

## 目 次

1 范围 .....	1
1.1 主题内容 .....	1
1.2 适用范围 .....	1
2 引用文件 .....	1
3 定义 .....	1
3.1 生存力 .....	1
3.2 飞机生存力评估 .....	1
3.3 易损性 .....	1
3.4 飞机易损性评估 .....	1
3.5 飞机杀伤概率 .....	1
4 一般要求 .....	1
4.1 工程管理 .....	1
4.2 生存力大纲 .....	2
4.3 管理机构 .....	2
4.4 大纲计划 .....	2
4.5 生存力特性要求 .....	2
4.6 验证方法 .....	5
5 详细要求 .....	5
5.1 威胁系统 .....	5
5.2 易损性评估 .....	9
5.3 生存力评估 .....	40
5.4 系统的有效性 .....	49
5.5 验证方法 .....	53
附录 A 飞机与单个武器交战的生存概率计算图表(参考件) .....	54

# 飞机非核生存力通用指南

## 1 范围

### 1.1 主题内容

本指导性技术文件规定了军用飞机非核生存力的通用要求

### 1.2 适用范围

本指导性技术文件适用于各类军用固定翼飞机和旋翼类飞机。

## 2 引用文件

GJB 1391-1992 失效模式影响及危害性分析程序

HB 7112-1994 飞机非核生存力术语

## 3 定义

除下述定义外,其他定义按 HB 7112 的规定。

### 3.1

**生存力 survivability**

飞机躲避或经受人为敌对环境的影响,而不引起持久的性能削弱,并保持连续有效地完成其指定任务的能力。

### 3.2

**飞机生存力评估 aircraft survivability assessment**

指对与敌方遭遇时的飞机生存力作系统描述、定量分析、特性统计和评价

### 3.3

**易损性 vulnerability**

系统的一种特性。表示在某种人为敌对环境下,由于遭受某种等级的威胁机理而使完成任务的能力受到限定等级的降低。

### 3.4

**飞机易损性评估 aircraft vulnerability assessment**

指对飞机受到威胁机理作用时的易损性作系统描述、定量分析和评价。

### 3.5

**飞机杀伤概率 aircraft probability of kill**

飞机无法承受所遭遇的特定威胁,导致规定破坏等级破坏的概率。

## 4 一般要求

### 4.1 工程管理

飞机生存力工程是一门系统工程,必须按系统工程的管理方法进行工程管理。对工程的技术工作管理的基本要求是,把订购方的要求变成为一个使用系统。它包括以下部分:定义系统性能参数;满足要求的最佳系统构形;技术任务的计划和控制;工程专业的一体化;全部设计工程一体化管理;附属工程;测试工程;后勤工程和满足费用、技术性能及计划目标的生产工程。

订购方和承制方必须在全寿命期内,实施对飞机生存力的设计和管理。它涉及到的内容,包含在全

寿命周期的各个阶段(见图 1)。

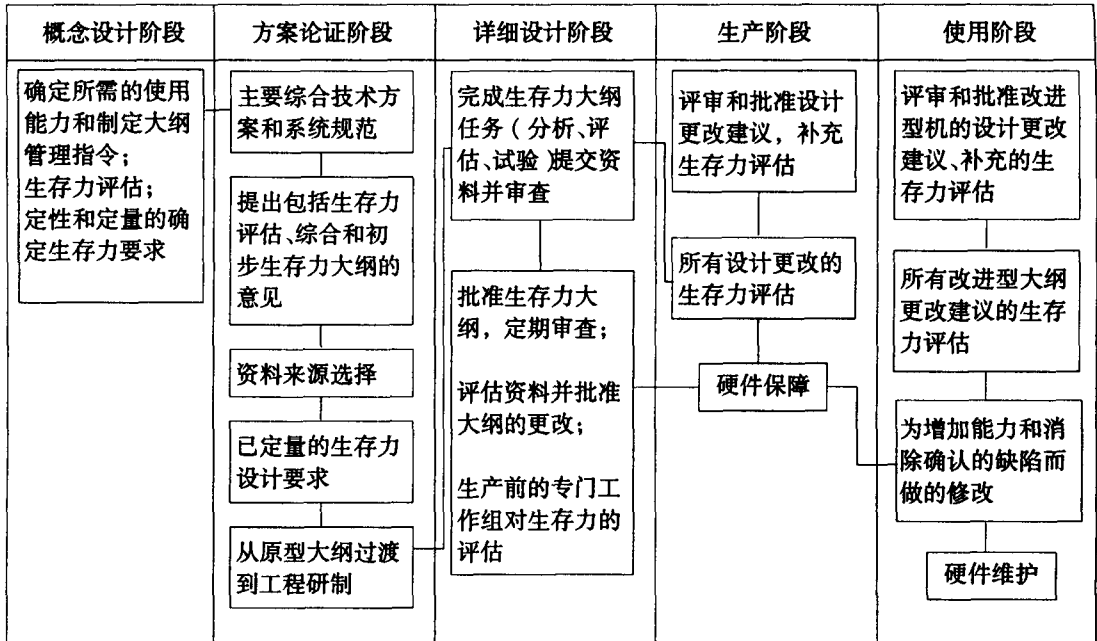


图 1 全寿命周期的生存力设计和管理

#### 4.2 生存力大纲

承制方应制订并执行有效的生存力大纲，并纳入到飞机设计、研制和生产的各个阶段。实施该大纲的目标是保证把有效的生存力特性纳入到所研制的型号飞机中。生存力大纲的基本要素包括：制订生存力大纲计划、建立适当的管理机构、明确规定大纲的任务、建立生存力大纲规程、制订大纲报告标准以及鉴定质量的验证方法和措施。

#### 4.3 管理机构

为贯彻和实施飞机生存力大纲，应建立一个生存力工程管理机构。它应具有以下职能：

- a) 支持设计流程；
- b) 实施分析和综合研究；
- c) 研制和试验以及验证大纲；
- d) 提供系统设计管理的必要信息和建议；
- e) 把提高生存力的有效方法应用到设计和生产。

生存力工程管理应具有与可靠性、维修性、安全性、制造工艺性、人机工程、综合保障和价值工程相同的管理级别。

#### 4.4 大纲计划

生存力大纲计划，应明确需要完成的具体任务和指出这些任务间的内在联系。生存力大纲计划的任务流程图见图 2。

#### 4.5 生存力特性要求

应提出飞机生存力水平的明确要求，以便编制设计准则。这些要求包括对特定系统所期望的品质特性和量化特性。品质特性用于综合研究和系统费用效益分析，以确定最佳方案和得出定量要求；量化特性是对特定的参数用给定的可计量值来表示。

为了确定系统的需求，可采用下列提高生存力的全部或部分內容。

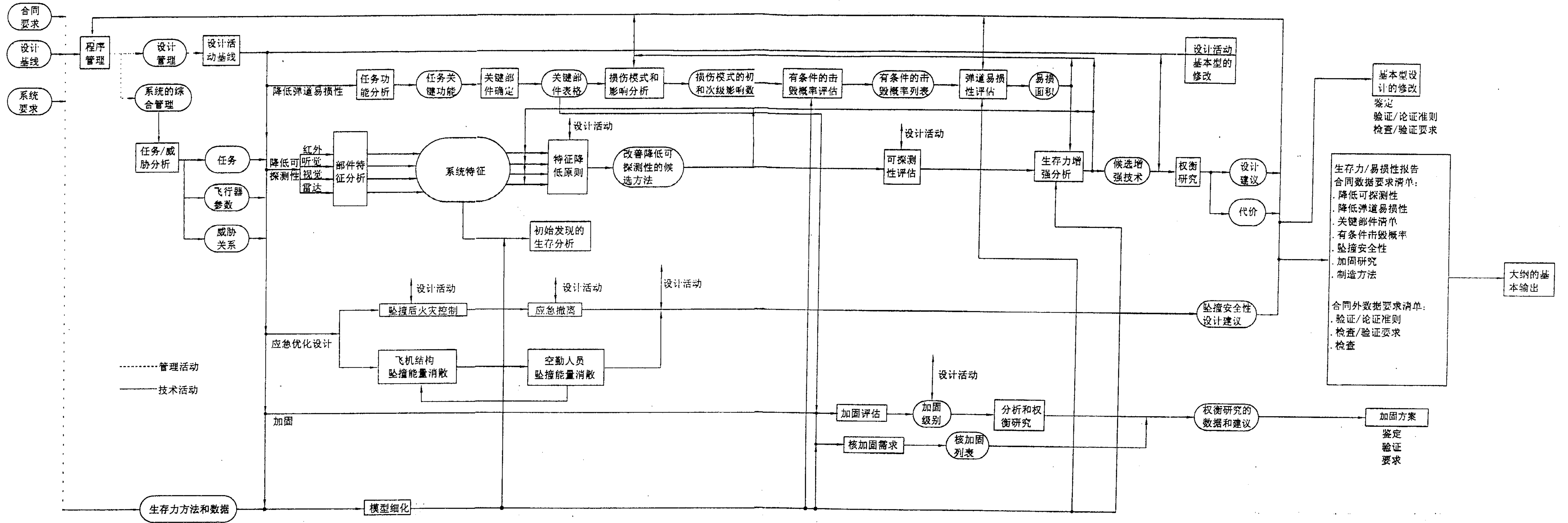


图 生存力大纲计划任务流程图

#### 4.5.1 减少可探测性

包括：

- a) 减小雷达散射截面；
- b) 红外信号抑制；
- c) 声响信号抑制；
- d) 视觉信号抑制；
- e) 电子对抗；
- f) 假目标。

#### 4.5.2 回避威胁

包括：

- a) 雷达报警；
- b) 红外探测。

#### 4.5.3 抑制威胁

包括：

- a) 电子对抗；
- b) 杀伤性防御。

#### 4.5.4 对威胁机理的防护

包括：

- a) 穿甲弹；
- b) 燃烧弹；
- c) 高速碎片；
- d) 爆炸超压；
- e) 其他威胁(如：高能激光等)。

### 4.6 验证方法

承制方应进行与生存力要求相一致的需求分析和试验,制订验证计划和方法,并将生存力要求和验证方法纳入转承制方的规范中。这些要求旨在确保最终的产品达到期望的生存力水平,并符合飞机系统的规范要求。

为了通过验证工作(试验或分析)获取必要的数,应明确飞机系统和遭遇的威胁参数,以便确定要实施的试验类型、仪表设备的数量、质量和试验条件等。

## 5 详细要求

### 5.1 威胁系统

本标准所陈述的非核武器威胁系统是传统的弹道威胁系统和高能激光威胁系统。

在任何航空武器系统里,包括所有的设备、结构和空勤人员,对于由敌方非核武器威胁与目标系统相互作用而造成的破坏机理非常敏感。为确保在有非核武器保护要求的作战系统设计中,适当考虑威胁及其接触效应,需要明确定义非核武器威胁的特性。

飞机系统设计应考虑那些与作战方案相关的威胁系统。非核武器威胁参数,将随着与敌方遭遇时的情况而变化。

非核武器威胁的破坏机理包括：

- a) 撞击和穿透(射弹、碎片和散裂)；
- b) 燃烧(起火)；
- c) 爆炸效应(超压和热量)；
- d) 激光烧蚀。

### 5.1.1 弹道武器系统

敌方非核武器威胁系统使用的是弹道破坏机理,它包括轻武器,高射炮,地对空导弹和舰对空导弹。飞行平台上装载的武器系统有空对空火箭、空对空导弹以及航空机炮。

无爆炸威胁的破坏机理是撞击力和穿透力,其产生的热量和结构破坏应力,造成了机体及设备的破坏和对空勤人员的打击。

爆炸威胁的破坏机理是使用的高爆弹,通过接近目标、碰撞、命中信号或定时引信来触发。这种高爆弹一旦爆炸,把所携带的射弹(战斗部)散射成许多高速碎片,产生了极强的高压冲击波、激波和高温热环境。

在无爆炸威胁和爆炸威胁的制造过程中,都可以添加燃烧剂的成分。当易燃材料进入目标后,此添加剂增强了弹道威胁的破坏效果。

#### 5.1.1.1 参数

##### 5.1.1.1.1 威胁系统主要参数

影响威胁系统主要参数如下:

- a) 威胁系统到目标的斜距;
- b) 目标探测距离;
- c) 跟踪目标的速度极限;
- d) 平台角度的操作范围和发射准确度;
- e) 威胁发射速度(如炮口初速度);
- f) 亮度或照度;
- g) 末端制导方式。

##### 5.1.1.1.2 环境参数和射弹参数

影响威胁终端效应的环境参数包括:空气密度、风速、风向、能见度、云层、温度和湿度。影响射弹和碎片的飞行准确度和终端效应的射弹参数如下:

- a) 初速度;
- b) 弹道阻力(气动力外形);
- c) 稳定性;
- d) 射弹重量;
- e) 射弹头部外形设计(穿透能力);
- f) 射弹材料的强度性能。

##### 5.1.1.1.3 设计和结构参数

影响威胁终端起爆效应的几个设计和结构参数如下:

- a) 起爆方式;
- b) 爆炸延迟时间;
- c) 烈性炸药的类型、重量、尺寸和形状;
- d) 战斗部壳体的重量和厚度;
- e) 壳体的弹着偏差;
- f) 末端制导方式。

##### 5.1.1.1.4 弹道参数

影响威胁效应的理论弹道因素:

- a) 爆炸前战斗部的阻力特性;
- b) 爆炸后的碎片形状、重量、阻力特性及最大速度。

#### 5.1.1.2 轻武器

发射射弹的口径小于和等于 14.5mm 的武器称为轻武器。实用的口径有:7.62mm、12.7mm 和

14.5mm。轻武器主要分为下列三种：

- a) 手持型(手枪)；
- b) 肩式射击型(手提(半)自动枪、卡宾枪、步枪和狙击步枪)；
- c) 支架型(连用机枪、轻型机枪、重型高射机枪以及小口径高射机枪)。

#### 5.1.1.2.1 类型

常用的轻武器类型见表 1。

表 1 轻武器类型

类 型	7.62mm	12.7mm	14.5mm
手提(半)自动枪	✓		
卡宾枪	✓		
狙击步枪	✓		
连用机枪	✓		
轻机枪	✓		
重机枪	✓		
重高射机枪	✓	✓	
军舰上装备的轻武器		✓	✓

#### 5.1.1.3 高射炮

高射炮可以固定在地面上,也可以安装在活动平台上或作为海军武器安装在舰船上,其口径范围从 14.5mm 到 130mm。当口径在 57mm 以下时,高射炮装在地面活动平台上,口径较大的则要安装在固定装置上。口径大于 85mm 的高射炮由于调度频率低,因此配置的数目有限。各种高射炮的安装方式见表 2。

表 2 高射炮安装方式

口 径 mm	陆地活动式	陆地固定式	海军型舰船式
14.5 <sup>1)</sup>	✓		
23	✓		
37	✓		✓
57	✓	✓	✓
85		✓	✓
100		✓	
130		✓	

注:1) 14.5mm 的武器既可当作轻武器,也可当作高射炮。

#### 5.1.1.4 面对空导弹

安装方式：

- a) 陆地对空导弹一般都为活动式。此类导弹的陆地活动方式有车载的和肩射的。
- b) 海基面对空导弹被安装在各类舰船上。只有当安装导弹的舰船活动时,导弹才算是活动的。

#### 5.1.1.5 机载威胁系统

机载威胁系统是指那些使用飞机作为武器发射平台的系统。按照其战斗作用可分为以下几种类型：

- a) 用于防御的武器平台,有歼击机、截击机和歼击轰炸机;
- b) 用于支援地面部队的武器平台,有强击机、歼击轰炸机和武装直升机;
- c) 用于攻击敌方纵深目标的武器平台有轰炸机。

由以上这些飞机携带的机载威胁系统,包括各种型号和规格的航空机炮、航空火箭弹和空空导弹。

### 5.1.2 高能激光武器

高能激光武器系统是对非核生存力有显著影响的新型威胁系统。激光武器基本的破坏机理是用很高的热能,象光束那样,在很短时间内集中在一个目标上,使目标的关键部件烧蚀而破坏。

### 5.1.3 终端武器效应系统

终端武器效应是在最终阶段由威胁产生的破坏动能转换到目标中的结果。射弹和碎片的威胁与其质量和速度有关,可以采用被动方法或主动方法来提高射弹的破坏能力。目前,由于尺寸的限制,阻碍了高爆炸药和射弹引信装置在轻武器中的使用,因此主动型武器的射弹只有燃烧弹和曳光弹两种。在弹药中添加能够提高热动能的燃烧混合物,是为了产生高温粒子,并使这些粒子在易燃材料存在的情况下点着火焰。弹药中有时也添加曳光混合物,以便射弹在整个飞行中,通过燃烧和可见光幅射,能够帮助改善射弹的命中率。较大的射弹可以含有高爆炸药,在这种配置中,射弹作为一个弹头,而高爆炸药以潜能的方式储存了大量能源。爆炸中,潜能转化成热能和高压能。高压能的作用主要是引起威胁壳体的结构分离和使残余物(碎片)的分离加速:并生成过压和激波,从而产生导致目标结构破坏的非正常应力。以飞机为目标的射弹主要有:

- a) 弹丸;
- b) 穿甲弹;
- c) 曳光弹;
- d) 燃烧弹;
- e) 高爆炸弹。

威胁的物理特性,有关的射弹和导弹威胁在最终阶段的特性,可以通过易损性分析技术转化成对目标破坏的潜能和目标保护需求。

#### 5.1.3.1 轻武器射弹

轻武器威胁在攻击目标时,它的碰撞速度与射弹的重量确定了产生破坏的可用能量。枪口速度、枪到目标的斜距和射弹的弹道阻力确定了此类武器射弹速度与射程的关系。

#### 5.1.3.2 导弹和炮

有关各种型号的地对空导弹和海基面对空导弹的物理特性和最终阶段弹道特性,可查阅有关资料。

炮是指其口径大于 14.5mm 的机载炮(机炮)和高射炮。它们最终阶段的破坏机理包括射弹穿透燃烧,高爆炸片和冲击波效应。

#### 5.1.3.3 高能激光武器

高能激光武器效应依赖于目标与武器间传播媒介的特性。这些特性取决于湿度、空气中微粒含量、紊流度等,并受到动力冷却和热霜的非线性影响。高能激光武器效应可以用光束持续时间、尺寸和射到目标上的强度来定义。当照射目标飞机的光束尺寸和强度是高能激光武器和传播媒介特性的主要函数时,目标上光束持续的时间主要是由交战情况和发射原则而定的。高能激光武器效应对系统其他参数的敏感性,要比对传播媒介参数的敏感性强。影响这些敏感性的因素包括:高能激光武器特性、交战情况、发射原则、发射条件、目标特性和目标防护措施。

要确定高能激光武器系统和传播媒介特性之间的关系,得到照射目标飞机的光束强度和尺寸是很复杂的过程。最好的办法是使用计算机模型,该模型应包含反映高功率、连续波激光束媒介的主要现象,并将媒介路径分成许多区间,在每个区间内检验大气影响,计算出集中或平行激光束的强度和尺寸。

#### 5.1.3.4 低能激光武器

低能激光武器对空中飞行系统也是一个潜在的威胁。低能激光束可能导致空勤人员的眼睛、红外线探测仪、TV 扫描器等永远或暂时失去功效。

## 5.2 易损性评估

易损性评估主要包括:定义系统破坏等级、关键部件识别、条件击毁概率准则和易损性评估方法及步骤。易损性评估限定为所涉及的飞机和部件对规定武器反应的有效等级。

### 5.2.1 易损性度量

因军用飞机遭受敌方环境的多变性,衡量易损性的参数将随所遇到的损伤类型而变。例如,如果某种射弹的命中会产生某种等级的损伤,那么最好以对飞机的一次打击为基础进行易损性的度量;当损伤是由近距爆炸的导弹战斗部或高爆射弹的碎片和冲击波引起时,最好是用对飞机的一次射击的结果来表示易损性。

当飞机暴露于某一确定的敌方环境时,易损性的衡量尺度是飞机破坏(或生存)达到某一确定等级的条件概率和易损面积。

### 5.2.2 易损面积

就给定的威胁和所遇环境而言,一个部件的易损面积( $A_{Vi}$ )是该部件的有效面积( $A_{Pi}$ )和该部件给定命中条件下杀伤概率( $P_{KH_i}$ )的乘积,可用公式表示为:

$$A_{Vi} = A_{Pi} \cdot P_{KH_i} \dots\dots\dots (1)$$

在考虑了功能上的多余度和迭加后,飞机总易损面积( $A_V$ )就是其各个部件易损面积( $A_{Vi}$ )之和。

### 5.2.3 目标破坏类别/破坏等级

为了估算固定翼和旋翼类飞机的易损性,定义四种破坏类型:损耗、强迫着陆、任务终止和任务完成。在每一破坏类别中又定义了不同的破坏等级。

#### 5.2.3.1 损耗

这一类别适用于带有大范围战斗损伤的飞机(对这些飞机进行再修理,既不经济又不合理)。损耗可分为六个破坏等级:“KK”、“K”、“A”、“B”、“C”和“E”。前四个等级具有顺序包含关系(即:“B”包含“A”、“K”、“KK”;“A”包含“K”、“KK”;“K”包含“KK”)和时间上的依赖关系。这些破坏等级是:

- a) “KK”破坏(又称为“灾难性”破坏)——该破坏等级用以度量飞机被击中后即刻解体的损坏。固定翼和旋翼类飞机结构损坏可导致“KK”破坏。结构解体通常由以下情况引起:射弹或导弹战斗部在飞机内部或外部爆炸、油箱爆炸、被来自破片式导弹战斗部的高密碎片和导弹冲击波击中、由发动机破坏引起的爆炸、机载武器的爆炸等。
- b) “K”破坏——该破坏等级用以度量在飞机被击中 30s 内,使飞机丧失人工控制能力的损坏。驾驶员(单人时)和下列部件的损(伤)坏可导致“K”破坏:固定翼飞机的结构、发动机(单发)、飞控系统、弹药;旋翼类飞机的结构、主旋翼组和弹药等。
- c) “A”破坏——该破坏等级用以度量在飞机被击中 5min 内,使飞机丧失人工控制能力的损坏。下列部件的损坏可导致“A”破坏:固定翼和旋翼类飞机的发动机、燃油系统和操纵系统(机械式和液压式)等。
- d) “B”破坏——该破坏等级用以度量在飞机被击中 30min 内,使飞机丧失人工控制能力的损坏。下列部件的损坏可导致“B”破坏:固定翼和旋翼类飞机的发动机、燃油系统、操纵系统(机械式和液压式)以及辅助动力装置及其燃油系统等。
- e) “C”破坏——该破坏等级用以度量在完成任前,使飞机丧失人工控制能力的损坏。
- f) “E”破坏——该破坏等级用以度量飞机在着陆时受到的附加损坏。这种损坏按照有关规定的要求,进行修复工作将是不经济的。起落架、操纵系统和飞机操纵翼面的损坏可导致“E”破坏。

#### 5.2.3.2 强迫着陆

这一类别涉及飞机战斗损伤后迫使空勤人员进行强迫着陆(有动力或无动力)。它包括两种情况:其

一是损伤的飞机经必要的修理后可飞往另一地方;其二是损伤不能在现场修复,但可以通过某一特别工作队完成修理工作。下述部件的损坏可导致强迫着陆:

- a) 固定翼飞机:液压系统、燃油管路、电气系统和发动机等;
- b) 旋翼类飞机:发动机(单发时)、主传动装置润滑系统、尾桨传动装置(包括齿轮盒)和尾桨操纵系统等。

### 5.2.3.3 任务终止

这一类别妨碍飞机完成其指定任务,但允许飞机带着战斗损伤返回基地。

### 5.2.3.4 任务完成

这一类表示飞机完成任务后带有战斗损伤安全着陆,且经必要的修理后可恢复其战斗力。根据损伤程度,使其恢复战斗力的间隔期各不相同。间隔期可以是时间或工时,或两者的组合。

### 5.2.3.5 破坏类别的有关说明

对于旋翼类飞机,要考虑前进飞行和悬停两种飞行状态。在前面所述的破坏等级中所列出的关键部件是对前进飞行而言的。前进飞行中强迫着陆的某些关键部件,在悬停状态下也许成为损耗的关键部件(例如尾桨传动装置)。若直升机不是飞行在高度-速度包线中的危险区域,悬停并不一定意味着零空速。应该注意到,易损性研究中强迫着陆的破坏类别,不适用于旋翼类飞机,这是因为该类飞机在有动力或旋翼自转状态下,几乎可以在任何地点着陆。许多这类飞机的空勤人员,可以在地面对飞机进行少许修理,然后再次起飞返回基地,或者还可继续任务飞行。然而,对一架受损的固定翼飞机来说,要成功地完成强迫着陆(或随后的再起飞)要困难得多,因为通常需要特别准备好着陆场地。鉴于旋翼类飞机的特殊性,5.2.3.1中按被击中后某一时间内飞机失控而划分的破坏等级,对于旋翼类飞机而言暂不适用。

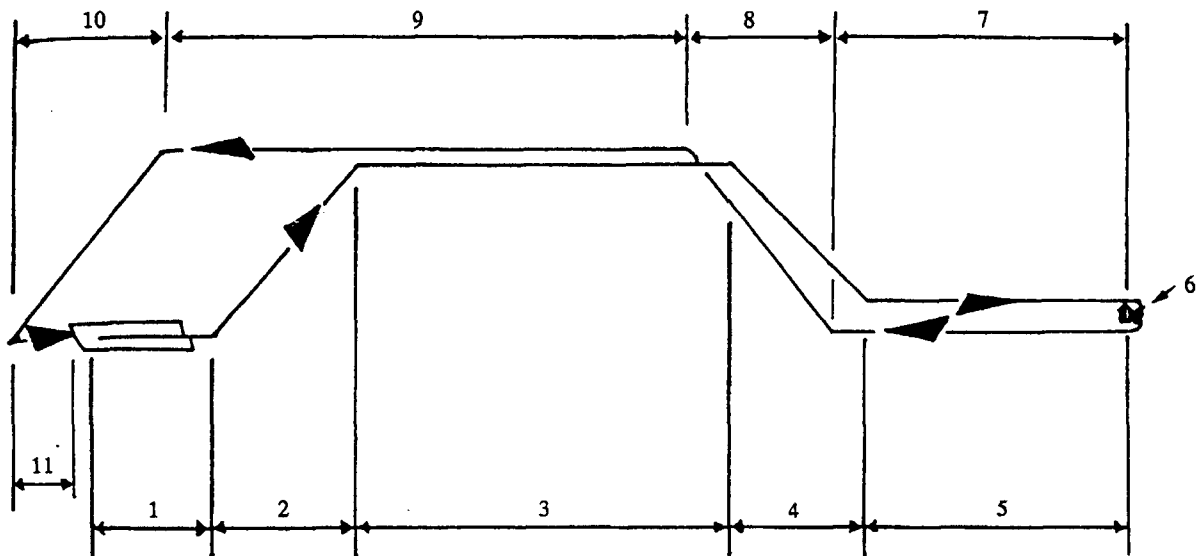
对于固定翼垂直和短距起飞着陆的飞机,还可使用“V”破坏等级;

“V”破坏——导致飞机丧失垂直飞行或起降能力的损坏。

### 5.2.4 关键部件识别

在非核易损性评估中,关键部件是指一旦遭到损坏或摧毁,可直接或间接确定飞机破坏等级的那些飞机设备或部件。为对关键部件进行识别,需考虑采取以下步骤:

- a) 分析和确定飞机在每个飞行阶段的战斗任务(见图3);



- 1 起飞    2 爬升    3 出航    4 下滑    5 突防    6 格斗或攻击目标
- 7 撤离    8 爬升    9 返航    10 下滑    11 着陆

图3 战斗任务剖面示例

- b) 对每一任务阶段所必须的系统功能进行识别。然后确定飞机子系统的功能:即那些为完成系统基本功能所必须的功能;
- c) 进行失效模式及其影响分析(FMEA)和损伤模式及其影响分析(DMEA),以确定丧失子系统功能的具体部件的失效模式。FMEA应执行 GJB 1391 的规定。

#### 5.2.4.1 系统基本功能

为维持飞行或完成任务或两者所需的那些功能称之为系统基本功能。表 3 给出了某直升机每一任务阶段所需求的系统基本功能。

表 3 某直升机每一任务阶段所需求的系统基本功能

项目	系统基本功能	任务阶段						
		待命	起飞	飞至待命位置	飞至进攻位置	与目标交战	返航至战区前沿	着陆
1	通讯	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
2	起动		✓					
3	监视			✓	✓	✓	✓	
4	提供升力		✓	✓	✓	✓	✓	✓
5	控制飞行		✓	✓	✓	✓	✓	✓
6	提供大气数据信息		✓	✓	✓	✓	✓	✓
7	保持离地高度		✓	✓	✓	✓	✓	
8	敌我识别/电子对抗			✓	✓	✓	✓	
9	导航		✓	✓	✓	✓	✓	
10	定位/确定目标			✓	✓	✓	✓	
11	使用武器					✓		

#### 5.2.4.2 子系统基本功能

对系统基本功能进行分析,以确定相关的子系统。表 4 给出了一个系统基本功能与子系统基本功能的关联情况。

表 4 系统基本功能与子系统基本功能的关联

项目	系统基本功能	关联子系统								
		电源	液压系统	动力装置	空勤人员及空勤舱	燃油系统	飞行控制系统	航空电子设备	武器	基本结构
1	通讯	✓			✓			✓		
2	起动	✓	✓	✓	✓	✓		✓		
3	监视	✓			✓			✓		
4	提供升力	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓		✓
5	控制飞行	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓		✓
6	提供大气数据信息	✓			✓			✓		
7	保持离地高度	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓		✓
8	敌我识别/电子对抗	✓			✓			✓		
9	导航	✓			✓		✓	✓		
10	定位/确定目标	✓			✓			✓		
11	使用武器	✓	✓		✓		✓	✓	✓	✓

对每一子系统进行分析是为了确定子系统功能以及它与系统基本功能的关系。表 5 给出了一个电源系统分析的实例。子系统部件按其重要程度可分为以下三类：

- a) 种类 1——基本任务(主要模式):完成基本功能所采用的正常或优先模式;
- b) 种类 2——基本任务(备份模式):主要模式丧失后,完成基本任务功能的替代模式;
- c) 种类 3——非基本任务:设备(部件)的丧失将不妨碍任务的完成,但可能明显降低飞机性能或导致完成基本任务的设备损坏。

表 5 电源子系统与系统基本功能关系

项目	子系统 基本功能	系 统 基 本 功 能										
		通讯	起动 系统	监控 系统	提供 升力	控制 飞行	提供大 气数据 信息	保持 离地 高度	敌我识 别/电 子对抗	导航	定位/ 确定 目标	使用 武器
a	发电机电源	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
b	供电自动控制及保护	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
c	配电	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
d	配电自动保护	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
e	电流转换(直流和交流)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
f	应急电源	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
g	控制系统	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
h	处理和发送子系统数据及 配电控制信号	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
i	提供电负载自动管理			✓								
j	操纵和显示		✓	✓								
k	提供照明	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

#### 5.2.4.3 失效和损伤模式及其影响分析

失效模式及其影响分析,可用来确定子系统在完成其指定功能时,单个部件失效或故障的后果。对于每个部件,所有可能的失效模式的研究资料,可用于系统的易损性评估。一种进行失效模式及其影响分析的方法是对每个系统/子系统的图解法,该方法形象地表示出每一子系统内的所有部件,以及所有部件与其他子系统中零件的内部联系。余度和独立性也可用图解法表示出来。图 4 为燃油子系统图解法的实例。借助这个方法可系统地确定用于分析的每一部件或零件。然后再分析确定每个部件对完成每次飞行和对任务基本功能的贡献。

损伤模式及其影响分析是在失效模式及其影响分析基础上,对每个威胁损伤模式及其影响进行分析,从而得到威胁损伤机理与部件易损性及所造成的破坏等级之间的关系。

通过以上分析对那些完成基本功能起作用的部件就组成了关键部件集。

##### 5.2.4.3.1 识别编码

识别编码用以确定每一子系统内部的各个部件,并尽可能地与已有的其他识别编码兼容,如与飞机使用维护系统的工作单元代码或飞机的分解结构代码兼容。随着设计工作的深入,对识别编码应该做适当的增减。

##### 5.2.4.3.2 子系统部件分析

对每一子系统部件的分析,旨在确定具体零部件所有可能的失效模式,它包括故障以及无法使用的条件。

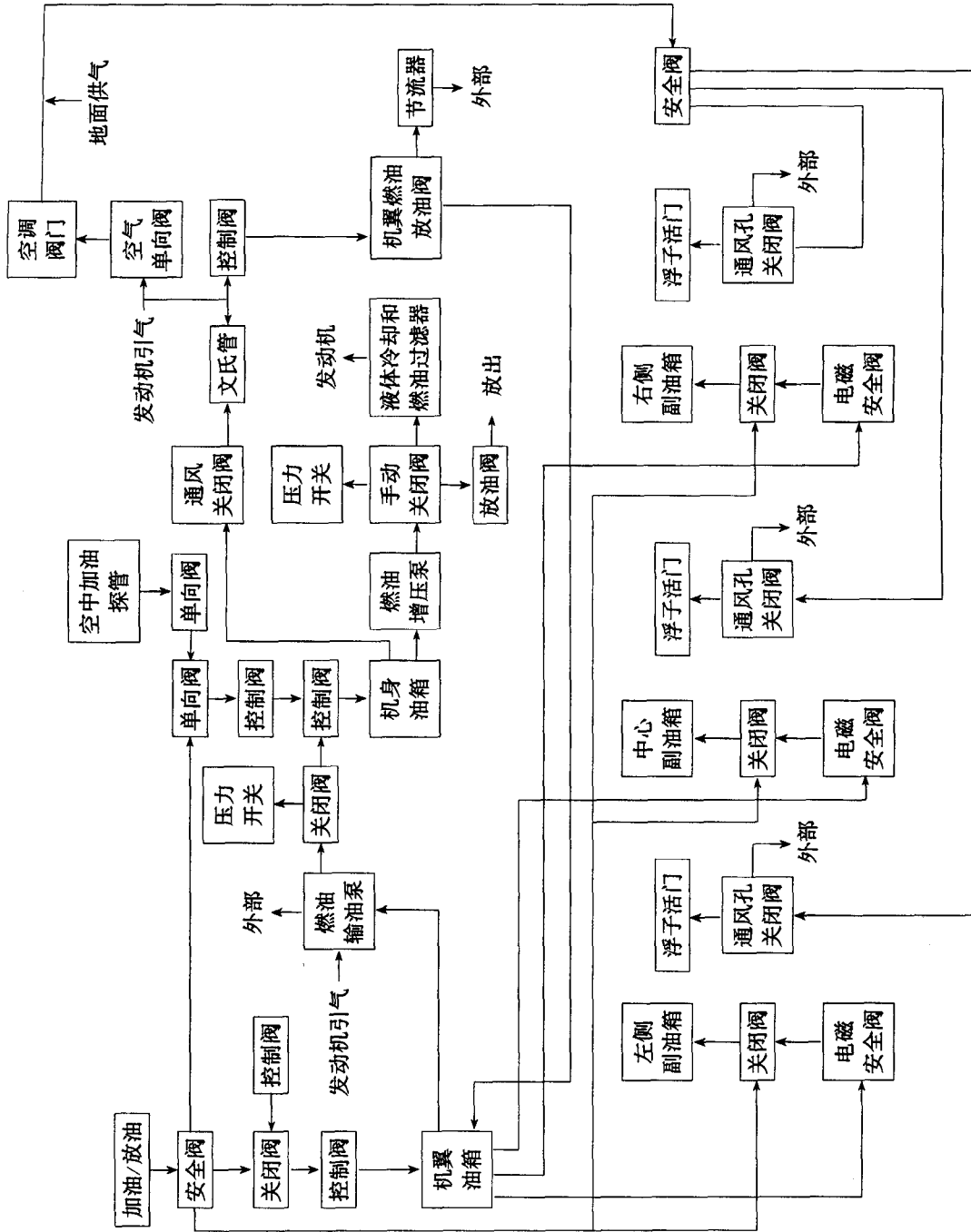


图 4 燃油系统图解法示例

### 5.2.4.3.3 部件失效

对失效模式进行分析,可确定每一部件失效模式对单元子系统的影响,以及对其他部件或者对一个功能上或物理上有界面的子系统的影响;还可确定部件失效直接或通过中间子系统对整架飞机系统产生的影响。

### 5.2.5 条件击毁概率

被射弹或碎片命中的部件条件击毁概率表示为给定命中的击毁概率  $P_{K/H}$ ;对暴露于给定等级的高能激光束区域的部件,给定的暴露击毁概率表示为  $P_{K/E}$ ;对遭受爆炸冲击波超压的部件,给定的有效超压等级的击毁概率表示为  $P_{K/P}$ 。通过对部件特定物理特性和敌方武器效应产生的破坏机理的分析和试验,可确定每一种概率的具体数值。如果确实没有足够的数据,可用相似内容的现存数据予以估计。

### 5.2.6 易损性评估

易损性评估用于定量地确定特定系统在敌方威胁环境下的易损性。飞机系统的易损性评估有以下作用:

- a) 帮助设计者在飞机设计中进行决策;
- b) 帮助军方对竞标设计方案进行评价;
- c) 帮助部队指挥员制定飞机作战的具体战术。

为了完成易损性评估,必须选择合适的分析方法。通常,对于几个特定武器效应和几个飞机破坏等级的评估,包含确定适用的衡量易损性的量化方法。对于射弹和外部碎片的袭击,要对每一预计攻击方向的易损面积进行计算;对外部的爆炸冲击波效应,应确定飞机的易损体积;对于外部爆炸,要考虑冲击波和碎片两方面的杀伤机理。因此,易损面积和体积都必须计算。

可使用布置图或用摄影方法得到的缩比飞机模型进行易损性手算,或使用计算机编程计算。使用真实部件图形进行手算,可得到最大的准确度,但是,它要求分析者具有丰富的经验,计算范围只能是有限数量的观察方向、破坏等级和威胁的组合。应用计算机可加速计算,但结果的精度主要依赖于程序输入的精度和所建模型的复杂程度,这两项工作都很费时,计算飞机易损性选择手算或用计算机计算,主要依赖于计算评估过程的有效性以及许多其他因素,这包括所需原始信息的精度和预计的易损性评估的工作强度。在确定了输入参数后,再选择合适的分析方法,计算飞机的易损性。

最后的工作就是以恰当的方式描述结果。描述结果的格式将取决于此研究的目的和满足完成该研究的需要。如果研究的目的是进行飞机设计,最适用的描述结果是易损面积(或体积)和命中或爆炸击毁飞机的条件概率,因为这些数值可直接用于生存力分析的输入。

#### 5.2.6.1 射弹攻击目标飞机的易损性

射弹攻击对飞机的易损性,可表示为用规定的损坏机理随机命中飞机,并使飞机破坏达到一定等级的概率  $P_{K/H}$ 。因此,飞机击毁概率取决于随机命中后关键部件被破坏的可能性,关键部件的失效,将导致飞机一定的等级破坏。如果我们假设这些关键部件  $P_{K_i}$  中的任何一个被击中将导致飞机破坏,那么:

$$P_{K/H} = P_{K_1} + P_{K_2} + \dots + P_{K_n} = \sum_{i=1}^n P_{K_i} \dots\dots\dots (2)$$

式中:

$n$  ——关键部件的个数;

$P_{K_i}$  ——命中飞机时,击毁第  $i$  个部件的概率。每一  $P_{K_i}$  依次为两个概率的乘积;

$$P_{K_i} = P_{K/H_i} \cdot P_{H_i/H}$$

式中:

$P_{K/H_i}$  ——命中部件时,击毁第  $i$  个部件的概率;

$P_{H_i/H}$  ——飞机随机命中时,命中第  $i$  个部件的概率, $P_{H_i/H}$  可由下式得出:

$$P_{H_i/H} = A_{P_i}/A_P$$

式中:

$A_{P_i}$ ——第  $i$  个部件在所假定的方向上的有效面积,  $m^2$ ;

$A_P$ ——整架飞机在所假定的方向上的总有效面积,  $m^2$ 。

通过以上公式的转换可得出:

$$\begin{aligned} P_{K/H} &= \sum_{i=1}^n P_{K_i} = \sum_{i=1}^n P_{K/H_i} P_{H_i/H} = \sum_{i=1}^n \frac{P_{K/H_i} A_{P_i}}{A_P} \\ &= \frac{P_{K/H_1} A_{P_1}}{A_P} + \frac{P_{K/H_2} A_{P_2}}{A_P} + \dots + \frac{P_{K/H_n} A_{P_n}}{A_P} \end{aligned}$$

$$\text{令 } A_{V_i} = P_{K/H_i} \cdot A_{P_i}; \quad A_V = \sum_{i=1}^n A_{V_i}$$

则上式可转换成:

$$P_{K/H} = \frac{A_{V_1} + A_{V_2} + \dots + A_{V_n}}{A_P} = \frac{\sum A_{V_i}}{A_P} = \frac{A_V}{A_P} \dots\dots\dots (3)$$

式中:

$A_{V_i}$ ——第  $i$  个部件的易损面积,  $m^2$ ;

$A_V$ ——飞机总易损面积,  $m^2$ 。

在这些推导中,假设任何一次命中都是均匀分布的,即射弹平均地落在飞机有效面积上的任何地方。如果目标飞机相对于武器的火力范围很小,或者说,如果武器弹道分散形式与目标飞机的尺寸相比很大,那么,这种假设通常是有效的。在这种情况下,射弹也可假定以平行轨迹飞行,有可能使飞机的所有零件受单一方向的攻击。显然,在推导中,任何一个关键部件的击毁都将导致飞机特定的破坏等级,只有关键部件是单一易损的(即所有关键部件都没有余度、备份或替代件),这个条件才能满足。如果任何一个关键部件是多重易损(冗余部件)的,要使飞机破坏则需要摧毁它们中两个或更多的部件(如四台发动机中的三台,两名驾驶员的双方等),那么,这些部件对飞机破坏所起的作用必须修正。

如果某一特定射弹命中目标,并导致该目标一定的破坏等级,那么这个目标的易损面积  $A_V$  在数学上可表达为有效面积  $A_P$  的加权值。其加权系数是随机命中击毁目标的概率  $P_{K/H}$ 。有效面积  $A_P$  是该目标在垂直命中射弹轨道平面上的投影面积,即  $A_V = P_{K/H} \cdot A_P$ 。也就是说,随机命中击毁飞机(由单一易损部件组成)的概率等于易损面积与有效面积的比值。在生存力分析中,为了能够得到随机命中击毁飞机的概率,计算飞机的这两个面积就成了主要问题。

### 5.2.6.2 部件的易损面积

关键部件的易损面积可用数学的方法精确地表达为:

$$A_V = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} P_{K/H}(x, y) dx dy \dots\dots\dots (4)$$

式中:

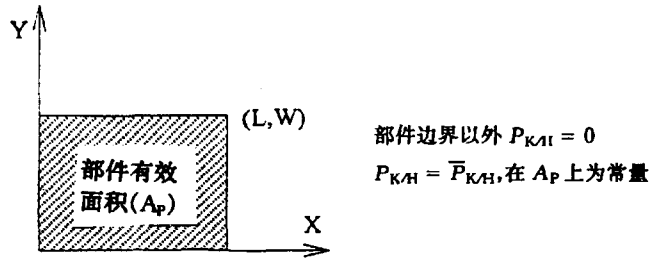
$P_{K/H}(x, y)$ ——射弹在命中点  $(x, y)$  处,使部件失效的概率。

这个积分是在攻击弹道上能导致飞机关键部件损坏的某一法平面内完成的。

当射弹是一颗子弹或一块碎片时,其面积效应只是一个点,部件有效面积  $A_P$  之外的  $\bar{P}_{K/H}$  值为零。易损面积可写成:  $A_V = \bar{P}_{K/H} A_P$ 。

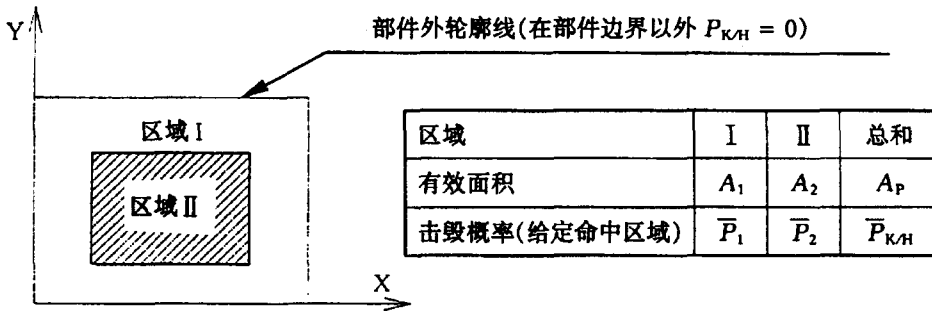
图 5 给出了两个实例。其中,依据点效应损伤机理,  $\bar{P}_{K/H}$  为单发随机命中在部件有效面积上造成失效的平均概率。

例1 ( $P_{KH}$  为常量)



$$A_v = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} P_{KH}(x, y) dx dy = \int_{-\infty}^L \int_{-\infty}^W P_{KH}(x, y) dx dy = \int_{A_p} P_{KH}(x, y) dx dy = \bar{P}_{KH} A_p$$

例2 ( $P_{KH}$  为变量)



$$A_v = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} P_{KH}(x, y) dx dy = \int_{A_1} P_1(x, y) dx dy + \int_{A_2} P_2(x, y) dx dy = \bar{P}_1 A_1 + \bar{P}_2 A_2$$

$$A_v = (\bar{P}_1 A_1 + \bar{P}_2 A_2) \frac{A_p}{A_p} = (\bar{P}_1 \frac{A_1}{A_p} + \bar{P}_2 \frac{A_2}{A_p}) A_p = \bar{P}_{KH} A_p$$

图5 点效应损伤机理的部件有效面积计算举例

当飞机仅仅由符合下列条件的部件组成时,只需简单地将各部件的易损面积叠加起来,就可得到飞机的总易损面积:

- a) 单一易损的;
- b) 无防护的;
- c) 无重叠的;
- d) 不考虑累积的综合损伤。

由于射弹面积效应的原因,必须对部件的有效面积这个概念进行修正。

5.2.6.2.1 面积效应

当射弹有触发引信高爆燃烧那样的面积效应时,一个近距脱靶射弹照样能够损坏飞机的部件。因此,  $A_v$  的积分面积应该是一个在所假定方向上比部件有效面积要大的“实际”有效面积(见图)6。

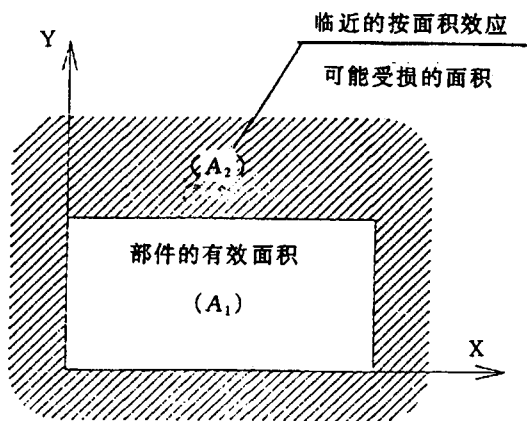


图6 面积效应损伤机理的部件易损性

图6中: 
$$A_v = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} P_{K/H}(x, y) dx dy = \int_{A_1} P_{K/H_1}(x, y) dx dy + \int_{A_2} P_{K/H_2}(x, y) dx dy$$

$$= \bar{P}_{K/H_1} A_1 + \bar{P}_{K/H_2} A_2 = \bar{P}_{K/H} A_p$$

这里: 
$$\bar{P}_{K/H} = \bar{P}_{K/H_1} \frac{A_1}{A_p} + \bar{P}_{K/H_2} \frac{A_2}{A_p} \quad A_p = A_1 + A_2$$

式中:

$\bar{P}_{K/H_i}$ ——依据面积效应损伤机理,在第*i*个区域内(*i* = 1,2)的任一单发命中造成所要求的破坏等级的平均概率;

$A_i$ ——在假定方向上,在第*i*个区域内(*i* = 1,2)的有效面积,  $m^2$ ;

$A_p$ ——在假定方向上,部件的有效面积(即在攻击弹道上,能导致飞机关键部件损坏的某一法平面内,部件总的投影面积,  $m^2$ )。

### 5.2.6.2.2 尺寸大于关键部件的射弹

在射弹或碎片的尺寸比关键部件大的情况下(见图7),威胁造成的破坏面积要比部件的有效面积大。在电缆、小直径拉杆、燃油箱、液压管、滑油箱、小直径控制管路及其他类似的项目中,用下式计算  $P_{K/H}$  值:

$$P_{K/H} = \frac{D + d - 2\theta d}{d} \dots\dots\dots (5)$$

式中:

$D$ ——射弹剪切长度或直径,  $m$ ;

$d$ ——关键部件的直径(管路、线路、拉杆等),  $m$ ;

$\theta$ ——管状件受损部分(功能不减)对应的中心角,  $rad$ 。

对  $P_{K/H}$  的计算是假设没有发生累积损伤的情况下才成立的。亦即,一次命中造成的损伤是独立的,与其他任何一次命中都无关。否则,  $P_{K/H}$  不能看作一个常量,而应随每次命中及先前命中造成损伤的程度而变化。从排除累积的观点,以及任何特定命中在部件有效面积上,造成“破坏”或“未破坏”的事实出发,认为  $P_{K/H}$  值与命中次数无关。亦即,部件的易损面积与部件的命中次数无关。单发命中造成损坏的假设是建立在大量作战经验基础上的,对地面高射炮及轻型武器而言,约85%的飞机损伤是由单发命中造成的,空中格斗统计数据也表明,飞机被命中的平均数不会超出1。如果在敌方空中防御体系中装备有四联装23mm高射炮及其他现有的高发射率高炮的情况下,由单发命中造成飞机损伤的百分数将会急剧降

低。

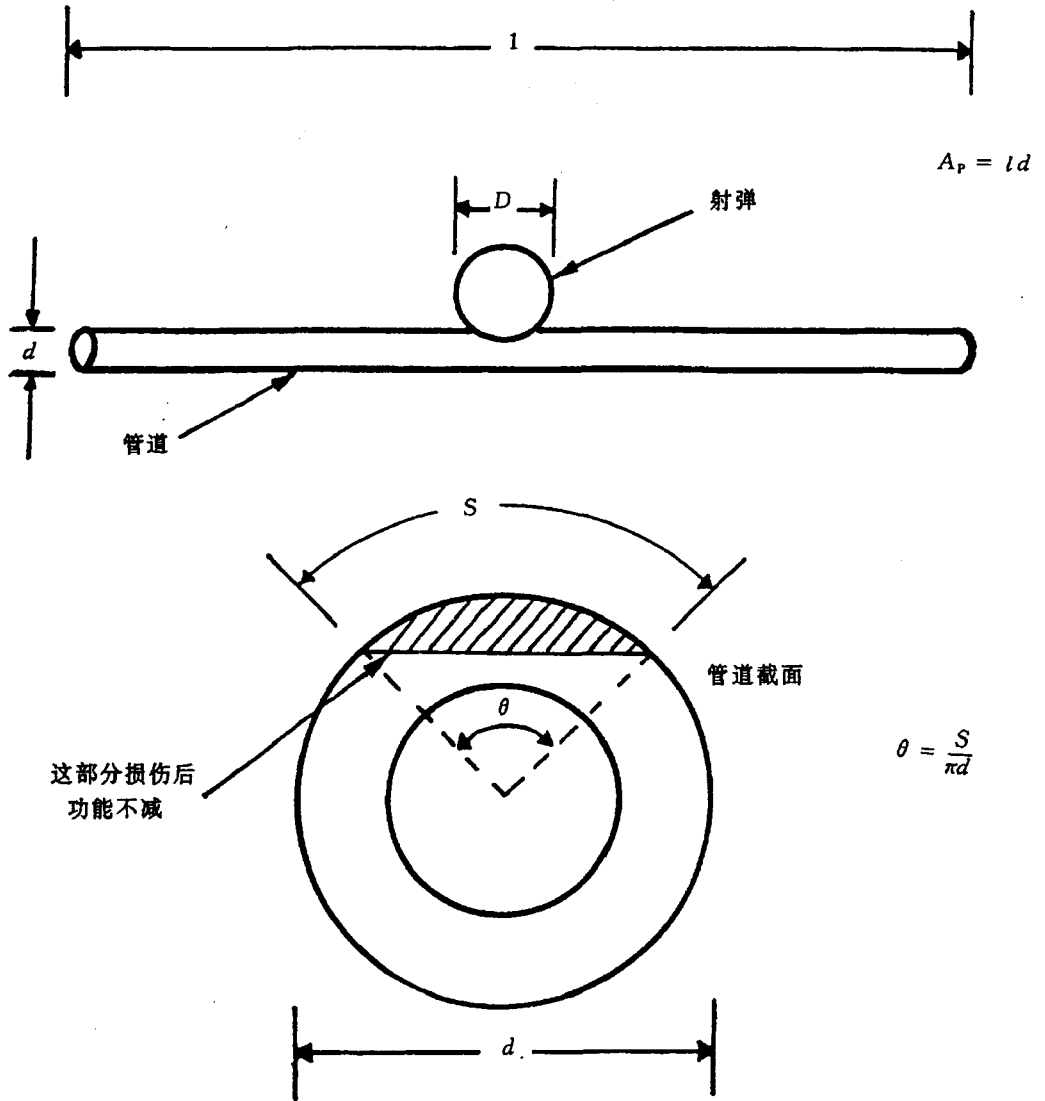


图7 大于关键部件的射弹造成部件的损伤

### 5.2.6.3 飞机易损面积

一旦确定了飞机每个关键部件的易损面积,便可计算整架飞机的易损面积。如果:

- a) 部件的有效面积不存在防护和重叠;
- b) 没有累积的综合损伤;
- c) 无多重易损部件。

则整架飞机的易损面积为每个部件易损面积的总和,即:

$$A_v = \sum_{i=1}^n \bar{P}_{KH} A_{P_i} = \sum_{i=1}^n A_{V_i}$$

#### 5.2.6.3.1 部件的防护与重叠

在飞机的非关键部件对关键部件提供了全部或部分防护的情况下,其防护效果取决于它们所在的实

际位置。在假定的特定方向上,一次命中被完全防护时,其总的有效面积应从上式中减去被防护部件的有效面积  $A_{P_i}$ 。

部件重叠时有效面积的计算,是把假定方向上飞机的有效面积划分成非重叠的均质小块区域,当任一平行弹道穿透这些给定的均质小区时,射弹遭遇的条件是相同的。如果把每一块均质小区的易损面积累积加起来,就可得到全机的易损面积。当均质区包含关键部件的防护及重叠情况时,要考虑综合构成一个均质区的部件易损面积的计算方法。已知一架飞机的有效面积范围,如果该面积内包含了几层重叠部件,且每个部件对特定破坏等级可以是或不是关键部件,那么就可以把这个范围划分成多个均质小区。这样,一个均质区的有效面积 ( $A_{PH}$ ) (见图8),就是包含在这个均质区集中的最小部件面积(图8中的  $A_2$ ) 在弹道法平面上的投影。一次命中第一个部件,其穿透的击毁概率为  $P_1$  (对于一个非关键部件:  $P_1 = 0$ ; 对于关键部件:  $0 < P_1 \leq 1$ )。假设这个部件被速度为  $V_1$  的射弹穿透,由计算可以得到射弹离开部件时的残余速度。对后面每一个要穿透的部件重复以上方法,直到射弹的残余速度为零或者在均质区集的所有部件被穿透为止。关于一次命中均质区的击毁概率可由下列关系式求得:

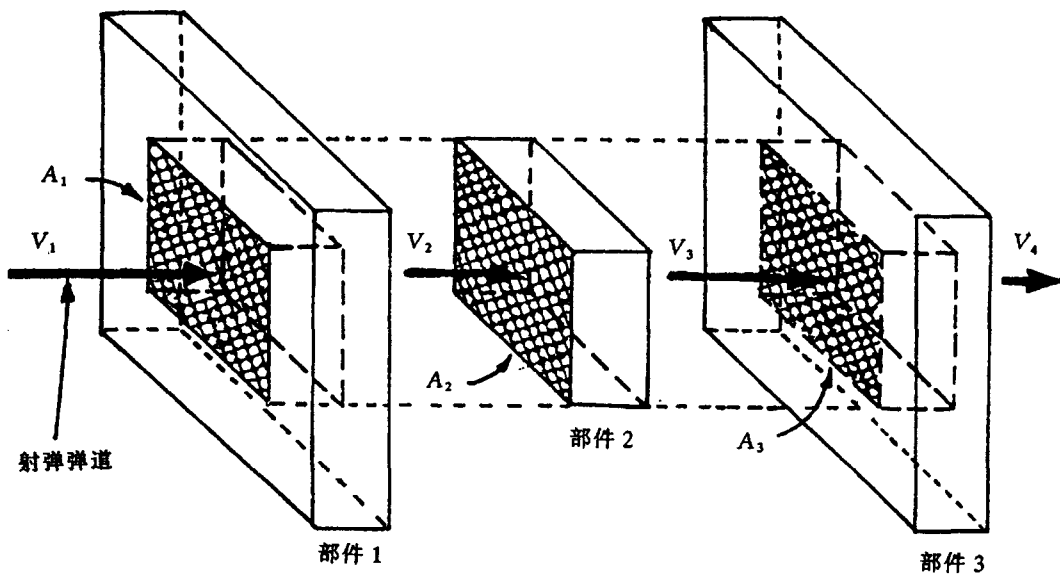
$$P_{KH} = P_1 + P_2(1 - P_1) + P_3(1 - P_1)(1 - P_2) + \dots + P_n(1 - P_1)\dots(1 - P_{n-1}) \dots (6)$$

式中:

$n$  —— 穿透的部件个数。

总的均质易损面积 ( $A_{VH}$ ) 可由下式获得:

$$A_{VH} = P_{KH} A_{PH}$$



$A_{PH} = A_1 = A_2 = A_3$ : 均质有效面积;

$P_i$ : 给定射弹以速率  $V_i$  击毁第  $i$  个部件的平均概率(非关键部件时  $P_i = 0$ ; 关键部件时  $0 < P_i \leq 1$ );

$P_{KH}$ : 研究的均质区,受到一次随机命中的条件击毁概率;

$$P_{KH} = P_1 + \sum_{K=2}^n \left[ P_K \prod_{j=1}^{K-1} (1 - P_j) \right] = P_1 + P_2(1 - P_1) + P_3(1 - P_1)(1 - P_2)$$

$n$ : 被穿透部件的个数 (= 3);

$A_{VH}$ : 均质区的总易损面积;

$$A_{VH} = P_{KH} \cdot A_{PH}$$

图8 计算一个均质区易损面积的实例

飞机总易损面积 ( $A_v$ ) 可通过累加所有均质区的易损面积获得:

$$A_v = \sum_{i=1}^n A_{vH_i}$$

式中:

$n$  ——对于特定破坏等级和假定方向上均质区的个数。

#### 5.2.6.3.2 累积损伤

目前还缺乏一种有效地处理累积综合损伤的分析技术。这类损伤是多次命中所造成的综合损伤。在这种情况下,我们不能假设每次命中在每个部件上造成的损伤是完全独立的。因此,只有当不同部件的失效机理被认为可导致独立的破坏等级,并且它们彼此没有相互作用造成飞机的综合破坏等级时,5.2.6.3中的公式才可延用到多次命中的情况。由于这一约束,严格地限制了多次命中或外部爆破弹爆破的情况下,易损面积概念的应用。

#### 5.2.6.4 高爆射弹及导弹对目标飞机的易损性

小口径高爆射弹对目标飞机的易损性,人工分析的具体方法是:在目标飞机的某一视图上添加网格点,用来表示弹的命中点。假定每发弹沿垂直视图方向射入目标,并在目标表面内一固定距离的地方爆炸,而使飞机遭受致命的内部爆炸损伤,我们就可以用在该飞机致命杀伤区域内的一个网格点(爆炸的位置)来记录出这个飞机符合某一破坏类型的破坏。

就高爆射弹及导弹对目标飞机的易损性而言,对一给定的破坏类别,假如爆炸的位置不在致命的内部爆炸范围内,则应考虑这个威胁的碎片所造成的潜在损坏。这样,就必须知道与碎片数目、分布、大小及速度有关的数据资料。就与网格点对应的每个爆炸点而言,应确定弹体爆炸后有哪些关键部件位于碎片的分布区内,而且注意它们是否受到防护,如果有防护,则应确定其对碎片迟滞及失效的影响。在对防护及射弹特性分析之后,就可确定在已知爆炸散射区内命中关键部件的弹片平均质量及速度,以及爆炸点到部件中点的最大距离,该距离说明了平均碎片对部件产生的潜在致命性杀伤力。由于关键部件在平均弹片的杀伤区内相对于每个爆炸点有一定的距离,那么,对已知爆炸下飞机的破坏概率就可进行估算,然后再将这个概率值与爆炸点有关的网格面积相乘,得到一个易损面积增量,所有这些网格中易损面积的总和构成了攻击方向上目标的易损面积。注意:单发小口径高爆弹具有使多重易损系统失效的能力。

#### 5.2.6.5 多重易损部件

假定一次单发命中只能破坏一个部件,对于多重易损部件来说,首次命中只能造成其中一个部件失效,这就不能使一架具有多重易损部件的飞机破坏。因此,这种首次命中也就不能作为衡量飞机易损性的可靠准则。为了得到多重易损飞机的易损性与射弹之间的关系,以预计破坏一架飞机所需要命中的次数为基础,提出“当量”易损面积的概念。这个概念只适用于不考虑连续综合性损伤,并假定击中的次数相同,每次位置不同的射弹情况。对于仅有单一易损部件的飞机,其当量易损面积就等于飞机部件易损面积之和。

##### 5.2.6.5.1 多重易损部件的命中效应

找出所有的关键部件,并确定它们是多重易损而不是单一易损的,这一点很重要。每个关键部件都有它的易损等级,其余度等级由该关键部件与其它系统部件的关系确定。对于射弹威胁,就可引入当量易损面积的概念,对多重易损部件的命中效应进行计算。

##### 5.2.6.5.2 当量单一易损面积

对具有一个或多个单一易损部件和多重易损部件的飞机,其当量单一易损面积 ( $A_s$ ) 可按下列式计算:

$$A_s = \frac{A_v}{E(\alpha, n, k)_i} \dots\dots\dots (7)$$

式中:

$A_v$  ——飞机总的易损面积,  $m^2$ ;  $A_v = A_{v_s} + nA_{v_m}$

$A_{v_{si}}$  ——飞机单一易损部件的易损面积总和,  $m^2$ ;

$A_{v_{mi}}$  ——每个多重易损部件的易损面积,  $m^2$ ;

$n$  ——构成多重易损部件组的部件数;

$E(\alpha, n, k)_i$  ——为使飞机破坏,需要在飞机总的易损面积上的期望命中数。

$$E(\alpha, n, k)_i = 1 + \frac{n}{\left(\frac{n}{\alpha} - 1\right)} + \frac{n(n-1)}{\left(\frac{n}{\alpha} - 1\right)\left(\frac{n}{\alpha} - 2\right)} + \dots$$

$$+ \frac{n(n-1)\dots(n-k+2)}{\left(\frac{n}{\alpha} - 1\right)\left(\frac{n}{\alpha} - 2\right)\dots\left(\frac{n}{\alpha} - k + 1\right)}$$

式中:

$k$  ——某个多重易损部件组里能引起该组失效的部件数。该组破坏可直接导致飞机规定的等级破坏。

$\alpha$  ——一组多重易损部件的易损面积总和与飞机总的易损面积的比例。其值为:

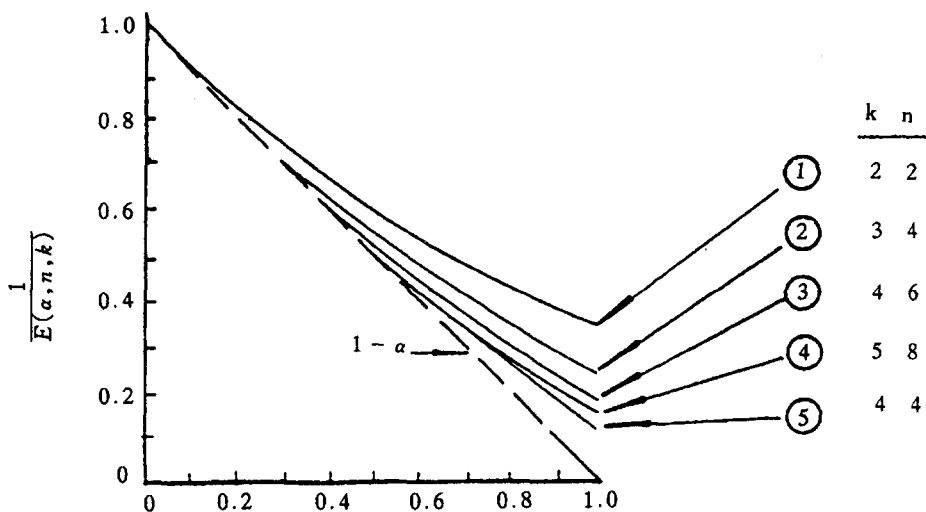
$$\alpha = \frac{nA_{v_m}}{A_v}$$

因为飞机总的易损面积包含了在每组多重易损部件上致命性击中的那部分易损面积,所以  $\alpha$  也可以解释为该组致命性击中的那部分易损面积占飞机总的易损面积的比例。当多重易损部件没有相同的易损面积时,当量单一易损面积的概念应谨慎使用。

当多重易损部件很小时,当量单一易损面积 ( $A_s$ ) 与单一易损部件的易损面积总和 ( $A_{v_s}$ ) 的差别很小。在应用上很可能可以忽略掉所有的或除了最重要之外的多重易损部件。

### 5.2.6.5.3 多重易损部件的影响

如果要忽略某一组多重易损部件的易损性,要求计算破坏目标的期望命中次数  $E(\alpha, n, k) = 1/(1 - \alpha)$ 。在不同的  $n, k$  值情况下,画出  $1/(1 - \alpha)$  和  $E(\alpha, n, k)$  的关系图,就得出它们值的变化规律。为便于分析,图9中以  $\alpha$  为轴,画出了  $E(\alpha, n, k)$  和  $1/(1 - \alpha)$  的相互关系曲线。如果误差小得在可接受的范围内,该组多重易损部件对整个飞机的易损性影响就可以忽略。



$\alpha$  (多重易损面积所占比例)

图9 不同  $n, k$  值时  $E(\alpha, n, k)$  与  $\alpha$  的关系

## 5.2.6.5.4 多组多重易损部件的当量单一易损面积计算

当量单一易损面积 ( $A_S$ ) 的概念可推广应用到具有多组多重易损部件的飞机上,方法是:每次考虑一组,同时认为其它组不具有易损性。数学公式表达如下:

$$\text{第一组: } A_{S_1} = \frac{A_{V_S} + n_1 A_{V_{m_1}}}{E(\alpha_1, n_1, k_1)}$$

式中:

$A_{S_1}$  ——不考虑其它多重易损部件组的易损性时,单一易损部件和第一组多重易损部件的当量单一易损面积。

在第一组计算的基础上,代入第二组多重易损部件的计算,得到一个新的当量单一易损面积  $A_{S_2}$  :

$$\text{第二组: } A_{S_2} = \frac{A_{S_1} + n_2 A_{V_{m_2}}}{E(\alpha_2, n_2, k_2)}$$

同理,第二组的计算也不考虑除该组外的其它多重易损部件的易损性。

例 1:一架飞机装有两台并列的发动机。假定两台发动机是仅有的一组多重易损部件,并且两台发动机必须全部破坏才导致飞机的破坏。

已知:  $A_P = 40\text{m}^2$ ——假定方向上,飞机总的有效面积;

$A_{V_m} = 1\text{m}^2$ ——每台发动机的单一易损面积;

$n = 2$ ——构成多重易损部件组的部件数;

$k = 2$ ——导致多重易损部件组失效的部件数;

$A_{V_S} = 4\text{m}^2$ ——单一易损部件的总易损面积。

求:  $E(\alpha, n, k)$ 、 $A_S$ (当量单一易损面积)、 $P_{K/H}$ (“当量”单发击毁概率)。

解:

$$A_V = A_{V_S} + nA_{V_m} = 4 + 2 \times 1 = 6\text{m}^2 \text{——飞机总的易损面积}$$

$$\alpha = nA_{V_m} / A_V = 2/6 = 0.333$$

$$E(\alpha, n, k) = 1 + n / (n/\alpha - 1) = 1 + 2 / (2/0.333 - 1) = 1 + (2/5) = 1.4$$

$$A_S = A_V / E(\alpha, n, k) = 6 / 1.4 = 4.285\text{m}^2$$

$$P_{K/H} = A_S / A_P = 4.285 / 40 = 0.107$$

例 2:一架轰炸机有两名驾驶员,装有四台发动机。发动机和驾驶员都看成多重易损部件组。只有当两名驾驶员都被击中并丧失工作能力时才能使飞机破坏。

已知:

$A_P = 100\text{m}^2$ ——假定方向上,飞机总的有效面积;

$A_{V_S} = 10\text{m}^2$ ——单一易损部件的总易损面积。

发动机:

$A_{V_{m_1}} = 2.5\text{m}^2$ ——每台发动机的单一易损面积;

$k_1 = 2$ ——导致发动机多重易损部件组失效的发动机数;

$n_1 = 4$ ——构成发动机多重易损部件组的发动机数。

驾驶员:

$A_{V_{m_2}} = 1\text{m}^2$ ——每名驾驶员的单一易损面积;

$k_2 = 2$ ——导致驾驶员多重易损部件组失效的驾驶员数;

$n_2 = 2$ ——构成驾驶员多重易损部件组失效的驾驶员数。

求:飞机总的当量单一易损面积  $A_S$  和“当量”单发击毁概率  $P_{K/H}$ 。

解:

$$A_V = A_{V_S} + n_1 A_{V_{m_1}} = 10 + 4 \times 2.5 = 20 \text{m}^2$$

$$\alpha_1 = \frac{n_1 A_{V_{m_1}}}{A_V} = \frac{10}{20} = 0.5$$

$$E(\alpha_1, n_1, k_1) = 1 + \frac{n_1}{\left(\frac{n_1}{\alpha_1} - 1\right)} = 1 + \frac{4}{(8-1)} = 1.571$$

$$A_{S_1} = \frac{A_V}{E(\alpha_1, n_1, k_1)} = \frac{20}{1.571} = 12.731 \text{m}^2$$

$$\alpha_2 = \frac{n_2 A_{V_{m_2}}}{A_V} = \frac{2 \times 1}{20} = 0.1$$

$$E(\alpha_2, n_2, k_2) = 1 + \frac{n_2}{\left(\frac{n_2}{\alpha_2} - 1\right)} = 1 + \frac{2}{20-1} = 1.106$$

$$A_S = A_{S_2} = \frac{A_{S_1} + n_2 A_{V_{m_2}}}{E(\alpha_2, n_2, k_2)} = \frac{12.731 + 2 \times 1}{1.106} = 13.319 \text{m}^2$$

$$P_{K/H} = \frac{A_S}{A_P} = \frac{13.319}{100} = 0.133$$

#### 5.2.6.6 易损性评估结果综述

在综合考虑了飞机型号、破坏等级、敌方环境和射弹情况下,飞机的易损性评估结果,由一系列易损面积的计算值组成。

##### 5.2.6.6.1 命中破坏的概率与命中发生的概率

易损面积只提供了飞机最终的易损性衡量尺度,但它并不考虑命中发生的概率。因此,在讨论飞机总的生存力时,单单靠易损性度量并不能提供比较不同飞机生存力设计的有效基准。飞机的总的生存力不仅取决于单发命中破坏飞机的概率,还取决于命中发生的概率。命中发生的概率主要受下列因素影响:

- 攻击飞机的武器有效数目(其影响因素:地形和植被、火力压制和武器发射决策等);
- 攻击飞机的武器精确度(其影响因素:武器射程、飞机飞行速度、机动性和电子干扰等)。

##### 5.2.6.6.2 易损面积综述

易损面积是比较不同部件对飞机易损性影响的基准,是飞机生存力设计的重要因素。通过它可以了解每个关键部件对飞机易损性的影响及哪些关键部件最具易损性,从而有助于飞机设计的优化。鉴于关键部件对飞机易损性影响的重要性,在飞机易损性评估结果中,常常包含关键部件及整架飞机的易损面积数据。为便于当量单一易损面积的计算,常常分别给出多重易损部件的易损面积值。这样就产生了大量的数据,并要对这些数据进行描述。对各种不同的遭遇情况、破坏等级及各种射弹类型都要计算出飞机及其关键部件的易损面积。为了综合考虑多种因素,易损面积可用一个多元函数式表达:

$$A_V = f(p, e, c, a) \dots \dots \dots (8)$$

式中:

- $p$  ——射弹特性(弹药规格和型号,如弹丸是穿甲弹、高爆弹等)
- $e$  ——遭遇情况(攻击方向、撞击速度等)
- $c$  ——飞机破坏等级(KK, K, A, B, C, E 等)
- $a$  ——飞机特性(如交战时刻飞机的燃油量及分布、关键部件数、飞机设计特点等)

任一参数的一个变化,都会产生一组新的易损性数据。为了尽量减少计算工作量,并将计算结果有意义地描述出来,必须预先确定那些会变化的参数。易损性的评估结果可用图示和列表两种方式来表示。

5.2.6.6.3 易损性评估结果列表

下述表格是在非爆炸射弹、碎片、高爆弹及导弹触发引信战斗部等威胁情况下,易损性评估结果的列表格式:

- a) 表 6 列出了在特定破坏类型、威胁和空间方向的情况下,不同的射弹速度对应的单一易损面积;
- b) 表 7 列出了在特定破坏类型和威胁的情况下,六个主要空间方向及不同的射弹速度所对应的飞机总的单一易损面积;
- c) 表 8 列出了在特定撞击方向、碎片质量及密度的情况下,碎片撞击速度从 300m/s 到 3000m/s 时,飞机各关键部件的易损面积及各个部件的给定命中破坏概率;
- d) 表 9 表示的是在高爆弹和触发引信战斗部威胁的情况下,按照特定的威胁武器、破坏类型和空间方向,飞机各区域的有效面积、破坏概率和易损面积。各个区域的易损面积等于该区域的有效面积与  $P_{KH}$  的乘积;
- e) 表 10 列出了在单一威胁情况下,飞机各区域的关键部件的有效面积、破坏概率和易损面积;
- f) 表 11 列出了在不同的速度范围内,单个碎片对飞行员头部、躯干和四肢伤害的概率;
- g) 表 12 列出了在单发命中 A 级破坏下,飞机各关键系统/部件在特定威胁武器下,六个空间方向的易损面积。

表 6 典型的关键部件单一易损面积表

评估日期		评估机构		破坏类别			
飞机型号		威胁武器		空间方向			
关键部件	在下列射弹速度(m/s)下的易损面积(m <sup>2</sup> )						
	150	300	450	600	750	900	1050
发动机油门控制							
弹射座椅启爆机构							
液压油箱							
液压油泵							
氧气瓶							
燃油油箱							
燃油供油管							
·							
·							
·							

表 7 飞机总的单一易损面积表

评估日期		评估机构		破坏类别		
飞机型号		威胁武器				
射弹速度 m/s	总的单一易损面积(m <sup>2</sup> )					
	左	右	上	下	前	后
150						
300						

表 7(续)

评估日期		评估机构		破坏类别	
飞机型号		威胁武器			
射弹速度 m/s	总的单一易损面积(m <sup>2</sup> )				
	左	右	上	下	前 后
450					
600					
750					
900					
1050					
注:应包含燃油装载、外挂物运载和其他的必要因素。					

表 8 典型的碎片破坏时飞机易损面积表

评估日期		评估机构		数据参考	
飞机型号		命中方向		碎片质量	
碎片密度(片/m <sup>2</sup> )					
名称及射入部件的速度 (V <sub>s</sub> ) m/s	击毁概率 (P <sub>KH</sub> )		部件易损面积 m <sup>2</sup>		备注 (部件位置)
驾驶员					
300					
900					
1500					
2000					
3000					
发动机					
300					
900					
1500					
2000					
3000					
供油箱					
300					
900					
1500					
2000					
3000					
.					
.					
.					
.					
注:应包含燃油装载、外挂物运载和其他的必要因素。					

表 9 高爆炸、触发引信导弹易损面积表

评估日期		评估机构		破坏类别	
飞机型号		威胁武器		空间方向	
区 域	有效面积 m <sup>2</sup>	击毁概率 ( $P_{KH}$ )	易损面积 m <sup>2</sup>	备 注	
1					
2					
3					
4					
5					
6					
7					
8					
.					
.					
.					

表 10 在单一威胁下飞机各区域的易损性参数

区 域	关键部件	有效面积 m <sup>2</sup>	$P_{KH}$	易损面积 m <sup>2</sup>
1	机身油箱结构			
2	机翼油箱结构			
3	飞行控制结构			
.				
.				
.				
整 机	底部外表			

表 11 单个碎片对飞行员伤害的  $P_{KH}$  值

颗粒数量	速度范围 m/s	头部与躯干 $P_{KH}$	四 肢 $P_{KH}$	
110	30~150			
	150~300			
	>300			
20	30~150			
	150~300			
	>300			

表 12 单发命中 A 级破坏飞机关键部件易损面积表

关键系统/部件及威胁武器	易 损 面 积					
	m <sup>2</sup>					
	左	右	上	下	前	后
座舱： 23mm 高爆燃烧曳光弹 57mm 高爆弹 导弹						
机身燃油： 23mm 高爆燃烧曳光弹 57mm 高爆弹 导弹						
油箱壁： 23mm 高爆燃烧曳光弹 57mm 高爆弹 导弹						
机翼燃油： 23mm 高爆燃烧曳光弹 57mm 高爆弹 导弹						
输油管路： 23mm 高爆燃烧曳光弹 57mm 高爆弹 导弹						
飞机控制系统： 23mm 高爆燃烧曳光弹 57mm 高爆弹 导弹						
结构： 23mm 高爆燃烧曳光弹 57mm 高爆弹 导弹						
弹药： 23mm 高爆燃烧曳光弹 57mm 高爆弹 导弹						
整机： 23mm 高爆燃烧曳光弹 57mm 高爆弹 导弹						

5.2.6.6.4 易损性评估结果图示

易损性评估结果可用多种图形表示。图示法取决于参数是常量还是变量。下式是依据一些重要参数来考虑飞机易损面积的表达式：

$$A_V = f(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6) \dots\dots\dots (9)$$

式中：

- $x_1$  —— 射弹/碎片的类型和尺寸；
- $x_2$  —— 攻击方向；
- $x_3$  —— 撞击速度, m/s；
- $x_4$  —— 飞机破坏等级；
- $x_5$  —— 关键部件；
- $x_6$  —— 燃油的配置。

这些参数影响飞机  $A_V$  的变化规律, 可通过以下两个步骤进行分析；

a) 令其余所有参数不变, 画出  $A_V$  随其中一个参数的变化规律；

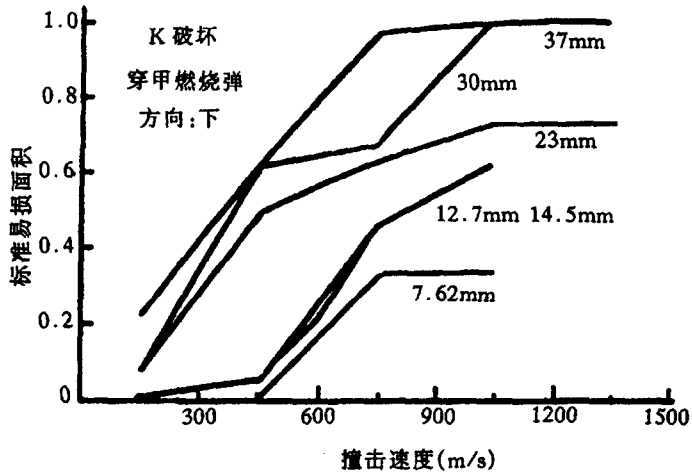


图 10 撞击速度和武器口径对易损面积的影响

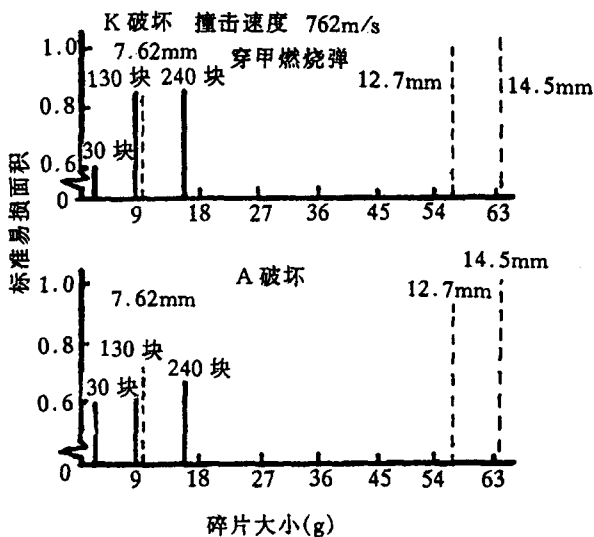


图 11 碎片大小对易损面积的影响

b) 在相同的坐标系里,给定上述参数一个增量,可得到一族曲线或点的直方图。每改变一个重要参数值,就会显示出其对飞机标准易损面积的影响。有关参数对飞机标准易损面积的影响见图 10~图 15。

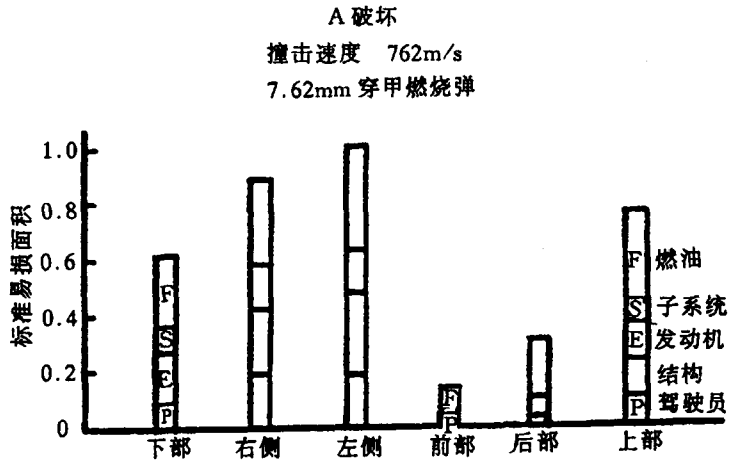


图 12 射弹方向对易损面积的影响

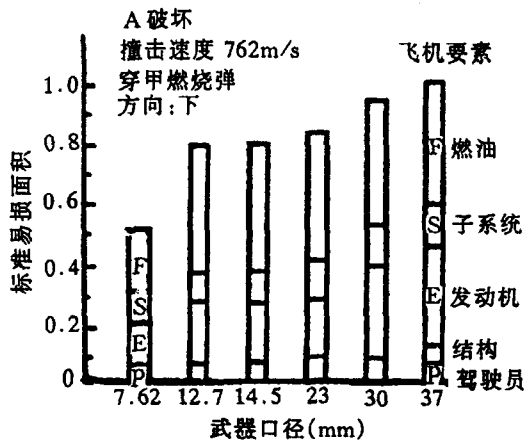


图 13 飞机要素对易损面积的影响

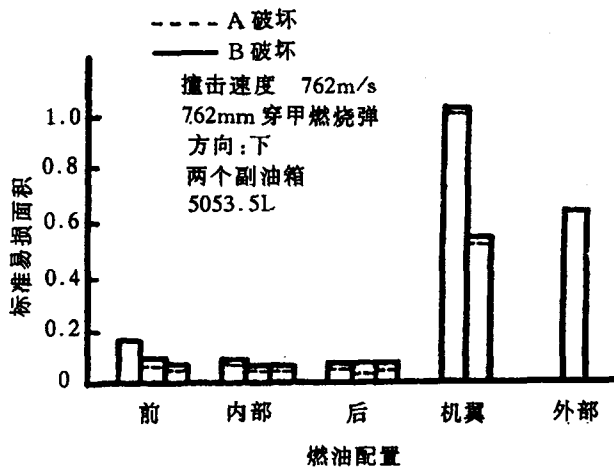


图 14 燃油配置对易损面积的影响

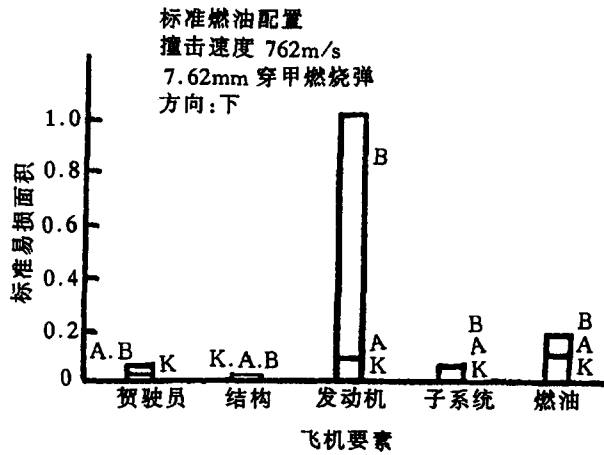


图 15 破坏等级对易损面积的影响

#### 5.2.6.7 外爆弹对目标飞机的易损性

对外爆弹(射弹或弹头),飞机易损性应按照这些弹采用的主要破坏机理评估。

外爆弹的破坏模式包括外冲击波损坏和外部碎片损坏两种。同时考虑以上两种损坏对易损性的综合影响,现在还没有一种成熟的评估方法。

##### 5.2.6.7.1 威胁武器

产生外冲击波的威胁武器有高射炮、空-空导弹、面-空导弹。高射炮采用的是有双保险的引信;其余几种导弹主要采用近炸引信。其主要杀伤机理是装药爆炸产生的高能碎片向外散射。冲击波产生的超压也会引起飞机部件和结构的严重损坏。如果装药在足够近的地方爆炸,其碎片会引起更严重的破坏。应该首先考虑任何碎片引起的损坏,然后再研究冲击波超压引起的其他损坏。

如果定义一个碎片大小、形状以及速度分布的易损性包线,在包线内一个弹头爆炸将引起一定的破坏等级。

##### 5.2.6.7.2 碎片对目标飞机的易损性

易损面积由在一定范围内预计的碎片大小和撞击速度计算,且通常用来表示外部爆炸弹碎片(射弹或弹头)对飞机及其关键部件的易损性。对于特定弹头爆炸造成的飞机破坏概率,由攻击方向、碎片大小、密度及碎片撞击飞机等一组特定遭遇条件确定;而与一特定弹头遭遇的飞机平均破坏概率,则由预计的弹头爆炸点分布及同飞机有关的碎片散射方向确定。

###### 5.2.6.7.2.1 单一外部爆炸弹的易损性

单独暴露在特定爆炸弹和单组遭遇条件下的飞机破坏概率,在满足下列条件时可直接求出:

- 飞机仅由单一易损部件组成;
- 不考虑累积的综合损伤;
- 全部有效面积都处于碎片以均匀密度散射的范围内(见图 16)。

在这种条件下,在假定的方向上,命中飞机有效面积的预计碎片数( $E_H$ )为:

$$E_H = \rho A_P$$

式中:

$\rho$ ——命中在  $A_P$  单位面积上的平均碎片数。

同理,致命打击飞机的预计碎片数( $E_K$ )可写成:

$$E_K = \rho A_V = P_{K/H} E_H$$

式中:

$A_V = P_{K/H} A_P$ ——假定方向上飞机的易损面积,  $m^2$ 。

因此,暴露在  $\rho$  中的飞机单一击中破坏概率 ( $P_{K/E}$ ) 可用至少一碎片击中飞机易损面积的概率来表示:

$$P_{K/E} = 1 - (1 - P_{K/H})^{E_H} \approx 1 - \exp(-E_K) \dots\dots\dots (10)$$

考虑用 5.2.6.5.2 条中计算一当量单一易损面积的方法,去掉有关单一易损部件的限制;

将  $P_{K/H}$  看成是  $E_H$  的函数[即  $P_{K/H} = f(E_H)$ ], 去掉有关累积综合损伤的限制;

把有效面积  $A_p$  分成  $m$  个子面积( $A_{Pi}$ ) 并且每一子面积都暴露在均匀密度( $\rho_i$ ) 的碎片区域中,由此方法来去掉有关  $A_p$  全部暴露在均匀密度碎片区域中的限制。

于是:  $E_H = \sum_{i=1}^m \rho_i A_{Pi} = \sum_{i=1}^m E_{Hi}$  和  $E_K = \sum_{i=1}^m \rho_i A_{Vi} = \sum_{i=1}^m E_{Ki}$

在这种情形下,暴露于单一爆炸中的飞机破坏概率为:

$$P_{K/E} \approx 1 - \exp(-E_K) = 1 - \exp(-\sum_{i=1}^m E_{Ki})$$

$$P_{K/E} = 1 - \exp(-\rho A_V)$$

式中:

$E_H = \rho A_p$  ——命中飞机有效面积的预计碎片数;

$E_K = \rho A_V$  ——命中飞机易损面积的预计碎片数;

$P_{K/E} = 1 - (1 - P_{K/H})^{E_H} \approx 1 - \exp(-E_K)$  ——暴露在  $\rho$  中的飞机破坏概率。

限制条件:

- a) 飞机仅由单一易损部件组成;
- b) 不考虑累积的综合损伤;
- c) 适用于碎片完全以均匀密度散射的区域内。

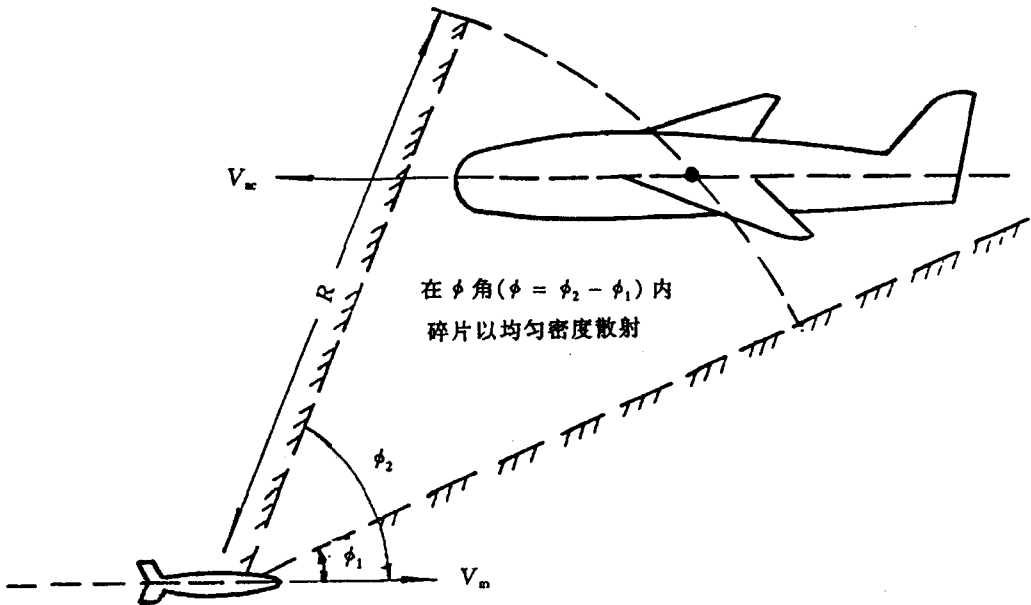


图 16 外部爆炸碎片破坏飞机概率的基本估算方法

5.2.6.7.2.2 估算  $P_{K/E}$  的具体方法

估算  $P_{K/E}$ , 必须已知弹头特性、遭遇条件、飞机特性及破坏等级。在确定这些参数后, 就可通过下列步骤计算  $P_{K/E}$ :

- a) 确定碎片的初速度 ( $V_0$ );

- b) 确定碎片撞击速度 ( $V_s$ );
- c) 确定碎片动态散射角 ( $\Phi$ );
- d) 确定射向飞机有效面积的碎片密度( $\rho$ );
- e) 确定飞机的易损面积 ( $A_v$ );
- f) 计算  $P_{KE} \approx 1 - \exp(-E_K) = 1 - \exp(-\sum_{i=1}^M E_{Ki})$ 。

5.2.6.7.2.3 碎片初速度

假定飞机与导弹相对运动且轨迹平行。图 17 给出了弹头运动中爆炸时碎片初速度  $V_0$  的计算方法。其条件是已知弹头静止爆炸时,碎片初速度( $V_{0s}$ )的大小和方向,以及弹头与飞机遭遇的速度。

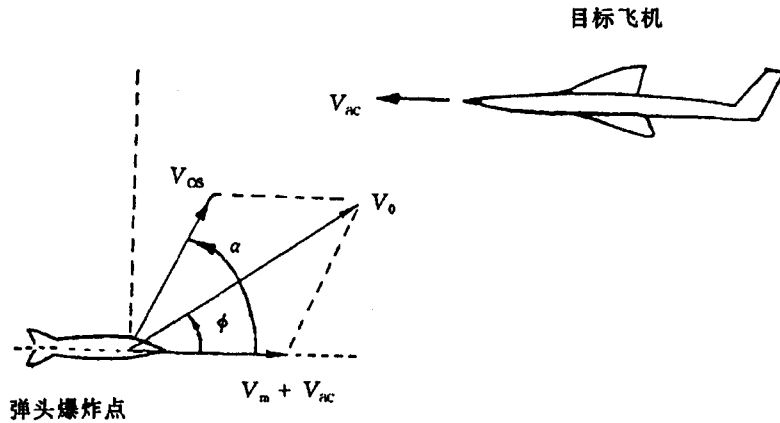


图 17 碎片初速度计算

$$V_0 = [ (V_m + V_{ac} + V_{0s} \cos \alpha)^2 + (V_{0s} \sin \alpha)^2 ]^{1/2}$$

式中:

- $V_0$  ——运动弹头爆炸时碎片的初速度, m/s;
- $V_{0s}$  ——静态弹头爆炸时碎片的初速度, m/s;
- $V_m$  ——导弹(或弹头)初速度, m/s;
- $V_{ac}$  ——目标飞机速度, m/s;
- $\alpha$  ——静态弹头爆炸后碎片飞行轨迹与导弹轨迹的夹角;
- $\Phi$  ——运行弹头爆炸后碎片飞行轨迹与导弹轨迹的夹角;

5.2.6.7.2.4 碎片的撞击速度

碎片速度随距离增大时,近似地以指数方式递减,任一距离  $r$  处的碎片撞击速度用下式表示:

$$V_s = V_0 \exp(-\beta r) \dots\dots\dots (11)$$

式中:

- $V_0$  ——弹头运动中爆炸时碎片的初速, m/s;
- $\beta$  ——常量。由空气密度、碎片大小、质量和阻力系数确定。

5.2.6.7.2.5 碎片散射极限

假定弹头静态爆炸的碎片,以辐射状飞向不断扩大的球面(见图 18),且碎片均匀分布在角  $\alpha_1$  与  $\alpha_2$  之间的散射区中,那么用静态角度  $\alpha_i$  就可得到确定动态碎片散射区角度极限的方法(对特定的弹来说,必须已知前几个参数)。如果不能假定碎片均匀分布在整个散射区中,则应先把散射区分成密度相同的散射子区后,再用相同的方法求出角度极限。

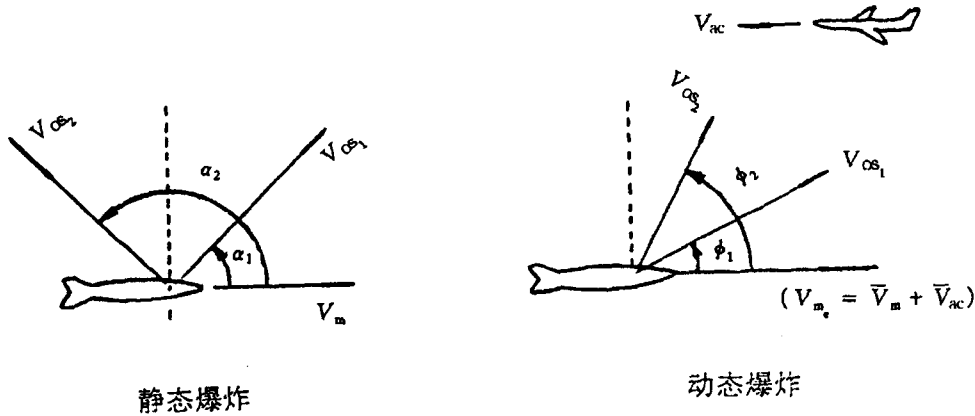


图 18 碎片散射角度计算

图 18 中:

$\alpha_i$  —— 静态弹头爆炸后碎片散射的角度极限 ( $i = 1, 2$ );

$\Phi_i$  —— 运动弹头爆炸后碎片散射的角度极限 ( $i = 1, 2$ );

$\vec{V}_{m_e} = \vec{V}_m + \vec{V}_{ac}$  —— 导弹相对于目标飞机的速度, m/s;

$$\Phi_i = \arctg \frac{V_{0s_i} \sin \alpha_i}{V_{m_e} + V_{0s_i} \cos \alpha_i} \quad (i = 1, 2)。$$

#### 5.2.6.7.2.6 碎片散射区密度

假定碎片均匀分布, 在碎片散射区内射向飞机有效面积上的碎片密度通过下列条件获得:

- a) 弹头爆炸发射出的碎片总数;
- b) 碎片动态散射角度极限;
- c) 碎片撞上飞机时, 爆炸点与飞机有效面积的距离(或半径)。

图 19 给出了计算碎片散射密度的方法, 其中必须给出假定弹头射出的碎片总数 ( $n$ )、碎片动态散射区的极限角, 飞机与爆炸点之间的距离则由遭遇条件给出。

$$\rho = \frac{N}{R^2} = \frac{n/\psi}{R^2} = \frac{n}{2\pi(\cos\Phi_1 - \cos\Phi_2)R^2} \dots\dots\dots (12)$$

式中:

$n$  —— 弹头爆炸后发射出的碎片总数;

$\Phi_i$  —— 动态碎片散射区的角度极限 ( $i = 1, 2$ );

$\psi$  —— 散射区所对的立体弧度;

$$\psi = A_{S1} = 2\pi R h \quad (R = 1)$$

$$A_{S1} = 2\pi R^2 (\cos\Phi_1 - \cos\Phi_2) \quad (R = 1);$$

$A_{S1}$  ——  $\Phi_i$  所对的单位球上球面区域的面积,  $m^2$  ( $R = 1$ );

$N$  —— 单位立体弧度中的碎片密度(碎片/立体弧度);

$$N = n/\psi = \rho R^2;$$

$\rho$  —— 在任一半径  $R$  处面积上的碎片密度(碎片/ $m^2$ )。

#### 5.2.6.7.2.7 条件击毁概率

在特定弹头爆炸及一组特殊遭遇条件下, 飞机的破坏概率可由下式得出:

$$P_{K/E} \approx 1 - \exp(-E_K) = 1 - \exp(-\rho A_V)$$

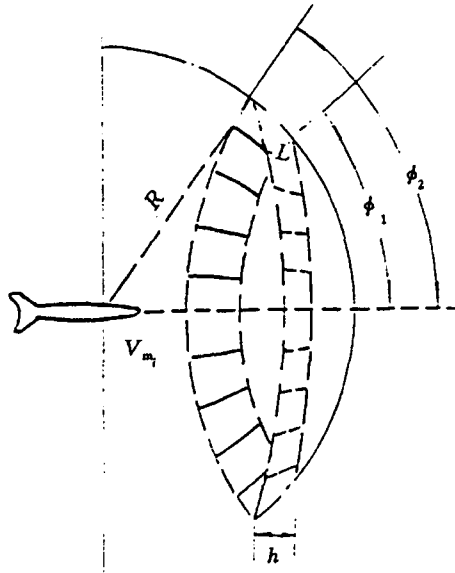


图 19 碎片散射密度计算

式中:

$A_v$ ——假定方向上的飞机易损面积,  $m^2$ ;

$\rho$ ——飞向  $A_v$  的碎片密度, 碎片/ $m^2$ (由 5.2.6.7.2.6 求出)。

计算举例:

已知:

静态弹头参数:

散射角:  $\alpha_1 = 30^\circ, \alpha_2 = 80^\circ$ ;

碎片数:  $n = 1000$ ;

碎片速度:  $V_{\alpha} = 2000m/s$

遭遇参数:

导弹速度:  $V_m = 450m/s$ ;

与导弹迎头遭遇的距离:  $R = 6m$ 。

飞机参数:

飞机速度:  $V_{ac} = 300m/s$

在所考虑方位上, 相对于碎片尺寸和碰撞速度的易损面积:  $A_v = 0.5m^2$

求: 单发导弹对飞机的破坏概率 ( $P_{KE}$ )。

解:

$$\begin{aligned} \text{碎片初速度: } V_{01} &= [(V_m + V_{ac} + V_{\alpha}\cos\alpha_1)^2 + (V_{\alpha}\sin\alpha_1)^2]^{1/2} \\ &= [(450 + 300 + 2000\cos30^\circ)^2 + (2000\sin30^\circ)^2]^{1/2} \\ &= (2482^2 + 1000^2)^{1/2} = 2675.9m/s \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} V_{02} &= [(V_m + V_{ac} + V_{\alpha}\cos\alpha_2)^2 + (V_{\alpha}\sin\alpha_2)^2]^{1/2} \\ &= (1097.32 + 1969.62)^{1/2} = 2254.6m/s \end{aligned}$$

$$V_0 = \frac{V_{01} + V_{02}}{2} = 2465.3m/s$$

碎片动态散射角:

$$\Phi_1 = \operatorname{arctg} \frac{V_{\alpha} \sin \alpha_1}{V_m + V_{ac} + V_{\alpha} \cos \alpha_1} = \operatorname{arctg} \frac{1000}{2482} = 21.9^\circ$$

$$\Phi_2 = \operatorname{arctg} \frac{V_{\alpha} \sin \alpha_2}{V_m + V_{ac} + V_{\alpha} \cos \alpha_2} = \operatorname{arctg} \frac{1969.6}{1097.3} = 60.9^\circ$$

$$\psi = 2\pi(\cos \Phi_1 - \cos \Phi_2) = 2\pi(\cos 21.9^\circ - \cos 60.9^\circ) \\ = 2.77 \text{ (立体弧度)}$$

$$\text{碎片散射密度: } N = \frac{n}{\psi} = \frac{1000}{2.77} = 361 \text{ (碎片/立体弧度)}$$

$$\rho = \frac{N}{R^2} = \frac{361}{6^2} = 10 \text{ (碎片/m}^2\text{)}$$

$$\text{破坏概率: } E_K = \frac{NA_V}{R^2} = \rho A_V = 10 \times 0.5 = 5 \text{ (次撞击)}$$

$$P_{KE} \approx 1 - \exp(-E_K) = 1 - \exp(-5) = 0.993$$

### 5.2.6.7.3 爆炸的易损性

按下列四个步骤评估爆炸对飞机易损性的影响;

- 输入条件;
- 分析方法;
- 易损性计算;
- 结果综述。

#### 5.2.6.7.3.1 输入条件

输入条件:武器终端效应、武器与飞机之间的遭遇条件、飞机的最终破坏等级和飞机特性。

##### 5.2.6.7.3.1.1 武器终端效应

武器终端效应(或损伤机理)是指与目标飞机密切相关的威胁射弹弹头爆炸(在外边)产生的冲击波。在易损性评估中,选择一装药重量谱进行飞机易损性的计算。选定的装药重量应代表预计的威胁射弹弹头,装药重量谱应包容不同的炸药类型、战斗部外壳的影响、装药影响和运动目标影响。

图 20 示出了冲击波向外传播的特性。图 21 表示一个距爆炸点距离为  $D$  的冲击波。确定该冲击波超压需要三个变量:超压峰值  $P$ 、正压力持续时间  $\Delta T$  和冲量  $I$ 。其中冲量值为曲线有效部分下的面积。

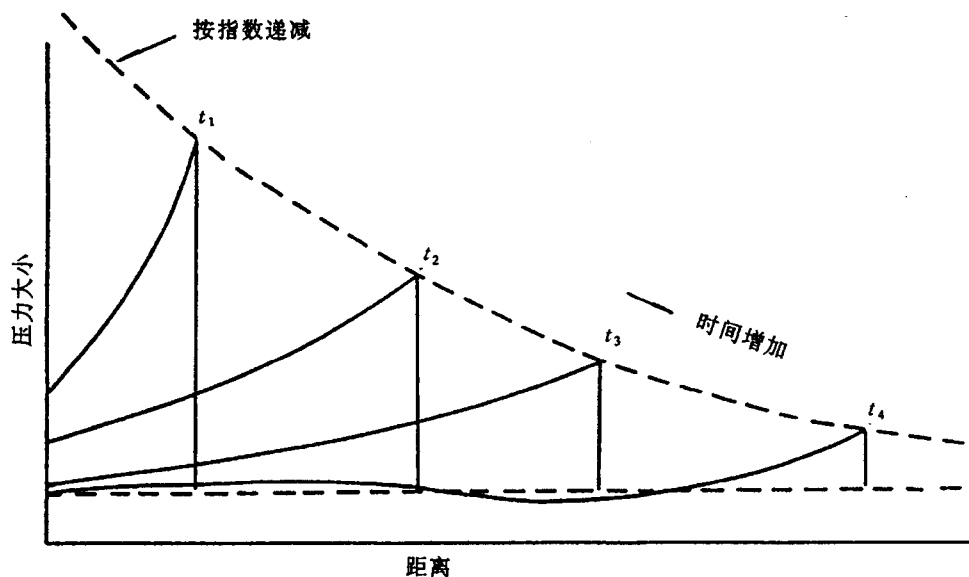


图 20 冲击波的传播

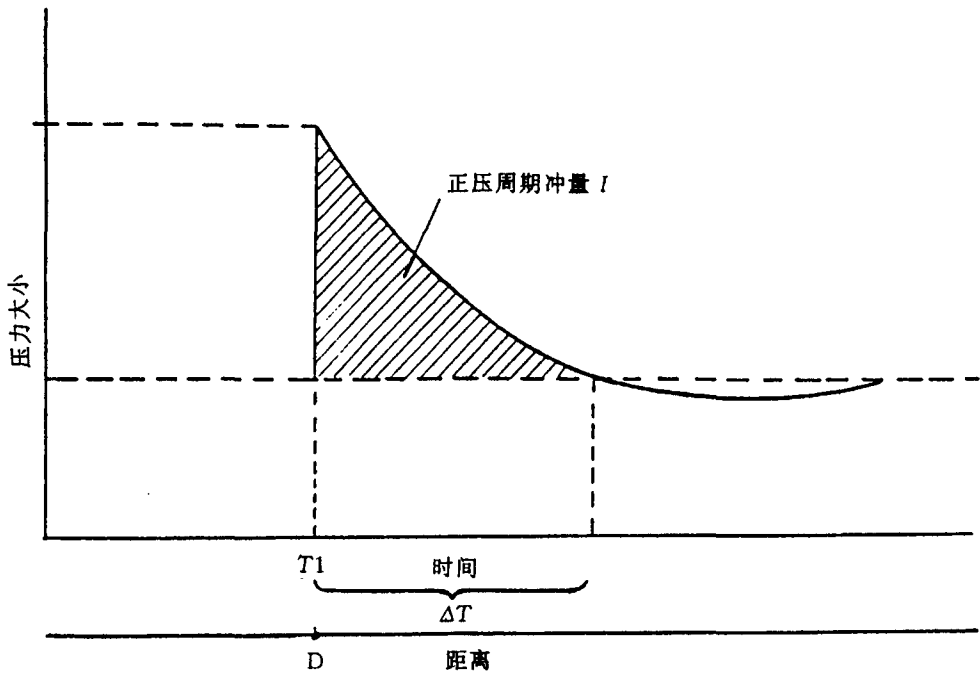


图 21 观察者感受的压力

#### 5.2.6.7.3.1.2 遭遇条件

遭遇条件包括:弹头爆炸时飞机的速度与高度和弹头的预计爆炸点分布。

对预计爆炸点分布的初步估算,为的是确定飞机是否要进行易损性评估,以便减少那些不必要的易损性评估工作量。

#### 5.2.6.7.3.1.3 破坏等级

在飞机易损性评估中,必须规定飞机的破坏等级,以使用这些破坏等级来识别飞机的关键部件,并计算出每一关键部件相对应的临界失效指标。规定的冲击波破坏等级主要为 K 和 A 两级。

#### 5.2.6.7.3.1.4 飞机特性

所需的飞机特性包括:在各种破坏等级下识别出飞机的关键部件;确定与每一关键部件及每个假定方向上破坏等级一致的临界失效指标。

由外部爆炸损坏的飞机关键部件,主要是指飞机的结构部件(如机翼)和操纵面。它们能够导致飞机破坏的失效机理包括结构变形或损坏,以及气动力效应。通常,关键部件的临界失效指标,用反射峰值或影响飞机特定破坏等级的入射压力、冲量等级来表示。当入射压力或冲量等级作用在有效面积很小的部件上时,反射现象可以忽略;否则,临界失效指标必须用反射压力和冲量等级表示。在实施结构和气动力分析时,确定了假定方向上导致飞机所需破坏等级的关键部件有效面积上的压力峰值和冲量等级后,就可得到临界失效指标。另一方面,也可以把同类关键部件和飞机的临界失效指标的现存经验数据,加进飞机状态中去。

#### 5.2.6.7.3.2 分析方法

应以假定的损坏机理、飞机特性及可能的失效模式来选择分析方法和相应的易损性度量方法。对外部爆炸,用飞机的易损体积或易损包线来度量飞机的易损性,在易损体积或易损包线内,特定重量弹头的爆炸将导致飞机所求的破坏等级。在飞机通过的每一平面上,要度量的易损性就简化成为飞机与该平面相交的一条轮廓线,这些易损性轮廓线就是易损包线在假想的特殊投影平面上的轨迹,它上面的每个点都可由该平面内的二维坐标系中的位置来确定。因此,只有在易损包线上,在装药重量谱中,定出每一装药重量的足够数据点,才能达到易损性评估的目的。

### 5.2.6.7.3.3 易损性计算

在定义了输入条件并选择了分析及相应的易损性度量方法之后,就可进行飞机的易损性计算。为达到易损性评估的目的,这一过程可通过在一足够宽的装药重量谱中,定出每一装药重量在易损包线上的足够点来完成。如果计算目的是为生存力分析提供易损性数据,则所需的点数只要能定义一近似的易损球或椭球就足够了;如果目的是要确定关键部件相对全机易损性的分布,以便作为设计或改型决策的依据,那就需要确定更详细的易损包线。因此,所需的数据点数取决于研究目的,而研究目的应在每一特定条件下确定。

### 5.2.6.7.3.4 结果综述

爆炸易损性评估的主要结果是计算飞机各个面上相应等级的失效数据点。在每个数据点爆炸时,可导致给定遭遇高度下所需的飞机破坏等级。数学上,在给定的有关平面上,对每个数据点距飞机表面距离  $R$ ,可写成具有三个自变量的函数(即装药重量  $W$ 、遭遇高度  $h$  和破坏等级  $k$ ):

$$R = f(w, h, k)$$

可用多种方法概括上式中的数据,其关键取决于是将哪一个参数看成常数,将哪一个参数看成变量。另外,也可以采用图形或数据表格形式来表示。

有两种实用的图形方法:

- a) 第一种图形方法:在一定破坏等级  $k$  下,绘制出装药重量  $W$  与距离  $R$  的关系。具体做法是:把几条曲线画在同一张图上,一条曲线表示一定高度。当  $k$  等于  $K$  级破坏、 $h$  等于海平面高度时,描绘出的曲线如图 22 所示。注意:对于飞机而言,在每一个有关的方位角和俯仰角内,都需绘出类似这样的图形;
- b) 第二种图形方法:在给定飞机破坏等级  $k$  下,用相同的装药重量绘制出通过飞机所有有关平面高度  $h$  上的曲线族。对于特定装药重量,已知遭遇高度和飞机破坏等级条件下的这些曲线包线就构成了飞机爆炸的易损性包线。图 23 至图 25 为三个用图形说明飞机破坏等级的实例。它们都是无壳 54.5kg 和 90.8kg 烈性炸药在海平面爆炸所造成的 A 级破坏。

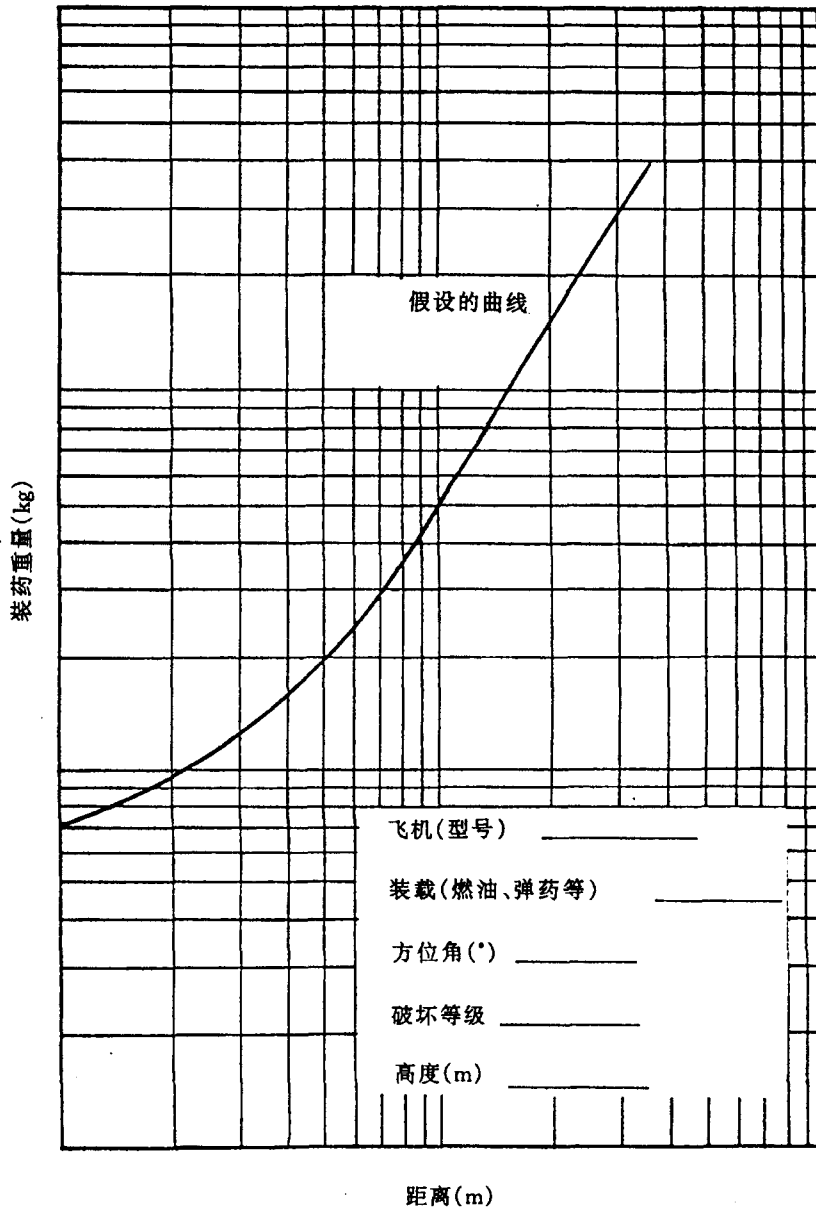


图 22 装药重量与距离的关系曲线

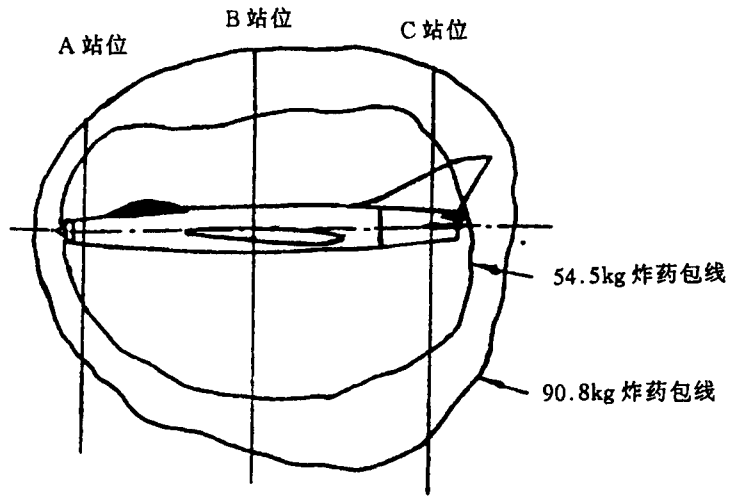


图 23 典型飞机破坏等级的外部爆炸包线示意图(侧视)

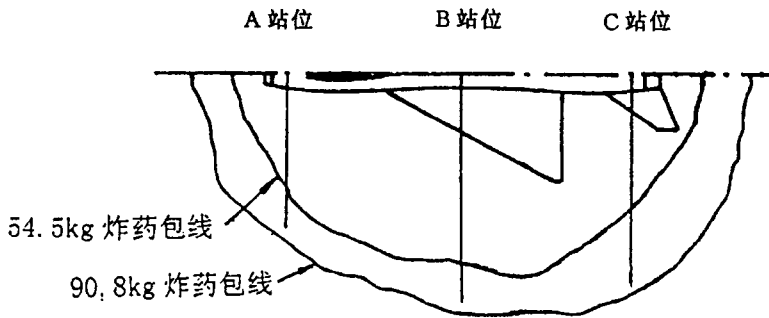


图 24 典型飞机破坏等级的外部爆炸包线示意图(俯视)

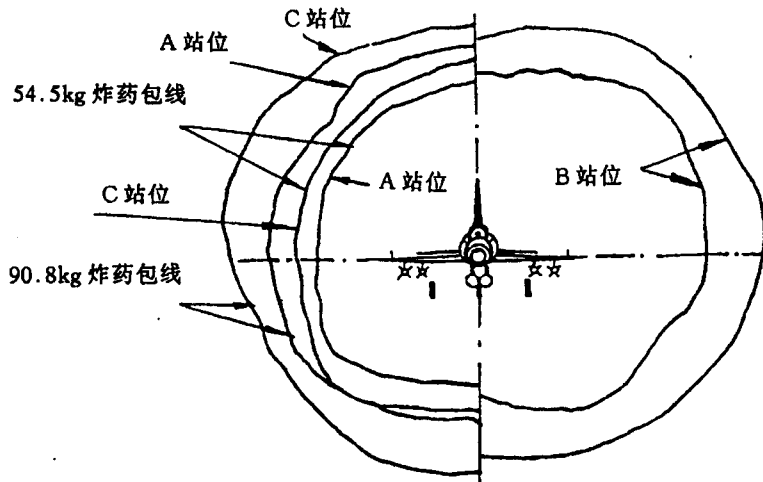


图 25 典型飞机破坏等级的外部爆炸包线示意图(前视)

### 5.2.7 易损性评估的计算流程

对非核武器效应下的飞机易损性进行评估,可根据威胁/武器数据、目标飞机的构型数据和遭遇条件等编制计算机程序。易损性计算流程图见图 26。

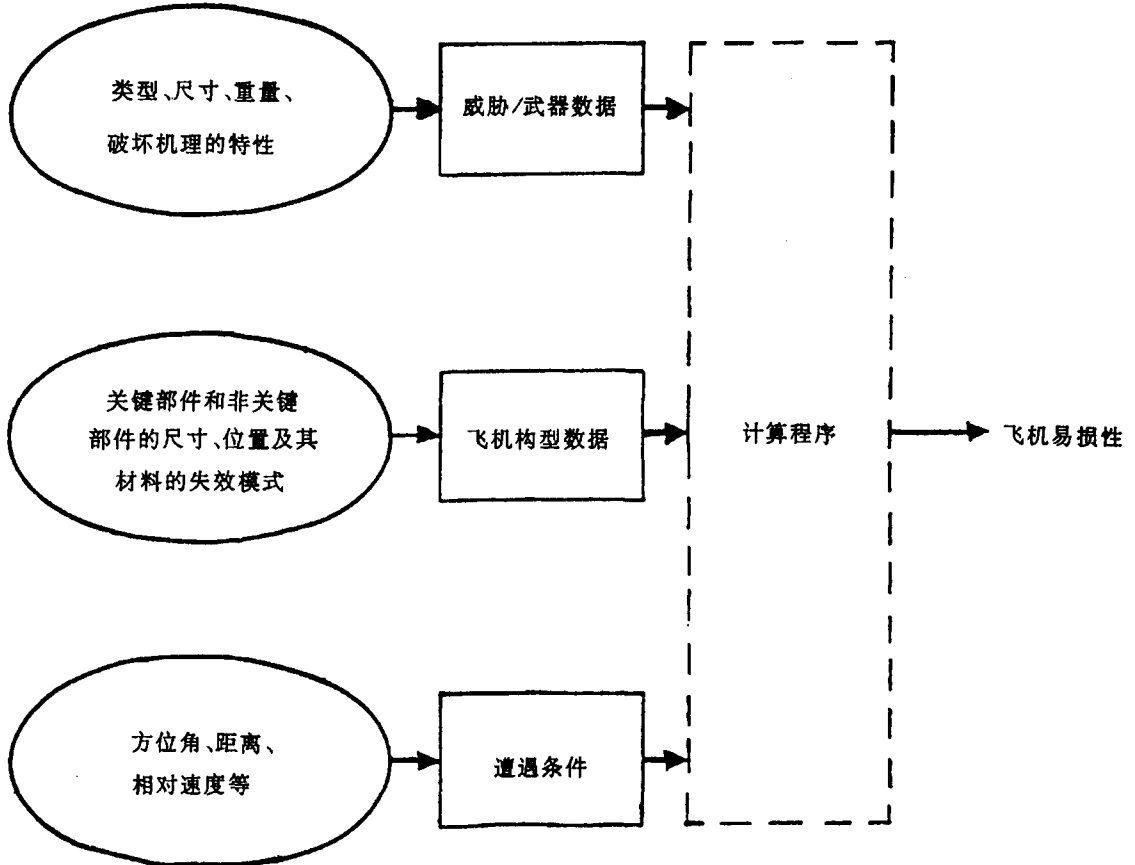


图 26 易损性计算流程图

## 5.3 生存力评估

### 5.3.1 概述

在生存力评估中,应考虑和评价对飞机防御能力有影响的每一个参数,并把它们定义成作战遭遇参数。生存力评估可在各种作战任务条件下进行,无论是单发击毁概率,还是在整个战斗任务下的生存力评估,都应包含在给定的作战环境下,对特定系统有效性的评估。

### 5.3.2 作战遭遇参数

军用飞机的生存力评估,要求仔细考虑与敌方武器系统遭遇时,所有有影响的变量,要充分了解敌方武器系统的基本性能。其要素是:

- a) 目标探测/目标截获/目标识别(目视、电子光学、雷达、红外线、声频和电子战支援手段);
- b) 目标跟踪(目视、电子光学、雷达和红外线);
- c) 威胁发射包线(位置、范围、速率和方位角);
- d) 末端制导(雷达、红外线和电子光学);
- e) 武器引爆(近炸、触发、指令和时间);
- f) 武器效应(穿透、爆炸和爆燃)。

### 5.3.2.1 地形参数

作战遭遇地区的地形特征对飞机生存力有显著的影响。例如:攻击机(无论是固定翼还是旋翼类)利用地形掩护,采取低空隐蔽飞行,跃升攻击战术,可以取得良好的作战效果。需要评估的地形基本参数是:

- a) 地面轮廓(山岭、平地和海平面);
- b) 植物(灌木、树木和丛林);
- c) 人工设施(道路、电线、塔、大坝、城市和建筑区)。

### 5.3.2.2 气象条件

气象条件能够影响敌方威胁系统探测和跟踪目标飞机的能力;相反,它也能影响目标飞机探测、识别、躲避或摧毁敌方威胁系统的能力。与生存力评估有关的主要环境参数是:

- a) 光(白天/黑天);
- b) 云层;
- c) 湿度;
- d) 降水量;
- e) 风力;
- f) 温度;
- g) 能见度。

### 5.3.2.3 飞机参数

在作战遭遇中,飞机的许多特性能够显著地影响它的生存概率。因此,必须与整个遭遇条件适当地联系起来,考虑下列中的每一个参数:

- a) 探测(目视、雷达、红外线、声频和电子发射);
- b) 性能(速度、高度、灵敏性、加速、减速和操纵品质);
- c) 电子战(电子对抗、箔条/烟雾剂/曳光弹和假目标);
- d) 杀伤性防御(枪炮、导弹和火箭);
- e) 易损性(飞行基本部件和任务基本部件);
- f) 空勤人员的工作能力(忍耐力、反应时间和任务负荷)。

### 5.3.3 生存力评估的方法

生存力评估的基本分析方法包括遭遇单发射击和多发射击情况下的生存力评估。这两种基本的遭遇类型,全都是指与面基(地面和海面)的敌方系统以及空载的敌方武器系统交战,并可采用枪炮、导弹或高能激光武器。

#### 5.3.3.1 遭遇生存力

敌方武器的有效性,用它击毁目标的能力来衡量。对任一类型的防空系统,为使其在遭遇中是有效的,大量的功能必须按顺序完成,任何一个步骤的遗漏,会严重削弱或完全丧失该系统的有效性。图 27 概括了防空系统的基本工作顺序。在交战前,应使用雷达或光学瞄准设备进行搜索、识别并确信被发现的目标为敌方飞机。一旦敌方目标处于射程、角速率极限和防御武器的机动性极限之内,就能够发射射弹或导弹。成功的制导是防御系统的一个功能,它涉及与该系统有关的发射射弹、导弹以及目标的运动方向。在防御系统的有效性分析中,其复杂程度取决于结果的意向用途及对输入的置信水平。在现代战争条件下,非常有必要对防御系统和目标飞机进行遭遇的动态模拟,如模拟飞机的机动性、气象条件、集中兵力突防、情报资料和地形变化等作战约束。基于这些考虑,可以把遭遇每一种防空武器的目标破坏概率,或者,每次目标遭遇的生存概率,作为一个函数,它取决于易损面积、爆炸和杀伤包线以及武器系统的精度。

每次遭遇的生存概率  $P_{SE}$ ,可按下式确定:

$$P_{S/E} = P_D \cdot P_{LOS} \cdot P_L \cdot P_G \cdot P_{DET} \cdot \left[ \prod_{i=1}^n (1 - P_{sk}) \right] \dots\dots\dots (13)$$

式中:

- $P_D$  —— 探测概率;
- $P_{LOS}$  —— 瞄准概率;
- $P_L$  —— 发射概率或开火概率;
- $P_G$  —— 成功制导概率;
- $P_{DET}$  —— 弹头爆炸概率;
- $n$  —— 每次开火射击的数目;
- $P_{sk}$  —— 单发击毁概率。

上面的等式显然不包括由于电子对抗而削弱的项目。电子对抗不仅能够影响发射或开火发生的概率、偏差距离和分散程度,而且还影响给定发射或开火的单发击毁概率。

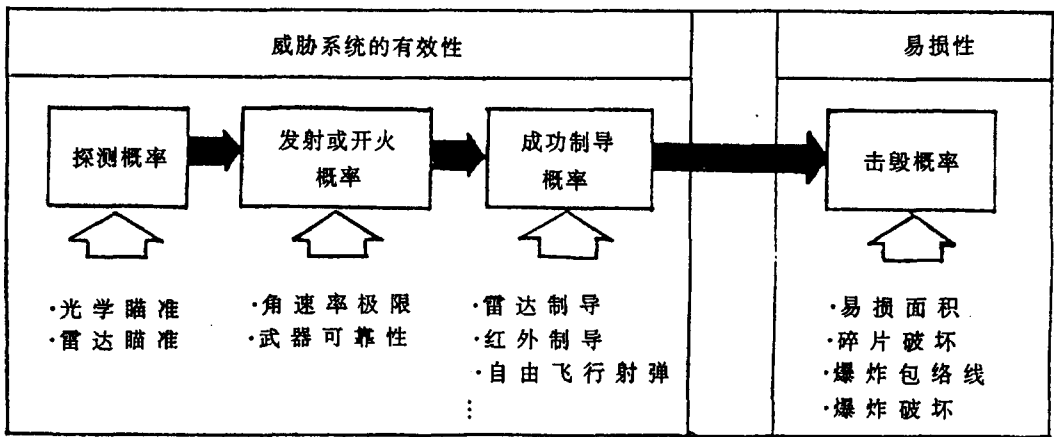


图 27 遭遇的武器系统工作顺序

5.3.3.1.1 外部爆炸战斗部的单发击毁概率

用于估算外部爆炸战斗部的单发击毁概率 ( $P_{sk}$ ) 的方法是:假定截击导弹沿着平行于目标速度矢量的弹道接近目标,战斗部爆炸点的分布由三个变化的法向分量描述。 $P_{sk}$  值是遭遇单一武器时目标的平均击毁概率。在这个遭遇时,假设武器系统的所有组件均具有按设计要求将战斗部送至目标附近的功能。 $P_{sk}$  的平均值是分别单独考虑由于爆炸产生的破坏概率( $P_b$ )和由于碎片产生破坏概率( $P_f$ ),然后再将两者的统计值累计起来而获得的,即:

$$P_{sk} = 1 - (1 - P_b)(1 - P_f) \dots\dots\dots (14)$$

计算  $P_b$  和  $P_f$  的方法:

为了便于积分,将区域  $V$  分成三个子区  $V_1$ 、 $V_2$  和  $V_3$  (见图 30),因此:

$$P_f = P_f(V_1) + P_f(V_2) + P_f(V_3)$$

区域  $V_1$  是由爆炸损伤包络线和碎片损伤体积的半圆锥截面来确定的。有关这些区域破坏概率的积分表达式如下:

a) 估算  $P_f(V_1)$  的表达式:

$$P_f(V_1) = \frac{P_g}{\sigma \sqrt{A_1 + B}} \exp\left[-\frac{K_1}{2}\right] \int_{-\infty}^{L(A_1, U_1, K_1)} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{w^2}{2}\right] dw \dots\dots\dots (15)$$

式中:

$$P_g = \frac{\alpha^2}{\alpha^2 + \sigma_g^2};$$

$$A_1 = \frac{\text{tg}^2 \phi_1}{\sigma_g^2 P_g} + \frac{1}{\alpha^2};$$

$$B = \frac{1}{\sigma_f^2};$$

$$U_1 = \frac{A_1 h_1}{A_1 + B};$$

$$K_1 = \frac{h_1^2 + A_1 B}{A_1 + B};$$

$$L(A_1, U_1, K_1) = \sqrt{A_1 + B}(K_1 - U_1);$$

$K_1$  —— 爆炸损伤包络线和  $V_1$  相交的  $y$  坐标;

$h_1$  —— 易损中心(CV)的  $y$  坐标;

$$\alpha^2 = 1.25NA_v$$

b) 估算  $P_f(V_2)$  的表达式:

$$P_f(V_2) = \frac{P_g}{\sigma_f \sqrt{A_2 + B}} \exp\left[-\frac{K_2}{2}\right] \int_{L(A_1, U_1, k_1)}^{L(A_2, U_2, k_2)} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{w^2}{2}\right] dw \dots\dots\dots (16)$$

式中:

$$P_g = \frac{\alpha^2}{\alpha^2 + \sigma_g^2};$$

$$A_2 = \frac{\text{tg}^2 \phi_2}{\sigma_g^2 P_g} + \frac{1}{\alpha^2};$$

$$B = \frac{1}{\sigma_f^2};$$

$$U_2 = \frac{A_2 h_1}{A_2 + B};$$

$$K_2 = \frac{h_1^2 + A_2 B}{A_2 + B};$$

$$L(A_2, U_2, K_2) = \sqrt{A_2 + B}(K_2 - U_2);$$

$K_2$  —— 爆炸损伤包络线和  $V_3$  相交的  $y$  坐标;

$h_1$  —— 易损中心(CV)的  $y$  坐标;

$$\alpha^2 = 1.25NA_v$$

c) 估算  $P_f(V_3)$  的表达式:

$$P_f(V_3) = \frac{P_g}{\sigma_f \sqrt{A_3 + B}} \exp\left[-\frac{K_3}{2}\right] \int_{L(A_3, U_3, k_1)}^{L(A_3, U_3, k_2)} \exp\left[-\frac{w^2}{2}\right] dw \dots\dots\dots (17)$$

式中:

$$P_g = \frac{\alpha^2}{\alpha^2 + \sigma_g^2};$$

$$A_3 = \frac{\text{tg}^2 \phi_3}{\sigma_g^2 P_g} + \frac{1}{\alpha^2};$$

$$B = \frac{1}{\sigma_f^2};$$

$$U_3 = \frac{h_1 + h_2(\alpha^2 A_3 - 1)}{\alpha^2(A_3 + B)};$$

$$K_3 = \frac{A_3 \alpha^2 [(h_1 - h_2)^2 + B \alpha^2 h_2^2] + B \alpha^2 (h_1^2 - h_2^2) - (h_1 - h_2)^2}{\alpha^4(A_3 + B)};$$

$$L(A_3, U_3, K_1) = \sqrt{A_3 + B}(K_1 - U_3);$$

$$L(A_3, U_3, K_2) = \sqrt{A_3 + B}(K_2 - U_3);$$

$K_1$ ——爆炸损伤包络线和  $V_1$  相交的  $y$  坐标;

$h_1$ ——易损中心(CV)的  $y$  坐标;

$h_2$ ——爆炸损伤包络线与  $V_2$  的近似边界线的  $y$  截距;

$tg\phi_3$ ——爆炸损伤包络线与  $V_2$  近似边界线的斜率。

### 5.3.3.1.1.1 战斗部爆炸点分布

目标坐标系的定义是:目标沿  $X_1$  方向直线前进,沿  $X_2$  方向上升; $X_3$  方向则指向飞行员的右侧。该坐标系的原点沿目标的纵向轴定位,目标的重心用 CG 来表示。假定战斗部爆炸点随着变量  $\sigma_{x_1}^2, \sigma_{x_2}^2, \sigma_{x_3}^2$  沿着三个轴的任一轴呈正态分布,其平均值在目标或飞机重心处。 $X_1$  方向的误差主要认为是由于引信造成的范围误差 ( $\sigma_{x_1}^2 = \sigma_f^2$ ); $X_2$  和  $X_3$  方向的误差为沿爆炸分布范围的制导误差,并在通常情况下假设它们相等 ( $\sigma_{x_2}^2 = \sigma_{x_3}^2 = \sigma_g^2$ ) 否则将指定为平均值。

例如,制导误差  $\sigma_g^2 = \frac{1}{2}(\sigma_{x_2}^2 + \sigma_{x_3}^2)$  或  $\sigma_g^2 = \sigma_{x_2}^2 = \sigma_{x_3}^2$

假定偏差距离  $r = \sqrt{x_2^2 + x_3^2}$  为瑞利(Rayleigh)分布,其中  $r$  被定义成战斗部与目标重心之间的最近距离。瑞利分布函数由下式给出:

$$f(r) = \frac{r}{\sigma_g^2} \exp\left[-\frac{r^2}{2\sigma_g^2}\right] \quad (r \geq 0)$$

它表达了在平面上的半径误差分布,其中,在每一轴上的误差是独立的,并以相同的变化和零平均值呈正态分布。

### 5.3.3.1.1.2 爆炸对目标飞机的易损性

利用爆炸对目标飞机的易损性数据,可把目标破坏表达成下列参数的一个函数:装药重量、高度、距目标上不同位置的爆炸距离。基于以上这些条件,可定义关于目标的易损性包络线。当爆炸发生在该包络线内时,实际的破坏概率为 1,反之则为零。为了评估的目的,爆炸包络线可被近似成一个或多个椭圆,使用的数量则取决于所需的精度。对于小型战斗部来说,包络线的形状将近似成目标的真实形状;而对较大的战斗部可以近似成球体。假定这些椭圆都不会相交,以便能够把每个椭圆中的爆炸破坏概率累加起来,获得爆炸破坏的总概率 ( $P_b$ )。图 28 是一个单一爆炸椭圆的近似例子。其描述方程为:

$$\frac{(x_1 - b_1)^2}{a_1^2} + \frac{(x_2 - b_2)^2}{a_2^2} + \frac{(x_3 - b_3)^2}{a_3^2} = 1 = \sum_{i=1}^3 \frac{(x_i - b_i)^2}{a_i^2} + \dots \quad (18)$$

### 5.3.3.1.1.3 爆炸破坏

爆炸破坏概率  $P_b$ , 等于在  $K$  个不相交椭圆中的一个椭圆内战斗部爆炸的概率。这些椭圆定义了爆炸对目标的损伤包络线。对第  $j$  个椭圆,数学上表达为:

$$P_{b_j} = P_r \left[ \sum_{i=1}^3 \frac{(x_i - b_{ij})^2}{(a_{ij})^2} \leq 1 \right] \dots \quad (19)$$

$P_b$  就是把  $K$  个椭圆上的  $P_{b_j}$  累加起来的。即  $P_b = \sum_{j=1}^K P_{b_j}$ 。用于估算在  $K$  个椭圆中任一椭圆内战斗部爆炸破坏概率的方法如下:对于第  $j$  个椭圆:

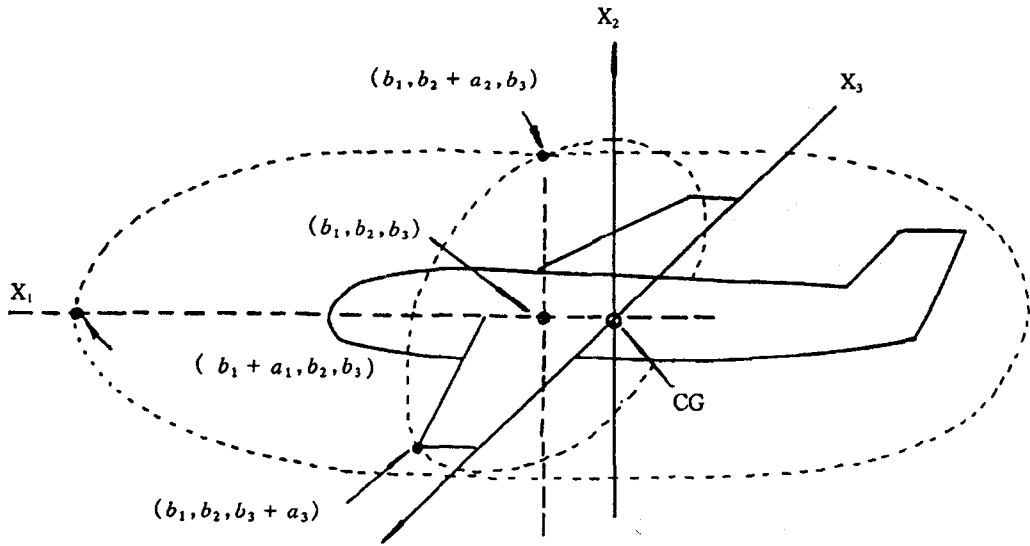


图 28 爆炸椭圆的近似描述

$$P_{bj} = P_r \left[ \sum_{i=1}^3 \frac{(x_i - b_i)^2}{a_i^2} \leq 1 \right] = P_r(Q \leq 1) = P_r(t \leq t_0)$$

式中:

$t$  ——近似的正态分布,  $N(0, 1)$ ;

$$Q = \sum_{i=1}^3 V_i (U_i + A_i)^2;$$

$$U_i = \frac{x_i}{\sigma_{x_i}};$$

$$A_i = \frac{b_i}{\sigma_{x_i}};$$

$$V_i = \frac{\sigma_{x_i}^2}{a_i^2};$$

$$t_0 = \frac{\sqrt[3]{1/m} - (1 - V/9m^2)}{\sqrt{V/9m^2}};$$

$$m = E(Q) = \sum_{i=1}^3 V_i (1 + A_i)^2;$$

$$V = E(Q - m)^2 = 2 \sum_{i=1}^3 V_i^2 (1 + 2A_i^2).$$

要求输入的参数有:定义爆炸椭圆的  $b_i$  和  $a_i$ ; 区域内的弹头变量及制导误差  $\sigma_f$  和  $\sigma_g$ 。通过这些参数的变换,可在正态分布曲线下,从  $-\infty$  到  $t_0$  的区域内估算  $P_{bj}$  值,即:

$$P_{bj} = P_r(t \leq t_0) = \int_{-\infty}^{t_0} \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} (-t^2/2\sigma^2) dt$$

式中:

$$t_0 = \frac{(1/m)^{1/3} - (1 - V/9m^2)}{(V/9m^2)^{1/2}};$$

$$m = \sum_{i=1}^3 V_i (1 + A_i)^2;$$

$$V = 2 \sum_{i=1}^3 V_i^2 (1 + 2A_i^2);$$

$$A_i = \frac{b_i}{\sigma_{x_i}} \quad (i = 1, 2, 3);$$

$$V_i = \sigma_{x_i}^2 / a_i^2 \quad (i = 1, 2, 3)。$$

一个爆炸破坏概率估算的实例:

已知:爆炸椭圆参数:  $b_1 = -2\text{m}$ ,  $b_2 = 0$ ,  $b_3 = 0$ ,  $a_1 = 9\text{m}$ ,  $a_2 = 1\text{m}$ ,  $a_3 = 0.8\text{m}$ ;

散布精度:  $\sigma_f = \sigma_{x_1} = 3\text{m}$ ,  $\sigma_g = \sigma_{x_2} = \sigma_{x_3} = 3\text{m}$

变换参数:

$$A_i = b_i / \sigma_{x_i} \quad A_1 = -2/3 = -0.67 \quad A_2 = 0 \quad A_3 = 0$$

$$V_i = \sigma_{x_i}^2 / a_i^2 \quad V_1 = 3^2 / 9^2 = 0.11 \quad V_2 = 3^2 / 1^2 = 9 \quad V_3 = 3^2 / 0.8^2 = 14.06$$

$$m = \sum_{i=1}^3 V_i (1 + A_i)^2 = 0.11(1 - 0.67)^2 + 9(1)^2 + 14.06(1)^2 = 23.07$$

$$V = 2 \sum_{i=1}^3 V_i^2 (1 - 2A_i^2) = 2(0.11^2 \times 1.90 + 9^2 + 14.06^2) = 557.41$$

$$t_0 = \frac{(1/m)^{1/3} - (1 - V/9m^2)}{(V/9m^2)^{1/2}} = \frac{0.351 - 0.8836}{(0.1164)^{1/2}} = -1.56$$

$P_b = P_r[t \leq t_0]$  由在标准正态分布曲线下的面积积分或查标准正态分布表获得。

#### 5.3.3.1.1.4 碎片对目标飞机的易损性

如果至少一个碎片击中目标的某个指定区域,目标将被击毁。为简单起见,假设此区域成组地归入一个或多个集中在目标轴线上的点或者易损中心 CV。对于任何这样的目标组(如图 29 所示),存在把易损中心 CV 包含在碎片分散区域内的第一个爆点(No1)和最后一个爆点(No2)。围绕易损中心 CV 旋转的封闭区域形成了所谓的碎片损伤体积。只有发生在这体积内的爆炸才能把易损中心包含在碎片散布区内。如果易损中心处于该散布区内,至少一个碎片击中(伴随着破坏)易损区域的概率是:  $P_f = 1 - P(\text{未击中}) = 1 - \exp(-E_K)$  式中:  $E_K$  为致命击中的预计碎片数(见 5.2.6.7.2.1)。为计算方便,将  $E_K$  近似地取为:

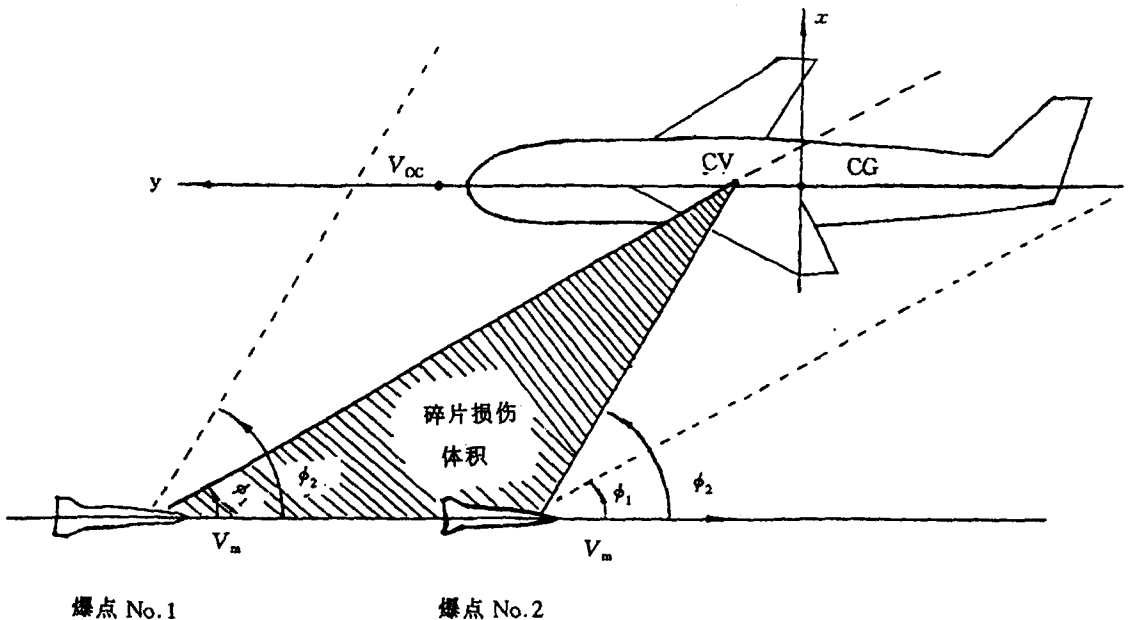


图 29 碎片损伤体积

$$E_k = d^2/2a^2 = d^2/2.5NA_v = 1/2.5\rho A_v$$

式中:

$$a^2 = 1.25NA_v$$

$d$  —— 碎片到目标的距离, m;

$N$  —— 碎片密度(碎片/立体弧度);

$\rho$  —— 区域碎片密度(碎片/m<sup>2</sup>),  $N/d^2$ 。

5.3.3.1.1.5 碎片破坏

碎片破坏概率  $P_f$  由每一点的爆炸概率, 并加权该点的破坏概率, 在碎片损伤体积内进行积分得到。因为目标相对于轴线对称, 所以三维问题能够在二维中解决,  $X_1, X_2, X_3$  空间内的体积可减少到处于  $r, y(y = x_1)$  的空间区域中。如果有一假定爆炸包络线, 区域  $V$  开始于与它相交的爆炸损伤包络线交线的外侧(见图 30), 那么:

$$P_f = \iiint_V f(r)f(y)\exp(-E_k)drdy \dots\dots\dots (20)$$

式中:

$$f(r) = \frac{r}{\sigma_g^2} \exp\left[-\frac{r^2}{2\sigma_g^2}\right];$$

$$f(y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_f} \exp\left[-\frac{y^2}{2\sigma_f^2}\right];$$

$$\exp(-E_k) = \exp\left[-\frac{d^2}{2a^2}\right];$$

$$d^2 = r^2 + (y - h_1)^2。$$

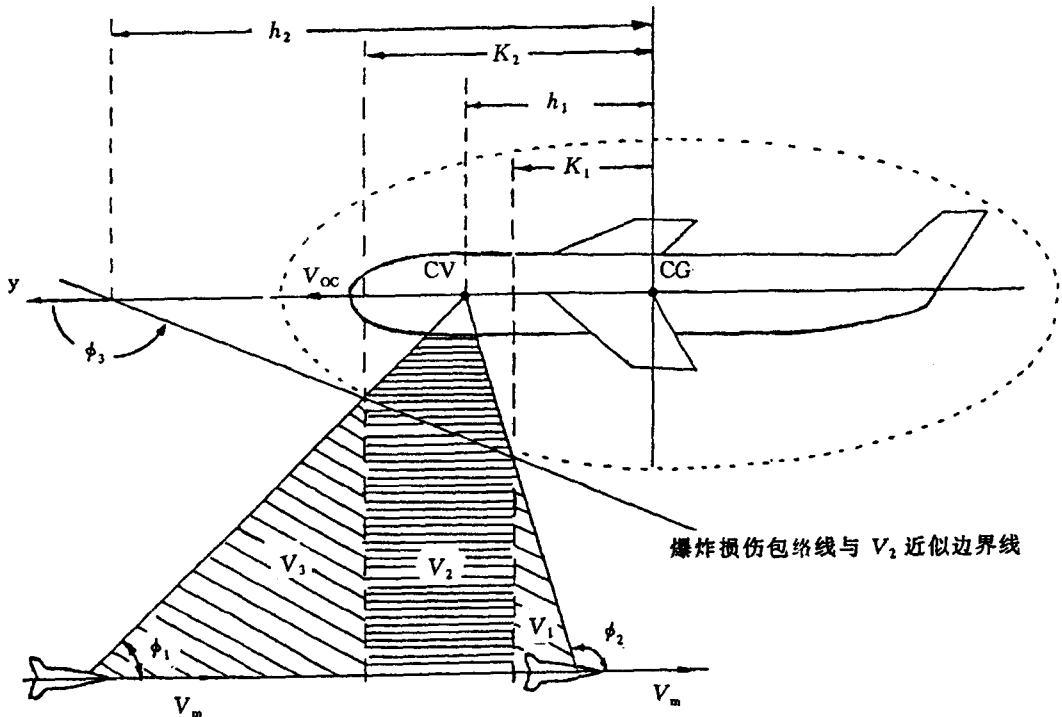


图 30 碎片损伤包络线

图 30 中:

- $K_i$ ——爆炸损伤包线与  $V_i$  相交的  $y$  坐标 ( $i = 1, 2$ ), m;
- $h_1$ ——易损中心的  $y$  坐标, m;
- $h_2$ ——爆炸损伤包线与  $V_2$  近似边界线的  $y$  截距, m;
- $\Phi_i$ ——动态碎片散射角度极限 ( $i = 1, 2$ );
- $\Phi_3$ ——爆炸损伤包线与  $V_2$  近似边界线的倾斜角;
- CG——坐标系原点, 也是该飞机的重心。

5.3.3.2 单架次生存力

5.3.3.2.1 飞机与各种武器交战的生存概率

飞机与某一防区内的各种武器进行多次交战的单架次生存概率, 可用下式计算:

$$P_{SM} = \prod_i P_{S_i} = \prod_i \exp\left[-\frac{N_i D^2 R_{eff_i} (1 - P_{S_{E_i}})}{A_i}\right] \dots\dots\dots (21)$$

式中:

- $P_{SM}$ ——与此防区内的各种武器经过第  $i$  次交战的生存概率;
- $A_i$ ——武器系统或火力单位被随意分配区域的面积,  $m^2$ ;
- $N_i$ ——A 区域里第  $i$  类武器系统的数量;
- $R_{eff_i}$ ——第  $i$  类武器系统的有效射程, m;
- $D$ ——飞机不明显改变高度或速度时, 飞越 A 区域的距离, m;
- $P_{S_{E_i}}$ ——飞机在某一给定的空速和高度下, 单机遭遇第  $i$  类武器系统的生存概率;
- $P_{S_i}$ ——与第  $i$  类武器系统进行多次交战的生存概率。

5.3.3.2.2 飞机与单个武器交战的生存概率

飞机与单个武器系统进行多次交战的生存概率  $P_{S_i}$  的计算图表见附录 A。

5.3.4 生存力评估的一般步骤

生存力评估一般需要依次完成以下四項工作:

- a) 任务/威胁的确定;
- b) 系统与部件要求分析;
- c) 易损性评估;
- d) 损耗模型。

5.3.4.1 任务/威胁的确定

为了详细地模拟遭遇, 首先要确定飞机的飞行任务和威胁环境。飞机飞行任务用飞行航迹、格斗战术、作战方式和各种构型因素(如重量、重心位置、剩余燃油和有效载荷等作为执行任务时的函数)来描述。威胁环境的定义包括在执行预期的任务期间, 对所有敌方威胁的完整描述。如描述机炮威胁环境的重要参数包括: 机炮相对于飞机飞行轨迹的位置、其瞄准与跟踪的方法、转动速率限制、射击准则、穿透物的质量及其成分、穿透物的速度和射程特性等。

5.3.4.2 系统与部件要求分析

根据飞机的飞行任务, 分析对系统和部件的要求。首先, 要确定完成飞行任务的系统基本功能, 确定实现这些功能的主要部件。然后进行失效模式及其影响分析和损伤模式及其影响分析, 以确定每个部件受破坏的各种方式和由于这此损坏给系统其余部件带来的影响。最后结合基本功能研究和失效和损伤模式、影响分析的结果, 形成生存力的逻辑。这个逻辑将整个系统的失效与单个部件的生存特性联系在一起。

5.3.4.3 易损性评估

对系统中每个部件的易损性进行评估。通过评估, 对每一部件可能的损坏环境模式均可列出易损性

面积表。这些表将部件的易损性表示为攻击方向、威胁类型和穿透速度或碰撞速度的函数。易损面积的计算见 5.3.6.2。当质量、速度一定的物体穿透部件时,部件易损面积取决于部件的大小和组成、部件外壳材料的类型和厚度以及这种威胁的穿透特性。

#### 5.3.4.4 损耗模型

将上述三项分析的结果输入到一个损耗模型上,该模型用来模拟飞机与威胁遭遇的过程,并计算系统的生存概率(或计算系统的破坏概率)。损耗模型可以用于计算命中飞机各个部位的概率以及系统各个部件的损坏概率。然后根据第二步建立起来的生存逻辑,将单个部件受破坏的概率综合在一起算出系统的破坏概率。此外,一些损耗模型还可用来计算单个部件破坏给整个系统带来影响的各种参数。在进行设计比较研究时,这些模型对提高飞机生存力是非常适用的。

### 5.4 系统的有效性

#### 5.4.1 概述

提高飞机生存力技术的选择与组合是否合理,应通过评估它对飞机总的有效性来证实,而该有效性则依据它对系统全寿命费用的影响来评估。用于给定型号飞机评估的具体方法,应通过协商确定。

在提高飞机生存力的同时,必须强调它对全寿命费用的重要影响。这些影响表现在它对飞机研制的其他要素的影响。为此,我们应对这些要素一一进行分析和研究,并权衡它们对全寿命费用的综合影响,为飞机的详细设计作出正确的抉择,保证所研制的飞机既具备足够的生存力,又满足全寿命费用的要求。这种抉择是一反复的过程,贯穿于整个研制阶段。图 31 示出了生存力综合研究与费用、有效性分析的关系和流程。

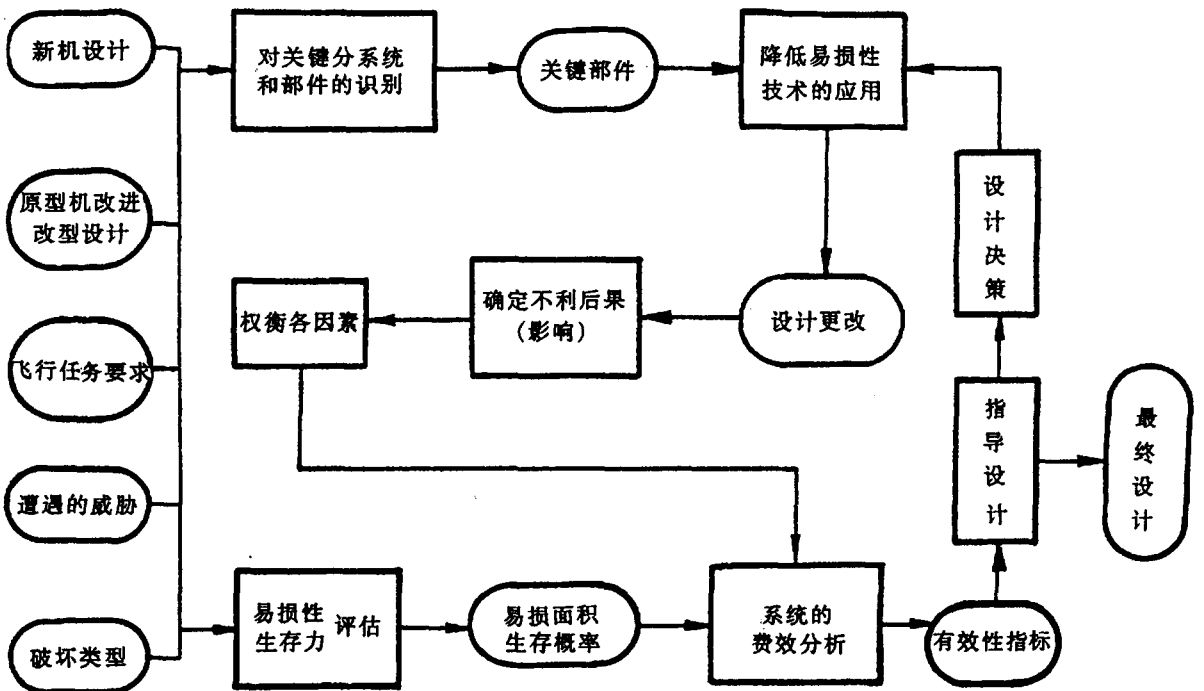


图 31 生存力综合研究图表

#### 5.4.2 生存力权衡

提高生存力涉及到对其它要素的影响,而这些要素对飞机的有效性和全寿命费用产生综合影响(包括飞机平时训练和作战使用)。在选择每一项生存力提高技术时,应对这些要素进行评估,以判定它们对飞机的综合影响。

#### 5.4.2.1 提高生存力的技术和需要权衡的要素

##### 5.4.2.1.1 提高生存力的技术

提高生存力的技术有：

- a) 减小可探测性(雷达散射截面、红外信号、视觉信号和声响信号)；
- b) 主动对抗对策(性能、电子对抗/威胁探测、假目标/箔条/烟雾剂和战术)；
- c) 降低易损性(余度/隔离、损伤容限、迟滞失效、泄漏抑制/控制、具有自动防止故障的特性和遮蔽/装甲/几何形状)。

##### 5.4.2.1.2 需要权衡的要素

需要权衡的主要要素有：

- a) 重量；
- b) 制造成本；
- c) 研究、试验及评估费用；
- d) 装备批量；
- e) 系统生存力；
- f) 系统易损性；
- g) 维修性；
- h) 人素工程；
- i) 安全性；
- j) 可靠性；
- k) 后勤保障；
- l) 系统费用；
- m) 系统重量；
- n) 全寿命费用效应；
- o) 其它。

##### 5.4.2.2 系统安全性

在选择生存力提高技术时,应对系统安全程度的可能变化进行评估。希望所选择的技术能够提高安全性。

例如,当敌方火力破坏了滑油散热器后,一个润滑旁路系统能维持飞机继续飞行,这对保障空勤人员的安全和争取救援时间提供了较大的可能性。采用润滑旁路系统后,实际上也提高了飞机平时使用的安全性。这是因为材料的损坏或维修工作的差错也能导致滑油从散热器、相关的管路及其他部件中渗漏出来。

又如,为提高飞机生存力而进行的坠撞安全性设计中所采用的专用座椅和结束装置,能大大减缓坠撞时人的加速度;利用一般结构和附件对人员和关键部件进行遮蔽,既节省了重量又提高了安全性;武器系统若进行破损安全设计,在运行中即使遭到敌方攻击,该系统仍处于未被解除保险的状态,可防止二次效应引爆。

类似上述这些与安全性有关的生存力设计技术,可转换成以下两个参数评估它们的影响：

- a) 飞行时间内事故；
- b) 每次事故中人员的存活数。

##### 5.4.2.3 维修性

一般而言,要提高现有飞机的生存力设计水平,将会引起整机维修工时的增加(包括计划维修和非计划维修)。对于新飞机设计,可以把维修工作减到最低程度,在有些情况下,还为提高生存力带来一定好处。应对每一个维修性定量指标进行评价,例如,维修工时或某一设备的检修时限。将一个分系统内的许多部件进行集中布置和综合利用,可能使该分系统对武器作用的易损性降低到最小程度,并减少一些

维修工时。把以上这些因素转换成以下三个指标进行评估：

- a) 每飞行小时的维修工时；
- b) 每飞行小时的停机时间(因故障造成的)；
- c) 平均维修时间。

#### 5.4.2.4 可靠性

生存力性能的提高影响着系统的可靠性。如若增加备用子系统回路,则要求增强每一个备用系统专用元件的可靠性,以满足总系统分配的可靠性。可把可靠性转化成以下三个指标进行评估：

- a) 部件的可靠性；
- b) 部件余度；
- c) 飞机的任务可靠性。

#### 5.4.2.5 后勤保障

军用飞机作战,要求有后勤保障,以便完成指定的飞行任务。对增强生存力性能有影响的主要项目包括燃油消耗、备件需求以及为达到预期的作战水平所消耗的有效载荷(弹药)。增强生存力,而又要保证飞机达到给定的性能水平,就要有更多的燃油保证,并增加系统的复杂性,这将影响在给定时间周期内作特定飞行的飞机数量。通过测定费用变化来评估这些指标。

#### 5.4.2.6 性能

飞机的性能损失,一般表示为作战半径的缩短或有效载荷的减少等。例如,改进燃油分系统(增加燃油抑爆和惰化系统及采用自封油箱等),将导致空机重量的增加,同时,由于容积的影响,将相应的减少燃油载油量,这就使得作战半径或有效载荷有所减小,如果变化较大,也可能影响飞机的极限速度和机动性能。对于比较小的变化和重量增加,一般对飞机性能的影响可以忽略。

空勤人员的防护装置会对他们的操作效能产生影响,其影响程度取决于防护原理及配置。对空勤人员操作效能的影响表现在他们完成指定任务的能力,例如:驾驶飞机、领航、准确地投放武器和观察地形等,同时还包括空勤人员应急离机的灵活性。

主要通过以下项目来测定对性能的影响：

- a) 作战半径；
- b) 有效载荷；
- c) 往返飞行时间；
- d) 雷达散射截面特征；
- e) 红外特征。

#### 5.4.2.7 作战有效性

一架飞机完成指定任务的能力,以作战有效性为衡量尺度,主要有以下几个方面：

- a) 完成作战飞行任务的能力；
- b) 击毁目标的数量；
- c) 可用于飞行的飞机数量；
- d) 完成训练任务的数量；
- e) 每月飞行的小时数。

#### 5.4.2.8 费用

对所有综合研究的评估,最终要与费用这一指标联系起来,它为设计管理提供了一个基准,并可根据敌方威胁效应选定有效的详细设计构型,从而提高生存力性能。受生存力性能影响的费准,并可根据敌方威胁效应选定有效的详细设计构型,从而提高生存力性能。受生存力性能影响的费用的指标是：

- a) 发展费用(研究、设计及试验)；
- b) 采购费用(制造飞机,备件,研究、设计及试验;保障设备)；
- c) 全寿命费用(平时使用及后勤保障、战时使用及后勤保障、平时损耗、战时损耗和采购费用)。

### 5.4.2.9 生存概率

生存力评估模型应考虑飞机的作战飞行剖面、速度、高度、突防距离、攻击战术、遭到的防御要素的数量和类型、暴露的时间、发射的次数、发射误差以及计算在飞行任务内的击毁概率或出动架次内的生存概率。生存力评估模型应反映飞机生存概率和未完成飞行任务的概率。

当对飞机进行生存力改进设计时,可能要增加分系统重量,从而引起包括增加起飞总重在内的诸多的不利后果(见图 32)。这是由于伴随着改进,增加了费用,同时,维修性、可靠性、后勤保障或其它相应的使用限制因素也受到改进的影响。如果在装配尺寸和重量方面改动很大,也可能显著影响现在使用的飞机性能。在新飞机设计时,如果使设想的基本飞行性能保持不变,以增大飞机的总尺寸和总重量来满足要求,这就导致了费用的增加。飞机设计人员应用构形分析方法,对新设计和改型设计的飞机特性及性能(包括重大更改)进行评估,如果需要,这一方法,可贯穿于飞机的全寿命周期。

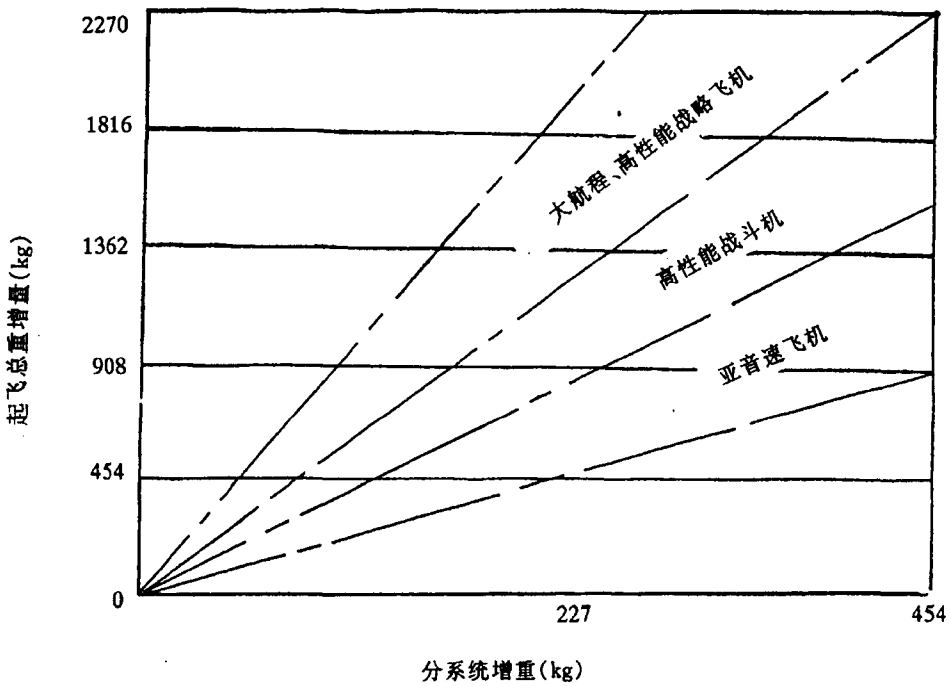


图 32 分系统增重对飞机起飞总重增重的影响

设计更改对飞机性能的影响可能非常显著地取决于所涉及的机型、任务要求及更改类别。图 32 说明了在新飞机设计过程中,子系统增重对不同类型飞机起飞总重增重的影响。

### 5.4.2.10 飞机生存概率与损耗率的关系

每架飞机大量地重复出动,进行常规的战术非核攻击,连续作战会遭受不同程度的战斗损耗。在作战延续期间,即使认为是较低的损耗率,也可导致严重的飞机损失以及非常大的战斗损耗费用。图 28 给出的数据显示出,若每架飞机每年攻击出动 300 架次(每月每架飞机平均出动 25 架次),如果每架次的平均损耗率为 0.1%,则大约每年损失 26% 的战斗力(由图 33 查出对应的生存概率为 0.74。如果损耗几乎全由轻型武器和自动武器系统威胁的射弹击中引起,假设其它因素(如战术和有效装载等)保持不变,那么,减少 50% 的易损面积,对这些威胁就可以降低一半(0.05%)的损耗率,也就是相同的出动架次只损失 14% 的战斗力。因此,采取措施降低易损性就可有效地提高生存力,降低严重威胁环境下的重大损坏。如果遭受的损失主要由高射炮弹(57mm 以上)、火箭和带有近炸引信战斗部的导弹密集碎片引起,可以通过改进突防和攻击战术以及应用电子对抗技术的途径更有效地提高生存力。

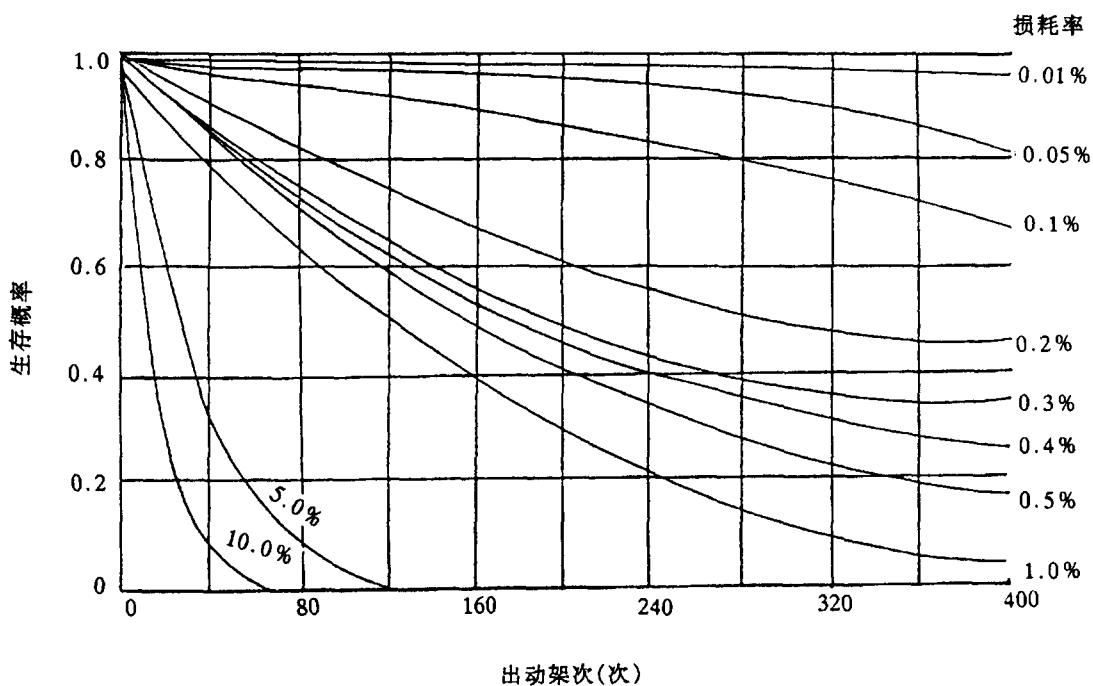


图 33 生存概率与损耗率的关系

### 5.5 验证方法

为了验证研制或改进的飞机能否达到所要求的生存力水平,一般使用分析和试验两种方法,它们既可以单独使用,也可以同时使用。分析方法是利用足够的局部试验数据和适度的理论计算,对这些数据进行推理、论证、采用相似的提高生存力设计的原理,提供具有相当置信水平的结论。或者在此基础上再进行必要的试验,既提高了分析的准确性,又可使试验费用不会明显增加。

某些子系统和部件可以通过试验来验证其防护效果。具体子系统和部件的试验方法、要求和条件应列入相应的子系统规范中。

附录 A

(参考件)

飞机与单个武器交战的生存概率

飞机与单个武器系统进行多次交战的生存概率  $P_{S_i}$  的计算图表见图 A.1。分析人员在使用这个图表时,必须研究和掌握作战计划、对防空环境的评估、飞机任务剖面以及与防空威胁武器有关的特性和性能等。

A.1 使用图表的假设条件

使用图表的假设条件如下:

- a) 武器系统的有效射程是没有重叠的;
- b) 地面武器的火力不会从一架飞机转移到另一架飞机;
- c) 飞机之间的距离足够大,以至于可以成为单个武器火力下的独立目标。

A.2 图表的修正

给定了上述假设条件后,图表可在下列修正后使用:

- a) 用系数  $1/F$  乘以有效武器密度。这里的  $F$  是一个出击编队的飞机数量;
- b) 通过用因子  $1 + S/2R_{eff_i}$  乘以飞行距离来增加编队的暴露机会。这里的  $S$  是编队的宽度,  $R_{eff_i}$  是武器的有效射程。下面的限制适用于因子  $1 + S/2R_{eff_i}$ : 如果  $S$  大于  $2R_{eff_i}$ , 编队就必须分成小组, 使  $S$  不大于  $2R_{eff_i}$ , 每个这样的小组都应单独计算; 如果所有小组的规模都是相同的, 那么这些小组的每架飞机的生存概率是相同的; 如果各小组的规模是不同的, 所得到的小组生存概率的加权平均值为一个近似值;
- c) 由此过程计算出的多次交战的生存概率  $P_{S_i}$ , 就是编队中每架飞机在设想的特定武器下的生存概率。

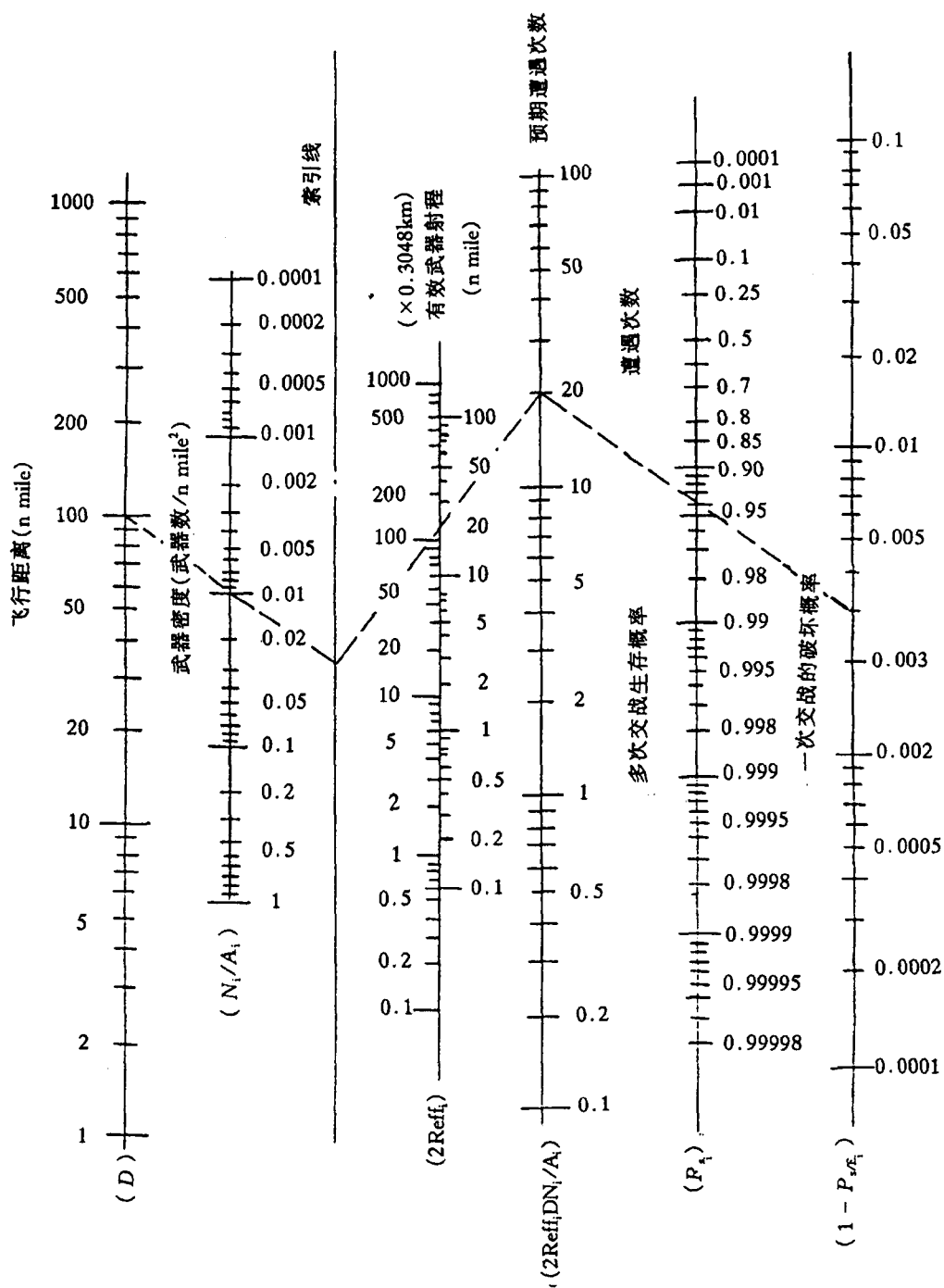
A.3 使用图表计算举例

- 已知:  $D = 100n$  mile;
- $N_i/A_i = 0.01/(n \text{ mile})^2$ ;
- $2 R_{eff_i} = 20n$  mile;
- $1 - P_{S_{E_i}} = 0.003$ ;

预期遭遇次数:  $2R_{eff_i}(D)(N_i/A_i) = 20$ 。

求: 飞机与单个武器系统进行多次交战的生存概率  $P_{S_i}$ 。

解: 在图 A.1 中, 分别在各标度上找出已知参数的点, 用虚线将它们连接, 虚线与  $P_{S_i}$  刻度相交的点即为所要求的  $P_{S_i}$  值。通过上述作图得出:  $P_{S_i} = 0.94$ 。



注:图中符号的定义见 5.3.3.2.1

图 A.1 飞机生存概率计算图表

---

**附加说明：**

本指导性技术文件由中国航空工业第一、第二集团提出。

本指导性技术文件由中国航空工业第三〇一研究所归口。

本指导性技术文件由中国航空工业第六〇三研究所、三〇一研究所和西北工业大学起草。

本指导性技术文件主要起草人：顾国忠、容乃刚、宋笔锋、何正忠、党举宏。

计划项目代号：9HK07。