

《近代兵器力学》丛书

火炮动力学试验

Test of Gun Dynamics

吴三灵 温波 于永强 等编著

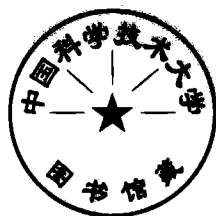
国防工业出版社

《近代兵器力学》丛书

火炮动力学试验

Test of Gun Dynamics

吴三灵 温波 于永强 等编著



国防



·北京·

图书在版编目(CIP)数据

火炮动力学试验 / 吴三灵等编著. —北京:国防工业出版社, 2004. 1

(近代兵器力学丛书)

ISBN 7-118-03273-5

I. 火... II. 吴... III. 火炮 - 试验 - 动力学

IV. TJ301

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 089804 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 10% 276 千字

2004 年 1 月第 1 版 2004 年 1 月北京第 1 次印刷

印数: 1—2500 册 定价: 28.00 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
(按姓名笔画为序)

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》丛书共 14 册,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从力学理论基础

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 handwritten signature in black ink, appearing to read '丁志国' (Ding Zhiguo). The characters are stylized and fluid, with the first character '丁' being particularly prominent.

2001 年元月

序

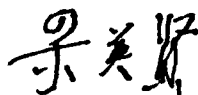
自从戈矛进化到火器,兵器(不论是枪械、火炮、坦克、战术火箭和导弹)便以发射抛射物来毁伤目标。发射动力主要来源于火药,毁伤能量主要靠抛射物的动能或是炸药含能(直接爆炸或抛出毁伤元)。能量的转换便以内弹道、外弹道、终点弹道递次进行。兵器的载体可以不同,如陆地、战车、飞机、舰船等,这种能量转换模式却不改变。发射抛射物直到对目标的毁伤是一种大功率高瞬态的能量转换。弹丸对目标的撞击、炸药爆炸、内弹道、外弹道等则是纳秒、微秒、毫秒级的过程。发射时兵器本身也受到高强度的激励。自从经典内弹道学建立的一百多年来,随着火药力和炸药能量的提高,这种特征日益明显,并以高瞬态的力学过程映射出来,也就日益有别于其它工程领域。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



2000年12月

前 言

随着我国兵器工业的发展,大量复杂的火炮系统动力学问题急需解决。解决这些复杂振动工程问题,一要靠先进的新理论,二要靠先进的试验技术以及理论与试验的集成。我国在振动工程领域已取得了不少成果,部分理论研究和试验研究也具有很高的学术水平。然而,火炮系统动力学行为的试验研究,还没有进行认真的提炼和系统的总结。本书首次提出试验研究动力学的新概念,系统阐述了火炮系统动力行为试验研究的重要性,试验研究的新理论、新技术、新方法和新设备,并结合兵器工业新火炮系统研制过程,介绍了火炮系统动力学行为试验研究的实施技术。

本书是根据作者们长期从事火炮系统动力学理论研究和试验研究,在负责多个型号项目的动力学研究开发任务以及预研项目和基金项目中,解决了产品研制过程中的多项关键技术,取得了多项成果和显著成绩,积累了丰富的工程实践经验,在此基础上加以提炼和总结而撰写成的,同时书中还充分融入了国内外该领域的最新成果。主要内容包括:火炮系统动力学行为试验研究的重要性;试验及测试系统动力学理论;火炮系统测试及试验方法;现代谱分析技术;试验模态分析技术的新发展;振动与温度、湿度综合环境试验技术;火炮系统故障的振动诊断。每项内容都结合工程研究项目给出了应用实例。

本书将测试、试验、武器结构以及测试系统与结构之间的“接口”揉为一起进行动力学试验研究,这是本书与国内外已出版的同类书相比较而具有的鲜明特色。因此,本书将注意力集中在试验研究动力学的新思想和新概念的开发应用上。在内容选材上突出了工程背景和实用性,在内容的叙述上突出了综合运用试验技术

的启迪性。

本书的概述、内容范围、结构框架由吴三灵提出,并主笔和统校全书文稿;第五章由温波主笔;于永强参加了第二章和第七章组稿和编写工作;党瑞荣、吴韧分别参加了第三章、第四章的组稿和编写工作。

感谢中国工程院院士朵英贤对本书编著工作的关注和指导。感谢西安交通大学胡时岳教授和长安大学顾炳其教授对本书的推荐。感谢国防科技图书出版基金评审委员会及有关编审对书稿提出的宝贵意见与支持。

本书引用了许多专家学者的著作与论文,在此表示谢意。

在本书稿的排版打印过程中,杨金保、袁小梅、宁变芳等给予了很大的帮助,在此一并致谢。

由于作者水平有限,书中的错误在所难免,恳请专家和读者批评指正。

作 者

2003年3月20日

目 录

第一章 火炮动力学试验概述	1
1.1 火炮系统动态特性和动态设计	1
1.2 火炮系统动力学行为研究方法	5
1.2.1 理论研究	5
1.2.2 试验研究	10
1.2.3 理论和试验相结合的研究方法	13
1.3 火炮动力学试验的内涵	15
1.3.1 火炮系统动力学问题的特殊性和关键技术	15
1.3.2 火炮动力学试验研究的重要性	15
1.3.3 火炮动力学试验的内涵及其展望	17
第二章 试验及测试系统动力学理论	21
2.1 测试系统动态特性	21
2.1.1 火炮动态信号特性	21
2.1.2 传感器及测试系统动态性能指标	23
2.2 动态建模方法	30
2.2.1 理论建模	31
2.2.2 试验建模	39
2.3 动态性能的改进	49
2.3.1 一阶系统动态性能的改善	49
2.3.2 二阶系统动态性能的改善	51
2.4 传感器安装响应动态特性分析	54
2.5 实测动态响应数据分析	58
第三章 火炮系统测试及试验方法	64
3.1 测试及试验的系统考虑	64

3.1.1	测试系统的选择和使用	65
3.1.2	测试方法和步骤	68
3.2	线振动参数测试方法	70
3.2.1	线位移测试方法	71
3.2.2	线速度测试方法	76
3.2.3	线加速度测试方法	81
3.3	角振动参数测试方法	83
3.3.1	角位移测试方法	83
3.3.2	角速度测试方法	85
3.3.3	角加速度测试方法	89
3.4	复杂冲击测试中有关问题	92
3.4.1	强冲击测试中的有关问题	92
3.4.2	火炮射击时典型复杂冲击信号测试	97
3.5	传感器和结构件的连接	100
3.6	响应数据存储测试方法	106
3.6.1	存储测试系统的原理	107
3.6.2	存储测试系统设计中的几个问题	108
3.6.3	新型存储测试系统实例	111
3.6.4	存储测试系统的应用	114
3.7	火炮射击现场实时数据测试方法	117
3.7.1	试验目的及内容	118
3.7.2	测试项目及测试方法	118
第四章	现代谱分析技术	123
4.1	非平稳动态信号的处理方法	123
4.2	短时傅里叶变换	126
4.2.1	连续短时傅里叶变换	126
4.2.2	离散短时傅里叶变换	128
4.2.3	离散短时傅里叶变换的计算	129
4.3	主分量自回归谱分析	130
4.3.1	主分量和最大熵对功率谱的估计	130

4.3.2 功率谱的主分量分析	131
4.4 维格纳时频域分析	132
4.4.1 连续时间信号的维格纳分布	132
4.4.2 离散时间信号的维格纳分布	136
4.4.3 离散时间和离散频率的维格纳分布	138
4.4.4 维格纳分布的计算	139
4.5 小波变换	144
4.5.1 连续小波变换	145
4.5.2 离散小波变换	146
4.5.3 有关小波变换的几点说明	148
4.6 小波包分析	151
4.7 现代谱分析在火炮系统振动信号处理中的应用	154
第五章 试验模态分析技术的新进展	164
5.1 模态分析的理论基础	164
5.1.1 特征值和特征矢量	164
5.1.2 特征矢量的正交性和振型矩阵的归一化	165
5.1.3 主坐标和模态叠加	166
5.2 模态试验方法	167
5.2.1 综述	167
5.2.2 正弦慢扫描模态试验	168
5.2.3 稳态随机激励模态试验	170
5.2.4 脉冲激励模态试验	172
5.2.5 传感器的选择	176
5.2.6 传感器的安装	178
5.3 模态分析方法	178
5.3.1 复指数曲线拟合法	178
5.3.2 多参考点复指数时间域法	181
5.3.3 模态置信因子 MCF	184
5.3.4 模态指示函数 MIF	185
5.3.5 模态置信判据 MAC	185

5.3.6 共轭和函数 CSF	186
5.4 模态参数识别	186
5.4.1 复指数法	188
5.4.2 最小二乘复指数法	188
5.4.3 Ibrahim 时间域法	189
5.4.4 多参考点时间域法	191
5.4.5 特征值实现算法	193
5.4.6 多参考点 Ibrahim 时间域法	194
5.4.7 多参考点频率域法	194
5.4.8 多参考点正交多项式法	195
5.4.9 复模态指示函数	196
5.4.10 直接参数识别法	196
5.5 模态分析的新进展	197
5.5.1 试验模态分析	197
5.5.2 试验预定义	198
5.5.3 测试仪器	199
5.5.4 光学非接触测量	199
5.5.5 参数识别	200
5.5.6 振声耦合模态分析	200
5.5.7 工作状态模态分析	201
5.5.8 结构变化检测	201
5.6 模态分析在火炮动力学特性分析中的应用	202
第六章 振动冲击环境试验	209
6.1 概述	209
6.2 火炮振动冲击环境与环境效应	212
6.2.1 射击工况	212
6.2.2 行驶工况	213
6.2.3 行驶中射击工况	216
6.2.4 环境效应	218
6.3 振动冲击环境的描述及数据获取	220