



宇宙飞行器 降落地球动力学

国防工业出版社

宇宙飞行器降落地球动力学

〔苏〕B. B. 安德雷耶夫斯基 著

刘钟毓 译 施长衡 校

国防工业出版社

内 容 简 介

本书阐述了各类宇宙飞行器以第一、第二宇宙速度进入大气，降落到地球的飞行力学和最佳弹道计算。

研究了降落过程的特性和推导了在各坐标系和计算系中飞行器质心运动的方程，在推导时计及了大气参数的可能扰动情况。

其次，推导出飞行器进入大气时弹道特征的近似估算方法及过载和热载荷边界的计算法。叙述了依据不同的技术准则使弹道最佳化的方法和确保降落飞行器能在预定地区着陆的控制方法。

本书可供火箭、航空工业技术人员参考，对高等院校师生亦有裨益。

ДИНАМИКА СПУСКА КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ НА ЗЕМЛЮ

В. В. Андреевский

Издательство «Машиностроение» Москва 1970

*

宇宙飞行器降落地球动力学

[苏]В. В. 安德雷耶夫斯基 著

刘钟毓 译 施长衡 校

*

国防工业出版社 出版

北京市书刊出版业营业许可证出字第074号

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印装

*

850×1168 $1/32$ 印张 $7\frac{5}{16}$ 185千字

1975年9月第一版 1975年9月第一次印刷 印数：0,001—3,200册

统一书号：15034·1438 定价：0.93元

译 序

这本《宇宙飞行器降落地球动力学》是苏美历年来（1970年前）发表过的大量有关文献资料的综合，并经作者分析处理成一完整的系统。其中对各类宇宙飞行器在大气中的降落弹道作了详细分析，并叙述了以最佳化技术建立最佳弹道和降落弹道的实际控制方案，以确保宇宙飞行器能精确、安全、可靠地返回地球，并在预定点着陆。因此，它对从事宇宙航行工作的广大工人及设计人员有一定的参考价值，但要本着“去粗取精，去伪存真”的精神，从中汲取对我们有益的东西，走“独立自主，自力更生”的创新道路，切勿被本书所约束。

本书内容涉及的知识面较广，其中包括飞行力学、控制、导航等，因限于译者水平，译文中定有不当之处，请读者指正。

译 者

目 录

前言	7
主要符号说明	9
第一章 宇宙飞行器在地球大气中降落时的飞行条件	13
§ 1 宇宙飞行器在地球大气中的降落技术	13
§ 2 宇宙飞行器在地球大气中降落时的飞行物理条件	23
1. 重力场与地球形状	24
2. 地球大气	27
3. 飞行器以高超音速飞行时的空气动力特征	37
4. 宇宙飞行器在大气中降落时的气动热	44
第二章 飞行器在地球大气中降落时质心运动的 一般动力学问题	53
§ 1 变质量物体运动的一般方程	53
§ 2 计算系与座标系	58
1. 计算系	59
2. 飞行器弹道的基本座标轴系	65
§ 3 飞行器在大气中降落时所受作用力投影的确定	75
1. 与飞行器方位有关的轴系 推力和气动力的投影	75
2. 有风作用时的气动力	81
3. 质量力在基本座标轴上的投影	84
§ 4 飞行器在地球座标轴系和球面速度座标轴系中的运动 方程 运动方程的积分	86
第三章 宇宙飞行器在地球大气中降落的弹道分析	92
§ 1 宇宙飞行器进入地球大气中的条件	92
§ 2 从定性分析人造地球卫星轨道的降落弹道中得出的 近似解析关系式	99
§ 3 从人造卫星轨道上降落的弹道基本微分方程 基本 方程的积分	103

1. 换算成地心轨道坐标系中的独立变量 $\bar{V}_s = \frac{V_s}{V_{1\kappa.\text{cp}}}$	103
2. 换算成速度坐标系中的独立变量 $x = \ln\left(\frac{V}{V_{1\kappa}}\right)$	106
3. 换算成速度坐标系中的独立变量 $y = \frac{Q}{Q_0}$	109
§ 4 宇宙飞行器从人造卫星轨道降落的弹道式弹道	110
1. 弹道式降落弹道的近似分析	111
2. 从人造卫星轨道上降落的弹道式弹道的基本特征	118
§ 5 高升力性能宇宙飞行器在大气中的降落弹道	120
1. 有翼式宇宙飞行器降落时的准定态飞行	122
2. 有翼式宇宙飞行器降落时在垂直平面内的机动飞行	129
3. 高升阻比宇宙飞行器的降落弹道模型	135
4. 高升阻比飞行器降落时的横向机动飞行	143
§ 6 有翼式飞行器在惯性下滑弹道域内的非定态运动	144
§ 7 低升阻比宇宙飞行器在大气中的降落 (半弹道式降落)	150
§ 8 近似计算 $V_{\text{BX}} > V_{1\kappa}$ 的星际宇宙飞行器在 大气中的降落弹道	152
1. $\bar{V}_{\text{BX}} > 1$ 时的基本降落方程的近似解算法	153
2. $\bar{V}_{\text{BX}} > 1$ 时有翼式飞行器在大气中降落的典型弹道	161
§ 9 宇宙飞行器的着陆	165
第四章 宇宙飞行器在大气中的降落弹道最佳化	170
§ 1 降落弹道最佳化问题的概述	170
1. 飞行器弹道的最佳化	170
2. 宇宙飞行器在大气中的最佳降落弹道数学模型和最佳性准则	172
§ 2 用古典变分法使大气中的降落弹道最佳化	177
1. 问题的概述	177
2. 严密解	178
§ 3 以极大值原理为基础使有翼式宇宙飞行器在大气 中的降落弹道最佳化	186
§ 4 确定有翼式宇宙飞行器在大气中的典型(模拟)降 落弹道的最佳特征	194
1. 准定态惯性下滑的最佳状态	195
2. 初始拉平的最佳化	199

§ 5 以快速下降法解算基准降落弹道的程序编制问题	
最佳横向机动飞行	201

第五章 宇宙飞行器降落的弹道控制 209

§ 1 宇宙飞行器在大气中的降落弹道的扰动	210
§ 2 宇宙飞行器在大气中降落段上的质心扰动运动方程	213
§ 3 以基准降落弹道为准的控制	216
§ 4 以预报落点为基础的控制	222

结束语 230

参考文献 231

宇宙飞行器降落地球动力学

〔苏〕B. B. 安德雷耶夫斯基 著

刘钟毓 译 施长衡 校

国防工业出版社

译 序

这本《宇宙飞行器降落地球动力学》是苏美历年来（1970年前）发表过的大量有关文献资料的综合，并经作者分析处理成一完整的系统。其中对各类宇宙飞行器在大气中的降落弹道作了详细分析，并叙述了以最佳化技术建立最佳弹道和降落弹道的实际控制方案，以确保宇宙飞行器能精确、安全、可靠地返回地球，并在预定点着陆。因此，它对从事宇宙航行工作的广大工人及设计人员有一定的参考价值，但要本着“去粗取精，去伪存真”的精神，从中汲取对我们有益的东西，走“独立自主，自力更生”的创新道路，切勿被本书所约束。

本书内容涉及的知识面较广，其中包括飞行力学、控制、导航等，因限于译者水平，译文中定有不当之处，请读者指正。

译 者

内 容 简 介

本书阐述了各类宇宙飞行器以第一、第二宇宙速度进入大气, 降落到地球的飞行力学和最佳弹道计算。

研究了降落过程的特性和推导了在各坐标系和计算系中飞行器质心运动的方程, 在推导时计及了大气参数的可能扰动情况。

其次, 推导出飞行器进入大气时弹道特征的近似估算方法及过载和热载荷边界的算法。叙述了依据不同的技术准则使弹道最佳化的方法和确保降落飞行器能在预定地区着陆的控制方法。

本书可供火箭、航空工业技术人员参考, 对高等院校师生亦有裨益。

ДИНАМИКА СПУСКА КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ НА ЗЕМЛЮ

В. В. Андреевский

Издательство «Машиностроение» Москва 1970

*

宇宙飞行器降落地球动力学

[苏] В. В. 安德雷耶夫斯基 著

刘钟毓 译 施长衡 校

*

国防工业出版社 出版

北京市书刊出版业营业许可证出字第 074 号

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印装

*

850×1168 $1/32$ 印张 7 $5/16$ 185 千字

1975 年 9 月第一版 1975 年 9 月第一次印刷 印数: 0,001—3,200 册

统一书号: 15034·1438 定价: 0.93 元

目 录

前言	7
主要符号说明	9
第一章 宇宙飞行器在地球大气中降落时的飞行条件	13
§ 1 宇宙飞行器在地球大气中的降落技术	13
§ 2 宇宙飞行器在地球大气中降落时的飞行物理条件	23
1. 重力场与地球形状	24
2. 地球大气	27
3. 飞行器以高超音速飞行时的空气动力特征	37
4. 宇宙飞行器在大气中降落时的气动热	44
第二章 飞行器在地球大气中降落时质心运动的 一般动力学问题	53
§ 1 变质量物体运动的一般方程	53
§ 2 计算系与座标系	58
1. 计算系	59
2. 飞行器弹道的基本座标轴系	65
§ 3 飞行器在大气中降落时所受作用力投影的确定	75
1. 与飞行器方位有关的轴系 推力和气动力的投影	75
2. 有风作用时的气动力	81
3. 质量力在基本座标轴上的投影	84
§ 4 飞行器在地球座标轴系和球面速度座标轴系中的运动 方程 运动方程的积分	86
第三章 宇宙飞行器在地球大气中降落的弹道分析	92
§ 1 宇宙飞行器进入地球大气中的条件	92
§ 2 从定性分析人造地球卫星轨道的降落弹道中得出的 近似解析关系式	99
§ 3 从人造卫星轨道上降落的弹道基本微分方程 基本 方程的积分	103

1. 换算成地心轨道坐标系中的独立变量 $\bar{V}_s = \frac{V_s}{V_{1\kappa.\text{cp}}}$	103
2. 换算成速度坐标系中的独立变量 $x = \ln\left(\frac{V}{V_{1\kappa}}\right)$	106
3. 换算成速度坐标系中的独立变量 $y = \frac{Q}{Q_0}$	109
§ 4 宇宙飞行器从人造卫星轨道降落的弹道式弹道	110
1. 弹道式降落弹道的近似分析	111
2. 从人造卫星轨道上降落的弹道式弹道的基本特征	118
§ 5 高升力性能宇宙飞行器在大气中的降落弹道	120
1. 有翼式宇宙飞行器降落时的准定态飞行	122
2. 有翼式宇宙飞行器降落时在垂直平面内的机动飞行	129
3. 高升阻比宇宙飞行器的降落弹道模型	135
4. 高升阻比飞行器降落时的横向机动飞行	143
§ 6 有翼式飞行器在惯性下滑弹道域内的非定态运动	144
§ 7 低升阻比宇宙飞行器在大气中的降落 (半弹道式降落)	150
§ 8 近似计算 $V_{\text{BX}} > V_{1\kappa}$ 的星际宇宙飞行器在 大气中的降落弹道	152
1. $\bar{V}_{\text{BX}} > 1$ 时的基本降落方程的近似解算法	153
2. $\bar{V}_{\text{BX}} > 1$ 时有翼式飞行器在大气中降落的典型弹道	161
§ 9 宇宙飞行器的着陆	165
第四章 宇宙飞行器在大气中的降落弹道最佳化	170
§ 1 降落弹道最佳化问题的概述	170
1. 飞行器弹道的最佳化	170
2. 宇宙飞行器在大气中的最佳降落弹道数学模型和最佳性准则	172
§ 2 用古典变分法使大气中的降落弹道最佳化	177
1. 问题的概述	177
2. 严密解	178
§ 3 以极大值原理为基础使有翼式宇宙飞行器在大气 中的降落弹道最佳化	186
§ 4 确定有翼式宇宙飞行器在大气中的典型(模拟)降 落弹道的最佳特征	194
1. 准定态惯性下滑的最佳状态	195
2. 初始拉平的最佳化	199

§ 5 以快速下降法解算基准降落弹道的程序编制问题	
最佳横向机动飞行	201

第五章 宇宙飞行器降落的弹道控制 209

§ 1 宇宙飞行器在大气中的降落弹道的扰动	210
§ 2 宇宙飞行器在大气中降落段上的质心扰动运动方程	213
§ 3 以基准降落弹道为准的控制	216
§ 4 以预报落点为基础的控制	222

结束语 230

参考文献 231

前 言

宇宙飞行器的回返地球，或者也就是说，宇宙飞行器的降落舱回返地球乃是大量宇宙作业中的最终阶段。首先这对载人宇宙飞行器飞行是必需的；其次，研究宇宙的自动站在飞行中将所取得的研究资料（仪器仪表指示记录、照片、行星表面的土壤试样等）送回地面时，也是必需的。

正如宇宙飞行的经验表明，宇宙飞行器安全降落地球的问题在技术上已获得可靠的解决。但是，随着宇宙飞行领域的扩大，降落飞行器的类型和结构显然将随之改变，并且对其控制、机动飞行、落点的精度也将提出更高的要求。因此，有关降落动力学问题、降落飞行器的弹道计算及其最佳化问题，和宇宙飞行中这一重要阶段的其它有关技术问题一样，具有现实意义，因而正不断地引起技术人员的重视。

在苏联国内和国外，降落动力学的各类问题在期刊上已有大量发表，说明这一问题不仅有其重要意义，而且在作了某些简化以后，降落问题可以作为恰当的例子，用来说明弹道的分析、程序的编排、最佳控制的综合等的最新方法。但在现有技术文献中尚缺乏用明确有据的假设、统一的技术术语来解决降落问题的一致办法，所以有必要出版一本综合性著作以阐述在地球大气中的降落动力学，作者在本书中试图作这样的概括和系统化。书中用具体例子加以说明降落动力学的原理，同时列出与本题有关文献的详细目录。为了将资料系统化，作者对已发表的各个专题研究成果重新作了某些处理、分析和综合。

在前两章中叙述了飞行器的飞行条件和运动方程。这些方程既可用作近似估算降落弹道，也可用在电子数字计算机上作精密

计算。此外还叙述了风的扰动和大气偏离标准状态特征的计算方法。并相应列出某些评估降落飞行器的气动特征和热载荷的图表与近似公式，这里所研究的高超音速飞行器的空气动力学和气动加热，仅是针对选择和计算降落弹道的需要而言的。

在第三章中叙述了各类飞行器，其中特别包括高升阻比的有翼式飞行器的降落弹道的近似分析方法。对这类飞行器给以特别的注意是由于它们具有高度机动性和可控性，从而将能广泛地应用于与未来轨道站的联系及站上宇航员回返地球的工作中。计算降落走廊的边界，这一边界取决于飞行器所采用的隔热系统的热流容许限度、安全过载限度及其它技术因素。并取用了各类降落飞行器的特征作为引例。

弹道最佳化和降落飞行器的控制原理叙述在第四、第五章中。对这方面特别考虑到工程上提出的有关最佳控制和评价其可能的解决途径问题，以及分析弹道最佳化成果。

最佳过程控制的数学理论：如边界问题中极值的求得，在电子数字计算机上使之最佳化时计算方法的特点等，本书因篇幅所限未加充分阐述。

应当指出，本书仅仅阐述了降落飞行器质心运动动力学、弹道的计算和最佳化。至于降落飞行器的定位和稳定方法，以及其动力学特征的选择均未列入作者所研究的问题之内。

主要符号说明

A_{ij} ——最佳化的权系数;

$A_{\text{конв}}$, $A_{\text{рад}}$ ——热流公式中的系数 (第一章, § 2);

A, B, C ——地球的主惯性矩;

$c_{\text{об}}$, $c_{\text{из}}$, $c_{\text{тз}}$ ——蒙皮材料、绝热材料、防热材料的比热;

G ——飞行器重量;

$G_{\text{тз}}$ ——防热重量;

H ——飞行高度;

$H_{\text{м}}$ ——大气基准高度;

h ——地理势位高度;

$$I = \frac{1}{RH_{\text{м}}} \left(\frac{2\sigma \cos \theta_0}{gQ_0} \right)^2$$

——弹道式降落的弹道参数;

$I_{\text{эф}}$ ——防热的有效吸热性能;

i ——轨道 (弹道) 面倾角;

$$J = \left(\frac{2\sigma}{Q_0 H_{\text{м}}} \cos \theta_0 \right)$$

——有升力的降落弹道参数;

j ——加速度;

K ——升阻比;

L ——距离;

M ——马赫数;

M ——空气分子量;

m ——质量;

n ——过载;

P ——推力;

p —— 线性共轭系的变量;

Q —— 迎面阻力, 总热流;

q —— 比热;

R —— 合力, 半径向量;

$R_{\text{газ}}$ —— 气体常数;

Re_l —— 化算到线性尺寸 l 的雷诺数;

$r_{\text{н}}$ —— 钝头半径或降落飞行器的前缘半径;

S —— 特征面积;

T —— 绝对温度; 振动周期; 运转周期;

t, τ —— 时间;

u —— 控制作用的一般表示法;

V —— 飞行速度;

W —— 风速;

x —— 速度函数〔见式(3.58)〕;

Y —— 气动力升力;

y_i —— 弹道变量的一般表示法;

$y = \frac{Q}{Q_0}$ —— 相对密度〔见式(3.75)〕;

$$Z = \frac{Q}{2\sigma} \sqrt{RH_{\text{м}} \bar{V}_s}$$

—— 飞行高度函数;

α —— 攻角;

β —— 侧滑角;

γ, γ_c —— 地球坐标系和速度坐标系中的倾侧角;

$\delta_{\text{обм}}, \delta_{\text{тг}}$ —— 蒙皮厚度, 防热层厚度等等;

ε_g —— 地心垂线与重力垂线间之夹角;

ε_r —— 地心垂线与地理垂线间之夹角;

θ —— 弹道倾角;

ϑ —— 俯仰角;

κ —— 真异常;