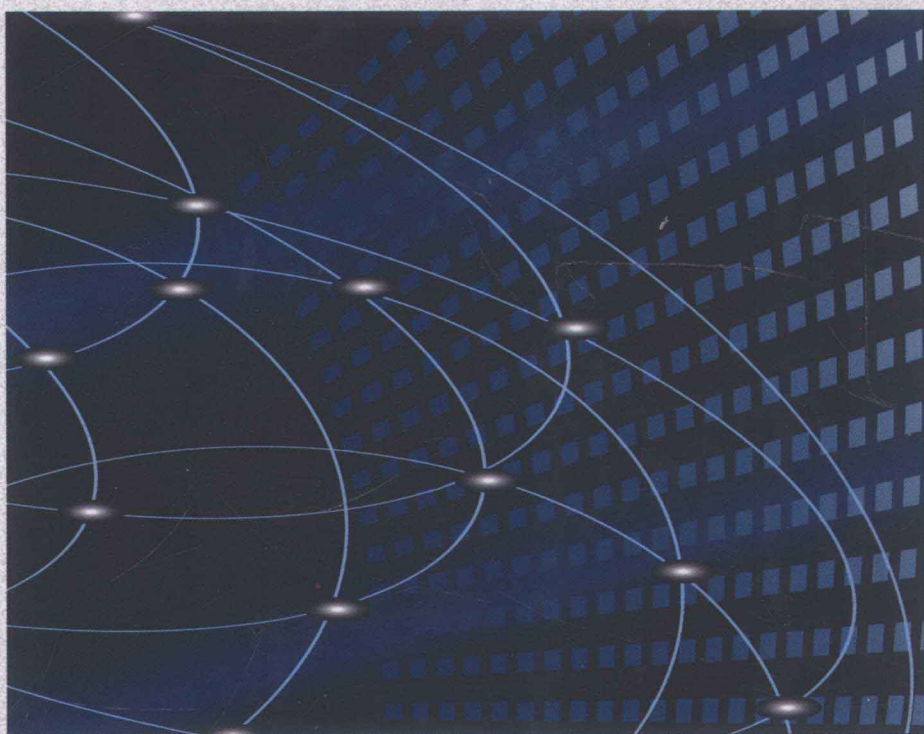


# 现代测试技术 原理与应用

何广军 主编

高育鹏 白云 师剑军 副主编



国防工业出版社

National Defense Industry Press

# 现代测试技术原理与应用

何广军 主编  
高育鹏 白云 师剑军 副主编

国防工业出版社

·北京·

## 内 容 简 介

本书从理论和实践相结合的角度,以构成测试系统的各环节为主线,详细阐述了测试技术的基本理论、原理和应用。本书共分6章,内容包括测试技术的有关概念、测试误差理论、常用传感器工作原理及应用、测控总线技术及应用、自动测试系统的设计、测试性与故障诊断技术等。

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学参考书,也可作为有关专业工程技术人员的参考书。

### 图书在版编目(CIP)数据

现代测试技术原理与应用 / 何广军主编. —北京:  
国防工业出版社, 2012. 6

ISBN 978 - 7 - 118 - 08074 - 2

I. ①现... II. ①何... III. ①测试技术 IV. ①TB4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 091413 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)

北京奥鑫印刷厂印刷

新华书店经售

\*

开本 787 × 1092 1/16 印张 15 字数 346 千字

2012 年 6 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—4000 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)88540777 发行邮购:(010)88540776

发行传真:(010)88540755 发行业务:(010)88540717

# 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一门综合学科。本书根据测试理论和技术的最新发展,结合作者多年的教学实践,比较全面和系统地介绍了组建自动测试系统所涉及的基本理论和知识。

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的宽厚,注重基础理论与实际应用相结合,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6章。第1章测试技术基础,简要介绍了测试技术的有关概念和方法,电子测量与电子仪器,测量误差分析及数据处理。第2章传感器技术,主要阐述了常用传感器的基本理论和应用。第3章总线技术,主要阐述了测控系统常用总线的技术规范和应用,包括了常见微型机总线、GPIB总线、RS-232C/422/485总线、VXI总线、PXI总线和1553B总线。第4章虚拟仪器技术,主要阐述了虚拟仪器的基本概念、软件标准、开发环境和应用实例。第5章自动测试系统设计,主要阐述了系统总体设计技术、软件设计和硬件设计。第6章测试性与故障诊断技术,主要阐述了测试性的基本理论和故障诊断的基本方法,还介绍了测试性分析与设计软件TEAMS。

全书内容深入浅出、图文并茂,各部分内容按照理论和应用两个层面重点阐述,各章之间相互联系又互相独立,读者可根据自己需要选择阅读。

本书第1章、第2章、第6章由何广军编写;第3章、第4章由高育鹏编写;第5章由何广军、白云、高育鹏编写,师剑军参加了部分编写工作,并对全书提出了宝贵意见。全书由何广军统稿。

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、现代测控技术及传感器技术等课程的教科书和教学参考书。

在本书的编写过程中,参考和应用了许多专家、学者的论著,均在参考文献中列出,在此表示衷心感谢。

# 目 录

|                        |    |
|------------------------|----|
| 第1章 测试技术基础 .....       | 1  |
| 1.1 测试与测试系统 .....      | 1  |
| 1.1.1 测试 .....         | 1  |
| 1.1.2 测试系统 .....       | 2  |
| 1.2 电子测量与电子仪器 .....    | 3  |
| 1.2.1 电子测量及方法 .....    | 3  |
| 1.2.2 电子测量仪器 .....     | 6  |
| 1.2.3 测量仪器的主要性能 .....  | 7  |
| 1.3 测量误差及处理 .....      | 9  |
| 1.3.1 误差分类 .....       | 9  |
| 1.3.2 误差的表示方法 .....    | 11 |
| 1.3.3 减小误差的方法 .....    | 12 |
| 1.4 误差的合成与分配 .....     | 15 |
| 1.4.1 测量误差的合成 .....    | 15 |
| 1.4.2 测量误差的分配 .....    | 19 |
| 思考与练习题 .....           | 20 |
| 第2章 传感器技术 .....        | 21 |
| 2.1 传感器概述 .....        | 21 |
| 2.2 应变式传感器 .....       | 23 |
| 2.2.1 电阻应变效应 .....     | 23 |
| 2.2.2 应变计的结构与分类 .....  | 24 |
| 2.2.3 应变式传感器的应用 .....  | 26 |
| 2.3 光电式传感器 .....       | 27 |
| 2.3.1 光电效应 .....       | 27 |
| 2.3.2 光电管 .....        | 29 |
| 2.3.3 光敏电阻 .....       | 30 |
| 2.4 压电式传感器 .....       | 32 |
| 2.4.1 压电效应 .....       | 32 |
| 2.4.2 压电传感器的等效电路 ..... | 33 |

|        |                        |    |
|--------|------------------------|----|
| 2.4.3  | 压电传感器的应用               | 34 |
| 2.5    | 霍耳传感器                  | 35 |
| 2.5.1  | 霍耳效应                   | 35 |
| 2.5.2  | 霍耳器件的特性                | 36 |
| 2.5.3  | 霍耳传感器的应用               | 37 |
| 2.6    | 电容式传感器                 | 38 |
| 2.6.1  | 电容式传感器的工作原理            | 38 |
| 2.6.2  | 电容式传感器的应用              | 40 |
| 2.7    | 光纤传感器                  | 40 |
| 2.7.1  | 光纤                     | 41 |
| 2.7.2  | 光纤传感器的应用               | 42 |
| 2.8    | 空天传感器                  | 43 |
| 2.8.1  | 概述                     | 43 |
| 2.8.2  | 摄影类传感器                 | 44 |
| 2.8.3  | 扫描成像类传感器               | 44 |
| 2.8.4  | 微波成像类传感器               | 47 |
| 2.9    | 智能传感器                  | 48 |
| 2.10   | 传感器管理                  | 50 |
| 2.10.1 | 传感器管理的概念与内容            | 50 |
| 2.10.2 | 传感器管理系统的结构             | 51 |
| 2.10.3 | 传感器管理的主要技术             | 53 |
|        | 思考与练习题                 | 54 |
| 第3章    | 总线技术                   | 55 |
| 3.1    | 总线概述                   | 55 |
| 3.1.1  | 总线的概念和分类               | 55 |
| 3.1.2  | 总线的组成                  | 56 |
| 3.1.3  | 总线的性能参数                | 56 |
| 3.2    | 常见微型机总线                | 57 |
| 3.2.1  | STD 总线                 | 57 |
| 3.2.2  | PC - 104 总线            | 61 |
| 3.2.3  | USB 总线                 | 66 |
| 3.2.4  | IEEE 1394 总线           | 76 |
| 3.3    | GPIB 总线                | 80 |
| 3.3.1  | GPIB 总线概述              | 80 |
| 3.3.2  | GPIB 总线特性              | 81 |
| 3.3.3  | GPIB 总线接口信号            | 82 |
| 3.3.4  | GPIB 总线三线挂钩过程          | 82 |
| 3.4    | RS - 232C/422/485 总线   | 83 |
| 3.4.1  | RS - 232C/422/485 总线概述 | 83 |

|       |                             |     |
|-------|-----------------------------|-----|
| 3.4.2 | RS-232/422/485 总线接口信号 ..... | 84  |
| 3.4.3 | RS-232/422/485 总线特性 .....   | 86  |
| 3.4.4 | RS-232/422/485 总线拓扑结构 ..... | 90  |
| 3.5   | VXI 总线 .....                | 91  |
| 3.5.1 | VXI 总线概述 .....              | 91  |
| 3.5.2 | VXI 总线接口信号 .....            | 95  |
| 3.5.3 | VXI 总线系统控制方案 .....          | 100 |
| 3.5.4 | 硬件寄存器与通信 .....              | 102 |
| 3.5.5 | VXI 总线接口软件 .....            | 104 |
| 3.5.6 | 电磁兼容与噪声 .....               | 104 |
| 3.6   | 1553B 总线 .....              | 105 |
| 3.6.1 | 1553B 总线概述 .....            | 105 |
| 3.6.2 | 1553B 总线特性 .....            | 107 |
| 3.6.3 | 1553B 总线消息传输机制 .....        | 108 |
| 3.6.4 | 1553B 总线应用 .....            | 112 |
| 3.7   | PXI 总线 .....                | 113 |
| 3.7.1 | PXI 总线概述 .....              | 114 |
| 3.7.2 | PXI 机械特性 .....              | 115 |
| 3.7.3 | PXI 总线规范 .....              | 116 |
| 3.7.4 | PXI 系统控制器 .....             | 117 |
|       | 思考与练习题 .....                | 119 |
| 第4章   | 虚拟仪器技术 .....                | 120 |
| 4.1   | 虚拟仪器基本概念 .....              | 120 |
| 4.1.1 | 虚拟仪器技术 .....                | 120 |
| 4.1.2 | 虚拟仪器的组成 .....               | 120 |
| 4.1.3 | 虚拟仪器技术的优势 .....             | 121 |
| 4.2   | 虚拟仪器的软件标准 .....             | 122 |
| 4.2.1 | VISA 技术 .....               | 122 |
| 4.2.2 | SCPI 技术 .....               | 124 |
| 4.2.3 | VPP 技术 .....                | 128 |
| 4.2.4 | IVI 技术 .....                | 130 |
| 4.3   | 虚拟仪器开发环境 .....              | 131 |
| 4.3.1 | Lab VIEW .....              | 131 |
| 4.3.2 | Measurement Studio .....    | 133 |
| 4.3.3 | Lab Windows/CVI .....       | 135 |
| 4.3.4 | Visual C++ .....            | 136 |
| 4.3.5 | Visual Basic .....          | 137 |
| 4.3.6 | Agilent VEE .....           | 138 |
| 4.4   | 虚拟仪器设计示例 .....              | 139 |

|            |                         |            |
|------------|-------------------------|------------|
| 4.4.1      | 产生不同的测试信号 .....         | 139        |
| 4.4.2      | 信号频谱分析示例 .....          | 141        |
| 4.4.3      | 数字滤波器 .....             | 145        |
| 4.4.4      | 曲线拟合 .....              | 150        |
|            | 思考与练习题 .....            | 154        |
| <b>第5章</b> | <b>自动测试系统设计 .....</b>   | <b>156</b> |
| 5.1        | 自动测试系统 .....            | 156        |
| 5.1.1      | 概述 .....                | 156        |
| 5.1.2      | 自动测试系统总体设计 .....        | 160        |
| 5.2        | 自动测试系统的硬件设计 .....       | 162        |
| 5.2.1      | 硬件资源配置 .....            | 162        |
| 5.2.2      | 输入通道的设计 .....           | 162        |
| 5.2.3      | 输出通道的设计 .....           | 164        |
| 5.2.4      | 硬件设计应注意的几个问题 .....      | 166        |
| 5.3        | 自动测试系统的软件设计 .....       | 169        |
| 5.4        | 系统设计举例 .....            | 176        |
| 5.4.1      | 工业锅炉测试系统 .....          | 176        |
| 5.4.2      | 导弹译码器测试系统 .....         | 182        |
|            | 思考与练习题 .....            | 195        |
| <b>第6章</b> | <b>测试性与故障诊断技术 .....</b> | <b>197</b> |
| 6.1        | 测试性 .....               | 197        |
| 6.1.1      | 测试性的概念 .....            | 197        |
| 6.1.2      | 测试性描述 .....             | 198        |
| 6.1.3      | 测试点选择与测试策略 .....        | 200        |
| 6.1.4      | 测试性分析与设计软件 .....        | 205        |
| 6.2        | 故障与故障诊断 .....           | 217        |
| 6.2.1      | 故障 .....                | 217        |
| 6.2.2      | 故障诊断 .....              | 219        |
| 6.2.3      | 故障诊断的基本方法 .....         | 220        |
| 6.2.4      | 故障树分析法 .....            | 222        |
| 6.2.5      | 专家系统故障诊断 .....          | 225        |
| 6.2.6      | 故障诊断技术发展趋势 .....        | 228        |
|            | 思考与练习题 .....            | 230        |
|            | <b>参考文献 .....</b>       | <b>232</b> |



# 第 1 章 测试技术基础

## 1.1 测试与测试系统

### 1.1.1 测试

测试就是利用实验的方法,借助于一定的仪器或者设备,得到被测量数据大小,描述被测量性质和属性的过程。测量是测试最基本、最原始的含义,是测试的一部分。测量是人们借助于专门的测量工具,通过实验的方法,把被测量直接或者间接地与作为测量单位的已知量相比较,从而取得数量观念的认识过程。测量结果包含一定的数值(绝对值大小、符号、误差范围)和单位两部分。检测是在传统的测量学基础上,以检测仪器为主要工具,辅助于专门的设备、计算机、网络等手段,通过适当的实验方法、必要的信号分析及定量的数据处理,由测得信号求取与研究被测对象的有关信息量值,完成有用信息的获取等任务。

测试是包含有测量和检测含义的更深、更广的概念。测量是以检出信号,确定被测对象属性的量值为目的;检测则是在检出信号的基础上作进一步的信号处理和数据分析判断等。

测试技术隶属于实验科学,它主要研究客观对象各种物理量的测量原理,信息获取、传输、显示及测试结果的分析与处理等相关内容。随着计算机技术、传感器技术、大规模集成电路技术、通信技术等的飞速发展,使测试技术领域日益发生着巨大的变化,从而产生了现代测试技术,其显著特点是计算机技术与测试技术的结合。基于现代测试技术的,以计算机为核心的测试系统称为自动测试系统(Automatic Test System, ATS),该系统一般具有开放化、远程化、智能化、多样化、网络化、系统大型化和微型化、数据处理自动化等特点。

随着自动测试系统的规模越来越庞大,结构越来越复杂,在测试技术中逐步引入了系统工程的思想,使得测试技术与系统工程相结合,逐步发展成测试工程学。测试工程学主要研究测试理论、测试技术、信号处理、信息传输、数据分析判断、测试管理以及测试系统的集成与控制等内容。

装备测试是指在装备研制、生产及使用过程中所进行的各种测试。测试的目的在于检查装备的功能和技术性能,发现定位故障,调整不合格的参数或更换有故障的部件,以保证装备技术性能符合要求及装备处于良好的战备状态。

从测试的目的和作用来看,装备测试分为实验性测试、检验性测试和维护性测试三种。在装备研制阶段,装备的技术状态尚未最后“冻结”,测试的方法也未完全确定,这个阶段的测试称为实验性测试;在装备批生产过程中,装备测试属于产品检验出厂的内容,

及运动轨迹的若干电极,这些电极一般称为电子光学系统。

## 2. 真空电子器件的分类

真空电子器件种类繁多,用途十分广泛,涉及应用领域广阔,它主要包括收信放大管、整流管、发射管、微波振荡管、微波放大管、示波管、摄像管、显像管、像增强管、光电倍增管、光敏管、气体放电管(离子管)、开关管、X射线管和电光源等。

### 1) 普通电子管

普通电子管是指基于静电控制原理工作的电子管,也可以说是利用空间电荷效应工作的电子管。在这类管子中,电子在极间的渡越时间远小于信号电压的变化周期,因而相对信号来说,电子在运动过程中所遇到的电场可以近似看成是静态场,即恒定场;从另一角度来说,在这类管子中,电子流的大小和分配是由阴极表面的静电场分布决定的,或者说是工作在空间电荷限制状态下(详见2.2节)的。

收信放大用二极管、三极管、四极管、五极管以及整流管、发射管、微波三极管、微波四极管等都属于普通电子管。

### 2) 微波电子管

基于动态控制原理,工作在微波波段的真空电子器件称为微波管。在微波波段,普通电子管已不能正常工作,因为电子的渡越时间已经与信号变化周期可以比拟甚至更短,电子运动过程中极间电场早已发生了改变,也就是说,不能再利用静态场控制原理。这时,必须放弃利用栅极或阳极直接对电子流的密度和速度进行调制(控制)的方式,而把对电子注的速度控制与密度控制分开,在电子运动过程中实现对电子注密度的调制,这就是微波电子管的动态控制原理。

最常用的微波电子管有速调管、行波管、磁控管、前向波放大器、回旋管及近年发展起来的一大批相对论电子注器件。

### 3) 电子束管

利用对电子束的聚焦和控制以实现光、电信号的记录、存储、转换和图像显示的真空电子器件,称为电子束管。在电子束管中,一般包括有产生和聚焦电子束的电子枪,控制电子束运动的偏转系统,接收电子束并实现光、电转换的靶面或荧光屏3部分。

示波管、雷达定位管、显像管、计算机显示管等都是将电信号转变成可见光信号电子束管,而摄像管则是将光信号转换成电信号的电子束管,存储管是对电信号进行存储和重现的一种电子束管。

### 4) 光敏管(光电管)

光敏管是利用材料的光电效应将光信号转变为电信号或光信号的一类真空电子器件,亦称为光电管。光信号变成电信号的光敏管有光电管、光电倍增管等,而光信号变光信号的光敏管则有变像管、像增强管、X射线增强管等。

光敏管与电子束管都具有光电转换功能,它们的不同之处在于:电子束管中的电子束是由热阴极发射的,光敏管中的电子则是由光照射具有光电效应的光电阴极产生光电发射而得到的。在这里将只是实现光信号到电信号的转换,而对信号没有放大的光敏管称为光电管,而将其他同样利用光电效应实现光电或光光转换的器件称为光敏管,其实这两种叫法并没有这样严格的区分,经常出现两种名称混用的情况。

### 5) 气体放电管(离子管)

气体放电管是一类利用气体电离放电特性工作的电子管,也称为离子管。由于气体放电

的过程。

被测量的信号检出后,不可避免的含有噪声、干扰等,这会直接影响测试系统对被测量的分析判断,另外,检出信号的幅度、频率等过小或者过大,信号形式也不便于加工处理、分析、判断,因此需要对信号进行处理。

如果信号调理装置输出的是规范化的  $4\text{mA} \sim 20\text{mA}$  电流信号,则称这种信号调理装置(电路)为变送器。

#### 4. 信号传输

该部分用来完成将信号按照某种特定的格式传输的功能,例如,采用某种总线标准或者进行某种格式的变换。信号传输主要是完成测试设备内部或者测试设备与其他设备之间的信息传输。目前,一般的测试仪器仪表特别是智能仪器都设有通信接口,以便能够实现程控、方便地构成自动测试系统。信号传输与通信是测试的重要环节,它已经转变为数据通信问题,良好的数据通信接口是现代测试系统的重要组成部分。在现代测试系统中,传输信息一般采用总线,它把各个相对独立的分系统、仪器、插件等通过各种总线接口连接成复杂测试系统。在测试系统中,常用的总线包括 GPIB 总线、RS - 232C/422/485 总线、VXI 总线、PXI 总线等。

#### 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。常用的显示方式可以是数字显示、指针式显示、图形显示、图表显示、文字显示、灯光闪烁、声音报警等。

#### 6. 电源

电源是用于给测试系统各部分供电的装置。在一般测试中,电源常用直流电源和交流电源。在某些特殊的测试场合,会用到特殊的电源,例如航空装备测试中的初级交流电源除了用到  $50\text{Hz}$  交流电外,还经常用到  $400\text{Hz}$  的中频交流电。

此外,通过测试系统获得了测试结果后,还需要对测试结果进行处理。测试结果的处理包括了测量误差的分析与判断,通过测试结果对测试仪器仪表进行自动校准、误差修正、故障检测等,判断被测对象性质的工作。一般简单的测试仪器仪表和测试系统测试结果的处理是依靠人工来完成,智能化的仪器仪表和自动测试系统可以自动完成或者部分自动完成上述工作。

## 1.2 电子测量与电子仪器

### 1.2.1 电子测量及方法

在测试过程中,除了少数时间参数、相位和微波频率外,大部分均为电压、电流等电工量的测量。即使各种非电量的测量也转换成相应的电量再进行测量,因此电子测量是测量的重要技术。

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。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、电信号及电路元器件的特性和参数进行测量外,还包括通过各种传感器对非电量进行的测量。电子测量是测试技术和电子技术相互结合的产物。它与其他测量相比,具有测量频率范围宽、量程宽、测量精度高、响应时间短、测量速度快、可以进行遥测及易于实现测试智能化和测试自动化等特点。它是实现测量过程自动化、智能化、网络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。

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。

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

1) 直接测量

用事先标定好的测量仪表直接读取被测量量值的方法称为直接测量。例如,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。

直接测量的特点是不需要对被测量与其他实测的量进行函数关系的辅助运算,因此测量过程简单迅速,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(图 1-2(a))时,就是直接用测量工具,如刻度尺测量出其长度,而作为相对测量(图 1-2(b)),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两者之间的偏差,最终由基准量和偏差得到测量值。

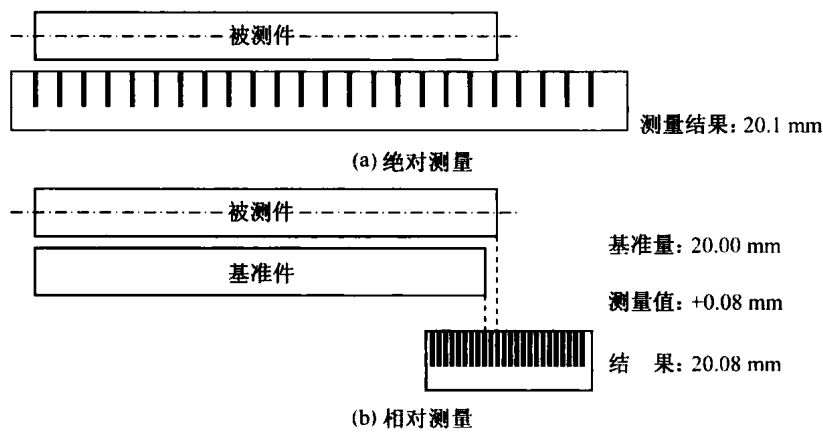


图 1-2 绝对测量和相对测量示意图

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),间接得到被测量值的测量方法。例如,需要测量电阻  $R$

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, 或间接测量的结果较直接测量更为准确, 或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的方法, 列出较多的方程。组合测量方式比较复杂, 测量时间长, 但精度较高, 一般用于科学实验。

### 2. 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。典型的例子如用示波器观察正弦信号的周期、频率、幅度等参数以及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

它是随着数字电路的飞速发展而发展起来的, 数据域测量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, 它也称为逻辑量测量。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, 因此目前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应用。

### 3. 按测量回路的构成不同分类

按照测量回路的不同, 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  $y$  实施开环测量, 因此具有简单、直观、明了、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  $y$  又反馈作用于输入量  $x$ , 因此具有精度高、复杂、成本高、要求高的特点。

除了上述几种常见的分类方法外, 还有其他一些分类方法。例如: 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。

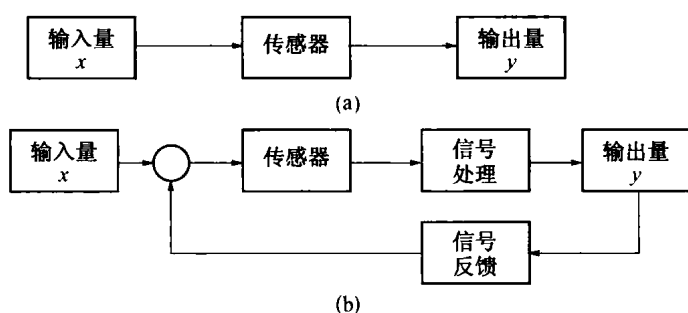


图 1-3 开环测量和反馈测量示意图

## 1.2.2 电子测量仪器

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。测量仪器是用来对被测对象取得“度”或“量”信息的一种器具,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。

电子测量仪器,按工作原理可以分为模拟式和数字式两大类。前者是指具有连续性并与同类模拟量相比较的仪器;后者是指通过模数转换把具有连续性的被测量量变成数字量,再显示结果的仪器。习惯上,一般人们按功能对电子测量仪器进行分类,大致可分为波形显示仪器,电路参数测量仪器,频率、时间、相位测量仪器,信号分析仪器,模拟电路特性测试仪器,数字电路特性测试仪器和测试用信号源等。

各类测量仪表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。

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,转化成与其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。另外,对于其他的电学物理量,如电场强度、电容等,也往往变换成容易测量的电压和电流的形式进行测量。对非电量测量,更须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,通过各种对其敏感的敏感元件(通常称为传感器),转换成与其相关的电压、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。

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。

测量的最终目的是要将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显示功能。如模拟式仪表通过指针在仪表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、笔式记录仪、示波器、磁带记录仪、半导体存储器等。除此之外,一些先进的仪器如智能仪器等还具有数据记录、处理及自检、自校、报警提示等功能。

1.2.3 测量仪器的主要性能

对测量仪器的性能指标的描述是多方面的,各种性能指标的重要程度随着使用要求和场合有很大差异,一般来讲主要包括以下几个方面。

1. 精确度

精确度是指测量仪器的读数或测量结果与被测量真值接近的程度,也称为精度。它是表明测量误差大小泛指性的广义词汇。一般讲精确度高,表明误差小;精确度低,表明误差大。进一步分析随机误差和系统误差,精度包含有准确度和精密度两部分内容。

1) 准确度

准确度是精确度的一个重要组成部分。它反映系统误差的大小,表明测量仪器设备有规则的偏离真值的程度。

2) 精密度

精密度说明了测量仪器设备指示值的分散程度,反映了测量仪器随机误差的大小。也就是说,对某一稳定的被测量对象,使用同一设备,在同一测量条件下进行连续多次测量时,得到的测量结果的分散程度。精密度高,意味着随机误差小,测量结果的重复性好。如某电压表的精密度为 0.1V,即表示用它对同一电压进行测量时,得到的各次测量值的分散程度不大于 0.1V。

测量时,其结果的分散程度一般用标准偏差  $\sigma$  或者用或然误差  $0.674\sigma$  来表示。

对于一个测量结果,精密度高的准确度不一定高。而准确度高的精密度也不一定高,可以用图 1-4 所示的打靶的例子来说明。

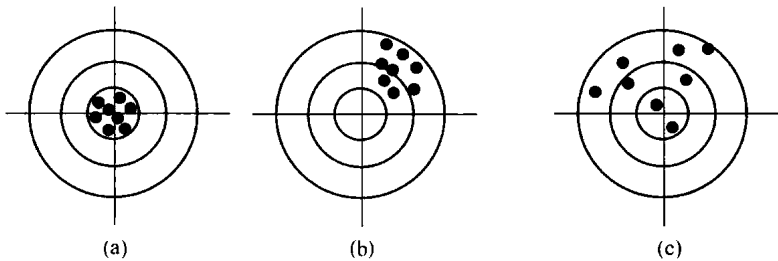


图 1-4 用射击比喻测量

在图 1-4 中,以靶心比做被测量真值,以靶上的弹着点表示测量结果。其中图 1-4(a)弹着点相互很接近且都围绕靶心,即系统误差和随机误差都小,精确度高。图 1-4(b)弹着点密集但明显偏向一方,表明精密度高,但准确度不好。图 1-4(c)弹着点仍较分散,表明精密度和准确度都不好。

2. 灵敏度

灵敏度表示测量仪表对被测量变化的敏感程度。可以定义为测量仪器输入变化所引起的输出变化量  $\Delta Y$  与输入变化量  $\Delta X$  之比。也就是说,测量仪器的灵敏度是单位输入变化量所引起的输出量的变化。灵敏度用  $S$  来表示,可以用式(1-1)计算:

$$S = \frac{\Delta Y}{\Delta X} \tag{1-1}$$

某些情况下,也用取对数的形式表示

$$S = \lg \frac{\Delta Y}{\Delta X}$$

### 3. 稳定性

稳定性通常用稳定度和影响量两个参数来表征。稳定度也称稳定误差,是指在规定的区间,其他外界条件恒定不变的情况下,仪表示值变化的大小。造成这种示值变化的原因主要是仪器内部各元器件的特性、参数不稳定和老化等因素。稳定度可用示值绝对变化量与时间一起表示。例如,某数字电压表的稳定度应为 $(0.08\% U_m + 0.003\% U_x)/(8h)$ ,其含义是在8h内,测量同一电压,在外界条件维持不变的情况下,电压表的示值可能发生 $0.08\% U_m + 0.003\% U_x$ 的上下波动,其中 $U_m$ 为该量程满度值, $U_x$ 为示值。稳定度也可用示值的相对变化率与时间一起表示,例如,国产XFC-6标准信号发生器,在220V电源电压和20℃环境温度下,频率稳定度小于等于 $2 \times 10^{-4}/10\text{min}$ ;XD6B超低频信号发生器,正弦波幅度稳定度小于等于0.3%/1h等。

由于电源电压、频率、环境温度、湿度、气压、振动等外界条件变化而造成仪表示值的变化量,称为影响量或影响误差,一般用示值偏差和引起该偏差的影响量来一起表示。例如,EE1610晶体振荡器在环境温度从10℃变化到35℃时,频率漂移小于等于 $1 \times 10^{-9}$ 等。

### 4. 线性度

线性度是测量仪表输入/输出特性之一,表示仪表的输出量(示值)随输入量(被测量)变化的规律。若仪表的输出为 $y$ ,输入为 $x$ ,两者关系用函数 $y=f(x)$ 表示,如果 $y=f(x)$ 为 $y-x$ 平面上过原点的直线,则称为线性刻度特性,否则称为非线性刻度特性。由于各类测量仪器的原理各异,不同的测量仪器可能呈现不同的刻度特性。如常用的万用表的电阻挡,具有上凸的非线性刻度特性,而数字电压表,具有线性刻度特性。

仪器的线性度可用线性误差来表示,如SR46双线示波器垂直系统的幅度线性误差小于等于5%。

### 5. 输入阻抗与输出阻抗

输入阻抗是指仪表在输出端接有额定负载时,输入端所表现出来的阻抗。输入阻抗的大小将决定信号源的衰减程度,输入阻抗越大,则衰减越小,所以,一般应选择输入阻抗大一些。

输出阻抗是指仪表在接入有信号源的情况下,输出端所表现的阻抗。输出阻抗大意味着把仪表或传感器看成信号源时,信号具有很大的内阻。这样,在仪表输出端接上负载后(如二次仪表)其信号衰减较大,产生较大的负载误差。因此一般要求仪表或传感器的输出阻抗要小。

### 6. 动态特性

测量仪表的动态特性表示仪表的输出响应随输入变化的能力。例如,模拟电压表由于动圈式表头指针惯性、轴承摩擦、空气阻尼等因素的作用,使得仪表的指针不能瞬间稳定在固定值上。又如,示波器的垂直偏转系统,由于输入电容等因素的影响,造成输出波形对输入信号的滞后与畸变,示波器的瞬态响应就表示了这种仪器的动态特性。

最后指出,上述测量仪器的几个特性,是就一般而论,并非所有仪器都用上述特性加以考核。有些测量仪器除了上述指标特性外,还有其他技术要求。另外,测量仪器与被测



对象仪器本身就构成了测试系统,因此,上述测量仪器的主要性能指标也同样适用于描述测试系统。

### 1.3 测量误差及处理

研究误差对于数据处理、实验设计有着十分重要的意义,它有助于正确地进行数据分析;有助于充分利用测量得到数据信息,在一定条件下得到更接近于真实值的最佳结果;有助于合理地确定实验误差,以免产生实验精度的虚假现象而升高或降低了实验应有的精度;有助于合理地选择实验条件和确定实验方案。

#### 1.3.1 误差分类

根据误差的性质及其产生的原因,可将其分为系统误差、随机误差和疏失误差三类。

##### 1. 系统误差

指测量中由于某种未发现或未确认的因素所引起的误差。其特点是始终偏向一个方向(偏大或偏小),其大小及符号在同一批次实验中完全相同。系统误差一般是由于所用仪器未经校准,观测环境(温度、压力、湿度等)的变化,观测者的某种习惯或偏向性动作所造成的。

系统误差变化情况可用图 1-5 表示,分以下几种:

恒值系统误差,如图中曲线 *a* 所示。这是大量存在的,在整个测量过程中,误差的大小和符号固定不变,例如,由于仪器仪表的固有(基本)误差引起的测量误差均属此类。

线性系统误差,如图中曲线 *b* 所示。在整个测量过程中,误差逐渐增大(或减小),例如,电路用电池供电,由于电池供电电压逐渐下降,将导致线性系统误差。

周期性系统误差,如图中曲线 *c* 所示。在整个测量过程中,误差值周期性变化,例如,晶体管的  $\beta$  值随环境温度周期性变化,将产生周期性误差。

复杂变化的系统误差,如图中曲线 *d* 所示。在整个测量过程中,误差的变化规律很复杂。上述曲线 *b*、*c* 和 *d* 表示的误差,统称为变值系统误差。

对于具体的测量者而言,善于找出产生系统误差的原因,并采取有效的措施来减小系统误差的影响,对于取得较准确的测试是很重要的。

##### 2. 随机误差

指在测量中已经消除了产生仪器系统误差的一切因素,而观测者又正确细心地进行测量,在所得数据末一位或两位数字仍然存在着数字上的差别。单次测量时,其误差可大可小,可正可负,产生误差的原因不详,也无法控制,但在多次测量后,其平均值趋于零。经验证明,这类误差的大小和正负,完全服从统计规律,亦即完全由概率决定,所以可用相关的概率理论进行处理。

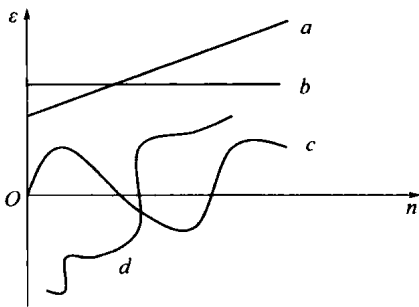


图 1-5 系统误差变化情况图