

火炮系统动力学 Gun System Dynamics

廖新中 吴三畏 马春茂 韩建奎

国防工业出版社

09904766

TJ 301

01

火炮系统动力学

Gun System Dynamics

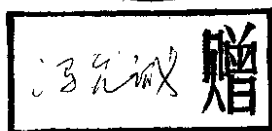
康新中 吴三灵 马春茂 等编著

H1K42/10



TJ 301

01



国防工业出版社



C0469205

图书在版编目 (CIP) 数据

火炮系统动力学/康新中等编著. —北京: 国防工业出版社, 1999. 5

ISBN 7-118-02019-2

I. 火… II. 康… III. 火炮-动力学 IV. TJ3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (98) 第 31603 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 13¼ 331 千字

1999 年 5 月第 1 版 1999 年 5 月北京第 1 次印刷

印数: 1—1000 册 定价: 24.00 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

第三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 崔士义

委 员 于景元 王小谟 尤子平 冯允成

(以姓氏笔划为序) 刘 仁 朱森元 朵英贤 宋家树

杨星豪 吴有生 何庆芝 何国伟

何新贵 张立同 张汝果 张均武

张涵信 陈火旺 范学虹 柯有安

侯正明 莫梧生 崔尔杰

序

西安交通大学陈绍汀教授向我介绍,《火炮系统动力学》是一部很有特色的专著。我有幸先期披阅此书的原稿,深感作者以自己鲜明的观点,结合自己多年的科研成果和解决工程问题的实践经验,综合当今新理论和新技术在火炮工程开发中的应用研究成果而撰写,是一部有较高学术水平的专著。

随着火炮系统提高射击精度、系统优化和动力可靠性的要求,传统的按静力学为主的设计方法已不能适应需要。火炮系统动力学是一门理论性和工程性都很强的学科,是火炮系统实现现代化设计的重要理论基础,但迄今尚未有系统完整的专著问世。此书的出版将会受到有关读者的欢迎,对促进我国提高火炮系统的现代化设计水平,提高火炮射击精度,合理设计强度和刚度,改进系统结构,优化火炮综合性能将起到积极作用。

此书在生动介绍火炮动力学基础理论的基础上,以火炮系统射击精度研究为主线,以实现建造火炮系统的“软件随机模拟样机”和“最优射击精度模型”设计为核心,删节传统设计方法中某些过时的,已被现代计算技术所取代的陈旧内容,而着重引入新理论和新技术及其开发应用,诸如多体系统动力学理论,设计参数灵敏度分析技术,随机模拟理论和复杂冲击分析等,反映了本书具有 90 年代的时代特征。本书在多体理论基础上建立的火炮系统通用动力学模型,是一项创新成果,克服了长期以来传统经典力学“一炮一模”的局限,实现了火炮的自动建模。本书理论紧密结合实际,附有解决工程问题的大量实例,并系统介绍了火炮模态实验、振动测试、复杂冲击分析等的基本理论和方法。本书学术思想新颖,内容科学实用,是一部理论与实际并重的优

秀专著。愿这本专著的出版，对火炮动力学的发展和火炮工程的开发起到积极的推动作用。

黄文虎

1998年7月10日

序

一本系统而全面论述火炮动力学的理论与实验的著作，在本世纪的最后年代里出版了。这是一件非常令人高兴的事。它反映了我国火炮开发设计水平达到了一个新阶段。本书也是作者对自己在长期从事火炮动力学研究和开发工作中所取得的丰硕成果和宝贵经验的一次系统的总结和升华。

这是一本具有很高学术水准的、具有先进技术水平的、以及具有广阔应用前景的专著。作为本书首批幸运的读者，我为自己从本书得到良多教益向作者和国防科技图书出版基金评审委员会表示感谢。

本书所体现的设计思想，是以“最佳射击精度模型”为主线的设计思想。为此，本书详细地考察和分析火炮主要部件和整个系统在一系列发射过程中的相互作用、瞬态运动和动力特性，以及把它们同射击精度联系起来，形成一套火炮系统运动学和动力学分析和仿真，以及动态优化设计的理论和方法，据此来指导设计。所以这是一种以现代理论为基础的先进的设计思想和技术路线。理所当然地，陈旧的理论和被现代计算技术淘汰的方法就进不了本书了。作者在实际研究开发工作中所采用的、得到成功应用的、新的更有效的、更有发展前途的内容，被大量地引入本书。如多体理论、设计参数灵敏度分析、随机模拟理论和复杂冲击分析等最新的学术成就和方法，都在本书中被用来服务于火炮的设计和开发。这一点充分体现出本书的时代特征。

书中在多体理论基础上建立的火炮系统通用动力学模型，是我国火炮动力学中的创新成果。它克服了长期以来习用的传统建

模方法所造成的“一炮一模”的局限，并使各类火炮的自动建模得以实现。这一创造也为其他工业部门的机械系统的自动建模提供了可资借鉴的成功经验和优秀方法。

本书为造就火炮工业下一步所追求的“软件模拟样机”做好了核心的工作，打通了前进的道路。以本书为基础和指导，开发出一批特定功能过程，经过严格考核后形成一批动态连接库，加上与物性、环境等有关的必须由实验提供的数据库，然后再把计算机辅助设计的技术，图形界面和多媒体技术等结合进来，形成一个完整的软件，那么，“软件模拟样机”这一最快、最好、最省、最美的工具就诞生了，届时我国火炮研究和开发工作将会出现一个飞跃。促进这一天的早日到来，才是本书作者的真正目的吧！

可以肯定地说，这本迎接新世纪到来的专著的编写和出版，必将加快我国火炮事业的现代化进程。

陈维丁

1998年7月27日

序

在现代战争中,投入使用的火炮装备总是处在恶劣的外部环境和复杂的工况之中。火炮发射更是一种瞬时、高能、强冲击的复杂过程。为实现向用户提供优良装备的目标,在设计和试制火炮的复杂技术过程中,工程师们始终有两个基本追求,其一是以系统效能为核心的各项性能指标的最佳组合,其二是装备可靠耐用。除了先进的系统集成技术和各相关专业的高新技术以外,火炮动力学理论和实验技术是达成上述目标所采用的有效的技术之一。

无论从环境还是从工况的角度,振动问题始终是影响火炮射击精度、关键部件动力可靠性、炮上仪器功能可靠性、主要零部件强度及使用寿命的关键问题。因而是火炮设计者们最关心的问题之一。

本书的作者们,长期从事火炮动力学理论和实验技术的研究,取得了许多科研成果并且参与解决了装备研制中一些相关的关键技术问题。本书所包含的内容,特别是关于火炮通用动力学模型理论、设计参数灵敏度分析理论、弹炮系统起始扰动理论、发射过程模拟技术以及复杂冲击测试分析技术等,融入了他们的最新研究成果,具有创新性和实用性。为推动我国火炮设计方法尽快地由静态设计转向动态设计,进而实现火炮的“软件模拟样机”和开展“虚拟设计、虚拟制造、虚拟试验”作出了积极的贡献。

愿本书的出版,能为加速振动工程技术在火炮行业中的广泛应用作出应有贡献。

杨葆新

一九九八年六月于咸阳

前 言

随着现代科学技术的发展,机械系统产品开发已进入系统仿真设计阶段。机械系统仿真简称 MSS 技术,其核心是机械系统运动学和动力学仿真软件。把 MSS 技术同 CAD 技术,FEA(有限元分析)技术,优化技术,随机模拟技术等组合在一起,就可实现建造机械系统的“软件模拟样机”。这样,远在实体物理样机制造之前,工程设计人员用“软件模拟样机”就可对产品进行反复“试验”(模拟)和“测试”(分析),全面了解产品性能,优化方案,指导设计。火炮系统动力学的任务之一就是实现火炮系统的 MSS 技术。

火炮系统动力学是一门理论性和工程性极强的应用学科,它的发展和机械振动,有限元理论,多体理论,模态理论,以及试验理论和技术密切相关。火炮动力学研究在我国起步较晚,基本上是在美军多次火炮动力学会议后发展起来的。多体理论的问世,使它得到更迅速的发展。近 20 年来,我国学者和科技工作者发表了不少文章,并结合工程实际解决了许多重大技术问题,为这门学科的发展奠定了一定的基础。为了系统地总结提高这方面的经验,也为了抛砖引玉,我们编写了这本“火炮系统动力学”。

本书基本上是根据作者多年的研究成果和工程实践撰写的,并充分融入了他人的最新成果。全书以火炮系统射击精度研究为主线,按理论研究和实验研究相结合的方法进行编写,把注意力集中在新理论、新技术和新方法(如多体理论,灵敏度分析技术,随机模拟理论和复杂冲击分析技术等)的开发应用上。在内容选材上突出科学性和实用性,在选材叙述上突出启迪性。全书共九章,前六章为理论研究部分,后三章为实验研究部分;其内

容为：火炮振动分析基础，几个较深的炮管振动问题，火炮通用动力学模型理论，设计参数灵敏度分析理论，弹炮系统起始扰动理论，火炮系统发射过程计算机模拟，火炮动力学特性的试验研究，火炮系统振动测试与试验技术，及火炮系统力学参数测试等。

本书前六章由康新中主笔，后三章由吴三灵主笔。马春茂、温波、王宝元分别参加了第六章、第七章和第四章的组稿和编写工作。全书由康新中统稿。

本书惠承中国工程院院士、中国振动工程学会理事长黄文虎教授，中国振动工程学会常务理事、原西安振动工程学会理事长陈绍汀教授，中国兵工学会常务理事、中国兵工学会火炮专业委员会主任委员杨葆新研究员，在百忙中审阅书稿，并为之撰写热情洋溢和寄予厚望的序文，以及陈绍汀教授，方远和教授对本书申请立项给予的热情推荐，深表谢忱。

本书的问世，一直得到朵英贤研究员，马福球研究员的热诚鼓励、关注和支持，作者对他们亦深表谢忱。

感谢王文同高级工程师在本书的立项、撰写和出版过程中给予的大力支持，感谢魏孝达研究员对本书部分初稿的评阅，感谢国防科技图书出版基金评审委员会对本书初稿提出的宝贵意见。本书的撰写出版得到国防科技图书出版基金的资助，以及国防工业出版社给予的支持，谨致谢意。在本书引用的研究成果中，包含了钱福彬研究员，顾国富高级工程师，牛宇浩高级工程师，王茂林高级工程师以及其他同行的辛勤劳动，在此，作者一并表示衷心的感谢。

由于作者水平所限，书中缺点和错误在所难免，恳请专家和读者批评指正。

作 者

1998年8月1日

目 录

第一章 火炮振动分析基础	1
1.1 概述	1
1.2 机械系统振动的数学描述	1
1.3 线性振动系统动态响应的基本组成 伴随自由振 动概念	2
1.4 伴随自由振动引起的拍振现象	4
1.5 冲击型外力引起的响应分析	6
1.6 系统呈静态或动态特性的工程判断	10
1.7 主从系统振动——振动解耦的一种分析方法	11
1.8 系统结构参数改变对其固有频率的影响	14
1.9 转动规范理论——一种建模的新方法	16
1.9.1 引言	16
1.9.2 转动规范理论的基本概念和原理	17
1.9.3 变形体的空间运动	20
1.9.4 变形对整体运动的影响	24
1.10 有限次重复冲击载荷作用下振系的响应特性	27
第二章 几个较深的炮管振动问题	29
2.1 炮管的横向振动	29
2.1.1 炮管横向振动运动方程的普遍形式	29
2.1.2 炮管横向振动运动方程的特点和求解问题	35
2.1.3 炮管振动分析的有限单元法	35
2.2 炮管的径向振动	41
2.2.1 运动方程及定解问题转化	41
2.2.2 自由振动	43

2.2.3 强迫振动	46
2.3 炮管的参数振动——炮管纵向和横向的耦合振动	48
2.3.1 参数振动和参数共振概念	48
2.3.2 炮管的参数振动方程	51
2.3.3 炮管的参数共振分析	53
2.4 炮管的刚—柔耦合动力学模型	55
2.5 移动载荷效应对炮管振动的影响分析	61
2.5.1 在恒速移动载荷作用下炮管的运动方程	62
2.5.2 移动载荷速度对炮管振动的影响分析	64
2.5.3 求解移动载荷效应的小参数法	67
第三章 火炮通用动力学模型理论——多体理论在火炮	
工程中的应用开发	73
3.1 概述	73
3.1.1 用经典力学理论实现火炮通用动力学模型 的缺陷	73
3.1.2 多体系统理论概况和主要方法体系	74
3.1.3 K—H 多体理论简述	74
3.1.4 应用 K—H 多体理论实现火炮通用动力学模型的可行 性分析	74
3.2 系统几何构形的数学描述	75
3.2.1 几个约定	75
3.2.2 系统拓扑结构的数学描述——低序体阵列	76
3.2.3 坐标变换矩阵	78
3.2.4 坐标变换矩阵导数	79
3.2.5 方位坐标描述	80
3.3 系统运动学描述	84
3.3.1 广义速率	84
3.3.2 角速度和偏角速度阵列	85
3.3.3 角加速度和偏角加速度阵列	86
3.3.4 质心位置矢量	86
3.3.5 质心速度和偏速度阵列	88
3.3.6 质心加速度和偏加速度阵列	89

3.4	系统动力学描述	90
3.4.1	广义力	90
3.4.2	偏速度和偏角速度	91
3.4.3	Kane 方程	91
3.4.4	K-H 基本方程	93
3.5	系统的约束处理和数值解法	94
3.5.1	用于数值解法的完整方程组	94
3.5.2	接点、自由度及施加于系统的约束	95
3.5.3	系统接点约束处理	96
3.5.4	数值解法过程和程序设计流程图	98
3.6	系统内力的广义主动力	101
3.6.1	概述	101
3.6.2	“无功”力(矩)概念	101
3.6.3	系统内力的广义主动力	102
3.7	有限段理论	105
3.7.1	引言	105
3.7.2	典型段的几何描述	106
3.7.3	典型段的运动学描述	108
3.7.4	含有柔性体的多体系统 K-H 基本方程	110
3.7.5	段间内力的广义主动力	113
3.8	应用开发实例	115
第四章	设计参数灵敏度分析理论——机械系统动态优化设计的现代方法	119
4.1	概述	119
4.2	基本术语和必要的数学知识	120
4.2.1	基本术语	120
4.2.2	约束最优化问题的 K-T 必要条件	122
4.2.3	隐函数的存在和唯一性定理(隐函数定理)	124
4.3	非线性规划理论	125
4.3.1	非线性规划问题的一般提法	125
4.3.2	非线性规划中的梯度投影法	126
4.3.3	梯度投影法算法	133

4.4	有限维最优设计原理——状态空间灵敏度分析法	134
4.4.1	有限维最优设计问题的数学模型	134
4.4.2	状态空间灵敏度分析法	136
4.4.3	状态空间梯度投影法算法	139
4.4.4	结语	140
4.5	机械系统和结构系统的动态优化设计	141
4.5.1	动态优化设计问题的特点	141
4.5.2	“等价”积分约束概念	141
4.5.3	动态优化设计问题的公式表示法	142
4.6	集中参数系统的设计参数灵敏度分析法	147
4.7	梁式弹性体的设计参数灵敏度分析法	154
4.8	带有间断运动系统的设计参数灵敏度分析法	158
4.8.1	概述	158
4.8.2	用于这类系统的参量描述	158
4.8.3	动态优化设计的公式和一般提法	159
4.8.4	状态空间灵敏度分析法	160
4.8.5	关于伴随方程的求解	165
4.9	应用实例	166
第五章	弹炮系统起始扰动理论	169
5.1	起始扰动概念及其形成过程	169
5.1.1	起始扰动概念	169
5.1.2	起始扰动形成过程	169
5.2	炮管的运动和振动传递给弹丸的加速度	171
5.2.1	力学模型和坐标系	171
5.2.2	公式推导	172
5.3	弹炮系统引起的起始扰动	173
5.3.1	约束期弹轴运动分析	173
5.3.2	半约束期弹轴运动分析	174
5.3.3	后效期弹轴运动分析	180
5.4	起始扰动与射弹散布的关系式	184
5.4.1	起始扰动引起的周期性章动和进动运动	184
5.4.2	起始扰动引起的弹道系数变化	185