

普通高等教育工科类教学改革规划教材

基础电子 技术实验教程

JICHU DIANZI JISHU SHIYAN JIAOCHENG

王怀兴 黄晓明 主编



 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



赠 电 子 课 件

普通高等教育工科类教学改革规划教材

基础电子技术实验教程

主 编	王怀兴	黄晓明	
副主编	秦新燕	王 娅	
参 编	王青萍	肖鹏程	肖正安
	罗海峰	龙 芸	黄 靓
主 审	肖 飞		



机械工业出版社

本书主要包括测量误差理论与数据处理、电路理论实验、模拟电子电路实验、数字逻辑电路实验、信号与系统实验等内容。与一般的实验教程相比,本书有以下几个特点:(1)立足于电类专业几门基础课程的实验教学需求;(2)电类实验课程必须首先会使用电子测量仪器,因此在第一章用较大篇幅介绍了电子测量相关基础知识;(3)误差处理与数据分析对科学实验过程而言非常重要,因此在第一章中加入了测量误差理论与数据处理的内容;(4)在每一个实验项目的内容安排与处理上,尽可能地以实验理论的原理分析与讲解为主,以实验方法与数据记录和处理为辅;(5)在实验最后加入相关思考题,促进学生对实验的过程、现象进行深入的思考与总结,真正做到理论联系实践,加强学生对知识的理解与把握;(6)更加注重开发理论联系实践的综合性、设计性实验项目,每一模块的几个实验项目中,至少安排了2个以上的综合性、设计性实验项目。

该实验教程更注重实验理论与方法,而不拘泥于具体的实验设备或实验仪器,具有更好的通用性,可以作为电子信息科学与技术、电子信息工程技术、应用电子技术、自动化、机械电子、电气自动化、通信工程、应用物理学、物理电子学、计算机科学等专业的电类基础课的实验教程或实验教学参考书等。

本教材配有电子教案,凡选用本书作为教材的教师,可登录机械工业出版社教材服务网 www.cmpedu.com 下载,或发送电子邮件至 cmpegaozhi@sina.com 索取。咨询电话:010-88379375。

图书在版编目(CIP)数据

基础电子技术实验教程/王怀兴、黄晓明主编. —北京:机械工业出版社, 2014.1

普通高等教育工科类教学改革规划教材

ISBN 978-7-111-44953-9

I. ①基… II. ①王…②黄… III. ①电子技术-实验-高等学校-教材 IV. ①TN-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 286316 号

机械工业出版社(北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑:赵志鹏 责任编辑:赵志鹏 邹云鹏

版式设计:常天培 责任校对:肖琳

封面设计:鞠杨 责任印制:刘岚

北京圣夫亚美印刷有限公司印刷

2014 年 3 月第 1 版第 1 次印刷

184mm×260mm·11.75 印张·289 千字

0001—3000 册

标准书号:ISBN 978-7-111-44953-9

定价:26.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心:(010)88361066 教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售一部:(010)68326294 机工官网:<http://www.cmpbook.com>

销售二部:(010)88379649 机工官博:<http://weibo.com/cmp1952>

读者购书热线:(010)88379203 封面无防伪标均为盗版

前 言

通过实验的过程来培养学生实验技能、提高学生分析问题和解决问题的科学实验能力与科学研究能力，是高等院校实践教学的主要内容和重要目的。

本书是针对并配合电子信息科学与技术、应用电子技术、自动化、电子信息工程技术等相关专业的专业基础课程的理论教学过程，以课程理论知识为基础，以服务课程教学、加深理论知识的理解与掌握为原则，以培养与提高学生动手能力、实验研究能力为目的而撰写的。在内容的编写上根据专业的发展趋势，依据教学大纲、紧跟专业的发展动向，尽量体现最新的实践教学方法与理念。在模块安排上将验证性实验与综合设计性实验结合起来，具有较强的通用性与可延用性。

全书共有5个模块，包括：模块1 测量误差理论与数据处理；模块2 电路理论实验；模块3 模拟电子电路实验；模块4 数字逻辑电路实验；模块5 信号与系统实验。

本书由黄晓明负责前言与模拟电子电路实验的编写，王怀兴负责统稿以及测量误差理论与数据处理、信号与系统实验的编写，秦新燕负责数字逻辑电路实验部分的编写，王娅负责电路理论实验的编写。黄靓与罗海峰负责全书各部分电路原理图与原理框图的编写，肖正安与王青萍负责全书各实验模块中实验原理的编辑审校，肖鹏程与龙芸负责全书各实验模块中实验记录表格的设计。

在本书的编写过程中，我们参考了许多其他相关教材与文献资料，在此也对这些编写人员表示感谢。

由于时间仓促、水平有限，书中难免会有不足之处，敬请广大读者批评指正。

编 者

目 录

前言

模块 1 测量误差理论与数据处理	1
单元 1 测量与计量	1
单元 2 电子测量技术	3
单元 3 测量误差的基本概念	11
单元 4 测量误差的判断与测量数据处理 ..	21
模块 2 电路理论实验	40
实验 1 电路元器件伏安特性的测试	40
实验 2 基尔霍夫定律	43
实验 3 叠加原理	45
实验 4 戴维南定理	46
实验 5 RC 一阶电路响应测试	49
实验 6 三相交流电路	51
实验 7 RC 电路频率特性	55
实验 8 RLC 串联谐振电路的研究	58
实验 9 提高功率因数的研究	61
模块 3 模拟电子电路实验	64
实验 1 分压式单管共射极放大器	64
实验 2 低频功率放大器	72
实验 3 差分放大器	75
实验 4 负反馈放大器	79
实验 5 集成运算放大器的基本运算电路 ..	83
实验 6 集成运算放大器的信号处理应用 ..	88
实验 7 RC 正弦振荡器	95
实验 8 集成稳压器	98
实验 9 光电报警器的设计	104

实验 10 温度控制系统设计	106
----------------------	-----

模块 4 数字逻辑电路实验	112
实验 1 TTL 集成逻辑门电路测试	112
实验 2 组合逻辑电路的设计与测试	115
实验 3 触发器逻辑功能测试	118
实验 4 计数器及其应用	122
实验 5 移位寄存器及其应用	128
实验 6 脉冲信号发生电路	134
实验 7 $D-A$ 、 $A-D$ 转换器	139
实验 8 交通灯控制电路的设计	144
实验 9 多组竞赛抢答器的设计	145
模块 5 信号与系统实验	147
实验 1 函数信号发生器	147
实验 2 虚拟函数信号发生器	154
实验 3 零输入响应与零状态响应	159
实验 4 方波信号的分解与合成	161
实验 5 基于 LabVIEW 的周期方波信号 分解与合成	164
实验 6 抽样定理实验	167
实验 7 基于 LabVIEW 的抽样定理仿真 实验	171
实验 8 模拟滤波器实验	175
实验 9 基于 LabVIEW 的滤波器频率响应 特性仿真实验	179
参考文献	183

模块1 测量误差理论与数据处理

测量与人类社会的发展联系紧密，是人类认识自然、探索自然必不可少的重要手段。无论是日常生活、生产实践、科学实验，高新技术研发，还是国防现代化建设等，都离不开测量，但由于测量仪器、测量理论或方法、测量条件、测量人员等因素的限制，测量结果不可能绝对准确，测量误差的存在是不可避免的。既然测量误差总是存在的，就需要对测量结果的可靠性做出评价，对其误差范围做出估计，并能正确地表达测量结果。

本模块主要从测量与计量入手，讲解测量尤其是电子测量的基础知识、测量误差的产生原因以及分析方法以及测量数据的处理等知识。测量误差的判断与测量数据处理部分内容包括：有效数字与数据运算、随机误差的判断与处理、系统误差的判断与处理、粗大误差的判断与处理以及数据处理等。

单元1 测量与计量

1.1.1 测量的定义

测量是人类对客观事物取得数值（数量）这一概念的认识过程，是人类认识自然、改造自然的一种不可或缺的手段。在任何生产实践、科学研究活动中，要想对被研究对象进行定量的评价，都必须进行准确的测量。

1. 狭义测量

为确定被测对象的量值而进行的实验过程是狭义测量。在测量过程中，人们借助专门的设备，把被测对象直接或间接地与同类已知单位进行比较，取得用数值和单位共同表示的测量结果，即

测量结果 = 测量数值 + 测量单位

例如 3.5V、5.2A、10Ω 等。

当然测量的结果也可以用一组数据、曲线或者图形表示出来，但是它们同样必须包含具体的数值与单位，没有单位的量值是毫无意义的。

测量的目的是取得一个关于被测对象的定量的信息。测量的内涵包括：

- (1) 测量对象 即被测客体中的相应的量值信息（电压、电流、电容、温度等）。
- (2) 测量过程 即通过实验去认识对象的过程。
- (3) 测量方法 即利用测量仪器将被测对象与同类已知有计量单位的量进行比较，具体包括直接比较和间接比较。
- (4) 测量标准 即以同类已知单位作为测量标准。
- (5) 测量结果 即最终需要表示给测量主体（人）的数据。

【例 1-1】 用示波器测量正弦信号的峰 - 峰值，波形在屏幕上的垂直方向占据 3 格（每格 0.1V），则被测电压峰 - 峰值为多少？

解： $V_{p-p}=3\text{格}\times0.1\text{V/格}=0.3\text{V}$

在这个例子中，测量对象就是正弦电压信号；测量标准就是示波器的垂直偏转灵敏度（0.1V/格）；比较过程是示波器来完成的（或者说是测量设备）；测量结果是0.3V。

【例 1-2】 试指出如图 1-1 所示的两个测量过程中采用的比较方法是直接比较还是间接比较。

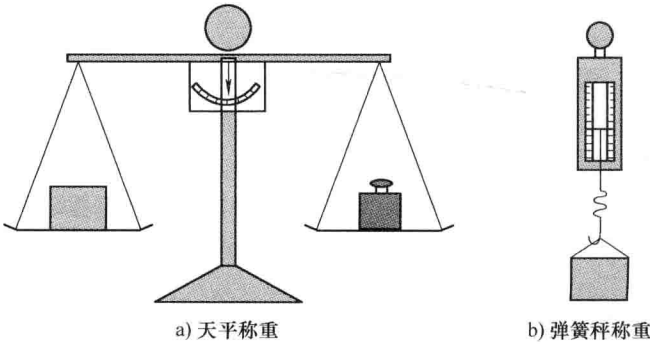


图 1-1 测量方法比较

解：图 1-1a 所示是直接比较法，图 1-1b 所示是间接比较法。

2. 广义测量

不仅包括对被测的物理量进行测量的定量，而且还包括对被测对象进行的定性、定位等测量，例如故障诊断、无损探伤、遥感遥测、矿藏勘探、地震源测定、卫星定位等都属于广义测量。其测量结果也不仅是由量值和单位来表征的一维信息，还可以用二维或多维的图形、图像来显示被测对象的属性特征、空间分布及拓扑结构等。

本书主要介绍狭义测量相关知识。

对于现代化的测量技术一次完整的测试（测量）过程可以用图 1-2 来理解。

在一个完整的测试（测量）过程中一般应该包括五个要素：被测对象、测量仪器、测量方法、测量人员和测量环境。

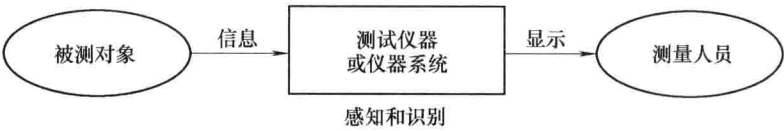


图 1-2 完整的测试（测量）过程

在测量过程当中，误差是不可避免的。因此在表示测量结果时应将测量结果与误差同时标注出来，以说明测量结果的可信赖程度。

1.1.2 计量的定义

计量在历史上称之为“度量衡”。随着生产和科学技术的发展，现代计量已远远超出“度量衡”的范围。现有长度、热学、力学、电磁学、无线电、时间、频率、电离辐射、光学、声学、化学等计量专业，已形成了一门独立的学科——计量学。

测量是利用实验手段，把待测量直接或间接地与另一个同类已知量（基准量）进行比较，从而得到待测量值的过程。测量结果的准确与否，与所采用的测量方法、实际操作和作为比较标准的已知量的准确程度等，都有着密切的关系。因此，必须定期对在测量过程中作为比较标准的已知量的各类量具、仪器仪表进行检验和校准，这个过程称为计量。计量是为了保证测量中量值的统一和准确一致，而利用技术和法制手段进行的一种测量，故其主要特征是统一性、准确性和法制性。

计量与测量不同，但二者又有密切的联系。计量是测量的一种特殊形式，是具有法制效力的基准量的测量，它把被测量与国家计量部门作为基准或标准的同类单位量进行比较，以确定合格与否，并给出具有法律效力的《检定证书》。

计量涉及工农业生产、国防建设、科学试验、国内外贸易、人民生活等各方面，是国民经济的一项重要的技术基础。计量包含了为达到统一和准确一致所进行的全部活动，如单位的统一、基准和标准的建立、量值的传递、计量的监督管理、测量方法及其手段的研究等。

1.1.3 计量与测量的关系

计量是测量的一种特殊形式，是测量工作发展的客观需要，没有计量会使测量数据的准确性、可靠性得不到保证，测量就会失去价值；而测量是计量联系生产实际的重要途径，没有测量就没有计量。计量与测量之间的关系见表 1-1 所示。

表 1-1 计量与测量之间的关系对比

计 量	测 量
计量的任务是确定测量结果的可靠性	测量发展的客观需要才出现了计量
计量是测量的基础和依据	测量是计量应用的重要途径
没有计量，也谈不上测量	没有测量，计量将失去价值
计量和测量相互配合，才能在国民经济各个领域发挥重要作用	为了保证测量结果的准确性，必须定期对仪器进行检定和校准，这个过程就是计量

计量工作是国民经济中一项极为重要的技术基础工作，它在工农业生产、科学技术、国防建设以及人民生活等各个方面起着技术保证和技术监督的作用。

单元 2 电子测量技术

1.2.1 电子测量的定义

从狭义上讲，电子测量是指在电学中对有关电的量值进行的测量，例如对电压、电容或电阻阻值等电量进行的测量。

从广义上讲，凡是利用电子技术进行的测量都可以说是电子测量，例如利用传感器把压力、温度等许多物理量变成电信号，然后利用电学方法来进行测量。

电子测量涉及宽频率范围内的所有电量、磁量，以及各种非电量的测量，广泛应用于科学研究、实验测试、工农业生产、通信、医疗及现代军事等各领域，已经成为一门对现代科学技术发展起着巨大推动作用的独立学科。

1.2.2 电子测量的特点

1. 测量频率范围宽

电子测量除了可以测量直流电量以外，还可以测量交流电量，其测量电信号的频率范围低至 10^{-4} Hz，最高测量频率可以达到 THz ($1\text{THz} = 10^{12}\text{Hz}$ ，读作“太”或“拉赫兹”)。如果利用各种传感器对被测量进行转换、处理，则几乎可以测量全部电磁频谱的物理量。当然对于不同的频率范围需要采用不同的测量方法和测量设备，并不是任何一个测量设备可以测量所有频段的电量。

2. 测量量程范围宽

量程是指测量仪器测量范围上限值与下限值之差。由于被测量值的大小往往相差很大，因而要求测量仪器具有足够的量程。一般情况下，一台电子测量仪器通常要求最高量程与最低量程要相差几个甚至几十个数量级。例如数字电压表，要求能测量纳伏级至千伏级的电压；而用于测量频率的频率计则要求其高低量程相差近 17 个数量级。

3. 测量速度快

测量速度快是电子测量的又一个特点，也是电子测量在现代科学技术领域得到广泛应用的一个重要原因。例如，卫星发射时需要对卫星飞行轨迹进行准确的测量并同时进行控制，如果测试系统的测量速度不够快，则不可能根据测试结果即时对卫星飞行轨迹进行调整或控制，自动控制系统就失去了作用。同样地，导弹拦截系统中也是需要先测量并根据测量结果计算导弹的飞行轨迹，然后进行拦截，如果测量速度不够快，则不可能拦截成功。

4. 测量准确度高

电子测量的准确程度比其他测量方法高很多。长度测量的准确度最高可达到 10^{-8} 数量级，而如果采用电子手段对频率或者时间进行测量，由于采用原子频标和原子秒作为基准，则可以使测量准确度达到 10^{-15} 的数量级。电子测量的这一特点正是它在现代科学技术领域得到广泛应用的重要原因之一。由于电子测量频率的测量准确度最高，因此在实际应用中，人们总是尽可能把其他参数转换成频率信号以后再进行测量。

5. 易于实现遥测遥控以及测量过程自动化

对于人体不便于接触和无法到达的区域，如深海、地下、高温炼钢炉、核反应堆等，可以通过将传感器或者测量设备置入其内部，或者通过电磁波、光、辐射等方式进行测量，这就是通常所说的遥测。而通常测量和控制总是联系在一起的，称作遥测遥控。

电子测量同计算机技术、通信技术、计算机网络技术、传感器技术等相结合，使测量仪器智能化、测量系统网络化、测量过程自动化。电子测量技术在如今的自动化系统中占据重要的地位，真正实现了测量技术的遥测遥控以及测量过程的自动化。主要体现在测量时能够自动转化量程、自动调节、自动校准、自动记录、自动进行数据处理以及自动修正等方面。

6. 易于实现仪器小型化

随着电子器件集成度的不断提高、可编程器件和微处理器以及专用集成电路 (ASIC, Application Specific Integrated Circuit) 的采用，电子测量仪器正向着小型化、数字化、智能化、网络化、宽带化、综合化的方向发展。特别是随着模块式仪器系统的采用，多个仪器模块可连同计算机组成更为紧凑的自动化测试系统。目前已经出现的小型电子测量仪器包括：智能化仪器、模块式仪器、插卡式仪器以及虚拟仪器等。

1.2.3 电子测量仪器分类

利用电子技术构成的测量仪器称为电子测量仪器，通常是指用于检测或测量一个特定的物理量或电量，或者为到达测量目的而提供的测量器具，包括各种指示式仪器、比较式仪器、信号源、稳压源及传感器等。

1. 按照电子测量仪器的发展过程分类

(1) 模拟仪器 其基本组成方式是电磁机械式，借助指针和分度盘来显示测量结果。

(2) 数字化仪器 利用 A-D 转换技术，将模拟信号转换为数字信号再进行测量，并以数字方式输出（显示）测量结果。

(3) 智能化仪器 该类仪器内置微处理器和数据接口（例如 GPIB、USB 接口），在进行自动测量的同时还具有一定的数据分析处理能力（例如信号频谱、均值、峰值、频率等的计算）。它的功能模块全都是以硬件或者固化软件的形式存在，不方便更改和二次开发，缺乏灵活性。

(4) 虚拟仪器 虚拟仪器是近些年提出并发展起来的新技术，强调将仪器功能用软件来实现。它是一种功能意义上的仪器，即在计算机上添加强大的测试应用软件和—些硬件模块，使其具有虚拟仪器面板和强大的数据处理功能。用户操作计算机就像操作真实仪器—样。这种技术具有用户自定义、开发周期短、可以随时更新升级等优点，是未来电子测量技术发展的必然趋势。

2. 按照功能分类

按功能分，一般把电子测量仪器分为专用仪器和通用仪器两大类。专用仪器指为某一个或几个特定目的而设计的电子测量仪器，如电视机实验室用的电视彩色信号发生器、电脑排线测试仪、微电阻测试仪（毫欧表）、晶体管特性图示仪等。通用仪器则是为了测量某一个或几个电参数而设计的，如电子示波器、万用表等。

通用仪器按其功能又可以分为以下几类：

(1) 信号发生器 信号发生器（包括函数发生器）为检修、调试电子设备和仪器时提供信号源。例如，低频、高频、脉冲、扫频以及噪声信号发生器等。

(2) 信号分析仪 用于观测、记录和分析各种电信号的变化，包括时域、频域以及数据域分析仪。例如，各种示波器、频谱分析仪、波形分析仪和逻辑分析仪等。

(3) 频率、时间及相位测量仪器 包括各种频率计（常用电子计数器式频率计）、相位计，以及各种时间频率测量仪器等。

(4) 网络特性测量仪 主要有频率特性测试仪（也称扫频仪）、阻抗特性测量仪、网络分析仪等，主要用于测量电路或者网络的频率响应特性、阻抗特性、各种传输特性及噪声特性等。

(5) 电子元器件测试仪 用于测量各种基本电子元器件或者集成电路的电参数并显示特性曲线等。例如，RLC 测试仪、晶体管特性图示仪、晶体管参数测试仪、模拟或者数字集成电路测试仪，以及电压电流表、万用表等。

(6) 电波特性测试仪 用于测量电波传播、电磁场强度及干扰强度等。例如，场强仪、测试接收机、干扰测量仪等。

(7) 辅助仪器 辅助仪器是指和上述仪器配合使用的仪器。例如，各种信号放大器、

衰减器、检波器、滤波器、记录器，以及各种交直流稳压电源等。

3. 按照工作原理与用途分类

(1) 多用电表 模拟式电压表、模拟多用表（即指针式万用表 VOM）、数字电压表、数字多用表（即数字万用表 DMM）都属此类。多用电表属常用仪表，它可以用来测量交流/直流电压、交流/直流电流、电阻阻值、电容器容量、电感量、音频电平、频率、NPN 或 PNP 型晶体管电流放大倍数 β 值等。

(2) 示波器 示波器是一种测量电压波形的电子仪器，它可以把被测电压信号随时间变化的规律，用图形显示出来。使用示波器不仅可以直观而形象地观察被测物理量的变化全貌，而且可以通过它显示的波形来测量电压和电流，进行频率和相位的比较，以及描绘特性曲线等。

(3) 信号发生器 信号发生器（包括函数发生器）为检修、调试电子设备和仪器时提供信号源，是一种能够产生一定波形、频率和幅度的振荡器。例如，产生正弦波、方波、三角波、斜波和矩形脉冲波等。

(4) 晶体管特性图示仪 晶体管特性图示仪是一种专用示波器，能直接观察各种晶体管特性曲线及曲性簇。例如，观察晶体管共射极、共基极和共集电极三种接法的输入、输出特性及反馈特性；二极管的正向、反向特性；稳压管的稳压或齐纳特性；它可以测量晶体管的击穿电压、饱和电流等。

(5) 绝缘电阻表 原称为兆欧表（俗称摇表）是一种检查电气设备、测量高电阻的简便直读式仪表，通常用来测量电路、电机绕组、电缆等的绝缘电阻。绝缘电阻表大多采用手摇发电机供电，故称摇表；由于它的分度是以兆欧（ $M\Omega$ ）为单位，故又称兆欧表。

(6) 红外测试仪 红外测试仪是一种非接触式测温仪器，它包括光学系统、电子线路，在将信息进行调制、线性化处理后达到对其指示、显示及控制的目的。目前已应用的红外测温仪有光子测温仪和热测温仪两种，主要用于电热炉、农作物、铁路钢轨、深埋地下超高压电缆接头、消防、气体分析、激光接收等温度测量及控制场合。

(7) 集成电路测试仪 该类仪器可对 TTL、PMOS、CMOS 数字集成电路功能和参数进行测试，还可判断抹去字的芯片型号及对集成电路进行在线功能测试、在线状态测试。

(8) LCR 参数测试仪 该仪器也称为电感、电容、电阻参数测量仪。该仪器不仅能自动判断元件性质，而且能将符号图形显示出来，并显示出其值。它还能测量 Q 、 D 、 Z 、 L_p 、 L_s 、 C_p 、 C_s 、 K_p 、 K_s 等参数，且显示出其等效电路图形。

(9) 频谱分析仪 频谱分析仪在频域信号分析、测试、研究、维修中有着广泛的应用。它能同时测量信号的幅度及频率，测试、比较多路信号及分析信号的组成，还可测试手机逻辑电路和射频电路的信号。例如，逻辑电路的控制信号、基带信号，射频电路的本振信号、中频信号及发射信号等。

除以上常用的电子测量仪器外，还有时间测量仪、电桥、相位计、动态分析器、光学测量仪、应变仪及流量仪等。

4. 按照显示方式分类

电子测量仪器还有其他分类方法，例如按照显示方式可以分为模拟式和数字式两大类。模拟式仪器主要指用指针指示方式显示的仪器，例如各种模拟电流电压表、模拟万用表等。而数字式仪器则是将连续变化的模拟量转化为数字量，并以数字方式显示测量结果，例如数

字电压表、数字存储示波器等。

可以看出,电子测量仪器种类繁多,用途各不相同,在使用时要合理选择。

1.2.4 电子测量方法分类

1. 直接测量与间接测量

(1) 直接测量 指无需通过被测量与其他实际测得量之间进行计算,就可以直接得到被测量量值的测量。例如,用直流或者交流电压(流)表测量时,可直接读出测量结果。

(2) 间接测量 指必须采用其他直接测量的结果,然后按一定的函数关系进行计算才能求得被测量的量值的测量。例如,测电阻消耗功率时,可以直接测量电阻和电流(或者电压)再计算出功率。

一般情况下,当不方便直接测量时或者间接测量结果比直接测量结果更为准确时,多采用间接测量法。例如,测量晶体管的集电极电流,较多采用测量集电极电阻 R 上的电压,然后通过计算得出集电极电流,而不采用断开集电极电路串入电流表进行直接测量(不方便)。与此类似地,测量放大器的放大倍数也是通过分别测量输入电压 U_i 和输出电压 U_o ,然后计算得出放大倍数 $A_U = U_o/U_i$ 。

(3) 组合测量 当某项测量结果需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,根据测量值与未知参数间的函数关系列出方程组并求解得到未知量,这种测量方法称为组合测量。

【例 1-3】 已知热敏电阻器阻值 R_t 与温度 t 之间满足关系

$$R_t = R_{20} + \alpha(t - 20) + \beta(t - 20)^2$$

式中, R_{20} 为环境温度 $t = 20^\circ\text{C}$ 时的电阻值,通常情况下为已知量, α 、 β 称为电阻的温度系数, t 为环境温度,求这两个温度系数。

解:可以在两个不同的温度 t_1 、 t_2 下 (t_1 、 t_2 可由温度计直接测得) 测得相应的两个电阻值 R_{t1} 、 R_{t2} ,代入上式得到联立方程组

$$\begin{cases} R_{t1} = R_{20} + \alpha(t_1 - 20) + \beta(t_1 - 20)^2 \\ R_{t2} = R_{20} + \alpha(t_2 - 20) + \beta(t_2 - 20)^2 \end{cases}$$

求解联立方程组,就可以得到 α 、 β 值。如果 R_{20} 也未知,显然可在三个不同的温度下,分别测得 R_{20} 、 R_{t1} 、 R_{t2} ,列出由三个方程构成的方程组并求解,进而得到 R_{20} 、 α 、 β 的值。

2. 直读测量法与比较测量法

(1) 直读测量法 直接从仪器仪表上(通常为分度线)读出测量结果的方法称为直读测量法。例如,用电压表测量电压、温度计测量温度、万用表测量电阻等都是直读测量法。

(2) 比较测量法 在测量过程中,将被测量与标准量直接进行比较而获得测量结果的方法称为比较测量法。例如,用天平称重、平衡电桥测电阻等都是比较测量法。

这里需要注意,直读测量法与直接测量法、比较测量法与间接测量法并不相同,而是有概念的相互交叉。例如,用电桥测电阻是比较测量法,但同时是直接测量法;用电压表、电流表测量功率是直读法,但又属于间接测量法。

3. 按测量性质分类

(1) 时域测量 指测量与时间有关的电量。例如,用电压表测量电压、用电流表测量

电流、用示波器测量正弦信号的峰值及有效值等。

(2) 频域测量 指测量与频率有函数关系的量。例如，用频谱仪测量信号的幅度频谱与相位频谱、用扫频仪测量系统的幅频响应或相频响应。

(3) 数据域的测量 指对数字逻辑量进行测量。例如，用逻辑分析仪测量并行数据的时序波形。

(4) 随机测量 指对各类随机信号或者干扰信号进行测量（例如噪声测量）。

在电子测量的实际应用中，很多时候还需要用到各种变换技术。例如变频、分频、检波、斩波，以及电压-频率、电压-时间、数-模、模-数转换等。

4. 按测量方式分类

(1) 偏差式测量法 在测量过程中，用仪器仪表指针的位移（偏差）表示被测量大小的测量方法，称为偏差式测量法。例如使用万用表测量电压、电流等。由于这种方法是从仪表分度盘上直接读取被测量（包括大小和单位），因此这种方法也称为直读测量法。

(2) 零位式测量法 该方法又称作零示法或平衡式测量法。测量时用被测量与标准量相比较（因此也把这种方法称为比较测量法），用指零仪表（零示器）指示被测量与标准量相等（平衡），从而获得被测量的值。利用惠斯通电桥测量电阻（或电容、电感）是这种方法的一个典型例子。

(3) 微差式测量法 偏差式测量法和零位式测量法相结合，构成微差式测量法。它通过测量待测量与基准量之差（通常该差值很小）来得到待测量量值，图 1-3 所示为微差法示意图。

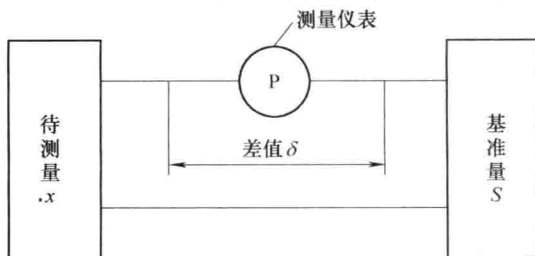


图 1-3 微差法示意图

1.2.5 电子测量内容

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、以电量和非电量为测量对象的测量过程。电子测量的内容越来越多、测量范围越来越广泛，概括起来包括以下几方面。

(1) 电能量的测量 电能量的测量如电流、电压、功率、电场强度等参量的测量。

(2) 电信号特性的测量 电信号特性的测量如信号的波形、频率、失真度、相位、调制度、信号频谱、信噪比等的测量。

(3) 电路参数的测量 电路参数的测量如电阻、电感、电容、电子器件的参数等。

(4) 电子电路性能的测量 电子电路性能的测量如放大电路的衰减、增益、通频带、灵敏度和信噪比等。

(5) 特性曲线的测量 例如幅频特性、相频特性、器件输入输出以及传输特性等。

上述各种参量中，频率、时间、电压、相位、阻抗等是基本参量，其他的为派生参量。电压测量则是最基本、最重要的测量内容。

随着电子技术的不断发展，人们力图将许多非电量通过传感器转换成电量，再利用电子测量技术对它们进行测量。例如，天文观测、宇宙飞行、地震预报、矿物探测、生命迹象探测，以及生产过程中的温度、压力、流量、振动、速度、位移等，都可以转换成电信号进行

测量。

1.2.6 电子测量仪器的主要技术指标

电子测量仪器的技术指标主要包括频率范围、准确度、量程与分辨力、稳定性和可靠性、环境条件、响应特性以及输入输出特性等。

(1) 频率范围 频率范围是指能保证仪器其他指标正常工作的有效频率范围。

(2) 准确度 测量准确度描述的是, 由于在测量过程中测量结果受各种因素的影响而产生的与被测量真实值间的差异程度, 即测量误差。

测量准确度通常以容许误差或不确定度的形式给出。不确定度是指对测量数据进行处理的过程中, 为了避免丢失真实数据而人为扩大的测量误差, 由于它在一定程度上能反映出测量数据的可信程度而得名, 不确定度的数值越大, 丢失真实数据的可能性越小, 即可信度越高。容许误差是为了描述测量仪器的测量准确度而规定的, 是利用仪器进行测量时允许仪器产生的最大误差。

(3) 量程与分辨力 量程是指测量仪器的测量范围。分辨力是指通过仪器所能直接反映出的被测量变化的最小值, 即指针式仪表分度盘上最小标度代表的被测量的大小, 或数字仪表最低位的“1”所表示的被测量的大小。同一仪器不同量程的分辨力不同, 通常以仪器最小量程的分辨力(最高分辨力)作为仪器的分辨力。

(4) 稳定性与可靠性 稳定性是指在一定的工作条件下, 在规定时间内, 仪器保持指示值或供给值不变的能力。可靠性是指仪器在规定的条件下, 完成规定功能的可能性, 是反映仪器是否耐用的一种综合性和统计性的质量指标。

(5) 环境条件 环境条件即保证测量仪器正常工作的工作环境, 例如基准工作条件、正常条件、额定工作条件等。

(6) 响应特性 一般说来, 仪器的响应特性是指输出的某个特征量与其输入的某个特征量之间的响应关系, 或驱动量与被驱动量之间的关系。例如峰值检波器的响应特性是, 检波器输出的平均值约等于交流输入信号的峰值。

(7) 输入特性与输出特性 输入特性主要包括测量仪器的输入阻抗、输入形式等。输出特性主要包括测量结果的指示方式、输出电平、输出阻抗、输出形式等。

1.2.7 电子测量的发展及趋势

近代自然科学阶段是从真正意义上的测量的出现开始的。在那个时代, 杰出的科学家们许多都是科学仪器的发明家、新的测量方法的创立者。他们留给后世的科学遗产常常包括两个部分, 一部分是科学探索的新发现, 另一部分是在这种探索过程中创造的新的测量技术和仪器仪表。

谈到测量技术肯定离不开仪器仪表。当人类活动的领域超出感觉器官极限的时候, 仪器仪表就成了一切事业取得成功的前提。许多学科的进展首先依赖仪器仪表的进展, 因此电子测量技术的发展过程实际就是电子测量仪器技术的发展。

1. 电子测量的发展

仪器仪表发展已有悠久的历史。据《韩非子·有度》记载, 中国在战国时期已有了利用天然磁铁制成的指南仪器, 称为司南。古代的仪器在很长的历史时期中多属用以定向、计

时或供度量衡用的简单仪器。

在 17、18 世纪，因发明了科学的温度计和实用的温标，温度的概念具有更加准确的科学涵义，成为可以测量和定量计算的基本物理量，它直接导致热力学的诞生。同时，欧洲的一些物理学家开始利用电流与磁场作用力的原理，制成简单的检流计；利用光学透镜制成的望远镜，奠定了电学和光学仪器的基础。其他一些用于测量和观察的各种仪器也逐渐得到了发展，使人们发现了能量守恒定律和热机的一系列基本规律，为欧洲的产业革命奠定了坚实的科学基础。

在 19 世纪，由于发明了测量电流的仪表，才使电学与磁学的研究迅速走上正轨，获得了一个又一个重大的发现，促进了电气时代的来临。

进入 20 世纪，由于威尔逊云室和众多核物理探测仪器的发明，人们才揭开了原子核反应神秘的面纱，逐渐展现出微观世界的真实图景，奠定了原子核物理学与日后原子能开发利用的基础。

20 世纪 50 年代起，晶体管仪器相继出现，并逐步取代了大部分电子管仪器。从 20 世纪 60 年代开始，集成电路问世，数字仪器不断涌现，使仪器的体积、重量、功耗大幅度减小，准确度明显提高，在工业、科技及军事上应用越来越多。从 20 世纪 70 年代起，随着微处理器的研制成功，微机化仪器迅速发展，多功能、高性能的智能仪器达到上千种，已部分取代了传统仪器。20 世纪 90 年代开始，以计算机为主体的虚拟仪器技术迅速发展起来，并逐步成为测试测控技术领域的主流技术。

2. 电子测量发展的趋势

从总的发展趋势来看，电子测量仪器技术将来的发展呈现以下几个趋势。

(1) 量限扩大化趋势 现代化电子测量仪器测量范围正逐渐扩大，例如，AGILENT（安捷伦）公司的 E4448A 型频谱分析仪，最高测试频率达到 50GHz 以上；KEITHLEY（美国吉时利仪器）公司的 6485 型皮安表测量电流最小量程为 2nA。

(2) 集成化、模块化趋势 便携式仪器越来越多，使用者要求测量设备更加集成化、微型化。

仪器模块化，可以容易地安装、选择和升级，以及进行故障诊断和维修，如 AGILENT、R/S（罗德与施瓦茨公司）、安立公司等仪器，大部分都具有模块化、功能化的配件。

(3) 智能化趋势 电子测量仪器智能化，是指测量仪器具有很强的自校准、自诊断、自补偿和存储、计算、报表输出等功能。如 FLUKE 公司的 9100 型校准器根据仪器的标准点，自动设置准确的输出，并提示用户进行必要的调节，程序可以自动检查对照被校准仪器各校准点的技术标准。与此同时，9100 型校准器还能控制打印机直接打印出校准证书。

(4) 数字化趋势 无论高档还是低档仪器，数字化越来越普及。随着微电子技术的发展，数字电路的成本越来越低。各类仪器上安装了 CPU，实现了数字化后，在软件的开发上相关公司投入了巨大的人力、财力。今后的数字化仪器的构成可以归纳为一个简单公式：“仪器 = A - D/D - A + CPU + 软件”。

(5) 虚拟化趋势 电子测量的智能化趋势可以看作将计算机置入仪器之中，而虚拟仪器则可以看作将仪器置入计算机内。将计算机技术应用于测量之中，利用计算机软件，在屏幕上虚拟出与传统仪器相似的显示面板，使用者通过鼠标和键盘操作面板上的虚拟按钮、开关、旋钮等来完成仪器的各种功能操作，并通过虚拟面板上的虚拟显示屏、数码显示器以及

指示灯等，来了解仪器的测量状态，以及读取或打印测量结果。

(6) 网络化趋势 将计算机网络用于电子测量中，通过局域网或者 Internet 来控制或使用电子仪器，可以使工程技术人员远在千里之外仍能够遥控仪器和获取结果。

(7) 跨专业多功能化趋势 未来的一台电子测量仪器将可测量多种参数，具有多种用途，而且可测量的参数跨越传统上被认为是不同的计量专业。这种仪器的好处是节约投资，携带使用方便。例如，FLUKE 公司的 5520A 型校准器，既能够校准电磁专业的万用表、功率表、电流钳、电力谐波分析仪，也能校准热工专业的温度计、数据采集器，还能校准无线电专业的电子电压表、示波器等，配上探头，还能测量压力等。

重视仪器仪表的研究及应用，是现代人追求科学理性精神的体现。理解仪器仪表的原理，就是理解信息时代。

单元 3 测量误差的基本概念

1.3.1 常用测量术语

1. 单次测量和多次测量

单次测量是用测量仪器对待测量进行一次测量的过程。在测量精度要求不高的场合，可以只进行单次测量，但其不能反映测量结果的精密度，只能给出一个量的大致概念和规律。

多次测量是用测量仪器对同一待测量进行多次重复测量的过程。依靠多次测量可以观察测量结果一致性的好坏（即精密度）。通常对于要求较高的精密测量都须进行多次测量，如仪表的比对校准等。

2. 等精度测量和非等精度测量

测量条件保持不变的多次测量，称为等精度测量；测量条件不能维持不变情况下的多次测量，称为非等精度测量。

3. 真值 A

真值是一个变量本身所具有的真实值记为 A ，它是一个理想的概念，一般是无法得到的。在计算误差时，一般用约定真值或相对真值来代替真值。

约定真值是一个接近真值的值，它与真值之差可忽略不计。实际测量中在没有系统误差的情况下，把足够多次的测量值之平均值作为约定真值，也称为指定值，记为 A_s 。

相对真值是指当高一级标准器的误差仅为低一级的 $1/3 \sim 1/20$ 时，可认为高一级的标准器或仪表示值为低一级的相对真值，也称为实际真值或者最佳值，用 A_0 表示。

4. 标称值

测量器具上标定的数值称为标称值。如标准砝码上标出的 1kg ，标准电阻上标出的 1Ω ，标准电池上标出来的电动势 1.0186V ，标准信号发生器分度盘上标出的输出正弦波的频率 $\pm 00\text{kHz}$ 等。由于制造和测量精度不够以及环境等因素的影响，标称值并不一定等于它的真值或实际值。为此，在标出测量器具的标称值时，通常还要标出它的误差范围或准确度等级。

5. 示值

示值也称为测量器具的测得值或测量值，是指测量器具的读数装置所指示出来的被测量的数值，用 x 表示，它包括数值和单位。一般地说，示值与测量仪表的读数有区别，读数是

仪器分度盘上直接读到的数字。例如，对于以 100 分度表示 50mA 的电流表，当指针指在分度盘上的 50 处时，读数虽然是 50，但示值是 25mA。为便于核查测量结果，在记录测量数据时，一般应记录仪表量程、读数和示值（当然还要记载测量方法、连接图、测量环境、测量用仪器、编号及测量者姓名、测量日期等）。对于数字显示仪表，通常示值和读数是统一的。

6. 测量误差

测量值与被测量真值之间的差异，称为测量误差。测量误差的存在具有必然性和普遍性，人们只能根据需要将其限制在一定范围内而不可能完全加以消除。人们进行测量的目的，通常是为了获得尽可能接近真值的测量结果，如果测量误差超出一定限度，则测量工作及由测量结果所得出的结论就失去了意义。

7. 测量准确度

测量准确度是指测量结果与被测量真值之间的一致程度，用准确度等级描述。定义中的“一致程度”不是定量的，而是定性的。因此，准确度为一种定性的概念而非定量的。当用于测量结果时，表示测量结果与被测量真值之间的一致程度。当用于测量仪器时，定义为测量仪器给出的测量结果接近于真值的能力，是测量系统误差的反应。

七个国际组织即国际标准化组织（ISO）、国际电工委员会（IEC）、国际法制计量组织（OIML）、国际计量局（BIPM）、国际纯物理和应用物理联合会（IUPAP）、国际纯化学和应用化学联合会（IUPAC）以及国际临床化学联合会（IFCC），曾在 1993 年规定，沿用的准确度只是表示测量结果与被测量真值之间的一致程度或接近程度，只是一个定性概念，不宜将其定量化。

一般电工测量指示仪表按仪表准确度等级分类，可分为 0.1、0.2、0.5、1.0、1.5、2.5、5.0 七级，具体说就是该测量仪器满量程的引用误差，如 1.0 级指示仪表，其满量程误差为 $\pm 1.0\%$ 。

8. 测量精密度

测量精密度是指多次重复测定同一量时各测定值之间彼此相符合的程度。它表征测定过程中随机误差的大小，或者随机误差分布的密集或离散程度。随机误差分布密集，离散度小，则测量结果较好，测量精密度高；反之则测量精密度低。

精密度通常以算术平均差、极差、标准差或方差来量度。

9. 测量精确度

精确度是指使用同种备用样品，进行重复测定所得到的结果之间的重现性。测量精确度（简称精度）高，是指偶然误差与系统误差都比较小，这时测量数据比较集中在真值附近，要求测量准确度或精密度都很高。

通常所说的“精度”，概念含混不清，有时指准确度，有时指精密度，因此不采用此概念。

10. 重复精度与再现精度

重复精度是指在同一测量方法和测试条件（仪器、设备、测试者、环境条件）下，在一个不太长的时间间隔内，连续多次测量同一物理参数，所得数据的分散程度。重复精度反映一台设备固有误差的精密程度。

再现（复现）精度是指用不同的测量方法、由不同的测试者、采用不同的测量仪器、