

机械工程测试技术

(第2版)

周生国 李世义 等编著



国防工业出版社

National Defense Industry Press

机械工程测试技术

第2版

周生国 李世义 等编著

国防工业出版社

·北京·

内 容 简 介

本书在第一版的基础上进行了适当调整,该版内容包括四部分:第一部分是测试技术的基础知识,包含现代测试技术的发展动向、测量系统的基本特性、测量误差与数据处理、传感器原理与测量电路、测试系统设计;第二部分是机械工程主要参数的测试方法,该部分包含压力测量、力和应力测量、位移、速度、加速度测量、温度测量等;第三部分是动态参数测试的有关问题,该部分包含动态压力和动态力校准技术、测试系统动态误差补偿与修正;第四部分是现代数据采集系统功能、特点与分类。

本书比较系统、全面地阐述了机械工程测试技术中的主要问题,并注重理论与实践的结合,内容基本反映了当前国内测试技术的现状和水平。

本书可作为高等院校机械工程类专业本科生和研究生的测试技术教材,也可供从事测试技术工作者学习参考。

图书在版编目(CIP)数据

机械工程测试技术 / 周生国, 李世义等编著. —2 版.
北京: 国防工业出版社, 2005. 9
ISBN 7-118-04079-7

I. 机... II. ①周... ②李... III. 机械工程-测试技术 IV. TG806

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 088490 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 787 × 1092 1/16 印张 23 1/4 535 千字

2005 年 9 月第 2 版 2005 年 9 月北京第 1 次印刷

印数: 1—4000 册 定价: 35.00 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

再 版 前 言

《机械工程测试技术》第一版于1993年1月在北京理工大学出版社出版发行,由周生国、李世义、裴思行、赵朝兰四位教师共同编写。十多年来,使用该教材的学生、教师和其他读者提出了许多宝贵意见,这次重新再版,对章节和部分内容进行了增删和调整。

随着科学技术飞速发展,测试技术的手段和水平也日益提高,本教材第一版的有些内容显见陈旧,需要进行修订。考虑到本教材的编写思想是以非电量参数电测技术为主导,以动态参数测试技术为中心,本次修订再版时,删除了原教材的第一章信号及其特性分析、第五章记录仪器、第六章光测技术—高速摄影、第十二章微型计算机在测试技术中的应用。把原第五章中瞬态记录仪内容放到再版的第十二章中重新编写。新增加的章节有第一章现代测试技术的发展动向、第十章动态压力和动态力校准技术、第十一章测试系统动态误差补偿与修正、第十二章现代数据采集系统、第三章中的测量不确定度的表示及评定、第七章中的双量程测力传感器等。除此以外,对有些章节也进行了适当修改。

本教材由北京理工大学周生国、李世义等编著,周生国编写第二、三、四、六、七、九、十一章,并负责全书的统编。北京理工大学李世义编写第一、五、八章;张训文、方继明编写第十章;空军指挥学院张迎新编写第十二章。保留了原华北工学院裴思行编写的第六章压力测量部分内容。

因再版时间比较仓促,有些内容还未修改,请读者谅解。由于编者水平所限,本教材难免存在缺点和不足之处,恳请广大读者批评指正并提出宝贵意见,深表谢意。

编著者
2005年8月

目 录

第一章 现代测试技术的发展动向	1
1.1 测试技术的地位及作用	1
1.2 测试系统的组成	1
1.3 现代测试技术的发展动向	3
1.3.1 传感器的发展趋势	3
1.3.2 测试技术的发展趋势	4
1.4 现代测试技术的典型应用	5
1.4.1 模拟发射技术	5
1.4.2 终点弹道模拟——火箭撬技术	6
1.4.3 遥测技术	7
1.4.4 存储测试系统	7
习题	8
参考文献	8
第二章 测量系统的基本特性	10
2.1 概述	10
2.2 测量系统的静态特性	10
2.3 测量系统的动态特性	12
2.3.1 传递函数	12
2.3.2 动态特性	13
习题	21
参考文献	21
第三章 测量误差与数据处理	22
3.1 测量误差的基本概念	22
3.2 随机误差理论	24
3.2.1 统计直方图	25
3.2.2 随机误差的特性	25
3.2.3 标准偏差与概率积分	26
3.3 标准偏差的计算方法	27
3.3.1 标准法——贝塞尔(Bessel)公式	28
3.3.2 绝对差法——佩特斯(Peters)公式	30
3.3.3 极差法	30
3.3.4 最大误差法	31

3.3.5 算术平均值的标准偏差·····	32
3.4 间接测量不确定度评定·····	34
3.4.1 误差传递的一般表达式·····	34
3.4.2 用不确定度表示的传递公式·····	34
3.5 系统误差·····	37
3.5.1 系统误差的分类·····	37
3.5.2 系统误差对测量结果的影响·····	38
3.5.3 系统误差的发现·····	39
3.5.4 系统误差的消除·····	41
3.5.5 系统误差已消除的准则·····	44
3.6 测量不确定度的术语及评定·····	44
3.6.1 测量不确定度术语·····	44
3.6.2 测量不确定度的评定·····	45
3.6.3 举例·····	48
3.6.4 测量不确定度与测量误差的区别·····	49
3.7 测量数据处理方法·····	50
3.7.1 表格法·····	50
3.7.2 图示法·····	50
3.7.3 经验公式法·····	51
3.8 一元线性与非线性回归·····	52
3.8.1 直线拟合——一元线性回归·····	53
3.8.2 曲线拟合——一元非线性回归·····	58
习题·····	59
参考文献·····	60
第四章 传感器原理与测量电路 ·····	61
4.1 传感器的分类·····	61
4.1.1 按被测参量分类·····	61
4.1.2 按传感器工作原理分类·····	61
4.2 电位器式传感器·····	61
4.2.1 构造与原理·····	61
4.2.2 阶梯特性与阶梯误差·····	62
4.2.3 负载特性与负载误差·····	63
4.2.4 特点与应用·····	64
4.3 电阻应变式传感器·····	65
4.3.1 电阻应变片·····	65
4.3.2 应变片胶黏剂·····	69
4.3.3 电阻应变式传感器·····	70
4.3.4 应变式传感器测量电路·····	72
4.3.5 应变式传感器的特点·····	78

4.4 电感式传感器	78
4.4.1 简单自感式与差动式自感传感器	79
4.4.2 差动变压器式传感器	83
4.4.3 电涡流式传感器	85
4.4.4 电感式传感器的特点	87
4.5 电容式传感器	87
4.5.1 工作原理及特性	87
4.5.2 测量电路	91
4.5.3 电容式传感器的特点	93
4.6 压电式传感器	94
4.6.1 压电效应	94
4.6.2 压电材料	96
4.6.3 等效电路与测量电路	97
4.6.4 压电式传感器的特点	100
4.7 压阻式传感器	100
4.7.1 工作原理	100
4.7.2 晶面及晶向表示法	102
4.7.3 传感器结构	103
4.7.4 测量电路	104
4.7.5 压阻式传感器的特点	105
4.8 霍尔式传感器	106
4.8.1 霍尔效应	106
4.8.2 霍尔元件及基本电路	107
4.8.3 霍尔元件的误差及其补偿	108
4.8.4 霍尔元件的特点及其应用	110
4.9 光纤传感器	111
4.9.1 光导纤维结构与传输原理	111
4.9.2 光纤的主要参数	112
4.9.3 光导纤维的类型	114
4.9.4 光纤传感器的应用	114
4.9.5 光纤传感器的特点	117
4.10 传感器静态特性指标的计算方法	117
4.10.1 性能指标的计算方法	117
4.10.2 精度的计算方法	119
4.10.3 性能指标与精度的计算实例	120
习题	123
参考文献	123
第五章 测试系统设计	124
5.1 系统设计的主要问题	124

5.2 传感器的选用原则	126
5.3 系统中的干扰电压及其抑制	128
5.4 外来电磁干扰及其抑制	140
5.5 接地噪声及其消除方式	150
5.6 测量系统设计举例	155
习题	161
参考文献	161
第六章 压力测量	162
6.1 压力测量概述	162
6.1.1 压力的概念	162
6.1.2 压力量值的传递标准	162
6.1.3 压力测量仪表	163
6.2 常用测压传感器	164
6.2.1 电阻应变式压力传感器	164
6.2.2 压电式压力传感器	168
6.2.3 压阻式压力传感器	169
6.3 动态压力测量	170
6.3.1 影响动态压力测量的因素	170
6.3.2 传感器的安装与管道效应	171
习题	172
参考文献	172
第七章 力和应力测量	174
7.1 力值传递标准	174
7.1.1 概述	174
7.1.2 基准测力机	175
7.1.3 标准测力机	177
7.1.4 标准测力计	179
7.2 单向力测量	181
7.2.1 概述	181
7.2.2 电阻应变式力传感器	182
7.2.3 压电式力传感器	193
7.2.4 双量程测力传感器	194
7.3 多向力测量	196
7.3.1 切削力测量	196
7.3.2 火箭发动机推力矢量测量	197
7.4 应力与应变测量	200
7.4.1 单向应力状态	201
7.4.2 平面应力状态(主应力方向已知)	201
7.4.3 平面应力状态(主应力方向未知)	201

习题	204
参考文献	204
第八章 位移、速度、加速度测量	206
8.1 概述	206
8.2 位移测量	207
8.2.1 线位移传感器	208
8.2.2 角位移传感器	213
8.3 速度测量	215
8.3.1 弹丸速度测量	215
8.3.2 线速度测量	216
8.3.3 角速度测量	218
8.3.4 激光多普勒测速法	219
8.4 加速度测量	223
8.4.1 加速度传感器	223
8.4.2 振动与冲击加速度测量	226
8.4.3 加速度测量系统的校准	233
习题	236
参考文献	237
第九章 温度测量	238
9.1 概述	238
9.1.1 温度的概念	238
9.1.2 温度计的种类和特点	238
9.1.3 温标	240
9.2 热电偶	242
9.2.1 热电偶测温的工作原理	242
9.2.2 热电偶的基本定律	245
9.2.3 热电偶种类和特性	247
9.2.4 热电偶结构	249
9.2.5 热电偶冷端处理的方法	251
9.2.6 热电偶测温的连接方式	252
9.2.7 热电偶测温的显示仪表	254
9.2.8 热电偶的检定	255
9.2.9 热电偶测量固体表面温度	257
9.2.10 热电偶测量高速气流温度	260
9.2.11 热电偶测温误差	262
9.3 电阻温度计	265
9.3.1 概述	265
9.3.2 铂电阻温度计	265
9.3.3 铜电阻温度计	267

9.4 辐射式温度计	268
9.4.1 全辐射高温计	269
9.4.2 比色高温计	271
9.4.3 红外辐射测温仪	272
习题	276
参考文献	276
第十章 动态压力和动态压力校准技术	278
10.1 动态压力校准技术	278
10.1.1 动态压力校准理论基础	278
10.1.2 动态压力校准装置	281
10.1.3 动态压力校准方法	287
10.2 动态力校准技术	290
10.2.1 动态力校准的意义	290
10.2.2 动态力校准方法	291
10.2.3 早期的负阶跃力校准装置	292
10.2.4 负阶跃力校准新技术	292
10.2.5 负阶跃力校准及数据处理的一般要求	296
习题	297
参考文献	297
第十一章 测试系统动态误差补偿与修正	298
11.1 概述	298
11.2 动态误差补偿原理与方法	298
11.2.1 动态误差补偿原理	298
11.2.2 建立测试系统动态数学模型	299
11.2.3 动态补偿数字滤波器设计	300
11.2.4 动态补偿方法实例	302
11.3 动态误差修正	306
11.3.1 时域修正法——数值微分法	306
11.3.2 频域修正法	308
习题	309
参考文献	309
第十二章 现代数据采集系统	310
12.1 现代数据采集系统概述	310
12.1.1 数据采集系统的发展	310
12.1.2 现代数据采集系统的功能	311
12.1.3 数据采集系统的特点	311
12.1.4 现代测量采集系统分类	313
12.1.5 数据采集/控制系统的基本构成	313
12.1.6 系统总线概述	315

12.2 数据采集系统的设计	316
12.2.1 确定信号的特征	317
12.2.2 选择传感器	317
12.2.3 信号调节与处理	319
12.2.4 计算机系统硬件和软件设计	319
12.2.5 信号的分析与处理	320
12.3 数据采集系统举例	320
12.3.1 标准总线测量控制系统	321
12.3.2 专用数据采集系统	325
12.3.3 太平洋 6000 数据采集系统	328
12.3.4 数据采集系统应用举例	330
习题	332
参考文献	332
附录 1 铂铑 10 - 铂热电偶分度表	333
附录 2 铂铑 30 - 铂铑 6 热电偶分度表	338
附录 3 镍铬 - 镍硅(镍铬 - 镍铝)热电偶分度表	343
附录 4 铜 - 康铜热电偶分度表	347
附录 5 镍铬 - 康铜热电偶分度表	349
附录 6 铂铑 13 - 铂热电偶分度简表	352
附录 7 铁 - 康铜热电偶分度简表	353
附录 8 铂热电阻分度表($R_0 = 46\Omega$)	354
附录 9 铂热电阻分度表($R_0 = 100\Omega$)	357
附录 10 铜热电阻分度表($R_0 = 50\Omega$)	360
附录 11 铜热电阻分度表($R_0 = 100\Omega$)	361

第一章 现代测试技术的发展动向

1.1 测试技术的地位及作用

人类认识客观世界和掌握自然规律的实践途径之一是试验性的测量——测试,在科学研究中测试是获得研究对象原始感性材料,从而为形成自然科学理论奠定基础,同时又是发展和检验自然科学理论的实践基础。在工程技术领域,由于实际研究对象的复杂性,很多问题难以进行完善的理论分析、推导和计算,所以必须依靠试验来获得研究对象的状态、变化和特征等,这正是通过测试来实现的。

测试(Measurement and Test)是具有试验性质的测量。测量是为确定被测对象的量值而进行的试验过程,试验是对迄今未知事物的探索性认识过程。因此,测试技术包括测试和试验两方面。

测试技术正是研究有关测试方法、测试手段和测试理论的科学,它应用于不同的领域并在各个自然科学研究领域起着重要作用。从尖端技术到生活中的家电,从国防到民用,都离不开测试技术。先进的测试技术也是生产系统不可缺少的一个组成部分。

在机械加工中,数控机床和生产流程的各个阶段都离不开参数的测量。如:在自适应控制磨床中,需要连续测定加工过程中的力矩、切削温度、工具的挠度、切削力的大小等参数,由计算机控制以达到最好的加工效果。

在军事中,测试技术对武器装备发展的支撑作用越来越突出,综合测试能力已经成为决定武器装备作战效能的重要因素。例如:在发射炮弹的一瞬间,就需要采用多种测试方法来测量各种参数,诸如膛压的变化过程、弹底压力、弹后压力波、身管应力分布、弹丸在膛内运动的轴向加速度和炮口激波压力等,还有外弹道测试和终点弹道测试。

现代科技发展的一个鲜明特征就是航空航天技术的迅猛发展,测试技术成为航空航天技术发展不可缺少的重要部分。现代飞行器装备着各种各样的显示系统和控制系统,反映飞行器飞行参数和姿态、发动机工作状态的各种物理参数都要进行检测。美国阿波罗飞行器和航天飞船的运载火箭部分需检测加速度、声学、温度、压力、振动、流量、应变等总共 3200 个参数。一架新型飞机测量参数高达几千甚至上万个,包括种类有:各种模拟量参数、数字量信号、各种航空电子总线信号、多路视频和语音、外部测试参数等。

在交通领域,一辆现代化汽车需要对车速、方位、转矩、振动、油压、油量、温度等参数进行检测。交通监视系统更是一个典型的监测系统。

1.2 测试系统的组成

测试的目的就是获得研究对象的状态、运动和特征等方面的信息,电测技术显示出突

出的优势。

电测技术具有下列主要优点：

1. 准确度和灵敏度高,测量范围广;
2. 电子装置惯性小,测量的反应速度快,具有比较宽的频率范围;
3. 能自动连续地进行测量,便于自动记录,并能根据测量结果,配合调节装置,进行自动调节和自动控制;
4. 采用微处理器组成智能化仪器,可与微型计算机一起构成测量系统,实现数据处理,误差校正,自监视和仪器校准功能;
5. 可以进行远距离测量,从而能实现集中控制和遥远控制;
6. 从被测对象取用功率小,甚至完全不取用功率,也可以进行无接触测量,减少对被测对象的影响,提高测量精度。

电测技术的任务,就是把待测的非电量,通过一种器件或装置变换成与它有关的电信号(电压,电流,频率等),然后对该电信号进行测量,从而确定被测非电量的值。

测试系统的结构框图如图 1-1 所示,图(a)是一般测试系统框图,图(b)是反馈测试系统框图。它由传感器,信号变换,信号分析与处理或微型计算机等环节组成,或经信号变换环节后,直接显示和记录。

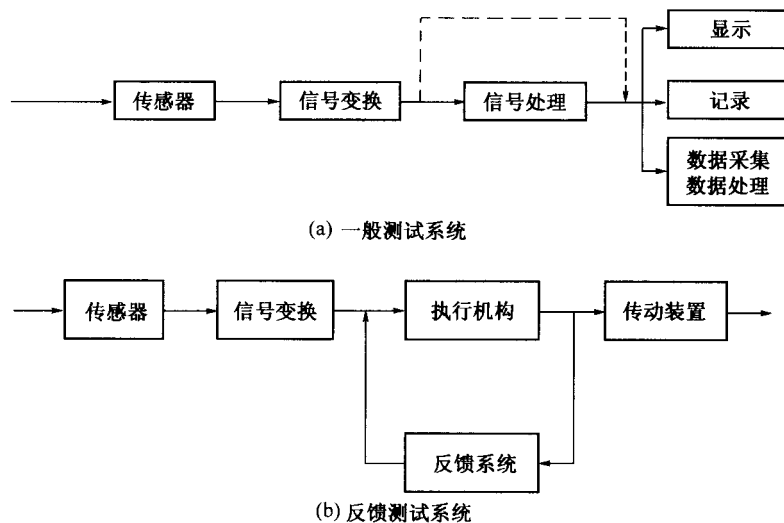


图 1-1 测试系统的结构框图

传感器是将外界信息按一定规律转换成电量的装置,它是实现自动检测和自动控制的首要环节。目前除利用传统的结构型传感器外,大量物性型传感器被广泛采用。结构型传感器是以物体(如金属膜片)的变形或位移来检测被测量的,物性型传感器是利用材料固有特性来实现对外界信息的检测,它有半导体类、陶瓷类、光纤类及其他新型材料等。世界上先进国家都把传感器技术列为核心技术。

信号变换环节是对传感器输出的电信号进行加工,如将信号放大、调制与解调、阻抗变换、线性化、将信号变换为电压或电流等。原始信号经这个环节处理后,就变换成便于传输、记录、显示、转换以及可进一步后续处理的信号。这个环节常用的模拟电路是电桥

电路、相敏电路、测量放大器、振荡器等。常用的数字电路有门电路、各种触发器、A/D 和 D/A 转换器等。

对于动态信号的测量,即动态测试,在现代测试中已占了很大的比重,它常常需要对测试得的信号进行分析、计算和处理,从原始的测试信号中提取表征被测对象某一方面本质信息的特征量,以利于对动态过程作更深入的了解。这个领域中采用的仪器有频谱分析仪、波形分析仪、实时信号分析仪、快速傅里叶变换仪等。

测试系统要测出被测对象中某些特征性信息,要求既不失真,也不受干扰。这就要求系统本身既具有不失真传输信号的能力,还需具有在外界各种干扰情况下能提取和辨识信号中所包含的有用信息的能力。

1.3 现代测试技术的发展动向

1.3.1 传感器的发展趋势

传感器的主要发展趋势:一是开展基础研究,探索新理论,发现新现象,开发传感器的新材料和新工艺;二是实现传感器的集成化、多功能化和智能化;三是研究生物感官,开发仿生传感器。

1. 发现新现象

传感器工作的基本原理就是各种物理现象、化学反应和生物效应,所以发现新现象与新效应是发展传感器技术、研制新型传感器的理论基础。例如:日本夏普公司利用超导技术研究成功高温超导磁传感器,是传感器技术的重大突破,其灵敏度比霍尔器件高,仅次于超导量子干涉器件(SQUID),而其制造工艺远比超导量子干涉器件简单,它可用于磁成像技术,具有广泛的推广价值。

2. 开发新材料

材料是传感器的重要物质基础,新型的敏感元件材料会给传感器带来新的功能或特性,特别是物性敏感元件材料。例如半导体氧化物可以制造各种气体传感器;而陶瓷传感器工作温度远高于半导体;光导纤维的应用是传感器材料的重要突破,用它研制的传感器具有突出特点;高分子聚合物材料作为传感器敏感元件材料的研究已引起国内外学者的极大兴趣。

3. 采用微细加工技术

微细加工技术又称微机械加工技术,是随着集成电路(IC)制造技术发展起来的,可使被加工的敏感结构的尺寸达到微米、亚微米级。微型传感器就是利用该技术加工制作的特征尺寸为微米级的各类传感器的总称,是近代先进的微电子机械系统(MEMS)中的重要组成部分。美国研制成功的 MEMS 加速度计能承受火炮发射时产生的近 $2 \times 10^5 \text{ g}$ 的加速度。

4. 智能传感器

智能传感器是传统传感器与微处理器赋予智能的结合,兼有信息检测与信息处理的功能。智能传感器充分利用微处理器的计算和存储功能,对传感器的数据进行处理并能对它的内部进行调节使其采集的数据最佳。

智能传感器的结构可以是集成的,也可以是分离的。按结构可以分为集成式、混合式和模块式三种形式。集成智能传感器是将传感器与微处理器、信号调理电路做在同一芯片上所构成的,集成度高、体积小。混合智能传感器是将传感器的微处理器、信号调理电路做在不同芯片上构成的。模块智能传感器是由许多相互独立的模块组成,如将微计算机、信号调理电路模块、输出电路模块、显示电路模块与传感器装配在同一壳体内,则组成模块智能传感器。

5. 多功能传感器

多功能传感器能转换多个不同物理量,对多个参数进行测量。如:同时检测钠、钾和氢离子的传感器,其尺寸为 $2.5\text{mm} \times 0.5\text{mm} \times 0.5\text{mm}$,可直接用导管送进心脏内进行检测。检测血液中的钠、钾和氢离子的浓度,对诊断心血管疾病非常有意义。

6. 仿生传感器

结合物理、化学和生物各方面作用原理,在整体上具有优良特性的复杂系统就是大自然创造的生物。不仅人类集多种感官于一身,还有多种生物具有奇异功能,尤其有些动物的感官功能大大超过了当今传感器技术所能实现的范围。深入广泛研究生物界具有的感知能力的机理,开发出仿生传感器必然能使传感器技术有巨大发展。

1.3.2 测试技术的发展趋势

随着材料科学、微电子技术和计算机技术的发展,测试技术也在迅速发展,从单一学科向多学科相互借鉴和渗透,形成综合各学科成果的测量系统。智能传感器和计算机技术的发展和运用,使得测试系统向自动化、智能化和网络化的方向发展;测试系统的在线实时测试能力在迅速提高;测试与控制密切结合,实现“以信息流控制能量流和物质流”。

测试项目和测试范围与日俱增,测试对象趋向复杂,测试速度和测试精度要求不断提高,这就使传统的单机单参数测试已经不能适应科技发展的要求,迫切要求测试技术不断改进与完善,自动测试系统是适应该要求的产物。自动测试系统(ATS, Automatic Test System)是指以计算机为核心,在程控指令的指挥下,能自动完成某种测试任务而组合起来的测试仪器和其他设备的有机整体。

自动测试系统是将测试技术与计算机技术和通信技术有机的结合在仪器的产物。它的发展大体经历了三个阶段:

第一阶段,常见的有数据采集系统、自动分析系统等。

第二阶段,采用了标准接口及总线系统,具有代表性的是 CAMAC 标准接口系统和 IEEE-488 标准接口系统,系统组建方便,可灵活的增加测试内容,得到了广泛的应用。

第三阶段,以通用计算机为核心,配以一定的测试硬件电路和应用软件,共同完成测试仪器或仪器系统的任务。这种插卡式仪器降低了成本,更新方便,在测试系统和网络化方面可发挥巨大作用。

以计算机为核心的更高层次、更高水平的虚拟仪器系统是自动测试系统的发展方向。虚拟仪器(Virtual Instrumentation)是一些借助于通用的模拟量及数字量输入输出平台,通过计算机软件,按已知的数学模型和时序实现的,具有信号测量、控制、变换、分析、显示、输出等全部或部分功能的智能化输入输出系统。典型特征是不脱离计算机而独立工作。它通常由通用硬件平台、软件平台、计算机以及数学模型几方面组成。典型的虚拟仪器模

式可以理解为除了信号的输入和输出以外,仪器的其他操作、测量、控制、变换、分析、显示等功能均由软件来实现的一种计算机管理的数字化仪器。

目前,主流的虚拟仪器主要是 VXI、PXI、各种计算机总线(如 PCI、ISA、RS232、USB)等总线标准的各种插卡和仪器模块,工作方式多是将各种总线式仪器插入有计算机的主机箱内,完成与非虚拟仪器相同的功能,具有同类的性能,将一部分仪器功能软件化。

1.4 现代测试技术的典型应用

1.4.1 模拟发射技术

在武器系统的研制中,要反复应用发射环境来验证武器系统的动态性能,使用实际发射平台及实物,其成本高昂且不能对其工作性能进行测试,由此,各种模拟发射设备被研制出来。如某研究所的模拟炮群(图 1-2),可以模拟多种发射环境。模拟炮一般由气源(压缩空气或火药)、加速段、测试段和回收段组成。某研究所模拟炮性能参数如表 1-1 所列。



图 1-2 某研究所的模拟炮群

表 1-1 某研究所的模拟炮性能参数

性能指标 名 称	弹丸质量 /kg	有效载荷 /kg	加速度峰值 /g	加速度上升 时间/ms	最大速度	结构/m
37 气体炮	0.5		24000	0.6	595m/s	长 30
85 气体炮	2	0.5	34000	2 ~ 3	600m/s 20000r/min	长 113 远解 60 回收 40
95 气体炮	2		24000	0.6	595m/s	长 7.8

(续)

性能指标 名 称	弹丸质量 /kg	有效载荷 /kg	加速度峰值 /g	加速度上升 时间/ms	最大速度	结构/m
155 气体炮	2.7	0.5	26275	2.1		
	5.2	2.5~3	10000~15000	3.85~4	500m/s	可回收
	3~5	0.5	45000	0.3	8000r/min	可回收
低过载模拟炮			3~90	0.3~1.5	40~200m/s	
85 低过载火药炮	7.5		7000		1300r/min	长 22m (051 靶场)
220 气体负压炮 (模拟火箭的恒加速度)	4	40	恒加速度 80g 8g			总长:50 发射段 38 回收段 12

1.4.2 终点弹道模拟——火箭撬技术

检验武器系统在碰击目标时的毁伤能力,要把有效载荷加速到一定速度,准确的碰击各种目标,用各种仪器检测其毁伤效果,典型的装置就是火箭撬。火箭撬就是用火箭发动机将装有有效载荷的小车在类似铁道的轨道上将其加速到一定速度,在接近目标时急刹车,让其有效载荷以惯性碰击目标。刹车方式有水、反推发动机及沙子等多种方式。某靶场的火箭撬及轨道如图 1-3 所示。最大速度为 $2Ma$,最大有效载荷为 100kg,轨道长为 1500m。

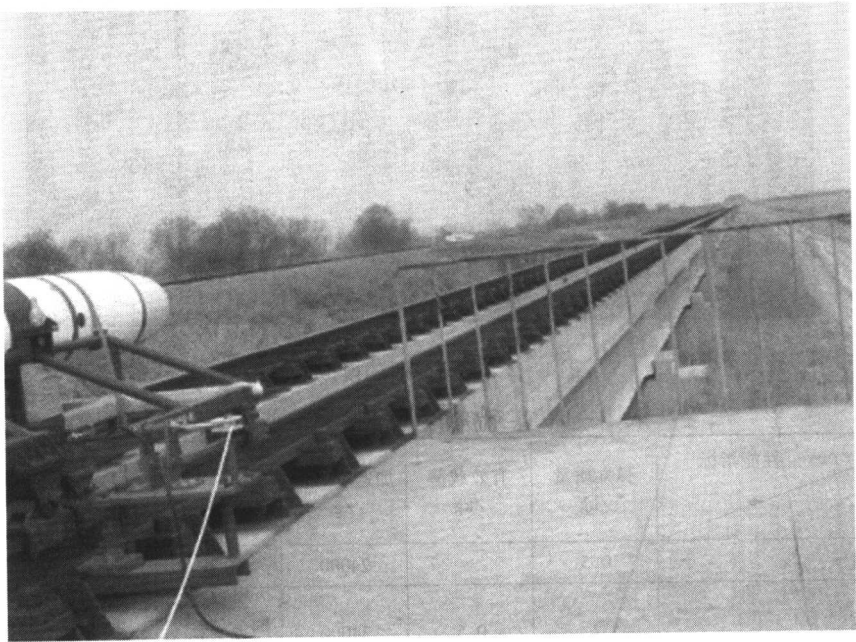


图 1-3 某靶场的火箭撬及轨道