

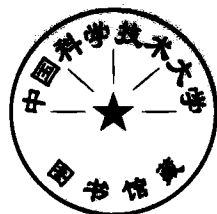
多体系统 发射动力学

芮筱亭 等编著

国防工业出版社

多体系统发射动力学

芮筱亭 等著



国防工业出版社

·北京·

(京)新登字 106 号

图书在版编目(CIP)数据

多体系统发射动力学 / 芮筱亭等著. —北京: 国防工业出版社, 1995. 5

ISBN 7-118-01359-5

I. 多… II. 芮… III. 多体系统-导弹发射-动力学 IV. TJ760.13

中国版本图书馆 CIP 数据核字(94)第 10564 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)

北京怀柔新华印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 850×1168 1/32 印张 7 $\frac{1}{8}$ 175 千字

1995 年 5 月第 1 版 1995 年 5 月北京第 1 次印刷

印数: 1—1000 册 定价: 11.30 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,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. 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,对国防科技发展具有较大推动作用的专著;密切结合科技现代化和国防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,密切结合科技现代化和国防现代化需要的新工艺、新材料内容的科技图书。
4. 填补目前我国科技领域空白的薄弱学科和边缘学科的科技图书。
5. 特别有价值的科技论文集、译著等。

国防科技图书出版基金评审委员会在国防科工委的领导下开展工作,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，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工业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
第二届评审委员会组成人员

名誉主任委员	怀国模		
主任委员	黄宁		
副主任委员	殷鹤龄	高景德	陈芳允
	曾铎		
秘书长	刘瑄德		
委员	尤子平	朱森元	朵英贤
(按姓氏笔划为序)	刘仁	何庆芝	何国伟
	何新贵	宋家树	张汝果
	范学虹	胡万忱	柯有安
	侯迁	侯正明	莫梧生
	崔尔杰		

序 1

芮筱亭等同志合著《多体系统发射动力学》，以物理概念和工程技术的实际为定解条件和边界条件，建立了多种情况下的动态方程式，为多体系统发射建立了理论基础，其中后四章是本书显著的技术进步部分，在国内外属首创，其应用前景广阔。

全书立论力求有据，公式推导严谨。在数学描述方法上，采用了矩阵，便于进入计算机运算，获得数值解。只有固有振动频率的获得，才有避免共振发生的可能。可用错开固有振动频率，使不发生共振，或用阻尼结构限制共振幅低于规范要求。如发生共振又不采取措施，重则会使发射系统结构损伤，轻则造成内弹道结束时，带给外弹道很恶劣的起始姿态条件，导致射击密集度大幅度降低。

理论可指导实践，反过来实践可检查理论的正确性并完善理论。笔者认为：本书研究的动态内容，将使多体系统发射的设计，登上一个新台阶。实践、认识；再实践、再认识，这一深化认识，提高技术水平的过程，无疑的将获得缩短，并提前在新武器的研制中得到广泛运用。

谢光选*

1993年8月28日

* 谢光选教授：战略导弹和运载火箭专家，长征三号运载火箭总设计师、中国科学院院士、国际宇航科学院院士。

Preface One

The works "Launch Dynamics of Multibody Systems" written by Dr. Rui Xiaoting and co-authors took physical conception and engineering reality as conditions of decidable solution and boundary, developed dynamic equations suitable for various cases and a theoretical base for the launch of multibody systems. Especially, the contents of later four chapters in the book are remarkable technology achievements originated in the world and have broad prospects in practical application.

The foundation reasoning and formulas deriving from the book are made strictly and rigorously. Because of using the matrix method in mathematical description, it is easy to compute and obtain numerical solutions. It is possible to avoid resonance only by obtaining natural frequency of vibration. Resonance can be avoided by staggering the natural frequencies of vibration, or using the damped structures are used to limit amplitude and make it smaller than the standard. If the resonance takes place and measures are not taken, it would do structure damage to the launch systems, or bring adverse initial disturbance of exterior ballistics, causing a great decrease of precision of fire.

Theory may guide practice, vice versa, and practice may examine the correctness of the theory and perfect it. I think that the dynamics stated in this book will enable the design of multibody systems to raise to a new stage. It will undoubtedly shorten the process deepening cognition——practice, cognition, practice again, cognition again——and improve technology level and will be used widely in developing new weapons in advance.

Xie Guanxuan

Professor of Launch Vehicle

Member, Chinese Academy of Sciences

Member, International Academy of Astronautics

Aug. 28, 1993

序 2

论著《多体系统发射动力学》在武器系统发射动力学方面取得多项富有创造性的研究成果,其中包括:系统地建立了统一形式的弹丸运动微分方程,与数值计算结果符合良好;发展了弹丸起始扰动理论;创造性地将传递矩阵法应用于多体系统振动;以及转管武器发射动力学的建模与求解等等。

论著是作者多年来的研究成果,具有重要的理论与实际意义,是一本优秀专著。

黄克智*

1993年9月20日

* 黄克智教授:力学家,《力学学报》主编、亚洲断裂组织主席、国际断裂学会副主席、中国科学院院士。

Preface Two

The works "Launch Dynamics of Multibody Systems" obtained many creative achievements in launch dynamics of weapon systems, including; systematical deducing the unified differential equations of projectile motion, and showing good agreement of theories with compute results; developing theories of projectile initial disturbance; creatively applying the matrix method in multibody system vibration; modeling and solving the launch dynamics of a spin tube weapon, etc. .

The book reflects achievements of authors studying for many years, it is an excellent works of important significance in both theory and practice.

Huang Kezhi

Professor of Mechanics

Member, Chinese Academy of Sciences

Vice President, International Congress on Fracture

Sept. 20, 1993

序 3

发射动力学是一门针对性很强的工程技术学科,是当代兵器科学关注的热点。它要寻找弹丸在膛内、外的运动规律,研究弹丸和炮膛的相互作用,研究影响弹丸运动的各种因素,最终目标就是为设计和使用弹炮系统提供理论基础和实用指导,使其能达到最好的射击命中率。作者近数年来在这个领域做了系统的研究,得到许多有意义的创造性成果:包括建立了非对称弹丸在膛内和后效期内的运动微分方程;研究了弹丸膛内的运动规律,澄清了至今尚有争议的弹丸逆进动问题;研究了渐速膛线武器的弹丸起始扰动问题;首次考虑了火药气体对弹丸作用力大小和作用点的变化;在研究多体火炮系统的振动特性中提出了多体系统振动的传递矩阵法,这个方法较之有限元法和传统的动力学方法,有简捷、高效、工作量小、易于抓住问题的整体和本质的特点,对力学理论也是一大创新,其应用前景广阔;首次研究了转管武器的振动特性。

作者的这些研究结果,许多已公开发表,得到了学术界的肯定。这本专著填补了国内外多体系统发射动力学理论专著的空白,并形成了独具特色的理论体系,是一本应用数学和力学与兵器工程结合得很好的模范。作者的研究具有很强的科学性、开拓性、先进性和实用性。其结果将产生很大的社会效益,将为推动发射动力学的发展起到重要作用,具有重要的理论和实用价值,是对加强我国国防建设的重要贡献。

郭仲衡*

1993年8月24日

* 郭仲衡教授:应用数学和力学家,中国科学院院士、波兰科学院院士。他解决了国际长期未解的伸缩张量率表达问题,被国际上称为“郭氏速率定理”。

Preface Three

Launch dynamics is an engineering technology field with a strong aim and focus of modern weapon science. It wants to find the laws of projectile moving in and out of the bore, study the interaction between the projectile and the gun bore, study various factors effecting projectile motion. Its ultimate aim is to provide theoretical bases and practical guides for the design and use of projectile—gun systems, and gain the best fire percentage of hits. In recent years, the authors studied systematically in this field and acquired a lot of significant creative achievements, including: developing differential equations of unsymmetric projectile motion in the bore and ulterior period; studying the laws of projectile motion in the bore; clarifying the problem of projectile counter clockwise precession—— a disputed subject at home and abroad; studying the projectile initial disturbance of increasing twist rifled bore weapon; considering the changes of quantities and positions of the propellant gas pressure acted on the projectile for the first time; studying the vibration characteristics of spin tube weapon for the first time; on the basis of studying the vibration characteristics of multibody gun systems, putting forward the Transfer Matrix Method of Multibody System Vibration. In comparing with finite element method and traditional dynamic methods, this method has the following advantages: it is simple and direct, very effective, computational scale is small, and it is easy to know the whole nature of problems. It is a great discovery in mechanical theory too, and it will have broad prospects in practical applications.

Many of the authors' research achievements have been publicly published and affirmed by the academic field. This book fills in the gap of theoretical works of launch dynamics of multibody systems at home and abroad, evolves the theoretical system with a distinguishing feature,

is a good model applying the mathematics and mechanics and combined them with ordnance engineering. The authors' achievements are very scientific, initiative, advanced and practical. The achievements will produce great social benefit, play an important role in the development of launch dynamics, have significant value in both the theory and practice, and makes a great contribution for strengthening the national defense.

Guo Zhongheng

Professor of Applied Mathematics and Mechanics

Member, Chinese Academy of Sciences

Member, Polish Academy of Sciences

Aug. 24, 1993

前 言

发射动力学是研究武器系统在发射过程中的受力及运动规律,进而研究控制受力与运动规律的一门新兴学科。它与包含内弹道、外弹道、中间弹道的整个弹道学和气体动力学、空气动力学以及火炮动力学经典理论和近代科技发展密切相关。弹丸起始扰动理论和武器系统振动特性问题是其核心内容之一。

本书共分九章。第一章对发射过程中的弹丸进行了受力分析,导出了弹丸受力解析表达式;第二章建立了统一形式的弹丸发射动力学方程;第三、四、五章研究了等齐膛线、渐速膛线、滑膛炮系统弹丸在发射过程中的运动规律;第六章研究了弹炮系统的固有振动特性和炮管受力问题;第七章建立了多(刚、弹性)体系统振动的传递矩阵法,并将其应用于多体火炮系统固有振动特性的研究;第八章建立了多(刚、弹性)体阻尼系统振动的传递矩阵法,并将其应用于弹丸运动与多体火炮系统振动相互影响的研究;第九章研究了转管武器发射动力学问题。

由于发射动力学的内容和形式都十分浩繁,发射动力学领域中的文献又浩瀚如海,而且处于不断的进展状态,所以本书未直接引用的文献一般将不予列出。本书的若干部分,已分别在近几年所发表的 50 多篇论文中进行了论述,限于篇幅,本书将只给出这些问题的数学、力学模型和结果,而不再讨论其细节。

参加本书编著工作的还有邱凤昌教授、徐明友教授、隋文海研究员、吴景忱研究员、邵允中工程师,以及秦英孝高工、伊增琪高工、石永亮同志。国际著名运载火箭专家、中国科学院院士、国际宇航科学院院士谢光选教授,国际著名应用数学和力学家、中国科学院院士、波兰科学院院士郭仲衡教授,国际著名力学家、《力学学

报》主编、国际断裂学会副主席、中国科学院院士黄克智教授，审阅了本书全稿，在本书撰写过程中给予了热情指导、支持与帮助，并为本书作了序。傅效山教授、张延教教授、陆毓琪副教授、刘正福副教授、董殿军教授、俞占鸿副教授、曾仕伦副研究员在本书撰写过程中提供了帮助，浦发教授、吴侃章研究员、张月林教授、郭锡福教授、陈滨教授、梅凤翔教授、郑兆昌教授、贾书惠教授、黄文虎教授、张阿舟教授、汪风泉教授、张令弥教授、卓家寿教授、杨岙生教授等审阅了本书初稿，他们在百忙中给予了很大的支持和鼓励，在此一并致以衷心的感谢。感谢国防科技预研基金和跨行业基金的资助，感谢南京理工大学科研基金和科技论著奖励基金的资助，感谢各界学者专家的资助及各方面的帮助。

芮筱亭

1993年8月

目 录

概论	1
§ 1 发射过程概述	1
§ 2 发射动力学的研究对象、任务和作用	2
§ 3 发射动力学目前研究状况	3
§ 4 本书的特色	7
第一章 运动弹丸受力分析	10
§ 1 引言	10
§ 2 坐标系 坐标变换	11
§ 3 弹丸质量、速度和加速度分布	21
§ 4 弹丸在膛内所受的力及力矩	27
§ 5 弹丸在后效期内所受的力及力矩	42
第二章 统一形式的弹丸发射动力学方程	44
§ 1 引言	44
§ 2 弹丸膛内运动状态的判据	45
§ 3 约束方程一览	46
§ 4 刚体碰撞公式	47
§ 5 Dubowsky 模型	49
§ 6 渐速膛线炮和滑膛炮弹炮碰撞公式	50
§ 7 统一形式的弹丸发射动力学方程	53
§ 8 弹丸在滑膛炮内的运动微分方程	61
§ 9 渐速膛线身管内的弹丸运动微分方程	63
§ 10 弹丸在后效期的运动微分方程	66
第三章 一类复变系数微分方程的解 ——前定心部未接触膛壁时及后效期内的	