

火炮测试技术进展

Progresses of Measurement
Technology of Gun

王宝元 衡刚 周发明 刘朋科 喻华萨 著



國防工業出版社

National Defense Industry Press

火炮测试技术进展

Progresses of Measurement
Technology of Gun

王宝元 衡刚 周发明 刘朋科 喻华萨 著

国防工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目(CIP)数据

火炮测试技术进展 / 王宝元等著. —北京: 国防工业出版社, 2011. 4

ISBN 978 - 7 - 118 - 07263 - 1

I. ①火... II. ①王... III. ①火炮 - 测试技术
IV. ①TJ306

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 032241 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 100048)

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 7 $\frac{5}{8}$ 字数 200 千字

2011 年 4 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—3000 册 定价 32.00 元

(本书如有印装错误, 我社负责调换)

国防书店: (010) 68428422

发行邮购: (010) 68414474

发行传真: (010) 68411535

发行业务: (010) 68472764

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

第六届评审委员会组成人员

主任委员 王 峰

副主任委员 宋家树 蔡 锺 程洪彬

秘 书 长 程洪彬

副 秘 书 长 邢海鹰 贺 明

委 员 于景元 才鸿年 马伟明 王小谟
(按姓氏笔画排序)

甘茂治 甘晓华 卢秉恒 邬江兴

刘世参 芮筱亭 李言荣 李德仁

李德毅 杨 伟 肖志力 吴有生

吴宏鑫 何新贵 张信威 陈良惠

陈冀胜 周一宇 赵万生 赵凤起

崔尔杰 韩祖南 傅惠民 魏炳波

序

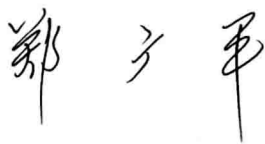
现代战争对火炮性能要求越来越高,研制难度也越来越大。随着世界范围的军事技术竞争加剧,火炮研制周期明显缩短。各军事大国在火炮设计研制过程中除普遍采用虚拟设计、虚拟仿真外,都高度重视实验测试技术在火炮实验验证中的应用。

我国较早开展了火炮测试技术研究,并在火炮型号项目研制、实验、测试中,不断积累和丰富火炮测试方法和理论,在火炮研制中的技术攻关和故障诊断中发挥了不可替代的作用。

本书提出的火炮质量与质心便携式测试,弹性中心测试,炮塔转动惯量测试,火炮射击稳定性测试,立靶密集度图像式测试等多种测试原理、测试技术和测试方法都是火炮科研与生产中急需的、实用的和关键的测试技术,这些测试技术和测试方法都经历了多年火炮工程实践的检验,是作者多年来创造性科技成果的汇总和总结。全书内容从火炮测试的重点和难点出发,对测试原理、测试方法进行了论述,有理论、有分析、有证明,是一部内容全面、非常实用的参考书,对提高我国火炮实验测试技术水平、发展我国火炮实验测试理论、推动我国火炮实验测试技术进步具有积极意义。

作者多年来一直从事火炮实验测试研究、火炮动力学理论分析和射击密集度分析等工作,经过不懈的努力和深入研究,提出了多项火炮实验测试新原理,研制了多项可靠实用的实验测试系统,并已在火炮实验测试中应用,解决了多项关键测试技术难题。将这些研究成果编著成《火炮测试技术进展》一书,为广大工程设计人员和测试技术研究人员提供参考和帮助。

火炮技术的发展需要测试技术的进步,先进的测试技术又为火炮技术的创新与发展及研制高性能火炮提供技术保障。

A handwritten signature in black ink, consisting of three characters: '郑' (Zheng), '方' (Fan), and '军' (Jun), which together read '郑方军' (Zheng Fanjun).

2009 年 5 月

前 言

由于火炮发射过程的复杂性、瞬态性、强冲击性和特殊性,火炮研制过程中所需的大量参数必须依靠实验测试手段获取,有些发射过程的运动参数只能依靠实验手段才能得到。火炮测试过程与火炮的设计、零部件加工和制造同等重要。实验测试可以为火炮系统动力学分析、火炮虚拟样机设计提供准确原始数据,为火炮故障诊断和结构修改提供实验依据,为评价火炮设计方案和验证火炮设计效果提供判断依据。

火炮发射过程可以借助于分析理论和仿真软件来掌握其运动规律,但是,由于理论分析和仿真计算是在各种假设条件下进行的,其分析计算结果难免会出现计算误差,有些理论计算结果可以指导系统设计,有些理论计算结果可能会产生较大计算误差,甚至有些火炮发射机理还没有被人们所认识和掌握。因此,实验测试不仅是检验理论模型正确性的工具,也是完善和发展分析理论的工具。

火炮研制过程有大量参数需要实验测试,科学技术的快速发展已为火炮系统大多数参数的测试建立了成熟的手段和方法。但是,随着火炮的发展和进步,又有许多新参数需要测试,而现有测试手段又无法满足,迫使人们去探索测试新方法和新原理。虽然有些参数也有测试手段和方法,但是,其测试精度和效率已无法满足当前火炮研制的要求,需要充分融入新的测试技术成果,原有的测试方法与精度需要改进和提高。例如,全炮质量与质心测试目前普遍采用在实验室建造固定的称重平台来实现测试目的,但火炮工程实践中有许多条件下,需要便携式能移动的全炮质量与质心测试系统。又如,对于自行火炮射击过程中的底盘多维动态运动位移实验测试需求,目前国内还基本停留在机械划针测试水平

上,其测试结果无时间信息,只能给出射击过程结束后保留下的轨迹图,方法落后、精度低、信息量太少。再如,立靶密集度测量是检验火炮火力系统设计效果的关键过程,但到目前为止,其测试方法还基本停留在采用长度尺人工测量弹孔坐标、人工计算密集度结果的水平上。最后,炮塔和底盘不分离时的炮塔转动惯量实验测试目前也没有实用测试方法,炮塔转动惯量参数的获取基本都是通过模型计算途径,其计算误差较大。针对上述测试需求和测试现实,本书作者结合火炮工程研制,充分借鉴新的测试理论和技术,提出了相应的测试方法和原理,自行研制了相应的测试系统,通过火炮工程实践的验证,弥补了火炮特殊测试的需求。

吴三灵(研究员级高级工程师)对本书测试原理的提出、测试方法的完善、测试系统的研制以及测试工程应用均给予悉心指导。朱德发、陈彦辉、邵小军、郭旻、焦明纲、张军龄、李兆伟、钞红晓、张鹏飞、洪丽娜、曹馨等分别在测试方法研究、试验模态分析、分析计算、结构设计、实验测试、数据处理有关方面做出了重要贡献,为丰富本书内容做出了成绩,在此表示感谢。

北京理工大学教授、中国工程院院士朵英贤和西安交通大学教授、“长江学者”特聘教授王铁军给予了热情洋溢的推荐。郑广平所长为本书作了序,樵军谋处长(研究员级高级工程师)作全书保密审查。向所有这些支持、帮助过本书出版的人一并表示衷心地感谢。

由于作者水平有限,书中缺点和错误在所难免,恳请专家和读者批评指正。

作者

2009年5月

目 录

第 1 章	概述	1
1.1	火炮测试的目的与意义	1
1.2	火炮测试内容	7
1.3	火炮测试方法	11
1.4	火炮测试基本理论	15
第 2 章	火炮质量与质心测试	25
2.1	概述	25
2.2	测试原理	26
2.3	系统组成	33
2.4	软件开发	35
2.5	工程应用	44
第 3 章	自行火炮弹性中心测试	46
3.1	概述	46
3.2	测试原理	50
3.3	例题验证	52
3.4	系统组成	54
3.5	测试软件	56
3.6	工程应用	65
第 4 章	炮塔转动惯量测试	66
4.1	概述	66

4.2	测试原理	71
4.3	系统组成	75
4.4	测试原理验证	76
4.5	小阻尼假设验证	79
4.6	测试软件	81
4.7	工程应用	83
第5章	转动部件阻尼系数测试	84
5.1	概述	84
5.2	阻尼理论	85
5.3	测试原理	88
5.4	系统组成	90
5.5	工程应用	93
第6章	结构运动响应测试	97
6.1	运动部件速度测试	97
6.2	弹丸卡膛速度与卡膛力测试	105
6.3	运动部件加速度测试	110
6.4	几种新的测试系统	119
第7章	工作模态试验分析	134
7.1	概述	134
7.2	传统试验模态分析理论基础	137
7.3	工作模态分析理论基础	150
7.4	工程应用	154
第8章	火炮射击稳定性测试及动画显示	160
8.1	概述	160
8.2	测试原理与系统组成	162
8.3	传感器性能	166

8.4	软件开发	167
8.5	原理验证	169
8.6	工程应用	171
第9章	结构应力和应变非接触式测试	174
9.1	概述	174
9.2	测试原理	175
9.3	工程应用	191
第10章	立靶密集度图像式测试	196
10.1	概述	196
10.2	工作原理与系统组成	199
10.3	照相机拍照位置对密集度测量结果的影响分析	203
10.4	软件开发	219
10.5	工程应用	222
参考文献		224

Contents

Chapter 1	Introduction	1
1.1	Purpose and significance of gun testing	1
1.2	Content of gun testing	7
1.3	Method of gun testing	11
1.4	Basic theory of gun testing	15
Chapter 2	Testing about mass and center of mass of gun	25
2.1	Introduction	25
2.2	Testing principle	26
2.3	System composition	33
2.4	Software development	35
2.5	Engineering application	44
Chapter 3	Testing about center of elasticity of self-propelled gun	46
3.1	Introduction	46
3.2	Testing principle	50
3.3	Example validation	52
3.4	System composition	54
3.5	Testing software	56
3.6	Engineering application	65

Chapter 4	Testing about moment of inertia of turret	66
4.1	Introduction	66
4.2	Testing principle	71
4.3	System composition	75
4.4	Validation of testing principle	76
4.5	Validation of small damping supposition	79
4.6	Testing software	81
4.7	Engineering application	83
Chapter 5	Testing about damping coefficient of rotational components	84
5.1	Introduction	84
5.2	Damping theory	85
5.3	Testing principle	88
5.4	System composition	90
5.5	Engineering application	93
Chapter 6	Response testing about the structure motion	97
6.1	Testing about velocity of motional components	97
6.2	Testing about velocity and force of bore jamming for projectile	105
6.3	Testing about acceleration of motional components	110
6.4	Some new measurement method	119
Chapter 7	Operational deflection shape experimental analysis	134
7.1	Introduction	134
7.2	Theory foundation of traditional experimental modal	

	analysis	137
7.3	Theory foundation of operational deflection	
	shape analysis	150
7.4	Engineering application	154
Chapter 8	Testing about gun fire stability and animation	
	display	160
8.1	Introduction	160
8.2	Testing principle and system composition	162
8.3	Performance of sensor	166
8.4	Software development	167
8.5	Principle validation	169
8.6	Engineering application	171
Chapter 9	Non-contract testing about stress and strain	
	of structure	174
9.1	Introduction	174
9.2	Testing Principle	175
9.3	Engineering application	191
Chapter 10	Imaging testing about vertical target	
	dispersion	196
10.1	Introduction	196
10.2	Operating principle and system composition	199
10.3	Effect of camera position on dispersion	
	measurement result	203
10.4	Software development	219
10.5	Engineering application	222
References		224

第 1 章 概 述

1.1 火炮测试的目的与意义

火炮发射过程是一个极其复杂的动态过程,一般发射过程极短(几毫秒至十几毫秒),经历高温($2500\text{K} \sim 3600\text{K}$)、高压(最大膛内压力高达 $250\text{MPa} \sim 700\text{MPa}$)、高速、高加速度(发射装置零件加速度高达 $200g \sim 500g$,零件撞击加速度可以达到 $15000g$)过程,并且发射过程以高频率重复进行(每分钟高达 6000 次循环)^[1]。

由于火炮发射过程的复杂性、瞬态性、强冲击性和特殊性,火炮研制过程中所需的大量参数必须依靠实验测试手段获取,有些发射过程的运动参数只能依靠实验手段才能得到。火炮测试过程与火炮的设计、零部件加工和制造同等重要。因此,火炮测试的目的就是通过实验测试方法获取火炮系统物理参数、几何参数、运动参数和响应参数,掌握火炮发射规律,再现火炮发射过程。火炮测试可以为系统动力学分析、火炮虚拟样机设计提供准确的原始数据,为火炮故障诊断和结构修改提供实验依据,为评价火炮设计方案和验证火炮系统设计效果提供判断依据。

火炮发射过程可以借助于分析理论和仿真软件来掌握其运动规律。例如,采用有限元结构强度与振动分析计算,根据结构设计图纸,可以预测火炮结构的应力应变和结构振动响应规律,采用多体动力学理论和软件,可以完成火炮系统运动学和动力学分析,进行结构优化设计。但是,由于上述理论分析和仿真计算是在各种假设条件下进行的,其分析计算结果难免会出现计算误差,有些理论计算结果可以指导系统设计,有些理论计算结果可能会产生较