

新编21世纪高等职业教育电子信息类规划教材·应用电子技术专业



电子感测 技术

周南山 罗丁喆 苏桂英 编著



电子工业出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

<http://www.phei.com.cn>

新编 21 世纪高等职业教育电子信息类规划教材·应用电子技术专业

电子感测技术

周南山 罗丁喆 苏桂英 编著

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书把内容联系紧密的传感器技术、自动检测技术和电子测量技术,有机整合为一门《电子感测技术》课程,其内容共分两大部分,第一部分为理论知识,共3章:第1章概述传感器和电子测量的基础知识;第2章介绍典型传感器及检测技术,第3章讲授电压、频率和电路元器件的测量方法,并涉及信号的时域、频域、数字域、随机域和射频的测量仪器。每章都附有思考题、习题和PPT课件。第二部分为实训指导书,把众多实训项目综合为5个,每个实训都提出预习要求和实训报告要求。

本书可作为高等职业院校的通信技术、应用电子技术、微电子技术和安全防范技术等专业的教学用书,也可作为本科生和从事电类专业的工程技术人员的参考书。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

电子感测技术/周南山,罗丁喆,苏桂英编著. —北京:电子工业出版社,2007.8

新编 21 世纪高等职业教育电子信息类规划教材·应用电子技术专业

ISBN 978-7-121-04852-4

I. 电… II. ①周…②罗…③苏… III. ①传感器—高等学校:技术学校—教材②自动检测—高等学校:技术学校—教材③电子测量—高等学校:技术学校—教材 IV. TP212 TP274 TM93

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 123900 号

责任编辑:贺志洪

印 刷:北京季峰印刷有限公司

装 订:三河市万和装订厂

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本:787×1092 1/16 印张:8 字数:205 千字

印 次:2007 年 8 月第 1 次印刷

印 数:3 000 册 定价:15.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系,联系及邮购电话:(010) 88254888。

质量投诉请发邮件至 zlts@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线:(010) 88258888。

新编 21 世纪高等职业教育电子信息类规划教材（第 2 版）

出版说明

2002 年 10 月,电子工业出版社组织 90 余所高职院校的优秀教师编写了“应用电子技术”、“机电一体化技术”、“电气自动化技术”和“通信技术”4 个专业的高职教材,从 2003 年 7 月第 1 本教材问世截至 2004 年 10 月,已经出版了 70 余种。时至今日已有 2 年多的教材使用时间,这批教材的大部分得到使用者的好评。随着教育的不断深入及社会用人单位对高职毕业生的更高要求,为使教材更好地适应高职毕业生的就业、使教材有益于培养高职毕业生的生产实践技能,2005 年 7 月,我们在杭州组织召开了教材研讨会,针对上述 4 个专业的大部分教材的内容的修订听取了到会老师的意见,明确了修订教材的编写思路和编写原则,确定了修订版教材的编写人员,计划在 2006 年年底~2007 年上半年基本出版齐全修订版教材。为便于读者区分,这批修订版教材均标明“(第 2 版)”。教材的丛书名仍沿用“新编 21 世纪高等职业教育电子信息类规划教材”。

第 2 版教材的主要特点如下:

1. 内容更加突出“实用性、技能性、应用性”。
2. 实训内容的选择以技能为要素。
3. 适当拓展了教材的广度,其目的是为方便不同学校、不同专业的学生选用。
4. 专业课以目前企业主要设备为主线进行讲解。
5. 习题尽量避免问答式、叙述式,而多为技能型、解决问题型。
6. 配备电子教案,以便于老师教学和学术交流。

我们的初衷是希望第 2 版教材的问世能够弥补第 1 版教材的不足,使其内容更加贴近企业用人的需求,更加有利于学生就业,让学生能够真正掌握一些实际的生产技能。同时,我们亦深知:高等职业教育的改革不能一蹴而就,编写出适合高职教育的教材也是一个渐进的过程。我们期待和全国高职院校的老师们一同努力,不断改进创新,为出版真正适合高职教育的好教材尽力。

在组织高职电子信息类教材的编写全过程近 4 年的时间内,我们结交了全国的许多优秀教师,他们的人品德行、人格魅力、学识水平均达到很高的水准。与他们的交往让我们受益匪浅,并且给我们以启迪:学校确是藏龙卧虎之地。我们愿意继续结交新的朋友,目的只有一个,那就是共同为高等职业教育的发展贡献我们大家的力量,在这个目标下达到学校、老师、出版社多赢。

我们亦衷心欢迎各高职院校有意愿、有能力的老师参加我们的教材编写。具体专业范围如下:

机电一体化技术,电气自动化技术,数控技术,模具技术,应用电子技术,通信技术。

电子工业出版社高等职业教育教材事业部

2006 年 3 月

参加“新编 21 世纪高等职业教育电子信息类规划教材”
编写的院校名单（排名不分先后）

上海科学技术职业学院

江西信息应用职业技术学院

江西蓝天职业技术学院

吉林电子信息职业技术学院

保定职业技术学院

安徽职业技术学院

杭州中策职业学校

黄石高等专科学校

天津职业技术师范学院

福建工程学院

湖北汽车工业学院

广州铁路职业技术学院

台州职业技术学院

重庆工业高等专科学校

济宁职业技术学院

四川工商职业技术学院

吉林交通职业技术学院

连云港职业技术学院

天津滨海职业技术学院

杭州职业技术学院

重庆职业技术学院

重庆工业职业技术学院

广州大学科技贸易技术学院

湖北孝感职业技术学院

江西工业工程职业技术学院

四川工程职业技术学院

广东轻工职业技术学院

西安理工大学

辽宁大学高职学院

天津职业大学

天津大学机械电子学院

九江职业技术学院

包头职业技术学院

北京轻工职业技术学院

黄冈职业技术学院

郑州工业高等专科学校

泉州黎明职业大学

浙江财经学院信息学院

南京理工大学高等职业技术学院

南京金陵科技学院

无锡职业技术学院

西安科技学院

西安电子科技大学

河北化工医药职业技术学院

石家庄信息工程职业学院
三峡大学职业技术学院
桂林电子工业学院高职学院
桂林工学院
南京化工职业技术学院
湛江海洋大学海滨学院
江西工业职业技术学院
江西渝州科技职业学院
柳州职业技术学院
邢台职业技术学院
漯河职业技术学院
太原电力高等专科学校
苏州经贸职业技术学院
金华职业技术学院
河南职业技术师范学院
新乡师范高等专科学校
绵阳职业技术学院
成都电子机械高等专科学校
河北师范大学职业技术学院
常州轻工职业技术学院
常州机电职业技术学院
无锡商业职业技术学院
河北工业职业技术学院
天津中德职业技术学院

安徽电子信息职业技术学院
浙江工商职业技术学院
河南机电高等专科学校
深圳信息职业技术学院
河北工业职业技术学院
湖南信息职业技术学院
江西交通职业技术学院
沈阳电力高等专科学校
温州职业技术学院
温州大学
广东肇庆学院
湖南铁道职业技术学院
宁波高等专科学校
南京工业职业技术学院
浙江水利水电专科学校
成都航空职业技术学院
吉林工业职业技术学院
上海新侨职业技术学院
天津渤海职业技术学院
驻马店师范专科学校
郑州华信职业技术学院
浙江交通职业技术学院
桂林工学院南宁分院

教材特色与教学亮点

1. 薄、精、新型：为反映理论与光、电、仪产业的结合，把内容联系紧密的传感器、自动检测技术和电子测量技术整合为一门课程，称为多学科领域精要的新型薄教材。授课时间仍为其中一门。

2. 涉及面广：具备时域、频域、数字域、随机域和射频等知识点。有关电子测量仪表的频率从直流到光波。另外，根据不同专业的要求，可设定重点章节，例如有的专业可强化第2章内容，而选择第3章内容；有的专业则可把第2章要点，归入到第1章传感器分类中去讲，可缩至34学时。

3. 易教易学：每章中的思考题和习题，归纳了重点内容，启发了学习思路和指明了解题方法。另外，本书的附录内容为易教易学提供了范例，其中PPT课件可做到形象地分解难点、突出重点、增加信息和趣味。由于加强了平时反复练习，因而不必在临考前进行“总复习”。

4. 理论实训相互联系：实训指导书中的提问，既能说明实训原理，又复习了理论知识。5个实训内容大部分不是验证性的，主要是认识实际系统、练习测试技能和开拓应用范围，做到实训与实验、实用性与前瞻性相统一。

5. 实训效果环环加强：先上理论课和先培养班内优秀学生，使之成为教师的助手，加强了实训的指导力量；实训报告按规定格式与预习报告一体化，在实训前查看和实训后进行批阅，并当场进行“操作/口试”考查；五个模块化、系统化的实训在同一室中轮做，还为学生创造了弥补上次实训和预习下次实训的机会。

6. 考核方法不断完善：理论笔试采用只能看自己笔记原件的半开卷考法（不能看书、习题本和复印件等），成绩占50%；在完成实训报告后进行当场考查，成绩占30%；还有20%是平时积分，包括查看笔记、课堂纪律和小测验等。

前 言

根据高等职业教育培养应用型、技能型人才的特点,将内容联系紧密的传感器技术、自动检测技术和电子测量技术,有机整合为一门《电子感测技术》课程,可成为多学科领域的新型教程,使内容精要、结构紧凑的薄教材,易于讲授和学习。实训项目使职业教学和职业培训结合起来,反映理论与光、电、仪产业的结合,有利于学生成才和就业。

本书分为理论知识和实训两大部分,前者的3章讲授51学时。第1章是电子感测技术的基础知识,概述传感器的组成、分类、转换特性和应用知识,以及电子测量的任务、方法、误差分析和数据处理。第2章是传感器及检测技术,简要介绍典型的非电量和光电传感器及其检测技术。第3章是电压、频率和电路元器件的测量,讲授信号的时域、频域、数字域、随机域和射频的测量方法,以及有关电子测量仪器,如计数器、晶体管特性图示仪、失真度仪、扫频仪、频谱分析仪和自动网络分析仪等的工作原理与应用,每章都附有思考题、习题和PPT课件。实训指导书把众多项目综合成5个,分别是电路元器件检测和误差处理;电信号参数的时、频域测量;温度、压力、流量、应变和位移等非电量电测;光电检测和光纤传感器;虚拟仪器技术。每个实训为6学时,包括完成实训报告和考核。

本课程的教学方法是以传感器为先,以测量为主,以实训为基础,涉及面力求达到“直流光波看全景,实训虚拟测四域”的目标。为了加强平时的反复练习,做到实训与实验统一,我们探索了一些行之有效的办法:书中的思考题、习题和预习要求,将加深理解基础知识和联系实训内容;教学辅助手段的PPT课件将不断达到易教易学的目的;一个实训包含多项内容,要在规定时间内达到基本要求,我们采取先上理论课和先培养班级内优秀学生,使之成为教师的助手,加强实训指导力量;学生每次实训完毕,需经“操作/口试”考核后,教师方可签收;实训报告按规定格式与预习报告一体化,在实训前查看和实训后进行批阅;五个模块化的实训放在同一室中轮做,还为学生创造了弥补上次实训和预习下次实训的机会。为进一步达到上述目标,本书不断修改和完善;每次授课都要有新意和新的教学方法;实训项目也要进行阶段性更新和重组,新新不停,以求永立涛头。

本书在上海科学技术职业学院经多届教学和实训后编写而成,并经上海大学通信学院施惠昌教授审阅,提出许多宝贵意见,在此谨致衷心的感谢。

最后对在本书编写过程中给予帮助的傅丰钰、张跃、张东、郑杏花等教师表示衷心的感谢,同时也对本书的出版给予多方支持的有关编委们表示感谢。

编著者

2007年7月1日

目 录

第 1 章 电子感测技术的基础知识	(1)
1.1 传感器概述	(1)
1.1.1 传感器的组成、转换特性和选用要点	(1)
1.1.2 传感器的融合和光电检测	(3)
1.2 电子测量任务和方法	(4)
1.2.1 电子测量的任务	(4)
1.2.2 电子测量的方法	(5)
1.3 测量误差与处理	(5)
1.3.1 误差理论	(5)
1.3.2 数据处理	(8)
思考题	(11)
习题	(12)
第 2 章 传感器及检测技术	(13)
2.1 温度检测	(13)
2.1.1 温标	(13)
2.1.2 温度传感器的介绍	(13)
2.2 压力检测	(19)
2.2.1 压力的概念及单位	(19)
2.2.2 压力传感器的介绍	(20)
2.3 流量检测	(23)
2.3.1 流量及测量方法	(23)
2.3.2 体积流量和质量流量的检测	(24)
2.4 光学量测量和光纤传感器	(27)
2.4.1 光学量测量方法和传感器	(27)
2.4.2 光纤传感器	(30)
2.5 模拟信号处理	(32)
2.5.1 模拟信号处理电路的结构	(32)
2.5.2 模拟信号的转换和加工	(34)
思考题	(37)
习题	(38)
第 3 章 电压、频率和电路元器件的测量	(39)
3.1 电压、电平、功率和噪声的测量	(39)
3.1.1 电压和相对电平的测量	(39)
3.1.2 功率和射频功率的测量	(42)
3.1.3 噪声测量和抗干扰措施	(44)

3.2	射频 (RF) 网络特性参数测量和应用	(46)
3.2.1	射频简介	(46)
3.2.2	单口网络的反射参数	(47)
3.2.3	双口网络的散射参数	(48)
3.2.4	S 参数的测量	(48)
3.2.5	应用举例	(50)
3.3	频率和频、时域的测量方法	(51)
3.3.1	计数法测量	(51)
3.3.2	示波器的时域测量	(54)
3.3.3	信号失真与频域测量	(55)
3.4	阻抗测量和半导体管的检测	(58)
3.4.1	电阻、电容和电感的测量	(58)
3.4.2	半导体管的检测	(62)
3.5	计算机测试技术	(63)
3.5.1	智能仪器和自动测试系统 (ATS)	(63)
3.5.2	虚拟仪器 (VI) 技术	(63)
	思考题	(69)
	习题	(69)
实训一	电路元器件检测和误差处理	(72)
实训二	电信号参数的时、频域测量	(75)
实训三	非电量电测	(79)
实训四	光电检测和光纤传感器	(86)
实训五	虚拟仪器技术 (I)、(II)	(91)
附录 A	实训报告格式	(106)
附录 B	用以构成十进倍数和分数单位的词头与希腊字母	(107)
附录 C	常用相对电平 (dB) 的计算	(108)
附录 D	思考题的答题方法	(109)
参考文献		(117)

第 1 章 电子感测技术的基础知识

1.1 传感器概述

传感器技术是信息技术的源头，它牵制着信息技术的发展水平和速度，是一门综合性、多学科交叉渗透的高新科学技术。

1.1.1 传感器的组成、转换特性和选用要点

1. 组成

传感器是与人的感觉器官相对应的元器件，又称“电五官”，它的定义是：“能够感受规定的被测量，并按照一定的规律转换成‘可用信号’的器件或装置”。这里，电信号是最易于处理和传输的“可用信号”。传感器一般由敏感元件和转换器组成，如图 1.1 所示，有些传感器两者合一，或只有敏感元件直接输出可以传输的电信号，甚至直接显示被测量。

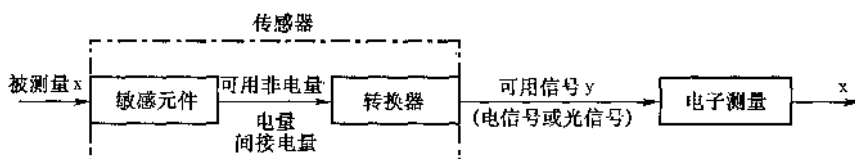


图 1.1 传感器组成及其输入、输出量

传感器这个术语可在各种不同的场合下应用，其内涵还是以不多加限制为好。目前，光信息技术已经异军突起，光信号成为便于快速、高效的处理与传输的可用信号，传感器的概念也将发展成为能把外界信息转换成光信号输出的器件。传感器中的敏感元件直接感受非电信号，以及电磁场、光波或射线等。其输出可能有三种：如果是可用非电量或间接电量，则转换器的作用是把它们变成易于传输和处理的可用信号 y ；如果是电量，则转换器可以进行放大或转换（电流和电压相互转换、模拟量和数字量相互转换、光信号和电信号相互转换）。电子测量电路除了有放大和转换作用外，还有校正、补偿、运算和显示等功能，最后还原成被测量 x 或其代表值。例如， x 表示温度，敏感元件可能是胀缩体和压敏电阻，前者输出可用非电量（如位移量）。后者输出间接电量（电阻变化），转换元件则是电桥，把电阻变化变成电压变化。温度也可通过热电偶直接变成电压变化，也可用水银柱直接显示温度。

2. 分类

大多数传感器是物理型的，也有化学型的和生物型的，多以功能命名，如温度传感器，压力传感器，流量传感器和光电传感器等。近来重点开发的传感器有微传感器（微电子机械

系统 MEMS)、环保传感器和医疗传感器等, 其中生物传感器是当今研究的前沿, 同时信息时代需要网络化传感器。

3. 转换特性

传感器的转换特性曲线如图 1.2 所示, 可归纳为以下三种类型:

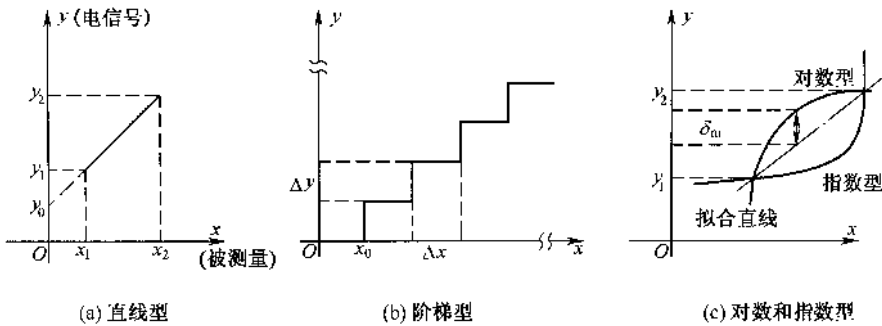


图 1.2 传感器的转换特性曲线

(1) 直线型的方程 $y = y_0 + Sx$, 表示线性传感器的灵敏度 $S = \frac{dy}{dx} = \text{常数}$ 。当 $x=0$ 时, $y = y_0$; 量程 $y_m = y_2 - y_1$; 测量范围 $x_m = x_2 - x_1 = y_m / S$; 校零后 $x_1 = y_1 = y_0 = 0$, 则 $y = Sx$, 直线型应用最方便, 也是研制传感器的目标。

(2) 如果直线型转换特性放大后, 就是阶梯型。当一个传感器的输入从零开始增加时, 只有在达到了某一最小值后才测得输出变化, 这个最小值 x_0 就称为传感器的阈值。分辨率是指当一个传感器的输入从非零的任意值开始增加时, 只有在超过某一输入增量 Δx 后输出才显示有变化 Δy , 这个输入增量 Δx 称为传感器的分辨率, 表达式可为 $\Delta x = \frac{1}{S} \Delta y$ ($\Delta y=1$ 时为单位分辨率)。阈值说明了传感器的最小可测出的输入量, 分辨率说明了最小可测输入变化量, 分辨率就是不灵敏度, 即死区。如果灵敏度过高, Δx 过小, 干扰影响就会显著增加。

(3) 对数型或指数型的非线性传感器是普遍的, 其灵敏度不是常数, 且随工作点和工作区间而变, 工作区间可用拟合直线的斜率 $S = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}$ 来代替。此时其非线性误差为:

$$\gamma = \frac{\delta_m}{y_m} \times 100\% \quad (1-1)$$

δ_m 表示实际曲线与拟合直线间的最大差值, 如果非线性较严重 ($\gamma \geq 10\%$), 往往分成多段直线型, 用计算机来处理。

【例 1.1】测试位移量 x (mm) 传感器的方程为 $I = 4 + 2x = 4 \sim 20\text{mA}$, 求传感器的灵敏度、每毫安 (mA) 的分辨率和测量 x 的范围。

解: 灵敏度: $S = \frac{dy}{dx} = \frac{dI}{dx} = \frac{d}{dx}(4 + 2x) = 2 \text{ mA/mm}$

分辨率: $\Delta x = \frac{1}{S} \Delta y = \frac{1}{2} \frac{\text{mm}}{\text{mA}} \quad (\Delta y = 1\text{mA})$

测量范围：当 $4 + 2x_1 = 4\text{mA}$ 时， $x_1 = 0\text{mm}$
当 $4 + 2x_2 = 20\text{mA}$ 时， $x_2 = 8\text{mm}$

4. 选用传感器的要点

首先，应了解被测对象以下要点：

- (1) 被测对象所处环境，如温度范围、有害程度、干扰情况等。
- (2) 测量方式和范围：有接触式、非接触式；在线式、取样式；被测参量的极限范围和常用范围；对线性度和测量时间等要求。
- (3) 安装和输出要求：被观测的距离和空间；连接、供电和保护措施等；输出信号类型和标准化要求等。

然后，了解传感器以下要点：

- (1) 测量精确度和可靠性（稳定度、影响量、牢固度和校正周期）。
- (2) 灵敏度、分辨率和响应速度等。
- (3) 先进性与性价比，零配件的储备，售后服务和维修制度等。

最后，选用传感器时，可能有几种传感器同时符合要求，但每一种传感器往往不可能满足所有的选用要点，应根据实际使用目的、指标和环境等，有不同的侧重点或用折中方法，综合考虑后，以确定选择哪一种传感器最合适，如果采用多种传感器确定重要信息，须用传感器融合技术。

1.1.2 传感器的融合和光电检测

1. 传感器融合

通过综合多种传感器信息来得到单个传感器所不能得到的信息，称为传感融合技术。例如，仅靠烟雾检测器来判断是否发生了火灾并不可靠，因为它区别不了是吸烟、炊烟还是火灾的烟雾。如用紫外线检测器可识别火焰，但无烟的火灾也是有的。因此，必须考虑采用多种传感器的组合。又如，判断是否有人入侵商场时，用红外线或微波传感器来区别是植物还是动物，再用超声波距离传感器和摄像机辨别出入的位置、时间及特征等。对来自各个传感器的信号进行综合判断。

2. 光电检测

将被测量的变化转换成光信号的变化，再通过光电传感器转换成电信号，这就是光电检测技术。光由一群光子所组成，每个光子具有 $h\nu$ 的能量（ h 为普朗克常数， ν 为光的频率），光照到物体上，使一个自由电子能量增加 $h\nu = w_0 + \frac{1}{2}mv_0^2$ ，用来克服逸出功 w_0 和作为电子逸出时具有初速度 v_0 的动能 $\frac{1}{2}mv_0^2$ 。当 $h\nu \leq w_0$ 时，即使光通量很大，也不可能有电子逸出，这个最低频率 ν_0 称为红限频率，对应的波长称为红限波长；当 $h\nu > w_0$ 时，即入射光频率 $\nu > \nu_0$ 的情况下，光通量越大，逸出的光电子数目也越多，电路中的光电流也越大。另外，光在传输或作为信息时，许多特性也优于电子：

- (1) 光子轻于电子，反应快，开关时间短，传输速率高；

(2) 光子不带电, 相互不排斥, 光电不干扰, 光路无接地问题;

(3) 光频极高 ($\nu > 300 \times 10^9 \text{ Hz} = 300 \text{ GHz} = 0.3 \text{ THz}$), 频带极宽, 一条光纤可双向传输 10 万以上用户同时通话;

(4) 光纤传输损耗小 (约 0.2 dB/km), 传输距离与电路同轴线 (衰减约 45 dB/km) 相比, 可增加 100 倍以上;

(5) 光纤细小、价低和设备简单, 以及温度系数小、稳定可靠和光通信保密性强等。

但由于光存储器和光逻辑门等器件尚未解决, 要实现全光电路和全光通信, 任重而道远。

另外, 光和电均是电磁量, 都有波、粒两重性, 以及可在空间作无线传播和在导线中传输。

1.2 电子测量任务和方法

1.2.1 电子测量的任务

电子测量是测量技术的主体和主导, 泛指以电子技术进行的测量, 如与传感器技术相结合, 则称为非电量电测。本书所说的电子测量, 面向电子工程, 是指电磁量而言, 其主要任务有以下两项:

(1) 测量三参数: 电压、频率和阻抗, 是得到其他电参数的测量基础。

(2) 表达四要素: 大小、正负、单位和误差。

【例 1.2】 如图 1.3 所示, 在一个电阻 R_1 上多次测得直流电压范围 $U=4.75 \sim 5.25 \text{ mV}$ 则

(1) 大小为 5, 是最接近被测量的近似值。

(2) 不是 -5, 也不是 ± 5 。

(3) 单位 $\text{mV} = \text{V}/1000$ 。

(4) 相对误差 $\pm 5\%$, 是被测量的测量结果 (近似值) 的误差范围, 也可写成 $5 \text{ mV} \pm 5\%$ 或 $5.00 \pm 0.25 \text{ mV}$ 。

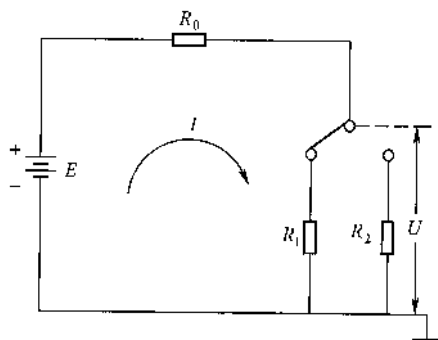


图 1.3 直流电路

必须指出, 不带误差的测量结果不可信, 没有单位的测量数据无价值 (少数相对值和规定量除外)。一般 R_1 已知, 则电流 $I = \frac{U}{R_1}$ 和功率 $P = \frac{U^2}{R_1}$ 可算得, 因此, 电压测量是其派生参数的测量基础。

1.2.2 电子测量的方法

1. 直接测量

被测量 $y=x$ 测量值或仪表示值，直接从仪表上读出被测量，是最基本、最简便的测量方法，应用也最广。

2. 间接测量

$y=f(x_i)$ ，对几个与被测量有确定的函数关系的电参量进行测量，例如测量功率 $P=UI=I^2R=U^2/R$ ，这里 $y=P$ ， $x_1=U$ ， $x_2=I$ ， $x_3=R$ ，后三者为直接测量所得，常用于以下几种情况：

(1) y 不能直接测量；

(2) 直接测量较困难，如电流 $I=U/R$ ，测出电压 U 和电阻 R 比测量 I 更方便；

(3) 间接测量精度更高，例如电压 $U_{ab}=U_b-U_a$ 由于电压表内阻不够大，直接测量 U_{ab} 的误差较大，分别测量 U_b 和 U_a 后之差，使误差抵消许多。

3. 组合测量

$y=f(x_i)$ ，被测量与多个未知测定值组成联立方程的函数关系，通过改变测量条件进行多次测量，如图 1.3 所示，有 $E=IR_0+U$ ，其中电源内阻 R_0 是一个看不到、摸不着的未知量，可改变负载电阻，测出 R_1 、 R_2 所对应的 U_1 和 U_2 值，代入方程：

$$E = I_1 R_0 + U_1 \text{ 和 } E = I_2 R_0 + U_2$$

求得：

$$R_0 = \frac{(U_2 - U_1)}{(I_1 - I_2)} = \frac{(U_2 - U_1)}{(U_1/R_1 - U_2/R_2)}$$

$$\text{当 } R_2 \rightarrow \infty \text{ 时, } R_0 = (U_2/U_1 - 1)R_1 \quad (1-2)$$

由于电压表内阻 $R_V \neq \infty$ ，将产生与 R_0 值成正比的误差。

1.3 测量误差与处理

1.3.1 误差理论

1. 电子测量误差来源

- (1) 仪表误差，仪表说明书中表述的误差范围，由仪表本身性能不完善、不稳定所致。
- (2) 环境变化、温度高低、电源变化和干扰情况等影响误差。
- (3) 人为误差，决定于操作熟练程度和所采用的测量方法。

2. 测量误差的表示

(1) 绝对误差 $\Delta = x - a_0$

x 为测量值或仪表示值。 a_0 为真值，是一个理论值或期望值，在误差存在的情况下，是

一个不可知的量，所以在实际应用时，常用实际值 a 来代替 a_0 。则上式可表示为：

$$\Delta = x - a \quad (1-3)$$

这里， Δ 有正有负，实际值 a 可有以下三种情况：

- 相对真值：用精度高一级仪表或新仪表的测定值 x_0 ，则 $a=x_0$ 。
- 近真值：测量次数 N 足够多时，采用算术平均值 $\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i$ ，则 $a = \bar{x}$ 。
- 用修正后的值 $x+c$ ，修正值 $c=-\Delta$ ，则 $a=x+c$ 也为近真值。

(2) 相对误差，绝对误差仅能说明测量值偏离实际值的情况，相对误差可以说明测量的准确程度，可有三种表示形式：

实际相对误差， $\gamma_a = \Delta/a \times 100\%$ ，在要求不太严格的场合，可用 x 代替 a

$$\text{示值相对误差，} \gamma_x = \Delta/x \approx \frac{\Delta}{a} \times 100\% \quad (1-4)$$

$$\text{引用相对误差，} \gamma_m = \Delta_m/y_m \times 100\% \quad (1-5)$$

这里， y_m 为仪表量程，又称满度值。 γ_m 可称满度相对误差，用于评价电工仪表的准确度。电工仪表准确度共分 7 级：0.1、0.2、0.5、1.0、1.5、2.5、5.0。例如 0.1 级仪表的引用误差为 $\gamma_m = \Delta_m/y_m = \pm 0.1\%$ 。引用相对误差实际上是给出仪表的最大绝对误差 Δ_m ，如果引用误差和仪表量程为已知，则可求出量程的最大绝对误差 $\Delta_m = y_m \gamma_m$ ，从而可算出最大实际相对误差 $\gamma_{am} = \Delta_m/a$ 或最大示值相对误差 $\gamma_{xm} = \Delta_m/x$ ，反映了仪表测量值的不确定度。

【例 1.3】测量一个约 80V 的电压。现有两台电压表，一台量程为 300V，0.5 级，另一台量程为 100V，1.0 级。问选哪一台为好？

解：(1) 使用 300V，0.5 级电压表时，最大示值相对误差为：

$$\gamma_{x1} = \frac{\Delta_m}{x} = \frac{y_m \gamma_m}{x} = \pm 0.5\% \times \frac{300}{80} \approx \pm 1.88\%$$

(2) 使用 100V，1.0 级电压表时，最大示值相对误差为：

$$\gamma_{x2} = \pm 1.0\% \times \frac{100}{80} \approx \pm 1.25\%$$

从计算结果可以看出，用 100V，1.0 级电压表测量该电压时，精度比较高，选用该表较好。

由此可见，尽管选择 100V，1.0 级电压表的准确度较低，但被测量电压示值接近满刻度值，符合量程选择原则。因此，在进行仪表选择时，若测量仪表的量程相同，仪表等级数越小，测量相对误差越小，准确度越高；若测量仪表的量程不相同，应该根据被测量的大小，兼顾仪表误差等级和量程上限，合理地选择仪表。 x 越近 y_m 误差越小，为了提高测量精度，测量时需调整仪表使其示值尽量接近量程，最好达到 $x \geq \frac{2}{3} y_m$ 。

数字仪表的基本绝对误差为：

$$\Delta = \pm \gamma_x x \pm \gamma_m y_m = \pm (\gamma_x x + \gamma_m y_m)$$

$$\text{或 } \Delta = \pm \gamma_x x \pm \text{几个字} \quad (1-6)$$

$\gamma_x x$ 是用示值相对误差表示的，它与读数 x 成正比，称为读数误差，它与仪表各单元电路的不稳定性有关。当量程 y_m 一定时， $\gamma_m y_m$ 是个固定值，称为满度误差，它包括量化误差

和零点误差等,与所取量程有关,常用正负几个字来表示。

【例 1.4】某五位数字电压表 5V 挡的基本误差为 $\pm 0.006\%U_x \pm 0.004\%y_m$, 求满度误差相当于几个字。

解: $\pm 0.004\% \times 5V = \pm 0.0002V$, 由于该表可以显示五位数字, 故 $\pm 0.0002V$, 恰好相当于末位正负两个字, 因此其基本误差也可表示为:

$\Delta U = \pm 0.006\%U_x \pm 2\text{个字}$, 与 $\Delta U = 0.006\%U_x \pm 0.0002V$ 完全一致。

3. 误差性质

(1) 随机误差 (随差), 由仪表内外的不稳定现象, 如噪声干扰、电源波动、元件老化和量化误差等所引起的测量结果分散性, 是不可预知和重复的, 当测量次数足够多时, 绝大多数随机误差服从正态 (高斯) 分布, 其分布钟形曲线如图 1.4 所示。

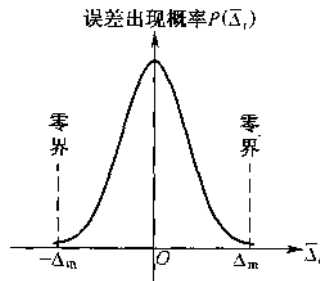


图 1.4 随差正态分布

随机误差的统计规律如下:

① 中间差小单峰性: 当绝对误差 $|\bar{\Delta}_i| = x_i - \bar{x}$ 较小时, 其出现概率 $P(\bar{\Delta}_i)$ 较多, 大量的仪表示值 x_i 集中分布在平均值 $\bar{x}$ 附近。

② 两边差大有界性: 当 $|\bar{\Delta}_i| \geq \Delta_m$ 时, $P(\bar{\Delta}_i)$ 小到可以忽略, 我们把 $\pm \Delta_m$ 作为零界。

③ 正负误差对称性: 以 $P(\bar{\Delta}_i)$ 纵坐标线为中心的钟形曲线左右对称。

④ 多次测量抵偿性: 测量次数越多, 误差代数和越接近零值, 表达式为: $\sum_{i=1}^N \bar{\Delta}_i \approx 0$

(2) 系统误差 (系差), 是由于仪表刻度不准、未校零点、预热不够和元器件理想化等原因所产生的。该误差具有: 定值重复性, 测后可修正; 变值规律性, 测前可控制。可采用电桥差动法电路和比值补偿法等控制措施, 并可采用一些专门的测量方法, 如替代法、交换法和对称测量法等。

我们把随机误差和系统误差比做射击打靶, 如图 1.5 所示, 其中图(a)靶点集中在离靶心不远的地方, 这时随差小, 精密度高。随差不能消除, 只能增加测量次数、取平均值的办法可以减小对测量结果的影响。图(b)靶点分散在靶中心 (真值) 附近不远。这时系差小, 准确度高。多次测量不能减少系差, 因为它不具有抵偿性。各次测量误差的算术平均值 $\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \bar{\Delta}_i \neq 0$ 体现了系差大小, 系差可用电路相消和数据修正来减小。图(c)靶点集中在靶心, 这时系差和随差均小, 是我们通常所说的精 (确) 度高。