应电压，取决于环路的尺寸(l, r_2-r_1)、

环路与引下线的距离以及放电电流的变化速率(di/dt)。图 49 是单位长度的归一化电压曲线图，是不同宽度的单匝环路中所感应的电压。

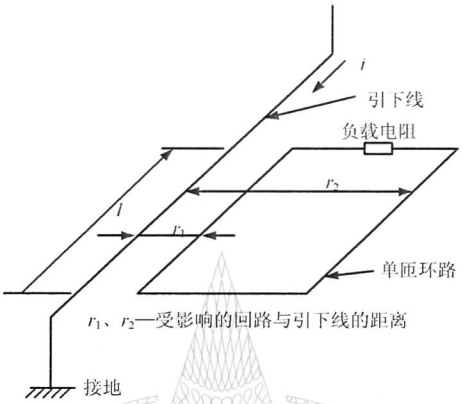


图 48　雷电能量与邻近电路的感性耦合

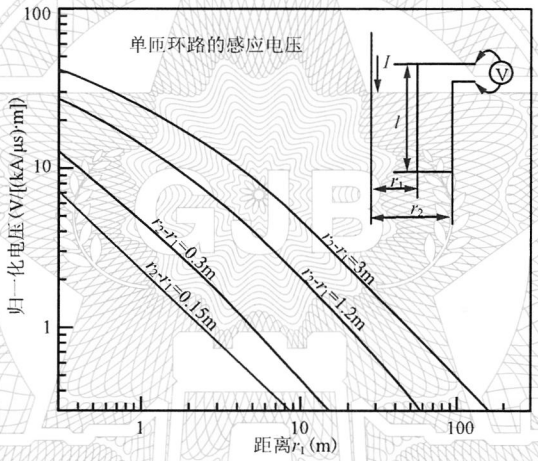


图 49　单匝环路中由雷电电流所感应的归一化电压

上述结果表明，可以采取措施减小雷电放电通过引下线时在信号线路、控制电路和输电线中所感应的电压。由于无法控制 di/dt，因为它是由放电自身所决定的，因此，应靠控制 l、r_1 和 r_2 来减小 V。变量 l 是环路平行于放电路径的走线长度，通过控制 l，可以把所感应的电压 V 减小。端接在器件或设备中的电缆对浪涌电压是敏感的，因此，这些电缆不应与承载雷电放电电流的导体平行敷设。如果平行敷设不可避免，由图 49 可知，应尽可能增大环路与雷电电流通路之间的距离 r_1。

在图 49 中，应尽可能使 r_2 减去 r_1 的值接近于零，即应减小受感应的环路导体之间的距离。减小该距离的简便方法是把两根导体扭绞在一起，这样就使各个导体与放电导体的距离相同。

另一个保护措施是进行磁屏蔽，把受感应环路的磁通密度降低。因属近场耦合，所以应采用高磁导率的屏蔽材料，如铁或铁镍合金等。对于屏蔽雷电所产生的场，钢管或铸铁管道比铝或其他有色金属材料更有效。

6.6.3.4　容性耦合电压

在雷电放电之前，电荷将慢慢地聚集在带电云层下方的地面物体上。这种电荷的集聚速度很慢，因而接地导体相对于大地的电位并没有明显的变化，甚至导体的接地阻抗很高的情况下亦是如此。当雷击点为结构物的顶端或如图 50 所示的与大地相接触的其他点时，所有邻近接地物体的电荷将突然重新分布。电荷重新分布产生的电流在接地物体的接地导体中流动时，将在此导体阻抗上产生电压降。

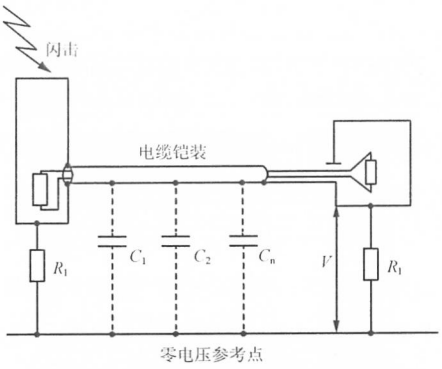


图 50　雷电能量的容性耦合

参考图 50 可知，导电物体和地之间的电压可以式(108)确定：

$$V=\frac{Q}{C}\exp\left(-\frac{t}{RC}\right) \quad \cdots\cdots(108)$$

式中：

Q ——贮存的电荷量，C；

C ——对地总电容量，F；

t ——从发生雷电起所经历的时间，s；

R ——有效接地电阻，Ω。

式(108)表明，如果 RC 的乘积很小，指数项将很大(时间 t 为 10μs 数量级时)。因此，对于一般的雷击来说，任何良好接地的物体，其容性感应电压是十分小的。

6.6.3.5　接地电阻

如图 51 所示的设施可能具有多条对地电气通路。例如，在变压器杆处或在建筑物 1 的供电引入处把一根接地棒打入大地，这根接地棒的接地电阻 R_{G1} 可能高达 25Ω，但仍然符合电气线路和设备架设安装规程的要求。而公用设施的金属管道，如自来水管，则往往呈现出相当低的接地电阻(标以 R_{G2})。在高电阻率的土壤中，公用设施管道之间的有效接触点可能离开设施相当的距离。经验数据表明，水管所呈现的接地电阻的数量级约为 1Ω～3Ω。如果电气接地点不与水管搭接，配电系统遭受雷击时，在接地点与公用设施的管道之间将产生一个很高的电位差，此电位差可能在电气接地点(包括设备机柜和建筑物的结构件)与公用设施的管道之间引起电弧，对人身安全构成一定的危险，因为这时在设备及建筑物的地与管道之间会形成高压。正是由于这种原因，同时也是为了防止当电力系统发生故障时出现类似的危险，要求将电气安全接地系统与建筑物的金属水管系统搭接。

如果 R_{G1} 为 25Ω，而 R_{G2} 仅有 1Ω左右，那么，遭受雷击时架空接地线的电位可能很容易变得足够高，以致在变压器绕组和绝缘子之间产生电弧。这是因为低压的次级绕组对地呈现出一个低阻抗，是雷击放电的最好通路。

这种典型的雷电威胁可以依靠下列措施来降低：

a)　把 R_{G1} 降低至接近 R_{G2} 的数值；

b)　在变压器中装配适当的浪涌保护装置，以便使电力导体和接地线之间，以及初级绕组和次级绕组之间的电位差保持在变电器的电压额定值之内；

c)　用截面积为 54mm^2 或更大的埋设铜电缆将雷电接地棒与大地电极分系统(其中包括水管和公用设施管道在内)互连，如图 51 中的虚线所示。

把建筑物的接地电极和变压器支撑杆电极搭接形成一个有效的大地接地点，并不能消除雷电对两个建筑物之间埋地电缆的威胁。如图 51 所示，电缆的屏蔽层是连至机柜的，也就是说连至建筑物的地。在遭受雷击时，建筑物 1 和其电力系统的电位将高于建筑物 2 的电位。即使两个建筑物之间的距离仅有几米，电缆屏蔽层的电感会使电缆呈现高阻抗，而这种高阻抗使两个建筑物之间产生有害的电位差。另外，如果电缆的屏蔽层对地绝缘(这是通常的情况)，那么电缆屏蔽层对地的电位可能会变得足够高，以

致超过绝缘层的击穿电压。

现在假设建筑物 1 有一个大地电极分系统，此分系统包括接地棒，接地棒又与对地具有 3Ω 纯电阻的供水管道相连。在一次 20kA 的雷电放电情况下，相对于建筑物 2 及非紧挨建筑物 1 的那部分大地所建立的电压会上升至 60kV。在建筑物 1 中，电缆屏蔽层的电压亦将随着建筑物的电压上升而上升。此电压脉冲将沿着电缆推进，相继把屏蔽层的电位(相对于周围大地)升到 60kV。这么高的电压会引起绝缘层的击穿。

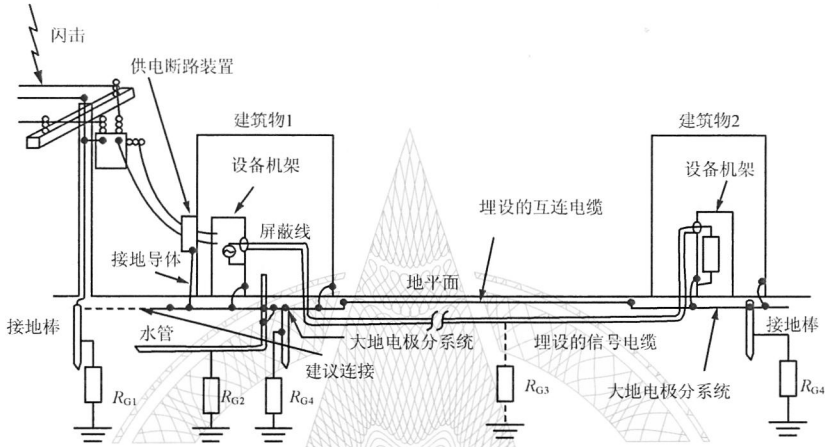


图 51　雷电能量通过互联装置的耦合

雷电脉冲沿着电缆行进时，其幅值会因电缆的电阻和介质损耗而降低。但是，该脉冲的幅值仍然足以损坏建筑物 2 中终端设备的电路元件。为了减小这种危害，通常应在这种电缆上配置与终端元件和附件相配套的浪涌保护器。在 15.3.3.5 中列出了有关浪涌保护器的详细资料。

在雷击时，在雷电放电电流流入接地电极附近的地面上，过高的电压梯度会对人身安全构成一定的威胁。在均一土质的土壤中，电流将快速地离开电极，电流密度在电极附近很高，并随着离开电极距离的增大而迅速降低。在电阻率均匀的土壤中，在离电极距离不同的两点之间存在着一个足够大的电压梯度。图 52 说明了这种电压变化的特点，并标出了在此范围行走(或站立)的人员可能遇到的危险。跨步距离上的电压差可能足以置人于死地。正如图 52 指出，其危险的程度取决于雷击电流的幅度、大地电极的接地电阻以及离接地电极的距离。虽然对雷击电流无法实行控制，但还是可以通过降低公共接地电阻和 5.8.1.4 所讨论的跨步电压降低方法降低这种危害。

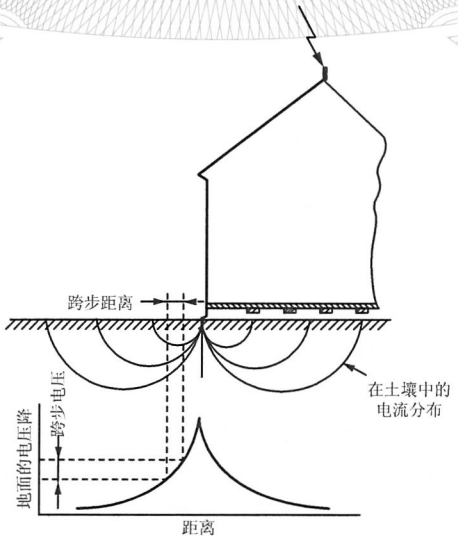


图 52　雷电感应电压在地面形成的电压梯度

6.7 基本防护要求

6.7.1 要求

为了有效保护诸如建筑物、杆塔或类似支撑物的结构物免受雷电损坏，应满足下列要求：

a) 应安装一个具有适当机械强度和导电性能且耐受雷电冲击的接闪器，用以拦截雷电放电，以免这种放电击穿结构物的非导电外罩，或防止这种放电端击中天线、照明装置、变压器或其他类似的易损、易坏器件上；

b) 从接闪器至大地之间应提供一条低阻抗的通路；

c) 放电通路和大地之间的连接应是低阻的。

6.7.2 措施

以上要求可以由下列措施之一来实现：

a) 把接闪器、屋顶导体和引下线牢固地互连成一个整体，以便获得一条最短的、实际可行的对地通路。

b) 建一个独立安装的防护系统，例如，一个用作接闪杆的金属杆及其引下线；或一根架空导体，并在其两端(必要时还可以在中间)用引下线连接至大地接地电极。具体的设计方法见第 15 章、第 16 章。

6.8 防护要求的确定

6.8.1 概述

是否需要雷电防护或需要防护到什么程度，应在分析结构物所处的地理位置以及结构物对整个设施使命中承担任务的相对重要性之后作出。当结构物中装有诸如航空指挥塔台、雷达装置、导航设备和通信中心等承担重要工作使命的部件时，该结构物就应进行防护。然而，并非每个建筑物或结构物都需要配置雷电防护系统，例如主要用来贮存非易燃性材料的建筑物。

在确定某一结构物或有关的综合系统是否应该装配雷电防护系统时，要考虑以下三个因素：

a) 雷击的可能性；

b) 结构类型；

c) 设施性质。

6.8.2 雷击的可能性

一个特定的结构物受雷击的相对可能性，与雷暴等级(即当地雷电活动情况)、结构物的有效高度、以及结构物的吸引面积等情况有关。平均雷电活动可以由图 41 所示的世界年平均雷暴日图确定。然后，利用 6.4 的方法，估算出结构物遭受雷击的频度。估算结果是确定雷电防护要求的输入之一。

6.8.3 结构类型

有金属外层的钢架建筑物具有很强的防御雷电损坏的固有能力，钢塔同样具有很强的抵御结构损坏的能力。对于这类建筑物，也许仅需要对布置在高度暴露位置的非常关键的设施进行附加防护。具有非导电性、非可燃外层(如砖块或其他砖石建筑等)的钢架建筑物也具有很好的雷电防护能力。其最大危险是由外层流向内部结构钢架的雷击电流击碎外层的砖石块。由接闪器、引下线和钢架支撑柱体互连构成的防护系统，足以防止这类结构的损坏。

由非导电材料，如木材、水泥板或人造材料构成的建筑物，最容易受到破坏。为了防止由这类材料构成的建筑物被雷电损坏，需要一个完整的辅助保护系统。

6.8.4 设施性质

如果设施遭受一次雷击就会对结构物内的人员造成生命威胁，则应提供可靠、全面的雷电防护，即使在低雷暴活动的地区亦应如此。另一种极端的情况是，用来贮存非易燃或非爆炸物体的建筑物的雷电防护要求是值得怀疑的，除非建筑物所贮存的物品对于设备的工作是关键性的，而建筑物通常又是外露的。介于这两种极端情况之间的情况是：结构物如不能正常使用会带来不便，或带来一些并非生死攸关的问题，这时应对这类结构物进行仔细分析，对可能因雷电造成的中断、常见设备故障、因维修导致的停工或其他事件所造成的停机可能性进行比较，以作判断。应对这些结构物进行仔细分析，对雷击与通

常的设备失效、维修及其他例行事故所造成的停机可能性进行比较，然后确定是否要配备雷电防护设备。

7 故障保护分系统

7.1 故障保护

7.1.1 概述

为了获得有效的故障保护，在故障点和故障线路的供电变压器之间应有一条低阻抗的通路。该通路的电阻应足够低，以便大的故障电流流过时使断路器跳闸或熔断器熔断。在建筑物内部，这种低电阻回流通路由接地导体和连接设备的接地网络来承担。当带电导体偶然接触任何与接地导体连接的导电物体时，都应立即使断路器跳闸或熔断器熔断。在具有第三根专门接地线(即单相三线制)的建筑物中，不管接地电阻如何，建筑物内部的任何故障均可以迅速排除。

7.1.2 电力系统的故障

电力系统的故障是指配电系统或与此系统有关的电力设备中发生的直接短路或电弧(连续电弧或断续电弧)。这些故障基于下列几种原因会对人身安全构成威胁：

a) 流入接地系统的故障电流可能会使接地设备的机架出现危险的高电位；

b) 故障电弧中的能量可能足以使铜、铝或钢发生气化，其热量可能使人身严重烧伤；

c) 任何短路或电弧都有诱发火灾的危险；

d) 绝缘层燃烧可能产生极其有毒的气体和烟雾，造成特殊的危害。

电力系统发生故障的常见原因是：啮齿动物在接地导体和相线间的啮咬、水分的渗入、绝缘体表面潮气和灰尘的沉积、由过载产生的热循环使绝缘层击穿、环境污染、装配期间的损伤、系统的老化。

图 53 给出了不正确的装配及故障状态对人身构成伤害的示意。假定 380V 三相线路的一相突然与电动机的机座接触，如果电动机没有接地，则电动机机座的电位将升至 220V。若此刻与机座接触的人又同时与另一个接地物体相碰，他就会遭受致命的电击。为了防止这种情况的发生，应把电动机的机座通过导线接地。故障电流通路的电阻应足够低以使过载保护器跳闸而中断此故障。故障电流通路的电阻太大，故障电流就不足以使过载保护器跳闸。因此，为了减少电击和火灾的危害，故障电流通路的电阻应尽可能低。然而，故障保护分系统一般并不依靠大地电极分系统使过流器件跳闸。通常故障电流经接地导线流至第一个断路装置的电源一侧，中线也在此处和接地导线连接在一起，然后故障电流经过中线流至变压器而形成更完整的回路。此通路的作用与大地电极分系统的连接完全无关。

配电系统中的故障保护通常由每相的电路断路器、熔断器或过载继电器来承担。这些器件只有在故障电流大到足以使过流器件跳闸时才能对人身安全提供保护。然而，这些器件的响应时间较长，并不能对偶然直接接触带电物体的人员提供保护。

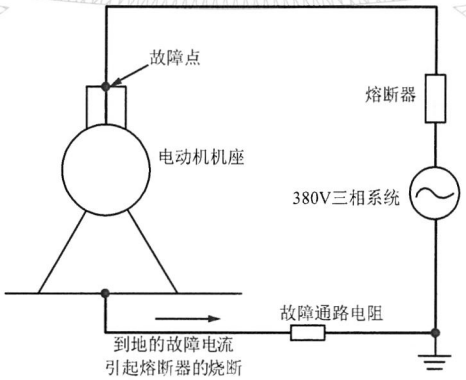


图 53 故障保护接地

7.1.3 线路接地故障断路器

高电阻故障(不小于 5mA 的小电流及中电流故障)可以利用线路接地故障断路器作快速保护。接地故障断路器含有一个电路，此电路能连续监测供给负载的电流与负载中回流电流的差值。如果这两个电

流之差不是零，必定有电流泄漏至地。当泄漏电流超过预定的数值时，接地故障断路器即发生动作、切断电路的电源。接地故障断路器是非常灵敏的，能够调节到接地故障电流低至 2mA 的情况下切断电源。利用狗进行的试验表明，跳闸电流为 5mA 或更小，就可以防止电击致死。

7.2 接大地

从历史上看，接大地的要求是根据保护工作人员、设备和设施免受雷击以及防止工业静电积累而提出来的。结构物和电气设备连接到大地(即接地)，就提供了雷电和静电放电所必需的通路。随着电力系统的发展，发现接大地也是安全所必需的。系统中的所有主要组成部分，如发电站、配电站和配电系统都是接大地的，以便在输电线发生事故时为故障电流提供一条返回发电机的通路。出于下列两个原因，接地通路的电阻应尽可能低：第一，当故障电流流过时，低电阻可以减小与大地电极分系统相连的设备之间的电位差，从而保护同时与两台或多台设备接触的工作人员；第二，低电阻可以使故障电流足够大，以保证线路熔断器或线路断路器对这种故障迅速反应。

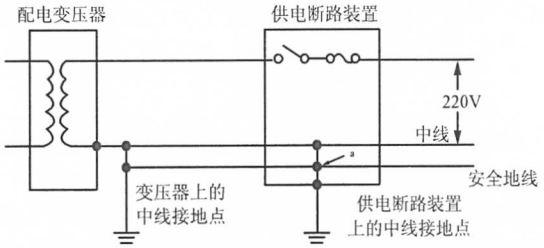
理想的大地接地应使接大地的设备及设施与大地之间呈现出零值电阻。然而，任何物理上所能实现的连接都会呈现出一定的对地电阻。大地电极分系统设计的经济性涉及到获得低电阻的必要费用与满足故障保护分系统最低要求之间的折衷处理。

7.3 交流电力线路的接地

在设施的单相交流配电系统中，三根导线中有一根是接地导线，而其他两根导线是相线和中线。接地导线应设计成仅在故障出现时才载流，即采用 TN－S 接地系统。当一个单相变压器仅对一幢通信建筑物供电时，为了实现故障保护，中线不仅在供电断路装置电源引入线处接地，同时还要在配电变压器上接地。在采用单相 220V 的交流电源接地连接的设施上，应采用 TN－S 接地系统，见图 54。对于“Y”形三相交流电源系统，应采用 TN－S 接地系统。安全地线也应接地于图 55 中标出的接地点上。

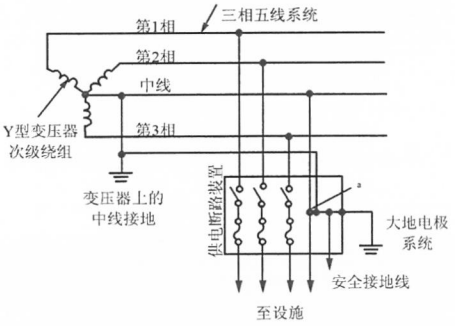
当只用一个变压器对多个通信电子设备供电时，每台设备的中线都只能与配电变压器的中线相接，参见图 54 和图 55。

为了防止工作人员暴露于危险电压之下，应把电气和电子设备的所有外露金属元件都与地线相接。由于建立了直接的故障保护通路，一旦因人为差错、绝缘或元件失效而发生相线与底座、机架或机柜之间的偶然接触，可迅速消除危险。



[a] 当单个变压器对多个设备供电，或由此接地点产生有害的电流、噪音或干扰时，应将此接地点断开。

图 54 单相交流电源的接地连接



[a] 当单个变压器对多个设备供电，或由此接地点产生有害的电流、噪音或干扰时，应将此接地点断开。

图 55 三相交流电源系统的接地连接

三相“Y”形配电系统的接地与单相系统相似。一种典型系统的接线如图 55 所示。正如在单相系统中一样，三相“Y”形的中线也连接至供电断路装置的地线上。此中线往往接地于供电断路装置的供电一侧。

将变压器次级绕组连接成“△”形的三相供电系统，则需要经过接地变换器接地，并建立中线。接地变换器可以是“之”字形的，也可以是“Y－△”形的。这两种型式都带有连接三相系统每相的引线和第四根用作中线的引线。一种接地变换器的典型连接如图 56 所示。

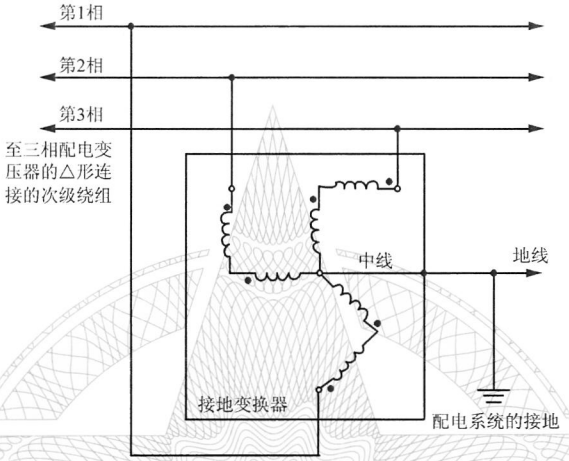


图 56　三相“之”字形接地变换器的接地法之一

7.4　试验设备

试验设备是用来测量故障保护系统的电阻和阻抗的，包括接地导体以及信号参考分系统(接地参考面)的电阻和阻抗，信号参考分系统有时可作为故障保护分系统的一部分。试验设备可以测量发生故障的设备与第一个供电断路装置之间每条通路的阻抗(在 50Hz 时)，因此，可用以确定每条通路中故障电流的数值。这些数据还可用来确定或预测故障电流叠加于信号参考分系统上时所引起的干扰程度。

8　信号参考分系统

8.1　概述

信号电路接地有三种作用：故障保护、控制静电荷和建立信号源与负载之间的回流通路。设计的目的就是要减少干扰和噪声。

如能建立一个真正的零阻抗接地参考面或母线，则可以利用它作为系统或综合设备内所有电流(电源电流、控制电流、音频电流和射频电流)的回流通路。这种接地参考分系统同时提供故障保护、静电放电和信号电流所必需的回流通路。最接近于理想的接地系统是利用敷设在整个设施下面的非常大的铜、铝或银等良导体薄板，并通过大的竖直板延伸至各台设备。在参考信号频率上，网络的阻抗是导体电阻、电感和电容的函数。在设计应考虑射频信号的接地系统时，需要应用传输线理论。

8.2　导体的考虑

8.2.1　直流电阻

一根均匀横截面导体的电阻 R_{dc}，正比于导体的长度，而反比于导体的横截面面积，按式(109)计算：

$$R_{dc}=\frac{\rho_m l}{S} \qquad (109)$$

式中：

R_{dc} ——电阻，Ω；

ρ_m ——导体材料的电阻率，Ω·mm；

l ——电流流动方向的导体长度，mm；

s ——导体的横截面面积，mm^2。

表 12 给出了部分导线的直流电阻 R_{dc}[23]。直流时，导体的电阻是决定因素。除了非常特殊的情况(例如，当所处理的信号幅值很小或者相连接的各设备相距很远时)，通常采用低电阻率的材料如铜和铝等，就可以相当经济的方式实现直流的良好接地。但是，大多数系统不只是采用直流信号，因此，导体与频率相关的特性变得重要。

表 12　退火铜导线的特性

横截面面积 mm^2	直径 mm	电阻 Ω/km
120	12.4	0.153
95	11	0.193
70	9.4	0.268
50	8	0.387
35	6.7	0.524
25	5.6	0.727
16	4.5	1.15
10	3.6	1.83
6	2.8	3.08
4	2.3	4.61
2.5	1.8	7.41
1.5	1.4	12.1
1	1.1	18.1
0.75	1	24.5
0.5	0.8	36.0

8.2.2　交流阻抗

8.2.2.1　趋肤效应

导体的交流阻抗包括交流电阻和电抗。由于趋肤效应，导体的交流电阻及电抗都会随频率的变化而变化。

尽管直流电流在导体的整个横截面上是均匀分布的，但是交流电流却趋向于集中在导体的表面附近。频率愈高，电流愈集中在表面，这种物理现象被称之为趋肤效应。电流渗入导体的程度由趋肤深度 δ 来衡量。δ 定义为电流密度衰减至导体表面密度的 $1/e$(即 0.37)时的深度。趋肤深度也可理解为外形与实际导体相同的空心导体的等效厚度，此空心导体的整个横截面上电流均匀分布，其直流电阻与导体的交流电阻相同。

对于厚度至少为 3 倍趋肤深度的导体来说，趋肤深度由式(110)给出：

$$\delta = \frac{6.61}{\sqrt{f \mu_r \sigma_r}} \quad \cdots\cdots (110)$$

式中：

δ——趋肤深度，cm；

f——频率，Hz；

μ_r——材料的相对磁导率，无量纲；

σ_r——材料的相对电导率，无量纲。

表 13 和图 57 给出了几种金属的趋肤深度。有关电导率、电阻率、表面电阻率及表面阻抗的概念辨析参见附录 D。注意，在 50Hz 时，铜的趋肤深度为 9.35mm，但到 1MHz 时，趋肤深度仅有 0.066mm。

表 13　导体材料的参数

材料	σ_r	δ cm	R_s Ω
银	1.05	$6.41/\sqrt{f}$	$2.52\times10^{-7}/\sqrt{f}$
铜	1.00	$6.61/\sqrt{f}$	$2.61\times10^{-7}/\sqrt{f}$
铝	0.61	$8.47/\sqrt{f}$	$3.26\times10^{-7}/\sqrt{f}$
黄铜	0.26	$12.98/\sqrt{f}$	$5.01\times10^{-7}/\sqrt{f}$
焊料	0.12	$19.11/\sqrt{f}$	$7.48\times10^{-7}/\sqrt{f}$

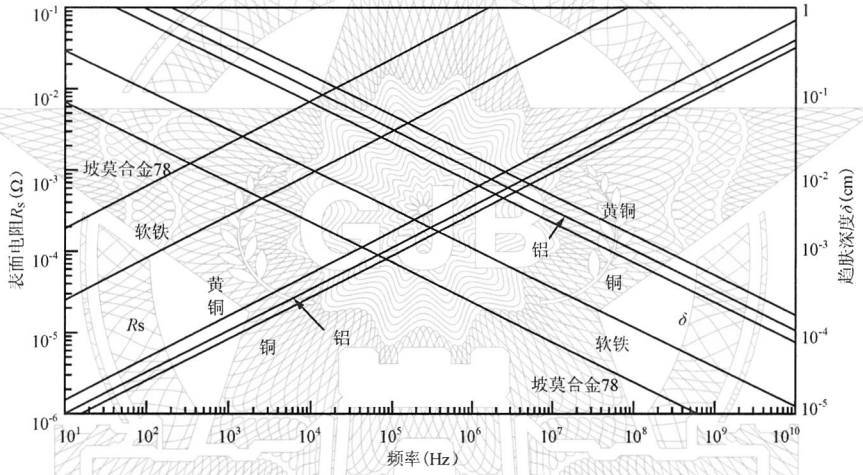


图 57　常用金属的表面电阻和趋肤深度

8.2.2.2　交流电阻

任何横截面形状的导体，如果它的厚度和曲率半径都远大于趋肤深度，而且其曲率半径沿着导体长度的变化并不太大，则它的交流电阻可由趋肤深度来确定。对于符合上述条件的导体来说，单位长度的交流电阻如式(111)或式(112)所示：

$$R_{ac}=\frac{\rho_m}{\delta l_c} \quad \cdots\cdots(111)$$

$$R_{ac}=\frac{R_S}{l_c} \quad \cdots\cdots(112)$$

式中：

R_{ac}——单位长度的交流电阻，Ω/m；

ρ_m——导体材料的电阻率，Ω·m；

δ——趋肤深度，m；

R_S——导体的表面电阻，Ω；

l_c——导体的周长，m。

表面电阻定义为长宽相等、厚度为δ、电阻率为 ρ 的长方体沿长度方向的直流电阻，可由式(113)计算：

$$R_S = \frac{\rho}{\delta} = 1.987\times10^{-4}\sqrt{\mu_r f \rho} \quad \cdots\cdots(113)$$

各材料的表面电阻也在图 57[24]和表 13 中给出。

交流电阻与直流电阻之比称为导体的电阻比。频率较高时，趋肤效应使电阻比大于 1。图 58[25]中，给出了圆直导线的电阻比与参数 x 的关系，式(114)给出 x 定义为：

$$x = \sqrt{\frac{8\pi\mu_r f}{R_{dc}\times10^9}} \quad \cdots\cdots(114)$$

式中：

μ_r——导体的相对磁导率；

f——频率，Hz；

R_{dc}——1cm 长导体的直流电阻，Ω。

应注意：式(111)及式(112)仅适用于上面的限定条件，而式(114)适用于所有频率。对于铜导线，依据式(114)，x_{cu} 由式(115)确定：

$$x_{cu} = 1.07\times10^{-2} d\sqrt{f} \quad \cdots\cdots(115)$$

式中：

d——导线的直径，mm。

8.2.2.3 电抗

导体的电抗通常是感性的，由角频率ω和导体自感 L 的乘积确定。导体的自感反映了导体抑制其内部电流流向变化的特性。由于趋肤效应改变了导体内的电流分布，且此分布与频率相关，所以导体的电感量亦随着频率的变化而变化。

一根直的圆导线的自感，由式(116)给出[25]：

$$L = 0.002l\left(2.303\lg\frac{4l}{d} - 1 + \mu_r K\right) \quad \cdots\cdots(116)$$

式中：

L——电感，μH；

l——导线长度，cm；

d——导线直径，cm；

K——趋肤效应的修正系数，对于铜可由图 59 来确定[25]。

除铜以外的其他材料，此时利用f'代替实际的频率f，K 仍可从图 59 获得[25]，f'由式(117)确定。

$$f' = f\left(\frac{\rho_0}{\rho_m}\right) \quad \cdots\cdots(117)$$

式中：

ρ_0——铜的电阻率，Ω·cm；

ρ_m——材料的电阻率，Ω·cm。

对于低频，可以假定电流在整个导体的横截面内均匀流动。一根长度为 l，直径为 d，相对磁导率为μ_r的直圆导体，其电感量(若周围是空气时)式(118)给出：

$$L_{LF} = 0.002l\left(2.303\lg\frac{4l}{d} - 1 + \frac{\mu_r}{4}\right) \quad \cdots\cdots(118)$$

式中尺寸单位为 cm，L_{LF} 的单位为 μH。当频率升高时，电感 L_{HF} 的极值近似于式(119)：

$$L_{HF}=0.002l\left(2.303\lg\frac{4l}{d}-1\right) \quad \cdots\cdots(119)$$

图 60 示出了直径为 8mm 的实心圆形铜导线的 L_{LF} 值随长度变化的曲线[26]，图 61 给出了随导线长度和直径变化的 L_{HF} 值[25]。

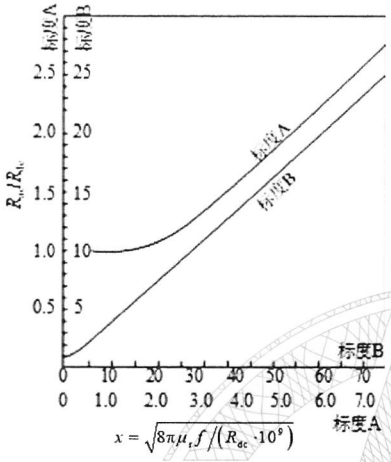


图 58　孤立圆导线的电阻比

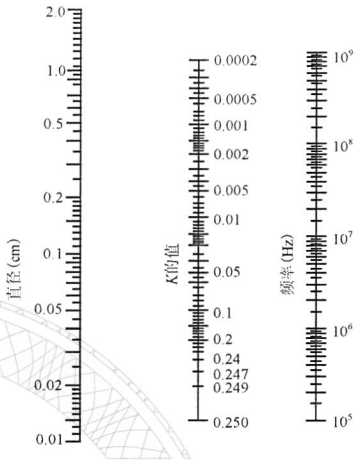


图 59　确定铜导线趋肤效应修正系数的计算图表

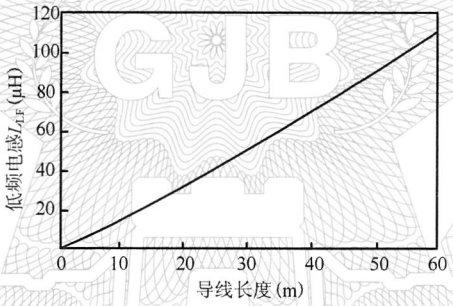


图 60　低频自感量与导线长度的关系

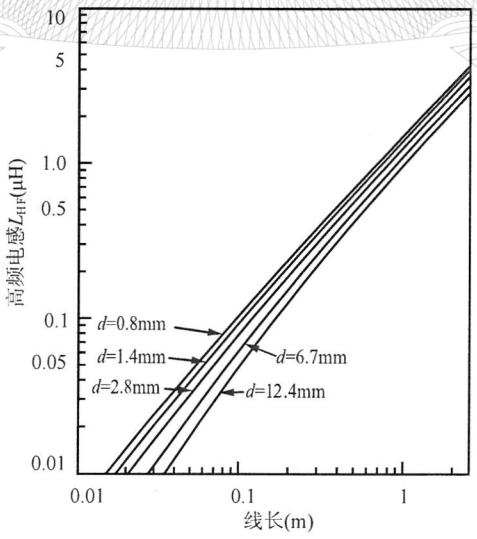


图 61　直圆导体的高频自感量

8.2.2.4　邻近效应

当两根或两根以上的导体紧邻时，一根导体中流动的电流会在另一根导体的电流所产生的电磁场的影响下重新分布，这种效应是趋肤效应的扩展，称为邻近效应。邻近效应会增加导体的交流电阻，使之大于仅存在简单趋肤效应时的电阻值。

8.2.3　电阻特性与阻抗特性的关系

虽然趋肤效应在所有频率上都存在，但是当频率升高时，趋肤效应则变得更为显著。导体的电抗也随着频率的升高而增加，这进一步增加了高于直流电阻的导体阻抗。为了设计一个有效的接地系统，应考虑到直流电阻、交流电阻和电感三者对接地导体的总阻抗的相对影响。

用式(109)可以计算圆形导体的直流电阻。表 14 则给出了导线在不同直径和长度的条件下导线的交流(50Hz)电阻、电感、感抗和总阻抗。电阻和电感量分别由表 12 和式(118)来确定。30m 长的电缆的直流电阻、交流电阻、电感和总阻抗特性由表 15 给出。1MHz 时的数据由式(111)和式(119)算出。注意，对于较粗(直径为 5.6mm 或更大)的长电缆来说，其电感量决定了阻抗的幅值。同时还应注意，对相同长度的电缆来说，电缆的粗细对阻抗值的影响没有对电阻值的影响大。

以两根30m 长的铜电缆为例：一根直径为1.8mm，另一根直径8mm，它们直流电阻之比为0.2223/0.0116＝19.16，在50Hz 时，它们的交流电阻与直流电阻相似，所以交流电阻之比同样亦为19.16。到1MHz 时，它们的交流电阻的比值则变成1.386/0.312＝4.44。然而，它们的阻抗比在50Hz 时为0.2232/0.0203＝11.00，到1MHz 时仅为381.12/324.87＝1.17。这些比值列在表16中以供比较。通过表12、表14至表16及上述例子，可以得出下列结论：

a)　由于电感的存在，采用直径为 8mm 的粗电缆，其总阻抗的下降效果远小于直流电阻的下降效果；

b)　加粗电缆(例如采用直径为 8mm 电缆)所获得的效果，不如缩短电缆走线所得到的效果好，这是因为随着长度的增加，电感的增加要比电阻的增加更快，见式(109)和式(116)；

c)　在长距离敷线时，加粗电缆对交流阻抗的改善不明显，所以对材料和人力成本的考虑可能是决定的因素；

d)　对于长度为 30m～145m 长的电缆来说，即使直径为 8mm 电缆，它对 50Hz 信号仍呈现出20.3mΩ～102.3mΩ的阻抗，所以在任何信号接地系统中控制杂散电流应该是基本的要求。

表 14　电缆在 50Hz 时的阻抗特性

横截面面积 mm^2	导线直径 mm	长度 m	R_{ac} Ω	L μH	X_L Ω	Z Ω	参考美国线规[a] No.
2.5	1.8	10	0.0741	18.521	0.00582	0.0743	12
2.5	1.8	30	0.2223	62.157	0.01953	0.2232	12
6	2.8	10	0.0308	17.637	0.00554	0.0313	8
25	5.6	10	0.00727	16.251	0.00511	0.0089	2
25	5.6	30	0.02181	55.346	0.01739	0.0279	2
25	5.6	45	0.03272	86.668	0.02723	0.0426	2
50	8	10	0.00387	15.537	0.00488	0.0062	1/0
50	8	30	0.01161	53.205	0.01671	0.0203	1/0
50	8	45	0.01742	83.458	0.02622	0.0315	1/0
50	8	90	0.03483	179.394	0.05636	0.0663	1/0
50	8	135	0.05225	280.041	0.08798	0.1023	1/0
[a] 参考美国线规为横截面面积相近的美国线规。							

表 15　电缆在直流和 1MHz 时的阻抗特性

横截面面积 mm^2	直径 mm	长度 m	R_{dc} Ω	R_{ac} Ω	L μH	X_L Ω	Z Ω	参考美国线规[a] No.
2.5	1.8	30	0.2223	1.386	60.657	381.12	381.12	12
25	5.6	30	0.0218	0.445	53.846	338.32	338.32	2
50	8	30	0.0116	0.312	51.705	324.87	324.87	1/0
[a] 参考美国线规为横截面面积相近的美国线规。								

表 16　直径 1.8mm 与直径 8mm 导线的阻抗之比

频率	长度 m	$R_{dc}(1.8)/R_{dc}(8)$	$R_{ac}(1.8)/R_{ac}(8)$	$Z(1.8)/Z(8)$
50Hz	10	19.16	19.16	11.98
50Hz	30	19.16	19.16	11.00
1MHz	30	19.16	4.44	1.17

8.2.4　几何效应

8.2.4.1　概述

在信号接地网络中，可以使用各种形状的导体。正如实心圆导体的情况一样，其他形状的导体阻抗也取决于电流在导体内的分布，因而亦取决于信号的频率。

8.2.4.2　绞合电缆

一根绞合电缆是由若干根导线紧密扭绞在一起构成的，绞合电缆比相同横截面面积的单根实心导体软得多。由于这些导线紧密靠拢，趋肤效应会把大部分电流重新分配至外层的导线上，这些外层的导线，在形状上是一个线圈，因此增大了电缆的自感量。趋肤效应会随着频率的增高而加剧，致使交流电阻也要增加。

对于一种给定规格的电缆来说，绞合导体的交流电阻和自感都比实心圆形导体的交流电阻和自感量大。由于在高频时绞合电缆的效率低，因此，建议频率超过 1200Hz 后不要使用绞合电缆[26]。但是，在许多情况下，仍然需要粗电缆，以便安全地承载因电源故障和雷电放电所产生的电流；另外，直径大于 6mm 的实心单线电缆可能很难得到。

8.2.4.3　矩形导体

当频率较高使趋肤效应变得很明显时，宽厚比超过 2:1 的扁平矩形导体的电阻比远小于具有相同截面积的实心圆形导体的电阻比。几种非磁性材料（$\mu_r=1$）矩形导体的电阻比见图 62[25]。

矩形导体在低频时的电感由式（120）给出[25]：

$$L_{LF}=0.002l\left(2.303\lg\frac{2l}{b+t}+0.5+0.2235\frac{b+t}{l}\right) \quad \cdots\cdots (120)$$

式中：

L_{LF} ——电感，μH；

l ——导体长度，cm；

b ——导体宽度，cm；

t ——导体厚度，cm。

如果 l 大于 $50(b+t)$，则等式中最后一项可以忽略。

在矩形导体上，其锋利的边缘势必把能量辐射至空间，扁平导体可能变成一根有效的天线。为了降低这种天线效应并减小能量辐射，可以把矩形导体的边缘修圆，使导体变成椭圆形。

8.2.4.4　管状导体

管状导体，在诸如材料利用率、成本、重量、横截面面积、趋肤效应、电阻比和电感量等各种因素之间可以获得最佳的折衷。管状导体的直流电阻可以根据导电材料的实际横截面面积，由式(109)确定；图 63 给出了三种不同直径铜管的直流电阻[26]。

管状导体的直流电阻和交流电阻，均比具有相同外径尺寸的实心导体的阻值大，但是其交流电阻并没有象直流电阻增加得那样快，所以管状导体的电阻比往往小于实心导体的电阻比。图 64 给出了四种铜管的交流电阻与频率的关系[26]，而图 65 则给出了孤立非磁性管状导体的电阻比[25]。对于一根给定长度的导体，管状导体的单位重量的交流电阻，在高频时要比任何其他形状导体的交流电阻都小。由于管状导体中心没有导体导致自感减小[26]。因此，管状导体的自感将比具有相同直径的实心导体要小，图 66 给出了三种有代表性的铜管的自感量与频率的关系[26]。

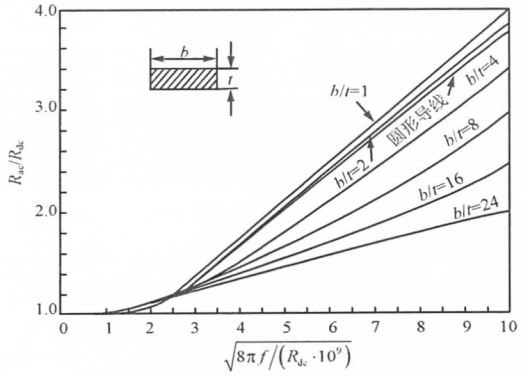


图 62　矩形导体的电阻比

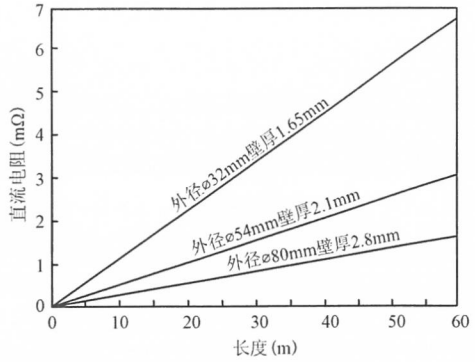


图 63　几种尺寸铜管直流电阻与长度的关系

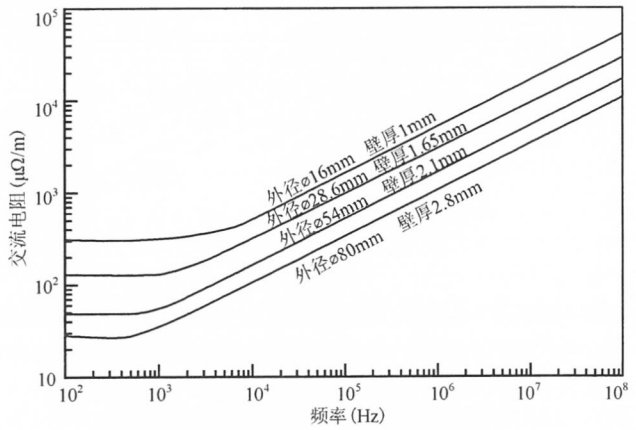


图 64　铜管的交流电阻与频率的关系

8.2.4.5　钢结构件

建筑物结构框架中的工字钢，是另一种常用接地导体。钢的电阻率约为铜的十倍，但钢的趋肤深度约比铜大 3 倍。趋肤深度的增加，使得钢在高频时的导电面积下降得较少。例如，把一根高 0.32m 的工字钢与一根截面 120mm^2 的铜电缆相比较就可以看出，工字钢的横截面周长约比铜电缆大 30 倍，趋肤深度大 3 倍，因此，在工字钢梁上高频电流的导电面积约比铜电缆增大 90 倍。但是，这些优点会由于电流趋向于工字钢梁的边缘流动，加之工字钢表面粗糙而稍有抵消。由于表面粗糙和电流分布的影响，其交流电阻将增加至 4 倍。即使如此，截面为 120mm^2 的铜电缆的交流电阻仍为高 0.32m 的工字钢梁交流电阻的 4.25 倍。另外，建筑物的框架构件往往提供许多并联的通路，因此，在任何两点之间的交流电阻和电感都会降低。

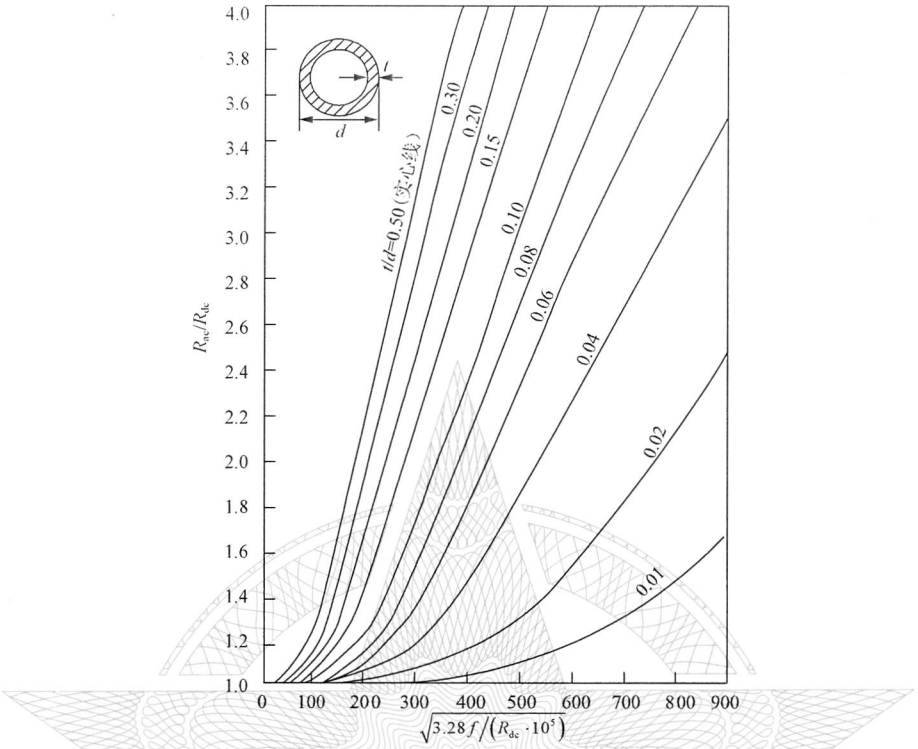


图 65　非磁性管状导体的电阻比

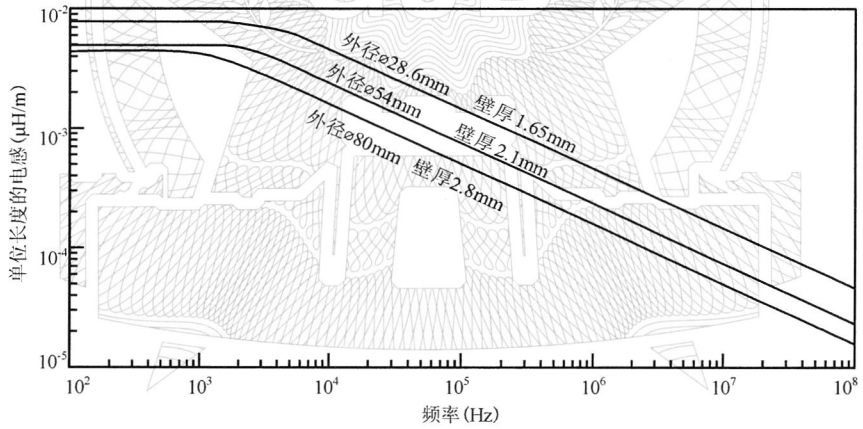


图 66　铜管的电感与频率的关系

8.3　信号参考分系统网络的配置

8.3.1　概述

在一台设备之内，信号参考分系统可能是薄金属板，此金属板在该设备中用作局部或所有电路的信号参考面。当各个单元设备分布在整个设施上时，各设备之间的信号接地网络往往由若干根互连导线、母线或一个用作电位参考面的格栅组成。信号参考分系统不论是在一台设备之内供所有电路之用，还是在一个设施内供几台设备之用，它所采取的配置形式可以是悬浮接地、单点接地，也可以是多点接地。对于通信电子设备，上述信号参考分系统中电位参考面是最佳接地方案。在现有设施中，原有设备可能不允许在其下方或地板上安装电位参考面，这时可把电位参考面架设在该设备的上方并将设备与之连接。建议对现有通信设备进行改造并装设电位参考面。

8.3.2　悬浮接地

悬浮接地如图 67 所示。在一个设施之内，这种信号接地系统在电气上是与建筑物的接地系统和其他导体相隔离。显然，出现在建筑物接地系统上的噪声电流不会传导至信号电路。悬浮接地系统的概念同样也可用来将信号回流通路与设备机柜相隔离，以防止机柜的噪声电流直接耦合至信号电路。

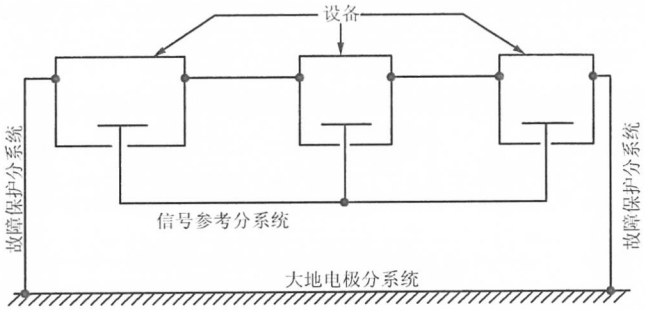


图 67　悬浮信号接地

悬浮接地系统的有效性取决于它们是否真正与其他邻近的导体相隔离，也就是说，要使之有效，悬浮接地系统应真正悬浮。在大型设施中往往很难获得完全悬浮的系统，即使获得了完全的隔离，也很难维护这样的系统。

悬浮接地系统还会受到其他限制，例如，在被隔离的信号电路中所产生的静电电荷有可能导致电击或火花放电的危险。特别当悬浮系统被置于高压电源线附近时，很可能产生静电。此外，在大多数现代的电子设施中，所有外部电源，如市电电源是以大地为接地参考系统的。因此，悬浮系统的一种危险是：电源与信号系统短路的故障将会使整个信号系统相对于设施中其他导电物体的电压升高至危险的电平。另一种危险是：当该设施遭受雷击时，由于没有传导方式的耦合，结构物相对于信号接地系统的电压可能会升高到足以引起绝缘体击穿或闪络，在结构物或机柜与信号系统之间形成闪络。通信设备的设施通常不推荐这种接地系统。

8.3.3　单点接地(适用于低频，0kHz～30kHz，某些场合可高至 300kHz)

信号接地网络的第二种配置是单点接地，如图 68 所示。在这种配置中信号电路以一点作参考，然后把这个单一的点连接至设施的接地系统。理想的单点信号接地网络中，各条接地导体从设施接地系统的同一点出发，并延伸至整个设施各种电路的接地通路上。这种接地网络需要大量的导体，在经济上往往是不合理的。通常进行不同程度的变通处理。

图 69 所示的配置法，非常接近于一种理想的单点接地系统。这种系统是利用多条接地母线从电极分系统延伸到各个独立的电子系统上。在每个电子系统内又把各种电子分系统单独连接至该接地母线的同一点。另一种常用的、接近理想网络的系统如图 70 所示。图中接地母线网络呈树叉状，每个系统内的分系统是单点接地的，然后，再利用单根绝缘导线把每个系统的接地点连接至树叉状的接地母线上。

单点接地系统实现了本章开始时所提到的信号电路接地的三种作用。也就是说，在每个单元或者每台设备中建立信号参考面，然后把这些参考面连接在一起，最后连接至大地电极分系统。

单点接地配置法的突出优点是，有助于控制传导耦合的干扰。如图 71 所示，单点接地不但可以避免在信号接地网络中形成干扰电流的闭合环路，并且设施接地系统中的干扰电压 V_N 也不会通过信号接地网络以传导的方式耦合至信号电路。因此，单点信号接地网络将减小设施接地系统中可能出现的低频噪声电流的影响。

然而，在高频时，单点接地导体会与大地构成传输线，这时大地就是该传输线的另一条线。搭接到该传输线的每台设备，都将起到调谐短截线的作用。当有数字信号(方波)作用在该调谐电路上时，环路

在一些特定频率上将产生谐振。因此，在射频时接地线往往呈现出传输线的特性：它的阻抗是变化的，随着频率的改变，它可呈现电感、电容、调谐电路、绝缘体和纯电阻等特性。在大型装置中，单点接地配置法的主要缺点是需要很长的导体。由于长导体(在关心的最高频率上，长度达$\lambda/8$)本身存在很大的自感，在高频时已不是一种满意的接地参考系统。此外，由于各导体之间还存在着杂散电容，因此当信号频率增高时，单点接地系统实际上已不复存在。基于上述考虑，通信电子设备中不推荐单点接地。

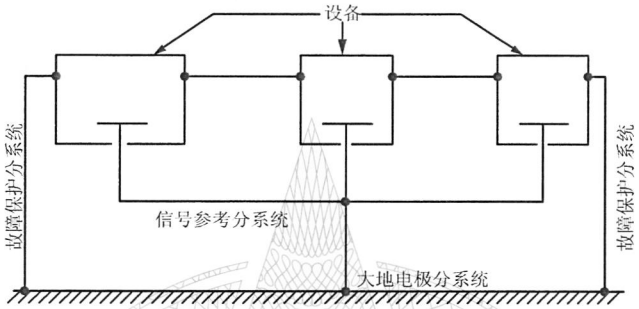


图 68　单点信号接地(低频)

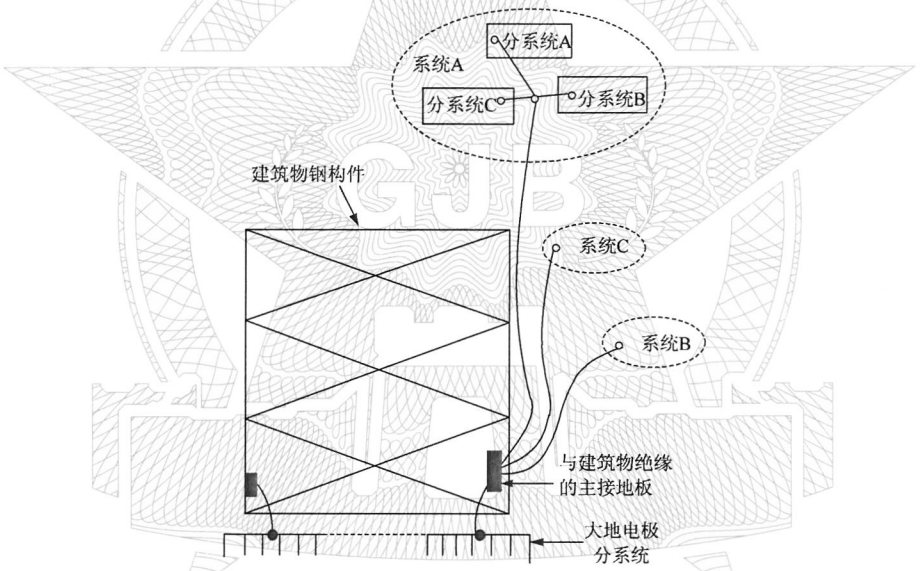


图 69　采用独立接线排的单点接地母线系统(低频)

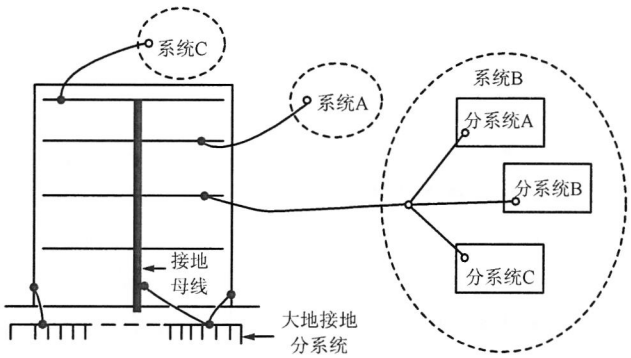


图 70　采用公共母线的单点接地母线系统

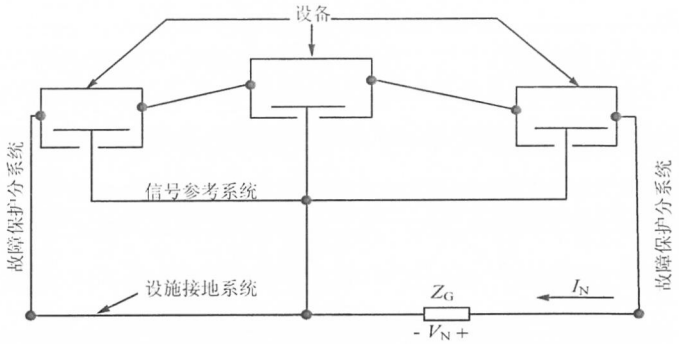


图 71　采用单点接地减小设备接地系统中地电流的影响

8.3.4　多点接地(适用于高频，＞300kHz，某些场合可低至 30kHz)

8.3.4.1　概述

图 72 所示为多点接地系统，是信号接地网络的第三种配置方法。多点接地系统中从大地电极分系统至设施内各种电子系统或分系统之间采用多条导电通路。在每个分系统内，各个电路和网络有多处与接地网络连接。因此，在一个设施内，在接地网络上的任何两点之间都存在几条并联通路，如图 73 所示。

多点接地往往能简化综合设备内的电路结构。对于高频信号电路的接地来说，多点接地是唯一的实用方法。这种接地法，在采用同轴电缆的设备中很容易实现连接，因为同轴电缆的外导体不一定要对设备的机柜和外壳悬浮，但是多点接地系统在射频时会呈现出传输线特性。为了实现有效的多点接地，在所关心的最高频率，若任何接地导体的长度超过$\lambda/8$，则多点接地系统需要一个等电位接地面。

应注意，采用多点接地时要确保 50Hz 的电源电流和其他流过设施接地系统的低频大电流不会传导耦合至信号电路，以免这些电流在敏感的低频电路中产生不允许的干扰。

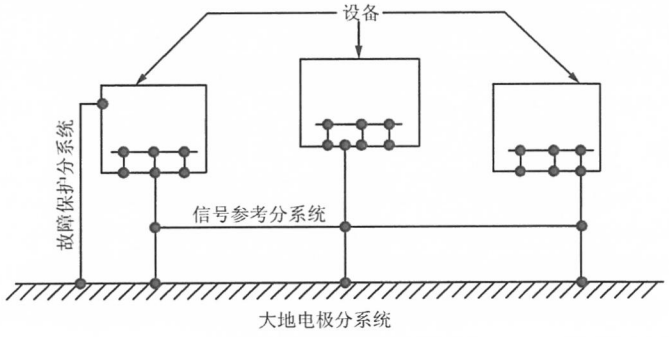


图 72　多点接地的配置

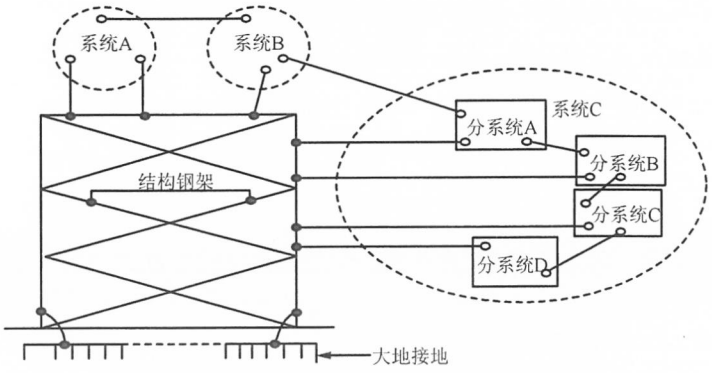


图 73　在多点接地中结构钢架的应用

8.3.4.2　电位参考面

不能忽略电位参考面在设施正常工作、射频干扰抑制和保护人身安全等方面的重要性。一个电位参考面含有一块或多块导电材料，当把这些材料连接在一起时，它们对电流流动所呈现的阻抗可以忽略。导电材料间的搭接对电流的流动呈现高阻抗时，可能会使整个接地系统对大地呈现很高的电位。金属元件之间存在高阻抗的互连时，一旦电力系统出现故障，形成强大电流，就可能对人身安全和设备构成极大的危险。应仔细考虑电位参考面或系统对射频干扰的影响，重要的是了解接地并不一定会降低所有类型的射频干扰。甚至相反，在某些情况下系统接地可能通过提供传导耦合通路、辐射或感应回路增加干扰。

在待接地设备下面的地板中埋设一层很大的导电板，可以弥补布线系统中的许多不足。对于现有的设备来说，可把这个系统装配在待接地的设备上方。一个大的导电面所呈现的特性阻抗要比导线低得多，这是因为特性阻抗(Z_0)是 L/C 的函数，当对地电容增加时，Z_0 就会减小。一块金属板或格栅的对地电容要比导线的对地电容大得多。如果金属板的尺寸增大，覆盖更大的面积，则电容量增加。同样，单位长度的电感，亦将随着宽度的增加而减小，电感的减小又进一步降低阻抗 Z_0。如果这块金属板足够大(像一块导电地板)，其特性阻抗就趋向于一个非常低的数值。在这种情况下，该金属板的特性阻抗将在很宽的频谱范围内保持低值，这就为所有连接至此金属板上的设备建立了一个电位参考面。

尽管从功能的角度出发并不需要把电位参考面端接至大地，但是将电位参考面接大地有以下好处：人员安全不必依赖于为电源故障保护而敷设的长电缆、为工频和射频提供低阻抗。

对于含有高频的通信设施，接地母线相当于有耗传输线，因此应将其接大地。采用接地母线的单点接地和多点接地在高频时阻抗较高，为在高频时有效，多点接地系统需要电位参考面。这种电位参考面通常是这样形成的：在建筑物内铺设金属地板或电气上互连的天花板导电格栅，或者是在水泥地板中埋设接地格栅，并与设施的钢结构及接地系统搭接。安装时应把设备机柜与接地格栅搭接，再把设备的装配底板与机柜连接，最后将所有的元件、信号回流引线等连接至底板。电位参考面应接至大地电极分系统，并以多点连接方式与主要结构钢架进行搭接，以确保人身安全和对所有频率的信号构成低阻抗通路。

电位参考面还具有下列一些附加优点：

a)　对于任何通过或沿着这一电位参考面连接至接收器(即接收机、解调器等)的“噪声”电缆和导体来说，将使其场被限制在导体和电位参考面之间。这样，就可以利用滤波器和搭接条将噪声场“短路”掉，因为这些“传输线”式的导体之间的距离非常近。把噪声场短路，就使得噪声电流不再沿着接收器的外壳和任何天线输入电缆流动，达到了预期的效果。

b)　当等效“传输线”两个终端已知时，设备接口端的滤波器可以更有效地起作用。正如上面所述，一个大的导电面能够限制导体所产生的电磁场，从而也就更容易防止这种电磁场的传播。

c)　一个大的导电面同样也可以对屋顶上的天线起屏蔽作用，把天线与天线下面的噪声电缆隔开。

8.3.4.3　电位参考面的类型

电位参考面的类型有：

a)　埋入水泥地板中的铜格栅(例如计算机房地板)；

b)　铺设在地板或地毯下面的铝、铜、磷铜制格栅或薄板；

c)　架设在设备上方的格栅天花板。

有关这些电位参考面的详细资料、数据，见 15.5.1.2.2。

8.3.5　悬浮接地系统

悬浮接地系统应完全与建筑物绝缘，或者与任何可能构成环流的线路绝缘。悬浮接地系统的有效性取决于它的真正隔离程度。在大系统中，很难获得所需的隔离度来实现一个高质量的悬浮接地系统。因为在悬浮接地系统和其他可接近的接地系统(如外部电力线路的地线、水管等)之间可能积聚静电电荷、故障电势和雷电电势，所以很容易发生绝缘体击穿。由于悬浮接地系统与建筑物的接地系统之间所存在的电位差会对人身安全构成危险，所以这种(悬浮)系统不予推荐。

8.4 应用场合

8.4.1 概述

音频电路、数字电路和控制电路(或工作频带下延到 50Hz 或更低的其他电路)上会出现电源的杂散电流，形成潜在干扰，因此，应采取措施把这些强大的杂散电流与信号回流通路隔离开来。很明显，减小电源电流影响的一种方法是适当地配置信号接地系统，使得信号回路与电源电流回路分开。因此应确保电源系统的地线、相线和中线在第一个断路器前始终敷设在同一电缆束、导管、管道或线槽中，然后接至大地电极分系统。

为一个设备或设施设计无干扰的信号参考系统，首先是要确保初级交流电源的回流线路与安全接地网络之间只有一点相连接。把交流电源的回流通路与信号参考网络相隔离，这是解决许多噪声问题的有效措施。但是，还应采取别的措施来减小其他的杂散电流，例如由电源滤波器产生的杂散电流。(降低这些电流的办法是限制装置中滤波器的数量，或者把滤波器尽量靠近设施的电源引入口安装。)

为了满足安全要求，减小电源电流和信号电流的共阻抗影响，配电系统的中线和大地电极分系统之间应单点连接。这种对大地接地分系统的连接应当是可拆的。应确保信号参考、故障保护和雷电防护分系统与大地电极分系统间的搭接点设置在接地棒的不同位置。这种单点的连接可以消除导电环路，因为导电环路中可能会流过电源回流而在信号参考网络的各元件上产生干扰。

8.4.2 低频网络(DC～30kHz，某些场合可高至 300kHz)

设施的低频接地网络应符合下列原则：

a) 它应与其他接地网络相隔离，其中包括与结构物接地网络、安全接地网络、雷电接地网络和电源接地网络等隔离。隔离的目的在于防止杂散电流(主要来自 50Hz 的电源)在接地网络的各点之间产生电位差。

b) 不应期望用设备间的接地系统或设施的接地系统为信号电流提供一条从负载至源端的主要回流通路。图 74 示出了一种消除有害外界信号的方法，这些外界信号以感性或容性方式感应出的电流可能进入接地网络，并在源端和负载之间产生电位差。图 75 示出了一种不推荐使用的方法。如果整个系统仅由一个源和一个负载构成，或者系统内的各种源与负载工作性质基本互不影响，这种接地配置法是可取的。

c) 低频接地网络只能有一个点与大地电极分系统相连接。

d) 接地网络的配置应尽可能减小导体通路的长度。若在设施中要与接地网络相连接的各台设备之间分开得很远时，应配备多个接地网络。

e) 接地网络导体的布线要避免接地导体与一次电源导线、雷电引下线或其他任何可能传送大电流的导体作长距离的平行敷设。

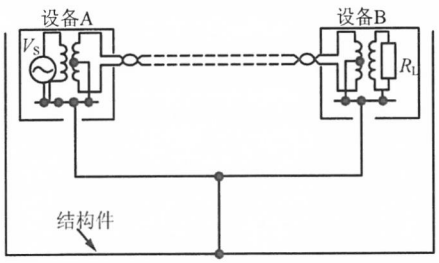


图 74 推荐的低频设备信号耦合方法

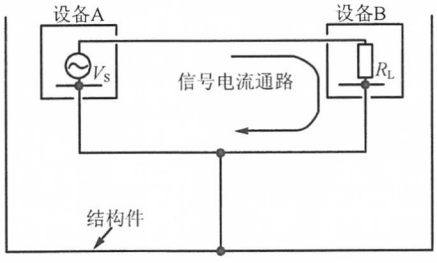


图 75 接地网络用作信号回流通路(通常不推荐)

8.4.3 高频网络(＞300kHz，某些场合可低至 30kHz)

高频(等电位)网络可在有关电子元件、机架、机柜之间提供一个具有最小阻抗的电位参考面。对于干扰频率超过 300kHz(某些场合可低至 30kHz)的设施，应采用这种电位参考面。在高频系统中，往往把设备的底板用作信号参考点，再把底板与机壳进行多点连接，以便在需要的频率上获得一条低阻抗的通路，见 8.4.4。

从安全要求出发，应把设备的机柜及外壳接地，以防止出现电气故障时产生危及人身安全的危险电压。故障保护网络中的杂散电流，可能会对工作到低频范围的任何信号系统造成干扰，因此应把这些杂散电流加以消除。凡存在这种问题的设备，应尽最大努力降低参考面的阻抗。一种实用的方法是，把设备的外壳与电位参考面互连，再通过建筑物的结构钢架、电缆托架、管道、暖气管、水管系统等将等电位接地平面接至大地电极分系统，以便尽可能地形成多条并联通路。由于网络的导体存在着电感和电容，这种多点的接地系统仅对低频的噪声电流呈现出低阻抗。高频噪声电流则可通过电位参考面的分布电容获得一个很低的接地阻抗。

8.4.4 频率分界线

下面关心的问题是什么频率以下的信号可认为是低频信号。当然低频和高频率之间的分界线应该足够高，以使低频信号足以包含所有音频信号。就数字系统而言，它所使用的频率从直流一直延伸到几百兆赫，因此基于脉冲信号确定分界线更合适。

为防止接地母线构成辐射天线，母线导体的长度不应超过 0.02λ。在 300kHz 时，这一长度约为 20m。对于大、中规模的设施，接地母线可能超过这个长度。所以 300kHz 可认为是能采用单点接地系统的最高频率。在 30kHz，按 0.02λ 准则，对应之接地母线最大长度可达 200m。至于频率到 300kHz 以上，一般设施中的接地母线长度都将超过 0.02λ，就应采用多点接地。

因此，通常将 DC～30kHz(取决于接口频率)的接地系统作为低频网络。高频网络的频率为 300kHz 以上。30kHz～300kHz 为高频网络与低频网络的重叠区域。

9 干扰的耦合方式及其降低的措施

9.1 概述

一套综合电子设备往往包含许多各式各样的设备。由各种系统和分系统组成的综合设备，可能被集中在一个很小的空间，例如集中在一个房间内；这些系统也可能分布在一个广阔的区域，并且装配在几个建筑物之中。不管各个设备之间的距离是大还是小，但是整个系统作为成套机组工作。每台设备都应将其指定的输出(不管这种输出是音频信号还是射频信号，也不管它们是模拟信号还是数字信号)供给某一个终端，例如供给一个天线、陆上通信线或另一台设备。同时应对各设备提供主电源和备用电源。在系统的关键点上还应进行本机监控和远程监控。因此，为了完成上述所要求的全部任务和功能，必然要有许多控制网络、配电网络和信号传输网络。

在互连的综合设备内，可能会存在许多不相容的信号，例如：一个极端是给各个分系统供电的大功率电源(主要是 DC 和 50Hz)；另一个极端是监控器、指示器和其他专用设备上存在的低电平直流信号和频率很低的信号。同样，在低频范围内，有供通信和控制用的音频信号，而在高频范围内，又存在供通信、监视和跟踪及其他用途的射频信号。这些射频信号可以从高频到微波频率范围，幅值范围可以从通信接收机输入的微瓦级至某些雷达系统发射功率的几千瓦甚至几兆瓦。宽带显示和通信系统的频率范围从音频至射频频率，而模拟和数字系统的频率却从几赫至几兆赫，并且其幅值范围可能是从几毫伏直至几伏。当综合电子设备内所输出的这些不同的信号在某一频率范围重叠时，这些信号就可能以不希望的方式互相作用而产生干扰。

干扰是电子系统中影响有用信号接收或产生不良响应的任何无关的电气或电磁骚扰。干扰可能来自电子系统内部，也可能由电子系统外部的自然骚扰源和人为骚扰源所产生。在现代电子设备和设施中，降低干扰的主要目的是减小和防止内部及外部无用信号导致的各种电子系统性能的降级。

电子综合设备和设施能否正确工作，必然与系统中的有用信号和设施中所出现的无用信号的频率及幅值有关。如果无用信号的频率落在系统的工作频率范围内，那么就可能会出现系统的响应误差。系统响应的程度与无用信号幅度相对于有用信号幅度的比值有关。例如工作在高电平信号的系统中，无用信号幅值达到伏特量级可能还是允许的；但是工作在低电平的系统中，无用信号的幅值仅几微伏就可能在系统的响应中产生不允许的误差。系统的正确接地是控制信号干扰的重要环节。

一个理想的信号系统是一对简单的信号发生器－负载组，如图 76 所示。在环路内不存在附加电压的情况下，这一简单的系统并没有干扰。但是，当电流的回流通路不是理想通路，而且又存在着噪声源时，如图 77 所示，则会出现干扰。若噪声电压 V_{N1} 和 V_{N2} 不相同，则在发生器的低电位侧(节点 1)和负载的低电位侧(节点 2)之间将存在一个电位差。如图 78 所示，这个电位差会有效地出现在与信号发生器相串联的信号传输回路上，并且会在负载中产生噪声电流。解决这种噪声问题有如下四种方法：

a) 把信号发生器－负载组与噪声源隔离开来，也就是将该系统悬浮并提供必要的屏蔽和滤波，以防止其他方式的耦合；

b) 在节点 1 或节点 2 上把环路低电位边接至参考地面，而不是把节点 1 和节点 2 都接至参考面；

c) 降低两个噪声源连接通路的回流阻抗 Z_R；

d) 控制噪声电流路径的阻抗，减少这些阻抗所产生的噪声电压 V_{N1} 和 V_{N2}。

实际的电子线路往往是几个信号源－负载组的集合，如图 79 所示。这些不同的信号源－负载组的集合，在功能上可能是互相依赖的，每个单独的信号源－负载组并不能单独地工作，因此在各信号源－负载组之间必然存在着耦合。例如，一个信号源可能激励几个负载，而一个负载也可能接收几个信号源的信号；或者一个信号源的负载可能用作另一个负载的信号源。从线路角度看，许多信号源和负载互相连接在一起，每个信号源－负载组无法使用独立的回流通路。更现实的做法是建立一个公共的接地面，即参考面，作为几个信号的公共回流通路。控制网络的非期望响应，特别在高增益或高频电路中，往往要求建立一个公共信号参考面，以供各种元件、电路和网络的功能组合件连接。理论上，这种公共参考连接面最理想的性能是：给所有以它为参考的信号提供零阻抗的通路，该网络内的几个信号电流在流回其信号源时就不会在各电路之间产生不希望的传导耦合。

在设备级，应把各种网络的信号参考面连接在一起，以防止工作人员受到电击的危险(见第 8 章和第 12 章)，同时应尽可能就近为所有网络提供相同的信号参考面。因此，在设施内的信号参考面可能延伸很远。假定这个大的参考面不能有效地提供零阻抗通路，此时应考虑信号参考面中导体的串联电感和电阻以及导体旁路电容的影响。流入信号参考面的电流将在这些阻抗上形成电压，并将在导体周围产生电磁场。

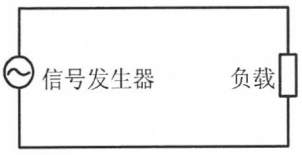


图 76　理想的能量传输回路

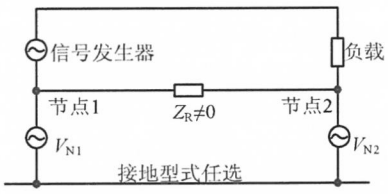


图 77　接地系统中有噪声源的能量传输回路

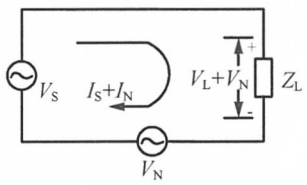
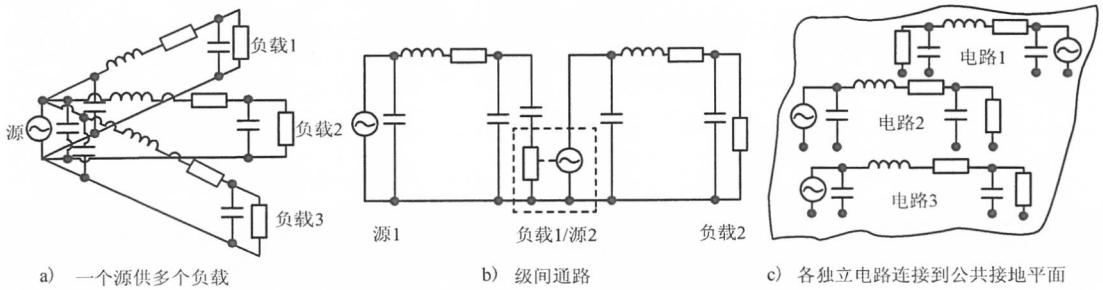


图 78　非理想的能量传输回路等效电路



a)　一个源供多个负载　　b)　级间通路　　c)　各独立电路连接到公共接地平面

图 79　信号源－负载组的实际组合

9.2 耦合机理

9.2.1 概述

耦合定义为由一个电路所产生的电场或磁场在另一个电路上感应出电压或电流的方式。干扰耦合就是在电路之间的杂散耦合或无意耦合，这种耦合会使其中一个电路的响应产生误差。应了解可能存在的寄生信号源以及了解这种干扰被耦合到敏感电路上的耦合机理，以便保护敏感的信号电路免受干扰。

降低敏感电路受到干扰的方法，取决于所出现的干扰类型。根据干扰的耦合形式，可以对干扰进行大体的分类：传导耦合和自由空间耦合。当干扰和受干扰的电路由一根导体相连接并且两个电路共有公共阻抗时，就会发生传导耦合。当一个电路或一个源产生电磁场，电磁场被电路或源辐射出去后被另一个敏感电路接收，或者电磁场以感性或容性形式(近场)耦合到另一个敏感电路时，则发生自由空间耦合。

9.2.2 传导耦合

引入设施中的电源线提供了一条将干扰从外部干扰源传入设施的耦合通路。外部干扰可能通过设备的电源线路很方便地传导至某个特定的单元或设备之中。同样，干扰也可以通过设备内公共的直流电源线在各种电路之间传导耦合。如果几个工作在不同信号电平和频率范围的电路采用同一直流电源，那么一个电路的工作就可能严重影响另一个电路的工作。例如，音频放大器中的前置放大器和功率放大器都由同一直流电源供电时，由于功率放大器的功耗电流会发生相当大的变化，这就可能造成前置放大器电源电压的变化。这种电压的变化量与前置放大器的工作信号电平相比，可能很大；这些不需要的变化量会与有用信号一起被放大，使放大器的输出产生失真。

传导耦合的另一个通路是信号线。通常，信号线要穿入各设施的每个单元或设备，也就是说，为了连接各个电子电路，这种信号线通常是必需的。干扰可以像通过电源线一样，在信号线上以传导的方式很容易地耦合至各个设施、设备和电路。

信号参考面也在各设备或电路之间为不需要的信号提供另一条潜在的耦合通路。因为实际信号参考面的阻抗并不为零，所以流入信号参考面的任何电流都会在参考面上的不同点之间产生电位差。以这些点为参考的互连电路，就可能以图 80 所示的方式受到传导耦合干扰。图 80 中流过电路 1 的电流 I_1，通过信号参考面的阻抗 Z_R 流回其信号源，这就在参考面上产生电压降 V_N。但是阻抗 Z_R 是与电路 2 所共用的，因此，V_N 就成为电路 2 中与有用信号电压源 E_{S2} 相串联的一个电压。这个寄生源(V_N)在电路 2 的负载上就产生一个干扰电压 V_{N2}；同样，在电路 2 中的有用电流 I_2 也在电路 1 中产生干扰。

在一个设施中，通过互连设备信号参考面所形成的传导耦合，可能出现类似于上述内部电路间的耦合方式。图 80 中，如果电路 1 代表两个互连的设备，而电路 2 也代表另一对互连设备，那么流入其中一个设备的电流就可以通过上述耦合方式在另一个设备中产生干扰。即使这两组设备不使用信号参考面作为信号回流通路，信号参考面仍然可以引起设备之间的耦合。图 81 给出了流入参考面(或接地面)的杂散电流 I_r 的影响。I_r 可能是另一组设备与信号参考面直接耦合产生的电流，也可能是自由空间对信号参考面耦合产生的电流。在这两种情况下，I_r 都会在信号参考面阻抗 Z_R 上产生电压 V_N。这个电压 V_N 又会在互连的回路中产生一个电流，进而在设备 B 的 Z_L 上形成干扰电压。可见，由于公共信号参考面的存在，干扰就可以通过传导方式耦合到与非零阻抗的参考面相连的所有电路和设备中。

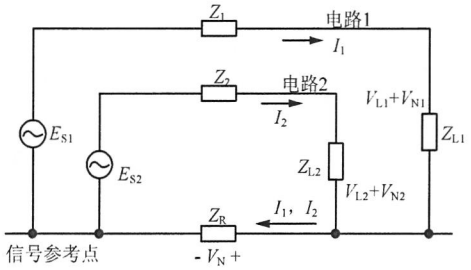


图 80 由共阻抗引起电路间的耦合

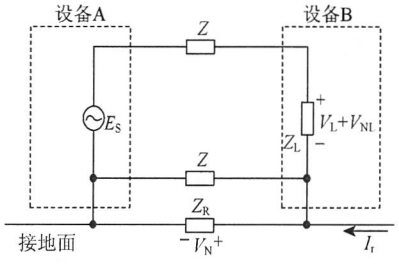


图 81 外界噪声经传导耦合进入互连电缆

9.2.3 自由空间耦合

9.2.3.1 概述

自由空间耦合是在两个或多个没有导体直接互连的电路之间的电磁能量传递。根据电路之间距离的不同，这种耦合通常分别定义为近场耦合或远场耦合。根据电磁场的性质又可以分为感性耦合和容性耦合两种。在感性耦合中，干扰源或电路产生与敏感器件和电路相交链的磁场；而容性耦合则是由干扰源和敏感电路之间的电场作用引起的。

电磁波能量的辐射，是远场耦合的基本机理。“辐射耦合”这个术语，虽然有时也用来描述近场(感性和容性)耦合和远场耦合这两种方式的耦合。但是，辐射耦合通常是指电磁波按照波的传播规律，通过空间传递的方式，将能量从一个辐射源传输到一个敏感电路中去。

9.2.3.2 近场耦合

9.2.3.2.1 概述

当两根或多根电线或其他导体互相放置得很近时，一根电线上的电流或电压将会以感性或容性耦合的方式耦合至另一根电线上。对于这种近场耦合，起干扰源作用的电线可以是任何导体，例如高电平的信号线、交流电源线、控制线、或者甚至是一根避雷引下线。感应至其他导线上的电流或电压又可以进一步以传导的方式耦合至敏感电路上。

9.2.3.2.2 感性耦合

一根直而长的载流导线周围的磁场如图 82 所示，该磁场可按式(121)由安培定律确定：

$$\oint H\mathrm{d}l = i(t) \qquad (121)$$

式中：

H ——磁场强度，A/m；

$\mathrm{d}l$ ——沿着环绕电流 $i(t)$ 的(任何)闭合环路积分线上的长度元，m。

若取一个半径为 r 的圆作为式(121)的积分路线，可以导出式(122)所示的磁场表达式：

$$H = \frac{i(t)}{2\pi r} \qquad (122)$$

因此，一根载有电流 $i(t)$ 的长直导线周围的磁场强度，与离开导线的距离 r 成反比，也就是说，H 随着与导线距离的增加而减小。

这个磁场会在邻近的信号电路环路上感应出电压，如图 83 所示。感应电压按式(123)由法拉第定律确定：

$$V_{\mathrm{i}}(t) = -\mathrm{d}\Phi/\mathrm{d}t \qquad (123)$$

式中：

$V_{\mathrm{i}}(t)$ ——感应电压，V；

Φ ——与敏感电路环路交链的总磁通，Wb。

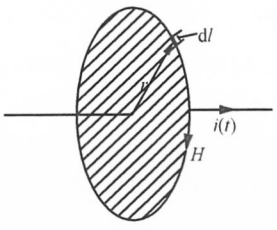


图 82 载流导体周围的磁场

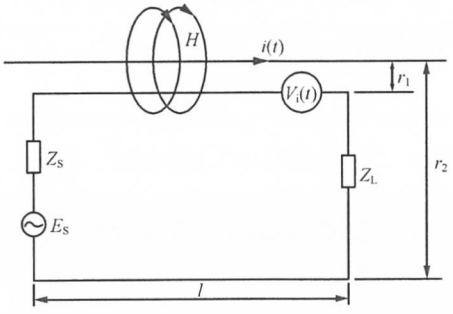


图 83 感性耦合示意图

总磁通由式(124)给出：

$$\Phi = \int_S B\mathrm{d}S = \mu \int_S H\mathrm{d}S \quad \cdots\cdots (124)$$

式中：

B ——磁通密度，$B=\mu H$，$\mathrm{Wb/m^2}$；

μ ——介质的磁导率，H/m；

$\mathrm{d}S$ ——环路面积元，$\mathrm{m^2}$。

将式(122)代入式(124)，并在图 83 的环路面积上积分就可以得出式(125)所示总磁通计算式：

$$\Phi = [\mu l i(t)/2\pi]\ln(r_2/r_1) \quad \cdots\cdots (125)$$

式中：

r_1 和 r_2 ——分别是从 $i(t)$ 至环路平行于 $i(t)$ 的两个边的距离，m；

l ——上述两平行边的长度，m。

式(125)给出了靠近载流导线的平行敏感环路中交链总磁通与载流导线上电流的关系。把式(125)的总磁通代入式(123)，就可得出环路上所感应的电压 $V_i(t)$，如式(126)所示：

$$V_i(t) = \frac{-\mu l}{2\pi}\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)\frac{\mathrm{d}i}{\mathrm{d}t} \quad \cdots\cdots (126)$$

在自由空间，$\mu_0=4\pi\times10^{-7}$ H/m，因此，式(126)可简化为式(127)：

$$V = -2\times10^{-7}\times l\times\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)\frac{\mathrm{d}i}{\mathrm{d}t} \quad \cdots\cdots (127)$$

如果在邻近导体中的干扰电流为正弦电流，如式(128)所示：

$$i(t) = I_m\cos(\omega t + \theta) \quad \cdots\cdots (128)$$

那么，$\mathrm{d}i/\mathrm{d}t$ 的最大值由式(129)给出：

$$\left|(\mathrm{d}i/\mathrm{d}t)\right|_{max} = \omega I_m = 2\pi f I_m \quad \cdots\cdots (129)$$

而在式(126)中所感应的电压最大值由式(130)给出：

$$\left|V_i\right|_{max} = \mu l f I_m \ln(r_2/r_1) \quad \cdots\cdots (130)$$

式中：

f —— $i(t)$ 的频率，Hz。

由式(126)和式(127)可见，在一个两边平行于电流 $i(t)$ 的电路环路上感应的电压 $V_i(t)$ 是由环路的尺寸、环路与电流 $i(t)$ 的距离以及 $i(t)$ 的时间变化率所决定的。因而，一个敏感电路环路中所感应的电压，将随着环路的面积的增加(l 或 r_2 的增加)、干扰源的频率 f 或时间变化率 $\mathrm{d}i/\mathrm{d}t$ 的增加而增加，并随着干扰源与环路之间距离 r_1 的减小而增加。

前面各式指出，感应电压与敏感电路环路的阻抗无关，也就是说，在高阻抗电路上所感应的电压幅值与在低阻抗电路上所感应的电压幅值相同。但是，通常在低阻抗电路上有用信号的电压要比在高阻抗电路上有用信号的电压小得多。换言之，在低阻抗电路中所感应的干扰电压可能比信号电压高，结果在电路负载上更有可能产生显著的干扰。但在高阻抗电路中，同样的感应电压就可能比信号电压幅值小，因此就不一定会形成干扰。因此，对于感性耦合，低阻抗电路通常比高阻抗电路更为敏感。

9.2.3.2.3 容性耦合

如图 84 所示，当两个电路的信号导体互相靠近时，在导体之间就存在着电容 C_C。这个电容的数值

是信号导体几何尺寸的函数，对于平行的导线来说，电容可由式(131)给出[25]：

$$C_C = \frac{1.21}{\lg(2r_C/d)} \times 10^{-11} \quad \cdots\cdots (131)$$

式中：

C_C ——电容，F/m；

r_C ——两根导线间的距离，m；

d ——导线的直径，m。

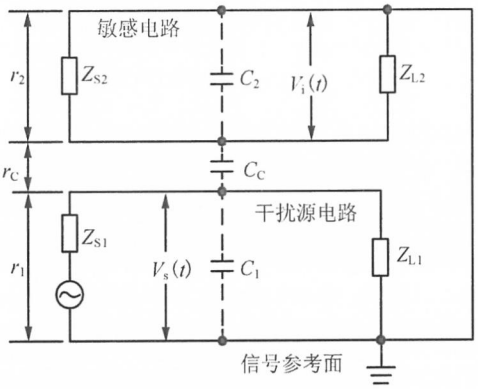


图 84　容性耦合示意图

在每根信号导线及其回流导线之间亦存在分布电容。如果信号导线与其回流导线平行，这些电容仍可以用式(131)进行计算，只要用 r_1 和 r_2 来代替 r_C 即可(见图 84)。

干扰源的电压 $V_s(t)$ 会通过两信号导体之间的互电容 C_C 产生一个电流，并在敏感电路中形成一个感应电压 $V_i(t)$。图 85 a)给出了图 84 的等效电路。在图 85 a)中，利用等效的阻抗 Z_2 代替 Z_{S2} 和 Z_{L2} 的并联组合，如式(132)所示：

$$Z_2 = (Z_{S2} \cdot Z_{L2})/(Z_{S2} + Z_{L2}) \quad \cdots\cdots (132)$$

随时间变化的电压，可用它的交流稳态相位复矢量来代替。在敏感电路中的感应电压(假定是交流稳态)由式(133)给出：

$$V_i = \frac{Z_{C2}Z_2/(Z_{C2} + Z_2)}{Z_{CC} + Z_{C2}Z_2/(Z_{C2} + Z_2)} V_S \quad \cdots\cdots (133)$$

Z_{C2} 和 Z_{CC} 由式(134)和式(135)给出：

$$Z_{C2} = \frac{1}{j\omega C_2} \quad \cdots\cdots (134)$$

$$Z_{CC} = \frac{1}{j\omega C_C} \quad \cdots\cdots (135)$$

把式(134)和式(135)代入式(133)，则感应电压由式(136)确定：

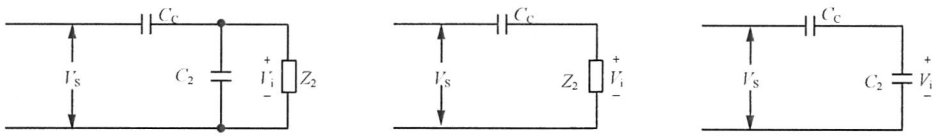
$$V_i = \frac{j\omega Z_2 C_C}{1 + j\omega Z_2(C_2 + C_C)} V_S \quad \cdots\cdots (136)$$

式中 $\omega = 2\pi f$。如果 $j\omega Z_2C_2 << 1$(在较低的频率时，这通常是正确的)，则图 85 b)的等效电路是适用的，感应电压由式(137)确定：

$$V_i \approx j2\pi f Z_2 C_C V_S \quad \cdots\cdots (137)$$

当在高频时，图 85 c)的等效电路是适用的，感应电压由式(138)确定：

$$V_i = \frac{C_C}{C_C + C_2} V_S \quad \cdots\cdots (138)$$



a) 实际等效电路　　b) 低频等效电路　　c) 高频等效电路

图 85　图 84 所示网络的等效电路

这些等式表明，在容性耦合的方式下，由信号导体耦合至邻近敏感信号电路中的感应电压 V_i，取决于干扰源电压的幅值以及频率、耦合电容 C_C、敏感电路中的杂散电容 C_2，以及敏感电路阻抗的幅值。式(137)表明，在低频时，感应电压将随着耦合电容或敏感电路阻抗的增加而增加。同样，在高频时，式(138)所给出的感应电压，将随着耦合电容的增加而增加，或者随着敏感电路内杂散电容的减小而增加。应当注意，干扰源电压 V_S 的数值，取决于图 84 中干扰源电路的杂散电容 C_1。

如果敏感电路的阻抗是纯阻性的，即 $Z_2=R_2$，则由式(136)所给出的感应电压按式(139)计算：

$$V_i = \frac{j2\pi f R_2 C_C}{1 + j2\pi f R_2 (C_2 + C_C)} V_S \quad \cdots\cdots (139)$$

而感应电压与干扰电压(正弦)的幅值之比由式(140)确定：

$$\frac{V_i}{V_s} = \sqrt{\frac{(2\pi f R_2 C_2)^2}{1 + [2\pi f R_2 (C_2 + C_C)]^2}} \quad \cdots\cdots (140)$$

该比值几乎随着 R_2 的增加而线性地增加，直至 R_2 接近 $1/[2\pi f(C_2+C_C)]$为止，也就是直至 R_2 接近 C_2 和 C_C 的并联电抗时为止。当 R_2 值较大时，比值趋近于 $C_C/(C_2+C_C)$。这个电压比值的频率特性如图 86 所示。在直流时，这个比值为零；随着频率升高，这个比值逐渐趋近于 $C_C/(C_2+C_C)$。式(140)和图 86 再次表明，在容性耦合情况下，耦合至敏感电路中的电压，不但随着电路总电阻的增大而增加，并且还将随着频率的增加而增加。如果敏感电路存在感性电抗，改变容性耦合量可能会导致谐振，但这种高频谐振在高频时产生的影响不显著。

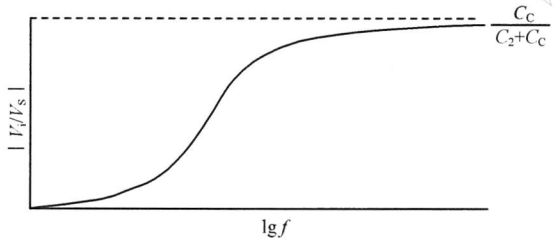


图 86　容性耦合的电压传递特性曲线

9.2.3.3　远场耦合

辐射是能量从一个导体中发射出来、并向空间传播的一种形式。上述导体不一定是专门为辐射能量而设计的，它可以是任何载流体，例如信号线、电源线、甚至是接地线。

在载流导体周围的电磁场，其数学表达式通常被表示为三项之和。其中每一项都与导体的距离 r 的某一幂次成反比；也就是说，每一项正比于 $1/r$、$1/r^2$ 或 $1/r^3$。靠近导体时(近场)，$1/r^2$ 和 $1/r^3$ 的分量

处于主导地位，并且电磁能量在导体周围和导体本身之间的空间振荡；近场各项所传播的平均能量为零。

超出近场区后，1/r 项将起支配作用。在远场区，发射出来的辐射能量要离开“天线”而进入空间传播。能量辐射的机理，可以利用电磁场在空间中两点之间传播所需要的时间来说明。电流以所加的信号频率流过天线，而且电流所产生的电磁场的极性则以相同的频率进行转换。当正电荷在天线的一端出现时，相等的负电荷则在另一端出现。在天线的附近，这两种电荷之间将建立起一个电场。当电流改变方向时，电荷将转换其位置；原先的电磁场将消失，并在相反的方向上重新建立电磁场。如果所施加的信号频率为低频，则方向转换就需要足够长的时间，使得实际储存在电磁场中的所有能量可以返回至电路中去，产生的辐射甚微。但是，如果频率很高，电荷转换得相当快，则电磁场中许多能量在返回电路之前，导线附近就已经形成了相反方向的电磁场。因此，未能返回电路的这部分电磁场就会从天线中分离出来，并以电磁波的形式向空间传播。

上述电磁能量从一根导线或天线辐射的过程，在图 87 中以一个偶极天线来表示。图 87 a)为偶极子天线两端的电荷最大时的情况。当电流以相反的方向流动而电荷向着偶极子的中心返回时，其轴向电力线会凹陷，如图 87 b)所示。由于电场以一定的速度移动，所以所有的电力线就没有足够的时间返回天线中去。当这些电力线的端部在天线中心相遇而天线的电荷为零时，没有消失的电力线将自行闭合，构成一个闭合环继续存在，如图 87 c)所示。天线电荷向着相反的方向移动，如图 87 d)所示，而相反方向的电场则把以前已分离出去的闭合环推至远处，如图 87 e)所示。这一过程将以反方向的电场持续进行，到天线附近的电场返回到原来状态时完成一次循环。这种循环随着所施加的信号频率重复进行，电磁场就以光速从天线向外传播。虽然图 87 仅示出了电场的情况，但是，根据麦克斯韦方程，同时也存在着相关的磁场。磁场由环绕着天线的同心圆组成，并且当电场向外传播时，磁场也顺着径向扩展。这些向外传播着的电场和磁场代表着由天线向周围空间辐射的能量。

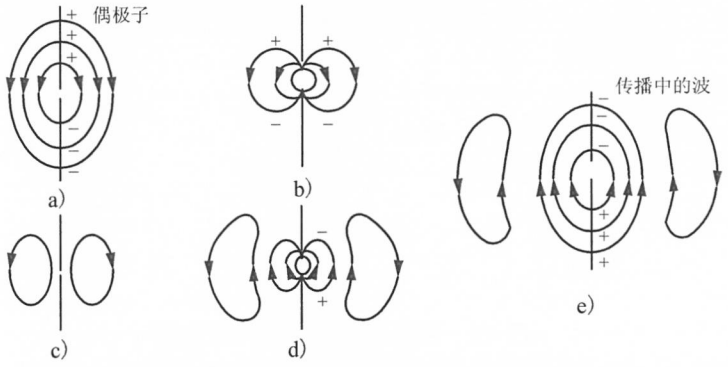


图 87　辐射偶极子附近的电场分布图

相反，放置在一个辐射电磁场内的导线或导体则会感应出电流。因此，这些导线或导体就起着接收入射电磁能量的天线的作用。在导线中的这种感应电流可能传导至相关的信号电路中去(见 9.2.2)。由此而产生的干扰幅值，既取决于导线附近电磁场的强度，也取决于导线作为天线的效率。辐射电磁场的强度与下列因素有关：离开辐射导线的距离、辐射导线作为天线的效率，以及辐射导线上信号的幅值和频率。一根导线或其他导体，不管它作接收天线或辐射天线，其效率均是线长与信号波长之比的函数。

评价某导线作为天线的效率，方法之一是把其辐射电阻与一个四分之一波长(λ/4)天线的辐射电阻进行比较。天线的辐射电阻是这样定义的，即：辐射电阻消耗的功率与该天线辐射的功率相等。可见，辐射电阻是天线辐射能量的直接度量。一根长为λ/4 的单极子天线，具有 36.5 Ω 的辐射电阻。当一根天线所发射或接收的能量为一根λ/4 的单极子所发射或接收能量的 10%或更小时，则可认为它的效率是相当低的。因此，一个低效率天线的辐射电阻为 3.65Ω 或更小。长为λ/11 的单极子符合这个准则。一般以λ/10 代替λ/11 计算更为方便。因此，选取λ/10 的长度来作为界定长度，低于此长度的导体不能作为天线有效工作。

9.3 共模噪声

9.3.1 概述

共模噪声是一种不希望的噪声电压，当相对系统的接地点或公共点进行测量时，在信号线路的两个导体上出现的相同的噪声电压。如同差模噪声一样，共模噪声可由不需要的噪声源经过阻性耦合、容性耦合或感性耦合引起。另外，许多测量传感器的一对输出线路上往往存在直流或交流共模电压，这种共模电压对传感器的正确工作是必要的。虽然这种共模电压并不是一个噪声源，但是需要精心设计和应用运算及仪表放大器，以免这些共模电压干扰有用信号分量。

电路或系统中大多数的共模噪声源是通过不同接地点之间阻性耦合的。这种耦合的简单例子如图 88 所示，示波器的探头从电路的某一点把信号耦合至示波器的输入端。把探头的地与电路地相连，再把电路地接到设施的接地系统。因为，通常总有电流流入设施的接地系统(这些电流主要是 50Hz 电源的杂散电流)，这就形成电路接地参考电位与示波器接地参考电位的差异。这种电位差是杂散电流流过设施接地系统的阻抗产生的。因此，电路的接地参考点和信号节点，相对于示波器的接地参考点都叠加有相同的噪声电压。这种噪声被称为共模噪声，因为这种噪声对于电路中所有接地点，其中包括电路的接地点，都是相同的。这些噪声源不仅会引起测量误差，而且会在互连的设备之间产生干扰。

阻性电阻耦合共模噪声除了在设备之间发生外，也可能出现在单个设备中。这种耦合源于共用地线、机架或接地面上流动的工频电流和多种信号电流。

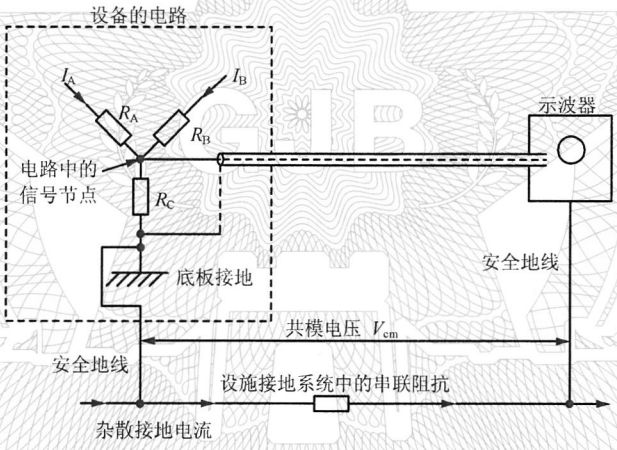


图 88 传导耦合共模噪声示意图

9.3.2 共模耦合的基本理论

共模耦合的机理可用图 89 来解释。在图 89 中，V_S 代表不平衡信号源的某个信号电压，如代表某个传感器或测量放大器的输出信号，而 R_S 是该信号源的输出阻抗。把此信号源连接至某电子器件的输入端，如图中的放大器。R_1 和 R_2 是信号源和放大器之间互连电缆的串联电阻。具有输出电阻 R_{cm} 的电压源 V_{cm} 则代表一个共模噪声电压源。当以放大器输出接地点作测量参考点时，此共模噪声电压源就叠加到信号电压上。在图 89 中，Z_1 和 Z_2 代表放大器两端的输入阻抗。在差分放大器中，这些阻抗通常是非常高的；但是，在单端放大器中，一个阻抗仍较高，另一个阻抗则由于输入端被直接连到接地参考点而变得非常低。

图 89 中电路的分析是十分复杂的，不进行大量的代数运算很难获得结论。通常 R_{cm} 很小，可以忽略。在这种近似的情况下，可以证明放大器的输出电压 V_O 由式(141)给出：

$$V_O = KV_X = K\left(\frac{Z_1}{R_S + R_1 + Z_1} - \frac{Z_2}{R_2 + Z_2}\right)V_{cm} + \left(\frac{KZ_1}{R_S + R_1 + Z_1}\right)V_S \quad \cdots\cdots (141)$$

式中：

K ——放大器的电压放大倍数。

在式(141)中，有两个信号对输出信号 V_O 产生影响，即有用信号和无用的共模噪声。降低共模噪声的方法有三种：

a) 降低 V_{cm}：降低 V_{cm}，输出端的共模噪声电压可成比例地降低。

b) 使平衡放大器的两路输入平衡：如果把 R_1 和 R_2 调整到满足式(142)所示的平衡条件，

$$\frac{Z_1}{R_S+R_1+Z_1}=\frac{Z_2}{R_2+Z_2} \quad \cdots\cdots(142)$$

就可使放大器输出端的共模噪声电压消失。

c) 增大 Z_1 和 Z_2：如果 Z_1 与 R_S+R_1 相比足够大，而且 Z_2 与 R_2 相比亦足够大，那么放大器输出端的共模噪声电压将会减小。此方法通常需用一个差分放大器，并把其信号输入引线进行精心的屏蔽。

对于平衡信号源或平衡信号传感器，其基本电路和方程式与图 89 和式(141)有所不同。图 90 给出了一个输出电压为 V_S，输出电阻为 R_S 的平衡信号源，此信号源又连至一个放大器的两个输入端。在这种情况下，把平衡信号源的中心抽头接至接地参考点。正如前面一样，如果我们假设 R_{cm} 很小，可以证明，V_O 由式(143)给出：

$$\begin{aligned}V_O &= KV_X \\ &= K\left[\frac{Z_1}{R_S/2+R_1+Z_1}-\frac{Z_2}{R_S/2+R_2+Z_2}\right]V_{cm}+K\left[\frac{Z_1}{R_S/2+R_1+Z_1}+\frac{Z_2}{R_S/2+R_2+Z_2}\right]\frac{V_S}{2}\end{aligned} \quad \cdots\cdots(143)$$

和不平衡信号源一样，减小放大器输出端共模噪声分量的结论同样适用于本电路。然而，在这种情况下，放大器应有一个差分输入级，否则信号源的一半将被短路掉。而在图 89 中，放大器可以用单端输入或差分输入。

放大器的共模抑制比(CMRR)是放大器的增益(K)乘以共模噪声电压(V_{cm})除以由于 V_{cm} 产生的输出。共模抑制比描述电路避免将共模噪声转换为差模噪声的能力。用一正量表示，CMRR 由式(144)给出：

$$\mathrm{CMRR}=\left|\frac{KV_{cm}}{V_O}\right|_{V_S=0} \quad \cdots\cdots(144)$$

式中：

K ——放大器电压放大倍数；

V_{cm} ——共模噪声电压，V；

V_O ——放大器输出电压，V。

理想情况下，一个放大器的共模抑制比应为无限大或尽可能的大。而在最坏情况下，CMRR＝1。实际上共模抑制比是有限的，所以共模抑制比是对放大器抑制其输入端上共模噪声信号能力的一种度量。对于具有平衡输入阻抗的优质差分放大器来说，CMRR 约为 1000，用分贝表示：CMRR＝60dB。

图 89 中放大器的共模抑制比很容易由式(141)推出，如式(145)所示：

$$\mathrm{CMRR}=\left|\frac{1}{\dfrac{Z_1}{R_S+R_1+Z_1}-\dfrac{Z_2}{R_2+Z_2}}\right| \quad \cdots\cdots(145)$$

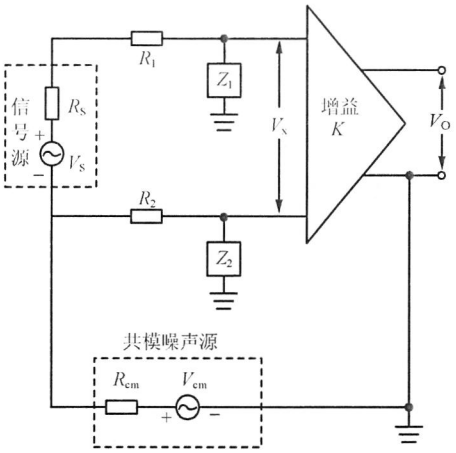


图 89　在不平衡系统中的共模噪声

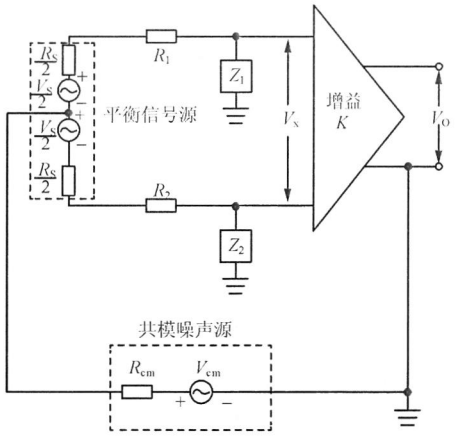


图 90　平衡系统中的共模噪声

9.3.3　差分放大器

设计差分放大器时，应使 $Z_2>R_2$，而 $Z_1>(R_1+R_S)$。由于 Z_1 和 Z_2 通常是频率的函数，因此可以看出，共模抑制比也是频率的函数。一般来说，Z_1 和 Z_2 是并联有电容的电阻，当容性的电抗变得比电阻小的时候，共模抑制势必将随着频率的增高而减小。因此，在高频时，很难获得大的共模抑制比。

9.4　降低干扰的方法

9.4.1　概述

可以利用下列方法来减小信号间的互相干扰：减小信号系统之间的耦合；改善信号系统，使系统之间的相互作用在其中任一系统中不能产生干扰；消除干扰源；把干扰从敏感信号系统中滤除。

9.4.2　减小耦合

9.4.2.1　概述

降低耦合的方法包括：减小参考面的阻抗、增大信号系统之间的空间距离、减小每个信号系统的环路面积、系统间互相屏蔽以及在每个系统中采用平衡线路。

9.4.2.2　减小参考面的阻抗

减小信号参考面的阻抗，可减小参考面上任何两点之间的电位差，因此就降低了接地于这些点的敏感电路间的传导耦合干扰。信号参考面阻抗的降低，可以通过减小构成该参考面的导体的电阻 R 和串联电抗 X 来实现。电阻将随着导体长度的缩短或信号频率的降低(由于趋肤效应，见 8.2.2.1)而减小，并随着导体横截面面积的增大而减小。电抗也将随着信号频率和导体电感的降低而减小，而电感本身又是导体长度和横截面面积的函数。要降低信号参考面的阻抗，应当使参考面的导体长度尽可能短，并使导体横截面面积尽可能大。信号参考面的总阻抗还取决于接地导体之间的低阻抗搭接。有关搭接和搭接电阻的问题，见第 10 章。

9.4.2.3　增大空间距离

感性和容性耦合，可以通过增大信号电路之间的间隔来降低。由式(126)、式(131)和式(136)可以看出，增大干扰电路与敏感电路之间的距离，耦合至敏感电路的电压将按指数规律降低。

9.4.2.4　减小电路的环路面积

减小干扰源电路或敏感电路的环路面积，将会减小两个电路之间的感性耦合。式(126)说明，减小敏感电路的连线长度 l 或环路宽度 (r_2-r_1)，可以减小感性耦合电压。把信号回流导体走线与信号导体走线尽量靠近，就降低了敏感电路的环路面积。最好的方法是把信号走线与其回流线绞合在一起。绞合导线之所以能降低感性耦合电压，是因为在每小段绞合面内所感应的电压与邻近绞合面内所感应的电压幅值近似相等而相位相反之故。扭绞线的干扰抑制效果很大程度上取决于扭绞的一致性和扭绞数。表 17 给出了普通导线每米扭绞数的最小值。

表 17　导线的每米扭绞数最小值

导线截面积 mm^2	双导线扭绞数	三导线扭绞数	四导线扭绞数	六导线扭绞数	八导线扭绞数
16	13	10	6	3	3
10	16	13	10	6	5
6	20	13	10	8	6
4	23	16	13	10	6
2.5	26	20	13	10	8
1.5	30	23	16	13	10
0.75	40	26	20	20	13
0.5	52	40	26	26	20

9.4.2.5　屏蔽

降低耦合的另一个有效方法是在电路和有关连线的周围进行屏蔽。以扁平线的屏蔽为例，图 91 给出了四种线路中扁平线的截面图。在这四种线路中所有导体和它们之间的间隔都是相同的。情况 a)和 b)的区别仅是两条线路接地导体的相对位置不同，对于情况 c)，除了在绝缘层的两边覆盖厚度约为 0.025mm 的柔性铝箔以外，其余皆与 a)相同，这种金属箔可以看作为接地面，起屏蔽作用，因此减少了相邻线路之间的耦合作用。同样的，情况 d)中除了采用双面屏蔽之外，其他与 b)也是相同的。上述所有四种情况中峰值电压和总能量的传输情况与常用的含有两对双绞线屏蔽电缆相似。情况 c)和 d)中分布电容是相同的，所以结果也相同，而且对上述情况分析表明，双面屏蔽布置形式可以得到最好的线间隔离。屏蔽原理在第 11 章介绍。

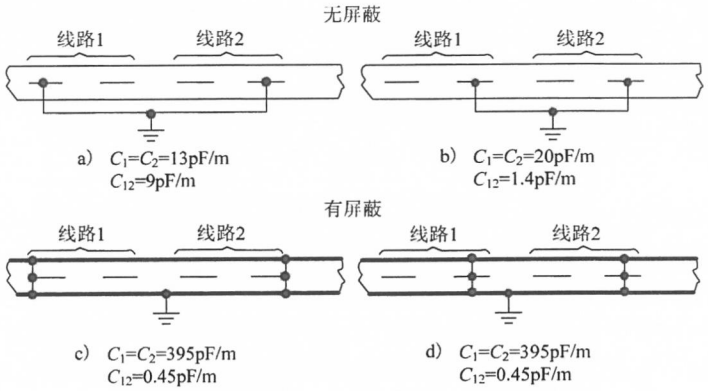


图 91　扁平线的截面图及其屏蔽效果

9.4.2.6　平衡线路

当把信号电路的信号源和负载端都接地时，就建立了传导耦合通路。利用平衡的信号线路和电路，是减小传导耦合干扰的有效方法。在一个平衡电路中，两根信号导体相对于地是对称的。在两根导体的对应点上，有用信号相对于地来说是极性相反而幅值相等的。共模电压是同相的，并且在每根导体上存在相等的幅值，因此到负载上势必抵消。抵消的程度取决于两根信号线相对于地的平衡程度。

如果信号线路完全平衡，则共模电压就全部抵消，在负载上的耦合干扰电压为零。信号源和负载通常不是(或不能)工作在平衡方式，那么在信号线路的信号源端和负载端均应采用平衡/不平衡变换器或其他耦合器件进行转换。

9.4.3　替代方法

除了降低耦合之外，减小干扰还有几种其他的方法。第一种方法是改进实际电路。例如，可以改变干扰源或敏感电路两者之一的频率，使得两个信号不互相干扰。同样，可以把有用信号变换到另一个频

率范围，或者把它转换成不受噪声影响的信号形式。前一种方法例子是把有用的信号变换成 VHF(甚高频)/UHF(超高频)，而后一种方法例子则是利用声耦合或光电传输。通过以上技术处理，就可使易受干扰的敏感通道部分的传输信号，在接收和检测装置上对噪声信号不产生响应。另外，可以通过减小干扰源的幅值或降低敏感电路的灵敏度来降低两个电路的相互作用。此外，还可以改变一个或两个电路中所使用的调制方式来减小干扰。

另一种方法是消除干扰源。虽然这似乎是一种普通的解决办法，但在许多情况下，它却是一种有价值的方法。例如，干扰源可能是一个生锈的连接点，这就可以通过正确的搭接把它消除。

第三个方法是利用滤波器。大部分的干扰信号(即使它们是通过自由空间耦合到信号线路和电源线路的干扰信号)都是以传导方式耦合至敏感电路的。因此，在信号线路和电源线路中，正确地采用滤波器可以降低这种耦合。

9.5 设施和设备的要求

本章所叙述的干扰抑制原理，在某种程度上是第 15 章～第 18 章中许多推荐方法的主要根据。例如，减小场地间或建筑物间大地上的共模噪声电压，就是在每个设施上需要将其对地电阻降低至 10Ω 以下的出发点之一。即使对地电阻没有降至 10Ω，仍然可通过其他方法减少连接两不同位置或建筑物的数据电缆上的所有共模干扰噪声的影响。低电阻对减小任意两接地电极间的电位差是有益的。在第 15 章～18 章推荐的屏蔽和在低频设备中使用平衡扭绞线对可对任何设施中存在的不可避免的噪声电压提供附加的共模抑制。实际上，控制一个设施中噪声源的方法很多，例如：使交流配电系统中各相之间的负荷平衡；确保中线仅在供电断路装置上接地(这在第 15 章～18 章中推荐)；限制电源滤波电容器漏电电流的大小，限制方法是在满足滤波要求的条件下尽可能采用小容量的滤波电容器，或者几台设备共用一组经过滤波的公共电源线路。

10 搭接

10.1 概述

搭接是指在两金属物体之间建立一个供电流流动的低阻抗通路。搭接是通过机械或化学方法把两个或多个金属物体连接到一起并进行结构固定。

10.2 搭接的目的

在任何的电子系统中，无论是一台设备还是一套设施，都应在各金属物体之间进行互相搭接，以便减小电击危险、提供雷电防护、建立信号参考点等。理想情况下，这些互连以适当方式完成后，通路的机械和电气性能仅取决于搭接件，而不取决于互连的搭接点。此外，搭接点应在长时期内保持性能稳定，以避免或延缓搭接性能的逐步衰退。搭接应按有关的方法和程序进行，以获得足够的机械强度及金属物体之间的低阻抗互连，并保证由此建立的通路不致因腐蚀或机械松动而失效损坏。

为了要达到下列目的，应采用搭接：

a) 保护设备和人身安全，防止雷电放电的危害；
b) 建立故障电流的回流通路；
c) 建立信号电流均匀而稳定的回流通路；
d) 降低机柜和壳体上的射频电位；
e) 保护人身安全，防止电源偶然接地时发生电击危害；
f) 防止静电电荷的积聚。

在正确设计和实施的情况下，搭接可以减小电子系统的故障保护网络、信号参考网络、屏蔽网络和雷电防护网络内各点之间的电位差。但是，不良的搭接则会引起各种危险和干扰，例如，在交流电源线路中的松动连接，可能会在负载上产生不可接受的电压降，而且负载电流流过电阻很大的不良搭接点时会产生足以损坏电线绝缘层的热量，甚至可能进而造成电源线路的故障或发生火灾。信号线路中的松动或高阻抗搭接点会扰乱信号的正常状态，例如降低信号幅值或增大噪声电平。雷电防护网络中的不良搭接点特别危险，一次雷电放电的强大电流可以在不良搭接点上产生几千伏的电压，由此产生的电弧有引

起火灾和爆炸的危险，并可能对设备产生干扰。搭接点上所形成的附加电压，还会增加该搭接点对放电通路邻近物体发生闪络的可能性。

高噪声电平引起系统性能的下降，往往是由于电路回流通路和信号参考网络上不良的搭接引起的。正如前面所述，信号参考网络对潜在的不相容信号提供了低阻抗回流通路。信号参考网络各元件间的不良连接，会增加电流通路的电阻。电流流过这些电阻所形成的电压可使电路或设备信号参考点之间的电位出现差异。当这些电路和设备互连时，上述电位差将形成系统内的无用信号。

搭接还关系到其他干扰控制措施性能的好坏，例如，连接器壳体与设备机箱的正确搭接，对保持电缆屏蔽的完整性和维持电缆的低损耗传输特性都是必不可少的。在电磁屏蔽中，为了获得较高的屏蔽效能，需要对接缝和接头进行仔细的搭接。为了获得最佳性能，还应对干扰抑制元件和器件进行良好搭接。以图 92 所示的典型电源滤波器为例，如果滤波器的回流一边(通常是壳体)对接地参考面(一般是设备的机柜或机架)没有良好的搭接，那么其搭接阻抗 Z_B 就可能较大，以致影响滤波器的性能。图 92 所示为低通滤波器，其预定用途是滤去设备电源线中的高频干扰分量。对干扰频率，旁路电容器的电抗 X_C 很小，滤波器在一定程度上达到了滤波目的。出现在电源线路上的干扰信号将沿着通路①被旁路至地，因此干扰信号就不会到达负载。但是，如果 Z_B 比 X_C 高，那么干扰电流将流过通路②到达负载，使滤波器的滤波性能降低。

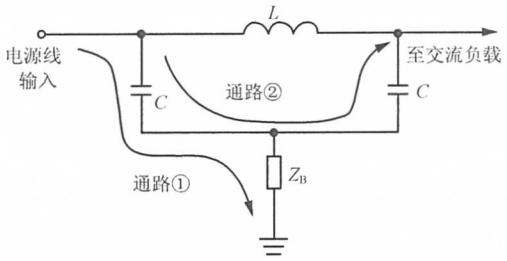


图 92　不良搭接对电源线滤波器性能的影响

如果电流通路上的某一个搭接点没有可靠接触，或由于振动使搭接点松动，这种搭接点就起着一组间歇式触点的作用。即使通过此搭接点的电流为直流或工频交流，在此搭接点上所产生的火花仍可能会产生频率高达几百兆赫的干扰信号。

在高电平射频电磁场中出现的不良搭接，例如在大功率发射机邻近处的不良搭接，可能会产生更复杂的干扰。当存在两个或两个以上高电平信号发射时，不良搭接点会引起无源互调产生其他混频分量。某些金属氧化物本身就是半导体，具有非线性器件的特性。因此，它能使这些信号之间产生混频作用，由此而产生的干扰信号往往可能被耦合至邻近的敏感设备。

10.3　搭接电阻的要求

搭接的基本要求是在两个被连接的物体之间建立一条低电阻的通路。通路的电阻应在长期使用中始终保持很低。对具体的搭接点而言，其电阻限值与流过该通路的(实际的或预料的)电流有关。例如，在仅用来防止静电电荷积累的场合，等于或大于 50kΩ 的电阻值仍然是允许的。但是在涉及到雷电放电或大故障电流的搭接点处，通路电阻应非常低，以降低其热效应。

为尽量降低噪声，则要求获得低于 50mΩ 的通路电阻。以降低噪声为目的时，确定搭接电阻需要下列信息：一是存在多大的电压幅值会构成干扰威胁；二是有多大的电流流过搭接点。对各个对象，这两个因素有所不同。

达到 1mΩ 的搭接电阻可认为是高质量的搭接点。实践表明，如果两个配接表面真正清洁，并在两个配接表面之间能保持适当的压力，很容易达到 1mΩ 的电阻。搭接电阻越小，对大电流提供的保护越好，但在一般类型的搭接中，实现起来就越难。例如在连接器的外壳上和在各节管子之间，其连接就很难获得很低的电阻。不过，也没有必要为使搭接电阻远小于被连接体本身的固有电阻而花费更多的精力。

允许的电阻值较大，必定会放宽搭接的准备工作要求和组装要求。这些要求应与保持长期可靠性联

系起来考虑。如果一定要求达到低至 1mΩ 的搭接电阻，就应保证清除表面杂质，并保证提供足够的接触面积，使日后由于腐蚀而导致搭接性能衰退的程度减至最小。

在一个接地参考面或网络上，任何相隔很远的两点之间都具有相似的低电阻时，就意味着整个接地参考面或网络上的导体数量已足够，而且各导体结合部的做工是良好的。在这种情况下，阻性电压降就会减小，有利于噪声的控制。另外，电阻值低，必定会采用尺寸相当大的导体，从而有助于减小通路的电感。

应当承认，在高频时，搭接直流电阻低并不是评价搭接性能好坏的唯一指标。驻波效应、接地回路谐振、以及导体的固有电感和杂散电容都对搭接阻抗起制约作用。因此在射频搭接中，考虑直流电阻的同时还应考虑这些因素。

10.4 直接搭接

10.4.1 概述

直接搭接是在互连元件之间不使用辅助导体而建立一条有效的电气通路：把互连部分放置在一起使它们直接接触，再通过熔焊或钎焊在其接合处建立起一种熔接的金属桥接，或者利用螺栓、铆钉或夹箍使配接表面之间保持强大的压力，以获得电气的连续性。直接搭接的例子有：母线条带之间的叠接；雷电引下线与大地电极分系统间的连接；设备前面板与设备机架的配接；以及连接器壳体在设备面板上的安装等。

正确的直接搭接，直流电阻很低，并能获得一个低至搭接部分结构所允许的射频阻抗。直接搭接往往是最好的连接方式，但是只有当两个互连元件能够连接在一起，并且没有相对运动时，才能使用直接搭接。对于在空间上应分离的搭接点、缝隙、铰链或固定物体，为了建立电气的连续性，就需要采用金属条带、搭接片或其他辅助导体进行间接搭接。

通过直接搭接的两个构件的电流路径如图 93 所示。搭接处两边导体通路的电阻 R_C 由式(146)给出：

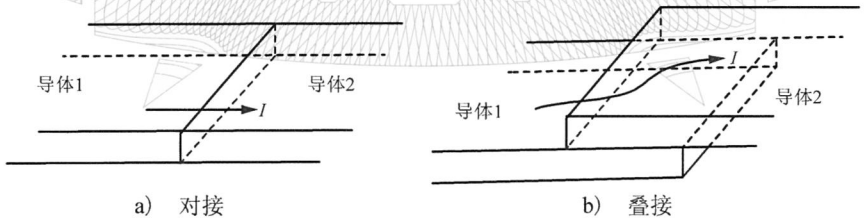
$$R_C = \frac{\rho_m l}{S} \quad \cdots\cdots (146)$$

式中：

ρ_m ——导体材料的电阻率，Ω·m；

l ——电流流过导体的通路总长度，m；

S ——导体的横截面积(设各处的截面积相等)，m^2。



a) 对接　　b) 叠接

图 93 流过直接搭接处的电流

搭接处的任何搭接电阻 R_B，都会增加通路的总电阻。因此，搭接的目的是要降低 R_B，使 R_B 的量值与 R_C 相比可以忽略，从而使总电阻只取决于 R_C。

焊接(如熔焊或钎焊)可以保证获得极低的搭接电阻 R_B。焊接型接头的电阻取决于焊接质量及填充金属的电阻率，因此熔焊或填充金属的电阻率应接近被连接金属的电阻率。

由于经济、日后的可维修性或功能方面的要求，金属焊接并非总是最恰当的搭接方法。例如，可以把配接表面叠在一起后通过高压形成连接。通常采用辅助紧固件，如螺栓、螺钉、铆钉或夹箍等在配接的表面上施加并保持一定的压力。这种连接的搭接电阻，取决于相关的金属种类、配接面的表面状态、配接表面的面积以及配接面上的接触压强。

10.4.2　接触电阻

10.4.2.1　概述

金属表面并不是绝对光滑的，事实上，金属表面有许多高低不平的峰谷。即使最光滑的市售金属表面，其均方根值粗糙度约为 0.01μm～0.02μm，大多数电气搭接表面的粗糙度比上述数值大几个数量级。当这样的两个表面接触时，它们只在峰顶(称为粗糙点)上接触。这样一来，实际供电流流动的接触面积，要比视在接触面积小得多。

图 94 给出了搭接表面间实际接触面的放大侧视图。理论上，两个无限硬的表面只能在三个粗糙点上接触。但是，一般在高压力之下由于弹性变形和塑性变形，其他粗糙点也会接触。因此，电流仅在挤压变形、建立了真正金属接触的这些粗糙点表面之间通过。电气接触的实际面积，等于各个粗糙点接触面积的总和。这种实际接触面积可能小至总视在接触面积的百万分之一[27]。

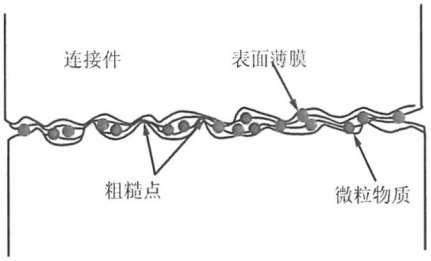


图 94　搭接件之间的接触状态

10.4.2.2　表面杂质

在每个实际的连接表面会出现一层薄膜。较为活泼的金属，例如铁和铝，会很快氧化并形成表面薄膜。而有些金属，如金、银和镍则较少受氧化膜的影响。所有金属中，金最不容易受氧化膜的影响。虽然，银并不会严重氧化，但银会很快形成硫化物。

如果表面薄膜比接触材料软得多，薄膜在粗糙点之间可被挤破，从而建立一种准金属的接触。但是，较硬的薄膜可能经受得住所加的全部或部分载荷，从而减少或限制导电的接触面积。如果这种硬薄膜出现在搭接表面，那么应在搭接之前采用热、机械或化学的方法把薄膜除掉或穿透，以便建立均一的金属通路。

搭接表面上的杂质会进一步妨碍搭接。灰尘以及像高阻金属微粒或研磨的残留物之类的固体杂质，可能会阻止金属接触。所以在搭接之前，应把这类物质从搭接的表面上彻底清除。

10.4.2.3　表面硬度

搭接表面的硬度，同样会影响接触的电阻。在一定载荷下，软金属的粗糙点会产生显著的可塑变形，建立较大的金属接触面。同样，一种软材料和一种硬材料进行相互搭接时，较软的材料必然会适应硬材料的表面形状，所产生的接触电阻会比两种硬材料所形成的接触电阻更低。表 18 列出了 6.45cm^2 视在搭接面积上搭接电阻随材料组合类型变化的情况[28]。

表 18　金属之间搭接的直流电阻　　单位为微欧

搭接的组成	电阻
黄铜－黄铜	6
铝－铝	25
黄铜－铝	50
黄铜－钢	150
铝－钢	300
钢－钢	1500
注：视在搭接面积 6.45cm^2；紧固力矩 11.3N·m。	

10.4.2.4 接触压力

机械载荷对搭接电阻的影响如图 95 所示[28]。此图给出了几种材料在视在搭接面积为 6.45cm^2 时搭接电阻随着螺栓力矩变化的曲线。黄铜的电阻变化最小、这是由于黄铜比较软，并且无绝缘的氧化薄膜之故。而铝虽然也相当软，但铝氧化膜的绝缘特性使铝的搭接电阻在力矩到达约 4.6N·m(这个力矩相应于 8.2MPa 左右的接触压强)之前，在很大程度上依赖于紧固力矩。钢则比较硬，并且易于形成氧化层，因此在 9.2N·m 的力矩或约 10.5MPa 的接触压强以下，它的搭接电阻取决于所施加的载荷(对低碳钢而言)。在超过这些压强时，其接触电阻将不再有显著改善。

10.4.2.5 搭接面积

在相同载荷(力矩)下，较小的搭接面积会产生较大的接触压强，从而降低搭接电阻。但是，正如图 95 所示，对钢来说，在压强超过 10.5MPa；对铝来说，压强超过 8.2MPa 时，增加压强所引起的搭接电阻变化已相当小。另外，用增加压强来改善电阻，会由于总搭接面积较小而抵消。反之，在相同的力矩下(不改变紧固件的尺寸)，较大的搭接面积会使搭接表面的压强减小，而压强减小又会在某种程度上抵消搭接面积增大的效果。但可以预料，减小压强的最后结果会增大搭接电阻。因此，当采用较大的搭接面积时，应相应采用力矩较大的螺拴来紧固(见 10.4.3.5)。

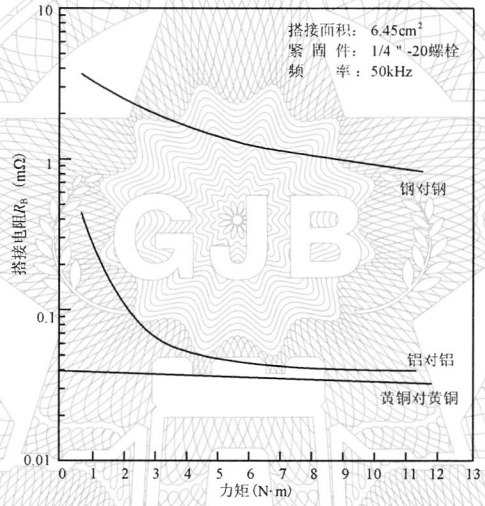


图 95　搭接电阻随紧固力矩变化的曲线

希望尽量加大搭接的配接表面面积，有以下几个原因：加大表面积能增大电流通路的横截面积，并相应增大表面之间金属真正接触点的总数；除了减小搭接电阻之外，在电源故障状态下或在雷电放电时，加大接触面积还可以减小电流拥挤。电流拥挤所导致的有效搭接电阻会比低电流流动期间所呈现有效搭接电阻更高。搭接电阻的增加，又会使接触电阻增至更高的数值，加上是大电流，搭接处产生的热量更大。加大搭接面积就可以在一个较大的金属面积上散发热量。加大搭接面积的另一个优点是它能够获得较大的机械强度，并减小腐蚀的影响，因为这时整个搭接面积中只有小部分面积暴露在环境之中。

10.4.3 直接搭接的方法

10.4.3.1 概述

直接搭接可能是永久性的或半永久性的。永久性搭接是指在装置的预期寿命中，可保持安装位置不变，适用于进行检查、维修或系统改建时不需要拆卸的那些连接。对那些不容易接近的搭接点，应进行永久搭接，并采取适当的措施保护搭接点，以防损坏。

大多数搭接，应采用可拆式搭接，并保证拆卸时不损坏或不显著地改变搭接元件。对于系统改建、信号参考网络的噪声测量、电阻测量，或出于其他原因可能需要断开的那些搭接点，不应进行永久性搭接。另外，由于成本的原因许多搭接不可能进行永久性连接。所有这些不能进行永久性搭接的点就被称之为半永久搭接点。半永久搭接点包括那些利用螺钉、铆钉、夹箍或其他辅助零件紧固的搭接点。

10.4.3.2　熔焊

就电气性能而言，熔焊是理想的搭接方法。熔焊所产生的强大热量(超过 2200℃)，足以气化污染的薄膜和杂质，在接合处形成一种接近于搭接元件本身电导率的金属桥路。这种搭接的纯电阻约为零，因为桥路相对于连接元件的长度短得多。熔焊搭接的机械强度是很高的，可以接近或超过搭接元件本身的机械强度。由于潮气和杂物不能透入熔接的接点中，所以熔焊又减少了搭接点的腐蚀。金属桥路的腐蚀率可以与基体元件的腐蚀率相比拟，所以搭接点的寿命亦与搭接元件的寿命一样长。

对于永久性的搭接点，凡有可能时都应采用熔焊。虽然熔焊可能是费用较高的搭接方法，但对于那些一经完成组装就不容易接近的接点来说，由于熔焊的可靠性高，还是常被采用。对于一般搭接结构中所碰到的大多数金属，均可以按标准工艺进行熔焊，如气焊、电弧焊、氦气保护焊和放热焊等。

常规的熔焊只能由经过适当培训并取得资格的人员进行。在许多情况下，熔焊要比利用诸如螺栓或铆钉等紧固安装的速度慢得多。熔焊成本的增加，迫使人们采用其他可行的搭接方法。

对于许多搭接场合，放热焊是一种有效的焊接工艺。在这个过程中，利用一个石墨模把铝、氧化铜和其他粉末的混合物盛装在搭接点周围。把上述混合物引燃，燃烧所产生的热量(超过 2200℃)可把氧化铜分解，从而在搭接点周围产生单质的铜膜。由化学反应产生的高温，可使铜材料与钢或铁进行搭接，亦可与其他铜材料搭接。

图 96 中有两个放热焊搭接的例子。左面为一根截面为 107mm^2 的铜包电缆与钢板的搭接，而右面为两根截面为 107mm^2 铜包电缆同轴搭接在一起。由这种放热工艺可建立起牢固的机械连接。图 97 给出了各种搭接结构的例子。

放热焊特别适用于电缆与电缆焊接、电缆与钢棒焊接、电缆与工字钢或与其他结构件的焊接。对于接地电缆与接地棒的搭接，当不便使用常规焊接方法，或者没有熟练的焊接工时，放热焊工艺也很有吸引力。每种不同的搭接结构，都需要一个单独的石墨模子，当进行几个相同结构的搭接时，放热焊工艺更为经济。

采用放热焊时，应严格遵守操作工艺。模子应是干燥的或按照规定予以烘干。特别是当模子已隔了好几个小时没有使用可能已吸潮时，尤其需烘烤。应把要搭接金属表面的灰尘和碎屑清除，并把多余的水分擦干。水分、灰尘或其他外界杂质会在熔接中造成孔隙，孔隙可能降低熔接强度或增大搭接电阻。另一个要求是模子的尺寸应与电缆或导体的横截面相协调，否则熔融的金属将会散落到搭接区域之外。

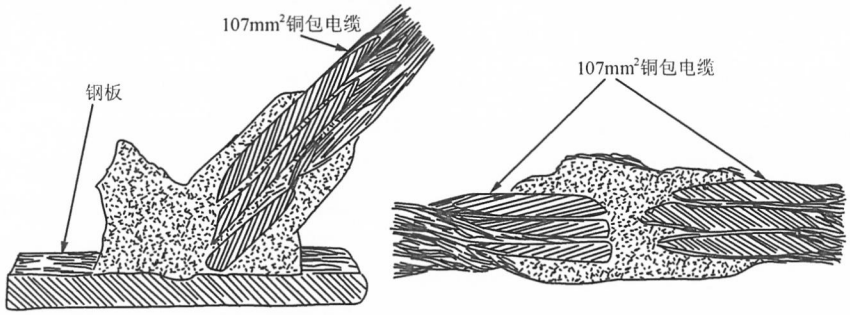


图 96　典型的放热焊接头

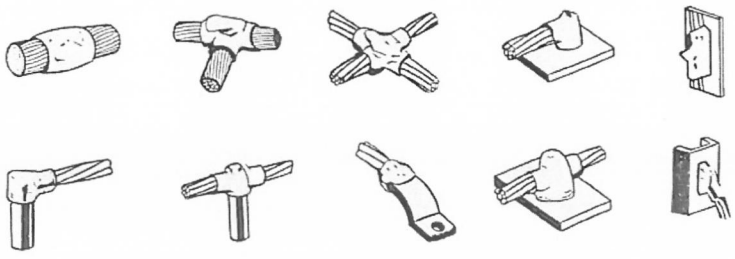


图 97　采用放热焊工艺完成的典型搭接结构

10.4.3.3 硬钎焊

硬钎焊(包括铜焊、银焊等)是永久性连接中另一类焊接工艺。硬钎焊时，应把搭接表面温度加热至450℃以上，但要低于搭接元件的熔点。对受加热的元件应施加含有适当助焊剂的钎料，液态钎料浸润搭接表面，以保证钎料与搭接表面之间的紧密接触。像高温熔焊一样，硬钎焊搭接点的电阻也基本为零。但是，由于硬钎焊往往使用与原搭接元件不同的金属，所以应采取附加措施防止搭接点免受腐蚀损坏。

10.4.3.4 软钎焊

软钎焊是一种常用的搭接工艺，因为利用这种工艺很容易进行搭接。软钎焊所需要的温度相当低，常用于几种高电导率金属(如铜、锡或镉等)的快速搭接。采用合适的焊剂，也可以焊接铝和其他金属。添加适当的相容材料，利用软钎焊所形成的搭接，其搭接电阻几乎和熔焊或硬钎焊的电阻一样低。但是由于软钎焊的熔点低，在可能出现大电流的场合不应把软钎焊用作主要的搭接手段。正由于其熔点低，不允许将软钎焊用于故障保护接地通路的搭接，也不允许在雷电防护接地网络的元件之间采用软钎焊互连。除了温度限制外，软钎焊的机械强度也低，如果在焊料冷却过程中连接元件相对移动，势必造成结晶裂纹。因此，如果搭接点应承受机械载荷时，不应使用软钎焊。当采用软钎焊时，应考虑到结晶裂纹的趋向并采取适当的预防措施。

但是，软钎焊可以有效地应用在许多场合。例如可用于在组装之前对表面上锡，以有助于控制腐蚀。软钎焊还可以用来有效地连接屏蔽的接缝，或者把电路元件连结在一起后接至与电路有关的信号参考面。软钎焊还经常配合机械紧固件进行接缝处理，把搭接点加热到足以熔化焊料的温度，再以低电阻焊料填充金属，为机械紧固件构成的低阻抗通路提供补充。此外，软钎焊也是防止潮气和其他污染物渗入配接表面的阻挡层。

10.4.3.5 螺栓搭接

在许多场合不希望采用永久性搭接。例如，当设备需要从壳体中取出或调整到其他位置时，需要将接地连接和其他连接断开。为便于调整和修理，设备的盖板也应是可拆卸的。在这种情况下，永久性搭接显然不合适。非永久性搭接除有较大的灵活性之外，在工艺上也比较简单，不需要对操作人员进行专门培训，也不需要专用器具。

最普通的半永久搭接是螺栓连接(或者是利用螺钉或其他螺纹紧固件的连接)，因为这种形式的搭接可提供所需要的灵活性和易实现性。螺栓(或螺钉)仅用作紧固件，在搭接面之间提供必要的紧固力，一般为 8MPa～10MPa。事实上，除了提供必要的金属抗拉强度之外，紧固件并不一定要求导电。虽然螺栓或螺钉可以对流过接点的电流提供一条辅助通路，但电流的主要通路应通过金属界面建立。由于自攻螺钉螺纹连接的可靠性差，因此绝不能用其进行搭接。

紧固件的尺寸、数量和间隔应满足整个搭接面上压强的要求。螺栓所形成的压力集中在紧靠螺栓头部的区域。在螺栓头部下面放置一个大的刚性垫圈，可增加有效的接触面积。因为压力扩大了分布面积，所以应通过加大力矩来增加螺栓的拉伸压力。可以利用图 98 的图表来估算所需要的螺栓规格和力矩[29]。当配接的表面非常大，以致需要很高的力矩时，应使用两个以上的螺栓。对大的配接面积应使用刚性垫圈，以便螺栓的压力分布到整个面积。需说明的是图 98 中螺栓系英制规格，它们与公制螺栓无直接对应关系，公制螺栓选用方法参见附录 E。

10.4.3.6 铆接

铆接不如螺栓或焊接工艺所形成的连接。铆接缺乏螺栓连接的灵活性，也没有像熔接、钎焊所具备的搭接表面防腐蚀保护性能。铆接的主要优点是可以利用自动化工具快速而一致地进行连接。

由铆钉所建立起来的搭接通路如图 99 所示。通过铆钉的电流通路，理论上要穿过搭接元件和铆钉体之间的界面。试验表明，铆钉与搭接元件之间的配合状态比搭接元件之间配接表面的状态更为重要，因此，铆钉孔的尺寸应保证在装配之后搭接元件与铆钉形成紧配合。在铆钉孔的周围边缘搭接元件上应无油漆、腐蚀物质或其他非导电材料。

屏蔽体中铆接点的最大间隔推荐值为 2cm 或更小。比较薄的金属板材，铆接时可能会引起铆钉之

间金属板料的翘曲，如图 100 所示。在翘曲区域，金属与金属的接触可能很差甚至不接触。这些不接触区域所造成的射频能量泄漏，可能是引起射频屏蔽性能不良的主要原因。缩小铆钉的间隔，弯曲或翘曲就会减小。为了提高射频屏蔽性能，应在接合处衬上金属丝编织网，或用导电的环氧树脂把缝隙填塞。

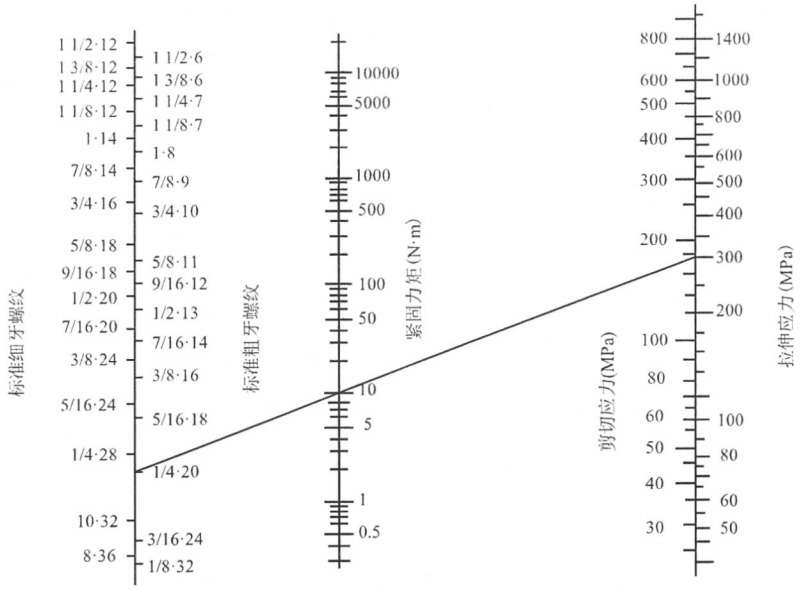


图 98　螺栓力矩的计算图表

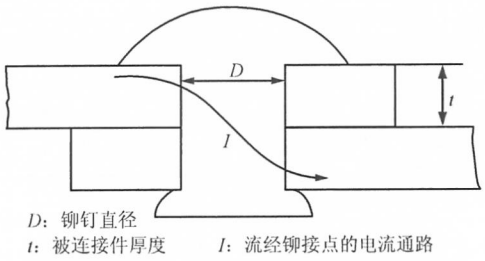


图 99　由铆钉所建立的搭接通路

图 100　不正常的铆接缝隙

10.4.3.7　导电粘合剂

导电粘合剂是一种添加有银粉的双组分环氧树脂，当这种环氧树脂固化后，就成为一种导电材料，这种导电的环氧树脂可以用在配接表面之间，以便产生低电阻的搭接。它的特点在于它不像焊接工艺那样要施加热量才能获得直接的搭接，而在许多地方，熔焊及钎焊连接所需的热量可能会造成火灾或爆炸的危险。在螺栓搭接中采用导电粘合剂时，粘合剂提供一种有效的金属桥路，此连接桥路既具有很高的防腐能力、又具有很高的机械强度。在固化状态，粘合剂的电阻将随时间的推延而增加。固化之后，这种粘合剂必然会牢固地与配接表面粘合，因此，环氧树脂加螺栓搭接比简单的螺栓搭接更难拆卸。在某些应用中，导电粘合剂的优点是主要的，难以拆卸的缺点是次要的。

10.4.3.8　搭接方法比较

表 19 列出了几种常用搭接方法的等级比较[30]。在此表中，对于每种方法的每个性能参量的指标定为 0～10。等级 10 意味着该方法在表中最左边一栏所列的特性参数最佳；较低的等级值意味着该方法不太合适；等级为 0，说明该方法不宜选择；“－”则表示该方法不得采用。

某种方法在等级表上百分之百地符合所列参数是不可能的，因为任何给定的方法在工艺上可能有很大的差异。精心操作，一个低等级值的方法可以比粗劣实施的高等级的方法效果好得多。制订该表时，假设所有的方法都是同等精心实施的。

表 19　选用搭接方法的等级

		热					化学	机械							
		软钎焊	硬钎焊	气体或电弧焊	放热焊	点焊	导电粘合剂	螺栓	压接	铆钉	夹箍	螺钉		绞合导线	导线螺母
												导线	端接片		
电气特性	低电阻	9	10	10	10	10	3	9	9	9	8	9	9	9	9
	电阻稳定性	10	10	10	10	10	7	8	9	9	5	7	9	5	8
	电压降	9	10	10	10	10	5	9	9	10	8	8	9	5	8
	电流容量	5	10	10	10	9	1	9	9	9	8	9	9	8	9
机械特性	拉断力	8	10	10	10	10	1	9	9	9	9	3	10	2	8
	低蠕变	9	10	10	10	10	5	9	9	9	8	3	8	2	8
	强度	6	10	10	10	7	4	9	9	10	8	5	9	4	8
导体可用性	实心导线	10	10	10	10	10	10	10	10	5	9	10	－	9	10
	多股线	9	9	8	9	0	9	9	10	2	9	2	－	9	10
	铝导线	5	2	1	8	0	2	9	8	4	9	4	－	1	6
	汇流条和结构件	8	8	8	9	9	6	9	7	10	7	－	10	－	－
环境	高温	3	9	10	10	10	1	8	9	4	5	7	8	5	7
	低温	9	10	10	10	10	5	8	9	5	5	8	8	7	7
	热冲击	8	9	10	10	10	7	9	8	4	5	2	8	2	8
	振动	6	7	10	10	9	1	7	9	5	4	2	9	1	7
	腐蚀环境	9	10	10	10	10	5	6	9	8	3	7	9	4	8
	老化	9	10	10	10	10	5	8	8	8	7	7	8	7	8
经济性	工具	7	4	3	4	4	9	8	8	7	10	9	10	10	10
	工艺	6	5	5	5	5	8	5	9	8	10	10	10	10	10
组装可实施性	方法需要的空间小	8	5	4	5	8	8	8	9	8	9	9	9	10	8
	方便修理	8	6	5	5	9	9	9	9	7	9	10	10	10	9

10.5　间接搭接

10.5.1　概述

优选的搭接方法是不用外加的导体就把物体搭接在一起。但是，由于操作要求或者设备的位置关系，往往不便进行直接搭接。当一个综合设备的各部分之间，或者综合设备与其参考面之间应在结构上分离时，就需要引入辅助导体作为搭接条。安装防振动冲击设备时，通常用搭接条把设备搭接至结构的接地参考系统上。同样，还可用搭接条旁路某些结构元件，如配电箱盖板或设备盖板上的铰链，以防止这些元件在受到强电磁场照射或通过高电平电流时产生宽带噪声。同样搭接条或搭接线可用于防止静电电荷的聚集，或用以将金属物体搭接至防雷引下线，以防闪络的出现。

10.5.2　电阻

间接搭接的电阻等于搭接导体的固有电阻和每个搭接头上金属与金属间接触电阻的总和。搭接条的电阻由所用材料的电阻率和搭接条的尺寸来确定。使用典型搭接条时，其直流电阻是很小的。例如用电阻率为 $1.72\times10^{-6}\ \Omega\cdot\mathrm{cm}$ 的铜导体制成宽 2.5cm、厚 1mm、长 0.3m 的搭接条，其电阻为 0.2mΩ。搭接条两端的直流连接电阻与其自身电阻相加就是间接搭接电阻。采用铝、铜或黄铜搭接条时，在正确搭接

的情况下，间接搭接电阻应小于 2.5mΩ。但是若需要采用长搭接条，搭接条的电阻可能比较大。

10.5.3　频率影响

10.5.3.1　趋肤效应

因为高电导率的材料会快速地衰减射频电流，所以高频电流无法深入导体内部，即电流只能存在于导体表层。频率高到一定程度，这种效应将变得很显著，搭接条的交流电阻可能与直流电阻有明显的差别。趋肤效应的详细讨论见 8.2.2.1。

10.5.3.2　搭接电抗

搭接阻抗的电抗分量与搭接导体的几何结构和被搭接物体之间的相对物理位置有关。搭接条本身呈现的电感是搭接条尺寸的函数。两种常用的非磁性金属直搭接条的电感分别由式(147)和式(148)给出：

扁平截面：

$$L = 0.002l\left[2.303\lg\frac{2l}{b+t} + 0.5 + 0.2235\frac{b+t}{l}\right] \cdots\cdots (147)$$

圆截面：

$$L = 0.002l\left[2.303\lg\frac{4l}{d} - 0.75\right] \cdots\cdots (148)$$

式中：

L ——电感量，μH；

l ——搭接条长度，cm；

b ——搭接条宽度，cm；

t ——搭接条厚度，cm；

d ——导线直径，cm。

表 20 列出了一条 15cm 长的非磁性矩形搭接条按式(147)计算的电感，表 21 对 1.5mm 厚、长度分别为 15cm、30cm 和 90cm 的搭接条的电感作了对比，而表 22 则列出了截面为 2.5mm^2～120mm^2 的导线，在其长度分别为 15cm、30cm 和 90cm 时的电感。表 21 和表 22 所列搭接条在 100MHz 以下的感抗见图 101。即使在相当低的频率时，搭接感抗分量都会比电阻大得多。因此，在应用搭接条时，应同时考虑搭接条的电阻和电感特性。

搭接条的结构尺寸对射频阻抗有很大影响。当搭接条宽度一定时，随着长度 l 增长，其阻抗呈非线性增加；但是，当宽度 b 增加时，搭接条阻抗则是非线性下降。由图 102 可见[31]：当搭接条的长宽比(l/b)减小时，其相对电抗会明显地下降。曲线表明，长、宽比值为 5:1 的搭接条，其感抗仅为一条细导线(即 l 与 b 的比值很大)感抗的 45%，而当此比值降为 3:1 时，其感抗的百分比降为 38%。因此，用于提供射频通路的搭接条，往往推荐搭接条的长宽比为 5:1 或更小，最好其比值为 3:1。

表 20　15cm 长的矩形搭接条的计算电感

宽度 cm	厚度 cm	电感 μH
1.3	0.05	0.109
1.3	0.15	0.107
1.3	0.25	0.105
2.5	0.05	0.090
2.5	0.15	0.089
2.5	0.25	0.088
5.0	0.05	0.071
5.0	0.15	0.070
5.0	0.25	0.070

表 21　1.5mm 厚的搭接条的计算电感

宽度 cm	计算电感 μH		
	长度 cm		
	15	30	90
1.3	0.107	0.254	0.959
2.5	0.089	0.218	0.851
5.0	0.070	0.180	0.732

表 22　部分导线的计算电感

导线截面积 mm^2	计算电感 μH		
	长度 cm		
	15	30	90
120	0.094	0.229	0.886
50	0.107	0.256	0.965
35	0.112	0.266	0.997
25	0.118	0.277	1.029
10	0.131	0.304	1.109
6	0.139	0.319	1.154
2.5	0.152	0.345	1.233

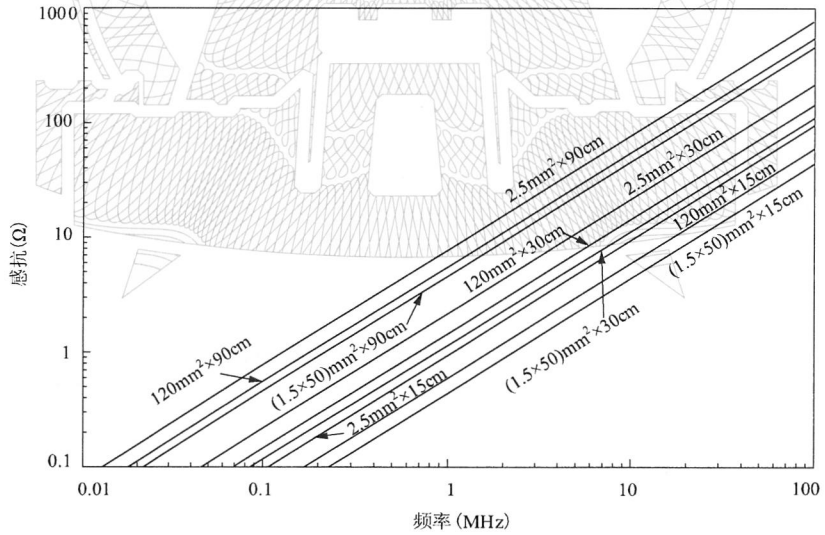


图 101　导线和搭接条的感抗

另一方面，射频电阻是直流电阻的很多倍，但相对于感抗仍很小。因此，估算搭接阻抗时电阻可忽略。典型搭接条本身的射频阻抗测量值在 30MHz 以内均随频率线性增加。在更高的频率，搭接条的长度与波长可比拟，搭接条相当于射频传输线，阻抗随着频率的增加从最小值到最大值作周期性变化。在该情况下，搭接条上有电流流过时就会出现电压差，搭接条成为射频能量的有效辐射器。可通过保持搭接条低阻抗避免这种效应，小长宽比和大宽厚比的搭接条，搭接阻抗较小，因此搭接条长宽比应小于 5:1。

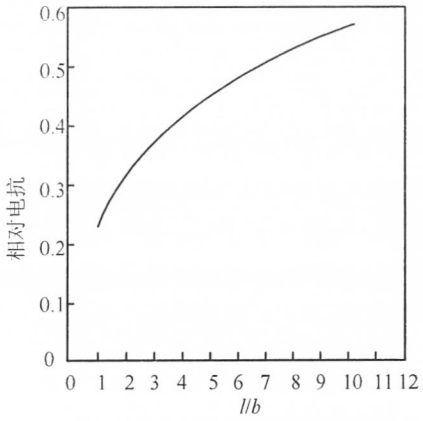


图 102　扁平搭接条的相对电抗与长宽比的关系曲线

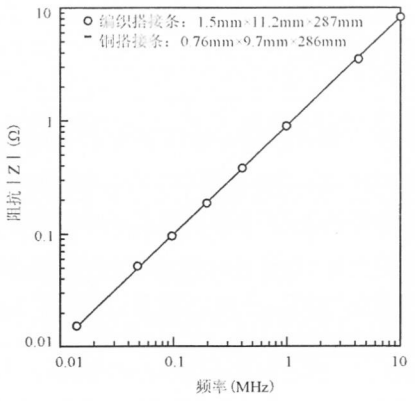


图 103　简单导体的阻抗随频率变化的曲线

从辐射发射角度考虑，典型搭接条上 1mV～10mV 量级的电压的辐射电平即可能导致辐射发射达到规定限值。在给定频率，搭接条阻抗越大，在搭接条上产生 1mV～10mV 电压所需流过的电流越小。在 10MHz，典型搭接条上流过几毫安甚至零点几毫安的电流就可能产生 1mV～10mV 电压，导致辐射发射超过限值。

由于编织搭接条的柔性较大，在许多应用中，人们宁可用编织搭接条而不用实心搭接条。图 103 为实测的编织铜搭接条与实心铜搭接条的阻抗特性[28]，射频搭接阻抗测试方法参见附录 B。从图中可以看出，编织搭接条阻抗与实心搭接条阻抗之间并无显著差别。其他试验也表明，用相同材料制成、具有相同尺寸的编织搭接条与实心搭接条，它们的射频阻抗特性之间确无实质性差别。但是编织搭接带中绞合线是暴露的，更容易受到腐蚀，所以在某些场合下，可能并不推荐使用编织搭接条。

10.5.3.3　杂散电容

在搭接条与被连接的物体之间，以及在被连接物体之间必然存在一定量值的杂散电容。图 104 为搭接条本身的等效电路，图中 R_s 代表搭接条的交流电阻，L_s 代表电感，此电感可利用式(147)或式(148)进行计算，而 C_s 则代表搭接条与两个被连接物体之间的杂散电容。除了非常短的搭接条之外，搭接条感抗的幅值要比电阻大得多。当频率高于 100kHz 后，R_s 项一般可以忽略。在不考虑 R_s 情况下，该等效电路阻抗 Z_s 按式(149)计算：

$$|Z_s| = \frac{\omega L_s}{1-\omega^2 L_s C_s} \quad \cdots\cdots (149)$$

图 104 的等效电路并没有考虑设备机柜或其他被连接物体的影响。图 105 为一个间接搭接系统的真正等效电路。搭接条的参数仍以 R_s、L_s 和 C_s 来代表。

一个被连接物体(例如一台设备的机架或机柜)的固有电感用 L_c 表示；而被连接元件之间，即设备与其参考面之间的电容用 C_c 表示。在大多数情况下，$L_s >> L_c$，$C_c >> C_s$，而 R_s 则可以忽略。因此，其最低的谐振频率由式(150)给出：

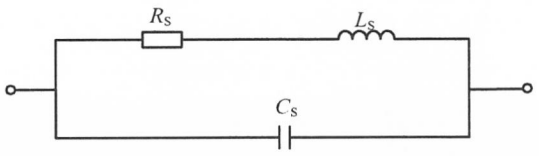


图 104　搭接条的等效电路

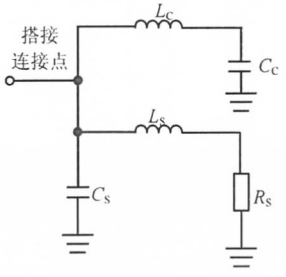


图 105　搭接系统的真正等效电路

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_s C_c}} \quad \cdots\cdots (150)$$

这种谐振可能在极低频率上发生，例如在一些典型结构中，谐振频率低至 10MHz～15MHz。在这些谐振频率点附近，搭接通路的阻抗通常为几百欧姆。出现如此高的阻抗，表示搭接失效。事实上，在这些高阻抗区域，搭接系统将起到某种等效天线系统的作用。这种等效天线系统会增大某些信号的捡拾，而这些信号刚好是原来要用搭接条降低的。图 106 和图 107 给出了两种不同长度的搭接条降低感应电压的实测效能[28]，上述感应电压是接地面上的一台设备机箱在辐射场中感应出来的。搭接效能表示利用搭接条后所获得的电压降低效果。当频率接近搭接网络的谐振点时，使用搭接条反而比不使用搭接条时所感应的电压更高。

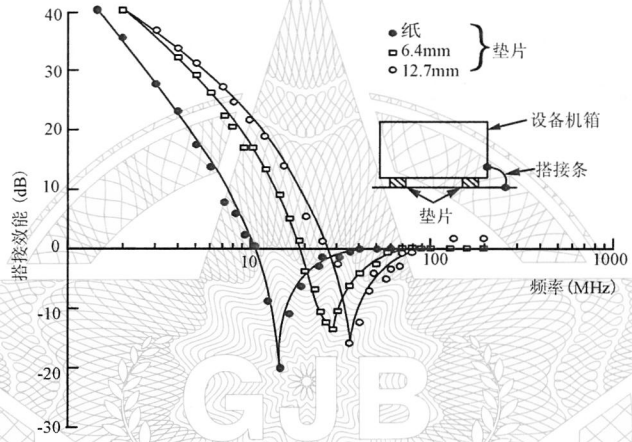


图 106　24cm 长的搭接条搭接效能的测量值

图 106 和图 107 说明：

a)　在低频时，搭接条的电抗很低，搭接条起到有效的连接作用；

b)　在搭接网络的并联谐振频率附近，搭接条反而增加了对无用信号的捡拾；

c)　当在并联谐振频率以上，搭接条对辐射信号的捡拾既不起加强的作用，也不起削弱作用。

总之，应小心设计和使用搭接条，特别要注意的是，应确保不要由于使用搭接条而引起不希望的干扰。搭接条的尺寸可依据附录 C 的方法确定。如果所关心的频率很高，被搭接件的长度大于 0.1 倍波长，被搭接件上将产生驻波，搭接也会失效。

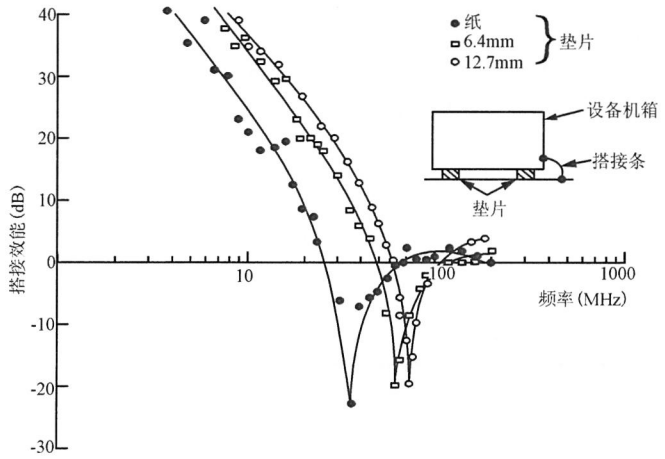


图 107　6cm 长的搭接条搭接效能的测量值

10.6 搭接表面处理

10.6.1 概述

为了获得有效而可靠的搭接，搭接表面应无任何杂质(如污物、粉屑、防腐剂等)以及不导电的薄膜层(如油漆、阳极氧化膜、氧化层和其他金属氧化薄膜)。可以使用多种机械和化学的方法清除出现在搭接表面上的各种物质。在清洗之后，应尽快进行组装或连结，以减少表面污染。搭接完成后，应利用适当的保护剂对搭接区进行封闭，以防由于配接表面的腐蚀而使搭接性能降低。

10.6.2 固态杂质

固态杂质，如灰尘、污物、碎屑、纤维、锯末和包装材料等，可能在搭接表面之间形成机械阻挡层，妨碍金属之间的接触。这些固态杂质还可能助长腐蚀而影响搭接的可靠性：灰尘、污物和纤维会吸收潮气并使潮气保持在其表面上；它们甚至会促进霉菌繁殖并释放腐蚀性的细菌代谢产物；外界金属的碎屑可能会建立微小的原电池(见 10.8)，这些原电池将大大加速表面的腐蚀。

应把搭接表面上的固态杂质清除干净，通常用刷扫或擦拭之类的机械方法已足够。应细心观察，并把所有槽隙或孔眼中的固态杂质除净。使用压缩空气是清除这些固态微粒(假如它们干燥得可以吹走)的有效方法。

10.6.3 有机化合物

油漆、油墨、清漆及其他油类保护化合物、油脂及其他润滑剂都是不导电的，应把它们清除掉。使用油漆溶剂可能很有效。油漆溶剂对于处理油性油漆、油墨和清漆效果甚好。如果使用油漆溶剂无效，则应采用刮刀、钢丝刷、电动磨光机、砂纸或喷砂机等机械方法来清除。使用机械方法时，应小心操作，以免磨去过多的材料。最后应采用 400 目的金相砂纸或钢棉进行清洁。把所有有机物清除之后，再使用钢棉细丝刷刷扫或使用吹喷的方法将研磨的细砂清除干净，最后利用工业酒精、干净的清洗液或挥发性清洗剂进行擦拭，以便把所有剩余的油污或潮气膜清除。

警告：许多油漆溶剂，如油漆稀料和丙酮，是极其易燃和有毒的。不应在明火附近使用，应有足够的通风。应防止吸入挥发物。

可利用一块棉布把油污、油脂和其他石油化合物擦拭干净。还应利用适当的溶剂把残膜溶解掉。使用热肥皂水清除各种剩余的油污或油脂也非常有效。但是，若用水洗，在进行连接之前应把表面彻底烘干。对于细小或复杂的部件，蒸汽去脂是一种有效的清洁方法。把待清洁的部件暴露于三氯乙烯、氯乙烯或二氯甲烷的蒸汽中，直到表面达到气化的温度为止。在特殊的情况下，可能还需要进一步清洗，其方法是用一个浴槽，在每升水中加 240g 固体铬酸和 30g 硫酸，再把部件放入后摇动即可。其平均浸泡时间应严格限制在 30s 以内，因为部件在浴槽中浸泡时间过长，可能产生严重腐蚀并导致尺寸减小。浴槽浸泡后应接着用冷水漂洗，然后用热水冲洗并随即干燥。

10.6.4 电镀层和表面保护层

许多金属表面上可电镀或涂覆其他金属，或者进行表面成膜处理，以便改善耐磨性或获得防腐能力。像金、银、镍、镉、锡和铑之类的金属镀层，应借助擦拭的方法把镀层上面所有固体杂质清除掉，并利用适当的溶液来清洗所有的有机材料。由于这类镀层通常非常薄，因此不应使用酸类和其他强的腐蚀剂。一经除去杂质之后，应利用细钢丝棉或金相砂纸将连接表面擦至晶亮、闪光状态。应注意不要过多地磨掉金属。最后，应用一块棉布放在工业酒精或无水清洗溶液中浸湿后擦拭搭接表面，并在搭接之前把表面烘干。

铬酸盐处理层可降低搭接电阻，同时又能作防腐保护，所以不应把此表面层除掉。

许多铝制品，考虑到外观和防腐要求，都应进行阳极氧化。由于这些阳极氧化膜是极好的绝缘层，所以搭接之前应把这种氧化膜清除干净。那些要进行电气连接的铝零件，不要进行阳极氧化处理，或者从搭接表面上把阳极氧化层清除掉。

10.6.5 腐蚀产物

氧化物、硫化物、硫酸盐和其他腐蚀产物应予以清除，因为它们会限制或妨碍金属接触。像氧化铁

和硫酸铜之类的疏松腐蚀产物，可以使用硬钢丝刷、钢丝棉或者其他研磨器具清除，擦至一般光亮金属的表面光洁度已足够。当发生蚀坑时，可能还需要借助抛光或研磨法将表面再处理，以便获得一个光滑而均匀的接触表面。某些硫化物是很难用机械法来清除的，因此可能还需要化学清洗和抛光。铝氧化物是透明的，因此不能以表面的外观作为是否需要清洗的标志。铝氧化物虽然硬，但它们又是脆的，因此利用锉刀或粗研磨材料把表面弄粗糙，是铝表面连接准备的有效方法。

10.7 搭接实施

在配接表面清洁之后，应尽快把搭接零件进行装接。如有可能，应在 30 分钟内完成。如果清洁与搭接之间的时间需要超过 2h，则应进行临时的保护涂覆。当然，在实行搭接之前，应再把上述临时保护层清除掉。

搭接的表面应在搭接之前保持干燥，而且应对已完成的搭接点进行封闭，以防止潮气渗入搭接区。令人满意的密封剂是油漆、硅橡胶、油脂和含硫聚合物。凡是在搭接之前除去油漆的地方，应在完成搭接之后重新油漆，以便与原来的表面处理层相配。应避免使用太稀的油漆，否则油漆可能从搭接零件的边缘渗入搭接面并影响搭接质量。压紧的铜导体搭接点或相容的铝合金搭接点，当它们处于可接近的区域，又不暴露在大气、腐蚀气体或过量的灰尘之中时，可不进行封闭。这在民用工程或认可的场所是可行的。

10.8 搭接点的腐蚀

10.8.1 腐蚀的化学原理

10.8.1.1 概述

腐蚀是材料(通常是金属)与周围环境发生化学或电化学作用而引起的材料的变质或破坏。大多数环境在一定程度上都有腐蚀性，含有盐雾和工业污染物的环境特别具有破坏性。暴露在这些和其他环境中的搭接应要保护，防止需要低阻抗连接的点因为搭接表面的恶化而被破坏。

金属腐蚀过程的原理示意如图 108 所示。这种过程发生的必要条件是：存在一对阳极和阴极，以形成原电池；电极之间存在供直流电流流动的完整通路。在许多环境中这些条件是很容易实现的。由于存在杂质、晶粒边界和晶粒取向，或者局部应力，在单个金属表面形成阳极和阴极区。这些阳极和阴极区域通过金属电气接触。电解液或导电液的存在构成了导电通路，并使电流从电池的阳极流向阴极。

如能去除上述任一条件，就可防止腐蚀发生。比如，在纯净的水中，氢气会聚集在阴极，提供绝缘覆盖层阻止电流流动。然而，大部分水中含有溶解的氧，它与氢原子结合形成水分子。氢原子的迁移使腐蚀得以发生。根据这一原理，可将油漆作为保护层。油漆可以防止潮气到达金属表面，因此可防止电解液通路的形成。

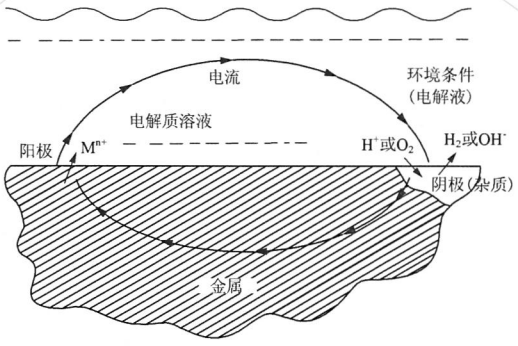


图 108 腐蚀过程的原理图

10.8.1.2 电化序

金属的氧化涉及到电子从金属向氧化介质的转移。在这种氧化过程中，金属与含有氧化介质的溶液之间将产生一个电动势。当金属与含有其同种金属离子的氧化液接触时，将建立起一个恒定的电位差。

在同样条件下，每种金属建立的这种电位差是不同的。在一组标准条件(其中包括溶液的温度和离子浓度)下所确定的一组电位，被称为电化(或电动势)序。常用金属的电化序(以标准氢电极作为 0V 参考电位)列于表 23 中[32]。电化序的重要性在于它表明了金属腐蚀的相对趋势。处于序前面的金属，容易起氧化作用，因此也就容易腐蚀。电化序同样也指出了当两种金属耦合形成电池时所建立的电位差大小。在电化序中离得越远的金属，它们之间的电位差就越高。处于前面的金属将起阳极作用，而后面的金属则起阴极作用。当两种金属接触时，通过氧化作用，阳极的金属将发生损耗，弥补电子以维持电流的流动。这种类型的腐蚀被定义为电化学腐蚀。电池两极的电位差越大，阳极腐蚀的速率就越大。

表 23　标准电化序

金属	电位 V	金属	电位 V
镁	−2.37	锡	−0.136
铝	−1.66	铅	−0.126
锌	−0.762	铜	+0.337
铁	−0.441	银	+0.799
镉	−0.402	钯	+0.987
镍	−0.250	金	+1.50

10.8.1.3　腐蚀电位序

电位序是基于与标准溶液接触的纯净金属(无氧化物和其他形态)。在实际中更感兴趣的是金属在一种腐蚀介质中考虑到包括表面薄膜影响后所得出的相对次序，这种次序称为腐蚀电位序。最普通的腐蚀电位序列在表 24 中[33]。这种电位序是以在海水中的试验为基础的，在涉及到其他环境时仅供参考。表 25、表 26、表 27 列出了不同环境条件下使用时允许和不允许的金属及其镀层间的搭配关系。

在大气中的电化学腐蚀与大气类型及湿度有很大关系。例如：靠近海岸以及在污染的工业环境中的腐蚀就会比在干燥的乡村环境中严重得多。靠近海岸或工业环境中的冷凝水，即使在相同的湿度和温度条件下，由于增加了硫和氯的化合物的含量，就具有更高的导电性，这种高导电性就意味着腐蚀速率的增加。

表 24　普通金属和合金在海水中的腐蚀电位序

阳极或活泼端		金属与合金	阳极或活泼端		金属与合金
排序	1	镁	排序	14	铅锡焊料
	2	镁合金		15	铅
	3	锌		16	锡
	4	镀锌钢或熟铁		17	镍(活泼的)
	5	1100 号铝		18	铬镍铁合金(活泼的)
	6	镉		19	耐盐酸镍基合金 B
	7	2024 号铝		20	锰青铜
	8	中碳钢或熟铁		21	黄铜
	9	铸铁		22	铝青铜
	10	铬钢(活泼的)		23	铜
	11	耐腐蚀高镍铸铁(高镍铸铁)		24	硅青铜
	12	18−8 不锈钢(活泼的)		25	蒙乃尔高强度耐蚀镍铜合金
	13	18−8 钼不锈钢(活泼的)		26	银焊料

表 24(续)

阳极或活泼端		金属与合金	阳极或活泼端		金属与合金
排序	27	镍	排序	33	耐蚀合金 3
	28	铬镍铁合金		34	银
	29	铬钢		35	钛
	30	18－8 不锈钢		36	石墨
	31	18－8 钼不锈钢		37	金
	32	耐盐酸镍基合金 C		38	铂
阴极或最惰性端			阴极或最惰性端		

表 25　在一般条件下使用时允许和不允许的金属及其镀层间的搭接(配)关系

序号	金属、合金和覆盖层	钢镀铜、镀镍、镀铬[a]	钢、铜和铜合金镀铬、镀镍[b]	钢、铜和铜合金镀铬	钢、铜和铜合金镀镍	钢镀镍、镀铜[c]	钢、铜和铜合金镀锡	银、铜和铜合金镀金	铜和铜合金	不锈钢	渗氮钢	渗氮后并涂清漆钢	钢镀镉钝化	钢镀锌钝化	铜和铜合金镀银和镀银黑化	阳极氧化、化学氧化、磷化氧化和染色的铝合金
1	钢镀铜、镀镍、镀铬[a]	＋	＋	＋	＋	＋	＋	－	*	＋	＋	＋	＋	＋	－	－
2	钢、铜和铜合金镀铬、镀镍[b]	＋	＋	＋	＋	＋	＋	－	*	＋	＋	＋	＋	＋	－	－
3	钢、铜和铜合金镀铬	＋	＋	＋	＋	＋	＋	－	*	＋	＋	＋	＋	＋	－	－
4	钢、铜和铜合金镀镍	＋	＋	＋	＋	＋	＋	－	*	＋	＋	＋	＋	＋	－	－
5	钢镀镍、镀铜[c]	＋	＋	＋	＋	＋	＋	－	*	＋	＋	＋	＋	＋	－	－
6	钢、铜和铜合金镀锡	＋	＋	＋	＋	＋	＋	－	＋	＋	＋	＋	＋	＋	－	－
7	银、铜和铜合金镀金	－	－	－	－	－	－	＋	＋	－	－	＋	－	－	＋	－
8	铜和铜合金	*	*	*	*	*	＋	＋	＋	*	*	＋	－	－	＋	－
9	不锈钢	＋	＋	＋	＋	＋	＋	＋	*	＋	＋	＋	＋	＋	＋	－
10	渗氮钢	＋	＋	＋	＋	＋	＋	－	*	＋	＋	＋	＋	＋	－	－
11	钢镀镉钝化	＋	＋	＋	＋	＋	＋	＋	＋	＋	＋	＋	＋	＋	＋	＋
12	钢镀锌钝化	＋	＋	＋	＋	＋	＋	－	－	＋	＋	＋	＋	＋	＋	＋
13	铜和铜合金镀银和镀银黑化	－	－	－	－	－	－	＋	＋	－	－	＋	－	－	＋	－
14	阳极氧化、化学氧化、磷化和染色的铝合金	－	－	－	－	－	－	－	－	－	－	*	＋	＋	－	＋

注：“＋”为允许接触，“－”为不允许接触，“*”定期换润滑油时可以接触。

[a] 铜、镍、铬复合镀层。
[b] 铬、镍复合镀层。
[c] 铜、镍复合镀层。

表 26　在恶劣条件下使用时允许和不允许的金属及其镀层间的搭接(配)关系

序号	金属、合金和覆盖层	钢镀铜、镀镍、镀铬[a]	钢、铜和铜合金镀铬、镀镍[b]	钢、铜和铜合金镀铬	钢、铜和铜合金镀镍	钢镀镍、镀铜[c]	钢、铜和铜合金镀锡	银、铜和铜合金镀金	铜和铜合金	不锈钢	渗氮钢	钢镀镉钝化	钢镀锌钝化	铜和铜合金镀银和镀银黑化	阳极氧化和染色(作涂漆底层)的铝合金	阳极氧化的铝合金
1	钢镀铜、镀镍、镀铬[a]	＋	＋	＋	＋	＋	＋	－	*	＋	*	*	*	－	－	－
2	钢、铜和铜合金镀铬、镀镍[b]	＋	＋	＋	＋	＋	＋	－	*	＋	*	*	*	－	－	－
3	钢、铜和铜合金镀铬	＋	＋	＋	＋	＋	＋	－	*	＋	*	*	*	－	－	－
4	钢、铜和铜合金镀镍	＋	＋	＋	＋	＋	＋	－	*	＋	*	*	*	－	－	－
5	钢镀镍、镀铜[c]	＋	＋	＋	＋	＋	＋	－	*	＋	*	*	*	－	－	－
6	钢、铜和铜合金镀锡	＋	＋	＋	＋	＋	＋	－	*	＋	*	*	*	－	－	－
7	银、铜和铜合金镀金	－	－	－	－	－	－	＋	＋	－	－	－	－	＋	－	－
8	铜和铜合金	*	*	*	*	*	*	＋	＋	*	－	－	－	＋	－	－
9	不锈钢	＋	＋	＋	＋	＋	＋	－	*	＋	*	－	－	－	－	－
10	渗氮钢	*	*	*	*	*	*	－	－	*	＋	－	－	－	－	－
11	钢镀镉钝化	*	*	*	*	*	*	－	－	－	－	＋	＋	－	＋	＋
12	钢镀锌钝化	*	*	*	*	*	*	－	－	－	－	＋	＋	－	＋	＋
13	铜和铜合金镀银和镀银黑化	－	－	－	－	－	－	＋	＋	－	－	－	－	＋	－	－
14	阳极氧化和染色(作涂漆底层)的铝合金	－	－	－	－	－	－	－	－	－	－	＋	＋	－	＋	＋
15	阳极氧化的铝合金	－	－	－	－	－	－	－	－	－	－	＋	＋	－	＋	＋
注：“＋”为允许接触，“－”为不允许接触，“*”定期换润滑油时可以接触。																
[a] 铜、镍、铬复合镀层。 [b] 铬、镍复合镀层。 [c] 铜、镍复合镀层。																

表 27　在海上条件下使用时允许和不允许的金属及其镀层间的搭接(配)关系

序号	金属、合金和覆盖层	钢、铜和铜合金镀铬	不锈钢	钢和铜合金	钢、铜和铜合金镀锡	镀镉钝化	镀锌钝化	阳极氧化和染色(作涂漆底层)的铝合金	阳极氧化的铝合金
1	钢、铜和铜合金镀铬	＋	＋	*	*	－	－	－	－
2	不锈钢	＋	＋	*	*	－	－	－	－
3	钢和铜合金	*	*	＋	*	－	－	－	－
4	钢、铜和铜合金镀锡	*	*	*	*	－	－	－	－
5	镀镉钝化	－	－	－	－	＋	＋	＋	＋
6	镀锌钝化	－	－	－	＋	＋	＋	＋	＋
7	阳极氧化和染色(作涂漆底层)的铝合金	－	－	－	＋	＋	＋	＋	＋
8	阳极氧化的铝合金	－	－	－	＋	＋	＋	＋	＋
注：“＋”为允许接触，“－”为不允许接触，“*”定期换润滑油时可以接触。									

10.8.2 阳极的相对面积

当不同金属之间的连接不可避免时，连接元件中的阳极元件尺寸应较大。在一个原电池中对于给定的电流强度来说，小电极的电流密度要比大电极的电流密度大(如图 109 所示)。一个阳极的电流密度越大，其腐蚀的速度就越大。例如，如果把一根铜搭接条或电缆连接至钢柱上，钢的腐蚀速率是低的，这是因为它有大的阳极面积。另一方面，一根钢带或螺栓紧固件与一块铜板接触时，前者将快速地腐蚀，这是因为电池阳极的面积相当小。

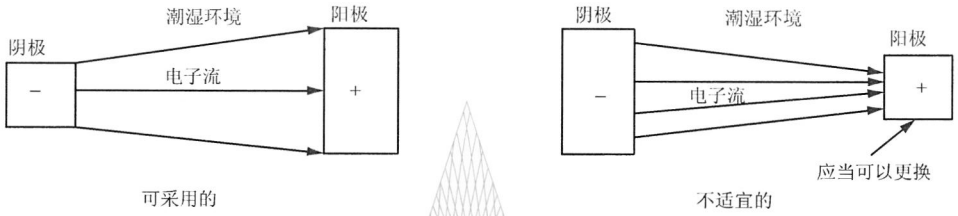


图 109 不同尺寸的阳极－阴极连接方式

10.8.3 保护涂覆层

为了防潮或为了给两种搭接元件提供相容的第三种金属，应认真地使用涂层或金属镀层。使用的涂层或金属镀层，应按图 110 所示覆盖两个元件，应避免只覆盖阳极。若只覆盖阳极，一旦涂覆得不完善或涂覆层发生破裂时，涂覆层出现缺陷的地方就发生腐蚀，并且会因暴露的阳极面积小而使腐蚀严重。应使所有这种涂覆层保持完好状态。

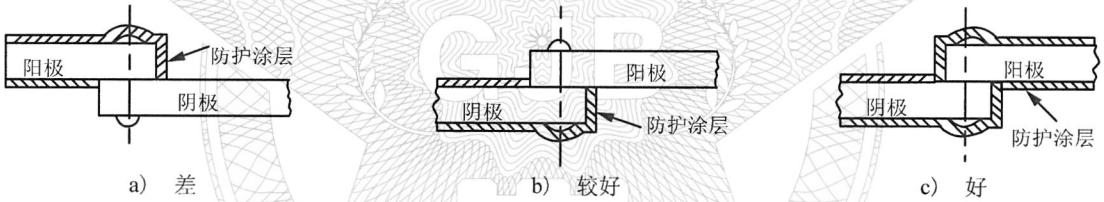


图 110 不同金属间搭接点的防护技术

10.9 工艺及人员要求

对于给定的情况，无论哪一种被确定为最好的搭接方法，都应把配接表面的所有涂覆物和杂质清除掉，因为这些物质不利于建立低阻抗搭接。其次，应采用适合于具体搭接方法的工艺，精心地把搭接元件连接起来。最后，应利用涂覆层保护搭接点，以确保搭接点的完善性。搭接点的质量取决于实施上述各个步骤的完善和精心程度。搭接的有效性与实施搭接的每个工作人员的技能及责任心有着极大的关系。因此，每个工作人员应了解电气搭接的重要性，并具备必要的技艺，以便正确地实施所选用的搭接方法。

应对负责进行搭接的这些工作人员进行精心培训，让他们掌握所需的工艺技术和操作规程。例如，当搭接要采用熔焊时，只能由有资质的焊工进行，但不需要进行额外的培训，因为适合于结构焊接的常规工艺技术，一般足以满足电气连接的要求了。进行钎焊连接时，也应聘用有资质的焊工。

放热焊可以由没有经过像熔焊工那样专门培训的人员来进行。进行放热焊的工作人员，应熟悉工艺规程的细则和进行这些操作所规定的注意事项。为了有助于放热焊的操作，要与材料制造厂取得联系，了解有关工艺。只要保证连结面的清洁、无水分并注意石墨模的干燥及位置的正确，就很容易获得可靠的低阻连接。

对利用螺栓、螺钉和夹箍加压连接的工艺应特别予以注意。当采用螺栓、螺钉和夹箍加压连接时，搭接工艺与普通结构施工作业不同，除了需要获得机械强度之外，还需要强调某些其他要求，例如，应对这一类型的连接进行检查，以便了解配接表面是否进行了精心清洁，搭接元件是否真正接合，完工的搭接点是否有足够的保护措施防止腐蚀等。

10.10 搭接导则小结

在搭接设计和实施过程中，应做到：

a) 应把搭接设计纳入系统设计。应指出，搭接的具体注意事项，不仅在电源线路和信号线路中应有规定，而且对下列各点也要规定具体注意事项：在信号接地母线网络的导体之间，在设备与接地母线网络之间，电缆屏蔽层及其部件与接地参考面之间，箱柜屏蔽层与接地参考面之间，构件之间，以及雷电防护网络各单元之间等等。在设施的设计和施工中，除了机械和工作要求之外，还应考虑信号通路、人身安全和雷电防护搭接的要求。

b) 搭接应实现并保持金属表面之间的紧密接触。配接表面应光滑、清洁，并且没有非导电的表面处理层。紧固件应能施加足够的压力，以便在有关设备和周围环境出现变形应力、冲击和振动时仍能保持表面的良好接触。

c) 搭接的有效性不仅取决于其结构及其所承载电流的频率和幅值，还取决于它所处的环境条件。

d) 搭接条仅是直接搭接的替代连接件。如果搭接条能尽量保持最小的长宽比和最低的电阻，并且其电化序又不比被连接元件高，就可以认为是一种相当好的替代连接件。

e) 搭接点最好由相同金属连接而成。如不能实现相同金属的连接，则应特别注意。要通过选择连接材料和选择辅助元件(如垫圈)来控制搭接点的腐蚀，以保证腐蚀作用仅影响可替换的元件。同时还要采用保护性的表面处理层来控制搭接点的腐蚀。

f) 应对搭接点提供保护，以便防潮和防其他腐蚀因素。

g) 在设备、系统或设施的整个寿命期间，应对搭接点进行检验、测试和维修保养，以确保搭接点能持续完成其使命。

11 屏蔽

11.1 电磁屏蔽的作用

为了实现设备或分系统的电磁兼容性，可以借助下列三种手段的任意组合：

a) 降低干扰源的电平；

b) 降低感受器的敏感性；

c) 增加干扰源到感受器之间干扰传播途径衰减。

无论是对干扰源还是对感受器进行电磁屏蔽，都可以有效地衰减由电磁干扰源引起的辐射干扰信号。电磁屏蔽体可以减小电磁干扰源产生的电场和磁场强度；电磁干扰源被屏蔽时，屏蔽体外部的场强减小；位于电磁场源附近的敏感组件被屏蔽时，则可以大大降低屏蔽体内部的场强。当干扰源与感受器相隔不远，又没有足够的自由空间衰减辐射时，正确设计和安装的屏蔽体，则可提供足够的宽带保护，即减小电磁辐射的影响。在 100kHz 以上的频率范围，单层屏蔽要达到 40dB 的屏蔽效能是比较容易的。精心设计的单层屏蔽结构，可获得高达 70dB 的屏蔽效能。对于更高的屏蔽要求，如 120dB 的屏蔽效能，通常要采用双层屏蔽。

当屏蔽层厚度不足、断面结合不良或者带有通风和其他用途的孔洞时，辐射能量仍然可以通过它们耦合至敏感装置。即使对于连接良好的实心屏蔽体，屏蔽效能的精确计算也需考虑屏蔽体的形状和所要屏蔽的场的类型。虽然电和磁的耦合都会出现，但一般来讲，实现电屏蔽比较容易。对磁屏蔽，特别是频率在 100kHz 以下时，较为困难。对关键部位，应通过试验来检验屏蔽效能，以避免计算误差。这种试验要求建立一个已知的场，测量由屏蔽引起的插入损耗。

在设施的结构布局中，装置的设计者应充分利用装置及其单个设备以及地物所提供的固有屏蔽作用。优先利用的地物有诸如建筑物的墙壁、隔板、搭架以及其他类似的结构。这些地物所提供的屏蔽效能，可把产生电磁辐射的设备与潜在的敏感装置、人员、易燃物及其他物品相隔离。另外，对于在机架或机柜内使用的设备，可利用其机柜固有的屏蔽作用。

虽然屏蔽是抑制电磁干扰的一项重要技术，但它不是达到上述目的的唯一手段。在采用屏蔽技术时，不应忽视滤波、接地和搭接在抑制干扰中所起的作用。

11.2 屏蔽的基本理论

11.2.1 屏蔽效能

一个设备或组件屏蔽壳体的屏蔽效能由若干参数决定，最值得注意的是入射波的频率和阻抗、屏蔽材料的固有特性以及屏蔽体不连续性的形式和数量。屏蔽体的屏蔽效能由该屏蔽体对电磁场强度的减弱程度确定。屏蔽效能(SE)的定义为同一位置无屏蔽体存在时的电磁场强度与加屏蔽体后的电磁场强度之比。因为这个比值的范围很大，常用分贝(dB)来表示屏蔽效能，如式(151)或式(152)所示：

$$SE = 20\lg(E_1/E_2) \cdots\cdots (151)$$

或：

$$SE = 20\lg(H_1/H_2) \cdots\cdots (152)$$

变量 E_1 和 H_1 是无屏蔽体时的电场强度和磁场强度；而 E_2 和 H_2 是在同一位置加屏蔽后的电场强度和磁场强度。

11.2.2 反向感应场

金属对电磁波总有屏蔽作用。电磁波能量的一部分向干扰源方向反射，另一部分在金属内耗散，剩余部分穿过该金属向前传播。上述屏蔽作用可分别看作是入射电场与磁场使屏蔽体表面感应电荷，并在屏蔽体内感应出电流的结果。感应电荷和电流的极性与方向应使其伴生的电场和磁场抵消入射场，从而削弱穿过屏蔽体的电磁场。虽然这种屏蔽原理本身不能有效地计算实际屏蔽体的屏蔽效能，但它可以为屏蔽提供一个清晰的物理概念。例如，从这一观点可以看出，屏蔽体上的缝隙假如妨碍了感应电流的流通，则它比顺着电流流通方向的缝隙对屏蔽效能的影响更大。所以当平面波投射到具有狭长缝的导电屏蔽体时，垂直于电场矢量的狭长缝比平行于电场的狭长缝更容易漏过能量(见图 111)。这个结论是正确的，因为电磁场的边界条件要求屏蔽体感应电流的流动方向与入射的磁场矢量垂直(也就是平行于电场矢量)。

11.2.3 传输线模型

最适用于工程计算的屏蔽理论是根据传输线理论所建立的模型。根据谢昆诺夫的平面波理论[34]，当电磁波波前与电磁屏蔽体边界的形状相一致时，它在数学上可用双线传输线中传输的电流和电压模拟。假定有一功率为 P_{in} 的入射电磁波照射到图 112 所示的屏蔽板上，当电磁波照射到屏蔽板的第一个表面时，入射功率的一部分(P_{r1})向场源反射。剩余部分(P_{t1})进入屏蔽板并穿过它继续传播。反射功率与入射功率的比值(P_{r1}/P_{t1})取决于屏蔽材料的本征阻抗和入射波的波阻抗，犹如两个特性阻抗不同的传输线连接处的情况一样。当电磁波通过屏蔽体时，进入屏蔽体的功率(P_{t1})有一部分随着电磁波在屏蔽体中的传播会转换成热。这一部分能量损失与吸收损耗有关，它与有损耗传输线中的能量损耗相类似。在屏蔽体内传播的功率到达屏蔽体的第二界面时，一部分(P_{r2})被反射回屏蔽体内部，而剩余功率(P_{out})则通过第二界面穿出屏蔽层。如果屏蔽体内的吸收损耗很小(小于 10dB)，则有很大一部分功率会在第二界面上反射并传回第一界面。在第一界面，部分功率再次反射回屏蔽体并传到第二界面而成为再次穿出屏蔽体功率的一部分。可见，屏蔽效能由三个因素决定：

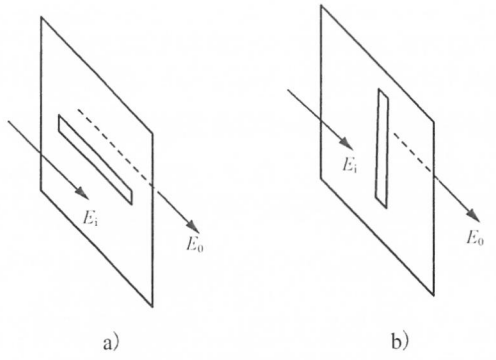
a) 反射损耗；

b) 吸收损耗；

c) 多次反射修正项(在吸收损耗很小时，它是不能忽略的)。

11.2.4 非均匀屏蔽

在处理电磁波通过各种屏蔽缺陷的传输过程时，非均匀屏蔽理论已得到广泛应用。该理论把缺陷部分作为与屏蔽材料自身相并列的传输通路来研究。任何一个实际屏蔽盒的总的屏蔽效能应计及上述所有并列传输通道的结果，并认真考虑各种传输通道相位的差异。不管采用什么理论，设备的屏蔽设计应包括下列过程：确定预期的屏蔽阻挡层一侧所存在的不希望的信号电平；再确定该屏蔽层另一侧所容许的信号电平；最后对各种屏蔽方案进行综合比较，以达到需要的屏蔽效能。



a)　　b)

图 111　电磁波通过狭缝

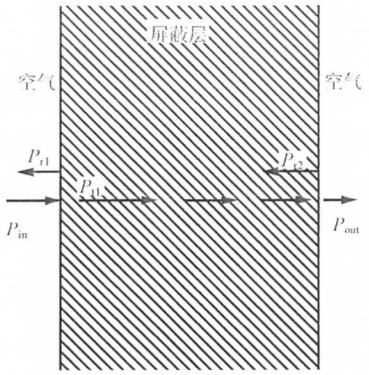


图 112　屏蔽的传输线模型

11.3　单层连续厚屏蔽体的屏蔽效能

11.3.1　概述

屏蔽的平面波理论(或传输线理论)是最常用的屏蔽设计基础理论。屏蔽效能为下列三项之和：吸收损耗、反射损耗及屏蔽体内多次反射修正项。

电磁波垂直入射到无穷大金属平板上时，其屏蔽效能可表示为式(153)：

$$SE = 20\lg|e^{\gamma t}| + 20\lg|1/T| + 20\lg|1 - \Gamma e^{2\gamma t}| \quad \cdots\cdots (153)$$

式中：

γ——电磁波在屏蔽体内的传播常数；

t——屏蔽体的厚度，m；

T——传输系数，无量纲；

Γ——两界面间的反射系数，无量纲。

屏蔽效能表达式常写成式(154)所示形式：

$$SE = A + R + B \quad \cdots\cdots (154)$$

其中 A、R 和 B 依次对应式(153)等号右侧的各项，分别表示前面所提到的吸收损耗、反射损耗和多次反射修正项。在计算实际屏蔽效能时，γ、Γ 和 T 的值由屏蔽材料的电导率(σ)、磁导率(μ)和介电常数(ε)决定。Γ 和 T 的计算值还与入射电磁波的波阻抗有关。

为了使屏蔽效能公式便于应用，分别把 A、R 和 B 项表示为更易使用的形式，使它们是电磁波频率(f)，屏蔽体厚度(t)，相对磁导率(μ_r)及相对电导率(σ_r)的函数。可推导出反射损耗和修正项的简化近似表达式。应根据波阻抗的低(Z_w<<377Ω；磁场)、中(Z_w=377Ω；平面波)或高(Z_w>>377Ω；电场)选择合适的近似表达式。低阻抗场出现在环形天线附近，高阻抗场出现在偶极子天线附近，而平面波场是存在于源天线近场区以外的区域。

11.3.2　吸收损耗

电磁波穿过壁厚为 t 的屏蔽体时，吸收损耗如式(155)所示：

$$A = 0.131t\sqrt{f\mu_r\sigma_r} \quad \cdots\cdots (155)$$

式中：

A——吸收损耗，dB；

t——屏蔽体壁厚，mm；

f——电磁波频率，Hz；

μ_r——屏蔽材料的相对磁导率，无量纲；

σ_r ——屏蔽材料相对于铜的电导率，无量纲。

应注意，吸收损耗与屏蔽材料的厚度成正比，而且随着所要屏蔽的电磁波频率的方根值上升而增加。从屏蔽材料选择的角度看，吸收损耗随屏蔽材料的相对磁导率与相对电导率乘积的方根值上升而增加。

表 28 列出了屏蔽材料的电参数[35]（σ_r 和 μ_r）。鉴于磁性材料的 μ_r 与频率有关，表中只给出了典型屏蔽材料在 150kHz 时的值。表 28 中吸收损耗是按所列材料，取薄板厚度为 1mm，频率为 150kHz 时，根据式(155)求出的。其他厚度的吸收损耗可简单地将表中值乘上屏蔽层厚度的毫米数得出。

吸收损耗随频率的变化，以及三种常用屏蔽材料在 1mm 厚时吸收损耗的比较数据可参阅表 29[36]。此外，表中还列入了铁在不同频率时的相对磁导率。图 113 是按表 29 的数据画出的曲线。

如前所述，吸收损耗是构成屏蔽体衰减(屏蔽效能)的三个相加项之一。至此，吸收损耗已经表示成解析形式[式(155)]，表格形式(表 28 和表 29)及曲线(图 113)。当所研究的屏蔽材料和频率列入上述图表中时，很容易由这些数据表和曲线得出准确的结果。几乎对于任一种材料和频率的组合，都能从吸收损耗诺模图(见图 255)中快速地求解，但其结果通常不够准确。对初始设计而言，诺模图是一种简便的工具。屏蔽体的材料和厚度一旦初步选定之后，就可利用式(155)准确地计算吸收损耗值。

表 28　屏蔽材料(1mm 厚)在 150kHz 时的吸收损耗

金属	相对电导率 σ_r	相对磁导率 μ_r	吸收损耗 dB
银	1.05	1	51.96
铜(退火)	1.00	1	50.91
铜(冷拉)	0.97	1	49.61
金	0.70	1	42.52
铝	0.61	1	39.76
镁	0.38	1	31.10
锌	0.29	1	27.56
黄铜	0.26	1	25.98
镉	0.23	1	24.41
镍	0.20	1	22.83
磷青铜	0.18	1	21.65
铁	0.17	1000	665.40
锡	0.15	1	19.69
钢	0.10	1000	509.10
铍	0.10	1	16.14
铅	0.08	1	14.17
高磁导率镍钢	0.06	80000[a]	3484.00[a]
蒙乃尔合金	0.04	1	10.24
μ－合金	0.03	80000[a]	2488.00[a]
坡莫合金	0.03	80000[a]	2488.00[a]
不锈钢	0.02	1000	244.40

[a] 入射场未使金属磁饱和。

表 29　1mm 厚金属板的吸收损耗　　单位为分贝

频率	铁		铜		铝	
	μ_r	A	μ_r	A	μ_r	A
50Hz	1000	12	1	0.9	1	0.7
1.0kHz	1000	54	1	4	1	3
10.0kHz	1000	171	1	13	1	10
150.0kHz	1000	663	1	56	1	40
1.0MHz	700	1430	1	131	1	103
3.0MHz	600	2300	1	228	1	178
10.0MHz	500	3830	1	416	1	325
15.0MHz	400	4200	1	509	1	397
100.0MHz	100	5420	1	1310	1	1030
1.0GHz	50	12110	1	4160	1	3250
1.5GHz	10	6640	1	5090	1	3970
10.0GHz	1	5420	1	13140	1	10300
注：相对电导率σ_r：铁 0.17；铜 1.0；铝 0.61。						

11.3.3　反射损耗

11.3.3.1　概述

反射损耗 R 可按式(153)得到，如式(156)所示：

$$R = -20\lg|T| \quad \cdots\cdots (156)$$

式中：

T ——屏蔽体的传输系数。

反射损耗包括屏蔽体两个表面上的反射(见图 112)，它除了与入射电磁波的波阻抗及频率有关之外，还与屏蔽材料的电性能有关。反射损耗与屏蔽体的厚度无关。

参照传输线理论中反射的经典公式，屏蔽体的反射损耗如式(157)所示：

$$R = 20\lg\frac{|1+(s/2)|}{|4s|} \quad \cdots\cdots (157)$$

式中：

s ——空气波阻抗与屏蔽体本征阻抗之比，它实际上与传输线中的电压驻波比类似。

屏蔽体的本征阻抗很容易由屏蔽材料的电性能确定，而空气波阻抗主要取决于电磁波源的类型和相对位置，如图 114 所示。

为便于给出确定反射损耗的具体方法，将电磁波分为独立的三种类型，并按这三种类型分别给出反射损耗的近似表达式。由于波阻抗是电场强度与磁场强度之比，所以当电场占优势时是高阻抗场，磁场占优势时是低阻抗场。根据波阻抗的低、中、高，通常将它们所对应的场分别看作为磁场、平面波和电场。

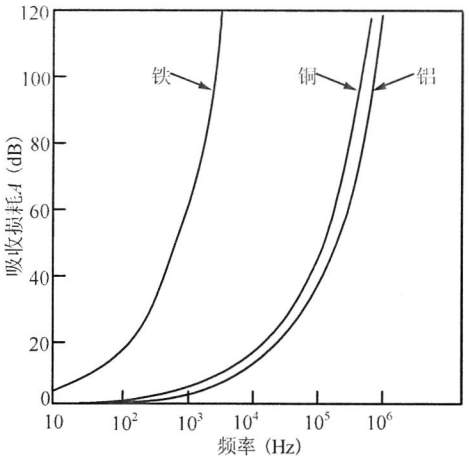


图 113　1mm 厚屏蔽体的吸收损耗

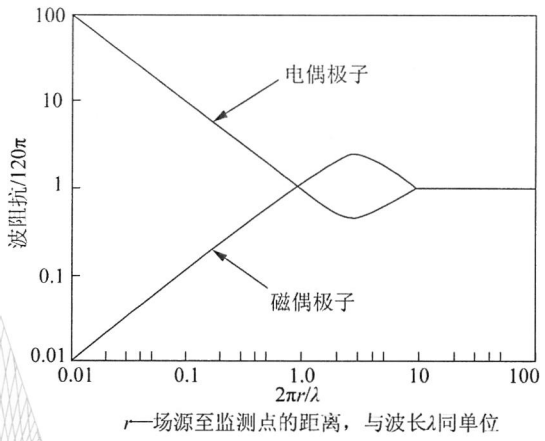


图 114　空气波阻抗随场源距离变化的曲线

11.3.3.2　低阻抗场

环天线(或磁偶极子)产生的电磁场在近区场($r<<\lambda/2\pi$)磁场占优势。这里 r 是离天线的距离，λ 是电磁波的波长。对于这种主要为磁场(低阻抗)的电磁场，反射损耗的近似表示由式(158)给出：

$$R_M = 20\lg\left(\frac{C_1}{r\sqrt{f\sigma_r/\mu_r}} + C_2 r\sqrt{f\sigma_r/\mu_r} + 0.354\right) \quad \cdots\cdots (158)$$

式中：

r ——电磁场源到屏蔽体的距离，单位见表 30；

f ——频率，Hz；

σ_r ——屏蔽体材料相对于铜的电导率，无量纲；

μ_r ——屏蔽体材料的相对磁导率，无量纲；

C_1、C_2 ——视距离 r 的单位而定的系数，它们的取值在表 30 中给出。

表 30　计算磁场反射损耗的系数

场源到屏蔽体的距离 r 的单位	C_1	C_2
m	0.0117	5.35
cm	1.17	0.053
mm	11.7	0.0053

和吸收损耗的情况一样，低阻抗场的反射损耗也取决于屏蔽材料的电性能以及电磁波的频率。此外，反射损耗与场源到屏蔽体的距离有关，而与屏蔽体厚度无关。

图 115 给出了反射损耗与频率的关系。图中给出的屏蔽材料有铁、铜和铝，它们离开低阻抗场源的距离为 2.54cm 和 25.4cm。由图可见，当距离相同时，铜和铝的反射损耗大于铁的反射损耗，只有在低频时铁的反射损耗才较大。在这些距离上，图中曲线不能向高频段延伸，因为在推导式(158)时采用了近似方法，假定间距 $r<<\lambda/(2\pi)$，当频率更高时，在这些距离上电磁场接近于平面波，而不是接近于低阻抗场。在图 116 中，以 $0.394r\sqrt{f\sigma_r/\mu_r}$ 为变量给出了低阻抗场反射损耗的通用曲线[35]。

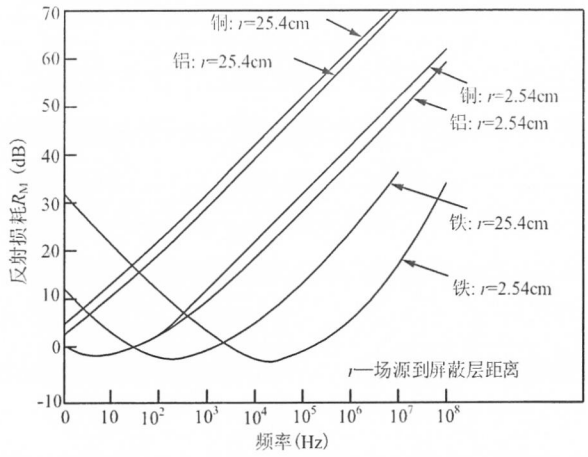


图 115　铁、铜、铝对低阻抗场源的反射损耗

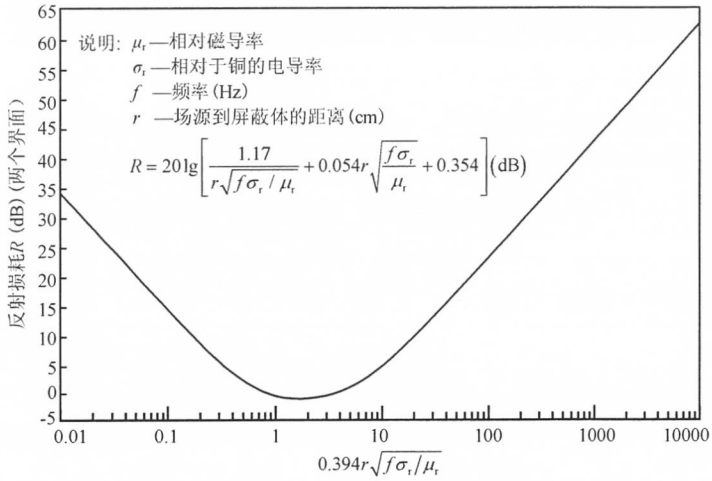


图 116　低阻抗场源反射损耗的通用曲线

11.3.3.3　平面波场

通常情况下，当离开场源的距离大于几个波长之后，电磁场基本上就是平面波，它的波阻抗等于传播媒质的波阻抗(空气为 377Ω)。平面波场兼有电场矢量 E 和磁场矢量 H，E 和 H 不但相互垂直，而且都与传播方向正交。

平面波场与磁偶极子近区的低阻抗场及电偶极子近区的高阻抗场都不一样，它的反射损耗与场源到屏蔽体的距离无关。

对于均匀照射到屏蔽体的平面波，反射损耗可由式(159)确定：

$$R_P = 168 - 20\lg\sqrt{f\mu_r/\sigma_r} \quad \cdots\cdots (159)$$

式中：

σ_r、μ_r、f——定义与式(158)的相同。

由式(159)可见，平面波的反射损耗将随着频率的上升而下降，而且(μ_r/σ_r)比值小的屏蔽材料较好。

图 117 给出了铁、铜、铝屏蔽体对平面波的反射损耗与频率之间的关系。铁的反射损耗曲线与铜、铝的曲线不一样，它不是一条直线，因为铁的相对磁导率与频率有关。图 118 以 $\sqrt{f\mu_r/\sigma_r}$ 为变量给出了对平面波的反射损耗通用曲线[35]。

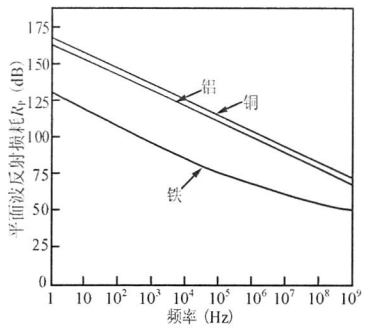


图 117　对平面波的反射损耗($r>2\lambda$)

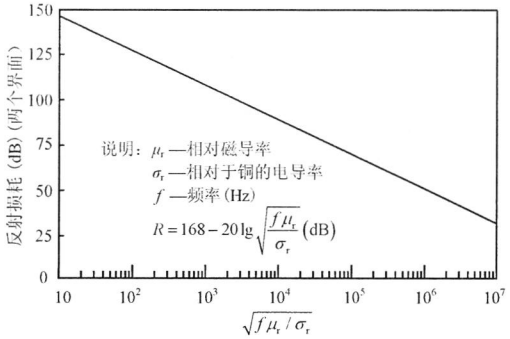


图 118　对平面波反射损耗的通用曲线

11.3.3.4　高阻抗场

邻近电偶极子天线的电磁场，其电场强度与磁场强度之比(波阻抗)较高。屏蔽体对这种场的反射损耗可由式(160)给出：

$$R_E = 322 - 10\lg(f^3 r^2 \mu_r / \sigma_r) \quad \cdots\cdots (160)$$

式中：

r——场源到屏蔽体的距离，m。

由式(160)可见，与低阻抗场情况一样，高阻抗场电磁波的反射损耗与电磁场源到屏蔽体的距离 r 有关。反射损耗随频率的升高而下降，而且(σ_r/μ_r)比值高的材料较好。

图 119 是对高阻抗场反射损耗的通用曲线[35]，图中上面一根线的变量范围如式(161)所示：

$$1<0.394r\sqrt{\mu_r f^3/\sigma_r}<10^6 \quad \cdots\cdots (161)$$

下面一根线的范围如式(162)所示：

$$0.394r\sqrt{\mu_r f^3/\sigma_r}>10^6 \quad \cdots\cdots (162)$$

图 120 给出了场源到屏蔽体距离为 2.54cm 和 25.4cm 时，铁、铜、铝对高阻抗电磁波的反射损耗与频率的关系。铜和铝的反射损耗曲线并未分开画出，因为铝对高阻抗场的反射损耗与铜大致相同。

表 31 列出了铁、铜、铝在几个典型频率上对磁场、电场和平面波的反射损耗[35][36]。表中场源到屏蔽体的距离，对于磁场和电场取 30.5cm。

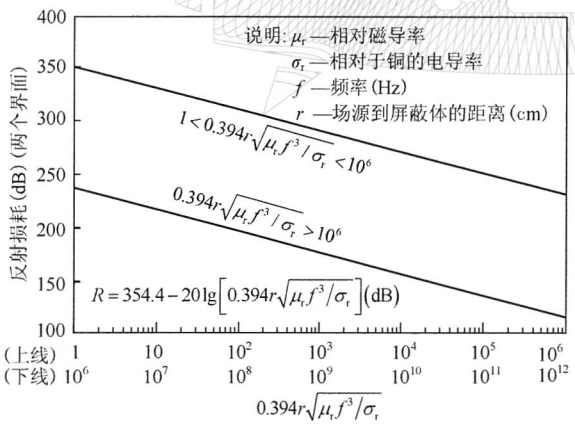


图 119　高阻抗场反射损耗的通用曲线

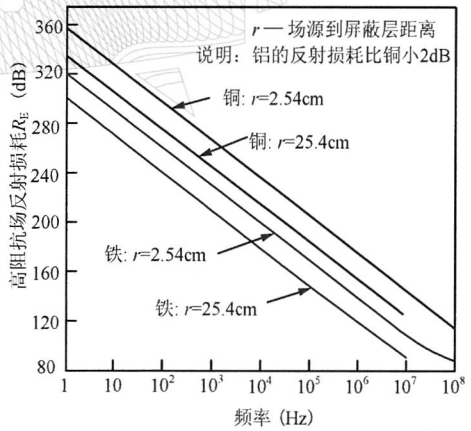


图 120　铁、铜、铝对高阻抗场的反射损耗

11.3.4　多次反射修正项

当屏蔽体的吸收损耗(A)相当大(比如说至少有 10dB)时，由第二个界面反射回屏蔽体的能量显然较小，它很难继续向前传播后穿出屏蔽层。然而，如果屏蔽层吸收损耗比较小，则第二个界面所反射的能

量有较大的数值，该能量经再次反射后最终将进入被屏蔽的区域。因此，当屏蔽层的吸收损耗较小时，计算的屏蔽效能应是下列三项之和：

a） 吸收损耗 A；

b） 反射损耗 R；

c） 多次反射修正项 B。

多次反射修正项如式(163)所示：

$$B = 20\lg\{|1-\Gamma^2 10^{-A/10}[\cos(0.23A)-j\sin(0.23A)]|\} \cdots\cdots (163)$$

式中：

Γ ——两界面间的反射系数；

A ——屏蔽体的吸收损耗，(见式(155))，dB；

Γ与屏蔽体的本征阻抗和照射电磁波的波阻抗有关。表 32 中按三类波阻抗分别给出了反射系数 Γ 的计算式，式中还用到了参变量 m。

表 31 金属板两个表面反射损耗的计算值

单位为分贝

频率 Hz	反射损耗[a]								
	铁(σ_r=0.17)				铜(σ_r=1，μ_r=1)			铝[b] σ_r=0.61，μ_r=1	
	μ_r	磁场 r=30.5cm	电场 r=30.5cm	平面波场	磁场 r=30.5cm	电场 r=30.5cm	平面波场	磁场 r=30.5cm	电场 r=30.5cm
50.0	1000	−0.7[c]	243	113	21	281	151	−	−
1.0k	1000	0.9	204	101	34	242	138	−	−
10.0k	1000	8.0	174	91	44	212	128	−	−
150.0k	1000	10.0	139	79	56	177	117	54	175
1.0M	700	28.0	116	72	64	152	108	62	150
15.0M	400	42.0	83	63	76	117	96	74	115
100.0M	100	57.0	64	61	84	92	88	82	90
1.5G	10	59[d]	59[d]	59	76[d]	76[d]	76	−	−
10.0G	1	61.0[d]	61[d]	61	69[d]	68[d]	68	−	−

[a] 对于吸收损耗小于 15dB 的情况，考虑了多次反射修正项 B。

[b] 没有给出平面波场(与铜的接近)。

[c] 铁的反射损耗在 620Hz 时为 0dB，在 58Hz 时为负值，在 31.5Hz 时又为 0dB，到更低频率时又变成正值。

[d] 在这些频率点上，对于原定的距离，电磁场已变成了平面波。

表 32 多次反射修正项 B 所用到的系数 m、Γ 计算式

场的类型	参变量 m(r 单位：m；f 单位：Hz)	反射系数 Γ
磁场 (低阻抗场)	$\dfrac{4.7\times10^{-2}}{r}\sqrt{\dfrac{\mu_r}{f\sigma_r}}$	$\Gamma^2 = 4\dfrac{(1-m^2)^2-2m^2+j2\sqrt{2}m(1-m^2)}{[(1+\sqrt{2}m)^2+1]^2}$
平面波[a] (Z_w=377Ω)	$9.77\times10^{-10}\sqrt{\dfrac{f\mu_r}{\sigma_r}}$	$\Gamma^2 = 4\dfrac{(1-m^2)^2-2m^2-j2\sqrt{2}m(1-m^2)}{[(1+\sqrt{2}m)^2+1]^2}\approx 1$
电场 (高阻抗场)	$2.05\times10^{-17}r\sqrt{\dfrac{f^3\mu_r}{\sigma_r}}$	$\Gamma^2 = 4\dfrac{(1-m^2)^2-2m^2-j2\sqrt{2}m(1-m^2)}{[(1-\sqrt{2}m)^2+1]^2}$

[a] 对于平面波，由于 m 非常小，Γ基本上为 1。

表 33 给出了多种厚度的铁板和铜板在一些典型频率上多次反射修正项的值[36]。由表可见，当屏蔽体比较厚或频率较高时，多次反射修正项趋近于零，因为在这两种情况下屏蔽层的吸收损耗很大。在同样厚度和频率条件下，铁的吸收损耗比铜大，所以从表中也可看出铁的多次反射修正项较小。图 121 以曲线图形给出了铜在磁(低阻抗)场中的修正项[37]。图 122 给出了吸收损耗(式(155))的通用曲线。多次反射修正项(式(163))取决于吸收损耗 A，而反射系数 Γ基本为 1。无论什么场合，如果近似式 $\Gamma\approx1$ 成立，则修正项就仅由吸收损耗决定。在这种情况下，吸收损耗和多次反射修正项的和如图 122 通用曲线中的虚线所示[36]。

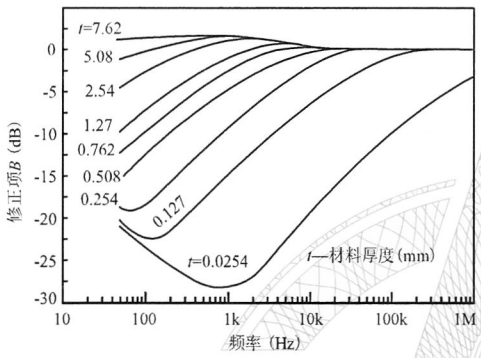


图 121　铜在磁场中的多次反射修正项 B

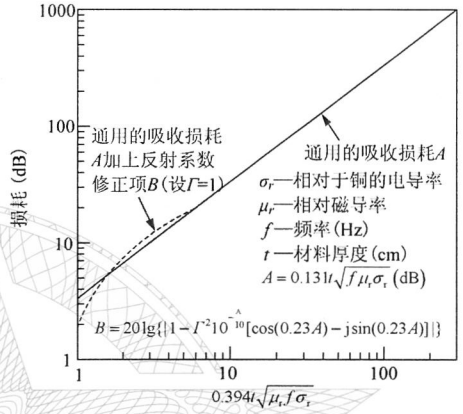


图 122　吸收损耗和 $\Gamma=1$ 的多次反射修正项 B

表 33　单层金属板的多次反射修正项 B

单位为分贝

材料	厚度 mm	频率					
		50Hz	100Hz	1kHz	10kHz	100kHz	1MHz
铜，$\mu_r=1$，$\sigma_r=1$，环天线场的近区场	0.025	−21.4	−24.00	−28.00	−20.0	−10.0	−3.0
	0.127	−20.8	−22.00	−16.00	−7.0	−0.6	+0.1
	0.254	−19.2	−19.00	−10.00	−3.0	+0.6	0.0
	0.508	−15.8	−14.00	−5.00	+0.1	+0.1	−
	0.762	−13.1	−11.00	−3.00	+0.6	0.0	−
	1.27	−9.5	−7.00	−0.60	0.0	−	−
	2.54	−4.8	−3.00	+0.50	−	−	−
	5.08	−1.1	+0.50	0.00	−	−	−
	7.62	+0.1	+0.50	−	−	−	−
铜，$\mu_r=1$，$\sigma_r=1$，平面波和电偶极子的近区场	0.0254	−42.3	−40.00	−30.00	−20.0	−10.0	−3.1
	0.127	−28.5	−25.00	−16.00	−7.0	−0.6	+0.1
	0.254	−22.6	−20.00	−10.00	−3.0	+0.6	0.0
	0.508	−16.8	−14.00	−5.00	+0.1	+0.1	−
	0.762	−13.4	−11.00	−3.00	+0.6	0.0	−
	1.27	−9.5	−7.00	−0.60	+0.1	−	−
	2.54	−4.7	−3.00	+0.50	0.0	−	−
	5.08	−1.0	+0.10	0.00	−	−	−
	7.62	+0.3	+0.60	−	−	−	−

表 33(续)　　单位为分贝

材料	厚度 mm	频率					
		50Hz	100Hz	1kHz	10kHz	100kHz	1MHz
铁，μ_r=1000，σ_r=0.17，环天线的近区场	0.0254	0.8	1.00	−1.60	−1.8	−	−
	0.127	0.9	0.90	−0.60	0.0	−	−
	0.254	0.8	0.50	+0.06	−	−	−
	0.508	0.5	0.08	0.00	−	−	−
	0.762	0.17	0.06	−	−	−	−
	1.27	0.04	0.00	−	−	−	−
铁，μ_r=1000，σ_r=0.17，平面波和电偶极子的近区场	0.0254	−20.32	−17.00	−8.0	−1.3	−	−
	0.127	−7.57	−5.00	+0.2	0.0	−	−
	0.254	−3.08	−1.30	+0.4	−	−	−
	0.508	+0.08	+0.50	0.0	−	−	−
	0.762	+0.57	+0.40	−	−	−	−
	1.27	+0.23	0.00	−	−	−	−

11.3.5　总屏蔽效能

11.3.5.1　概述

人们所关心的屏蔽体的总屏蔽效能，是吸收损耗(A)，反射损耗(R)及多次反射修正项(B)三者之和。A，R 和 B 三项的意义只是在于对屏蔽效能作出预测。表 34 列出了多种厚度的铜、铁、铝等屏蔽材料在不同频率下对电磁波所具有的单项及总的屏蔽效能计算值[36]。在“场源”一栏下的符号，代表电磁波波阻抗的三种类别：L 表示环天线，磁场占优势；D 表示电偶极子天线，电场占优势；P 表示平面波($Z\approx377\Omega$)。除平面波之外，表中所有数值对应于场源到屏蔽体之间的距离为 30cm 的情况。

表 34　屏蔽效能的计算值

材料	厚度 mm	频率 Hz	场源[a]	R dB	A dB	B dB	$SE=A+B+R$ dB
铜	0.0254	50	L	21.5	0.024	−21.45	0.074
	0.254	50	L	21.5	0.235	−19.21	2.525
	7.62	50	L	21.5	7.059	+0.13	28.689
	0.254	1k	L	34.2	1.060	−10.37	24.89
	0.254	10k	L	44.2	3.340	−2.62	44.92
	0.254	10k	D	212.0	3.340	−2.61	212.73
	0.254	10k	P	128.0	3.340	−2.61	128.73
	0.762	10k	L	44.0	10.020	+0.58	54.60
	0.254	150k	L	56.0	12.900	0.50	69.40
	0.254	150k	D	176.8	12.900	0.50	190.20
	0.254	150k	P	117.0	12.900	0.50	130.40
	0.254	1M	L	64.2	33.400	0.00	97.60

表 34(续)

材料	厚度 mm	频率 Hz	场源[a]	R dB	A dB	B dB	$SE=A+B+R$ dB
铜	0.254	1M	D	152.0	33.400	0.00	185.40
	0.254	1M	P	108.0	33.400	0.00	141.40
	0.254	15M	L	76.0	129.00	0.00	205.00
	0.254	15M	D	116.0	129.00	0.00	245.00
	0.254	15M	P	96.0	129.00	0.00	225.00
	0.254	100M	L	84.0	334.00	0.00	418.00
	0.254	100M	D	92.0	334.00	0.00	426.00
	0.254	100M	P	88.0	334.00	0.00	422.00
铁	0.0254	50	L	−0.7	0.31	+0.76	0.37
	0.254	50	L	−0.7	3.07	+0.80	3.17
	7.62	50	L	−0.7	92.03	0.00	91.33
	0.254	1k	L	0.9	13.70	+0.06	14.66
	0.254	10k	L	8.0	43.50	0.00	51.50
	0.254	10k	D	174.0	43.50	0.00	217.50
	0.254	10k	P	99.5	43.50	0.00	143.00
	0.762	10k	L	8.0	130.50	0.00	138.50
	0.254	150k	L	19.0	160.00	0.00	179.00
	0.254	150k	D	139.0	169.00	0.00	308.00
	0.254	150k	P	79.0	169.00	0.00	248.00
	0.254	1M	L	28.0	363.00	0.00	391.00
	0.254	1M	D	116.0	363.00	0.00	479.00
	0.254	1M	P	72.0	363.00	0.00	435.00
	0.254	15M	L	42.0	1060.00	0.00	1102.00
	0.254	15M	D	83.0	1060.00	0.00	1143.00
	0.254	15M	P	63.0	1060.0	0.00	1123.00
	0.254	100M	L	56.0	1370.00	0.00	1426.00
	0.254	100M	D	64.0	1370.00	0.00	1434.00
	0.254	100M	P	60.0	1370.00	0.00	1430.00
铝	0.254	1M	L	62.0	26.0	0.00	88
	0.254	1M	D	150.0	26.0	0.00	176.0
	0.254	1M	P	–	–	–	–
	0.254	15M	L	79.0	100.0	0.00	179.0
	0.254	15M	D	115.0	100.0	0.00	215.0
	0.254	15M	P	–	–	–	–
	0.254	100M	L	82.0	260.0	0.00	342.0

表 34(续)

材料	厚度 mm	频率 Hz	场源[a]	R dB	A dB	B dB	$SE=A+B+R$ dB
铝	0.254	100M	D	90.0	260.0	0.00	350.0
	0.254	100M	P	–	–	–	–
[a] L——环天线或磁偶极子的近区场，场源到屏蔽体的距离 $r=30$cm； D——电偶极子的近区场，场源到屏蔽体的距离 $r=30$cm； P——平面波。							

11.3.5.2 测量数据

与前面讨论的屏蔽效能理论值相对照，表 35[35]和图 123 及图 124[38]给出了实际的测量数据。图 123 给出了不同的高磁导率薄板料在低频时的典型屏蔽效能曲线。测量线圈与发射线圈分别距薄板 0.3cm。该图表示了当频率降低时，屏蔽效能曲线趋向平直，其转折点出现在 1kHz 附近。低频磁屏蔽实质上是借助建立低磁阻通路分流磁场实现的。图 123 中的材料 AMPB－65 的屏蔽效能与测量线圈间距的关系如图 124 所示。同时图 124 还表明在几个特定频率上试验间距所覆盖的区域，其相应的屏蔽效能变化约为 5dB。

大多数磁屏蔽材料都有这样的特点：在成型、机械加工、受到冲击、或者温度变化时，它的磁导率极易改变。上述过程改变了材料中的磁畴排列方向，所以应对这些材料进行退火处理，使磁畴重新排列，恢复原先的磁导率。典型的退火处理过程包括：把材料加热至 1100℃(有时在惰性气体中)，保温约 2h，然后让它慢慢冷却至室温。

表 35 实心薄板材料的实测屏蔽效能

单位为分贝

波型	材料	厚度 mm	频率 Hz							
			0.1k	1k	10k	85k	200k	2M	5M	10M
平面波	铜	0.064	–	–	–	–	109	106	114	–
	铝	0.127	–	–	–	–	107	109	118	–
	不锈钢	0.46	–	–	–	–	97	95	99	–
	钢（$\mu_r=250$）	0.114	–	–	–	–	105	99	101	–
	Co－Netic AA $\mu_r=10000$	0.09	–	–	–	–	97	130	–	–
低阻抗场	铜	3.175	8	22	58	–	–	–	–	–
		1.6	–	–	–	97	–	–	–	–
		0.79	4	11	29	59	–	120	–	–
		0.114	–	–	–	34	–	55	–	–
	铝	3.175	5	18	50	–	–	–	–	–
		1.6	1	16	35	78	–	–	–	–
		0.79	1	10	24	–	–	–	–	–
	钢	1.6	25	40	80	–	–	–	–	–
		0.79	4	28	59	94	–	92	–	120
	钢两面包覆铜层	0.79	–	–	–	107	–	–	–	–

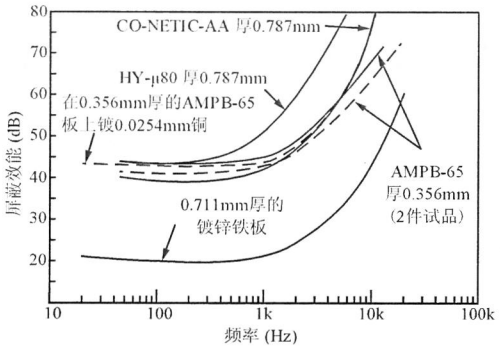


图 123　高磁导率材料屏蔽效能的测量值

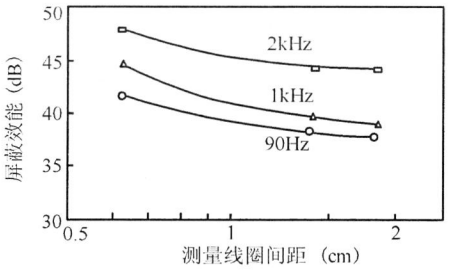


图 124　高磁导率材料 AMPB－65 的屏蔽效能测量值与测量线圈间距的关系

11.3.5.3　小结

一个屏蔽体的屏蔽效能包括下列三项的总和：吸收损耗(A)，反射损耗(R)和多次反射修正项(B)。其中吸收损耗与屏蔽体到场源的距离无关，它取决于屏蔽体的厚度和材料的电导率、磁导率以及入射电磁波的频率。而反射损耗(类似于两种传输线连接处的反射)则和电磁波的波阻抗与屏蔽体本征阻抗的比值有关，即它与电磁场源的类型、场源到屏蔽体的距离、电磁场源的频率以及屏蔽材料的电导率和磁导率有关，但与屏蔽体的厚度无关。对于吸收损耗大于 10dB 的屏蔽体来说，多次反射修正项基本为零。但对于吸收损耗较小的屏蔽体，则应计入多次反射修正项。多次反射修正项与电磁波波阻抗的种类、吸收损耗、频率以及屏蔽材料的电导率和磁导率有关。表 36 汇总了常用的屏蔽效能表达式。为了计算屏蔽效能的各分量，前面已给出了有关的表达式、表格和曲线。至于选用哪种形式来解决具体的屏蔽问题，则由使用者根据实际情况来确定。

表 36　屏蔽效能计算公式汇总

r——源与屏蔽体距离，m；f——频率，Hz；μ_r——相对磁导率；
Γ——反射系数；σ_r——相对于铜的电导率；m——修正参数；t——屏蔽体壁厚，mm

场源	吸收损耗 A	反射损耗 R[a]	修正项 B[b] 的相关系数
平面波	$0.131t\sqrt{f\mu_r\sigma_r}$	$168-20\lg\sqrt{f\mu_r/\sigma_r}$	$\Gamma^2=4\dfrac{(1-m^2)^2-2m^2-j2\sqrt{2}m(1-m^2)}{[(1+\sqrt{2}m)^2+1]^2}\approx1$ $m=9.77\times10^{-10}\sqrt{f\mu_r/\sigma_r}$
环天线 (近区场)	$0.131t\sqrt{f\mu_r\sigma_r}$	$20\lg\left(\dfrac{C_1}{r\sqrt{f\sigma_r/\mu_r}}+C_2r\sqrt{f\sigma_r/\mu_r}+0.354\right)$	$\Gamma^2=4\dfrac{(1-m^2)^2-2m^2+j2\sqrt{2}m(1-m^2)}{[(1+\sqrt{2}m)^2+1]^2}$ $m=\dfrac{4.7\times10^{-2}}{r}\sqrt{\mu_r/f\sigma_r}$
电偶极子 (近区场)	$0.131t\sqrt{f\mu_r\sigma_r}$	$322-10\lg(f^3r^2\mu_r/\sigma_r)$	$\Gamma^2=4\dfrac{(1-m^2)^2-2m^2-j2\sqrt{2}m(1-m^2)}{[(1+\sqrt{2}m)^2+1]^2}$ $m=2.05\times10^{-17}r\sqrt{f^3\mu_r/\sigma_r}$

[a] 反射损耗计算公式中系数 C_1、C_2 见表 30；

[b] 多次反射修正项按下式计算：$B=20\lg\{|1-\Gamma^2 10^{-A/10}[\cos(0.23A)-j\sin(0.23A)]|\}$。

11.4　其他屏蔽体的屏蔽效能

11.4.1　多层实心屏蔽体

在有些情况下，为了得到特殊的综合屏蔽特性，需要采用两层甚至三层屏蔽材料。多层屏蔽主要用于对电场和磁场都有较高屏蔽要求的场合，但也不排除在其他条件下应用。

虽然μ－合金和类似的高磁导率合金对低频弱磁场可提供良好的屏蔽，但在强磁场作用下它们的屏蔽效能会下降。需要在强信号环境中进行磁屏蔽时，通常希望使用多层屏蔽，而且其外层材料与内层相比要有较高的磁饱和强度，当然其磁导率相应会低一些。这种屏蔽结构体可用具有表 37 所列特性的材料构成。

所用材料的厚度取决于外界的场强电平和所要求的抑制能力。

当屏蔽作用很大程度上取决于反射损耗时，若用绝缘材料将两层或多层金属隔开，使其形成多次反射，则可比同样厚度的单层金属板提供更高的屏蔽效能。上述金属层间的隔离对提供附加的两个不连续表面是必不可少的。将磁性薄板材料分隔后的类似优点亦已有介绍(图 125)[38]。

对于用气隙将材料和厚度相同的两层金属板隔开的特殊情况，其穿透深度和反射损耗是每个单层板的 2 倍，但多次反射修正项并不是单层板修正项的 2 倍。在大部分频率范围内修正项是负的，因此双层屏蔽体的屏蔽效能显然小于两个单层屏蔽体的屏蔽效能之和，但比总厚度相同的单层屏蔽体要好得多。

表 37　磁性材料的特性

参数	内层材料 (Co－Netic A A)	外层材料 (Netic S 3－6)
起始磁导率	20000	300
在 0.02T 时的磁导率	80000	500
饱和磁感应强度(T)	0.75	2.2

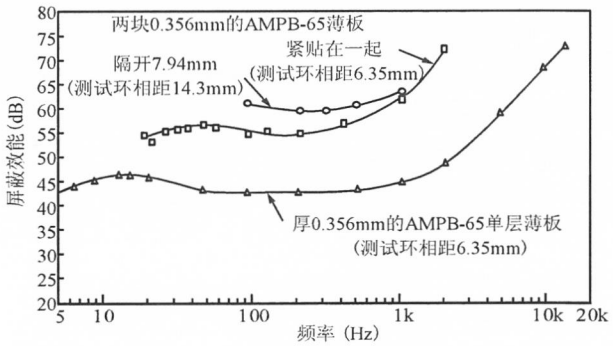


图 125　实测的两层高磁导率金属薄板的屏蔽效能

11.4.2　镀层和薄膜屏蔽层

薄膜屏蔽已应用于各种场合。其范围可从运输和贮藏期间用以防护射频场的金属化复合包装层到微电子学中应用的真空沉积屏蔽层，以及供屏蔽室用的类似于墙纸的屏蔽材料。

实心材料的屏蔽理论也适用于薄膜屏蔽层。对厚度远小于$\lambda/4$ 的屏蔽层，吸收损耗非常小，但多次反射修正项 B 相当大，并且是负数，因此抵消了一部分反射损耗。负数项的含意是因为各种反射有附加的相位关系，从而降低屏蔽效能。这时屏蔽效能基本上与频率无关。当屏蔽层厚度超过$\lambda/4$ 时，多次反射项可忽略，对其他损耗不再起抵消作用，因而材料的屏蔽效能增加，并且与频率相关。

表 38 提供了不同厚度和不同频率时铜膜屏蔽效能的计算值[39]。由电磁场基础理论可知，电磁波在良导体内的传播速度如式(164)所示：

$$v_p = \sqrt{4\pi f/(\mu\sigma)} \quad \cdots\cdots (164)$$

式中：

v_p ——传播速度，m/s；

f ——电磁波的频率，Hz；

μ——导体的磁导率，铜的$\mu=4\pi\times10^{-7}$ H/m；

σ——导体的电导率，铜的$\sigma=5.8\times10^{7}$ S/m。

在f=1GHz时，电磁波在铜层内传播的速度v_p和波长λ分别由式(165)和式(166)给出：

$$v_p=\sqrt{4\pi f/(\mu\sigma)}=\sqrt{4\pi\times10^{9}/(4\pi\times10^{-7}\times5.8\times10^{7})}=1.31\times10^{4}\ \text{m/s} \quad \cdots\cdots(165)$$

$$\lambda=v_p/f=1.31\times10^{4}/10^{9}=1.31\times10^{-5}\ \text{m} \quad \cdots\cdots(166)$$

在1GHz时，电磁波在铜中的1/4波长为3.3μm，可以看出，在此厚度以上屏蔽效能的变化明显。

表38　铜薄膜对平面波场的屏蔽效能计算值　　单位为分贝

薄铜膜厚度 μm	0.1		1.2		2.2		22	
频率	1MHz	1GHz	1MHz	1GHz	1MHz	1GHz	1MHz	1GHz
吸收损耗 A	0.014	0.44	0.16	5.2	0.29	9.2	2.9	92
单层反射损耗 R	109	79	109	79	109	79	109	79
多次反射修正项 B	−47	−17	−26	−6	−21	0.6	−3.5	0
总屏蔽效能 SE	62	62	83	78	88	90	108	171

11.4.3　屏蔽网和穿孔的金属板屏蔽层

有许多场合是不能用实心材料作屏蔽层的。如果一个封闭壳体应是透光(例如表头的表面)或通风的，则必然要采用屏蔽网或穿孔材料。实心金属屏蔽层的屏蔽效能已在前面章节里用经典传输线理论得出。为了得到适用于屏蔽网和穿孔金属薄板的屏蔽效能表达式，需要进行下列各项计算：

a)　各个屏蔽孔径(相当于许多叠在一起的截止式波导)的衰减效应(见11.5.4.2)；

b)　考虑了窗孔几何形状的反射损耗；

c)　试验天线与屏蔽体的距离远大于屏蔽体上孔间距离时的总开孔面积；

d)　趋肤深度；

e)　邻近孔之间的耦合。

屏蔽效能可用式(167)表示[40]：

$$SE=A_a+R_a+B_a+K_1+K_2+K_3 \quad \cdots\cdots(167)$$

正如实心屏蔽一样，式中：

A_a——吸收损耗或衰减项，dB；

R_a——反射损耗项，dB；

B_a——多次反射修正项，dB；

K_1——反映上述c)因素影响的近似估算项，dB；

K_2——反映上述d)因素影响的近似估算项，dB；

K_3——反映上述e)因素影响的近似估算项，dB。

下面给出单层金属丝编织物或屏蔽网的屏蔽效能的详细表达式。

孔眼的衰减A_a由式(168)和式(169)给出：

矩形孔眼

$$A_a=27.3(D/w) \quad \cdots\cdots(168)$$

圆形孔眼

$$A_a = 32(D/d) \quad \cdots\cdots (169)$$

式中：

D ——孔眼的深度，cm；

w ——矩形孔眼的宽度(垂直于电场矢量方向的测量值)，cm；

d ——圆形孔眼的直径，cm。

孔眼反射损耗 R_a 由式(170)给出：

$$R_a = 20\lg\left|\frac{(1+K)^2}{4K}\right| \quad \cdots\cdots (170)$$

孔眼的多次反射修正项(当 A_a 大于 10dB 时可忽略) B_a 由式(171)给出：

$$B_a = 20\lg\left|1-\frac{(K-1)^2}{(K+1)^2}\times 10^{-A_a/10}\right| \quad \cdots\cdots (171)$$

式中：

K ——孔眼的特性阻抗与入射波阻抗之比值；

r ——信号源到屏蔽层的距离，cm；

j ——$\sqrt{-1}$；

f ——频率，MHz；

λ ——波长，m。

在矩形孔眼、磁场情况下，K 由式(172)给出：

$$K = w/\pi r \quad \cdots\cdots (172)$$

在圆形孔眼、磁场情况下，K 由式(173)给出：

$$K = d/3.682r \quad \cdots\cdots (173)$$

在矩形孔眼、电场情况下，K 由式(174)给出：

$$K = -4\pi wr/\lambda^2 \times 10^{-4} \quad \cdots\cdots (174)$$

在圆形孔眼、电场情况下，K 由式(175)给出：

$$K = -1.086\pi^2 dr/\lambda^2 \times 10^{-4} \quad \cdots\cdots (175)$$

在矩形孔眼、辐射场情况下，K 由式(176)给出：

$$K = jfw \times 6.69 \times 10^{-4} \quad \cdots\cdots (176)$$

在圆形孔眼、辐射场情况下，K 由式(177)给出：

$$K = jfd \times 5.79 \times 10^{-4} \quad \cdots\cdots (177)$$

单位面积上孔数修正项 K_1(适用于试验天线至屏蔽体的距离远大于屏蔽体上的孔洞间距)由式(178)给出：

$$K_1 = 10\lg\left(\frac{1}{nS}\right) \quad \cdots\cdots (178)$$

式中：

n ——每平方厘米的孔洞数；

S——每个孔洞的面积，cm^2。

低频时导体的趋肤深度修正项 K_2(dB)由式(179)给出：

$$K_2 = -20\lg[1+35/(d/\delta)^{2.3}] \quad \cdots\cdots (179)$$

式中：

d——导线直径，cm；

δ——趋肤深度，cm。

$$\delta = 6.61/\sqrt{f} \quad \cdots\cdots (180)$$

式中：

f——频率，Hz。

薄板邻近孔间的耦合修正项 K_3：

$$K_3 = 20\lg\frac{1}{\tanh(A_a/8.686)} \quad \cdots\cdots (181)$$

举例：

有一张 22 目、线径 0.038cm 的铜网，离工作频率为 1MHz 的环形源 4.45cm，主要是受磁场的作用，试确定该铜网的屏蔽效能。这种 22 目的铜网相邻导线中心间距为 0.115cm，孔的宽度是相对导线中心间距减去导线直径。假定孔眼深度为导线直径，由式(168)可得孔眼的衰减如式(182)所示：

$$A_a = 27.3D/w = 27.3\times 0.038/(0.115-0.038) = 13.5 \quad \cdots\cdots (182)$$

矩形孔眼对磁场的波阻抗比值由式(183)给出：

$$K = w/\pi r = (0.115-0.038)/(3.142\times 4.45) = 0.0055 \quad \cdots\cdots (183)$$

反射项由式(184)给出：

$$R_a = 20\lg\left|\frac{(1+K)^2}{4K}\right| = 33.3 \quad \cdots\cdots (184)$$

多次反射修正项由式(185)给出：

$$B_a = 20\lg\left|1-\frac{(K-1)^2}{(K+1)^2}\times 10^{-A_a/10}\right| = -0.4 \quad \cdots\cdots (185)$$

孔眼数的修正项由式(186)给出：

$$K_1 = 10\lg\left(\frac{1}{nS}\right) = 3.5\text{dB} \quad \cdots\cdots (186)$$

趋肤深度修正项由式(187)给出：

$$K_2 = -20\lg[1+35/(d/\delta)^{2.3}] \quad \cdots\cdots (187)$$

其中，由式(188)和式(189)可得：

$$\delta = 6.61\times 10^{-3} = 0.00661\text{cm} \quad \cdots\cdots (188)$$

$$K_2 = -20\lg[1+35/(0.038/0.00661)^{2.3}] = -4.2 \quad \cdots\cdots (189)$$

最后，孔间耦合修正项由式(190)给出：

$$K_3 = 20\lg\left[\frac{1}{\tanh(A_a/8.686)}\right] = 0.8 \quad \cdots\cdots (190)$$

至此，网的屏蔽效能 SE 就可由上面 6 个系数相加得出，如式(191)所示：

$$SE = 13.5 + 33.3 - 0.4 + 3.5 - 4.2 + 0.8 = 46.5 \quad \cdots\cdots (191)$$

图 126 给出了离环形天线为 4.45cm 的几种类型的铜网屏蔽效能的计算值和测量值[40]。典型的非实心薄板屏蔽效能的测试值列在表 39[39]和表 40[35]中。这两张表提供了几种屏蔽材料(包括网、穿孔薄板和峰窝状通风窗)对低阻抗、高阻抗和平面波场的屏蔽效能。图 127 和图 128 给出了由 AMPB－65 材料制成的穿孔薄板的屏蔽效能与孔洞尺寸及孔洞间距的关系[38]。表 41 列出了 22 目，线径 0.38mm 的铜屏蔽网在若干频率上对磁场和平面波屏蔽效能的计算值和测量值[40]。可以看出，对磁场而言，屏蔽效能是随着频率的增加而增加的，对平面波则随着频率的增加而减小，而对电场基本上与频率无关。

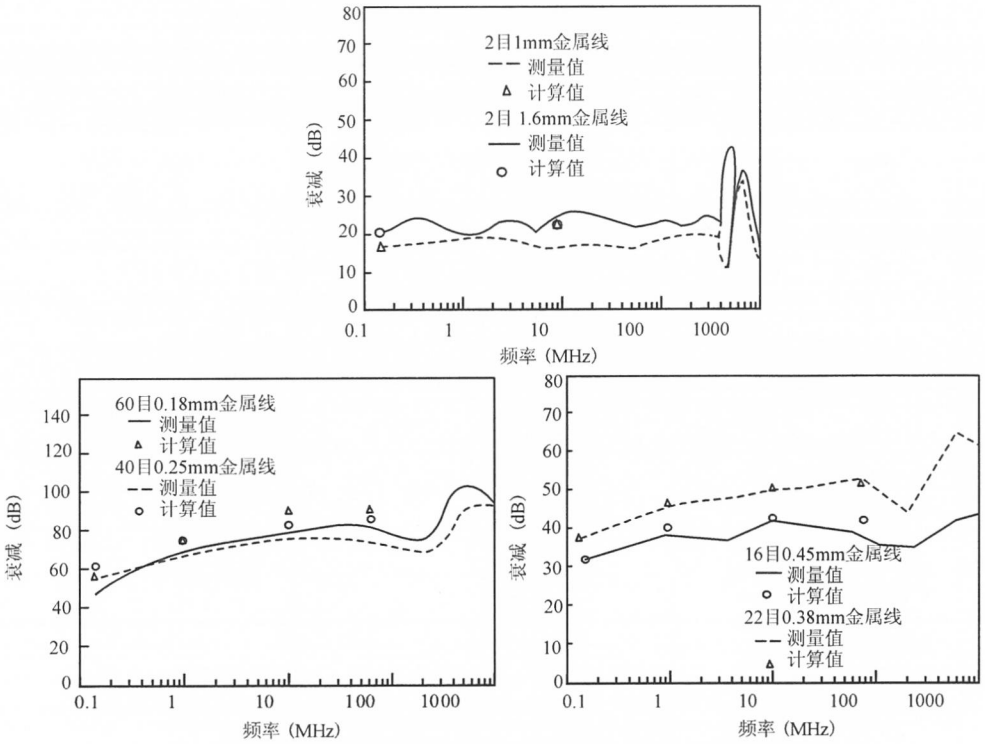


图 126　铜屏蔽网对低阻抗场屏蔽效能的测量值和计算值

表 39　非实心屏蔽材料对低阻抗场和平面波场的屏蔽效能

入射波	型式		材料	厚度	标称屏蔽效能 dB					
	类型	规格		mm	0.1kHz	1kHz	10kHz	85kHz	1MHz	10MHz
低阻抗场	屏蔽金属网	2 层间隔 2.54cm	铜(氧化处理)	–	2	6	18	–	–	–
		22 目	铜	–	–	–	–	31	43	43
		16 目	青铜	–	–	–	–	18	–	–
		4 目	镀锌钢丝	–	–	–	–	10	17	21

表 39(续)

入射波	型式		材料	厚度	标称屏蔽效能 dB					
	类型	规格		mm	0.1kHz	1kHz	10kHz	85kHz	1MHz	10MHz
平面波场	穿孔薄板	Φ1.1mm 35 孔/cm²	铝	0.5	3040MHz			9380MHz		
					60			62		
	屏蔽金属网	16 目	铝	直径 0.33	34			36		
		22 目	铜	直径 0.38	200kHz		1MHz	5MHz		100MHz
					118		106	100		80

表 40　非实心屏蔽材料对高阻抗场的屏蔽效能

型式		材料	厚度 mm	标称屏蔽效能 dB (14kHz～1000MHz)	开孔率 %	气流静压 Pa	
类别	规格					流量 6m³/min	流量 12m³/min
蜂窝状通风窗	6mm 孔眼 25mm 深	铝	0.08	＞90	－	15	65
视屏屏蔽网	0.23mm 孔眼 0.71mm 中心距	95%铜 5%镍	0.18	＞90	12	＞500	－
					50	50	100
		100%镍	0.08	＞90	50	50	125
穿孔金属板	孔径 3.2mm 中心距 5mm	钢	1.5	58	32	67	＞150
	孔径 6.4mm 中心距 8mm	铝	1.5	48	46	－	－
	孔径 11mm 中心距 16mm	铝	1.0	35	45	－	－
金属网	16 目	铝	0.5(线径)	55	36	－	－
	22 目	铜	0.5 (线径)	65(14kHz～60MHz)	－	－	－
	12 目			50	50	－	－
	16 目	青铜		45(14kHz～60MHz)	－	－	－
	10 目	蒙乃尔合金	0.46 (线径)	40	－	－	－
	4 目	镀锌钢	0.76 (线径)	35 28(14kHz～40MHz)	76	－	－
	2 目			24	88	－	－

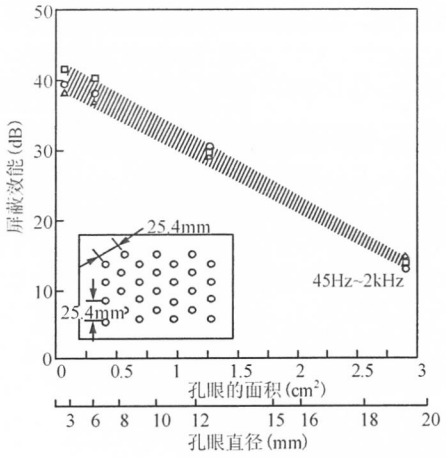


图 127　AMPB－65 材料的穿孔薄金属板屏蔽效能与孔洞尺寸的关系

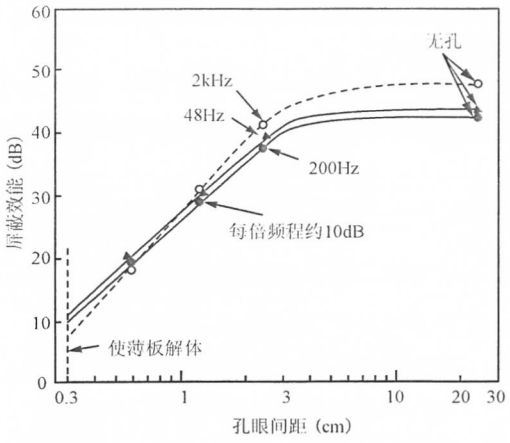


图 128　AMPB－65 材料的穿孔金属板屏蔽效能与孔洞间距的关系

表 41　22 目，0.38mm 铜屏蔽网屏蔽效能测量值与计算值之比较

试验类型	频率 MHz	屏蔽效能实测值 dB	屏蔽效能计算值 dB
磁场 r=4.5cm	0.085	31	29
	1.000	43	46
	10.000	43	49
平面波	0.200	118	124
	1.000	106	110
	5.000	100	95
	100.000	80	70

屏蔽网应采用单层或双层的铜网或黄铜网制成，其导线直径为 0.64mm～1.3mm，孔径不得大于 1.6mm。不应使用少于 18 目的金属网，金属网线直径至少应为 0.64mm。如果要求衰减的标称值大于 50dB，则栅网孔眼的尺寸应不大于用 0.38mm 铜线制成的 22 目铜网的孔眼。金属网对电磁波的衰减作用比实心金属屏蔽所提供的衰减作用要小得多。金属网的屏蔽作用主要依靠反射。测试表明：当金属网的开孔率为 50%，而且每波长内有 60 或更多股金属线时，它所引起的反射损耗非常接近于同种材料实心薄板的反射损耗。

屏蔽网结构应采用熔接工艺使各线股交叉点构成永久性结合。这种电气接触是耐久的，屏蔽效能不会因氧化而降低。这种结构的屏蔽网对低频电场(高阻抗场)的屏蔽非常有效，因为这时损耗主要是由反射引起的。屏蔽网可利用窗孔周围的连接边条进行安装。

11.5　屏蔽体不连续(孔眼)的影响

11.5.1　概述

理想的屏蔽壳体应当是一个没有开口或不连续性缺陷的无缝结构。然而任何实际的屏蔽壳体都应有人员、电源线、控制电缆或通风管道等的出入口。为了使不连续区域的引入不致明显降低屏蔽壳体的屏蔽效能，不连续区域的设计和制作就成为非常关键的问题。大多数满足机械性能要求的理想金属屏蔽体在 1MHz 以上时能提供足够的屏蔽，在 1MHz 以上，电磁干扰的泄漏主要由屏蔽的不连续性引起的。电磁干扰泄漏(从不连续处泄漏的电磁能量)主要取决于：开孔的最大长度(不是面积)、波阻抗、电磁波的波长。

这里取开孔的最大长度而不取宽度是十分重要的，因为凡是电流“迂回”最长的地方电压值也最大。

最大电压出现在缝隙的中部，并且随着缝隙长度的增加而增加。宽度对“迂回”长度几乎不起作用，因而对电压影响很小。

波长支配着“隙缝天线”的辐射量。如果缝隙长度刚巧是$\lambda/4$或更长，它就是一个非常有效的辐射器；如果隙缝长度小于$\lambda/100$，则是一个效率相当低的辐射器。因此，如果缝隙的宽度虽然仅为0.02mm～0.1mm，但长度有$\lambda/100$或更长时，它就能导致大量泄漏。图129给出了金属屏蔽体中0cm～15cm的典型缝隙，其长度为λ和$\lambda/100$时与频率的对应关系[41]。频率和缝隙长度组成的坐标落在$\lambda/100$线的右侧时，势必会造成泄漏。该图还说明为什么高于100MHz以后，即使屏蔽体中不连续处的缝隙非常窄，但只要其长度达数厘米时，就会急剧地降低屏蔽体的屏蔽性能。

常见的不连续型式包括：

a) 两个紧密接触的金属表面接缝(如铆合在一起的两块金属薄板间的接缝)；

b) 加有金属衬垫的金属表面之间的接缝或孔隙；

c) 通风孔或导线、电缆、水管、表头面板、以及照明灯或胶片等的出入口。

11.5.2 无衬垫接缝

外壳或舱室壁板的接缝或开口只要连接恰当，就可对经过该接缝的射频电流提供一个低阻抗通道。为了要保持良好的屏蔽特性，屏蔽壳体内金属件的永久性配接表面应采用熔焊、铜焊、软钎焊、砧接或其他金属流动工艺进行连接。为了保证正确有效地实施搭接，应遵循下列要点：

a) 在搭接之前所有配接表面应予以清洁处理。

b) 在构成固定搭接之前，待搭接区域内比待搭接金属导电性差的所有防护涂层应彻底清除。

c) 当应用临时性保护涂层时，所选保护涂层应在搭接之前能方便地从配接表面清除。鉴于裸露金属间的配接容易获得满意的连接，所以在搭接工艺和表面涂覆之间可能发生矛盾。从屏蔽效能观点看，在需要综合考虑搭接效能的地方，舍去表面涂覆工艺是可取的。

d) 某些防护性的金属镀层，如镉、锡或银等在一般情况下不需要去除。同样，用于铝合金的低电阻耐腐蚀表面防护磷酸盐处理层也可以保留。其余大多数化学处理层(如阳极氧化层)是不导电的，均应去除。上述表面防护层所造成的屏蔽效能变化数据见图130[37]。

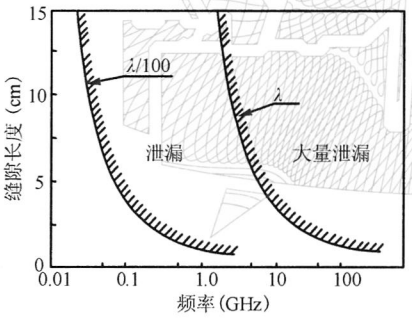


图129 缝隙辐射(泄漏)

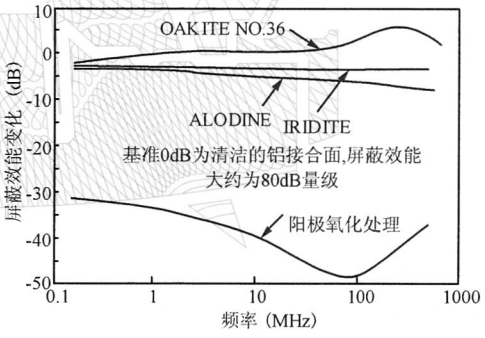


图130 铝表面防护层对屏蔽效能的影响

e) 配接表面在除去防护层之后，应立即进行搭接处理，以免氧化。从屏蔽的角度看，搭接处理后重新进行涂覆是可取的。

f) 当应把两种不同的金属搭接时，应选择电化序列中彼此接近的金属，以减少腐蚀。

g) 可以用软钎焊填充搭接中的缝隙，但不能靠软钎焊提供连接的强度。

h) 符合要求的连接大多需要通过连续的对焊或搭焊达到。由于点焊会引起翘曲，而且焊点间隔内可能会出现腐蚀，所以不宜采用。铆接和销钉连接质量的下降对磨蚀很敏感，所以这两种连接方式更不易满足要求。

i) 对交叠接缝再加上钎焊或点焊就可实现相当有效的连接。此外，还可以使用其他类型的压接接缝，但要保持压紧力均匀，并持续保持不变。

对于应实现良好的临时性连接的场合，需采用螺栓、螺钉或一些夹持式和滑销式的紧固件。上述关于配接表面的清洁和密合接触方法，以及减小配接表面的电解(阴极)作用的一般要求，同样也适用于临时性连接。为确保搭接点的接触压力在整个使用周期内始终保持不变，应使用可靠的锁紧装置。

当应采用与待搭接表面本身不同的材料制造螺栓、螺母、螺钉和垫圈时，其腐蚀电位应比待搭接表面材料本身的腐蚀电位更趋活泼，这样才能使任一材料的离子迁移只腐蚀这些可更换的紧固零件。

各种临时性连接(永久性的点焊连接也一样)的关键因素是各紧固件或焊点之间的间距。图 131 提供了 200MHz 时铝板在 1.27cm 宽的交叠接缝上屏蔽效能与螺钉间距的关系。图上在间距为 2.54cm 处的屏蔽效能，要比在同样结构中加入 1.27cm 宽蒙乃尔合金网状衬垫后的屏蔽效能差 12dB 左右。当间距为 25.4cm 时，与带有同样衬垫的情况相比，屏蔽效能将差 30dB 左右。导电衬垫的使用方法及其他有关问题见 11.5.3。

与上面叙述类似的技术还可应用于磁性材料的接缝中。永久性的接缝可以在氩或氦气保护下用电弧焊进行连续或点式的对焊及搭焊，而且应分别对材料作最后的热处理。临时性的接缝通常用螺栓或螺钉固定在一起。

图 132 和图 133 分别表示 AMPB－65 材料在不同频率时屏蔽效能与螺钉间距和叠合宽度的关系[38]。

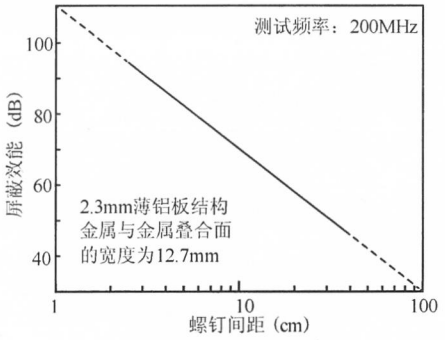


图 131　螺钉间距对屏蔽效能的影响

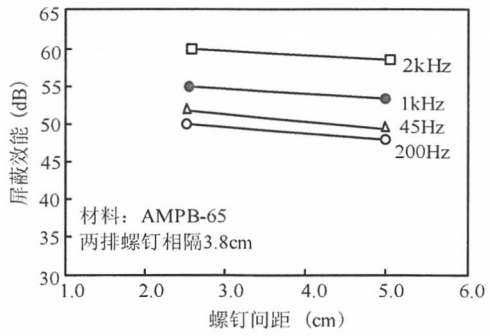


图 132　叠合接缝屏蔽效能与螺钉间距的关系

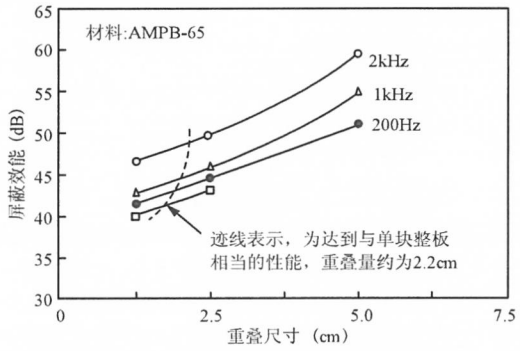


图 133　叠合接缝屏蔽效能与重叠尺寸的关系

11.5.3　有衬垫的接缝

对于临时性连接的屏蔽，在待接合的屏蔽表面之间填放弹性金属衬垫，可使原来金属配接面的屏蔽性能获得可观的改善。然而金属－金属配接表面的清洁处理及可靠的压力接触仍是必不可少的。

对射频衬垫材料的要求除了应与配接表面相容，有耐腐蚀性和适当的电气特性外，还应具有弹性(这对预期要反复压缩和舒展的衬垫特别重要)和机械耐磨性，并能够形成所需要的形状。鉴于上述理由，一般优先选用的材料是蒙乃尔合金和镀银黄铜。只是在两个铝的配接表面之间才采用铝衬垫。亦可使用铍铜合金的梳形簧片，如果需要还可镀上各种适当的镀层。如果关心的是磁屏蔽效能，则可以采用 μ－合金和坡莫合金。

用橡胶和氯丁橡胶制成的衬垫可以兼顾气密和导电密封，即除了维持气压差之外还能对射频干扰起抑制作用。还可以用海棉状硅制成高温用衬垫。衬垫既可以用非导电胶，也可用导电的压敏胶制造。表 42 概述了几种衬垫的特性。图 134 给出了一些衬垫的典型安装方法。编织金属丝网的结构见图 135。

衬垫需要的厚度取决于待密封接合面的平整度、衬垫本身的可压缩性、以及外加的压力。对衬垫形状的要求取决于具体的应用条件，不但与有效空间及衬垫在该空间的安装方法有关，而且还与影响衬垫厚度的上述各种参数有关。衬垫可以借助侧壁摩擦、钎焊、胶合安装就位，也可以安置在沟槽或台肩上。钎焊操作时应十分小心，以免焊料渗入衬垫而破坏其弹性。用于射频屏蔽密封的衬垫表面不应采用胶合剂(尤其是不导电胶合剂)，应采用辅助薄片，推荐压力为 140kPa 左右。

采用导电衬垫时，设计的主要目的是要求衬垫的弹性足以使不规则表面间构成连续的接触，以保证其所在结合面间的低阻抗特性。各种型式的导电衬垫可采用的材料有：蒙乃尔合金、镍铜合金、镀银黄铜及铝等。这些材料的适用场合列于表 43。当这些导电衬垫用在与铝或镁构件相接触的场合时，需要对金属表面进行专门的处理。

表 42　导电衬垫材料的特性

材料	主要优点	主要缺点
编织金属丝网	为弹性最大的金属衬垫(法兰所需要的压力小)，接触点最多，可在各种厚度和弹性变形条件下使用，还可与氯丁橡胶和硅橡胶配合使用	不宜在薄片状态下应用(难以制成复杂的形状)
带戳孔的黄铜或铍铜合金	最容易刺穿防护层膜	实际没有弹性，而且一般不能重复使用
定向金属丝橡胶衬垫	对射频和流体起组合密封作用，如果金属线末端是锐利的，则能有效地戳破防护层	在同样效果的衬垫中，它的尺寸可能较大
用氯丁橡胶浸渍过的铝屏蔽网	导电性和流体的密封组合，是最薄的衬垫，可以切割成复杂的形状	弹性非常差(法兰所需要的压力高)
软金属	在小尺寸情况下，价格最低	受冷变形，弹性差
裹有金属的橡胶	利用橡胶弹性的优点	金属箔片会撕裂或错位，屏蔽效能一般较低，射频性能差
导电橡胶	导电性和流体密封的组合	射频性能可能较差
指形簧片	最适合于滑动接触	易损坏，仅少数点接触

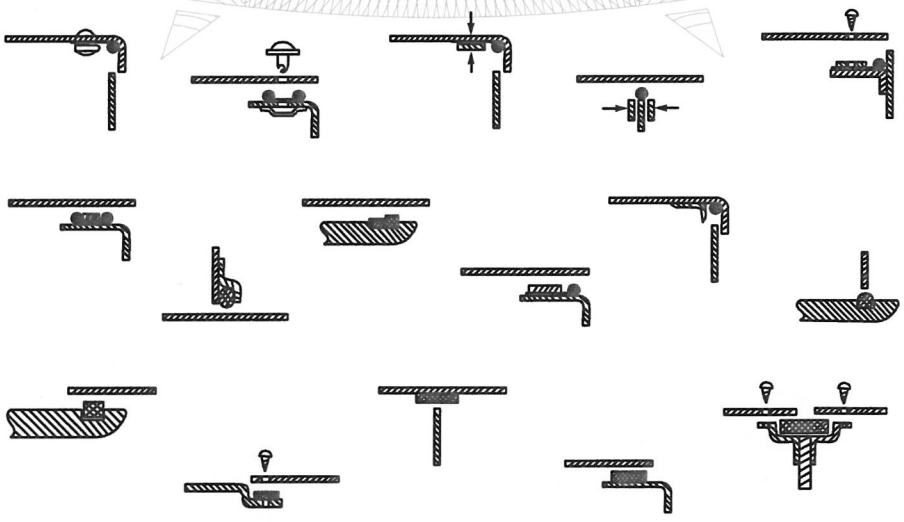


图 134　射频衬垫的典型安装方法

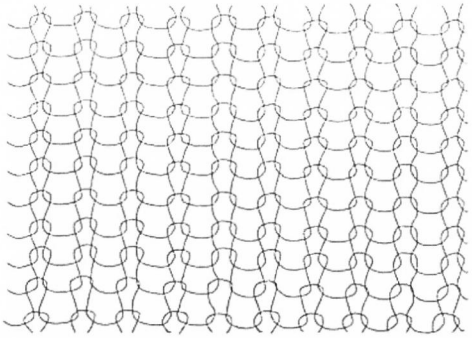


图 135　编织金属丝网的放大图

表 43　根据机械适用性选择射频衬垫类型的指南

适用场合		丝网型衬垫				挤压型衬垫	成型射频衬垫	铍铜簧片	组合型衬垫	橡胶外包金属网	导电橡胶	指形簧片	螺旋管	
		○	□	○	○○								○	○—
固定方法	靠侧壁紧配合卡在缝或槽内	1	1	3	3	3	1	3	2	1	1	3	3	3
	用不导电胶的点式粘合	2	1	2	2	3	1	3	2	1	1	3	2	1
	除射频衬垫的部分外，用不导电的胶粘合	3	3	1	1	3	3	3	1	3	3	3	3	1
	用导电胶粘合射频衬垫部分	2	1	2	2	3	1	3	2	1	1	3	2	1
	螺钉、点焊或铆接	3	3	1	1	1	3	2	3	3	3	1	3	1
	低温钎焊	3	2	2	2	1	2	1	1	3	1	3	3	1
	用穿过螺栓孔的螺栓固定	3	3	2	2	1	2	1	1	3	1	3	3	1
	压敏粘合剂敷层	3	3	3	3	3	3	3	1	3	3	3	3	1
衬垫的其他功能	冷却空气密封	3	3	3	3	1	3	3	1	1	1	3	3	1
	防雨密封	3	3	3	3	1	3	3	1	1	1	3	3	1
	压力密封	3	3	3	3	3	3	3	1	3	1	3	3	1
适用的压强	0kPa～35.0kPa	1	1	1	1	1	1	2	1	1	1	1	1	1
	35.0kPa～350.0kPa	1/2	1	1/2	1/2	1	1	1	1	1/2	1	2	1	1/2
	350.0kPa 以上	2	2	2	2	1	2	1	2	2	1	3	1	2
结合面总的不平度	小于 0.05mm	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	0.05mm～0.75mm	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	1	1	1
	0.75mm～1.50mm	1	1	1	1	1	1	2/3	1	1	2/3	1	1	1
	超过 1.50mm	1	1/2	1	1	2	1/2	3	2	1	3	1	1	1

表 43(续)

适用场合		丝网型衬垫				挤压型衬垫	成型射频衬垫	铍铜簧片	组合型衬垫	橡胶外包裹金属网	导电橡胶	指形簧片	螺旋管	
		○	□	○—	○○								○	○—
可用间隙的宽度	小于 1.50mm	1	1	3	3	3	2	3	3	3	1	3	1	1
	1.50mm～12.70mm	1	1	1	2/3	2	1	2	2	1	1	2	1	1
	12.70mm～38.10mm	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
可用间隙的厚度	小于 0.75mm	3	3	3	3	2	3	2	3	3	2	2	3	3
	0.75mm～1.50mm	1	1	2	3	1	1	1	2	2	1	1	1	3
	1.50mm～2.30mm	1	1	1	2	1	1	1	2	2	1	1	1	1
	超过 2.30mm	1	1	1	1	3	1	3	1	1	1	1	1	1
接缝的类型	仅有压缩	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	兼有压缩和滑动	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	2	2
	仅有滑动	2	2	2	2	3	2	3	3	2	3	1	2	2
		表中数字：1 适用 2 可考虑 3 不适用												

注 1：用不导电胶的点式粘合，如果这种粘合方式的粘合点直径仅为 3.0mm～6.0mm，间隔为 25.0mm～50.0mm，则不导电胶也可用于射频衬垫之下。

注 2：不导电胶如果是用在组合条、衬垫的附着物或橡胶部分之下，应采取连续粘合，但不能粘在射频衬垫下面。

注 3：导电胶可以在射频衬垫之下进行连续式粘合。

注 4：借助覆盖在附带鳍片上的衬条固定。

注 5：假定采用的挤压型衬垫是橡胶外包裹金属网的一种变形材料。

注 6：仅评价其机械适用性。可进一步提高压强，以满足屏蔽效能的要求。

注 7：评价的前提是接缝的间隙可以容纳足够厚的衬垫。

注 8：此宽度包括固定材料所应的间隙。

注 9：各项评价并非是按导电橡胶的电气适用性为依据，因为它一般比所列其他材料的电气性能差。

11.5.4 贯通孔

11.5.4.1 概述

设计中不可避免的孔洞(例如通风孔和电路调整孔)会构成屏蔽的不连续性。补偿这种不连续性的有效方法之一是采用圆形和矩形的截止波导。

11.5.4.2 截止波导式贯通孔

一个设计正确的截止波导式开口犹如一个高通滤波器。截止频率是波导横截面尺寸的函数，对 TE 主模截止频率由式(192)和式(193)给出：

圆波导 $$f_c = 17.6/d \quad \cdots\cdots (192)$$

矩形波导 $$f_c = 15/b \quad \cdots\cdots (193)$$

式中：

f_c ——主模的截止频率，GHz；

d ——圆形波导内壁直径，cm；

b ——矩形波导的宽边内壁尺寸，cm。

蜂窝状通风窗中的六角形波导，截止频率可用式(192)计算，但 d 为对角线尺寸。

对远小于截止频率的任一频率 f_a 即（$f_a<0.1\,f_c$），每厘米的衰减量 A(dB/cm)近似值由式(194)和式(195)给出：

圆波导　　$A\approx 32/d$ ……(194)

矩形波导　　$A\approx 27.3/b$ ……(195)

以上关系式满足如下条件才是适用的：首先应是空气波导，其次要求波导长度与宽度之比或长度与直径之比等于或大于3。

在许多场合，屏蔽网引入的空气阻力太大，并且可能提供的屏蔽效能不够。这种情况下，在孔口上可覆盖专门设计的带孔通风板(如蜂窝状板)，这种通风板开孔的依据就是截止波导原理。蜂窝状通风孔板的屏蔽效能是波导管口径和长度的函数，而且还与通风板上所含的波导数量有关。表44列出了钢结构蜂窝状板的屏蔽效能[42]，该蜂窝状板上开有0.32cm的六角形孔，孔的长度(深度)1.27cm。

表44　钢结构六角形蜂窝状通风板的屏蔽效能(孔径为0.32cm，孔长为1.27cm)

频率 MHz	屏蔽效能 dB
0.1	45
50.0	51
100.0	57
500.0	56
2200.0	47

蜂窝状通风孔板代替屏蔽网的优点：

a)　在规定的频率范围内，能比屏蔽网提供更大的衰减；

b)　在相同孔径条件下，能容许通过更多的空气，而且压降较小；

c)　不像屏蔽网那样容易损坏，因而更为可靠；

d)　暴露在空气中氧化后，性能下降较少。

所有非实心屏蔽材料，诸如穿孔金属板、细密的铜屏蔽网以及蜂窝状金属板都会对气流造成阻碍。其中蜂窝状金属板最好，因为在整个微波波段它对电场都能产生非常高的衰减，而气流压降可忽略不计。然而与金属屏蔽网或穿孔金属板相比较，蜂窝状板的缺点是占用较大的体积，并且价格较高。另外蜂窝状板的装配往往比较困难。因为它要求安装得贴合无缝。尽管蜂窝状板在10MHz以下的衰减可达100dB以上，但有时从结构设计考虑，还是采用屏蔽网及穿孔金属板比较简便。

当控制轴应延伸到屏蔽壳体之外时，波导衰减器也有可观的衰减量。用绝缘控制轴穿过波导管能实现控制，而辐射发射也小。在应采用金属控制轴的地方，轴应通过紧配合的衬套或金属指形簧片接地到壳体。

保险丝座、耳机塞孔、面板上暂时不用的连接器及其他插座孔都应配备金属罩，这些金属罩可以保证电气上的整体连续性，并维持机箱的完整性。

在屏蔽壳体上应钻有孔洞的地方，也可以考虑采用波导衰减器的办法处理。如果金属板厚度足以构成一个足够长的“管道”，就等于形成了一个波导衰减器。例如金属壁厚为0.5cm时，就容许采用0.16cm的孔而不致有太多的泄漏。在应把非常强的干扰源限制在一定范围的场合，截止波导技术有着广泛的应用前景。

11.5.4.3　屏蔽网和导电玻璃

操作人员需要观察的指示灯、表头面板、纸带图表记录器、示波器或其他类似装置，往往应给予射频屏蔽。可供选择的方案包括：

a)　使用波导衰减器；

b)　使用屏蔽网；

c） 在重要组件的背后加以屏蔽，并对进入组件的所有导线进行滤波；

d） 使用导电玻璃。

波导衰减器是处理照明灯射频屏蔽的一种切实手段。这个技术的优点是不会造成光线的传输损耗。然而截止波导式衰减器对于大多数表头孔或大孔洞并不适用，因为它对空间的要求是无法回避的。

在表头的表面及其他大孔洞上覆盖屏蔽网以满足屏蔽要求已是常用的方法。典型的屏蔽网会使光线损失 15%～20%以上，从而导致表头读数困难。如被屏蔽的装置本身带有刻度(例如示波管的方格)，屏蔽网可能扰乱图像的分格。然而这些潜在缺陷可由其低廉的成本和良好的屏蔽效能所弥补。

镀有导电材料(例如银或氧化铟)的玻璃能为观察表面提供屏蔽，但光线的透射率会有所损失。在市场上很多玻璃制造商销售导电玻璃。

图 136 给出了镀银玻璃(表面电阻率 50Ω/□和 100Ω/□)对弧光放电的屏蔽效能数据[43]。图 137 给出了导电玻璃对 0.25MHz～350MHz 频率范围内的平面波所具有的屏蔽效能与表面电阻率的关系。这类玻璃的光线透射特性与表面电阻率的关系如图 138 所示[39]。为了有效地屏蔽，导电玻璃的四周应与导电表面保持良好的接触。

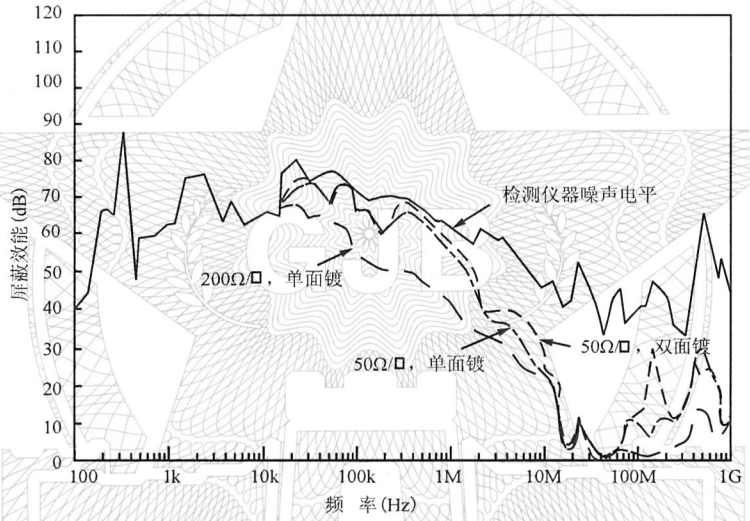


图 136 导电玻璃对高阻抗波的屏蔽效能

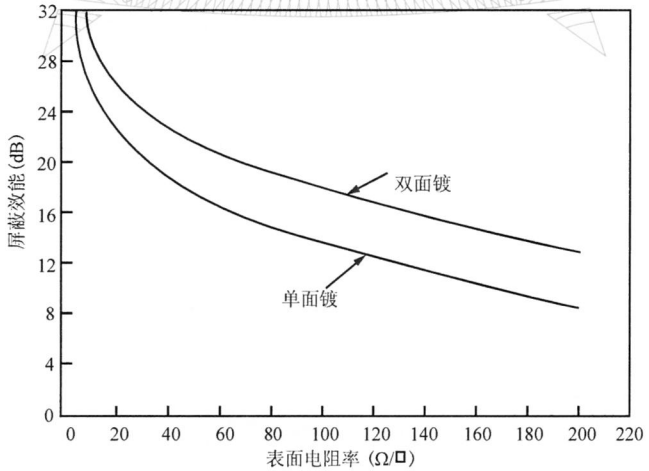


图 137 导电玻璃对平面波的屏蔽效能

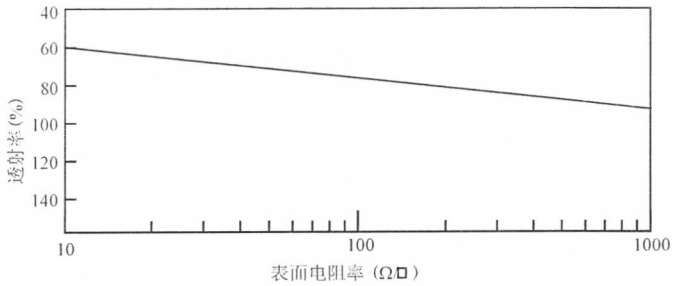


图 138　导电玻璃光学透射率与表面电阻率的关系

11.6　屏蔽材料的选择

选择屏蔽材料的依据是它要能泄放感应电荷和承载足够大的反向感应电流，以便抵消干扰场的影响。对材料本身所要考虑的特性是它的相对电导率σ_r和相对磁导率μ_r。屏蔽体的厚度和需要衰减信号的频率也是需要考虑的重要因素。

屏蔽材料的选择应遵循下列基本原则：

a)　在低频时，只有磁性材料才能对磁场起明显的屏蔽作用；

b)　对于既定的材料，磁场比电场需要更厚的屏蔽层；

c)　当频率较高时，对于同种材料，随着频率升高，所要求的屏蔽层厚度将减小；

d)　当频率足够高时，有色金属材料(如铜和铝)不论对电场还是磁场都将起相当大的屏蔽作用；

e)　对 50Hz～800Hz(即交流电源频率)的电场分量，用铁、铜、铝和黄铜等导电薄板料就能轻易地实现屏蔽。

至于具体设施，选择屏蔽材料的详细过程说明可参见 15.8.4。给分系统附加屏蔽体时应小心对待，例如，当某个电路中的 Q 值是关键因素时，若外加屏蔽体离该电路太近，就可能引起电路性能下降。因为这时屏蔽体的损耗会以有效电阻的形式出现在上述电路中，从而降低该电路的 Q 值。

11.7　常规建筑材料的使用

11.7.1　概述

从电磁屏蔽特性考虑，一般不选用常规建筑材料。普通结构材料提供屏蔽的一些实例已有报导。虽然这些数据是不完全的，但它已初步反映了由各种材料所建造的建筑物所能获得的屏蔽程度。

11.7.2　混凝土

图 139 表明，普通混凝土的屏蔽效能很低[44]。在混凝土中加入焦炭和其他形式的碳可大大提高其屏蔽性能。可以假定砖的特性类似于混凝土，在 1GHz～10GHz 时屏蔽效能大约可以到 30dB。混凝土－焦炭混合物在频率高于 20MHz 以后大约能提供 30dB 以上的屏蔽效能；到 300MHz 以上，可以提供的屏蔽效能大于 100dB。

11.7.3　钢筋

在混凝土中加入钢筋或金属丝网能对低频磁场提供有限的屏蔽。为了获得高的屏蔽效能，所有导体连接处和交叉点都应予以焊接，以便形成许多围绕待屏蔽空间的连续导电回路或通路。钢筋的屏蔽程度取决于下列参数：

a)　待屏蔽空间的形状和尺寸；

b)　钢筋的直径和间距(两钢筋的中心距)；

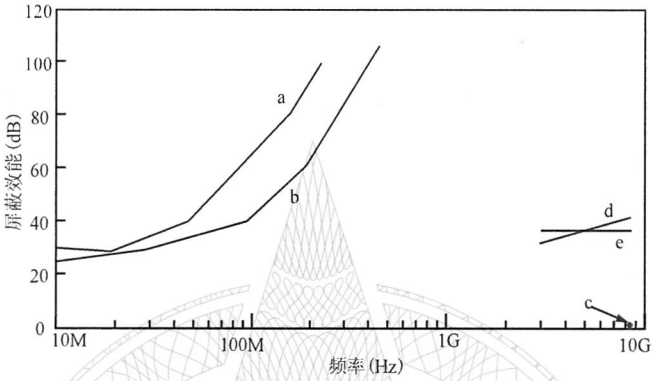
c)　钢筋材料的电磁特性(电导率和相对磁导率)；

d)　入射波的频率。

图 140 给出了一组封闭建筑对于干扰场的衰减曲线[45]。建筑物高 4.5m，钢筋直径 4.3cm，钢筋中心间隔 35.6cm，外界干扰约为 10kHz。建筑物的长宽比变化范围大于 5:1。图 140 所示房间的尺寸、钢筋的直径和间隔较为典型，它包括了工程中会遇到的大多数情况。图中所给出的衰减值是在房间中央得

出的。在靠近房间的边缘处屏蔽效能将降低。

把焊接式金属丝编织网嵌入房间或建筑物的墙壁内，如果这些编织网的各根金属线又连接起来构成一个包围待屏蔽区域周界的连续电环路，就能提供有效的屏蔽。在屏蔽网相交的每一接缝处，每根金属线都应与其对应的金属线进行熔焊或铜钎焊，或者用连续的带条将相交的编织网连接起来。在常规墙壁两侧分别装上焊接的金属丝编织网，可进一步提高其衰减。



[a] 用掺有焦炭的混凝土制成的新圆柱体，直径 15cm，长 1.8m。

[b] 同上，两个月后。

[c] 2.5cm 厚的混凝土板。

[d] 掺有碳的 2.5mm 厚的混凝土板。

[e] 以注有碳质乳胶的混凝土制成的砌块(40cm×20cm×20cm)。

图 139　几种建筑材料的屏蔽效能

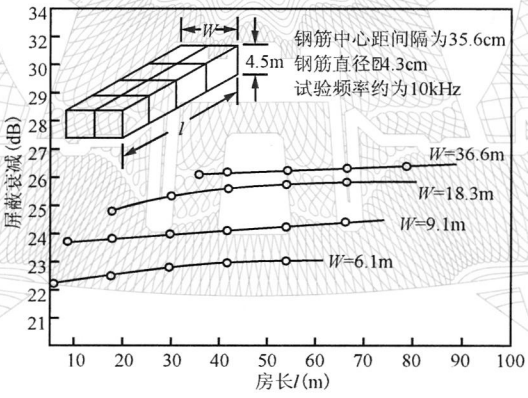


图 140　4.5m 高的单层钢筋建筑中心区域感应电压的衰减值

11.8　电缆和连接器的屏蔽

11.8.1　概述

需要电磁屏蔽的不仅是设备外壳，而且还包括连接各设备单元的许多电缆，因为干扰会通过互连电缆从一个电路或部位传送到其他的电路或部位。干扰可以由电缆辐射，反之外界干扰场也可通过耦合进入电缆内部。干扰一旦通过辐射或共阻抗电路元件送入电子或电气综合设备的电缆线路，它就能通过互连电缆传送到该综合设备的其他元件。在电缆走线或其他地方，当电缆紧靠在一起时，由于电缆间磁场交链的作用，可能发生电缆内或电缆间的串扰。

11.8.2　电缆屏蔽

电缆屏蔽层的主要特性参数是屏蔽层对电磁波的屏蔽衰减以及屏蔽层的表面转移阻抗 Z_t。如同其

他屏蔽一样，电缆对电磁波的屏蔽衰减是由于吸收和反射造成的，它取决于所用材料的形式和厚度，以及屏蔽层上孔眼的数量和尺寸等因素。另外，电缆屏蔽层最常用的连接方式是使屏蔽层本身能承载更大的电流。虽然干扰电流通常是沿着屏蔽层的外表面流通(趋肤效应)，但电场及由此产生的轴向电压梯度是沿着屏蔽层向内导体展开的(见图 141)。内导体与屏蔽层间每单位长度上的开路感应电压与屏蔽层中电流之比定义为表面转移阻抗 Z_t。

对电缆屏蔽衰减起制约作用的因素是金属的电导率、编织层内线股之间的接触电阻、编织的角度和类型、线股的尺寸、屏蔽层的覆盖率以及孔眼的尺寸等。可由这些参数计算出 Z_t。当电流沿电缆屏蔽层均匀分布时，得出 Z_t 后，就可根据电缆终端负载阻抗的数值预测该电缆的屏蔽衰减。典型情况下电缆长度是入射场频率的几个波长，电缆外层的电流分布将随长度而变，并且与电缆相对于入射波及周围电磁场的取向有关。鉴于电缆外层的电流分布实质上是无法预测的(除非特殊情况下)，因此通过 Z_t 来预测电缆屏蔽层屏蔽衰减的可能性是极其有限的。

对电缆进行屏蔽的方法包括下列几种：

a) 编织层；

b) 柔性导管；

c) 刚性导管；

d) 用高磁导率材料按螺旋形缠绕构成屏蔽层。

可买到的屏蔽电缆的主要类型包括单芯屏蔽线、多芯屏蔽线、屏蔽双绞线对和同轴电缆。还可以买到单层屏蔽和多层屏蔽电缆，它们的屏蔽层配置有多种形式，并且有各自的物理特性。表 45 给出了五类电缆屏蔽层的一般特性。

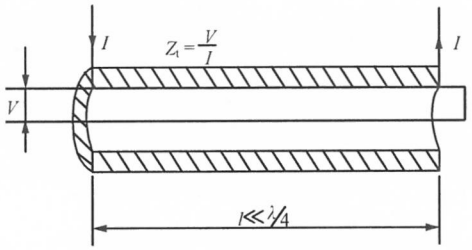


图 141　表面转移阻抗

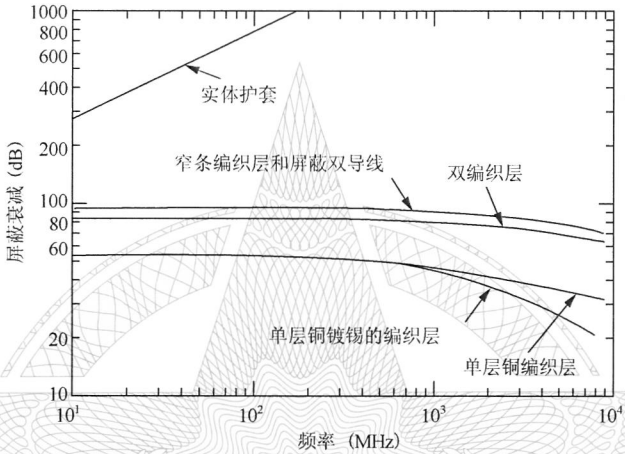
表 45　电缆屏蔽层的比较

特性	单层编织层[b]	多层编织层[b]	金属箔[c]	导管[c]	柔性导管
屏蔽衰减[a](音频)	好	好	优良	优良	好
屏蔽衰减[a](射频)	好	优良	优良	优良	差
标称覆盖率，%	60～95	95～97	100	100	90～97
疲劳寿命	好	好	中等	差	中等
抗拉强度	优良	优良	差	优良	中等

[a] 差，＜20dB；中等，20dB～40dB；好，40dB～60dB；优良，＞60dB。
[b] 对磁场的屏蔽性能差。
[c] 为了有效屏蔽磁场，应采用高磁导率材料。

凡不能采用实心材料制作屏蔽层时，就以编织层作为屏蔽层。其优点是制成的电缆不但便于卷叠，而且重量轻。然而应指出：编织材料对辐射场的屏蔽衰减一方面随着频率的增加而下降，另一方面又随着编织紧密度的增加而增加。单层和双层编织屏蔽电缆的屏蔽衰减与频率的关系见图 142[46]。

不管是刚性或柔性导管还是拉链式电缆套管，都可用来屏蔽系统的线缆，使其免受射频环境的影响。对射频而言，刚性导线管的屏蔽效能与具有同一厚度、同样材料的实心材料的屏蔽效能相同。拉链式铠装或柔性导管在低频时可以提供有效的屏蔽，但是在较高频率时，各个链接环之间的孔隙会呈现裂缝天线特性，从而严重地降低屏蔽效能。如果需要使用拉链式铠装导管时，管内所有的导线应分别进行屏蔽。导管屏蔽效能的下降，通常不是因为导线管材料本身的屏蔽性能不够，而是由于电缆屏蔽的不连续性引起的。这些不连续性往往是屏蔽层拼接不良或端接不当造成的。频率低于 1GHz 时，拉链式电缆封套可以提供 60dB 以上的屏蔽效能。



注：通过测量 0.3m 长电缆所辐射的相对功率电平可确定屏蔽衰减，单层编织护套的覆盖率等于 95%。

图 142　各种类型射频电缆的屏蔽衰减与频率的关系

当主要是为了屏蔽磁场时，屏蔽材料应具有高的磁导率。例如，铁或钢的导管比铝制导管能更好地屏蔽磁场。有时采用经退火处理的高磁导率金属带绕在电缆外面代替铁类导管。螺旋形交叉缠绕的多层铁镍合金、硅铁合金或低碳钢多层屏蔽电缆的效果较好。高磁导率和高电导率的组合带可以兼顾电场和磁场屏蔽。

电缆安装是否正确，对干扰抑制有很大影响。假若已经应用了正确的接地技术，则以下条件应作为使用信号电缆的指南：

a）选用电缆的依据是所需要的特性阻抗、信号容许的衰减量、电缆所处的环境及拟传输信号的特性。

b）在需要高质量屏蔽的场合，应采用以绝缘材料隔离的多层屏蔽电缆。对于双层屏蔽，两屏蔽层间应互相隔离，否则是无效的。

c）内含多线对的电缆，外屏蔽层不应用作信号回流的通路。

d）对于单独屏蔽的电缆，使用时应在它们的屏蔽层外加上绝缘套管或覆盖层。平衡信号电路应使用绞合线或具有公共屏蔽的对称同轴线。外面加有屏蔽层的同轴线通常称为三同轴电缆。那些除了公共屏蔽层之外各导线又有各自屏蔽层的多导体绞合线电缆，使用时应保持电缆内所有屏蔽层之间的互相绝缘。

e）在任何情况下，同轴电缆应以其特性阻抗进行端接。

f）载有高电平信号的同轴电缆不应与非屏蔽电缆或载有低电平信号的屏蔽电缆捆扎在一起。

g）应避免将几根芯线的屏蔽层用同一根导线通过连接器的一个插针接地，特别当屏蔽层到连接器与连接器到地的引线长度超过 2.5cm，或者此接地线涉及几个可能会相互影响的不同电路时，上述接地线就是一个共阻抗元件，通过这个阻抗形成的干扰电压会由一个电路转移到另一个电路。

为保持阻抗特性和屏蔽的完整性，应特别注意连接器。应采用一个屏蔽壳体来屏蔽连接器内的各插针，设计良好的连接器往往自身已带有包围其连接点的屏蔽外壳。多芯连接器的外壳应与屏蔽层连接。同轴线应端接在有屏蔽的插针上。同轴线采用“猪尾式”(将屏蔽层拧成一股线)的端接是不合适的，因为这种连接会产生射频泄漏。

屏蔽导线或同轴电缆与连接器连接不适当，将会出现严重的干扰问题。连接器正确的接地很重要。在连接器和设备外壳之间保持金属与金属的可靠接触，就能够实现真正的直接接地。当多根屏蔽线中有很多独立屏蔽层都应接地时，推荐采用环形接地技术。无屏蔽的裸露引线应尽可能地短，以减少各导体之间的耦合。当屏蔽电缆进入一个完全封闭的盒子，并在其内部接地时，则会引起干扰。安装射频屏蔽电缆的正确方式是把屏蔽护套一直延伸到连接器内部，并将屏蔽护套沿连接器壳体一周接地。

11.8.3 电缆端接方式及连接器

为保持屏蔽层的屏蔽效能，电缆屏蔽层端部应正确地连接。在一个其他方面都已充分屏蔽的系统内，沿着屏蔽层传导的射频电流将经由不正确的电缆端接耦合到系统的布线中。对暴露在大功率射频场内的电缆，其屏蔽层接地更不能疏忽。

正确的端接，应把屏蔽层周围一圈接地于一个低阻抗的参考系统上，从而使端接表面的任一点电位都达到最低。不推荐采用锡焊法端接屏蔽层，因为这样存在损坏导体绝缘层的风险[47]。为此提出了多种端接方法，其中包括采取压接措施。用含银的环氧树脂或其他合成导电材料进行屏蔽连接是不可取的，因为这种连接方法的机械强度达不到要求。

为了适应电源、信号控制、检测仪器、传感器，以及音频、视频、脉冲和射频等各种用途，已制成各种型式和规格的电缆连接器。连接器可制成具有特殊功能的型式，并满足气密、水密及不受气候影响的要求。已经生产的连接器类型有：直式、弯式、螺口式、卡口式、卡口螺纹式、屏蔽防护式、直插式及推入式等，表 46 给出了部分高频连接器的特性。

表 46　射频连接器应用概要

连接器型号	配用电缆	接口形式	额定电压 V	特性阻抗 Ω	频率范围 GHz
BNC	SYV－50－2－1，SYV－50－2－2 SYV－50－3，SDY－4，SYV－75－3	卡口	500	50 75	0～4
SMA	SYV－50－1，SYV－50－2－1	螺纹	150	50	0～12
TNC	SYV－50－2－2，SYV－50－3，SDY－4	螺纹	－	50	0～10
N	SYV－50－3，SYV－50－5 SYV－50－7－1，SYV－50－7－2 SYV－50－5－1，SYV－50－5－2	螺纹	1000	50 75	0～18
7/16 型	SYV－50－7－1，SYV－50－7－2 SYV－50－9，SYV－50－12 SYV－75－5－1，SYV－75－5－2	螺纹	1500	50	0～6
APC－7	SYV－50－3，SYV－50－5，SYV－50－5－2	螺纹	－	50	0～18
SMB	SYV－50－1，SFB－50－1	推入	－	50	0～6

图 143 给出了一种连接器类型，当一个屏蔽电缆组件包含各独立屏蔽线时应使用这种连接器。不推荐把独立屏蔽线的屏蔽层编成辫线后集中连接到同一个插针上的作法。应把各屏蔽层分别连接到为它们专门设置的同轴插针上，并保证配接壳体的屏蔽层在其插针接触之前先实现接触。

当需要保持一对连接器(即两个互连的连接器)屏蔽的完整性时，图 144 介绍了一种可取的方法，它是在一边连接器的内侧部分安装弹性触片，因而沿着配合部分的四周实现了可靠的接触。这些接触片要向前延伸，以便在连接器组件上的插针接触之前连接器的屏蔽外壳先配接，并在插针分离之后屏蔽外壳才断开。

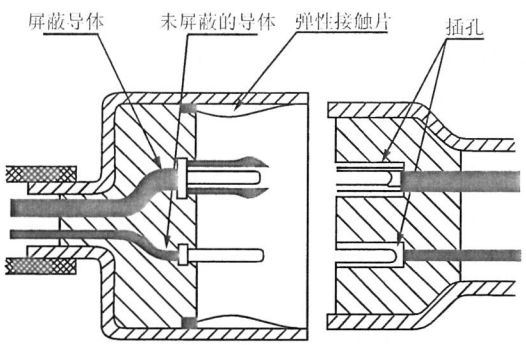


图 143　屏蔽壳体内的屏蔽连接器

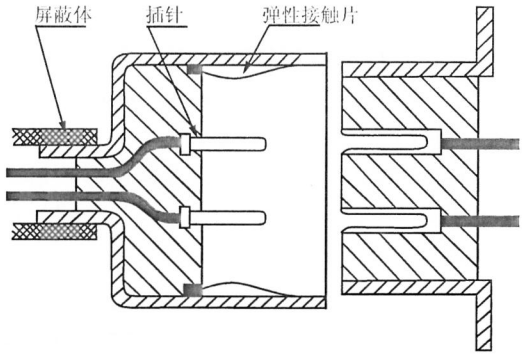


图 144　射频屏蔽连接器

在卡口式的连接中，四周采用弹性簧片后屏蔽衰减的改善见图 145[48]。在这里弹性接触片采用的是镀银铍铜合金。

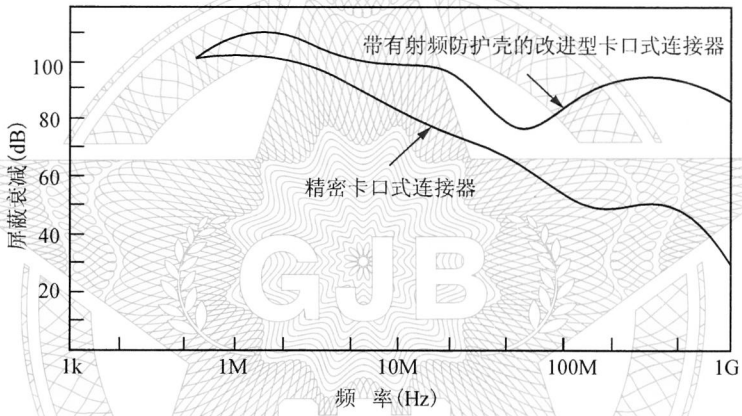


图 145　弹性指形簧片改进连接器的屏蔽衰减

11.9　屏蔽室

11.9.1　概述

屏蔽室是一种专门设计的屏蔽壳体，它形成了一个低电磁噪声的区域。在信号电平非常高的环境或在非常敏感的设备应予以保护的场所，屏蔽室也许是不可少的。

表 47 概括了国内外 12 种不同类型的屏蔽室的一些主要性能[49]。这 12 种屏蔽室，只要在工程上对窗口和开孔予以重视，就可望其对电场与平面波场提供 100dB 以上的衰减。当需要建造屏蔽室时，应考虑几种可供选择的比较方案。这些比较方案中最重要的是要考虑究竟是对现有的，还是对将要建造的房间或建筑物加以屏蔽，或者还是要提供一个可移动的可拆式屏蔽室。

表 47　屏蔽室的性能举例

说明	频率 kHz	磁屏蔽效能 dB	
		最大	最小
铜网屏蔽室	15	61	56
在门上装有编织衬垫材料，泡沫塑料墙芯，外蒙金属薄板	15 150 200	90 87 97	54 63 96

表 47(续)

说明	频率 kHz	磁屏蔽效能 dB	
		最大	最小
空芯结构，钢琴式铰链门，门上带有梳形簧片	15 200	100 118	81 108
在 1.8cm 层压板的基板上(两面)贴 0.5mm 的薄金属板，接缝采用螺钉夹紧，门体是三点悬挂的 6m 移门，装有两排梳形簧片	1000	100	80
类似于上述结构，只是没有移门	18 150	93 120	64 95
0.45mm 厚钢板，板间采用折叠式接缝，并加以钎焊。门上带有双排铍铜合金的梳形簧片。所有电源线都备有滤波器	14 280	58 75	34 58
镀有 0.038g/cm^2 锌层的 1mm 厚薄金属板，连续钎焊。两扇门上各带梳形簧片两排。电源线安装有滤波器，屏蔽室尺寸为 6m×6m×2.4m	14 100	70 –	65 90
2.8mm 厚薄钢板，重叠接缝，连续的惰性气体保护焊，标准屏蔽室门上，带有两排梳形簧片	14 200	90 130	74 106
镀锌钢板(0.5mm 厚)双层模块可拆卸式，门采用不锈钢单刀插入式密封，双排圆弧式簧片，焊接式安装，压插锁定，门尺寸为 0.85m×2m	–	10 200	75 100
由 3.5mm 厚低碳薄钢板用连续的惰性气体保护焊构成双层屏蔽室，壁板间隔 5cm，伸出壁板的气动滑门(无衬垫)	0.1 1	– 62	25 52
屏蔽室分隔成三个独立的房间，其中两个 3.6m×3.6m×3m，第三个是 3.6m×3.6m×4.3m。用 1.5mm 厚薄钢板，所有接缝均采用连续的惰性气体保护焊。每个气动滑门带有三排梳形簧片	0.5 1.0 5.0 15	104 122 80 20	73 – – –
屏蔽室分成三个小室，单层屏蔽、薄钢板、连续的惰性气体保护焊，带有伸出壁板的气动滑门(接触表面用射频衬垫)，屏蔽室总尺寸为 9m×21m×3.6m	1 15 100 10000	115 114 140 119	– 104 114 61

11.9.2 模块式的可拆式屏蔽室

可拆式屏蔽室的基本结构件是在 1.8cm 厚的层压板或聚氨酯两边覆盖标称厚度为 0.5mm 的镀锌钢板。对非绝缘的双层屏蔽室而言，屏蔽壁的两层覆盖面将使得板与板之间的接合相当可靠，因为每个搭接接缝是相同的。上述屏蔽壁板之间的连接将受专用金属紧固件的影响，因此这种结构要求周密地控制弹性与刚性之间的协调关系，以便在每个搭接件的整个长度内建立起无间隙的连续接触。

任何屏蔽室最关键的部分是门。一些现代装置要求门的尺寸为 0.85m×2m 或更大。一般情况，门的连接采用两种型式，分别称之为“楔形”和“刀插式”结构。通用的楔形门见图 146，这种门一般采用门扇形式，一扇或两扇开合式门靠铰链与门框相连，在每扇门边缘加工成楔形嵌入口，并围绕每扇门的整个四周附装上两层铍铜合金的梳形簧片。采用楔形结构的理由是，只要楔形的角度选得正确，就能在梳形簧片上产生很大的接触压力，而在门打开过程中弹性梳形簧片无撕裂与折断的危险。这种结构型式的整体特性较好，衰减量可达 125dB。插刀式结构的门已被应用于一些专门的场合。这种门上装有法兰式棱边，棱边被制成刀形，关门时插入固定于门框凹槽内的两组梳形簧片之间。这种结构的优点是梳形簧片为全保护型，因而它比楔形门有更好的性能，特别是在低频时。

为构成门的辅助搭接，可以在门缝簧片槽底部采用编织的μ－合金衬垫(用于甚低频)或柔性微波吸收体(用于甚高频)。

可以使用波导结构的过道衰减50MHz以下的信号[50]。过道的截止频率与其最大的横向尺寸成反比，因此，通常需要在过道尺寸和衰减要求之间进行折衷处理。如11.5.4.2所述，在截止频率以下，信号的衰减量与过道长度有关。过道可由厚度为1.83mm或更厚的低碳钢构成，过道的支撑可由任意非导电、结构牢固的材料构成。

不管是什么类型的门，当需要用在几百兆赫以上时，设计时应避免在门上开设金属贯通孔。可设计一种专用的锁定门扣，这种门扣对门有充分的锁持力，并能从门的两边解除门闩而不需在屏蔽体上开设金属贯通孔。没有金属件贯通这一点非常必要，因为任何操纵轴即使进行了最完备的搭接，当频率刚好使轴的长度等于谐振长度时，此贯通轴仍会使屏蔽效能明显地下降。如果屏蔽体采用绝缘贯通孔(利用截止波导管原理)，设计时应注意：波导管中加有高介电常数的绝缘贯通轴后，截止频率会显著降低。屏蔽室的另一个要求是要有良好的通风。蜂窝状结构提供了一个实际上不妨碍空气流通的通道，并且便于集通风窗、风道和风机或空气调节系统为一体。

防止通过电源和信号线造成信号贯通是一个主要的问题。在屏蔽室的所有引入电缆中都应接入具有足够插入损耗的滤波器。一个大屏蔽室有三相电源线路和有数百根信号引线进入是很正常的。基本要求是在所有频率上，各滤波器满负荷工作时都应提供规定的衰减量。在所有频率和各种负载电流条件下，若不能保持滤波器的衰减量，则整个屏蔽室的衰减作用将由于滤波器造成的信号贯通而下降。通风、气体管道和水管的进入，亦会构成屏蔽体的贯通孔。这类管道贯通孔缺陷可通过下述办法解决：在截止波导式管道内加装绝缘管，或是把金属管道焊接到屏蔽体上。上述所有的输入线路和贯通管道都应在一个限定的区域内进出，这是十分重要的。

出于安全考虑，屏蔽体应良好接地。虽然外界的接地连接对安装在一个理想屏蔽体里的设备没有影响，但为了使屏蔽体不致出现远高于外界环境的危险电压，外部接地是必不可少的。

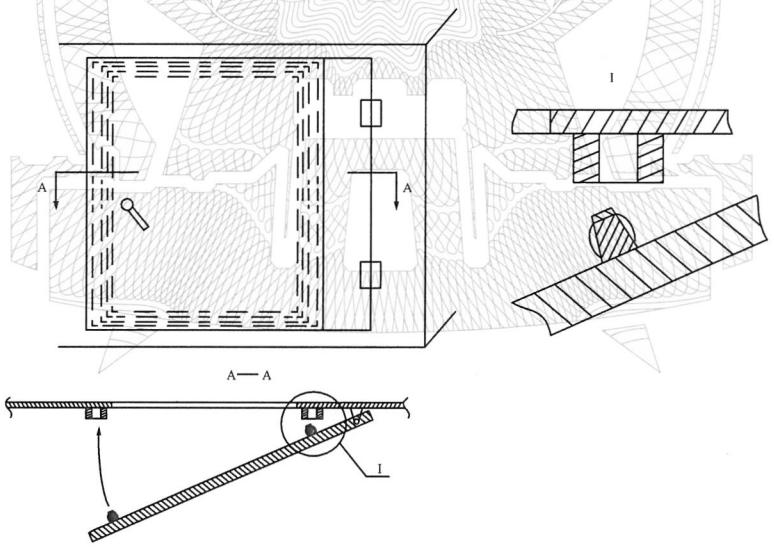


图146　采用梳形簧片使门实现搭接

11.9.3　按传统方式建造的屏蔽室

虽然模块式可拆屏蔽室已得到广泛采用，但按传统方式专门建造的屏蔽室还是大量需要的。这种屏蔽室应用于下列两种场合：对插入损耗的要求明显高于模块式屏蔽室的指标时，或需要的屏蔽区域特别大，并且从经济性考虑规定要沿用某种其他设计时。建造屏蔽室所能采用的几种型式仍不外乎：用编织的铜丝或钢丝网、穿孔金属板和拉制金属网、铝箔、铜箔或μ－合金等高磁导率材料拼接制成，或全部采用薄钢板焊接而成。

网状和多孔的结构材料仅用于要求非常经济的结构或对屏蔽性能要求不高的地方。虽然高磁导率箔料的低频性能相对其厚度而言是非常良好的，但通常不用这种材料，更经济的结构是采用较厚的钢板焊接而成。然而，在应对频率极低或恒定的磁场提供很高衰减的场合，仍要使用高磁导率材料。

用薄钢板连续焊接的屏蔽室实际能提供最有效的屏蔽。常规的习惯做法是用 1.2mm 厚的热轧镀锌薄钢板或 3mm 热轧钢板焊接而成，顺着屏蔽室边缘的所有连续焊缝应采用惰性气体保护的电弧焊工艺。这种方法可花较低的代价获得最高的效能。屏蔽室的安装既可以用原来房间的墙壁和天花板支撑，也可以将屏蔽层与屏蔽室自身的独立钢骨架拼合。

采用双层屏蔽能够改善屏蔽室的屏蔽效能。正如本章前几条的屏蔽理论指出，两层平行(但留有一些间隔)屏蔽体的屏蔽效能比单层 2 倍厚度的屏蔽体所具有的屏蔽效能要好，但不是单层屏蔽体屏蔽效能的 2 倍。屏蔽效能实际改善情况取决于在两屏蔽层之间的电气绝缘程度。

有屏蔽室的制造商认为，彼此绝缘的双层屏蔽室比任何单层屏蔽或“彼此不绝缘的双层屏蔽室”效果更好。除了有射频保护锁，采用与模块式屏蔽室相同的门、通风孔、滤波器。还可以通过电动、液压或气动系统实现门的全自动操作。

11.9.4 用金属箔贴面的屏蔽室

当屏蔽要求并不需要采用钢板全焊接式或模块式屏蔽板拼合的屏蔽室时，采用金属箔也许是可行的。例如，通常可以采用 0.1mm 厚的铜箔并借助连续软钎焊使其接缝密合，把这种铜箔粘贴到现有房间的墙壁、地板和天花板上，就可以构成一个完整的金属箔贴面。这种结构与带衬垫的金属门、正确设计的通风孔及滤波器等配合使用时，虽然对低频磁场而言性能并不好，但当频率较高时，它就能与钢板焊接式屏蔽室媲美。要达到上述性能，基本的要求是应把所有的接缝和搭接点仔细地钎焊以实现连续的连接。如在房子筹建时就考虑这种结构，则成本就要低得多，尤其是在房间内壁提供饰面装贴架或在屏蔽区域内部安装设备会造成额外麻烦时。一般而言，这种结构形式仅用于要求不太复杂的屏蔽室，例如用在某些理疗作业中。倘若要求进一步降低造价，安装时可以省去铜箔接合面间的钎焊，采用价格较便宜的导电胶带粘合。如果仅是阻挡低频电场，那么这种形式的铜箔屏蔽室大多能够满足要求。

当只要求屏蔽微波信号时，在墙壁、地板和天花板上贴上厚度为 0.1mm 左右的铝箔，就可以建成非常经济的屏蔽室。相邻箔片之间应有 5cm 左右的重叠部分，并用铝基密封胶带粘合。在数百兆赫以上时，这类屏蔽室是很有效的；鉴于两相邻箔片之间的连接基本上是容性的，所以屏蔽效能将随着频率的增加而提高。这种屏蔽室通常用来保护工作在大功率雷达附近的电子计算机和数据处理装置。当这种屏蔽室只需工作在甚高频时，对于地面设施，可以省去中心区域上方的部分屏蔽箔。

11.10 屏蔽测试

11.10.1 概述

屏蔽测试可分为：

a) 材料的屏蔽测试，以确定它们的屏蔽特性；

b) 屏蔽结构物(如屏蔽室)的测试，以确定设计和结构是否满足要求。

第一类测试可以得出本章前面已介绍过的设计数据。这类实验通常是屏蔽材料生产厂完成的，不必由设备的设计者或使用者进行。有关屏蔽室的试验项目和测试方法已有标准，见 GB/T 12190。但是检验屏蔽室和设备的屏蔽是否有效是设备研制或验收的必要环节，为此下面作一说明。

屏蔽体上有意或无意出现的孔洞和接缝的影响，从某种意义上看是不确定的，所以屏蔽室建成以后应进行测试。通过检漏测试能找出电磁泄漏的部位，造成泄漏的原因通常是缝隙的焊接缺陷或衬垫装配质量较差，上述测试对于完善屏蔽室的结构常常是必不可少的。屏蔽室验收应采取不同于检漏测试的均匀试验场试验。均匀场测试(相对于检漏测试)用于屏蔽验收测试。对于不同频率的低阻抗(磁场)、高阻抗(电场)和平面波的检漏测试和均匀场验收测试，已有现成的方法。

屏蔽效能测试方法之所以各种各样，其主要原因是因为影响材料屏蔽性能的因素是多种多样的，它包括：屏蔽体的结构形式(是平板状，还是盒状？)；所关心的频率范围；入射波的类型；入射波的波阻

抗；以及诸如此类的其他因素。本条只介绍一些用得最多、使用最广的屏蔽效能测试方法。常用的方法包括：

a） 小环法低阻抗磁场测试；
b） 亥姆霍兹线圈法低阻抗磁场测试；
c） 采用杆状天线的高阻抗电场测试；
d） 采用平行线辐射体的高阻抗电场测试；
e） 采用一对天线的平面波测试；
f） 采用平行板传输线的平面波测试。

上述试验中的某些项目与 GJB 151B－2013 中对设备和系统进行的电磁兼容性测量非常相似，也类似于 GB/T 12190 中评定屏蔽室屏蔽效能时所进行的测试。

应当指出，屏蔽测试所得结果的准确度通常不高。限制测量准确度的因素有：波阻抗是不确定的；天线校准系数是以平面波为前提的，但试验条件未必能保证这个条件；由毗邻结构所造成的辐射场畸变程度是未知的；此外还有一些其他因素。然而，上述测试方法是制定相应屏蔽测量方案的基础，依此制定的方案可望获得较符合实际的效果。

11.10.2 小环法低阻抗磁场测试

本方法用以考核屏蔽体对磁场的屏蔽效能。测试采用两个小环天线，并利用两环之间在插入屏蔽体前后的耦合得到试样的屏蔽效能。GB/T 12190 亦列入了与小环法类似的测量方法，以评定屏蔽室的磁场屏蔽效能。

本方法采用一对相同的小环天线，其中一个置于屏蔽层一侧，一个置于另一侧，而且它们离屏蔽层的距离相等。对屏蔽室进行试验时，通常将发射环和信号发生器置于屏蔽室外部，而接收环和检测仪器置于屏蔽室的内侧。

图 147 和图 148 给出了小环的两种基本取向方式。图 147 中的两个环同轴放置，即两个环轴线重合。图 148 中的两个环是共面的，即两个环处于同一平面上。两环的直径和间距应远小于被测的屏蔽盒、罩或屏蔽室的最小尺寸。由于这种方法每次只能对受照射屏蔽体的一小部分进行测量，所以应使环沿屏蔽体的整个表面缝隙移动，以全面测定该屏蔽体的屏蔽效能。

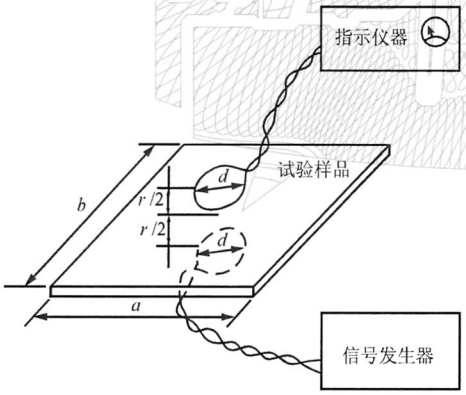


图 147 用共轴环测量屏蔽效能

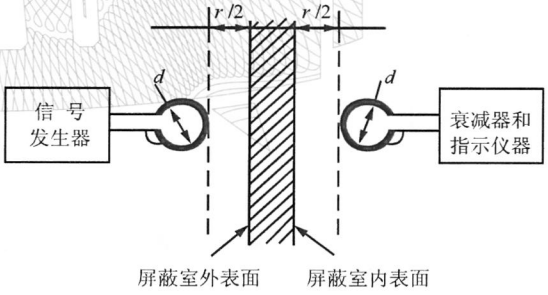


图 148 用共面环测量屏蔽效能

这种试验方法所适用的频率范围取决于：所需测量的屏蔽效能大小(测量系统的动态范围)；测试设备的灵敏度；发射环的激励功率；以及环与屏蔽层之间的间距。制约因素通常是环的面积和圈数，因为它们决定了环天线的自谐振频率。试验中两个环的间距应不小于环的直径。

GB/T 12910 所规定的磁场屏蔽效能试验配置与图 148 所示相同，并采用下列参数：

a） 环直径(d)：30cm；
b） 环与屏蔽室的间距($r/2$)：30cm；

c） 该试验配置可提供不小于70dB的测量范围。

均匀磁场的试验，需要将屏蔽体置于亥姆霍兹线圈（大环）内，再把探测环放入受试屏蔽体内部。采用亥姆霍兹线圈是为了磁场能同时照射到屏蔽体的大部分。试样在相对于环的各种取向都应进行试验。该测试方法的频率范围受到试样尺寸的限制，因为要求的频率范围会影响亥姆霍兹线圈的尺寸。线圈尺寸增大后，就会增加电感量，降低其自谐振频率，从而减小线圈保持磁场强度恒定的频率范围。线圈直径至少应是试件尺寸的两倍，最好是三倍。上限频率的典型值是100kHz～500kHz。

11.10.3 补充测试方法

对中等阻抗和高阻抗入射场的屏蔽效能还有另外一些补充测试方法，中等阻抗入射场的屏蔽效能测试方法参见GB/T 12190。由于高阻抗场的屏蔽相对容易，很少对高阻抗入射场的屏蔽效能进行测试。

11.11 人员的防护屏蔽

减小电磁干扰的屏蔽，对保护人体免受潜在的外来电离或非电离辐射危险也是适用的。装备灵敏电子仪器的大多数场所，防止电磁干扰所要求的设施屏蔽措施，已足以提供必要的人员防护。然而，当有高电平入射场时，对人体的防护仍不容忽视。特别应注意的是紧靠下列对象的区域，如警戒和跟踪雷达等大功率的射频源或辐射体附近。

为防止触及频率极低（例如直流和50Hz交流）的危险电压所加的屏蔽体与防止辐射场的屏蔽体通常是不同的。低频人员防护可以采用绝缘措施，其实质是防止偶然接触的简单物理屏障。金属的电磁屏蔽体也可以建立起一个物理屏障，然而它是附带的作用，不应将它看作是屏蔽体的主要目的。

11.12 屏蔽要求的确定

11.12.1 概述

对结构物（特别是大的结构物）全面屏蔽的代价可能很高。如果周围环境是已知的或是可预测的，那么恰当地选择合适的现有材料就能以最低的代价来满足屏蔽要求。对于一个既定的场所，确定屏蔽要求的可行方法包括：分析设备的故障干扰；进行电磁环境现场勘测，并对设施内待装的设备进行电磁敏感度和发射试验。通过设备敏感电平和放置设备处测得的功率密度电平之比较，就可以确定屏蔽要求。

11.12.2 分析设备干扰的耦合种类

某个设备是否需要屏蔽的依据是该设备所要承受或可能引起的干扰程度。考虑到干扰耦合方式多样，所以应确定其主要耦合方式，并判断是否可利用屏蔽有效地解决。如果干扰信号是沿电源线或信号线耦合进入设备或系统的，则屏蔽的意义不大。然而，引线还可以通过耦合模式捡拾干扰信号，而耦合模式又是可以利用屏蔽解决的。例如，对于由感性、容性或辐射耦合所引起的干扰，不论是单独对电缆屏蔽，还是将电缆与设备一起屏蔽，都是有效的。

如果一个设备在装入新设施之前需确定其是否要进行屏蔽，那么应当考虑该设备在其他类似环境中的工作情况。如果具体设备的性能不知道，就应当研究与其型号或结构类似设备的工作情况。确定屏蔽要求的最可靠方法是将已知的设备或系统敏感电平与设备或系统待安装位置的实测功率密度电平相比较。

11.12.3 电磁环境的测量

不管是新建的还是原有的设施，确定其屏蔽效能最有效的方法是对设备或装置待安装位置的电磁环境进行测量。可采用标定过的天线和频谱分析仪或专用的场强计进行测量。测量结果为场强或功率密度。对于有关人员危害防护的确定，可以采用射频场强监测仪测量。

频谱测量的目的在于对所有潜在的干扰场进行鉴别。应特别注意那些由容易识别的场源（例如广播电台、电视台、雷达和通信发射机等）所发射的信号场强。可能形成干扰的其他场源包括：射频加热装置、射频焊接设备、微波加热炉以及在邻近医疗设施区域内的高频理疗和电灸器械。如果所有发射源的输出功率和位置都能识别，则也可以通过计算评估给定区域内的功率密度（即信号强度）电平。

电力系统也能成为一个干扰源。尤其是在高压输电系统中，往往会通过沾污的连接器和绝缘子上的电晕放电及电弧产生噪声。这种噪声的频谱通常可扩展到高频（3MHz～30MHz）、甚至高频以上的范围，

继而可能引起严重的干扰问题。对于电力线路的走线，不管是现有还是筹建中的，都应予以足够的重视。如果信号或控制电缆不得不与电力线长距离平行敷设时，则不管它们是架空线还是地下电缆，都应对信号或控制电缆进行屏蔽。

除了上述可识别的干扰源(对它们屏蔽也许是必要的)以外，还可能存在一些隐蔽的干扰源。例如，内燃机的点火噪声是棘手的问题。此外，在计算机、测量系统和其他敏感设备中也常常可以觉察到由办公设备、自动售货机以及荧光灯所产生的干扰。

11.12.4 设备的电磁干扰特性

不同设备所呈现的发射和敏感特性之所以有差别，是因为干扰特性取决于设备所要执行的使命、设计方法、结构类型、所用组件的型式以及各种其他因素。究竟要为一台给定的设备或全套综合设备进行何种程度的屏蔽，只有对该设备或系统的发射电平或敏感电平进行测量，才能提供最切实的指标。为此，需让设备在一个可以控制的电磁环境内运行，并且测量该设备发射或辐射的信号频率及幅度；或者反之用已知的场强照射受试设备或使设备经受既定信号的试验，并记录设备或系统的敏感电平。在现场条件下，上述发射和敏感试验程序中没有一个可望得到精确而详细的数据，因为二次辐射和互耦合作用会使测量结果在很宽的范围内变化。然而，如果各发射场强的取样合理，或者在各种位置和不同的取向条件下提供照射，那么可以估测设备或系统的相对敏感度或由它们的发射所构成的威胁的数量级。如果需要精确的数据，应按照验收标准的试验程序(例如 GJB 151B－2013)进行试验。遗憾的是对设备进行详尽而准确的发射和敏感度试验花费太大，甚至对大型综合设备是否具备以有效的方式进行上述试验的能力也是值得怀疑的；加上往往在具体设备的全貌搞清之前就得对结构的屏蔽要求作出判断，所以一般只能把注意力集中到那些准备安装在设施中的最关键的设备或系统上。设备的屏蔽要求，可将设备安装位置所测得的或计算得到的功率密度电平与该设备的敏感电平进行比较后得出。

如果屏蔽要求在事先根本不能预料或规划，那么对设备未来所要工作的电磁环境应进行测量或计算，并将所得资料提供给设备承制厂，以便采取恰当的措施，确保设备或系统将来在上述环境中能正常工作。

11.13 屏蔽系统设计的要点考虑

11.13.1 概述

待屏蔽的设施所要屏蔽的总面积或总体积，以及屏蔽的结构外形与下列因素有关：

a) 要求屏蔽的设备或系统的尺寸；

b) 包括干扰源与感受器之间相对取向在内的结构布局；

c) 各种干扰信号的幅度和频率；

d) 材料的价格。

上述因素一般是相互制约的。虽然在给定情况下会有一个起主导作用，但仍然应综合考虑所有的因素。

11.13.2 尺寸

如果一个非常灵敏的设备或小型系统安装在一个大型建筑物中，那么为了防护一个小单元而屏蔽整个建筑物是很不经济的。假定所有其他因素相同，则屏蔽的成本是与其所封闭的容积密切相关。因此更经济的方案是只屏蔽安装设备的那个房间、仅仅给敏感(或干扰)设备建造一个屏蔽罩、或者改进特定设备的机箱机柜或外壳的屏蔽性能。另一方面，如果敏感单元是一个相当大的系统，例如一个通信中心或一台大型计算机，那么，可能需要把适当的屏蔽材料掺入房间或建筑物墙壁、地板及天花板内。如果在设施的早期设计阶段就考虑这一要求，也许只要用一般建筑材料经过适当的装配就能提供所需的屏蔽。也就是说，在设施的建造过程中就考虑屏蔽往往要比建成后追加屏蔽经济得多。

11.13.3 配置

如果需要在建筑物内安装敏感设备或系统，并且有几个位置可供选择时，则应尽量利用建筑结构固有的屏蔽特性。房间原来存在的金属墙壁、装饰屏蔽网和其他导电物体都可以提供所要的屏蔽。再说，

设备往往只是对一、两个方向上入射的辐射信号较为敏感，因此，设备取向时将敏感一侧背着入射信号，就能降低对屏蔽的要求。

对于信号和控制电缆应多加注意，由于感受器导线中的感应电压(或电流)与其到干扰导线的距离成反比，与路径长度成正比，所以应尽量避免长距离平行走线。

11.13.4 信号特性

所有材料的屏蔽效能实际是与频率有关的。用于防护 3cm 波段雷达信号的屏蔽形式未必能有效地屏蔽广播发射机的干扰。为具体对象选择屏蔽时，应将材料的衰减特性与有害信号的频率相比较。

待屏蔽信号的幅度反映了屏蔽体应提供的场强衰减量。对于大多数场强来说，屏蔽体所产生的衰减与场强本身的大小无关，也就是说，一个屏蔽体对低电平场衰减 60dB，对高电平场同样也是 60dB。然而，强磁场能引起铁磁材料的饱和，因此在很强的磁场条件下，屏蔽体的衰减作用通常将减小。例如，在选择防御电磁脉冲(EMP)的屏蔽体时，这种现象应予注意。凡当可能存在饱和作用的场合，就得采用比较厚的屏蔽体，以保持屏蔽强场所需的衰减值。

11.13.5 费用

关于尺寸对费用大小的影响在 11.13.2 已经提到。在保持屏蔽效能的情况下，需要考虑的其他费用因素与下列内容有关：为导线和电缆提供的出入口、通风孔，以及结构孔洞和观察孔(门、窗、表头孔)等。凡这些不连续结构在数量上的增加，都将导致屏蔽费用上升，有时甚至相当可观。

12 人员防护

12.1 电击

12.1.1 概述

当人接触一个接地物体，或者站在潮湿的地板上、并与带电的仪器或电路触碰时通常会发生电击。严重的电击可导致人员死亡，但大多数伤害事故是由于反应电流引起人们不自觉的动作造成的。

电流对人体的影响，主要取决于电流幅值(大小)和电击时间的长短，而电流的幅值则由欧姆定律所决定。由欧姆定律可知 $I=V/R$，公式中 V 是电源的开路电压。而 R 则是回路的总电阻，此总电阻包括电源的内阻和人体的电阻。在供电电路中，电源内阻与人体的电阻相比，往往可以忽略不计。在这种情况下，如果发生电击事故，电压 V 的电平是起决定作用的因素。

对于 50Hz、120V～240V 的工频电压，人体的接触电阻对通过人体的电流起主要作用。人体的接触电阻在完全干燥条件下比潮湿条件下可大 100 倍。因此，皮肤上的汗水对皮肤的接触电阻影响极大。为便于计算，通常把皮肤电阻值取为 500Ω～1500Ω。当电压超过 240V 时，皮肤上的接触电阻就变得不太重要了。在较高的电压下，皮肤往往被击穿，结果导致深层组织的烧伤。在这种情况下，人体的内部电阻将决定通过人体的电流。

12.1.2 电击的电平

电击是由于电流通过人体而造成的，其引起的生理反应取决于电流值的大小和持续时间及其通过人体的路径。电流值取决于施加的电压以及电源的阻抗和人体的总阻抗。人体的总阻抗依次取决于接触区域的湿度及施加的电压和频率。

电流的效应由生理参数和电气参数决定，心室纤维性颤动是电击引起死亡的主要原因。15Hz～100Hz 电流的生理效应的阈值见 GB/T 13870.1。

12.1.3 电击的预防

应依据 GJB/Z 150.1－2007 进行军用电子设备电击防护的安全设计。大多数电击危害的起因可以分为两类：不安全的设备和不安全的操作。针对这两类最常见的危害，可以用下列办法来加以预防：

a) 定期更换绝缘层已磨损或破裂的电力线缆和配电缆线；

b) 从供电装置中除去所有绞接的线缆；

c) 将开关板背面和设备机架上的裸露导体及端接条带进行包封，并安装警告标志；
d) 在所有导体裸露外壳和高压开关前面的地板上，安放绝缘胶垫；
e) 高压开关应采用封闭式安全开关；
f) 所有引线应符合电气规程的要求，这些引线的有效截面积应足以承载所规定的电流；
g) 临时使用的引线，使用完毕后应尽快予以拆除；
h) 设备中的非载流金属元件和电源附件应接地；
i) 所有电路的总电源开关，应在户外锁闭，并应附有标志；
j) 在更换熔断器之前，应将电源开关断开，并使用拉拔工具更换熔断器；
k) 应将熔断器盒锁闭，以防止进行桥接或用大容量的熔断器来更换；
l) 应切实防止各个电路过载。

12.2 静电防护

由于带电体可能是固体、液体、粉体以及其他条件的不同，静电放电(ESD)可能有多种形态，但是根据其特点，并从防止静电危害方面来考虑，放电类型可分为以下 7 类：电晕放电、刷形放电、火花放电、传播型刷形放电、粉堆放电、雷状放电、电场辐射放电。表 48 列出了各类 ESD 的发生条件与特点[51]。

静电电击引起的不自觉反应，可使工作人员受到意外伤害。静电更为常见的危害是损坏电路元器件及相关的敏感电路。空气中的挥发性气体、瓦斯气、粉末尘埃或它们的混合物达到适当的比例时，静电还会导致火灾或爆炸。静电引燃混合气体，应具备下列四个条件：有一个有效的静电发生源；有一个聚积局部电荷并保持适当电位差的载体；有足够的能量产生火花放电；火花在能够着火的混合气体中出现。

常用的 ESD 防护技术包括[51]：

a) 把一个系统的所有金属零件连接起来，以免在该系统中的任何两个金属零件之间出现静电感应电位差。
b) 把所有金属结构接地，防止静电电荷的聚集。
c) 空气加湿，把相对湿度提高到 60%～70%。通过提高空气湿度增加诸如纤维、木材、纸张、混凝土或砖墙等绝缘材料的电导率。
d) 使用静电消除器，静电消除器的基本原理是利用空气电离发生器使空气电离产生正负离子对中和带电体上的电荷。
e) 使用抗静电改性剂、导电性填充和辐照等方法对材料进行抗静电处理，将绝缘材料变为静电消散材料，达到抑制静电的目的。

表 48 各类 ESD 的发生条件与特点

种类	发生条件	特点及引燃引爆性
电晕放电	当电极相距较远，在物体表面的尖端或突出部位电场较强处较易发生	有时有声光，气体介质在物体尖端附近局部电离，形成放电通道。感应电晕单次脉冲放电能量小于 20μJ，有源电晕单次脉冲放电能量较此大若干倍，引燃能力甚小
刷形放电	在带电电位较高的静电非导体与导体间较易发生	有声光，放电通道在静电非导体表面附近形成许多分叉，在单位空间内释放的能量较小，一般每次放电能量不超过 4mJ，引燃引爆能力中等
火花放电	主要发生在相距较近的带电金属导体间或静电导体间	有声光，放电通道一般不形成分叉，电极是有明显放电集中点，释放能量比较集中，引燃引爆能力较强
传播型刷形放电	仅发生在具有高速起电的场合，当静电非导体的厚度小于 8mm，其表面电荷密度大于等于 0.27mC/m^2 时较易发生	放电时有声光，将静电非导体上一定范围内所带的大量电荷释放，放电能量大，引燃引爆能力很强

表 48(续)

种类	发生条件	特点及引燃引爆性
粉堆放电	主要发生在容积达到 100m^3 或更大的料仓中，粉体进入料仓时流量愈高，粉体绝缘性愈好，愈容易形成放电	首先在粉堆顶部产生空气电离，形成仓壁到堆顶的等离子体导电通道，放电能量可达 10mJ，引燃引爆能力强
雷状放电	空气中带电粒子形成空间电荷云且规模大、电荷密度大的情况下发生，如承压的液体或液化气等喷出时形成的空间电荷云	放电能量极大，引燃引爆能力极强
电场辐射放电	依赖于高电场强度下气体的电离，当带电体附近的电场强度达到 3MV/m 时，放电就发生	放电时，带电体表面可能发射电子，这类放电能量比较小，引燃引爆能力较小，出现这类放电的概率也小

12.3 射频辐射危害及其防护

射频辐射对生物体的细胞组织的影响实质上主要是热效应。人体最容易受伤害的部分是眼睛和睾丸，可能会受影响的其他部分是大脑、神经组织、皮肤和肌肉。热效应的程度可以从皮肤或组织的轻微热效应直至组织的损伤和坏死。

当频率低于 1GHz 时，射频能量透入人体很深。这种频率是极其危险的，因为这种辐射并不能由皮肤上的神经末梢感觉出来，人体细胞组织中所吸收的功率可能高达入射功率的 40%。泌尿膀胱、胆囊水泡和肠胃消化道部分特别容易受到伤害，因为这些脏器不能由充足的血液循环所冷却。同样，在牙齿中的不锈钢或铂骨架镶入物及填充物在受到射频辐射时，也可能升高温度，致使细胞组织烧伤。

在 2GHz～5GHz 的射频范围内，眼睛和睾丸是最容易受射频辐射危害损伤的组织。对眼睛的损伤通常是不可恢复的，并且可能由于白内障或眼球晶体透明度的消失而造成失明。用动物试验表明，低量级的射频辐射暴露对睾丸的损害，与利用一般形式的热对睾丸所引起的损害并没有什么不同，而且，由热效应所造成的睾丸生理功能下降是暂时的。现在还不清楚，射频辐射是否会产生任何遗传性的损害。

作业区和生活区的电磁辐射场强应符合 GJB 5313 规定的暴露限值。电磁辐射环境应根据辐射源特点采用场强探头法或天线法进行测量，包括各种专门用于电磁干扰测量的场强仪、电磁干扰接收机，以及用频谱分析仪、天线组成的测量系统。

电磁辐射危害防护主要包括以下几个方面：

控制电磁辐射环境。在系统研制初期提出电磁辐射危害防护要求，总体设计中进行相应的电磁辐射防护设计，研制过程中合理地解决电磁辐射危害问题。具体措施包括：调整优化天线布置，使电磁污染源远离人员工作区。采用电磁屏蔽或吸波材料将电磁辐射的作用和影响限定在一定的空间内，防止其传播与扩散。

设定安全防护距离。为了防止射频对人体的危害，应根据天线特征通过计算或测量确定人员离开发射机或天线的安全距离。设置围栏或围索，对进出射频危害区域的人员进行控制。

使用危害警告装置。包括在必要区域设置警告标识、安装监测设备和人员随身携带报警装置。对于场强超过人体暴露限值的区域，应设置“当心电磁辐射”或“当心微波”的警告标识，以示危害。对于辐射程度不同的区域，应设置不同的警告标志，以区分不同的危害等级。对于辐射源间歇工作的非连续辐射区域，可以设置警告灯或警铃。在辐射源不工作时，该区域属于非保护区，当辐射源工作时，通过警告灯或警铃报警，提醒人员离开危险区域。还可以在必要区域安装监测设备，实时监测电磁辐射强度，当环境电平超出保护限值时，监测设备应报警或对该区域采取必要的控制手段。对于经常在不同区域往来的人员，作为除防护服等常规防护方式外的补充防护，应随身携带监测报警装置，当所在区域电磁辐射强度超出保护限值时，监测报警装置会警告人员采取必要的措施。

穿戴防护用具。对于在超过控制环境暴露电平的电磁环境中工作的人员，应穿戴相应的电磁防护用具，如：防护服、防护帽、防护眼镜等。

制定科学的工作规程。由于人员受电磁辐射危害与受辐照时间有关，可通过规定人员工作时间来减少人员受电磁辐射危害程度。在不影响工作质量的原则下，设法减少人员受照时间。如熟练操作技术，减少不必要的停留时间，几个人轮流操作，尽量缩短使用电磁辐射设施的时间，或尽量减少人员在发射机主波束下的单次工作时间等。当不能确信电磁辐射不会危害眼睛时，不允许对波导开口馈电喇叭和有微波泄漏的部位进行目视检查。在雷达工作的微波辐射期间，雷达部门的工作人员应离开雷达机柜波导以及天线一定的距离，以防微波辐射对人体造成伤害。检查雷达时应确保雷达天线指向已知的安全方位，避免人体直接受辐照。

13　核电磁脉冲效应

13.1　概述

核爆炸除了产生冲击波、热效应和放射性尘埃之外，还产生强电磁效应。一般情况下，核爆炸产生的高强度电磁脉冲，其频谱可以从 1Hz 一直延伸到 300MHz 以上。除非采取保护措施，否则这种高强度的电磁脉冲将摧毁或损坏一些关键的电子设施，其破坏面积可以覆盖我国整个大陆。电子设施的防护设计，包括接地、搭接和屏蔽、以及对电磁脉冲本身性质的了解。

13.2　电磁脉冲的产生

13.2.1　高空电磁脉冲

13.2.1.1　概述

高空电磁脉冲是由外大气层核爆炸产生的。由于它的覆盖面积大，所以是通常最感兴趣的一种电磁脉冲，对高空电磁脉冲的干扰特性和防护特性的研究也是最早的。下面对高空电磁脉冲标准波形的三个组成部分进行说明。

13.2.1.2　早期高空电磁脉冲

核武器爆炸时，产生的高能量 γ 射线，从爆心向四周辐射。当爆炸在高空发生时，γ 光子的平均自由程很大，在与其他粒子相互作用之前，可以飞行很长距离，如图 149 所示。射向地球的 γ 射线与稠密的大气层相遇，在与空气分子相互作用过程中，产生了康普顿反冲电子和正离子。最初，康普顿反冲电子也从爆心向外辐射。这些运动着的带电粒子在地球磁场的作用下将绕地磁力线旋转。

地磁场加速康普顿反冲电子，使康普顿反冲电子辐射电磁场，场的持续时间约为 1μs。因此，早期高空电磁脉冲由电荷加速(电子旋转)过程产生，这种现象发生在地面(海拔)上空 30km，厚约 20km 的区域里，如图 150 所示。这个区域覆盖的范围，可由从爆心出发、并与地球表面相切的立体角来确定。对地面人员，由爆心射向他的入射波近似为平面波，其振幅、持续时间和极化方向，取决于爆心和观察者相对于地磁力线的位置。GJB 151B－2013 规定的高空电磁脉冲(HEMP)早期电场波形见图 151，峰值场强为 50kV/m，上升时间(10%～90%)为 2.3ns±0.5ns，半峰值脉冲宽度 23ns±5ns。

13.2.1.3　中期高空电磁脉冲

在早期高空电磁脉冲之后所产生的瞬态现象称为中期高空电磁脉冲。该阶段持续时间为 1μs～1s。在地球表面观察到的中期高空电磁脉冲，其峰值电场强度有几百伏/米，基本上是垂直极化波。

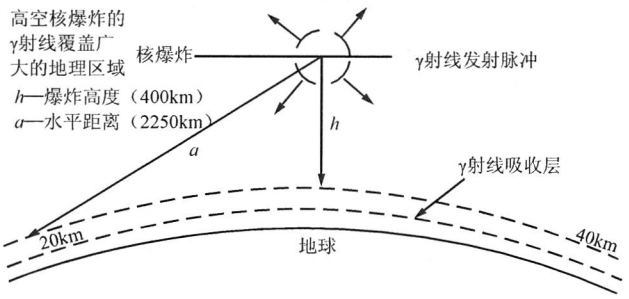


图 149　高空核爆炸的电磁脉冲

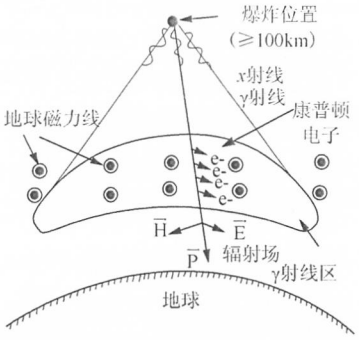


图 150　高空电磁脉冲的图解说明

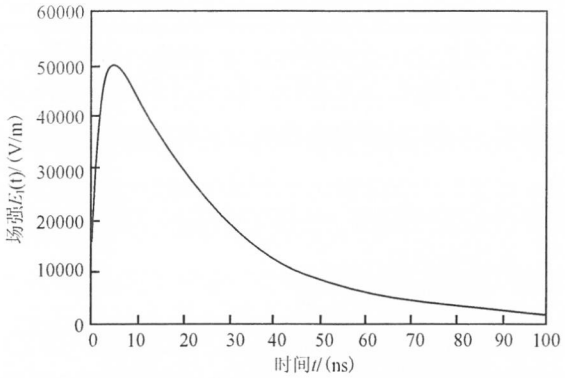


图 151　HEMP 早期电场波形图

13.2.1.4　晚期高空电磁脉冲

而后一段时间(1s～100s)，在边膨胀边上升的火球影响下，大地上将产生感应电流。这种效应称为磁流体动力学电磁脉冲，这是由急剧膨胀的核弹碎片和热离子气体在地磁场中运动产生的。后期高空电磁脉冲按其基本效应，可分为两个阶段。第一种效应是电离层冲击波效应，它可使地磁力线发生畸变并产生后期高空电磁脉冲的先期部分，可在 2s～10s 内到达地球表面，全球都可感受到。第二种效应是“大气断层”效应。当热核弹碎片和空气离子横切地磁力线运动时，在电离层内形成巨大的环形电流。这些电流在 10s～100s 时间内可在地面感应出镜像电流。尽管晚期高空电磁脉冲在地表产生的场强是较弱的(几十伏/千米)，但其持续时间比较长。因此在设计长距离电力线和通信线路时，要考虑晚期高空电磁脉冲的影响。因为持续时间长，还要考虑晚期高空电磁脉冲能量对保护装置的影响。

13.2.2　地面爆炸电磁脉冲

当在地球表面或地面附近发生核爆炸时，中子和 γ 射线由爆心向外辐射。γ 射线光子除由核弹发射外，还会由中子与空气、地面及水发生非弹性碰撞而产生。γ 射线与空气分子相互作用产生康普顿反冲电子。然而，在海平面或其附近，康普顿反冲电子很快会与空气分子碰撞，形成大量的低能二次电子和离子，即康普顿反冲电子引起了电荷大量分离。二次电离将使空气导电，如图 152 所示，辐射场强近似正比于 $\mathrm{d}J^{\mathrm{c}}_{\mathrm{net}}/\mathrm{d}t$ (电偶极子场强)。由于地面的缘故，使电荷位移呈非对称形式。原先的偶极子电荷通过电离的空气和土壤中的电流通路放电。从远处看，地面爆炸的电磁脉冲，犹如从偶极子源发射的垂直极化波，它将随着离爆点距离的倒数(1/r)衰减。所以地面爆炸的电磁脉冲覆盖范围比高空电磁脉冲要小。然而，在康普顿电子源区范围里，会出现二次电离和弛豫电流，场强很强。这种强场强在长导体(如电力线和通信电缆)上感应出的大电流，可能沿导体传播很远。因此，对那些有导线、电缆或其他导体与源区相联的系统来讲，即使它们远离源区，也要注意源区电磁脉冲的影响。

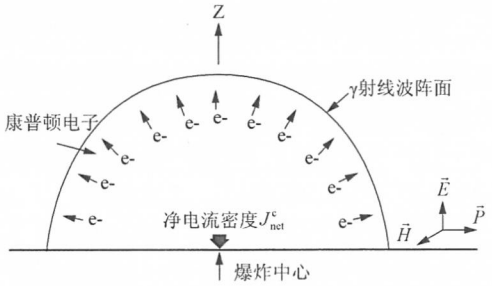


图 152　地面爆炸的康普顿电子及净电流密度 $J^{\mathrm{c}}_{\mathrm{net}}$

13.3　高空电磁脉冲与系统的相互作用

13.3.1　概述

高空电磁脉冲对系统的作用和影响可分为长线效应和局部效应。所谓长线效应是指在很长的电源

线、通信电缆或其他导体(例如管道)上感应出电流和电压。这些效应可能传得很远，并沿导体引入设备。局部效应是指直接在设备的屏蔽体、结构、导线或设备外壳上感应出电压和电流。由于设备结构的复杂性和缺少结构件材料全面的电性能数据，再加上复杂的相互作用路径、众多的仪器状态及多种其他因素，使得局部效应很难用分析法评估。但是，局部效应可以通过在仪器设备周围建立模拟的高空电磁脉冲场来评定。然而，对连接在设备上的长导线，其全部长度很难用模拟的高空电磁脉冲场来照射。评定高空电磁脉冲对长线的影响，通常用分析法，即在长线端口设定一个外部激励，然后进行模拟分析。

13.3.2 长线中的电流

13.3.2.1 架空长线

已有文献详细分析了在类似高空电磁脉冲环境下，与地面平行的长直架空线上所感应的电流。如果导线是架在理想导电地面上，则电流波形就像早期电磁脉冲一样，只是在架高几米的导线上电流上升时间要长些。对于非理想导电的地面(例如土壤表面)，由于地面对电磁波不能完全反射，与理想导电地面相比，架空线可能经受更强烈和更长时间的激励。

图 153 表示指数脉冲的入射场在土壤上方半无限长(从观察者延伸到无限远)架空线中所感应的短路电流。图中水平极化入射场感应的电流为虚线；垂直极化感应电流为实线。曲线$\sigma \cdot \tau=\infty$表示在理想导电地面上架空线中的感应电流，它正比于架线高度 h，衰减时间常数τ和入射场强度 E_i。图 153 中的电流已归一化，它包括导线的特性阻抗 Z_C、场强峰值 E_0，衰减时间常数τ，光速 c 和方向性函数 D。方向性函数 D 取决于架空导线与入射波坡印廷矢量所在的垂直平面的交角(方位角) ϕ，及入射坡印廷矢量的仰角ψ。有限导电地面的修正量正比于入射场强、衰减时间常数的 3/2 次幂，以及土壤电导率 σ 的平方根倒数。

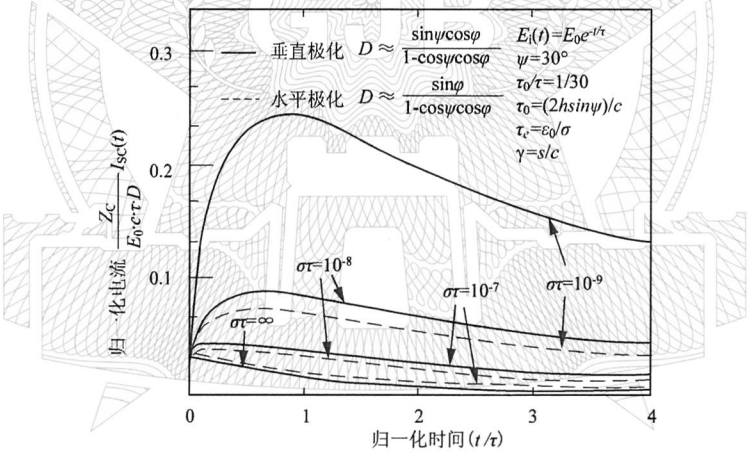


图 153 指数脉冲在无限长架空线上感应的终端短路电流

对于在电导率为 10^{-3} S/m 的土壤上方 10m 处 300Ω 的长线，当指数入射波衰减时间常数为 250ns、场强为 15kV/m 时，长线上的感应电流为 10kA。垂直极化波感应电流要比水平极化波大。但是在我国大陆的纬度上，高空电磁脉冲主要是水平极化。所以即使高空电磁脉冲峰值场强有可能超出 15kV/m，但这里仅取 15kV/m。更复杂的分析，即考虑爆炸点、观察位置、以及它们对高空电磁脉冲极化和波形的影响，可得出在早期高空电磁脉冲峰值短路电流值在 5kA～10kA 之间。半无限长线的终端开路电压为其短路电流和特性阻抗 Z_C 的乘积。以 300Ω 长线为例，开路电压为 3MV。

13.3.2.2 埋地长线

正如 13.3.2.1 中所述，非理想导电土壤对入射场不能完全反射，一部分将传入土壤。传入土壤的这部分，可能在地下电缆、管道和其他导体上感应出电流。然而，因为电磁波在土壤中的传播速度要比空气中慢得多，所以“弓形波”效应在地下导体上可以忽略不计。而且，地下导体靠近有耗土壤，所以衰

减要比架空线大。对于与土壤接触的导体(即埋地裸导体)，在任一被测点的电流，其大小主要由被测点处入射场趋肤深度范围内的耦合程度决定。因为在远处的感应电流很快被土壤衰减，所以它对被测点的总电流影响不大。

图 154 给出了地下电缆在各种埋设深度下的感应电流。深度参数$\tau_d=\sigma\mu d^2$，其中 d 是埋设深度。电流进行了归一化，它包含电缆每单位长度的电感量 L_0、入射指数脉冲的幅值 E_0、衰减时间常数τ、土壤时间常数$\tau_e=\varepsilon/\sigma$和方向性函数 D。感应电流正比于入射场强 E_0、衰减时间常数的 3/2 次幂、以及土壤电导率σ的平方根倒数。对水平极化、垂直入射的脉冲，若 $E_0=50$kV/m，$\tau=250$ns，且长线埋在接近地表处($d\approx0$)，土壤电导率为 10^{-3}S/m，则在长线上感应电流为 2.8kA。

13.3.2.3 垂直结构件

高空电磁脉冲作用于垂直结构件(如无线电发射塔、波导、连接架空天线的电缆以及电力线与通信电缆的引下线)的方式与作用于水平线的方式在很大程度上相似，区别仅是电场的垂直分量来激励垂直结构件。架空输电线的引下线上的感应电流如图 155 所示。由于引下线较短，入射角只有 30°，所以忽略“弓形波”效应。本例中，感应电流还受架空线高度的限制。对较高的结构件，电流波形前沿按入射波的积分关系连续上升，对高达上百米的结构件而言，电流随结构件高度增加而增加。

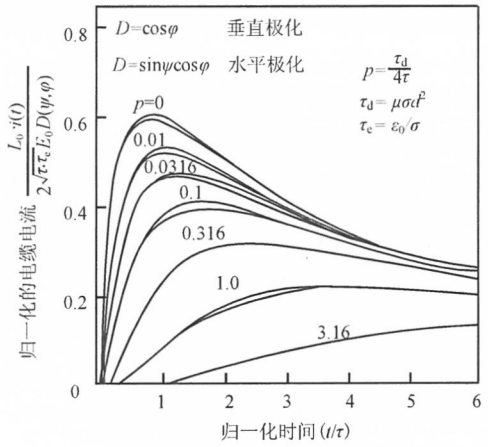


图 154 归一化电流波形与深度参数τ_d的关系(指数脉冲)

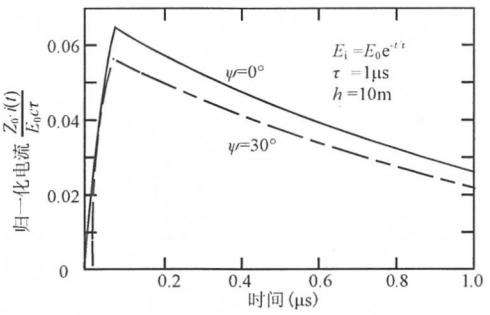


图 155 垂直极化波在垂直结构件底部感应的短路电流

13.3.3 高空电磁脉冲与局部结构的相互作用

13.3.3.1 屏蔽体

入射到封闭屏蔽体上的高空电磁脉冲场会感应出表面电流，并在其外表引起电荷位移。如果屏蔽体是连续的金属(即在表面没有开口和不连续处)，厚度约 1mm，那么高空电磁脉冲在屏蔽体内部电路上引起的感应电流很小，表 49 给出了在 10m 半径的球形屏蔽体内最大单匝环上的感应电压，入射波是峰值为 50kV/m 的指数脉冲，上升时间为几个纳秒，衰减时间常数为 250ns[52]。由表可见，即使屏蔽体壁厚只有 0.2mm，感应电压仍小于 1V，所以用厚度便于加工的普通金属制造屏蔽体，就可以阻止较强的高空电磁脉冲对内部电路的影响。这个结论可能的例外是那些长而细的屏蔽体，例如内部电缆上的屏蔽体。

表 49 由散射产生的屏蔽作用

屏蔽层厚度 mm	环内感应电压		
	铜 5.8×10^7S/m	铝 3.7×10^7S/m	钢 6×10^6S/m，$\mu_r=200$
0.2	0.34V	0.85V	0.076V
1.0	2.6mV	6.4mV	1.1mV
5.0	21.0μV	51.0μV	15.0μV

13.3.3.2 贯穿导体

如图 156 所示，一些贯穿屏蔽体的导体，例如电源线和信号线，可能把很大的电流和电压传到内部电路。在靠近屏蔽体内外两侧导线上电流的大小几乎相等，即此处对导线的屏蔽为 0dB。高频时，导线和屏蔽体之间的电容可以使导线中电流有所衰减，但这种情况在 $Z_L>>1/j\omega C$ 的频率下几乎已不起作用。这里 C 是导线与屏蔽层之间的电容，Z_L 是导线负载阻抗。当 $C=10pF$，$Z_L=200\Omega$，$f=800MHz$ 时，分布电容引入的衰减量为 6dB。所以，对于高空电磁脉冲主要应考虑贯通导体，因为它很容易将高空电磁脉冲感应波引入屏蔽室内。如上面所讨论和图 156 所示，屏蔽体对入射电磁波的屏蔽是有效的，但对穿过屏蔽体的绝缘贯通导体上传导的电磁波几乎没有影响。

13.3.3.3 孔缝

外部高空电磁脉冲的感应场可由屏蔽体的孔缝窜入，与其内部的导线或其他导体相互作用，如图 157 所示。与表面电荷密度($q=\varepsilon_0 E_n$)相关的外部法向电场 E_n，能在内部电缆上感应电荷，如图 157 a)所示。与表面电流密度相同幅值的外部切向磁场 H_t，能穿过孔缝与内部电路发生作用，如图 157 b)所示。由于电场感应电流正比于 dE_n/dt，磁场感应电压正比于 dH_t/d_t。所以孔缝耦合主要发生在高空电磁脉冲感应瞬间的快速变化部分，或是高频部分。与其他外部干扰源相比，高空电磁脉冲的作用，其上升率起着主导地位，这一结论无疑是很重要的。

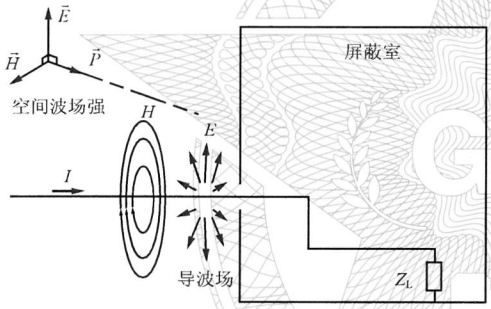


图 156 屏蔽室隔离电磁场

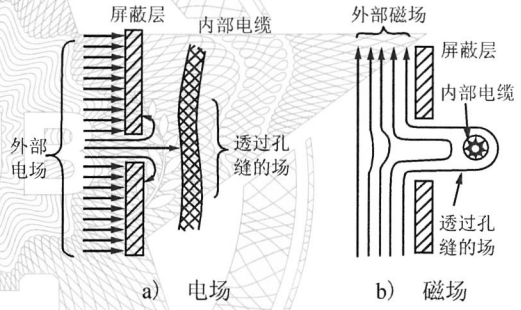


图 157 电磁场由小孔穿入

例如，一个变化率为 $10^{11}A/(m\cdot s)$的外部磁场，穿过半径为 5cm 的圆孔时，感应的最大开路电压超过 600V。上述磁场变化率就是高空电磁脉冲的特性，而且分析感应电压时认为受感应导线刚好直接穿过屏蔽体孔缝的内侧。因此，在分析高空电磁脉冲作用时，孔缝耦合是需要考虑的重要内容。设备屏蔽体上的孔缝有许多形式，它们可以是敞开的门和窗或屏蔽体中铆接和螺栓连接的不连续部分。

13.4 高空电磁脉冲的防护

13.4.1 概述

在防护设计时，有一个很重要的内容要加以考虑，即估算出高空电磁脉冲防护所要增加的费用。对高空电磁脉冲防护必然会增加设备成本，而增加成本需要确保设备经受得住高空电磁脉冲。这就意味着：(1)对高空电磁脉冲的防护能够经受检验；(2)这种防护在设备整个寿命期内要能够保持和维护。若防护设计得难以检验或维护，这种防护的价值就不大。当高空电磁脉冲在设备内部所感应的电应力大到足以引起寄生闪络和其他绝缘击穿现象时，这种防护就难以检验。若防护质量取决于设备所用材料，而材料电磁性质不明或不能控制时，也难以检验。最后，如果应检测的参数项目很多，防护能力的检验将是困难的。例如，如果高空电磁脉冲在设备内部深处感应的电应力很大，则需要评估的参数就很多，如系统的状态参数、激励模式和应力波形等。

由于和平时期不常发生高空电磁脉冲，设备平时的运行状态难以明显地显示出防护措施的降级情况。因此，高空电磁脉冲防护措施的永久性具有重要意义。防护不能因为设施的正常使用和维护而降级。防护不能依赖特殊配置来控制，应适应设备日后的改进和完善。防护用的关键元件数目要少，而且要可

接近和可检测。

通信设施对高空电磁脉冲的典型防护措施，是在设施外面建立一个封闭的高空电磁脉冲屏障。这个屏障由阻止空间入射波的屏蔽体和各种屏蔽元件(用于必需的贯通导体以及人和设备所要求的出入口)组成。为确定防护措施性能而应做出评估的贯通导线、孔缝和其他特征点的数目要尽可能少。另外，对防护应确定的系统状态的数量或配置需要给予关注。防护单元的耐用性和可接近性也是重要的考虑因素。

下面给出基本的高空电磁脉冲防护原理和设计要求，更详细的设计要求可参考 GJB 3622 通信和指挥自动化地面设施对高空核电磁脉冲的防护要求。

13.4.2　高空电磁脉冲屏蔽层

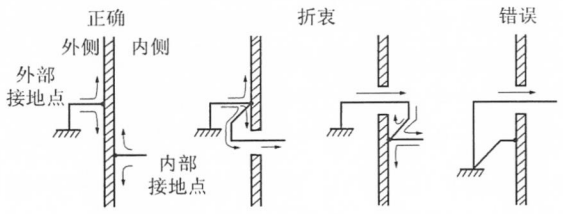
13.4.2.1　屏蔽体

用于防高空电磁脉冲的设施屏蔽体，大多用薄钢板焊接加工而成，其厚度通常按加工方便选择，但是需要考虑机械加工余量、机械强度以及可加工性。屏蔽体组装的典型办法是用连续的熔焊、钎焊或其他熔接金属的办法，以减少屏蔽体中不连续处的数量(认为焊接或其他熔接方法是连续金属)。

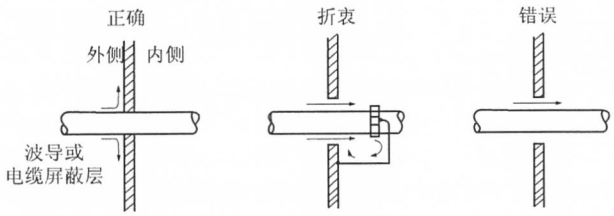
13.4.2.2　贯穿导体

有关贯通导体处理的方法见图 158。能够接地的贯通导体，例如管道、波导、接地电缆和屏蔽电缆等，都应采用四周熔焊或采用夹箍、套筒等方法，将它们搭接在屏蔽体入口处的壁板上。把贯通导体搭接到屏蔽体上时，应尽量少出现或不出现不连续。

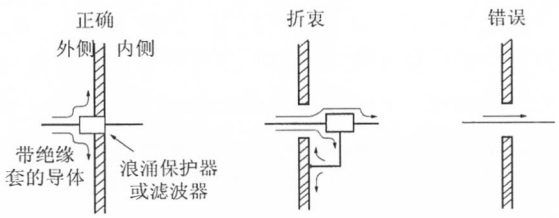
凡不必穿过屏蔽体的信号线和电源线，都不应穿过屏蔽体。一定要穿过屏蔽体的信号线和电源线，应加装滤波器或浪涌保护器等防护元件，以便把电源线或信号线上高于阈值的电压或通带之外的干扰加以抑制。



a)　接地导体



b)　可以接地的导体



c)　带隔离的导体

图 158　载有外部干扰的导体在屏蔽壁上的接地

13.4.2.3　孔缝

屏蔽体中不应有不必要的孔洞和不连续处。操作人员出入通道及设备加载和通风所必需的孔洞，设计时应限制电磁场的渗入。用于通风采光的孔洞，可在上面覆盖屏蔽网或蜂窝状截止波导，以减少高空电磁脉冲波的穿透，如图 159 所示。经常出入的地方，可以使用两端带门的截止波导式通道(如没有门，高空电磁脉冲频谱中最高端的那些频率就会经过这样的行人通道进入屏蔽室)。如有可能，屏蔽体上的不连续处都要用熔焊或类似的方法处理。设备安装和维修所必需的孔洞，应用可靠的搭接技术进行电磁密封，例如用导电衬垫或小间距排列的螺栓。基本不用的出入口，可以焊死。大型货运门，对屏蔽的完整性影响很大，难以实现有效和持久的密封。

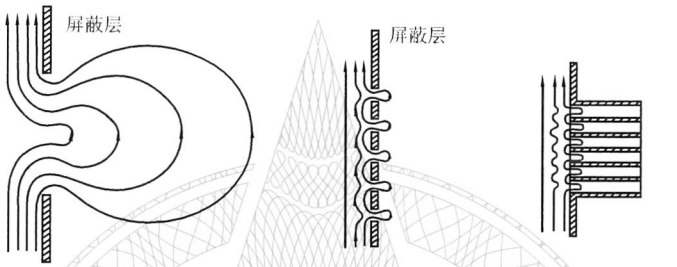


图 159　孔口的电磁场防护

13.4.3　防护配置

13.4.3.1　防护量值的确定

防护量值的大小在某种程度上取决于对系统失效的定义。对于通信设施，失效阈值或可接受的最低性能可以用允许的最大停机时间或出错率来表征。在某些情况下，基本要求是系统本身不被损坏，以便在遭受高空电磁脉冲之后能重新启动并恢复工作。系统失效的定义或操作要求，都应在系统技术条件中明确规定。除高空电磁脉冲以外，防护量值还受制于许多其他因素。

在确定高空电磁脉冲防护量值时，重要的是给设施或设施中的设备规定瞬态承受能力和敏感电平。要尽可能把瞬变电应力限制在不影响设备性能的量值以下。零应力当然满足这个规定，但是，还可以找到一些更实际的量值。例如，设备允许的信号工作电平及设施在和平时期允许的内部瞬变电应力。这两个值很有参考价值，如果高空电磁脉冲感应的电应力低于任意一个，它就不会引起设备的故障。

根据和平时期已知的实际允差值来确定设备或内部电路的阈值，有以下几个优点：

a)　设备的瞬态承受能力是已知的。高空电磁脉冲防护，只需要把高空电磁脉冲引起的瞬变电应力值降低到这个已知的承受能力以下。

b)　不必确定设备内部的电路或结构元件对高空电磁脉冲的响应，这样就大大减少了加固检验和维护的复杂性。

c)　可将有关高空电磁脉冲防护的所有要求归入设施的屏蔽，这样对内部配置的控制和内部状态的考虑就可简化。

13.4.3.2　设置防护的场所

如前所述，高空电磁脉冲防护应设计加固检验程序。为便于检验，所检测的数目和保证防护完整性的假设条件应尽可能少。例如，假设设施有 100 对电缆与网络的其他部分相连，由于终端的不平衡和非线性，对设施屏蔽电缆的贯通评定时，双线电应力和敏感值有 200^2 个。在设备内部，200 条线缆可能要分别接到 1000 条或更多的支线和设备终端上。于是，一旦高空电磁脉冲在屏蔽内部感应的电应力大于和平时期的已知应力值，那么就要检验 1000^2 个应力和敏感值(其中有部分可能无关大局而不需评定)。另外，在后一种情况下，对 1000 条线和其他内部电路之间的相互干扰也应做出评定(或假设不重要)。通常，要评定的防护特性数目和必要的假设条件数目，都随着加固检验在系统中的深入程度而增加。因

此，如果防护高空电磁脉冲对于一些设施很有价值(即确认防护是重要的)，那么采取系统级的防护措施便足以使防护圈内的高空电磁脉冲所感应的电应力值不起主要作用。

13.4.3.3 端子防护装置

13.4.3.3.1 概述

高空电磁脉冲主要是通过天线和连接电缆、长的内部连接线和设备间电缆以及电源线传播。天线和连接电缆，特别是其连接的通信设备前端要经受非常高的电压和电流时，防护措施或装置不但不能影响设备的工作性能，还应要能承受电磁脉冲感应的瞬变电应力和系统内的其他瞬变电应力。后两个考虑可能使许多防护装置在射频条件下的应用受到严重限制，除非对它们加以改进或与其他部件配合使用。

13.4.3.3.2 火花隙放电器和气体放电管

火花隙放电器是浪涌放电器的早期形式之一。它由一对电极构成，电极间隙以空气或其他气体绝缘。当电压超过某一值时，气隙被击穿。绝缘气体的压力，从几十到几百千帕；碳棒电极的间距可以从几毫米到上十厘米(电力设备的大型浪涌保护器)。击穿电压从 1kV 左右到几百千伏(用于大型浪涌保护器)。大型火花隙放电器能承受大量电荷(若干库仑)的泄放。在非导通状态，气隙呈开路或小电容特性，其击穿电压随施加电压上升速率的增加而增加。因此，对于电磁脉冲感应电压的上升速率，其击穿电压比静态击穿电压要大几倍。当火花隙放电器用于供电线路时，应采取一些可靠的灭弧措施。通常将金属氧化物压敏电阻器与火花隙放电器串联使用，以保证在浪涌之后灭弧。

气体放电管是充有低压气体的放电器，因此可以获得较低的击穿电压。击穿电压低于 100V 的气体放电管可在市场上买到。与火花隙放电器相比。它的峰值电流和电荷泄放能力受到较大的限制。气体放电管主要用于由外部屏蔽长电缆引入设施的线对、或设施内部裸露线对的二次防护。采用平衡双线型式效果较好，因为放电初期产生的电离使放电管两极之间导通后线路的不平衡可减到最小。在同轴线(例如天线馈电电缆)上采用同轴型放电管比较有效。气体放电管的极间电容小，在非导通状态下几乎没有损耗。当线路阻抗把放电电流限制在 100mA 以下时，会发生辉光放电，此时放电管端电压约为 100V。当放电电流加大时，会发生电弧现象。此时，放电管的端电压约为 10V～20V。所以气体放电管不能单独用在供电线路上，否则它会始终处于电弧和辉光放电状态。

火花隙放电器和气体放电管在击穿点上呈现负动态阻抗，即这些放电装置的端电压将随着放电电流增加而下降。火花隙放电器和气体放电器的这种特性，往往会在被防护线路中引起难以预测的不稳定性。另外，放电电压和电流的突变，还可能激励被保护电路。建议在放电装置与被防护电路之间设置线性滤波器，以减小负动态阻抗及其激励作用的影响。

13.4.3.3.3 金属氧化物压敏电阻器

如果金属氧化物压敏电阻器封装、安装得好，使端子引线电感最小，则其分流能力可达数十千安，因此它能有效地抑制上升速率很高的瞬态干扰。尽管金属氧化物压敏电阻器是非线性的，但不像火花隙放电器和气体放电管那样有负动态阻抗和激励特性。金属氧化物压敏电阻器的非线性可能在射频电路中产生互调效应。当外加电压降到金属氧化物压敏电阻器伏－安特性曲线转折点以下时，它就不再导通，不存在电流熄火的问题，用以保护供电线路是理想的。一般说来，金属氧化物压敏电阻器用在保护电路中，将增加几毫微法并联电容和几兆欧并联电阻，所以在高频或高阻抗电路中使用金属氧化物压敏电阻器要特别注意。大型金属氧化物压敏电阻器可耗散几十千焦耳能量。如果耗散能量恰好大于失效阈值，金属氧化物压敏电阻器常常因为短路或低阻抗而失效。然而当能量远大于失效阈值时，金属氧化物压敏电阻器可能造成物理损坏，甚至爆炸毁坏。

13.4.3.3.4 半导体保护器件

一些雪崩器件用作浪涌限制器是有效的。半导体器件与金属氧化物压敏变阻器、气体放电管相比，它适用于较低的电压(约 1V～100V)。但是，半导体器件不如其他器件能耐受大的峰值电流和高的能量。峰值电流的额定值在 100A 以下比较适用。因为半导体器件本身可能被外部电线和电缆引入的瞬变电应力损坏，所以不推荐作设施级使用，仅用于设施内部的设备，或已屏蔽的设施内部的线路。半导体器件会把几个毫微法的电容并联到被保护的电路上，而且可能加剧互调现象。

13.4.3.3.5　滤波器

线性滤波器也可用在贯通导线上作隔离单元，但在外部(设施级)屏蔽体上，滤波器往往与浪涌限制器组合使用。例如，在电源线上，线性滤波器通常承受不了峰值电压，所以先用火花隙放电器限制电压，再由滤波器起隔离作用，使内部电路不受负动态阻抗及其激励作用的影响。滤波器的输入并联电容会降低电压上升速率，使浪涌抑制器的击穿电压有所降低。用于电源线和信号线防护的滤波器有低通、带通和高通等多种型式。

13.4.3.4　贯穿设施屏蔽层的波导

13.4.3.4.1　概述

像其他外部导体贯穿设施屏蔽体一样，如果波导与屏蔽体的连接处理的不连续，那么瞬变干扰就能进入设施，如图 160 所示。最理想的情况是在波导进入设施屏蔽体的入口处使波导或波导组合件的四周与设施屏蔽体实现连续接触。那么，波导表面的所有电流都将沿屏蔽体外表面流动。此时，外界瞬变干扰只能经波导或设施壁扩散到内部。

实际上，为使波导和屏蔽体之间连续接触，可以把波导熔焊或钎焊到屏蔽壁上，图 161 给出了把波导的馈通部分安装在屏蔽壁上(焊接或螺栓连接)的两种方式。在这两种方式中，所用波导都带有法兰接头，这样，波导内部信号通过屏蔽壁传输，但外部瞬变干扰则被控制于设施之外。这种处理波导的方法只需将波导馈通部分永久地与屏蔽体壁连接，所以允许在设施内部和外部的波导管敷设工程中采用柔性连接。

微波接收系统的工作信号很小，不希望在连接处有零点几分贝的损耗或是由于焊接变形而增加损耗。虽然焊接变形可以用机械加工或改进焊接工艺加以改善，但在不允许存在这类损耗的地方，还要用另外一些连接方式，下面介绍其中的两种。尽管这些方法的使用效果令人满意，一般不会出现不平整的地方，但与图 161 所示的焊接馈通段相比，对腐蚀和其他降级更为敏感。

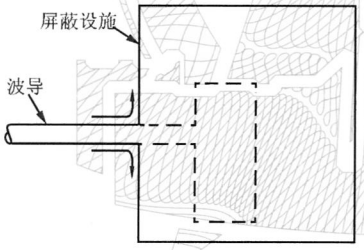


图 160　防止波导管电流进入设施内部

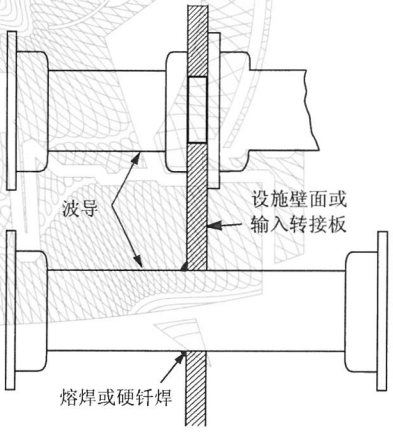


图 161　波导管馈通安装

13.4.3.4.2　波导的准直连接

13.4.3.4.2.1　概述

波导与屏蔽体相连时，若不用馈通段或连接法兰连接则要求准直连接。准直连接不太方便，因为波导在设施上的馈入孔口定位应非常精确，才能保证内部设备上的波导端口与外部波导端口对准。另外，壁孔应足够大以便波导法兰贯通后再利用附加装置对通孔作有效密封处理。最后附加装置应能适应波导管与安装孔的非重合性。如要保证波导内部的光洁度，就不能采用可能引起变形和损伤的熔焊或硬钎焊，而只能采用软钎焊、汞润和夹箍等办法使附加装置与波导实现电连接。凡在承受雷电或电源故障电流的通道上，都不准采用软钎焊进行搭接。下面的方法可将波导或电缆搭接至所选定的射频屏蔽体、阻挡层或入口板上。

13.4.3.4.2.2　套筒和波纹管连接

用紧配合套筒套于波导上，实现波导连接，如图 162 所示。套筒在波导终端配件安装前安装在波导上；如用对开套筒，则可随时安装套筒。推荐用低熔点的铅锡合金将套筒焊接在波导上。对于对开套筒，可能必需用夹箍提供机械支撑，如图 162 所示。使用对开套筒时，套筒与波导不进行软钎焊，仅用夹箍也满足电性能要求，但应保证套筒和波导表面清洁，且应在装配过程中保持表面清洁。为防止波导受夹变形，建议在夹箍和套筒之间垫入氯丁橡胶或其他弹性衬垫。套筒的法兰、波纹管及其法兰可焊接在一起，焊接过程中不应损坏波导。具体设计细节可不同，但如果在波导组件安装后现场安装波纹管组件，则波纹管及其法兰应足够大，以便波导法兰贯穿。

13.4.3.4.2.3　编织线套

使用编织线套效果虽然差些，但是它能与波导较好地接触，如图 163 所示。编织线套形成的细颈用软钎焊与波导管焊在一起，然后呈喇叭状扩展，套在设施屏蔽壁的法兰颈圈上。法兰颈圈与屏蔽壁要用钎焊或熔焊。为了增强机械强度，这两处都用了软管夹箍和衬垫。跟前面的刚性套筒一样，如果不能使用钎焊，只用夹箍也行。不过，编织网和波导在安装前后同样要保持清洁。

编织套口径一定要扩大，以便于波导末端接头穿过(除非在接头之前编织套就装好)。另外，希望编织套的覆盖率不能低于 85%，这对编织套的要求非常高，因为套口张得越开，覆盖率越低。

采用波纹管和编织套时，在设施屏蔽壁内部应有机械连接装置，以便安装防风雨的护罩或密封装置，防止潮气或其他外部物质进入。

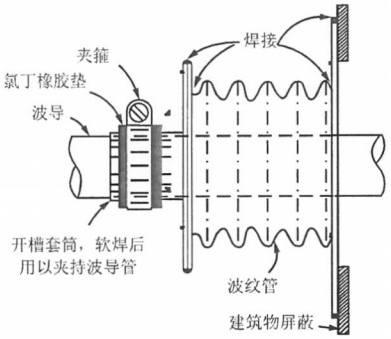


图 162　波导管用带开槽套筒的波纹管安装

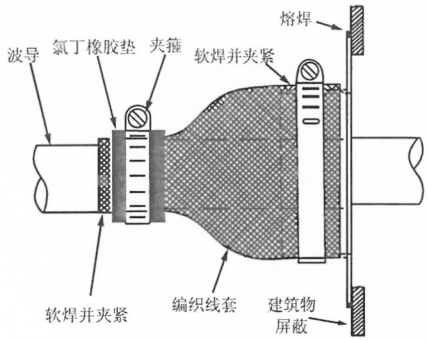
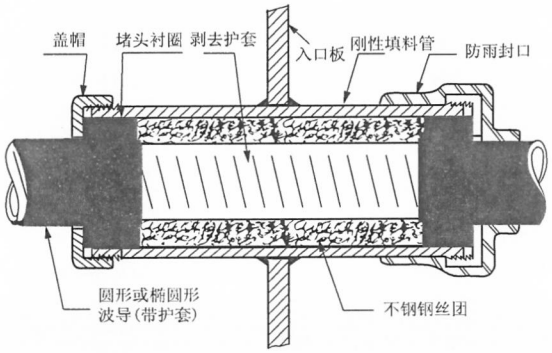


图 163　波导管用编织线套夹持

13.4.3.4.2.4　波导填料管

这个方法如图 164 所示，把高度压缩的不锈钢丝棉置于刚性填料管和波导之间实施连接。填料管应在堵头安装之前装在波导外面，然后用盖帽把钢丝棉压紧，这样，既可防潮也可防腐。在完成气候防护处理之后，刚性波导填料管应用熔焊或硬钎焊搭接到入口板或设施的屏蔽壁上。



注 1：不锈钢丝团借助堵头压紧；

注 2：不锈钢丝团和波导表面经防腐处理。

图 164　利用填料管安装波导管

14　高功率微波(HPM)及其加固技术

14.1　HPM 概述

高功率微波是由可产生高功率或高能量密度的微波源(武器)产生的强电磁辐射，HPM 源的工作频率通常在100MHz～300GHz之间，脉冲峰值功率在100MW以上(一般大于1GW)或平均功率大于1MW。

高功率微波环境属于高功率电磁环境。由于有的脉冲波形并没有准确的中心频率，文献[53]中依据带比对高功率电磁环境进行分类。带比定义为包含 90%能量谱的最高频率与最低频率之比。高功率电磁环境依据带比的分类见表 50。

表 50　高功率电磁环境依据带比的分类

名称	带比
亚宽带或窄带 (hypoband or narrowband)	$B_r \leqslant 1.01$
中宽带(mesoband)	$1.01 < B_r \leqslant 3$
极宽带(sub-hyperband)	$3 < B_r \leqslant 10$
超宽带(hyperband)	$B_r > 10$

典型的窄带高功率电磁环境信号的带比 $B_r \leqslant 1.011\%$，脉冲持续时间从百纳秒到微秒数量级。一个频率为 1GHz、具有 20 个振荡周期的窄带高功率电磁环境的归一化电场时域波形及其频谱示意图见图 165。从图 165 可知，该信号几乎是单一频率。窄带高功率电磁信号包括正弦信号的脉冲调制，还可能是具有频率捷变的窄带信号。窄带高功率电磁环境信号通常具有很高的功率和能量，且电磁能量集中在很窄的频带内，在单一频率上的场强很容易达到每米上千伏。如果信号频率与电子系统的谐振频率相一致，可对电子系统造成永久性的损坏[53]。

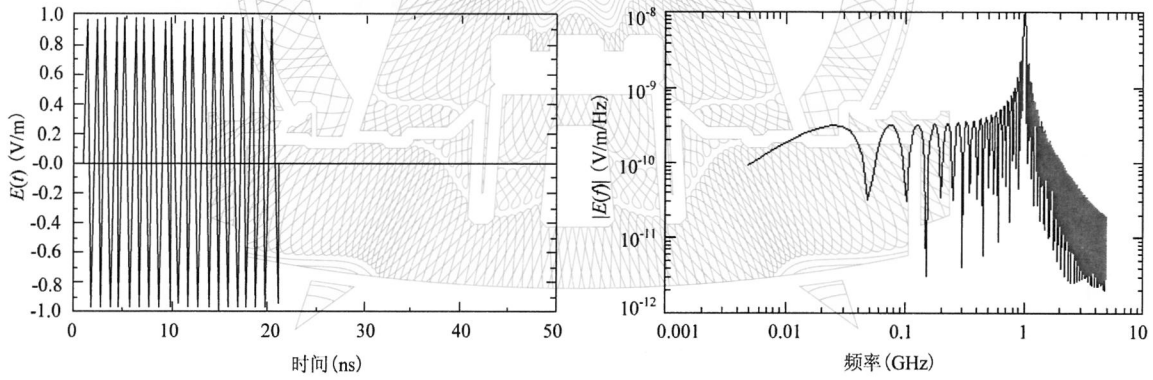


图 165　窄带高功率电磁环境信号的归一化电场时域波形及其频谱

一个 1GHz 的单一脉冲的归一化电场时域波形及其频谱示意图见图 166，信号的最大幅值出现在840MHz，带宽为 900MHz。对于宽带高功率电磁环境，由于时域脉冲能量同时分布在多个频率点上，可能同时激励起电子系统的多个谐振模式，因此更容易对电子系统的性能造成影响。由于单个频率点上的能量密度比窄带高功率电磁环境小得多，对电子系统的效应通常不如窄带高功率电磁环境严重。

依据百分比带宽可将 HPM 源分为窄带和宽带。百分比带宽是带宽与最高和最低频率平均值的比值，用百分比表示。百分比带宽小于 1%的为窄带 HPM 源，百分比带宽大于 1%的为宽带 HPM 源。美国国防部高级研究计划署将 20dB 带宽大于 1.5GHz 或百分比带宽大于 25%的信号定义为超宽带(ultrawideband, UWB)。根据上述定义，UWB 属于宽带 HPM。文献[54]给出了窄带 HPM 和宽带 HPM 辐射源产生的电场环境，见表 51 和表 52。对于窄带 HPM，给出的是距离 HPM 源 1km 处的电场强度，对于宽带 HPM，给出的是距离 HPM 源 100m 处的电场频谱密度。

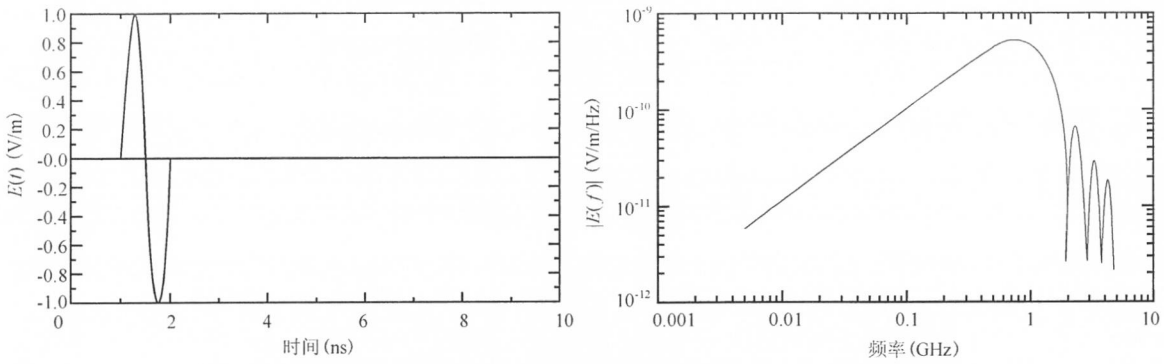


图 166　宽带高功率电磁环境信号的归一化电场时域波形及其频谱

表 51　窄带 HPM 电磁环境

频率范围 MHz	电场强度 kV/m@1km
2000～2700	18.0
3600～4000	22.0
4000～5400	35.0
8500～11000	69.0
14000～18000	12.0
28000～40000	7.5

表 52　宽带 HPM 电磁环境

频率范围 MHz	宽带场强谱 mV/m/MHz@100m
30～150	33000
150～225	7000
225～400	7000
400～700	1330
700～790	1140
790～1000	1050
1000～2000	840
2000～2700	240
2700～3000	80

14.2　HPM 加固策略

HPM 和 HEMP 环境同属高功率电磁环境，防护加固技术的思路有相同之处，例如都会采用屏蔽、滤波和限幅等技术。HPM 与 HEMP 最重要的区别在于二者的频率范围不同，这就决定了它们之间有一定的区别。在防护技术的思路和途径方面相近，而具体要求和实施却不一样。如屏蔽对二者都是重要方法，但间距数厘米的金属网对 HEMP 有相当好的屏蔽效果，而对 HPM 则可能毫无作用。

在进行 HPM 加固设计时还应与系统性能要求和系统在其他环境中的生存能力要求相一致，做到从系统上对电子设备进行保护。这是一个涉及多学科，需全面、系统、均衡考虑问题的新型领域。电子设备加固的方法和思路可以用图 167 来描述。

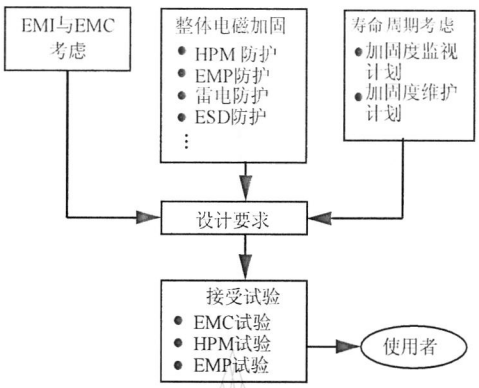


图 167　电子设备 HPM 加固方案

对于一个电子设备系统，一般的加固策略可分为两种：控制耦合，即通过控制天线和后门进入点，或者通过系统设计，采用诸如吸收体、限幅器、滤波器和屏蔽等措施反射或衰减入射的 HPM 场；降低敏感度，即设计足够坚固的子系统和组件，在遭遇 HPM 环境后仍能成功地执行使命。

加固的要素有以下几点：

a)　通过系统功能的分析确定关键组件和耦合通路；

b)　确定适用于系统终端和接口的翻转和损坏的阈值；

c)　确定耦合到这些部位的功率和/或能量的大小；

d)　采用各种加固技术对终端和接口进行防护。

系统的 HPM 加固度也可以通过选择组件和子系统来提高。选择电磁防护性能方面更好的，与系统、系统结构、系统使命等相协调一致的组件和子系统，可降低系统屏蔽、限幅和滤波等加固措施的任务量。

电子设备加固的一般流程参见图 168。首先对 HPM 进行前门加固，这就要求识别所有的前门通路，确定对于每个前门通路设计的带宽和空间接收特性，确定带内保护需要的量值，并在前门通路适当区域增设一个或几个限幅器。后门加固问题从概念来说与 HEMP 加固问题相同。对前门和后门加固的另一要求是将 HPM 加固与对所有其他电磁加固的要求统一考虑。对于所有电磁威胁的加固研究(如分析、实验室实验、样机试验等)应相互紧密协调。

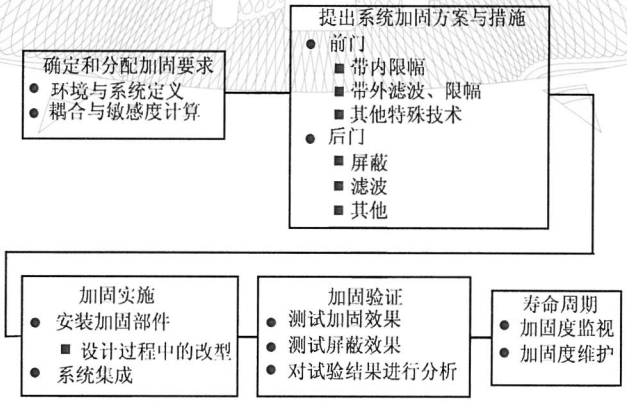


图 168　HPM 加固流程

14.3　HPM 加固技术

14.3.1　前门加固技术

前门加固采用的技术是允许所希望的信号能量进入系统天线和射频部件，而制止或者衰减不希望的 HPM 能量。在各种微波频率上，带内和带上通路倾向于认为是比后门通路更为严重的问题。

对于前门加固来说，有两种基本的方法，一种是限制前门天线或传感器的耦合，即降低进入口的有效面积 A_e；一种是限制耦合能量传播到系统内部，即降低进入口和系统内部敏感组件之间的耦合，采用的技术手段主要是滤波、限幅和隔离。

图 169 表示一个典型的前门通路，加固单元(滤波器和限幅器)设置在接收机的输入端。

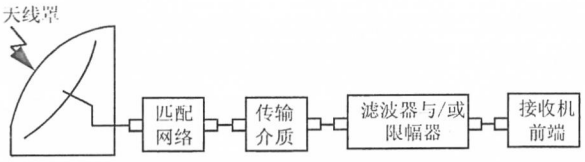


图 169　典型前门通路加固

系统 HPM 前门加固与抗电磁干扰、电子对抗相似，但 HPM 加固更困难，这主要是由于功率密度电平幅度比传统意义上的功率密度高几个数量级，并且 HPM 脉冲的上升时间在 1ns 量级或者更短。这样，HPM 加固不仅要考虑带内攻击还要考虑带外攻击；不仅要考虑超大功率攻击还要考虑“潜行”(保护装置启动前脉冲快速上升部分能量的窜入)攻击。前门加固最实用的方法是综合使用滤波器和限幅器。极化选择、时间选择和空间选择也是备选方法。

HPM 加固设计采用带通滤波器反射和(或)吸收系统工作带宽以外的信号能量。滤波器允许带内信号通过，抑制带外信号。选择 HPM 加固用的滤波器时，需要对其功率处理能力做特别考虑，防止介质击穿。同时还需要在功率处理能力和其他性能之间进行折衷考虑和选择。一般来说，中心频率高的滤波器功率处理能力较低，功率处理能力高的滤波器物理尺寸较大。有些电抗式滤波器在设计通带之外可能还存在高频通带，也称寄生通带。寄生通带可能引起 HPM 高频能量泄露。

在 HPM 加固设计中已经使用的限幅器有半导体限幅器、气体等离子体放电器件、高速微波功率开关和铁氧体限幅器。对实际限幅器而言，当输入功率低于阈值时存在低插损损耗，输出功率略低于输入功率；当输入功率高于限幅器响应幅值时，HPM 脉冲被抑制。当输入功率高于限幅器功率处理能力时，限幅器被损坏，失去保护作用。限幅器的另一个重要特性是对快上升沿信号的响应存在尖峰泄露。

在前门加固设计中常把滤波器和限幅器一起使用。一般来说，把限幅器放在滤波器前面。这样既可以降低滤波器承受的 HPM 能量，又可以经滤波器消除限幅器产生的尖峰泄露。也可以把限幅器和滤波器制作成为一体，例如，把 PIN 二极管或其他非线性器件与滤波器组合在一起形成一种新型的微波限幅滤波器。加固元件应尽可能靠近系统的前端。

14.3.2　后门加固技术

14.3.2.1　概述

后门加固的核心是阻止任何微波能量通过前门以外的其他通道进入系统。针对 HPM 的后门加固技术与电磁兼容性设计和 HEMP 环境的加固技术类似，主要是屏蔽、滤波、接地和搭接，并且要综合采用多种措施。但在具体设计时要考虑微波频率及更高功率电平的特点。屏蔽技术所采用的元器件应具备能工作于微波频率以及经受住与 HPM 有关的峰值场强和能量。

14.3.2.2　屏蔽

对关键的系统和设备可能需要进行分级屏蔽和加固。由于在较低频率下的数据不能精确地外推到微波频率，使用前应对 1GHz 以上的屏蔽性能进行试验摸底；此外，在设计时要注意管线对电磁屏蔽效能的影响，在安装施工时要对周边接缝处的电磁泄露予以高度的重视。

对于导电衬垫，应考虑 HPM 功率电平对衬垫性能的影响。在正常的 EMC 和 EMI 环境中，流过衬垫缝隙的表面电流密度比较小，对衬垫性能的影响较小，甚至不引起衬垫性能降低。某些类型的衬垫在大峰值电流流过接缝之后，可能经受不可逆的变化(例如，转移阻抗增加)。

对于屏蔽电缆，要注意在整条线路上屏蔽的连续性，例如：对于信号转换接口板，一定要采用金属板，另外要保证屏蔽层和壳体在整个圆周上保证 360° 的搭接，不得采用“猪尾式”(将屏蔽层拧成一股线)的连接方式。因为无论多短的“猪尾式”的连接方式，都足以使电缆屏蔽层失去屏蔽效果。

14.3.2.3 贯穿导体的加固

对于 HPM 防护，贯穿导体在进入屏蔽体之前应进行加固处理，常用的加固技术包括使用滤波器、限幅器，进行合理地接地，以及用不带金属铠甲的光纤代替信号传输电缆。

当设计人员考虑采用滤波器对后门 HPM 进行加固时，分为两种情况：

a) 被保护的电路是微波电路(即它使用波导、同轴或微波带状线介质)；

b) 被保护的电路工作在远低于微波波段的频率和带宽，并且大部分由集总元件组成。

对于情况 a)，后门滤波的要求除了功率处理要求可以大大降低之外，与前门通道的要求有点相似。对于情况 b)，可以采用低通有耗滤波器。这种有耗特征是在滤波器的引线和引线连接器上使用铁磁材料或其他有耗材料所得到的。对于 HPM 加固，可以使用铁磁材料制作的分布元件滤波器，也可以在同轴电缆介质中掺入铁磁材料，设计成有耗介质同轴电缆。

如果在后门通道采用限幅器，要注意那些在低于微波频率下有用的限幅器对于微波的应用一般是无效的，用于雷电和 HEMP 防护的气体放电管，对于 HPM 脉冲抑制可能几乎不起任何作用。用于这种快速上升脉冲有效的限幅器，引线长度应尽可能短。此外，很多的限幅器(压敏电阻和雪崩结器件)可能有过大的分布电容，这会导致在没有 HPM 脉冲时系统性能的降低。PIN 二极管限幅器是后门加固可用的限幅器，它可以设计成波导、同轴或微带结构。

采用光纤传输信号时需要考虑：一是光纤机械强度差，需要保护；二是光纤中传输的是光信号，需要对电信号进行电－光转换，而实现这一转换的电路又有 HPM 加固问题。

15 新设施设计准则

15.1 概述

新设施指的是一种新建造的，或者虽为现有的、但主体部分需进行更新或主要设备需重新配置的设施。即使是现有设施中的非主要设备重新配置，设计人员也应规定其接地要求(见第 16 章)。本章详细介绍新设施中有关接地、搭接和屏蔽的设计、安装实施和试验、验收程序，主要包括：

a) 大地电极分系统；

b) 故障保护分系统；

c) 雷电防护分系统；

d) 信号参考分系统；

e) 搭接；

f) 屏蔽。

此外，本章还涉及到其他一些内容，如：安全信息传输设施的要求(15.6)；设施中共模噪声抑制和仪表安装(15.9)；电磁脉冲防护的结构实施(15.10)；军用移动设施战术接地要求(15.11)；栅栏的安装、接地要求(15.12)；以及新设施的验收和试验程序(15.13)。

除了提供足够的电源系统故障保护、电磁脉冲和雷电防护之外，为了获得电子设备的最佳性能和确保人身安全，应对建筑物的接地系统、必要的搭接点及其施工方法、以及建筑物的屏蔽作全面考虑。对新设施来说，上述每一方面的要求都应予以规定，并提出适当的设计步骤，以确保将必要的措施落实在最终的结构施工和设备安装之中。

15.2 大地电极分系统

15.2.1 概述

大地电极分系统建立了设施和大地之间的电气连接。这种连接对于雷电防护、电源保护以及减少互连设施之间的噪声是必需的。该系统应根据场地而设计，体现场地的特征和设施的要求。电子系统的性能和大地接地电阻之间的相互关系不是很明确。在 1.2.3.1 a) 中推荐的 10Ω 大地电极电阻值，代表了故障和雷电防护整体要求与典型环境中获得此电阻的相对估算成本之间的一种折衷方案。在土壤电阻率高的地方，获得 10Ω 电阻值的代价是昂贵的。在这些地方应对现场进行全面鉴别后考虑设施的平面布置

要求，然后根据土壤的条件、相对成本等等，选择最佳折衷方案。

应正确地装配大地电极分系统，并采取措施保证在结构物的全寿命期始终保持低电阻连接。为了达到这些目的，首先应测定场地的电气和物理性能；其次是设计适合该场地的大地电极分系统；第三，应按推荐的程序装配此分系统；最后测量分系统的大地电阻，以验证它是否符合要求或设计规范。

15.2.2 场地参数的勘测

15.2.2.1 概述

在设计开始之前，对要安装大地电极分系统的场地进行勘测，通过这种勘测，确定土壤的电阻率、查明主要的地理特征、收集可能影响分系统设计的有关建筑和地貌特征以及当地的气候条件。如有可能，在最后场地选定之前再进行一次勘测，避开接地特别困难的位置。

15.2.2.2 土壤电阻率

作为场地勘测的第一步，应在打算布置设施的区域内选几个点测量土壤的电阻率。即使最小的设施，就电极分系统而论，设施的有效面积至少为 15m×15m。对于较大设施，设施的有效范围至少应超过建筑物地基或结构物(即地板平面、变电站栅栏、塔的基座、变压器室等)的外廓 6m。了解大地电极分系统所覆盖或涉及的上述区域内的土壤电阻率是必要的。土壤电阻率的测量步骤如下：

a) 采用四电极法按下列步骤测量土壤电阻率。在场地中心附近的地点，按图 170 中说明，将大地电阻测试装置的 4 个电极成直线插入土壤中。建议的合适电极间距 a 为 6m～9m。如果测试装置未配备电极，可采用直径为 6mm～10mm，长度为 30cm～46cm 的 4 根金属棒(钢、铜或铝棒)代替，并根据金属棒的直径在其顶部钻孔、攻丝，再将测试装置的引线紧固到金属棒上。也可用夹子把引线连到接地棒。

   1) 用测试装置测得电阻 R。

   2) 由式(196)计算电阻率(Ω·cm)：

$$\rho=6.28aR \quad \cdots\cdots(196)$$

   式中：

   a ——电极间距，cm；

   R ——测试装置的电阻读数，Ω。

   例如：设电极间距 a 为 610cm 时，测得电阻 R 为 2Ω。

   由式(197)计算电阻率(Ω·cm)：

$$\rho=6.28\times610\times2=7662\Omega\cdot\text{cm} \quad \cdots\cdots(197)$$

b) 得出最接近试验地区内土壤平均电阻率的读数。为绘制场地的电阻率分布图，就需要在整个测绘区域内的许多采样点重复上述程序。225m^2 以下的小场地，在场地中心至少进行 1 次测量，并在 15m×15m 的 4 个角落上每一处至少进行 1 次测量，如图 171 所示。在所示位置上打入标桩或标识。应使标桩或标识位于电极中间，将电位和电流电极排成一直线。在每一位置上进行电阻测量，并按上面 a)第 2)步计算电阻率。取 5 个读数的平均值作为场地土壤的电阻率。如有可能，应在正常气候条件下进行土壤测量，不能在下雨或雷电后立即进行测量。

c) 对于较大的场地，在整个场地区域内每隔 30m～50m 进行测量，包括场地内有支撑结构的地方。如变压器台架、塔、机动发电机等地点。选择足够数目的试验点，以反映整个区域内土壤成分的相对一致性。应特别注意那些土壤电阻率很高或很低的局部区域。

15.2.2.3 地理影响

查明场地的主要地理特征，特别应设法确定下列内容：

a) 主要土壤类型的分布图见 5.3.2，包括砂土和砂砾沉积的位置；

b) 主要岩石结构；

c) 是否存在水源，包括地下潜流；

d) 地下水位深度。

通过试验钻孔、当地地质图的分析，并访问当地建筑界专家、井位钻探人员和其他当地人员的办法收集所需要的资料。

鉴别上述各方面所提供的资料，弄清对设施大地电极分系统的设计和装配可能有影响的、特别复杂或特别有用的特性。

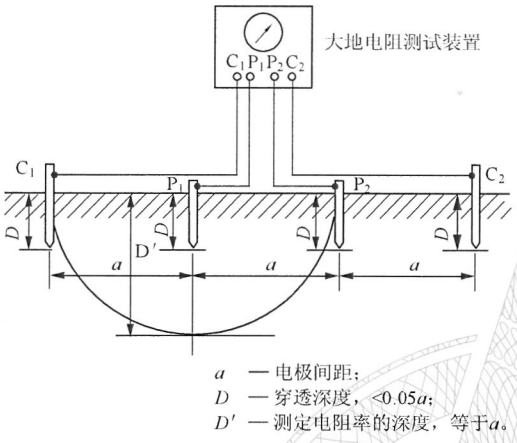


图 170　土壤电阻率的测量

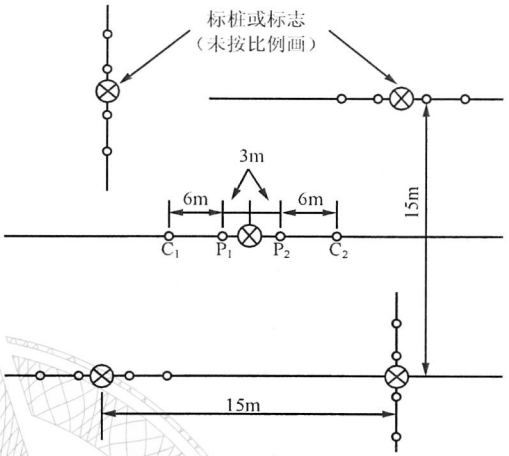


图 171　小场地电阻率的测量

15.2.2.4　物理特征

应确定和识别可能影响大地电极分系统的总体配置、试验和进出口的位置、物理防护要求等物理特征以及材料和安装成本。为此，在场地总体规划上需反映：

a）　所设计的建筑物或结构物的外廓尺寸；

b）　所铺设的道路和停车场的位置；

c）　下水道(天然的和人工的)位置；

d）　埋设的金属物体(如水管和水箱)的位置。

15.2.2.5　当地气候

应查明当地的气候特征：

a）　调查当地气候条件，并且确定年度降雨量和季节降雨分布、雷电的相对发生率、以及该地区内的典型冻结冰冻线深度。从当地气象站获得降雨量和冰冻线的资料。根据图 41 和图 42 的年平均雷暴日图可以预估雷电相对发生率。

b）　将上述数据记入设施场地档案，以供设施的大地电极分系统设计时使用。

15.2.3　设计程序

15.2.3.1　电极配置的选择

确定最适合于设施(综合设备、建筑物、结构物、变压器台架和配电站等等)的大地电极分系统型式，通常采用环形接地系统。如果不采用这种配置，满足这些要求的其他配置在 15.2.3.3 中介绍。

首先，确定大地电极分系统需要满足的主要功能要求。针对雷电，在雷电高发地区或极易遭受雷击的地区(见 6.4)内设置的设施，其大地电极分系统应安全耗散雷电能量而不致熔化导体或使土壤过热(见 5.8.2.3)。在有人员活动的区域，大地电极分系统还应减小跨步电压。关于脉冲性能和射频阻抗特性，如果大地电极分系统还兼作天线的地网，它就应具有低的射频阻抗。关于移动性，可移动的设施或临时移动的设施一般无需装配延伸式的固定电极分系统。对于这种设施，仅需配备一个能够提供可接受的最低雷电防护和人身保护的基本接地系统(见 15.11)。关于电阻，在固定的通讯电子设施中，大地电极分系统对地可呈现 10Ω 或更小的电阻。如果采用环形的接地系统，获得 10Ω 电阻较困难时，可考虑其他方法。安装后在 12 个月内每隔 3 个月用电位降法测量一次电阻。一年之后，每隔 21 个月测量一次。

其次，评定当地条件：

a) 土壤电阻率：土壤的电阻率通常分为低（＜50Ω·m）、中（50Ω·m～200Ω·m）、高（＞200Ω·m）三类。土壤电阻率越高，达到10Ω接地电阻的电极分系统越复杂，且代价越高。

b) 湿度：地下水位是靠近地表还是在地下深层，以及季节变化影响的大小，这些因素对接地电阻极为重要。所以设计大地电极分系统时，应尽可能使大地电极分系统与全年持续湿润的土壤形成并保持接触，最好穿透固定的地下水位。

c) 冰冻线：土壤电阻率在0℃以下将急剧增加（见5.3.3）。所以，为了使电极电阻尽可能稳定，大地电极分系统应穿透很深的土壤层，使接地棒始终与不冻的土壤保持接触。本章所叙述的大地接地技术不能直接用于永久冻土层。在永久冻土层中，故障保护应利用导线与变压器或发电机的地线直接连接，才能确保构成返回变压器或发电机的回流通路。在永久冻土层中，人体防护则更加强调应将所有可能与人接触的金属物体连接在一起，并将它们连接至第7章所叙述的电源系统的地线上。由于永久冻土层的电阻高，大地的杂散电流很小，与设施电源频率有关的噪声也相应减少（见5.1.4）。当存在与大地电流有关的噪声时，可采取9.4叙述的共模抑制措施。

d) 岩层：地面表层附近若以岩层为主，或岩层大到足以影响大地电极分系统的设计和布置，那么，在浅岩层区域就不能再采用垂直接地棒，而应采用水平格栅、接地导线或平板。遇到大的露头岩或次表层漂砾岩，则需改变导体路径，即改变接地棒的排列方向。无需在岩石上钻孔，因为岩石的电阻率非常高。一般而言，在岩石上埋接地棒或接地导线是无效的。

e) 建筑布置：设计电极分系统，应使它基本上不受围墙和檐口气候遮蔽效应的影响。雷电引下线的布置和路径往往受建筑方面的影响。应为引下线就近提供合适的连接点，并设计符合防雷要求的电极分系统。可在引下线附近安排接地分系统中地网电缆的通路，以免引下线和有效接地点之间的电缆延伸太长。配置电极分系统时，应便于大地电极分系统与设施内的电源接地导体及信号接地系统的引出端进行连接。

f) 地貌特征：在草皮地面或长满草木的地面之下设置大地电极分系统的导体较为有利。设置导体应充分利用屋顶及停车场等流水或排水路径的润湿效应，尽可能避免把大地电极分系统的主要部分布置在道路及停车场延伸的铺砌区。

然后，参照表53中给出的相对优缺点，选择最适合建筑场地的基本电极类型，以满足设施的功能要求。

最后，根据电极分系统的不同配置，估算满足要求的相对成本，其中包括材料成本、装配成本、以及维修和加固改进的成本。

表53　典型大地电极的相对优缺点

类型	优点	缺点
环形接地电极	能直接进行设计，易于装配（特别是围绕某一现有设施），附件易于买到，能延伸到地下水面	大岩层靠近地表时不适用
水平裸线（辐射状）	对不能使用垂直接地棒的岩石结构，能获得低电阻，低瞬态阻抗。当呈星状敷设时是较好的射频地网	在土壤干燥时电阻容易受土壤干燥程度的影响而发生变化
水平格栅（裸线）	表面电位梯度最小。如果在施工之前进行，能直接装配。当岩层上不能使用垂直接地棒时能获得低电阻接触。与垂直接地棒组合能稳定电阻值	如果不采用垂直接地棒，在土壤干燥时电阻容易受土壤干燥程度的影响而发生变化
垂直接地棒	设计简单，最易于装配（特别是围绕某一现有设施），附件容易买到，能延伸到地下水面	瞬态阻抗高。大岩层靠近地表时不适用。在大的故障电流、或直击雷的作用下，地表的跨步电压会过大
金属板	在有限区域内能得到低电阻接触	装配最困难
附属电极（利用水管、屋基及埋设的水箱）	有很低的电阻	很难或不能控制将来的腐蚀变化，应与另外的电极配合使用

15.2.3.2　大地电阻的计算

最适合于设施的电极配置一经选定，就可计算该配置接大地的电阻。如果计算的电阻符合设计要求，接着应完成包括所有互连结构在内的设计。为举例说明这个设计程序，先假设初步选定像如图 172 所示的一个 30m×48m 的矩形配置。再假设场地勘测过程中所测得的土壤电阻率为该区域的平均电阻率 100Ω·m。若场地勘测表明所有岩层深度位于 3m 以下；地下水面不会低于地表以下 1.5m；而冰冻线只延伸到地表以下 0.3m。估算时可先选择 3m 长的接地棒，并取 5.5.2 中推荐的接地棒直径 1.9cm。基于以上条件的电阻计算过程如下：

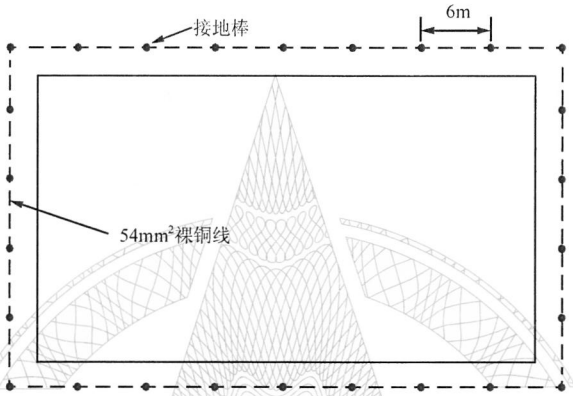


图 172　矩形设施大地电极分系统的最小配置

a）　由图 173 确定单根接地棒的电阻[55]。首先在“d”线上的“1.9”点与“l”线上的“3”点之间连直线，与“q”线相交于一点。然后，在“q”线上的交点与“电阻率”线上 100Ω·m 点之间连直线，该直线与“电阻”线相交之处读出电阻为 32Ω。

b）　假设相邻接地棒之间的初始间距为 6m 或棒长的 2 倍(见 5.6.2)。由图 172 可见，围绕建筑物一周需要 26 根接地棒。利用图 174 确定 26 根接地棒并联后的电阻相对单根接地棒电阻的下降量，约降至单根的 5.5%。因此，土壤电阻率 100Ω·m 时 26 根接地棒的电阻为：

$$R=32\times0.055=1.76\Omega$$

图 174 主要适用于场地尺寸比接地棒间距大得多，接地棒成直线排列或沿场地周围排列的情况。如果接地棒的分布为格栅状(如变电所常用的排列一样)，则应采用图 175 来估算其纯电阻[56]。在许多情况下，由图 174 和图 175 给出的结果将是一致的。就上例而言，对于估算面积为 1440m²(30m×48m)的 26 根棒，从图 175 中可知电阻比率约为 0.056，网络电阻为 1.9Ω。

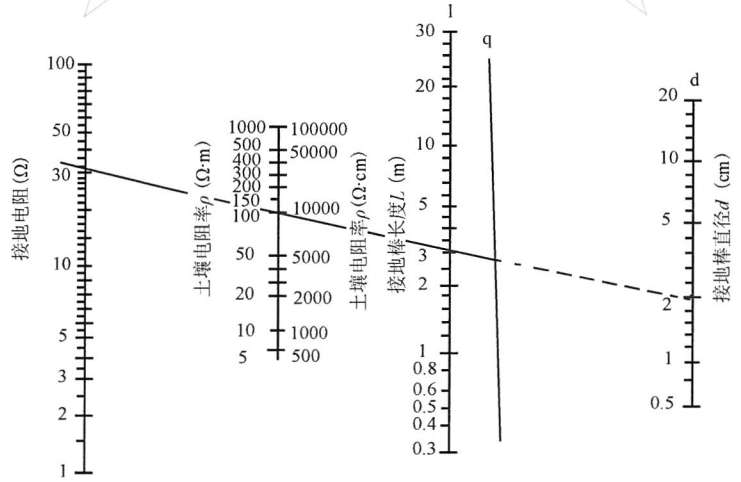


图 173　确定单根接地棒接地电阻的计算图

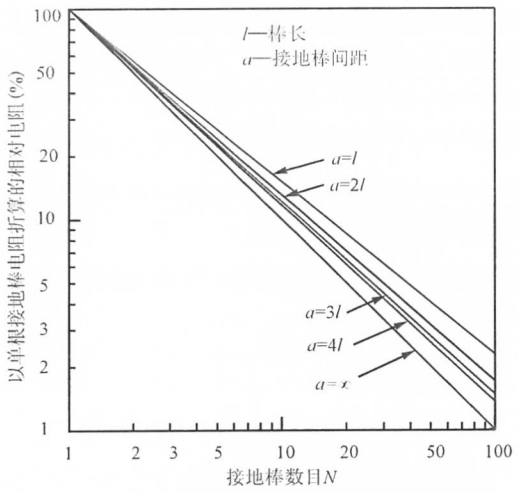


图 174　并联接地棒的相对电阻

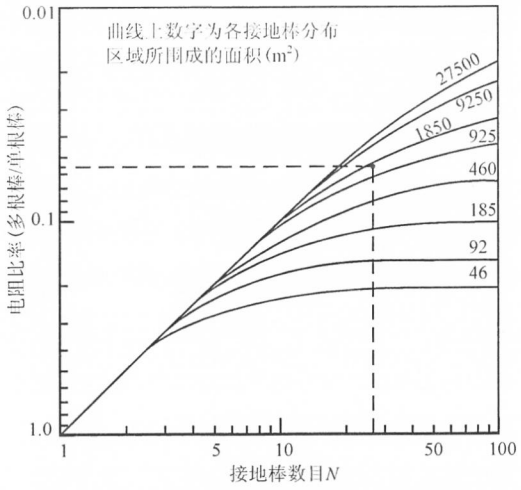


图 175　多根接地棒与单根接地棒电阻的比率

15.2.3.3　其他配置

常常会碰到非理想的场地，例如：碰到妨碍场地周围接地棒均匀分布的大岩层；基岩比较接近地表；地下水位降到地表面以下 1m 至数米深；土壤电阻率很高；建筑和地貌条件限制了接地棒不能在特定点上装设。在这种情况下，需修正电极配置以便在有限的地域上获得所希望的电阻。推荐的其他典型配置有以下几种：

a)　改变接地棒的数目。上述例子表明即使减少接地棒的数量，仍然能满足 10Ω 的要求。因此，如果在设施周围某些点上存在露头岩石，就允许省掉一些接地棒。由于电阻率为 100Ω·m 的土壤中 1 根 3m 接地棒的电阻为 32Ω，而要求的有效网络电阻 10Ω 仅为 32Ω 的 31%，由图 174 可见，少至 3 根棒还是可接受的。当然，如果土壤电阻率高，那就需要较多的接地棒。

b)　采用较长的接地棒。在高电阻率土壤中可以采用长于 3m 的接地棒(用几节 3m 长的棒组装而成)来代替大量的 3m 接地棒。凡在一年的任何季节里，地下水位低于地表 3m，或冰冻线深入地表 3m 的地方，都可采用较长的接地棒，以保持与永久湿润的、非冰冻的土壤接触。已知土壤电阻率后，可利用图 173 估算所需要的接地棒长度。

c)　以水平裸线或水平格栅代替垂直棒。当基岩或其他障碍物妨碍采用垂直棒时，可采用水平裸线、水平格栅或辐射状接地系统，设计数据或公式见 5.6.1.2。

d)　利用降阻剂降低土壤电阻。在上述其他配置方案行不通或在成本上不实用时，剩下的唯一选择往往是采用降阻剂。在做出决定之前，应参阅 5.9。

15.2.4　设计指南

设计指南具体内容如下：

a)　每个由电网供电的设施上，在供电断路装置附近至少应装配一根接地棒，并将它搭接在大地电极分系统上。如果在场地上设置了变压器，应采用截面积 54mm^2 的裸导线将变压器的接地棒与第一个供电断路装置的大地电极分系统互连，以满足雷电防护的需要。

b)　出于雷电防护需要，不管设施大小，也不管它是处于雷击高发区还是低发区，都应按上节方法设置大地电极分系统。当设施具有高于周围地带的延伸结构或设备突出物(如天线单元或塔状建筑)时，应设置一个环绕所有设施的连续的大地电极分系统，或设置多个单独的大地电极分系统，并将它们连接在一起。

c)　大多数大地电极分系统需要许多互连接地棒，但图 172 所示的配置对多数设施是足够的。在给定地点实际需要的接地棒数目，由土壤的电阻率和电极配置方式确定。建筑物周围每隔 6m 设

置 1 根 3m 长的接地棒，便可在充分利用接地棒有效半径的情况下实现对大地的多点连接。如果要加长接地棒使其达到地下水位或穿过地下冰冻线，以便与低电阻率土壤形成接触，则应同时加大接地棒的间距。接地棒之间的距离为接地棒长度的 1 倍～2 倍，但是，在每根雷电引下线附近应设置接地棒。

d) 组成大地电极分系统的接地棒和互连电缆应埋在建筑物或结构物滴水线之外 0.6m～1.8m 处，以确保雨、雪及其他下落液体能润湿接地棒周围的土壤。

e) 对于非矩形或正方形配置的设施，通常沿着结构物周围布置接地棒，如图 176 所示。

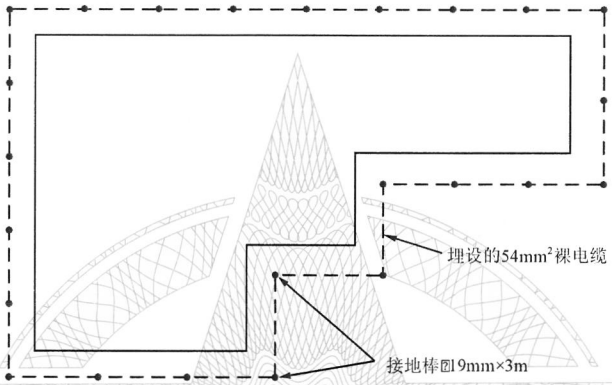


图 176　不规则形设施的电极配置

f) 当 2 个或 2 个以上的结构物或设施配置在同一地区，而且它们之间有信号、控制和监测线路等电气互连时，应当为它们提供公共接地系统或者利用埋设的裸电缆将它们的大地电极分系统互连。两个独立的结构物靠近一起安装的常见实例是雷达或通信台站，它们的掩蔽所往往是与天线塔分开设置的。天线塔和掩蔽所之间的典型走线有信号电缆(同轴线和波导)、控制电缆和电源线。比掩蔽体高的天线塔较易遭雷击，为了减少两个结构物之间的电位差，设施共用一个公共大地电极分系统较为有效。距离不足 6m 的相邻结构物可用一个环绕两个设施的公共大地电极分系统，如图 177 所示。当两结构物间距等于或大于 6m、但小于 60m 时，可照图 178 配置。埋设的裸电缆还可用来保护一起埋设的信号电缆或电源线缆。包含 3 个结构物的典型接地系统如图 179 所示。当结构物或设施之间没有互连电缆，而且间距大于 60m 时，就不需要将它们的大地电极分系统互连。

g) 在大地电极分系统附近，可能有埋设的金属附属结构物。应将这些结构物连接到接地分系统上，以便在雷电防护或故障保护期间减小电位差造成的危害；埋设的结构物与接地分系统的连接还有利于降低电极分系统的对地电阻。对大地电极分系统的这种附加连接也可包括混凝土地基的钢筋，以及埋设的水箱和管道。

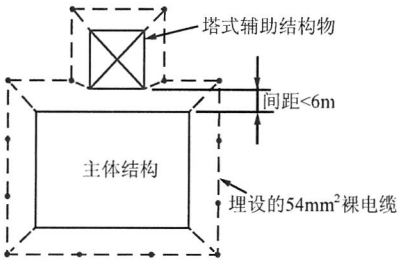


图 177　毗邻结构物的电极位置

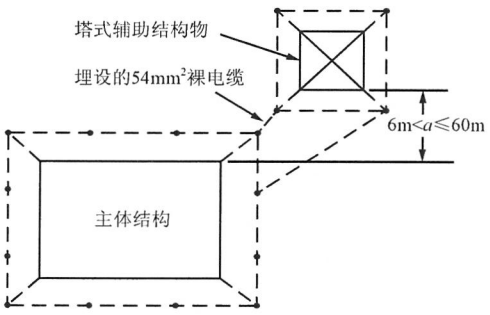


图 178　相邻结构物的电极配置

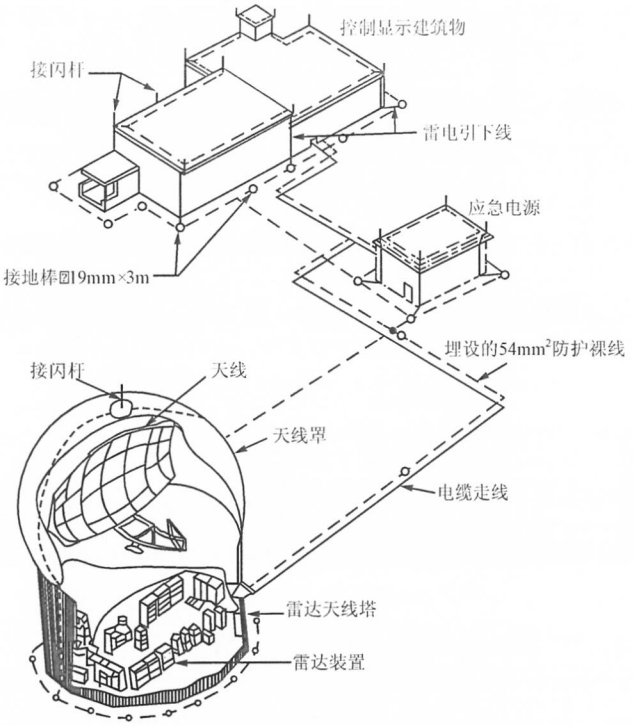


图 179　雷达装置的典型接地系统

h)　为了减少土壤表面干燥和土壤冰冻所引起的电阻变化，同时也是为了减少接地棒、搭接点和互连电缆机械损伤的可能性，接地棒的顶部至少应低于地面 0.3m。埋设的互连裸电缆至少应低于地面 0.45m，截面不小于 54mm^2，具体方法如图 180 所示。

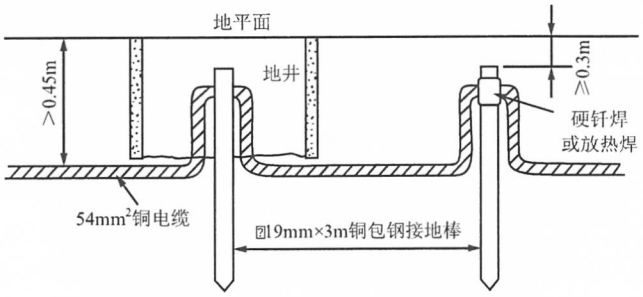


图 180　接地棒或大地电极分系统装配详图

i)　如果在浇注地基和安装电缆、公用水管后才安装电极分系统，应事先对供水系统、雷电引下线、结构钢、埋设的导线和电缆、以及电极之间必要的互连等做出统筹安排。

j)　在每个场地上可设置 1 个或多个地井，以方便大地电极分系统的安装出入。图 181 和图 182 给出了两种地井类型。井圈可以采用陶土管或浇注的混凝土，而且应带有可移动的出入口盖子。在大型结构物内，特别是在其下面装有接地格栅的建筑物，应在建筑物内容易接近之处设置一个或多个地井。地井数多少取决于设施的大小、电极分系统的延伸范围、以及希望接近电极的程度。至少应有一个地井位于开阔的地面土壤区域内，以便建筑物启用后，能对大地电极分系统的电阻进行检验。图 183 是具有代表性的接地棒装配俯视图，说明了雷电防护分系统和设施接地网络的连接要求。

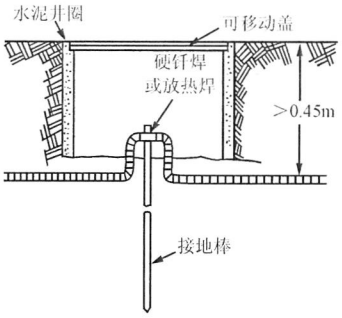


图 181　混凝土地井

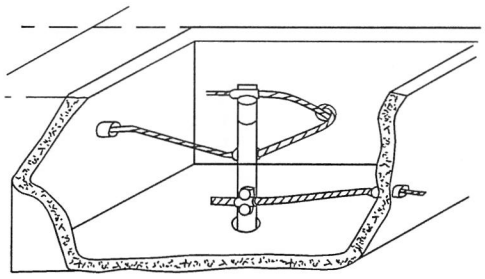


图 182　典型的地井装配

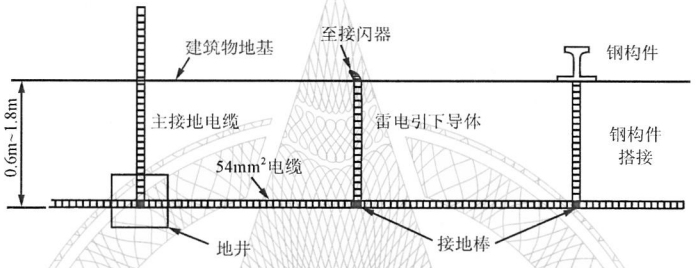


图 183　大地电极分系统的连接(俯视图)

15.2.5　装配方法

装配时应注意：

a) 与大地电极分系统装配有关的所有挖掘工作，诸如打孔和挖沟之类，都应与设施建造中的其他挖掘、清理等土方工程同时进行。如果完成其他土方工程之前先装配大地电极分系统，则应采取必要的防护措施，确保接地件不受损伤或破坏。

b) 特别应注意保证所有金属管线，例如自来水管、污水管(如果是金属管)、铠装电缆等等，都细心地搭接到大地电极分系统。这类搭接，应采用截面 54mm^2 或更大的搭接条，也可采用裸铜线。

c) 用回填松土或其他方法覆盖大地电极分系统之前，应对所有接头和连接处进行目视检查，包括检查机械完整性，确认不存在孔洞和其他不良的搭接，并检查是否完成了所需要的全部互连。

d) 所有在隐蔽位置的搭接点应进行硬钎焊或熔焊。任何不同金属之间，例如铜线和铸铁或钢管之间的搭接点应进行彻底的防潮密封，以减少腐蚀。螺栓紧固连接只能用在检修井和地井中，或者用在便于接近并能检查搭接完整性的场合。

e) 只能把接地棒打入原状土壤，或打入彻底夯实、压紧的回填土中。只有在土壤被压紧或经过足够时间下沉密实后，才能将接地棒和电缆安置于房基周围的回填土中。不能把接地棒打入或埋设在砂石地基上(这些砂石地基是为排水设置的)，除非接地棒穿过这种砂石地基进入下面原状土层 1.8m 以上。在任何情况下，都不能将水平电缆敷设在这种砂石地基上。

f) 可以采用大锤、气锤或动力打桩机把接地棒打入大地。应采用桩头保护螺母来防止端头受损，特别当接地棒是由 2 段或 2 段以上接地棒连接起来时。打入深层的接地棒，特别是打入硬质或岩层土壤中的接地棒，通常应用动力打桩机，并用特殊的打桩箍防止接地棒受损。

g) 以硬钎焊、熔焊或夹紧方法把地网电缆搭接到接地棒上。如果接地棒的顶端可在地井内接近，并且已根据某种规则制定了维修程序来定期检查连接的完善性，则也可采用螺栓紧固型连接。

h) 在装配接地棒时，接地棒一旦达到预定的深度，就应对每根接地棒进行一次电阻检查。如符合要求，以后每隔 3 个月应对大地电极分系统(作为一个系统)测一次电阻，一年之后，每隔 21 个月测一次电阻。可采用 16.2.3.3.2 f)中列出的测量程序，对电极结构进行跟踪检查。如果所测出的接地棒电阻小于计算电阻值，可使用较少的接地棒，只要不低于雷电引下线的最小数量要求即可。另一方面，如果所测得的接地棒电阻大于计算电阻值，应在施工阶段安装辅助接地棒

或采用较长的接地棒，而不应等设施建成后再增加辅助接地棒。

15.3 结构物的雷电防护

15.3.1 防护原理

对雷电防护而言，结构物是指除电力线、电站和配电站之外的建筑杆塔或类似的自支撑物体。为防止结构物遭受直击雷，应满足下面四个要求：

a) 提供接闪器，以便有意吸引闪电先导的闪击；

b) 建立一条从接闪器尖端连接至大地的通路，此通路的阻抗应足够低，以保证只能沿着它放电而不会沿着其他通路放电；

c) 与大地电极分系统进行低电阻搭接；

d) 大地电极分系统和大地之间应建立低阻抗连接。

当雷电放电电流只通过结构物的导电部分进入或离开大地时，上述条件满足。为满足上述条件，可采用以下两种方法之一(每种具有特定的应用)：

a) 由屋脊导体，引下线与接闪器互连组成的整体防护系统，安装时应构成实际可行的最短到地距离。

b) 单独安装下面两种防护系统中的一种：

1) 杆塔，详见 15.3.3.1；

2) 架空接地导线，详见 15.3.3.2。

15.3.2 整体防护系统

15.3.2.1 概述

按下面步骤设计和安装整体防护系统：

a) 在高度最高的各点和其他暴露区竖立接闪杆，以便在雷电可能损坏这些区域内的结构物、设备或单元之前拦截雷电；应使接闪杆端点高出结构物足够距离，以避免电弧引起的火灾；

b) 装配屋脊导体和引下线，为通过接闪杆和大地之间的雷击电流提供尽可能低的阻抗；通路愈直，效果愈好；引下线的弯曲半径不应小于 0.2m，弯曲角度不应小于 90°；

c) 应在结构物的四周对称地分配接地连接而不是将接地点集中在一侧；

d) 靠近放电通路的所有金属物体都应与其互连，以防横向闪络，图 184 给出了典型的互连方式；

e) 应确保接闪器系统的机械结构是牢固的，并且使用的材料应耐腐蚀。

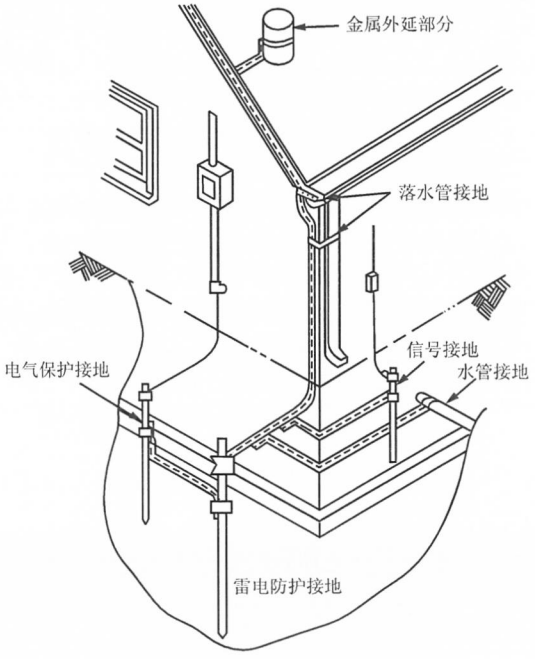


图 184 雷电防护接地方法

15.3.2.2　接闪器

15.3.2.2.1　概述

接闪器(接闪杆)应把所有雷击拦截或吸引到它们自己身上，否则这些雷电就会闪击受保护的建筑物或结构物。天线及其附属的传输线和支撑结构应采用符合 15.3.2.2.2 规定的接闪器保护，而不应依赖 15.3.3.5.24 所介绍的瞬态防护或抑制装置。

15.3.2.2.2　尺寸和材料

为了防止爆炸、燃烧或其他方面的危害，接闪杆可用铜、铝或青铜制成。实心铜棒或青铜棒，其最小直径为 1.3cm；实心铝棒，其最小直径为 1.6cm。

接闪杆应比被保护建筑物至少高出 25cm，这样才能为相邻建筑物(天线及其支撑或控制塔)提供一个 1:1 的保护区。可用下面介绍的图解法和分析法来检验接闪杆的保护区是否满足要求。在需要用更高的接闪杆提供保护的地方，接闪杆应采用拉索和牢固的支撑结构。

如果接闪杆安装在释放易爆易燃尘埃、蒸汽或煤气的通风口或烟囱上，或者接闪杆离这些出风口很近(小于 1.5m)，则应增大接闪杆到它们的间距：

a)　在自然通风下释放易爆物质的加罩式通烟孔上，接闪杆至少应延伸到通风口上方 1.5m 处；

b)　在强制通风下释放易爆炸物质的敞开式烟囱上，接闪杆至少应延伸到通风口上方 4.5m 处。

15.3.2.2.3　位置

接闪杆的具体安装位置如下：

a)　按图 185 所示，沿双坡屋脊、复斜坡屋脊和四坡屋脊上设置接闪杆。

b)　按图 186 所示，在缓坡屋顶的边角和四周设置接闪杆。缓坡屋顶定义为：(1)跨度小于等于 12m，而坡度比(即斜度)小于等于 1/8；(2)跨度大于 12m 而坡度比小于等于 1/4 的屋顶。

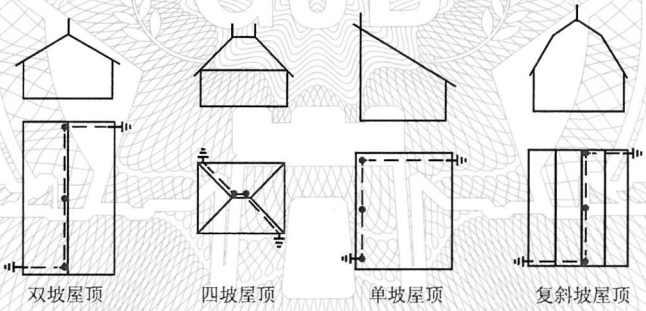


图 185　一般屋顶上接闪杆的位置

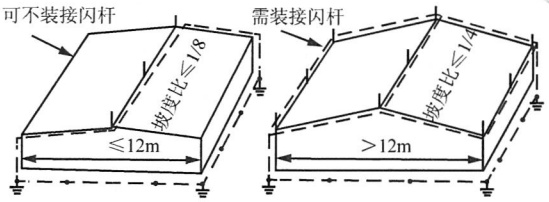


图 186　在缓坡屋顶上接闪杆的位置

c)　按图 187 所示，在平屋顶上围绕周围设置接闪杆。在平屋顶或跨度超过 15m 的缓坡屋顶上，每隔 15m 应设置 1 根附加接闪杆。

d)　离屋角 0.6m 内，在屋脊的两端或主屋顶的边缘上，都应设置接闪杆。

e)　高度低于 0.6m 的接闪杆，间隔为 6m 或更小。高于 0.6m 的接闪杆，安装间隔不超过 7.5m。

f)　应保证结构物的各部分不致延伸到由接闪杆所确立的圆锥保护区外，可以绘制简单的结构物外形图，然后在此外形图上叠加一个 45° 角(1:1 的圆锥保护区)的三角形来确定接闪杆的圆锥保

护区。三角形的顶点应与待定保护区的接闪杆顶部一致，如图 188 所示。对于现有的结构物来说，可按图 189 所示 2:1 的圆锥防雷保护区，用目视方法确定凸台是否凸出。这一方法对较小的结构物特别有用。

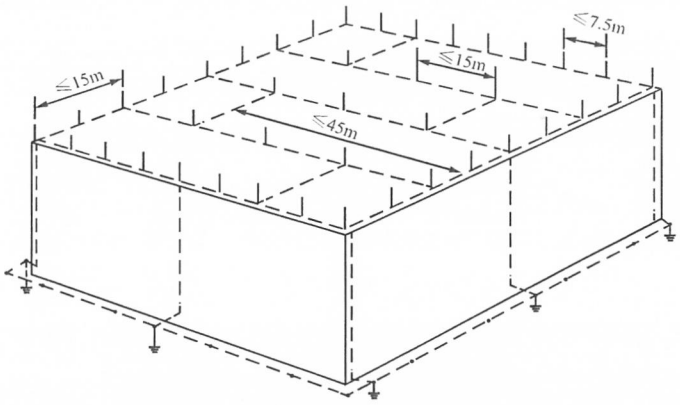
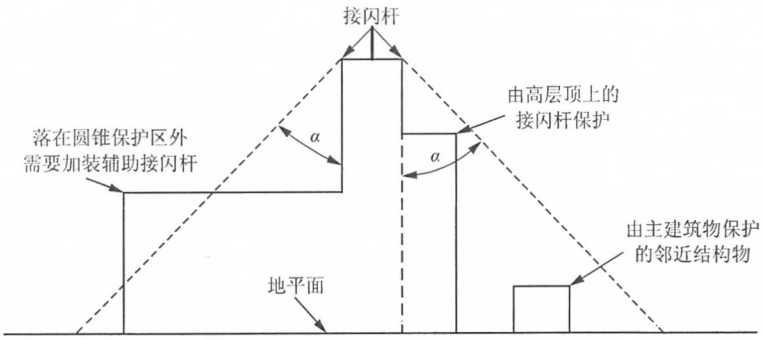
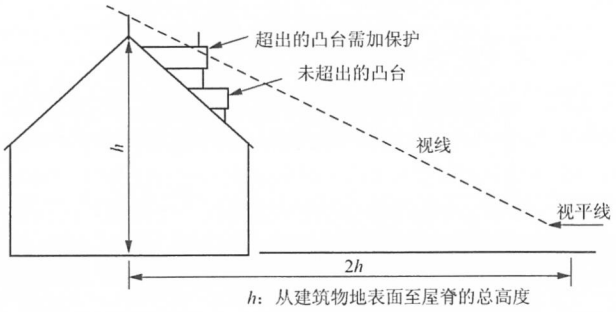


图 187　平顶结构物上接闪杆的位置



注：1:1 的圆锥保护区$\alpha=45^{\circ}$。

图 188　确定需要附加接闪杆的图解法



注：以 2:1 的圆锥保护区为例。

图 189　确定凸出天窗保护的简便目视方法

如果需要确定平顶结构物上的所有局部构件，如烟囱、管道、电缆设施或凸出延伸部分是否受到保护，可采用图 190 所示的方法计算由 2 个垂直接闪杆所保护的地带。这种方法也可用来确定由垂直杆或水平导线所提供的覆盖面。在图 190 中 P 点表示识别点，也就是说 P 点是下行雷电闪击的末级梯级先导放电的出发点(见 6.2)。为了确定接闪杆是否确实最靠近 P 点，可用 P 点为中心，并以通过接闪杆顶端的距离 x 为半径画一个圆弧来判定。设半径为 30m，因为 30m 通常代表了与梯级先导放电有关的最

短长度(见 6.2)。由于接闪杆的典型高度和雷击距离 x 之间相差较大，用图解法确定保护区域不太方便。为了更加准确，可用式(198)计算临界距离：

$$h' = h - x + \sqrt{x^2 - (a/2)^2} \quad \cdots\cdots (198)$$

式中：

h' ——接闪杆之间完全受到保护的结构的最大高度，m；

h ——接闪杆的高度，m；

x ——圆弧半径，m；

a ——接闪杆的间距，m。

当 $a \leqslant 2x$ 时，式(198)成立。

计算示例：

假设需要确定 0.9m 高的接闪杆之间的最小距离，这个距离应保证平屋顶的所有部分处于在受保护的地带之内。即当式(198)中 $h'=0$ 时，a 的值是多少？为进行计算，首先设 $h'=0$，得到式(199)：

$$0 = h - x + \sqrt{x^2 - (a/2)^2} \quad \cdots\cdots (199)$$

变换得式(200)和式(201)：

$$x^2 - 2hx + h^2 = x^2 - (a/2)^2 \quad \cdots\cdots (200)$$

$$(a/2)^2 = 2hx - h^2 \quad \cdots\cdots (201)$$

或式(202)：

$$a^2/4 = h(2x - h) \quad \cdots\cdots (202)$$

用 $h=0.9$m 和 $x=30$m 代入上式，可知，只有 $a \leqslant 14.6$m，才能保证屋顶的所有部分都处于保护区域之内。

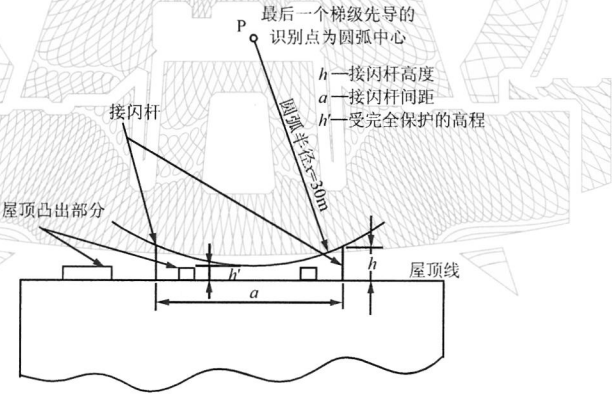


图 190　确定接闪杆所提供的平屋顶表面保护区域的图示

15.3.2.3　接地导体

15.3.2.3.1　概述

应利用屋顶导体和引下线对每个接闪杆提供两条对地通路。所用的屋顶导体和引下线规格，对高度不超过 23m 的结构物，应符合表 54 的要求，高度超过 23m 的结构物，则应符合表 55 的规定[57]。对于凸出在主体结构上的老虎窗，当接闪杆延伸的连接导体不足 4.8m 时，只需一根从接闪杆至主引下线的连接通路，如图 191 所示。铜导线的结构参数列于表 56 中，便于对表 54 和接地导线中铜导线的选取。

表 54　高度不超过 23m 的结构物上屋顶导体和引下线的最低要求

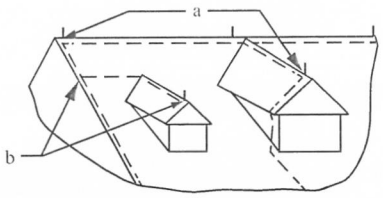
应用类型	导体类型	参数	材料	
			铜	铝
接闪器	实心圆柱	直径 mm	9.5	12.7
	圆管	直径 mm	15.9	15.9
		壁厚 mm	0.8	1.63
引下线	线缆(单根或扭绞)	单股线直径 mm	1.12	1.6
		参考美国线规 No.	17	14
		单位长度重量 g/m	278	141
		线缆截面积 mm^2	29	50
	实心带	厚度 mm	1.3	1.63
		截面积 mm^2	29	50
搭接条	线缆(单根或扭绞)	单股线直径 mm	1.12	1.6
		参考美国线规 No.	17	14
		线缆截面积 mm^2	13.3	20.8
	实心带	厚度 mm	1.3	1.63
		宽度 mm	12.7	12.7
注 1：单股线直径仅适用于扭绞线； 注 2：参考美国线规为与单股线直径相近的美国线规号。				

表 55　高度超过 23m 的结构物上屋顶导体和引下线的最低要求

应用类型	导体类型	参数	材料	
			铜	铝
接闪器	实心圆柱	直径 mm	12.7	15.9
引下线	线缆(单根或扭绞)	单股线直径 mm	1.5	1.83
		参考美国线规 No.	15	13
		单位长度重量 g/m	558	283
		线缆截面积 mm^2	58	97
	实心带	厚度 mm	1.63	2.61
		截面积 mm^2	58	97
搭接条	线缆(单根或扭绞)	单股线直径 mm	1.12	1.6
		参考美国线规 No.	17	14
		线缆截面积 mm^2	13.3	20.8
搭接条	实心带	厚度 mm	1.3	1.63
		宽度 mm	12.7	12.7
注 1：单股线直径仅适用于扭绞线； 注 2：参考美国线规为与单股线直径相近的美国线规号。				

表 56　铜线的重量、断裂强度和直流电阻

线缆直径 mm	重量 kg/km	硬		半硬		软
		最小断裂强度	20℃时直流电阻最大值	最小断裂强度	20℃时直流电阻最大值	20℃时直流电阻最大值
		N/mm^2	Ω/km	N/mm^2	Ω/km	Ω/km
11.8	972	－	0.1625	294	0.1625	0.1577
10.6	785	－	0.2014	307	0.2014	0.1954
9.5	630	－	0.2507	319	0.2507	0.2432
8.5	504	－	0.3132	330	0.3132	0.3038
7.5	393	－	0.4022	341	0.4022	0.3903
6.7	313	－	0.504	349	0.504	0.489
6	251	－	0.6285	357	0.6285	0.6098
5.3	196	－	0.8055	365	0.8055	0.7815
4.75	158	411	1.0028	370	1.0028	0.9729
4.25	126	416	1.2526	376	1.2526	1.2153
3.75	98	421	1.6089	381	1.6089	1.561
3.35	78	426	2.0161	386	2.0161	1.9561
3	63	430	2.5139	389	2.5139	2.4391
2.62	48	434	3.2961	393	3.2961	3.1979
2.36	39	436	4.0623	396	4.0623	3.9414
2	28	440	5.6564	400	5.6564	5.488
1.9	25	441	6.3345	401	6.3345	6.0809
1.6	18	445	8.9326	404	8.9326	8.575
1.41	14	－	11.502	407	11.502	11.042
1.31	12	－	13.325	408	13.325	12.792
1.12	9	－	18.23	410	18.23	17.5
1.03	7	－	21.555	411	21.555	20.692
0.94	6	－	25.88	412	25.88	24.844
0.85	5	－	31.65	413	31.65	30.383
0.75	4	－	40.653	414	40.653	39.026
0.66	3	－	52.496	415	52.496	50.395
0.57	2	－	70.383	416	70.383	67.565
0.48	2	－	99.251	417	99.251	95.278
0.38	1	－	158.362	418	158.362	152.022
0.3	1	－	254.082	419	254.082	243.91



[a] 在主脊上，或者在与主脊等高、甚至更高的老虎窗及侧翼的屋脊上，接闪杆的引下导体不少于两条。

[b] 连接导体总长不应超过 4.8m。

图 191　接闪杆覆盖准则

15.3.2.3.2　屋顶导体

屋顶导体的设置要求如下：

a) 屋顶导体可沿着双坡、复斜坡和四坡屋顶的屋脊，或环绕平屋顶和缓坡屋顶周围布线。

b) 沿整个平台、平面和平屋顶布线的屋顶接地导体应互连成闭合环路，以保证所有接闪杆至少有两条到地通路。

c) 对于高低错落的屋顶，如果低层屋顶上的接闪杆不超过 2 根，那么屋顶引下线可从高层落到低层，在屋顶相交处不需增设额外的引下线。

d) 宽度超过 15m 的屋顶，应设置附加导体，以实现大面积防护所需要的多根接闪杆之间的互连（见图 187）。每 15m 宽应有一根附加导体，例如，在 15m～30m 宽的屋顶上增加 1 根附加走线；在 30m～45m 宽的屋顶上增加 2 根附加走线。这些附加走线也应每隔 45m 用横跨导体互连一次，如图 187 所示。

e) 使屋顶导体保持水平或向下的走向。给引下线提供“U”或“V”形（向下或向上）凹槽，从凹槽底部连接到地或合适的主引下线上，如图 192 a）所示。

f) 敷设的导体应水平地穿过或围绕障碍物，如图 192 b）、图 192 c）所示。导体弯曲的角度不应小于 90°，弯曲半径不小于 20cm，见图 192 d）。特别应避免回折成环线。当围绕障碍物走线时，最好用大曲率的渐弯。推荐的其他敷线方法见图 192 e）～图 192 h）。

g) 每隔 0.9m，用紧固件将引下线直接牢固地与屋脊隆起物或屋顶压接一次。

h) 导体悬空不足 0.9m 时可不给支撑。若采用可接受的支撑件，如直径 1.9cm 以上的包铜接地棒或等效物，且两端已可靠地紧固，则导体可悬空 1.8m。

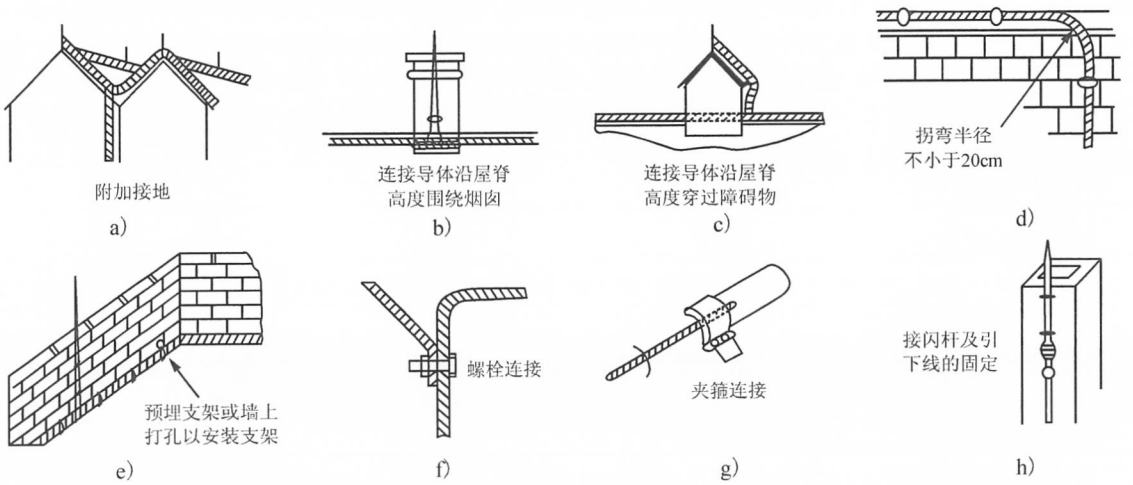


图 192　推荐的雷电综合防护系统的常用结构

15.3.2.3.3　引下线

引下线的要求如下：

a）　几根引下线从结构物顶端部分往外引时，尽可能使它们分开，优选的位置是按正方形或矩形的对角线布置，对于圆柱形建筑物则在其一周均匀分布。

b）　尽可能把引下线敷设在便于把接闪杆和结构物的大地电极分系统连接的位置上。引下线可在结构物一周等间距地对称布置。

c）　除了像旗杆、天线杆（无大的塔基）、灯柱以及类似的细长物体之外，所有结构物上至少应有 2 根引下线。

d）　周长超过 75m 的结构物，每 30m（不足 30m，按 30m 计算）就应设置 1 根引下线。对于平顶或缓坡屋顶结构物，引下线的数量应保证相邻引下线之间的平均距离不超过 30m。对于不规则结构物，应根据需要另外增加引下线，为每个接闪器提供两条通路。

e）　引下线装配和定位应恰当，单侧引线端不能超过 4.8m。见图 191 中注 b。

f）　当引下线在环绕或穿过通路上的任何障碍物时，应始终保持下行。应避免急弯或回折，必不可少的弯曲应大于 90°，弯曲半径不小于 20cm。

g）　当大回折环（即回折大于 90° 的环）不能避免（例如绕檐口或越过栏杆）时，应保证引下线在回折环开口侧的间隙大于该回折环回折长度的 1/8。推荐利用障碍物的孔洞或水槽敷设引下线，无论如何应避免形成完整的回折环。

h）　具有悬空结构（例如有延伸平台的天线塔或采用悬臂结构的建筑）的结构物上，应通过结构物内部垂直敷设引下线。该引下线应封闭在非金属的阻燃管道内。

i）　建筑物的主体金属结构单元自身或经过适当搭接后，如能构成接闪杆到大地电极的连续电气连接，那么它们就可以代替正规的防雷导体。结构单元导电的横截面积，包括接点的横截面积，至少为单独采用的防雷导体横截面积的 2 倍。当用作引下线时，这种导体在结构物内部或在外部没有什么不同的要求。以砖或其他砖石产品堵砌的钢筋构架建筑物应有外部安装的接闪杆和屋顶导体，并应将它们直接搭接在结构元件上，以免雷电放电穿过外层墙到达钢筋构架。

15.3.2.4　紧固件

紧固件的要求如下：

a）　应将接闪杆、屋顶导体以及引下线可靠地固定在它们所依托的建筑物或其他物体上。

b）　紧固件（包括用以固定导体的抓钉、螺钉或其他手段）在结构上应是牢固、不易发生断裂的，而且应与导体的材料相同或者是相容的，以免在潮湿情况下引起严重电化腐蚀。关于腐蚀的详细资料，见 10.8。

c）　应使所有附件、组合件以及非熔焊或非硬钎焊的连接点和需要维修保养的连接点都易于接近。

d）　任何检修用的专用工具都应当永久性地保管好，以防止丢失。无论如何，采用适当的锁具或其他器具对于安全、可靠是必不可少的，也便于日后对配件及其应用区域作物理防护维修。

15.3.3　独立安装的防护系统

15.3.3.1　杆塔

杆塔的要求如下：

a）　受保护结构的任何部分都不应超出图 188 解得出的防护区域（借助于图 193，可对两个杆塔进行保守的估算）；

b）　当不可能安装共用杆塔对整个结构物提供防护时，应安装附加的杆塔；

c）　如果杆塔是用非导电材料制成的，在杆塔的顶部应装配一个接闪杆，接闪杆应超出杆塔顶部 0.6m 以上，但不必超出 0.9m；

d）　至少利用直径 9.1mm 的铜导体或等效导体将杆塔的基底（如果杆塔是金属的）或引下线连接到

受保护结构物的大地电极分系统上。

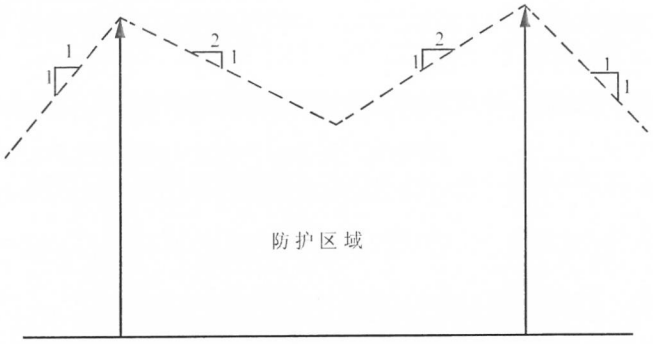


图 193　由两个垂直杆塔提供的防护区域

15.3.3.2　架空接地导线

架空接地导线的要求如下：

a)　如果柱子是不导电材料，接闪杆应牢固地安装在每根柱子的顶部，接闪杆在柱子的顶部伸出高度不少于 0.45m。引下线顺着柱子向下敷设，或用拉索作为引下线，如图 194 所示。如果采用拉索，该拉索除应符合 15.3.2.3 的要求外，在柱顶连接处应采用绝缘拉线与架空接地导线相连接。架空接地导线和拉索之间应采用一条单独的电缆互连。引下线和用作引下线的拉索应搭接到受保护结构的大地电极分系统。现有的大地电极分系统不在拉索附近时，可以用各自的地锚或者单独的接地棒将拉索接地。

b)　柱子的高度应足够高，以便使架空接地导线和建筑物最高突出部分之间的间隔不小于 1.8m。当架空接地导线系统用于保护强制通风下排放易爆尘埃、蒸汽、煤气的烟囱或排气道时，安装的架空接地导线到受保护物体顶部距离不应少于 4.5m。

c)　无论是采用杆塔型或架空接地线型保护系统，柱子都应离开结构物，柱子和结构物之间的距离至少是结构物高度的 1/3，且不应小于 1.8m，见图 194。

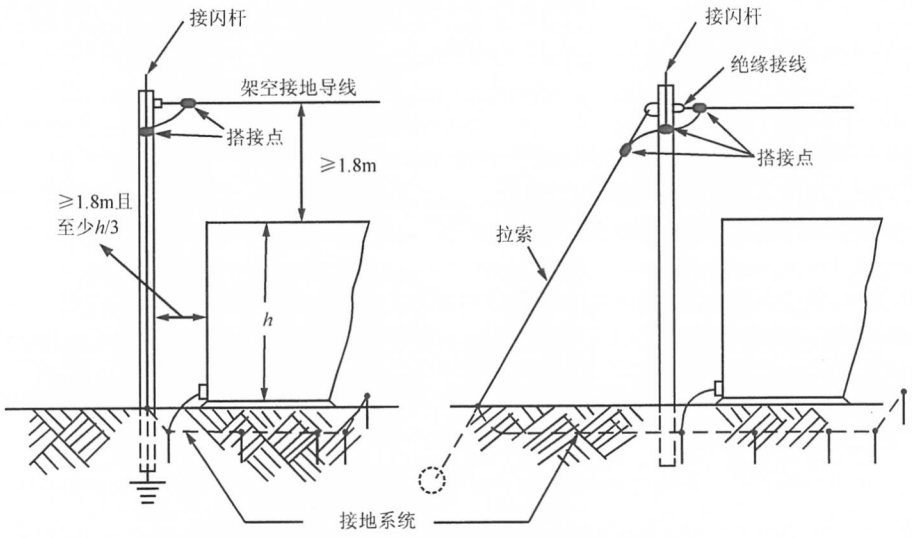


图 194　架空接地线雷电防护系统

15.3.3.3　波导安装和接地

天线与发射或接收设备之间的互连波导应按下列方法接地：

a)　在靠近天线顶部、在靠近垂直到水平的转折点的底部，每根波导都应搭接到接闪杆的引下线。

如果天线塔高度超过 60m，除上述位置外，波导的中间一点也应搭接到天线塔上。

b） 波导的全部支撑结构应搭接到天线塔上。应将波导和支撑结构在波导入口板上搭接在一起，并将它们连接到大地电极分系统。

c） 所有进入建筑物的波导、导管或水管都应搭接到波导入口板上，然后再搭接到大地电极分系统，如图 195～图 200 所示。关于屏蔽室的波导贯通或入口安装板见 13.4.3.4。

d） 长度小于 1.8m 的刚性波导可通过入口板或紧固在波导法兰盘螺栓下面的压紧型接线片与直径 4.1mm 导线搭接在一起。这种搭接应延伸到波导入口板的汇流条，并连接到大地电极分系统。

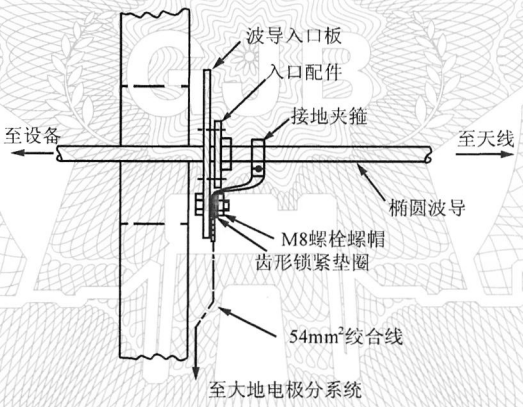
e） 按图 197 所示确定固定接地条位置，并除去波导外套。接地条由一段波导制成，详见图 198 和图 199 说明。用溶液或清洗液清洗波导和接地条的配接表面。

f） 对 8GHz 以上的波导用直径 1.6mm 的铜导线绕扎接地条，4GHz 波导用直径 2.6mm 的铜导线绕扎接地条，如图 197 所示。用可调的不锈钢夹箍按照要求紧固接地条。拧紧螺钉直到夹箍压紧为止。拧得太紧会损坏波导并影响电气特性，应进行防水处理。

g） 一种代替波导夹箍的方法是采用热缩带，以获得防水的结构。铜导线(4GHz 用直径 2.6mm，8GHz 用直径 1.6mm)端部用软钎焊焊到接地条波纹形部分的端部。使接地条的波纹部分与波导的露出部分对准。用导线紧紧地绕扎接地条和波导，并把绕线的末端也用软钎焊焊到接地条，以达到可靠的连接。波导的热缩带缠绕及加热工艺应遵循制造厂家的说明。

h） 去掉接地条的全部锐边和粗糙边缘。

i） 波导接地的另一种方法如图 195 所示。



注：为防护电磁脉冲，需将波导一周都与波导入口板搭接。

图 195　波导入口板详图

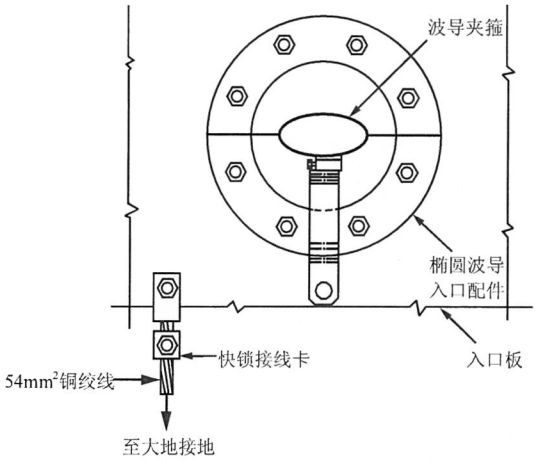


图 196　椭圆波导的接地主视图

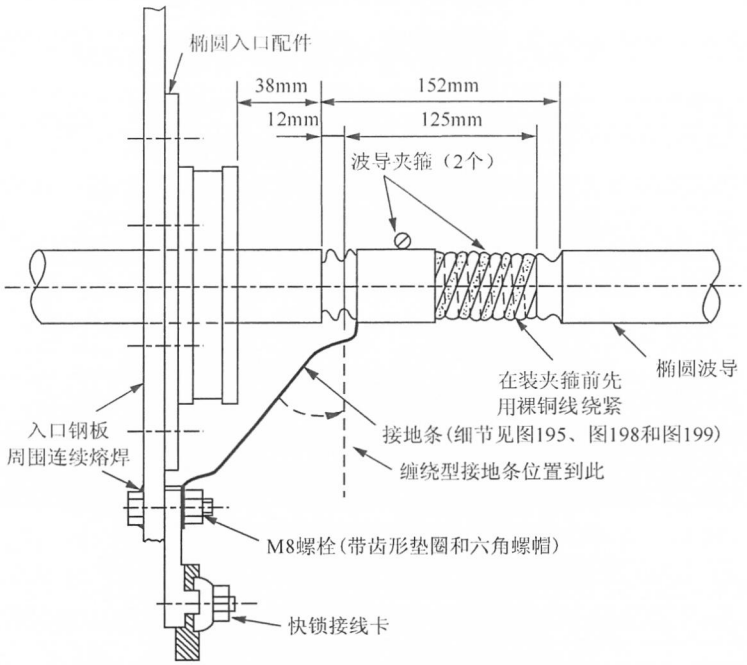
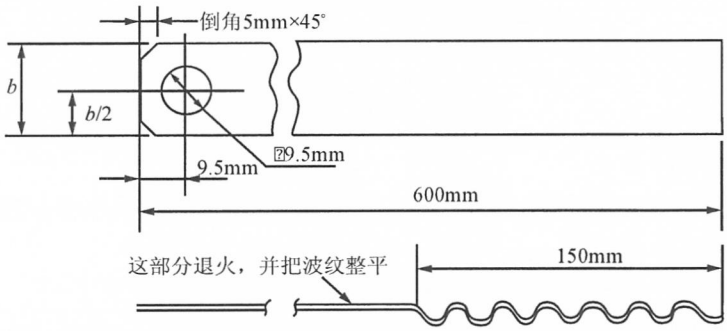
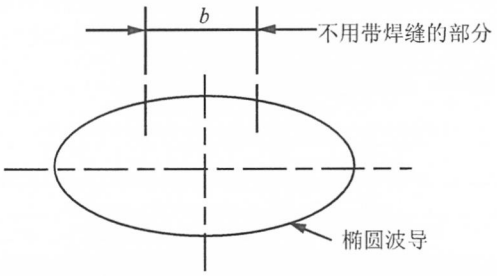


图 197　椭圆波导的接地左视图



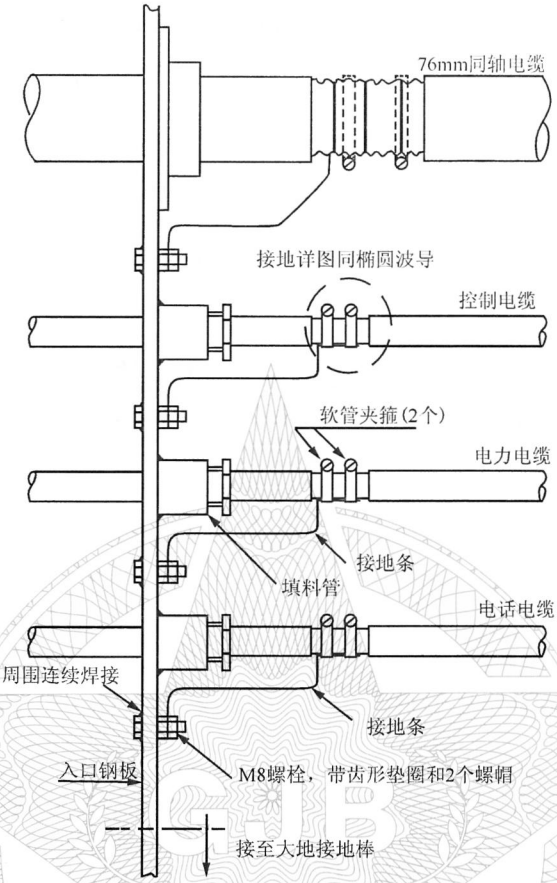
注：图中，4GHz 波导，b=32mm；8GHz 波导，b=25mm。

图 198　椭圆波导接地搭接条详图



注：图中，4GHz 波导，b=32mm；8GHz 波导，b=25mm。

图 199　椭圆波导接地条剪切详图



注：防护核电磁脉冲时，所有电缆周围都应与入口板搭接。

图 200　电缆入口安装示例

15.3.3.4　电缆安装和接地

进入设施的电缆通常应采用图 200 所示方法进行安装，具体设计细节由设计者负责，但通常按图 201 和图 202 所示步骤：

a）　非常细心地去掉电缆外护套，不应损伤电缆屏蔽层(见图 202 第 1 步)。

b）　预制与电缆直径相配的接地条，并按图 202 第 2 步紧固第 1 个软管夹箍。

c）　经第一个夹箍在电缆上折回接地条约 32mm 长，使之形成齐整的配合。按图 202 第 3 步在接地条的回折片外装上第 2 个软管夹箍。

d）　对于小直径电缆，采用一根 7 股绞合的直径 1.56mm 的铜导线，并在导线另一端焊接一个接线片。采用与接地条相同方法紧固绞合电缆。

e）　当接地条搭接全部完成后，用防水带包覆暴露的区域。

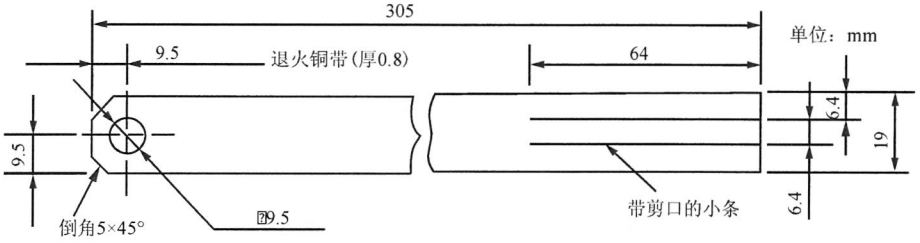


图 201　接地条详图

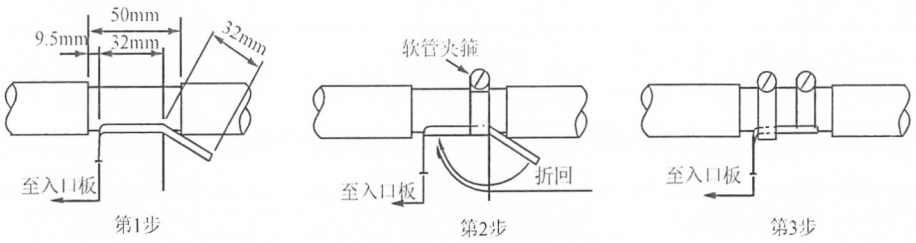


图 202　电缆的接地步骤

15.3.3.5　雷电产生的瞬态浪涌防护

15.3.3.5.1　概述

雷电产生的瞬态可能会严重损坏各种设施电气和电子设备，瞬态出现在与设备直接相连接的外部暴露线路上。外部暴露线路是指暴露在自然环境中的室外线路，包括埋地的和架空的。线路包括引入的交流供电导体，以及设备信号线、状态线、控制线、接地线和设施内部的交、直流电源线。下面介绍瞬态源及其危害、在不同类型线路上出现的瞬态波形和幅值、瞬态发生的频次，以及防止设备瞬态损坏和失效的有效实施方法。

15.3.3.5.2　瞬态源和设备损坏

构成运行系统的电气和电子设备，对下面两种主要瞬态耦合途径上的雷电瞬态浪涌危害敏感：

a)　从外电网引入的交流电力供电线路，耦合到设备的瞬态浪涌。

b)　通过与设施连接的控制线、状态线、电源线、数据和信号线，耦合到设备的瞬态浪涌。上述各种导线是外部设备到装有所关心设备的建筑或结构物之间的连接线。

由雷电瞬态引起的损坏以多种形式出现：整个设备底板爆炸和燃烧，壁式安装设备在巨大瞬态能量作用下把墙壁爆塌。但下列两种形式的损坏更为普遍：

a)　瞬态发生时元件突然破坏性失效；

b)　瞬态发生时过应力导致元件工作寿命的缩短。

15.3.3.5.3　减少损坏

正确采用下面介绍的一般现场防护方法，能减少损坏，而且在大多数情况下甚至能避免损坏。为了减少开支和提供有效的防护，防护措施的安装分为三类：

a)　对受保护设备的相应外部线路进行瞬态抑制(敷设金属导管和保护线)。

b)　外部线路的两端均安装瞬态抑制器件。外部线路一经穿入安装有设备的建筑物后，应立即在其接线端或外部的设备终端上安装瞬态抑制装置。设施供电断路装置的交流供电引入线，也应安装瞬态抑制装置。在屏蔽设施上，瞬态抑制装置应安装在入口套间或供电断路箱内。

c)　将外部线路与设备接口处的瞬态抑制装置作为受保护设备的组成部分。

进行实际瞬态防护装置设计时，应规定瞬态发生的频次、瞬态的振幅和波形、以及受保护设备的耐受电平。耐受电平是设备能耐受的短时间电压和电流浪涌电平，无超限的应力发生，即不致立即发生元件破坏或设备工作失效。应明确最敏感的元件及其典型的耐受电平，并提供瞬态发生的频次。由于交流供电导体的结构尺寸大，对瞬态浪涌电流呈现的阻抗(电阻和电感)很小，交流输入端与控制、状态、数据、信号等线路以及系统内电源线输入端的瞬态振幅和波形有明显差别。因此，对交流电力供电输入线的保护与其他外露线路的保护应分别对待。

15.3.3.5.4　敏感元件

用于固态设备中的集成电路、分立晶体管和二极管、电容器、开关、以及小型继电器和变压器，非常容易被雷电瞬态浪涌损坏。其他元件也可能受损，但敏感性小得多。某些常用设备和元件耐受电平的典型极限是：

a)　集成电路：1.5 倍标称额定结电压和电源电压；

b) 分立晶体管：2 倍标称额定结电压；
c) 二极管：1.5 倍反向峰值电压；
d) 小型继电器、变压器和开关：3 倍额定电压；
e) 电容器：除非已知介质瞬态击穿电压，否则取 1.5 倍直流工作电压；
f) 具有降压变压器和二极管桥式整流器的直流电源：1.5 倍二极管额定反向峰值电压乘以变压器次级对初级的电压比；
g) 小马达、小变压器和轻型机械：10 倍标称工作电压；
h) 大马达、大变压器和重型机械：20 倍标称工作电压。

15.3.3.5.5 瞬态发生的频次

应精确计算在规定时间间隔内某特定地点雷电所产生的瞬态数目是不可能的。但是，经过长期观察，对那些年平均雷暴日已知地区内发生的闪电数可进行统计估计。有些闪电可能不产生任何瞬态，而另一些闪电将产生几次瞬态。进行大量平均和圆整后，表 57 给出了可利用的数据。该表列出了位于强雷区、少雷区的设施上由雷击产生的典型瞬态期望数。与图 42 配合使用，就可算出 10 年期间国内某个地方可能发生的雷电浪涌次数。将每 10 年的 1750 次减少到 10%，即为每年的雷电浪涌数目。

表 57 瞬态发生的频次

雷电区域	强雷区(每年 100 个雷暴日)	少雷区(每年 10 个雷暴日)
10 年期间一个设施上雷电浪涌的次数	1750	175

15.3.3.5.6 交流供电线路中瞬态的定义

在规定时间间隔内，应准确预测特定设施上发生的瞬态过程的振幅、波形和数目是不可能的。但是对许多直接雷击所产生的电流幅值已进行过测量，并且已记录过电流的波形。根据大量的记录数据，就能对可能发生的波形和振幅进行统计计算，瞬态发生的频次见 15.3.3.5.5，下面将进一步提供这类数据。

a) 直击雷产生的瞬态电流的幅值 由直击雷引起的电流幅值在 1kA～250kA 范围内变化。表 58 中已经归纳并提供了几千次测量的结果，典型峰值电流在 10kA～20kA。表 59 列出了对 2721 次闪电所测得的峰值电流值，其中间幅值接近 15kA，这与表 58 中所提供的典型值是一致的。注意，表 59 中，2721 次的电流幅值中有 1818 次，即 66.8%是在 1kA～20kA 范围内。并应注意，只有 14%的次数大于 40kA，即 86%的峰值电流不超过 40kA。2721 次测量幅值中只有 45 次，即 1.65%在 100kA 水平以上。同时要强调的是，在前面所说明的峰值电流幅值是雷电直击金属塔后在初级供电线路所引起的。

表 58 直击雷电流参数

参数	最小	典型	最大
每次闪电回击的次数	1	2～4	26
回击之间的时间间隔，ms	3	40～60	100
每次回击的峰值电流，kA	1	10～20	250
达到电流峰值的时间，μs	＜0.5	1.5～2	30
上升速率，kA/μs	＜1	20	210
半峰值宽度，μs	10	40～50	250
连续电流的持续时间，ms	50	150	500
连续峰值电流，A	30	150	1600

表 59　直接雷击引起的峰值电流

电流范围 A	在此峰值电流范围内闪电的次数	等于或大于此电流电平的闪电次数	等于或大于此电平的百分率%
1000～5000	567	2721	100
5001～10000	611	2154	79.2
10001～20000	640	1543	56.7
20001～30000	296	903	33.2
30001～40000	227	607	22.3
40001～50000	140	380	14.0
50001～60000	80	240	8.82
60001～70000	61	160	5.88
70001～80000	22	99	3.64
80001～90000	21	77	2.83
90001～100000	11	56	2.06
100001～110000	11	45	1.65
110001～120000	9	34	1.25
120001～130000	9	25	0.918
130001～140000	7	16	0.588
140001～150000	2	9	0.331
150001～160000	3	7	0.257
160001～170000	0	4	0.147
170001～180000	1	4	0.147
180001～190000	0	3	0.110
190001～200000	1	3	0.110
200001～210000	0	2	0.073
212000	1	2	0.073
218000	1	1	0.037
总数	2721	－	－

b)　感应的瞬态幅值　安装合适的瞬态抑制装置后，在紧靠高强度雷击的区域仍会发生感应瞬态，这些瞬态能量将通过供电变压器耦合到交流供电线路上。这些耦合和感应的瞬态幅值受大地电阻和电磁场在空气中传播的衰减、以及供电变压器绕组中耦合损耗等因素的影响，比直击雷至少小 50%。因此，在设施电力线供电断路装置上，显现出的瞬态电流浪涌值的 86%不会超过 20kA，而且大多数(66.8%)的浪涌值将在 0.5kA～10kA 范围内。只有 1%的浪涌值大于 50kA，0.25%的浪涌值大于 75kA。表 60 提供了交流供电引入线路上的瞬态幅值及其百分率。

表 60　交流供电引入线路上的瞬态浪涌幅值及其百分率

瞬态浪涌幅值 A	在所列幅值的瞬态百分率 %
500～2500	21
2501～5000	23
5001～10000	24
10001～20000	19
20001～30000	8
30001～40000	3
40001～50000	1
50001～75000	0.9
750001～100000	0.1

c）交流线路上的瞬态波形　瞬态过程的波形随雷击靠近程度、雷击强度、以及交流供电输入线路的长度和电感而变化。由表 58 可知达到电流峰值的时间为 1.5μs～2μs，典型的半峰值宽度是 40μs～50μs。因此，上升时间 2μs，半峰值宽度为 40μs 的波形是直击雷产生的典型电流浪涌波形。在供电断路装置测得的瞬态(幅值超过 3000V)有 1μs～2μs 的上升时间，半峰值宽度为 20μs～40μs。但是，某些交流供电引入线路的电感将使波形上升速率稍微减慢。对于试验和规范而言，大多数中等交流浪涌保护器采用 8/20μs 或 10/20μs 的电流波形，这主要是因为这种波形容易产生。8/20μs 或 10/20μs 的波形是可以接受的试验波形。但是，使用浪涌保护器时应注意下列几点：

1）浪涌保护器端子上可能出现上升时间比 8μs 快的瞬态，导致浪涌保护器比规定值有较高的导通电压(充气火花隙和气体放电管的导通电压为其冲击火花放电电压，MOV 的导通电压为其压敏电压，瞬态电压抑制器的导通电压为其击穿电压)；

2）浪涌保护器端子上可能出现半峰值宽度达 40μs 的瞬态，这将要求浪涌保护器消耗比半峰值宽度为 20μs 的瞬态大得多的能量。

15.3.3.5.7　交流供电线路中瞬态的防护方法

正确采用下列方法，可以在交流供电引入线路上对雷电产生的瞬态实现有效的防护：

a）将埋地线路完全封装在电气连续的水密黑色金属导管中；

b）使用架空防护导线保护架空线路；

c）在设施供电干线断路装置上安装次级交流浪涌保护器；

d）当电源由民用交流电力线供电、并为固态设备提供工作电源时，在低电压(5V～48V)整流输出和交流电源输入处安装浪涌抑制器，并将其作为设备的组成部分；

e）在供电变压器的初级和次级上安装合适的浪涌保护器；

f）安装电源滤波器。

15.3.3.5.8　黑色金属导管的使用

为防止雷电电流所产生的电磁波在埋地的线路上感应出瞬态电压，所有埋地的交流供电引入线路应封装在水密的黑色金属导管中。为确保有效性，导管应是电气连续，并可靠地搭接到建筑物的入口板上，导管两端应接大地电极分系统。截面为 33mm^2 的裸铜绞合线和熔焊搭接工艺对于接地连接是合适的。导管应从供电变压器次级一直延伸到设施干线的供电断路装置上。使用导管可以消除低电平的感应瞬态，也可将高电平感应瞬态至少衰减 90%。导管虽然能有效地防止感应瞬态，但它并不能防止从供电变压器次级直接进入供电导体的传导瞬态。

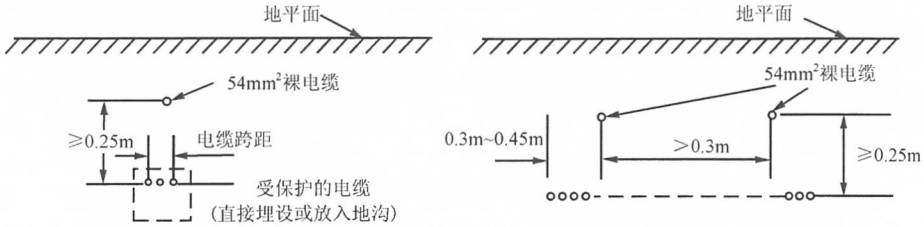
15.3.3.5.9　架空防护导线的使用

将架空交流供电线路封装在金属导管中是不可取的，而实验证明使用架空防护导线可以有效地防止架空的供电导体受到直接雷击。这种防护导线还可以提供一般性的防护，如防止邻近雷击和云与云之间放电在传输线上感应出瞬态。架空防护导线应位于供电线路上部并平行于供电线路。为了确保有效，防护导线的高度应对供电导体形成一个 1:1 的防护圆锥区(见 6.5.3)，而且防护导线应从设施的供电变压器次级一直延伸到设施的供电入口装置。同时防护导线还应延伸并搭接到有效的大地接地系统或设施的大地电极分系统。当两端设施的距离超过 75m 时，防护导线应以不超过 76m 的间隔连接到包铜的接地钢棒，该接地棒的长度至少为 3m，直径大于 19mm，包铜层的厚度不小于 0.3mm。防护导线应采用截面不小于 54mm^2 的镀锌钢缆。

15.3.3.5.10　埋地电缆的保护

在电缆上方或电缆沟上方设置防护线可防止埋设电缆遭受直接雷击。推荐采用截面为 54mm^2 的裸铜电缆直接敷设在受保护的电缆上方，如图 203 a)所示。受保护的电缆与保护导线之间至少保持 0.25m 的距离。

当一组电缆的横向跨距小于 0.9m(即电缆沟宽小于 0.9m)时，仅需一根保护导线。要是电缆跨距较宽，则至少应提供 2 根截面为 54mm^2 的电缆(因为保护导线和受保护电缆被埋入大地，适用的保护圆锥区的大小不易确定。)，如图 203 b)所示。



a)　电缆跨距小于 0.9m　　b)　电缆跨距大于等于 0.9m

图 203　地下电缆的雷电防护

15.3.3.5.11　埋设的保护导线

对于埋设在地下但未封装在金属导管中的电缆，采用在电缆上方平行埋设保护导线的方法，能提供有效的瞬态防护。因此，推荐采用保护导线来保护未封装在金属导管中的埋设的设备线路。试验表明，截面为 54mm^2 的裸铜电缆已可提供有效的保护。保护导线应埋在受保护电缆或电缆沟的上方、距离不小于 0.25m 的土壤中，并平行于受保护的电缆或电缆沟。电缆埋设的宽度或沟的宽度不超过 0.9m 时，在电缆或沟的上方中央埋 1 根保护线就能提供有效的保护。当电缆埋设或沟的宽度大于 0.9m 时，应埋设 2 根保护导线。2 根保护导线至少应分开 0.3m，而且离最外边的导线、或沟的边缘 0.3m～0.45m(见图 203)。应将保护导线有效地搭接到每个端接设施的大地电极分系统上。最有效的搭接方法是放热熔焊。是否需要埋地保护线，不但与线路规划及市政工程有关，同时还与线路本身的情况及布置出发点有关，例如线路的优先级和瞬态的频次、幅值和波形。

15.3.3.5.12　次级交流浪涌保护器

在设施干线供电断路装置上安装正确选择的次级交流浪涌保护器，可以防止大能量的瞬态通过设施内的交流配电线耦合到设备上。安装的浪涌保护器应具有足够的保护特性：

a)　在预定时间内能完全耗散设施上可能产生的瞬态能量。推荐选择能在十年之内提供保护作用的浪涌保护器。

b)　具有足够快的导通时间，以保证瞬态能量在浪涌保护器导通和钳位之前不致造成危害。

c)　在耗散瞬态电流时，应保持足够低的放电(钳位)电压，以免损坏受保护设备。

d)　具有足够高的最大持续工作电压，以保证在正常工作过程中不导通。

e） 受保护线路一经放电，浪涌保护器应能完全熄灭。

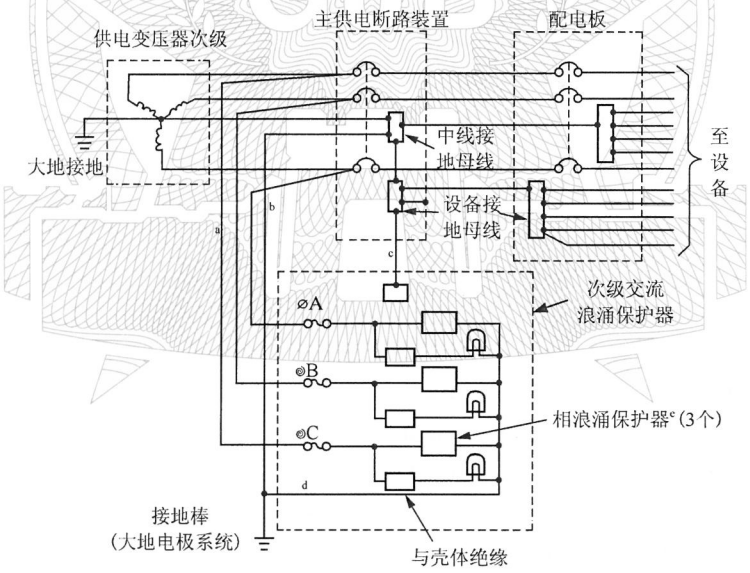
除上述特性要求之外，浪涌保护器应正确地安装，以保证最佳工作状态。在进入每一相浪涌保护器之前的线路上都应安装熔断器，以便当某个浪涌保护器万一短路时能提供保护，防止交流电源过载或损坏。应在浪涌保护器外壳面板上安装指示灯和报警器，在熔断器熔断后就能自动报警，以便维修。

15.3.3.5.13 浪涌保护器的安装

正确安装浪涌保护器对于其发挥最佳性能是非常重要的。如果不采用正确的安装程序，即使具有优良工作特性的浪涌保护器也不能正常地工作。所以应规定主要的安装准则，并将这些准则用于浪涌保护器每一相的输入和接地连接。所有浪涌保护器应按照制造厂商推荐的方法进行安装。

具体安装准则如下：互连线应尽可能短；采用截面足够大的互连线，以减小浪涌保护器到地通路的瞬态电阻和电感；互连线应尽可能直线敷设，不应弯成锐角走线，并尽可能减少弯曲次数；导线不应构成环路；大地接地连接线应短而直，而且应正确地搭接至大地电极分系统上。

对于浪涌保护器的输入连接，带中线和不带中线供电系统中浪涌保护器的装配分别表示在图 204 和图 205 中。如要获得尽可能好的保护效果，应将浪涌保护器连接到干线供电断路装置供电线路的一侧。但是，为了便于在维修浪涌保护器时脱开交流电源，允许将浪涌保护器接到干线供电断路装置的负载一侧。为了防止在浪涌保护器的通路上引入过大的瞬态电感和电阻，应采用最小截面积为 21mm^2、尽可能短的绝缘绞合铜线进行互连。同样，互连线也不应包含线环或急剧的折弯，否则浪涌保护器的响应速度就会延迟，并且会将一个高于浪涌保护器钳位电压的瞬态施加到受保护的设备上，从而增加设备损坏的可能性；当非常快的瞬态发生时，浪涌保护器很可能始终不能导通，结果全部瞬态能量将由受保护的设备来耗散。



注：对于由同一个电源供电的多幢建筑物，应在第一个供电断路装置的中线和地线之间增设一个浪涌保护器。

a 铜绞线，截面大于 21mm^2，带绝缘层及颜色标识，连线应直而短，不应急剧折弯。

b 带绝缘层及颜色标识的铜绞线。

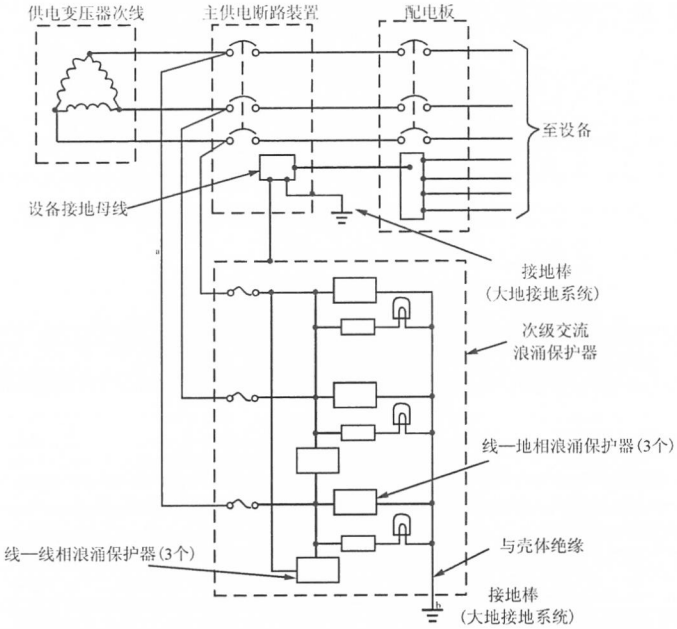
c 铜绞线，裸线或带绝缘，带颜色标识。

d 铜绞线，截面大于 21mm^2，带绝缘层及颜色标识；所用连线应直而短，不应急剧折弯。

e 图中画出了三个相浪涌保护器，对于单相保护断路装置，去掉二个相的浪涌保护器、保险丝和指示灯。

图 204 带中线供电系统次级交流浪涌保护器的安装(从单个电源至单个建筑物)

浪涌保护器的接地连接要求：当浪涌保护器接地不正确时，浪涌保护器的响应时间将会延长，并且将高于浪涌保护器钳位电压的电压施加到受保护的设备上。如果浪涌保护器的大地接地连接线带有线环或急剧折弯，或大地接地连接不能正确地搭接至大地电极分系统上，就可能会发生上述情况。图 205 所表示的浪涌保护器安装，接地路线最短，因此引线电感最小，保证了浪涌保护器的正常工作。为了获得最好的结果，与地下大地电极分系统的搭接应采用放热熔焊或等效方法。



[a] 铜绞线，截面不小于 21mm^2，带绝缘层及颜色标识。连线应短而直，不应急剧折弯。

[b] 铜绞线，截面大于 34mm^2，带绝缘层，连线应短而直，不应急剧折弯；可接到主供电断路装置的接地母线上。

图 205　不带中线供电系统的次级交流浪涌保护器的安装

15.3.3.5.14　现有的浪涌保护器类型

目前可用于雷电保护的浪涌保护器有以下四种类型：

a)　带有串联非线性电阻的火花隙浪涌保护器；

b)　气体放电管；

c)　金属氧化物压敏电阻器(MOV)；

d)　固态浪涌保护器，包括瞬态电压抑制器和晶体闸流管；

e)　上述几种器件的组合(复合型)浪涌保护器。

表 61 中列出前四类基本浪涌保护器的综合特性[58]。

表 61　各类浪涌保护器的综合特性

器件类型		工作模式	响应速度	脉冲通流容量	限压稳定性	电容	失效模式	额定脉冲电流下的寿命
火花隙浪涌保护器		开关	μs 级或 ns 级	非常大	中等	pF 级	开路	长
气体放电管		开关	μs 级或 ns 级	非常大	中等	pF 级	开路	长
MOV		限压型	ns 级	大	中等	nF 级或 pF 级	短路	短
固态浪涌保护器	瞬态电压抑制器（雪崩二极管）	限压型	ps 级	小	优良	pF 级	短路	长
	晶体闸流管	开关	μs 级或 ns 级	大	优良	nF 级	短路	长

15.3.3.5.15　浪涌保护器的特性参数

这里除介绍各种类型的浪涌保护器的工作特性之外，还给出选择浪涌保护器的导则。

a）　瞬态能量耗散能力　推荐选择能足以防护最坏情况的浪涌保护器。瞬态波形在 15.3.3.5.6 有规定。最严重情况下的波形是 2/40μs。预计要发生的瞬态频次和幅值可以参考表 57 和表 60 确定：

1）　在高雷击地区(平均每年 100 个雷暴日)，在 10 年期间内预料要发生 1750 次瞬态过程。对照表 60 就可以得出瞬态的幅值及其发生的次数，如表 62 所列。

2）　在低雷击地区(平均每年 10 个雷暴日)，在 10 年期间内预料要发生 175 次瞬态过程。相应的瞬态次数和幅值如表 63 所列。

3）　在小型电子设施上瞬态幅值是很小的。记录数据表明，大型电子设施势必比小型电子设施吸引更大能量的雷击。表 62 和表 63 中的瞬态幅值是相对于大型电子设施的，在正常工作中每相电流要求大于 100A 为大型电子设施。对于小型电子设施，幅值可减少 50%，即表 62 和表 63 中的瞬态幅值也可减少 50%。

表 62　强雷区的瞬态发生率

瞬态幅值 A	在 10 年期间的瞬态次数
500～2500	368
2501～5000	402
5001～10000	420
10001～20000	333
20001～30000	140
30001～40000	52
40001～50000	17
50001～75000	16
75001～100000	2

表 63　少雷区的瞬态发生率

瞬态幅值 A	在 10 年期间的瞬态次数
500～2500	37
2501～5000	40
5001～10000	42
10001～20000	33
20001～30000	14
30001～40000	5
40001～50000	1.75
50001～75000	1.5
75001～100000	0.175

b）　响应时间　充气火花隙、气体放电管和瞬态电压抑制器的响应时间指在特定试验电压和试验脉宽的脉冲作用条件下，从脉冲过电压开始作用于器件两端到器件发生击穿的延迟时间；MOV 的响应时间是指压敏电阻两端电压上升到钳位电压与达到峰值电压之间的时间差。浪涌保护器

中基本抑制器件的电离化、击穿及其他与击穿有关的现象都是与电压有关的，导通电压低的器件，其响应时间就短。浪涌保护器的响应时间要求取决于受保护的设备和元件的耐受电平。例如，如果仅是保护重负荷电气设备，如马达、接触器和开关之类，可以允许有相当长的导通时间 （1μs～5μs）。但是，如果要保护固态电子设备、或者既有电气又有固态电子设备的综合设施，则响应时间就非常关键。通常希望获得最短的响应时间，但是，费用和电流耗散能力却往往限制这种选择。

c) 响应时间的重要性 除在浪涌保护器导通和钳位之前直接承受瞬态能量的关键元件，对所有其他保护来说，50ns 的响应时间都已足够快了。固态器件可用来保护关键的设备元件，而充气火花隙浪涌保护器对重负荷电气设备（如马达、接触器和开关）则可提供足够的防护。响应时间长和导通电压高的浪涌保护器，不应用来保护内部装有低压快速导通瞬态抑制器或瞬态抑制电路的电子设备。否则，设备中的瞬态抑制器会在干线断路装置上的浪涌保护器导通之前导通并耗散瞬态能量，在大多数情况下，设备内的瞬态抑制器将迅速损坏。设施内配电板和配电线的电阻和电感不但会延缓瞬态的上升时间，还会在浪涌保护器导通前后耗散一些瞬态能量。这种电阻和电感与干线供电断路装置中的浪涌保护器一起，可提供附加的保护作用。但是，由此所提供的实际保护程度，将随着瞬态波形和设施内配电导线的尺寸及长度的改变而剧烈变化。总之，响应时间最重要的特性是：

1) 响应时间应足够短，以防止从瞬态发生到浪涌保护器导通，进而对入射瞬态钳位过程中，受保护设备承受过电压而损坏。

2) 浪涌保护器的导通电压和响应时间应与受保护设备内部的瞬态抑制器或抑制电路的特性一致。否则，浪涌保护器导通之前，设备的瞬态抑制器或抑制电路将耗散瞬态能量，并可能因此而遭到破坏，导致受保护设备的损坏或工作失常。

d) 钳位电压 钳位电压是指浪涌保护器使瞬态浪涌电流导通到地时在其输入端和接地端之间呈现的电压。装配在干线供电断路装置中的浪涌保护器上形成的钳位电压波形，在经受配电线路和配电板的电感和电阻吸收损耗之后，在受保护的设备上将有所反映。

1) 通常，希望采用钳位电压尽可能低的浪涌保护器。全固态浪涌保护器能提供非常低的可用钳位电压。但是，其他因素（如电流耗散能力和价格）往往限制在干线供电断路装置上简单地装配一个具有最低可用钳位电压的浪涌保护器。

2) 在新设施中，当设备交流输入端含有瞬态浪涌抑制器时，干线供电断路装置上允许有较高的钳位电压。较好的工程设计方案是，设备级抑制器的导通电压阈值比干线供电断路装置上的浪涌保护器稍低、但导通时间稍短。这就允许设备级抑制器以一个较低的钳位电压为设备提供最大的保护。这一方案中，在瞬态发生时，设备级抑制器将首先导通。

3) 上述线路安装时需要在相应的交流导体中串联一个规格合适的电感器（最小 2μH）。电感器应位于浪涌保护器和设备级瞬态抑制器之间，并且可以是浪涌保护器或设备级瞬态抑制器的一部分。

4) 设备级抑制器在瞬态电流导通时将立即开始趋近钳位电压。因为配电线路和配电板存在电阻和电感，所以，在设备级抑制器导通后，浪涌保护器很快导通（纳秒级）、并耗散大部分剩余瞬态能量。浪涌保护器导通后，设备级抑制器仅耗散浪涌保护器钳位电压所引起的瞬态能量。

5) 因此，浪涌保护器耗散大部分瞬态浪涌能量，而设备级抑制器则对设备提供了快速上升时间内的瞬态防护，并把浪涌保护器钳位电压降低至受保护设备安全许可的电平。总之，在耗散高瞬态能量的同时，浪涌保护器的钳制电压应足够低，以便在考虑下述因素的情况下对设备提供足够的保护：一是设施内设备级瞬态抑制器提供的保护；二是设施内的配电线和配电板的阻抗（电阻和电感）。

e） 最大持续工作电压　可连续施加在浪涌保护器上的最大交流工作电压有效值或直流工作电压。对于瞬态电压抑制器，又称为最高工作电压。

1） 雷电瞬态有效保护的设计，要求在瞬态发生时浪涌保护器以尽可能低的电压非常迅速地导通。另外，希望浪涌电流导通到地时在浪涌保护器上维持低的钳位电压。导通电压和响应时间相关，而钳位电压又与最大持续工作电压成比例。也就是说，低最大持续工作电压的浪涌保护器具有较低的导通电压（相应的导通时间较快）和较低的钳位电压。可见，浪涌保护器具有尽可能低的最大持续工作电压是很重要的。

2） 为实现有效的保护，对于安装在线、地之间的火花隙或气体放电管浪涌保护器而言，最大持续工作电压应为相应交流供电线路线地间标称电压的 200%～300%。对于相线间火花隙或气体放电管浪涌保护器而言，最大持续工作电压也应为相应交流供电线路线线间标称电压的 200%～300%。对于 MOV 浪涌保护器，最大持续工作电压应为相应交流供电线路线地间或者线线间标称电压的 150%～200%。

15.3.3.5.16　浪涌保护器的理想工作特性

用于设施级的有效保护，浪涌保护器需具有下列特性：

a） 响应时间：50ns 或更小。

b） 最大持续工作电压和泄漏电流：为了保证浪涌保护器在瞬变发生过程之外维持断开状态，对于充气火花隙或气体放电管，最大持续工作电压应为标称线电压的 200%～300%；对于 MOV 抑制器，最大持续工作电压应约为标称线电压的 150%～200%。在最大持续工作电压上泄露电流不应超过 100μA。

c） 极性：双极或单极，取决于线电压。

d） 导通电压：在 1mA 时，不超过最大持续工作电压的 125%。

e） 钳位电压：对于瞬态峰值 100A，不超过导通电压的 200%；对于瞬态峰值 1000A，不超过导通电压的 225%。

f） 工作寿命：在 10 年期间应能耗散预期发生的瞬态次数和幅值，见 15.3.3.5.19。

g） 恢复能力：所加的电压降到导通电压以下时，浪涌保护器应自动恢复到断开状态。

15.3.3.5.17　几类浪涌保护器的特性

15.3.3.5.17.1　概述

不同类型的浪涌保护器在性能价格上有很大差别，使用时应合理选择才能充分发挥它们的特点，弥补彼此的不足。虽然现有浪涌保护器中大多数具有较理想的特性，但也有些特性并不理想。有些类型能耗散极大的电流，但导通电压出现在浪涌保护器两端之后，导通得相当慢（150ns～200ns）；另一些类型导通较为迅速（50ns 或更短），可是不像较慢装置一样能耗散大量的电流，除非将许多装置并联应用，但这是不希望采用的；固态浪涌保护器虽然具有非常快的响应时间，但价格昂贵，而且大多数的电流耗散能力有限。复合型产品是由耗散低能量瞬态的固态抑制器和耗散高能量的瞬态抑制器组成，这两个抑制单元通常由一个与受保护相线串联的扼流圈分开。交流浪涌保护器 3 个最重要的特性是：能耗散所要求的浪涌电流量级；在耗散瞬态电流时维持低的放电（钳位）电压；快速的响应时间。快速响应时间是重要的，它可防止浪涌保护器导通和钳位之前高量级的瞬态能量（过冲电压）施加到受保护设备上。下面分别介绍各类抑制器及其典型的工作特性。

15.3.3.5.17.2　与碳化硅块串联的充气火花隙浪涌保护器

火花隙浪涌保护器能导通很大的电流。有些产品具有极大的放电工作能力，对于 10/20μs 波形的瞬态，其峰值放电能力为 150kA。这种产品的最小寿命是耗散 2500 次 10/20μs 波形的瞬态（峰值浪涌电流为 10kA）。对于上升速率为 10kV/μs 波形的瞬态，其脉冲火花放电（导通）峰值电压为 1.4kV。表 64 列出了波形为 10/20μs 的瞬态作用在与碳化硅块串联的火花隙浪涌保护器上的最大钳位电压。

表 64　与碳化硅块串联的火花隙浪涌保护器的典型最大钳位电压

峰值浪涌电流 kA	最大钳位电压 kV
10	2
40	3
150	5.5

续流：在浪涌保护器完全导通时，在火花隙上的典型放电(电弧)电压是 20V～30V。这种低电压电弧，在瞬态被耗散后，仍然由交流电源的电压和电流维持，使火花隙处于导通状态，直到电力电源首次零点交越为止，或直到电源线保险丝、电源线路、火花隙、甚至供电变压器被烧断为止。正是由于这种原因，需将碳化硅块(非线性电阻器)与火花隙串联接地，以保证火花隙在连接线首次零点交越时熄灭。更重要的是在瞬态被耗散后到电源线首次零点交越为止的这一段时间内(最大 10ms)，它可以限制通过火花隙的续流。碳化硅块是非线性电阻，当所施加的电压增高时，电阻值减少。这样，在电源电压上，它的电阻值相当高，限制了跟随电流；当施加高电平的瞬态电压时，它将减少到零点几欧姆。但是，在泄放大幅值的瞬态电流时，由该阻值产生的钳位电压也相当高。

火花放电(导通)电压：火花隙浪涌保护器的火花放电时间与瞬态上升时间直接相关，这是因为火花隙电离，从断开状态通过辉光阶段进入电弧工作状态需要一定的过渡时间。同样，电离时间在某种程度上也与瞬态的上升时间有关。火花放电电压出现在浪涌保护器两端之后，从断开状态至电弧工作状态的过渡时间，一般为 150ns～200ns。

总之，火花隙虽然能够进行高幅值瞬态放电，但它具有相当长的响应时间和相当高的击穿电压。对于 10/1000μs 波形的响应时间为 3μs～5μs，击穿电压典型值为 300V～500V，典型的电弧电压为 20V。会产生跟随电流(一般为 10A～80A)，但通常不会出现重大问题。图 206 给出了具有串联有碳化硅电阻器的充气火花隙浪涌保护器的典型工作曲线。

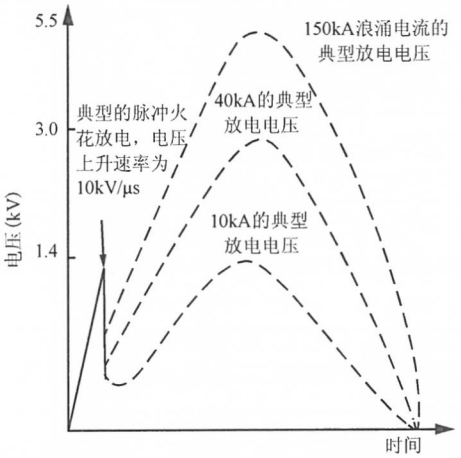


图 206　串联有非线性电阻的火花隙浪涌保护器典型工作曲线

15.3.3.5.17.3　气体放电管

气体放电管是一种陶瓷或玻璃封装的、内充低压惰性气体的短路型保护器件。其基本的工作原理是气体放电，当极间的电场强度超过气体的击穿强度时，就引起间隙放电，从而使与气体放电管并联的设备得到保护。气体放电管比火花隙具有更好的可控击穿电压。

气体放电管有如下的主要电气参数[59][60]：

a) 直流击穿电压：施加缓慢升高的直流电压(一般为 100V/s)时，气体放电管从高阻抗状态转变为导通状态时刻的电压。

b) 冲击火花放电电压：对气体放电管施加一定上升速率的单次冲击电压(一般为 100V/μs 或 1kV/μs)，在放电电流流过气体放电管之前，其两端子间的电压最大值。气体放电管的响应时间和动作时延与电压脉冲的上升陡度有关，对于不同的上升陡度，气体放电管的冲击火花放电电压是不同的。

c) 标称冲击放电电流：将气体放电管通过规定波形和规定次数的脉冲电流，其直流放电电压和绝缘电阻不发生明显变化的电流峰值。脉冲波形分为 8/20μs 和 10/1000μs 两种，一般以 8/20μs 波形用得较多。冲击放电电流又分为 8/20μs 波形冲击 1 次和 8/20μs 波形冲击 10 次两种，一般后者约为前者的一半左右。

d) 标称交流放电电流：气体放电管通过工频电流 5 次，其直流击穿电压和绝缘电阻不发生明显变化的最大交流电流。一般要求气体放电管能通过持续时间为 1s 相隔 3 分钟的交流放电电流 10 次。

e) 绝缘电阻：指气体放电管未放电时的极间电阻，一般为 100V 直流偏置下测得的数值。

f) 电容：指在一定频率下(一般为 1MHz)下测得的极间电容值。

表 65 为典型气体放电管的参数。

表 65 气体放电管的典型性能参数

直流击穿电压 V	冲击火花放电电压 V		标称交流放电电流 A	标称冲击放电电流 8/20μs kA		绝缘电阻 GΩ	电容 pF
	@100V/μs	@1kV/μs		10 次	1 次		
75	＜500	＜600	5	5	10	＞1	≤1
90	＜500	＜600	5	5	10	＞1	≤1
150	＜500	＜600	5	5	10	＞1	≤1
230	＜600	＜700	5	5	10	＞1	≤1
250	＜600	＜700	5	5	10	＞1	≤1
300	＜800	＜900	5	5	10	＞1	≤1
350	＜900	＜1000	5	5	10	＞1	≤1
400	＜900	＜1000	5	5	10	＞1	≤1
420	＜900	＜1000	5	5	10	＞1	≤1
470	＜1100	＜1200	5	5	10	＞1	≤1
500	＜1100	＜1200	5	5	10	＞1	≤1
600	＜1200	＜1300	5	5	10	＞1	≤1
800	＜1300	＜1400	5	5	10	＞1	≤1
1000	＜1400	＜1500	5	5	10	＞1	≤1
1500	＜2200	＜2500	3	3	5	＞1	≤1
2000	＜2600	＜3000	3	3	5	＞1	≤1
2500	＜3200	＜3500	3	3	5	＞1	≤1
3000	＜3800	＜4000	3	3	5	＞1	≤1
3600	＜4500	＜4700	3	3	5	＞1	≤1
4000	＜5300	＜5500	3	3	5	＞1	≤1
4500	＜5500	＜6000	3	3	5	＞1	≤1
5500	＜7200	＜7500	3	3	5	＞1	≤1

15.3.3.5.17.4　金属氧化物压敏电阻器(MOV)类型浪涌保护器

MOV 又称为压敏电阻器。目前普遍采用的是氧化锌压敏电阻器。在 MOV 的发展史上，除了氧化锌压敏电阻外，还曾出现过齐纳二极管、碳化硅、硒堆、氧化锡等压敏电阻。由于齐纳二极管性价比较低，碳化硅、硒堆、氧化锡等压敏电阻的特性不能满足应用的需要，现在都已经被氧化锌压敏电阻取代。当 MOV 两端所加电压低于标称额定电压值时，其电阻值接近无穷大，内部几乎无电流流过。当 MOV 两端电压略高于标称压敏电压时将迅速击穿导通，并由高阻状态变为低阻状态，工作电流也急剧增大。MOV 具有几个理想的特性：相当短的导通时间(50ns 或更短)、低的导通电压、相当低的钳位电压、以及多种量级的电流耗散能力。压敏电压低于 82V 的称为低压 MOV，压敏电压大于等于 82V 的称为高压 MOV。

MOV 有如下的主要电气参数[59][61]：

a) 最大持续交流工作电压 $U_{C(ac)}$：在环境温度 25℃下，可以连续施加在元件上的，波形基本上是正弦波(总谐波失真小于 5%)的最大交流电压有效值。

b) 最大持续直流工作电压 $U_{C(dc)}$：在环境温度 25℃下，可以连续施加在元件上的最大直流电压值(纹波小于 5%)。

c) 标称压敏电压 U_N：在规定的温度和直流测试电流下，MOV 两端产生的端电压，除非另有规定，直流测试电流为 1mA。

d) 钳位电压 U_{cla}：施加规定波形和幅值的冲击电流 I_p 时，在 MOV 两端测得的最大电压值，又称限制电压。除非另有规定，冲击电流波形为 8/20μs。

e) 通流量：MOV 能够承受的波形为 8/20μs 的最大浪涌电流峰值。一般通常给出两个通流量指标，一个是冲击一次指标，另一个是冲击两次(间隔 5 分钟)的指标。

表 66 列出了一类 MOV 的典型特性，而表 67 列出了一种高能量级 MOV 的典型特性。

电流耗散：试验已证明，列于表 66 的器件并联连接后可用于线对地或线对线的保护。MOV 并联连接不但可提高电流耗散能力，并且比单个或高能量的 MOV 有更低的最大钳位电压。5 个器件并联后的浪涌抑制能力列于表 68。

导通：尽管 MOV 并不是固态结型器件，但这类浪涌保护器的作用很像固态结型器件。这就是说，当达到击穿电压后，从断开状态至导通的转换发生得很快，如图 207 b)所示。图 207 b)是 MOV 的典型工作曲线。由于这类浪涌保护器中的抑制器件实质是非线性的，其两端施加的电压增加到击穿电压值以上时，电阻迅速降低，流过的电流却迅速地增加。由于受 MOV 中电阻和电容的影响，钳位电压略滞后于瞬态电流波形。当所施加的电压降到导通电压以下时，这类浪涌保护器就自动恢复到断开状态。所以，在断相期间没有电流出现。

表 66　MOV 的典型特性

电阻直径 mm	最大持续交流 工作电压 V	最大持续直流 工作电压 V	标称压敏电压 V	钳位电压 V		通流容量 A	
				U_{cla}	I_p(A)	一次	两次
5	11～300	14～385	18～470	$40 \leqslant U_{cla} < 210$	1.0	800	600
				$210 \leqslant U_{cla} \leqslant 810$	5.0		
7	11～320	14～430	18～485	$36 \leqslant U_{cla} < 200$	2.5	1750	1250
				$200 \leqslant U_{cla} \leqslant 845$	10		
10	11～680	14～895	18～1100	$36 \leqslant U_{cla} < 200$	5.0	3500	2500
				$200 \leqslant U_{cla} \leqslant 1815$	25		
14	11～1000	14～1465	18～1800	$36 \leqslant U_{cla} < 200$	10	6000	5000
				$200 \leqslant U_{cla} \leqslant 2970$	50		
20	11～1000	14～1465	18～1800	$36 \leqslant U_{cla} < 200$	20	10000	7000
				$200 \leqslant U_{cla} \leqslant 2970$	100		

表 67　高能量 MOV 的典型特性

规格	3 个 80mm 圆盘并联	
电力线路电压	250V 交流(最高)	
标称压敏电压	560V	
钳位电压 (波形 10/20μs)	电流 kA	钳位电压 V
	10	1300
	40	1600
	150	2450

表 68　5 个 MOV 并联连接的试验结果

施加的浪涌次数	浪涌幅值	钳位电压(峰值)
2000	250A, 1.0kV	300V
2500	400A, 1.6kV	315V
225	20kA, 8.75kV	500V
25	40kA, 16.8kV	650V
8	50kA, 20.0kV	700V

15.3.3.5.17.5　固态浪涌保护器

由于有多种不同类型的固态浪涌保护器，以致通常很难对它们作出统一的评价。由硅雪崩二极管(SAS)构成的瞬态电压抑制器作为固态浪涌保护器可获得所希望的电流控制能力，如 1ns～10ns 的快速响应时间。但是，这种类型的浪涌保护器通常只能控制大约 500A 以下的浪涌电流(波形 8/20μs～8/40μs)。图 207a)是此类瞬态电压抑制器的典型工作曲线。这类浪涌保护器与其他浪涌保护器相比，有较低的钳位电压(一般最大为击穿电压的 160%)。另一种固态浪涌保护器是带有晶体闸流管的组合件，它由硅雪崩二极管或整流二极管连接成桥式网络，与其相接的第二级主要由晶体闸流管和限流变阻器串联而成。这类浪涌保护器的响应时间慢，有的达 1μs，这是因为晶体闸流管的导通速度慢。同时固态浪涌保护器的钳位电压也可能完全取决于晶体闸流管限流变阻器的阻值。固态浪涌保护器应用之前，需要进行全面的实验室验证试验。

瞬态电压抑制器有如下主要电气参数[59][62]：

a)　最高工作电压 V_{WM}：可连续施加在瞬态电压抑制器上的最高工作电压。对于交流电压，用电压有效值 $V_{WM\,rms}$ 表示。

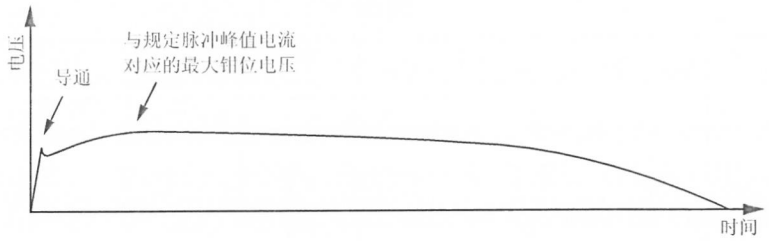
b)　击穿电压 V_{BR}：在规定的脉冲直流试验电流 I_T 或接近发生雪崩的电流条件下，瞬态电压抑制器两端测得的电压。

c)　脉冲直流试验电流 I_T：测量击穿电压 V_{BR} 的试验电流，该电流值由制造商确定，通常以脉冲持续时间小于 40ms 的毫安级电流给出。

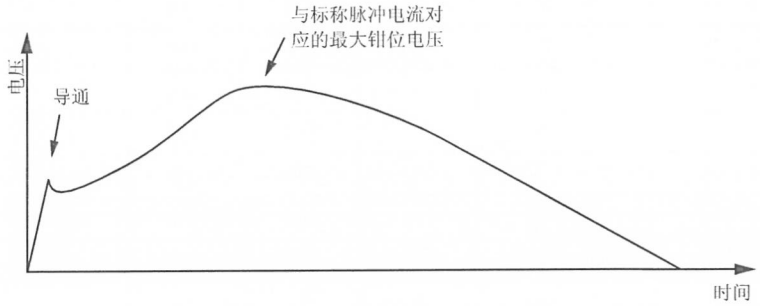
d)　钳位电压 V_C：施加规定波形脉冲电流时，瞬态电压抑制器两端测得的峰值电压。

e)　反向漏电流 I_R：在规定温度和最高工作电压条件下，流过瞬态电压抑制器的最大电流。

表 69 列出了最大可承受功率为 400W 的 P4KE 系列硅雪崩二极管瞬态电压抑制器的有关特性。



a)　SAS



b)　MOV

图 207　典型的 MOV 和 SAS 工作曲线示意图

表 69　某承受功率为 400W 的系列瞬态电压抑制器参数

最高工作电压 V_{WM} V	击穿电压 V_{BR} V	脉冲直流试验电流 mA	钳位电压 V_C V	反向漏电流 I_R μA	最高工作电压 V_{WM} V	击穿电压 V_{BR} V	脉冲直流试验电流 mA	钳位电压 V_C V	反向漏电流 I_R μA
5.5	6.12	10	10.8	1000	13.6	15.2	1	22.5	5
5.8	6.45	10	10.5	1000	14.5	16.2	1	26.5	5
6.05	6.75	10	11.7	500	15.3	17.1	1	25.2	5
6.4	7.13	10	11.3	500	16.2	18	1	29.1	5
6.63	7.38	10	12.5	200	17.1	19	1	27.7	5
7.02	7.79	10	12.1	200	17.8	19.8	1	31.9	5
7.37	8.19	1	13.8	50	18.8	20.9	1	30.6	5
7.38	8.65	1	13.4	50	19.4	21.6	1	34.7	5
8.1	9	1	15	10	20.5	22.8	1	33.2	5
8.55	9.5	1	14.5	10	21.8	24.3	1	39.1	5
8.92	9.9	1	16.2	5	23.1	25.7	1	37.5	5
9.4	10.5	1	15.6	5	24.3	27	1	43.5	5
9.72	10.8	1	17.3	5	25.6	28.5	1	41.4	5
10.2	11.4	1	16.7	5	26.8	29.7	1	47.7	5
10.5	11.7	1	19	5	28.2	31.4	1	45.7	5
11.1	12.4	1	18.2	5	29.1	32.4	1	52	5
12.1	13.5	1	22	5	30.8	34.2	1	49.9	5
12.8	14.3	1	21.2	5	31.6	35.1	1	56.4	5
12.9	14.4	1	23.5	5	33.3	37.1	1	53.9	5

表 69(续)

最高工作电压 V_{WM} V	击穿电压 V_{BR} V	脉冲直流试验电流 mA	钳位电压 V_C V	反向漏电流 I_R μA	最高工作电压 V_{WM} V	击穿电压 V_{BR} V	脉冲直流试验电流 mA	钳位电压 V_C V	反向漏电流 I_R μA
34.8	38.7	1	61.9	5	111	124	1	179	5
36.8	40.9	1	59.3	5	121	135	1	215	5
38.1	42.3	1	67.8	5	128	143	1	207	5
40.2	44.7	1	64.8	5	130	144	1	230	5
41.3	45.9	1	73.5	5	136	152	1	219	5
43.6	48.5	1	70.1	5	138	153	1	244	5
45.6	50.4	1	80.5	5	145	162	1	234	5
47.8	53.2	1	77	5	146	162	1	258	5
50.2	55.8	1	89	5	154	171	1	246	5
53	58.9	1	85	5	162	180	1	287	5
55.1	61.2	1	98	5	171	190	1	274	5
58.1	64.6	1	92	5	175	198	1	344	5
60.7	67.5	1	108	5	185	209	1	328	5
64.1	71.3	1	103	5	202	225	1	360	5
66.4	73.8	1	18	5	214	237	1	344	5
70.1	77.9	1	113	5	243	270	1	430	5
73.7	81.9	1	131	5	256	285	1	414	5
77.8	86.5	1	125	5	284	315	1	504	5
81	90	1	144	5	300	332	1	482	5
85.5	95	1	137	5	324	360	1	574	5
89.2	99	1	158	5	342	380	1	548	5
94	105	1	152	5	356	396	1	631	5
97.2	108	1	173	5	376	418	1	600	5
102	114	1	165	5	445	495	1	791	5
105	117	1	187	5	467	522.5	1	760	5

15.3.3.5.17.6 复合型浪涌保护器

复合型浪涌保护器是两级浪涌保护器的组合。第一级由充气火花隙与 MOV 组成，用以耗散高能瞬态。第二级是耗散低能量瞬态的固态级，这两级浪涌保护器由一个直流电阻很低的扼流圈隔开。瞬态到来后，低能量耗散级首先响应以获得快速的响应时间。当在扼流圈两端形成足够的电压时，高能量耗散级才导通并耗散高电平的瞬态能量。复合型浪涌保护器有效利用了现有不同器件的特性，例如，瞬态电压抑制器的快速接通和低钳位电压特性，以及充气火花隙与 MOV 的大电流耗散能力。

15.3.3.5.18 设备外露线路的瞬态防护

为了有效防止设备外露(外边)线路由雷电引起的瞬态损坏设备，应对下列内容作出规定：

a) 瞬态发生的频次；

b) 瞬态的幅值和波形；

c) 设备耐受水平；

d) 防止瞬态的保护方法。

15.3.3.5.19　瞬态发生频次的预测

在给定时间和地点发生的雷电瞬态次数，尚无精确计算方法。但是，根据现有统计数据(见 15.3.3.5.5)，在平均每年有 100 个雷暴日的高雷击地区的设施上，10 年时间内将发生 1750 次瞬态，而在平均每年有 10 个雷暴日的低雷击地区的设施上，10 年时间内将发生 175 次瞬态。注意，低雷击地区的瞬态次数降低了一个数量级。可利用图 42 确定在具体地点每年平均雷暴日，同时将每 10 年的 1750 次瞬态发生次数降低至 10%，得到某一地方每年发生的瞬态次数。

15.3.3.5.20　瞬态的幅值和波形

陆地通信线路上发生的瞬态波形为 10/1000μs，脉冲峰值电压 1000V，其中 10μs 是从瞬态开始至峰值电压的时间，而 1000μs 是从瞬态开始直到幅值按指数下降为峰值 50%的时间。无法准确规定源阻抗，设计时可假定为 1Ω。同样，典型的雷电感应瞬态可以规定为 10/1000μs 的波形、1000V 峰值电压以及 1000A 的峰值浪涌电流。对于这里所规定的瞬态脉冲条件和 15.3.3.5.19 规定的 1750 次瞬态脉冲，利用表 60 可得出强雷区(平均每年 100 个雷暴日)外露线路上 10 年时间内各种幅值的瞬态次数，如表 70 中所列。

表 70　强雷区 10 年内在外露线路中预计要发生的瞬态次数

瞬态次数	百分率%	峰值电压 V	峰值电流 A
2	0.1	750～1000	750～1000
15	0.9	500～749	500～749
18	1	400～499	400～499
53	3	300～399	300～399
140	8	200～299	200～299
332	19	100～199	100～199
420	24	50～99	50～99
403	23	25～49	25～49
367	21	5～24	5～24
注：设计时可假定源阻抗为 1Ω。			

15.3.3.5.21　设备耐受电平

设备耐受电平通常如 15.3.3.5.4 规定。但是，制造厂通常并未规定设备或元件对雷电瞬态浪涌的耐受电平。对每台被保护的设备，分析和确定其耐受电平是必不可少的。耐受电平可以比设备的损坏阈值和工作受扰电平低 10%。损坏阈值电平定义为元件立即发生破坏的电平，或反复施加、可以降低设备元件有效工作寿命时间的能量电平，以低者为准。工作受扰电平定义为导致设备工作降级的瞬态电压。确定精确的耐受电平是必不可少的。否则，所设计的瞬态抑制器可能无效，或者所设计的昂贵的瞬态防护措施实际上并不需要。

15.3.3.5.22　防止瞬态的保护方法

为了对设备外露的信号线、状态线、控制线以及设施内部的交流和直流线路上由雷电产生的瞬态提供有效的防护，应正确实施下列条款所规定的方法：

a)　将埋地线路始终封装在水密的黑色金属导管中；

b)　在埋地的、不带金属封装导管的电缆上面，埋设保护导线；

c)　在设备外露线两端的线－地之间连接瞬态抑制器，并尽可能安装在线路刚刚贯通建筑物的地点或外接设备的端接点上；

d)　在所有外部线路至设备的界面上，将瞬态抑制器或瞬态抑制线路作为受保护设备整体的一部分处理；

e） 射频同轴线贯通建筑物时，其屏蔽层应搭接到建筑物的入口金属板上。

15.3.3.5.23 在黑色金属导管内走线

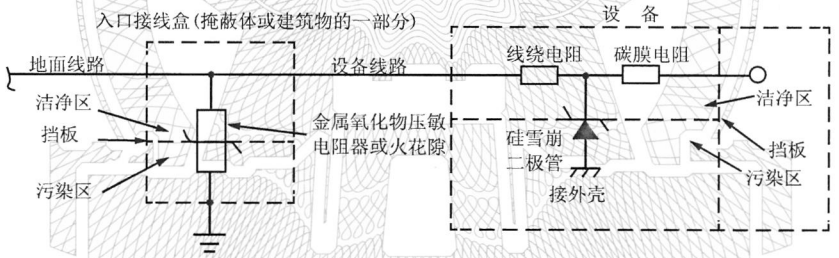
由雷电电流和云与云之间放电所产生的电磁波会在外部线路上感应出瞬态电压。所以，将埋地的外部电缆完全封装在电气连续的水密黑色金属导管中走线，可对雷电所产生的瞬态提供有效防护。

费用的考虑：当埋地的电缆敷设长度小于 90m 时，将电缆始终敷设在金属导管中是经济实用的。当电缆敷设长度超过 90m 时，在建筑物贯通处和设备接口上安装瞬态抑制器要比安装导管经济实用得多。但是，不管电缆敷设长度如何，使用金属导管就能有效地防止感应瞬态。导管应从一个建筑物贯通处一直延伸至另一建筑物的贯通处，或从建筑物贯通处延伸至外部设备的端口上。

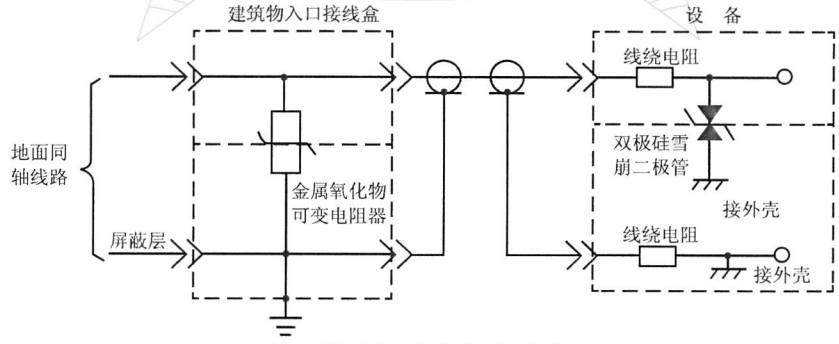
导管接地：为提供有效的防护，导管应是电气连续的，并且每一端都应有效地搭接到大地接地系统。截面 34mm^2 的裸铜绞合电缆对大地接地连接是合适的。放热焊可有效地用于地下的搭接。合格的密封连接器适用于地面之上。敷设电缆超过 90m 时，应在导管的每一端及每隔 30m 的位置将导管接到大地接地系统。导管至大地电极分系统的总搭接电阻应为 5mΩ 或更小，导管可以利用天线塔的结构钢架有效接地。

金属导管中线路瞬态的抑制：对于外部线路或设备接口，只需用单级瞬态抑制器就可有效地抑制金属导管中的线路所传导的感应瞬态。单级瞬态抑制器可以安装在建筑物的贯通处，或把它设计成相应设备整体的一部分。单级瞬态抑制可以由接在线路到地之间的一个抑制器完成，或者在外部线路入口处串接两个电阻，再在这两个电阻的连接点与大地或设备的外壳地（这取决于瞬态抑制器的安装位置）之间接一个雪崩二极管，见图 208 a）。

封装在金属导管内的外部线路瞬态的幅值：雷电在外部电缆上产生的瞬态次数不会由于电缆在金属导管中敷设而改变，但瞬态电压和电流幅值至少降低 90%。因此，可以利用表来预测高雷击地区外露线路以及包封金属导管之后发生的瞬态次数和幅值（电压和电流）。



a） 瞬态抑制的典型配置



b） 外露同轴电缆的瞬态保护

注：图 a）中，硅雪崩二极管可以是单极性或双极性的，取决于线路电压。

图 208 设施和设备级瞬态抑制器的典型安装

15.3.3.5.24 瞬态抑制

为了有效地防止雷电所发生的瞬态危及设备，在外露线路与电气或电子设备之间的接口上，线路的

每个端子都应进行瞬态抑制。当设备的耐受电平低于线路与设备连接处发生的瞬态电平时，都应按上述要求处理。正如前面指出，全部封装在电气连续的黑色金属导管内的线路上所发生的瞬态幅值，仅为未封装线路上瞬态幅值(表)的 10%。最有效的保护设计是在建筑物贯通处，在所有线路与大地之间接一个高能量级的瞬态抑制器。同时再把低能量瞬态抑制作为设备整体设计的一部分。图 208 给出了供设施和设备级同轴电缆和单线(或线对)瞬态抑制器的典型安装方法。在建筑物贯通处的抑制器应安装在连接外露线的、刚刚贯通入口板处的接线盒内。

瞬态抑制器的接地：为了使瞬态抑制器能正确工作并提供最佳的设备保护，瞬态抑制器的接地端应尽可能直接连接到大地接地处。高能量级抑制器的接地端应直接连接到最靠近的接线盒壳体上。

瞬态抑制器的安装：将瞬态抑制器安装在合适的接线板和接地母线之间，并利用短的直导线直接连接。保持短引线是重要的，它可防止长引线的电感延迟抑制器的导通和响应。

15.3.3.5.25　瞬态抑制器的封装设计

对于标准导线和屏蔽绞合线对，瞬态抑制器的封装并不是关键的。但是，引线应带绝缘，并尽量是短的直线连接。用于同轴线和屏蔽双线的瞬态抑制器应连同其两端的连接器(一个插头和一个插座)封装在金属和环氧树脂的外壳内，并将插头座垂直安装在接口处接线盒的面板上。所有屏蔽双线抑制器的封装应包含两个抑制器。

15.3.3.5.26　同轴电缆贯通入口板时屏蔽层的连接

为了提供有效的瞬态防护，应当把每根射频同轴电缆四周都搭接到连接器罩壳，而罩壳本身又搭接到建筑物入口板，最后接到大地电极分系统，这样电缆屏蔽层上的瞬态电流就可以直接流入大地，而不是通过端接设备到地。同样，在瞬态能量耦合到设施内其他设备线路之前，应把瞬态浪涌电流旁路到地。入口板由钢板制成，其最小厚度 6mm。入口板所安装的同轴馈通连接器数量和规格应能满足全部引入导线的端接要求。连接器还应为电缆屏蔽层提供一条到地通路。如果外部和内部同轴电缆结构尺寸不同，尺寸转换可由入口板上的馈通连接器来完成。入口板应当通过一条截面积在 54mm^2 以上、并带有绝缘层的铜电缆连接到大地电极分系统上。应采用放热熔焊将电缆搭接到入口板和大地电极分系统。

15.3.3.5.27　电缆中备用导线的接地

外露敷设的电缆中，所有未使用的导线或线对，每端都应接地。这种措施将使备用导线上的瞬态减小，以免其耦合到电缆束中其他导线上。

15.3.3.5.28　射频同轴线的瞬态抑制

对于传输信号的外露射频同轴线，最好的方法是自始至终把它封装在黑色金属导管中，并把瞬态抑制器件作为所用设备整体的一部分处理。目前已有适用频率范围 DC～3GHz、8/20μs 的最大脉冲电流容量可达 5000A 的瞬态抑制器件。

15.3.3.5.29　设备级瞬态抑制

在 15.3.3.7 将讨论设备级的瞬态防护。一般说来，可利用与外部线路输入端串联的低值电阻器和线到地之间的瞬态电压抑制器提供有效保护。设备级抑制器的组成包括：火花隙、与射频扼流圈并联的瞬态电压抑制器、或 MOV 与射频扼流圈的组合。

15.3.3.6　雷电瞬态防护的评定

为评定是否已提供了有效和足够的瞬态抑制措施来防止雷电瞬态引起的损伤，需要详细审查设施图纸和进行外观检查，并做出必要的纠正。

a)　设施图纸。需审查下列项目的设施图纸，并草拟随后的外观检查内容：

1)　在市电供电变压器初级和次级上是否配备了浪涌保护器；

2)　封装在水密黑色金属导管内的埋地交流电源线，在变压器处有无接大地？在设施终端有无接到大地电极分系统上？接地连接用的铜绞线截面积是否不小于 34mm^2；

3)　从供电变压器至设施的电力线有无架空保护线保护？保护导线每一端是否都已接地？保护导线有无为供电线提供 1:1 的圆锥保护区；

4） 在设施干线供电断路装置(如果多于 1 个，应在每个干线断路装置)上是否都配备了交流浪涌保护器？在草图上注明制造单位和元件编号；

5） 端接到外部设备上的外部线路，其中包括与设施设备相连的射频同轴线，如果电缆敷设的长度为 90m 或更短时，是否已封装在水密的黑色金属导管中？导管的每端有无连接到大地电极分系统上；

6） 与设施相连、长度大于 90m、且未封装在黑色金属导管中的埋地陆上线路，在其电缆沟中是否自始至终设置了保护导线？保护导线的每一端是否已接到大地电极分系统上；

7） 在建筑物贯通处，所有射频同轴电缆连接器的罩壳是否已在金属入口板上接地；

8） 贯通建筑物后的第一个端接处，未封装在黑色金属导管中的外部导线的端子，有无安装线对地的瞬态抑制器或瞬态抑制电路？但传输信号高于 3MHz 的射频同轴线不在此列。

b） 检查。16.2.3.4.4 中的勘测表格为完成整个外观检查提供了导则。应对所有缺陷作详细的书面记录。

c） 纠正措施。对每项查明的缺陷所应执行的具体纠正措施难以详述，例如：敷设长度小于 90m 的电缆，可能并未自始至终地封装在电气连续的水密黑色金属导管中。在雷电强度和发生率中等的地区，经济可能性和实际必要性，往往是确定安装金属导管是否合理和实用的重要因素。对所举的例子来说，大多数情况下，在外露设备线路的每一端上安装瞬态抑制电路是最实用的解决办法。但是，在线路至设备连接处直接安装瞬态抑制器也是允许的，这取决于设备敏感度和雷电发生频次。应分别考虑每种缺陷，参照 15.3.3.5 和 15.3.3.7 的要求，以最可行的方法来纠正缺陷。一些典型缺陷及其纠正措施举例如下：

1） 如果次级交流浪涌保护器并未安装在设施上，而且在该地区上也没有任何雷击事件的历史，则只需在干线供电断路装置的引入线路或负载侧安装一个浪涌保护器，可参考 15.3.3.5 确定所选择的浪涌保护器是否足够和有效；

2） 如果浪涌保护器和瞬态抑制电路不具备有效的低阻抗大地接地通路，应采用一切可行的措施来提供有效接地；如果没有有效的接地，那么浪涌保护器和抑制电路就不能提供有效的瞬态防护；

3） 在所有暴露在外(没有封装在金属管内)、并且连接着敏感设备的线路上，如果不安装瞬态抑制电路，则至少应在连接敏感设备的每一根线的引入端上安装瞬态抑制电路，安装要求见 15.3.3.5 和 15.3.3.7。

15.3.3.7 设备级瞬态防护

15.3.3.7.1 防护要求

与外露设备线路(包括民用交流线路)直接相连的某些电气和电子设备，可能需要瞬态防护，并将其设计成该设备整体的一部分。是否需要保护，取决于所关心设备的损坏敏感度、在建筑物贯通处外露线路或外部设备终端上已提供的瞬态抑制电平，以及预计要引入设备的瞬态能量电平。就本指导性技术文件而言，外露线路定义为暴露在外界环境中的线路。这种线路可能架空敷设，也可能沿地表面敷设或在大地中埋设。外露线路包括交流电源输入线、信号线、控制线、状态线。外露线路及设施内部的电源线通常被列为陆上线路。当连接的陆上线路是光纤而不是金属线路时，设备内部不要求瞬态防护。为了提供有效的瞬态防护，除需要确定设备的耐损坏(耐受)电平之外，还应了解传导到设备的瞬态幅值和频次。设备在下述三方面的电路通常要求瞬态防护：

a） 交流电源输入端；

b） 其他外露线路与设备连接处；

c） 由民用交流电源供电、并为固态电路设备提供 5V～48V 直流工作电压的整流器输出端。

15.3.3.7.2 瞬态的定义

对于民用交流输入线路和连接到设备的其他陆上线路，可能出现的瞬态波形和幅值如下：

a) 交流电源线路的瞬态。预计 10 年时间内雷电在设备交流电力输入线路上产生的瞬态次数和幅值列在表 71 和表 72 中。瞬态波形是 8/40μs，其中 8μs 是瞬态从起始至幅值峰值的上升时间。而 40μs 是半峰值宽度。所列瞬态是以 15.3.3.5.5 数据为依据的。在两个表中列出的是瞬态钳位电压，此钳位电压是安装在干线供电断路装置上(见 15.3.3.5)的设施次级交流浪涌保护器抑制瞬态浪涌时施加到设备上的。实际施加在受保护设备上的电压和电流必然与该电源干线供电断路装置所带设备数量和类型有关。

b) 陆上线路的瞬态。预计要传导至每个陆上通信线路设备接口上的瞬态频次和幅值列在表 73 中。瞬态的波形是 10/1000μs。10μs 是从 0 到瞬态幅值峰值的上升时间，1000μs 是半峰值宽度。在表 73 中给出的资料是以 15.3.3.5.5 所给数据为依据的。因为设备设计者一般并不知道外部线路是否要封装在黑色金属导管中，所以表中没有提供外部线路封装在金属导管中后各种瞬态幅值。

表 71　预计 10 年期间由次级交流浪涌抑制器施加到设备上的线对地瞬态浪涌

浪涌电压电流幅值(波形 8/40μs)	浪涌次数
1.5kV，100A	1500
2kV，200A	700
2.5kV，300A	375
3kV，500A	50
3.5kV，1kA	5
4kV，1.5kA	2
4.5kV，2kA	1

表 72　预计 10 年期间由次级交流浪涌抑制器施加到设备上的线对线瞬态浪涌(仅不带中线设施)

浪涌电压电流幅值(波形 8/40μs)	浪涌次数
500V，50A	1000
750V，100A	100
1kV，200A	50
1.5kV，300A	10

表 73　预计 10 年期间在外露的陆地线路上发生的瞬态浪涌

浪涌电压、电流幅值	浪涌次数
100V，50A	1000
500V，100A	500
750V，375A	50
1000V，1000A	5

15.3.3.7.3　设备损坏(耐受)电平的确定

制造厂通常不规定元件的耐受电平。所以，应对设备中直接与任何外露线路(其中包括交流输入线路)相连的部分进行分析，以确定它们的耐受电平。表 71、表 72 和表 73 提供了预计要传导到设备上的瞬态。分析应以实验室试验结果或工程分析为依据，而且应包括设备中暴露在瞬态中的所有电路。决定设备耐受电平的因素有三个：

a) 元件破坏电平：元件破坏电平是引起元件直接破坏、或使元件性能降级的瞬态能量电平。

b) 缩短元件工作寿命的电平：反复施加某种瞬态能量电平的结果，也会使元件反复经受过载应力，

造成这些元件有效工作寿命的明显缩短。在某些情况下，这种能量电平也许很难确定，但是，它在设计瞬态防护时确实十分有用。

c) 扰乱电平：扰乱电平是引起设备工作状态改变的瞬态能量电平。由于设备工作状态的改变通常会使有关系统的工作产生不可容忍的改变，所以瞬态防护应确保施加到受保护设备上的瞬态能量电平绝不引起扰乱。

为了最终确定设备的耐受电平，就得将引起元件直接破坏、过应力损伤或设备扰乱电平的瞬态能量电平进行比较，选择三种瞬态能量中最低的电平，并且以最低的瞬态能量电平为基准，再降 10%作为耐受电平。

15.3.3.7.4 瞬态防护要求的认定

由输入交流供电并对固态设备提供 5V～48V 直流电压的整流电源往往需要内部瞬态防护。直接连接外露线路，包括民用交流输入线路的其他设备，是否需要将瞬态防护设计为设备整体的一部分，可将其耐受电平与表 71、表 72 和表 73 中适用的瞬态进行比较后决定。如果设备耐受电平高于表中提供的瞬态幅值，则不需进行设备级的瞬态防护。如果设备耐受电平低于表中提供的瞬态幅值，就需要进行设备级的瞬态防护。可在交流输入端或其他外露线路与设备的接口上进行瞬态防护，或者两种瞬态防护措施同时采用。

15.3.3.7.5 减少瞬态损坏

当需要防止雷电瞬态损坏设备时，瞬态抑制的设计应确保在瞬态进入设备任何元件之前的外部线路与设备的接口上把它有效地衰减到设备的耐受电平。

对于新设备：

a) 交流输入：最可行的瞬态抑制方法是把抑制器设计成设备整体的一部分。

b) 其他外部线路的接口：瞬态抑制最有效的方法是把低能量瞬态抑制器设计成设备整体的一部分，并把制造厂提供的高能量电平瞬态抑制器安装在建筑物贯通处的电缆接口分线盒中相应的线路或外接设备的端子上。可以把总的瞬态抑制设计成设备整体的一部分，但应确保为耗散高能量电平的瞬态抑制元件单独提供一条到大地的专用通路。

对于现有设备，按上述新设备的 a)和 b)的方法，可以获得最有效的瞬态防护。当在现有设备的机房不能增加所需要的瞬态抑制元件时，除了传输信号频率非常高的射频线路之外，其他所有线路都可以把瞬态抑制元件装配在一个小壳体之内，然后将该壳体安装在机柜的底板或框架上。

15.3.3.7.6 交流电源输入

安装在干线供电断路装置上的次级交流浪涌保护器耗散瞬态浪涌时，施加到受保护设备上的钳位电压可能高于设备耐受电平，所以，有效的瞬态抑制应和设备设计为一个整体。

对于瞬态抑制的设计，应对每根电源相线和中线提供相同的抑制，以提供有效保护。对于不带中线的线对线电源输入，应安装线对地的抑制器，而线对线抑制器可根据需要决定是否安装。与安装在干线供电断路装置上的次级交流浪涌保护器中的抑制器相比，安装在设备电源输入端的抑制器应有稍低的导通电压和稍快的响应时间。对于设计成设备整体一部分的抑制器，不仅可以对出现在交流浪涌保护器导通前的过冲电压钳位，还可以对瞬态的响应进行钳位。同样，设备上的抑制器具有较低导通电压时，对于给定的瞬态浪涌也将有一个比次级浪涌保护器低的钳位电压，因此可提供最佳的设备保护。但是，这种设备的浪涌抑制器势必在次级浪涌保护器导通之前耗散一部分瞬态。所以在输入线路中串联一个电感器是非常必要的。这样，次级浪涌保护器就会在设备抑制器导通后很快导通，这是由于设备抑制器对地放电引起电感器上电压上升的结果。图 209 给出了用于交流输入端相线和中线的设备级典型抑制电路。图 210 给出了一种供给不带中线(线对线)输入端使用的典型抑制电路。

关于抑制元件：其充气火花隙抑制器最大持续工作电压应为标称线电压的 200%～300%。对于 MOV 和瞬态电压抑制器，它们的最大持续工作电压应为标称线电压的 175%±25%。击穿电压、压敏电压、钳位电压以及任何过冲电压的幅值和时间应足够低，以免设备损坏或受扰；在最大持续工作电压下每个抑制器元件的泄漏电流不应超过 100μA；当瞬态电压降至抑制器的导通电压以下时，浪涌抑制器应自

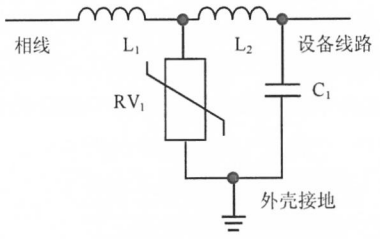
动恢复至断开状态；工作寿命：设备的瞬态抑制应能够安全地耗散表 71 和表 72(按适用)中规定的浪涌次数和幅值。钳位电压在工作寿命期内的变化不应超过 10%；只有直流电阻低的电感器才能用作电源线传导瞬态的串联抑制元件。串联电感器应安全地通过设备的工作电压和线电流，并能承受时间 50ms，幅值 130%的过电压作用。

关于瞬态抑制器的接地，瞬态抑制器的接地端应尽可能直接搭接到壳体接地点。当直接搭接不可能时，抑制器接地端应尽可能短而直地间接搭接到壳体接地点，而且壳体应具有低的对地连接电阻。否则，瞬态抑制器不能正常工作。

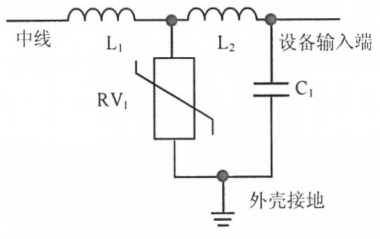
关于瞬态抑制器的功能特性，在交流输入到设备接口处的瞬态抑制功能应符合下列要求，才能获得有效的瞬态抑制：

a) 电感器 L_1：图 209 和图 210 中的电感器 L_1 是确保电压增加所必需的，以便使干线断路装置上的次级交流浪涌抑制器在抑制器 RV_1 导通时很快导通，并将瞬态电流传入大地。电感器应能安全地通过正常工作电流，并能通过由 130%的过电压所引起的过电流，历时 50ms。同时，电感器应是：
   1) 具有很低的直流电阻；
   2) 对瞬态浪涌呈现高阻抗；
   3) 对 50Hz 线路电压呈现很低的阻抗；
   4) 能够安全通过表 71 中所列的瞬态电流。

b) 抑制器 RV_1：图 209 所示 RV_1 为 MOV。MOV 特别适于这一应用。某些情况下还需用其他器件。瞬态电压抑制器用于保护很敏感的设备是有效的。在 15.3.3.5 中已提供了各种类型抑制器的数据。由于下面两个原因，不推荐在 RV_1 的位置上采用充气火花隙抑制器：
   1) 满足电流抑制要求的现有充气火花隙，往往有相当高的火花放电(导通)电压和相当长的导通时间，如果在交流输入端采用火花隙进行瞬态抑制，为提供所需的保护，应加上附加抑制器，其中包括电感器、MOV 或瞬态电压抑制器；
   2) 火花隙的电弧电压一般为 20V～30V，当瞬态发生期间火花隙导通时，就中断正常线路电压，引起设备受扰；正由于电弧电压仅为 20V，并且是跨接在 220V 电源上，所以火花隙将维持在电弧工作状态并且吸取电流，直到电源电压波形跨越零点，或者电源线路断路器断开为止，甚至可能在电源线路断路器断开之前火花隙已被破坏；应采取措施避免出现上述两种情况。



a) 用于设备交流输入相线的典型瞬态抑制线路



b) 用于设备交流输入中线的典型瞬态抑制线路

图 209 设备电源线浪涌和瞬态防护典型配置图(带有中线)

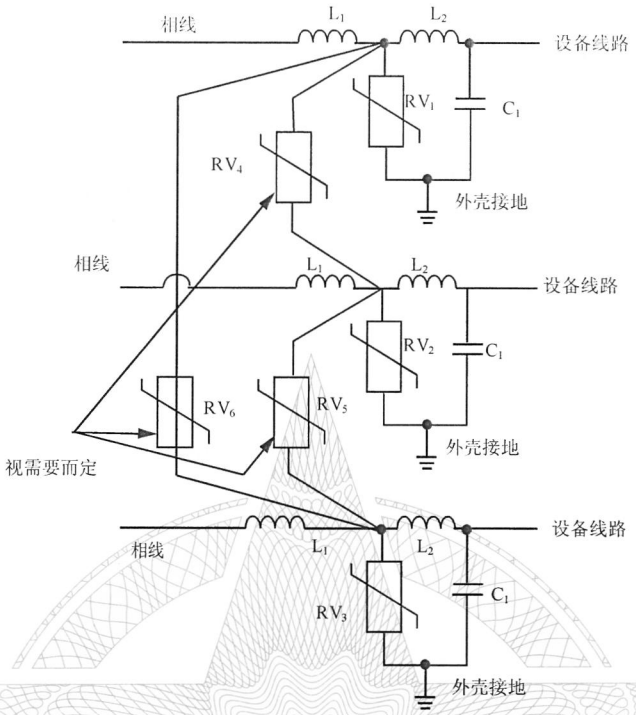


图 210　设备电源线浪涌和瞬态防护典型配置图(不带中线)

c)　电感器 L_2 和电容器 C_1：这两个元件构成滤除瞬态浪涌高频成分的 LC 网络；只有当设备对高频敏感，而且持续时间很短(小于 1ns)的瞬态脉冲可能越过 RV_1 时，才需要这个网络。

关于瞬态抑制器的封装，抑制器元件应安装在独立、屏蔽、用隔板分开的壳体内，并作为设备整体的一部分来设计。隔板上应采用穿心电容器，以阻止高频瞬态能量耦合进入设备电路。抑制器应尽可能直接搭接到设备机柜，抑制器的接地线应短而直。

15.3.3.7.7　直流电源输出端的瞬态抑制

由民用交流电网向固态设备提供 5V～48V 直流工作电压的电源应在整流器输出和壳体地之间安装瞬态抑制器。因为大多数军用设备在有害电磁环境下工作，所以除了供电断路装置的浪涌保护器和设备入口电源线瞬态抑制器之外，整流器输出端还需要瞬态抑制器。瞬态电压抑制器可对这种特定的应用提供最好的保护。因为瞬态电压抑制器不但有很快的响应速度，能抑制上升速度快、持续时间短的瞬态，而且还可提供最低的钳位电压。因此，在采用这种器件后，设备交流输入接口上的瞬态抑制输出将被整流器内的雪崩二极管钳位至较低电平，进而对由它供电的固态调压器和其他固态器件提供最佳的保护。为满足上述功能要求，安装在整流器输出端的抑制器应具有下列工作特性：

a)　最高工作电压：应比整流器最大输出电压高 5%。

b)　泄漏电流：对地的泄漏电流在最大持续工作电压时不应超过 100μA。

c)　导通电压：当采用目前工艺水平的抑制器时，导通电压应尽可能接近最大持续工作电压。

d)　钳位电压：钳位电压应采用目前工艺水平的抑制器可能达到的最低值。

e)　过冲电压：过冲电压应足够低，以便防止设备损坏或工作受扰；应将过冲电压的时间尽可能限制到 2ns 以内。

f)　自动恢复能力：电源中安装的瞬态抑制器在线路瞬态降到抑制器额定导通电压以下时应自动恢复至断开状态。

g)　工作寿命：瞬态抑制器应安全地耗散幅值高于整流器输出电压 200V、波形为 8/40μs 的浪涌

1000 次。这里波形参数 8μs 是从瞬态开始至峰值电压的上升时间，40μs 规定为从瞬态开始至峰值电压按指数规律降到峰值 50%的时间。

15.3.3.7.8　陆上线路的瞬态抑制

15.3.3.7.8.1　概述

当设备耐受电平低于陆上线路与设备接口上可能出现的瞬态能量电平时，设备的设计应提供瞬态抑制。一般说来，所有陆上线路与设备直接相连的接口，都需要进行瞬态抑制。但是，如果陆上线缆已自始至终封装在黑色金属导管内，则所需的抑制程度要比直接埋入大地或架空的陆上线缆低得多。应在设计新设备的同时设计瞬态防护措施。制造方可能不了解外露的陆上线路是否会完整地封装在黑色金属导管中，这时，所设计的瞬态防护措施应确保对表 73 所列的瞬态电平提供足够的防护。下面提供几类陆上线路瞬态抑制的设计指南。

15.3.3.7.8.2　控制线、状态线、设施内部电源线和陆上音频线路

控制线、状态线、设施内部的电源线和音频线的瞬态抑制器是设备整体的一部分，按规定安装在建筑物贯通处或外接设备的端子上。有效的设计如图 211 所示。

关于抑制器的设计和元件选择：只有选择合适的元件并且元件正常工作时，瞬态抑制器才会有效地保护设备，即抑制元件或电路的钳位输出能为设备提供最佳的保护。在图 211 中将实际的抑制元件表示为 GT_1，RV_1，RV_2 及 TVS_1。在设备入口处的抑制元件应比设施入口处的抑制元件具有更低的导通电压和钳位电压。所以，电阻器 R_1 既要提供能使设施入口处抑制元件导通的电压，又要限制流过设备入口处抑制器的电流。否则，在瞬态发生时，设施入口处的抑制元件可能不导通。当瞬态峰值低于 400V，而抑制元件(GT_1)是充气火花隙时，该元件通常不会导通。但是，当幅值较大的瞬态发生时，设施入口处的抑制元件应导通。否则，设备入口处的抑制元件将耗散全部到地的瞬态。此时，设备入口处的抑制元件耗散额外的瞬态电流，它将有较高的钳位电压。这种较高的钳位电压会施加至受保护的设备，抑制元件也可能因此而失效。

抑制元件的特性和应用注意事项如下：

a) 气体放电管或充气火花隙 GT_1：在某些情况下，充气火花隙适合用作建筑物或设施入口处的瞬态抑制器。与 MOV 或瞬态电压抑制器相比，该元件有较高的火花放电(导通)电压和较长的导通时间。对于典型雷电在陆上线路感应的瞬态，可以采用导通电压标称值 500V、导通时间为 5μs 的气体放电管或充气火花隙。只要电阻 R_1 的数值为 10Ω 或更大，并且不超过设备入口处抑制元件的脉冲峰值电流额定值时，上述特性是令人满意的。对于标称导通电压 500V 的气体放电管(充气火花隙)，当 R_1 为 10Ω 时，需要 50A 的峰值电流才能在 R_1 上产生 500V 的电压。由于在标称值 5μs 后 GT_1 才导通，所以将不超过大多数 MOV 和瞬态电压抑制器的额定脉冲峰值电流。在火花隙导通后，在器件两端的电弧电压标称值是 20V，大大低于正常线电压，使受保护设备工作受扰，这在某些情况下是不容许的。如果正常线电压大于 20V，熄灭这种电弧可能会有困难，这取决于所建立的电流。对于有些器件，电弧工作状态可以维持 1A 以上的电流。当 R_1 小于 10Ω时，在设施入口处应采用 MOV 或其他等效的抑制器，特别当设备入口处的抑制器是瞬态电压抑制器时，这是因为在设备入口处的瞬态抑制器被过冲电流损坏之前火花隙不能导通。

b) 压敏电阻器(MOV)RV_1、RV_2：如图 211 所示，在各种线路中都可采用 MOV 来提供有效的瞬态抑制。MOV 的导通时间小于 50ns，并且其压敏电压范围为 18V～1800V，钳位电压不如瞬态电压抑制器低，导通速度也不如瞬态电压抑制器快。瞬态电压抑制器的导通时间一般小于 10ns，在某些线路中可小于 1ns。如图 211 c)所示线路，瞬态电压抑制器对保护高度敏感的设备特别有效。当所保护的设备能安全地耐受设备入口处的 MOV 额定钳位电压时，图 211 a)和

图 211 b)所示的线路可提供足够的保护。单元直径 20mm 的 MOV 通常可在设施入口处提供所需的保护，而单元直径 10mm 的 MOV 则往往只在设备入口处提供所需的保护。为了获得所希望的功能，设施入口处的 MOV 的导通电压应超过设备入口处 MOV 导通电压 10%左右，以使设备入口处的 MOV 能够导通并耗散低幅值的瞬态。当高幅值瞬态出现时，R_1 上电压的增加将引起设施入口处的 MOV 导通。当设施入口处的 MOV 导通时，它就耗散掉接下来的大部分瞬态能量。这样，设备入口处的 MOV 将只导通少量的电流，并保持低的钳位电压。MOV 对负向或正向瞬态电压的响应相同。

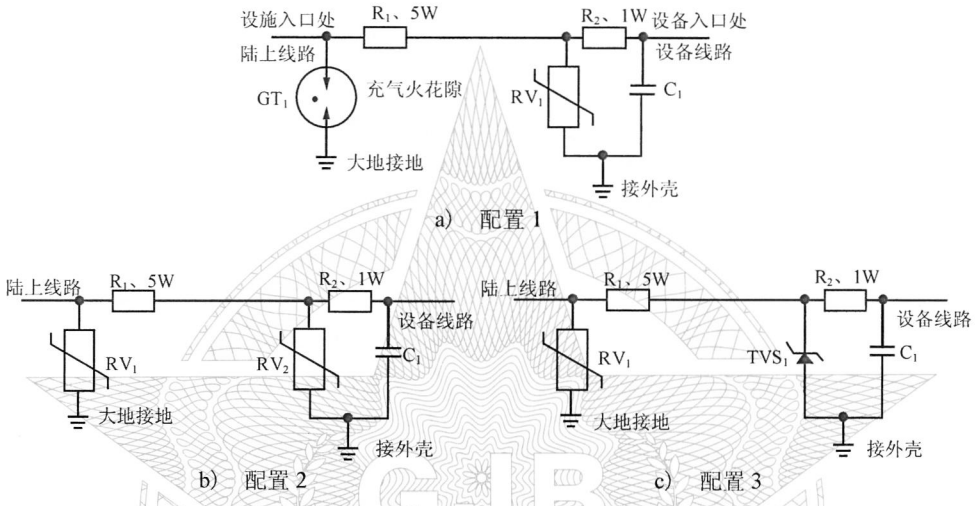


图 211 防止设备经陆上线路导入瞬态的典型线路

c) 瞬态电压抑制器 TVS_1：瞬态电压抑制器的导通时间是图 211 所示三种抑制器件中最快的一种。其导通时间一般小于 10ns，而某些线路中可以小于 1ns，这取决引线的长短和器件对地通路的情况，导通电压范围为 3.3V～440V。可以将器件串联连接，以便获得较高的导通电压，并改善功率耗散能力。例如，两个器件串联的功率耗散能力大约是单个器件的 1.8 倍。该器件的钳位电压也比 MOV 低。推荐用于设备入口处的器件，在 1ms 时间内的额定脉冲峰值功率耗散值为 1500W。瞬态电压抑制器有单极性和双极性两种。单极性器件的工作特性与齐纳二极管的工作特性非常相似，而双极性器件的工作特性与一组背对背的齐纳二极管相同。为了实现最有效的保护，对于载有单极性电压的线路，只要该线路上的交流噪声电压小于 0.5V，就应采用单极性器件。在载有交流(双极)电压的线路、以及交流噪声电平大于 0.5V 的线路上，应采用双极性器件。选择瞬态电压抑制器要以最大持续工作电压为依据。最高工作电压应大于线路最大工作电压，如有可能，应比正常线电压高 20%。

d) 电阻器 R_1：电阻器 R_1 的功能是对设备入口处的抑制元件提供限流作用，并对设施入口处的抑制器提供导通电压。经验证明，电阻器的额定功率应为 5W。其电阻值应高到设备工作允许为止，典型值为 10Ω～50Ω，已经成功地采用了低至 2Ω 的阻值。但是，当阻值低于 10Ω 时，设施入口处的抑制器应是 MOV 型或等效类型的抑制器。

e) 电阻器 R_2 和电容器 C_1：R_2 对设备入口处瞬态抑制器钳位电压所引起的、流入受保护设备的电流起限制作用。在某些情况下电阻器也加速设备入口处瞬态抑制器的导通。另外，当出现一种与设备电源极性相反的瞬态时，电阻器还能限制流向受保护设备的电流。电阻器的额定功率取 1W 已足够。R_2 的阻值应尽可能高到相应设备所允许的值为止，并考虑电阻器 R_1 的值和陆上线路阻抗。电容器 C_1 的作用是滤掉瞬态高频成分，其电容量可据此进行相应的选择。在某些

情况下，设备的工作特性和线的长度可能限制电阻器 R_2 和电容器 C_1 的使用。

关于接地，抑制元件或电路的接地原则：如图 211 所示，设施入口处的高能量瞬态抑制器到大地的通路应是尽可能短。这样，当大幅值的瞬态电流通过高能量瞬态抑制器至地时，由 $L(di/dt)$ 所引起的高电压尖峰可以减到最小，以免损坏受保护设备或设备入口处的低能量瞬态抑制器。设施入口处瞬态抑制器的接地：在设施入口处的高能量瞬态抑制器应装在接线盒内，或装在电源干线第一个供电断路器内。通过第一个供电断路器或接线盒内的接地母线汇流排可以为抑制器提供最有效的接地。瞬态防护装置应搭接到各自的安装匣子上，并以最短的方式接地。这里重要的是接地线不能构成环或折弯，而应尽可能短。接地母线汇流排的位置应使陆上线路端子到大地接地点之间的抑制器能短而直地连接。设备入口处瞬态抑制器的接地：如有可能，应将设备入口处的低能量瞬态抑制器直接搭接到设备壳体上。为了有效接地，设备入口处抑制器接地一侧的连接应短而直，并应直接接到设备壳体上。抑制器对设备壳体的连接将使抑制器和设备电路参考于相同的地电位，因而可为设备提供最佳保护。

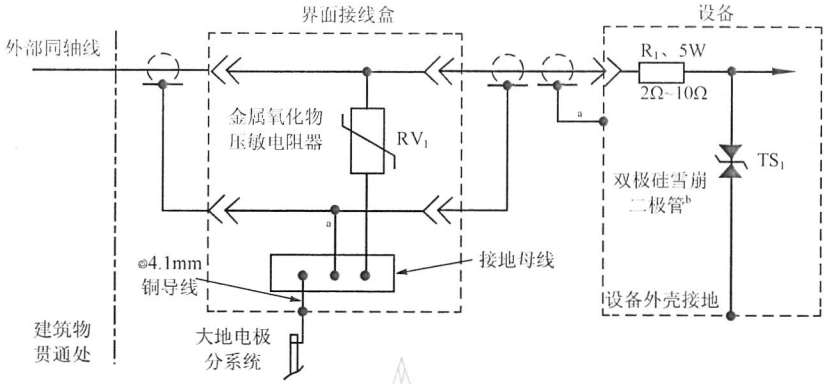
关于外壳的结构：作为设备结构整体设计的一部分，应把瞬态抑制元件或电路封装在一个屏蔽的、与设备分隔的壳体内，这是防止瞬态能量对设备中其他电路的交叉耦合所必需的。应确定抑制元件的安装位置，以便在瞬态进入任何易损的设备元件(其中包括电磁干扰滤波器)之前将其衰减掉。安装在设施入口处的瞬态抑制器，虽然其外壳结构不是关键的，但结构应保证从线路端子到接地点之间的瞬态抑制器连接能短而直。

15.3.3.7.8.3　同轴线和屏蔽双线(直流至 3MHz)

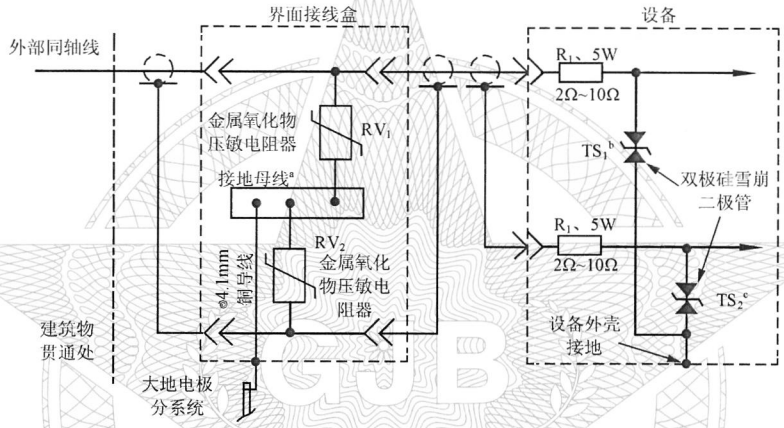
与 15.3.3.7.8.2 讨论的控制线和状态线一样，外露的同轴线和屏蔽双线上也会出现瞬态。一般说来，在 15.3.3.7.8.2 叙述过的瞬态防护措施对直接与同轴线或屏蔽双线连接的设备同样也能提供有效的瞬态防护。这就是说，可在设施入口处或外接设备端子上安装高能量瞬态抑制器和电阻器(如图 211 所示)，包括作为设备整体一部分的低能量瞬态抑制器，以提供最有效的瞬态防护。但是，在许多情况下，连接到同轴线上的端接设备不容许有附加的电容器 C_1 和附加的电阻 R_2，因为连接到同轴线和屏蔽双线上的大多数端接设备的耐受电平都相当低，所以应将图 211 c)所示瞬态抑制电路中的电阻器 R_2 和电容器 C_1 去除。瞬态电压抑制器 TVS_1 往往是双极性的。直接连接外露屏蔽双线的设备，应采用图 211 c)所示的保护线路。由于屏蔽双线通常传输直流和低电平音频信号，所以应采用双极性瞬态电压抑制器。下面是具体设计指南：

设施入口处抑制。在设施入口处或外接设备端子上应安装高能量瞬态抑制器，并将它串接在有关线路上。这些线路应在设施入口处接线盒内连接器的安装金属板处端接，或在外接设备端子上端接。瞬态抑制元件应封装在一个密封的、具有相应连接器的金属壳体中，以便串接安装。在密封壳体内抑制器的接地侧，应采用直径 2mm 以上的铜线、尽可能直接接到密封壳体外面的接地点上，以便与接线盒内的接地母线或接线排连接。用于屏蔽双线的壳体应包括 2 个抑制电路，其中两条芯线各有一个抑制电路。同样，当同轴电缆屏蔽层并不直接在连接的设备上接地时，安装壳体内也应包括两个瞬态抑制电路，一个用于电缆中心导体，另一个用于电缆屏蔽层。上述两类线路的具体接地电路见图 212 和图 213。由于接地配置的关系，在设施入口处应采用 MOV 或等效器件。

设备入口处抑制。在同轴线与设备接口连接处，设备入口处的瞬态抑制器配置如图 212 所示。应将瞬态抑制器封装在隔开的屏蔽区域中，以防止瞬态能量与设备其他电路交叉耦合。瞬态抑制器安装的位置，应当能使瞬态在进入任何敏感设备元件(包括电磁干扰滤波器)之前就受到衰减。因为终端设备通常耐受电平较低，所以在设备入口处应采用双极性雪崩二极管抑制器。如果受保护的设备能安全地承受施加到它上面的钳位电压，可以采用 MOV。为了实现有效防护，应将瞬态抑制器接地一侧直接搭接到设备壳体上。不能直接搭接时，应采用短搭接条搭接到设备壳体。



a) 同轴线典型的瞬态抑制装置(屏蔽层不与地隔离)



b) 同轴线典型的瞬态抑制装置(同轴屏蔽层对地隔离)

注 1：界面接线盒应以最短的方式接地。

[a] 当电缆有铠装屏蔽时，应将铠装接至接地母线，同样电气连接的双层屏蔽同轴电缆，屏蔽层也应接至接地母线。

[b] 当线电压大于 12V 时，采用两个串联的雪崩二极管。

[c] TS_2 的最高工作电压应尽可能低，但不能对屏蔽层上的交流噪声电压起响应而导通。

图 212 同轴线典型的瞬态抑制装置(DC～3MHz)

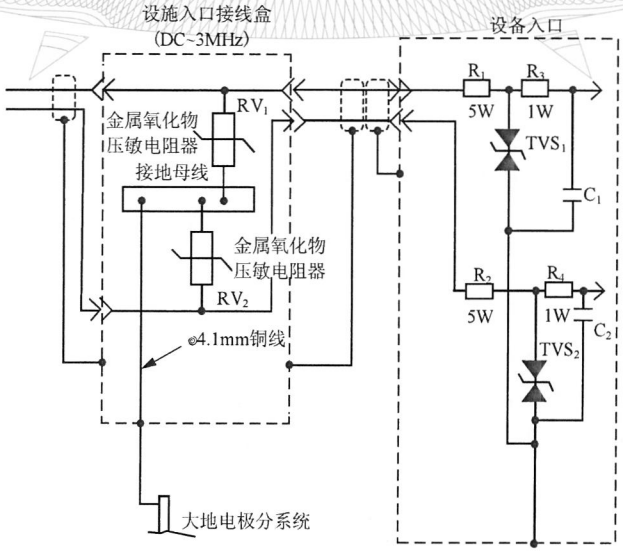


图 213 屏蔽双线瞬态抑制(DC～3MHz)

15.3.3.7.8.4　射频同轴线(高于 3MHz)

目前已有适用频率范围 DC～3GHz、8/20μs 脉冲波形条件下最大脉冲电流容量达 5000A 的瞬态抑制器件。

在使用时应注意以下问题：

a) 瞬态抑制器的设计：有效的瞬态抑制器是充气火花隙、与射频扼流圈串联的 MOV、以及与选配的射频扼流圈并联的分布电容小的浪涌瞬态电压抑制器。这些抑制器和元件都可用于线路和设备的接口上抑制线对地的瞬态。

b) 瞬态抑制器的选择：应根据线路的工作频率、传输速率、传输带宽、工作电压、接口形式和特性阻抗等参数，选择插入损耗小、分布电容小、并与纵向平衡、近端串扰适配的瞬态抑制器。

c) 瞬态抑制器的安装使用：将瞬态抑制器设置在雷电防护区界面处，根据雷电过电压、过电流幅值和设备端口耐冲击电压额定值，可设置单级浪涌保护器，也可设置能量配合的多级瞬态抑制器。如图 214 所示的天馈系统射频同轴线安装方法，在建筑物贯通处，在所有线路与大地之间接一个高能量级的瞬态抑制器，同时再把低能量瞬态抑制器作为设备整体设计的一部分。

d) 瞬态抑制器的接地：瞬态抑制器应列为设备整体的一部分。而且可能需要耗散表 73 中所列的瞬态电流。但是，在大多数情况下，射频线路封装在黑色金属导管中，因此瞬态幅值仅是表 73 所列幅值的 10%。不管何种情况，都应尽可能采用最短、最直接的方法将瞬态抑制器接到设备壳体的接地点。随后，应通过设备的机柜和接地导体将设备壳体有效地连接到大地接地系统。

e) 天馈线路的瞬态抑制器：天线应置于直击雷防护区内。应根据被保护设备的工作频率、平均输出功率、连接器形式及特性阻抗等参数选用插入损耗小、电压驻波比小、适配的天馈线路瞬态抑制器。天馈线路的瞬态抑制器应安装在收/发通信设备的射频输出、输入端口处，如图 214 所示。具有多副天线的天馈传输系统，每副天线应安装适配的天馈线路瞬态抑制器。天馈线路的瞬态抑制器接地端应采用能承载预期雷电流的多股绝缘铜导线有效地连接到大地接地系统，导线截面积不应小于 6mm^2；同轴电缆的前后端及进入机房前应将金属屏蔽层就近接地。

f) 封装设计：应将瞬态抑制器设置在一个屏蔽的、与设备其他部分隔开的单元里，而且应使传导的瞬态进入任何敏感电路元件之前就被衰减。

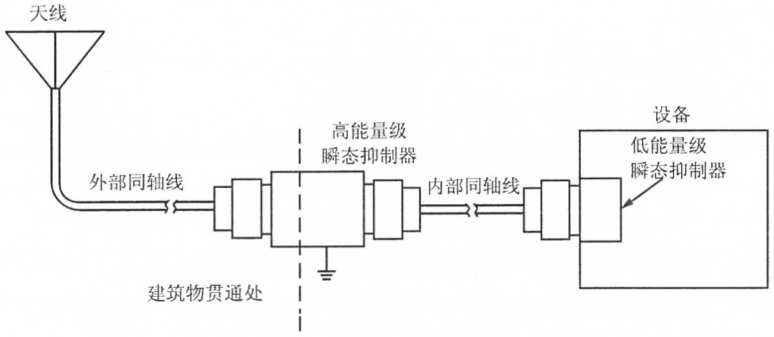


图 214　天馈系统射频同轴线瞬态抑制(高于 3MHz)

15.3.3.7.8.5　金属导管中线路瞬态的抑制

当外露线路被完整地封装在金属导管中后，传导到设备上的瞬态幅值至少会被衰减 90%，但瞬态次数不会改变。即表 73 列出的瞬态次数仍会发生但幅值仅为所列幅值的 10%。当设备制造者确认所有外露的设备线会封装在黑色金属导管中时，应将总的瞬态抑制器设计成设备整体的一部分。总的瞬态抑制应包括：与陆上线路输入端串联的 5W 电阻，以及在设备一侧线地之间所接的 MOV 或瞬态电压抑制器。

15.3.3.7.8.6　高能量瞬态抑制器功能特性

高能量瞬态抑制器功能特性如下：

a）　最大持续工作电压：充气火花隙抑制器的最大持续工作电压应为标称工作线电压的200%～300%；MOV和瞬态电压抑制器等抑制器的最大持续工作电压应为标称工作电压的175%±25%；

b）　泄漏电流：在最大持续工作电压时，对地的泄漏电流不应超过100μA；

c）　导通电压：导通电压不应超过最大持续工作电压的125%；

d）　过冲电压：应为现有最好工艺水平的抑制器在尽可能短的时间内所能达到的最低电压；

e）　钳位(放电)电压：应尽可能低，当瞬态放电电流的峰值为1000A时，钳位电压应不大于导通电压的225%；

f）　工作寿命：瞬态抑制器按表73所列峰值的90%释放浪涌电流(压)时，其放电寿命应大于该表所列的瞬态次数；在整个工作寿命期间钳位电压的变化不应大于10%；

g）　恢复能力：在瞬态电压电平下降到低于导通电压时，瞬态抑制器应自动恢复到断开状态。

15.3.3.7.8.7　低能量瞬态抑制器特性

低能量瞬态抑制器功能特性如下：

a）　最大持续工作电压：充气火花隙抑制器的最大持续工作电压应为标称线电压的200%～300%；MOV和瞬态电压抑制器等抑制器的最大持续工作电压应为标称工作电压的175%±25%。

b）　导通电压：按照现有工艺水平，设备抑制元件的导通电压应尽可能接近最大持续工作电压。

c）　过冲电压：采用现有工艺水平的抑制器，其过冲电压应是在尽可能短时间内所能达到最低值；过冲电压应足够低，以免设备损坏或工作失常。这一要求对于上升时间快至5000V/μs的瞬态仍然适用。

d）　泄漏电流：在最大持续工作电压时，对地的泄漏电流不应超过100μA。

e）　钳位电压：当耗散的瞬态电流峰值幅度是表73所列值的10%时，钳位电压应保持在设备耐受电平以下，在整个工作寿命期间内钳位电压的变化不应大于10%。

f）　工作寿命：当电流幅值为表73所列值的10%时，瞬态抑制器能安全耗散瞬态的次数应大于该表所列的瞬态次数。

15.3.3.8　腐蚀控制

腐蚀控制技术要求如下：

a）　制作雷电防护分系统的材料应是高耐腐蚀的材料。应避免不相容金属之间的结合或接触；当这种结合不可避免时，接触表面应永久不接触潮气。

b）　当铜制保护系统的任何部分直接暴露在烟囱气体或其他腐蚀气体的作用下时，暴露的铜元件应经过连续热浸镀铅处理。涂覆层至少应延伸到烟囱顶部以下0.6m，或低于通气孔及烟道口0.6m。

c）　当采用铝引下线时，绝不允许它们与土壤接触：

1）　铜接地电极的上延接线头至少应高出地平面0.3m；铜接线头与铝引下线之间的连接应采用双金属连接件；

2）　凡是潮湿的或者会间断变潮的混凝土或砂浆，都不能与铝制零件(包括紧固件和固定件)直接接触；

3）　应防止铝制零件与碱基涂料接触。

d）　铝零件不应用在由铜覆盖的材料上面，而且不应与其他铜表面接触，同样，在铝构件上或采用铝覆盖材料或铝挡板的结构件上，绝不能采用铜作雷电防护材料。

e）　在铝制雷电防护系统中，铜、包铜材料或铜合金的固定装置及配件不应用于连接件上。当铝应与铜连接时，只能采用双金属连接件。

15.3.3.9　接头

接头的要求如下：

a)　熔焊或硬钎焊搭接优于所有其他类型的搭接，凡是今后不易接近、维护的接头，应实施熔焊或硬钎焊；

b)　雷电防护系统的任何搭接部位，绝对不能使用软钎焊焊接；

c)　当需要与扁平表面进行螺栓连接时，接触表面的面积应大于 $20cm^2$。

15.3.3.10　物理防护

物理防护的要求如下：

a)　利用所有结构物提供的固有防护要素敷设导线，尽量使雷电防护系统的元件免受破坏和物理损伤。最好安装一套用木材或阻燃的复合材料加工的防护罩或防护盖。

b)　当采用导电的导管时，应把每段独立导管的两端搭接到其内部封装的雷电引下线上。标准的导管接地夹是比较适用的搭接装置。

c)　因为黑色金属导管会增加雷电引下线的阻抗，所以应避免采用黑色金属导管封装雷电引下线。

15.4　故障保护分系统

15.4.1　目的

设备故障保护分系统为一个网络，该网络除应确保人身免遭电击伤害之外，还应确保设备不致因电气系统可能发生的故障而损伤或破坏。为实现这种保护，接地连接应足以承受正常电流和故障电流。故障保护分系统包括安全地线和固定式设备所有外露非载流的电缆管道及其他壳体等金属零部件，这些金属零部件在电源发生故障时往往会带电。用于故障保护接地目的的任何导体都不能贯通射频隔板、金属丝网屏蔽房及屏蔽壳体等，只能与预焊在屏蔽隔板上的螺栓搭接。

15.4.2　设备故障保护分系统的组成

接地系统中的主要缺陷之一，是在设备的各种配电板及设备上将交流配电线路的中线与故障保护线互连或接反。这种安装差错会在接地系统中产生附加的电气噪声和交流电流。设备故障保护分系统的配置应受中心接地点(即主接地点)的制约，理想的主接地点应在电站主变压器的接地点上。若保护线无法连接到主接地点，则其应与建筑物的大地电极分系统直接相连。设备故障保护分系统的配置，包括一条来自电源的主干线和延伸到各个中间配电板和设备的保护线。保护线应沿着相线和中线敷设，从主接地点起，经供电断路器配电板、中间配电板、设备配电板，最后接到设备。

15.4.3　设备故障保护分系统的配置

设备故障保护分系统的配置及其要求如下：

a)　设备故障保护分系统主要由内部交流配电系统组成。接地导体是绝缘或裸导线，它可与中线或相线导体敷设在同一导管或线槽中。接地导体最好带有包封层，以便降低电磁干扰。图 215 为一个典型的设备故障保护分系统，应注意的要点是：

1)　导管应在每端的电源配电板上接地，但是不应用它来代替导管到保护母线汇流条之间的接地导体；

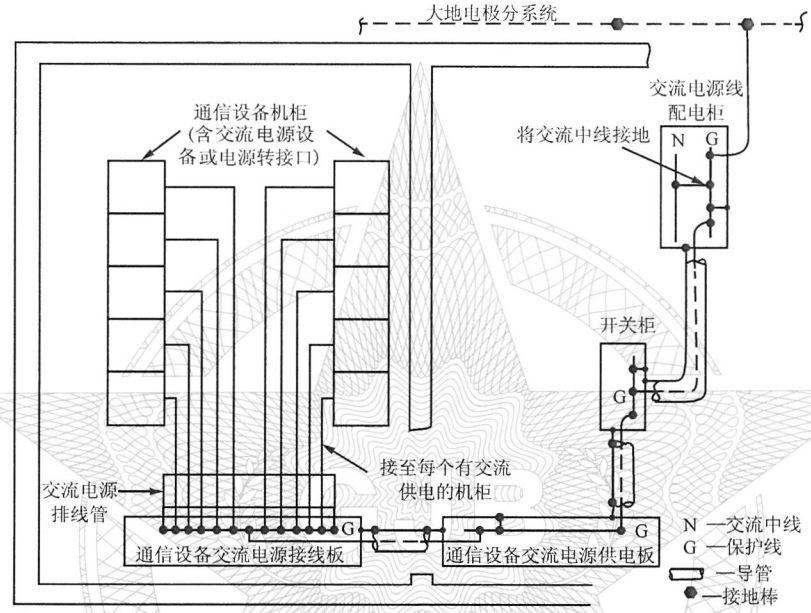
2)　交流中线引线可在第一个供电断路装置上接地，在这种情况下交流中线可兼做返回电源的保护导体；为了获得最佳的结果，在五线配电系统中，应将已接地的交流中线和需接地的安全地线同时接到供电变压器的第一个断路装置上。

b)　为防止人身暴露在危险电压下，应将电气和电子设备的所有暴露金属元件连接到地。应建立一个良好、直接的故障电流通路，以便由于人为失误、绝缘或元件失效，“相”线与底板、机架或机柜发生偶然接触时，可很快消除危险。对故障保护而言，最好将中线在配电变压器上接地。如果变压器在建筑物以外，中线应在建筑物以外的辅助接地点接地，决不可在第一个断路装置的负载侧接地。

c)　变压器、开关装置、马达等的接地导线和接地应符合 GB 50169 的规定。

d) 如果金属盒、连接件以及固定设备的其他非载流金属零件已连接到接地电缆的铠装或搭接到建筑物的接地构件上，它们就不需要另外的保护。电路、设备壳体和导线导管的对地通路应是耐久和连续的。这种通路应安全承载可能施加于它的任何故障电流，且阻抗足够低，以便限制对地电压并有助于电路保护装置的工作。

e) GB 50169 规定了交流电气设备接地装置的选择、敷设和接地线的连接等要求。接地装置应充分利用原有接地体，如埋设在地下的金属管道等，并且规定了低压电气设备地面上外露接地线的最小截面。



注 1：为使线路清晰，省去了交流相线、中线，以及机柜之间的连接，保护地线(G)与电源导线应在同一个导管或电缆屏蔽套内。

注 2：所有穿过或横跨射频汇流条板或屏蔽体的接地导体，都应与汇流条或屏蔽体搭接。

图 215　典型的设备故障保护分系统

f) 军用通信设备设施的经验表明，如果提供独立设计和安装的接地导体，可以在很长时间内保持一个低噪声、低阻抗的设备故障保护分系统。所以，在交流配电系统中应包括一根独立的设备故障保护导体。这根独立的接地导体应与其他交流导体安装在同一导管中。当采用黑色金属导管或电缆槽保护或屏蔽中线及相线时，若再在同一导管或电缆槽中安装这种独立的保护导体，就可得到最低阻抗。如果将接地保护线绕在其他导体上，并将其搭接到导管或电缆槽的两侧，则线路阻抗可进一步降低。在一个正确安装的配电系统中，除了故障期间外，保护导体上不应有电源电流。应注意，有两种情况可以使过流保护装置工作。第一种是设备中的过负荷，在这种情况下，故障出现在中线和相线上。第二种故障是相线偶然碰地，这时故障电流出现在基座引线和接地导体上。在这两种情况下，过流保护装置(通常是电路断路器)将断开相线。由于故障电流可能流过相线、中线和接地导体，所以建议，当电源线和信号线均未敷设在导管中时，它们之间应保持 5cm 的间距。

15.4.4　管道和管子

对于管道和管子：

a) 所有金属管道和管子(其中包括导管)及其支撑件应在电气上是连续的，并且它们至少应有一点搭接到设施的接地系统上。如果金属管道或管子的敷设长度超过 3m，应将它每个端子都搭接到设施的接地系统上。敷设较长的管子时，则管子应每隔约 45m 左右与设施的接地系统搭接

一次。

b) 在室内上述搭接可以利用具有持续压力的夹箍来完成。对于安装在室外的管道，应在引入点或在任何可焊接的地方利用熔焊或硬钎焊将它搭接到设施接地系统。在不锈钢管道上可以采用相容的不锈钢带。当不能进行直接搭接时，可采用镀锌软管夹或未镀锡的裸铜绞合搭接条。应对所有搭接点进行保护，以防止在潮湿或腐蚀环境中被腐蚀。

c) 金属管道和管子之间接缝的直流电阻不应大于 5mΩ。对螺纹连接，应先将螺纹清洗，然后拧紧(刚性穿墙导管，力矩用 270N·m)，以防止腐蚀。对于铅封或嵌缝管接头、法兰和其他压紧式配件以及“O”形环配件的接缝电阻都应进行测量，以检验接缝的直流电阻是否小于 5mΩ。

15.4.5 电气支撑结构物

15.4.5.1 概述

电气支撑结构物，诸如导管、电缆桥架或线槽、布线系统的设备壳体、电源电缆的金属铠装包封层等，都应是电气连接的，并以多点搭接到设施接地系统。万一出现故障，这种连续性就可防止上述结构物电位上升到危险的程度。

15.4.5.2 金属导管

对于金属导管：

a) 不论导管是用来封装电源电缆还是信号和控制电缆，所有金属导管都应接地。

b) 各段导管之间，以及导管、配件和盒壁之间的所有接头，在安装时都应构成连续的电气连接。

c) 所有导管螺纹及配套螺母的螺纹在啮合之前应先做清洁处理，然后拧紧固定，详细要求见 10.6 和 10.7。

d) 开槽防松螺母应完全挤穿所有涂漆层或其他不导电表面。

e) 电气不连续的任何接头，需要用直径 2mm 以上的铜导线搭接。应把这些跨接搭接条熔焊或硬钎焊在合适的位置上，或者用夹箍、尾部开槽螺栓、接地衬套或螺钉及锁紧垫圈进行搭接。

f) 防止这些接头受潮、腐蚀及机械损伤。

g) 将分线盒、接线盒和插座盒上盖板的螺钉拧紧。

h) 导管敷设用的所有支架和悬钩应牢固地搭接到导管及导管所依托的结构件上。导管敷设中的搭接还包括各节导管之间，以及导管与管接头，管线配件、分线盒、接线盒、插座盒之间的搭接，导管搭接到设施接地系统上的搭接点间隔不应超过 15m。每一连接处的电阻不应超过 5mΩ。

15.4.5.3 电缆桥架

按 15.7.5.1 的要求把每段桥架搭接在一起，使全部电缆桥架系统保持电气连续。每个支架或悬钩都应与它们所支撑的电缆桥架搭接。按照 3.4mm^2/m 准则，用符合要求的铜电缆把桥架组件搭接到设施接地系统。沿着电缆桥架全长，每隔不到 15m 搭接一次，且搭接处到电缆槽端部不能超过 0.6m。当电缆桥架采用金属盖板时，应采用螺栓将其可靠地固定。

15.4.5.4 壳体

电气和电信线路，以及配线设备的所有壳体都应接地。

15.4.5.5 电缆铠装

如果铠装电力电缆为 3m 或更长，应将电缆两端的铠装搭接到设施的接地系统。每隔不到 15m 的间隔实施一次附加搭接。每处搭接的电阻不应超过 5mΩ。

15.4.5.6 旋转式机械

电动机、发动机和其他类型旋转式机械的基座，应搭接到设施的接地系统上。

15.4.6 配电系统

对于配电系统：

a) 交流配电系统的中线，除在第一个供电断路装置处接到大地电极分系统上之外，还应接到配电变压器次级的接地端。对于有一个公共配电系统供电的各独立设施，每个断路装置应接到各自

设施的大地电极分系统上。若出现噪声或交流声，这一连接点可撤去。在具有公共大地电极分系统的各独立设施上，每个供电断路装置应就近接到大地电极分系统。

b) 除了在供电断路装置处有连接之外，配电系统的中线与设备和结构件都应隔离。

c) 将设备电源插座的接地端连接到设施接地系统上。不应使用插针或插头式的搭接条，因为它们的接地质量取决于弹性片。

d) 直流电源系统中一根电源线应接到大地电极分系统。接地导体的规格应符合 GB 50169 的要求。无论是在电源端或在负载端接地，都应在负载到电源之间设置一条电流返回导体，以减少设施接地系统或低频信号接地网络中的直流负载电流。

15.4.7 备用交流发电机

交流发电机的机座和外壳应接地。发电机中线应就近接至设施的主接地金属板或大地电极分系统。当各发电机并联连接时，应将各中线互连在一起后用一根公共接地导体接到设施的大地电极分系统。

15.4.8 可移动设备的故障保护分系统

为了防止人员暴露在危险电压下，对于设备和支撑结构物上所有暴露的金属件，应通过交流配电系统的安全地线互连在一起，并以电源为参考(即使它的电位与电源的电位相同)。在现场安装、并由移动式发电机供电的移动式设备的接地比较简单，只要求：

a) 通过一个保护地线网络，将所有拖车、工作车和机动发电机互连在一起；

b) 电源中线通过公共母线在发电机处接到大地电极，当接地零件需拆卸或承受震动时，可采用金属条带代替安全接地线。

当移动式设备由民用交流电源供电或与固定设施永久安装在一起时，人员保护要求就变得较为复杂。当移动设备仅部分固定安装时，应延伸原有的大地电极分系统，为移动式设备提供接地连接，从而将其纳入设施接地系统。设施的所有金属零件应通过设备的故障保护分系统互连起来，并在主电源板上搭接到大地电极分系统。

15.4.9 故障保护分系统的评定

15.4.9.1 测量

进行这一部分勘测的目的是确定装有军用设备的设施在接地、搭接、屏蔽方面是否符合要求。为了方便，电力线和设备接地导体中电流的测量可在勘测时进行。勘测用的表格列于 16.2.3.4.4 示例中第 4 部分，电流测量导则见 16.3.3.5 和 16.3.4 示例中第 4 部分。还应拟制一些草图，用以说明勘测结果或安装情况。草图应附在勘测数据之后。

确认所需的步骤可能比检查更多。例如，在检查中如果发现除所有带标识的中线导体外，还有一根安全地线接到了中线母线上，则应查明该导线的去向，并确定其真正的功能。如果在检查过程中未完成这种确认工作，则应把此不符合项记录在数据页上，并作为潜在的违规予以标识。

检查期间，有些缺陷应当随时纠正，如清除搭接区的漆层。把原来不符合要求的情况及采用的措施载入勘测记录。

15.4.9.2 符合性检查

15.4.9.2.1 供电引入口

进行下列检查以确定供电入口处导线是否符合要求。

a) 确定从电网输入设备的是单相还是三相，如果为三相，是 Δ 形还是 Y 形。电源线中是否有一根中线。

b) 检查每条敷设的电缆、导管是否包括了所有的相线和带标识的导线，并检查每根带标识的导线是否在变压器处接地，还是接在断路装置之前或附近。如果源端为变压器，其次级是带中线的三相四线 Y 形，电源通过导管敷线至供电断路开关，那么每条导管应包含中线和所有 3 根相线，而且中线还应在供电断路开关附近接地。

c) 对于由单个电源系统供电的几个建筑物，应检查每个供电断路开关是否敷设了带标识的导线，并且应检查该导线是否已利用表 74 所要求的导线搭接到每个建筑物的大地电极上。

d) 如果与接地电极相连的导体通过金属导管走线，则应检查此导管的两端是否已搭接到该接地导体上。如果大地电极端是不能接近的，本条检验无法实施。

e) 检查中线及其他导线的颜色是否正确。

f) 检查设备安全接地导线是否正确。

g) 检查所有非载流的金属构件是否已利用下面规定方法之一进行有效的搭接，并检查是否已把搭接通路中所有的非导电涂层清除掉。

1) 用压力连接件、夹箍或其他方法连接搭接条；

2) 采用带有螺纹连接头和螺纹卡圈的刚性封装管连接时，应把连接头拧紧；

3) 金属管子及刚性导管连接用的螺纹连接应拧紧；

4) 在破坏电连接的冲孔或其他形式的不连续处使用搭接条，以保证电连接特性；

5) 搭接型锁紧螺母和垫块用于其他装置的搭接。

h) 检查电缆槽、分线盒、接线盒、表面线槽等的盖子是否已安装固定好。

i) 用钳式电流表测量每根相线和中线的电流，还应测量接大地电极的导体中的电流。

表 74 接大地电极的导体规格

供电导线或等效并联导线的最大尺寸				接大地电极的导线最小尺寸			
铜线		铝或铜包铝线		铜线		铝或铜包铝线 [b]	
截面积 mm^2	参考美国线规 [c]	截面积 mm^2	参考美国线规 [c]	截面积 mm^2	参考美国线规 [c]	截面积 mm^2	参考美国线规 [c]
35 或更小	2 或更小	50 或更小	0 或更小	10	8	16	6
50 或 70	1 或 0	70 或 95	2/0 或 3/0	16	6	25	4
70 或 95	2/0 或 3/0	120～150	4/0 或 250MCM	25	4	35	2
95～185	3/0～350MCM	150～240	250MCM～500MCM	35	2	50	0
185～300	350MCM～600MCM	240～500	500MCM～900MCM	50	0	95	3/0
300～500	600MCM～1100MCM	500～800	900MCM～1750MCM	70	2/0	120	4/0
＞500[a]	大于 1100MCM	＞800	大于 1750MCM	95	3/0	150	250MCM

[a] 当供电导线或等效并联导线的截面积超过 $500mm^2$ 时，接大地电极的导线截面积不应小于供电导线截面积的 12.5%。

[b] 在直接与砖石结构或大地接触、或者有腐蚀条件的场合，不应采用铝或铜包铝接地导线。在户外使用时，在地面以上 45cm 范围内不应安装铝或铜包铝接地导体。

[c] 参考美国线规为横截面积相近的美国线规。

15.4.9.2.2 分隔的电源系统

分隔的电源系统是指由现场的发电机、变压器或变换器独立绕组供电的系统，它与其他供电系统没有直接的电气连接。

以下情况中线应接地：

a) 在小于 50V(峰－峰值)的下列交流电路中：

1) 由变压器供电的分隔电源系统，变压器进线的对地电压超过 150V(峰－峰值)；

2) 由变压器供电的分隔电源系统，变压器进线未接地；

3) 室外的的架空线路。

b) 当系统接地后，不接地导体上的最大对地电压不超过 150V。

c） 标称值 380V/220V 的 Y 形三相四线系统。

d） 接地的辅助导线非绝缘。

分隔的电源系统接地时，应检查接地的安装是否符合上述的规定。

15.4.9.2.3 电源转换和分路开关

如果设施包含有电源转换或分路开关，应对每一开关进行下列检查：

a） 检查是否有一根中线(如使用)从电源引入每一开关中；

b） 检查中线是否未在开关中接地；

c） 检查中线的导线颜色是否正确，利用油漆或以其他诸如标签或标签牌之类的方法重新标识规定的颜色；

d） 检查所有电缆槽、导管及封装层等是否确实接地；

e） 检查从每个源到开关的相线、中线及接地导线是否在一起走线；

f） 检查从开关接出的相线、中线及接地导线是否在一起走线。

15.4.9.2.4 电源配电板

对于电源配电板，其中包括供电引入板，应检查下列各项：

a） 检查相线、中线和设备接地导线是否通过同一导管、电缆槽或电缆一起进入电源配电板。

b） 检查中线是否连接到中线母线上。

c） 检查中线母线是否接地。

d） 检查所有连接到中线母线上的导线颜色。

e） 检查相线的颜色、标识是否正确。

f） 如果设备接地导线是一根单独引入配电板的导线，检查它是否为裸线，如带绝缘层，检查它是否带有规定的颜色标识；如为截面积大于 12.56mm^2 的裸线或其他颜色的导线，应利用油漆或标签牌重新进行标记。

g） 不管设备接地导线带绝缘层还是裸线，都应检查它是否已连接到接地母线上，如果不存在母线，是否已利用专门的连接器把它接到电源配电板的框架上。

h） 设备接地导线为一根单独的导体，它应与馈电导线敷设在同一导管中，并且和带绝缘层的馈电导线捆扎在一起。

i） 采用钳式电流表测量每一相线、中线、以及设备接地导线中的电流。将测量的数据记录在第 16 章中勘测表格的第 4 部分(安全接地)。

j） 检查在交流和直流电源系统中是否未借助锡焊作为电气和机械连接。锡焊只能作为机械连接的辅助手段，用以降低射频信号电路或分系统的总阻抗。

k） 检查是否所有有关的相线和设备接地导线(“安全接地”)都经过配电板上的同一导管、电缆槽或电缆送到各负载电路。

l） 检查所有从电源配电板单独引出的设备接地导体是否带有规定的颜色标识，或是否为裸线。若导线截面积大于 12.56mm^2，或颜色不合规定，则应利用油漆、条带或其他方法在导体每个端头和在能接近导体的地方重新进行标识。在应考虑电磁干扰或 TEMPEST 的场合，不能采用裸线。TEMPEST 是有关信息泄露工作的专门术语，包括：计算机系统、通信和数据处理设备有用信息的非功能性传导发射和辐射发射的检测、评价和控制等。

m） 检查每个线路上的设备接地导线是否满足表 75 所给定的规格，该表是以线路中相线过电流保护装置的工作要求为依据的。

n） 检查所有搭接连接是否已把搭接表面的绝缘层清除掉，接地锁紧螺母是否已完全拧紧，其实质都是应获得良好的连接。

o） 采用钳式电流表测量从电源配电板引出的每根设备接地导线中的电流。把测量数据记录在第 16 章勘测表格的第 4 部分。

在某些情况下，步骤(k)～(n)从设备或负载端往回检查可能更容易完成。

15.4.9.2.5　导线槽、电缆槽、电缆桥架

对于所有导线槽、电缆槽及电缆桥架，应检查下列各项：

a)　所有盖子(当适用时)是否就位，并且是否正确地紧固；

b)　各段线槽是否都进行了电气连接，搭接通路中的所有绝缘层是否已被清除；

c)　如果导线槽、电缆槽、电缆桥架中包含有重新标识的中线或设备接地导线时，检查在它们整个长度内是否已按一定间隔完成重新标识。

15.4.9.2.6　设备

对于所有设备，应检查下面所列项目：

a)　当设备接地导线是一根独立导线时，检查此导线是否与相线及中线在同一导管或电缆槽内走线；

b)　检查返回电源配电板的设备接地通路是否连续，接地通路中每个接触表面的绝缘层是否都已清除；

c)　检查用于设备过流装置的设备接地导线截面是否不小于表 75 的规定；

d)　检查中线确未连接到设备的底板或机架上，这可用目视法或绝缘电阻测试仪进行检查。

表 75　设备接地导线最低要求

设备电路中自动过流装置的标称或设定电流 A	导线尺寸			
	铜线		铝或铜包铝线	
	截面积 mm^2	参考美国线规[a] No.	截面积 mm^2	参考美国线规[a] No.
15	2	14	2.5	12
20	2.5	12	4	10
30	4	10	6	8
40	6	10	10	8
60	10	10	10	8
100	10	8	16	6
200	16	6	25	4
400	35	3	50	1
600	50	1	70	2/0
800	70	0	95	3/0
1000	70	2/0	120	4/0
1200	95	3/0	120	250 MCM
1600	120	4/0	185	350 MCM
2000	150	250 MCM	240	400 MCM
2500	185	350MCM	400	600MCM
3000	240	400MCM	400	600MCM
4000	300	500MCM	400	750MCM
5000	400	700MCM	630	1200MCM
6000	500	800MCM	630	1200MCM
[a]　参考美国线规为横截面积相近的美国线规。				

15.4.9.2.7　中线的隔离

在某些情况下，检查时可能需要将设备关机。当一个设施或其一部分的电源可断开时，应进行下列试验：

a）　在断开电源的情况下，把设施的中线从接地导体上断开，或者在设施的某一部分（如电源配电板）上断开，见图216。

b）　测量中线母线与设备接地导线或电源配电板框架之间的电阻。若是低阻值（＜10Ω），表明该设备中线除在供电断路装置上接地外，可能还在某个地方接地。这是不容许的，因为这将导致电源电流通过设备接地网络流动。

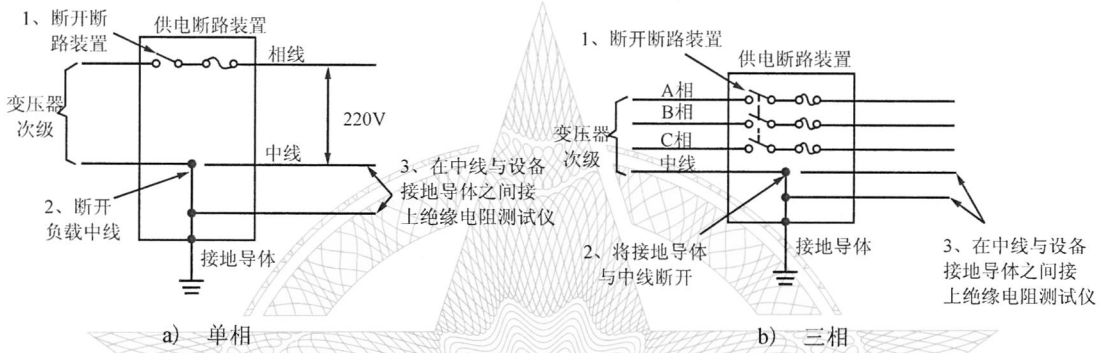


图216　判定存在不适当中线接地连接的方法

15.4.9.3　缺陷的纠正

应对勘测的结果进行仔细复查，以便确定纠正缺陷后的整体效果。有些纠正措施的代价可能是昂贵的，并且不会使设施的性能获得任何改进。某些类型的缺陷应进行纠正，下面列出一些可能遇到的缺陷及其相应的纠正措施。

a）　设备接地导线截面积过小。用符合要求的导线替换。

b）　设备接地导线或中线未与相线在一起敷设。把接地导线或中线重新和相线设置在同一电缆槽中。

c）　设备没有按照15.4.9.2.4 g）～h）要求设置接地导线，而是借助设备本身安装结构（例如安装机架）来接地。通过一根独立的安全地线将设备接地，此导线应与相线和中线一起敷设。

d）　电源配电板（不是供电入口配电板）的中线母线接在配电板的框架上。拆除这种接地连接。

e）　与中线母线连接的安全地线又接到设备底板，充作设备的接地导线。将此导线从中线母线上断开，通过专用连接器重新接到接地母线或配电板框架。

f）　搭接表面带有漆层。拆开搭接头，去除漆层并重新组装，如果搭接头暴露在潮气中，用防水漆保护。

g）　不符合规定的带色导线（不是重新标识的）作为设备接地导线。如果该导线截面积大于12.56mm^2，可以在其端部和容易接近处用规定的色漆、带条或其他方法重新标识；如果截面积不足12.56mm^2，应把它换成符合要求的线；但是，如果更换不切实际或代价昂贵，可接受的替代法是用规定的色漆或带条对它重新进行标识。

h）　接地导线经过导管走线，而导管不接地。用接地套管或夹箍、跨接导线和尾部开槽螺栓连接器将导管两端接地。跨接导线应与接地导线采用同一规格。

i）　供电中线没有接地，但设备外壳利用接地导体接地。将中线接到第一个供电断路装置的接地导体或母线上，实现中线接地。

j）　导线绝缘层损坏。予以更换，或采用绝缘强度等效于导线绝缘层的绝缘带缠裹损坏的区域。

k）　电源配电板借助锡焊连接进行接地。应采用螺栓接地连接件提供补充接地。

l) 接地母线没有接地，并且设备接地导线端接在设备机架上而不是在插座上。通过专用连接件将接地母线连接到电源配电板框架上。

m) 电缆槽包含有不同系统(例如民用电源和稳压电源)的中线和接地导线，而且导线不可识别。用油漆、带条或标签牌将导线互相区别，或者将每一系统的相线、中线和设备接地导线捆扎在一起。

15.5 新设施的信号参考分系统

15.5.1 高频信号参考网络

15.5.1.1 概述

高频信号参考网络是一个导电板、格栅或电缆网络，这个网络在其结构之内任意两点之间以及结构中任意点到大地电极分系统之间提供多条低阻通路。它由三个主要部分组成：等电位接地平面，设备接地导线，连接到大地电极分系统的结构钢元件和电气支撑构件(见图 217～图 219)。这种分系统是安全接地线所无法取代的。等电位接地平面所要求的互连电缆的最大长度及网眼最大间距应是该平面最高使用频率信号波长的 1/8。实际上这可能是行不通的，互连电缆只能根据实际可能尽量短，网眼的间距只能根据实际可能尽量小。

在钢架建筑物中，利用熔焊、钎焊、或螺栓高压连接的方法把每一个接点和互连点搭接，使建筑物的所有结构件(如建筑物的立柱、墙架、屋顶桁架等)在电气上连续。当上述类型的直接搭接不可能时，利用一根截面为 54mm^2 的铜绞电缆进行搭接，该搭接电缆两端应利用硬钎焊、熔焊或螺栓固定。该要求不包括钢筋。

用截面为 54mm^2 的铜电缆将结构物的钢网络连接到大地电极分系统上，建筑物结构至大地电极分系统的相邻连接点之间的距离不应超过 15m。

在非钢架结构的建筑物上需安装补充网络，组成网络的粗铜电缆应符合表 76 规定。

设备机柜、电气支撑构件和公用事业管道，都应连接到该结构物的钢架上或接到用截面积 12.56mm^2 以上的铜电缆组成的格栅(等电位接地平面)上。这种互连线应尽可能短，最好不超过 0.6m，以减小高频电抗。电气支撑结构件包括所有导管、电缆槽、开关和断路器配电板，以及与通信电子设施有关的、通常不带电的附件。

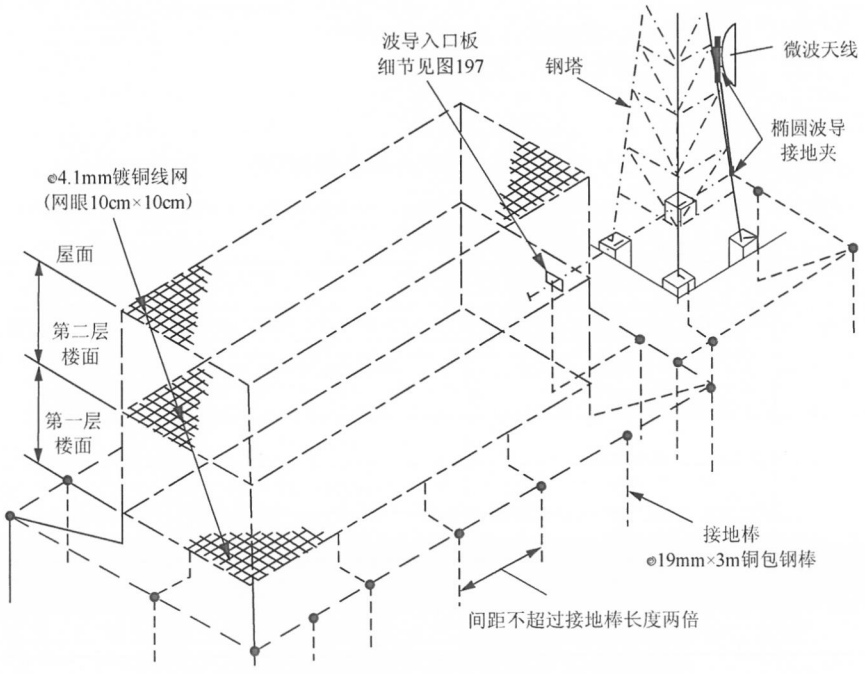


图 217 多层建筑物的典型等电位接地面

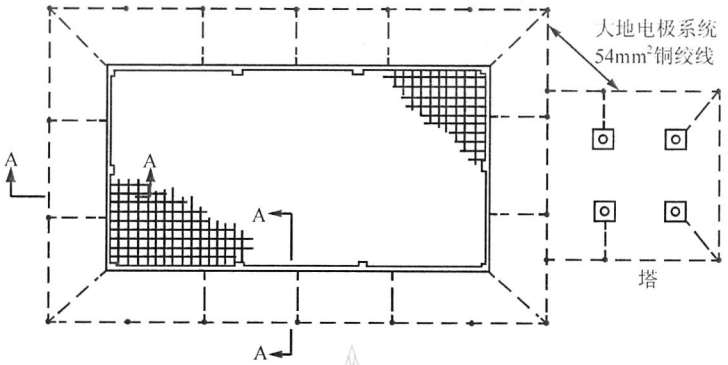


图 218　典型建筑物的地面图

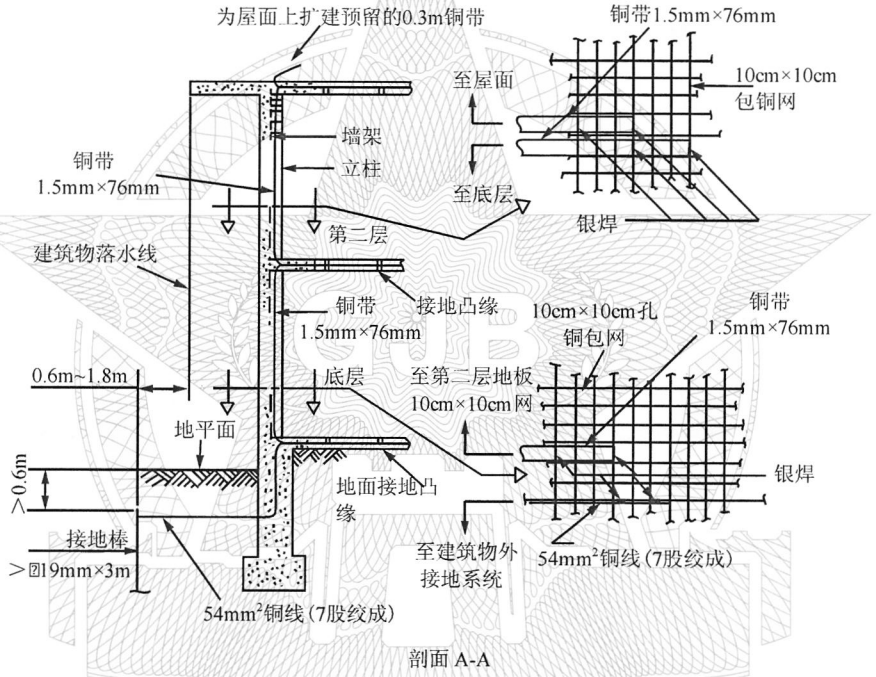


图 219　典型多层建筑物图

表 76　设备接地电缆的要求

类型	尺寸 mm		最大通路长度 m
	截面积 mm^2	参考美国线规[a] No.	
电缆	400	750MCM	114
	300	600MCM	91
	240	500MCM	76
	185	350MCM	53
	150	300MCM	46
	120	250MCM	38

表 76(续)

类型	尺寸 mm		最大通路长度 m
	截面积 mm^2	参考美国线规[a] No.	
电缆	120	4/0	32
	95	3/0	25
	70	2/0	20
	50	1/0	16
	50	1	12
	35	2	10
	25	4	6
	16	6	4
	10	8	2.4
汇流条	102mm×6.5mm	－	194
	102mm×3.2mm	－	97
	76mm×6.4mm	－	145
	76mm×3.2mm	－	72
	51mm×6.5mm	－	97
	51mm×3.2mm	－	48
	51mm×2mm	－	24
	25mm×6.5mm	－	48
	25mm×3.2mm	－	24
	25mm×1.6mm	－	11
[a] 参考美国线规为横截面积相近的美国线规。			

15.5.1.2 多点接地系统

15.5.1.2.1 概述

多点接地系统需要一个遍及整个系统的等电位接地平面。这种等电位接地平面的实例是建筑物内的金属地面或电气搭接在一起的天花板格栅；或者是建筑物内夹有接地格栅层的水泥地面，这种格栅应当接到设施的接地端。安装时将设备机柜连接到等电位接地平面，再将底板连接到设备机柜，而所有元件、信号回线等又连接到底板上。最后将等电位接地平面接到大地电极分系统，以确保人身安全，并为信号提供低阻抗通路。

如果在待接地设备下面的地板中已夹入大的导电平面，或地板本身是高架的金属地板，那么在高频时地板将呈现出比信号导线更低的特性阻抗，即使这两种地板没有正确与地端接亦如此。因为特性阻抗(Z_c)是 L/C 的函数，随着对地电容量的增加，Z_c将减小。通常，金属板的对地电容量比导线的对地电容量大。如果增加金属板的尺寸并扩大其占有面积，电容量就增加。同时，单位长度的电感将随着金属板宽度的增加而减少，这就进一步减小 Z_c。如果金属板尺寸增加得非常大(如底层的导电地板那样)，特

性阻抗则趋向很低的值。这种情况下，即使不正确端接，阻抗在很宽频率范围内都相当低，这就为所有搭接在该金属板的设备建立一个等电位参考面。如把该参考面接到大地，还具有下列优点：

a) 任何“噪声”电缆或接到感受器的导体，在通过或沿着上述接地面敷设时，与它们有关的电磁场将被限制在导体和接地面之间；因为这些“传输线”导体之间的距离非常近，所以噪声场就可以被滤波器和搭接条“短路”掉，从而避免了噪声电流在感受器外壳和任何天线输入电缆上流动；

b) 当上述电缆或导体与接地面构成等效传输线时，设备接口处的滤波器可以工作得更有效；正如以上 a)所述，大的导电表面很容易限制带噪声导体所引起的噪声场，因而也防止了噪声的进一步传播；

c) 大面积的导电面还可以将任何屋顶天线与敷设在它下面的电缆加以隔离。

15.5.1.2.2 等电位接地平面类型

15.5.1.2.2.1 概述

可用作等电位接地平面的导电媒质有：

a) 夹在水泥地板中的铜格栅或诸如计算机房的高架金属地板；

b) 在地板贴面或地毯下铺设的铝、铜、磷铜栅网或薄板；

c) 架在设备上方的格栅天花板。

格栅的开孔尺寸应不大于最高使用频率信号波长的 1/20，最大为 10cm。因此，格栅开孔尺寸不大于 10cm 就是设计的着眼点。下面这些等电位接地平面可以用于新的设施，或者正在大修及加固改进的通信电子设备。

15.5.1.2.2.2 夹在水泥地板中的铜格栅

由于大面积的实心导电面对于某些场合并不经济实用，所以应考虑采用铜或铜包钢组成的格栅。格栅开孔尺寸为 10cm，预浇在水泥地面中，并通过与水泥地面齐平的接地连接件(见图 220)为安装设备提供接地点。栅网可采用 Φ2.12mm～Φ4.25mm 的铜线组成。栅网通常成卷提供，但其宽度可以有各种规格，最宽为 5.5m。在栅网之间连接的地方，应当重叠 0.3m，并通过熔焊或硬钎焊每隔 0.6m 将叠接缝焊接一次；或者用预制的接地连接器接到格栅条上，接地连接器还为地面提供接地点(见图 221～图 224)。如果格栅夹入水泥地板，上述后一种方法通常可提供最方便的接地点。等电位接地平面应以多点接地方式熔焊到建筑物的主结构钢件上。当利用建筑物的框架接地时，可以使用截面为 54mm^2 的铜导线将等电位接地平面以多点接地方式连接到大地电极分系统。假如采用金属地板系统(金属地板上再浇上一层水泥)，那么这地板本身就是一个等电位接地平面。事实上，这是建立等电位接地平面的最常用方法。

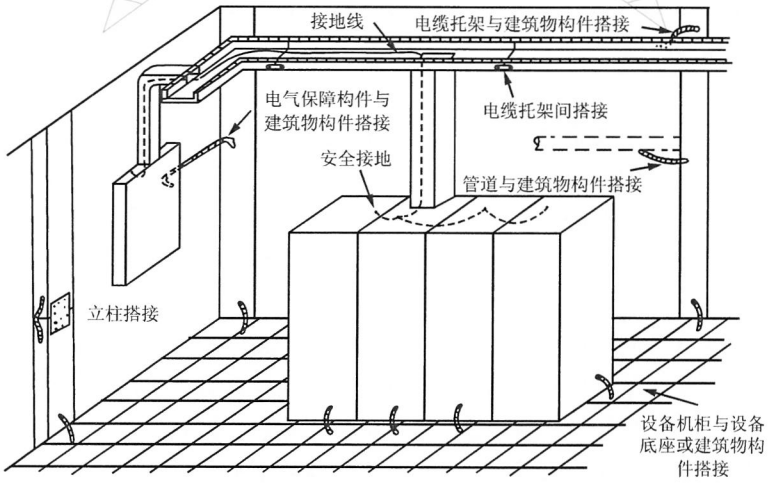


图 220 带接地格栅的设施接地系统的各种构件

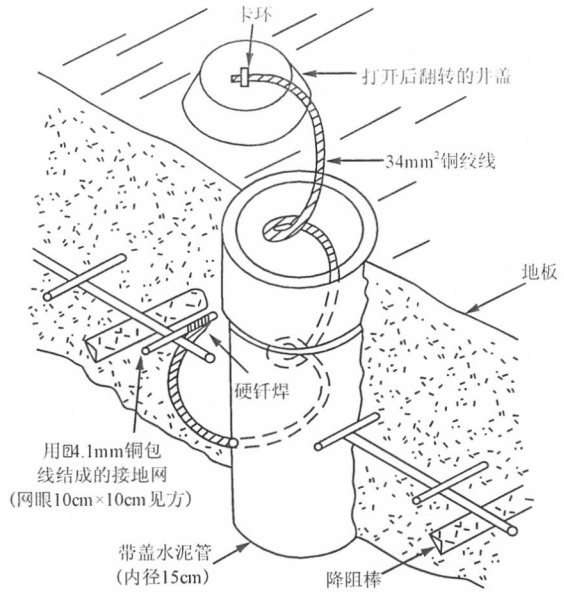
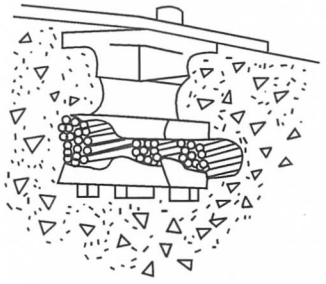
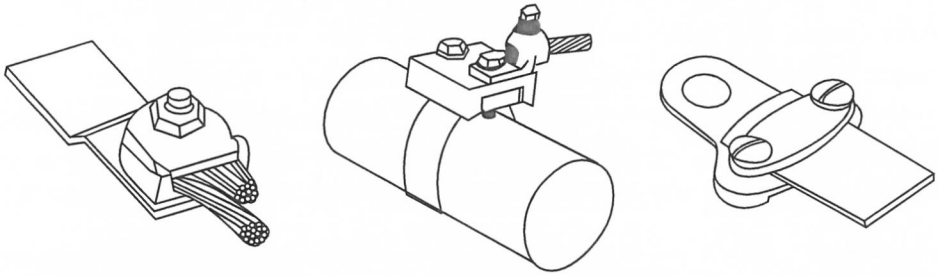


图 221　新建的典型等电位接地面(用于高频或混合频率设施的安装)



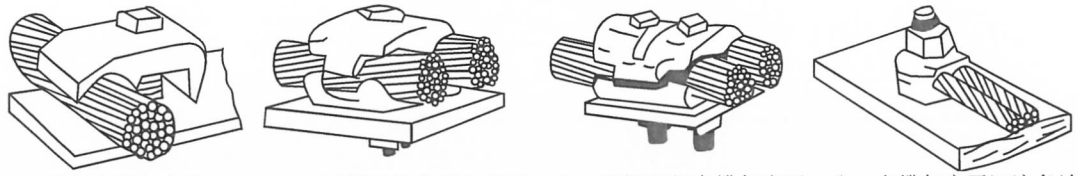
水泥地板内汇流转接件的使用方法：先将转接件接到地板的接地电缆（等位面），然后浇灌水泥，使转接件顶部5×5cm²的平板与水泥地面平齐。转接件可按预定位置设置，也可在整个地板或墙基按一定间隔设置，但转接件一定要便于电气设备接地。转接件顶部5cm见方的安装表面上预制4个或2个M8的螺纹孔，供接地之用。上述等位面要有多点焊接到大地电极分系统。

图 222　在水泥地板中的等电位接地平面接地连接件



a)　铜焊在钢搭片上的青铜连接器(钢搭片可进而与原有钢构件焊接)　b)　大中型尺寸的管用带形连接器　c)　长度可调的带状连接器

图 223　典型的接地连接器



a)　单根电缆与扁平汇流条用单螺栓压紧　b)　两根平行电缆与扁平汇流条用单螺栓压紧　c)　两根平行电缆与扁平汇流条用双螺栓压紧　d)　电缆与扁平汇流条连接

图 224　电缆连接至接地汇流条示例

15.5.1.2.2.3　在地板贴面或地毯下面的等电位接地平面

在地板贴面或地毯下面铺设一层金属板或金属丝网就可以构成一个等电位接地平面。这些金属板或丝网由铜、铝或磷铜制成。用树脂将它们胶在地板上，再在上面铺以贴面或地毯。在已安装设备的现有设施中，等电位接地平面不必铺设在设备机柜底下方的地板下，但机柜四周应与等电位接地平面搭接。这种等电位接地平面应有多点与建筑物的主结构钢件熔焊搭接，而主结构钢件应熔焊到大地电极分系统上。

15.5.1.2.2.4　架空的等电位接地平面

当无法将等电位接地平面安装在设备四周时，只能把等电位接地平面架空安装在设备房间的天花板内或天花板上。等电位接地平面既可以是薄金属板，也可以是金属网，但通常采用磷青铜网，因为它轻、耐久、并容易加工。从设备到等电位接地平面的搭接条应尽可能短。该等电位接地平面应搭接到建筑物的钢结构，然后再经该钢结构搭接到大地电极分系统。

15.5.1.2.2.5　高架(计算机房)地板

15.5.1.2.2.5.1　概述

利用高架地板在结构上支撑设备机柜后，在原设施地板和高架地板之间就提供了一个空间，此空间可敷设电缆、通风或空调管道、水暖管及下水管道等。常用的地板系统有：

a)　螺栓连接的格栅(桁条)或刚性格栅系统；

b)　镶嵌式格栅或移动式格栅；

c)　仅有柱架、或无桁条的非永久性地板。

不过仅 a)型可作为等电位接地平面。

15.5.1.2.2.5.2　栓接格栅(桁条)或刚性格栅系统构成的高架地板

栓接格栅地板系统如图 225～图 227 所示。这些系统类似于镶嵌式格栅，不过其正确的安装方法是应采用螺栓或压板紧固格栅。镶嵌式地板应是金属板或两面覆盖金属的木板，单块尺寸不应大于 0.61m×0.61m，金属地板上面应铺设符合相关要求的地板面层。虽然金属地板与桁条的接触电阻未必很低，但大的分布电容可使地板在射频达到电气连续。设备机柜应通过尽可能短的搭接条连接到地板桁条，以便为低频提供低阻抗通路。桁条和柱架端头的材料应采用钢和铝。防静电地板的标准尺寸为：铝基地板—0.6m×0.6m，钢基地板—0.61m×0.61m，复合基地板—0.5m×0.5m。

一般说来，高架地板的接地情况是极好的。设计者应注意以下几个问题。

a)　安装方法　不应采用自攻螺母来代替标准螺母，因为前者通常会变形而使连接松动。若铝制柱架连接头已严重氧化，安装前应将连接表面轻微揩擦，最好涂覆一层淡薄的接点保护膏。对于可能渗入潮气、清洗剂和蜡的无地毯地板，在几年内连接头就可能严重损坏，特别应考虑采用接点保护膏。螺栓附件使用不当也会形成不可靠的连接，所以，英制螺栓连接应满足表 77 的要求，公制螺栓连接应满足表 E.1 的要求。有时采用金属薄板螺栓将桁条固定在柱架上，但取代标准螺母的自攻螺母会变形，并由此会产生接头损耗，所以不应使用自攻螺母。这种自攻螺母如图 228 所示。在地板安装前，建议先培训安装人员，并对地板进行检查。柱架连接头和桁条之间安装搭接不良，主要由下列原因造成：

1)　在搭接时柱架连接头严重氧化和沾污；

2)　连接螺栓选用不当，如快锁自攻螺母，金属薄板自攻螺栓等；

3)　没有安装螺栓附件，或紧固不当。

b)　地板系统检查　机柜底板和高架地板间的搭接电阻不应超过规定的数值，通常为 1mΩ。柱架连接头与桁条间的典型电阻值约为 4μΩ，最大不应超过 100μΩ。电阻测量设备选用微欧计。

c)　高架地板系统的连接　从设备机柜和大地电极分系统至地板的连接都应受到重视。如采用压

条，应将其装在柱架组件上部，以避免下柱架组件（有底座）和上立柱之间出现较高的接触电阻。桁条与柱架的紧固附件往往需要更换，以便将电缆端子直接搭接到柱架连接头上。也可以准备一些其他型式的格栅固定附件，利用它们把搭接电缆的端子栓接至地板格栅上。搭接电缆端接的另一方法是在非承重桁条上钻一个孔，再用螺栓搭接。

d) 腐蚀控制　在非常潮湿的环境中，通常推荐采用防腐剂。将非腐蚀性的硅橡胶覆盖在栓接的连接头上，可使接头在其安装寿命期间免受腐蚀。

e) 铺地毯　应选用低静电或无静电型地毯，以防止静电放电及由此而引起的元件失效。

f) 维修测量　为了确定地板的性能老化，应提供电阻测量的结果和方法，以便在怀疑接地参考分系统有问题、或要对接地参考分系统的性能作定期检验时，可进行复测。

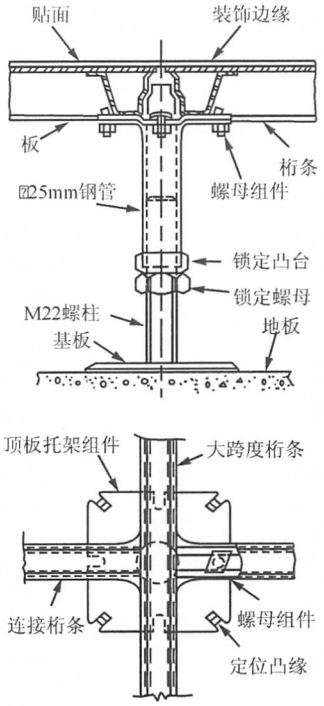


图 225　刚性格栅高架地板系统详图

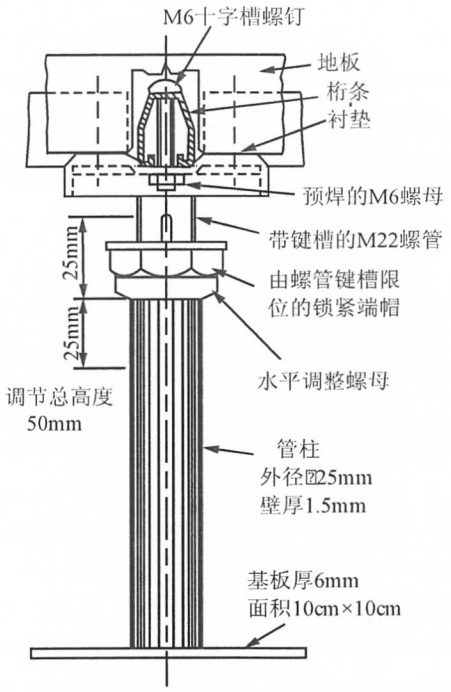


图 226　刚性格栅与柱架螺栓连接示例

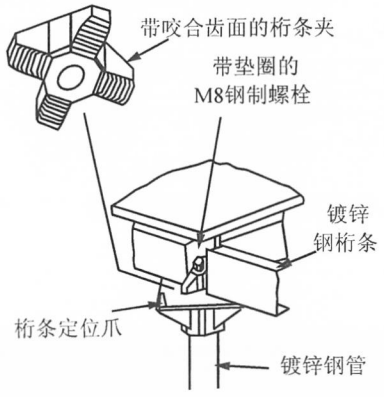


图 227　刚性格栅与柱架的夹持连接

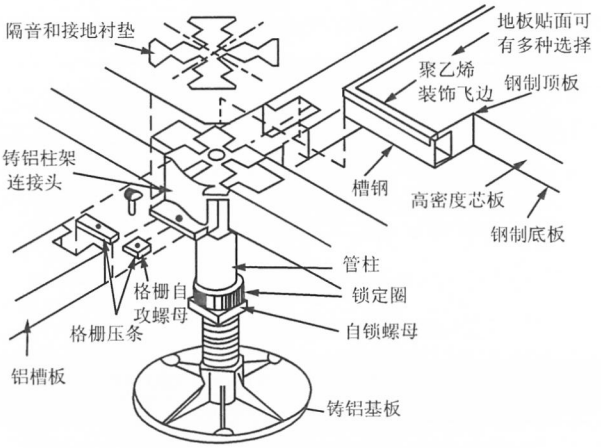


图 228　格栅与柱架间不可接受的搭接示例

表 77　英制螺栓搭接的最小力矩要求

螺栓尺寸	齿数/英寸	最小扭矩 N·m	拉伸力 N	搭接面积 mm^2
#8	32	2.0	2780.1	270
	36	2.3	3047.0	295
#10	24	2.6	3136.0	305
	32	3.6	4181.3	405
1/4"	20	9.0	8184.7	790
	28	11.3	9786.1	950
5/16"	18	15.8	11298.5	1090
	20	17.0	11654.3	1130
3/8"	16	28.3	16636.4	1570
	24	31.1	17570.5	1705
7/16"	14	45.2	22730.4	2195
	20	48.0	22774.9	2210
1/2"	13	62.1	27178.6	2625
	20	65.0	27312.1	2640
5/8"	11	104.0	32694.4	3160
3/4"	10	158.2	41368.5	4000
7/8"	9	220.3	49375.3	4775
1"	8	291.5	57382.1	5550

15.5.1.2.2.5.3　镶嵌式或移动式格栅系统

镶嵌式格栅地板结构如图 229 所示。格栅条或桁条由柱架连接头上的啮合凸块或凹陷固定。桁条起支撑作用，并且在新安装时与柱架连接头有较低的接触电阻。安放在地板上的设备机柜可使一定面积内的接触压力增加。由于灰尘、潮气及地板蜡会通过缝隙渗入地板，结果造成了地板连接头的严重腐蚀和不可靠的电气接触。这种地板系统不适于做等电位参考面。安放在柱架和格栅条上的地板尺寸通常为 0.6m×0.6m。

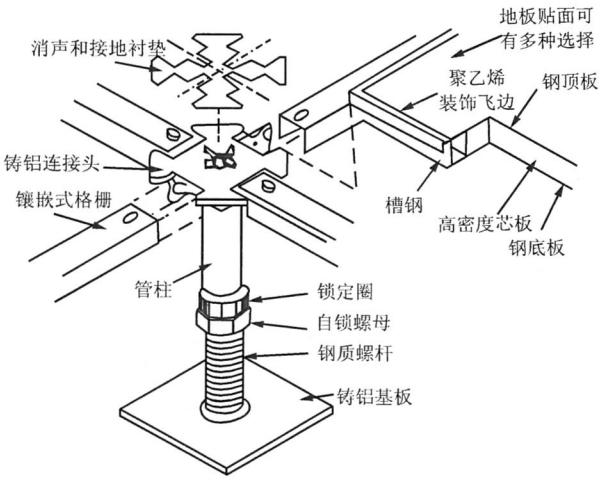


图 229　镶嵌式格栅地板结构示例

15.5.1.2.2.5.4　仅有柱架或无桁条的非永久性地板系统

仅有柱架的地板系统实例见图 230。柱架基板被粘结或“钉死”在适当位置构成基座结构。柱架顶部应保持同一水平高度，以便安装地板。各柱架间的导电性是变化而不可靠的，因此这种系统不适合作接地参考面。

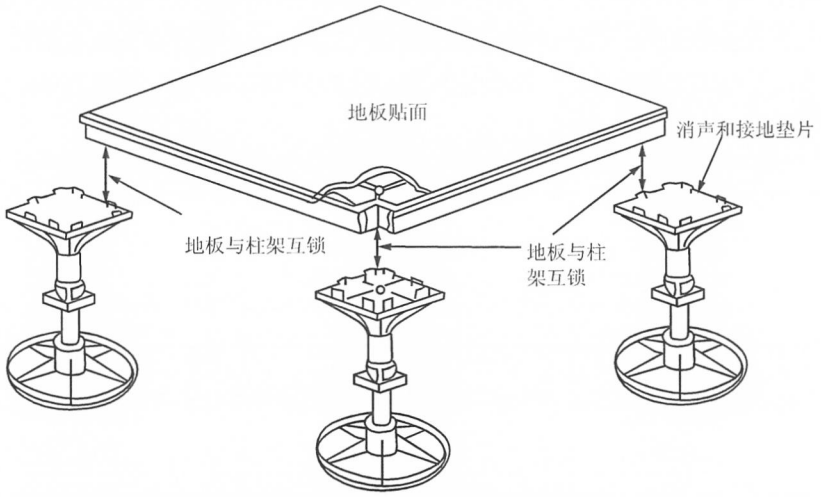


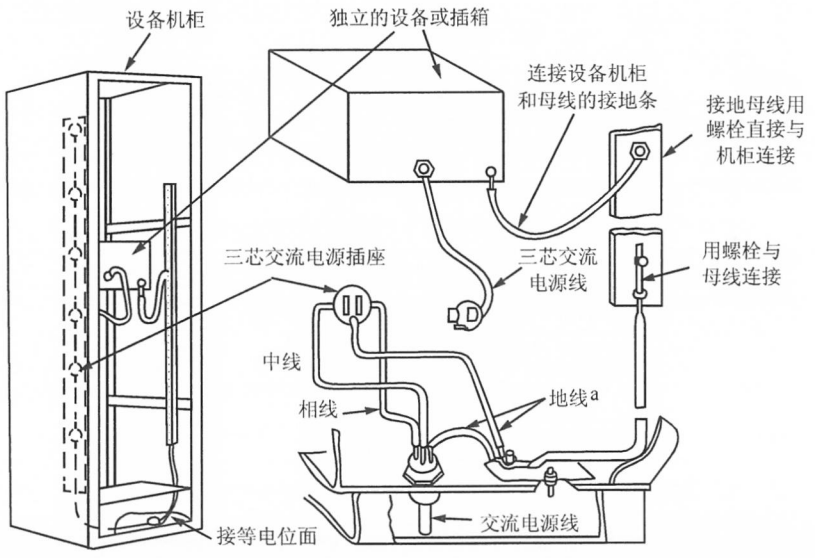
图 230　仅有柱架的地板结构示例

15.5.1.2.2.6　高度可调的接地柱架

所用的高度可调接地柱架类型既取决于要安装的等电位接地平面类型，也取决于它所架设的建筑物是新结构，还是对安装新设备的原有建筑物进行大修，或者只是在原有建筑物内设备不动的情况下对接地系统进行加固改进。后一种情况将在 16.2.4 予以讨论。

15.5.1.2.2.7　设备机柜的接地

每个独立单元或设备外壳或底板应接地，接地方式为搭接到机架或机柜，或就近搭接到等电位接地平面。机架或机柜也应就近搭接到等电位接地平面(见图 231)。



[a] 安全接地线的尺寸应不小于交流电源输入线。

图 231　典型的设备机柜接地详图

15.5.2 低频信号参考网络

15.5.2.1 概述

这种网络是为了给低频信号提供单点参考，减少低频灵敏设备中电源频率的噪声电平，同时也为其他隔离网络中的故障和静电放电提供保护。实际上，设施中信号接地网络的设计和安装，应使之能控制干扰耦合(见 8.4 和 9.5)。但是，即使正确设计的(低频或高频)网络，也并非能解决所有电路和系统的噪声问题。为了把系统电路中的噪声电平限制到无妨碍的程度，往往需要采取一系列附加措施，诸如：通过屏蔽、滤波或变更设计等方法降低干扰源的电平；利用共模抑制技术；实施其他各种耦合控制技术等。

15.5.2.2 配置

设施的低频(低于 30kHz，某些场合可高至 300kHz)接地网络被配置成如图 232 所示的树状。这种树状网络的主要组成元件见图 233。

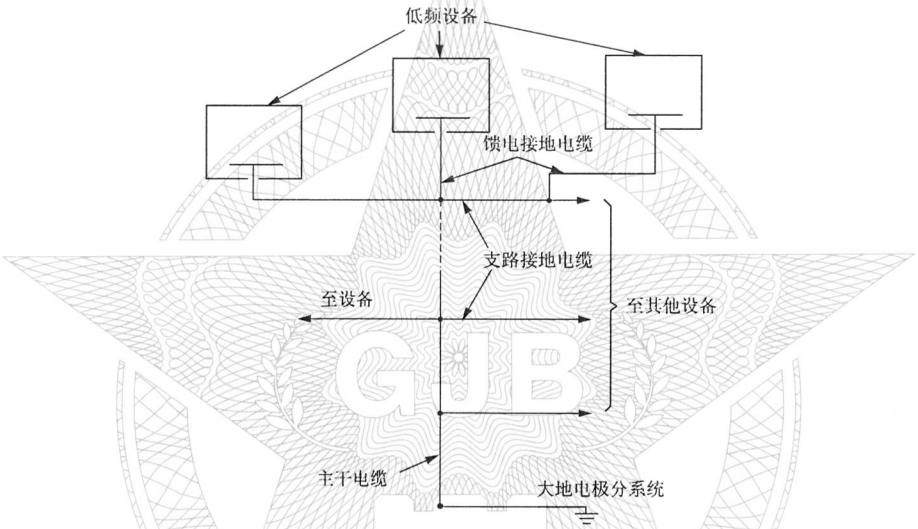


图 232 低频信号接地网络示意图

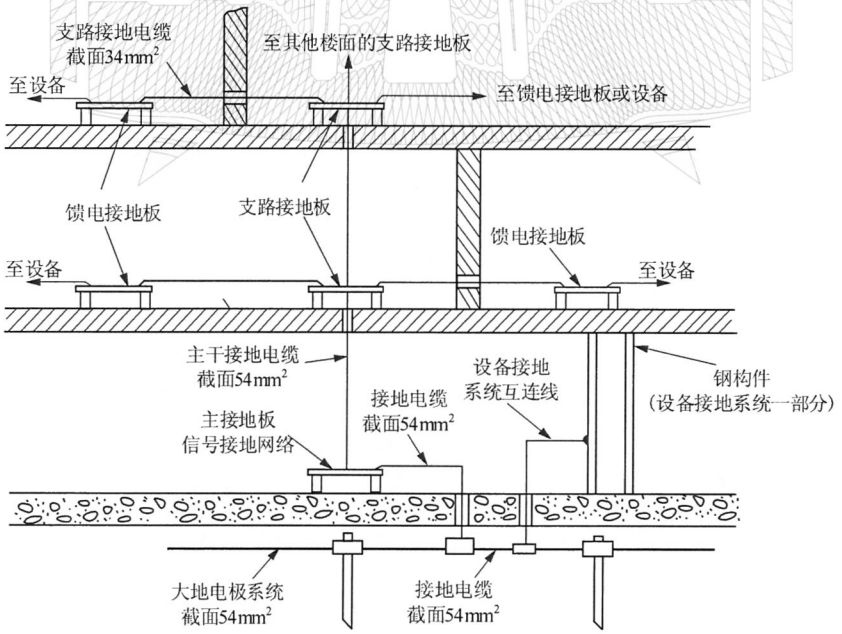


图 233 典型的低频信号网络配置

具体安装要求如下：

a) 在设施中心位置安装主接地板，用于低频接地网络、设施接地系统和电源系统接地时的单点互连。

b) 在主接地板和遍布整个设施的支路接地板之间安装主干接地电缆。

c) 装配支路接地电缆，这些电缆应从支路接地板延伸至位于室内或设备附近区域的馈电接地板。

d) 利用带绝缘的导体将每一设备内的信号参考点或参考面(见 17.2.1.2)连到馈电接地板上。

e) 所用网络应满足设施的需要。如果设施是一个大的综合设备，其低频设备遍布各处，则应将此网络延伸到所有有关的区域。另一方面，如果低频设备布置在一个有限的特定区域，则仅需将网络延伸到这一区域。通信电子设施中不设置低频信号参考分系统。

15.5.2.3 组成元件

15.5.2.3.1 主接地板

主接地板应为铜制的。优先选用铜，是因为铜比其他金属耐腐蚀。这种接地板的尺寸和安装结构见图 234。接地板应可靠地安装在一个容易接近的位置。

15.5.2.3.2 主干接地电缆

对主干接地电缆的要求如下：

a) 规划主接地板到设备之间的带绝缘的主干接地电缆走线，以便减少电缆长度。

b) 主干接地电缆应避免与非屏蔽电源电缆长距离平行敷设，而且尽可能远离雷电引下导体。当不得不靠近电源线走线时，应将电源线或主干接地电缆置于黑色金属导管中。

c) 信号接地电缆的导线截面不应小于 34mm^2，并且应按照 0.85mm^2/m 的准则设计导线，即：导线最小横截面积(mm^2)＝敷设长度(m)×0.85mm^2/m。按此准则设计的电缆将使网络上任何两点之间的直流电阻限制在 20mΩ 以下。

d) 对于主干接地电缆，推荐的最小截面为 54mm^2。对于短线段，截面为 54mm^2 的导线，已大于上述准则所要求的最小横截面。例如，敷设一根 15m 长的电缆，可算得其最小截面积应为 15m×0.85m，即 12.75mm^2。

e) 主干接地电缆的总长度不应大于 60m。如果需要较长的电缆，在设备中则应安装较大的电缆或配置多重网络。在大尺寸结构物中，设备往往分散配置，一根 60m 的电缆显然不够，这时推荐使用平行网络。当设备在高层结构中垂直分布时，增大电缆规格是合适的。

15.5.2.3.3 支路接地板

在每层地板上，或在装有低频设备的每个主要区域内都应安装一块支路接地板，这是为了给主干接地电缆和支路接地电缆提供一个方便的互连点。支路接地板尺寸应符合图 234 的要求。为了保证网络对地隔离，应通过绝缘垫板将支路接地板安装在绝缘支柱上，并用不导电螺钉紧固。

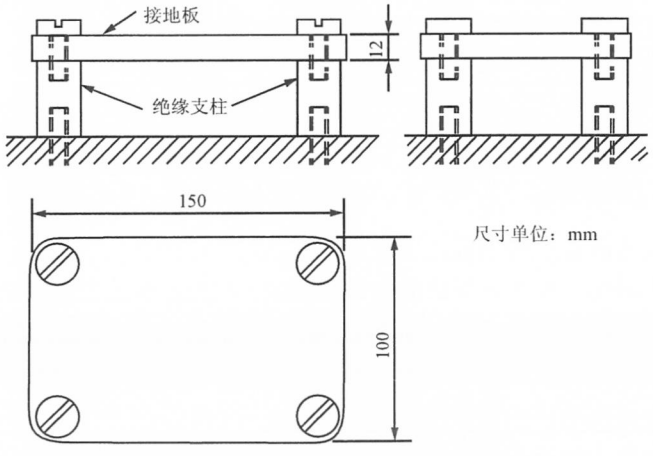


图 234 主接地板和支路接地板

15.5.2.3.4　支路接地电缆

安装支路接地电缆是为了在主干电缆和一般设备区域之间提供必要的延伸。支路接地电缆的最小截面应为 34mm^2。支路接地板和位于设备附近的馈电接地板(见下条)之间敷设的支路接地电缆总长度不能超过 45m，以满足 0.85mm^2/m 准则的要求。

如果设施中从支路接地板到设备的馈电电缆长度大于 45m，则应安装几个低频接地网络。在设备到馈电接地板之间简单敷设的设备信号接地电缆较长时(见 17.2.1.2.2)，也应符合上述要求。

15.5.2.3.5　馈电接地板

对馈电接地板的要求如下：

a) 馈电接地板应设置在设备附近。从各个设备引出的信号接地电缆和支路接地电缆应利用螺栓和锁定垫圈牢固地搭接到这些馈电接地板上。

b) 馈电接地板采用铜制造、其尺寸为 150mm×100mm×6mm。

c) 安装时应采用绝缘柱、绝缘垫或不导电螺钉，以确保网络与设施接地系统隔离。

d) 为了避免无谓地加长信号接地电缆，馈电接地板相对于与其连接的各设备应居中设置。当设备布局改变时，把馈电板移到相应的新位置也许是有益的。

15.5.2.4　多网络配置

当安装多重网络时(见上面 15.5.2.3.2 e)和 15.5.2.3.4)，除了在主接地板上的互连(主接地板用于 2 个或多个网络)，或者通过大地电极分系统互连(每个网络采用独立的接地板)之外，应在网络之间保持电气隔离。不应将两个独立的接地网络所引出的支路接地电缆搭接到同一个馈电接地板或支路接地板上。同样，还应避免通过设备构成无意互连。

各接地网络安装后，在与设备互连之前，用绝缘电阻测试仪检查各个接地网络之间的绝缘性(在一个网络与主接地板断开的情况下检查)，网络之间至少应呈现 1MΩ 的电阻。

15.5.2.5　布局和走线

对布局和走线的要求如下：

a) 在运行要求所允许的范围内，确定各设备的布局，以减小它们到整个设施所需要的低频接地网络导线长度。

b) 当设备的布局受限制时，可以调整网络电缆的走线以适应布局要求。但是，在这种情况下，为了保证接地网络不致成为信号电流、杂散电源电流和其他噪声电流的公共回路(见 8.3.3 和 9.1)，应保持树状配置。如果没有要求，不必都设置支路。例如，敷设的主干接地电缆经过设备安装区时，不必再向该区域敷设支路接地电缆。支路接地板也可取代馈电接地板作为设备信号接地导体的端接点，反之亦然。按上述方式配置时，主干接地电缆的总长不能超过 60m。

c) 应确保网络本身无折回闭合，也不在两点之间建立多条通路。

15.5.2.6　标志及其保护

为了保持低频信号参考网络隔离和完善性，应用色码和标签清晰标识网络的所有元件，要求如下：

a) 沿着电缆以一定的间隔提供识别标志。每根电缆的端头应采用色码或标签清晰地标识。特别是在主干电缆和支路电缆之间，以及在支路电缆和设备信号接地电缆之间的连接处，即在支路接地板和馈电接地板上，识别标志应容易辨认。

b) 低频信号参考网络导线的导管或线槽也应利用色标或标签给予清晰的标识。

c) 利用不导电的保护盖板覆盖支路接地板和馈电接地板。这种盖板可起物理保护作用，但是，它的主要作用是标识这些接地板属于低频参考网络，不作其他接地用。

15.5.3　信号参考面及设施电源的混合接地

图 235 为用于典型电子设施的接地方法。图中分别给出了低频和高频两种设备所要求的典型防雷接

地、电源接地、安全接地和信号接地。此图仅表示了各种接地网络如何连接，每种接地情况并没有给出。具体要求如下：

a) 变压器次级 Y 型连接的中线先接地到变压器壳体上，然后再接到电网的接地棒或格栅上。变压器的接地由设施的大地电极分系统提供。变压器的接地点最好在适当位置与结构接地互连，这种推荐的互连在图中以虚线表示。

b) 中线与设施大地电极分系统的连接只能在供电断路装置的输入侧，而不能在其他地点，更不能在设备内部。所有设备外壳应通过安全接地线接地，电气和电子设备中所有暴露的、人体可能触及的外部金属件亦以这种方式接地。

c) 如果需要，可对低频设备提供一个隔离的单点信号接地网络，这种树状网络可按需要延伸到整个设施。高频设备应接地到等电位平面上。设备故障保护由设备的接地电缆通过设备接地板的互连来提供。将结构元件接地到大地电极分系统。主接地板用作低频接地网络和大地电极分系统之间的中间连接点。

d) 雷电防护分系统应经结构物的大地电极分系统接地。当屋顶导体及引下导体与结构元件的间距小于 1.8m 时，应在它们之间进行横向搭接。

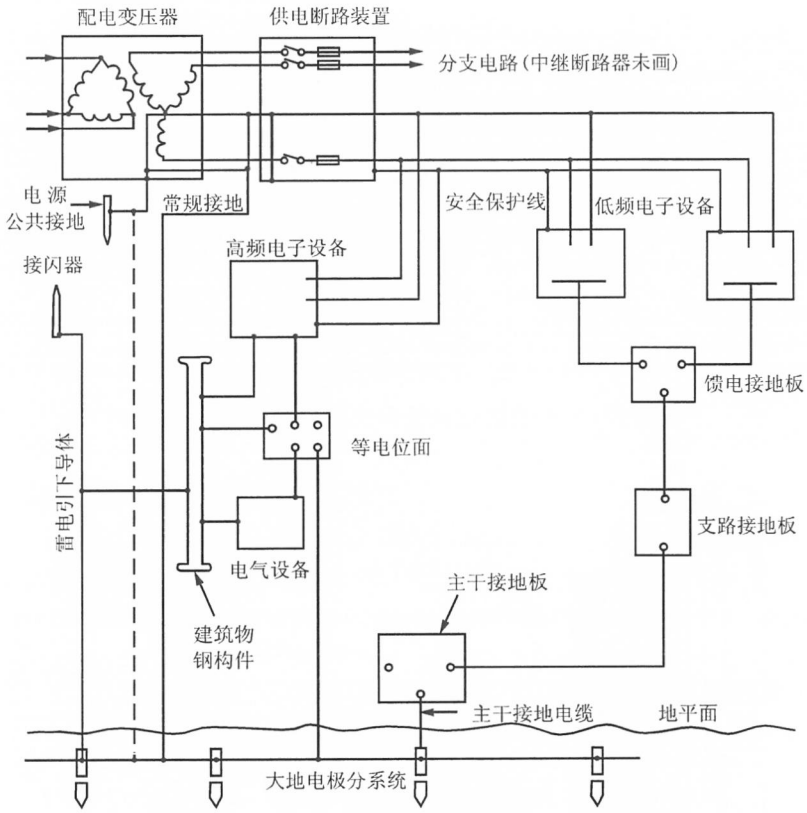


图 235　高频/低频信号设施的混合参考系统

15.6　处理有关国家安全信息的设备(红/黑设备)的接地原理

在处理有关国家安全信息(红色数据)的场所，凡未作加密处理，呈“明码”状态的机密电子数据及传送这些数据的设备、电路和部件，都以“红”色表示，系统中其他部分则以“黑”色表示。等电位地平面是通信系统中信号参考分系统的视在“大地”，不管它实际离开大地的高度如何。为了保护人身和设备的安全而对设备、导管及机柜采取的接地方式与任何其他设施的接地方式没有什么不同。信号地线

方面，典型的做法是在要控制的空间范围内将红/黑信号地线全部直接连接到等电位接地平面和大地电极分系统(见图 236)。从红色设备到加密设备红色一侧的电缆屏蔽层至少应在两端接地，而从加密设备黑色一侧经过黑色中间配线架到黑色设备的电缆屏蔽层通常在两端接地。对于不平衡的信号传输线，其信号地一般从红色配线架中隔离的信号地母线直接连接到等电位地平面，进而接到大地电极分系统，以此构成信号地(见图 237～图 239)。图 240 提供了设施电源和交流接地配线系统的资料。黑色信号地只为黑色配线架和信号线滤波器提供信号参考地。现有红/黑设备和系统的接地可参考 16.4。

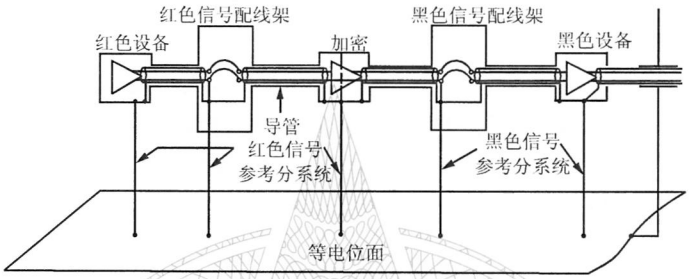


图 236　典型的红/黑信号参考分系统(高电平信号)

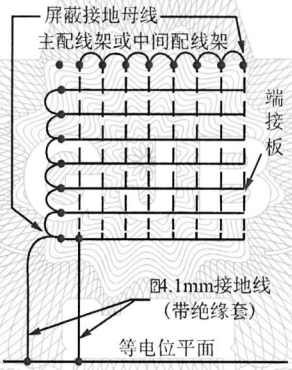


图 237　典型的红色信号屏蔽接地母线布线系统

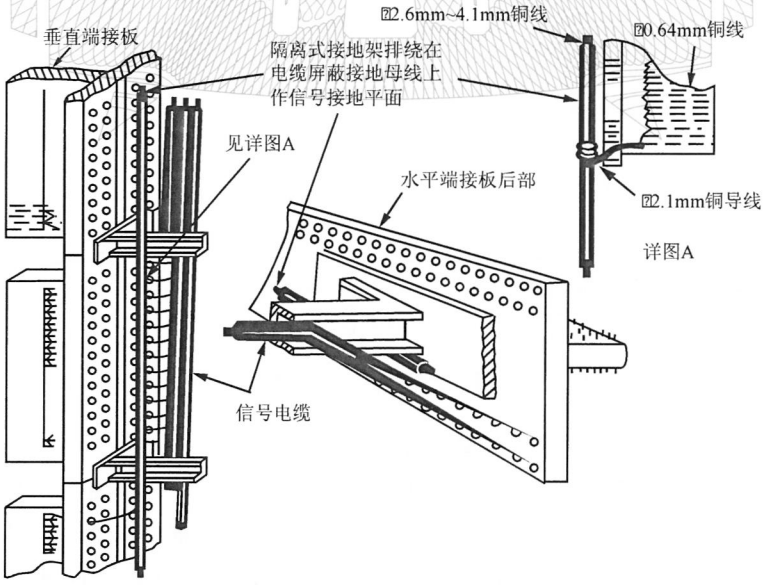


图 238　典型的中间配线架(配线架中的屏蔽接地母线)

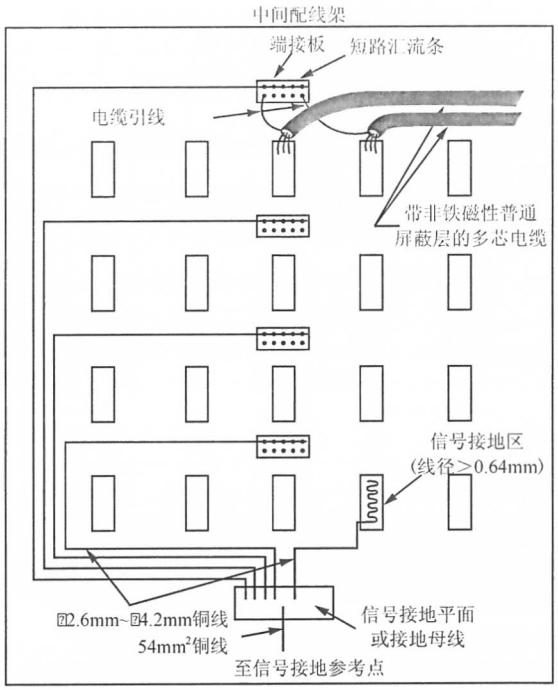
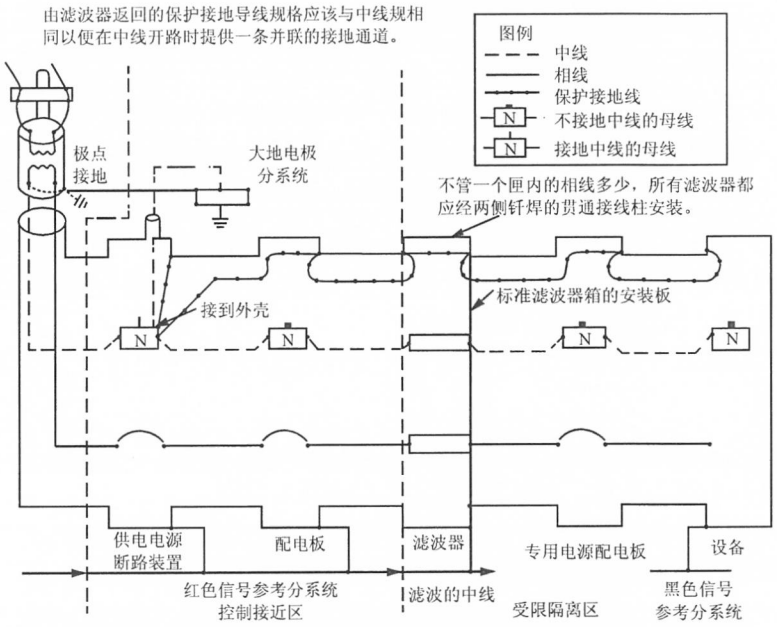


图 239　典型的中间配线架(数据集中机架)



注：当系统或设备施工计划中列入中线滤波器时，该滤波器应先经过 TEMPEST 试验验证。

图 240　设施电源和交流地线布线图

15.7　搭接实施

15.7.1　概述

设施中导电元件之间的高质量搭接是整个接地和屏蔽系统有效发挥作用的基本要求。因此最重要的是对于设施的整体设计和结构的连接、搭接给予全面考虑。高质量的搭接电阻应为毫欧级，其他资料见第 10 章。不同接地系统的搭接要求见表 78。

表 78　不同接地系统的搭接要求

搭接功能	安全接地	信号接地	防雷接地
搭接目的	防止工作人员触电或着火，适用于可能需要承受因短路而产生的故障电流的设备和结构	保护射频环境下的设备，适用于能够产生、发射或接收射频信号的设备。包括天线座架以及电缆屏蔽层连接	保护设备免受雷击影响，适用于可能会承受雷击电流的设备
搭接要求	要求接地点低阻抗、低电压以防止因短路而引起的触电或着火危险。可以使用搭接条连接	要求在高频率时阻抗较低。直接连接最好，不建议使用搭接条，万不得已时才可以使用短而宽的搭接条连接	要求在适当的频率时阻抗较低。接地件要能够承受强电流而不产生电弧，若使用搭接条，其需要可承受强磁力
频率要求	低频	高频	高频
电流要求	大电流	小电流	大电流
注 1：低频搭接允许使用搭接条或跨接线； 注 2：高频搭接要求低电感，短的搭接条在某些情况下允许使用； 注 3：大电流搭接要求大的横截面积； 注 4：小电流搭接允许使用较小的搭接面积。			

15.7.2　应用指南

应用指南具体如下：

a）　对于永久性的搭接点应尽可能采用熔焊(放热焊)。熔焊应焊透，除保证搭接元件所需的机械强度外，还必需满足下列最低要求：

1）　最大尺寸在 5cm 以下的搭接件，熔焊应延伸到最大尺寸的整个侧边或表面。

2）　最大尺寸大于 5cm，但小于 30cm 的搭接件，至少应有 5cm 长的熔焊缝。

3）　最大尺寸大于 30cm 的搭接件，在横跨最大尺寸的表面上应以均匀的间隔提供 2 段或 2 段以上熔焊缝，每个焊缝的长度不小于 5cm。相邻熔焊缝之间的最大间隔不应超过 30cm。

4）　在对接接头上，厚度小于 6mm 的所有搭接件采用完全焊透的熔焊。当搭接件的厚度大于 6mm 时，熔焊深度不应小于 6mm。

5）　角焊缝的尺寸应等于搭接件的厚度或遵照建筑物结构钢的设计、加工和安装等结构规范的规定。

6）　厚度小于 6mm 的零件之间的搭接点，应双面焊。

b）　铜和黄铜间的永久搭接，采用硬钎焊，包括铜焊和银焊。

c）　在故障保护分系统或雷电防护分系统中的任何连接，都不应采用锡焊。

d）　所有结构的螺栓连接，应符合表 77 或表 E.1 力矩要求。

e）　螺栓连接装配的正确顺序表示在图 241 中。将负荷分配垫圈直接放在螺栓头下面或放在紧靠金属构件的螺母下面，在螺母和负荷分配垫圈之间可以放置齿形锁紧垫圈；在主搭接件之间不应放置齿形锁紧垫圈。但是，图 241 所示结构只是在内部安装、不受潮气影响、而且垫圈与连接部分的金属电化学相容时才可以使用。

f）　一经清除了配接表面的所有不导电杂质，则应尽快进行搭接。在腐蚀环境中如果 2h 以后才进行搭接，则应利用合适的涂覆层对清洗过的表面进行临时保护，搭接之前再将涂覆层除去。

g）　鳄鱼夹及其他弹簧夹仅在临时搭接时采用。使用这些夹子，主要是确保在对设备或设施接线进行维修的工作人员不会偶然暴露在危险电压下。

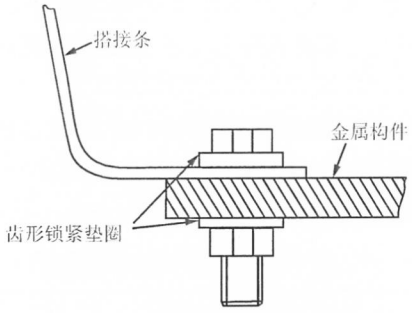


图 241　螺栓连接的组装顺序

15.7.3　表面准备

表面准备的要求如下：

a)　熔焊一般仅要求除去可能妨碍形成均匀熔焊缝的表面杂质。

b)　进行放热焊前应擦去或刷掉熔焊面上的污垢和其他残留物，并且在安置熔焊模具前应将水分烘干。

c)　需要铜焊或锡焊的表面，应清洗掉所有杂质及可能妨碍填充金属与主体零件结合的金属膜，并应加上合适的助焊剂。搭接完成之后，应清除多余的助焊剂或中和剂，以防日后腐蚀。

d)　螺栓连接和其他压力类型接头的配合表面，应按 10.6 规定仔细清洗，其基本要求是：

1)　应除去所有不导电的物质，包括油漆层和其他有机涂覆层、阳极氧化膜、氧化和硫化膜、以及油污和其他石油产品。

2)　应除去所有腐蚀剂，包括水、酸、强碱，以及任何其他能构成导电电解腐蚀通路的物质。

3)　应除去搭接表面上所有妨碍界面形成低电阻通路的固体物质以及可能形成楔块或夹层、使搭接区开裂进而导致腐蚀物质或媒剂渗入的固体物质。这些固体物质包括灰尘、污垢、沙粒、金属屑和腐蚀产物。

15.7.4　搭接头保护规程

15.7.4.1　概述

为了获得高可靠的搭接，应采用的防腐措施有：

a)　避免不相容金属配合；

b)　防止潮气或其他电解质进入搭接区域。

要直接接触的金属应尽可能选用电动势序相近的金属（见 10.8.1.3）。表 79 给出了一般金属的相容组别。当金属的结合面直接暴露在盐雾、雨水或其他液体中时，不同组别金属之间的腐蚀作用最严重。接头暴露得越少，腐蚀的程度越小。暴露的相对程度可以按下面给予定义：

a)　外露：指敞开、无保护地暴露在气候环境中；

b)　掩蔽：指有限地防止气候的直接作用，例如在通风的房屋、车棚和机动车内；

c)　室藏：指放置在不受气候影响的建筑物内。

表 79　普通金属的相容组合

组别	金属
I	镁
II	铝、铝合金、锌、镉
III	碳钢、铁、铅、锡、铅－锡焊料
IV	镍、铬、不锈钢
V	铜、银、金、铂、钛

在上述不同暴露条件下所使用的接头，应选用不同的金属组合完成，并按表 80 的规定对接头给予保护。条件 A 意味着在建立金属与金属的接触后，应对连接处施加一层保护层，使液体膜不能桥接连接处的两个零件。条件 B 是指接合表面的金属可裸露连接，但应对接头的其余部分给予合适的保护处理。条件 C 表示这种组合不能采用，除非在非常特殊的条件下，如只要求接头在短期内有效，或者设备通常为贮存状态，仅有短时期暴露。对于暴露在气候环境、腐蚀气体、或过量粉尘中的搭接头，应进行保护涂覆。表 81 列出了供选择的搭接零件防腐蚀方法。

表 80　搭接头防护的要求

暴露条件	阳极				阴极
	I	II	III	IV	
外露	A	A	–	–	II
掩蔽	A	A	–	–	
室藏	A	A	–	–	
外露	C	A	B	–	III
掩蔽	A	B	B	–	
室藏	A	B	B	–	
外露	C	A	B	B	IV
掩蔽	A	A	B	B	
室藏	A	B	B	B	
外露	C	C	C	A	V
掩蔽	A	A	A	B	
室藏	A	A	B	B	

表 81　搭接零件的表面防护涂覆层

搭接金属类型		表面处理要求
相容金属间	包层铝和耐腐蚀铝	清洗和脱氧
	不耐腐蚀的铝	在接头上的两个零件上采用能检验的有色涂覆层(Alodine 600, Iridite 14)，进行化学处理[63]
	钢(合金钢和碳钢)	镀锡[64]
	不锈钢	对机加工表面进行研磨或进行清洗(磷酸酸洗)[65]
	铜和铜合金	镀锡
不相容金属间	耐腐蚀铝与下列金属配合	耐腐蚀铝清洗和脱氧
	1)　不耐腐蚀的铝	采用能检验的有色涂覆层(Alodine 600，Iridite 14)进行化学处理
	2)　钢(合金和碳钢)	镀锡
	3)　铜和铜合金	镀锡
	4)　不锈钢	研磨或进行清洗(磷酸酸洗)
	不耐腐蚀铝与下列金属配合	不耐腐蚀铝采用能检验的有色涂覆层(Alodine 600，Iridite 14)进行化学处理
	1)　钢(合金钢和碳钢)	镀锡

表 81(续)

搭接金属类型		表面处理要求
不相容金属间	2) 铜和铜合金	镀锡
	3) 不锈钢	研磨或进行清洗(磷酸酸洗)
	钢(合金钢和碳钢)与下列金属配合	钢(合金钢和碳钢)镀锡
	1) 铜和铜合金	镀锡
	2) 不锈钢	研磨或进行清洗(磷酸酸洗)
	铜、铜合金与不锈钢配合	铜、铜合金零件镀锡；不锈钢研磨或清洗(磷酸酸洗)

15.7.4.2 搭接条紧固件

表 82 中给出了铝和铜搭接条搭接到结构物上时可接受的紧固件材料，表中金属是按电化腐蚀作用减弱的顺序排列的。由表可见，进行连接所采用的螺栓、螺母和垫圈是：

I 型——镀镉或镀锌的钢或铝；

II 型——钝化的不锈钢。

当表中列出两类紧固件时，从防腐蚀出发，应优先采用 II 类。

表 82 铝或铜搭接条与金属结构物的连接

结构物 (外层处理金属)	铝搭接条	螺栓类型	镀锡铜搭接条	螺栓类型
镁和镁合金	直接或镁垫圈	I	铝或镁垫圈	I
锌、镉、铝和铝合金	直接	I	铝垫圈	I
钢(不锈钢除外)	直接	I	直接	I
锡、铅、铅锡焊料	直接	I	直接	I 或 II
铜和铜合金	镀锡或镀镉垫圈	I 或 II	直接	I 或 II
镍和镍合金	镀锡或镀镉垫圈	I 或 II	直接	I 或 II
不锈钢	镀锡或镀镉垫圈	I 或 II	直接	I 或 II
银、金和贵金属	镀锡或镀镉垫圈	I 或 II	直接	I 或 II

15.7.5 典型搭接

15.7.5.1 电缆桥架

电缆桥架可用作整个系统搭接配置的一部分。每两段桥架之间按图 242 所示方法搭接，以便构成连续通路。桥架也可用宽的柔性实心搭接条连接到设备外壳上，如图 243 所示。

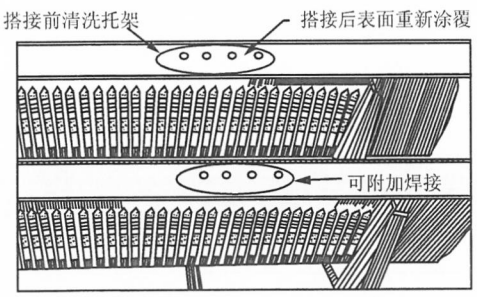


图 242 电缆桥架的搭接

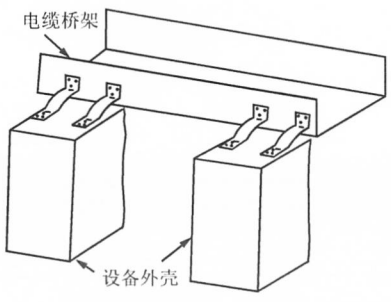


图 243 设备外壳与电缆桥架的搭接

15.7.5.2　敷设管道和导管

长跨度导管的两端和中间几个点应正确地搭接到结构物上。不能用普通夹箍搭接柔性导管，因为夹箍的压力会压缩或压陷这种导管。可采用一种带喇叭口的开槽衬套代替普通夹箍(图 244)套在软管的外面。这种衬套可在其整个面积上分散搭接夹箍的高压力，因此减小了对导管的压强。

图 245 为硬导管的搭接方法。无论采用哪一种类型的夹箍，都应对导管进行清洁处理，除掉夹持表面的油漆和杂质。在组装前应清除接触面上所有绝缘涂覆层，而且也不能把阳极氧化的螺钉、螺母和垫圈作为附加的接触零件。

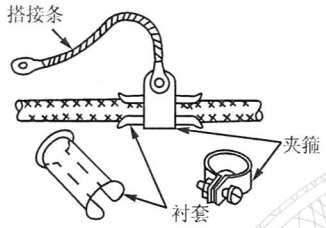


图 244　软电缆及导管的搭接图

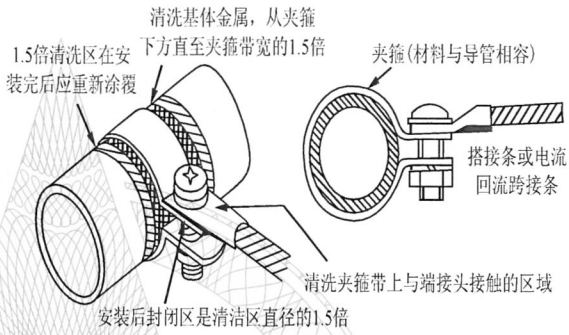


图 245　硬导管的搭接

15.7.5.3　其他搭接实例

图 246 给出了搭接条与扁平表面搭接的搭接方式及表面处理要求；图 247 给出了扁平裸露表面的螺栓搭接；图 248 给出了铆接或熔焊方式进行支架搭接的表面处理要求；图 249 给出用搭接条进行结构件间互连的方式；图 250 给出了结构件直接搭接的表面要求；图 251 给出了大地电极引线、结构柱与设施地的搭接方式。

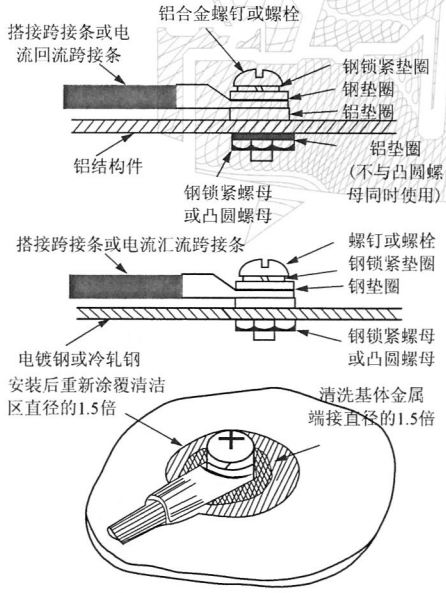


图 246　搭接条与扁平表面的搭接

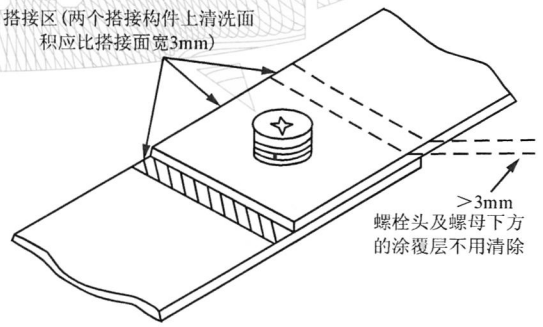


图 247　扁平裸露表面的螺栓搭接

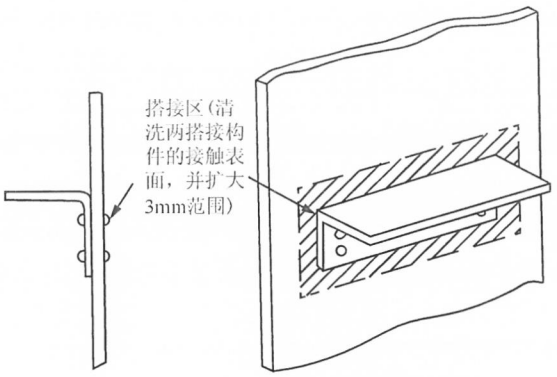


图 248　支架的安装(铆接或熔焊)

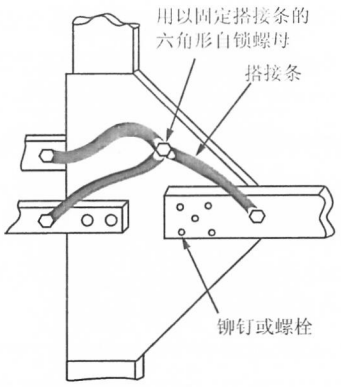


图 249　搭接条用于结构件互连

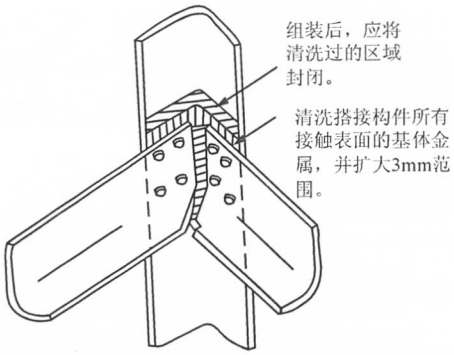


图 250　结构件的直接搭接

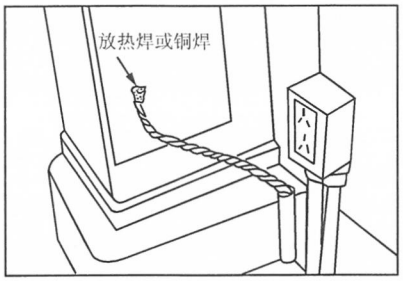


图 251　大地电极引线与结构柱的搭接

15.8　屏蔽

15.8.1　概述

对某一设施所提供的屏蔽应足以对设备和人员提供所需要的防护，但是不必超过特定设施的防护要求。为了确定设施的屏蔽要求，首先应勘测规划地点的电磁环境，然后将这种有害环境与待装放在该环境中的设备的响应特性和敏感度相比较。如果需要屏蔽，那么既可由设施部分提供屏蔽，也可以提高设备自身的屏蔽能力，最后应根据已知的(或估算的)屏蔽要求及提供这种屏蔽所需要的费用综合考虑。对于电子设备，不管是传导还是辐射的发射和敏感度，都应满足 GJB 151B－2013 的要求。

15.8.2　要求的确定

根据待装设备或系统的要求，确定设施的屏蔽时需完成如下工作：

a)　在设施地点进行电磁环境勘测(见11.12.3)，进行这种勘测需要专用仪器、周密的设备校准程序以及校准过的天线，并应由有经验的人员来完成；

b)　查阅类似设备以往在其他类似电磁环境中的性能；

c)　考虑已测得的待装设备的电磁干扰特性。

如果手头有电磁环境敏感度数据(对设备产生干扰的入射场电平)，以入射的信号场强(计量单位是 dBμV/m)减去设备敏感度电平(单位为 dBμV/m)就可确定所需的附加屏蔽量。当测得的信号场强大于敏感度电平时，应增加额外的屏蔽。它可以利用设备结构物或建筑物的布局提供，也可以通过设备的加固改进提供(见 17.4)。如果没有敏感度数据，则可根据以往其他场地相似设备性能，对需要的屏蔽量做出最佳的估量。

在决定需要补充什么类型和多少屏蔽材料之前，先估算常规建筑材料和工程所能提供的固有屏蔽量，例如：

a) 利用图 252 和图 253 估算普通结构(外墙为钢筋骨架和水泥、砖墙，内墙为标准木结构、石膏板或水泥板)所提供的屏蔽效能[66]；

b) 由于存在钢筋，所以加固用的水泥板能提供附加的屏蔽；利用 11.7.3 中图 140 所给出的曲线，可估算单层钢筋对低频磁场的屏蔽效能；当建筑物中钢筋的尺寸和间距与图 140 不同时，可利用表 83 所列屏蔽效能修正系数[49]；

c) 利用图 254 确定钢筋(及其他导线网眼或格栅)对高频电场或平面波的屏蔽效能[67]；为了利用该图，首先应计算导线(或钢筋)直径 d 与导线间距 a 的比值，然后确定在重要频率点 f(单位为 Hz)处 a 与波长 λ 之比。

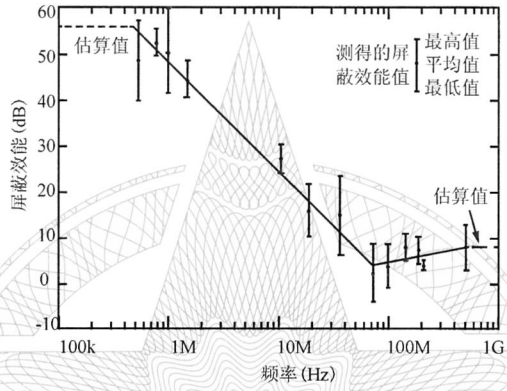


图 252　在典型建筑物外墙内侧 1.9m 处测得的电磁屏蔽效能

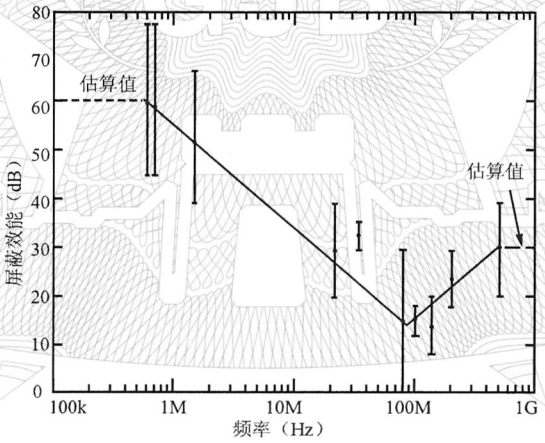


图 253　在典型建筑物外墙内侧 13.7m 处测得的电磁屏蔽效能

表 83　加强钢筋的屏蔽效能修正系数

钢筋直径 mm	钢筋间距 mm	钢筋层数	修正系数 dB
57	305	单	+5
43	356	单	0
25	457	单	−6
57	508	双	+8.5
43	356	双	+13
25	406	双	+5

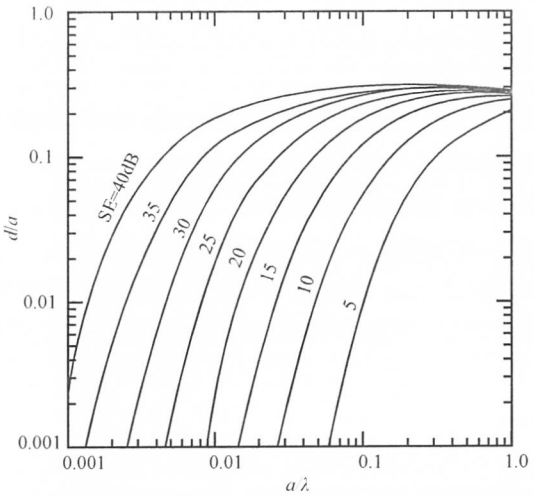


图 254　格栅屏蔽效能与导线直径、导线间距及波长的关系

例如，对于直径 2.6mm 导线制成的 25mm×50mm 格栅，在 100MHz 时的屏蔽效能计算步骤如下：

a) 计算波长 $\lambda = \dfrac{3\times10^8}{1\times10^8} = 3\text{m} = 3000\text{mm}$；

b) 计算频点 f 处导线间距 a 与波长 λ 的比值，根据入射波的极化方向选取相应的比值；

c) $\left.\dfrac{a}{\lambda}\right|_{a=25} = \dfrac{25}{3000} \approx 0.0083$ 或 $\left.\dfrac{a}{\lambda}\right|_{a=50} = \dfrac{50}{3000} \approx 0.017$；

d) 计算直径 d 与导线间距 a 的比值，根据入射波的极化方向选取相应的比值。

$\left.\dfrac{d}{a}\right|_{a=25} = \dfrac{2.6}{25} \approx 0.1$ 或 $\left.\dfrac{d}{a}\right|_{a=50} = \dfrac{2.6}{50} \approx 0.05$；

e) 根据图 254，屏蔽效能(SE)(取决于场的极化)为：

$SE|_{a=25} = 35\text{dB}$ 或 $SE|_{a=50} = 25\text{dB}$；

f) 设计采用较小的屏蔽效能(25dB)；

g) 如果上述计算或估算表明需要附加屏蔽，则应将屏蔽列入结构设计，并且在施工阶段一次性地安排屏蔽施工，这样最为经济。

15.8.3　设计指南

设计指南具体如下：

a) 设计符合系统需要的屏蔽，比较容易实现的办法是屏蔽单个设备，而不是屏蔽整个房间或整个结构物。

b) 确保提供的屏蔽足以满足系统需求(包括已知的和预计的)，但设计裕量不能过大。

c) 最大程度地利用结构物固有屏蔽，如利用钢筋混凝土提供的少量屏蔽(一般为 10dB～20dB)。但是，不应企望由常规建筑材料(如砖、水泥、木头、玻璃纤维或塑料)对电磁信号提供任何显著的屏蔽。

d) 根据设备工作要求所允许的条件，将最敏感和最关键的设备放置在结构物中心附近。

e) 为了降低屏蔽要求，预先确定各类潜在干扰源(如配电站、机动发电机以及射频发射机)的位置；增大这些干扰源与潜在敏感设备或系统之间的间隔。

f) 在选择掩蔽物或结构物的外层材料时，例如备选材料有玻璃纤维与钢板和铝板时，应优先选用有利于改善屏蔽特性的金属。为了利用金属板形成有效的屏蔽，接缝应电气连续。

g) 应确保在信号电缆、电源导线、公用事业管道和接地线入口处的屏蔽连续性。

h) 窗口、门洞、以及通风孔，一定要与墙壁同时屏蔽。窗户采用良好搭接的屏蔽网，门洞安装金属门，通风孔上覆盖蜂窝通风窗或合适的屏蔽网。

i) 给屏蔽区域的所有电源线装上电源滤波器。

j) 优先采用钢导管而不用铝导管，以利于提高磁屏蔽性能。

k) 优先采用密封的金属敷线管道或线槽，而不用带孔隙的网套或管道。

l) 如屏蔽目的仅仅是防止人体无意触及直流和电源频率的危害电压，可考虑采用不导电的遮蔽体，这些遮蔽体可能是比较便宜的。如果采用金属屏蔽提供电击防护，应将其仔细地接到电源安全接地点。

15.8.4 材料选择

可以根据下面程序之一来选择屏蔽材料：

a) 选择已知厚度的屏蔽金属材料，然后确定其屏蔽效能是否等于或大于所希望的电磁衰减量；

b) 由希望的衰减量确定所需要的金属板厚度或格栅类型。

利用前一程序的具体步骤如下：

a) 为选择屏蔽类型和材料，首先应判定干扰场的性质，确定它是电场、磁场还是平面波。干扰源到屏蔽体之间的距离与信号波长的比值决定了入射场的阻抗特性。注意：干扰源可能是实际信号发生器，如发射机之类；也可能是载流导体，如电源线或信号电缆。

由式(203)计算入射信号的波长λ：

$$\lambda=\frac{3\times10^{8}}{f} \quad \cdots\cdots (203)$$

式中：

f——入射场频率，Hz。

假设已知干扰源的位置，可测量或估算到干扰源的距离r，然后计算$2\pi r/\lambda$。

1) $(2\pi r/\lambda)<1$，则入射场将是高阻抗电场，或低阻抗磁场。为此应确定产生场的干扰源类型。高阻抗源和小电流源为电场源，例如，高压直流电源、静电放电、单极子短天线等。通常低阻抗、大电流源为磁场源，典型磁场源是环形天线和电源线。

2) $(2\pi r/\lambda)>1$，入射场是平面波。

b) 然后，利用图 255 得出材料的吸收损耗[68]。该图使用方法为：在右边垂直刻度线选定相应金属，再在厚度刻度线选定材料厚度。根据上述两点画一直线，与从左到右的第四条轴线相交得第三点。最后，在该点和最左边刻度线上相应的频率点之间连一直线，得到吸收损耗。图中示例频率为 1kHz，材料为 0.4mm 厚的不锈钢。首先在右边刻度的“不锈钢”，和厚度刻度上“0.4mm”之间连出直线 1；然后，在左边刻度线上“1kHz”和交点 P 之间画直线 2，得出吸收损耗约为 3dB。对于右边刻度线上没标出的金属，可由表 84 查得该金属的相对导电率σ_{r}和相对磁导率μ_{r}，再根据σ_{r}与μ_{r}的乘积在最右边直线上找出对应的位置。当给定频率和希望的吸收损耗时，可以利用图 255 确定所需要的金属种类和厚度。

表 84　常用金属的相对电导率和相对磁导率

金属	相对电导率σ_r	相对磁导率μ_r		成分
		起始值	最大值	
铝铁合金	0.011	3450	116000	－
铍	0.377	1	－	－
黄铜	0.442	1	－	铜 66%，锌 34%
镉	0.230	1	－	－
耐热合金	0.017	－	－	铬 15%，镍 35%，铁 50%
铬	0.663	1	－	－
钴	0.117	70	250	－
镍	0.250	110	600	－
镍铜	0.039	－	－	铜 55%，镍 45%
铜	1.000	1	－	工业用退火铜
金	0.707	1	－	－
海姆 80(HyMn80)	0.030	20000	100000	镍 80%，铁 20%
纯铁	0.178	25000	350000	退火
铸铁	0.057	100	600	－
柯伐合金	0.006	－	－	镍 29%，铁 53.7%，钴 17%，锰 0.3%
铅	0.079	1	－	－
镁	0.387	1	－	－
锰铜	0.039	－	－	铜 84%，锰 12%，镍 4%
锰铁	0.41	－	－	镍 67%，铜 30%，铁 1.4%，锰 1%
μ－合金	0.034～0.069	20000	100000	镍 71%～78%，铜 4.3%～6%，铬、球铁 0%～2%
银镍合金	0.062	－	－	铜 64%，锌 18%，镍 8%
钯	0.160	1	－	－
坡莫合金	0.038	2500	25000	镍 45%，铁 55%
铁钴磁合金	0.066	800	4500	钴 50%，钒、球铁 1%～2%
铂	0.164	1	－	－
铑	0.338	1	－	－
镍铬硅铁磁合金	0.019	1000	5000	镍 36%，铁 64%
银	1.064	1	－	－
钢	0.078～0.133	50	100	0.4%～0.5%，碳，球铁
锰钢	0.025	－	－	锰 13%，碳 1%，铁 86%
硅钢	0.034	500	7000	硅 4%，铁(热轧)96%
不锈钢	0.019	－	－	碳 0.1%，铬 18%，镍 8%，铁 73.9%
超坡莫合金	0.029	100000	1000000	镍 79%，钼 5%，铁 16%
锡	0.151	1	－	－
钛	0.036	1	－	－
钨	0.315	1	－	－
锌	0.287	1	－	－

c) 利用图 256 确定磁场的反射损耗，利用图 257 确定电场的反射损耗，方法与上述确定吸收损耗的方法相同[16]。用图 258 确定平面波的反射损耗[68]。注意，图中右边的刻度是相对电导率与相对磁导率之比。在右边金属刻度线（σ_r/μ_r）和左边频率刻度线上相应两点之间连一直线；就可在中间的刻度线得出反射损耗的值。总的屏蔽效能是吸收损耗和反射损耗的和。低吸收损耗的薄壁屏蔽层可能出现多次反射，从而导致对屏蔽效能的错误估算。如果吸收损耗小于 10dB，应考虑多次反射修正项，方法见 11.3.4。

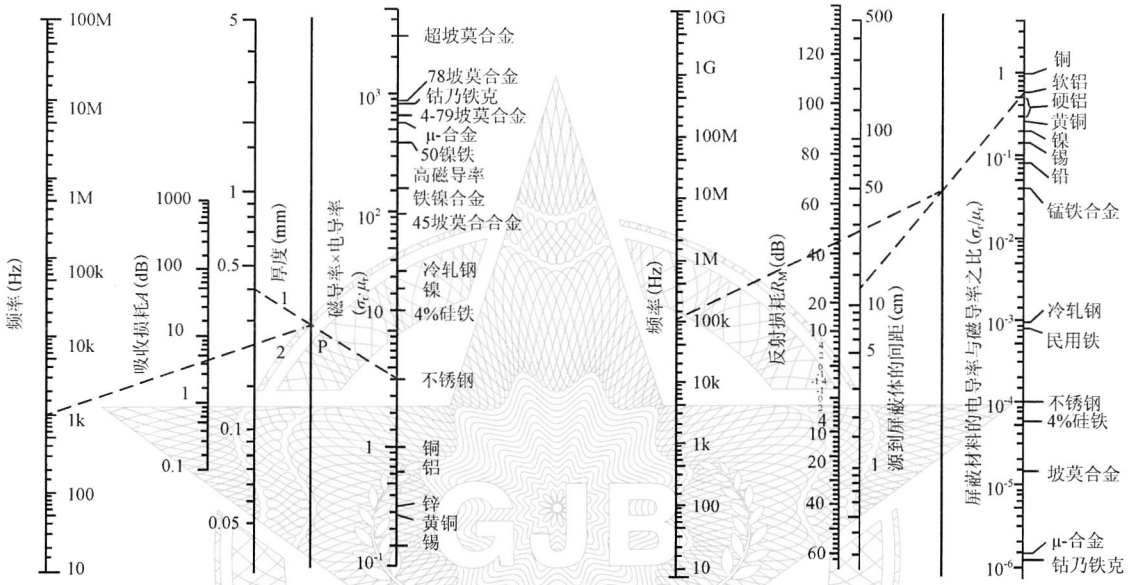


图 255　屏蔽吸收损耗

图 256　磁场反射损耗

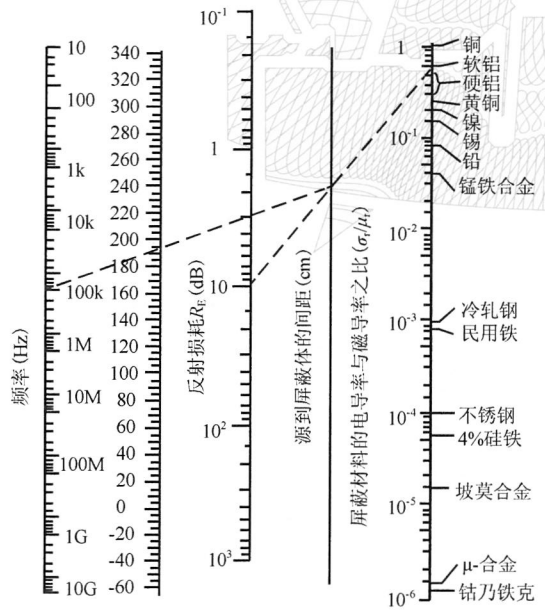


图 257　电场反射损耗

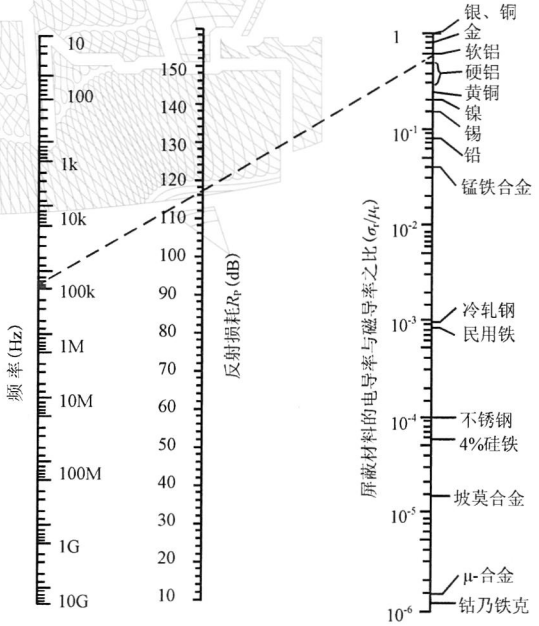


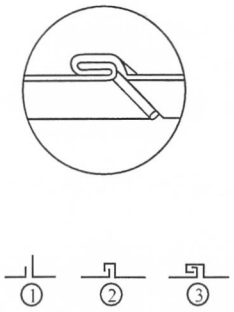
图 258　平面波反射损耗

15.8.5　施工导则

施工导则具体如下：

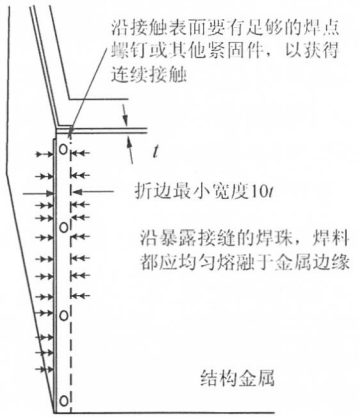
a) 将全部金属屏蔽体可靠接地。

b) 所有缝隙和接头应搭接良好。对于应提供高的射频屏蔽效能(≥80dB)或预定用于电磁脉冲防护的壳体应采用熔焊。如果不能熔焊应采用锡焊或金属编织层制成的密封衬垫，以加强机械紧固(见 11.5.3)。图 259 和图 260 给出了屏蔽体中两种推荐的焊缝结构。



注：为获得最佳防护性能应对接缝进行钎焊或熔焊。

图 259　永久搭接缝的形成图



注：→→表示边角焊缝上的焊珠。

图 260　良好的拐角缝设计

c) 尽可能限制开口(窗、门、通风口)和贯通孔(信号线、电源线、公用事业管道)的数量和尺寸：

1) 如果屏蔽体应有贯通孔洞，应按 11.4.3 确定其最佳尺寸和间距。

2) 尽可能利用蜂窝窗(见 11.5.4.2)作通风口的屏蔽。当通过装有蜂窝窗或屏蔽网的屏蔽口进行强制通风时，可用图 261 的曲线预测压降。为使屏蔽孔通过的空气量与非屏蔽孔相同，一般需要较大的鼓风机。

d) 将金属公用事业管道沿整个圆周搭接到屏蔽体的入口板。也可以将非金属管道贯穿截止波导管(见 11.5.4.2)作为水、气、压缩空气等的出入口。

e) 利用金属丝网或导电玻璃(见 11.5.4.3)覆盖观察孔口。应确保将金属丝网或导电玻璃完整地搭接到开口周围的壳体上。

f) 门应是金属的，门缝应与周围紧密均匀的接触，可安装金属丝编织层、导电衬垫或梳状簧片。

g) 对于高要求的大屏蔽室，可采用截止波导通风窗。

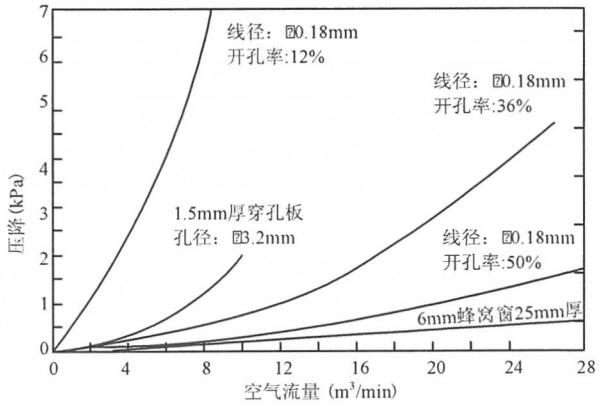


图 261　不同材料用于屏蔽通风孔洞时的压降

15.9 共模噪声抑制和仪表安装

15.9.1 概述

在设施的设计和施工阶段可采取以下措施减少仪表、设备和系统中的共模噪声。下面推荐的措施适用于一般的干扰控制，并不局限于共模噪声的抑制。

15.9.2 设计实施

设计实施要求如下：

a) 敏感的数据和仪表设施应尽可能远离高压(60kV 以上)输电线。

b) 数据线和信号线应与供电线正交敷设。当只能平行敷设时，两者应保持最大距离。在许多情况下，数据电缆和信号电缆需要在铁管中布置。

c) 如果可能，设施的配电馈线应与高压电源线正交布线。无论哪种布线，应避免配电馈线和供电线之间长距离平行敷设。

d) 需要架空配电线时，应优先采用预组装架空电缆而不用相互独立的导线。因为预组装的架空电缆是绞合线，周围的磁场大大减小。

e) 在敏感的试验和测量设施附近，传输电流大于 5A 的所有内部配电电源线应是绞合的。建议的绞合率为：约绝缘电源线直径 25 倍长度作一次完整的绞合。

f) 电源线应尽可能封装在金属管道内。按优选顺序，推荐封装的类型有以下几种：

1) 管道：从减少噪声的观点出发，对电源线而言，刚性钢导管是最有效的封装材料，只要实际可行就应采用，电气金属管以及铝导管和铜导管都能提供有效的静电屏蔽，但它们的磁屏蔽效能比刚性钢导管至少低一个数量级。

2) 电缆铠装：有时采用铠装电缆取代导管和相互绝缘导线的组合，铠装能提供有效的静电屏蔽，但对磁屏蔽不如刚性钢导管那样有效；所以，钢质铠装优于铝质或青铜的铠装。

3) 柔性导管：由于结构限制，与上述两种封装相比，柔性导管的静电屏蔽效能较差，而且磁屏蔽也比刚性钢导管差；只有在长度较短，或者要求减振、所用设备及装置的位置需要调整的场合，才推荐采用柔性导管。

4) 线槽或电缆桥架：线槽是金属薄板结构的矩形管道；线槽和电缆桥架对静电屏蔽或磁屏蔽的效能比刚性钢导管差得多。除非导线槽或电缆桥架是由铁质金属制成，而且已将所有不连续处良好搭接，否则在电源线屏蔽方面的应用受限。

g) 电力设备，如变压器、调压器、电动机、发动机及开关装置等，应尽可能远离数据系统的设备和导线。设施的建筑布局应使上述装置和数据系统之间有最大距离。这一要求也适用于带有电动机和大电流开关装置的加热、通风和空调设备。最大距离将受到系统中设备馈电线上允许压降的限制。

h) 尽可能采用无滑环或整流子的鼠笼式感应电动机。

i) 应采用带整流子的电动机时，应通过正确的设计来减少电弧。为降低整流子或滑环上的电弧，应进行精心的机械设计，例如采用同心度高的大尺寸轴和轴承，以减少电刷的跳动和振动。

15.9.3 仪表安装

当传感器及其数据处理装置需作为设施整体的一部分安装时，仪表系统的设计和安装不能影响其他低频系统所使用的单点信号接地网络。特别是在几个系统之间的接口上，应认真对待，以确保维持每一个系统接地的完整性。

试验设备的交流电源与被测设备或系统的电源可从同一供电支路中引出。如果这一接法影响系统可靠性，应在试验设备电源插座上装配小电流断路器或熔断器。如果试验设备的电源插座不能连接到主要设备的馈电支路上，则试验设备供电支路只能供试验设备使用。尤其是不应把旋转式机械、工业机械、

电动工具、办公机械以及其他任何无电磁干扰抑制措施的设备连接到该支路上。

15.10 高空电磁脉冲防护

15.10.1 概述

高空电磁脉冲防护的基本方法为：屏蔽、滤波、瞬态防护以及接地和搭接。具体包括：在设备、设施的周围和/或内部设计安装屏蔽体；将所有外部电缆布置在黑色金属导管内，在电源线、信号线和控制线上安装快速响应的浪涌抑制器；在电源、信号和控制线缆上安装使用电磁干扰滤波器，将滤波器外壳、屏蔽体、线缆的屏蔽层和浪涌抑制器端接至大地，为脉冲提供低阻抗通路。

15.10.2 接大地

优先采用辐射状、即星形配置的大地电极分系统而不用其他类型，因为这类大地电极分系统的瞬态阻抗较低(见 5.6.3)。当除常规的信号和安全防护之外还应提供电磁脉冲防护时，可以在常规的大地电极分系统上附加辐射状电极。

在外部引线或导体入口处，凡安装有过压浪涌保护器的位置，都应设置一个低瞬态阻抗的辐射状电极。上述位置的例子之一是市电电力线进入第一个降压变压器的位置。其他的例子如：当外部导体进入屏蔽体时，在屏蔽体上安装浪涌保护器的位置也应安装低瞬态阻抗电极。

管子或导管应接到大地电极分系统上，以免接地电流进入结构物。另外，在第一个供电断路装置上的交流中线只能一点接到大地电极分系统，以防止环路电流损坏变压器。

15.10.3 对电磁脉冲的屏蔽

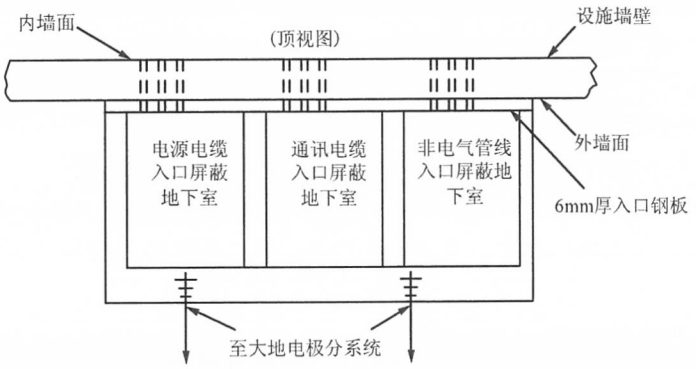
对于电磁脉冲的屏蔽：

a) 优先对整个建筑物进行屏蔽，只有当常规的防护方法不能把电磁脉冲降低至可接受的电平而需要进一步的屏蔽，或改造现有结构对整个建筑物进行防护价格过高时，才采用屏蔽单个房间或局部区域的办法对关键设备提供附加防护。

b) 对小房间可以采用螺栓拼装的商品化屏蔽室。但是，对于大型结构，优先采用连续熔焊的钢板屏蔽室。

c) 电气布线和元件，应利用诸如铁导管、射频屏蔽线槽或电缆铠装之类的屏蔽体作防护处理，以防止电磁脉冲场的危害。电子元件亦可用薄钢板壳体作屏蔽。

d) 设施屏蔽体上所有金属贯通应集中布置，如图 262 所示。所有屏蔽电缆、导管和管子应在一个入口金属板上接地，如图 263 所示。该金属板应足够大，以保证在最邻近的 0.3m 区域内不再有其他贯通孔。应将入口金属板的周围连续地熔焊至建筑物上。导管应为钢管，并带有螺纹或熔焊连接头。导管的敷设应尽可能短，而且中间接头应最少。对于那些不在建筑物入口板上进入建筑物的电缆，也应按照 15.3.3.5.26 所述的程序对其提供瞬态防护。



注 1：进入入口屏蔽室的通口至少在地面 1m 以下；

注 2：终端保护装置(TPD)装在入口屏蔽室内；

注 3：接线架引出的走线管应贯通 6mm 入口钢板，并将其周边一圈与入口钢板搭接。

图 262　典型的外部贯通集中布置

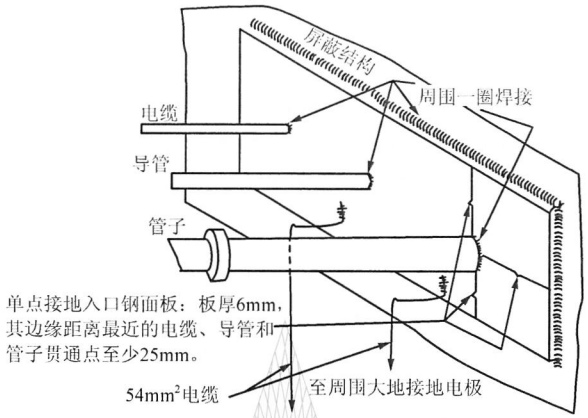


图 263　刚性电缆、导管及管子的贯通入口板

15.10.4　防电磁脉冲的搭接实施

对于防电磁脉冲的搭接实施：

a）　凡有可能，都应采用熔焊，因为熔焊能防止电磁脉冲信号穿透，可提供最佳的防护。

b）　当采用螺栓作为紧固件时，螺栓所连接结构体不能进行熔焊或硬钎焊，以免屏蔽壁变形影响配合。螺母和垫圈应放在屏蔽区域的内侧，这样它们就不致暴露在入射场中。在电磁脉冲加固确认试验过程中应定期检查螺母的压紧程度。

c）　应将管子、导管和连接器外壳四周连续地熔焊或硬钎焊到屏蔽体区的贯通点上。用于接地的导体不应贯通任何屏蔽电磁脉冲的屏蔽体，如屏蔽室和防电磁脉冲的地下室，但应与焊接在屏蔽体上的接地螺栓搭接。

d）　非直接搭接的跨接带应尽可能宽而短，以减少电磁脉冲感应电流通路的电感。

15.10.5　结构指南

下面列出对降低电磁脉冲干扰及仪器损伤行之有效的附加结构措施：

a）　采用内部发电机隔离外部电源干扰，并在线路上安装浪涌抑制器；

b）　将所有外部导线置于连续的、正确接地的黑色金属导管内；

c）　进入屏蔽区的空调管道口上所采用的屏蔽网应与屏蔽壁可靠搭接；

d）　将混凝土中的加强钢筋与结构物的屏蔽系统及接地系统互连；

e）　在电站变压器上采用浪涌抑制器；

f）　为所有浪涌抑制器配置低阻抗接地引线；

g）　将电缆外屏蔽层接地，并确保该屏蔽层在整个长度内是连续密封的；

h）　将外带黑色金属导管的电源电缆和信号电缆埋设在经济可行的深度(大于 0.9m)，以减少电缆上感应的浪涌电流，并使电缆上感应的波前上升沿变缓；

i）　所有暴露在外界环境中的天线和其他电线都应安装瞬态防护装置；

j）　对工作人员进行正确的防护方法培训，例如，不应将外部插头上的延长线引进屏蔽区域；

k）　将所有诸如升降机械的缆索、金属通风管道以及贮存机柜之类的非带电导体搭接在一起并接地；

l）　所有导管贯通口四周都应搭接到屏蔽体；

m）　把多根导管固定在一起时，不应采用非导电的润滑剂；

n）　在导管贯通电磁脉冲屏蔽层的部位，应对导管四周作低阻抗的熔焊；

o）　当外壳盖紧时，盖子四周应与盒体接触；

p）　应在充油的变压器及其他高压装置上采用足够的浪涌防护以防止爆炸，或者在屏蔽壳体内采用

干式变压器；

q） 对应急电源设备提供足够的浪涌防护；

r） 不能以保险丝或电路熔断器作为电磁脉冲的防护装置；

s） 优先采用自动启闭的门，而不是手动启动的门；

t） 在三相电源系统内，中线、每一根相线上都应设置浪涌保护器；

u） 在信号、控制和电话线路上采用无源 L－C 低通射频干扰滤波器；

v） 鉴于屏蔽结构物角上的电磁场通常比结构物其他部位的强，所以不应把对电磁脉冲敏感的设备布置在拐角处。

15.11 军用移动设施

15.11.1 战术接地通用要求

15.11.1.1 设施接地系统

15.11.1.1.1 概述

设施接地系统是通过配置大地电极，将连接各分系统的所有金属单元接到大地。设施接地系统可为任何设备、分系统提供公共的基准电位，并使整个系统保持地电位。下面介绍的四种接地分系统组成设施的接地系统，它们是任何电气或电子设备、分系统和系统在设计和安装过程中都应当处理的接地问题。虽然不可能有一套固定的规则来指导所有电气或电子设备及系统中的各种接地配置，但这里提出的原则可指导具体的战术接地系统的安装。

15.11.1.1.2 大地接地系统

15.11.1.1.2.1 概述

一个良好的、基本的大地接地系统，即大地电极分系统，是为其余三种接地（即雷电或电磁脉冲防护接地、信号接地、以及故障保护接地）分系统提供接地点的基本网络。理想的大地接地系统可为系统中所有区域提供公共电位参考点，以消除不希望的电压和电流。

15.11.1.1.2.2 大地电极分系统的一般要求

大地电极分系统是由接地棒、板、钢筋或格栅等通过电气互连而组成的一种网络，以建立与大地的低电阻接触。作为设计目标，大地电极分系统对大地的直流电阻不应超过 10Ω。

15.11.1.1.2.3 大地电极分系统的类型

大地电极分系统按下列两类设施配置：

a） 场地固定的设施　为固定设施或半永久性建筑物及结构物配置的大地电极分系统，其说明见 15.2 和 15.4。

b） 战术设施　战术用大地电极分系统可连接到现有的低电阻埋地设施上（如可能），或者连接到打入的接地棒或接地棒阵上。总的接地电阻受土壤类型、接地棒与土壤之间的接触电阻以及连接件电阻的影响。

15.11.1.1.2.4 土壤电阻

大地电极分系统能否获得低接地电阻，基本上受其埋设位置土壤电阻率的制约。土壤电阻率（单位Ω·m）是一立方体均匀土壤的电阻。土壤温度和湿度也是影响接地电阻的因素。接地电阻随土壤温度成反比例变化，但稍高于 0℃时，接地电阻仅发生轻微变化。随着湿度的变化，土壤电阻率将在很宽范围内发生变化。关于土壤电阻率的其他资料见 5.3、15.2.3 和 15.2.4。

15.11.1.1.2.5 接地棒电阻

接地棒电阻与接地棒打入大地的深度有关。理论上，垂直打入土壤的单根接地棒的接地电阻R由式（204）给出：

$$R=\frac{\rho}{2\pi l}\ln\frac{4l}{d} \qquad (204)$$

式中：

ρ——土壤电阻率，Ω·m；

l——接地棒长度，m；

d——接地棒直径，m。

图 264 说明了接地棒的长度对总接地电阻测量值的影响。

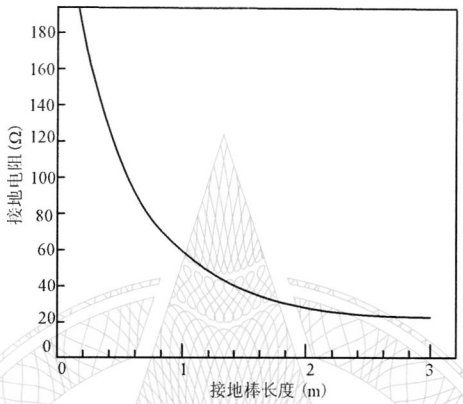


图 264　棒长对接地电阻的影响

15.11.1.1.2.6　接地壳层电阻

在打入大地的接地棒中注入电流时，其周围就会形成假想的接地壳层，这种由接地棒向外延伸的同心接地壳层与大地对所流过电流的电阻有关。越靠近接地棒，壳层的横截面越小，呈现的电阻增量越大。对地总电阻中，大约有 90%的对地电阻出现在电极周围平均以 2 倍棒长为半径的范围内。

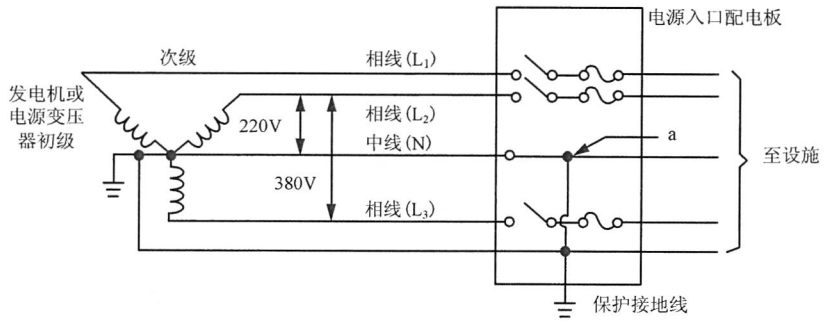
15.11.1.1.3　电源接地

15.11.1.1.3.1　概述

战术部署用的设备和系统，其电源供给可有下列三种来源：移动式交流发电机、就近的民用交流电，以及供给直流功率的电池。在掩蔽体内第一个供电断路装置的负载侧，交流中线总是悬浮的，新系统中优先选用 15.11.1.1.3.2 所介绍的三相五线制。如果单个电源(变压器或发电机)应给多个掩蔽体供电，或者出现交流声，则中线导体只能在该电源处一点接地。

15.11.1.1.3.2　三相配电系统

在图 265 中说明了三相 Y 型系统的接地点。五线制交流电源的接地，要求把中线或接地导体接在电源(发电机或变压器)上，并接在第一个供电断路装置或电源进线配电板的电源侧。安全地线也应在第一个断路装置和变压器处接大地。



[a] 当一个变压器同时供应几个建筑物用电，或在线上出现有害电流、噪声或干扰时，该接地点拆除。

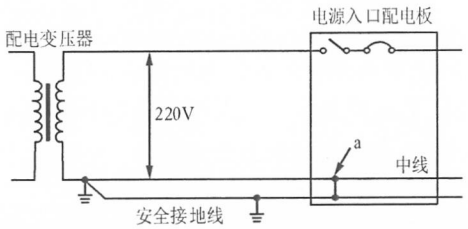
图 265　三相五线 Y 形配电系统的接地

15.11.1.1.3.3　单相电源配电系统

民用电源是单相 220V。单相三线制电源系统的电源中线首先应在变压器次级接地，同时还应在第一个供电断路器处接地。图 266 给出了一种单相三线制电源系统的接地连接方法。

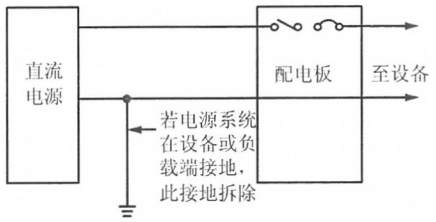
15.11.1.1.3.4　直流电源系统(二线制)

二线制直流电源发电机只可将正极或负极导线的一端接地，而且最好在源端。中线(接地导体)不应在电源引入板上接地。图 267 表示了 28V 直流电源系统的接地连接。三线直流电源接地，要求只在该电源(发电机或变压器)处将中线(接地导体)连接到大地接地电极。



[a] 当一个变压器同时供应几个建筑物用电，或在线上出现有害电流、噪声或干扰时，该接地点拆除。

图 266　单相三线制电源系统的接地



注：每个直流电源系统只能在源端或负载端中选一侧接地，不能两端都接地。

图 267　直流 28V 二线制电源的接地

15.11.1.1.4　雷电和 HEMP 防护分系统

15.11.1.1.4.1　概述

在雷电和 HEMP 接地系统中，降低大地接地电阻至关重要。对于雷电防护分系统，低对地电阻是必不可少的，因为它可减少由大地与邻近设备或掩蔽体之间的电位差所引起的电弧，也可减小雷电向大地放电时在入地点附近所形成的跨步电压和电压梯度。有关资料见 5.8.1.4 和 6.6.3.5。在战术环境中是否需要雷电防护，由该地区雷电发生的频次和强度，以及待保护结构物的类型确定。雷电防护分系统引下线到大地电极分系统的搭接点，应远离信号参考分系统和故障保护分系统的搭接点。防止雷电危害的两种通用保护方法是采用接闪器和浪涌保护装置。

15.11.1.1.4.2　接闪器

为了保护掩蔽体免受雷击引起的危害，应配置接闪器，以便在雷电击中结构物之前把它截获。接闪器的机械强度和电气传导性能应足以承受雷击，它和大地电极分系统之间应建立低阻抗通路(电缆)。大地电极分系统的电阻应当小于 10Ω。15.3.2.2 给出了接闪器系统设计施工的详细资料。

15.11.1.1.4.3　终端保护装置

终端保护装置和电磁屏蔽体对雷电和电磁脉冲提供附加的防护(见 15.3.3.5.12)。终端保护装置是安装在电源线、信号和控制电缆等暴露线路上的快速响应保护器件。终端保护装置的引线应尽可能短。为使外来脉冲旁路到地，终端保护装置应当安装在线路上，典型安装位置是在信号线和电源线引入掩蔽体壁板的信号入口板上。常用的终端保护装置有 MOV、充气火花隙、气体放电管以及电磁干扰滤波器。保护系统免遭雷电闪击的浪涌抑制器也可对某些其他类型的电磁脉冲提供防护，但这种浪涌抑制器的响应速度应足够快(见 13.4.3.3)。

15.11.1.1.5　信号参考分系统

在信号参考分系统中，信号线的接地方法随工作频率而定。低频电路(30kHz 以下)应进行单点接地，高频电路(高于 30kHz)应采用等电位接地平面。对于金属车箱或掩蔽体，等电位接地平面可以是屏蔽壳体外皮，所有设备的外壳和机箱应用最短、最直的连线搭接到等电位接地平面上。在固定场地中应按照 15.5.1 的规定安装等电位接地平面。若高频电路和低频电路同时存在，应采用高频信号接地方法。所有数字电路都看作是高频的信号电路。对多掩蔽体配置，信号参考分系统只能搭接到公共大地电极分系统上，以减少掩蔽体间信号电缆上的干扰。

15.11.1.1.6　故障保护分系统

设计的故障保护分系统接地线只是在设备或系统失效时才传输电流，故障保护分系统包括设备架、机柜、导管、接线箱、电缆槽、管道以及其他通常非载流的金属构件。对于掩蔽体内的设备，故障保护分系统应经过电源引入板接到大地电极分系统。应注意，信号参考分系统和故障保护分系统不能搭接到大地电极分系统的同一点。

15.11.1.2　在战术环境中接地电阻的测量

应利用电位降法测量大地电极分系统对大地的电阻(见 5.7.2)。如果战术情况下不允许采用这种方法，可采用三点测量法(见 5.7.4)。

15.11.1.3　在战术环境中降低接地电阻

15.11.1.3.1　概述

战术设备和系统的接地，可考虑下面三种基本方法：利用现有的、永久性设施的大地电极分系统；利用新设置的大地电极、接地棒或接地棒阵；利用天线地网(包括辐射状接地电极)。下面分别介绍这些方法中减小接地电阻的具体措施。

15.11.1.3.2　现有接地设施

只要可行，大地电极分系统的安装可利用现有设施的水管、水井井筒、下水管道以及其他深埋并与大地接触的金属件，以发挥它们的低电阻特性。在使用之前应对上述设施的电阻进行测量，以便确定是否满足 10Ω的要求。在永久冻土层地带，特别希望利用现有设施的接地装置。

15.11.1.3.3　多电极系统

为降低单个垂直打入的接地棒的接地电阻，还可用截面为 54mm^2 的裸铜电缆将附加接地棒与该接地棒并联连接。但是应注意，这种并联组成的系统总电阻对电极间距较为敏感。位置靠得很近的 N 个接地棒，由于相互之间的电磁作用，使并联连接的大地电极分系统的总电阻不等于单个接地棒电阻的 $1/N$。若多电极系统中电极间距为棒长的 1.2 倍～2 倍，就可减少上述相互作用的影响，使系统的总电阻接近理想值。

15.11.1.3.4　大地电极分系统

在土壤和战术条件允许的情况下，大地电极分系统应由一组合适间距的接地棒加上截面积为 54mm^2 的裸铜线电缆并联而成。战术条件下，互连电缆与接地棒应采用夹紧式连接，以便于拆装和搬运。对于里面装有几台独立设备，如便携式单台用户终端、电话或小开关板的临时掩蔽体，应在掩蔽体四周安装图 178 和图 268 所示大地电极分系统，这些大地电极分系统应延伸到掩蔽体滴水线之外 0.6m～1.8m，以确保任何形式的降水都能湿润大地电极分系统周围的土壤。可以采用辐射状或星型配置的大地电极分系统，但这种配置不太适用于：工作在射频的设备接地，如雷达或微波系统；在互联的掩蔽体之间需要提供低阻抗接地，以减小由雷电放电引起的干扰或电压浪涌。5.6 介绍了整个大地电极分系统接地电阻的计算方法，5.7 给出了这些系统接地电阻的测量方法。

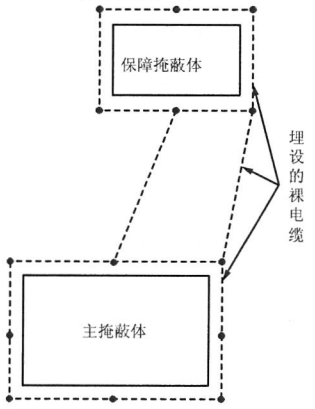


图 268　并置掩蔽体间隔大于 8m 时的接地分系统

15.11.1.3.5　降阻剂

对接地棒及互连电缆或导线周围的土壤可采用降阻剂降低接地棒的电阻。在电极附近的土壤中施加诸如硫酸镁(泻盐)、氯化钠(食盐)，以及硝酸钾(硝石)之类能产生离子的化合物之后，可像皂浆土那样，起到增加接地棒视在横截面面积、减少土壤电流密度的作用。推荐使用硫酸镁，因为它对金属腐蚀作用小、而且电导率高。在电极外围，离电极中心 0.45m 的一周挖个环形沟，沟深约为 0.3m，直径 0.9m(见图 27)。用盐溶液填沟，再用土覆盖。为了使降阻剂能最好地扩散，减小腐蚀作用，溶液不应直接接触电极。详细资料见 5.9。

15.11.2　详细的战术接地要求

15.11.2.1　概述

15.11.2.1.1　适用范围

对接地方案及实施应认真对待。正确接地对恶劣条件下保持通信能力举足轻重。这里仅说明机动设备战术部署的接地要求。接地方法的规定，不仅要考虑可实施性，而且应符合具体的电阻测量要求。战术应用的机动设备有四种类型，即独立设备、独立掩蔽体、并置设备和并置掩蔽体。

15.11.2.1.2　培训

应对通讯设备的安装和工作人员进行有关接地系统安装和维修的正规培训。这种培训应包括讲授各种接地技术和接地系统配置，要求如表 85 所示。

表 85　典型培训要求

接地技术	电阻测量方法
	降低接地电阻的方法
	接地系统与地形的关系
接地配置	单根接地棒大地电极分系统
	多根接地棒大地电极分系统
	等电位接地平面
	天线地网
	辐射状单点接地网络
	以节点为基础的接地系统

15.11.2.1.3　试验

接地系统安装完毕以后，就应测量接地电阻。当系统在同一地点长期使用时，应以一定的时间间隔及在系统出现异常噪声时测量接地电阻。用于接地电阻测量的大地电阻测量装置，每个单元都应经过认可。独立设备和成组设备的大地接地电阻值应等于或小于 10Ω。当成组设备系统间隔大于 8m 时，在战术情况下测量的接地电阻差别可能较大。如果由于这些接地电阻的差别较大而产生噪声或其他不希望的响应时，应利用截面为 54mm^2 的裸铜电缆将每个设施的大地电极分系统互连起来，或对电阻较高的分系统施加降阻剂以降低土壤电阻率。

15.11.2.2　独立设备

15.11.2.2.1　概述

军用机动系统的独立设备一般是可转移工作场地的齐套设备。这些设备通过专用电缆或同轴电缆与其他设备连接。独立设备整体一般带有齐套的电源和接地系统。独立设备低电阻接地的主要出发点是确保人员安全和雷电防护。雷电防护既要防止雷电可能通过接口电缆对工作人员所构成的危险，也要防止雷电对掩蔽体的直击。

15.11.2.2.2　接地程序

15.11.2.2.2.1　概述

在独立设备上提供雷电和安全保护的方法包括低电阻接地和接口电缆上安装浪涌保护器。

15.11.2.2.2.2　低电阻接地

15.11.2.2.2.2.1　概述

获得和维持低电阻接地是使用人员的责任。为了获得足够的雷电防护，接地电阻应小于10Ω。对于独立设备来说，可供选择的接地方法有以下三种。

15.11.2.2.2.2.2　现有设施

对现有设施，工作人员可以按15.11.1.3.2的规定，将设备互连电缆接到现有的低电阻接地设施上。

15.11.2.2.2.2.3　单根接地棒的大地电极分系统

如果能够获得设计的电阻值，可以通过互连电缆把设备连接到打入地下的单根接地棒。接地棒的长度一般在1.8m～3.0m之间。接地棒类型的选择，应考虑在战术场地位置所具备的土壤条件。应按5.7.2规定测量接地棒和大地之间的电阻。当测得的电阻不够低时，可以对接地棒附近的土壤加入降阻剂(见15.11.1.3.5)以减小接地电阻。

15.11.2.2.2.2.4　多根接地棒的大地电极分系统

当用化学方法无法降低土壤电阻时，可以将附加电极与给定接地棒并联。互连电缆应是截面54mm^{2}的裸铜电缆，而接地棒间距应为1.5倍～2倍棒长，以减少电阻壳层(见15.11.1.1.2.6)的重叠。

15.11.2.3　独立掩蔽体

15.11.2.3.1　概述

独立掩蔽体由安装在可移动的金属掩蔽体内的设备组成。一般说来，它距离其他设备较远，不适合在互连系统之间组成一个公共的大地电极分系统。独立掩蔽体的电源可以是发电机或民用电源，并通过电力电缆连接。独立掩蔽体接地是为了给下列对象提供接地通路：

a)　故障保护分系统；

b)　泄放由接口信号电缆带来的静电电荷或控制电磁干扰；

c)　信号参考分系统；

d)　雷电防护分系统。

15.11.2.3.2　分系统的互连

出于下列原因，需要把信号参考分系统和故障保护分系统接到大地电极分系统：

a)　掩蔽体的外壳往往用作信号参考分系统的等电位接地平面；

b)　电子设备及系统已经尽可能以最短的路径连接到掩蔽体的外壳；

c)　故障保护分系统已接到电源引入板的接地母线，并进而接到了大地电极分系统。

虽然电源引入板也搭接到掩蔽体外壳，但并未构成环路，这样即使遇到电源故障、电磁脉冲、雷电或电磁干扰，掩蔽体内所有的物体仍保持相同的电位。如果在战术部署区域内的雷电活动要求对掩蔽体提供附加保护，可按15.11.1.1.4.2的方法在掩蔽体顶部安装接闪器。对于长期设置的掩蔽体，雷电防护措施则应强制执行。

15.11.2.4　并置军用移动设备

15.11.2.4.1　概述

并置移动设备是一组彼此独立工作、但安置在同一个活动屏蔽体(例如屏蔽帐篷)内的设备。一般说来，这些设备不带安装机架，可以放置在地上。这里不考虑金属壳体形式的掩蔽体(参照15.11.2.5)。屏蔽帐篷内部各设备之间可以有通信线路，但通信线路主要是在设备和外部系统之间。并置设备的基本工作特性类似于独立设备。接地主要是为了防止雷电和电源故障危及人身安全。

15.11.2.4.2　接地程序

每个独立设备至少应配置一根接地棒。如果屏蔽帐篷内的设备总数很少，且在配置上每台设备都能使用接地棒且不降低接地完整性时，现有的低电阻接地设施或每台设备单独配置的打入式接地棒(参照15.11.2.2.2.2)可用于成组设备接地。当一个屏蔽帐篷内设置有许多设备时，仍然采用分别接地的方法已不合适，应在屏蔽帐篷周围部署简单的大地电极分系统。接地系统的尺寸和满足接地电阻要求所需的接地棒数目，应按照15.11.1.3.4确定。在需要附加雷电或电磁脉冲防护的区域，应采取15.11.1.1.4所提出

的措施。

15.11.2.5　并置掩蔽体

15.11.2.5.1　概述

并置掩蔽体是指几个共用公共信号或电力电缆的活动金属掩蔽体，通常可分成两类：一类掩蔽体彼此相距在 8m 之内；另一类相距超过 8m(见图 268)。当应将一个设备系统布置在多个掩蔽体内时，就构成典型的并置掩蔽体。并置掩蔽体的接地，既要保障人身和设备免受雷电及电源故障的影响，又要提供信号接地基准。对于采用同一电源供电、或掩蔽体之间有通信信号电缆的并置掩蔽体必需给予特别考虑。间隔大于 8m 的并置掩蔽体，是否需要建立一个包围整个掩蔽体的接地系统，应视每个掩蔽体所测得的接地电阻值而定。应采用 2 根截面为 54mm^2 的铜电缆，按图 268 所示将各个掩蔽体的接地系统互连。如果由于各掩蔽体之间接地电阻的差别而引起噪声或其他不希望的效应，则可用 5.9 或 15.11.1.3.5 中降低电阻率的方法降低接地电阻。

15.11.2.5.2　接地程序

15.11.2.5.2.1　电源接地

由单个电源供电的并置掩蔽体，应将它们所有接地导体(中线)在发电机一点接地。如果是几个电源发电机并联供电，则各个发电机的电源中线应互连后单点接地。对于不共用公共电源，由几个电源供电的并置掩蔽体，应将所有中线搭接在一起，然后在一点接地。若设备掩蔽体的间距不到 8m，则它们可共用一个公共的大地电极分系统。

15.11.2.5.2.2　信号接地

并置掩蔽体的互连通信电缆小于 8m 时，应将它们的信号接地导体搭接到大地电极分系统上(见 15.11.1.3.4)，大地电极分系统将给所有的互连掩蔽体提供一个公共的信号参考面。

15.11.2.5.2.3　故障保护分系统

掩蔽体内的设备安全接地线应在每个掩蔽体的电源入口配电板接地，并搭接到大地电极分系统上。

15.11.2.5.2.4　雷电和 HEMP 防护

应在掩蔽体入口处的所有电力线和信号电缆上采用浪涌抑制器，以防止雷电和 HEMP 在掩蔽体内的电缆上产生感应电流。应按 15.3 的规定提供附加的雷电防护。

15.11.2.5.2.5　间距大于 8m 的并置掩蔽体

15.11.2.5.2.5.1　概述

间距大于 8m 的并置掩蔽体是指由多个掩蔽体组成的设备系统，互连掩蔽体的间距可达到 75m。它与所有单元都设置在单个掩蔽体内的设备系统不同，但这些掩蔽体也可认为是独立掩蔽体。当布局要求各掩蔽体有 8m 以上的间距时，应按照图 268 和下列方法进行接地。

15.11.2.5.2.5.2　接地电阻差值小于 150Ω

如果所有掩蔽体的接地电阻测量值相差不足 150Ω，则每个掩蔽体应按独立掩蔽体接地(参照 15.11.2.3)。

15.11.2.5.2.5.3　接地电阻差值大于 150Ω

如果接地电阻测量值相差 150Ω或更大，应采取降低接地电阻的措施(参照 15.11.1.3)，并将每个掩蔽体按独立掩蔽体接地(参照 15.11.2.3)。

15.11.2.5.2.5.4　大地电极分系统

15.11.2.5.2.5.4.1　概述

各个掩蔽体的大地电极分系统应采用两根裸铜电缆互连(见图 268)。将所有掩蔽体的大地电极分系统连接在一起，以形成公共的大地电极分系统。互连电缆的尺寸可参照表 76。

15.11.2.5.2.5.4.2　电源接地

各个掩蔽体的电源中线应通过电源入口配电板接到大地电极分系统。

15.11.2.5.2.5.4.3　信号接地

信号参考分系统(蒙皮或掩蔽体)应以单点接到大地电极分系统。

15.11.2.5.2.5.4.4　安全接地或设备接地

将各个掩蔽体的设备接地导体接到在电源入口配电板的接地母线，进而再接到大地电极分系统。

15.11.2.5.2.5.4.5　雷电和 HEMP 防护

本项要求可参照 15.11.2.5.2.4。如果需要附加雷电防护，应将每个接闪器及其引下线接到大地电极分系统的接地棒。为此可能需要安装附加接地棒。

15.11.2.6　固定的预制式掩蔽体

15.11.2.6.1　概述

固定的预制式掩蔽体通常把较大的部件设计成预制件，然后在预定地点总装成固定的掩蔽体。这种掩蔽体可看作固定设施，例如，它自身应配备符合 15.2 要求的大地电极分系统(环状接地)。当掩蔽体配置在接地高塔的保护圆锥区之外时，应按 15.11.1.1.4.2 的要求安装雷电防护分系统。掩蔽体金属预制板在结构装配时应确保电气上是连续的，并应接到大地电极分系统，以便泄放静电和降低对通信电子设备电路的干扰。如果金属层在电气上都是连续的，固定的预制式掩蔽体的蒙皮就可视作是一个等电位接地平面。如果蒙皮不是金属层或电气上是不连续的，就应单独设置一个满足 15.5 要求的等电位接地平面。

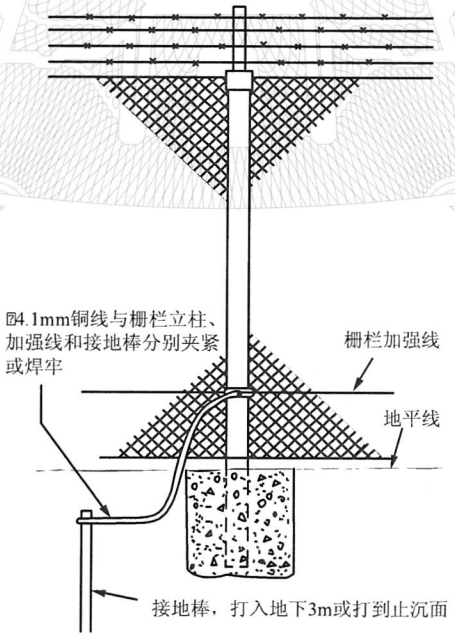
15.11.2.6.2　电气连接

如果掩蔽体是金属的，并且电气上连续，它就应在第一个供电断路器或电源入口配电板上搭接到故障保护分系统的安全接地电缆，并以最短的路径连接到大地电极分系统。在第一个供电断路器的内部，接地中线和安全地线应连接在一起，然后再接到大地电极分系统。当一个电源供给两个或多个掩蔽体时，如果出现交流声或噪声，则可将接地中线与安全接地线断开。

15.12　栅栏

15.12.1　概述

场地周围的安全栅栏是设施接地系统的一部分，应由镀锌钢丝或钢板网构成。栅栏上不应采用乙烯树脂涂层。栅栏立柱及其顶部的栏杆或导线应为导电材料。用于加强的铜导线直径至少为 4.1mm，应编织在栅栏的整个长度上。栅栏柱和栅栏钢丝间隔一段距离就要用接地棒接地。小场地的接地棒间距是 30m，大场地的接地棒间距是 150m。安装方式如图 269 所示。



注：接地棒设置间距：小场地，30m；大场地，150m。

图 269　栅栏接地方法

15.12.2 接地

栅栏每个栅门的两边都应接地，在采用高张力跨接线的地方，应在高张力跨接线的两边相隔 45m 的点上接地。如果栅栏仅由木柱和一些水平的金属绞合线组成，引下线应沿栅栏立柱的整个高度敷设，并可靠地固定到每根绞合线上，以保持电气连续性。如果是金属柱子，并与栅栏电气连续，则可在通过立柱进行接地连接。

15.12.3 安装

栅栏接地的安装应按下述规定完成：

a) 将直径 4.1mm 以上的裸铜导线穿过栅栏的各个网眼，每次应同时穿过 2～3 个网眼，并将整个导线拉紧，直到消除下垂，然后重复此过程；在立柱之间的铜导线应是连续的，如需绞接，应在栅栏与立柱的搭接点上进行；

b) 按照 15.7.3 的规定，准备搭接表面；

c) 用发热熔焊或硬钎焊将加强导线搭接到每个立柱上；

d) 用发热熔焊或硬钎焊将接地搭接条搭接到栅栏立柱上；与接地棒的搭接应采用发热熔焊或夹箍加硬钎焊；

e) 按 15.7.4 要求密封保护所有搭接表面。

15.13 新设施的验收和试验程序

15.13.1 概述

下面推荐的接地、搭接和屏蔽验收和试验的实施要求和程序，应在建筑物或结构物施工期间作为设施的总体组成部分来完成。为了保证实施要求能适时完成，从破土开始至设施建成，始终应仔细监测施工质量。设施验收之前，应先准备好 15.13.6 中提供的设施检查表格。为便于设施的验收和检验，提供下列指南。

15.13.2 大地电极分系统

大地电极分系统的验收和检查程序如下：

a) 查看安装程序：特别应观察是否遵守了 15.2.5 的装配方法内容。应检查所用的接地棒尺寸是否符合规定。如果采用打入式接地棒，应查看接地棒有无加装保护套箍或螺母，以免打入过程中损坏接地棒。检查接地棒有无弯曲，段与段的连接处有无开裂或鼓凸。对过于薄弱或严重损坏的连接头，应在其打入深层土壤之前予以更换。

b) 抽查接地棒的接地电阻：把棒打到设计深度后，采用 16.2.3.3.2 的电位降方法测定其接地电阻。再利用图 173～图 175，由接地棒的总数算出纯接地电阻。此推算值将表明，计划中的电极分系统接地电阻能否达到 10Ω或更小。打入附加棒时，应继续抽检单根棒的电阻，每隔 3～4 根抽检 1 根。该程序对是否需要调整电极配置(增加或减少接地棒)应做出决定，以便获得所要求的电阻(见 15.2.3.3)。

c) 查看各接地棒互连电缆的尺寸(截面为 $54mm^2$)是否恰当，检查各电缆段之间及电缆与接地棒之间的所有连接。埋设的和以后不能接近的所有连接点都应进行熔焊或硬钎焊。夹箍或螺栓连接仅限用于以后可以接近的连接点。

d) 检查是否已将大地电极分系统与公用管道、埋设的水箱及其他地下金属物进行互连。

e) 检查用于雷电引下线、信号接地以及电源系统接地安装连接的引线条或电缆(见 15.3.2.3)规格是否合适。应确保用于雷电引下线接地的引线条不再用作信号参考或故障保护分系统的接地。

f) 一旦安装成电阻最小的完整系统，应按照 16.2.3.3.2 规定的电位降法测量系统至大地的电阻。如果电阻大于 10Ω，可采用 5.9 的电导率提高方法降低对地电阻。

g) 在设施图纸上正确标出所有更改或修正的内容。

15.13.3 雷电防护网络

雷电防护网络的验收和检查程序如下：

a) 应先确定由接闪器(是单独安装的杆塔或架空接地导线)所建立的圆锥保护区。在缩小的结构物比例图上定出接闪器位置(包括所有视图)，并按照 15.3.2.2 的程序判定设施各部分是否确已被接闪器所建立的圆锥保护区所覆盖。对未被覆盖的区域，应考虑采取附加措施，在 15.3.2.2 和 15.3.2.3 可查到有关指南。

b) 检查接闪器材料类型(15.3.2.2.2)和高度(15.3.2.2.3)是否正确，位置是否适当(15.3.2.2)。

c) 检查屋顶导体规格是否合适、材料是否正确(表 54 和表 55)，走线(15.3.2.3.2)及所采用的紧固件(15.3.2.4)是否适当。

d) 检查引下线规格是否合适、材料是否正确(表 54 和表 55)。检查引下线走线是否符合 15.3.2.3.3 推荐的方法。当采用钢结构件作引下线时，应遵循 15.3.2.3.3 推荐的方法。检查紧固件和附件是否符合 15.3.2.4 及 15.3.3.8 所推荐的易接近性、强度及抗腐蚀能力等要求。

e) 检查是否提供了足够的物理保护(15.3.3.10)。

15.13.4 信号参考及故障保护分系统

信号参考及故障保护分系统的验收及检查程序如下：

a) 检查等电位接地平面是否符合 15.5.1.2 的规定。

b) 在钢架建筑物中，应检查等电位接地平面是否已搭接到主结构钢架上。对木质或砖石建筑物，应保证有多根引下导线搭接到等电位接地平面。应按 15.6 所提的要求，将红、黑信号地线搭接到等电位接地平面上。

c) 检查钢结构件之间的接头是否都已搭接并形成了低电阻的(小于 1mΩ)连接。检查是否采用了 15.5.1 所推荐的紧固方法，最好选用符合 15.7.2 规定的熔焊接头。机械式紧固接头需仔细清洁处理，螺栓应有足够的扭紧力矩(见表 77 和表 E.1)，对搭接点应提供适当的保护。应目视检查清洁处理的程序，抽检测量扭紧力矩，并检查是否按要求涂覆了油漆和密封胶。利用 16.2.3.4.1 介绍的微欧计法抽检测量结构物上各连接点的搭接电阻值。遇到搭接电阻大于 1mΩ 的连接点，应根据情况重新清洁搭接表面，拧紧螺栓，或提供辅助搭接条，直到达到 1mΩ。

d) 在非钢架或砖石建筑物中，应检查增加的接地网络是否符合 15.5.1 推荐的要求。特别应检查敷设的接地电缆截面积是否满足 3.4mm^2/m 准则。

e) 检查是否已按 15.5.1.2 的规定把接地连接件搭接到等电位接地平面上，并检查搭接电阻是否小于 1mΩ。还应检查接地连接件的位置，确保它能提供到等电位接地平面的最短通路。

f) 检查在等电位接地平面和大地电极分系统之间是否至少存在 2 条电气通路。等电位接地平面最好与建筑物主要钢构件(或木质建筑物中的引下导线)至少每隔 3m 搭接一次。在等电位接地平面上选择一点，并测量与大地电极分系统之间的电阻，检查总电阻是否小于 5mΩ。假如总电阻超过了 5mΩ，应检查所有连接点的搭接是否正确、引下线规格是否合适。所有不合格的导体应予以更换、不良的搭接点应重新搭接。

g) 检查所有金属导管是否符合 15.4.4 所推荐的电气连续性和搭接要求。

h) 检查是否按 15.4.5 的要求，对所有电气支撑结构件和电缆导管进行了互连和搭接。

i) 检查配电系统的接地是否符合 15.4.6 的规定。

15.13.5 搭接点和搭接电阻

搭接点和搭接电阻的验收和检查程序如下：

a) 除了检查结构件的连接点以外，通常还需检查所有的搭接点是否经过必要的清洁处理，所用的紧固件或配件是否合适，此外，是否采取了有效的防腐措施。特别应注意的是，是否符合 15.7.2 和 15.7.4 所推荐的方法。

b) 选择一些搭接点进行接触电阻检查。采用 16.2.3.4.1 所介绍的微欧计法。所有搭接点的电阻应为 1mΩ或更小，不小于 1mΩ的搭接点应重新搭接。

15.13.6　设施检查表格

示例：

设施_____日期_____

位置_____检查人员_____

第 1 部分　大地电极分系统

A.　土壤电阻率_____Ω·cm

（可由场地勘测获得，或者通过测量单根或一组接地棒的接地电阻获得。）

B.　整个大地电极分系统的接地电阻_____Ω

C.　完工后的大地电极分系统的草图

（标出尺寸、其他埋设的金属物体位置、用于雷电防护、电源或信号接地的接地引出头位置，以及所有接地井。可用正式的工程图代替草图。）

D.　检查清单（完工时的初始情况或改正后的相符情况）：

检查项目	是否符合规定
是否规定了接地棒的尺寸	×××
是否使用截面积为 54mm^2 的线缆（或使用规定的线缆）	×××
是否按规定设置接地引线条	×××
是否所有连接点连接至埋设的金属物体	×××
所有今后不易接近的连接点是熔焊或铜焊	×××
是否按规定提供接地井	×××

第 2 部分　雷电防护网络

A.　雷电防护圆锥区

（附上设施（包括天线）的视图，并标明雷电防护圆锥区）

B.　是否要获得安全标准的标识（视需要而定）

要求_____不要求_____

C. 图纸

（附上有关雷电防护系统的全部图纸，或指明可以得到这些图纸的地点。）

D. 检查清单

		是否符合规定	说明
接闪器	材料	×××	×××
	高度	×××	×××
	位置	×××	×××
屋顶导体	尺寸	×××	×××
	材料	×××	×××
	走线	×××	×××
引下线	尺寸	×××	×××
	材料	×××	×××
	走线	×××	×××
紧固件及配件	材料	×××	×××
	安装	×××	×××
	保护装置	×××	×××

第 3 部分　设施接地系统

A. 钢架建筑物

检查结构的接头是否正确搭接_____（见下面第 4 部分）。

B. 非钢架建筑物

		是否符合规定	说明
补充接地网络	电缆尺寸	×××	×××
设施接地面	尺寸	×××	×××
	位置	×××	×××
电阻测量	测量数目	×××	×××
	上限值	×××	×××
	下限值	×××	×××

第 4 部分　搭接

A.　程序

	是否符合规定	说明
清洁处理	×××	×××
紧固	×××	×××
保护	×××	×××

B.　扭矩试验

检查数目_____

检查之处_____

C.　电阻试验

检验数目_____

电阻下限值_____mΩ

电阻上限值_____mΩ

16　现有设施

16.1　概述

对不防电磁脉冲的现有设施，本章为接地网络、搭接和屏蔽提供检验、改造和评定的步骤及程序。16.2 规定设施评定期间应考虑的具体项目，并在 16.2.3.4.4 提供推荐的勘测记录表格。另外，在 16.3 中列出检查程序。这些检查程序的目的在于检查设施的屏蔽、搭接和接地网络是否受到损害，基本电阻指标是否符合规定，腐蚀是否已得到有效地控制。有条件进行高空电磁脉冲防护的设施改造，应参考 15.10 采取相应的措施。

16.2　改造

16.2.1　概述

对于一个已装好电线、具备大地电极分系统(通常仅是与供水系统连接)、而且电气或电子设备已安装就位的现有设施来说，要再按第 15 章规定安装屏蔽、搭接和接地网络可能并不容易。应当注意，为了使设施符合所推荐的准则，可能需要进行大量改造，随之就要追加费用和中断运行，因此应对整个设施的接地、搭接、屏蔽及雷电防护进行一次全面的勘测。勘测的数据结果应填入勘测记录表格。对数据结果进行分析，确定现有系统与第 15 章所提出的推荐性准则之间的不符合程度。针对各个不符合项，应检查设施中设备和分系统的运行历史记录，如有可能，应找出记录的各种不符合项与运行情况之间所存在的关系。然后，根据改造的必要程度、内容及各类改造所需的费用，决定是否进行改造和改造所涉及的范围。图 270 和图 271 是典型建筑物的平面扩建图。

在对设施的接地、搭接和屏蔽进行改造、更新或扩建之前，应对现有系统进行研究和分析，至少应完成下列步骤：

a)　索取或准备一份能表明设施原始状态的准确而完整的成套图纸。

b)　确定变更之前接地、搭接和屏蔽系统的状态，以及它们的完整性和有效性，通常应包括外观检查、设施图纸分析和电气测量等方面的综合。

c)　全面编写步骤 a)和 b)所得结果的文件，供将来参考。

d)　将上面得到的结果与设施的要求相比较，以确定是否需要进行改造。一旦确定系统需要变更或改造的内容，就应采取有效措施，解决勘测出的缺陷问题。

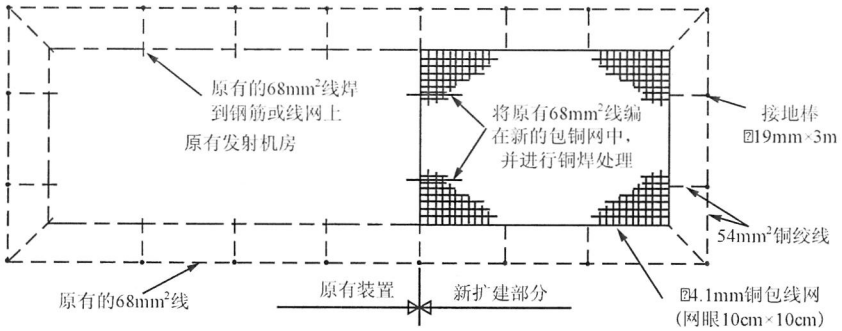


图 270　发射机房扩建图

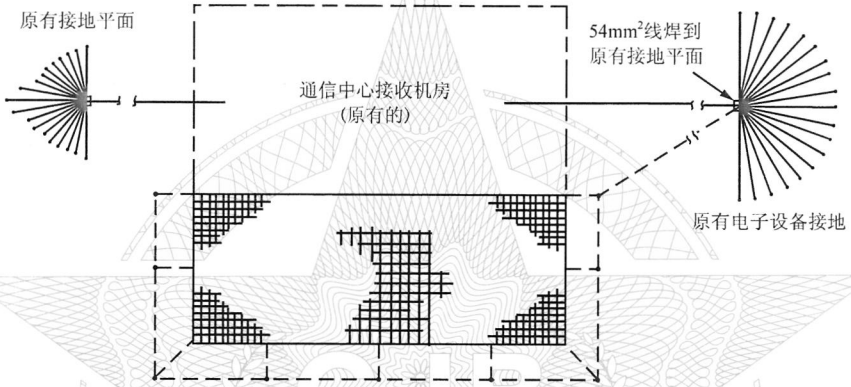


图 271　通信中心/接收机房扩建图

16.2.2　图纸

应索取、准备或完成一套设施及其全部有关结构物的建筑和工程图纸。其中，特别重要的是场地布置图，这套图纸应标明大地电极分系统的配置、水管和电缆系统的位置、一般地貌特征，以及建筑物的外形。此外，结构图纸应标明大地电极分系统的连接方法、结构钢筋的配置方式、加固钢筋和金属丝网或薄板的位置与安装方法。电气图纸应标明导线尺寸、断路器规格、电缆型号与走线方式、以及所用屏蔽壳体的类型。雷电防护分系统图纸应标明接闪器的高度和位置、引下线的规格和走线、与之有关的紧固件和物理保护装置以及引下线与大地电极分系统的连接。上述各图纸一旦准备齐全，就应将图纸与现有结构相比较，必要时可修改图纸，以反映在图纸上尚未列入、但实际已增加或更改的内容。如果应绘制新图纸，则应确保列入结构物的所有部件。在决定对现有设施进行任何加固改进或翻修之前，应掌握能准确反映现有设施结构配置的图纸，这一点至关重要。

16.2.3　设施勘测

16.2.3.1　概述

在得到或绘制好图纸后应对整个设施的接地、搭接、屏蔽和雷电防护方法进行全面勘测。这一勘测应包括下列主要内容，即故障保护分系统、信号参考分系统、搭接(含电流通路及结构件之间的搭接)、结构物的雷电防护、电磁干扰(需要时也含电磁脉冲)的屏蔽和人员防护。外观检查的结果应简要地编成文件并与设施的工程图归在一起。与外观检查同时完成的测量，其结果应详细地填写在 16.2.3.4.4 的接地、搭接和屏蔽记录表格上。

16.2.3.2　勘测步骤

对设施勘测有关的步骤为：

a)　分析大地电极分系统并测试其对地电阻；

b)　在整个设施中选取代表性数量(5%～10%)的搭接点进行检查；

c)　检查和评定雷电防护分系统；

d) 检查故障保护分系统，并对杂散电流的电平进行抽查；

e) 在图上标出和说明设施中的信号接地网络(或系统)；

f) 测量接地系统的噪声；

g) 如有需要，还应对设施(或设施内)的电磁屏蔽效能作出评定；

h) 在离开被勘测设施之前，应复查勘测表格的正确性和完整性。

16.2.3.3 勘测程序

16.2.3.3.1 概述

下面遵照勘测表格的先后顺序介绍各勘测项目。在某些设施中，合适的勘测顺序可能与此不同；在大型设施中，可同时在几个区域进行勘测。最重要的不是勘测的先后顺序，而是应精确和完整地进行勘测。在进行勘测之前，应在勘测表格上部填写设施(或具体的建筑物、结构物、需要勘测的分系统)名称和必要的说明，设施所处位置(包括足以表明地理区域的信息)、勘测日期、以及勘测者或勘测组负责人的姓名。

16.2.3.3.2 大地电极分系统

大地电极分系统的检查程序如下：

a) 确定设施大地电极分系统的配置。在勘测表格第 1 部分 A 项所提供的位置或在附页上画出导线布置图。也可以将工程图纸附在后面代替所拟的草图，但应根据需要对图纸进行修改或补充。标出大地电极分系统的类型，即接地棒、接地环圈、格栅、带接地棒的格栅、接地平板、水平的辐射状导体以及公用事业管道等。注明大地电极分系统与其他导体(如水管、埋地罐体、结构柱架、地下防护电缆、天线地网、以及电源接地点)之间的所有互连。

b) 根据现有资料，确定接地棒材料和结构形式(铜、铜包钢、钢，实心、空心等)、直径和长度、接地环圈的尺寸、埋设深度和材料。如果使用水平接地棒或带条，应记录其尺寸；同样，应记录板状、圆柱状或其他类型的电极实际尺寸和材料。

c) 检查第一个断路装置(即设施的主电源开关或断路器)、电源变压器、或电源配电系统的其他单元的中线接地导体。在勘测表格第 1 部分 B 项记录这些导体的规格。用钳式电流表测量上述每一导体中的交流杂散电流并记入勘测表格第 4 部分 C 项。

d) 仔细检查与大地电极分系统相连的各种搭接点是否有松动、腐蚀、电解以及雷击或机械损伤的迹象。有关搭接检查程序的详细内容，见 16.2.3.3.3。在勘测表格第 2 部分相应的空格处说明具体的缺陷。

e) 在现场对土壤进行大致分类。如果场地具有特殊性(例如，位于山顶、沼泽地、珊瑚礁等)，应适当标明其特性。一般来说，还应记录勘测时的具体天气条件，特别是在要按照下一步的规定进行大地电阻测量时，这一点尤其重要。假若已知，应记载最近是否已下过总降雨量不少于 0.25mm 的降雨日期。在第 1 部分的 D 项和 F 项中记下场地和气候的说明。同样，应记录土壤是否进行了处理或施加了降阻剂。

f) 用电位降法测量大地电极分系统的对地电阻(关于这一方法的原理说明，见 5.7.2)。

1) 把测量仪器上标为 C_1 和 P_1 的接线柱端接在一起，并把它们连接到受试电极。

2) 确定大地电极分系统的最大尺寸 a。对于圆形，此尺寸为直径；对于方形或矩形，此尺寸是对角线；对于其他形状，此尺寸选择跨该分系统的最大展开距离，如图 272 所示。试验仪器的电流测试棒 C_2，应置于远离受试电极连接点的地方，其间距为上述最大尺寸 a 的 5 倍或 5 倍以上。试验仪器一般带有长约 30m 的互连导线。除了最简单的电极之外，对于所有其他大地电极分系统，30m 互连线满足不了电流测试棒 C_2 对间距的要求。对于接地棒长不大于 6m 的单棒式接地分系统或接地棒长不大于 6m 且间距不超过 6m 两棒式接地分系统，可以采用 30m 间距。但是，在大多数情况下，需要用外加导线把试验仪器连接到电流测试棒 C_2 和电位电极 P_2。当距离达 300m 时，应采用直径为 1.3mm 或 1mm 的铜导线(带绝缘层)。

3） 将电流测试棒 C_2 布置在从受试电极出发的一条直线上，此线应使测试棒 C_2 离受试电极或其他埋地金属(诸如水管、电源和信号电缆、燃料罐及下水管等)的距离最大。在选择测试棒 C_2 的布置方向时，应检查设施电极分系统的配置方式，并确定上述所有埋地金属的位置，然后尽可能根据图 272 所示，在远离这些埋地金属的位置上布置电流测试棒。

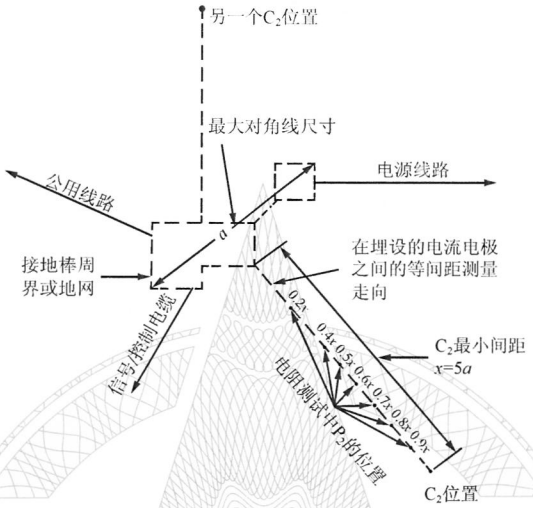


图 272　典型设施中的大地电阻测量

4） 随后，沿着电流测试棒 C_2 和受试电极连接点之间的直线布置电位测试棒 P_2。把 P_2 和 C_2 一起插入土壤，插入深度为 10cm～30cm。倘若由制造厂随试验仪器提供的测试棒不能使用时，应按 15.2.2.2 的说明制作一套测试棒。设受试电极和 C_2 之间的距离为 x，将电位测试棒 P_2 放置在受试电极和 C_2 之间大约为 $0.2x$ 的位置读取第一个电阻读数，在 $0.4x$、$0.5x$、$0.6x$、$0.7x$、$0.8x$ 和 $0.9x$ 各点重复进行测量。应记录 C_2 和受试电极之间的距离以及图 273 所示工作单上每个 P_2 位置的电阻测量值。图 274 是一个已测完的工作单的示例。

5） $0.5x$ 和 $0.7x$ 处的电阻值与 $0.6x$ 处的值相差不应超过 10%。若前两个读数与 $0.6x$ 处的读数相差不止 10%，则应沿着另一个方向进行测量，或者将电流测试棒 C_2 移至更远离受试电极的位置。如果无法将 C_2 放置在比 5 倍最大尺寸距离更远的位置，则电流测试棒 C_2 至少应在可能的 5 个最大距离上进行试验。然后，应按照 5.7.2.3 规定的延伸型电极分系统的处理方法，通过图解确定该大地电极分系统的电阻，具体可见 5.7.2.3 给出的图解示例。

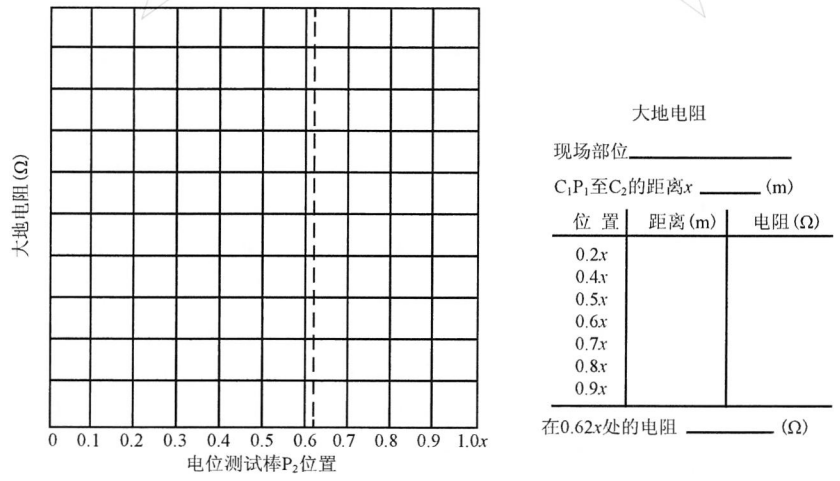
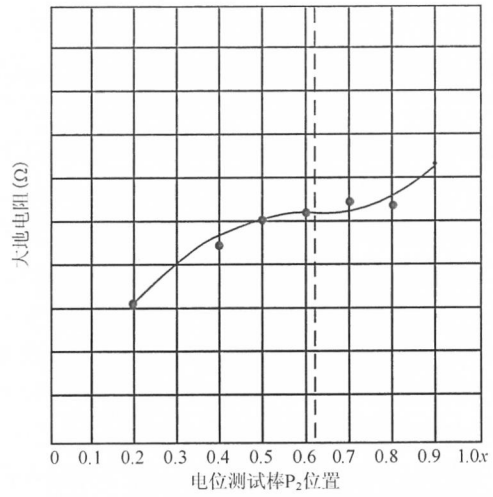


图 273　电阻测量工作单



大地电阻

现场部位 NO.1变压器

C_1P_1至C_2的距离x 40 (m)

位 置	距离(m)	电阻(Ω)
0.2x	8	3.2
0.4x	16	4.5
0.5x	20	5.1
0.6x	24	5.2
0.7x	28	5.4
0.8x	32	5.3
0.9x	36	6.3

在0.62x处的电阻 5.3 (Ω)

图 274　完成的电阻测量工作单示例

16.2.3.3.3　搭接

搭接的检查程序如下：

a) 在整个设施所使用的各类搭接点中，选取有代表性的、数量为 5%～10%的搭接点进行外观检查。检查一个搭接点是不够的；然而，一般也不必检查设施中的每个搭接点。除了检查搭接的腐蚀故障点之外，还应查找一些其他问题：

1) 应检查熔焊、铜焊或银焊连接处有无裂缝或漏焊、焊缝堆积物的大小(见 15.7.2)、长度和数量(如不连续)、以及腐蚀的迹象。

2) 应检验软钎焊搭接点有无断裂、虚焊迹象(结晶裂缝、颗粒状外形)或过热的现象。软焊料只能用于改善连接点的导电特性，不应要求其提供机械约束力。在故障保护分系统(包括安全地线网络)及雷电防护分系统中都不应有软钎焊连接点。

3) 对于螺栓固定的连接点，除检查其松紧程度外，还应检查紧固件尺寸是否足够，紧固件或主要结构件有无腐蚀、所用垫圈和锁紧螺母有无差错，保护涂覆层是否遗漏或失当，配件有无损坏或丢失，以及配合表面的清洁处理是否适当。对敞开或暴露于外界气候环境的螺栓固定连接点，特别应认真检查。

4) 对于使用铆钉、夹箍和其他类型紧固件的连接点，通常应检查其松紧和腐蚀情况。

b) 在勘测表格的第 2 部分 B 项记录具体搭接缺陷的位置和情况。

c) 对搭接点进行外观检验的同时(或之后)可按 16.2.3.4.1 规定的试验程序测量搭接电阻。选择外观上密实、制作良好、且无腐蚀的 5～10 个搭接点测量其电阻。上述抽样点应包括结构物自身的搭接、设备到结构物的搭接、安全接地线之间的连接、导管与导管、或导管与机柜的连接、雷电引下线(包括用作雷电放电通路的结构物立柱)的搭接、以及其他合适的搭接点。对所有呈现可见缺陷的搭接点均应进行测量。上述测量结果反映两个被测点之间的实际电阻，当然也包括受试搭接点上所有并联通路的影响。

d) 对于电阻大于1mΩ 的各个搭接点，应检查此搭接是否松动，如有松动，需拧紧紧固件。拧紧后再次测试电阻。如果电阻仍然大于1mΩ，而且搭接点拆装比较方便，则可拆开搭接点，并检查有无腐蚀、杂质、漆层或其他不导电的材料。去除杂质材料，重新装配搭接点并测量电阻。如果电阻仍然大于1mΩ，则应在勘测表格中注明搭接点的位置，并指出需要采取的补救措施的类型。

e) 导线、电缆或宽金属带等构成的搭接条经常用于故障接地、信号接地和雷电防护接地。故障保护搭接条应采用符合电气规程尺寸要求的电缆或金属带。信号接地条的长度只能等于跨接结构

距离所必需的长度，并且其长宽比不大于5:1，雷电搭接条的长度需限制在1.8m 以下，并且只应用于雷电引下线与邻近金属物体之间的互连。除了这些要求以外，应检查搭接条的端部连接点有无松动、腐蚀和机械损伤。任何不符合这些要求的搭接条应载入勘测表格第2部分的 D 项。应注明缺陷的具体位置，并指出需要采取的补救措施。

16.2.3.3.4 雷电防护网络

雷电防护网络的检查程序如下：

a) 首先绘出设施雷电防护网络的草图，或将已安装的系统与工程图纸相比较。
   1) 草图应包括设施外形的轮廓图。此视图应大致按比例绘制，并标上尺寸，以便日后按比例绘成正式图纸。在草图上，应标明接闪器的位置、屋顶导体和引下线的走线、引下线与大地电极分系统的连接以及搭接条的位置和规格。应检查接闪器的位置和安装方式是否能对所有电子通信建筑物、结构物、天线和设备提供充分的保护(1:1 的保护圆锥区)。
   2) 在大多数情况下，工程图纸是可用的。如果在原图纸上未标出雷电防护分系统的部件，应将它们加到原工程图纸上。
b) 一些大型的现有设施可能已装有经过认证的雷电防护系统。则应在勘测表格第 3 部分的 B 项注明。
c) 在勘测表格第 3 部分 C 项记录接闪器的材料和高于屋顶的高度。查找可能严重影响接闪器物理性能的烧蚀、凹痕或熔融迹象。检查接闪器时，应特别注意那些高于接闪器或超出保护圆锥区的其他金属延伸物(如屋顶围栏、天线塔等等)，并且应在勘测表格上注明所有延伸物的情况。
d) 记录用作屋顶导体及引下线的电缆规格和材料。检查上述屋顶及引下线是否有多余的长度、急剧或不必要的弯曲(半径小于 20cm)、以及腐蚀和机械损伤。
e) 检查紧固件和安装配件是否可靠地固定，有无松动、腐蚀和机械损伤。确认用于非同组金属(例如铜与铝)连接的紧固件是否为双金属结构。在勘测表格第 3 部分 F 项记录发现的所有缺陷。
f) 应确保检查的搭接点中(见 16.2.3.3.3)包括有雷电防护分系统的搭接点。
g) 应确保雷电防护分系统与大地电极分系统、结构金属件及公用事业管道之间的互连，并在原先绘制的草图或设施图纸上记录或标注。
h) 检查引下线的机械防护挡板是否合适。对于公共出入区或接近设备及机器的区域，引下线可能被人触及，所以这些引下线应用高出地面或地板 2.7m 以上的非金属(最合适)或金属挡板隔开。保护挡板应牢固地固定，外表无明显的物理损伤。包括电工金属导管在内的金属挡板，其顶端和底部应搭接到引下线。在勘测表格第 3 部分 H 项记录所有查明的缺陷。

16.2.3.3.5 安全接地

安全接地系统的检查程序如下：

a) 检查故障保护分系统是否符合线路和设备的架设及安装要求。检查设施及与设施有关的设备，看其有无接地导体，并记录这些导体的规格。注意检查接地导体的所有连接点是否牢固可靠。在勘测表格第 4 部分记录故障保护分系统所要求的其他有关资料。
b) 务必细心检查，确保从断路器安装板到设备的导线标识颜色具有连续性。特别是应防止中线和安全地线互相接反。
c) 应保证中线不在中间配电板、开关盒或设备内部接地。接地导体只能在设施第一个供电断路装置上搭接到大地电极分系统。在检查可与供电装置临时断开的设施时应当断电，并且锁定电源开关，或采取其他确保电源断开的措施。电源断开后，从第一个断路装置接地点上拆开中线，检查中线与接地导体之间的电连续性(见图 275)。低阻值读数(小于 10Ω)表明中线在第一个断路装置以外的某个地方接地。应找出这种接地连接，并予拆除。在一般情况下，中线与接地点之间的电阻应大于 1MΩ。

d) 在设施内选定的一些测试点上，用钳式电流表测量安全接地网络的杂散电流电平。选择足够数量的点，以给出设施中杂散电流电平的相对大小信息。在装有电子设备的设施中，应记录所有大于 0.1A 的电平，并采取必要的纠正措施。把测量结果填在第 4 部分 C 项中。减小杂散电流的步骤见 16.2.4。

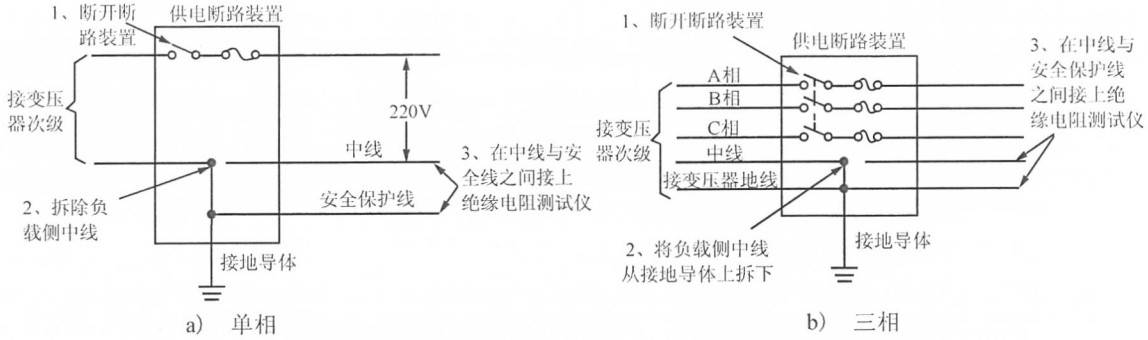


图 275 确定中线接地有无不正确连接的方法

16.2.3.3.6 信号接地实施

信号接地实施的程序如下：

a) 编制设施中信号接地的方法、技术和实施的一般说明(见 8.3 和 15.5)。对于可识别的专用信号接地网络，需要确定其特性，注明以它作参考的设备。勘测表格第 5 部分的 A 项为接地网络的说明，B 项记录信号线接地导体或母线的位置及规格。对现有的等电位接地平面也应确定其特性。

b) 用微欧计测试信号接地网络上选定点之间的搭接电阻(见 16.2.3.4.1)。对于低频接地网络，应测试网络上设备互连点之间的电阻。图 276 就是在设备 D 与 E 之间、E 与 G 之间、以及 G 与 K 之间进行搭接电阻测量的典型例子。搭接电阻不应超过 20mΩ。当设备之间有信号电缆及控制线互连时，还应进一步测量各设备接地端子之间的电阻。对于采用设备底板或机柜作信号接地的系统(例如，大多数高频和射频系统)，应测量机柜到机柜(或底板到底板)的电阻，见图 276 上 B－F 和 F－H 的连接。还应测量机柜到结构件的电阻(见 B－C 和 K－J 的连接)，这两个阻值应小于 5mΩ。将试验点的位置和测定的阻值记录在勘测表格第 5 部分 C 项。

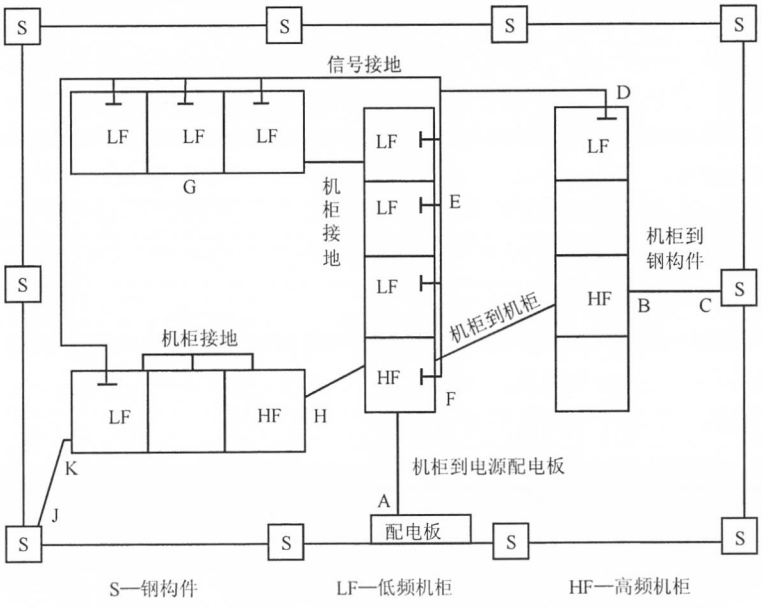


图 276 电子设施中搭接电阻和杂散电流的典型测量位置

16.2.3.3.7　接地系统噪声勘测

故障保护分系统、信号参考分系统以及电缆屏蔽层上的杂散电流是引起设施共模噪声干扰的常见原因。这些电流的测量是勘测电子设施不可缺少的部分。按下列规定测试电源杂散电流和非电源杂散电流。

a）　用钳式电流表检查三相电源线上的交流负载电流。特别应注明线电流之差大于10%的情况。还应检查和记录中线上的交流电流。

b）　用钳式电流表探测信号接地线、信号参考分系统、电缆屏蔽层、以及其他极有可能带有杂散电源电流的导体。特别应注意低频设备接地线及信号电缆屏蔽层中的电流电平，这种电缆用以传送视频信号、数据信号或工作在电源频率范围的其他类型信号。图276表示出了测量杂散电流的典型位置，如：高频设备机柜与结构件之间的B－C连接线，设备机柜与电源板之间的A－F连接线，低频设备E与G之间的连接线、以及机柜接地的J－K连接线。

c）　在勘测表格第6部分记录电流测量结果。

d）　按照16.2.3.4.2规定的试验程序，在敏感信号的电缆屏蔽层、导管、信号参考分系统、以及设备接地电缆上测量杂散电流电平。记录示波器的测量状态及结果。

e）　按照16.2.3.4.3规定的试验程序，测量下列对象的噪声电压：互连设备之间；低频(或其他)信号接地网络与结构件接地点之间；接地网络上相距较远的两点之间；设备内信号接地点与连接到大地电极分系统的搭接点之间；以及存在共模电压的其他任何两点之间。

f）　确定所需接地的类型，即单点接地或等电位接地面。

16.2.3.3.8　屏蔽

屏蔽的检查程序如下：

a）　判定设施中屏蔽的形式和种类(或类型)。应注意屏蔽可能由墙壁、网栅或其他类型的阻挡物附带提供，而这些物体的主要用途并不是屏蔽。在勘测表格第7部分的A项注明这些屏蔽。

b）　检验网栅，屏蔽柜、门、盖等射频阻挡物有无磨损、毁坏、腐蚀等情况。搭接条、搭接点有无断裂或损伤，衬垫是否松动等现象。检查设备运行有无干扰、噪声或不正常的迹象。在勘测表格第7部分B项记录各项缺陷。应确保贯通射频阻挡层的所有接地导体都与这些阻挡层搭接。

c）　保证搭接检查(见16.2.3.3.3)包含了屏蔽检查。

d）　检查电缆和连接器安装方法是否适当，屏蔽层有无断裂、破损或腐蚀的迹象。检查电缆屏蔽层的端接是否符合17.2.1.2.7和17.2.1.3.2的规定。在勘测表格第7部分C项注明发现的缺陷。

16.2.3.4　试验程序

16.2.3.4.1　搭接电阻

16.2.3.4.1.1　概述

本试验所得出的搭接点直流电阻足以反映搭接的一般特征。

16.2.3.4.1.2　试验设备

微欧计：分辨率优于10μΩ。

16.2.3.4.1.3　测量环境的一般要求

对于测量环境的一般要求如下：

a）　在不影响测量设备正常工作的电磁环境下进行搭接、接地直流电阻的测试；

b）　与被测对象有关的设备应停止运行并断电；

c）　微欧计测量端子应和测量点可靠地电接触；

d）　所有搭接、接地应符合相关标准规定。

16.2.3.4.1.4　测量步骤

测试布置如图277所示，直流搭接电阻的测试采用四端法，利用微欧计的4个端子(两个电流端子、两个电压端子)进行测量。

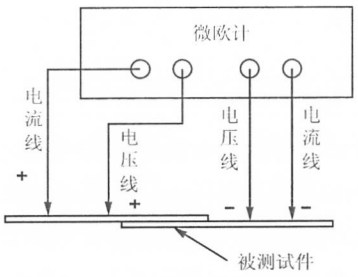


图 277　直流搭接电阻测试简图

a)　测量设备通电预热，使其达到稳定工作状态，并对仪器进行校准。

b)　根据搭接和接地安装工艺要求，选择适当的测量点。测量点应尽量靠近零件、组合件或构件的结合处，一般距结合处不应大于 20mm；如需要，对被测部位的测量点周围的保护涂层、污物及氧化层进行清理，使仪器测量端子与测量点的接触电阻达到最小。

c)　使用微欧计测量搭接处的直流电阻，读取并记录测量值。

d)　如果搭接表面涂层在测量时有所破损，应在规定时间内采用原有涂料或与其等效的涂料重新进行表面涂封。

16.2.3.4.2　接地系统噪声电流

16.2.3.4.2.1　概述

本试验程序用于测试故障保护分系统、信号接地线以及电缆屏蔽层上的杂散电流，这些杂散电流往往是产生设施内部共模噪声干扰的原因。可将时域测量结果转换到频域，频域结果有助于鉴别电流干扰源。

16.2.3.4.2.2　试验设备

所用的试验设备如下：

a)　示波器；

b)　电流探头；

c)　屏蔽电缆。

16.2.3.4.2.3　设备配置及试验程序

设备配置及试验程序如下：

a)　按图 278 所示连接试验设备；

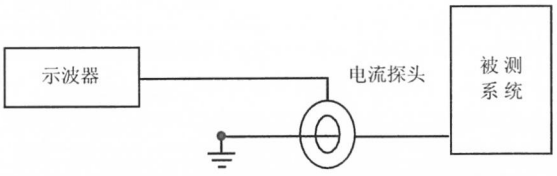


图 278　杂散电流的测量配置图

b)　将电流探头卡在需要测试的一根地线或屏蔽电缆上，测量杂散电流，存储测量结果；

c)　对被测系统的其他地线或屏蔽电缆分别重复步骤 a)～b) 的测试。

16.2.3.4.3　差模噪声电压

16.2.3.4.3.1　试验设备

所用的试验设备如下：

a)　示波器；

b)　差分电压探头；

c)　屏蔽电缆。

16.2.3.4.3.2　设备配置及试验程序

设备配置及试验程序如下：

a)　按图 279 所示配置试验设备；

b)　将电压探头连接在差模噪声电压的两个被测点之间；

c)　在预热足够时间后，测量环境噪声电平，存储测量结果。

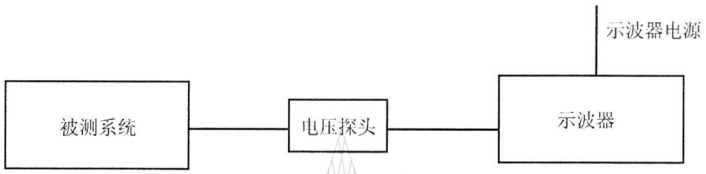


图 279　接地系统差模噪声电压的测试配置

16.2.3.4.4　勘测表格

示例：

设施接地、搭接和屏蔽

设施_____日期_____

地点_____检验者_____

第 1 部分　大地电极分系统

A.　配置(草图或附图)

B.　检查

接地棒的直径和长度	×××	接地导体直径和长度	×××
接地棒结构形式	×××	接地导体结构形式	×××
接地互连电缆尺寸	×××	接地井(有或无)	×××
接地互连电缆埋设深度	×××	接地井(尺寸及类型)	×××

C.　搭接点

总体情况	极好	好	差	不可接受
	×××	×××	×××	×××
具体缺陷	×××			
(也可见第 2 部分：搭接)				

D. 土壤条件

土壤类型	二合土	粘土	砂土	砂砾	岩石
	×××	×××	×××	×××	×××

潮湿情况	干(<5%)	润(5%～20%)	湿(20%～30%)	水饱和
	×××	×××	×××	×××
其他说明	×××			

E. 电阻测量

试验配置的草图(标出电极棒的位置、间距等)。

F. 气候(电阻测量期间)

潮湿情况	潮湿	干燥
	×××	×××
温度℃	×××	

天气	雪	雨	雾	阴	晴
	×××	×××	×××	×××	×××

最近一次降雨(或雪)后的时间	当天	1 天～5 天之前	5 天～19 天之前	多于 20 天之前
	×××	×××	×××	×××

第 2 部分　搭接

A. 一般状态(检查)

极好_____好_____差_____不可接受_____

B. 具体缺陷

搭接位置	缺陷特征
×××	×××

(如果需要，可加附页)

C. 电阻(用微欧计测量，并注明电阻超过 1mΩ 的搭接点)

搭接位置	缺陷特征
×××	×××

(被测搭接点的选择见 16.2.3.4.1)

D. 搭接条(检查结果或缺陷)

位置	材料	长度	接接条(线)尺寸
×××	×××	×××	×××

(如果需要，可加附页)

第 3 部分　雷电防护分系统

A.　配置(草图或工程图纸)

B.　认证

是_____否_____

C.　接闪器

高度	位置	材料
×××	×××	×××
高度是否足以保护设施或天线(1:1 保护圆锥区)	是	否
	×××	×××
是否有烧蚀、凹痕或熔融的迹象(标明位置和特殊的迹象)	迹象	位置
	×××	×××

D.　屋顶导体

电缆尺寸	–	
弯曲半径	＞20cm	＜20cm
	×××	×××
电缆材料	×××	
拐弯角度	＞90°	＜90°
	×××	×××
具体缺陷	位置	缺陷
	×××	×××

E.　引下线

结构件？(　)		独立导体？(　)	
导体尺寸	×××	导体尺寸	×××
结构形式	×××	结构形式	×××
弯曲半径	×××	弯曲半径	×××
弯曲角度	×××	弯曲角度	×××

F. 紧固件和安装附件

位置	缺陷
×××	×××

G. 保护挡板

类型	×××
是否正确搭接	×××
物理状态	×××

H. 在下面注明具体缺陷的位置和特征

位置	缺陷
×××	×××

第 4 部分　故障保护分系统(安全接地)

A. 接地导体

1. 接线图(包括变压器接线和设施第一个供电断路装置(干线断路器)内的中线连接)。

2. 电缆尺寸

(在上述接线图上确定并标明连接所使用的电缆尺寸)

3. 安全地线和接地的中线是否敷设在同一导管中

是_____否_____(若否，记录所有位置及走线)

相接的设备	位置	电缆长度
×××	×××	×××

4. 确定并记录安全地线与大地电极分系统的连接

连接点	位置	电缆的长度和尺寸
×××	×××	×××

B. 设备安全接地(安全网络的示意图或说明)

(在上面线路图(或工程图纸)上注明导线尺寸、连接点、使用的导管、电缆桥架的连接等。)

C. 杂散电流测量

位置	电流读数
×××	×××

第5部分 信号参考分系统

A. 信号接地网络的一般说明(必要时可用草图表示)

B. 鉴别用作信号接地的导线和母线，并记录位置

位置	功能
×××	×××

C. 接地系统内接地点之间的电阻(利用微欧计进行有选择的测量)

测试点	电阻
×××	×××

第6部分 噪声和电流电平

A. 杂散电流测量

测试点或导体	电流电平
×××	×××

B. 噪声电压测量(附上测量结果曲线)

第7部分 屏蔽

A. 现有屏蔽(有意的和附带的)

特征	位置
×××	×××

B. 屏蔽状态

系统或位置	缺陷
×××	×××

C. 电缆和连接器

位置	缺陷
×××	×××

16.2.4 改造指南

根据已核对和修改过的图纸及设施勘查资料可以确定是否有必要对设施进行完善或改造。应将现有接地、搭接、屏蔽及雷电防护网络与第 15 章推荐的实施方法相比较。进行比较时，需特别注意可能与勘测中记录的缺陷直接或间接有关的运行、安装或维护等问题(不管是对系统还是设备)。如果表明需要改进，则应确定改造步骤并估算其成本。如果改造设施的成本是合适的，那就着手进行改造。

下列指南有助于对勘测结果作出评定，也可用以确定改造步骤。这些指南并不适用于所有情况，有些特殊情况并未列入指南，因此，应针对每种情况的具体内容做出判定和处理。

a) 如果测得的大地电极分系统电阻大于 10Ω，则可参照 5.3 或 15.2.2 分析产生高电阻的原因。另外，如有可能，还应查阅过去的大地电阻测量记录，是否有电阻逐渐增加及突然变化的现象。(剔除“零”电阻读数以及其他类似的不合理的阻值时，应检查 16.2.3.3.2 的测量程序是否得到了正确的实施)。检查电阻读数是否与现场的变化(见 15.2.2.4)以及当地的气候条件(见 15.2.2.5)有关系。上述情况都可能使电极电阻增加，需对系统进行改造，以确保达到 10Ω 的要求。

b) 一旦确定产生高电阻的原因，就应根据成本及降低电阻的难易性来确定最合适的方法。典型的可用方法包括采用更多或更长的接地棒、安装水平格栅或导线(见 15.2.3.3)、提高电极周围土壤的电导率(见 5.9)、或者把地井打到常年地下水位。

c) 仔细检查建筑物图纸，以保证设施的所有构件都正确地连接到大地电极分系统(见 15.2.4、15.3.2.3.3 和 15.5)。例如，当建筑物扩建、主要设备增加或重新布置时，大地电极分系统应进行相应扩充，以适应新增区域的需要。扩充部分应符合 15.2.4 的规定。

d) 应尽快修复大地电极分系统的安装缺陷(如接地导体尺寸不符合要求)和维护缺陷(如搭接点及紧固件的松动或腐蚀)。

e) 如果结构物原来未装雷电防护分系统，则应参照 6.8，确定是否需要雷电防护分系统。如果安装新的分系统，就应符合 15.3 的要求。

f) 当结构物安装雷电防护分系统时，勘测期间发现的各类缺陷都应加以修复，例如：
   1) 应当更换严重丧失功能或已损坏的所有接闪器；
   2) 接闪器应按需要重新布置，使它们是结构物中架设最高的物体；它们所提供的 1:1 的圆锥保护区应覆盖天线，但不能影响天线的工作；
   3) 当需要对大地构成更多的直接通路时，应重新布置引下线或增加附加的引下线(见 15.3.2.3)；
   4) 如果不是原先提供的雷电防护网络，则它应当与大地电极分系统的接地线、公用事业管线、设备接地线及建筑物接地线进行互连，以便为所有部分提供共用接地；
   5) 所有已腐蚀及遭受机械损坏的连接件和紧固件应予以更换；
   6) 丢失和严重损坏的保护挡板应当予以添补及更换。

g) 雷电防护分系统应当按照需要予以扩展，以便对超出防护圆锥体的设施扩展部分提供防护(见 15.3.2.2)。

h) 对于曾因雷电造成供电中断的设施，表明在其信号或电源线上需要提供浪涌防护，所以应当为它们安装合适的雷电和浪涌保护器。应确保安装在设备上的防护器能对设备提供足够的保护(见 13.4.3.3)。

i) 查阅设施中的电气接线图，了解电气设备在设施中的布置，以确定骚扰源设备与敏感电子设备之间是否存在直接或间接的耦合通道。可采取的纠正措施有：
   1) 重新布置设备(见 15.9.2)；
   2) 重新分配电气负载，使潜在的干扰设备经单独的馈电线供电；

3） 馈电线应敷设在钢制的导管或电缆槽内，以减少磁场发射；

4） 将敏感设备的信号线重新敷设，使其尽可能远离骚扰源设备的馈电导体。

j） 如有可能，就应弄清各种设备故障现象与已测得的接地导体及信号或控制电缆屏蔽层上杂散电流或电压值之间的相关性。如果上述相关性存在，则应利用第 8 章～第 9 章所列的原理尽可能全面地确定产生这种噪声电压的大致原因。然后，采用 15.5、15.8 和 15.9 所规定的方法，把设施中设备噪声电平减小到可接受的程度。

k） 认真查阅设施图纸，以判别整个设施所采用的信号接地类型。如果维护记录、供电中断报告和操作人员所反映的系统噪声及干扰问题确实是由接地缺陷所引起的，就应当依据第 8 章～第 9 章和 15.5 的内容进行仔细分析。根据分析结果及有关问题的严重性，选择最合适的降噪措施并予以实施。

l） 当屏蔽存在缺陷时，应确定是否需要增加或改进现有屏蔽。如果原先没有屏蔽，应按需要设计和安装屏蔽。有关设计的辅助资料见 15.8.2。如果现有屏蔽由于贯通孔控制不当、搭接或接缝维护不良而使其屏蔽效能有所降低时，应立即采取补救措施（见 15.7～15.8 及 17.3～17.4）。

m） 如果利用结构件作为雷电引下线或电气安全接地导体，应查看所有的连接点是否已有效地搭接（见 15.7.2）。

n） 如果测试的搭接点中有 25%以上的搭接电阻大于 1mΩ（在已采取 16.2.3.3.3 d）所推荐的各步骤后），应当仔细地检查整个设施的所有连接点，并测试其电阻。找出的每一处缺陷都应当按 15.7 列出的推荐方法重新整改。

o） 改造过程中所做的各种变更结果都应在设施图纸上标明。

16.2.5 现有设施的扩建

当工作要求变化时，设施的屏蔽和接地网络必然要相应扩展。在采取扩展措施时，其增添部分应符合现有网络的要求和完整性。对屏蔽区域进行扩建或改造，应保持屏蔽完整性的原有水平。应当特别注意连接器外壳的搭接、滤波器的安装、以及不加控制可能严重降低屏蔽室或其他外壳屏蔽效能的实施方法。

设施扩展之后，应当重新勘测，并修复在安装中有损原网络特性的所有缺陷。复制一份设施维修文件，记录所有勘测结果，以提供维修的原始记录。最后应审查所有图纸，以检查它们是否完整、准确地反映实际安装情况。

16.2.6 现有设施接地向高频的扩展

大多数现有通信设施需要一个附加的等电位接地平面，以满足频率在 30kHz 以上的接地要求。当应同时满足高频和低频要求时，可能需要一个混合接地系统，但在大多数情况下，等电位接地平面足以满足这两类接地要求。

等电位接地平面可安装在地板贴面或地毯下面。如果不便实施，等电位接地平面可架空安装，但应当尽可能将等电位接地平面安装在地板面上或地板中间。在有些情况下，等电位接地平面可以安装在地板下面，经接地连接件穿出地板，与安装在地板上的设备搭接。图 280 是一个架空等电位接地平面的安装例子。

16.3 维护

16.3.1 概述

如果不进行适当的维护，不管是在新设施还是现有设施中，即使是设计完善且安装正确的接地、搭接、屏蔽及雷电防护网络，其性能仍可能迅速变坏。应规定设施的维护周期，在设施的整个寿命周期内，应对接地、搭接、屏蔽及雷电防护网络进行全面、定期的维护。

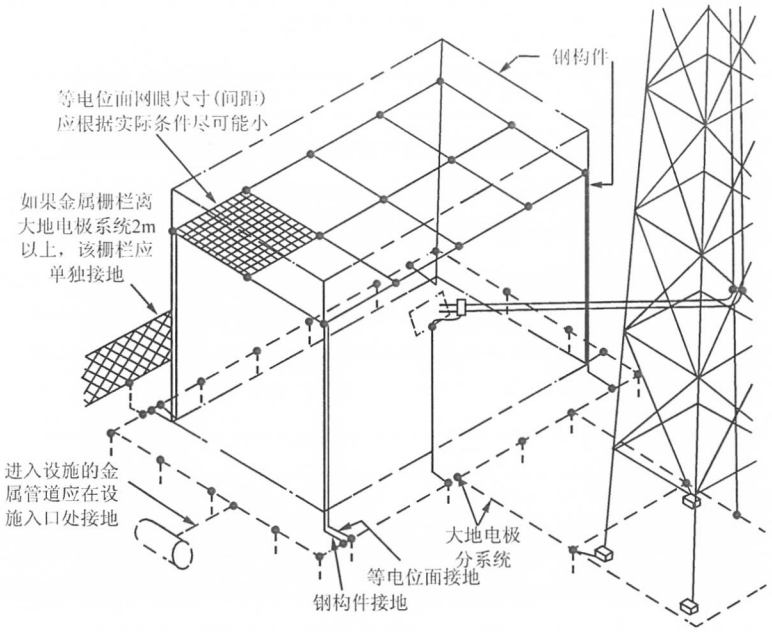


图 280　等电位接地平面与多点接地的例子

16.3.2　维护周期和记录

在新设施中，应把初始检查(见 15.13)作为对设施的第一次维护检查。设施初始检查所提供的结果或数据，是日后检查结果的基础及参考。另外，在设施结构本身、或该结构内的设备或系统进行重大更改或增加后，都应对网络中受到影响的元件或构件进行全面检查。

在使用较久的设施中，如要进行勘测，可考虑按 16.2 的规定进行初始维护检查。在进行勘测之前，应完成设施检查，以确定接地网络、搭接、屏蔽和雷电防护分系统的总体情况。上面所讨论的设施作了重大更改或扩充后，亦应进行一次维修检查。

应当保存按时间顺序编写的所有试验和勘测记录，当发现明显偏离已有记录时，应进行分析，确定其原因并采取必要的修复措施。未满足规定值或推荐值的任何测量结果(即大地电极分系统电阻、搭接电阻、接地网络内点到点的电阻等)都应立即进行分析，决定是否需要返工。

16.3.3　维护程序

16.3.3.1　概述

设施大地电极分系统、雷电防护分系统、信号参考分系统、故障保护分系统以及搭接和屏蔽的维护程序见 16.3.3.2 至 16.3.3.7。在完成这些程序的任何一个或全部之后，还应编制 16.3.4 的设施维护报告，并把报告归为存档的维护文件或和其他辅助资料(如试验结果、照片以及图纸)一起保存。凡是可以立即修复的缺陷(如搭接、跨接线断裂或装错，螺栓或螺钉松动，或其他轻微缺陷)应当立即修复，并在设施维修报告上作相应的记录。主要差异报告(举例见图 281)应说明有关主要缺陷(如大地电极电阻太高、结构件部分超出保护圆锥体以外、信号接地导体上电流电平过大等等)，以表明哪些区域需要作大量的返工或改造。不要将正常维护周期内返修或改造与 16.2 所述的设施全面返修或改造相混淆，除非设施性能降低到不大修不能保持最低性能或可接受的性能，否则，不进行全面返修或改造。

16.3.3.2　设施大地电极分系统的维护程序

16.3.3.2.1　技术资料引用

引用的技术资料：

a)　本指导性技术文件；

b)　大地电极分系统的工程图纸。

主要差异报告

1. 设施_____

2. 地点_____

_____

3. 差异说明_____

_____

_____

4. 检验评语_____

_____

_____

5. 检验人员_____

6. 日期_____

7. 初查结果_____

_____

_____

图 281　主要差异报告表格

16.3.3.2.2　相关的维护程序

相关的维护程序如下：

a)　雷电防护；

b)　故障保护；

c)　搭接。

16.3.3.2.3　适用的测量程序

适用的测量程序如下：

a)　大地电阻测量(见 16.2.3.3.2)；

b)　搭接点电阻测量(见 16.2.3.4.1)。

16.3.3.2.4　试验设备

所用试验的设备如下：

a)　微欧计；

b)　大地电极试验仪器；

c)　30m 卷尺；

d)　摄影机(需要时)。

16.3.3.2.5　试验器材

大地电阻试验仪器用的试验引线(如果仪器生产单位未提供或是买不到)。在需要的引线长度大于生产单位所提供的引线时，应以直径 1.0mm～1.3mm 的导线加长。

如果大地电阻试验仪未配带接地测试棒，则应添置(见 15.2.2.2)。

16.3.3.2.6　程序

维护程序如下：

a)　按照说明书预热设备。

b)　测试大地电极分系统对大地的电阻。如果大地电极分系统设有接地井，而且可以直接接近时，把试验仪器的 C_1、P_1 端子直接连到接地棒或接地电缆；如果电极不能直接接近时，可把 C_1、P_1 像信号接地电缆、电源系统接地导体、雷电引下线或结构体接地连接那样，直接接到接地连接件(见 15.2.4)。

c) 在设施维护报告表格(见 16.3.4)上填写测得的大地电阻值。

d) 检查系统所有可以接近的部分。特别应寻找松动的连接、腐蚀和物理损伤。必要时可拍成照片，以反映问题的性质，也便于进行前后比较及留存档案。对系统所作的变更或改进，如果原无记载，则应加以说明，必要时还得修改图纸。

e) 修复较小的缺陷，如清洁表面、重新紧固或更换连接件及紧固件、重新涂覆防护涂层等等。

f) 主要缺陷应当是主要差异报告所列的内容。主要缺陷修复之后，应当重新检查该设施。

g) 应在测量表格上提供其他需要的资料。把带有辅助数据或文件的测量表格归入设施的归档档案中备查。

16.3.3.3 设施雷电防护分系统维护程序

16.3.3.3.1 技术资料引用

引用的技术资料：

a) 本指导性技术文件；

b) 雷电防护网络工程图纸；

c) 建筑外形设计图纸。

16.3.3.3.2 相关的维护程序

搭接。

16.3.3.3.3 适用的试验程序

搭接电阻试验(见 16.2.3.4.1)。

16.3.3.3.4 试验设备

试验设备如下：

a) 微欧计；

b) 摄影机(需要时)。

16.3.3.3.5 程序

维护程序如下：

a) 根据 16.2.3.3.4 进行。

b) 检查结构物及天线的所有构件，以确保防护圆锥体足够有效(见 15.3.2.2)。注明结构物外部增加的任何部件，确认所有增加部件不超出已确定的保护圆锥体。

c) 对整个雷电防护分系统进行全面的检查。在设施维修报告表格的第 2 部分注明所有缺陷。完整的主要差异报告中还应记录检查期间所有无法修复的缺陷。

16.3.3.4 设施搭接维护程序

16.3.3.4.1 技术资料引用

本指导性技术文件。

16.3.3.4.2 相关的维护程序

无。

16.3.3.4.3 适用的试验程序

搭接电阻测量(见 16.2.3.4.1)。

16.3.3.4.4 所需要的试验设备

所需要的试验设备如下：

a) 微欧计；

b) 摄影机(需要时)。

16.3.3.4.5 程序

维护程序如下：

a) 根据 16.2.3.3.3 进行；

b) 在设施维修报告的第 3 部分记录检查和测量的结果。附上辅助资料，如照片、草图等；

c) 所有无法修复的缺陷应列入主要差异报告。

16.3.3.5 设施安全接地(故障保护)分系统维护程序

16.3.3.5.1 技术资料引用

本指导性技术文件。

16.3.3.5.2 相关的维护程序

相关的维修程序如下：

a) 大地电极分系统；

b) 搭接。

16.3.3.5.3 适用的试验程序

搭接电阻测量(见 16.2.3.4.1)。

16.3.3.5.4 所需要的试验设备

所需要的试验设备如下：

a) 微欧计；

b) 钳式交流电流表；

c) 摄影机(需要时)。

16.3.3.5.5 程序

维护程序如下：

a) 根据 16.2.3.3.5 进行；

b) 抽查电源插座的电阻测量值和安全接地线上杂散电流的测量值，以确认电源插座上的接地端子已与设施接地系统正确连接，接地导体上也无杂散电流流通(见 15.4.6 和 17.2.2)；

c) 在设施维护报告的第 4 部分记录检查的结果：所测得的杂散电流电平和接地电阻值；

d) 所有主要缺陷应列入主要差异报告。

16.3.3.6 设施信号参考(信号接地)分系统维护程序

16.3.3.6.1 技术资料引用

本指导性技术文件。

16.3.3.6.2 相关的维护程序

搭接。

16.3.3.6.3 适用的试验程序

适用的试验程序如下：

a) 搭接电阻测量(见 16.2.3.4.1)；

b) 接地系统噪声电流测量(见 16.2.3.4.2)；

c) 差模噪声电压测量(见 16.2.3.4.3)。

16.3.3.6.4 所需要的试验设备

所需要的试验设备如下：

a) 微欧计；

b) 50MHz 示波器；

c) 示波器用差分电压探头；

d) 示波器用钳式电流探头。

16.3.3.6.5　所需要的器材

与示波器探头配套使用的同轴电缆。

16.3.3.6.6　程序

维护程序如下：

a)　按照 16.2.3.3.6 和 16.2.3.3.7 进行；

b)　在设施维修报告的第 5 部分记录检查和测量的结果；

c)　按要求填写主要差异报告。

16.3.3.7　设施屏蔽维护程序

16.3.3.7.1　技术资料引用

本指导性技术文件。

16.3.3.7.2　相关的维护程序

搭接。

16.3.3.7.3　适用的试验程序

搭接电阻测量(见 16.2.3.4.1)。

16.3.3.7.4　所需要的试验设备

微欧计。

16.3.3.7.5　所需要的器材

无。

16.3.3.7.6　程序

维护程序如下：

a)　检查电磁及人身防护的屏蔽体是否保持了屏蔽的完整性，并进行了接地和搭接处理(见 16.2.3.3.8)。有关设计程序及工程材料等资料见 15.8.3 和 15.8.5。

b)　完成 16.3.4 设施维修报告的第 6 部分。

c)　按要求填写主要差异报告。

16.3.4　设施维护报告

示例：

设施_____日期_____

地点_____检查人员_____

第 1 部分　大地电极分系统

A.　电阻测量

试验配置草图(标明测试棒的位置、间距等等)。

(在附页上列表填写电阻读数的原始数据)

B.　电阻_____Ω(电位降法)

(注意 16.2.3.3.2 给出的注意点)

C. 天气

潮湿情况	潮湿			干燥	
	×××			×××	
气温℃	×××				
天气	雪	雨	雾	阴	晴
	×××	×××	×××	×××	×××
最近一次降雨(或雪)后的时间	当天	1 天～5 天之前	5 天～19 天之前	多于 20 天之前	
	×××	×××	×××	×××	
土壤湿度的一般情况	干	湿润	水饱和		
	×××	×××	×××		

D. 上次测量以来的月数_____

E. 上次测量值_____

F. 与上次测量值比较：降低_____升高_____相同_____

G. 检查清单

检查项目	初查情况
检查所有可以接近的搭接及连接点有无松动、腐蚀和物理损伤。	×××
在供电断路装置与大地电极分系统之间的接地导体上测得的杂散电流(电流读数_____)。	×××
检查上一次检查以来所进行的扩充或改动，并修改现有图纸。	×××
全面检查设施现场有无变动(如植被、道路、停车场、坑道、排水设施等)，这些变动势必引起大地电阻的变化。在下面检查结论中注明这些变动。	×××

检查结果或勘测值		
位置	状态或缺陷	采取的修复措施
×××	×××	×××
总体意见：	×××	

第 2 部分　雷电防护分系统

A. 保护圆锥区

状态	初始检查
与原先的检查结果相比无变化(设施及天线所有构件都在 1:1 的防护圆锥区内)。	×××
虽经扩充但仍在保护圆锥区内(修改图纸，标明扩充部分的位置)。	×××
雷电防护分系统需要扩展，以求把新扩充部分纳入保护区。	×××

B. 检查清单

状态	初始检查
检查接闪器有无烧蚀、剥落或熔融迹象。	×××
检查引下线和紧固件有无烧蚀或熔融。	×××
检查屋顶导体、引下线和搭接条有无断裂、变形或严重损伤。	×××
查找需要加装搭接条或火花放电器的闪络或击穿的痕迹。	×××
检查有无腐蚀或松动的连接器和紧固件。	×××
确保不出现铜与铝的接触，但订购方同意的通过双金属连接件连接除外。	×××
确保引下线的所有保护挡板都已就位，并且没有严重机械损伤。	×××
确保所有保护挡板的两端都已搭接到引下线。	×××
在下面记录所有的缺陷	
位置	缺陷	采取的修复措施
×××	×××	×××
附加检查意见：×××		

第 3 部分　搭接

A. 总体状态(检查)

极好_____良好_____差_____

B. 电阻测量

(记录所有搭接点上测得的电阻。对于测量值大于 1mΩ 者，按 16.2.3.3.3 步骤 d)处理)。

搭接的位置	采取的修复措施
×××	×××

C. 缺陷

位置	状态或缺陷	采取的修复措施
×××	×××	×××

第 4 部分　故障保护分系统(安全接地)

A. 检查清单

项目	初始检查
检查所有电气/电子设备的安全接地，检查导线尺寸是否符合要求。	×××
现场检查所有安全接地线的连接点是否出现松动和腐蚀。	×××
检查内部设备、开关盒和配电板位置上的中线是否未接地；中线在第一个供电断路装置中脱开后对地电阻是否大于 1MΩ。	×××
检查第一个供电断路装置上的接地连接，接地连接是否是牢固且未受腐蚀的。	×××
全面检查电气支撑结构的连接点或搭接点是否有松动及腐蚀的迹象。	×××
检查地线是否在第一个电源断路开关处互连后接大地。	×××
在下面记录所有的缺陷	
位置	缺陷特征	采取的修复措施
×××	×××	×××
×××	×××	×××

B. 杂散电流测量

位置	读数
×××	×××
×××	×××

第 5 部分 信号参考分系统接地

A. 检查清单

项目	初始检查
外观检查信号参考分系统，看其是否符合规定。	×××
检查设备信号接地端子及等电位接地平面上的连接有无松动和腐蚀，并采取修复措施。	×××
检查自上次检查以来是否增添或重新安置任何新的设备，如有新设备，检查连接电缆是否符合要求。	×××
确认标识和保护盖板已经就位、并无严重损伤。	×××
检查设备接地电缆规格是否恰当，有无物理损伤，连接端头的搭接是否正确。	×××

记录所有的缺陷		
位置	缺陷	采取的修复措施
×××	×××	×××

B. 接地系统中点到点的电阻：

试验点	测得的电阻
×××	×××

C. 附上接地系统的噪声勘测结果。将此结果与以前检查期间所获得的结果仔细比较，检查电压和电流电平有无明显的变化。

第 6 部分 设施屏蔽(指定的射频屏蔽结构)

A. 检查清单

项目	初始检查
检查人身防护用挡板的机械强度及损伤痕迹，对金属挡板，还应检查其接地是否正确。	×××
确认高压设备周围的所有屏蔽物上都已正确设置了标识。	×××
检查电磁屏蔽搭接是否可靠。	×××
检查自上一次检查以来所有电磁屏蔽层上是否增加了孔洞或开口。查看这些开口是否用网栅或盖子正确地覆盖。	×××
对于进入屏蔽区域的电源线和信号线，应检查其滤波器周边是否正确地接地。	×××
检查电缆屏蔽层引线是否过长。	×××
检查射频连接器的密封性，查看有无腐蚀或物理损伤的迹象。	×××
确保所有穿透射频屏蔽层的接地导体周边都与屏蔽层搭接。	×××

B. 记录所有缺陷

位置	缺陷	采取的修复措施
×××	×××	×××

16.3.5 性能评定要点

16.3.5.1 目的

对本指导性技术文件中所列出的接地、搭接和屏蔽实施方法提供检查清单和要点。

16.3.5.2 引用文件

本指导性技术文件。

16.3.5.3 接地、搭接和屏蔽的评定

对接地、搭接和屏蔽的评定主要应由在接地、搭接和屏蔽领域中有资质的评审人员通过外观检验来完成。下面给出了检查清单。检查清单要求回答“是”或“否”。对于符合要求的接地、搭接和屏蔽，在清单中填写“是”，用“√”表示，不符合要求的填写“否”，用“×”表示。下面清单所填结果以合乎要求的台站评定结果为例。测量大地电极电阻的试验程序见第 5 章。测量交流电流的钳式电流表，其最低量程满刻度为 6A，测量搭接点电阻的微欧计应能测出 1mΩ。此外，还需要一个能测量 1MΩ 的绝缘电阻测试仪。

接地、搭接、屏蔽性能判定检查清单：

示例：

性能判定要点

接地、搭接、屏蔽

评定台站_____日期_____

项目	是	否
大地电极分系统的对地电阻小于 10Ω 吗?	√	–
雷电引下线是熔焊或硬钎焊到大地电极分系统的吗?	√	–
进入设施的地下金属管道是否搭接到大地电极分系统?	√	–
是采用电位降法测试大地电极分系统吗?	√	–
试验数据有效吗?	√	–
电源系统有一个独立的接地导体(安全地线)吗?	√	–
相线和中线是否与安全地线一起敷设?	√	–
是否用导管替代了独立的接地导体?	–	×
所有非载流金属件是接地的吗?	√	–
所有主要金属结构件是电气连续并接地的吗?	√	–
所有金属管道、导管和支撑件是电气连续并接地的吗?	√	–
所有电气支撑结构物是电气连续并接地的吗?	√	–
交流中线只是在供电引入板上接到大地电极分系统吗?	√	–
在安全地线或信号参考网络中有交流电流吗?	–	×
所有的发电机都接地吗?	√	–
各发电机的机座都是接地的吗?	√	–

各发电机的中线是集中连接在一起后再通过单根引线接地到大地电极分系统的吗?	√	－
所有交流插座的接地端是通过安全地线连接到设施接地系统的吗?	√	－
每个直流电源系统中有一根线是接地的吗?	√	－
在电源端或负载端单点接地的吗?	√	－
设施有防雷措施吗?	√	－
所有天线都在 1:1 的保护圆锥区内吗?	√	－
雷电防护分系统的引下线有弯曲半径小于 20cm、弯曲角度不到 90° 的折弯吗?	－	×
在雷电防护引下线四周 1.8m 范围内的所有金属件已搭接到引下导体了吗?	√	－
在雷电防护分系统各单元之间的所有搭接点是熔焊、硬钎焊，或通过专用夹箍紧固的吗?	√	－
天线塔有大地电极分系统吗?	√	－
天线塔与建筑物的大地电极分系统搭接了吗?	√	－
杆塔上的引下线在基座处与杆塔搭接了吗?	√	－
引下线在金属导管内走线吗?	√	－
如为金属导管，导管的每一端都搭接到引下线吗?	√	－
波导是在：(1)靠近天线处；(2)垂直至水平的过渡段；(3)在波导输入口接地的吗?	√	－
所有扶手、梯子、楼梯、天线底座和人员可能触及的其他物体接地了吗?	√	－
在进入到设施入口点处的电源线安装浪涌保护器了吗?	√	－
电缆屏蔽层在每端都是接地的吗?	√	－
所有搭接点是否呈现出腐蚀的痕迹?	－	×
所有用螺栓或螺纹紧固的搭接点都有足够的扭紧力矩吗?	√	－
搭接点两侧是否呈现高电阻?	－	×
承受雷电或电源故障电流的搭接点是用的软焊料连接的吗?	－	×
搭接采用了 C 形夹或弹簧夹吗?	－	×
搭接区的外观清洁吗?	√	－
每个组件和插箱正确地搭接地到机架、机箱或机柜了吗?	√	－
电缆连接器安装合适吗?	√	－
同轴电缆的屏蔽层正确紧固了吗?	√	－
电缆屏蔽层辫线长度短于 2.5cm 吗?	√	－
屏蔽外壳保持了层蔽的完整性吗?	√	－
贯通屏蔽体的接地导体与屏蔽体搭接了吗?	√	－
在导线走线和布局时，电源线及高电平信号线与低电平信号线分开了吗?	√	－
低频接地网络需要吗?	√	－
高频接地网络需要吗?	√	－
低频网络安装了吗?	√	－
高频网络安装了吗?	√	－
等电位接地平面搭接到设施的大地电极分系统了吗?	√	－
等电位接地平面各点之间的电阻是否都进行了测量?	√	－
在 15A 和 20A 的通用电源插座上是否安装了接地故障断路器?	√	－

16.4　现有保密信息处理设备(红/黑设备)的接地考虑

16.4.1　概述

本指导性技术文件的前几章规定了设施或系统中非保密部分(黑色设备)的接地、搭接和屏蔽实施方法。虽然黑色设备接地分系统是整个设施基本接地系统的组成部分，但应为处理保密(红色)信息的设施设计专门的补充接地。下面阐述红/黑设备接地分系统所必需的一些要求。

16.4.2　现有设施

过去，通信设施的设计和安装，是把红色设备与黑色设备接地系统相互隔离，如图 282 所示。这两个系统一般按单点或树状接地网络进行安装。虽然这些系统通常不符合 15.6 的要求，但它们仍将在现有设施中继续使用。所以，给出这些系统的信息只是出于维护考虑。在新建或加固改进的保密信息处理设施中不再安装单点信号接地系统(不管是红色或黑色系统)。所有主要建筑物或设施的升级应包括信号参考分系统的改造，例如等电位接地平面的使用。现有建筑物扩建时，应在建筑物新建部分按照规定设置等电位接地平面，并将其连接到现有系统。

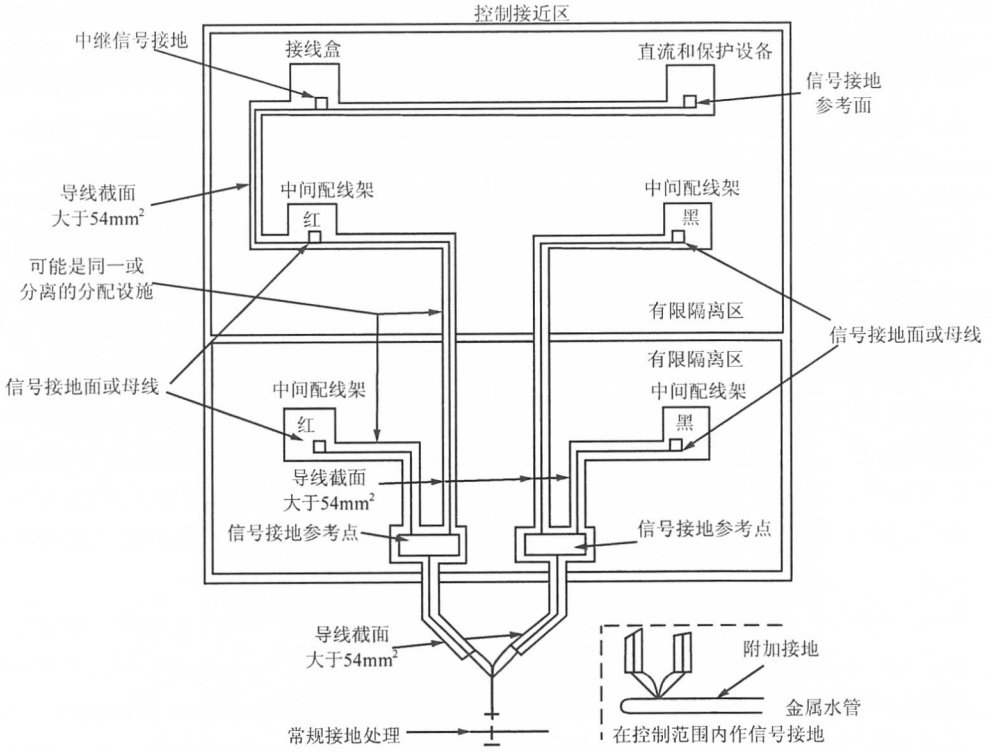


图 282　典型的分区接地配置(单点接地网络)

16.4.3　保护接地

信号参考分系统接地的方法有许多种，这应视系统内设备的类型、数量、配置方式以及信号电平和设施的位置而定。这些方法除提供一般参数之外，还给出接地系统的基本思路，这里的接地系统在保障必要的系统安全性的同时，还应确保其相关的信号电路有足够的信噪比。本指导性技术文件的目的在于减少或消除有限隔离区内接地点的数量。在有限隔离区内，红色设备区的有色金属屏蔽体或信号接地导体，除了与配电设施或有限隔离区内交流故障保护分系统的结构件(包括设备外壳、管道、导管、机架、面板)接触外，不再在其他地方有连接。上述措施有助于降低有限隔离区内交流故障保护分系统上的泄漏发射。然而，库存或现有的许多设备在结构上已无法将交流故障保护分系统与信号参考分系统完全分开。交流故障保护分系统由几部分构成(见图 240)，其主要目的是确保整个设施中人身和设备的安全。故障保护接地分系统包括以下两部分：

a) 交流系统的金属构件：设施交流配电分系统(故障保护分系统的一部分)的金属构件包括所有设备的外壳、机柜、机架、管道、导管(钢性或柔性的电工金属管)、金属网地板、专用电源配电板、主电源配电板、以及配电架等，将这些构件在电气上互连成一体后再连接到交流故障保护接地分系统或大地电极分系统上(见图 240)。系统的电连续性是通过金属与金属的直接接触实现的。

b) 安全接地导线：在设施常规交流配电或故障保护分系统的金属构件内部，还有一条连续的安全接地导体，因此设施中设备运行所需要的交流电源，将受到完善的双重故障保护。这种安全接地导体将由接地电极或第一个供电断路装置的配电板连接到有限隔离区和控制接近区内所有设备的每个壳体上(见图 240)。这里的安全地线既没有“TEMPEST”的含义或工程技术问题，也与信号参考分系统没有关系。

16.4.4 信号参考分系统

在旧的红/黑准则中，信号参考分系统称作信号接地系统。这种参考分系统由多个部分组成，它们使台站的所有信号在电气上都以同一点作参考(见图 282)。旧的信号接地系统由下列几部分构成：

a) 信号接地点：是整个控制接近区内红色和黑色信号接地导体集中连接的点。

b) 信号接地参考点：在大型设施中，某些有限隔离区内可能需要几路红色或黑色信号接地导体连接到信号接地点。对含有多个有限隔离区的设施，为了减少与实际信号接地点相连馈线的数量，可以建立信号接地参考点，以便为控制接近区或有限隔离区内的接地提供灵活性。红色和黑色接地导体可能合用同一个信号接地参考点，但是在大多数情况下，采用独立的红色及黑色信号接地参考点。信号接地参考点应当设置在控制接近区或有限隔离区内各个子隔离区的中心点上。对信号接地参考点的位置也应认真规划，以保证它与信号接地点或大地电极分系统实现最直接的连接。

c) 信号接地面：有色金属屏蔽体与供电系统中公共接地线的集结点，通常采用铜排，安装在主电源配电架、中间配线架或红色信号中间配线架的内部、旁边或附近，但与它们绝缘。信号接地面将通过一条粗的绝缘导线(信号接地导体)与信号接地点或信号接地参考点相连接，此绝缘导线应安装在金属的接线盒或管道中且截面积不小于 54mm^2。用于红色和黑色系统的信号接地面，彼此不能通过信号接地导体直接相连。只有在最终与信号接地点或信号接地参考点相连接的那一点，相互独立的红色和黑色信号接地导体才有公共连接点。

d) 信号接地参考面：为端接诸如数字通信设备或数字终端设备等红色或黑色设备线路建立公共连接点，但不能将红色和黑色设备连接在一起。信号接地参考面应与交流保护接地的接地导体或母线相隔离。使用时，应将信号接地参考面连接到最近的相应的信号接地面上。

e) 信号接地母线：主电源配电板、中间配线架或密码配线架内的接地母线，用作信号和控制电缆有色金属屏蔽体与接地系统的连接点。屏蔽接地母线安排在配线架所有垂直和水平端接板的后面(见图 237、图 238 和图 283)。屏蔽接地母线系统由一排端接有色金属屏蔽体的绕接端子(Φ0.64mm)和一根绝缘导体构成。该绝缘导体将绕接端子与水平和垂直端接板背面的绝缘铜接地架配线电缆(信号接地面)相连。此绝缘导体应通过硬钎焊连接到配线架附近的信号接地面。如果信号接地母线到信号接地面之间采用搭接线跨接，则所用绞线的截面积不应小于 10mm^2。

f) 其他保护接地：信号接地是一种受控的接地方法。应当知道，一个接地系统并非总是可以纳入某个控制区域的。在这种情况下，应考虑采用其他替代措施。虽然水管有其局限性，但它仍被用作简单的接地点。另一种情况是对于一些旧的密码设备(见图 284 和图 285)，如果无法将接地导体连接到该设备时，则可将其外壳作为接地点。有时，密码单元电源板上安全地线的接地点也可用作信号接地，如图 285 中的 A 所示。

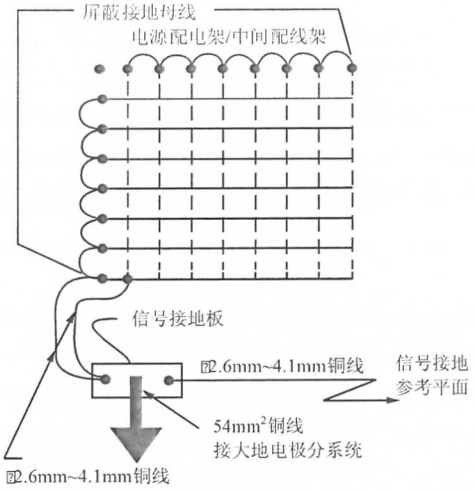


图 283　典型的信号线屏蔽层接地母线及其单点接地配线系统

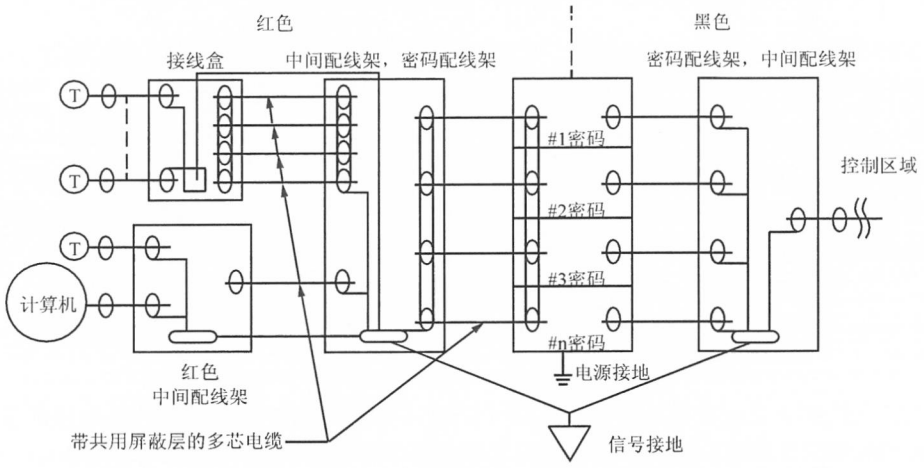


图 284　典型的设施接地系统(单点接地网络)

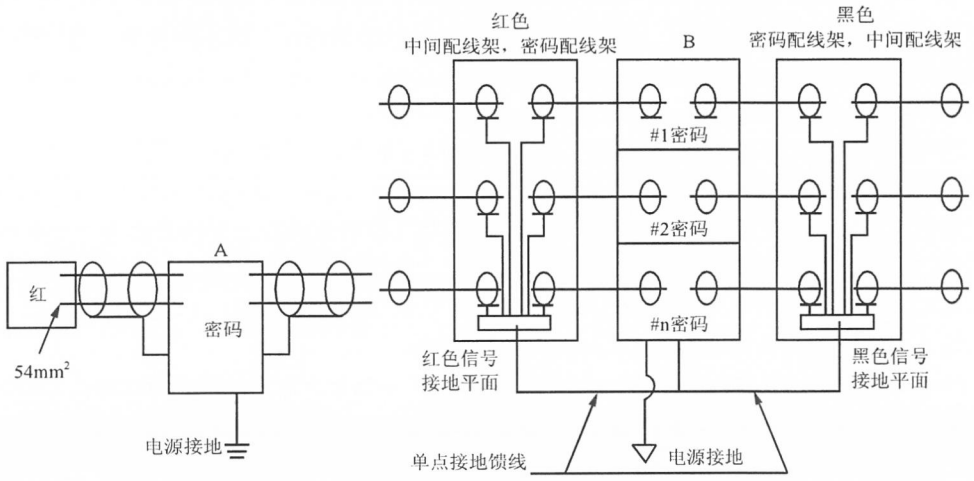


图 285　密码设备接地系统(单点接地网络)

16.4.5 信号滤波器接地

为了减少由滤波器外壳与大地接地之间阻抗过高引起的滤波器插入损耗特性的衰退，可将滤波器直接安装在接地参考面上，然后再将此接地面连接到信号接地点。如果滤波器不能安装在接地参考面上或设备底板上(此底板通常可提供一个有效的接地面)，则应特别注意为滤波器外壳提供可靠的接地。推荐采用屏蔽电缆作滤波器外壳的输入线；屏蔽电缆应通过同轴型连接器接到滤波器，其屏蔽层则可借助连接器壳体固定到滤波器外壳上，不允许采用“猪尾式”连接。另外，还可用粗的编织带把滤波器外壳接到接地点。

16.4.6 接地注意事项

在安装时，设备、机柜、机架或管道应尽可能避免与非毗邻控制接近区内墙壁或地板上性质不明的导体发生偶然接触。此外，除非特别要求，壳体不作绝缘处理。在需要绝缘处理时，具体情况具体分析。台站信号接地布线系统的所有组成部分，都应置于控制接近区或控制区域内。应进行定期检查，以确保安装在控制区域内的信号接地系统在其全寿命周期内都处于有效和良好的工程运行状态。

17 设备设计准则

17.1 概述

本章给出在设备设计和组装中推荐采用的接地、搭接和屏蔽实施方法，这些方法涉及从电路板设计到机柜内安装过程的各方面。本章还给出一套检查和试验程序，用以考核设备设计和组装中所采用的接地、搭接和屏蔽方法是否合适。设备设计时，除采取一般的干扰和噪声控制措施之外，应特别注意接地、搭接和屏蔽，以使配备有该设备的系统能兼容运行。在设备或系统的制造、安装和运行期间，仍然应保持上述技术要点的延续性。例如，在制造期间，除了应特别注意电缆走线、电缆连接器的挑选和安装、信号和接地导线的选择之外，同时对设备内所有搭接点也应认真处理。安装设备时，原设施接地网络(此网络的详细说明见 15.5)的配置和屏蔽的完整性不应受到影响。同样，在设备运行期间，设施内的接地网络和屏蔽体的性能不应降低。比如，不应为了改善设备工作性能而随意更改接地连接方式，甚至不考虑这种更改对整个系统所带来的影响。上述建议对于设备内部和设备外部进行的接地方式更改同样重要。

对基本的人员安全也应采取防护措施，除了防止工作人员偶然触及带有危险电压的金属零件之外，还应采用适当的屏蔽体或遮挡物防护，以免设备暴露于电离或非电离型的辐射危险之中。此外，应对内部的电源线故障提供防护。具体防护措施是安装足够粗的接地导体，并且在设计中配置规格合适的保险丝或断路器。在电源线、信号线和控制线上应配备过电压和过电流保护。各种方法可以单独使用，也可组合起来使用，以提供相应的防护。根据下面的方法进行有效地接地、搭接和屏蔽，是实现上述防护要求的重要因素。

17.2 接地程序

17.2.1 信号接地

17.2.1.1 概述

对于设备内的接地应与对待放大器的设计、滤波器与元件的选择以及结构布局等一样重视。第 8 章介绍的信号接地基本原理和第 15 章推荐的设拖接地方法亦适用于较小的对象。在设备设计中所用的接地技术和方法，应确保在设备内部的信号参考点或参考面与其他设备的信号参考点或参考面连成整体时，不致降低该独立单元或整个系统的信号接地系统性能。

基本的信号接地点和接地面是设备可靠而又无干扰运行的重要条件。遗憾的是理想接地面是不存在的，在不同接地点之间总会有一些电位差。下面介绍在高频和低频设备中减少这种电位差的技术和程序。

17.2.1.2 低频设备

17.2.1.2.1 信号接地网络的配置

在低频设备，即工作于 30kHz 或更低频率的设备中，应采用单点信号接地网络。设备内部所建立

的低频信号参考点或参考面应与设备外壳隔离。共电源系统一般设计成连接到底板或机柜的单点接地系统，而底板或机柜又连接到直流电源的一根母线上。单点接地系统既应与结构物隔离，又应与其他低频设备和系统的机架和机柜隔离。共电源系统与其他设备和系统之间的所有互连线应尽可能是平衡的。屏蔽接地必须有所选择，以确保所希望的隔离。设备内部电路的功能要求决定了在建立单个参考点和参考面时所应采用的实际方法和技术。由于设计要求变化范围很广，最终选择应由设计者确定，为此，设计者应全面熟悉第 8 章和第 9 章所介绍的基本设计原理。

17.2.1.2.2 信号接地接线端

信号接地接线端的设计准则如下：

a) 在每一台设备的外壳上，应如图 286 所示配置一个与外壳绝缘的信号接地端，以便为设备内部的信号参考点提供一条到设施低频接地网络的互连通路。

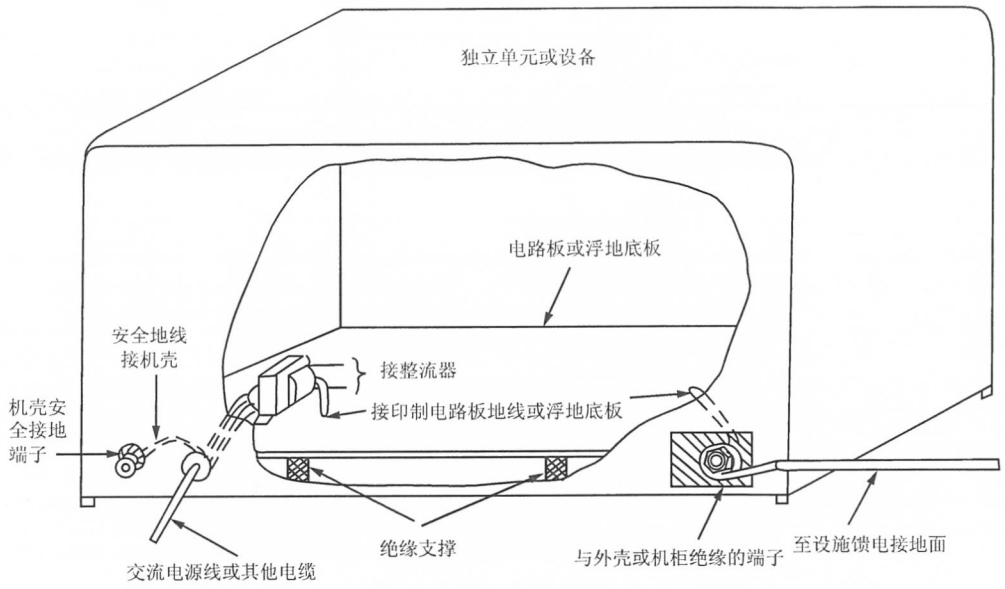


图 286 低频设备的接地

b) 接地的接线端可以是连接器内的一个插针、接地条上的一个螺钉或一个插针、带绝缘套的接线柱、插座或馈通装置。如果采用带绝缘层的铜导线，为提供足够的机械强度，导线横截面积不应小于 1.5mm^2，长度不应超过 1.5m。如果为了连接设施的低频信号接地网络需要更长的导线时，那么应加大导线的直径。可根据下面方法计算所需的导线横截面积。

所需的截面积(mm^2)等于所需走线长度(m)×0.85mm^2/m。

例如，若所需的导线长度为 3m，则所需的导线最小横截面积为：

$$3\text{m}\times 0.85\text{mm}^2/\text{m}=2.55\text{mm}^2$$

选 4mm^2 的导线更合适。

c) 当带绝缘层的接地导线贯通金属板(如设备外壳)时，应用橡胶衬圈、塑料套管或其他防护零件提供足够的物理防护，确保浮地底板与设备外壳或机柜之间的完全隔离。

17.2.1.2.3 颜色标识

为了将信号接地端子与设备的其他接线端相区别，信号接地端子应用标牌或颜色标识作出清晰的标记。

17.2.1.2.4 机柜汇流母线

机柜汇流母线的设计准则如下：

a) 对于装有两台或多台独立低频设备机架和机柜，应配置一条与机架或机柜绝缘的接地母线。

b） 利用搭接条把每个设备单元的信号接地端子连接到信号接地汇流母线，如图 287 所示。为了获得足够的机械强度和低阻抗通路，在信号接地汇流母线和每个设备单元信号接地端子之间应用宽的扁平铜条或铝条搭接。也可采用截面积不小于 1.5mm^2 的铜导线搭接。搭接条应加绝缘防护套，或采用其他方法隔离措施，以免它与设备外壳、机架或机柜相接触。

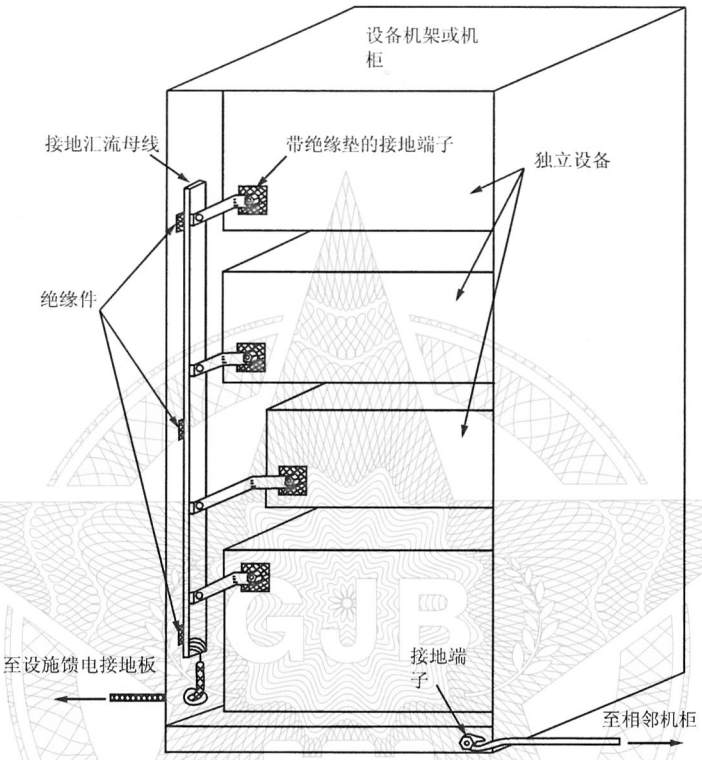


图 287 机架或机柜中低频信号接地母线的安装

17.2.1.2.5 隔离

信号接地网络的隔离要求如下：

a） 低频设备中的信号接地网络从设计到装配都应保证此接地网络和设备外壳之间有完整的电气隔离(见图 286)。例如，印制线路板的信号接地线不能接于底板。另一方面，如果设计者确认金属底板可用作低频电路的信号参考点而不致产生干扰问题，并且确实又希望这样做时，底板应采用绝缘衬垫或支座安装，使其在设备外壳内呈浮地状态。应仔细地进行设备结构设计，确保螺钉和紧固件不致破坏这种隔离。

b） 各种控制、读数和指示装置，保险丝和浪涌保护器、监测插孔，以及信号连接器的安装方式，应保证不破坏上述隔离。交流电源线的初级和次级都应与低频信号接地系统及设备外壳隔离。凡是人员能触及的设备金属部分，应用安全地线接地。

c） 为检验浮地隔离性能，可测量设备接地端子和外壳之间的电阻、机柜接地母线和机柜框架之间的电阻、以及交流电源的每根馈线和设备外壳之间的电阻，每次的测量值都应大于 1MΩ。在进行这些测量之前，务必首先断开外部的电源线和所有互连电缆。

17.2.1.2.6 信号互连线

信号互连线的设计准则如下：

a） 低频设备互连的优先办法是采用平衡线。所有信号输入和输出线相对于信号接地点都应是平衡的。这些设备之间的信号接地通路如图 288 所示，采用屏蔽的平衡扭绞双线连接。扭绞应尽可能地扭紧，对于较细的导线希望做到每米扭绞 60 次。

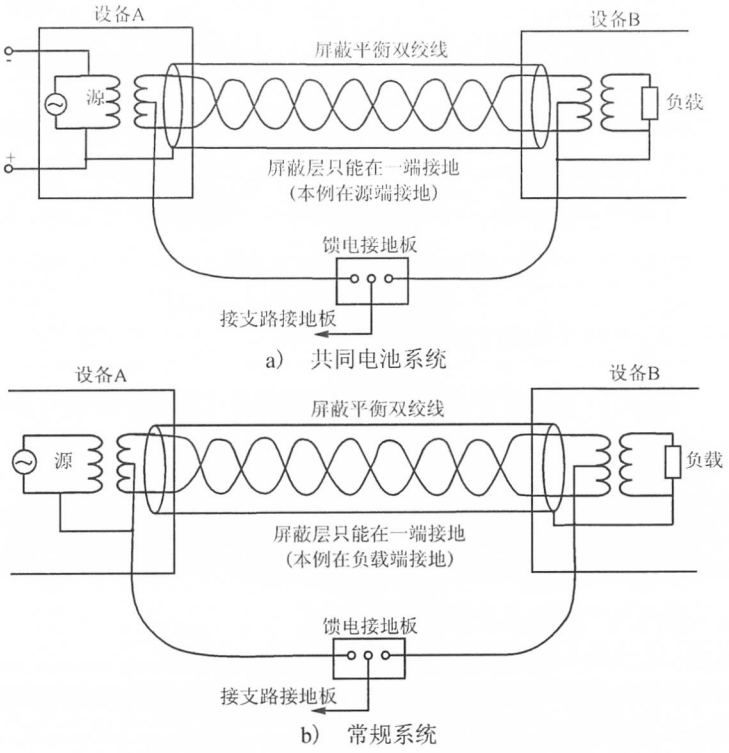


图 288 用平衡线防止形成地环路

b) 在应采用不平衡信号线的场合，信号回线应在一端接地，不应将两端同时接地(见图 289)。应事先确定信号线是在源端(激励端)还是在负载端(接收端)接地。在复杂的装备中往往会碰到如何实现的问题，例如：某些设备对一个信号电路是负载，但对另一个负载又是源，如图 290 所示。在这种情况下，虽然每根线仅在源端或负载端接地，但单点接地仍将被破坏。绝大多数现代的电子装备极为复杂，加之分布范围广，即使在不扰乱设施低频信号接地网络的情况下实现了不平衡连接，但设备进一步扩展或改造时，也未必能保证其单点接地。因此，设备应设计得既能在源端，也能在负载端与地隔离。

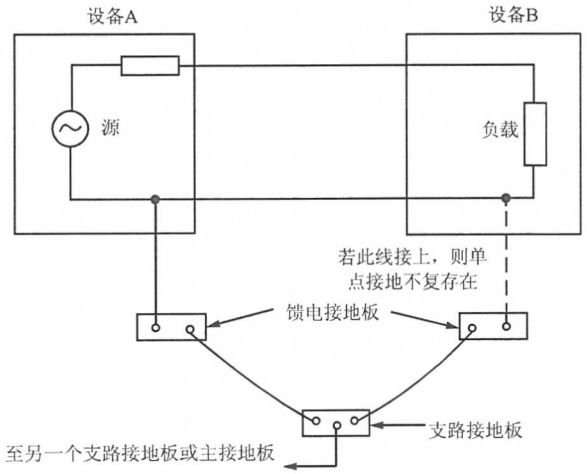


图 289 不平衡电缆对单点接地的影响

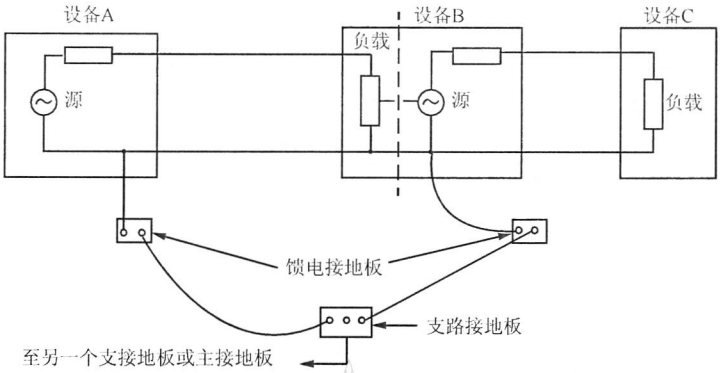


图 290　设备两根不平衡互连电缆都在源端随意接地的影响

17.2.1.2.7　屏蔽层的接地(仅适用于黑色设备)

屏蔽层的接地设计准则如下：

a)　低频信号线的屏蔽层只能在一端接到设备内的信号接地网络，如图 288 所示。接地连接可以在源端或负载端进行，一般情况下，按下列方法处理。

1)　敏感数据线的屏蔽层在负载端接地；

2)　高电平[6)]信号线的屏蔽层在源端接地；

3)　高阻抗直流信号源(如应变仪，热电偶等)引出线上的屏蔽层在源端接地。有关数据检测系统屏蔽接地的详细情况见 17.5.2。

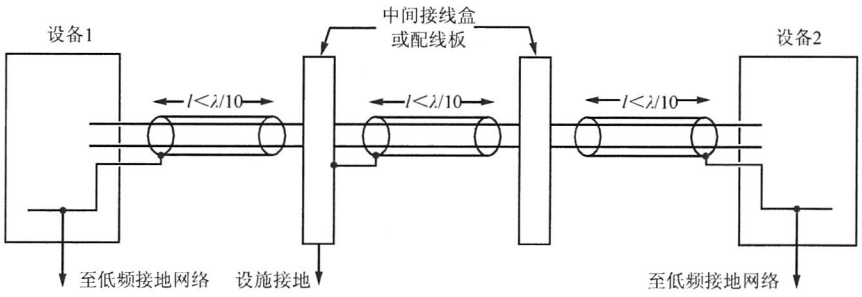
b)　同一电缆束内所有低频信号线的屏蔽层应互相绝缘，以减少交叉耦合。另外，上述各个屏蔽层还应与整个电缆束的屏蔽层、设备底板和外壳、接线盒、导管、电缆桥架以及设施接地系统的所有其他元件相隔离。电缆比较长时，应特别注意保持非接地端的隔离，包括整个电缆走线上所有中间连接器屏蔽层之间的隔离。

c)　在端接设备中，各低频信号线的屏蔽层可以通过独立的插针引入外壳或机柜内，也可以接在一起后用共用连接器内的一个插针引入(或引出)，采用哪一种方法取决于相关设备的特性。如果采用共用插针的方式，仍然应遵循单点接地原则。建议低电平信号屏蔽层使用一个插针，而高电平信号线使用另一个插针。上述各屏蔽层都应端接于低频信号接地网络。总屏蔽层的接地方法见下面 g)～i)。

d)　在屏蔽层剥开处到连接器插针之间的辫线应尽可能短。

e)　对于个别的信号线屏蔽层在某一端接地而其他导线的屏蔽层在另一端接地的多芯电缆，应特别注意防止屏蔽层在两端同时接地。

f)　如果由于屏蔽层长度大于临界频率波长的 1/10(即 $\lambda/10$)而引起敏感度或辐射发射问题(见 9.2.3.5)，可以将屏蔽层按图 291 所示的方式分段，每一屏蔽段仅在一端接地。



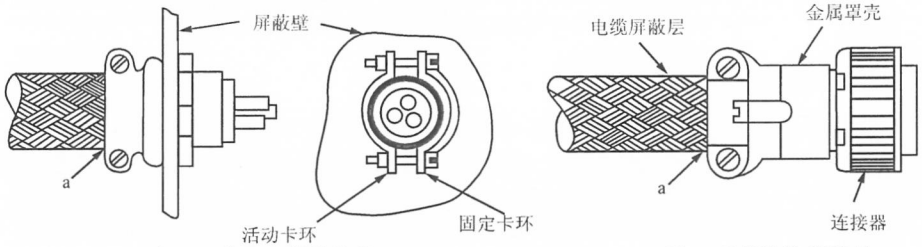
注：各屏蔽层也可在另一端接地。

图 291　低频屏蔽长电缆上屏蔽层的分段接地方法

g) 当多芯电缆内包含未屏蔽或单独屏蔽的导线，或两者兼而有之时，往往也有一个总屏蔽层用以提供物理防护和辅助的电磁屏蔽作用。这种总屏蔽层在电缆走线的每一端都应接地，以实现无间断的射频连续屏蔽。

h) 对于电缆走线中有一个或多个中间连接器的长电缆，其总屏蔽层应在沿线的机架或各个接线盒、分线盒及临时接线板的外壳上接地。

i) 为了获得最好的屏蔽效能，总屏蔽层应按图 292 和图 293 所示，以低阻抗连接方式有效地搭接到设备外壳、屏蔽壁、或其他被贯通的(金属)屏蔽体。将总屏蔽层搭接到连接器的最佳方案是使屏蔽层完好地引入连接器壳体，并且使屏蔽层四周和连接器壳体之间形成清洁的金属与金属接触。如果未使用连接器，则应采用最短的搭接条。



a) 屏蔽盒上的连接器　　b) 多芯连接器接地

[a] 应保证电缆屏蔽层是清洁的，而且电缆卡环应夹紧，以提供良好的接地。

图 292　电缆总屏蔽层与连接器的接地处理

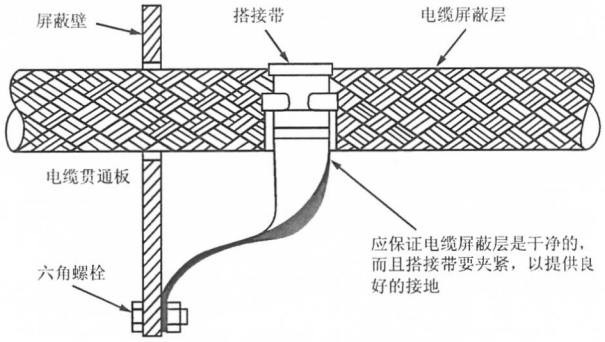


图 293　电缆总屏蔽层在贯通壁上的接地处理

17.2.1.3　高频设备

17.2.1.3.1　概述

在高频设备中，要求进行多点等电位接地。设备内部的各种信号线按要求用最短的导线接至公共的金属参考面或等电位接地面，设备底板通常作为信号参考面。设备底板再通过外壳或机柜接至等电位接地面。高频信号参考网络的所有互连电缆都应具有足够的横截面尺寸。

17.2.1.3.2　信号互连线

对高频信号，设备之间的高频信号互连线可以是不平衡的、阻抗恒定的传输线，例如同轴电缆。电流的回流导体，例如标准同轴电缆护套内的屏蔽层[7)]，应在电缆的两端及沿电缆走线的中点接地到设备的外壳。屏蔽层多点接地能保持电缆的射频屏蔽效能，简化设备的设计。

17.2.1.3.3　电缆连接器

电缆连接器的接触电阻应小于 1mΩ，以便为电缆屏蔽层和安装此连接器的设备外壳之间提供一条低阻抗通路。将电缆屏蔽层周围一圈以压紧或锡焊的方法搭接到连接器壳体，夹紧后再焊接效果最好。高频屏蔽层端接应保持互连系统的射频密封性(见图 294)。

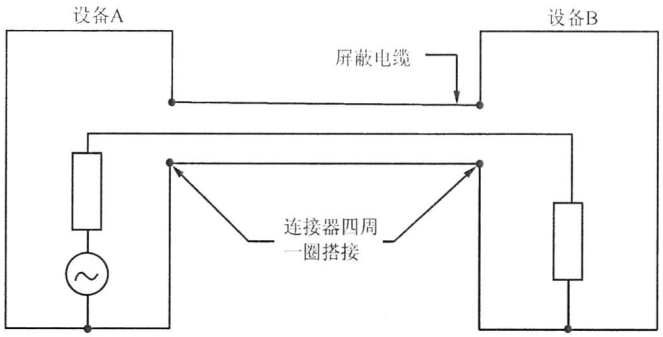


图 294　在高频设备之间建立连续的屏蔽

17.2.1.4　兼有低频和高频电路的设备

某些类型的设备，出于设计或运行要求的原因，需要在同一设备壳体内配备低频和高频两种信号电路。例如，典型的甚高频或超高频接收机，既有与天线相连的高频输入，又有音频或中频放大器的低频输出，如图 295 所示。如果低频电路和高频电路在功能上无关，而且又能分开，则低频信号接地系统应按 17.2.1.2 的规定进行设计和安装，而高频信号接地系统应符合 17.2.1.3 的规定，当低频设备安装于具有等电位接地平面的设施中时，单点接地应连接到该安装用的等电位接地平面。但是，在某些设备中，出于设计或结构的要求，低频电路和高频电路应合用一个公共信号接地系统时，则两种信号电路都应按高频设备的要求接地。连接到该类设备的高频连接线应采用阻抗恒定的屏蔽线，此屏蔽线屏蔽层的四周应在底板或机柜上接地。低频连接线可以采用图 295 所示的屏蔽平衡双绞线，但其屏蔽层只能在一端接地。

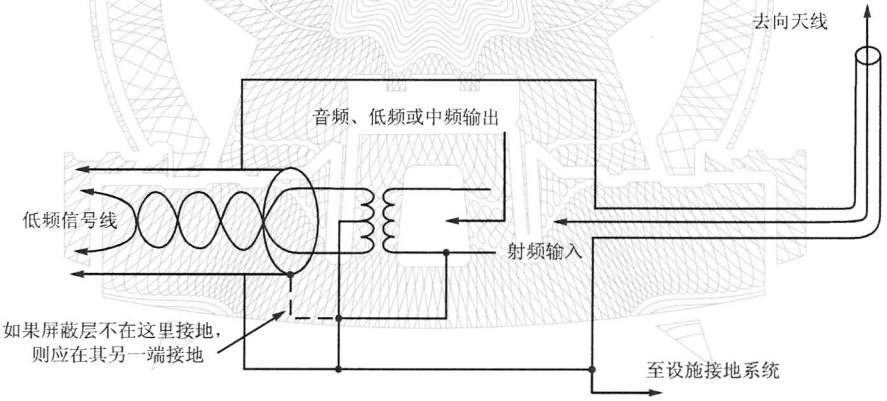


图 295　兼有低频和高频电路的设备接地方法

17.2.2　故障保护

各个独立的电子或电气设备、单元及所有外露导电零件，都应连接到邻近的导电物体，例如建筑物结构钢架，以防止设备与其周围物体之间出现危险电压。另外，还应把每台设备通过低阻抗通路接到大地电极分系统，以便为故障电流提供一条返回交流配电变压器的通路。

a)　按照要求把电气和电子设备外露的非载流金属件接地，以提供故障保护。

b)　作为设备整体一部分的通用电源插座应接地。利用安全接地导线将此电源插座的接地端子与安装该插座的设备外壳、机架或机柜相连接。

c)　设备或设备机柜上配置的所有通用电源插座和插头的接地端子应借助安全地线连接到故障保护分系统上。此外，安全地线还应连接到设备外壳和机架。接地导线的规格按表 75 或有关规范确定。

d) 由每个设备延伸的可触及导电零件应接地到设备外壳，以防止这些零件在电源线发生故障或元件失效时带电。例如，金属控制轴应借助紧密配合的轴套、金属梳形簧片或其他安装附件接地。

e) 交流中线绝不能连接到设备的任何非载流金属零件上。

17.2.3 机柜接地

每个独立单元或每台设备的外壳或机柜应与邻近其他设备的外壳及邻近的等电位接地平面或故障保护系统进行电气搭接，以减少由杂散电流所产生的噪声电压。

a) 每个非上架安装单元或设备的外壳或机柜应用低电阻接地电缆连接到设备接地网络上最靠近的点。为保证此接地电缆具有足够低的电阻，接地电缆的横截面积至少应为 3.4mm^2/m。为了确定所需的导线规格，首先应根据下式计算所需要的横截面面积：

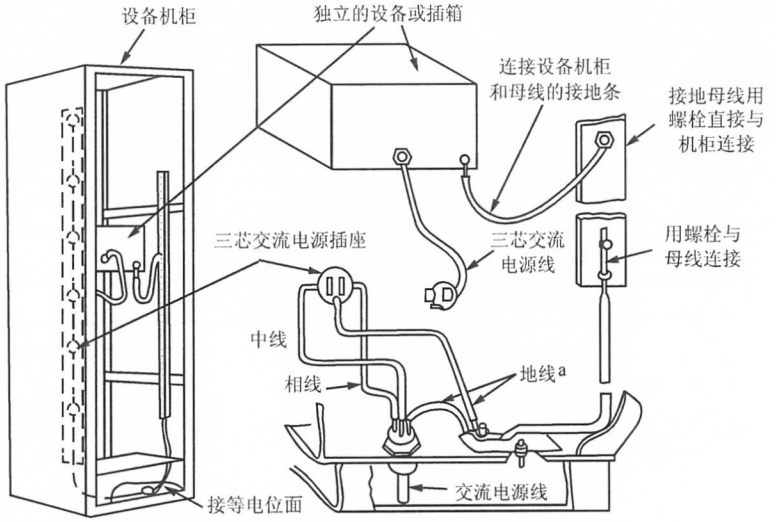
所需横截面积(mm^2)＝走线长度(m)×3.4mm^2/m

查阅表 12 或标准线规表，确定符合所需(或更大)横截面积要求的导线。例如，假定走线长度为 6m，为此所需的最小横截面积是：

6m×3.4mm^2/m＝20.4mm^2。

所以走线长 6m 时应使用截面积为 25mm^2 的导线。

b) 如果设备是安装在机架或机柜中，应按 17.3 推荐的方法将设备外壳直接搭接到机架或机柜。然后再用接地导体将机架或机柜接地到设施内故障保护分系统上最靠近的点，此接地导线的横截面积应满足 3.4mm^2/m 的要求。图 296 给出了典型设备机柜接地的详图。



[a] 安全保护地线的芯线尺寸应当等于或大于交流输入线的尺寸。

图 296 典型设备机柜的接地详图

17.3 搭接实施

为使系统能良好地运行，应经济而有效地综合运用各种干扰抑制技术，以满足设备的发射和敏感度要求。搭接是干扰控制措施中最有效的手段之一。下面介绍的设计和实施指南将有助于实施设备电路、设备外壳和电缆接线的有效搭接。这些指南并不是实现电磁兼容性规范要求的具体步骤，其目的和重点是提供电路、组件和设备之间兼容性的原理和技术。

a) 应尽可能采用熔焊接缝，因为熔焊接缝是永久性的低阻抗搭接，具有十分良好的射频密封性。

b) 在不必实现射频密封的场合，可以采用点焊。点焊不如连续熔焊理想，因为在点焊焊点之间易出现翘曲并产生腐蚀。

c) 软钎焊不能用在有机械强度要求的场合。如有机械强度要求，则应采用紧固件(如螺钉或螺栓)增强软钎焊连接。

d) 在预计很可能要承载大电流(如由电源线故障产生的电流或雷电电流)的场合，不能单靠软钎焊构成搭接。

e) 不能把紧固件(如螺栓、铆钉或螺钉)作为连接点上电流的主要通路。

f) 铆钉主要用于对软钎焊搭接提供机械强度。

g) 金属薄板型螺钉仅用来固定设备上的防尘罩或盖板，以免未经培训的人员因疏忽而触及设备内部。

h) 搭接除了依靠金属与金属的直接接触外，还可以使用辅助搭接条。使用搭接条时(见图 297)，应注意下列事项：

1) 搭接条应直接搭接到主体结构件，而不能通过邻近单元来连接；

2) 搭接条不能以两根或多根串联安装；

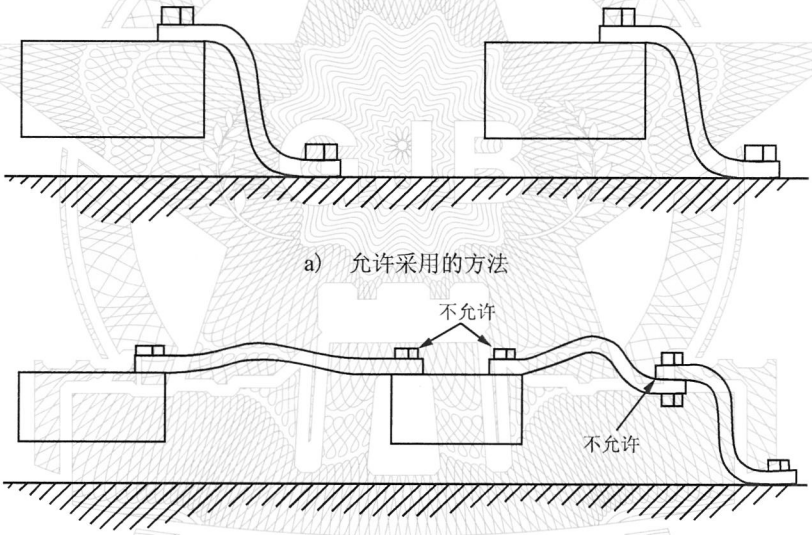
3) 搭接条应尽可能地短；

4) 搭接条不能用自攻螺钉紧固；

5) 搭接条的安装方式应保证振动或相对运动时不致影响搭接通路的阻抗；

6) 搭接条应采用铝带、镀锡铜、镀镉磷青铜、或镀镉钢带制造；

7) 相配接的金属应有所选择，以便获得最好的防腐相容性(见 15.7.4)。



a) 允许采用的方法

b) 不允许采用的方法

图 297 搭接条允许和不允许使用的方法

i) 当要求振动冲击缓冲装置两端保持电气连续时，每个振动冲击缓冲装置两端之间应安装跨接搭接条。搭接条厚度不应大于 0.6mm，以保证不影响振动冲击缓冲装置的性能。在强烈冲击和振动环境条件下，可以将实心连接带折成波纹状，或者采用柔性编织带。

j) 在要求射频密封而又不能采用熔焊连接的场合，搭接表面应用机械方式加工平整，使得在整个连接区域形成一个高质量的接触表面。紧固件应紧固至在整个搭接区域保持均匀的压力。

k) 安装在底板上的组件应将整个安装面用于搭接，如图 298 和图 299 所示。在这种情况下不应再另外采用搭接条。

l) 采用快锁式紧固件将设备的安装法兰固定到底座或机架上时，应围绕法兰四周进行搭接，如图 300 所示，而且应对法兰表面和机架配合表面的整个接触区域进行清洁处理。

m) 采用一个或多个导钉安装的上架式插件，应按图 301 所示进行搭接。

n) 对设备插箱进行有效搭接的推荐方法如图 302 所示，设备插箱和机架之间的搭接是通过设备前面板与机架前衬架的接触来实现的。这些衬架搭接到水平导轨，而水平导轨又焊接到机架上。机柜顶部的接地螺栓用以将机柜连接到设施接地系统。

o) 在采用铰链的场合，应当用薄的柔性搭接片跨接在铰链上，以建立一条辅助电气通路，如图 303 所示。

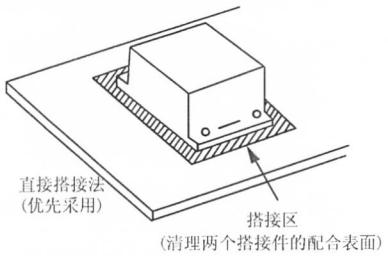


图 298　组件与设备底板的搭接

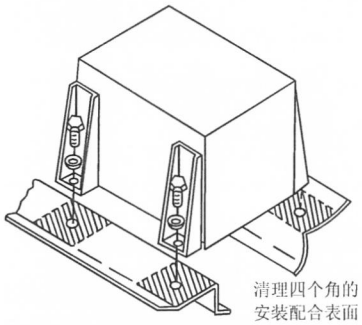


图 299　设备与安装表面的搭接

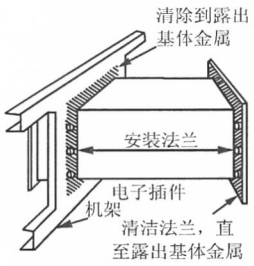


图 300　设备法兰与底座或机架的典型搭接方法

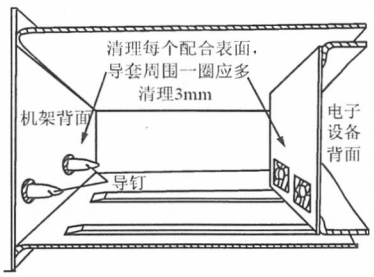


图 301　采用导钉安装的设备在机柜上的搭接方法

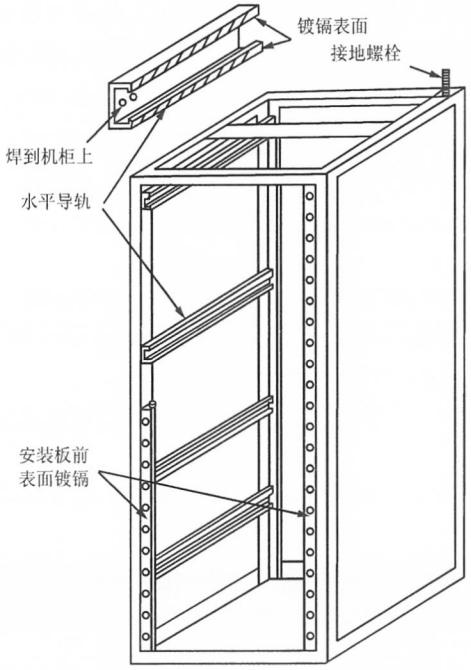


图 302　机箱内有效搭接的推荐方法

p） 连接器和同轴连接器的整个配合表面应搭接到各自的面板，如图 304 所示。应把面板表面清理干净，直至露出基体金属，清理区域至少应超出待装连接器的外围 3mm。

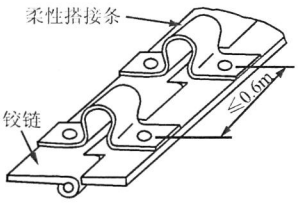


图 303 铰链的跨接搭接方法

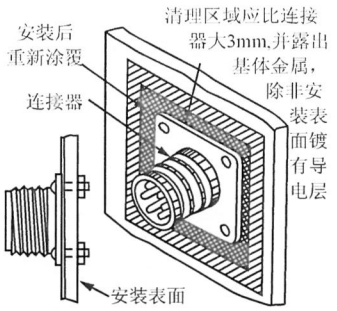


图 304 连接器与安装表面的搭接

q） 在理想情况下，电缆屏蔽层的四周应完整地搭接到连接器的壳体上，具体做法是借助压力或锡焊，最好用锡焊搭接。

r） 在缝隙、出入口的盖子、可移动的隔板、以及其他屏蔽不连续处，为使连接处具有射频密封性，需要采用导电衬垫。为了改善不规则搭接面或粗糙搭接面之间的连接效果，也可以使用导电衬垫。导电衬垫要有足够的弹性，以使连接处能频繁地打开或闭合。然而，导电衬垫还要有足够的硬度，以便能刺破搭接表面上所有不导电的薄膜层。

s） 导电衬垫应用螺钉、导电胶或其他不影响其性能的任何手段，可靠地固定到被搭接的单元之一。导电衬垫也可放在已铣好的槽内，以防止产生横向移动。

t） 对于不易接近的区域内的所有搭接点应进行保护，以防止腐蚀和机械损伤。为实现防腐，除了要保证配合金属间具有防腐相容性之外，还应对搭接点进行防潮密封处理，见 15.7.4。

17.4 屏蔽设计指南

17.4.1 概述

在设备的电路设计阶段就应考虑屏蔽要求。在设计期间实现电磁兼容性要求，可大大减少结构的后期整改。然而，一个正确设计的电路，在其从试验线路板上的设计电路到最终装配至成品的过程中，还可能受损，除非采取某些适当的控制措施。因此，根据元件的敏感特性和屏蔽要求仔细地选用元件是非常重要的。同时在安装元件时还应特别注意发挥这些元件固有的屏蔽防护特性而避开其不利的因素。这样做，既能控制设备内部电路之间的耦合，也可以控制住内部电路与外部发射源或感受器之间的耦合。军用电子设备电磁发射和敏感度要求和测量方法见 GJB 151B－2013。

17.4.2 元件选择

元件选择指南如下：

a） 在杂散耦合可能起有害作用的电路中，应使用带有屏蔽的电感器；

b） 如有可能，应使用有屏蔽的继电器，并把屏蔽层进行电气接地；

c） 隔离放大器的输入变压器，初级绕组应进行电屏蔽；

d） 敏感电路的电源变压器，初级和次级绕组之间应有静电屏蔽层，而且屏蔽层和变压器外壳均应接地到设备的外壳；

e） 在底板内侧的高电平引线应采用屏蔽连接线，以免干扰信号耦合到延伸在底板上的其他内部连线上；

f） 应选择合适的连接器类型，使其能提供足够数量的插针供各屏蔽层端接用；

g） 选择合适的连接器，使其既能承受环境条件，又不降低自身的屏蔽特性。

17.4.3 布局和结构

布局和结构设计指南如下：

a) 低电平信号通路不应靠近高电平信号通路或未滤波的电源线。
b) 避免采用长距离平行敷设的导线。
c) 在不应不采用长距离平行敷线的场合，如在“母板”上，排线的顺序依次为：低电平引线、最敏感的引线，最后是电平最高的引线。经滤波的直流电源引线和低速率的控制引线(电位器引线、参考电压引线等)可以在中间走线。
d) 相邻电路板之间的平行走线尽可能少。
e) 对于射频和高速数字通路，应采用双面和多层印制电路板，板上的微带传输线终端阻抗应匹配良好。
f) 应将各个电路板上大片的未腐蚀区有效地接地，并可将这些接地区作屏蔽用。
g) 仔细考虑相邻电路板上变压器和电感器的位置，以保证电路之间不会发生不希望的磁耦合。
h) 在电路板上分配电路功能区的时候，应将最敏感的网络与高电平网络或产生瞬态干扰的网络进行物理分隔。
i) 对各种磁性元件应合理配置或加以屏蔽，以免杂散磁场相互影响。
j) 相邻变压器的绕组轴线应互成 90° 放置，以减少漏磁通叠加所形成的耦合，从而降低屏蔽的要求。
k) 对于 Q 值要求较高的电路，配置的屏蔽体应尽可能远离该电路，因为屏蔽体的损耗可能降低电路的 Q 值。
l) 印制电路板上所有的屏蔽体应直接接地到主底板上，不能通过印制板上的地线接地。
m) 印制电路板上的屏蔽体绝不能用作电路回流导体，因为在屏蔽体表面流过的电流可能形成射频辐射。
n) 在可能时，应采用模块结构，尤其是应将电源输入滤波器装在屏蔽好的模块内。
o) 电平特别高和特别低的电路应采用单独的盒子分隔。
p) 将电源滤波器壳体的四周搭接到底板。如果其表面是铝质的，表面应进行导电氧化处理，绝不能进行阳极氧化处理或涂底漆。安装用突耳或螺栓应有足够的强度，以保证整个安装表面可靠接触。
q) 最常见的低频干扰是来自电源线的“交流声”，它以磁场感应为主。因此，对电源频率干扰进行屏蔽时，可以采用高磁导率的屏蔽体将整个敏感电路屏蔽。
r) 对电源设备、电池充电器、直流－交流变换器、以及直流－直流变换器都应提供有效的电场和磁场屏蔽。
s) 对高压电源设备应进行足够的屏蔽，同时还应与高敏感电路仔细隔离。

17.4.4 设备壳体

17.4.4.1 概述

壳体的屏蔽效能取决于壳体材料以及壳体结构的设计和安装质量。材料的选择主要取决于环境电磁场和所需的屏蔽等级(见 11.3)。然而，影响屏蔽效能的主要因素通常不是材料，而是缝隙、孔洞和导线贯通所造成的泄漏。针对这些主要泄漏途径，推荐以下控制措施。

17.4.4.2 缝隙

缝隙控制要点如下：

a) 将机械不连续性减到最小程度。
b) 在每个缝隙和机械不连续处将设备壳体进行搭接。
c) 应认识到性能最差的电气连接点将制约整个壳体的屏蔽效能。
d) 确保缝隙处金属与金属之间的清洁接触，以防止能量的泄漏和辐射。
e) 在可能时，缝隙应进行熔焊或钎焊，以实现连续的连接。然而在某些应用场合，使用小间隔的铆钉、点焊或螺母和螺栓连接也可以获得满意的效果。

f) 尽可能提供较大的重叠面，并尽量缩小紧固件的间距，以减少连接处翘曲的可能性。

g) 所用紧固方法应能产生足够的压力，以保证设备在其正常运行环境中遭受外来应力、冲击和振动等情况时，结合表面仍能保持接触。

h) 在缝隙不平整、或者采用可拆卸面板及插箱的场合，应使用衬垫或梳形簧片材料。衬垫应填满缝隙和不规则的区域，以在配合表面提供连续的电气接触。

i) 用小间距的螺钉固定可拆卸的盖子和面板，并在整个周边加上导电衬垫。

j) 选用具有良好弹性和高导电率的衬垫。

k) 根据被连接表面的不连续性，确定最小的衬垫厚度和宽度。

l) 提供达到缝隙射频密封所需要的压力。

m) 在永久性缝隙上，按图 305 所示安装射频衬垫。但应注意：

1) 用导电胶把衬垫粘接到缝隙的一个金属表面；配合表面在连接前应清除非导电物质；

2) 金属表面应是机械加工的平滑光洁表面，并且已清除所有非导电材料；

3) 应使用合适的机械紧固件(如夹箍、螺栓等)对射频衬垫施加足够高的压力，该压力沿整个缝隙长度应是相当均匀的。

n) 确保所有射频衬垫被充分地压紧。

o) 在门或面板的铰链一侧，按图 306 a)所示安装衬垫。在这种情况下，在门压紧衬垫过程中，衬垫仅受到很小的滑动作用，甚至无滑动。如果衬垫按图 306 b)所示安装，衬垫很可能由于门的滑动作用而很快地磨损。

p) 保证与衬垫配合的金属表面没有油膜、腐蚀、潮气和油漆。

q) 对梳形簧片应特别注意，它应安装在凹槽中或内侧凸缘上，以减少机械损伤的可能性。

r) 注意弹性簧片压力的持续性，因为此压力对于缝隙的屏蔽效能是非常重要的。

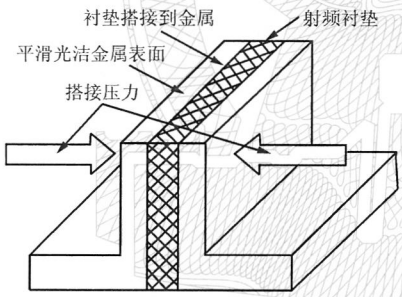


图 305　用射频衬垫构成永久接缝

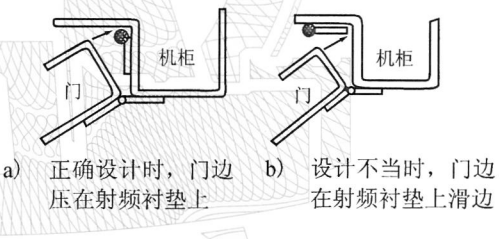


图 306　设备门和面板铰链侧衬垫的安装

17.4.4.3　贯通孔和孔洞

为了进行机械和电气连接，需要在设备机壳上开一些孔。由于各个连接处都会降低机壳的屏蔽效能，因此，在这些连接处所选择和实施的连接技术对屏蔽的完整性至关重要。图 307 列出了正确的和不正确的屏蔽贯通方法。为保证屏蔽完整性，应做到：

a) 在屏蔽体内侧安装电源和控制电缆的滤波器，并将滤波器的输入接线端伸出屏蔽体。

b) 伸出机壳的金属控制轴应用金属梳状簧片、接地螺母或射频衬垫接地。也可根据截止波导原理，采用图 308 所示的圆截止波导，并将贯通该波导的金属轴用尼龙、聚四氟乙烯或其他刚性较好的绝缘轴代替。

c) 用于通风排气的孔洞应采用电小的孔，以免降低其屏蔽效能。“小”孔是指孔径远小于工作波长的孔。较大的孔应用细铜网覆盖，或者用一组小孔代替。

d) 当设备机壳上需有较大的通风孔洞时，应以合适的屏蔽层(如蜂窝状屏蔽窗)覆盖洞口。表 86 列出了典型的蜂窝屏蔽窗孔眼尺寸及其相应的截止频率与推荐的使用频率。有时也可用屏蔽效

能较差、空气阻力较大的多层铜网进行屏蔽。其网眼规格应保证在所屏蔽的最高频率上每单位波长有 60 根或更多的铜丝。

e) 在孔洞上按图 309 方式安装屏蔽网。

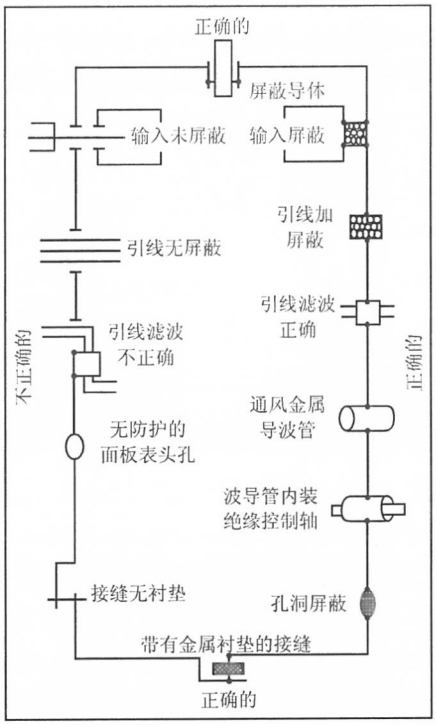


图 307　正确和不正确的屏蔽贯通孔示例

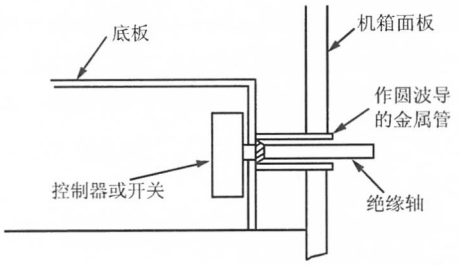


图 308　截止波导用于控制轴的屏蔽贯通口

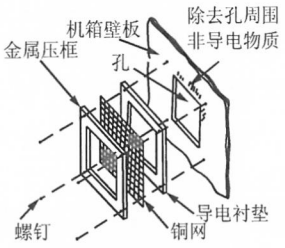


图 309　在大孔洞上安装屏蔽网的方法

表 86　典型蜂窝屏蔽窗的频率特性

孔眼尺寸 mm	截止频率 GHz	最高可使用频率 GHz
3	50	17
4	38	12.5
5	30	10
8	19	6.3
10	15	5.0

f) 在选定屏蔽网之前，应将各种屏蔽网的衰减量与所要求的屏蔽效能进行比较。

g) 对指示表头的屏蔽可按图 310 所示的方法进行。

h） 保险丝插座和话筒及仪表插孔应配置金属帽盖。

i） 在可能时，采用带有金属壳体的保险丝座、插孔和插座。

j） 可以在信号灯和指示灯的前面或后面进行屏蔽，前面的屏蔽材料应采用金属网或导电玻璃。

k） 利用设备机壳和机柜衰减不希望的信号。

l） 在不能采用机壳屏蔽的特殊场合，可采用内部模块式屏蔽体。

m） 采用内部屏蔽或隔舱结构，以限制干扰在设备及分系统内部的传播。

n） 利用诸如面板或隔板等内屏蔽结构将高电平源与敏感的感受器隔开。

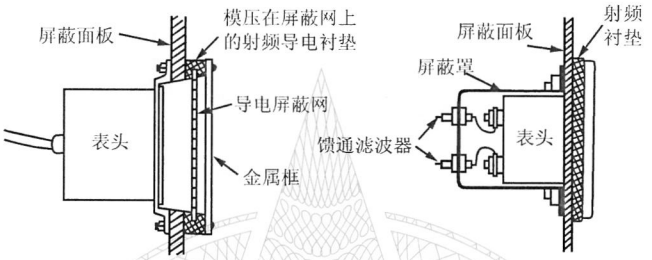


图 310 屏蔽面板仪表的安装方法

17.5 共模噪声抑制和仪表接地

17.5.1 共模噪声抑制

共模噪声主要可通过下面两种途径来降低：(1)在敏感电路、网络或装置附近控制共模噪声的幅值；(2)减少电压、电流或场强的耦合。第一种途径可采用下列措施，将噪声源与敏感电路进行结构分隔；屏蔽噪声源；降低噪声源的电流或电压电平；降低各种有用和无用的电流公共阻抗。第二种途径可采用的措施包括：将噪声电压源单端接地；采用平衡信号线，采用差分形式信号；力求构成零电阻参考面；屏蔽信号线；采用不敏感的信号传输模式，减少信号捡拾环路的面积；或是上述方法的组合。9.4 中有上述降噪方法的更详细的信息。

在某些情况下，只需采用这些降噪方法中的一种，并正确地实施，就足以将噪声电平降到可接受的程度。但是在一般情况下，可能需要把两种抑制途径中的某些措施配合使用。为了能以最低的成本提供最好的噪声抑制效果，必须仔细地分析设备或系统，以确定其工作特性(或要求)；还应仔细地检查原来存在的电磁环境，以确定是否需要采取特殊类型的防护；最后，应将上述两方面的因素互相比较，以确定设备和系统有效和可靠工作所应采取的噪声抑制步骤。

共模噪声抑制主要是把正确的接地、搭接、屏蔽措施与仔细的电路和设备功能设计结合起来，使整个系统获得最大的信噪比。应特别注意 17.2.1.2 所述低频噪声抑制技术。

17.5.2 仪表接地

17.5.2.1 概述

相当多的数据仪表都是与某种物理现象(或这些现象的变化)的测量或检测有关，获取或测量这些物理现象所需的时间范围从几毫秒到几分钟或更长。由于这些现象的变化相当慢，所以传感器输出的基频从零(直流)到几百赫。配电系统、机电开关、以及大气噪声所产生的无意信号，大多集中在上述低频范围。由于这些信号互相迭加，需要采取一些方法防止无意信号淹没或影响传感器的输出。

数据仪表系统可能使用模拟或数字信号，或两种信号的组合，虽然模拟和数字系统中降低噪声的机理基本是相同的，但对这些系统的接地方法有所区别。

17.5.2.2 模拟系统

17.5.2.2.1 概述

对于低频模拟信号应采用单点接地。信号回流线仅在一端接地，或干脆两端都不接地(即采用平衡线路)。同样，在信号线外面的屏蔽层也只能在一端接地。

17.5.2.2.2　接地式传感器

图 311 给出了热电偶与单端数据放大器组合使用的情况。传感器热电偶已经作搭接(接地)处理，而放大器的输出则驱动记录装置，如示波器。对于接地式传感器：

a)　传感器信号引线外面的屏蔽层应与传感器在同一点接地，以确保屏蔽层和信号引线处于相同的电位。

b)　当应采用单端放大器时，应断开记录器接地点。

c)　如图 312 所示，当已搭接的热电偶与隔离差分放大器相连接时，输入电缆的屏蔽层应与放大器内部的防护屏蔽层相连，以保证放大器内部信号屏蔽的连续性。注意，图中所示数据系统信号参考点与试验场大地接地之间的接地母线。在任何采用隔离差分放大器的仪表系统中，这根接地母线是必不可少的，其用途是：在记录系统中为信号电路提供大地参考点，以减少产生高电压的危害；减少放大器输入和输出端之间的共模电压，如果没有接地母线，此共模电压是由于数据记录系统接地于独立的大地或设施接地点所引起的。还需注意，放大器外壳和输出屏蔽层应接到数据系统(或负载端)的接地点。

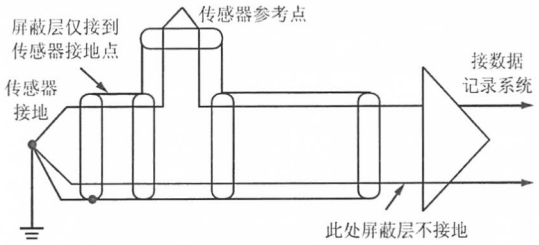


图 311　单端放大器的接地方法

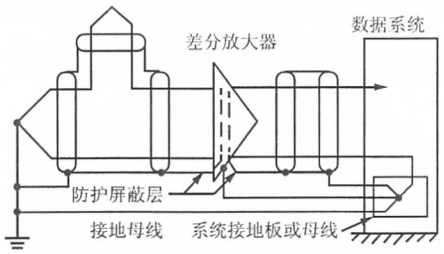


图 312　差分放大器的接地方法

d)　接地的桥式传感器应用直流电源平衡激励。当采用图 313 所示的对地平衡直流电源激励时，整个电桥将对地平衡，而放大器输入端的不平衡阻抗仅与电桥臂的电阻有关。虽然接地回路仍然存在，但由于采用了平衡激励电源，其影响将大大地降低。

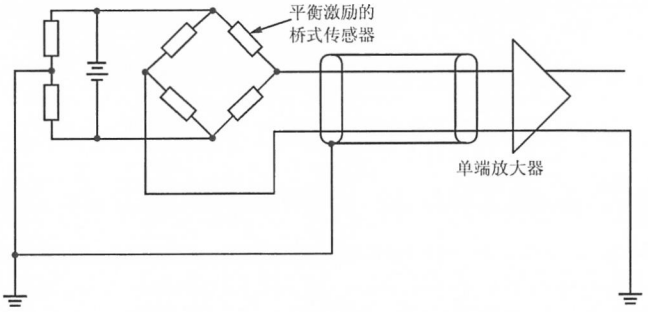


图 313　桥式传感器的接地方法

e)　在可能时，应按照图 314 所示将隔离放大器与桥式传感器配套使用。采用这种配置，传感器和放大器都能接地而不会降低系统性能。

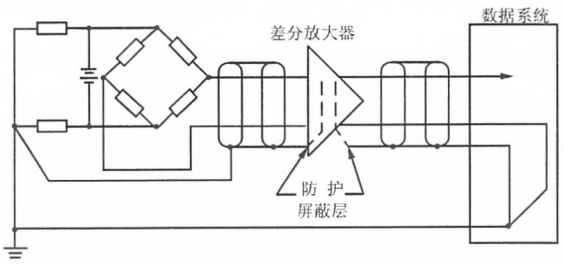


图 314　隔离式差分放大器与平衡桥式传感器配套使用

f) 应确保与大地的低电阻连接(见 15.2)。

g) 在试验场内，应给所有接地的传感器提供单点共用信号参考接地。

h) 仪表各通道中电缆屏蔽层的接地应尽可能靠近传感器接地连接点。

i) 传感器的引线应采用屏蔽扭绞线。

j) 当放大器输入端是一个接地的传感器时，在单端数据放大器的输出端应采用浮地负载。

k) 将数据放大器的防护屏蔽层与输入电缆屏蔽层连接。

l) 在数据仪表系统中自始至终应采用带绝缘的屏蔽电缆。绝不能采用不带绝缘的屏蔽层。

17.5.2.2.3 不接地的传感器

对于不接地的传感器：

a) 图 315 推荐了不接地传感器的接地方法。传感器的金属壳体与电缆屏蔽层相连，而且壳体和屏蔽层两者都应在传感器处接地。如果信号电缆线上的负载是图 315 a)所示的单端放大器，则输入电缆屏蔽层不应接到放大器。放大器外壳应在负载端接地。

b) 图 315 b)推荐了使用隔离放大器时系统的接地方法。某些类型的非隔离差分放大器需要设置一条传感器接地通路才能保证放大器良好地工作。正确的实施程序应参阅放大器制造厂提供的说明。

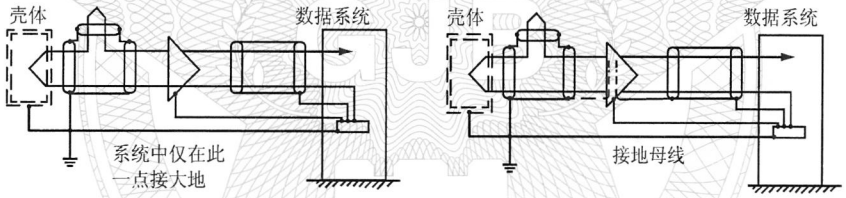
c) 为所有电缆屏蔽层提供单点公共参考接地点。

d) 所有输入电缆的屏蔽层应在传感器处接地。

e) 从传感器外壳到数据放大器输入端的信号线应带有连续的总屏蔽层。

f) 隔离放大器的防护屏蔽层应与输入电缆屏蔽层连接。

g) 在每根输入电缆屏蔽层上的接地连接点不能多于一个。



a) 单端放大器　　b) 隔离差分放大器

图 315 推荐的悬浮传感器接地方法

17.5.2.2.4 放大器

对于放大器：

a) 如果通道与通道之间是隔离的(例如，采用浮地负载)，可在数字式数据检测系统中使用单端放大器；

b) 为避免通道与通道之间构成接地回路，不应将单端放大器与已接地(搭接)的传感器一起使用；

c) 不应将单端放大器与已接地的电桥一起使用，以免造成某个电桥臂的短路；

d) 将放大器输出线的防护屏蔽层接到数据系统的接地母线；

e) 如果试验场及数据系统的仪表含有无法拆除的永久接地点，则应采用隔离差分放大器切断接地回路。

17.5.2.3 数字数据系统

数字电路是通过识别高低电平信号电压或电流的状态进行工作的，系统的运行速度取决于电平变化的速率。由于数字脉冲的快速上升和下降会引起容性和感性耦合，所以应采取措施尽量减少这种影响：

a) 将时钟信号线与其回流引线扭绞在一起，以减少这些线周围的磁场。

b) 尽可能多采用点对点走线，以减少容性耦合。

c) 在接地线中应配置多条通路，使地电流从多条线分流。

d) 进行静电屏蔽时应小心，避免对数据线的加载。

e) 所有数字电路的引线应尽可能短。

f) 所有接地线应汇集到系统的公共接地点。

g) 数字电路和低电平模拟电路之间应保持最大距离。

h) 应将模拟和数字电路装在同一设备的机柜内时，应尽可能加大模拟和数字电路之间的距离，如装在机柜相对的两侧。系统的公共接地板可以放在机柜的中心，或者采用两个接地板：一个用于模拟电路接地，一个用于数字电路接地。但是，这两个接地板应用低电感母线连接在一起，然后再接到系统的接地母线。

17.6 高空电磁脉冲防护考虑

一般说来，控制电磁干扰有效的设计方法也适用于高空电磁脉冲的防护。对于高空电磁脉冲威胁应特别注意强磁场分量和高电平的总入射场(见第 13 章)。高空电磁脉冲防护的设计要求如下：

a) 由于存在磁场分量，采用减小磁场耦合的设计方案非常重要。例如：将信号线和回线扭绞、将电源线扭绞、靠近接地面敷设导线、尽可能减小导线的长度等减小磁场耦合面积的方法应加以强调。

b) 屏蔽所使用的材料在 200MHz 以下的频率范围内应能提供足够高的衰减。考虑到磁饱和效应，实现屏蔽所需的壁厚可能导致屏蔽体相当笨重。缝隙、接头、孔洞的结构处理应与建筑物及结构物的屏蔽同样对待。由于这些原因，一般来说，对安装设备的建筑物或结构物进行整体屏蔽比对每台设备单独屏蔽更实用。

c) 在屏蔽的区域或设施中，关键设备的位置应尽可能远离角落、电气不连续处、或门窗及贯通孔，最灵敏的设备应放在中心位置。

d) 各种元件对高空电磁脉冲的敏感程度不同(见第 13 章)。机电装置敏感性最低，真空器件具有一定的抗干扰特性，而固态器件，例如晶体二极管和三极管(特别是场效应三极管)、可控硅整流管和集成电路，所能承受的电磁脉冲损伤阈值比电磁脉冲的施加的电平低 2～3 个数量级。设计开始阶段就应考虑到这些因素，在电路功能可以用低敏感的器件来实现时，就应采用抗干扰性较好的器件。例如：使用机电继电器与使用可控硅整流或开关二极管相比，前者受到破坏的可能性要少一些。在接收机的输入端采用真空管比采用晶体管具有更好的抗扰性。在应使用比较灵敏的器件时，应对这些器件加以足够的屏蔽(最经济、实用的方法是将各个分系统进行分隔)，并对贯通屏蔽体的所有输入和输出引线提供适当的浪涌防护措施。

e) 为使高空电磁脉冲防护的设计方法切实有效，需要在功能要求、防护装置性能、安装条件限制和总成本等各方面进行综合比较。有关其他的辅助设计技术参见第 13 章。

17.7 设备验收和检查程序

17.7.1 概述

设施中的任何一台电子设备或部件按本指导性技术文件推荐的要求完成设计或改型后，在安装或验收之前需要评定它们是否符合本指导性技术文件的规定。评定结果应记录在 17.7.12 给出的检查表格中。

在开始评定之前首先应确定设备的工作频率是低频(直流到 30kHz，某些场合下可达 300kHz)还是高频(高于 300kHz，某些场合下可低至 30kHz)。方波信号通常被列为高频信号。区分工作频率主要考虑的对象是与其他设备或系统之间发生联系或互相传输的信号。例如，应注意控制和监测信号、通信信号、数据线路及输入和输出线上射频信号的频率。将内部源产生的上述各种信号限制在设备或单元内是设计者的主要责任。将这些信号的频率填在 17.7.12 验收表格的 1A 部分。

在确定了设备的频率分类以后，应检查低频类设备是否实施了 17.2.1.2 的推荐方法，高频类设备是否符合 17.2.1.3 的推荐方法。某些设备之间传输的信号兼有低频和高频两类信号，例如，宽带数据通信频率往往从音频一直延伸到 10MHz 以上。对这样的混合系统应检查是否符合 17.2.1.4 的推荐方法。以上三类设备的具体验收步骤和试验程序如下所述。

17.7.2 低频设备

低频设备的验收和检查程序如下：

a) 审查结构图纸和电原理图，并目测检查设备是否具有符合 17.2.1.2.1 规定的单点信号接地网络。在验收表的 1B 部分填写信号接地网络的简明说明，或者附上原理图或结构图的复印件。核实内部信号接地网络是否端接到符合 17.2.1.2.2 规定的绝缘式信号接地端子或其他型式的指定接地端。如果使用了接地导线，应检查该导线的规格是否符合 0.85mm^2/m 的准则或其他有关规定。在验收表的 1C 部分填写与接地端有关的资料。

b) 检查信号接地线的颜色标识是否正确。

c) 将所有的电缆(信号电缆、控制线、电源电缆等)断开，用绝缘电阻测试仪测量信号接地接线端子和设备机壳之间的电阻(见图 316 和图 317)。该电阻应不小于 1MΩ。同时，还应测量每一交流输入端(地线除外)和机壳之间的电阻，所测电阻应不小于 1MΩ。

d) 在验收表上记录以上两组读数。如果所测得的电阻小于 1MΩ，应实施下列程序：

1) 首先检查所有电缆、导线、芯线等是否已与设备断开，然后再检查这些电缆的另一端是否与其他设备和结构件相绝缘。凡是发现仍然连接着的电缆，一定要将其断开。

2) 如果没有发现连着的电缆，或是在断开所有的电缆后电阻读数仍然小于 1MΩ，就要目测检查信号接地接线端子的安装情况，看其安装是否与机壳或机柜良好绝缘，如需要可进行拆卸。另一种方法是断开设备内部的信号接地连接线，然后测量该接线端子和机壳之间的电阻。如果接线端子不与机壳或机柜绝缘，则该端子应重新进行绝缘处理。

3) 如果上述两个步骤都不能找出绝缘不良的原因，就要分析和检查设备的原理图和结构布局，以确定信号接地绝缘不良的位置。应特别注意各种元件(变压器、开关、继电器等)和读出装置(表头、信号灯)中隐蔽的电流通路，此外，还应注意机壳或机柜和信号接地点之间是否有隐蔽的电气接触，连线是否有误接。

e) 测量安全地线和机壳之间的电阻，电阻读数不应大于 0.1Ω。如果测得的电阻读数较大，就要检查设备电源芯线中的安全地线是否已连接到机壳或机柜。如果确实已经连接好，则应检查接触区域的漆层是否已去除？螺钉或螺母是否已拧紧？凡存在上述任何一种缺陷，都应在设备安装或通电之前进行整改。

f) 检查所有电缆连接及其连接器，低频连接线是否采用平衡信号线？电缆屏蔽层是否仅在一端接地？各电缆对的屏蔽层除公共接地点外应彼此绝缘。检查所有的屏蔽层是否已按 17.2.1.2.6 的规定接地。在验收表的 1E 部分记录查明的所有具体缺陷。

g) 如果设备已经安装好，应核实信号接地接线端子是否连接到了设施低频信号接地网络中最靠近的馈线接地板。检查接地电缆的规格是否符合 17.2.1.2.2 规定的每米 0.85mm^2 的准则(或符合其他规定)。

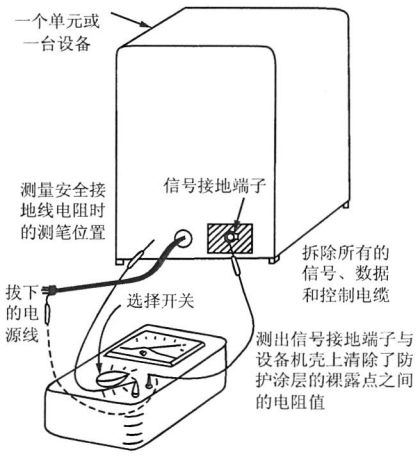
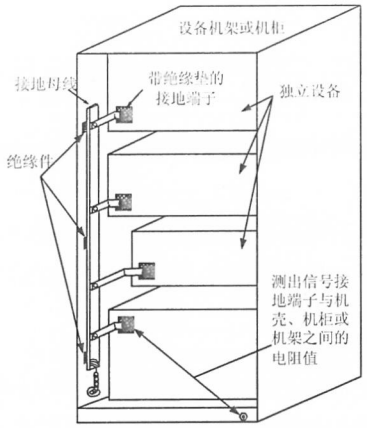


图 316　单个设备上的信号接地接线端子绝缘电阻的测量



注：在测量电阻之前，应先断开或拔下所有电缆，如信号、电源、数据、控制电缆等。

图 317　齐套设备上信号接地接线端子绝缘电阻的测量

17.7.3　高频设备

高频设备的验收和检查程序如下：

a）　检查高频参考点和参考面是否按照电路设计要求所允许的方式直接接地到底板及设备机壳上（除非另有规定）。如果需要，在检查设备的高频接地之前，应先查阅 17.2.1.3 的内容。

b）　检查所用的连接电缆匹配是否良好，阻抗是否恒定。核实所有连接器的类型和设计是否在信号线屏蔽层至设备机柜之间提供了低阻抗通路。设备机壳外部高频信号电缆屏蔽层的端接不允许采用辫线形式。

c）　除检查连接器本身的密封程度和清洁质量外，还应检查其安装是否正确（见 17.2.1.3.3 和 17.3）。用微欧计按图 318 测量连接器壳体与安装面之间的电阻，测量程序见 16.2.3.4.1。测得的电阻值不应超过 1mΩ，否则应重新清洁安装面，除掉所有油漆、不导电涂覆层或污物，并重新拧紧所有螺钉或紧固件，以实现紧密的机械配合。

d）　在机壳或机柜上选定一些点，用微欧计测量点与点之间的电阻。机壳或机柜上任何两点之间的最大电阻值不应超过 1mΩ或符合规定要求。如果此电阻不符合要求，应检查所有搭接面是不是已正确地清除干净、所有连接处是否可靠紧固。必要时应采用规格较大的接地电缆，以便把电阻降到 1mΩ或更小。

e）　将检查结果记录在验收表的第 1 部分。

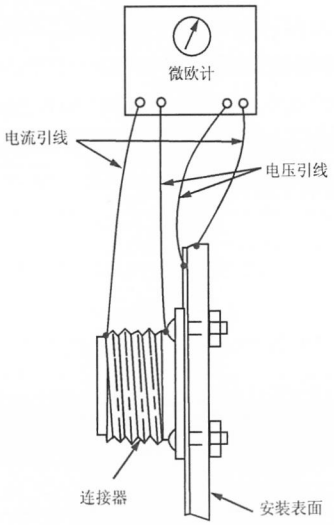


图 318　连接器搭接电阻的测量

17.7.4 混合设备

对于通过低频和高频两种信号进行联系的一些设备，首先检查 17.2.1.4 的内容。如果低频和高频信号网络是彼此独立的，则应按前面有关的说明对每种网络分别进行检查。如果这些混合网络中含有低频和高频两种信号，则应检查它们是否符合高频要求。将检查结果记录在验收表的第 1 部分。

17.7.5 已安装的设备

此外，对于已安装就位的设备，应检查它是否按 17.2.3 规定(或其他规定)，以截面积大于 3.4mm^2/m 准则规定的电缆将机壳或机柜接到了设施的接地系统。还应按验收表格第 2 部分的要求进行检查并予以记录。

17.7.6 故障保护系统

检查设备的所有外露金属零件是否已正确地安全接地。安全接地导线的规格应符合表 75 的规定。通用电源插座应按 17.2.2 规定接地。将所得的全部资料记录在检查表的第 3 部分。

17.7.7 搭接

搭接的验收和检查程序如下：

a) 检查所有接头、接缝和连接点，以便确定在搭接之前配合面是否已清除了防腐层、非导电表面涂层和污物(见 15.7.3)。检查紧固件有无松动。应避免采用不相容的金属组合(见 15.7.4)。在不得不采用不相容金属组合搭接时，是否已采取了合适的防护措施(见 10.7 或 15.7.4)。

b) 不允许采用金属薄板螺钉或自攻螺母进行电气搭接。

c) 在使用搭接条的场合，搭接条应符合 17.3 h)的推荐要求。

d) 检查各分组件、设备和机柜之间的所有搭接点是否符合 17.3 中 h)～n)的规定。

e) 检查电缆屏蔽层端部整个周边是否已紧密地搭接到连接器壳体。这种连接应当是稳定的，并应在屏蔽层和连接器壳体之间提供最良好的接触。为防止潮气和杂质进入搭接区域，搭接处最好以合适的耐气候密封件进行防护。

f) 应检查屏蔽辫线端接是否紧密，有无多余的长度(见 17.2.1.2.7)。辫线的长度只要能满足连接要求即可，不能过长。

g) 填写验收表的第 4 部分。

17.7.8 屏蔽

屏蔽的验收和检查程序如下：

a) 仔细检查设备的结构和布局是否符合 17.4 规定的设计指南。应特别注意观察屏蔽的明显缺陷，如：低劣的搭接接缝；电平很高(或很低)的电路或装置未加屏蔽；有非屏蔽线进入或引出屏蔽区域；无防护的仪表、插孔及其他开口上未加屏蔽防护措施；过大或未屏蔽的通风孔；导电衬垫安装不良或未用导电衬垫的接缝等。

b) 在检查衬垫有无清洗处理的同时，还应检查安装和接触面的准备情况。检查衬垫在压紧时是否与配合面形成了稳定、连续的接触；衬垫能否提供足够的弹性以经受其使用部位所要求的反复压缩；衬垫和配合面是否有足够的防腐能力。

c) 填写验收表的第 5 部分。

17.7.9 仪表系统

仪表系统的验收和检查程序如下：

a) 对于模拟系统，检查其是否符合 17.5.2.2 列出的推荐要求；

b) 对于数字式系统，应检查其接地网络是否符合 17.5.2.3 的推荐要求。

17.7.10 电磁脉冲设计

电磁脉冲设计的检查要点如下：

a) 检查设备设计中是否考虑了电磁脉冲的潜在威胁(注意，大多数电磁脉冲防护措施同样也能有效地实现雷电防护)；是否已采取了减小磁感应的措施(见第 13 章)？

b) 对潜在的敏感器件或元件是否重点考虑了提供有效的磁屏蔽？

c) 在可能的场合，是否已针对电磁脉冲(和雷电)浪涌配备了高抗干扰性能的元件和器件？

d) 对所有输入和输出导线，是否采用了快速反应的瞬态防护器件，以提供足够的防护？

17.7.11 其他检查

应注意验收表第6部分列出的、由接地、搭接或屏蔽缺陷所引起的各种对人员的危害。如果设备按其预定要求使用，则应确定与该设备相连的信号线、控制线或电源线上对雷电浪涌所采取的防护措施类型(若已采用)。将所有检查结果记录在验收表的第6部分。

17.7.12 验收表格

示例：

设备接地、搭接和屏蔽

设备类型_____

制造单位_____

检验人员_____日期_____

第1部分 信号接地

A. 工作频率

功能	频率
×××	×××

B. 信号接地原理图或文字说明

C. 信号接地端子

型式	×××
规格	×××
位置	×××

D. 绝缘电阻测量读数

信号接地端子	×××
交流电源输入端子	×××

E. 电缆和连接器(查明并记录所有缺陷)

位置	缺陷
×××	×××

第2部分 已安装的设备

A. 低频信号接地线规格_____

B. 机壳或机柜接地导线规格_____

C. 机壳与设施接地系统或结构物之间的电阻(最大mΩ)_____

第3部分 安全接地

A. 安全地线是否符合有关规定？_____

B. 电源插头接地端子与机壳或机柜之间的电阻(最大0.1Ω)_____

C. 其他缺陷

搭接的位置	采取的修复措施
×××	×××

第4部分 搭接

A. 缺陷

位置	缺陷特征
×××	×××

B. 电阻测量(查明所有大于1mΩ的搭接)

位置	电阻值
×××	×××

第5部分 屏蔽

屏蔽检查结果

位置	缺陷
×××	×××

第6部分 其他检查

A. 人员危害

B. 浪涌保护

附 录 A
（资料性附录）
世界雷暴日和全国主要城市平均雷暴日数信息

A.1 雷暴日定义

根据国际协定，一个雷暴日定义为一个听到雷声的当地日历天。不管那日实际发生了多少次雷暴均记为一个雷暴日。当一个雷暴从午夜前开始至午夜后结束时，则记为两个雷暴日。因此，这些记录既没有各雷暴日雷暴发生的频率的信息也没有雷暴的强度和持续时间的信息。仅闪电没有雷声不记为雷暴日。

须实际听到雷声的要求限制了观测点的覆盖范围为以观测点为圆心、半径约为10km的圆形范围内。这一限制几乎消除了同一个雷暴被一个以上观测点记录的可能。另一方面，观测者听到的雷声受观测者的“人差方程”的影响。

图A.1～图A.4为世界季节雷暴日图，这些图来自文献[18]和[19]，根据陆地雷暴日数据、海上雷暴日数据和世界地图绘制而成。

A.2 雷暴日数据

A.2.1 陆地雷暴日数据

陆地雷暴日数据来于1953年7月出版的“World Distribution of Thunderstorm Days－Part 1: Tables”，其数据由气象公共事业机构提供。1956年增补了包含前苏联的245个测试点数据。

A.2.2 海上雷暴日数据

海上雷暴日数据出自1956年7月出版的“World Distribution of Thunderstorm Days－Part 2: Tables”，其源于一百多年来，自愿商船的海洋上气象要素和现象的观测。由于观测在时间和空间上分布不规则，观测数据在用于描述普遍的气象条件前须对其进行仔细的分类和分析。另外，海上的观察数据主要用于天气现象统计，它们的统计处理总是需要引入简化假设并将基本气候概念泛化，如用“区域”代替“观测点”，用观测数代替记录周期。文献[19]的表中给出的雷暴日/5°方形网格区域是根据听到雷声(t)或看到闪电(l)百分比频率计算的。

在C.E.P. Brooks和N. Carruthers编著的气象学统计方法手册中，给出了基于理论概率的海上气象现象与现象发生天数的转换公式：

$$n = 30 - 30q\left(1 - \frac{pI}{D}\right)^{\frac{24}{I}-1} \quad \cdots\cdots (A.1)$$

式中：

n ——一个月内(30天)发生该天气现象的天数；

q ——现象不发生的概率，即$1-p$；

p ——现象发生的概率；

I ——观察数据间隔；

D ——现象的持续时间，以小时计。

根据德国联邦气象所H.J. Bullig博士分析结果，式(A.1)中下列参数可以给出：$I=1$，$D=1.25$，因此式(A.1)可以简化为式(A.2)：

$$n = 30 - 30q\left(1 - \frac{p}{1.25}\right)^{23} \quad \cdots\cdots (A.2)$$

这样上式唯一的变量就是每月听到雷声(t)或听到雷声且看见闪电($t+l$)的百分比频率p。通过与海洋岛屿上的记录对比，并考虑到日光下可能错过的闪电，看见闪电(l)的百分比频率可以通过添加一个系数1.5转换成上面的p。

A.3 世界地图

应国际电信联盟无线电咨询委员会要求，采用标准化地球投影。图A.5所示世界地图是一个简单的圆柱投影，全球作为一个矩形网格呈现出来；纬线为平行直线，每隔10°一条；经线也是平行直线，每隔15°一条，且与纬线正交，这样经纬线就组成了一个个方格。这不是等角投影，也不是等积投影。本附录中给出的地图比例尺大约是1:20000万。

A.4 平均雷暴日图雷暴日等势线说明

图A.6给出了本指导性技术文件的世界平均雷暴日图。该图来自文献[18]和[19]，据陆地雷暴日数据、海上雷暴日数据和图A.5所示世界地图绘制而成。

季节雷暴日分布地图上显示很多闭合曲线和阴影部分。闭合曲线是雷暴日不同的两个区域的分界线。如闭合曲线“10”表示曲线一边区域在该地图上指定时间内平均雷暴日高于10天，曲线另一边区域则少于10天；这些闭合曲线并不能解释成自始至终连接的都是雷暴日为10天的精确曲线。阴影区域表示该地区雷暴日分布明显不同于邻近地区，这里数值要不一成不变要不突然间断，无法绘制等势线。标记在这些阴影区域的数值表明该区域内平均数值高于标记数值(少数情况下等于，极少情况下小于)。

A.5 全国主要城市平均雷暴日数

GB 50343－2012给出的全国主要城市平均雷暴日数见表A.1。

表A.1 全国主要城市平均雷暴日数统计表

地名	雷暴日数(d/a)	地名	雷暴日数(d/a)	地名	雷暴日数(d/a)
北京	35.2	合肥	25.8	昆明	61.8
天津	28.4	福州	49.3	拉萨	70.4
上海	23.7	南昌	53.5	兰州	21.1
重庆	38.5	济南	24.2	西安	13.7
石家庄	30.2	郑州	20.6	西宁	29.6
太原	32.5	武汉	29.7	银川	16.5
呼和浩特	34.3	长沙	47.6	乌鲁木齐	5.9
沈阳	25.9	广州	73.1	大连	20.3
长春	33.9	南宁	78.1	青岛	19.6
哈尔滨	33.4	海口	93.8	宁波	33.1
南京	29.3	成都	32.5	厦门	36.5
杭州	34.0	贵阳	49.0		
注：本表数据引自中国气象局雷电防护管理办公室2005年发布的资料，不包含港澳台地区城市数据。					

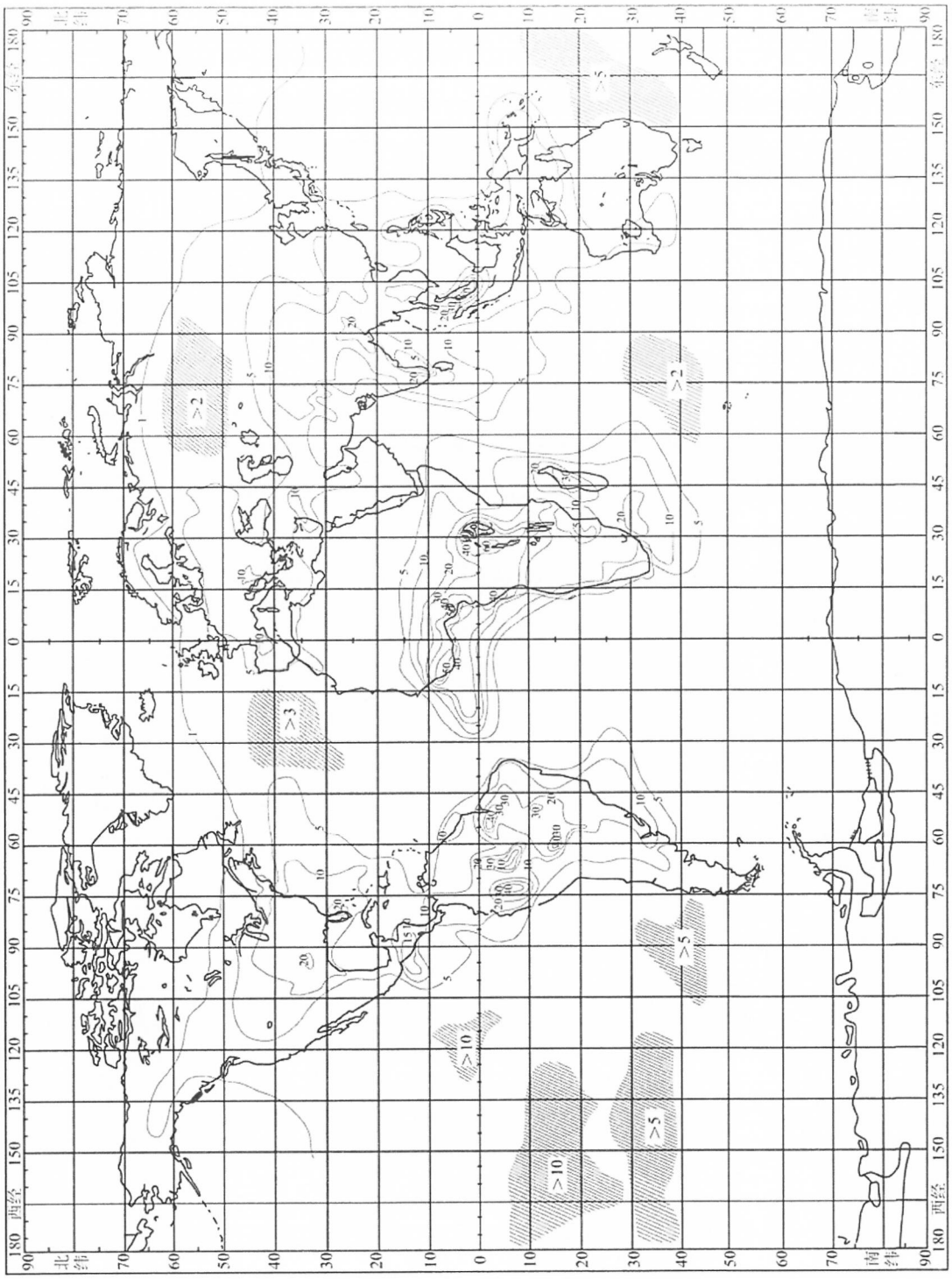


图 A.1　3 月～5 月平均雷暴日

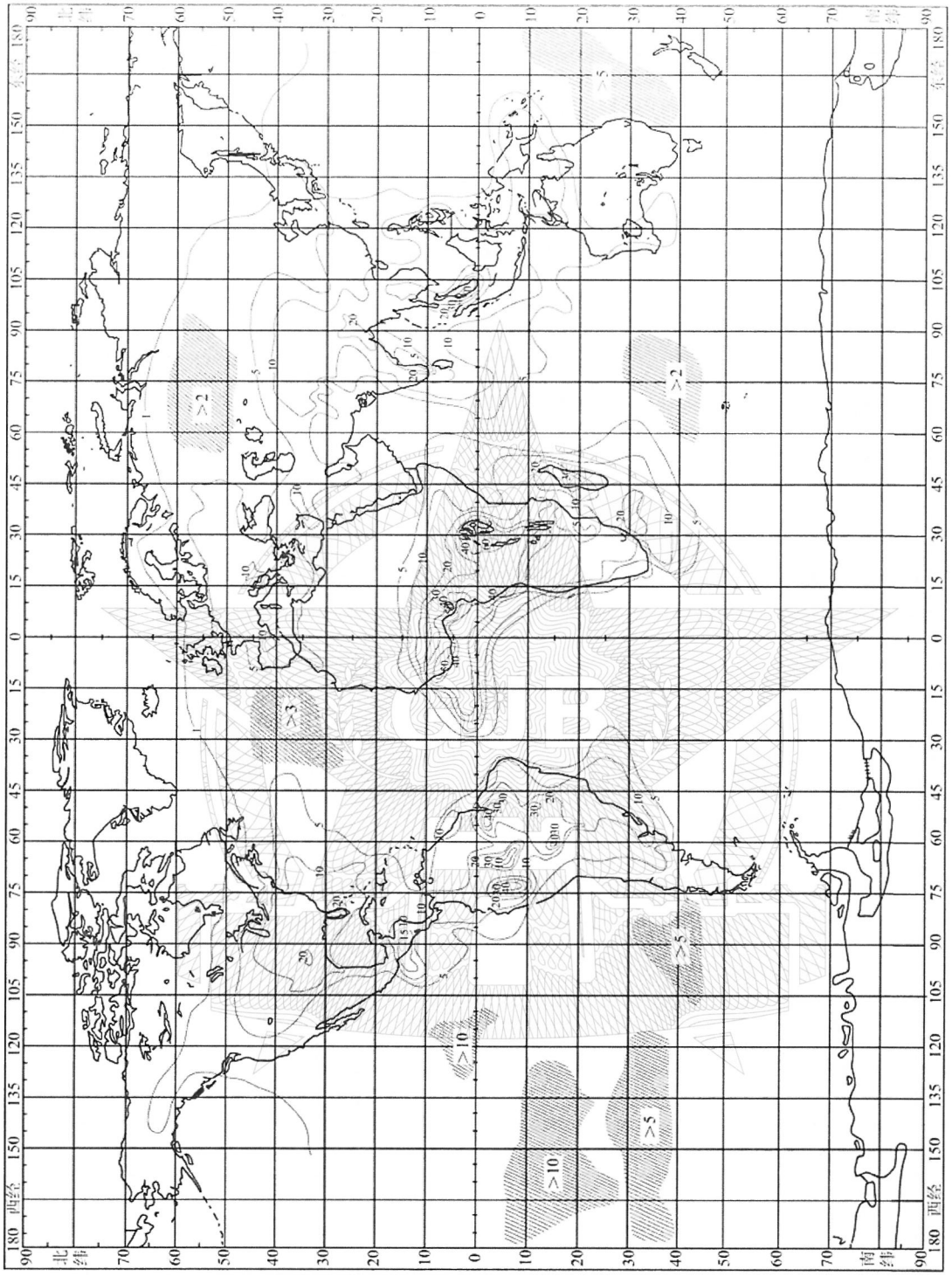


图 A.2　6 月～8 月平均雷暴日

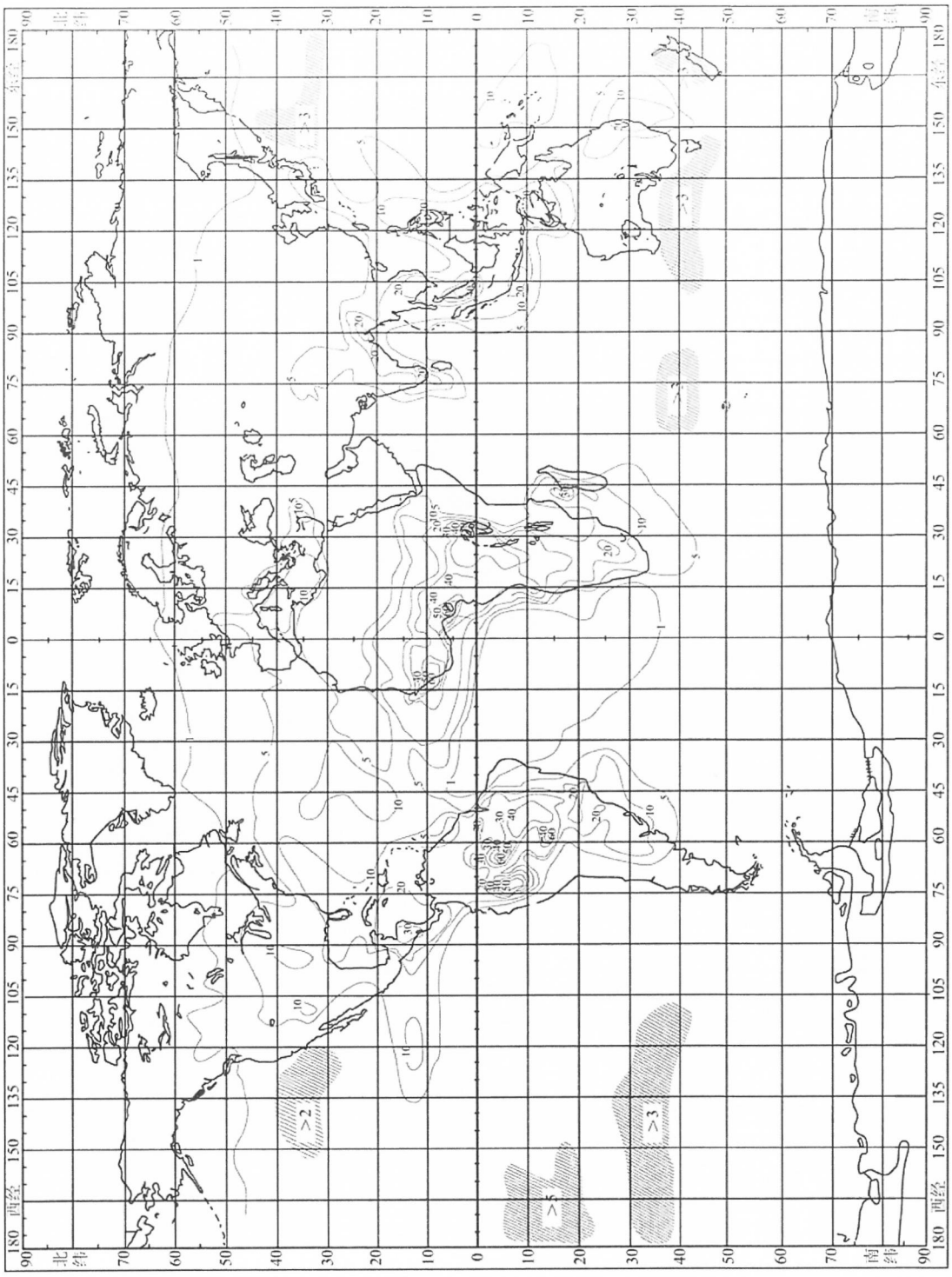


图 A.3　9月～11月平均雷暴日

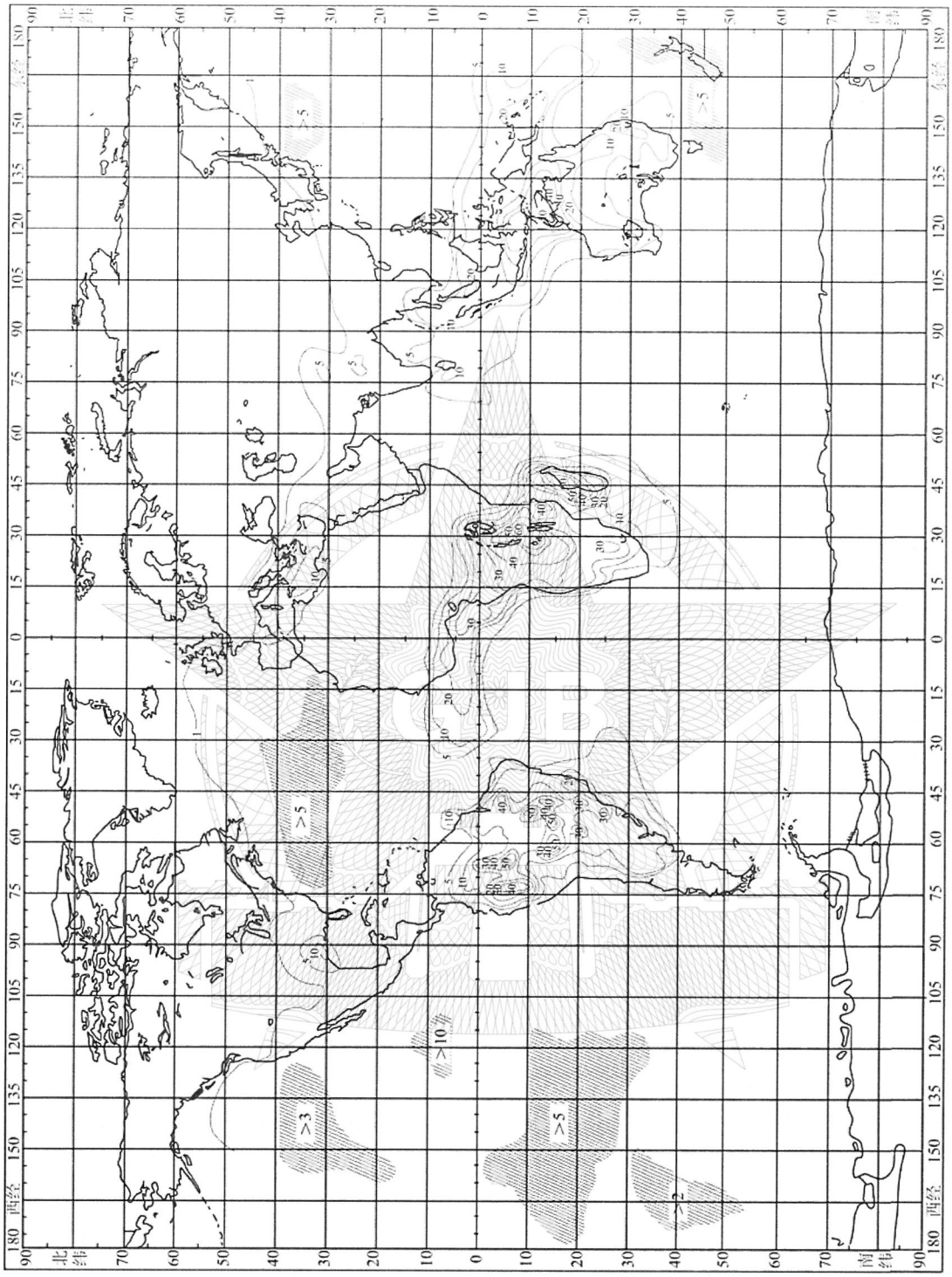


图 A.4　12 月～2 月平均雷暴日

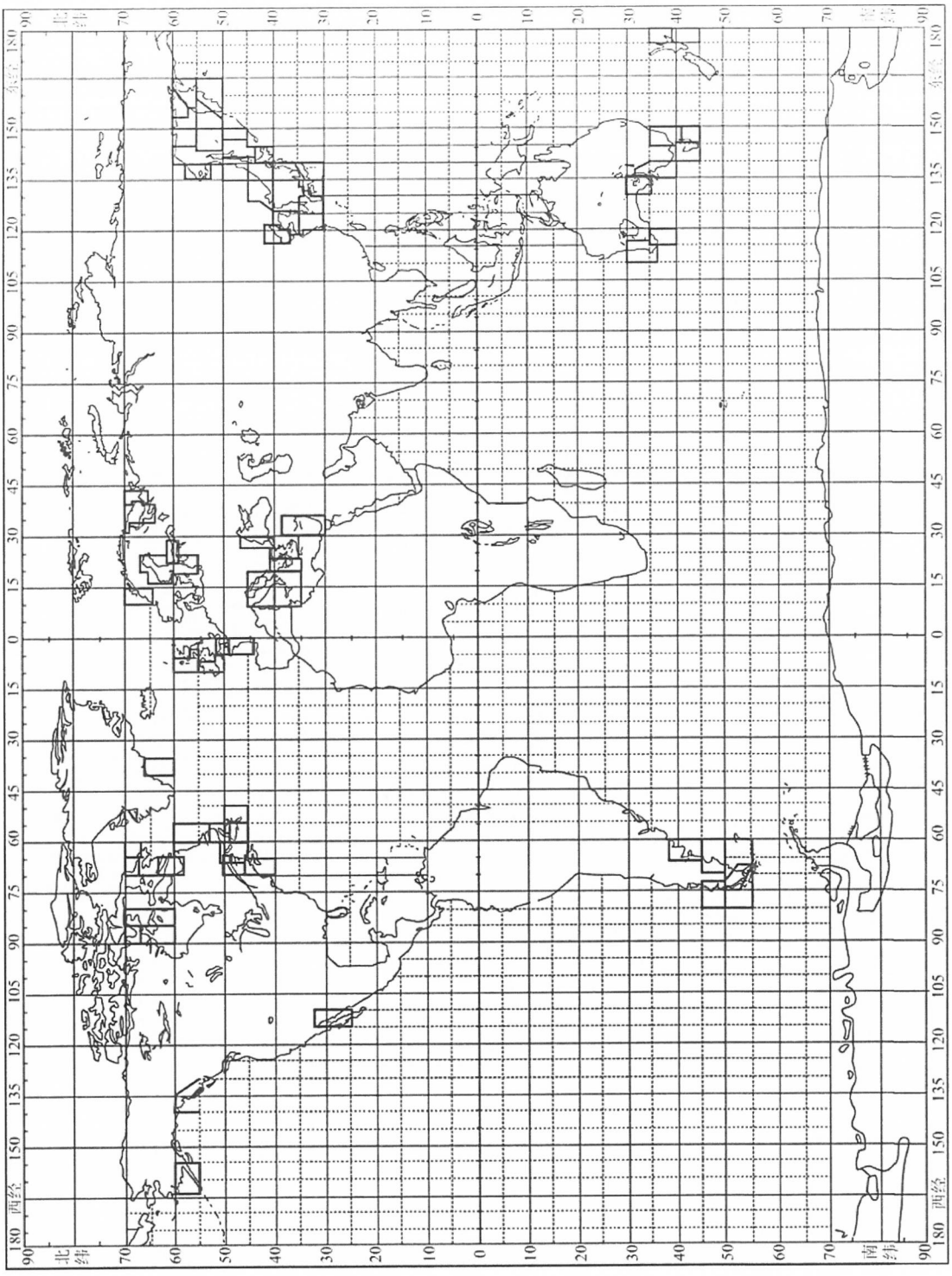


图 A.5　世界地图

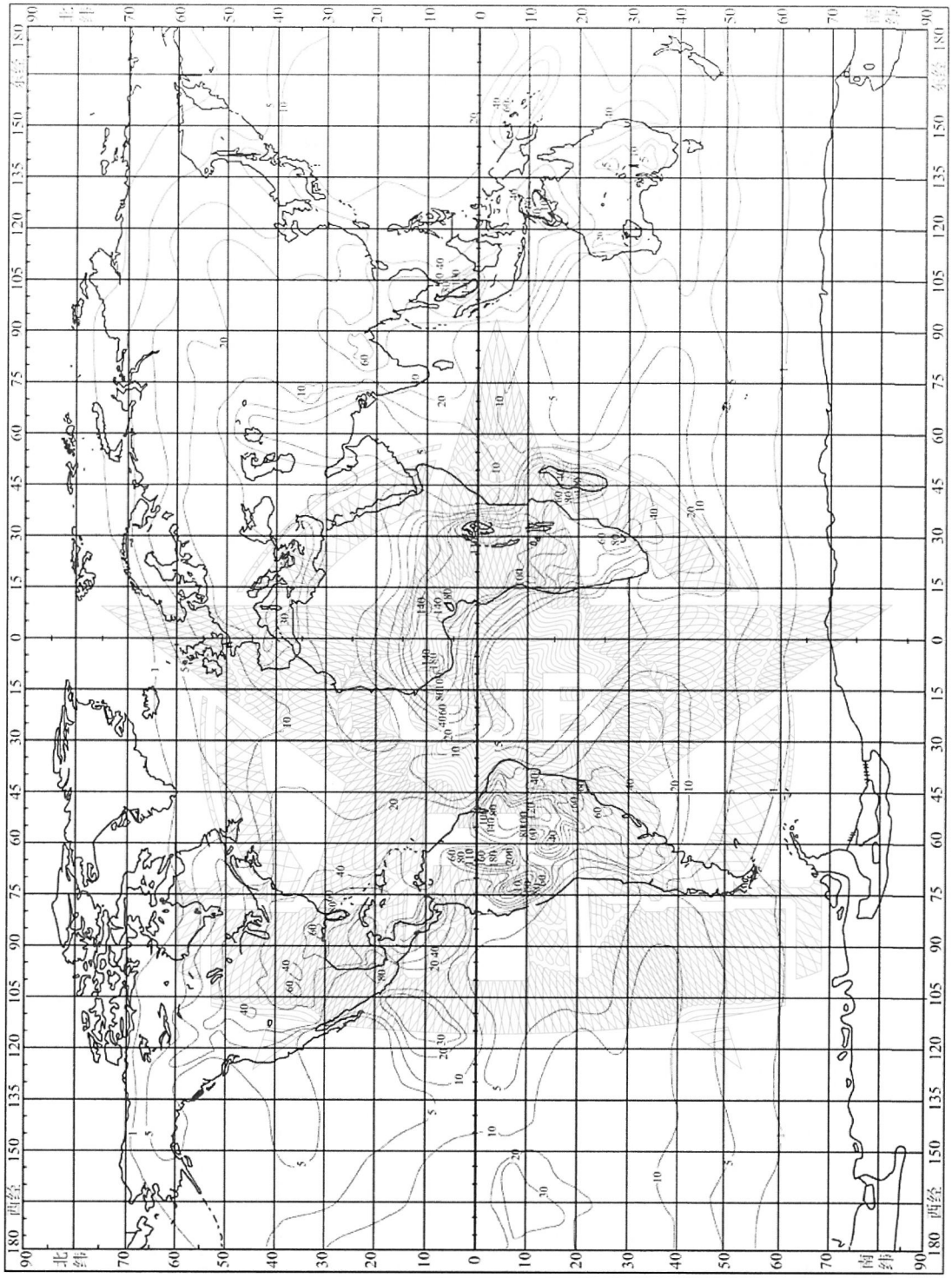


图 A.6　1 月～12 月平均雷暴日

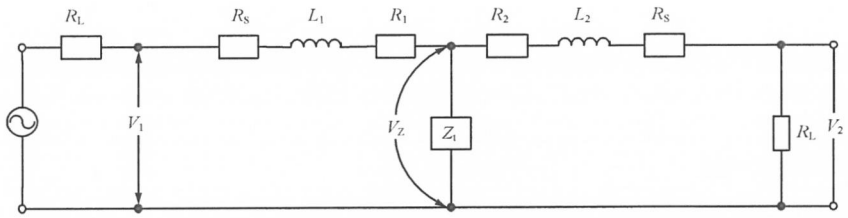
附　录　B
（资料性附录）
射频搭接阻抗测量方法

B.1　适用范围

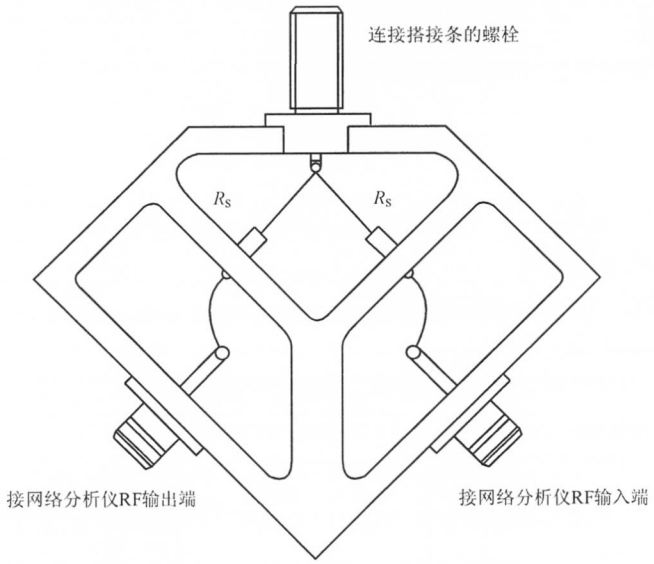
本方法适用于400MHz以下射频搭接阻抗测量。

B.2　测量原理

射频搭接阻抗测试利用扫频/T形分流插入损耗原理，如图B.1所示。其装置结构示意见图B.2。该原理是基于T形衰减器的旁路阻抗(Z_t)在与串联支路的电阻(R_S)相比较低时(即$Z_t << R_S$)，待测搭接阻抗(Z_t)变化时，电流(I)不变。电压(V_1)固定时，输出(V_2)与待测搭接阻抗(Z_t)成比例变化，通过矢量网络分析仪所测S_{21}的幅值($S_{21}=20\lg\left|\frac{V_2}{V_1}\right|$)计算出$Z_t$。



图B.1　插入损耗测量装置的等效电路图



图B.2　测试装置的内部结构图

图中令$Z_1=R_S+R_1+j\omega L_1$，$Z_2=R_S+R_2+j\omega L_2$，R_S为隔离电阻，R_1、R_2分别为R_S在两支路中的连接引线电阻，L_1、L_2分别为R_S在两支路中的连接引线电感，R_1、R_2、L_1、L_2通常很小，可以忽略不计，即$Z_1\approx Z_2\approx R_S$，假定测量系统阻抗为50Ω(即源端和接收端的内阻$R_L$均为50Ω，$R_S$也为50Ω)，根据等效电路，当满足$Z_t<0.1R_S$的前提下，可以得到式(B.1)和式(B.2)：

$$V_2 \approx \frac{R_L}{R_L + Z_2} \cdot V_Z \quad \text{(B.1)}$$

$$V_Z \approx \frac{Z_t}{Z_1 + Z_t} \cdot V_1 \quad \text{(B.2)}$$

将式(B.2)代入式(B.1)，可得式(B.3)：

$$V_2 \approx \frac{R_L}{R_L + Z_2} \cdot \frac{Z_t}{Z_1 + Z_t} \cdot V_1 \quad \text{(B.3)}$$

又 R_L=50Ω，$Z_1 >> Z_t$，$Z_2 >> Z_t$，$R_S >> R_1 + j\omega L_1$，$R_S >> R_2 + j\omega L_2$，可以得到式(B.4)：

$$V_2 = \frac{50 \cdot Z_t}{(50+R_S) \cdot R_S} V_1 \quad \text{(B.4)}$$

变形可得 Z_t 如式(B.5)所示：

$$Z_t = \frac{(50+R_S)R_S}{50} \left| \frac{V_2}{V_1} \right| \quad \text{(B.5)}$$

式中：

$\left| \frac{V_2}{V_1} \right| = 10^{\frac{|S_{21}|}{20}}$，单位为 dB。

需要注意，式(B.5)忽略了 Z_t 的影响，因此它只适用于搭接阻抗绝对值小于 $0.1R_S$ 的情况。

B.3 测量设备

B.3.1 搭接阻抗测试装置

搭接阻抗测试装置要求：

a) R_S 的值应至少为预期最大待测阻抗的 10 倍；

b) 测试装置的空载特性曲线在所关心的频率范围内尽可能地平坦。

B.3.2 矢量网络分析仪

频率范围及 S_{21} 测量动态范围满足测试要求。

B.4 测试步骤

测试步骤如下：

a) 矢量网络分析仪通电预热。设定测试频率和相关测量参数。

b) 如图 B.3 安装好被测试样。

c) 连接电缆并校准，这里选用直通校准。

d) 连接电缆和测试装置，测量 S_{21}。

e) 存储数据，按照式(B.5)处理所得数据，得出搭接阻抗曲线。

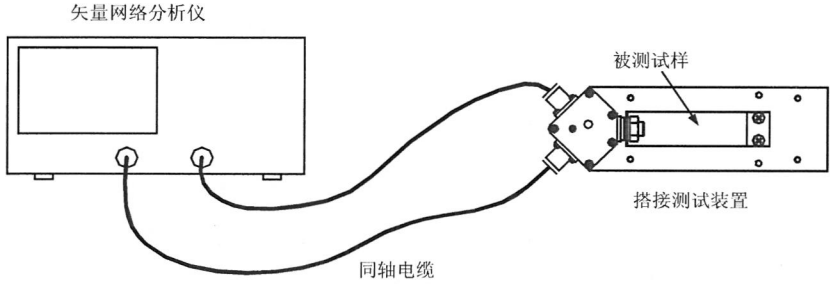


图 B.3 测试配置示意图

附 录 C
（资料性附录）
搭接条尺寸的设计

C.1 搭接电感的允许值

有两个因素导致搭接性能恶化：一是搭接条电感与被搭接件和地间的电容谐振；二是搭接条与波长可比拟时，搭接条上电压呈驻波分布。可合理选择搭接条的电感使谐振引起的搭接恶化在由于驻波发生搭接恶化的频点发生。如图 C.1 中所示的搭接条，产生驻波的最低频率 f_{min}（单位：Hz）由式（C.1）给出：

$$f_{min}=\frac{v_c}{10l_{max}} \quad \cdots\cdots (C.1)$$

式中：

v_c ——光速，3.0×10^8 m/s；

l_{max} ——被搭接件的最大线性尺寸，m。

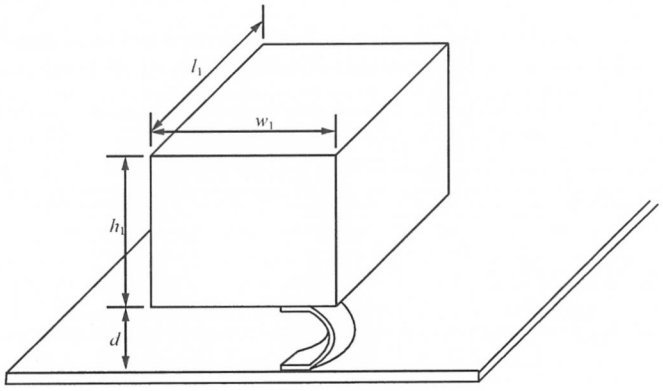


图 C.1 搭接条搭接示意图

如图 C.1 所示，对于长宽高分别为 l_1、w_1、h_1 的被搭接件，将 LC 谐振频率 f_{res}（单位：Hz）设计在驻波频率的两倍处，如式（C.2）所示：

$$f_{res}=2f_{min} \quad \cdots\cdots (C.2)$$

被搭接件与地之间的电容 C（单位：F）由式（C.3）给出：

$$C=\frac{\varepsilon A}{d} \quad \cdots\cdots (C.3)$$

式中：

ε ——空气介电常数，8.85×10^{-12}，单位：F/m；

A ——被搭接件面向地面一面的面积，$l_1\times w_1$，单位：m^2；

d ——被搭接件底面与地面的距离，单位：m。

用式（C.2）计算的谐振频率和式（C.3）计算的电容可按式（C.4）计算搭接条电感 L_1（单位：H）的设计允许值：

$$L_1=\frac{1}{4\pi^2 f_{res}^2 C} \quad \cdots\cdots (C.4)$$

C.2 搭接条的尺寸设计

一定结构尺寸的搭接条的搭接电感 L_2 可由式(147)与式(148)计算。实际搭接电感 L_2 应满足：$L_2 \leqslant L_1$。若 $L_2 > L_1$，应采取措施使搭接条的并联电感小于式(C.4)的设计允许值。可采取的措施有：多个搭接条并联(如果可以)、缩短搭接条的长度等。

附 录 D
（资料性附录）
电导率、体积电阻率、表面电阻率及表面阻抗的概念

D.1 电导率 conductivity[69]

标量或张量，在介质中该量与电场强度之积等于传导电流密度。

注：对于各向同性介质，电导率是标量；对于各向异性介质，电导率是张量。

D.2 体积电阻率 volume resistivity

电场强度与传导电流密度之比。

注：体积电阻率常用来表征材料的导电性能，通常所说的电阻率即为体积电阻率。

D.3 表面电阻率 surface resistivity

材料表层的电场强度与面电流密度之比。

对于常规三维导体，电阻如式(D.1)所示：

$$R=\rho\frac{L}{A}=\rho\frac{L}{W\cdot t} \quad \cdots\cdots (D.1)$$

式中：

ρ——电阻率，Ω·m；

L——长度，m；

A——横截面积，横截面积 A 可分解为宽度 W 和厚度 t 的乘积，m^2。

合并电阻率ρ和厚度 t，电阻表达式可写为式(D.2)：

$$R=\frac{\rho}{t}\frac{L}{W}=\rho_S\frac{L}{W} \quad \cdots\cdots (D.2)$$

式中：

ρ_S——表面电阻率，Ω/□。

由式(D.2)可知，表面电阻率在数值上等于长宽相等的试样的电阻。在进行表面电阻率实际测试时，只要保证长宽相等，试样尺寸的绝对大小并不影响测试结果。举例来说，对于 1cm×1cm 和 10cm×10cm 的试样，它们的电阻相等，均等于其表面电阻率。

表面电阻率适用于薄膜类导电材料、电介质材料和高频时的良导体。对于厚度已知的薄膜类导电材料，则可以用表面电阻率 ρ_S 乘以薄膜厚度 t(单位：m)，得到体电阻率ρ(单位：Ω·m)如式(D.3)所示：

$$\rho=\rho_S\cdot t \quad \cdots\cdots (D.3)$$

通常，电阻率(即体电阻率)的单位是Ω·m。当该单位除以薄膜厚度，单位就变成 Ω。表面电阻率的另一种常用单位是“欧姆每平方”(表示为“Ω/sq”或“Ω/□”)，其量纲是欧姆。采用“Ω/□”这一单位的好处是不会被误解为体电阻。

注：在静电领域有时也会区分体电阻率和表面电阻率，由于绝缘固体表面的潮气或其他导电性物质附着于试样表面时，表面电阻率会比体电阻率低，从而影响静电荷的积累和消失等性能。

D.4 表面阻抗 surface impedance

表面电阻和表面电抗之和。适用于高频情况的良导体，也称为本征阻抗。表面阻抗 Z_S 如式(D.4)所示：

$$Z_S = R_S + jX_S \quad \cdots\cdots (D.4)$$

式中：

R_S ——表面电阻，Ω；

X_S ——表面电抗，Ω。

R_S 和 X_S 由式(D.5)给出：

$$R_S = X_S = \rho\frac{1}{\delta} \quad \cdots\cdots (D.5)$$

式中：

δ——趋肤深度，即电磁波的场强(E 或 H)衰减到表面值的 1/e 倍时所传播的距离，m。

由式(D.4)和式(D.5)可知，表面阻抗包括表面电阻和表面电抗两部分。表面电阻和表面电抗的大小均等于长宽相等、厚度为δ、电阻率为ρ 的长方体沿长度方向的直流电阻，如图 D.1 所示。高频均匀平面波进入良导体后，表面单位面积进入的平均电磁功率将全部转化为对应的以该单位面积为横截面的导体柱中的焦耳热损耗。在高频时，材料对导电作贡献的只有表面一薄层。由于表面阻抗还反映电磁能量在良导体内随频率变化的衰减规律，所以对于屏蔽和搭接设计，都是极有用的参数。

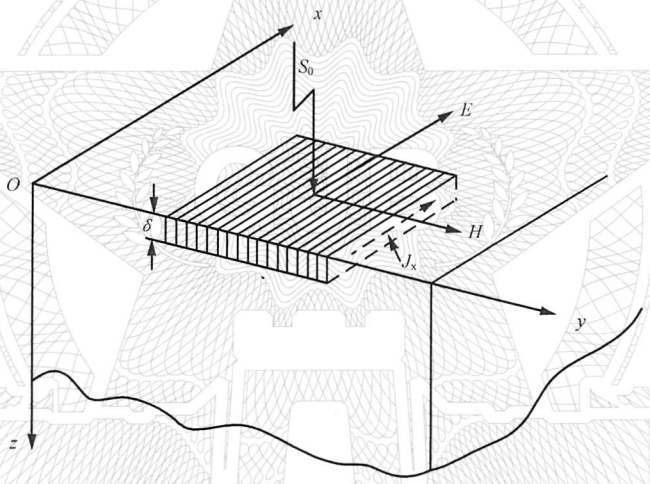


图 D.1　良导体的表面电阻等效示意图

附　录　E
（资料性附录）
公制螺栓最小力矩要求及计算方法

E.1　概述

利用螺栓搭接时，需要在配接表面施加一定的压强以保证整个配接表面的接触电阻趋于一个稳定值，所以需要紧固螺栓提供可以使配接表面的压强大于等于该值的紧固力。螺栓的紧固力通过其紧固力矩来控制，本附录给出公制螺栓紧固力与拧紧力矩的诺模图，以及如何利用该图指导搭接工程实践。

E.2　公制螺栓拉应力、剪应力扭矩诺模图及绘制说明

E.2.1　螺栓受力分析

图 E.1 为螺栓连接两个金属配接面的示意图，先假定：

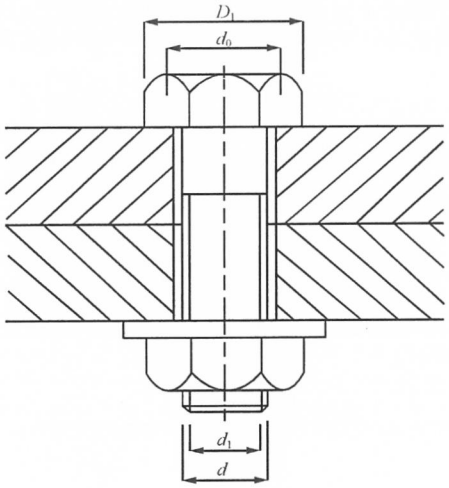


图 E.1　螺栓尺寸示意图

d_0 为被连接件或垫圈孔直径，mm；

D_1 为螺纹支撑面外径，mm；

d 为螺栓公称直径，mm；

d_1 为外螺纹小径，mm，$d_1 = d - \frac{5}{4}H$；

d_2 为外螺纹中径，mm，$d_2 = d - \frac{3}{4}H$；

P 为螺纹螺距，mm；

H 为原始三角形高度，$H = \frac{\sqrt{3}}{2}P$，mm；

T_1 为螺旋副间的螺纹力矩，N·m；

T_2 为螺栓头(或螺母)支承面上的摩擦力矩，N·m；

F 为螺栓的预紧力，N；

ψ 为螺纹升角，$\psi = \arctan\left(\frac{nP}{\pi d_2}\right)$；

n 为螺纹线数，常用螺纹为单线螺纹；

ρ' 螺纹当量摩擦角，$\rho' = \arctan\left(\dfrac{\mu_s}{\cos(\alpha/2)}\right)$；

α 为螺纹的牙型角，对公制螺纹α=60°；

μ_s 为螺旋副的静摩擦系数，当材料为钢和铸铁时，μ_s=0.10～0.15；

μ_c 为螺母与被连接件支承面间摩擦系数，无润滑时可取μ_c=0.15；

d_s 为螺纹部分应力截面的计算直径，$d_s = \dfrac{1}{2}\left(d_1 + d_2 - \dfrac{H}{6}\right)$，mm；

A_s 为螺纹部分的应力截面积，mm^2；

W_s 为抗扭截面模量，mm^3；

σ 为螺纹应力截面的拉应力，N/mm^2；

τ 为螺杆抗扭转的剪应力，N/mm^2。

拧紧螺母时，要克服螺旋副间的螺纹力矩 T_1 和螺栓头(或螺母)支承面上的摩擦力矩 T_2，故拧紧力矩 $T=T_1+T_2$。拧紧螺母所需的螺纹力矩按式(E.1)计算：

$$T_1 = \frac{Fd_2\tan(\psi+\rho')}{2}\times 10^{-3} \quad \cdots\cdots (E.1)$$

螺栓头(或六角螺母)支承面是一外径为 D_1、内径为 d_0 的圆环面，对于非磨合圆环面，摩擦力矩按式(E.2)计算：

$$T_2 = \frac{\mu_c F}{3}\left(\frac{D_1^3 - d_0^3}{D_1^2 - d_0^2}\right)\times 10^{-3} \quad \cdots\cdots (E.2)$$

于是拧紧力矩按式(E.3)计算：

$$T = T_1 + T_2 = \left[\frac{Fd_2\tan(\psi+\rho')}{2} + \frac{\mu_c F}{3}\left(\frac{D_1^3 - d_0^3}{D_1^2 - d_0^2}\right)\right]\times 10^{-3} \quad \cdots\cdots (E.3)$$

令 $K = \dfrac{1}{2}\left[\dfrac{d_2}{d}\tan(\psi+\rho') + \dfrac{2\mu_c}{3d}\left(\dfrac{D_1^3 - d_0^3}{D_1^2 - d_0^2}\right)\right]$，则式(E.3)可表示为式(E.4)：

$$T = KFd\times 10^{-3} \quad \cdots\cdots (E.4)$$

E.2.2 拉应力和剪应力的理论值

连接拧紧后，螺栓受预紧力 F 和螺纹力矩 T_1 的作用，螺纹部分应力截面的拉应力按式(E.5)计算：

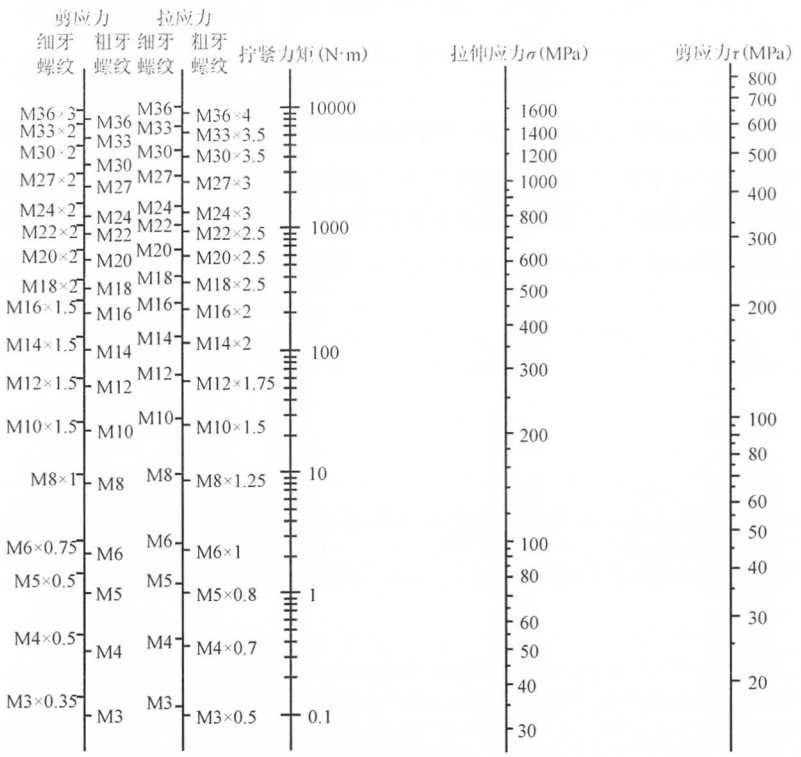
$$\sigma = \frac{F}{A_s} = \frac{F}{\dfrac{\pi d_s^2}{4}} = \frac{4T}{\pi d_s^2 Kd\times 10^{-3}} \quad \cdots\cdots (E.5)$$

剪应力按式(E.6)计算：

$$\tau = \frac{T_1}{W_s} = \frac{F\tan(\psi+\rho')d_2/2}{\pi d_s^2/16} = \frac{8T\tan(\psi+\rho')d_2}{\pi d_s^3 Kd\times 10^{-3}} \quad \cdots\cdots (E.6)$$

E.2.3 诺模图的绘制

根据上述受力关系，确定各变量的取值范围，列出函数关系式，可以得到公制螺栓拉应力、剪应力、扭矩诺模图。公制螺栓拉应力、剪应力、扭矩诺模图见图 E.2。



注：上述计算图拧紧力矩系数 $K=0.2$，螺旋副的静摩擦系数 $\mu_s=0.15$。

图 E.2　公制螺栓拉应力、剪应力、扭矩诺模图

E.3　公制螺栓拉应力、剪应力、扭矩诺模图的应用

在螺栓搭接中，配接表面材料越软、电导率越高，使得接触电阻趋于稳定的最小压强就越小。试验证明，对于钢－钢配接面，当压强达到 10.5MPa 时，配接表面接触电阻最接近其稳定值，而对于铝－铝配接面，只需要 8.2MPa 的压强就可以使得接触电阻接近稳定值。因此，对于常用的搭接配接表面，其接触压强应当达到 10.5MPa，以便获得可靠的低接触电阻搭接。

在螺栓搭接的实施过程中有可能遇到两种情况：

a）　搭接所用螺栓的规格和强度等级是确定的，此时螺栓所能提供的最大紧固力是确定的，通过螺栓拉伸应力扭矩诺模图可以确定使此螺栓产生其保证应力的紧固力矩，为保证配接表面(假设配接表面的压力是均匀分布的)的压强达到 10.5MPa，可以确定一个最大的搭接面积。例如，对于一个强度等级为 4.8 的 M4 粗牙螺栓，通过查阅紧固件标准 GB/T 3098.1－2000 可得此螺栓的保证载荷为 2720N(即保证螺栓不产生任何的塑性变形、开裂或者断裂的最大拉力)，得其螺纹应力截面积为 8.78mm^2，该保证载荷除以应力截面积为螺栓的保证应力 σ =310MPa，根据螺栓规格和该保证应力查图 E.3 拉应力诺模图即可获得相应的紧固力矩为 2.18N·m。为了使得配接表面获得不小于 10.5MPa 的压强，那么其最大有效搭接面积 $S_{max}=2720/10.5=259$(mm^2)。如果将强度等级提高至 6.8 级，则对应的最大有效搭接面积提高至约 400mm^2，所需紧固力矩约为 3.1N·m。

b）　当螺栓搭接中的有效搭接面积确定时，为了使得配接面的压强达到 10.5MPa，可以确定一个最小紧固力，此时需要根据实际情况选取某一规格的螺栓。当螺栓的公称直径确定以后，查阅紧固件标准 GB/T 3098.1－2000 可以得到螺栓的最低强度等级。例如，当搭接的有效搭接面积为 600mm^2 时，为了使配接表面产生不小于 10.5MPa 的压强，那么紧固螺栓至少需要提供 6300N

的拉力，查阅紧固件标准 GB/T 3098.1－2000 可得对于 M6 的粗牙螺栓，其强度等级至少为 5.8(此时的保证载荷为 7640N)。这里假设选用 5.8 级的 M6 粗牙螺栓，那么查阅紧固件标准 GB/T 3098.1－2000 可得其螺纹应力截面积为 20.1mm^2，为了使配接表面压强达到 10.5MPa，此螺栓的最小拉应力σ_{min}=6300/20.1=313.4MPa，通过螺栓拉应力的诺模图可查得此时的拧紧力矩为 7.56N·m。需要说明的是，对 5.8 级的 M6 粗牙螺栓，其保证应力 380MPa，大于 313.4MPa，所以使用这一螺栓还可以使得配接表面获得高于 10.5MPa 的接触压强，当螺栓的拉应力达到 380MPa 时，所对应的拧紧力矩为 9.17N·m，如图 E.3 所示，此时对减小配接表面的接触电阻是有利的。

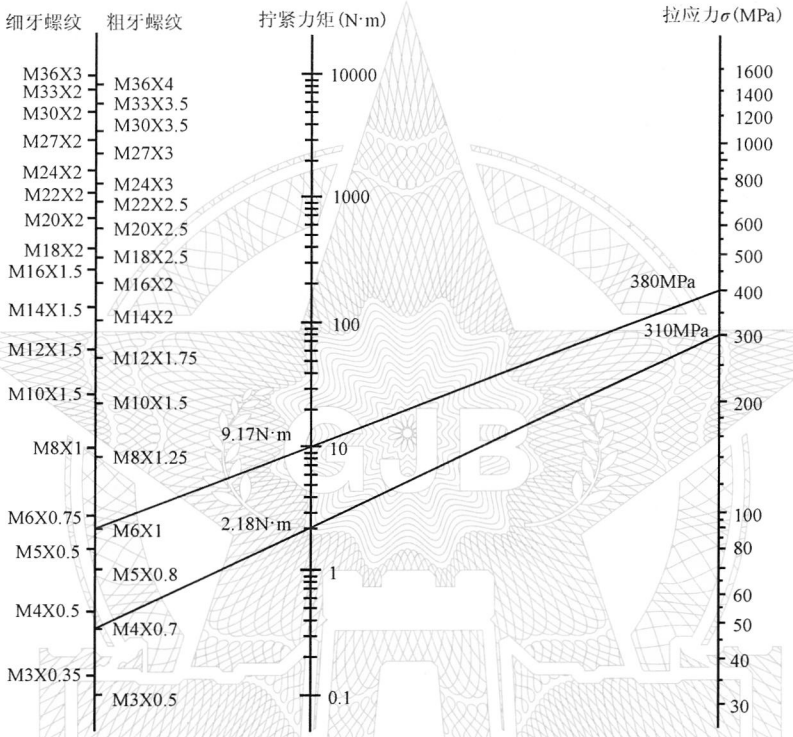


图 E.3　公制螺栓拉应力扭矩诺模图应用举例

E.4　公制螺栓最小力矩要求

为方便使用，表 E.1 总结出利用螺栓搭接时典型有效搭接面积、螺栓规格和所对应的最小扭矩系列数据，表格使用说明如下：

根据初步选定的螺栓规格，参照表 77 得到有效搭接面积；按照有效搭接面积上的压强约为 8MPa～10MPa 的设计原则，计算所需的最小紧固力 F，该最小紧固力除以螺栓截面积为螺栓的拉伸应力σ，根据螺栓规格和该拉伸应力查图 E.3 拉应力诺模图即可获得相应的最小扭矩。

该表格中螺栓规格和有效搭接面积之间的对应关系参照正文表 77，该关系对应于某种强度等级(见表 E.1)的螺栓，选择螺栓等级时应确保拉伸应力小于螺纹保证载荷并裕量合理。

表 E.1　公制螺栓最小力矩要求

螺栓规格	螺距 mm	有效搭接面积 mm^2	最小扭矩 N·m		拉伸力 N	
			8MPa 时	10MPa 时	8MPa 时	10MPa 时
M3(粗牙强度等级不低于 8.8 级)	0.5	250	1.2	1.5	2000	2500
M4(粗牙强度等级不低于 8.8 级)	0.7	400	2.6	3.2	3200	4000
M5(粗牙强度等级不低于 4.8 级)	0.8		3.2	4		
M6(粗牙强度等级不低于 8.8 级)	1.00	900	8.6	10.8	7200	9000
M8(粗牙强度等级不低于 5.8 级，细牙强度等级不低于 5.6 级)	1.25	1100	14.1	17.6	8800	11000
M10(粗牙强度等级不低于 5.8 级，细牙强度等级不低于 4.8 级)	1.50	1600	25.6	32	12800	16000
M12(粗牙强度等级不低于 5.8 级，细牙强度等级不低于 5.8 级)	1.75	2600	49.9	62.4	20800	26000
M14(粗牙强度等级不低于 4.8 级，细牙强度等级不低于 4.6 级)	2.00		58.2	72.8		
M16(粗牙强度等级不低于 4.6 级，细牙强度等级不低于 4.6 级)	2.00	3100	79.4	99.2	24800	31000
M18(粗牙强度等级不低于 4.6 级，细牙强度等级不低于 4.6 级)	2.50	4000	115.2	144	32000	40000
M20(粗牙强度等级不低于 4.6 级，细牙强度等级不低于 3.6 级)	2.50	4800	153.6	192	38400	48000
M22	2.50		169	211.2		
M24	3.00	5500	211.2	264	44000	55000
M27	3.00		237.6	297		

参考文献

[1] National Electrical Code, 1987 Edition, NFPA No. 70－1987, National Fire Protection Association, Battery march Park, Quincy MA 02269.

[2] IEEE Std. 80－1961. Guide for Safety in Alternating-Current Substation Grounding [S].

[3] "Earthing," British Standard Code of Practice CP 1013[M]. British Standards Institution, London.

[4] O.S. Peters. Ground connections for electrical systems[J]. Journal of the Franklin Institute, 1918, 186(2):245－247.

[5] "Getting Down to Earth..." Manual 25T[M]. James G. Biddle Co, Plymouth Meeting PA, October, 1970.

[6] 曾永林编著.接地技术[M]. 水利电力出版社, 1978。

[7] Rudenberg R. Grounding principles and practice I-Fundamental considerations on ground currents [J]. Electrical Engineering, 1945, 64(1):1-13.

[8] Wenner F. A Method of Measuring Earth Resistivity[J]. Bulletin of the Bureau of Standards, 1915－1916, 12:469－478.

[9] Dwight H B. Calculation of Resistance to Ground[J]. Elec. Engr, 1937, 55(12):1319－1328.

[10] Sunde E D. Earth Conduction Effects in Transmission Systems[M]. Dover Publications, Inc, New York NY, 1968.

[11] Lewis W W. The Protection of Transmission Lines Against Lightning[M]. John Wiley, New York, 1950.

[12] Installation Practices: Communications Systems Grounding, Bonding and Shielding[M]. Army FM 11－487－4, Air Force T.O. 31－10－24, Dept of Army and Air Force, September 1978.

[13] Tagg G F. Measurement of the Resistance of an Earth-Electrode System Covering a Large Area [J]. Proc.IEEE, March 1969, Vol 116:475－479.

[14] Jones W R. Bentonite Rods Assure Ground Rod Installation In Problem Soils[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus & Systems, 1980, PAS－99(4):1343－1346.

[15] Sellman P V, Delaney A J, Arcone S A. Conductive Backfill for Improving Grounding in Frozen Soils[R]. Special Report 84－17, US Army Corps of Engineers-CRREL, June 1984.

[16] Delaney A J, Sellman P V, Arcone S A. Improving Electrical Grounding in Frozen Materials[R]. Special Report 82－13, US Army Corps of Engineers-CRREL, June 1982.

[17] Christian H J et al. Global frequency and distribution of lightning as observed from space by the Optical Transient Detector[J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 2003, 108(D1): ACL 4－1–ACL 4－15.

[18] World Meteorological Organization. Secretariat. World Distribution of Thunderstorm Days: Tables(1v.). World Meteorological Organization, 1956.

[19] World Meteorological Organization. Secretariat. World Distribution of Thunderstorm Days: Tables(2v.).World Meteorological Organization, 1956.

[20] Cianos N, Pierce E T. A Ground-Lightning Environment for Engineering Usage[M]. Contract L.S.－2817－A3, Stanford Research Institute, Melo Park CA, August 1972.

[21] Maxwell E L et al. Development of a VLF Atmospheric Noise Prediction Model[R]. Final Report, Contract N00014－69－C－1050, Westinghouse Georesearch Laboratory, Boulder CO 1970.

[22] Pierce E T. Latitudinal Variation of Lightning Parameters[J]. Journal of Applied Meteorology, 1970, 9(1):194.

[23] GB/T 3956－2008. 电缆的导体[S].

[24] Wheeler H A. Formulas for the Skin Effect[J]. Proceedings of the Ire, 1942, 30(9):412－424.

[25] Terman F E. Radio Engineer's Handbook[M]. McGraw-Hill Book Company, Inc, New York, 1943.

[26] Electromagnetic Compatibility Principles and Practices[M]. NHB 5320.3, National Aeronautics and Space Administration, Washington DC, October 1965.

[27] Jedynak L. Where the (Switch) Action Is[J]. IEEE Spectrum, 1973, 10(10):56－62.

[28] Denny H W, Warren W B. RF Bonding Impedance Study[M]. RADC－TR－67－106, Contact AF30(602)－3282, Engineering Experiment Station, Georgia Institute of Technology, Atlanta, Georgia, March 1967.

[29] Nomogram for Torque on Bolts[J]. Design News, May 22, 1972.

[30] Whitley J H. Which Permanent Electrical Connection Should You Use?[J]. Electronics, 1963, 1:50－51.

[31] Troup R J, Grubbs W C. A Special Research Paper on Electrical Properties of a Flat Thin Conductive Strap for Electrical Bonding[C]. Proceedings of the Tenth Tri-Service Conference on Electromagnetic Compatibility, IITRI, Chicago IL, November 1964, pp 450－474.

[32] 张允诚, 胡如南, 向荣. 电镀手册(第3版)[M]. 国防工业出版社, 2007.01.

[33] Roessler G D. Corrosion and the EMI/RFI Knitted Wire Mesh Gasket[J]. Frequency Technology, 1969, 7(3):15－24.

[34] Schelkunoff S A. Electromagnetic Waves[M]. D Van Nostrand Co, Inc (1943).

[35] Shultz R B et al. Shielding Theory and Practice[C]. Proceedings to the Ninth Tri-Service Conference on Electromagnetic Compatibility, IITRI, Chicago IL, October 1963, pp 596－635, AD 434850.

[36] Everett W W. Topics in Intersystem Electromagnetic Compatibility[M]. Holt, Rinehart, and Winston, Inc, 1972.

[37] Electromagnetic Compatibility[M]. AFSC Design Handbook DH 1－4, Air Force Systems Command, 2 March 1984.

[38] Schultz R B. ELF and VLF Shielding Effectiveness of High Permeability Materials[J]. IEEE Transactionson Electromagnetic Compatibility, 1968, EMC－10(1):95－100.

[39] Electromagnetic Compatibility Design Guide for Avionics and Related Ground Support Equipment[M]. NAVAIR AD1115, Department of the Navy, Washington DC.

[40] Jarva W. Shielding Efficiency Calculation Methods for Screening, Waveguide Ventilation Panels,and Other Perforated Electromagnetic Shields[C]. Proceedings of the Seventh Conference on Radio Interference Reduction and Electronic Compatibility, Armour Research Foundation (IITRI), Chicago IL, November 1961, pp 478－498.

[41] ITEM-1973 R & B Enterprises. PO Box 328. Plymouth Meeting PA 19462.

[42] Electromagnetic Compatibility and Electromagnetic Radiation Hazards[M]. NAVELEX 0101, 106, Department of the Navy, Washington DC, August 1971.

[43] Sachs H M et al. Evaluation of Conductive Glass in Fluorescent Light Shielding Applications[C]. Proceedings of the Sixth Conference on Radio Interference Reduction and Electronic Compatibility, Armour Research Foundation (IITRI), Chicago IL, October 1960, pp 281－294.

[44] Architectural Interference Data[M]. RADC－TR－63－312, Contract AF 30(602)－2691, White lectromagnetics Inc,Bethesda MD, 20 August 1963.

[45] Uhlig E R. Development of Criteria for Protection of NIKE－X Power Plant and Facilities Electrical Systems against Nuclear Electromagnetic Pulse Effects[R]. Report No. 67U05, General Electric Company, Pittsfield MA, March 1967, AD 811 072L.

[46] RF Transmission Line Catalogue and Handbook, TL－6[M]. Times Wire and Cable Co, 385G Hall Ave, Wallingford CT 06492.

[47] MIL－E－45782B(1), 15 December 1980. Electrical Wiring, Procedures for[S].

[48] Schor F W. Measurement of RF Leakage in Multipin Electrical Connectors[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 1968, EMC－10(1):135－141.

[49] EMP Protection for Emergency Operating Centers[M]. TR－61A, Defense Civil Preparedness Agency, Washington DC, July 1972.

[50] Peele W D et al. Electromagnetic Pulse(EMP) Protection Study[M]. FAA RD 72－68, Rome Air Development Center, Rome NY, June 1972.

[51] 刘尚合, 武占成等. 静电放电及危害防护[M]. 北京邮电大学出版社, 2004.

[52] Vance E F, Graf W, Nanevicz J E. Defense Nuclear Agency Report 5433F－1, Unification of Electromagnetic Specifications and Standards Part I-Evaluation of Existing Practices[R]. 31 October 1980.

[53] IEC 61000－2－13－2005. Electromagnetic compatibility(EMC)－Part 2－13: Environment-High-power electromagnetic(HPEM) environments, radiated and conducted [S].

[54] MIL－STD－464C－2010 Electromagnetic environmental effects requirements for systems[S].

[55] Whitehead L E.Nomograph Determines Ground Rod Resistance[J]. Electric Light and Power, December 1962.

[56] Jensen C H. Grounding for Substations[J]. Electrical South, Ott/Nov 1960.

[57] Master Labeled Lightning Protection Systems[M]. UL 96A, Underwriters Laboratories, lnc, Chicago IL, June 1963.

[58] ITU－T K.36－1996. Selection of Protective Devices[S].

[59] 何金良编著. 电磁兼容概论[M]. 科学出版社, 2010.

[60] GB/T 18802.311－2007. 低压电涌保护器元件 第311部分：气体放电管(GDT)规范[S].

[61] GB/T 27746－2011. 低压电器用金属氧化物压敏电阻器(MOV)技术规范[S].

[62] GB/T 18802.321－2007. 低压电涌保护器元件 第321部分：雪崩击穿二极管(ABD)规范[S].

[63] Chemical Conversion Coatings on Aluminum and Aluminum Alloys[M]. Military Specification MIL－C－5541B(2), 30 November 1972.

[64] Tin Plating, Electrodeposited on Hot-dipped, for Ferrous and Nonferrous Metals[M]. Military Specification M1L－T－10727B, 2 April 1980.

[65] Cleaning Method and Pretreatment of Ferrous Surfaces for Organic Coatings[M]. Federal Specification TT－C－490B, 21 July 1971.

[66] Mir S, White D R J. Building Attenuation and the Impact on Product Susceptibility[J]. 1974 IEEE Electromagnetic Compatibility Symposium Record, 74CH0803－7 EMC, San Francisco CA, 16－18 July 1974, 76－84.

[67] Lamb H.On the Reflection and Transmission of Electrical Waves by a Metallic Grating[J]. Proceedings of the London Mathematical Society, 1898, 29(1):523－546.

[68] Cowdell R B. Simplified Shielding[C]. 1967 IEEE EMC Symposium Record, Washington DC, pp 399－412.

[69] GB/T 2900.1－2008. 电工术语－基本术语[S].

中 华 人 民 共 和 国
国家军用标准
电子设备和设施的接地、搭接和屏蔽设计指南
GJB/Z 25A—2023
*
国家军用标准出版发行部出版
（北京东外京顺路 7 号）
国家军用标准出版发行部印刷车间印刷
国家军用标准出版发行部发行
版权专有　不得翻印
*
开本 880×1230　1/16　印张 23　字数 767 千字
2023 年 9 月第 1 版　2023 年 9 月第 1 次印刷

*
军标出字第 15550 号