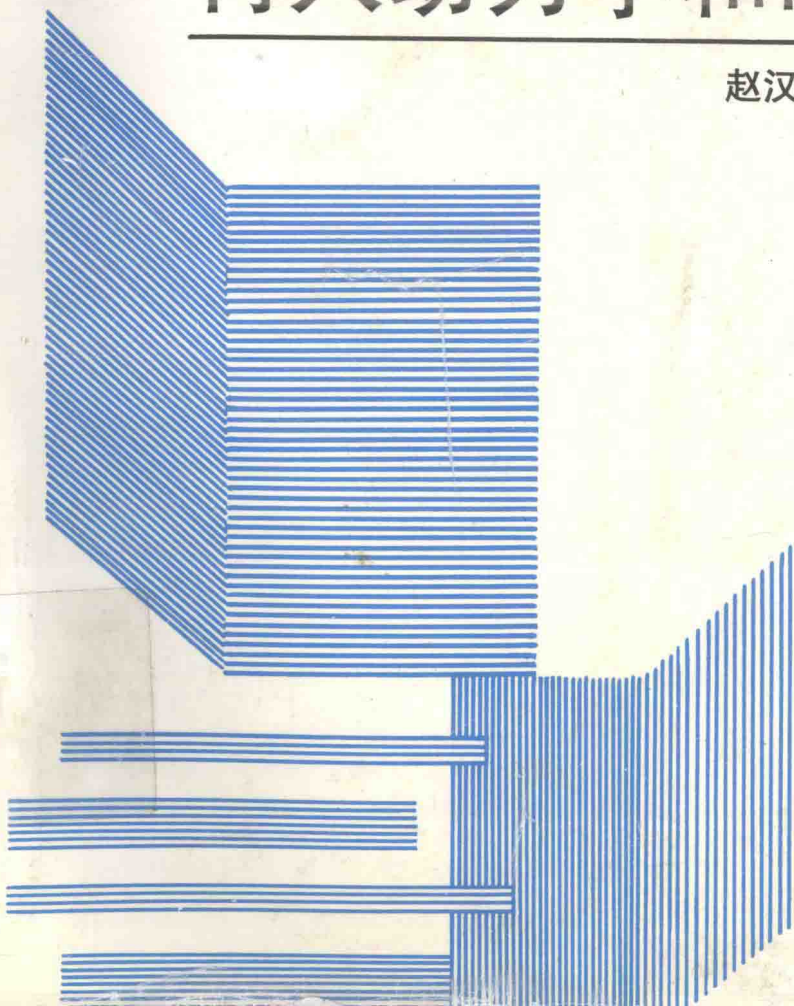


● 研究生教材 ● 研究生教材

飞行器 再入动力学和制导

赵汉元 编著



■ 研究生教材 ■

赵汉元 编著

飞行器再入动力学和制导

国 防 科 技 大 学 出 版 社

图书在版编目 (CIP) 数据

飞行器再入动力学和制导/赵汉元. —长沙: 国防科技大学出版社,
1997. 11

ISBN 7-81024-465-5

I 飞行器再入动力学和制导

II 赵汉元

III ①飞行器②再入动力学③制导

IV V44

*

国防科技大学出版社出版发行

电话 (0731) 4505241 邮政编码: 410073

责任编辑: 张建军 责任校对: 谢小伟

新华书店总店北京发行所经销

湖南大学印刷厂印装

*

850×1168 1/32 印张: 15.625 字数: 392 千

1997 年 11 月第 1 版第 1 次印刷 印数: 2000 册

*

定价: 20.00 元

内 容 简 介

本书专门研究飞行器再入大气层时的运动规律。包括运动方程的近似解；飞行器再入时的最佳轨迹；机动弹头再入时的特点、机动弹道设计、制导方法和落点精度分析；航天器特别是载人飞船的返回轨道设计、再入制导方法和着陆点的精度分析。

本书可作为飞行力学、飞行器设计和飞行器控制专业硕士生的教科书，也可供飞行力学专业本科生教学。

本书理论联系实际，有较强的工程实用性，对从事弹头、航天器总体设计、轨道设计、控制系统设计、飞行试验和使用的科技工作者有参考价值。

前 言

飞行力学是研究飞行器运动规律的学科，是应用力学的一个分支。飞行力学是研究飞行器在气动力、惯性力、弹性力和控制力作用下飞行器运动规律以及这四个力之间相互关系的学科。飞行力学与飞行器设计、飞行器使用、飞行器的可靠性和精度、飞行器仿真和试验等有密切的关系。

随着导弹技术的发展，弹道导弹的射程愈来愈远，对落点精度要求愈来愈高，而突防的要求愈来愈迫切，使得弹头再入大气层后的减速过载、热流愈来愈大，精度控制愈来愈难，所有这些使弹头飞行力学的问题愈来愈受到人们的重视。而随着航天技术的发展，航天活动已由无人发展到有人，对飞行过程中所受的过载和热流要求也愈来愈小，对航天器返回着陆点的要求也愈来愈高，航天器返回再入问题受到人们的关注，形成了航天器再入动力学。

飞行器（包括弹头、卫星、飞船和航天飞机等）高速再入大气层带来一系列的问题，其中与再入轨迹设计、再入制导和控制方法有关的问题便形成飞行力学的一个新的分支——飞行器再入动力学和制导。它是专门研究飞行器再入大气层的运动规律，包括如何保证再入大气层和再入大气层后的运动特性。

本书是为飞行力学专业硕士研究生编写的专业课教材。

1982年作者曾编写过讲义《再入动力学》，主要讨论再入段运动方程、近似解和小弹头滚转共振问题。

本书是在《再入动力学》讲义的基础上,结合近十多年来再入动力学的发展和作者的科研成果编写而成。其中小弹头滚转共振问题已编入作者另一本书《大气飞行器姿态动力学》中,本书不再编入。

全书共六章,第一章绪论,介绍飞行器再入大气层的特点和飞行器再入动力学和制导研究的内容。第二章建立再入飞行器的运动方程;因再入飞行器姿态机动范围大,引进四元数微分方程且突出转动次序不同的影响;运动方程的简化,着重阐明三自由度弹道仿真和六自由度弹道仿真的区别和联系。第三章研究飞行器再入时运动方程的近似解,研究弹头再入、卫星和飞船再入、升阻比(L/D)为常数和变数时的再入近似解,着重讨论过载、热流、总吸热量与再入角 Θ_0 和升阻比(L/D)的关系。第四章讨论飞行器再入时的最佳弹道问题。研究平面和空间的以落速最大或横程最大为指标的最佳弹道数学模型、讨论求解最佳弹道两点边值问题的算法。第五、六章研究机动弹头和航天器的轨道设计和制导方法。这两章是本书的重点。第五章研究机动弹头弹道设计和制导方法,研究机动弹头的最优导引律和落速大小的控制问题;三自由度弹道仿真和精度分析;姿态控制系统综合设计及六自由度弹道仿真。第六章讨论航天器返回轨道设计及制导方法,研究航天器制动发动机推力方向的确定;卫星和飞船返回轨道设计;载人飞船再入制导方法研究;三自由度和六自由度弹道仿真及精度分析;航天飞机标准返回轨道设计及再入制导方法研究。

本书虽是为飞行力学专业硕士生编写的专业课教材,也适用于飞行器设计、飞行器制导控制和仿真专业的硕士生;对从事弹头、航天器总体设计、轨道设计、控制系统总体设计的科技工作者;试验基地的工程技术人员也有一定的参考价值。

本书在编写过程中得到了国防科技大学三〇三教研室的程国采教授、陈克俊副教授、何力副教授、汤建同志、郭振云同志

的大力支持，引用了他们的一些科技报告，也参考了《导弹与航天丛书》，特别是《航天器进入与返回技术》和《弹头技术》两本书中李颐黎、王国雄、曾庆湘等所写的部分内容，航天工业总公司的王藻藩、王宝兴、孙承启等同志的技术报告，也给作者很大帮助。作者在此对所有这些同志表示衷心的感谢。

本书在 1992 年后曾以讲义的形式给飞行力学专业硕士生使用过，历届飞行力学专业硕士生提出了不少宝贵意见，特别是曾国强同志对原稿进行了认真细致的校对，在此对他们表示感谢。

作者将十分感谢读者提出的改进本书内容的建议。

赵汉元

1997. 8

主 要 符 号 表

A	轴向力;大地方位角;
a	大气声速;加速度;椭圆的长半轴;
a_c	哥氏加速度;
a_e	牵连加速度;地球椭球体的长半轴;
B	大地纬度;
b	椭圆的短半轴;
b_e	地球椭球体的短半轴;
c	落点;
C_A, C_N, C_{z1}	轴向力系数、总法向力系数、横向力系数;
C_{x1}, C_{y1}, C_{z1}	轴向力系数、法向力系数、横向力系数;
C_L, C_D, C_x	总升力系数、阻力系数、侧力系数;
C_x, C_y, C_z	阻力系数、升力系数、侧力系数;
D	阻力;阻力加速度;
E	总能量;
e	再入点;轨道偏心率;
f	开伞点;引力常数;
G	重量;
g	重力加速度;
g	引力加速度;
h	几何高度;飞行高度;
i	轨道倾角;
I_{x1}, I_{y1}, I_{z1}	绕 x_1, y_1, z_1 轴的转动惯量;
J	目标函数;
J_2	地球引力势中的系数;
L	总升力;

l ——飞行器长度;
 M ——马赫数;力矩;
 M_{x1}, M_{y1}, M_{z1} ——滚动力矩、偏航力矩、俯仰力矩;
 M_{st} ——静稳定力矩;
 M_d ——阻尼力矩;
 M_c ——控制力矩;
 m ——质量;
 $\dot{m} = \left| \frac{dm}{dt} \right|$ ——质量秒消耗量;
 $m_{x1s}, m_{y1s}, m_{z1s}$ ——滚动、偏航、俯仰力矩系数;
 $\bar{m}_{x1d}, \bar{m}_{y1d}, \bar{m}_{z1d}$ ——无因次滚动阻尼导数、偏航阻尼导数、俯仰阻尼导数;
 N ——总法向力;
 n ——过载;
 o ——返回制高点;原点;
 o_1 ——飞行器质心;
 O_E ——地心;
 P ——发动机推力;
 Q ——总吸热量;
 q ——动压;热流;
 R ——空气动力;地球半径;纵程;
 r ——地心距;
 S ——飞行器最大横截面积;
 T ——动能;周期;
 V ——位能;
 v ——飞行速度;
 W ——视速度;风速;
 $\dot{W}$ ——视加速度;
 x_g ——飞行器质心到顶点的距离;
 x_p ——飞行器压心到顶点的距离;
 X, Y, Z ——空气阻力、空气升力、空气侧力;
 X_1, Y_1, Z_1 ——空气动力的轴向力、法向力、横向力;
 Z ——查普曼变量;横程;
 α ——攻角(迎角);

β ——侧滑角；

γ ——滚动角；

$\gamma_v(\gamma_c)$ ——倾侧角；

ΔR ——纵程增量；

ΔZ ——横程增量；

δ ——舵偏角；

$\delta_\varphi, \delta_\psi, \delta_\gamma$ ——俯仰、偏航、滚动通道的等效舵偏角；

η ——总攻角；

η_{cr} ——配平攻角；

θ ——速度倾角；

Θ ——速度方向对当地水平面的倾角(当地速度倾角)；

Θ_e ——再入角；

λ ——经度；

μ ——地球引力系数；

ν ——倾侧角；

ρ ——空气密度；目标与飞行器质心间的距离；

σ ——航迹偏航角；

φ ——飞行器俯仰角；

ϕ ——地心纬度；

ψ ——偏航角；制动角；

ω ——角速度；角频率；

ω_e ——地球自转角速度

χ ——制动角

Ω ——角速度

上 角 码

0——单位矢量；

*——要求值；

~——标准值；

'——导航计算值；导航测量值；

下 角 码

$a(A)$ ——绝对值；

αv ——平均值；

b ——飞行器

c ——落点;
 e ——再入点;
 f ——开伞点;
 $\max, m$ ——最大值;峰值;
 $\min$ ——最小值;
 n ——法向;
 o ——制动点, 原点, 初值;
 opt ——最佳值;
 pr ——程序;
 r ——相对的;
 tot ——总的;
 tr ——配平的。

前置符号 Δ ——偏量;增量;

上置符号 $-$ ——限幅值;

黑体——矢量;向量;矩阵;坐标系。

$O_E-X_I Y_I Z_I$ ——地心惯性坐标系, 简记为 I ;

$O_E-X_E Y_E Z_E$ ——地心坐标系, 简记为 E ;

$o_o-x_o y_o z_o$ ——返回坐标系, 简记为 O ;

$o_A-x_A y_A z_A$ ——返回惯性坐标系, 简记为 A ;

$o_T-x_A y_A z_A$ ——平移坐标系, 也简记为 A ;

$o_1-x_1 y_1 z_1$ ——飞行器坐标系, 简记为 B ;

$o_1-x_v y_v z_v$ ——速度坐标系, 简记为 V ;

$o_1-x_h y_h z_h$ ——半速度坐标系, 简记为 H ;

$o_1-x_T y_T z_T$ ——地理坐标系, 简记为 T ;

$e_1-x_e y_e z_e$ ——再入坐标系, 简记为 e ;

$e_A-x_A y_A z_A$ ——再入惯性坐标系, 也简记为 A ;

$o_1-x_2 y_2 z_2$ ——飞行器第二体坐标系, 简记为 $B2$;

$o_o-\xi \eta \zeta$ ——视线坐标系, 简记为 S ;

$o_o-x y z$ ——目标坐标系, 也简记为 O 。

目 录

前 言

主要符号表

第一章 绪论

§ 1.1 飞行力学研究的内容	(1)
§ 1.1.1 飞行力学学科的定义和作用	(1)
§ 1.1.2 飞行力学的主要研究手段	(6)
§ 1.2 飞行器再入动力学和制导研究内容	(7)
§ 1.2.1 飞行器再入时的特点	(7)
§ 1.2.2 飞行器再入动力学和制导研究的内容	(17)

第二章 再入飞行器运动方程及其简化

§ 2.1 再入飞行器矢量形式的动力学方程	(23)
§ 2.2 需用的坐标系和坐标系间的转换关系	(25)
§ 2.2.1 需用的坐标系	(25)
§ 2.2.2 坐标系间转换关系表示法	(29)
§ 2.2.3 各坐标系间的转换关系	(36)
§ 2.3 在返回坐标系建立运动方程	(48)
§ 2.3.1 在返回坐标系中的质心动力学方程	(48)
§ 2.3.2 在飞行器坐标系建立绕质心转动动力学方程	(56)
§ 2.3.3 在返回坐标系建立运动方程	(63)
§ 2.4 在半速度坐标系建立运动方程	(74)
§ 2.4.1 在半速度坐标系中的质心动力学方程	(74)
§ 2.4.2 在飞行器坐标系建立绕质心转动动力学方程	(81)
§ 2.4.3 在半速度坐标系建立运动方程	(81)

§ 2.5 运动方程的简化	(87)
§ 2.5.1 质心的空间运动方程	(88)
§ 2.5.2 质心的平面运动方程	(94)
§ 2.5.3 瞬时平衡状态下飞行器姿态角的确定	(97)
第三章 再入飞行器运动方程的近似解	
§ 3.1 弹头再入时运动方程的近似解	(100)
§ 3.1.1 不考虑重力影响时运动方程的近似解	(102)
§ 3.1.2 考虑重力作用时运动方程的近似解	(111)
§ 3.2 人造卫星和载人飞船再入时运动方程的近似解	(114)
§ 3.2.1 小倾角和小升阻比再入时运动方程的简化	(114)
§ 3.2.2 升阻比 $L/D = 0$ 时弹道特性分析	(122)
§ 3.2.3 升阻比 L/D 等于常数时弹道特性分析	(125)
§ 3.3 升阻比为常数时运动方程的近似解	(127)
§ 3.3.1 升阻比为常数时运动方程的近似解	(130)
§ 3.3.2 再入运动方程的一阶近似解	(133)
§ 3.4 升阻比为变数时运动方程的近似解	(139)
第四章 再入飞行器的最佳弹道	
§ 4.1 平面最佳再入机动弹道的数学模型	(144)
§ 4.1.1 末速为最大时的数学模型	(144)
§ 4.1.2 总吸热量为最小时的数学模型	(148)
§ 4.2 空间最佳再入机动弹道的数学模型	(152)
§ 4.2.1 落速最大的空间再入机动弹道的数学模型	(152)
§ 4.2.2 横程最大的空间再入机动弹道的数学模型	(163)
§ 4.3 最佳弹道的计算方法讨论	(168)
§ 4.3.1 末速最大的平面再入机动弹道的计算方法	(170)
§ 4.3.2 总吸热量为最小时再入机动弹道的计算方法	(176)
§ 4.3.3 落速最大的空间再入机动弹道的计算方法	(177)
§ 4.3.4 横程最大的空间再入机动弹道的计算方法	(179)
§ 4.4 再入机动弹道的工程设计法	(182)
第五章 机动弹头的弹道设计和制导方法	

§ 5.1 概述	(202)
§ 5.1.1 弹头概述	(202)
§ 5.1.2 机动弹头的特点及组成	(209)
§ 5.2 再入机动弹头速度方向的控制	(214)
§ 5.2.1 坐标系及其相互间的关系	(214)
§ 5.2.2 再入机动弹头质心运动方程	(217)
§ 5.2.3 导引方程	(219)
§ 5.3 机动弹头最优导引规律	(221)
§ 5.3.1 相对运动方程	(221)
§ 5.3.2 俯冲平面内最优导引控制规律	(223)
§ 5.3.3 转弯平面内最优导引控制规律	(229)
§ 5.4 机动弹头速度方向控制的仿真计算及分析	(231)
§ 5.4.1 速度方向控制三自由度仿真的数学模型	(231)
§ 5.4.2 速度方向控制的三自由度弹道仿真和结果分析	(232)
§ 5.5 再入机动弹头落速大小的控制	(235)
§ 5.5.1 理想速度曲线的设计	(235)
§ 5.5.2 速度大小控制问题	(238)
§ 5.6 机动弹头三自由度弹道仿真计算及分析	(242)
§ 5.6.1 机动弹头三自由度弹道仿真的数学模型	(242)
§ 5.6.2 机动弹头三自由度弹道仿真计算和分析	(245)
§ 5.7 机动弹头六自由度弹道仿真及分析	(248)
§ 5.7.1 机动弹头六自由度弹道仿真的数学模型	(248)
§ 5.7.2 机动弹头六自由度弹道仿真及精度分析	(270)
第六章 航天器返回轨道设计和再入制导方法	
§ 6.1 概述	(283)
§ 6.1.1 再入式航天器分类	(284)
§ 6.1.2 航天器的返回过程	(289)
§ 6.1.3 航天器按返回轨道形式分类	(299)
§ 6.1.4 航天器再入走廊	(302)
§ 6.2 航天器返回制动方向的确定	(308)
§ 6.2.1 圆轨道运行且速度冲量最小时推力方向的确定	(309)

§ 6.2.2	椭圆轨道运行且速度冲量最小时推力方向的确定	(315)
§ 6.2.3	航程最小时推力方向的确定	(318)
§ 6.3	人造地球卫星返回轨道设计	(322)
§ 6.3.1	轨道设计对卫星总体设计的要求	(322)
§ 6.3.2	卫星标准返回轨道设计	(325)
§ 6.3.3	返回轨道偏差量和落点偏差的计算	(326)
§ 6.4	载人飞船返回轨道设计	(332)
§ 6.4.1	载人飞船轨道设计对总体设计的要求	(333)
§ 6.4.2	载人飞船以配平攻角飞行的运动	(337)
§ 6.4.3	载人飞船标准返回轨道设计原则	(340)
§ 6.4.4	返回轨道设计的数学模型	(348)
§ 6.4.5	载人飞船标准返回轨道设计	(361)
§ 6.5	载人飞船返回再入制导方法	(365)
§ 6.5.1	航天器返回再入制导的目的和内容	(365)
§ 6.5.2	载人飞船制动段关机方程	(367)
§ 6.5.3	无再入制导时开伞点位置误差分析和机动能力	(370)
§ 6.5.4	再入制导方法分类	(382)
§ 6.5.5	再入纵向制导最佳反馈增益系数的确定	(388)
§ 6.6	载人飞船返回再入误差分析	(400)
§ 6.6.1	开伞点星下点位置误差统计分析	(400)
§ 6.6.2	返回舱再入轨道最大偏差位置	(403)
§ 6.7	载人飞船利用预测能力制导方法简介	(404)
§ 6.7.1	纵程和横程同时控制的预测制导	(406)
§ 6.7.2	纵程和横程分开制导的预测制导	(409)
§ 6.8	载人飞船六自由度轨道仿真及精度分析	(412)
§ 6.8.1	载人飞船从制动到着陆段飞行程序	(412)
§ 6.8.2	返回再入段姿态控制系统简介	(413)
§ 6.8.3	返回再入段六自由度轨道仿真的数学模型	(424)
§ 6.8.4	飞船返回再入段六自由度轨道计算及精度分析	(442)
§ 6.9	航天飞机轨道器返回轨道设计和再入制导方法	(445)
§ 6.9.1	航天飞机轨道器再入时的特点	(447)

§ 6.9.2	轨道器再入时的关键技术·····	(449)
§ 6.9.3	航天飞机轨道器再入轨道设计·····	(451)
§ 6.9.4	轨道器再入制导方法·····	(468)
§ 6.9.5	轨道器飞行控制命令和仿真分析·····	(471)
§ 6.9.6	轨道器末端能量管理 (TAEM) 段的制导方法·····	(474)
参考文献 ·····		(480)

第一章 绪论

§ 1.1 飞行力学研究的内容

§ 1.1.1 飞行力学学科的定义和作用

1. 飞行力学学科的定义

飞行力学学科的定义有不同的说法，最一般的说法是飞行力学是研究飞行器运动规律的学科，是应用力学的一个新分支。它是按照力学的基本原理结合具体对象——飞行器来分析、研究在有控制或无控制情况下飞行器运动特性的一门学科。

首先考虑一下“飞行”这个词。飞行一词定义为穿过流体介质和真空的运动，而“飞行器”一词是指由某种方式联结在一起的任一飞行的物体。这样定义飞行和飞行器，则弹丸是最简单的飞行器，可视为一个单一的理想刚体。而一架飞机可视为复杂的飞行器，它包含一个机体主体、旋转部分（喷气发动机）、操纵部分和液体部分。

按上述飞行器的定义，飞行器可分为弹丸、飞机（又分为各种飞机，如直升飞机、歼击机、轰炸机、民用飞机等）、导弹（又细分为各种类型的导弹，如弹道导弹、战术导弹、地空导弹、巡航导弹等）和航天器（又细分为卫星、飞船、航天飞机、星际探测器等）。相应地就有外弹道学、飞机飞行力学、导弹飞行力学和航天器飞行力学。也可叫飞机飞行动力学、导弹飞行动力学、航天器飞行动力学，在本书中飞行力学和飞行动力学无区别，只是