

QJ

中华人民共和国航天行业标准

FL 1310

QJ 1385A—2006

代替 QJ 1385—1988

地地导弹飞行试验弹头飞行力学 结果分析方法

**RV flight dynamics result analysis methods for
ground-to-ground missile flight test**

2006—12—15 发布

2007—05—01 实施

国防科学技术工业委员会 发布

目 次

前言.....	II
1 范围.....	1
2 规范性引用文件.....	1
3 术语和定义、符号.....	1
3.1 术语和定义.....	1
3.2 符号.....	3
4 结果分析原始数据、检测修订和预处理.....	6
4.1 原始数据.....	6
4.2 遥外测数据检测修订.....	6
4.3 有关数据的预处理.....	6
5 被动段特征点弹道参数估值方法.....	15
5.1 方法原理及使用条件.....	15
5.2 估值公式.....	15
5.3 估值计算初始条件.....	17
5.4 计算说明.....	17
6 弹头飞行特性参数计算.....	18
6.1 自旋弹头真空飞行段陀螺特性参数计算.....	18
6.2 弹头再入段飞行特性参数计算.....	20
6.3 再入模拟量估算.....	22
6.4 计算说明.....	22
7 分离弹头再入段干扰引起的落点偏差.....	23
7.1 分离方法、使用条件及基本思想.....	23
7.2 分离误差计算.....	23
7.3 分离误差计算初始条件.....	26
7.4 计算说明.....	27
8 子母弹头落点分布参数确定.....	28
8.1 子弹落点分布参数分析评定前的数据准备.....	28
8.2 子弹落点分布中心的确定.....	29
8.3 子弹飞行成功率计算.....	29
8.4 子弹抛撒半径计算.....	29
8.5 子弹落点分布均匀性.....	30
附录 A (规范性附录) 弹头零攻角飞行弹道计算方程.....	32
附录 B (规范性附录) 摄动方程系数矩阵计算.....	35
附录 C (规范性附录) 发射坐标系向雷达坐标系的参数换算.....	37
附录 D (规范性附录) 再入段落点偏差计算.....	39

前 言

本标准代替 QJ 1385—1988《地地导弹飞行试验弹头飞行力学结果分析方法》。

本标准与QJ 1385—1988相比主要变化如下：

- 删除了原 4.4.1 计算流程图；
- 删除了原 5.4.1 流程图；
- 增加了真空段过载拟合及遥测过载系统偏差修正的处理内容；
- 增加了描述弹头在真空段运动的空间锥和体锥示意图；
- 删除了原第 7 章“示例”；
- 增加了第 8 章“子母弹头落点分布参数确定”。

本标准的附录 A～附录 D 为规范性附录。

本标准由中国航天科技集团公司提出。

本标准由中国航天标准化研究所归口。

本标准起草单位：中国航天科技集团公司第一研究院第十四研究所。

本标准主要起草人：严东升、丁兆祥、宋加洪、陈浩、童伟。

本标准于 1988 年 2 月首次发布。

地地导弹飞行试验弹头飞行力学结果分析方法

1 范围

本标准规定了无控旋转体弹头飞行特性参数分析计算方法、弹头再入段干扰引起的落点偏差分离方法和子母弹头子弹分布特性参数确定方法。

本标准适用于地地导弹飞行试验弹头飞行力学结果分析，亦适用于潜地导弹弹头。

2 规范性引用文件

下列文件中的条款通过本标准的引用而成为本标准的条款。凡是注日期的引用文件，其随后所有的修改单（不包含勘误的内容）或修订版均不适用于本标准，然而，鼓励根据本标准达成协议的各方研究是否可使用这些文件的最新版本。凡是不注日期的引用文件，其最新版本适用于本标准。

GB/T 4086.2 统计分布数值表 χ^2 分布

GB/T 4882 数据的统计处理和解释 正态性检验

GB/T 4883 数据的统计处理和解释 正态样本异常值的判断和处理

QJ 1294 导弹飞行动力学参数符号

3 术语和定义、符号

3.1 术语和定义

下列术语和定义适用于本标准。

3.1.1

实测参数理论弹道 **standard trajectory of measured parameter**

在标准条件下，以实际测量数据作为初始条件通过弹道方程解算的弹道。

3.1.2

实测参数理论落点 **standard impact point of measured parameter**

由实测参数理论弹道得到的弹头落点。

3.1.3

散布平面 **dispersion level**

目标点在地球参考椭球面上的投影点的切平面。

3.1.4

导弹射击偏差 **fire deviation of missile**

在导弹实弹射击或飞行试验中，弹头实际落点与瞄准点之间的偏差。射击偏差可在散布平面内分解为纵向射击偏差和横向射击偏差两个分量。

3.1.5

再入散布 **reentry dispersion**

在再入段飞行时，弹头由于干扰引起的落点偏差。再入散布由系统分量和随机分量两部分组成。

3.1.6

再入落点偏差 reentry deviation of impact point

弹头再入大气层后，由于干扰因素所引起的弹着点偏差。再入落点偏差可分解为在散布平面内的纵向偏差和横向偏差两个分量。

3.1.7

被动段特征点 characteristic point of unpowered phase

可以反映弹头在被动段飞行过程中重要特性的点。如头、体分离点，突防诱饵的释放点，再入大气层的起始点等。

3.1.8

弹头飞行总攻角 total angle of attack of RV

旋转对称弹头纵轴与飞行速度矢量之间的夹角。

3.1.9

弹头配平攻角 trim angle of attack of RV

弹头在再入飞行过程中，气动力矩达到平衡时，弹头理论纵轴与飞行速度矢量之间的夹角。

3.1.10

气动俯仰频率 aerodynamic pitch frequency (undamped natural pitch frequency)

弹头在再入飞行过程中，由于气动力矩产生攻角振动的角频率。

3.1.11

滚转共振 roll resonance

自旋弹头滚转角速度与气动俯仰频率相耦合的现象。

3.1.12

滚速过零 roll-rate reversal

自旋弹头由于某种原因引起滚转角速度逐渐减小以致自转停止或反转，其自转角速度瞬时为零的现象。

3.1.13

滚转共振联锁 roll resonance catenation

弹头自转角速度与气动俯仰频率长时间内变化趋势一致和数值几乎相同的现象。

3.1.14

临界滚转速率 critical roll rate

弹头气动俯仰频率与弹头转动惯量函数的比值。

3.1.15

共振指标 resonance guide line

滚转速率与临界滚转速率之比。

3.1.16

配平攻角放大因子 amplifying coefficient of trim angle-of-attack

旋转弹头与不旋转弹头配平攻角之比。

3.1.17

配平平面 trim plane

作用于弹头上的配平总法向力与弹头纵轴组成的平面。

3.1.18

故障子弹 damaged sub-warhead

落地不正常的子弹。

3.1.19**野弹 sub-warhead out of range**

经统计检验后其落点位置数据为异常的子弹。

3.1.20**未找到的子弹 missing sub-warhead**

未找到落点弹坑或残骸的子弹。

3.1.21**有效子弹 qualified sub-warhead**

剔除未找到的子弹、故障子弹和野弹后的子弹。

3.1.22**子弹落点分布中心 centre of distribution of sub-warheads**

子母弹头飞行试验时，对所有子弹落点坐标数据进行分析判断和统计处理后得到的几何中心。

3.1.23**子弹抛撒半径 distribution radius of sub-warheads**

以子弹分布中心为圆心，以某长度 R 为半径作圆，使落入该圆内的子弹数与有效子弹总数之比为规定值 P_k ，满足上述条件的最小半径 R_p 称为子弹抛撒半径。

3.1.24**子弹落点周向分布均匀性 fan-shaped area distribution uniformity of sub-warheads**

以子弹落点分布中心为原点，某规定的方向为极轴的极坐标系中，在 $[0, 2\pi)$ 的极角范围内，各等分极角扇形区域子弹落点分布的均匀程度。

3.1.25**子弹落点径向分布均匀性 radial distribution uniformity of sub-warheads**

以子弹落点分布中心为圆心的圆形、环形区域范围内子弹落点分布的均匀程度。

3.2 符号

QJ 1294 确立的及以下参数符号适用于本标准。

3.2.1 主要参数符号

主要参数符号见表1。

表 1 主要参数符号

序号	符号	名称或含义	单位
1	A	配平攻角放大因子	—
2	A_{CO}	由落点（或目标点、理论落点）到发射点的大地线方位角	弧度（rad）
3	A_{CoC}	由目标点到落点（或理论落点）的大地线方位角	弧度（rad）
4	A_{CCo}	由落点（或理论落点）到目标点的大地线方位角	弧度（rad）
5	A_i	雷达测量方位角	弧度（rad）
6	A_o	导弹发射大地方位角	弧度（rad）
7	A_{OC}	由发射点到落点（或目标点、理论落点）的大地线方位角	弧度（rad）
8	a	大气声速	米每秒（m/s）

表1 (续)

序号	符号	名称或含义	单位
9	a_e	地球椭球体赤道半径 (长半轴)	米 (m)
10	B	弹头飞行瞬时星下点大地纬度	弧度 (rad)
11	B_C	弹头落点大地经度	弧度 (rad)
12	B_{C_i}	理论落点大地纬度	弧度 (rad)
13	B_{C_o}	目标点大地纬度	弧度 (rad)
14	B_o	发射点大地纬度	弧度 (rad)
15	b_e	地球椭球体极半径 (短半轴)	米 (m)
16	C_A	弹头轴向力系数	—
17	C_D	弹头零攻角气动阻力系数	—
18	C_N	弹头法向力系数	—
19	D	共振阻尼因子	—
20	dS	由目标点到落点 (或理论落点) 的大地线长度 (即射击偏差)	米 (m)
21	E_i	雷达测量仰角	弧度 (rad)
22	e	地球第一偏心率	—
23	e'	地球第二偏心率	—
24	f	弹头飞行瞬时星下点航程角	弧度 (rad)
25	GM	地球引力常数	立方米每平方秒 (m^3/s^2)
26	H	导弹横向射击偏差	米 (m)
27	H'	弹头飞行位势高度	千米 (km)
28	H_i	导弹理论落点横向射击偏差	米 (m)
29	H_o	导弹实际横向射击偏差	米 (m)
30	ΔH	纵向再入落点偏差	米 (m)
31	ΔH_a	自转角速率过零时再入散布短半轴	米 (m)
32	ΔH_i	第 i 组实测数据分离的纵向再入落点偏差	米 (m)
33	h	弹头飞行海拔高度	米 (m)
34	h_C	弹头落点高程	米 (m)
35	h_{C_o}	目标点高程	米 (m)
36	h_i	雷达测量站高程	米 (m)
37	h_o	发射点高程	米 (m)
38	\hat{k}	俯仰、偏航角速度振荡角频率	每秒 (1/s)
39	J ($=J_{y_1}$ 或 J_{z_1})	弹头赤道转动惯量	千克米平方 ($\text{kg}\cdot\text{m}^2$)
40	$J_{x_1}, J_{y_1}, J_{z_1}$	弹头绕主轴转动惯量	千克米平方 ($\text{kg}\cdot\text{m}^2$)
41	$J_{x_1y_1}, J_{x_1z_1}, J_{y_1z_1}$	弹头转动惯量惯性积	千克米平方 ($\text{kg}\cdot\text{m}^2$)
42	L	导弹纵向射击偏差	米 (m)
43	L_i	导弹理论落点纵向射击偏差	米 (m)
44			
45	L_o	导弹实际纵向射击偏差	米 (m)
46	ΔL	纵向再入落点偏差	米 (m)
47	ΔL_a	自转角速率过零时再入散布长半轴	米 (m)
48	ΔL_i	第 i 组实测数据分离的纵向再入落点偏差	米 (m)
49	l	弹头参考长度	米 (m)
50	M	弹头飞行马赫数	—
51	m	弹头质量	千克 (kg)
52	$n_{x_1}, n_{y_1}, n_{z_1}$	弹头飞行过载矢量在弹头体轴坐标系内各轴的投影分量	—
53	P	大气压力	帕 (Pa)
54	p_{cr}	临界滚转速率	弧度 (rad)
55	q	弹头飞行动压	帕 (Pa)

表 1 (续)

序号	符号	名称或含义	单位
56	R_i	雷达测量斜距	米 (m)
57	R_o	地心到导弹发射点距离	弧度 (rad)
58	r	弹头飞行矢径	米 (m)
59	S	发射点到落点 (或目标点、理论落点) 的大地线距离 (即射程)	米 (m)
60	S_m	弹头参考面积	平方米 (m ²)
61	T	大气温度	开 (K)
62	t	弹头飞行时间	秒 (s)
63	V	弹头飞行速度	米每秒 (m/s)
64	$V_x、V_y、V_z$	弹头飞行速度矢量在发射坐标系各轴的投影	米每秒 (m/s)
65	$\dot{V}_x、\dot{V}_y、\dot{V}_z$	弹头飞行加速度矢量在发射坐标系各轴的投影	米每秒平方 (m/s ²)
66	X	弹头气动阻力	牛 (N)
67	x_{cg}	弹头顶点到质心的轴向距离	米 (m)
68	x_{cp}	弹头顶点到压心的轴向距离	米 (m)
69	$x_i、y_i、z_i$	弹头质心位置在测站直角坐标系内各轴的分量	米 (m)
70	$x、y、z$	弹头质心位置在发射坐标系的分量	米 (m)
71	η	弹头飞行总攻角	弧度 (rad)
72	λ	弹头飞行瞬时星下点大地经度	弧度 (rad)
73	λ'	共振指标	—
74	λ_c	弹头落点大地纬度	弧度 (rad)
75	λ_{c_i}	理论落点大地经度	弧度 (rad)
76	λ_{Co}	目标点大地经度	弧度 (rad)
77	λ_i	雷达测量站大地经度	弧度 (rad)
78	λ_o	发射点大地经度	弧度 (rad)
79	μ	地球引力常数扁率修正系数	5 次方米每平方秒 (m ⁵ /s ²)
80	ρ	大气密度	千克每立方米 (kg/m ³)
81	τ_B	弹头横向角速度转动周期	秒 (s)
82	τ_s	弹头进动周期	秒 (s)
83	ϕ	弹头纵轴与锥形运动中心线的夹角	弧度 (rad)
84	$\Delta\psi$	配平平面相位变化角	弧度 (rad)
85	ω_A	弹头气动俯仰频率	弧度每秒 (rad/s)
86	ω_e	地球自转角速率	弧度每秒 (rad/s)
87	ω_T	弹头横向角速度	弧度每秒 (rad/s)
88	$\omega_{x_i}、\omega_{y_i}、\omega_{z_i}$	弹头转动角速度在弹头体轴坐标系内各轴的投影分量	弧度每秒 (rad/s)

3.2.2 下角注符号

下角注符号见表 2。

表 2 下角注符号

序号	符号	含 义
1	C	落点参数
2	C_i	理论落点上的参数
3	C_o	目标点上的参数
4	E	再入点上的参数
5	e	地球上的参数
6	K	特征点上的参数
7	o	发射点、初始点、自转角速率过零点
8	max	最大值
9	min	最小值

3.2.3 顶标符号

顶标符号见表 3。

表 3 顶标符号

序号	符号	含义
1	·	表示参数对时间的一阶导数
2	^	表示参数的估值
3	—	表示参数的均值、相对值

3.2.4 其它符号

其它符号见表 4。

表 4 其它符号

序号	符号	含义
1	[]	表示矩阵
2	[] ^T	表示矩阵的转置矩阵
3	[] ⁻¹	表示矩阵的逆矩阵

4 结果分析原始数据、检测修订和预处理

4.1 原始数据

供飞行试验弹头飞行力学结果分析使用的主要原始数据有：

- a) 弹头出厂时的技术状态及有关数据，包括弹头的实际质量、质心位置、转动惯量，过载传感器安装位置参数；
- b) 弹头理论或地面风洞试验的气动力、气动力矩系数，弹头参考长度、参考面积；
- c) 飞行试验首、末区外弹道测量获得的弹头飞行速度、位置数据；
- d) 遥测或存储器获得的弹头过载、转动角速度数据，弹头防热烧蚀量数据，子母弹头爆高信号对应时间；
- e) 弹头再入飞行末区的实测气象数据，包括随高度变化的大气压力、温度、相对湿度、风速和风向；
- f) 弹头外测、遥测零点绝对时间；
- g) 弹头、子弹实际落点的大地测量成果，包括落点大地坐标、高程，以及对瞄准点的纵、横向偏差；
- h) 头、体分离时刻附近的飞行时间、弹头姿态角及其偏差测量数据。

4.2 遥外测数据检测修订

对飞行试验获得的遥外测数据，常用下列方法进行检测修订：

- a) 利用各参数之间的确定关系对原始数据进行检查纠错；
- b) 用运载工具和弹头上相同或相近测量参数数据进行比对修正；
- c) 利用参数在时间序列上的变化规律及连续性，剔除野值并进行修补；
- d) 根据给出的遥外测零点绝对时间数据，对遥测或外测数据进行时间对齐修正；
- e) 检查遥测数据超量程测量情况，利用两端未超量程数据插值补点。

4.3 有关数据的预处理

4.3.1 弹头真空段遥测转动角速度拟合

4.3.1.1 总则

具有非零惯性积 $J_{x_1y_1}$ 、 $J_{x_1z_1}$ ，且俯仰、偏航方向转动惯量相等（即 $J_{y_1} = J_{z_1} = J$ ）的无控自旋弹头，在

真空段具有如下运动特性：弹头自旋角速度 ω_{x_1} 为常值，俯仰、偏航角速度 ω_{z_1} 、 ω_{y_1} 分别围绕 $\omega_{x_1} \frac{J_{x_1 z_1}}{J - J_{x_1}}$ 、

$\omega_{x_1} \frac{J_{x_1 y_1}}{J - J_{x_1}}$ 作正弦振动。

4.3.1.2 转动角速度拟合计算

转动角速度拟合计算公式见公式（1）或公式（2）：

$$\left. \begin{aligned} \hat{\omega}_{x_1} &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \omega_{x_1}(t_i) \\ \hat{\omega}_{y_1} &= \hat{A}_y \sin \hat{k}t + \hat{B}_y \cos \hat{k}t + \hat{D}_y \\ \hat{\omega}_{z_1} &= \hat{A}_z \sin \hat{k}t + \hat{B}_z \cos \hat{k}t + \hat{D}_z \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (1)$$

或

$$\left. \begin{aligned} \hat{\omega}_{x_1} &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \omega_{x_1}(t_i) \\ \hat{\omega}_{y_1} &= \hat{C} \sin(\hat{k}t + \hat{\phi}_C) + \hat{D}_y \\ \hat{\omega}_{z_1} &= \hat{C} \cos(\hat{k}t + \hat{\phi}_C) + \hat{D}_z \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (2)$$

公式（1）和公式（2）中：

N ——为遥测数据的采样点数。

4.3.1.3 转动角速度拟合系数估值计算

转动角速度拟合系数估值计算公式见公式（3）～公式（7）：

$$\begin{bmatrix} \hat{A}_y \\ \hat{B}_y \\ \hat{D}_y \end{bmatrix} = [D] \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^N \omega_{y_1}(t_i) \sin kt_i \\ \sum_{i=1}^N \omega_{y_1}(t_i) \cos kt_i \\ \sum_{i=1}^N \omega_{y_1}(t_i) \end{bmatrix} \dots \dots \dots (3)$$

$$\begin{bmatrix} \hat{A}_z \\ \hat{B}_z \\ \hat{D}_z \end{bmatrix} = [D] \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^N \omega_{z_1}(t_i) \sin kt_i \\ \sum_{i=1}^N \omega_{z_1}(t_i) \cos kt_i \\ \sum_{i=1}^N \omega_{z_1}(t_i) \end{bmatrix} \dots \dots \dots (4)$$

$$\hat{k} = \hat{\omega}_{x_1} \frac{J - J_{x_1}}{J} \dots \dots \dots (5)$$

$$\left. \begin{aligned} \hat{A} &= \frac{\hat{A}_y + \hat{B}_z}{2} \\ \hat{B} &= \frac{\hat{B}_y - \hat{A}_z}{2} \\ \hat{C} &= \sqrt{\hat{A}^2 + \hat{B}^2} \\ \hat{\phi}_C &= \text{tg}^{-1} \left(\frac{\hat{B}}{\hat{A}} \right) \\ \hat{\omega}_T &= \hat{C} \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (6)$$

$$[D] = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^N \sin^2 \hat{k}t_i & \sum_{i=1}^N \sin \hat{k}t_i \cos \hat{k}t_i & \sum_{i=1}^N \sin \hat{k}t_i \\ \sum_{i=1}^N \sin \hat{k}t_i \cos \hat{k}t_i & \sum_{i=1}^N \cos^2 \hat{k}t_i & \sum_{i=1}^N \cos \hat{k}t_i \\ \sum_{i=1}^N \sin \hat{k}t_i & \sum_{i=1}^N \cos \hat{k}t_i & N \end{bmatrix}^{-1} \dots \dots \dots (7)$$

\hat{k} 为俯仰、偏航角速度振荡角频率，一般通过真空段遥测俯仰、偏航角速度随飞行时间的变化曲线直接求出，比用公式（5）计算结果更接近实际。

4.3.1.4 转动角速度拟合系数估值标准差计算

自转角速度的估值标准差计算见公式（8）：

$$S_{\omega_{x_1}} = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N [\omega_{x_1}(t_i) - \hat{\omega}_{x_1}]^2} \dots \dots \dots (8)$$

俯仰、偏航角速度拟合系数 A_y 、 B_y 、 D_y 或 A_z 、 B_z 、 D_z 的估值精度，即标准差 S_{A_y} 、 S_{B_y} 、 S_{D_y} 、 S_{A_z} 、 S_{B_z} 、 S_{D_z} 为公式（7）中 $[D]$ 矩阵对角线元素的开方。

4.3.2 弹头真空段非质心处遥测过载拟合

4.3.2.1 弹头真空段非质心处过载拟合计算

无控自旋弹头真空飞行段非质心处的过载仅与过载传感器的安装位置、弹头转动角速度及转动角加速度有关。非质心处过载拟合公式见公式（9）：

$$\left. \begin{aligned} \hat{n}'_{x_1} &= \hat{a}_{x_1} \cos(\hat{k}t + \hat{\phi}_C) + \hat{a}_{x_2} \sin(\hat{k}t + \hat{\phi}_C) + \hat{a}_{x_3} \\ \hat{n}'_{y_1} &= \hat{a}_{y_1} \sin(\hat{k}t + \hat{\phi}_C) \cos(\hat{k}t + \hat{\phi}_C) + \hat{a}_{y_2} \sin(\hat{k}t + \hat{\phi}_C) + \\ &\quad \hat{a}_{y_3} \cos(\hat{k}t + \hat{\phi}_C) + \hat{a}_{y_4} \cos^2(\hat{k}t + \hat{\phi}_C) + \hat{a}_{y_5} \\ \hat{n}'_{z_1} &= \hat{a}_{z_1} \sin^2(\hat{k}t + \hat{\phi}_C) + \hat{a}_{z_2} \sin(\hat{k}t + \hat{\phi}_C) + \\ &\quad \hat{a}_{z_3} \sin(\hat{k}t + \hat{\phi}_C) \cos(\hat{k}t + \hat{\phi}_C) + \hat{a}_{z_4} \sin(\hat{k}t + \hat{\phi}_C) + \hat{a}_{z_5} \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (9)$$

式中：

\hat{a}_{x_1} 、 \hat{a}_{x_2} 、 \hat{a}_{x_3} ——为弹头真空段轴向过载待估拟合系数，由公式（10）～公式（13）计算；
 \hat{a}_{y_1} 、 \hat{a}_{y_2} 、 \hat{a}_{y_3} 、 \hat{a}_{y_4} 、 \hat{a}_{y_5} ——为弹头真空段法向过载待估拟合系数，由公式（14）～公式（19）计算；
 \hat{a}_{z_1} 、 \hat{a}_{z_2} 、 \hat{a}_{z_3} 、 \hat{a}_{z_4} 、 \hat{a}_{z_5} ——为弹头真空段横向过载待估拟合系数，由公式（20）～公式（25）计算；
 $\hat{\phi}_C$ ——由公式（6）计算。

4.3.2.2 弹头真空段非质心处过载拟合系数估值计算

弹头真空段非质心处过载拟合系数估值计算公式见公式（10）～公式（25）：

$$\begin{bmatrix} \hat{a}_{x_1} \\ \hat{a}_{x_2} \\ \hat{a}_{x_3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d_{x11} & d_{x12} & d_{x13} \\ d_{x21} & d_{x22} & d_{x23} \\ d_{x31} & d_{x32} & d_{x33} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^N n'_{x_1}(t_i) \cos(\hat{k}t_i + \hat{\phi}_C) \\ \sum_{i=1}^N n'_{x_1}(t_i) \sin(\hat{k}t_i + \hat{\phi}_C) \\ \sum_{i=1}^N n'_{x_1}(t_i) \end{bmatrix} \dots \dots \dots (10)$$

$$\left. \begin{aligned} d_{x11} &= \sum_{i=1}^N \cos^2(\hat{k}t_i + \hat{\varphi}_C) \\ d_{x12} &= \sum_{i=1}^N \sin(\hat{k}t_i + \hat{\varphi}_C) \cos(\hat{k}t_i + \hat{\varphi}_C) \\ d_{x13} &= \sum_{i=1}^N \cos(\hat{k}t_i + \hat{\varphi}_C) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (11)$$

$$\left. \begin{aligned} d_{x21} &= \sum_{i=1}^N \sin(\hat{k}t_i + \hat{\varphi}_C) \cos(\hat{k}t_i + \hat{\varphi}_C) \\ d_{x22} &= \sum_{i=1}^N \sin^2(\hat{k}t_i + \hat{\varphi}_C) \\ d_{x23} &= \sum_{i=1}^N \sin(\hat{k}t_i + \hat{\varphi}_C) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (12)$$

$$\left. \begin{aligned} d_{x31} &= \sum_{i=1}^N \cos(\hat{k}t_i + \hat{\varphi}_C) \\ d_{x32} &= \sum_{i=1}^N \sin(\hat{k}t_i + \hat{\varphi}_C) \\ d_{x33} &= N \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (13)$$

$$\begin{bmatrix} a_{y1} \\ a_{y2} \\ a_{y3} \\ a_{y4} \\ a_{y5} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d_{y11} & d_{y12} & d_{y13} & d_{y14} & d_{y15} \\ d_{y21} & d_{y22} & d_{y23} & d_{y24} & d_{y25} \\ d_{y31} & d_{y32} & d_{y33} & d_{y34} & d_{y135} \\ d_{y41} & d_{y42} & d_{y43} & d_{y44} & d_{y45} \\ d_{y51} & d_{y52} & d_{y53} & d_{y54} & d_{y55} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^N n'_{y_1}(t_i) \sin(\hat{k}t_i + \hat{\varphi}_C) \cos(\hat{k}t_i + \hat{\varphi}_C) \\ \sum_{i=1}^N n'_{y_1}(t_i) \sin(\hat{k}t_i + \hat{\varphi}_C) \\ \sum_{i=1}^N n'_{y_1}(t_i) \cos(\hat{k}t_i + \hat{\varphi}_C) \\ \sum_{i=1}^N n'_{y_1}(t_i) \cos^2(\hat{k}t_i + \hat{\varphi}_C) \\ \sum_{i=1}^N n'_{y_1}(t_i) \end{bmatrix} \dots\dots (14)$$

$$\left. \begin{aligned} d_{y11} &= \sum_{i=1}^N \sin^2(\hat{k}t_i + \hat{\varphi}_C) \cos^2(\hat{k}t_i + \hat{\varphi}_C) \\ d_{y12} &= \sum_{i=1}^N \sin^2(\hat{k}t_i + \hat{\varphi}_C) \cos(\hat{k}t_i + \hat{\varphi}_C) \\ d_{y13} &= \sum_{i=1}^N \sin(\hat{k}t_i + \hat{\varphi}_C) \cos^2(\hat{k}t_i + \hat{\varphi}_C) \\ d_{y14} &= \sum_{i=1}^N \sin(\hat{k}t_i + \hat{\varphi}_C) \cos^3(\hat{k}t_i + \hat{\varphi}_C) \\ d_{y15} &= \sum_{i=1}^N \sin(\hat{k}t_i + \hat{\varphi}_C) \cos(\hat{k}t_i + \hat{\varphi}_C) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (15)$$

$$\left. \begin{aligned}
 d_{y21} &= \sum_{i=1}^N \sin^2(\hat{k}t_i + \hat{\varphi}_C) \cos(\hat{k}t_i + \hat{\varphi}_C) \\
 d_{y22} &= \sum_{i=1}^N \sin^2(\hat{k}t_i + \hat{\varphi}_C) \\
 d_{y23} &= \sum_{i=1}^N \sin(\hat{k}t_i + \hat{\varphi}_C) \cos(\hat{k}t_i + \hat{\varphi}_C) \\
 d_{y24} &= \sum_{i=1}^N \sin(\hat{k}t_i + \hat{\varphi}_C) \cos^2(\hat{k}t_i + \hat{\varphi}_C) \\
 d_{y25} &= \sum_{i=1}^N \sin(\hat{k}t_i + \hat{\varphi}_C)
 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (16)$$

$$\left. \begin{aligned}
 d_{y31} &= \sum_{i=1}^N \sin(\hat{k}t_i + \hat{\varphi}_C) \cos^2(\hat{k}t_i + \hat{\varphi}_C) \\
 d_{y32} &= \sum_{i=1}^N \sin(\hat{k}t_i + \hat{\varphi}_C) \cos(\hat{k}t_i + \hat{\varphi}_C) \\
 d_{y33} &= \sum_{i=1}^N \cos^2(\hat{k}t_i + \hat{\varphi}_C) \\
 d_{y34} &= \sum_{i=1}^N \cos^3(\hat{k}t_i + \hat{\varphi}_C) \\
 d_{y35} &= \sum_{i=1}^N \cos(\hat{k}t_i + \hat{\varphi}_C)
 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (17)$$

$$\left. \begin{aligned}
 d_{y41} &= \sum_{i=1}^N \sin(\hat{k}t_i + \hat{\varphi}_C) \cos^3(\hat{k}t_i + \hat{\varphi}_C) \\
 d_{y42} &= \sum_{i=1}^N \sin(\hat{k}t_i + \hat{\varphi}_C) \cos(\hat{k}t_i + \hat{\varphi}_C) \\
 d_{y43} &= \sum_{i=1}^N \cos^3(\hat{k}t_i + \hat{\varphi}_C) \\
 d_{y44} &= \sum_{i=1}^N \cos^4(\hat{k}t_i + \hat{\varphi}_C) \\
 d_{y45} &= \sum_{i=1}^N \cos^2(\hat{k}t_i + \hat{\varphi}_C)
 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (18)$$

$$\left. \begin{aligned}
 d_{y51} &= \sum_{i=1}^N \sin(\hat{k}t_i + \hat{\varphi}_C) \cos(\hat{k}t_i + \hat{\varphi}_C) \\
 d_{y52} &= \sum_{i=1}^N \sin(\hat{k}t_i + \hat{\varphi}_C) \\
 d_{y53} &= \sum_{i=1}^N \cos(\hat{k}t_i + \hat{\varphi}_C) \\
 d_{y54} &= \sum_{i=1}^N \cos^2(\hat{k}t_i + \hat{\varphi}_C) \\
 d_{y55} &= N
 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (19)$$

$$\begin{bmatrix} a_{z1} \\ a_{z2} \\ a_{z3} \\ a_{z4} \\ a_{z5} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d_{z11} & d_{z12} & d_{z13} & d_{z14} & d_{z15} \\ d_{z21} & d_{z22} & d_{z23} & d_{z24} & d_{z25} \\ d_{z31} & d_{z32} & d_{z33} & d_{z34} & d_{z35} \\ d_{z41} & d_{z42} & d_{z43} & d_{z44} & d_{z45} \\ d_{z51} & d_{z52} & d_{z53} & d_{z54} & d_{z55} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^N n'_{z_1}(t_i) \sin^2(\hat{kt}_i + \hat{\varphi}_C) \\ \sum_{i=1}^N n'_{z_1}(t_i) \sin(\hat{kt}_i + \hat{\varphi}_C) \\ \sum_{i=1}^N n'_{z_1}(t_i) \sin(\hat{kt}_i + \hat{\varphi}_C) \cos(\hat{kt}_i + \hat{\varphi}_C) \\ \sum_{i=1}^N n'_{z_1}(t_i) \cos(\hat{kt}_i + \hat{\varphi}_C) \\ \sum_{i=1}^N n'_{z_1}(t_i) \end{bmatrix} \dots\dots\dots (20)$$

$$\left. \begin{aligned} d_{z11} &= \sum_{i=1}^N \sin^4(\hat{kt}_i + \hat{\varphi}_C) \\ d_{z12} &= \sum_{i=1}^N \sin^3(\hat{kt}_i + \hat{\varphi}_C) \\ d_{z13} &= \sum_{i=1}^N \sin^3(\hat{kt}_i + \hat{\varphi}_C) \cos(\hat{kt}_i + \hat{\varphi}_C) \\ d_{z14} &= \sum_{i=1}^N \sin^2(\hat{kt}_i + \hat{\varphi}_C) \cos(\hat{kt}_i + \hat{\varphi}_C) \\ d_{z15} &= \sum_{i=1}^N \sin^2(\hat{kt}_i + \hat{\varphi}_C) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (21)$$

$$\left. \begin{aligned} d_{z21} &= \sum_{i=1}^N \sin^3(\hat{kt}_i + \hat{\varphi}_C) \\ d_{z22} &= \sum_{i=1}^N \sin^2(\hat{kt}_i + \hat{\varphi}_C) \\ d_{z23} &= \sum_{i=1}^N \sin^2(\hat{kt}_i + \hat{\varphi}_C) \cos(\hat{kt}_i + \hat{\varphi}_C) \\ d_{z24} &= \sum_{i=1}^N \sin(\hat{kt}_i + \hat{\varphi}_C) \cos(\hat{kt}_i + \hat{\varphi}_C) \\ d_{z25} &= \sum_{i=1}^N \sin(\hat{kt}_i + \hat{\varphi}_C) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (22)$$

$$\left. \begin{aligned} d_{z31} &= \sum_{i=1}^N \sin^3(\hat{kt}_i + \hat{\varphi}_C) \cos(\hat{kt}_i + \hat{\varphi}_C) \\ d_{z32} &= \sum_{i=1}^N \sin^2(\hat{kt}_i + \hat{\varphi}_C) \cos(\hat{kt}_i + \hat{\varphi}_C) \\ d_{z33} &= \sum_{i=1}^N \sin^2(\hat{kt}_i + \hat{\varphi}_C) \cos^2(\hat{kt}_i + \hat{\varphi}_C) \\ d_{z34} &= \sum_{i=1}^N \sin(\hat{kt}_i + \hat{\varphi}_C) \cos^2(\hat{kt}_i + \hat{\varphi}_C) \\ d_{z35} &= \sum_{i=1}^N \sin(\hat{kt}_i + \hat{\varphi}_C) \cos(\hat{kt}_i + \hat{\varphi}_C) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (23)$$

$$\left. \begin{aligned}
 d_{z41} &= \sum_{i=1}^N \sin^2(\hat{k}t_i + \hat{\varphi}_C) \cos(\hat{k}t_i + \hat{\varphi}_C) \\
 d_{z42} &= \sum_{i=1}^N \sin(\hat{k}t_i + \hat{\varphi}_C) \cos^2(\hat{k}t_i + \hat{\varphi}_C) \\
 d_{z43} &= \sum_{i=1}^N \sin(\hat{k}t_i + \hat{\varphi}_C) \cos^2(\hat{k}t_i + \hat{\varphi}_C) \\
 d_{z44} &= \sum_{i=1}^N \cos^2(\hat{k}t_i + \hat{\varphi}_C) \\
 d_{z45} &= \sum_{i=1}^N \cos(\hat{k}t_i + \hat{\varphi}_C)
 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (24)$$

$$\left. \begin{aligned}
 d_{z51} &= \sum_{i=1}^N \sin^2(\hat{k}t_i + \hat{\varphi}_C) \\
 d_{z52} &= \sum_{i=1}^N \sin(\hat{k}t_i + \hat{\varphi}_C) \\
 d_{z53} &= \sum_{i=1}^N \sin(\hat{k}t_i + \hat{\varphi}_C) \cos(\hat{k}t_i + \hat{\varphi}_C) \\
 d_{z54} &= \sum_{i=1}^N \cos(\hat{k}t_i + \hat{\varphi}_C) \\
 d_{z55} &= N
 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (25)$$

4.3.2.3 弹头真空段非质心处过载拟合系数估值标准差计算

弹头真空段非质心处过载拟合系数估值标准差计算公式见公式 (26) ~ 公式 (28):

$$\left. \begin{aligned}
 S_{a_{x1}} &= \sqrt{d'_{x11}} \\
 S_{a_{x2}} &= \sqrt{d'_{x22}} \\
 S_{a_{x3}} &= \sqrt{d'_{x33}}
 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (26)$$

$$\left. \begin{aligned}
 S_{a_{y1}} &= \sqrt{d'_{y11}} \\
 S_{a_{y2}} &= \sqrt{d'_{y22}} \\
 S_{a_{y3}} &= \sqrt{d'_{y33}} \\
 S_{a_{y4}} &= \sqrt{d'_{y44}} \\
 S_{a_{y5}} &= \sqrt{d'_{y55}}
 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (27)$$

$$\left. \begin{aligned}
 S_{a_{z1}} &= \sqrt{d'_{z11}} \\
 S_{a_{z2}} &= \sqrt{d'_{z22}} \\
 S_{a_{z3}} &= \sqrt{d'_{z33}} \\
 S_{a_{z4}} &= \sqrt{d'_{z44}} \\
 S_{a_{z5}} &= \sqrt{d'_{z55}}
 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (28)$$

公式 (26) ~ 公式 (28) 中:

$d'_{x11}, d'_{x22}, d'_{x33}$ ——为矩阵 $[d_{xij}]_{3 \times 3}^{-1}$ 的对角线元素;
 $d'_{y11}, d'_{y22}, d'_{y33}, d'_{y44}, d'_{y55}$ ——为矩阵 $[d_{yij}]_{5 \times 5}^{-1}$ 的对角线元素;
 $d'_{z11}, d'_{z22}, d'_{z33}, d'_{z44}, d'_{z55}$ ——为矩阵 $[d_{zij}]_{5 \times 5}^{-1}$ 的对角线元素。

4.3.3 弹头被动段非质心处遥测过载估值系统偏差计算及修正

4.3.3.1 弹头真空段非质心处遥测过载估值系统偏差计算

弹头真空段非质心处遥测过载估值系统偏差计算公式见公式 (29) ~ 公式 (32):

$$\left. \begin{aligned} \Delta n'_{x_1} &= (\hat{a}_{x1} - a_{x1}) \cos(\hat{k}t + \hat{\phi}_C) + (\hat{a}_{x2} - a_{x2}) \sin(\hat{k}t + \hat{\phi}_C) + (\hat{a}_{x3} - a_{x3}) \\ \Delta n'_{y_1} &= (\hat{a}_{y1} - a_{y1}) \sin(\hat{k}t + \hat{\phi}_C) \cos(\hat{k}t + \hat{\phi}_C) + (\hat{a}_{y2} - a_{y2}) \sin(\hat{k}t + \hat{\phi}_C) + \\ &\quad (\hat{a}_{y3} - a_{y3}) \cos(\hat{k}t + \hat{\phi}_C) + (\hat{a}_{y4} - a_{y4}) \cos^2(\hat{k}t + \hat{\phi}_C) + (\hat{a}_{y5} - a_{y5}) \\ \Delta n'_{z_1} &= (\hat{a}_{z1} - a_{z1}) \sin^2(\hat{k}t + \hat{\phi}_C) + (\hat{a}_{z2} - a_{z2}) \sin(\hat{k}t + \hat{\phi}_C) + \\ &\quad (\hat{a}_{z3} - a_{z3}) \sin(\hat{k}t + \hat{\phi}_C) \cos(\hat{k}t + \hat{\phi}_C) + (\hat{a}_{z4} - a_{z4}) \cos(\hat{k}t + \hat{\phi}_C) + \\ &\quad (\hat{a}_{z5} - a_{z5}) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (29)$$

$$\left. \begin{aligned} a_{x1} &= \hat{C}[-2\hat{D}_z \Delta X_x + (\hat{k} + \hat{\omega}_{x1}) \Delta Z_x] / g_0 \\ a_{x2} &= \hat{C}[-2\hat{D}_y \Delta X_x + (\hat{k} + \hat{\omega}_{x1}) \Delta Y_x] / g_0 \\ a_{x3} &= [-(\hat{C}^2 + \hat{D}_z^2 + \hat{D}_y^2) \Delta X_x + \hat{\omega}_{x1} (\hat{D}_y \Delta Y_x + \hat{D}_z \Delta Z_x)] / g_0 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (30)$$

$$\left. \begin{aligned} a_{y1} &= -\hat{C}^2 \Delta Z_y / g_0 \\ a_{y2} &= -\hat{C}[(\hat{\omega}_{x1} - \hat{k}) \Delta X_y + \hat{D}_z \Delta Z_y] / g_0 \\ a_{y3} &= \hat{C}(-2\hat{D}_z \Delta Y_y + \hat{D}_y \Delta Z_y) / g_0 \\ a_{y4} &= -\hat{C}^2 \Delta Y_y / g_0 \\ a_{y5} &= [\hat{\omega}_{x1} \hat{D}_y \Delta X_y - (\hat{\omega}_{x1}^2 + \hat{D}_z^2) \Delta Y_y + \hat{D}_y \hat{D}_z \Delta Z_y] / g_0 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (31)$$

$$\left. \begin{aligned} a_{z1} &= -\hat{C}^2 \Delta Z_z / g_0 \\ a_{z2} &= -\hat{C}(-\hat{D}_z \Delta Y_z + 2\hat{D}_y \Delta Z_z) / g_0 \\ a_{z3} &= \hat{C}^2 \Delta Y_z / g_0 \\ a_{z4} &= \hat{C}[(\hat{\omega}_{x1} - \hat{k}) \Delta X_z + \hat{D}_y \Delta Y_z] / g_0 \\ a_{z5} &= [\hat{\omega}_{x1} \hat{D}_z \Delta X_z + \hat{D}_y \hat{D}_z \Delta Y_z - (\hat{\omega}_{x1}^2 + \hat{D}_y^2) \Delta Z_z] / g_0 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (32)$$

公式 (29) ~ 公式 (32) 中:

$\Delta X_x, \Delta Y_x, \Delta Z_x$ ——为轴向过载 n'_{x_1} 传感器安装在弹体坐标系各轴上的分量, 单位为米 (m);
 $\Delta X_y, \Delta Y_y, \Delta Z_y$ ——为法向过载 n'_{y_1} 传感器安装在弹体坐标系各轴上的分量, 单位为米 (m);
 $\Delta X_z, \Delta Y_z, \Delta Z_z$ ——为侧向过载 n'_{z_1} 传感器安装在弹体坐标系各轴上的分量, 单位为米 (m)。

4.3.3.2 弹头被动段非质心处遥测过载估值系统偏差修正

弹头真空段非质心处遥测过载用公式 (33) 进行系统偏差修正:

$$\left. \begin{aligned} \tilde{n}_{x_1}(t_i) &= \hat{n}'_{x_1}(t_i) - \Delta n'_{x_1}(t_i) \\ \tilde{n}_{y_1}(t_i) &= \hat{n}'_{y_1}(t_i) - \Delta n'_{y_1}(t_i) \\ \tilde{n}_{z_1}(t_i) &= \hat{n}'_{z_1}(t_i) - \Delta n'_{z_1}(t_i) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (33)$$

弹头再入段非质心处遥测过载用公式 (34) 进行系统偏差修正:

$$\left. \begin{aligned} \tilde{n}_{x_1}(t_i) &= \hat{n}'_{x_1}(t_i) - \Delta n'_{x_1}(t_e) \\ \tilde{n}_{y_1}(t_i) &= \hat{n}'_{y_1}(t_i) - \Delta n'_{y_1}(t_e) \\ \tilde{n}_{z_1}(t_i) &= \hat{n}'_{z_1}(t_i) - \Delta n'_{z_1}(t_e) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (34)$$

式中:

$\tilde{n}_{x_1}(t_i)$ 、 $\tilde{n}_{y_1}(t_i)$ 、 $\tilde{n}_{z_1}(t_i)$ —— 为非质心处的遥测过载经系统偏差修正后的结果;
 t_e —— 为弹头至再入初始点附近的飞行时间, 单位为秒 (s)。

4.3.4 弹头质心处过载换算

由弹头非质心处的遥测过载数据用公式 (35) 换算到弹头质心处过载:

$$\left. \begin{aligned} n_{x_1}(t_i) &= \tilde{n}_{x_1}(t_i) - [-(\omega_{y_1}^2(t_i) + \omega_{z_1}^2(t_i))\Delta X_x + \\ &\quad (\omega_{x_1}(t_i)\omega_{y_1}(t_i) - \dot{\omega}_{z_1}(t_i))\Delta X_y + \\ &\quad (\dot{\omega}_{y_1}(t_i) + \omega_{x_1}(t_i)\omega_{z_1}(t_i))\Delta X_z] / g_0 \\ n_{y_1}(t_i) &= \tilde{n}_{y_1}(t_i) - [(\dot{\omega}_{z_1}(t_i) + \omega_{x_1}(t_i)\omega_{y_1}(t_i))\Delta Y_x - \\ &\quad (\omega_{x_1}^2(t_i) + \omega_{z_1}^2(t_i))\Delta Y_y + \\ &\quad (\omega_{y_1}(t_i)\omega_{z_1}(t_i) - \dot{\omega}_{x_1}(t_i))\Delta Y_z] / g_0 \\ n_{z_1}(t_i) &= \tilde{n}_{z_1}(t_i) - [(\omega_{x_1}(t_i)\omega_{z_1}(t_i) - \dot{\omega}_{y_1}(t_i))\Delta Z_x + \\ &\quad (\dot{\omega}_{x_1}(t_i) + \omega_{y_1}(t_i)\omega_{z_1}(t_i))\Delta Z_y - \\ &\quad (\omega_{x_1}^2(t_i) + \omega_{y_1}^2(t_i))\Delta Z_z] / g_0 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (35)$$

公式 (35) 中, 弹头真空飞行段用公式 (2) 计算角速度 ω_{x_1} 、 ω_{y_1} 、 ω_{z_1} 及其对时间的微分。再入飞行段则用遥测数据并进行数值微分。

4.3.5 大气测量数据处理

根据大气平衡方程和状态方程并考虑水蒸汽的影响, 大气密度和大气声速用公式 (36) ~ 公式 (39) 计算:

$$\left. \begin{aligned} \rho' &= \frac{P}{287.05287T} \\ \rho &= \rho'(1 - 0.378\phi' \frac{P_s}{P}) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (36)$$

$$\phi' = \frac{P_w}{P_s} \dots\dots\dots (37)$$

$$\left. \begin{aligned} P_w &= 47.881 \exp(22.65 - \frac{5500}{T_D}) \\ P_s &= 47.881 \exp(22.65 - \frac{5500}{T}) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (38)$$

$$a = 20.0468\sqrt{T} \dots\dots\dots (39)$$

公式 (36) ~ 公式 (39) 中:

P —— 实测大气压力, 单位为帕 (Pa);

- T ——实测大气温度，单位为开（K）；
- ϕ' ——测量的大气相对湿度；
- P_w ——温度 T_D 下的饱和水汽压力，单位为帕（Pa）；
- P_s ——温度 T 下的饱和水汽压力，单位为帕（Pa）；
- T_D ——实测露点温度，单位为开（K）。

4.3.6 外弹道测量数据处理

外弹道测量数据由试验基地按外测大纲要求处理后提供。

5 被动段特征点弹道参数估值方法

5.1 方法原理及使用条件

被动段上特征点弹道参数估值方法原理是应用弹道摄动理论，利用外弹道测量的位置参数数据及加权最小二乘法对所选取的参考弹道特征点上的参数进行修正，以获得较为接近实际飞行的特征点上弹道参数估值。

本方法使用条件是：

- a) 外弹道测量数据系统偏差可以进行系统修正，但不需要作平滑处理；
- b) 对利用 30km 高度以上的外测数据，可以不考虑再入干扰对参数的影响。

5.2 估值公式

5.2.1 弹头零攻角飞行弹道运动方程

弹头零攻角飞行弹道运动方程见附录 A。

5.2.2 弹头运动摄动方程

弹头运动摄动方程见公式（40）和公式（41）：

$$[\dot{\lambda}] = [\alpha] [\lambda] \dots\dots\dots (40)$$

$$[\lambda] = \begin{bmatrix} \lambda_{11} & \lambda_{12} & \lambda_{13} & \lambda_{14} & \lambda_{15} & \lambda_{16} \\ \lambda_{21} & \lambda_{22} & \lambda_{23} & \lambda_{24} & \lambda_{25} & \lambda_{26} \\ \lambda_{31} & \lambda_{32} & \lambda_{33} & \lambda_{34} & \lambda_{35} & \lambda_{36} \\ \lambda_{41} & \lambda_{42} & \lambda_{43} & \lambda_{44} & \lambda_{45} & \lambda_{46} \\ \lambda_{51} & \lambda_{52} & \lambda_{53} & \lambda_{54} & \lambda_{55} & \lambda_{56} \\ \lambda_{61} & \lambda_{62} & \lambda_{63} & \lambda_{64} & \lambda_{65} & \lambda_{66} \end{bmatrix} \dots\dots\dots (41)$$

公式（40）和公式（41）中：

- $[\alpha]$ ——表达式见公式（85），具体计算见附录 B；
- $[\dot{\lambda}]$ ——为 $[\lambda]$ 中元素一阶导数的矩阵。

5.2.3 发射坐标系向雷达测量系的参数换算公式

发射坐标系向雷达测量坐标系的参数换算公式见附录 C。

5.2.4 实测弹道位置偏差计算公式

实测弹道位置偏差计算公式见公式（42）～公式（44）：

$$[\Delta'(t_k)] = \begin{bmatrix} \Delta'_1(t_k) \\ \Delta'_2(t_k) \\ \Delta'_3(t_k) \end{bmatrix} \dots\dots\dots (42)$$

$$\left. \begin{aligned} \Delta'_1(t_k) &= R_i(t_k) - R'_i(t_k) \\ \Delta'_2(t_k) &= E_i(t_k) - E'_i(t_k) \\ \Delta'_3(t_k) &= A_i(t_k) - A'_i(t_k) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (43)$$

$$k=1, 2, \dots, N \dots\dots\dots (44)$$

公式 (42) ~ 公式 (44) 中:

- $R_i(t_k)$ —— t_k 时刻雷达测量的斜距实际值, 单位为米 (m);
- $R'_i(t_k)$ —— t_k 时刻在雷达测量坐标系中表示的参考弹道的斜距, 单位为米 (m);
- $E_i(t_k)$ —— t_k 时刻雷达测量的高低角实际值, 单位为弧度 (rad);
- $E'_i(t_k)$ —— t_k 时刻在雷达测量坐标系中表示的参考弹道的高低角, 单位为弧度 (rad);
- $A_i(t_k)$ —— t_k 时刻雷达测量的方位角实际值, 单位为弧度 (rad);
- $A'_i(t_k)$ —— t_k 时刻在雷达测量坐标系中表示的参考弹道的方位角, 单位为弧度 (rad);
- t_k —— 对应采样点的时间, 单位为秒 (s);
- N —— 采样样本数。

5.2.5 特征点弹道参数偏差估值及估值协方差计算

特征点弹道参数偏差估值及估值协方差计算公式见公式 (45) ~ 公式 (49):

$$\left. \begin{aligned} [K_{\Delta\hat{x}_k}] &= ([S]^T [K] [S])^{-1} \\ [\Delta\hat{x}_k] &= [K_{\Delta\hat{x}_k}] [S]^T [K] [\Delta] \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (45)$$

$$[S] = \begin{bmatrix} [S'(t_1)] \\ [S'(t_2)] \\ \vdots \\ [S'(t_k)] \\ \vdots \\ [S'(t_N)] \end{bmatrix} \dots\dots\dots (46)$$

$$[\Delta] = \begin{bmatrix} [\Delta'(t_1)] \\ [\Delta'(t_2)] \\ \vdots \\ [\Delta'(t_k)] \\ \vdots \\ [\Delta'(t_N)] \end{bmatrix} \dots\dots\dots (47)$$

$$[K] = \begin{bmatrix} [K'(t_1)] & [0] & \dots & [0] & \dots & [0] \\ [0] & [K'(t_1)] & \dots & [0] & \dots & [0] \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ [0] & [0] & \dots & [K'(t_k)] & \dots & [0] \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ [0] & [0] & \dots & [0] & \dots & [K'(t_N)] \end{bmatrix} \dots\dots\dots (48)$$

$$[K'(t_i)] = \begin{bmatrix} 1/\sigma_{R_i}^2(t_k) & 0 & 0 \\ 0 & 1/\sigma_{E_i}^2(t_k) & 0 \\ 0 & 0 & 1/\sigma_{A_i}^2(t_k) \end{bmatrix} \dots\dots\dots (49)$$

$S'(t_k)$ 的计算公式见附录 C。

5.2.6 特征点弹道参数估值计算

特征点弹道参数估值计算公式见公式 (50) 和公式 (51) :

$$[\hat{X}_k] = [X_k] + [\Delta\hat{X}_k] \dots\dots\dots (50)$$

$$\left. \begin{aligned} [X_k] &= [V_{x_k}, V_{y_k}, V_{z_k}, x_k, y_k, z_k]^T \\ [\Delta\hat{X}_k] &= [\Delta\hat{V}_{x_k}, \Delta\hat{V}_{y_k}, \Delta\hat{V}_{z_k}, \Delta\hat{x}_k, \Delta\hat{y}_k, \Delta\hat{z}_k]^T \\ [\hat{X}_k] &= [\hat{V}_{x_k}, \hat{V}_{y_k}, \hat{V}_{z_k}, \hat{x}_k, \hat{y}_k, \hat{z}_k]^T \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (51)$$

5.3 估值计算初始条件

5.3.1 参考弹道积分初始条件

第一次计算时, 初始条件取飞行试验精确弹道特征点上参数 t_k 、 V_{x_k} 、 V_{y_k} 、 V_{z_k} 、 x_k 、 y_k 、 z_k ; 如果需要迭代计算, 则取估值后的弹道参数 t_k 、 \hat{V}_{x_k} 、 \hat{V}_{y_k} 、 \hat{V}_{z_k} 、 \hat{x}_k 、 \hat{y}_k 、 \hat{z}_k 。

5.3.2 摄动方程初始条件

当 $t=t_k$ 时, 初始条件见公式 (52) :

$$[\lambda] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \dots\dots\dots (52)$$

5.4 计算说明

5.4.1 计算步骤

计算步骤如下:

- a) 取飞行试验精确弹道上特征点的参数 t_k 、 V_{x_k} 、 V_{y_k} 、 V_{z_k} 、 x_k 、 y_k 、 z_k 及 5.3.2 中公式 (52) 作为初始条件, 联合求解附录 A 和 5.2.2 中公式 (40) 得 t , x , y , z , $[\lambda]$;
- b) 把 a) 中计算结果通过附录 C 把参考弹道中有关数据进行坐标转换, 变成雷达测量坐标系的参数 $R'_i(t_k)$ 、 $E'_i(t_k)$ 、 $A'_i(t_k)$ 及 $[S'(t_k)]$;
- c) 由 5.2.4 中公式 (42) 和公式 (43) 计算实测弹道位置偏差的雷达测量参数 $[\Delta'(t_k)]$;
- d) 由 5.2.5 中公式 (45) ~ 公式 (49) 计算特征点弹道参数偏差估值 $[\Delta\hat{X}_k]$;
- e) 由 5.2.6 中公式 (50) 和公式 (51) 计算特征点弹道参数估值 $[\hat{X}_k]$;
- f) 取偏差估值的协方差矩阵对角线元素开方值作为偏差估值精度, 见公式 (53) 和公式 (54) :

$$[\hat{\sigma}] = [\hat{\sigma}_{\hat{V}_{x_k}}, \hat{\sigma}_{\hat{V}_{y_k}}, \hat{\sigma}_{\hat{V}_{z_k}}, \hat{\sigma}_{\hat{x}_k}, \hat{\sigma}_{\hat{y}_k}, \hat{\sigma}_{\hat{z}_k}]^T \dots\dots\dots (53)$$

$$\left. \begin{aligned} \hat{\sigma}_{\hat{V}_{x_k}} &= \sqrt{K_{\Delta X_k 11}} \\ \hat{\sigma}_{\hat{V}_{y_k}} &= \sqrt{K_{\Delta X_k 22}} \\ \hat{\sigma}_{\hat{V}_{z_k}} &= \sqrt{K_{\Delta X_k 33}} \\ \hat{\sigma}_{\hat{x}_k} &= \sqrt{K_{\Delta X_k 44}} \\ \hat{\sigma}_{\hat{y}_k} &= \sqrt{K_{\Delta X_k 55}} \\ \hat{\sigma}_{\hat{z}_k} &= \sqrt{K_{\Delta X_k 66}} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (54)$$

式中:

$K_{\Delta\hat{X}_k ii}$ ($i=1, 2, \dots, 6$) ——为矩阵 $[K_{\Delta\hat{X}_k}]$ 的对角线元素。

- g) 把 $[\hat{\sigma}]$ 作为本估值计算是否作为迭代的条件, 若 $|\Delta\hat{X}_k|$ 大于 $[\hat{\sigma}]$, 则把 $[\hat{X}_k]$ 作为参考弹道的积分初始条件, 重复步骤 a) ~f), 直到 $|\Delta\hat{X}_k|$ 小于 $[\hat{\sigma}]$ 为止。

5.4.2 其它说明

主要有:

- a) 大气层的起始高度一般取 80km;
- b) 当外测数据是由其它外测设备获得时, 则 5.2.3 及 5.2.4 和 5.2.5 中有关计算公式应根据交会测量的台站变换计算公式;
- c) 当外测数据的采样时间大于特征点时间时, 则联合求解附录 A 和 5.2.2 中公式 (40) 时积分步长为正。反之, 积分步长为负。

6 弹头飞行特性参数计算

6.1 自旋弹头真空飞行段陀螺特性参数计算

6.1.1 总则

在没有气动力作用的真空飞行段, 弹头(物体)的运动可以被描述成一个体锥沿着空间锥的滚动, 如图 1 所示。

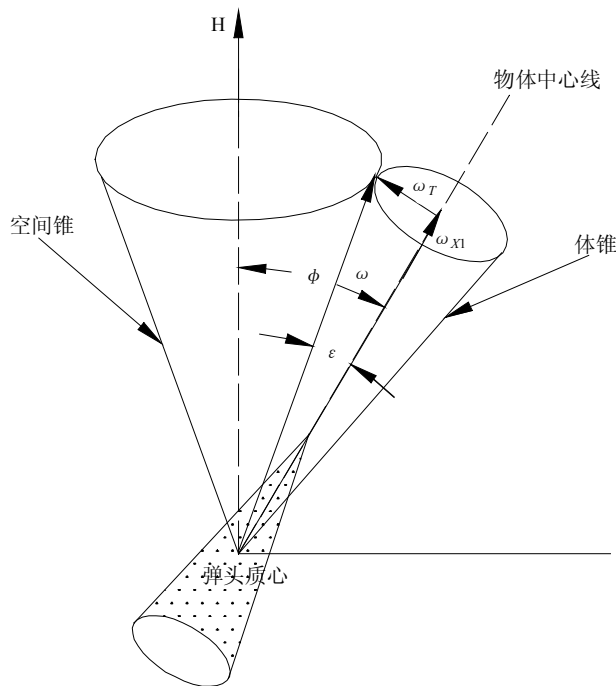


图 1 空间锥及体锥示意图

6.1.2 弹头体锥半锥角 ε

弹头体锥半锥角 ε 计算公式见公式 (55) :

$$tg\varepsilon = \frac{\hat{\omega}_T}{\hat{\omega}_{x1}} \dots\dots\dots (55)$$

6.1.3 弹头纵轴与空间锥中心线夹角 φ

弹头纵轴与空间锥中心线夹角 φ 计算公式见公式 (56) :

$$tg\phi = \frac{J\hat{\omega}_T}{J_{x_1}\hat{\omega}_{x_1}} \dots\dots\dots (56)$$

6.1.4 弹头纵轴绕空间锥中心线转动周期（进动周期） τ_S

弹头纵轴绕空间锥中心线转动周期（进动周期） τ_S 计算公式见公式（57）：

$$\tau_S = \frac{2\pi}{\hat{\omega}_{x_1} \frac{J_{x_1}}{J} \sqrt{1+tg^2\phi}} \dots\dots\dots (57)$$

6.1.5 弹头横向角速度（ ω_T ）向量绕弹头纵轴转动周期 τ_B

弹头横向角速度（ ω_T ）向量绕弹头纵轴转动周期 τ_B 计算公式见公式（58）：

$$\tau_B = \frac{2\pi}{(1-\frac{J_{x_1}}{J})\hat{\omega}_{x_1}} \dots\dots\dots (58)$$

6.1.6 弹头惯性积估值

弹头惯性积估值计算公式见公式（59）：

$$\left. \begin{aligned} \hat{J}_{x_1y_1} &= (J - J_{x_1}) \frac{\hat{D}_y}{\hat{\omega}_{x_1}} \\ \hat{J}_{x_1z_1} &= (J - J_{x_1}) \frac{\hat{D}_z}{\hat{\omega}_{x_1}} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (59)$$

6.1.7 弹头慢旋小火箭平均推力的确定

弹头慢旋小火箭平均推力的确定见公式（60）：

$$\left. \begin{aligned} M_{x_1} &= \frac{J_{x_1}\hat{\omega}_{x_1}}{\Delta t} \\ F &= \frac{M_{x_1}}{k_1 l_k} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (60)$$

式中：

Δt ——慢旋小火箭平均工作时间，单位为秒（s），可从遥测自转角速度数据中查出；

k_1 ——慢旋小火箭的个数；

l_k ——慢旋小火箭中心线到弹头纵轴的距离，单位为米（m）。

6.1.8 自旋弹头初始再入最大总攻角偏差估值

自旋弹头初始再入最大总攻角偏差估值计算公式见公式（61）和公式（62）：

$$\Delta\hat{\eta}_{\max} = \frac{AA}{\hat{\omega}_{x_1} - \hat{k}} + \frac{BB}{\hat{\omega}_{x_1}} + \sqrt{E^2 + F^2} \dots\dots\dots (61)$$

$$\left. \begin{aligned} AA &= \hat{\omega}_T \\ BB &= \hat{\omega}_{x_1} \frac{\sqrt{\hat{J}_{x_1y_1}^2 + \hat{J}_{x_1z_1}^2}}{J - J_{x_1}} \\ E &= \Delta\varphi_0 + \frac{J\hat{\omega}_{y_1}}{J_{x_1}\hat{\omega}_{x_1}} + \frac{\hat{J}_{x_1y_1}}{J_{x_1}} \\ F &= \Delta\psi_0 + \frac{J\hat{\omega}_{z_1}}{J_{x_1}\hat{\omega}_{x_1}} + \frac{\hat{J}_{x_1z_1}}{J_{x_1}} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (62)$$

式中：

$\Delta\varphi_0$ 、 $\Delta\psi_0$ ——分别为弹头起旋瞬时的俯仰、偏航角偏差，单位为弧度（rad）。

6.1.9 自旋弹头真空段飞行攻角变化历程计算

6.1.9.1 自旋弹头真空段姿态角运动方程

自旋弹头真空段姿态角运动方程见公式（63）：

$$\left. \begin{aligned} \dot{\varphi} &= \frac{1}{\cos \psi} (\hat{\omega}_{y_1} \sin \gamma + \hat{\omega}_{z_1} \cos \gamma) \\ \dot{\psi} &= \hat{\omega}_{y_1} \cos \gamma - \hat{\omega}_{z_1} \sin \gamma \\ \dot{\gamma} &= \hat{\omega}_{x_1} + \dot{\varphi} \sin \psi \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (63)$$

6.1.9.2 积分初始条件计算

积分初始条件计算公式见公式（64）～公式（66）：

$$\left. \begin{aligned} \varphi_0 &= \varphi_{t_0} - \omega_z t_0 \\ \psi_0 &= \psi_{t_0} - (\omega_y t_0 \cos \varphi_0 - \omega_z t_0 \sin \varphi_0) \\ \gamma_0 &= \gamma_{t_0} - (\omega_y t_0 \sin \varphi_0 + \omega_z t_0 \cos \varphi_0) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (64)$$

$$\left. \begin{aligned} \varphi_{t_0} &= \varphi_{cx0} + \Delta\varphi_0 \\ \psi_{t_0} &= \Delta\psi_0 \\ \gamma_{t_0} &= \Delta\gamma_0 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (65)$$

$$\left. \begin{aligned} \omega_x &= \omega_e \cos B_o \cos A_o \\ \omega_y &= \omega_e \sin B_o \\ \omega_z &= -\omega_e \sin A_o \cos B_o \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (66)$$

公式（64）～公式（66）中：

t_0 ——从起飞时刻起算的头、体分离时间，单位为秒（s）；

φ_{cx0} ——头、体分离时刻对发射惯性坐标系的俯仰程序角，单位为弧度（rad）；

$\Delta\varphi_0$ ——头、体分离时刻对发射惯性坐标系的俯仰角偏差，单位为弧度（rad）；

$\Delta\psi_0$ ——头、体分离时刻对发射惯性坐标系的偏航角偏差，单位为弧度（rad）；

$\Delta\gamma_0$ ——头、体分离时刻对发射惯性坐标系的滚动角偏差，单位为弧度（rad）。

6.1.9.3 自旋弹头真空段飞行攻角计算

自旋弹头真空段飞行攻角计算公式见公式（67）和公式（68）：

$$\left. \begin{aligned} \sin \beta &= \sin \psi \cos \gamma \cos \sigma \cos(\varphi - \theta) + \sin \gamma \cos \sigma \sin(\varphi - \theta) - \sin \sigma \cos \psi \cos \gamma \\ -\sin \alpha \cos \beta &= \sin \psi \sin \gamma \cos \sigma \cos(\varphi - \theta) - \cos \gamma \cos \sigma \sin(\varphi - \theta) - \sin \sigma \cos \psi \sin \gamma \\ \cos \eta &= \cos \alpha \cos \beta = \cos \psi \cos \sigma \cos(\varphi - \theta) + \sin \psi \sin \sigma \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (67)$$

$$\left. \begin{aligned} \sin \sigma &= -\frac{V_z}{V} \\ \tan \theta &= \frac{V_y}{V_x} \\ \cos \theta &= \frac{V_x}{V \cos \sigma} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (68)$$

由公式（67）的后两个表达式得到 $\tan \alpha$ ，求取 α 。 α 的取值范围 $[-\pi, \pi]$ 。

6.2 弹头再入段飞行特性参数计算

6.2.1 弹头轴向和法向气动力系数计算

弹头轴向和法向气动力系数计算公式见公式 (69) 和公式 (70) :

$$\left. \begin{aligned} C_A &= \frac{n_{x_1} mg_0}{qS_m} \\ C_N &= \frac{\sqrt{n_{y_1}^2 + n_{z_1}^2} mg_0}{qS_m} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (69)$$

$$q = \frac{1}{2} \rho V^2 \dots\dots\dots (70)$$

6.2.2 弹头再入段总攻角变化历程计算

弹头再入段总攻角变化历程计算公式见公式 (71) :

$$\eta = \frac{\sqrt{n_{y_1}^2 + n_{z_1}^2} C_A}{n_{x_1} C_N^\eta} \dots\dots\dots (71)$$

式中:

C_N^η ——为弹头法向力气动系数对总攻角的导数, 单位为每弧度 (1/rad)。

6.2.3 弹头再入滚转异常特性参数计算

6.2.3.1 气动俯仰角频率 ω_A 计算

气动俯仰角频率 ω_A 计算公式见公式 (72) :

$$\omega_A = \sqrt{\frac{C_N^\eta (x_{cp} - x_{cg}) q S_m}{J}} \dots\dots\dots (72)$$

6.2.3.2 共振阻尼因子 D 计算

共振阻尼因子 D 计算公式见公式 (73) 和公式 (74) :

$$D = \frac{\frac{Y_\eta}{mV} \left(1 - \frac{J_{x_1}}{J}\right) - \frac{M_q}{J}}{\omega_A \sqrt{1 - \frac{J_{x_1}}{J}}} \dots\dots\dots (73)$$

$$\left. \begin{aligned} Y_\eta &= C_N^\eta q S_m \\ M_q &= C_{mq} \frac{l}{V} q S_m l \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (74)$$

式中:

C_{mq} ——弹头阻尼气动力矩系数。

6.2.3.3 共振指标 λ' 计算

共振指标 λ' 计算公式见公式 (75) :

$$\lambda' = \frac{\omega_{x_1}}{P_{cr}} \dots\dots\dots (75)$$

6.2.3.4 配平攻角放大因子 A 计算

配平攻角放大因子 A 计算公式见公式 (76) :

$$A = \frac{1}{\sqrt{(1 - \lambda'^2)^2 + D^2 \lambda'^2}} \dots\dots\dots (76)$$

6.2.3.5 配平平面相位变化 $\Delta\psi$ 计算

配平平面相位变化 $\Delta\psi$ 计算公式见公式 (77) :

$$\left. \begin{aligned} \sin \Delta\psi &= -D\lambda'A \\ \cos \Delta\psi &= (1-\lambda^2)A \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (77)$$

6.2.3.6 自转角速度过零引起的再入散布计算

自转角速度过零引起的再入散布计算公式见公式 (78) :

$$\left. \begin{aligned} \Delta L_a &= \frac{15.778 h_0}{\sin \vartheta_0} \frac{\sqrt{n_{y10}^2 + n_{z10}^2} g_0}{\sqrt{|\dot{\omega}_{x10}|}} \\ \Delta H_a &= -\Delta L_a \sin \vartheta_0 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (78)$$

式中除 g_0 以外, 带有下标 “0” 的参数均为自转角速度过零时刻的弹道参数。

6.3 再入模拟量估算

6.3.1 总则

对于同样外形、质量的弹头飞行试验, 可用特征点弹道参数估计方法来计算实际飞行时的再入点参数, 从而确定再入环境模拟量。

6.3.2 再入点速度、当地弹道倾角计算

再入点速度、当地弹道倾角计算公式见公式 (79) 和公式 (80):

$$\left. \begin{aligned} \hat{V}_E &= \sqrt{\hat{V}_{xE}^2 + \hat{V}_{yE}^2 + \hat{V}_{zE}^2} \\ \sin \hat{\vartheta}_E &= \frac{\hat{V}_{xE}(\hat{x}_E + R_{ox}) + \hat{V}_{yE}(\hat{y}_E + R_{oy}) + \hat{V}_{zE}(\hat{z}_E + R_{oz})}{\hat{r}_E \hat{V}_E} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (79)$$

$$\hat{r}_E = \sqrt{(\hat{x}_E + R_{ox})^2 + (\hat{y}_E + R_{oy})^2 + (\hat{z}_E + R_{oz})^2} \dots\dots\dots (80)$$

6.3.3 最大轴向过载模拟量 $\bar{n}_{x1 \max}$ 计算

最大轴向过载模拟量 $\bar{n}_{x1 \max}$ 计算公式见公式 (81) :

$$\bar{n}_{x1 \max} = \frac{\sin \hat{\vartheta}_E}{\sin \vartheta_E} \left(\frac{\hat{V}_E}{V_E} \right)^2 \dots\dots\dots (81)$$

6.3.4 驻点最大热流模拟量 $\bar{q}_{s \max}$ 和总加热量模拟量 \bar{Q}_s 计算

驻点最大热流模拟量 $\bar{q}_{s \max}$ 和总加热量模拟量 \bar{Q}_s 计算公式见公式 (82) :

$$\left. \begin{aligned} \bar{q}_{s \max} &= \left(\frac{\sin \hat{\vartheta}_E}{\sin \vartheta_E} \right)^{0.5} \left(\frac{\hat{V}_E}{V_E} \right)^{3.25} \\ \bar{Q}_s &= \left(\frac{\sin \vartheta_E}{\sin \hat{\vartheta}_E} \right)^{0.5} \left(\frac{\hat{V}_E}{V_E} \right)^{2.25} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (82)$$

6.3.5 锥面最大热流模拟量 $\bar{q}_{c \max}$ 和总加热量模拟量 \bar{Q}_c 计算

锥面最大热流模拟量 $\bar{q}_{c \max}$ 和总加热量模拟量 \bar{Q}_c 计算公式见公式 (83) :

$$\left. \begin{aligned} \bar{q}_{c \max} &= \left(\frac{\sin \hat{\vartheta}_E}{\sin \vartheta_E} \right)^{0.82} \left(\frac{\hat{V}_E}{V_E} \right)^{3.1} \\ \bar{Q}_c &= \left(\frac{\sin \vartheta_E}{\sin \hat{\vartheta}_E} \right)^{0.18} \left(\frac{\hat{V}_E}{V_E} \right)^{2.1} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (83)$$

6.4 计算说明

6.4.1 计算步骤

计算步骤如下:

- a) 利用 80km 以上高度的遥测数据 $\omega_{x_1}(t_i)$ 、 $\omega_{y_1}(t_i)$ 、 $\omega_{z_1}(t_i)$ ，用 6.1 中公式 (55)～公式 (68) 计算弹头在真空段飞行时的角运动姿态特性参数及估计再入初始攻角最大偏差值；
- b) 对 80km 以下高度的遥测数据 $\omega_{x_1}(t_i)$ 、 $\omega_{y_1}(t_i)$ 、 $\omega_{z_1}(t_i)$ 和纵向、法向、侧向过载 $n'_{x_1}(t_i)$ 、 $n'_{y_1}(t_i)$ 、 $n'_{z_1}(t_i)$ 进行平滑处理、剔除不合理数据；
- c) 把处理后的过载参数修正到弹头质心处；
- d) 用公式 (69)～公式 (71) 计算弹头轴向、法向气动力系数和攻角，并画出随飞行时间变化的曲线；
- e) 用公式 (72)～公式 (77) 计算与滚动异常有关的特性参数，并画出随时间变化的曲线；
- f) 从曲线中求出 $\lambda'=1$ 时所有参数数据，并分析滚转共振联锁时间；
- g) 从角速度曲线中求出 $\omega_{x_1}=0$ 时所有参数数据，由公式 (78) 计算滚速过零时的再入散布数据；
- h) 利用第 5 章的内容对弹头再入点参数进行估值，并由公式 (79) 和公式 (80) 计算有关再入点参数；
- i) 由公式 (81)～公式 (83) 计算再入环境模拟量。

6.4.2 其它说明

当没有实测大气参数时，可以选用飞行试验再入场区的气象统计资料代替。

7 分离弹头再入段干扰引起的落点偏差

7.1 分离方法、使用条件及基本思想

7.1.1 分离方法

应用求差法分离弹头再入段干扰引起的落点偏差。

7.1.2 使用条件

使用条件如下：

- a) 利用 N 组 30km 高度以上弹头外弹道测量数据处理后的参数： t_i 、 $V_x(t_i)$ 、 $V_y(t_i)$ 、 $V_z(t_i)$ 、 $x(t_i)$ 、 $y(t_i)$ 、 $z(t_i)$ ($i=1, 2, \dots, N$)；
- b) 在 30km 高度以上的干扰对弹头再入偏差影响不大，可以忽略不计，且将 t_i 时刻的弹道参数均作为再入点参数处理；
- c) N 组数据在时间系列中不相关或弱相关。

7.1.3 基本思想

利用 N 组外测数据作为弹头运动方程的积分初始条件，在标准条件下计算得到 N 组实测参数理论弹道及相应的实测参数理论落点。通过理论落点与实际落点相比较，得到不等精度的 N 组再入落点偏差 (ΔL_i 、 ΔH_i) 及相应的标准差 ($\sigma_{\Delta L_i}$ 、 $\sigma_{\Delta H_i}$) 数据。当满足 7.1.2 中的使用条件时，则变成独立的随机事件，进而分离出弹头再入段干扰引起的落点偏差估值及估值的标准差。

7.2 分离误差计算

7.2.1 实测参数理论弹道计算

7.2.1.1 弹头零攻角飞行弹道运动方程

弹头零攻角飞行弹道运动方程见附录 A。

7.2.1.2 弹头落点偏差计算

弹头落点偏差计算见附录 D。

7.2.2 单台站外弹道测量数据分离再入落点偏差估值及估值标准差计算

7.2.2.1 射程误差系数计算方程

射程误差系数计算方程如下：

- a) 标准弹道方程见附录 A；
- b) 共轭方程见公式 (84) ~ 公式 (86)：

$$[\dot{u}] = -[\alpha]^T [u] \dots\dots\dots (84)$$

$$[\alpha] = \begin{bmatrix} \alpha_{11} & \alpha_{12} & \alpha_{13} & \alpha_{14} & \alpha_{15} & \alpha_{16} \\ \alpha_{21} & \alpha_{22} & \alpha_{23} & \alpha_{24} & \alpha_{25} & \alpha_{26} \\ \alpha_{31} & \alpha_{32} & \alpha_{33} & \alpha_{34} & \alpha_{35} & \alpha_{36} \\ \alpha_{41} & \alpha_{42} & \alpha_{43} & \alpha_{44} & \alpha_{45} & \alpha_{46} \\ \alpha_{51} & \alpha_{52} & \alpha_{53} & \alpha_{54} & \alpha_{55} & \alpha_{56} \\ \alpha_{61} & \alpha_{62} & \alpha_{63} & \alpha_{64} & \alpha_{65} & \alpha_{66} \end{bmatrix} \dots\dots\dots (85)$$

$$[u] = \begin{bmatrix} \frac{\partial L}{\partial V_x} & \frac{\partial H}{\partial V_x} \\ \frac{\partial L}{\partial V_y} & \frac{\partial H}{\partial V_y} \\ \frac{\partial L}{\partial V_z} & \frac{\partial H}{\partial V_z} \\ \frac{\partial L}{\partial x} & \frac{\partial H}{\partial x} \\ \frac{\partial L}{\partial y} & \frac{\partial H}{\partial y} \\ \frac{\partial L}{\partial z} & \frac{\partial H}{\partial z} \end{bmatrix} \dots\dots\dots (86)$$

式中 $[\alpha]$ 按附录 B 中提供的公式进行计算。

7.2.2.2 权系数计算

权系数计算公式见公式 (87) ~ 公式 (90)：

$$\left. \begin{aligned} P_{L_i} &= \frac{1}{\sigma_{\Delta L_i}^2} \\ &= \frac{1}{\sum_{i=1}^N \sigma_{\Delta L_i}^2} \\ P_{H_i} &= \frac{1}{\sigma_{\Delta H_i}^2} \\ &= \frac{1}{\sum_{i=1}^N \sigma_{\Delta H_i}^2} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (87)$$

$$\begin{bmatrix} \sigma_{\Delta L_i}^2 & \sigma_{\Delta L_i \Delta H_i} \\ \sigma_{\Delta L_i \Delta H_i} & \sigma_{\Delta H_i}^2 \end{bmatrix} = [u(t_i)]^T [K(t_i)] [u(t_i)] \dots\dots\dots (88)$$

$$[K(t_i)] = \begin{bmatrix} \sigma_{V_x}^2(t_i) & \sigma_{V_x V_y}(t_i) & \sigma_{V_x V_z}(t_i) & \sigma_{V_x x}(t_i) & \sigma_{V_x y}(t_i) & \sigma_{V_x z}(t_i) \\ \sigma_{V_y V_x}(t_i) & \sigma_{V_y}^2(t_i) & \sigma_{V_y V_z}(t_i) & \sigma_{V_y x}(t_i) & \sigma_{V_y y}(t_i) & \sigma_{V_y z}(t_i) \\ \sigma_{V_z V_x}(t_i) & \sigma_{V_z V_y}(t_i) & \sigma_{V_z}^2(t_i) & \sigma_{V_z x}(t_i) & \sigma_{V_z y}(t_i) & \sigma_{V_z z}(t_i) \\ \sigma_{x V_x}(t_i) & \sigma_{x V_y}(t_i) & \sigma_{x V_z}(t_i) & \sigma_x^2(t_i) & \sigma_{xy}(t_i) & \sigma_{xz}(t_i) \\ \sigma_{y V_x}(t_i) & \sigma_{y V_y}(t_i) & \sigma_{y V_z}(t_i) & \sigma_{yx}(t_i) & \sigma_y^2(t_i) & \sigma_{yz}(t_i) \\ \sigma_{z V_x}(t_i) & \sigma_{z V_y}(t_i) & \sigma_{z V_z}(t_i) & \sigma_{zx}(t_i) & \sigma_{zy}(t_i) & \sigma_z^2(t_i) \end{bmatrix} \dots\dots\dots (89)$$

$$i=1, 2, \dots, N \dots\dots\dots (90)$$

公式 (87) ~ 公式 (90) 中:

N —— 分离参数的样本数。

7.2.2.3 再入落点偏差估值计算

再入落点偏差估值计算公式见公式 (91) 和公式 (92) :

$$\left. \begin{aligned} \Delta L_j &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N P_{L_i} \Delta L_i \\ \Delta H_j &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N P_{H_i} \Delta H_i \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (91)$$

$$j=1, 2, \dots, M' \dots\dots\dots (92)$$

式中:

M' —— 参加飞行试验、测量的外测台站数。

7.2.2.4 再入落点偏差估值标准差计算

再入落点偏差估值标准差计算公式见公式 (93) :

$$\left. \begin{aligned} S_{\Delta L_j} &= \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N P_{L_i} (\Delta L_i - \Delta L_j)^2} \\ S_{\Delta H_j} &= \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N P_{H_i} (\Delta H_i - \Delta H_j)^2} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (93)$$

7.2.3 多台站外测数据分离再入落点偏差综合评定计算

7.2.3.1 权系数计算

权系数计算公式见公式 (94) :

$$\left. \begin{aligned} P_{L_j} &= \frac{\frac{1}{S_{\Delta L_j}^2}}{\sum_{j=1}^{M'} \frac{1}{S_{\Delta L_j}^2}} \\ P_{H_j} &= \frac{\frac{1}{S_{\Delta H_j}^2}}{\sum_{j=1}^{M'} \frac{1}{S_{\Delta H_j}^2}} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (94)$$

7.2.3.2 再入落点偏差估值计算

再入落点偏差估值计算公式见公式 (95) ~ 公式 (96) :

$$\left. \begin{aligned} \Delta L_k &= \frac{1}{M'} \sum_{j=1}^{M'} P_{L_j} \Delta L_j \\ \Delta H_k &= \frac{1}{M'} \sum_{j=1}^{M'} P_{H_j} \Delta H_j \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (95)$$

$$k=1, 2, \dots, L' \dots\dots\dots (96)$$

式中:

L' —— 飞行试验总数。

7.2.3.3 再入落点偏差估值标准差计算

再入落点偏差估值标准差计算公式见公式 (97) :

$$\left. \begin{aligned} S_{\Delta L_k} &= \sqrt{\frac{1}{M'-1} \sum_{j=1}^{M'} P_{L_j} (\Delta L_j - \Delta L_k)^2} \\ S_{\Delta H_k} &= \sqrt{\frac{1}{M'-1} \sum_{j=1}^{M'} P_{H_j} (\Delta H_j - \Delta H_k)^2} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (97)$$

7.2.4 一批飞行试验弹头再入散布结果评定计算

7.2.4.1 弹头再入散布系统偏差估值计算

弹头再入散布系统偏差估值计算公式见公式 (98) :

$$\left. \begin{aligned} \Delta \bar{L} &= \frac{1}{L'} \sum_{k=1}^{L'} \Delta L_k \\ \Delta \bar{H} &= \frac{1}{L'} \sum_{k=1}^{L'} \Delta H_k \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (98)$$

7.2.4.2 弹头再入散布随机偏差标准差计算

弹头再入散布随机偏差标准差计算公式见公式 (99) :

$$\left. \begin{aligned} S_{\Delta \bar{L}} &= \sqrt{\frac{1}{L'-1} \sum_{k=1}^{L'} (\Delta L_k - \Delta \bar{L})^2} \\ S_{\Delta \bar{H}} &= \sqrt{\frac{1}{L'-1} \sum_{k=1}^{L'} (\Delta H_k - \Delta \bar{H})^2} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (99)$$

7.2.4.3 弹头再入散布最大范围估算

弹头再入散布最小值估值计算公式见公式 (100) ~ 公式 (102), 弹头再入散布最大值估值计算公式见公式 (103) :

$$\left. \begin{aligned} \Delta L_{\min} &= \Delta \bar{L} - 3\hat{\sigma}_{\Delta L} \\ \Delta H_{\min} &= \Delta \bar{H} - 3\hat{\sigma}_{\Delta H} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (100)$$

$$\left. \begin{aligned} \hat{\sigma}_{\Delta L}^2 &= \frac{\sum_{k=1}^{L'} (\Delta L_k - \Delta \bar{L})^2}{\chi_{\alpha}^2(v)} \\ \hat{\sigma}_{\Delta H}^2 &= \frac{\sum_{k=1}^{L'} (\Delta H_k - \Delta \bar{H})^2}{\chi_{\alpha}^2(v)} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (101)$$

$$v = L' - 1 \dots\dots\dots (102)$$

$$\left. \begin{aligned} \Delta L_{\max} &= \Delta \bar{L} + 3\hat{\sigma}_{\Delta L} \\ \Delta H_{\max} &= \Delta \bar{H} + 3\hat{\sigma}_{\Delta H} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (103)$$

公式 (100) ~ 公式 (103) 中:

α —— 为给定的置信水平;

$\chi_{\alpha}^2(v)$ —— 为 χ^2 分布的下侧分位数, 可根据 α 、 v 由 GB/T 4086.2 查出。

7.3 分离误差计算初始条件

7.3.1 实测参数理论弹道计算初始参数

取试验基地提供的 30km 高度以上外弹道测量数据处理结果中下列采样点参数:

- a) 弹头飞行时间;
- b) 弹头飞行速度矢量在发射坐标系各轴的投影分量;
- c) 弹头质心位置在发射坐标系的分量。

7.3.2 确定共轭方程边界条件的原始数据

取弹头飞行试验时精确弹道落地时的飞行时间、坐标分量、当地弹道倾角等参数数据。

7.3.3 计算权系数使用的原始数据

取试验基地提供的外测数据协方差矩阵。

7.4 计算说明

7.4.1 计算步骤

计算步骤如下:

- a) 利用附录 D 中公式 (D.1) ~ 公式 (D.26), 计算弹头飞行试验后的射击偏差 L_o 和 H_o ;
- b) 把 7.3.1 中 a)、b)、c) 作为初始条件, 通过附录 A、附录 D 计算实测参数理论弹道及再入段落点偏差 ΔL_i 、 ΔH_i ;
- c) 用公式 (104) ~ 公式 (105) 判断 ΔL_i 、 ΔH_i 是否作为样本参加再入落点偏差分离;

$$|t_{C_i} - t_C| < \varepsilon \dots\dots\dots (104)$$

$$\varepsilon = \sqrt{\sum_{j=1}^{N_j} (t_{C_j} - t_{C_o})^2} \dots\dots\dots (105)$$

公式 (104) ~ 公式 (105) 中:

- t_{C_i} ——为实测参数理论弹道总飞行时间, 单位为秒 (s);
- t_C ——弹头实际总飞行时间, 单位为秒 (s);
- N_j ——为干扰种类;
- t_{C_j} ——为第 j 种理论干扰弹道计算的最大总飞行时间, 单位为秒 (s);
- t_{C_o} ——为飞行试验理论精确弹道总飞行时间, 单位为秒 (s)。

- d) 由 7.3.3 中原始数据, 利用求差法计算纵、横向偏差偏导数得到共轭方程的边界条件, 即 t_C 时刻的 $[u(t_C)]$;
- e) 通过 7.2.2.1 计算射程误差系数;
- f) 由 7.2.2.2 中的公式计算 P_{L_i} 、 P_{H_i} ;
- g) 由 7.2.2.3 和 7.2.2.4 中的公式计算 ΔL_j 、 ΔH_j 及 $S_{\Delta L_j}$ 、 $S_{\Delta H_j}$;
- h) 重复上述步骤 a) ~ g), 计算另一外测台站数据, 分离再入落点偏差;
- i) 利用 7.2.3 中的公式进行多台站的综合分离, 得到 ΔL_k 、 ΔH_k 及 $S_{\Delta L_k}$ 、 $S_{\Delta H_k}$;
- j) 重复上述 a) ~ i) 步骤, 计算下一发弹头飞行试验的再入落点偏差分离结果;
- k) 将各发飞行试验弹头再入落点偏差分离结果折合至同一母体;
- l) 利用 7.2.4 中公式, 计算一批飞行试验弹头再入散布系统偏差 $\Delta \bar{L}$ 、 $\Delta \bar{H}$ 、 $S_{\Delta \bar{L}}$ 、 $S_{\Delta \bar{H}}$ 、 ΔL_{\max} 、 ΔH_{\max} 。

7.4.2 其它说明

其它说明如下:

- a) 大气层起始高度一般取 80km;
- b) 当靶场飞行试验测量数据测量结果无协方差数据时, 则认为权系数均为 1, 即:

$$\left. \begin{array}{l} P_{L_i} = 1 \\ P_{H_i} = 1 \end{array} \right\} \dots\dots\dots (106)$$

8 子母弹头落点分布参数确定

8.1 子弹落点分布参数分析评定前的数据准备

8.1.1 数据统计特性（正态性）检验

在分析评定前，当有充分理论依据或根据以往积累信息可确认总体样本数据为正态分布时，则不必进行正态性检验。如果怀疑总体样本数据分布的正态性，那么就需进行正态性检验。常用的统计特性（正态性）检验方法有：

- a) 无方向的 W 检验（SHAPIRO—WILK 检验）（ $3 \leq n \leq 50$ ）；
- b) 无方向的 D 检验（D' AGOSTINO 检验）（ $50 < n \leq 1000$ ）；
- c) 有方向的偏度检验（ $8 \leq n \leq 5000$ ）；
- d) 有方向的峰度检验（ $7 \leq n \leq 5000$ ）；
- e) 偏度和峰度多方向的联合检验（ $20 \leq n \leq 1000$ ）。

各种正态性检验的计算公式和统计常用数表见 GB/T 4882。

8.1.2 子弹落点数据异常检验

8.1.2.1 总则

在分析评定前，常用工程检验法和统计检验法对所获取的子弹落点数据异常子样加以剔除。

8.1.2.2 工程检验法

剔除异常数据的工程检验法步骤如下：

- a) 对子母弹头飞行试验后获取的各子弹落点相对某一参考坐标系的坐标数据 $(X_1, Y_1), (X_2, Y_2), \dots, (X_i, Y_i), \dots, (X_N, Y_N)$ ，用公式（107）求出子弹落点概略分布中心坐标 (X_0, Y_0) ；

$$\left. \begin{array}{l} X_0 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_i \\ Y_0 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N Y_i \end{array} \right\} \dots\dots\dots (107)$$

- b) 用公式（108）计算各子弹落点相对概略分布中心的距离 R_i ：

$$R_i = \sqrt{(X_i - X_0)^2 + (Y_i - Y_0)^2} \dots\dots\dots (108)$$

- c) 选定某一筛选边界值 R_0 ，当满足不等式（109）时，则认为子样为异常值，应予以剔除；循环上述步骤 a) ~ c)，直至判断“没有异常值”，或有效子弹数达到规定的下限值为止。未被剔除的子弹参加子弹落点分布参数的评定：

$$R_i \geq R_0 \dots\dots\dots (109)$$

- d) R_0 的大小通常可根据子弹落点分布抛撒半径的误差及子弹的落点精度加以确定。

8.1.2.3 统计检验法

各种异常数据统计检验法的计算公式和统计常用数表见 GB/T 4883。常用方法有：

- a) 当已知标准差的条件下，则可用奈尔（Nair）检验法判断测量数据有没有异常值，并对正态样本异常值进行判断和处理；
- b) 当标准方差未知的条件下，可用统计学中的格拉布斯（Grubbs）、荻克荪（Dixon）及偏度—

峰度检验法，对正态样本异常值进行判断和处理。

8.1.2.4 异常子样数据剔除原则

为了保证工程检验方法和统计检验方法剔除异常子弹子样的合理性，减少犯错误的概率，用上述两种方法检测出子弹落点数据为异常时，还要开展下列物理分析工作：

- a) 如果找到影响异常子样的因素并且排除此因素，则可将异常子弹子样剔除；
- b) 如果找到故障原因，并能进行修正，则可用修正后的数据作为正常样本数据。

8.2 子弹落点分布中心的确定

取所有用工程检验法或统计检验法检测通过并且合格的子弹落点坐标数据 (X_1, Y_1) , (X_2, Y_2) , ..., (X_i, Y_i) , ..., (X_{N-K}, Y_{N-K}) ，用公式 (110) 求出子弹落点分布中心坐标：

$$\left. \begin{aligned} X_0 &= \frac{1}{N-K} \sum_{i=1}^{N-K} X_i \\ Y_0 &= \frac{1}{N-K} \sum_{i=1}^{N-K} Y_i \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (110)$$

式中：

- N ——找到的子弹总个数；
- K ——通过检验后剔除的异常子弹个数。

8.3 子弹飞行成功率计算

子弹总数 n 与未找到的子弹数、故障子弹数、野弹（落点异常子弹）数之差即为飞行有效子弹数 $N_{有效}$ 。子弹飞行成功率 p 按公式 (111) 计算：

$$p = \frac{N_{有效}}{n} \times 100\% \dots\dots\dots (111)$$

8.4 子弹抛撒半径计算

通常，用如下两种方法计算子弹的抛撒半径 R_p ：

方法一：

- a) 确定子弹分布中心后，计算每枚子弹落点相对分布中心的纵向、横向偏差 ΔL_j 、 ΔH_j ，以及至分布中心的距离 d_j ($j=1, 2, \dots, N_{有效}$)；
- b) 将 d_j ($j=1, 2, \dots, N_{有效}$) 按由小到大升序排列，形成新的距离系列 R_i ($i=1, 2, \dots, N_{有效}$)；
- c) 记 $k = [N_{有效} \times P_k]$ ，则子弹抛撒半径 $R_p = R_k$ （试验条件下， P_k 的取值根据子弹的结构排布形式由具体文件规定）。

方法二：

- a) 根据每枚子弹落点相对分布中心的纵向、横向偏差 ΔL_j 、 ΔH_j ，按公式 (112) 计算子弹落点分布的均方差 (σ_L , σ_H)；

$$\left. \begin{aligned} \sigma_L &= \sqrt{\frac{1}{N_{有效}-1} \sum_{j=1}^{N_{有效}} (\Delta L_j)^2} \\ \sigma_H &= \sqrt{\frac{1}{N_{有效}-1} \sum_{j=1}^{N_{有效}} (\Delta H_j)^2} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (112)$$

- b) 用公式 (113) 计算子弹落点分布的圆概率偏差 CEP ；

$$CEP = 0.562 \times \text{Max}(\sigma_L, \sigma_H) + 0.615 \times \text{Min}(\sigma_L, \sigma_H) \dots\dots\dots (113)$$

c) 子弹落点分布最大距离 (出现的概率 99.74%) 即为抛撒半径。抛撒半径 R_p 按公式 (114) 计算。

$$R_p = 2.29 CEP \dots\dots\dots (114)$$

8.5 子弹落点分布均匀性

8.5.1 径向区域划分

将有效子弹落点到子弹落点分布中心的距离由小到大升序排列, 形成 $d_1 < d_2 < \dots < d_{n_{\text{有效}}}$ 的距离序列。取 $A = N_A$ 、 $B = N_{\text{有效}} - (N_A - 1)$, N_A 为自子弹分布中心起算、作为径向分布区域下界的子弹序号。 A 、 B 子弹落点到子弹分布中心的距离分别为半径 R_A 、 R_B 。通常将 R_A 、 R_B 之间的圆环区域按距离或面积等分的原则划分为 n' 个区域。 $n' = 3$ 时, 如图 2 所示, 划分方法如下:

a) 将 $(R_B - R_A)$ 按径向距离划分成三等份, 得到 R_1 和 R_2 , 见公式 (115):

$$\left. \begin{aligned} R_1 &= \frac{2R_A + R_B}{3} \\ R_2 &= \frac{2R_B + R_A}{3} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (115)$$

b) 将 $(R_B - R_A)$ 之间的圆环按等面积划分为三等份, 得到 R_1 和 R_2 , 见公式 (116):

$$\left. \begin{aligned} R_1 &= \sqrt{\frac{2R_A^2 + R_B^2}{2}} \\ R_2 &= \sqrt{\frac{2R_B^2 + R_A^2}{3}} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (116)$$

$n' = 3$ 时, 子弹落点分布径向各区域划分如下:

- 1) 径向第 1 区域: 以分布中心为圆心, $R \leq R_1$ 的圆区域;
- 2) 径向第 2 区域: 以分布中心为圆心, $R_1 < R \leq R_2$ 的圆环区域;
- 3) 径向第 3 区域: 以分布中心为圆心, $R_2 < R$ 的圆环区域。

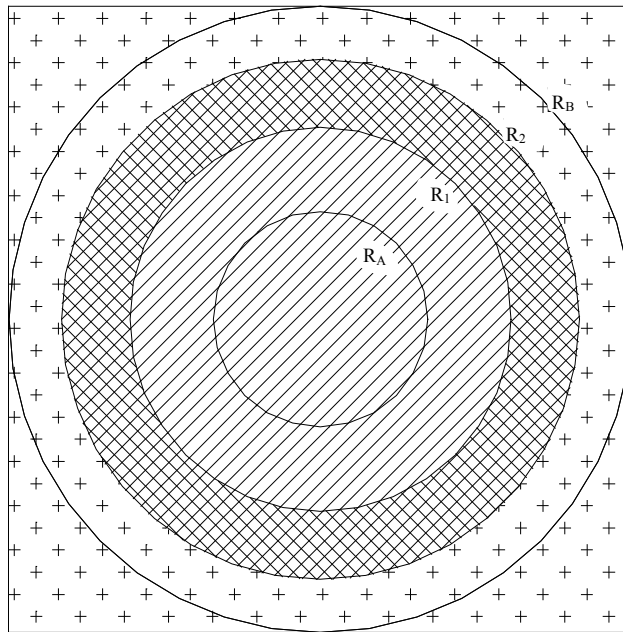


图 2 沿径向方向的区域划分示意图

8.5.2 周向区域划分

以子弹分布中心为圆心,以高斯北或射向为起始线,每 $360^\circ / n'$ 为一份,将子弹分布平面划分成 n' 等分的周向扇形区域。 $n' = 6$ 时,周向扇形区域划分如图3所示:

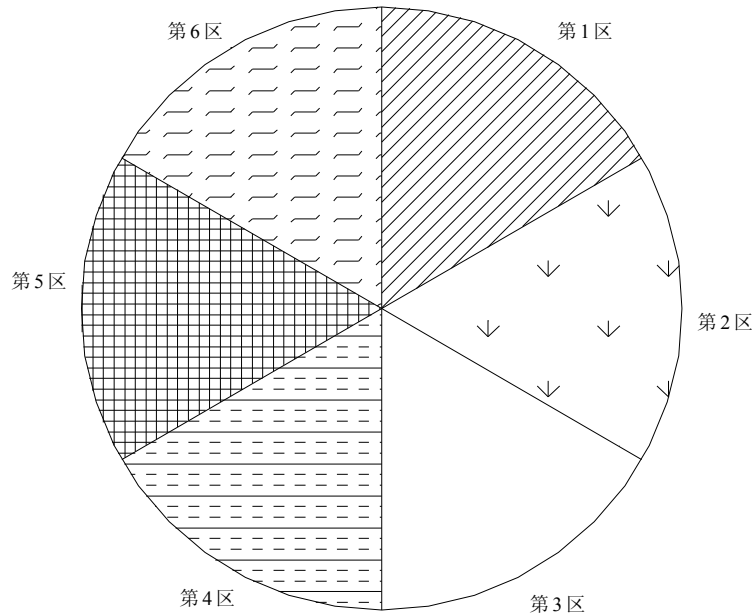


图3 沿周向方向的区域划分示意图

8.5.3 子弹分布均匀性计算

子弹分布均匀性计算步骤如下:

- a) 根据子弹分布径向、周向划分区域,确定落入各区域的有效子弹个数;
- b) 当给定了各区域最低可接受的子弹个数要求时,实际落入该区域的子弹数不小于最低可接受的子弹个数,则该区域子弹分布均匀;
- c) 当未给定各区域最低可接受的子弹个数要求时,按皮尔逊— χ^2 检验方法分别判断径向、周向区域子弹分布均匀性。

按公式(117)计算皮尔逊统计量 χ^2 :

$$\chi^2 = \frac{1}{\bar{n}} \sum_{i=1}^{K_{\text{区域}}} (n_i - \bar{n})^2 \dots\dots\dots (117)$$

式中:

\bar{n} ——为落入径向、周向各区域的平均有效子弹个数,即 $\bar{n} = \frac{N_{\text{有效}}}{K_{\text{区域}}}$;

$K_{\text{区域}}$ ——为划分的径向、周向区域个数;

n_i ——为落入径向、周向各区域的有效子弹个数。

给定显著性水平 α ,查 χ^2 分布表,得到 $\chi_\alpha^2 (K_{\text{区域}} - 1)$ 。当皮尔逊统计量 $\chi^2 \leq \chi_\alpha^2 (K_{\text{区域}} - 1)$ 时,则所检验的(径向或周向)区域子弹分布均匀。

附录 A

(规范性附录)

弹头零攻角飞行弹道计算方程

A.1 弹头运动微分方程

弹头运动微分方程见公式 (A.1) 和公式 (A.2) :

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_x \\ \dot{V}_y \\ \dot{V}_z \end{bmatrix} = -\frac{X}{mV} \begin{bmatrix} V_x \\ V_y \\ V_z \end{bmatrix} + \frac{\bar{g}_r}{r} \begin{bmatrix} x + R_{ox} \\ y + R_{oy} \\ z + R_{oz} \end{bmatrix} + g_\omega \begin{bmatrix} \bar{\omega}_{ex} \\ \bar{\omega}_{ey} \\ \bar{\omega}_{ez} \end{bmatrix}$$

$$- \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x + R_{ox} \\ y + R_{oy} \\ z + R_{oz} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & b_{13} \\ b_{21} & b_{22} & b_{23} \\ b_{31} & b_{32} & b_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_x \\ V_y \\ V_z \end{bmatrix} \dots\dots\dots (A.1)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_x \\ V_y \\ V_z \end{bmatrix} \dots\dots\dots (A.2)$$

A.2 有关常量计算方程

有关常量计算方程见公式 (A.3) ~ 公式 (A.10) :

$$\begin{bmatrix} \bar{\omega}_{ex} \\ \bar{\omega}_{ey} \\ \bar{\omega}_{ez} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos A_o & 0 & \sin A_o \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin A_o & 0 & \cos A_o \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos B_o \\ \sin B_o \\ 0 \end{bmatrix} \dots\dots\dots (A.3)$$

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \omega_{ex} \\ \omega_{ey} \\ \omega_{ez} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_{ex} & \omega_{ey} & \omega_{ez} \end{bmatrix} - \omega_e^2 \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \dots\dots\dots (A.4)$$

$$\begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & b_{13} \\ b_{21} & b_{22} & b_{23} \\ b_{31} & b_{32} & b_{33} \end{bmatrix} = 2 \begin{bmatrix} 0 & -\omega_{ez} & \omega_{ey} \\ \omega_{ez} & 0 & \omega_{ex} \\ -\omega_{ey} & \omega_{ex} & 0 \end{bmatrix} \dots\dots\dots (A.5)$$

$$\begin{bmatrix} \omega_{ex} \\ \omega_{ey} \\ \omega_{ez} \end{bmatrix} = \omega_e \begin{bmatrix} \bar{\omega}_{ex} \\ \bar{\omega}_{ey} \\ \bar{\omega}_{ez} \end{bmatrix} \dots\dots\dots (A.6)$$

$$\begin{bmatrix} R_{ox} \\ R_{oy} \\ R_{oz} \end{bmatrix} = R_o \begin{bmatrix} \cos A_o & 0 & \sin A_o \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin A_o & 0 & \cos A_o \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -\sin \mu_o \\ \cos \mu_o \\ 0 \end{bmatrix} \dots\dots\dots (A.7)$$

$$tg \phi_o = (1 - e^2) tg B_o \dots\dots\dots (A.8)$$

$$\mu_o = B_o - \phi_o \dots\dots\dots (A.9)$$

$$R_o = \frac{a_e b_e}{\sqrt{a_e^2 \sin^2 \phi_o + b_e^2 \cos^2 \phi_o}} + h_o \dots\dots\dots (A.10)$$

A.3 有关参数计算

有关参数计算公式见公式 (A.11) ~ 公式 (A.32) :

$$r = \sqrt{(x + R_{ox})^2 + (y + R_{oy})^2 + (z + R_{oz})^2} \dots\dots\dots (A.11)$$

$$\sin \phi = \frac{(x + R_{ox})\bar{\omega}_{ex} + (y + R_{oy})\bar{\omega}_{ey} + (z + R_{oz})\bar{\omega}_{ez}}{r} \dots\dots\dots (A.12)$$

$$R = \frac{a_e b_e}{\sqrt{a_e^2 \sin^2 \phi + b_e^2 \cos^2 \phi}} \dots\dots\dots (A.13)$$

$$h = r - R \dots\dots\dots (A.14)$$

$$tgB = \frac{tg\phi}{1 - e^2} \dots\dots\dots (A.15)$$

$$tg\Delta\lambda = \frac{x \sin A_o + z \cos A_o}{-x \cos A_o \sin B_o + y \cos B_o + z \sin A_o \sin B_o + R_o \cos \phi_o} \dots\dots\dots (A.16)$$

$$\cos \Delta\lambda = -\frac{\sin \phi_o \sin \phi - \cos f}{\cos \phi_o \cos \phi} \dots\dots\dots (A.17)$$

$$\lambda = \lambda_o + \Delta\lambda \dots\dots\dots (A.18)$$

$$\cos f = \frac{(x + R_{ox})R_{ox} + (y + R_{oy})R_{oy} + (z + R_{oz})R_{oz}}{rR_o} \dots\dots\dots (A.19)$$

$$V = \sqrt{V_x^2 + V_y^2 + V_z^2} \dots\dots\dots (A.20)$$

$$\sin \vartheta = \frac{(x + R_{ox})V_x + (y + R_{oy})V_y + (z + R_{oz})V_z}{rV} \dots\dots\dots (A.21)$$

$$g'_r = -\frac{GM}{r^2} - \frac{\mu}{r^4} (1 - 5 \sin^2 \phi) \dots\dots\dots (A.22)$$

$$g_{\omega_e} = -\frac{2\mu}{r^4} \sin \phi \dots\dots\dots (A.23)$$

$$H' = \frac{6356.766h}{6356766 + h} \dots\dots\dots (A.24)$$

$$T = T_b + L_b (H' - H_b) \dots\dots\dots (A.25)$$

$$P = \begin{cases} P_b \left(\frac{T_b}{T}\right)^{\frac{34.1631947}{L_b}} & L_b \neq 0 \\ P_b \exp\left[-\frac{34.1631947(H' - H_b)}{T_b}\right] & L_b = 0 \end{cases} \dots\dots\dots (A.26)$$

$$\rho = \frac{P}{287.05287T} \dots\dots\dots (A.27)$$

$$a = 20.0468\sqrt{T} \dots\dots\dots (A.28)$$

$$X = C_D q S_m \dots\dots\dots (A.29)$$

$$M = \frac{V}{a} \dots\dots\dots (A.30)$$

$$q = \frac{1}{2} \rho V^2 \dots\dots\dots (A.31)$$

$$C_D = C_D (M, h) \dots\dots\dots (A.32)$$

A.4 弹道计算说明

弹道计算说明主要有：

a) 上述计算公式中， ϕ_0 、 ϕ 、 B 、 f 、 θ 角参数根据三角函数值取主值区间值， $\Delta\lambda$ 角参数根据两个三角函数值符号判断象限；

b) 当高度 h 大于 80000m 时，取：

$$T=198.639$$

$$P=0$$

$$\rho=0$$

$$a=282.54$$

c) C_D 根据 $C_D(M, h)$ 数表进行二元插值。

附录 B
(规范性附录)
摄动方程系数矩阵计算

摄动方程系数矩阵计算公式见公式 (B.1) ~ 公式 (B.12) :

$$\begin{bmatrix} \alpha_{11} & \alpha_{12} & \alpha_{13} \\ \alpha_{21} & \alpha_{22} & \alpha_{23} \\ \alpha_{31} & \alpha_{32} & \alpha_{33} \end{bmatrix} = -\frac{X}{mV} \left\{ \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} - \frac{N_1}{V^2} \begin{bmatrix} V_x \\ V_y \\ V_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_x & V_y & V_z \end{bmatrix} \right\} \\ + \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & b_{13} \\ b_{21} & b_{22} & b_{23} \\ b_{31} & b_{32} & b_{33} \end{bmatrix} \dots\dots\dots (B.1)$$

$$\begin{bmatrix} \alpha_{14} & \alpha_{15} & \alpha_{16} \\ \alpha_{24} & \alpha_{25} & \alpha_{26} \\ \alpha_{34} & \alpha_{35} & \alpha_{36} \end{bmatrix} = -\frac{X}{mV} N_2 \begin{bmatrix} V_x \\ V_y \\ V_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial h}{\partial x} & \frac{\partial h}{\partial y} & \frac{\partial h}{\partial z} \end{bmatrix} \\ - \frac{g'_r}{r^3} \left\{ r^2 \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} x + R_{ox} \\ y + R_{oy} \\ z + R_{oz} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x + R_{ox} & y + R_{oy} & z + R_{oz} \end{bmatrix} \right\} \\ - \frac{1}{r} \begin{bmatrix} x + R_{ox} \\ y + R_{oy} \\ z + R_{oz} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial g'_r}{\partial x} & \frac{\partial g'_r}{\partial y} & \frac{\partial g'_r}{\partial z} \end{bmatrix} \\ - \begin{bmatrix} \bar{\omega}_{ex} \\ \bar{\omega}_{ey} \\ \bar{\omega}_{ez} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial g_{\omega}}{\partial x} & \frac{\partial g_{\omega}}{\partial y} & \frac{\partial g_{\omega}}{\partial z} \end{bmatrix} \\ + \begin{bmatrix} \alpha_{11} & \alpha_{12} & \alpha_{13} \\ \alpha_{21} & \alpha_{22} & \alpha_{23} \\ \alpha_{31} & \alpha_{32} & \alpha_{33} \end{bmatrix} \dots\dots\dots (B.2)$$

$$\begin{bmatrix} \alpha_{41} & \alpha_{42} & \alpha_{43} & \alpha_{44} & \alpha_{45} & \alpha_{46} \\ \alpha_{51} & \alpha_{52} & \alpha_{53} & \alpha_{54} & \alpha_{55} & \alpha_{56} \\ \alpha_{61} & \alpha_{62} & \alpha_{63} & \alpha_{64} & \alpha_{65} & \alpha_{66} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \dots\dots\dots (B.3)$$

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial h}{\partial x} \\ \frac{\partial h}{\partial y} \\ \frac{\partial h}{\partial z} \end{bmatrix} = \frac{1}{r} \begin{bmatrix} x + R_{ox} \\ y + R_{oy} \\ z + R_{oz} \end{bmatrix} - \frac{R^3 \sin \phi (a_e^2 - b_e^2)}{a_e^2 b_e^2 r} \left\{ \begin{bmatrix} \bar{\omega}_{ex} \\ \bar{\omega}_{ey} \\ \bar{\omega}_{ez} \end{bmatrix} - \frac{\sin \phi}{r} \begin{bmatrix} x + R_{ox} \\ y + R_{oy} \\ z + R_{oz} \end{bmatrix} \right\} \dots\dots\dots (B.4)$$

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial g'_r}{\partial x} \\ \frac{\partial g'_r}{\partial y} \\ \frac{\partial g'_r}{\partial z} \end{bmatrix} = \frac{1}{r^2} \left(\frac{2GM}{r^2} - 4g'_r \right) \begin{bmatrix} x + R_{ox} \\ y + R_{oy} \\ z + R_{oz} \end{bmatrix} - \frac{5g_\omega}{r} \left\{ \begin{bmatrix} \omega_{ex} \\ \omega_{ey} \\ \omega_{ez} \end{bmatrix} - \frac{\sin \phi}{r} \begin{bmatrix} x + R_{ox} \\ y + R_{oy} \\ z + R_{oz} \end{bmatrix} \right\} \dots\dots\dots (B.5)$$

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial g_\omega}{\partial x} \\ \frac{\partial g_\omega}{\partial y} \\ \frac{\partial g_\omega}{\partial z} \end{bmatrix} = -\frac{4g_\omega}{r^2} \begin{bmatrix} x + R_{ox} \\ y + R_{oy} \\ z + R_{oz} \end{bmatrix} - \frac{2\mu}{r^5} \left\{ \begin{bmatrix} \bar{\omega}_{ex} \\ \bar{\omega}_{ey} \\ \bar{\omega}_{ez} \end{bmatrix} - \frac{\sin \phi}{r} \begin{bmatrix} x + R_{ox} \\ y + R_{oy} \\ z + R_{oz} \end{bmatrix} \right\} \dots\dots\dots (B.6)$$

$$N_1 = \begin{cases} 0 & \rho = 0 \\ 2 + \frac{M}{C_D} \frac{\partial C_D}{\partial M} & \rho \neq 0 \end{cases} \dots\dots\dots (B.7)$$

$$N_2 = \begin{cases} 0 & \rho = 0 \\ \frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial h} + \frac{1}{C_D} \left(\frac{\partial C_D}{\partial h} - \frac{M^2}{\partial V} \frac{\partial C_D}{\partial M} \frac{\partial a}{\partial h} \right) & \rho \neq 0 \end{cases} \dots\dots\dots (B.8)$$

$$\frac{\partial a}{\partial h} = \begin{cases} 0 & \rho = 0 \\ \frac{a}{2T} L_b \frac{\partial H'}{\partial h} & \rho \neq 0 \end{cases} \dots\dots\dots (B.9)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial h} = \begin{cases} 0 & \rho = 0 \\ \frac{\rho}{P} \frac{\partial P}{\partial h} - \frac{\rho L_b}{T} \frac{\partial H'}{\partial h} & \rho \neq 0 \end{cases} \dots\dots\dots (B.10)$$

$$\frac{\partial P}{\partial h} = \begin{cases} 0 & \rho = 0 \\ -34.1631947 \frac{\rho}{P} \frac{\partial H'}{\partial h} & \rho \neq 0, L_b \neq 0 \\ -34.1631947 \frac{P}{T_b} \frac{\partial H'}{\partial h} & \rho \neq 0, L_b = 0 \end{cases} \dots\dots\dots (B.11)$$

$$\frac{\partial H'}{\partial h} = \begin{cases} 0 & \rho = 0 \\ \frac{6356766H'}{(6356766 + h)h} & \rho \neq 0 \end{cases} \dots\dots\dots (B.12)$$

$\frac{\partial C_D}{\partial M}$ 、 $\frac{\partial C_D}{\partial h}$ 由零攻角气动阻力系数进行数值微分。

附录 C

(规范性附录)

发射坐标系向雷达坐标系的参数换算

发射坐标系向雷达测量坐标系的参数换算公式见公式 (C.1) ~ 公式 (C.11) :

$$\begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \end{bmatrix} = [A] \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} + [B] \begin{bmatrix} 0 \\ R_o \\ 0 \end{bmatrix} - [C] \begin{bmatrix} 0 \\ R_{io} \\ 0 \end{bmatrix} \dots\dots\dots (C.1)$$

$$\left. \begin{aligned} R_i &= \sqrt{x_i^2 + y_i^2 + z_i^2} \\ \text{tg} E_i &= \frac{y_i}{\sqrt{x_i^2 + z_i^2}} \\ \sin A_i &= \frac{z_i}{\sqrt{x_i^2 + z_i^2}} \\ \cos A_i &= \frac{x_i}{\sqrt{x_i^2 + z_i^2}} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (C.2)$$

$$[S'(t_k)] = \begin{bmatrix} \frac{\partial R_i}{\partial x_i} & \frac{\partial R_i}{\partial y_i} & \frac{\partial R_i}{\partial z_i} \\ \frac{\partial E_i}{\partial x_i} & \frac{\partial E_i}{\partial y_i} & \frac{\partial E_i}{\partial z_i} \\ \frac{\partial A_i}{\partial x_i} & \frac{\partial A_i}{\partial y_i} & \frac{\partial A_i}{\partial z_i} \end{bmatrix} [A] \begin{bmatrix} \frac{\partial x}{\partial V_{x_k}} & \frac{\partial x}{\partial V_{y_k}} & \frac{\partial x}{\partial V_{z_k}} & \frac{\partial x}{\partial x_k} & \frac{\partial x}{\partial y_k} & \frac{\partial x}{\partial z_k} \\ \frac{\partial y}{\partial V_{x_k}} & \frac{\partial y}{\partial V_{y_k}} & \frac{\partial y}{\partial V_{z_k}} & \frac{\partial y}{\partial x_k} & \frac{\partial y}{\partial y_k} & \frac{\partial y}{\partial z_k} \\ \frac{\partial z}{\partial V_{x_k}} & \frac{\partial z}{\partial V_{y_k}} & \frac{\partial z}{\partial V_{z_k}} & \frac{\partial z}{\partial x_k} & \frac{\partial z}{\partial y_k} & \frac{\partial z}{\partial z_k} \end{bmatrix} \dots\dots\dots (C.3)$$

$$[A] = \begin{bmatrix} \sin B_i & \cos B_i & 0 \\ -\cos B_i & \sin B_i & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \Delta\lambda_i & 0 & -\sin \Delta\lambda_i \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \Delta\lambda_i & 0 & \cos \Delta\lambda_i \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \sin B_o & -\cos B_o & 0 \\ \cos B_o & \sin B_o & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos A_o & 0 & -\sin A_o \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin A_o & 0 & \cos A_o \end{bmatrix} \dots\dots\dots (C.4)$$

$$[B] = \begin{bmatrix} \sin B_i & \cos B_i & 0 \\ -\cos B_i & \sin B_i & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \Delta\lambda_i & 0 & -\sin \Delta\lambda_i \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \Delta\lambda_i & 0 & \cos \Delta\lambda_i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sin \phi_o & -\cos \phi_o & 0 \\ \cos \phi_o & \sin \phi_o & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \dots\dots\dots (C.5)$$

$$[C] = \begin{bmatrix} \cos \mu_i & -\sin \mu_i & 0 \\ \sin \mu_i & \cos \mu_i & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \dots\dots\dots (C.6)$$

$$\left. \begin{aligned} \operatorname{tg} \phi_i &= (1-e^2) \operatorname{tg} B_i \\ \mu_i &= B_i - \phi_i \\ \Delta \lambda_i &= \lambda_i - \lambda_0 \\ R_{i0} &= \frac{a_e b_e}{\sqrt{a_e^2 \sin^2 \phi_i + b_e^2 \cos^2 \phi_i}} + h_i \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (C.7)$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial R_i}{\partial x_i} &= \frac{x_i}{R_i} \\ \frac{\partial R_i}{\partial y_i} &= \frac{y_i}{R_i} \\ \frac{\partial R_i}{\partial z_i} &= \frac{z_i}{R_i} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (C.8)$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial E_i}{\partial x_i} &= -\frac{x_i y_i}{R_i^2 \sqrt{x_i^2 + z_i^2}} \\ \frac{\partial E_i}{\partial y_i} &= \frac{\sqrt{x_i^2 + z_i^2}}{R_i^2} \\ \frac{\partial E_i}{\partial z_i} &= -\frac{y_i z_i}{R_i^2 \sqrt{x_i^2 + z_i^2}} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (C.9)$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial A_i}{\partial x_i} &= -\frac{z_i}{x_i^2 + z_i^2} \\ \frac{\partial A_i}{\partial y_i} &= 0 \\ \frac{\partial A_i}{\partial z_i} &= \frac{x_i}{x_i^2 + z_i^2} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (C.10)$$

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial x}{\partial V_{x_k}} & \frac{\partial x}{\partial V_{y_k}} & \frac{\partial x}{\partial V_{z_k}} & \frac{\partial x}{\partial x_k} & \frac{\partial x}{\partial y_k} & \frac{\partial x}{\partial z_k} \\ \frac{\partial y}{\partial V_{x_k}} & \frac{\partial y}{\partial V_{y_k}} & \frac{\partial y}{\partial V_{z_k}} & \frac{\partial y}{\partial x_k} & \frac{\partial y}{\partial y_k} & \frac{\partial y}{\partial z_k} \\ \frac{\partial z}{\partial V_{x_k}} & \frac{\partial z}{\partial V_{y_k}} & \frac{\partial z}{\partial V_{z_k}} & \frac{\partial z}{\partial x_k} & \frac{\partial z}{\partial y_k} & \frac{\partial z}{\partial z_k} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \lambda_{41} & \lambda_{42} & \lambda_{43} & \lambda_{44} & \lambda_{45} & \lambda_{46} \\ \lambda_{51} & \lambda_{52} & \lambda_{53} & \lambda_{54} & \lambda_{55} & \lambda_{56} \\ \lambda_{61} & \lambda_{62} & \lambda_{63} & \lambda_{64} & \lambda_{65} & \lambda_{66} \end{bmatrix} \dots\dots\dots (C.11)$$

附录 D
(规范性附录)
再入段落点偏差计算

D.1 发射点 (O) 到落点 (C) 大地线长度及大地线方位角计算

发射点 (O) 到落点 (C) 大地线长度及大地线方位角计算公式见公式 (D.1) ~ 公式 (D.4) :

$$tgu_o = \sqrt{1-e^2} tgB_o \dots\dots\dots (D.1)$$

$$tgu_c = \sqrt{1-e^2} tgB_c \dots\dots\dots (D.2)$$

$$\omega^{(1)} = \lambda_c - \lambda_o \dots\dots\dots (D.3)$$

$$\Delta\omega^{(0)} = 0 \dots\dots\dots (D.4)$$

用迭代方法按公式 (D.5) ~ 公式 (D.16) 求下列参数:

$$\cos \sigma^{(1)} = \sin u_o \sin u_c + \cos u_o \cos u_c \cos \omega^{(1)} \dots\dots\dots (D.5)$$

$$\sin A_{12}^{(1)} = \frac{\sin \omega^{(1)} \cos u_c}{\sin \sigma^{(1)}} \dots\dots\dots (D.6)$$

$$\cos A_{12}^{(1)} = \frac{\sin u_c - \cos \sigma^{(1)} \cos u_c}{\cos u_o \sin \sigma^{(1)}}, A_{12}^{(1)} \in [-\pi, +\pi] \dots\dots\dots (D.7)$$

$$\sin A_2^{(1)} = \frac{\sin \omega^{(1)} \cos u_o}{\sin \sigma^{(1)}} \dots\dots\dots (D.8)$$

$$\cos A_2^{(1)} = \frac{\sin u_o - \cos \sigma^{(1)} \sin u_c}{\cos u_c \sin \sigma^{(1)}}, A_2^{(1)} \in [-\pi, +\pi] \dots\dots\dots (D.9)$$

$$A_{12}^{(1)} = 0, A_2^{(1)} = \pi, \text{ 当 } \sin \sigma^{(1)} = 0 \dots\dots\dots (D.10)$$

$$tgM^{(1)} = \frac{tgu_o}{\cos A_{12}^{(1)}}, M^{(1)} \in [-\pi, +\pi] \dots\dots\dots (D.11)$$

$$M^{(1)} = \frac{\pi}{2}, \text{ 当 } A_{12}^{(1)} = \pm \frac{\pi}{2} \dots\dots\dots (D.12)$$

$$\sin m^{(1)} = \cos u_o \sin A_{12}^{(1)} \dots\dots\dots (D.13)$$

$$\cos m^{(1)} = \begin{cases} \frac{\sin u_o}{\sin M^{(1)}}, & \sin M^{(1)} \neq 0 \\ 0, & \sin M^{(1)} = 0 \end{cases} \dots\dots\dots (D.14)$$

$$\Delta\omega^{(1)} = \frac{1}{2} e^2 \sigma^{(1)} \sin m^{(1)} \dots\dots\dots (D.15)$$

$$\omega^{(2)} = \omega^{(1)} + \Delta\omega^{(1)} \dots\dots\dots (D.16)$$

当 $|\Delta\omega^{(1)} - \Delta\omega^{(0)}| > \delta$ 时, 则令 $\Delta\omega^{(0)} = \Delta\omega^{(1)}$, $\omega^{(1)} = \omega^{(2)}$, 重复计算公式 (D.5) ~ 公式 (D.16)。否则, 按公式 (D.17) ~ 公式 (D.20) 进行下列参数计算:

$$\left. \begin{aligned} \sigma &= \sigma^{(1)} \\ M &= M^{(1)} \\ \cos m &= \cos m^{(1)} \\ k^2 &= e'^2 \cos^2 m \\ B &= \frac{k^2}{4} \\ A &= 1 + B \\ A_{12} &= A_{12}^{(1)} \\ A_2 &= A_2^{(1)} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (D.17)$$

$$S = b_e [A\sigma - B \sin \sigma \cos(2M + \sigma)] \dots\dots\dots (D.18)$$

$$A_{OC} = \begin{cases} A_{12} \\ A_{12} + 2\pi, A_{12} < 0 \end{cases} \dots\dots\dots (D.19)$$

$$A_{CO} = \begin{cases} -A_2 + 2\pi, A_2 > 0 \\ -A_2 \end{cases} \dots\dots\dots (D.20)$$

D.2 射击偏差计算

射击偏差计算公式见公式 (D.21) ~ 公式 (D.27) :

$$\begin{aligned} tgu_{C_0} &= \sqrt{1 - e^2} \operatorname{tg} B_{C_0} \\ tgu_C &= \sqrt{1 - e^2} \operatorname{tg} B_C \\ B_m &= \frac{1}{2}(B_{C_0} + B_C) \dots\dots\dots (D.21) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \omega &= V |\lambda_C - \lambda_{C_0}| \\ V &= \sqrt{1 + e'^2 \cos B_m} \end{aligned}$$

$$\left. \begin{aligned} \operatorname{ctg} A_{12} &= \frac{tgu_C \cos u_{C_0} - \sin u_{C_0} \cos \omega}{\sin \omega} \\ \operatorname{ctg} A_2 &= \frac{tgu_{C_0} \cos u_C - \sin u_C \cos \omega}{\sin \omega} \\ \cos \sigma &= \sin u_{C_0} \sin u_C + \cos u_{C_0} \cos u_C \cos \omega \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (D.22)$$

$$dS = \frac{a_e \sigma}{V} \dots\dots\dots (D.23)$$

$$A_{C_0C} = \begin{cases} A_{12} & \lambda_C - \lambda_{C_0} > 0 \\ 0 & \lambda_C - \lambda_{C_0} = 0, B_{C_0} \leq B_C \\ \pi & \lambda_C - \lambda_{C_0} = 0, B_{C_0} > B_C \\ 2\pi - A_{12} & \lambda_C - \lambda_{C_0} < 0 \end{cases} \dots\dots\dots (D.24)$$

$$A_{CC_0} = \begin{cases} 2\pi - A_2 & \lambda_C - \lambda_{C_0} > 0 \\ \pi & \lambda_C - \lambda_{C_0} = 0, B_{C_0} \leq B_C \\ 0 & \lambda_C - \lambda_{C_0} = 0, B_{C_0} > B_C \\ A_2 & \lambda_C - \lambda_{C_0} < 0 \end{cases} \dots\dots\dots (D.25)$$

$$\left. \begin{aligned} \operatorname{tg}\left(\frac{L}{R_{Co}}\right) &= -\operatorname{tg}\left(\frac{dS'}{R_{Co}}\right) \cos(A_{CoO} - A_{CoC}) \\ \sin\left(\frac{H}{R_{Co}}\right) &= \sin\left(\frac{dS'}{R_{Co}}\right) \sin(A_{CoO} - A_{CoC}) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (D.26)$$

$$\left. \begin{aligned} R_{Co} &= \frac{a_e b_e}{\sqrt{a_e^2 \sin^2 \phi_{Co} + b_e^2 \cos^2 \phi_{Co}}} + h_{Co} \\ \operatorname{tg} \phi_{Co} &= \frac{\operatorname{tg} B_{Co}}{1 - e^2} \\ dS' &= dS + (h_C - h_{Co}) \operatorname{ctg} \vartheta_{Co} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (D.27)$$

D.3 再入落点偏差计算

再入落点偏差计算公式见公式 (D.28) :

$$\left. \begin{aligned} \Delta L_i &= L_o - L_i \\ \Delta H_i &= H_o - H_i \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (D.28)$$

D.4 计算说明

计算说明主要有:

- a) u_o 、 u_C 、 u_{Co} 、 u_c 、 u_C 、 u_c 、 $\frac{L}{R_{Co}}$ 、 $\frac{H}{R_{Co}}$ 根据三角函数值取主值区间值;
- b) δ 为迭代精度, 可根据弹头实际落点大地测量精度确定。

中华人民共和国航天行业标准
**地地导弹飞行试验弹头
飞行力学诸果分析方法**
QJ 1385A—2006

*

中国航天标准化研究所出版
北京西城区月坛北小街2号
邮政编码：100830

北京航标印务中心印刷
中国航天标准化研究所发行

版权专有 不得翻印

*

2007年5月出版

定价：46.00元