

高等学校仪器仪表及自动化类专业规划教材

# 现代测试技术

■ 主编 何广军 高育鹏  
参编 白云



西安电子科技大学出版社  
<http://www.xduph.com>

高等学校仪器仪表及自动化类专业规划教材

军队“2110工程”资助

# 现代测试技术

主编 何广军 高育鹏

参编 白云

西安电子科技大学出版社

2007

## 内 容 简 介

本书从理论和实践相结合的角度,详细介绍了测试技术的基本理论、原理和方法。其主要内容包括测试技术的有关概念,测试误差理论,各种常用电量和非电量参数的测试方法,常用仪器仪表、常用传感器的结构及工作原理,自动测试系统的设计及总线技术和数据采集与处理系统。

本书可作为高等院校测控技术及仪器、电气工程及其自动化等相关专业本科生的教材和教师的教学参考书,也可作为相关专业工程技术人员的参考书。

### 图书在版编目(CIP)数据

现代测试技术/何广军,高育鹏主编. -西安:西安电子科技大学出版社,2007.3

高等学校仪器仪表及自动化类专业规划教材

ISBN 978 - 7 - 5606 - 1809 - 8

I. 现… II. ①何… ②高… III. 测试技术-高等学校-教材 IV. TB4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 020391 号

策 划 臧延新 云立实

责任编辑 郭 景 王 瑛

出版发行 西安电子科技大学出版社(西安市太白南路2号)

电 话 (029)88242885 88201467 邮 编 710071

<http://www.xduph.com> E-mail: [xdupfb@pub.xaonline.com](mailto:xdupfb@pub.xaonline.com)

经 销 新华书店

印刷单位 陕西光大印务有限责任公司

版 次 2007年3月第1版 2007年3月第1次印刷

开 本 787毫米×1092毫米 1/16 印张 17.5

字 数 411千字

印 数 1~4000册

定 价 22.00元

ISBN 978 - 7 - 5606 - 1809 - 8/TN · 0365

**XDUP 2101001 - 1**

\*\*\* 如有印装问题可调换 \*\*\*

本社图书封面为激光防伪覆膜,谨防盗版。

# 前 言

现代测试技术是一门涉及传感器技术、数据处理、仪器仪表、计算机技术等多学科和技术的新兴综合学科。本书结合国内外科技的发展,比较全面和系统地介绍了测试技术的有关概念,测试误差理论,各种常用电量和非电量参数的测试方法,常用仪器仪表、常用传感器的结构及工作原理,自动测试系统的设计及总线技术和数据采集与处理系统。

为了适应今后科学技术的发展,本书强调基础理论和基本知识,注重基础理论与实际应用的结合,注重现代测试手段的介绍,力求知识的基础性、系统性和完整性。全书共分为8章。第1章简要介绍了测试技术的有关概念和方法。第2章主要介绍了测量误差的有关概念、特性及其处理和减小方法。第3章和第4章主要介绍了各种常用电参数和非电参数的测试方法、测试原理及测试的常用仪器仪表。第5章介绍了几种常用传感器的结构及工作原理。第6章主要介绍了微型机总线、GPIB总线、VXI总线、PXI总线及PCI总线的规范、结构特点等。第7章介绍了数据采集与处理系统的结构类型及其设计方法,对智能仪器与个人仪器作了简单介绍。第8章介绍了自动测试系统的设计和组建方法。

全书的计划学时数为60学时左右,使用者可根据需要取舍部分内容,也可根据需要增加8学时左右的实验内容。

本书可作为测控技术及仪器、电气工程及其自动化等专业自动测试技术、现代测控技术、电子测量技术及传感器技术等课程的教科书和教学参考书。

本书第1、2、5、7章由何广军编写;第3、4、6章由高育鹏编写;第8章由白云编写。全书由何广军统稿。白云和高育鹏负责全书的校对工作。

在本书的编写过程中,胡小江、马计房、李刚、李国宏、康红霞等同志提出了许多宝贵的建议和意见,在此表示诚挚的感谢。

全书在编写的过程中还参阅了不少兄弟院校的教材和国内外文献资料,特向作者和编著者表示诚挚的谢意。作者尤其要感谢西安电子科技大学出版社的领导和同志们的大力支持。

由于测试技术涉及面广,书中难免存在不妥之处,敬请读者批评指正。

编著者

2006年12月

# 目 录

<b>第1章 绪论</b> .....	1	3.1.1 信号源的种类 .....	39
1.1 测试技术 .....	1	3.1.2 信号源的工作性能 .....	41
1.1.1 概述 .....	1	3.2 信号发生器的频率合成技术 .....	42
1.1.2 计量 .....	4	3.2.1 直接合成法 .....	43
1.2 电子测量 .....	4	3.2.2 间接合成法 .....	45
1.2.1 电子测量的内容 .....	5	3.3 电压、电流和功率的测量 .....	49
1.2.2 电子测量的特点 .....	6	3.3.1 数字电压表 .....	49
1.2.3 电子测量的方法 .....	7	3.3.2 电压的测量 .....	52
1.3 测量仪器 .....	10	3.3.3 电流的测量 .....	57
1.3.1 电子测量仪器的主要功能 .....	10	3.3.4 功率的测量 .....	60
1.3.2 电子测量仪器的分类 .....	11	3.4 频率和时间的测量 .....	61
1.3.3 电子测量仪器的主要性能指标 .....	11	3.4.1 时间频率的基本概念 .....	62
1.3.4 电子测量仪器的发展 .....	13	3.4.2 计数法测频原理 .....	64
思考与练习题 .....	14	3.4.3 计数法测周期 .....	65
<b>第2章 测量误差分析及数据处理</b> .....	15	3.4.4 电子计数法测量时间间隔 .....	66
2.1 测量误差的分类与测量结果的评定 .....	15	3.5 电路基本元器件参数的测量 .....	68
2.1.1 真值和误差 .....	15	3.5.1 电阻的测量 .....	68
2.1.2 测量误差的分类 .....	16	3.5.2 电容的测量 .....	70
2.1.3 误差的表示方法 .....	16	3.5.3 电感的测量 .....	73
2.1.4 测量结果的评定 .....	17	3.5.4 半导体二极管的测量 .....	75
2.2 随机误差的统计特性及估计方法 .....	18	3.5.5 半导体三极管的测量 .....	77
2.2.1 随机误差的性质和特点 .....	18	3.6 波形的测量 .....	79
2.2.2 测量值的数学期望和标准差 .....	19	3.6.1 失真度的测量 .....	80
2.3 系统误差 .....	21	3.6.2 频谱分析 .....	81
2.3.1 系统误差的特征及其减小方法 .....	21	3.6.3 尖峰电压的测试 .....	82
2.3.2 系统误差的判别 .....	23	3.7 脉冲波形参数的数字化测量 .....	83
2.4 疏失误差及其判断准则 .....	25	3.7.1 脉冲宽度的数字化测量 .....	83
2.4.1 测量结果的置信问题 .....	25	3.7.2 脉冲前后沿的数字化测量 .....	85
2.4.2 判断异常数据的统计学方法 .....	27	3.7.3 脉冲时间间隔的数字化测量 .....	86
2.5 测量数据的处理 .....	29	3.8 接收机噪声及灵敏度 .....	87
2.5.1 有效数与数据表示方法 .....	29	3.8.1 概述 .....	87
2.5.2 等精度测量结果的处理步骤 .....	31	3.8.2 噪声系数的自动测量 .....	88
2.6 误差的传播和测量方案的设计 .....	33	3.8.3 噪声系数自动测量法的 基本原理 .....	89
2.6.1 测量误差的合成 .....	33	3.8.4 接收机灵敏度的自动测量 .....	91
2.6.2 测量误差的分配 .....	36	3.9 数据域测量 .....	94
2.6.3 测量方案的设计 .....	37	3.9.1 数据域测量的基本概念 .....	94
思考与练习题 .....	38	3.9.2 数据域测量的特点 .....	94
<b>第3章 常用电参数及器件的测量</b> .....	39	3.9.3 数字信号的特点 .....	95
3.1 信号源的种类和工作性能 .....	39		

3.9.4 数据域测量技术 .....	96	4.9.5 声波式物位计 .....	151
3.9.5 数据域测试 .....	98	4.9.6 光学物位计 .....	152
思考与练习题 .....	100	4.10 成分的测量 .....	153
<b>第4章 非电参数的测量</b> .....	<b>101</b>	4.10.1 概述 .....	153
4.1 概述 .....	101	4.10.2 热导式气体分析仪 .....	153
4.2 转速的测试 .....	102	4.10.3 电化学式分析仪 .....	155
4.2.1 电子计数式测速 .....	103	4.10.4 光学吸收式分析仪 .....	156
4.2.2 瞬态转速测试 .....	106	思考与练习题 .....	157
4.2.3 激光测转速 .....	108	<b>第5章 传感器技术</b> .....	<b>159</b>
4.3 转矩的测试 .....	109	5.1 传感器概述 .....	159
4.3.1 传递转矩测试法 .....	109	5.2 电阻应变片 .....	160
4.3.2 平衡力转矩测试法 .....	115	5.2.1 电阻应变片的结构 .....	160
4.3.3 能量转换转矩测试法 .....	115	5.2.2 电阻应变片的特点 .....	161
4.4 温度的测试 .....	118	5.2.3 电阻应变效应 .....	161
4.4.1 概述 .....	118	5.3 光电式传感器 .....	162
4.4.2 接触式测温 .....	119	5.3.1 光电效应 .....	163
4.4.3 非接触式测温 .....	123	5.3.2 光电管 .....	165
4.5 压力的测试 .....	124	5.3.3 光敏电阻 .....	165
4.5.1 概述 .....	124	5.4 霍尔传感器 .....	167
4.5.2 机械弹性式压力计原理 .....	125	5.5 压电传感器 .....	170
4.5.3 霍尔式压力计原理 .....	126	5.5.1 晶体压电效应 .....	170
4.5.4 光电式压力测量原理 .....	127	5.5.2 压电加速度传感器 .....	171
4.6 噪声的测试 .....	128	5.6 频率式传感器 .....	171
4.6.1 噪声的概念 .....	128	5.6.1 振弦式压力传感器结构和 工作原理 .....	171
4.6.2 噪声测试的原理 .....	129	5.6.2 振弦式压力传感器的应用 .....	172
4.6.3 噪声测试的频谱分析 .....	131	5.7 电容式传感器 .....	173
4.6.4 家用电器的噪声测量 .....	132	5.7.1 电容式传感器的原理 .....	173
4.7 振动的测试 .....	133	5.7.2 电容式传感器的应用 .....	174
4.7.1 基本概念 .....	133	5.8 光纤传感器 .....	174
4.7.2 振动的测试 .....	133	5.8.1 光纤传感器的定义和分类 .....	174
4.7.3 振动试验设备 .....	138	5.8.2 强度型光纤传感器 .....	175
4.8 流量的测试 .....	139	5.9 超声波传感器 .....	176
4.8.1 概述 .....	139	5.9.1 概述 .....	176
4.8.2 差压式流量计 .....	139	5.9.2 工作原理 .....	177
4.8.3 转子流量计 .....	143	5.10 谐振式传感器 .....	177
4.8.4 靶式流量计 .....	145	5.10.1 谐振式传感器的产生及 特点 .....	177
4.8.5 电磁流量计 .....	145	5.10.2 谐振现象的实质和力 矢量图 .....	178
4.8.6 超声波流量计 .....	146	5.10.3 振动筒压力传感器 .....	179
4.9 物位的测量 .....	148	5.11 软传感器 .....	181
4.9.1 概述 .....	148	5.11.1 产生原因、定义及特点 .....	181
4.9.2 直读式玻璃液位计 .....	149		
4.9.3 浮力式液位计 .....	149		
4.9.4 电容式液位计 .....	150		

5.11.2	软传感器的设计方法	182	<b>第7章 数据采集与处理系统</b>	230
5.11.3	软传感器模型的在线校正	184	7.1 微型计算机数据采集与处理系统	230
5.11.4	软传感器技术存在的 问题及展望	184	7.1.1 基本的数据采集与处理系统	230
5.12	遥感传感器	185	7.1.2 高速微机数据采集与 处理系统	233
	思考与练习题	189	7.1.3 数据采集与处理系统的发展	236
<b>第6章 测控总线技术</b>		190	7.2 数据采集与处理系统实例	237
6.1 总线概述		190	7.3 智能仪器与个人仪器	242
6.1.1 总线与接口		190	7.3.1 智能仪器	242
6.1.2 总线和接口标准的分类		191	7.3.2 个人仪器	244
6.1.3 总线的组成和性能参数		192	思考与练习题	245
6.1.4 基于总线的自动测试系统		193	<b>第8章 自动测试系统</b>	246
6.2 常用微型机总线简介		195	8.1 概述	246
6.2.1 STD 总线		195	8.1.1 组成与工作过程	246
6.2.2 XT/ISA/EISA 总线		195	8.1.2 对系统的基本要求	247
6.2.3 PC/104 总线		196	8.2 自动测试系统的结构与原理	248
6.2.4 USB 总线		196	8.2.1 输入通道的基本结构	248
6.2.5 IEEE 1394 总线		198	8.2.2 输出通道的基本结构	250
6.2.6 串行通信接口		200	8.3 微机自动测试系统的设计	252
6.3 GPIB 总线		204	8.3.1 设计任务	253
6.4 VXI 总线		207	8.3.2 系统总体结构设计	253
6.4.1 概述		207	8.3.3 输入通道电路设计	254
6.4.2 VME 总线技术规范		208	8.3.4 输出通道设计	256
6.4.3 VME 总线控制器		209	8.4 微机自动测试系统的软件设计和 测试	257
6.4.4 VXI 总线模块		210	8.4.1 软件设计	257
6.4.5 VXI 总线主机箱		210	8.4.2 软件测试的概念和内容	259
6.4.6 VXI 总线连接器		211	8.5 自动测试系统的组建	261
6.4.7 VXI 总线的电气性能		212	8.5.1 组建自动测试系统的准备工作	261
6.4.8 VXI 对电磁辐射和敏感度的 考虑		216	8.5.2 组建自动测试系统的几项 主要工作	261
6.4.9 VXI 总线系统结构		216	8.5.3 编制测试程序	264
6.5 PXI 总线		218	8.5.4 运行测试程序	265
6.5.1 概述		219	8.6 自动测试系统设计实例	265
6.5.2 PXI 的主要机械特性		219	8.6.1 系统概念	265
6.5.3 PXI 总线电气规范		220	8.6.2 测试系统的总体方案	266
6.5.4 PXI 系统控制器		221	8.6.3 测试系统的硬件设计	267
6.5.5 PXI 仪器		223	8.6.4 测试系统的软件设计	268
6.6 PCI 总线		223	思考与练习题	269
6.6.1 PCI 总线的主要性能与特点		224	<b>参考文献</b>	270
6.6.2 PCI 总线的系统结构		224		
6.6.3 PCI 总线协议		228		
思考与练习题		229		

# 第1章 绪 论

## 1.1 测试技术

### 1.1.1 概述

测试通常包含测量与试验两部分内容,测量是对某一物理量的“数量”的描述,而试验则是对其“性质”的探讨。测试是人们认识和研究客观物质世界的基础。一个完整的测试过程就是从客观事物中提取有用信息、摒弃冗余信息,进而比较客观、准确地描述被测对象“数量”与“性质”的过程。在测试过程中,人们必须借助于专门的仪器设备,通过科学的试验和必要的数据处理,才能取得被测对象的准确信息。

测试技术隶属于试验科学,并在其中占据着很重要的部分,它主要研究各种物理量的测量原理和测量信号(包括可能的误差信息)的分析与处理方法。随着各种相关技术(如计算机技术、传感器技术、大规模集成电路技术、通信技术)的飞速发展,测试技术领域发生了巨大的变化,从而产生了现代测试技术。现代测试技术的一个主要特点是基于计算机的测试,也就是以计算机为核心构成测试系统。该系统一般具有开放化、远程化、智能化、多样化、网络化、测控系统大型化和微型化、数据处理自动化等特点,它将成为仪器仪表与测控系统新的发展方向。

#### 1. 测试技术的作用

人们通过对客观事物大量的观察和测试,形成各种定性或定量的认识,并归纳、建立起各种定理和定律,而后又通过测试来验证这些认识、定理和定律是否符合实际情况,经过如此反复实践,逐步认识事物的客观规律,并用以解释和改造世界。因此,可以说测试是人类认识和改造世界的一种不可缺少和替代的手段。事实已经证明:当今科学技术要取得进步,社会生产要得到继续发展,就必须与测试理论、技术、手段的发展和进步相互依赖、相互促进。测试技术水平是反映一个历史时期、一个国家的科学技术水平的一面“镜子”。可以这样认为,评价一个国家的科技状态,最为快捷的办法就是去审视在那里所进行的测试以及由测试所累积的数据是如何被利用的。

具体来讲,测试技术有如下主要作用:

(1) 测试技术是技术部门和科研院所进行研究、认识、维护不同对象的必不可少的手段。对于科研院所,探讨某一真相,研究某一理论,进行某一实践,都涉及到对对象的某种认识和了解,因此离不开相应的测试技术;对于军事部门来说,现代武器系统日益复杂,功能模块十分繁多,导致可能出现的故障和隐患大大增加,对其实施有效、实用的检测就必须借助于现代测试技术。



(2) 测试技术是产品检验和质量控制的重要手段。借助于测试工具对产品进行质量评价是测试技术重要的应用领域。传统的方法只能将产品区分为合格品和废品,只能起到产品验收和废品剔除的作用,对废品的出现并没有预先防止或提示的能力,属于被动测试。随着科学技术的发展,在传统测试技术基础上发展起来的一种新的技术称为主动测试技术或在线测试技术,该技术的一个显著特点是它可以使测试和生产加工同时进行,并能及时地用测试结果对生产过程主动地进行控制,使之能够克服外界干扰因素的影响,适应生产条件的变化或能够自动地将生产过程调整到最佳状态。这样,测试的作用已经不只是单纯的检查产品的最终结果,还需要过问和干预造成这些结果的原因,从而进入质量控制的领域。

(3) 测试技术是大型设备安全经济运行的保证。电力、石油、化工、机械等行业的一些大型设备通常在高温、高压、高速和大功率状态下运行,保证这些关键设备的安全运行在国民经济中具有重大意义。为此,通常设置故障监测系统以对温度、压力、流量、转速、振动和噪声等多种参数进行长期的动态监测,以便及时发现异常情况,加强故障预防,达到早期诊断、预防事故发生的目的,这样就可以避免严重的突发事故,保证设备和人员的安全,提高经济效益。另外,在日常运行中,这种连续监测可以及时发现设备故障的前兆,并采取预防性检修。随着计算机技术的发展,这类监测系统已经发展到故障自诊断系统,可以采用计算机来处理测试信息,进行分析、判断,及时诊断出设备故障并自动报警或采取相应的对策。

(4) 测试技术是自动化系统中不可缺少的组成部分。任何生产过程都可以看做是由“物流”和“信息流”组合而成的。人们为了有目的地进行控制,首先必须通过测试获取有关信息,然后才能进行分析、判断,以便实现自动控制,而反映物流的数量、状态和趋向的信息流则是人们管理和控制物流的依据。所谓自动化,就是系统或某个过程的运行不需要人工的干预,也就是用各种技术工具和方法代替人来完成测试、分析、判断和控制工作。一个自动化系统通常由多个环节组成,分别完成信息的获取、信息的转换、信息的处理、信息的传送及信息的执行等功能。在实现自动化的过程中,信息的获取与转换是极其重要的组成环节,只有精确、及时地将被控对象的各项参数测试出来并转换成易于传送和处理的信号,整个系统才能正常地工作。因此,自动测试技术是自动化系统中不可缺少的组成部分。

(5) 测试技术是推动现代科学技术进步的重要力量,测试技术的完善和发展直接影响着现代科学技术能否以较快的速度发展和进步。

(6) 现代测试技术是理论研究成果形成的推进剂。人们在自然科学各个领域内从事的研究工作,一般是利用已知的规律对观测、试验的结果进行概括、推理,从而对所研究的对象取得定量的概念并发现它的规律性,然后上升到理论。因此,现代测试手段所达到的水平在很大程度上决定了科学研究的深度和广度。测试技术达到的水平愈高,提供的信息愈丰富、愈可靠,科学研究取得突破性进展的可能性就愈大。此外,理论研究的一些成果也必须通过实验或观测来加以验证,这同样离不开测试技术。

从另一方面看,现代化生产和科学技术的发展也不断地对测试技术提出新的要求和课题,成为促进测试技术向前发展的动力。科学技术的新发现和新成果不断应用于测试技术中,也有力地促进了测试技术自身的现代化。

测试技术与现代化生产和科学技术相互渗透、相互作用的密切关系,使它成为一门十分活跃的技术学科,测试技术几乎涉及到人类的一切活动领域中,在人类的活动中发挥着愈来愈大的作用。

## 2. 测试系统的组成

测试的基本任务是获取有用信息,而信息又蕴涵在某些随时间或空间变化的物理量(信号)中。因此,首先要检测出被测对象所呈现的有关信号,再加以处理,最后将结果提交给观察者或其他信息处理与控制装置。为了实现对上述信号的获取、处理和管理工作,人们一般通过构建相应的测试系统来完成。一般来讲,测试系统由传感器、调理变换装置、信号传输装置和显示记录装置等部分组成,分别完成信息的获取、变换处理、传输和显示等功能,当然其中还包括电源等不可缺少的部分。图1-1给出了基本测试系统的组成框图。

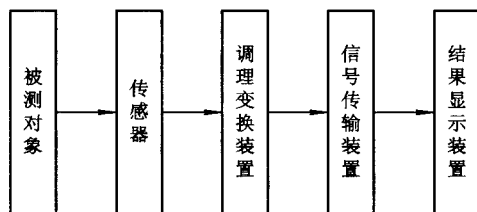


图 1-1 基本测试系统的组成框图

### 1) 被测对象

被测对象是测试系统信息的来源,它决定着整个测试系统的构成形式。被测对象的形式往往是千变万化的,因此便构成了不同的测试系统。比如被测对象可能与力、位移、速度、加速度、压力、流量、温度等某一个或某些参数有关,则相应的测试系统就必须具有完成相关参数检测的功能。

### 2) 传感器

传感器是把被测量(如物理量、化学量)转换成电信号输出的器件。显然,传感器是测试系统与被测对象直接发生联系的环节,传感器能否正常地将被测量输出、传感器性能的好坏、传感器选用的是否恰当等因素直接关系到测试系统的性能。测试系统获取信息的质量往往是由传感器的性能一次性确定的,因为测试系统的其他环节无法添加新的测试信息并且不易消除传感器所引入的误差。

目前传感器的形式多样,工作原理也不尽相同,但是一般运用比较多的传感器按照其工作原理的不同可以分为电阻式、电容式、电感式、压电式、热电式、光电式、磁电式等,至于实际使用中采用哪种类型则必须根据系统要求来选定。

### 3) 调理变换装置

调理变换装置的作用是将传感器的输出信号进行调理(包括量程选择,阻抗匹配,信号放大、缩小等),将其转换成易于测量的电压或电流信号,并进行相应的处理变换。

调理变换装置的种类和结构是由传感器的类型决定的,不同的传感器所要求配用的测量电路经常具有自己的特色。一般而言,调理变换装置较多考虑选用电桥、放大器、滤波器、调制器、解调器、运算器、阻抗变换器等器件来组成。

#### 4) 信号传输装置

信号传输装置用来实现将信号按照某种特定的格式传输,比如采用某种总线标准或者进行某种格式的变换。

#### 5) 结果显示装置

结果显示装置是测试人员和测试系统联系的主要环节之一,主要作用是使人们了解测试数值的大小或变化的过程。常用的显示装置一般包括实时信号分析仪、电子计算机、笔式记录仪、示波器、磁带记录仪、半导体存储器等。

### 1.1.2 计量

计量是利用比较标准的各类量具、仪器仪表,对测量设备定期进行检验和校准,以确保测量结果的准确性、可靠性和统一性的过程。计量可认为是测量的特殊形式。在计量过程中,认为所使用的量具和仪器是标准的,用它们来校准、检定受检量具和仪器设备,以保证使用受检量具仪器进行测量时所获得的测量结果的可靠性。计量是测量的基础和依据。

计量具有准确性、一致性、法制性和原始性的特点。计量结果必须包含被计量的值和量值的误差范围(准确性)。计量误差是计量结果与被计量的量的真值之间的差异。计量基准是指用最先进的科学技术和工艺水平,以最高的准确度和稳定性建立起来的专门用以规定、保持和复现物理量计量单位的特殊量具或仪器装置等。计量单位的统一是量值统一的前提,计量结果应该不随所使用的计量器具和计量人员的变化而超出误差范围。就一个国家而言,所有的量值都归结到国家标准上;就世界而言,量值应该归结到国际标准上,以免造成技术和应用上的混乱。

计量器具是计量仪器、量具、计量物质及装置的总称,是计量工作的物质技术基础。

## 1.2 电子测量

从广义上讲,凡是利用电子技术为基本手段的测量技术都可以说是电子测量;从狭义上讲,电子测量是指在电子学中测量有关电的量值。它是测试技术和电子技术相互结合的产物,是实现测量过程自动化、智能化及应用计算机技术组建现代测试系统进而实现测试系统化、快速化的基础。

电子测量除了具体运用电子科学的原理、方法和设备对各种电量、电信号及电路元件的特性和参数进行测量外,还包括通过各种敏感器件和传感装置对非电量进行测量。电子测量具有比其他测量方法更加方便、快捷、准确的特点,有时是用其他测量方法所不能替代的。因此,它不仅用于电学各专业,也广泛的应用于物理学、化学、光学、机械学、材料学、生物学、医学等科学领域及生产、国防、交通、通信、商业贸易、生态环境保护乃至日常生活的各个方面。特别是计算机技术和微电子技术的迅猛发展,为电子测量和测量仪器增添了巨大活力。电子计算机尤其是微型计算机与电子测量仪器相结合,构成了一代崭新的仪器和测试系统,即人们通常所说的“智能仪器”和“自动测试系统”。它们具有对若干电参数进行自动测量、自动量程选择、自动数据记录和处理、自动数据传输、误差自修正、

故障自检自核以及在线测试等功能。这些仪器和测试系统不仅改变了若干传统测量概念,更对整个电子技术和其他科学技术的发展产生了巨大的推动作用。

### 1.2.1 电子测量的内容

通常人们把电参数测量分为电磁测量和电子测量两类。电磁测量主要指交直流电量的指示测量法、比较测量法以及电磁量的测量等。电子测量是指以电子技术理论为依据,以电子测量仪器和设备为手段,对电量和非电量进行的测量。电子测量可分为以下几个方面:

(1) 电磁能量测量。电磁能量测量包括电压、电流、功率、电场强度、磁场强度、功率通量密度等的测量。

(2) 信号特性测量。信号特性测量包括波形、周期、相位、失真度、调幅度、调频指数及数字信号的逻辑状态等的测量。

(3) 网络特性测量。网络特性测量包括频率特性、传输系数、反射系数、电压驻波比以及其他网络参数等的测量。

(4) 电路元器件参数测量。电路元器件参数测量包括电阻、电感、电容、阻抗、品质因数及电子器件参数等的测量。

(5) 电子设备的性能测量。电子设备的性能测量包括增益、衰减、灵敏度、频率特性、噪声指数等的测量。常用的测量仪器有波形分析仪、示波器、噪声测试仪、扫频仪等。

(6) 非电量的测量。非电量的测量包括温度、位移、压力、速度、重量、流量、物面高度、物质成分等的测量。

上述各项测量内容中,尤以频率、时间、电压、相位、阻抗等基本电参数的测量更为重要,它们往往是其他参数测量的基础。如放大器的增益测量实际上就是分别对其输入、输出端电压的测量;脉冲信号波形参数的测量可归结为对电压和时间的测量。同时,由于时间和频率的测量具有其他测量所不可比拟的精确性,因此情况允许的话一般可以把其他物理量转换成时间或频率进行测量。

在航空航天领域的测控系统中,最重要的是弹道和轨道的测量以及对航天器上各设备工作状态的测量。这些测量一般是通过无线电(或光)跟踪测量(遥测)系统来完成的。弹道的测量主要是对高速运动空间目标的角度跟踪与测量、距离和速度的测量等;对航天器设备工作状态的测量在航天器研制过程中用得较多,主要是对信号波形和工作转换状态的测量。它与一般的电子测量有所不同,主要有以下特点:

(1) 采用遥测技术。通过无线电或光测设备,对航天器的轨道或各个主要设备的特征状态进行测量。

(2) 作用距离远。如美国深空测控网 DSN,由于采用大口径、高功率、低噪声天线,低噪声接收,大功率发射机及先进的信号处理等技术,其作用距离可达  $4.6 \times 10^8$  km,可实现对月球、行星及星际之间目标的探测。

(3) 实时性强。使用测试系统或仪器设备对航天器进行测量的主要目的之一就是对其实施控制或制导。最常见的情况就是对其稳定跟踪后,要连续输出测距、测角、测速数据,并可根据事前获取的标校数据对测量值进行实时修正,以得到实时、高精度的测量数据。

## 1.2.2 电子测量的特点

与其他测量相比,电子测量具有以下几个明显的特点。

### 1. 测量频率范围宽

电子测量的频率范围包括了从  $10^{-6}$  Hz 以下到  $10^{12}$  Hz 以上极宽的范围。实际使用中通常是根据不同的工作频段,采用不同的测量原理和使用不同的测量仪器。

### 2. 量程宽

量程是测量范围的最大值和最小值之差或上、下限值之比。电子测量的另一个特点是一些被测对象的量值大小相差悬殊,例如,从地面上接收到的宇宙飞船自外空发来的信号功率,低至  $10^{-14}$  W 数量级,而远程雷达发射的脉冲功率,可高达  $10^8$  W 以上,两者之比为  $1:10^{22}$ 。一般情况下,使用同一台仪器、同一种测量方法是难以覆盖如此宽广的量程的。但是随着电子测量技术的不断发展,单台测量仪器的量程也可以达到很宽。

### 3. 测量精度高

电子测量仪器的精确度一般比其他测量仪器高很多。特别是对频率和时间的测量,由于采用原子频标作为基准,使误差减小到  $10^{-13} \sim 10^{-14}$  数量级,这是目前人类在测量精确度方面达到的最高标准。例如在 GPS 系统中就采用了铯原子钟。

电子仪器的精确度高,正是它在现代科技领域得到广泛应用的重要原因。例如发射导弹、火箭或人造卫星,需要高精度的自动控制系统和遥测系统。如果测量控制不准,末级火箭速度有千分之二相对误差,卫星就会偏离轨道近百千米。在导弹上,起爆时机有千分之一的相对误差,就不能有效杀伤目标。

### 4. 响应时间短、测量速度快

一般来讲,测量的响应时间短,它的测量速度就快。其中,模拟电路的响应速度比时序数字电路的响应速度快,但模拟式的读数装置(电表指针)的响应速度比数字式的读数装置(数字显示器)的响应速度慢。另外,响应时间、测量速度还和测量原理有关。可以想象,如果没有快速、自动地测量与控制,像导弹、卫星等航天器的发射、控制与精确制导就是不可能的。

### 5. 可进行遥测

由于电子测量依据的是电子的运动和电磁波的传播,因此可以将现场各种待测量转换成易于传输的电信号,用有线或无线的方式传送到测试控制台(终端),从而实现遥测和遥控。这使得对那些远距离的、高速运动的或其他人们难以接近地方的信号测量成为可能,比如像卫星、飞船这类航天器的发射与运行状态的测量与控制。

### 6. 易于实现测试智能化和自动化

电子测量作为电子科学一个活跃的分支,电子科学的每一项进步,都非常迅速地在其领域中得到体现。随着电子计算机,尤其是功耗低、体积小、处理速度快、可靠性高的微型计算机的出现,给电子测量理论、技术和设备带来了新的革命。比如微处理器出现于 1971 年,而在 1972 年就出现了使用微处理器的自动电容电桥。现在,已有大量带微处理器的电子测量仪器面世,许多仪器还带有一些标准仪器接口(如 GPIB、RS-232、USB 等),可以

方便地与其他辅件构成功能完善的自动测试系统,从而使得某些测量或测试过程能够在程序控制下自动进行,并具有一定智能功能,比如对误差的自动处理、对干扰的补偿等。

### 1.2.3 电子测量的方法

一个物理量的测量,可以通过不同的方法实现。要得到比较令人信服的测量结果,就必须进行方法的选择,而所测量方法选择的正确与否,不仅直接关系到测量结果的可信赖程度,也关系到测量工作的经济性和可行性。不当或错误的测量方法,除了得不到正确的测量结果外,甚至会损坏测量仪器和被测量设备。

在这里特别要强调的就是有了先进、精密的测量仪器设备,并不等于就一定能获得准确的测量结果,而不精密的测量仪器设备,也未必不能得到准确的测量结果。实际使用中,我们必须根据不同的测量对象、测量要求和测量条件,选择正确的测量方法、合适的测量仪器构成实际测量系统,再进行正确、细心的操作,才能得到理想的测量结果。

测量方法的分类形式有多种,下面介绍几种常见的分类方法。

#### 1. 按测量手段分类

按测量手段分类,可以将测量分为以下几种:

(1) 直接测量。直接测量法是用事先标定好的测量仪表直接读取被测量量值的方法。比如用电压表测量电压,用电桥法测量电阻阻值,用计数式频率计测量频率,用温度计测量温度等。直接测量简单迅速,是工程测量中广泛应用的测量方法。

直接测量又可以分为绝对测量和相对测量两种方式,其中绝对测量是采用仪器、设备、手段测量被测量,直接得到被测量量值,其特点是测量简单、直观、明了,但测量精度不高。相对测量是将被测量直接与基准量比较,得到偏差值,其特点是精度高,但测量复杂、成本高、要求高。

以测量某一物体长度为例,采用绝对测量(如图1-2(a)所示)是直接用测量工具,比如刻度尺测量出其长度;而作为相对测量(如图1-2(b)所示),则是把该物体与某一基准相比较,然后用某一测微工具测量出二者之间的偏差,最终由基准量和偏差得到测量值。

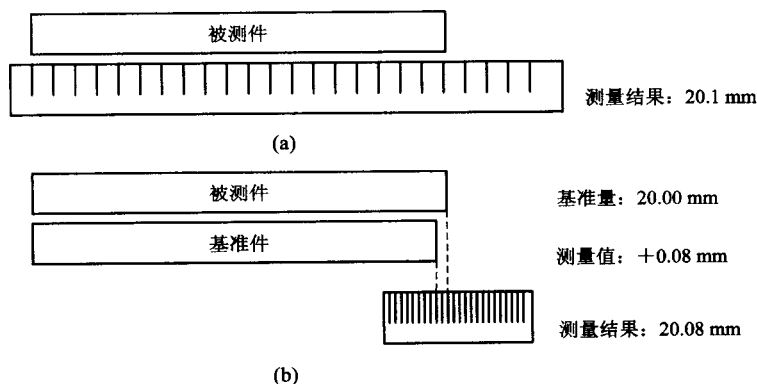


图 1-2 绝对测量和相对测量示意图

(a) 绝对测量; (b) 相对测量

(2) 间接测量。当被测量由于某种原因不能直接测量时，可以通过直接测量与被测量之间的函数关系(可以是公式、曲线或表格等)，间接得到被测量量值。例如测量电阻  $R$  上消耗的直流功率  $P$ ，可以通过直接测量电压  $U$  和电流  $I$ ，而后根据函数关系  $P = UI$ ，经过计算间接获得功耗  $P$ 。

间接测量费时费事，常在下列情况下使用：直接测量不方便，间接测量的结果较直接测量更为准确，缺少直接测量仪器等。

(3) 组合测量。当某项测量结果需要用多个未知参数表达时，可通过改变测量条件进行多次测量，根据函数关系列出方程组并求解，从而得到未知量的值，这种测量方式称为组合测量。在较复杂的测量过程中，经常要用到组合测量法，列出较多的方程。组合测量法比较复杂，测量时间长，但精度较高，一般用于科学试验中。

### 2. 按测量回路分类

按照测量回路的不同，我们可以把测量分为开环测量和反馈测量两种类型。开环测量如图 1-3(a) 所示，它是直接对输出量  $y$  实施测量，具有简单、直观、明了，但测量精度不高的特点。反馈测量如图 1-3(b) 所示，它所测量的输出量  $y$  反馈作用于输入量  $x$ ，具有精度高、复杂、成本高、要求高的特点。

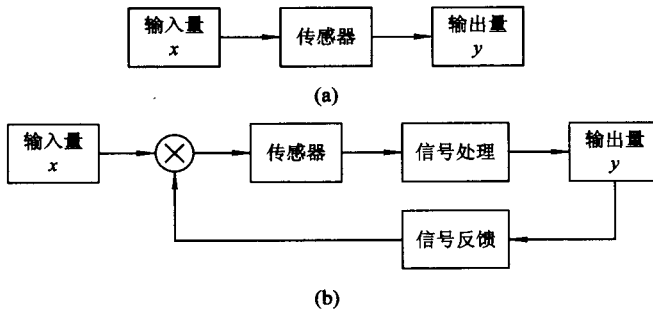


图 1-3 开环测量和反馈测量示意图  
(a) 开环测量；(b) 反馈测量

### 3. 按测量方式分类

按测量方式分类，测量可分为以下几种：

(1) 直读式测量法。直读式测量法是根据仪表的读数来判断被测量值的大小，直接读取被测量数值的测量方法。直读法测量的过程简单，操作容易，读数迅速，但其测量精度不高。

(2) 零位式测量法。零位式测量法又称做零示法或平衡式测量法。测量时用被测量与标准量相比较(因此也称之为比较测量法)，用指零仪表(零示器)指示被测量与标准量相等(平衡)，从而获得被测量。

(3) 微差式测量法。将偏差式测量法和零位式测量法相结合，即可构成微差式测量法。它是一种通过测量待测量与标准量之差(通常很小)间接来得到待测量量值的测量方法。

和零位式测量法相比，微差式测量法可以省去反复调节标准量大小去寻求平衡的步骤，因此，微差式测量法兼有偏差式测量法的测量速度快和零位式测量法测量准确度高的

优点。微差式测量法除在实验室中用作精密测量外,还广泛地应用在生产线控制参数的测量上。

(4) 替代式测量法。替代式测量是将被测量与已知量先后两次接入同一测量装置,如果两次测量中测量装置的工作状态能保持相同,则认为替代前接在装置上的待测量与替代后的已知标准量数值完全相同。当然要做到完全替代,已知标准量最好是连续可调的,这样才能在替代时通过调节使测量装置的工作状态保持不变。

#### 4. 按被测量的性质分类

如果按被测量的性质来区分,测量过程还可以作如下分类:

(1) 时域测量。时域测量也叫做瞬态测量,它主要用来测量被测量随时间的变化规律。例如用示波器观察正弦信号的周期、频率、幅度等参数以及将其施加于某一电路后的输出响应等。

(2) 频域测量。频域测量也称为稳态测量,主要目的是获取待测量与频率之间的关系,如用频谱分析仪分析信号的频谱,测量放大器的幅频特性、相频特性等。

(3) 数据域测量。数据域测量也称为逻辑量测量。它是随着数字电路的飞速发展而发展起来的,主要是用逻辑分析仪、逻辑笔等设备对数字量或数字电路的逻辑状态及逻辑功能、可能的故障类型和故障状态进行测量。数据域测量可以同时观察多条数据通道上的逻辑状态,也可以显示某条数据线上的时序波形,还可以借助计算机分析大规模集成电路芯片的逻辑功能等。由于当前集成电路技术的发展,使得数字电路的测量靠单纯人工测量越来越难以完成,因此其发展的趋势是倾向于测量的智能化和自动化。可以肯定,随着微电子技术的发展需要,数据域测量技术必将得到更大的发展。

(4) 统计测量。统计测量又叫做随机测量,主要是对各类噪声信号进行动态测量和统计分析,这是一项较新的测量技术,尤其在通信领域有着广泛的应用。

除了上述几种常见的分类方法外,还有其他一些分类方法。比如,按照对测量精度的要求可以分为精密测量和工程测量;按照测量时测量者对测量过程的干预程度分为自动测量和非自动测量;按照被测量与测量结果获取地点的关系分为本地(原位)测量和远地测量(遥测)、接触测量和非接触测量;按照被测量的属性分为电量测量和非电量测量等。

#### 5. 测量方法的选择原则

测量的方法形式多样,而测量的对象又是千差万别,因此合理、科学的选择测量方法就显得尤为重要。一般在具体选择测量方法时,要综合考虑下列主要因素:

- ① 被测量本身的特性。
- ② 所要求的测量准确度。
- ③ 测量环境。
- ④ 现有测量设备等。

在此基础上,还要选择合适的测量仪器和正确的测量方法。前面已经讲过,正确可靠的测量结果的获得,要依据测量方法和测量仪器的正确选择、正确操作和测量数据的正确处理。否则,即便使用价值昂贵的精密仪器设备,也不一定能够得到准确的结果,甚至可能损坏测量仪器和被测设备。



## 1.3 测量仪器

测量仪器是测量者用来对被测对象取得“度”或“量”信息的器具，它能够将被测量转换成可供直接观察的指示值或等效的信息。测量仪器一般包括各类指示仪器、比较仪器、记录仪器、传感器和变送器等。利用电子技术对各种待测量进行测量的设备，统称为电子测量仪器。为了能够正确地选择测量方法、使用测量仪器和估价测量结果，本节将对电子测量仪器的主要功能、分类及其主要性能指标等做一些概括介绍。

### 1.3.1 电子测量仪器的主要功能

电子测量仪器一般具有物理量的变换、信号的传输和测量结果的显示等三种最基本的功能。

#### 1. 变换功能

电压、电流等电学量的测量，是通过测量各种电效应的方式实现的。比如作为模拟式仪表最基本构成单元的动圈式检流计(电流表)，就是将流过线圈的电流强度，转化成与之成正比的扭矩而使仪表指针偏转到距离初始位置一个角度，根据此偏转角度的大小(通过刻度盘上的刻度获得)得到被测电流的大小，这就是一种基本的变换功能。对非电量的测量，更需将各种非电物理量如压力、位移、温度、湿度、亮度、颜色、物质成分等，通过各种对之敏感的敏感元件(通常称为传感器)，转换成与之相关的电压、电流等，而后再通过对电压、电流的测量，得到被测物理量的大小。随着测量技术的发展和需要，现在往往将传感器、放大电路及其他有关部分构成独立的单元电路，将被测量转换成模拟的标准电信号，送往测量和处理装置，这样的单元电路常称为变送器，它是现代测量系统中极为重要的组成部分。特别是在近几年，随着传感器技术、集成电路技术、信息处理技术的发展，还出现了数字传感器，它能直接将各种非电量转换为频率信号(准数字量)或数字信号，这使得我们构建自动测试系统更为方便。

#### 2. 传输功能

信号一旦检测出来后就要通过一定方式将其显示给控制者，因此，对于测量仪器的另一个必不可少的功能就是传输功能。传输的过程要涉及到对信号的变换和处理(如电压变换、信号匹配等)，同时根据用户需要可能还要对传输的信号格式做出相应处理。比如在遥测遥控等系统中，现场测量结果需经过较长距离的传输才能送到测试终端和控制台。不管采用有线的还是无线的方式，传输过程中造成的信号失真和外界干扰等问题都会存在，所以必须通过变送器对其做相应处理。由此可见，此类测量仪器的传输功能是一个必须认真对待和处理的问题。

#### 3. 显示功能

我们进行测量的最终目的是要将测量结果以某种有效的方式显示出来。因此，任何测量仪器都必须具备一定的显示功能。比如模拟式仪表通过指针在仪表刻度盘上的位置不同而显示不同的测量结果，数字式仪表通过数码管、液晶或阴极射线管直接以数字形式显示测量结果。作为测量仪器其常用的显示装置一般包括实时信号分析仪、电子计算机、笔式