

《近代兵器力学》丛书

弹箭飞行动力学

Flight Dynamics of Missiles

徐明友 著

国防工业出版社

图书在版编目(CIP)数据

弹箭飞行动力学/徐明友著. —北京:国防工业出版社, 2003. 1

(近代兵器力学丛书)

ISBN 7-118-02908-4

I. 弹... II. 徐... III. ①枪弹—外弹道—飞行力学②炮弹—外弹道—飞行力学 IV. TJ012.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 050389 号

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)

北京奥隆印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 850×1168 1/32 印张 7¼ 191 千字

2003 年 1 月第 1 版 2003 年 1 月北京第 1 次印刷

印数:1—1500 册 定价:19.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

致 读 者

本书由国防科技图书出版基金资助出版。

国防科技图书出版工作是国防科技事业的一个重要方面。优秀的国防科技图书既是国防科技成果的一部分,又是国防科技水平的重要标志。为了促进国防科技和武器装备建设事业的发展,加强社会主义物质文明和精神文明建设,培养优秀科技人才,确保国防科技优秀图书的出版,原国防科工委于1988年初决定每年拨出专款,设立国防科技图书出版基金,成立评审委员会,扶持、审定出版国防科技优秀图书。

国防科技图书出版基金资助的对象是:

1. 在国防科学技术领域中,学术水平高,内容有创见,在学科上居领先地位的基础科学理论图书;在工程技术理论方面有突破的应用科学专著。

2. 学术思想新颖,内容具体、实用,对国防科技和武器装备发展具有较大推动作用的专著;密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的高新技术内容的专著。

3. 有重要发展前景和有重大开拓使用价值,密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的新工艺、新材料内容的专著。

4. 填补目前我国科技领域空白并具有军事应用前景的薄弱学科和边缘学科的科技图书。

国防科技图书出版基金评审委员会在总装备部的领导下开展工作,负责掌握出版基金的使用方向,评审受理的图书选题,决定资助的图书选题和资助金额,以及决定中断或取消资助等。经评审给予资助的图书,由总装备部国防工业出版社列选出版。

国防科技事业已经取得了举世瞩目的成就。国防科技图书承担着记载和弘扬这些成就,积累和传播科技知识的使命。在改革开放的新形势下,原国防科工委率先设立出版基金,扶持出版科技图书,这是一项具有深远意义的创举。此举势必促使国防科技图书的出版随着国防科技事业的发展更加兴旺。

设立出版基金是一件新生事物,是对出版工作的一项改革。因而,评审工作需要不断地摸索、认真地总结和及时地改进,这样,才能使有限的基金发挥出巨大的效能。评审工作更需要国防科技和武器装备建设战线广大科技工作者、专家、教授,以及社会各界朋友的热情支持。

让我们携起手来,为祖国昌盛、科技腾飞、出版繁荣而共同奋斗!

**国防科技图书出版基金
评审委员会**

国防科技图书出版基金

第四届评审委员会组成人员

名誉主任委员 陈达植

顾问 黄 宁

主任委员 刘成海

副主任委员 王 峰 张涵信 张又栋

秘书长 张又栋

副秘书长 彭华良 蔡 镭

委员 于景元 王小谟 甘茂治 冯允成
(按姓名笔画排序)

刘世参 杨星豪 李德毅 吴有生

何新贵 佟玉民 宋家树 张立同

张鸿元 陈火旺 侯正明 常显奇

崔尔杰 韩祖南 舒长胜

《近代兵器力学》丛书组织结构 编辑委员会

主任委员 蓝祖佑

副主任委员 陈鹏飞 杨葆新 李魁武

委员 马春茂 王玉林 王光华 朵英贤
(按姓名笔画排序) 刘 铭 杨楚泉 来渝生 吴三灵
邱晓华 胡国强 恽寿榕 徐明友
崔士义

编辑部

主编 朵英贤 马春茂

副主编 吴三灵 杨楚泉 恽寿榕 徐明友

责任编辑 康新中

序

力学作为一门工程技术的重要基础学科,在各行各业得到了广泛应用,现已发展成为多种类别的应用力学,兵器力学就是其中之一。建国以来尤其是近二十年来,兵器工业在基础研究、预先研究以及型号研制等方面取得了突破性进展,很多科研成果达到了国内外先进水平,也积累了不少经验和教训。为了总结、升华已有的科研成果,使之形成新的、系统的兵器力学理论体系,推动今后兵器科研和设计理论的发展,跟踪国际先进水平,我们编纂出版了这套《近代兵器力学》丛书。

《近代兵器力学》丛书,从力学角度覆盖了兵器系统的典型力学问题,总结了国内外装甲车辆、火炮与自动武器、弹道、爆炸与冲击等力学方面的成就。每一册都是由各专业领域内具有丰富实践经验和较高学术水平的专家学者进行撰著。本套丛书不仅包含了理论研究还有试验研究,重点突出了相关专业领域内的新理论、新原理和新技术的发展,基本反映了当前国内外兵器发展中应用工程力学的广度和水平,具有较高的理论水平和工程应用价值。

1998年冬,中国工程院院士朵英贤倡议编纂本套丛书,首先得到国防科技图书出版基金委员会办公室的支持,也得到中国兵器工业第二〇二研究所的积极响应并承担组织工作。经过专家学者们两年来的辛勤劳动,《近代兵器力学》丛书正式开始出版,这是一件很有意义的事情,得到了各级领导的重视和支持,受到了广大兵器科技工作者的欢迎;这一套丛书的出版必将为力学理

论基础到工程实践应用都给现代兵器的研制提供理论的指导方向，必将对兵器研制的现代化起到积极的推动作用。

A stylized handwritten signature in black ink, consisting of several fluid, connected strokes. The characters appear to be '丁世忠' (Ding Shizhong).

2001 年元月

序

自从戈矛进化到火器,兵器(不论是枪械、火炮、坦克、战术火箭和导弹)便以发射抛射物来毁伤目标。发射动力主要来源于火药,毁伤能量主要依靠抛射物的动能或是炸药含能(直接爆炸或抛出毁伤元)。能量的转换便以内弹道、外弹道、终点弹道递次进行。兵器的载体可以不同,如运动体、战车、飞机、舰船等,这种能量转换模式却不改变。发射抛射物直到对目标的毁伤是一种大功率高瞬态的能量转换。弹丸对目标的撞击、炸药爆炸、内弹道、外弹道等则是纳秒、微秒、毫秒级的过程。发射时兵器本身也受到高强度的激励。自从经典内弹道学建立的 100 多年来,随着火药力和炸药能量的提高,这种特征日益明显,并以高瞬态的力学过程映射出来,也就日益有别于其他工程领域。有人说,兵器领域是“瞬态力学大户”,此言不虚!本套《丛书》归纳了 20 世纪后叶兵器力学的主要成果,其中不乏我国学者的贡献。每个分册的作者都是该领域中的卓有成效者。

工程实践和理论基础是兵器发展的两个巨轮,而理论基础则依赖于对工程实践的认识和提高,并用以指导后期的工程实践。20 世纪 60 年代,我国兵器已进入自行研制,那是鄙薄技术最严重的时期,漫长的岁月,理论工作被荒芜,很多在工程中已成功的经验不能总结升华,这给兵器力学的发展带来严重后果,也给兵器发展带来不利影响。所幸的是改革开放以来,已有很大的弥补,《丛书》中相当的篇幅是这一时期的结晶。毕竟,研究瞬态力学有其很大的难度,过程短暂、幅值很高、频域很宽,非线性问题多、信号采集困难、费用消耗大等因素制约着发展。即使这样,经过 20 多年的知识积淀及相邻学科的带动,给设计观念带来很大的变化,并运

用于产品研制。但是,也要看到这套《丛书》只是反映了兵器力学中的一部分。譬如,动态强度篇幅较少,在高速碰撞下材料的特性如何变化尚处于假设。工程中存在的“应力腐蚀”、“氢脆”、镀层强度等力学问题,须在更微观层次中进行研究。兵器中已大量应用非金属复合材料,但本构关系不甚清楚。至于用力学来描述高速破片对目标的创伤过程,目前远不成熟。等等。现在,纳米技术已进入社会,也逐步贴近兵器,那么兵器这种通过高爆能量转换和高动力发射的模式,会不会成为应用纳米技术使武器小型化的障碍?兵器力学中真有没完没了的事情,任重道远!

如此说来,这套《丛书》只是一个开头,希望这项工作能够获得延续。我更希望兵器力学研究的现状能够得到改进,使它发挥应有的推动作用。

中国工程院院士

果美贤

2000年12月

前 言

弹箭飞行动力学或外弹道学是研究弹箭在空中运动规律及总体性能的科学,其研究对象是无控及有控弹箭等飞行体。弹箭的运动状态是由弹箭的主要结构参数、弹体外形、发射条件以及飞行环境所决定的,对有控弹箭,则还与控制机构密切相关。可见,欲使弹箭具有良好的弹道性能,就需要对运动规律及其影响因素进行综合分析,以获得良好的设计参数及相应的最佳运动状态。

在兵器与科学领域,惟有国际弹道学会这一学术组织活跃于世界舞台。各先进工业国均有规模可观的弹道研究机构 and 实验设备,直接为军方探索新型武器的原理方案,为新式兵器的研制奠定可靠的基础。外弹道学贯穿于武器系统论证、研制、试验、性能评估、生产、存储和部队使用等各个环节,是兵器与多种基础学科的有机结合。它是建立在运动稳定性、振动理论、多体系统动力学、空气动力学及流体力学、气象学等学科基础之上的,又依赖于现代控制论和计算技术的发展,并与测量技术密切相关。

近二十多年来,外弹道学得到了快速的发展。撰写本书的目的,就是要反映我国现代兵器飞行动力学方面的学术水平和科研成果,对兵器技术的发展起推动作用。本书共有八章。第一章弹箭在空中的运动模型,建立了形式紧凑的矢量矩阵表示的弹箭通用运动方程组,适用于快速电子计算机运算,并给出了各坐标系之间简明的相互关系,便于精确地由基本转换矩阵将任一坐标系内的力、力矩和运动方程,转换到其他选定的坐标系中,而且适应现代兵器研制的需要,突破了刚体弹道的框架,拓展到柔体弹道模型,并将四元数运用于飞行动力学领域。第二章全面地论述了弹

箭飞行稳定性,首次采用李雅普诺夫直接法推导动稳定条件,给出了动力平衡角新的计算公式和弹箭稳定性设计方法,对非线性运动稳定性做了精练的阐述。第三章给出弹箭膛内运动新的模式,导出了被动控制原理方面的重要公式,建立了计算起始扰动及揭示发射过程中弹箭运动状态的多体动力学模型,该模型在具有管弹间隙条件下,考虑了碰撞及火力系统各部分的运动状态,做了全面的力学描述。第四章将有控弹道与无控弹道构成一个统一的体系,揭示了它们的共性,重点论述了最优制导律、稳定性,以及简控火箭弹道和末敏弹弹道的特点。其中动稳定性判据是作者的最新研究成果。第五章开辟了随机弹道学这一篇章,给出无控弹箭散布计算的通用公式。首次给出了南京风场规律并与国外风场模型加以对比;建立了随机过程的弹道模型。阐述了统计线性化及仿真方法,在型号设计中可直接采用。该方法在其他学科领域亦有广泛用途。第六章伞弹运动用凯恩方法成功地建立了紧凑的运动方程,以实例计算出了运动参量的变化规律。第七章简明地给出了弹箭水弹道的研究成果,尤其利用四元数计算出了大姿态角条件下的运动规律,其中的运动模型突破了平面假设的限制。第八章外弹道优化设计作为弹箭总体设计的中心环节,是一项专业性很强的系统工程;而且对各类弹箭型号不能千篇一律。对此以尾翼火箭为典型范例,阐述了优化设计的基本原理和方法。

本书立足于弹箭飞行动力学的学科前沿,提供有实用价值的新理论、新方法,其中包括作者 40 年从事教学和科研所积累的知识,尤其是近年来在科研中所建立的一系列弹箭运动模型和推导出的大量解析公式,将这些毫无保留地奉献给祖国的国防事业。我的部分学生为本书的内容做出了贡献,他们是:金友兵博士、徐直军博士、韩珥礼博士、陈熙博士、臧涛成博士、沈坚平博士、骆连珍博士、丁松滨博士、李磊博士、许多生博士、王申博士,以及芮筱亭教授、薛晓中教授、王良明教授、阮仲皋教授等。朵英贤院士、宋丕极教授、康新中研究员审阅了本书主要内容;马殿荣将军(教授)、李鸿志院士为本书的学术内涵提出了宝贵意见;《近代兵器力

学》丛书编委会和南京理工大学的领导给予了热情支持和帮助,在此对他们表示诚挚的感谢!一切有志于弹箭飞行动力学研究的学者们,必将为兵器科学的发展做出杰出贡献。限于作者水平,尚存问题在所难免,敬请读者不吝赐教。

徐明友

2002 年 2 月于南京理工大学

目 录

第一章 弹箭在空中的运动模型	1
1.1 坐标系、参考基及坐标变换	1
1.2 作用于弹箭上的力和力矩	7
1.3 弹箭一般运动方程	13
1.4 弹体有限转动张量	20
1.5 弹体有限转动四元数	21
1.6 四元数形式的运动方程	24
1.7 弹体弯曲变形条件下的气动力	29
1.8 柔体弹道模型	33
第二章 弹箭运动稳定性	39
2.1 李雅普诺夫意义下的稳定性	39
2.2 弹箭角运动方程的复数形式	41
2.3 用李雅普诺夫直接法建立弹箭飞行动稳定条件	45
2.4 攻角二圆模式	48
2.5 动稳定性分析	51
2.6 受迫运动的稳定性	54
2.7 弹箭稳定性设计	56
2.8 非线性稳定性简介	60
第三章 发射过程中的弹箭运动	65
3.1 炮弹在膛内的运动模型	65
3.2 碰撞模型	71
3.3 火箭在膛内的运动模型	74
3.4 被动控制原理	77

3.5	发射过程中的矢量描述	80
3.6	图论及 R/W 方法的应用	84
3.7	算例	90
第四章	制导兵器弹道	97
4.1	导弹运动方程	97
4.2	扰动运动方程	98
4.3	控制方程	98
4.4	制导律	99
4.5	滚转导弹的稳定性	106
4.6	筒控火箭弹道	112
4.7	末制导炮弹弹道	116
第五章	随机弹道学及数值仿真方法	118
5.1	弹箭角运动的通用公式	118
5.2	南京风场规律与国外风场模型	122
5.3	弹箭运动的随机过程	128
5.4	外弹道学中的成形滤波器	130
5.5	统计线性化及 CADET 方法	134
5.5	SLAM 方法	139
第六章	伞弹运动	144
6.1	参考基及坐标变换	144
6.2	作用力和力矩	147
6.3	拉直段弹道	147
6.4	充气段弹道	149
6.5	凯恩动力学模型	151
6.6	运动学方程	159
6.7	末敏弹弹道	161
6.8	计算实例	162
第七章	水弹道	166
7.1	概述	166
7.2	参考系	166

7.3 各坐标系间的关系	168
7.4 受力分析	169
7.5 运动方程	173
7.6 入水弹道	183
7.7 有控弹道及四元数的应用	187
第八章 外弹道优化设计原理	195
8.1 概述	195
8.2 优化设计中的随机弹道模型	200
8.3 火箭弹道总体优化分析	204
8.4 无控火箭减小散布的优化设计	207
8.5 单独推力加速度的优化	211
8.6 转速规律优化	214
8.7 尾翼延迟张开时间的优化	217
8.8 尾翼式火箭总体参数优化	220
参考文献	223

Contents

Chapter 1. The Motion Model of Missiles Both in the	
Air and in Space	1
1.1 Reference System and Translation of Coordinates	1
1.2 Forces and Moments on Missiles	7
1.3 General Dynamical Equations of Missiles	13
1.4 Limited Spin Tensor of Projectil Body	20
1.5 Quaternion of Spin Projectil	21
1.6 The Motion Equations in the Form of Quaternion	24
1.7 Aerodynamic Forces Acting on the Flexible	
Bending Projectil	29
1.8 Ballistic Model of the Flexible Body	33
Chapter 2. The Motion Stability of Missiles	39
2.1 Liapunov's Stability	39
2.2 The Angle Motion Equation in the Plural Form	41
2.3 Dynamic Stability Criteria Derived by	
Liapunov's Direct Method	45
2.4 Two Circles Model of Angular Motion	48
2.5 Analysis of Dynamic Stability	51
2.6 Stability of Forced Vibration	54
2.7 Stability Design of Missiles	56
2.8 Brief of Nonlinear Stability	60
Chapter 3. The Motion of Missiles During Launching	65
3.1 The Model of Motion of Artillery Projectile	