



火炮动态测试技术

靳秀文 汪 伟 栾军英 唐力伟 编著



国防工业出版社

National Defense Industry Press

总装部队军事训练“十五”统编教材

科研试验系列

火炮动态测试技术

靳秀文 汪伟 栾军英 唐力伟 编著



国防工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目 (CIP) 数据

火炮动态测试技术 / 靳秀文等编著. —北京: 国防工业出版社, 2007. 10

总装部队军事训练“十五”统编教材. 科研试验系列
ISBN 978-7-118-05306-7

I. 火... II. 靳... III. 火炮—射击试验—动态参数—测试技术 IV. TJ306

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 118472 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)

国防工业出版社印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 880 × 1230 1/32 印张 15 3/4 字数 452 千字

2007 年 10 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2500 册 定价 40.00 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

第三届总装备部军事训练教材 编辑工作委员会

主任委员 张建启

副主任委员 曹保榆 夏长法 侯贺华 郭文敏

委 员 (按姓氏笔画排序)

于俊民 王宜标 王泽民 尤广志

冯 章 朱双华 朱忠刚 刘树军

刘瑞成 安敏建 李方洲 李治三

肖力田 迟宝山 张忠华 张海东

陈永光 胡利民 侯 鹰 姜世忠

聂 皞 倪红星 徐 航 郭 勇

黄伟强 彭华良 裴承新 潘贤伦

秘 书 长 聂 皞

办公室主任 田 禾

办公室副主任 石根柱 郝 刚

办公室成员 李国华 李立法 郑晓娜

第三届总装备部军事训练教材 常规兵器试验系统编委会

主任委员 邱学臣

副主任委员 冯炳煊

委 员 (按姓氏笔画排序)

田 禾 冯三任 安振涛 赵 宇 侯日升

郭金茂 程永生

秘 书 郑晓娜

序

军事训练教材是部队开展军事训练和培养高素质科研试验与管理人才的重要基础。“十五”期间是我军加速武器装备现代化建设的关键时期,随着科学技术不断发展,新武器、新装备大量投入部队使用,急需编写相应的配套教材,来满足部队军事训练和人才培养的需求。为此,总装司令部印发了《总装部队军事训练教材建设“十五”计划》,并组织部分专家、学者编著了这套总装部队军事训练“十五”统编教材。

编著这套总装部队军事训练“十五”统编教材是国防科研试验事业继往开来的大事,也是体现国防科研试验技术水平的一个重要标志。它以新时期军事战略方针为统揽,以军委和总装首长关于加强军事训练工作的一系列重要指示为指导,以《军事训练与考核大纲》、《继续教育科目指南》为依据,坚持科学性、前瞻性和实用性相结合,不断满足军事训练和人才培养对教材的需求,为圆满完成武器装备科研试验和管理保障任务提供了有力的技术支持。

“十五”统编教材共计 69 部,内容涉及科研试验、陆军装备科研订购、通用装备保障和试验后勤等 4 个系列的 28 个系统。这套教材既总结升华了武器装备科研试验和管理保障经验,又反映了国内外最新动态和发展方向,是对国防科研试验工程技术系列教材建设的进一步延续和扩展,是一批高质量的精品教材。其使用对象主要是部队具有大专以上学历的科技人员和管理干部,也可供院校有关专业师生使用或参考。

期望这套教材能够有益于部队高素质人才的培养,有益于武器装备科研试验和管理保障任务的完成,有益于国防科技事业的进步。

总装备部军事训练教材
编辑工作委员会
二〇〇五年十二月

前 言

本教材是一本有关兵器测试技术课的通用专业基础教材,可供兵工院校武器类专业使用。通过章节的筛选,可适合研究生或本科生的有关课程教学,还可作为部队、兵工厂、研究所、靶场等单位有关科技人员的参考书。

本教材的编写,是在收集、参阅国内外已出版的各类有关教材、发表的有关论文以及有关科研成果的基础上,结合编者多年来教学、科研工作的经验总结和体会完成的。

全书分上、下两篇共 13 章。上篇由第 1 章~第 7 章构成了测试基础篇。下篇由第 8 章~第 13 章构成了火炮射击过程中具体动态参数测试篇。第 1 章概论,介绍了火炮动态测试的意义、测试系统的组成、测试系统的发展方向等内容;第 2 章信号分析基础,介绍了测试中常用信号的描述及分析方法;第 3 章测量系统的基本特性,阐述了测量系统的静态特性及动态特性;第 4 章误差估算与数据处理;第 5 章常用传感器及其测量电路,介绍了传感器基本概念及常用传感器(电阻应变式、压电式、光电式、电感式、电容式、霍尔式)的工作原理以及与之相适应的测量电路等内容;第 6 章是计算机测试技术,介绍了计算机测试的基本概念、系统组成及虚拟仪器;第 7 章是测试系统设计;第 8 章弹丸飞行速度测试,介绍了 3 种测速方法的测试原理、所用设备的结构与工作原理及数据处理方法;第 9 章压力测试,介绍了塑性变形测压法、弹性变形测压法的测试原理及适用场合,论述了压力测量系统的标定方法;第 10 章武器运动体运动规律测试;第 11 章炮口制退器效率测试;第 12 章武器振动与声学信号测试;第 13 章温度测量技术,介绍了温度测量的基本原理及基本方法,论述了火炮射击过程中温度测量的基本原则。

本教材由军械工程学院兵器测试中心有关教员编写。具体分工是:

靳秀文同志任主编,并负责第 8 章~第 11 章、第 13 章的编写工作;汪伟同志任副主编,负责第 2 章~第 5 章的编写工作;栾军英同志编写了第 6 章、第 7 章;唐力伟同志编写了第 12 章及第 2 章(2.6)。陶辰立同志参加了部分英文资料的翻译工作;硕士研究生王虹同学为本书做了大量的打印、校对工作;肖志松同学参加了部分校对工作。

本书由军械工程学院博士生导师郑海起同志任主审,并负责了第 1 章概论的编写工作。

本书在编写过程中,参考了有关专家的专著、论文,参考了兄弟院校的教材,得到了有关专家、教授及科技工作者的帮助,谨表感谢。

由于编者水平有限,加之时间紧迫,未能广泛收集编写意见和修改意见。恳切希望广大教师、学生以及从事军械工程工作的科技人员对本书的内容编排、书中的不妥之处提出批评和修改意见。

编 者

目 录

上篇 测试基础

第 1 章 概论	3
1.1 测试的概念	3
1.2 测试在兵器工程中的地位与作用	4
1.3 测试系统的组成及其工作原理	8
1.3.1 测量方法的分类	8
1.3.2 测试系统的组成	10
1.3.3 测试系统的工作原理	12
1.4 动态测试技术的发展方向	12
1.4.1 传感器技术的发展方向	13
1.4.2 记录、显示设备的发展方向	14
1.4.3 计算机测试技术的发展方向	15
1.4.4 兵器综合测试技术的发展方向	17
第 2 章 信号分析基础	20
2.1 概述	20
2.1.1 信号的分类	20
2.1.2 信号的描述与分析	22
2.2 周期信号的频谱函数	24
2.2.1 周期信号的单边频谱(三角函数展开式)	24
2.2.2 周期信号的双边频谱(复指数函数展开式)	27
2.2.3 周期信号频谱的特点	29
2.2.4 周期信号的平均功率	30

2.3	非周期信号及其频谱密度函数	31
2.3.1	傅里叶变换	32
2.3.2	傅里叶变换的主要性质	34
2.3.3	几种典型信号的傅里叶变换推导	41
2.3.4	几种典型信号的傅里叶变换	43
2.4	信号的相关分析	43
2.4.1	自相关函数	44
2.4.2	互相关函数	46
2.4.3	相关函数应用	47
2.5	功率谱密度函数	48
2.5.1	自功率谱密度函数	48
2.5.2	互功率谱密度函数	50
2.5.3	相干函数	51
2.6	小波分析简介	51
2.6.1	概述	51
2.6.2	连续小波变换	53
2.6.3	离散小波变换	54
2.6.4	小波分析应用	55
第3章	测量系统的基本特性	60
3.1	测量系统的静态特性	60
3.2	测量系统的动态特性	63
3.2.1	系统模型描述	64
3.2.2	理想不失真测量系统	65
3.2.3	一阶系统动态特性	66
3.2.4	二阶系统动态特性	70
3.2.5	测量系统动态特性测定	78
第4章	误差估算与数据处理	83
4.1	测量误差的基本概念	83
4.2	随机误差理论	85
4.2.1	统计直方图	86

4.2.2	正态分布随机误差特性	87
4.2.3	正态分布随机误差的概率分布	88
4.2.4	标准偏差的计算方法	91
4.2.5	标准偏差的传递	98
4.3	系统误差分析	104
4.3.1	系统误差分类	104
4.3.2	系统误差对测量结果的影响	105
4.3.3	系统误差的发现	106
4.3.4	系统误差的消除	109
4.4	粗大误差舍弃	110
4.5	测量结果的表示方法	116
4.5.1	测量结果为特征量时的表示方法	116
4.5.2	测量结果为函数关系时的表示方法	117
4.6	一元线性与非线性回归	118
4.6.1	一元线性回归(直线拟合)	118
4.6.2	一元非线性回归(曲线拟合)	122
第5章	常用传感器及其测量电路	129
5.1	传感器基本概念	129
5.2	电阻应变式传感器	130
5.2.1	金属应变片工作原理	132
5.2.2	半导体式电阻应变片工作原理	135
5.2.3	应变片测量电路	135
5.2.4	应变式传感器特点	141
5.2.5	应变式传感器应用	141
5.3	压电式传感器	141
5.3.1	压电效应	141
5.3.2	压电材料	144
5.3.3	压电式传感器等效电路	145
5.3.4	压电式传感器测量电路	145
5.3.5	压电式传感器特点	147

5.3.6 压电式传感器应用	147
5.4 光电式传感器	147
5.4.1 光电管和光电倍增管	148
5.4.2 光敏电阻	149
5.4.3 光电池	152
5.4.4 光电三极管	153
5.4.5 光电式传感器应用及分类	154
5.5 电感式传感器	156
5.5.1 自感式传感器	156
5.5.2 互感式传感器	162
5.5.3 电涡流式传感器	165
5.6 电容式传感器	174
5.6.1 工作原理及特性	174
5.6.2 测量电路	179
5.6.3 电容式传感器特点	182
5.6.4 电容式传感器的绝缘与屏蔽	183
5.7 霍尔式传感器	184
5.7.1 霍尔式传感器工作原理	184
5.7.2 霍尔元件的主要特性参数	186
5.7.3 霍尔元件的常用测量电路及应用	187
第6章 计算机测试技术	193
6.1 概述	193
6.2 采样过程和采样定理	195
6.2.1 采样过程	195
6.2.2 采样定理	196
6.3 计算机测量系统的组成技术	198
6.3.1 数据的采集与保持技术	198
6.3.2 数/模及模/数转换技术	201
6.3.3 A/D 通道方案的确定	205
6.4 智能仪表	209

6.4.1	概述	209
6.4.2	智能仪表的基本组成	211
6.4.3	智能仪表的功能模块	215
6.5	虚拟仪器	218
6.5.1	概述	218
6.5.2	LabVIEW 虚拟仪器开发系统	222
6.5.3	虚拟仪器设计举例	226
第7章	测试系统设计	229
7.1	概述	229
7.2	传感器的选用	234
7.3	测量系统各单元间的阻抗匹配	237
7.4	测量系统抗干扰设计	241
7.4.1	概述	241
7.4.2	干扰信号的来源	241
7.4.3	干扰噪声的耦合途径	246
7.4.4	抗干扰技术	248
7.5	接地噪声及其消除方式	250
7.6	测试系统设计实例	254
7.6.1	内燃机机体结构的振动频率响应函数 测试系统	254
7.6.2	基于单片机的温度、压力测量系统设计	257

下篇 火炮动态测试

第8章	弹丸飞行速度测试	265
8.1	概述	265
8.2	瞬时速度法简介	268
8.3	外弹道区截测速法	270
8.3.1	外弹道区截测速法原理	270
8.3.2	区截装置	271

8.3.3	测时仪	282
8.3.4	测速数据处理	287
8.3.5	保证测速精度的措施	299
8.4	雷达测速法	301
8.4.1	概述	301
8.4.2	多普勒效应	301
8.4.3	多普勒雷达测速原理	303
第9章	压力测试	312
9.1	概述	312
9.2	铜柱(铜球)测压法	315
9.2.1	铜柱测压法系统组成及工作原理	315
9.2.2	铜柱测压器和测压铜柱的选取	319
9.2.3	铜柱压力表的编制	320
9.2.4	铜柱测压时的压力换算	323
9.2.5	铜柱测压数据处理	326
9.2.6	铜柱测压法特点	329
9.2.7	铜球测压法简介	329
9.3	应变测压法	331
9.3.1	概述	331
9.3.2	测量系统的组成	331
9.3.3	应变测压法的数据处理	339
9.3.4	应变测压法特点	340
9.4	压电测压法	340
9.4.1	测量系统的组成	340
9.4.2	压电式压力传感器结构与工作原理	341
9.4.3	信号调理器的选取与应用	343
9.4.4	压电测压法的数据处理	345
9.5	压阻测压法	345
9.5.1	测量系统的组成	345
9.5.2	压阻式压力传感器	345

9.5.3	电压放大器	347
9.5.4	压阻式压力测量系统(传感器)特点	347
9.6	压力测量系统的标定	348
9.6.1	概述	348
9.6.2	压力测量系统的静态标定	349
9.6.3	压力测量系统的动态标定	351
9.7	炮口冲击波压力测试	354
9.7.1	炮口冲击波的概念	354
9.7.2	炮口冲击波压力的安全标准	357
9.7.3	冲击波压力的测量方法	358
9.7.4	冲击波压力测量系统的标定	361
9.8	放入式电子测压系统简介	363
9.8.1	放入式电子测压器结构	364
9.8.2	放入式电子测压器工作原理	365
9.8.3	放入式电子测压器分类及性能指标	366
第10章	武器运动体运动规律测试	369
10.1	概述	369
10.2	传感器结构与工作原理	370
10.3	实验曲线的处理	375
10.3.1	曲线分析	375
10.3.2	数据处理	377
第11章	炮口装置效率测试	381
11.1	自由后坐台法	381
11.2	后坐阻力功法	383
11.2.1	测量原理	383
11.2.2	减装药装药量的确定原则	385
11.2.3	阻力曲线的测定	386
第12章	武器振动与声学信号测试	393
12.1	概述	393
12.2	振动位移测量	394

12.2.1 利用电涡流位移测量系统进行振动位移测量	394
12.2.2 利用光电位移跟踪器进行振动位移测量	399
12.3 振动加速度测量	402
12.3.1 系统组成及其工作原理	402
12.3.2 压电加速度传感器的安装	407
12.3.3 压电加速度传感器灵敏度的校准	410
12.4 动态特性测量系统	411
12.4.1 脉冲激励	412
12.4.2 稳态正弦激励与随机激励	412
12.5 声学信号的测量	415
12.5.1 基础知识	415
12.5.2 声学信号测量系统组成及其工作原理	419
12.5.3 声学信号的分析处理	425
12.5.4 声学信号测量注意事项	426
第 13 章 温度测量技术	428
13.1 温度测量基础	428
13.2 热电偶测温技术	433
13.2.1 热电偶测温原理	433
13.2.2 热电偶基本定律	436
13.2.3 热电偶的种类和基本特性	439
13.2.4 热电偶基本结构	441
13.2.5 热电偶的冷端温度补偿	443
13.2.6 热电偶的测温电路	446
13.2.7 热电偶测温误差分析	448
13.3 热电阻测温技术	450
13.3.1 金属丝电阻温度计	451
13.3.2 半导体电阻温度计	452
13.4 热辐射测温技术	452
13.4.1 全辐射高温计	453

13.4.2	比色高温计	456
13.4.3	红外辐射测温仪	458
13.5	火炮温度测量技术	460
13.5.1	身管内壁温度测量	461
13.5.2	身管外壁温度测量	463
13.5.3	膛内火药燃气温度测量	464
13.5.4	反后坐装置液体温度测量	465
附录		467
附表 1	铂铑 30—铂铑 6 热电偶分度简表	467
附表 2	铂铑 10—铂热电偶分度简表	468
附表 3	铂铑 13—铂热电偶分度简表	469
附表 4	镍铬—镍硅热电偶分度表	469
附表 5	镍铬—康铜热电偶分度表	475
附表 6	铜—康铜热电偶分度表	479
附表 7	铁—康铜热电偶分度简表	481
附表 8	铂热电阻分度简表	482
附表 9	铂热电阻分度简表	482
附表 10	铜热电阻分度简表	483
附表 11	铜热电阻分度简表	484
参考文献		485