

# 外 弹 道 学

[俄] A. A. 德米特里耶夫斯基 月. H. 留申科 著  
G. C. 波哥吉斯托夫

韩子鹏 薛晓中 张 遵 译

国防工业出版社

461274

中国人民解放军总装备部专项基金资助出版

# 外弹道学

〔俄〕A. A. 德米特里耶夫斯基 Л. И. 雷申科 С. С. 波哥吉斯托夫 著

韩子鹏 薛晓中 张 莺 译



00461274

国防工业出版社

· 北京 ·

# 著作权合同登记 图字:军—1999—021 号

## 图书在版编目(CIP)数据

外弹道学/(俄)德米特里耶夫斯基等著;韩子鹏等译.—北京:国防工业出版社,2000.1

ISBN 7-118-02107-5

I. 外… II. ①德…②韩… III. 枪炮外弹道学  
IV. TJ012.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(1999)第 14308 号

Дмитриевский А. А. и др.

Д 53 Внешняя баллистика:Учебник для студентов вузов  
А. А. Дмитриевский, Л. Н. Лысенко, С. С. Богодистов, — 3-е изд.  
перераб. и доп. — М. Машиностроение, 1991. — 640 с.; ил.  
ISBN 5-217-01042-8

©Издательство “Машиностроение”, 1972

А. А. Дмитриевский, Л. Н. Лысенко,

©С. С. Богодистов, 1991

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号)

(邮政编码 100044)

国防工业出版社印刷厂印刷

新华书店经售

\*

开本 850×1168 1/32 印张 15 3/4 407 千字

2000 年 1 月第 1 版 2000 年 1 月北京第 1 次印刷

印数:1—1000 册 定价:31.00 元

---

(本书如有印装错误,我社负责调换)

# 出版前言

本书是俄罗斯唯一的一本外弹道学教科书,由莫斯科包曼大学飞行力学教研室主任 Л. Н. 雷申科教授等三人编写。

本书详尽而系统地讲述了外弹道学的基本理论和应用,不仅有一般外弹道学的内容,例如弹道方程的建立和求解、角运动和稳定性、扰动运动和散布分析、弹道优化设计和修正理论、弹道试验和射表编制等,而且包含了俄罗斯在外弹道领域的最新成果,例如灵巧弹药和子母弹的外弹道理论。同时本书在理论体系上采用了严格的弹丸非线性运动方程和李雅普诺夫稳定性分析方法,将有控飞行器的最优控制理论和统计飞行力学方法与经典的外弹道理论相融合,适应了常规弹药制导化的需要。因此本书代表了当今俄罗斯外弹道学领域的水平。

Л. Н. 雷申科教授曾应邀到我校讲学,为了加强我们两国和两校的学术交流,向读者介绍俄罗斯学者在外弹道领域的贡献以及所采用的方法和得到的结果,并从中得到启发和借鉴,促进我国外弹道学和兵器技术的发展,在征得三位作者以及莫斯科机械制造出版社的同意后,在我国国防工业出版社的大力支持下,决定翻译出版此书,以供从事兵工专业的师生、设计和试验人员参考。

本书第四~十二章由韩子鹏翻译,第一~三章由薛晓中翻译,第十三~十四章由张莺翻译,全书由韩子鹏统稿。徐明友、郭锡福教授分别审阅了部分章节,在翻译过程中还得到教研室全体同志和南京理工大学外事办公室同志的支持和帮助,特向他们表示衷心的感谢。

同时,我们也向三位作者及莫斯科机械制造出版社的友好合作表示衷心的感谢。

由于译者水平有限,译文中错误缺点在所难免,欢迎广大读者批评指正。

译者

## 中文版序

为中国读者所关注的这本书是俄罗斯唯一的一部外弹道学教科书,本书有三个版本(第一版-1972年,第二版-1979年,现在的第三版-1991年)。由于这类书很少,故需对它的详情作些说明。骤然看来,“外弹道学”是专业面相当窄的学科,内容也相当稳定。但事实上并非完全如此,无论是培养从事民用的或是培养从事军用的火箭火炮系统研究、设计、制造和维修的专家,这都是一门基础课。

此外,近十几年来,这门科学及由它服务的技术部门都发生了很大的变化,故需对“外弹道学”课程及用于在专门高等学校讲课的教材作相应的修订。

这些变化在很大程度上是由以下原因产生的:

——由于计算技术领域里众所周知的成就,使过去在弹道设计和试验研究阶段,以及在战斗射击的弹道学保障阶段不可能实现的新的算法现在已能实现。

——由于科学的进一步发展,首先是基础数学和应用数学的发展,极大地提高了火箭炮弹稳定性和控制性研究方法的成效,发展了求解弹道问题的统计方法和对策论方法。

——由于出现了大量的新原理弹药,例如弹道修正弹,非传统的目标杀伤兵器,按非经典空气动力原理设计的战斗部元件等等。

这些变化在本教科书中都有一定的反映。

俄罗斯弹道学学者 A. A. 德米特里耶夫斯基是在苏联出版本书的倡导者,早在本世纪40~50年代他就曾在迫击炮弹和火箭增程弹的外弹道发展中作出了卓越的贡献。许多专家参加了前两个版本的写作和出版前的准备,这些专家是在 A. A. 德米特里耶夫斯基领导下的工作集体,然而 A. A. 德米特里耶夫斯基所作的贡献是与他们的集体劳动成果分不开的。本版教科书是本书封面所列名字的专家参加工作编写的,这一版无论从其内容讲还是从其学科描述方法讲

都是最成功的,它是对我们的导师——A. A. 德米特里耶夫斯基教授的纪念,在本教科书第三版刚出版时他已去世了。

正如任何一本教科书那样,本书也不纯粹是作者独创的科学著作,它吸收了我们的先辈——世界著名的俄罗斯弹道学流派的代表人物的优秀成果,他们以这些成果证实了自己在火箭火炮武器的军事应用和历史发展中的优先地位。本书在对学生教课的过程中还为由我所领导的莫斯科国立包曼技术大学弹道教研室和空气动力教研室的教师们所完善,包曼大学是苏联最老和最大的培养国防工业部门干部的大学。在本书所作的修订中还大量引用了我国军事、科研和国防工业中同行和朋友的意见和建议。所有的这些使我有理由认为,本书对中国高等学校的学生、研究生以及在武器制造部门的专家来说将不是无益的。

最后,我向中国的弹道学者韩子鹏教授表示感谢,感谢他倡议在中国出版本书并在将本书翻译成中文的过程中做了大量的工作。

俄罗斯科学院院士 教授 Л. Н. 雷申科

## 第三版序

本书第二版出版(1979年)以来,外弹道学又增添了许多新的研究成果和更切实际的分析理论。没有这些新的理论研究成果,外弹道学在相应专题上的技术研究就不完备了。

这些研究理论有研究各类飞行器运动的微分方程组的定性方法,外弹道中关于弹丸的修正弹道,以及非传统方法摧毁目标的新理论。计算弹道的研究得到了进一步的发展(在计算机应用的基础上),弹道实验的技术装备精度和方法得到了大大改观,另外还有定位测量技术、射击瞄准所需要的气象数据的获取方法等都大大完善了。

现在,射击威力的提高、射程的增加和无控弹丸射击精度的提高,在很大程度上成为了现实。所以,本书新版着重注重于身管武器发射弹丸和无控火箭的动力学问题。

全书除包括基本章节外,书中部分章节还介绍了许多用于选修科的资料。

在参考文献中列出了引用作者文章的清单,为更深入的学科研究指明了方向。本书的序言和绪论,第1、2、3、5、6章内容由 A. A. 德米特里耶夫斯基(Д. Митриевский)写成,第7、11、13、14章由 Л. Н. 雷申科(Лысенко)撰写,第4、8、12章由 С. С. 波哥吉斯托夫(Богодистов)撰写,第9、10章由 A. A. 德米特里耶夫斯基和 Л. Н. 雷申科一起完成。

在第三版手稿付印的准备过程中,采纳了工程科学院院士 Н. М. 蒙钦科教授的许多评论意见,作者在此向他致以衷心的感谢。

作者同样衷心地感谢那些参加本书前几版工作的全体同志们,他们对该书第三版的出版同样给予了很大的帮助。

本书以黑体拉丁字母表示矢量,以黑体大写字母表示矩阵或对矩阵的偏导数。

标量函数或矢量函数表示成  $X(t); f(x); f(x, t)$ 。即,数变量和

矢变量形式的自变量放在括号中。

基本符号符合国家图书20058—80《飞行器空间运动动力学》和4401—81《标准大气、参数》的有关规定。

## 基本符号

- $A$  方位角  
 $a$  声速  
 $a_a$  弹体质心的绝对运动加速度  
 $a_r$  弹体质心的相对运动加速度  
 $a_r$  弹体—燃料—气体系统质心相对火箭壳体运动的加速度  
 $c$  弹道系数  
 $c_R$  空气动力合力的气动系数  
 $c_x, c_y, c_z$  空气动力系数  
 $F$  外力合力  
 $F_{kop}$  科氏力  
 $F_P$  反作用力合力  
 $F(V), G(V), K\left[\frac{V}{a}\right]$  空气阻力函数  
 $g$  自由落体加速度  
 $g_r$  重力加速度  
 $\Gamma$  表面摩擦力矩  
 $H$  位势高度  
 $H(y)$  依赖于高度的空气密度函数  
 $I_{x_i}, I_{y_i}, I_{z_i}$  火箭相对各坐标轴的转动惯量  
 $I_{x_i y_i}, I_{x_i z_i}, I_{y_i z_i}$  惯性积  
 $K$  物体动量矩矢量  
 $L$  沿地球表面的线射程  
 $M$  马赫数  
 $M_\lambda$  阻尼力矩  
 $M_{CT}$  静力矩

$M_F$  外力相对惯性中心的合力矩  
 $m$  运动体(火箭、弹丸)的质量  
 $m_x, m_y, m_z$  空气动力力矩系数  
 $\Pi$  重力势, 比重  
 $\Pi_T$  地球引力势  
 $\Pi_n$  离心惯性力势  
 $P$  推力  
 $p$  气压  
 $Q$  物体的动量矢  
 $Q_i$  广义力  
 $q$  速度头  
 $S$  特征面积  
 $T = t_c = t_n$  全飞行时间  
 $T_n$  变质量物体的动能  
 $V_a$  物体质心绝对运动速度  
 $V_r$  物体质心相对运动速度  
 $V_r$  弹体—燃料—气体系统质心相对火箭壳体的速度  
 $V_{x_c} = u$  质心速度在射出点坐标系  $OX_c$  轴上的投影  
 $V_{y_c} = w$  质心速度在射出点坐标系  $OY_c$  轴上的投影  
 $X_a$  迎面阻力  
 $X_p, Y_p, Z_p$  控制力在固连坐标系上的分量  
 $x_c$  水平距离  
 $V_a$  气动升力  
 $y$  地理高度  
 $y_s$  弹道高  
 $Z_a$  气动侧向力  
 $\alpha$  攻角  
 $\beta$  侧滑角  
 $\gamma$  侧倾角

|                 |              |
|-----------------|--------------|
| $\varepsilon$   | 当地角          |
| $\theta$        | 弹道倾角         |
| $\vartheta$     | 俯仰角          |
| $\lambda_*$     | 经度           |
| $\lambda$       | 结点的线经度       |
| $\pi(y)$        | 气压函数         |
| $\rho$          | 空气密度         |
| $\tau$          | 虚温           |
| $\varphi_r$     | 地球纬度         |
| $\varphi_{r_0}$ | 相对地心的纬度      |
| $\Psi$          | 弹道偏角         |
| $\psi$          | 偏航角          |
| $\Omega$        | 地球角速度        |
| $\omega$        | 火箭弹体角速度矢     |
| 下标              | $\kappa$ 终点量 |
|                 | $n$ 目标       |

|    |     |               |
|----|-----|---------------|
| 上标 | 0   | 单位矢(OPT), 理想值 |
|    | $T$ | 矢量或矩阵的转置记号    |
|    | *   | 名义值 局部导数      |

鉴于外弹道学公式繁多,使用符号很多,故本书全部沿用原书中的符号;书中采用的其它符号在文中解释。

出版前言  
中文版序  
第三版序  
基本符号

# 目 录

## 绪论

|      |                    |   |
|------|--------------------|---|
| B. 1 | 外弹道学的研究目的和任务 ..... | 1 |
| B. 2 | 外弹道学的发展历史 .....    | 3 |

## 第一部分 火箭和炮弹的飞行条件 及运动数学模型

### 第一章 作用在飞行器上的力和力矩

|       |                                 |    |
|-------|---------------------------------|----|
| § 1.1 | 确定飞行器空间位置的坐标系和角度 .....          | 9  |
| 1.1.1 | 坐标系的一般特征 .....                  | 9  |
| 1.1.2 | 坐标系相互方位的确定 .....                | 12 |
| 1.1.3 | 利用方向余弦矩阵进行坐标变换 .....            | 15 |
| § 1.2 | 地球引力场及地球旋转对火箭和炮弹飞行<br>的影响 ..... | 20 |
| 1.2.1 | 地球引力的力势, 地球的形状和大小 .....         | 20 |
| 1.2.2 | 重力和重力势 .....                    | 26 |
| 1.2.3 | 地球旋转对火箭和弹丸飞行的影响 .....           | 29 |
| § 1.3 | 大气及其特性 .....                    | 35 |
| 1.3.1 | 大气的构成 .....                     | 35 |
| 1.3.2 | 标准大气 .....                      | 37 |

|                             |    |
|-----------------------------|----|
| § 1.4 空气动力及其力矩·····         | 42 |
| 1.4.1 空气阻力矢量和由它产生的力矩·····   | 42 |
| 1.4.2 总空气动力和总空气动力矩的各分量····· | 43 |
| 1.4.3 空气动力和力矩转化为标准阻力函数····· | 48 |
| § 1.5 火箭发动机的推力·····         | 55 |
| § 1.6 附加力和力矩以及控制力和控制力矩····· | 58 |
| 1.6.1 附加力和力矩·····           | 58 |
| 1.6.2 控制力和力矩·····           | 59 |

## 第二章 飞行器运动数学模型建立的理论基础

|                                           |    |
|-------------------------------------------|----|
| § 2.1 数学模型的分类和表示形式·····                   | 61 |
| 2.1.1 作为动力系统的飞行器·····                     | 61 |
| 2.1.2 数学模型的可能形式·····                      | 63 |
| § 2.2 建立飞行器运动方程的原理·····                   | 66 |
| 2.2.1 密歇尔斯基(Мещерский)方程 ·····            | 66 |
| 2.2.2 变质量物体和常质量物体运动的动力学基本定理、<br>固化原理····· | 68 |
| 2.2.3 将火箭作为变质量物体时的直线运动<br>矢量方程·····       | 72 |
| 2.2.4 飞行器旋转运动方程·····                      | 75 |
| 2.2.5 矢量方程在弹道法线和切线上的投影·····               | 78 |
| 2.2.6 火箭和炮弹运动方程的线性化·····                  | 81 |

## 第三章 火箭和炮弹运动微分方程组的建立

|                                              |    |
|----------------------------------------------|----|
| § 3.1 火箭在主动段上的空间运动方程·····                    | 86 |
| 3.1.1 火箭空间运动的基本方程组·····                      | 86 |
| 3.1.2 在稠密大气层中火箭相对基准地球坐标系的<br>空间运动方程组的简化····· | 90 |
| 3.1.3 考虑地球旋转时火箭质心运动方程组·····                  | 95 |
| § 3.2 在弹道主动段上飞行器纵向和侧向运动方程组                   |    |

|                                        |     |
|----------------------------------------|-----|
| 的简化 .....                              | 101 |
| 3.2.1 将运动分解成在纵向平面和侧向平面中<br>的运动 .....   | 101 |
| 3.2.2 在地球中心引力场中有控火箭弹的<br>纵向运动方程 .....  | 103 |
| 3.2.3 在地球平面平行引力场里火箭的<br>纵向运动方程 .....   | 105 |
| 3.2.4 侧向和纵向稳定运动的标准线性方程 .....           | 107 |
| 3.2.5 无量纲化自变量的运动方程组 .....              | 112 |
| 3.2.6 以过载形式表示的运动方程 .....               | 113 |
| § 3.3 有控和无控火箭在弹道被动段上运动的<br>数学模型 .....  | 117 |
| 3.3.1 常质量火箭在稠密大气层中的<br>自由运动方程组 .....   | 117 |
| 3.3.2 在大气中飞行器质心纵向运动方程的简化 .....         | 119 |
| 3.3.3 不考虑外部介质阻力时飞行器质心自由<br>运动方程组 ..... | 122 |
| § 3.4 炮弹的自由飞行 .....                    | 125 |
| 3.4.1 矢量形式下的炮弹运动方程 .....               | 125 |
| 3.4.2 B. C. 普加乔夫形式下的炮弹运动方程 .....       | 129 |
| 3.4.3 章动角较小时炮弹的空间运动方程 .....            | 135 |
| 检查题 .....                              | 137 |

## 第二部分 飞行器运动数学模型的研究和 外弹道问题的解法

### 第四章 火箭和炮弹的运动稳定性

|                                        |     |
|----------------------------------------|-----|
| § 4.1 运动稳定性的一般概念及火箭和炮弹的<br>运动稳定性 ..... | 139 |
|----------------------------------------|-----|

|       |                                  |     |
|-------|----------------------------------|-----|
| 4.1.1 | 火箭和炮弹的弹道稳定性 .....                | 139 |
| 4.1.2 | 稳定无控火箭和炮弹的方法 .....               | 141 |
| § 4.2 | 李雅普诺夫运动稳定性 .....                 | 146 |
| 4.2.1 | 李雅普诺夫运动稳定性的定义 .....              | 146 |
| 4.2.2 | 李雅普诺夫第一方法和一级近似稳定性 .....          | 148 |
| 4.2.3 | 李雅普诺夫第二方法 .....                  | 151 |
| § 4.3 | 高速旋转弹的运动稳定性 .....                | 156 |
| 4.3.1 | 在弹道起始段上弹丸相对质心运动方程<br>的首次积分 ..... | 156 |
| 4.3.2 | 弹丸角运动稳定性的必要条件 .....              | 158 |
| 4.3.3 | 炮弹运动的李雅普诺夫稳定性一般问题 .....          | 160 |

## 第五章 外弹道方程的数值积分和电子计算机的应用

|       |                               |     |
|-------|-------------------------------|-----|
| § 5.1 | 步进积分法及其实际应用 .....             | 166 |
| 5.1.1 | 差分法数值积分 .....                 | 166 |
| 5.1.2 | 计算精度和积分步长的选取 .....            | 174 |
| 5.1.3 | 利用电子计算机求解外弹道基本问题 .....        | 176 |
| 5.1.4 | 飞行器运动方程计算机积分程序的编制 .....       | 177 |
| § 5.2 | 飞行器运动过程的模拟仿真 .....            | 181 |
| 5.2.1 | 利用模拟计算机求解外弹道问题 .....          | 181 |
| 5.2.2 | 利用电子模拟机研究常质量尾翼弹纵轴的摆动<br>..... | 182 |

## 第六章 外弹道问题的近似解法和表解法

|       |                               |     |
|-------|-------------------------------|-----|
| § 6.1 | 不考虑空气阻力的解析方法 .....            | 187 |
| 6.1.1 | 抛物线理论 .....                   | 187 |
| 6.1.2 | 椭圆理论 .....                    | 190 |
| 6.1.3 | 计算火箭最大飞行速度的齐奥尔科夫斯基公式<br>..... | 197 |
| § 6.2 | 常质量弹丸弹道的近似计算方法 .....          | 199 |

|            |                                     |            |
|------------|-------------------------------------|------------|
| 6.2.1      | 采用解析函数表示空气阻力的解法 .....               | 199        |
| 6.2.2      | 假速度法 主要函数和辅助函数 .....                | 202        |
| 6.2.3      | 弹道相似和表解法 .....                      | 207        |
| <b>第七章</b> | <b>外弹道最优问题的求解 .....</b>             | <b>210</b> |
| § 7.1      | 外弹道边值问题 .....                       | 211        |
| 7.1.1      | 外弹道两点边值问题 .....                     | 211        |
| 7.1.2      | 在有控飞行边值问题中确定多点曲线问题的<br>提法 .....     | 213        |
| § 7.2      | 外弹道学逆问题 .....                       | 215        |
| 7.2.1      | 飞行动力学逆问题的概念 .....                   | 215        |
| 7.2.2      | 基于逆问题概念的有控飞行动力学边值问题的<br>求解 .....    | 216        |
| 7.2.3      | 在求解身管武器外弹道逆问题时射程参数控制的<br>近似确定 ..... | 217        |
| § 7.3      | 最简单的基准运动规划极值问题 .....                | 220        |
| 7.3.1      | 弹道式轨道最优射角的确定 .....                  | 220        |
| 7.3.2      | 有控尾翼弹水平滑翔的最大射程 .....                | 222        |
| § 7.4      | 火箭动力学和外弹道学中的变分问题 .....              | 225        |
| 7.4.1      | 变分计算和最优控制问题的提法和分类 .....             | 225        |
| 7.4.2      | 基于经典变分法的基准运动最优规划 .....              | 228        |
| 7.4.3      | 根据极大值原理确定飞行器的最优控制运动 ...             | 234        |
| 7.4.4      | 用动态规划法计算滑翔飞行器最大飞行<br>斜距弹道 .....     | 240        |
| <b>第八章</b> | <b>火箭和弹丸的角运动 .....</b>              | <b>246</b> |
| § 8.1      | 旋转稳定弹相对质心的运动 .....                  | 246        |
| 8.1.1      | 在仅有翻转力矩作用时弹丸的角运动 .....              | 246        |
| 8.1.2      | 弹丸角运动稳定性的充分条件 .....                 | 257        |
| 8.1.3      | 作用力的构成对旋转稳定弹运动稳定性的                  |            |

|                                              |     |
|----------------------------------------------|-----|
| 影响 .....                                     | 262 |
| § 8.2 尾翼弹和迫击炮弹相对质心的运动 .....                  | 268 |
| 8.2.1 尾翼式旋转弹的角运动 .....                       | 268 |
| 8.2.2 尾翼式非旋转弹的运动 .....                       | 271 |
| § 8.3 尾翼式旋转弹的共振 .....                        | 273 |
| 8.3.1 外形、质量轻微不对称及推力偏心对尾翼式<br>旋转弹角运动的影响 ..... | 273 |
| 8.3.2 稳定共振旋转的研究 .....                        | 276 |
| 8.3.3 共振旋转状态的稳定性 .....                       | 279 |
| § 8.4 沿弹道降弧段的自由飞行 .....                      | 284 |
| 8.4.1 飞行器再入大气层的运动 .....                      | 284 |
| 8.4.2 飞行器再入大气层时角运动的定性分析 .....                | 288 |
| 检查题 .....                                    | 292 |

## 第三部分 飞行器的扰动运动和散布特征的确定

### 第九章 外弹道修正公式和扰动弹道计算

|                                           |     |
|-------------------------------------------|-----|
| § 9.1 修正理论的基本原理 .....                     | 293 |
| 9.1.1 修正的概念 .....                         | 293 |
| 9.1.2 修正理论基本公式 .....                      | 294 |
| 9.1.3 一定参数的定性影响及弹道导数的符号 .....             | 296 |
| 9.1.4 初始质量改变时火炮弹丸射程的变化 .....              | 299 |
| § 9.2 弹道诸元改变量和弹道导数的计算方法 .....             | 300 |
| 9.2.1 利用积分运动方程的方法确定弹道诸元改变量<br>和修正系数 ..... | 300 |
| 9.2.2 利用积分偏差微分方程的方法确定<br>修正系数 .....       | 304 |
| 9.2.3 共轭偏差方程组及其解 .....                    | 309 |
| 9.2.4 由弹道相似条件确定修正系数 .....                 | 311 |