

实用电子技术

电子测量技术

秦 斌 编



实用电子技术

电子测量技术

秦 斌 编

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书是“实用电子技术”丛书之一。本书首先介绍测量的基础知识；其次介绍万用表、指示式电工仪表、示波器、波形记录仪等常用测量仪器的原理与使用方法；然后介绍电子元件的特性，以及电阻、电容与电感等各种电路元件参数的测量；接着介绍电流与电压、功率、频率、波形等的测量；最后介绍测量用信号源，以及数据域测试技术等。

本书配有大量照片和图表，并辅以简洁的介绍，有助于读者理解和掌握各种电子测量技术。

本书可供电子工程、通信、自动控制等领域的技术人员阅读，亦可作为工科院校相关专业学生的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

电子测量技术/秦斌编. —北京:科学出版社,2009
(实用电子技术)

ISBN 978-7-03-024534-2

I. 电… II. 秦… III. 电子测量 IV. TM93

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 068287 号

责任编辑:刘红梅 孙力维 / 责任制作:董立颖 魏 谨

责任印制:赵德静 / 封面设计:李 力

北京东方科龙图文有限公司 制作

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

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

丽源印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2009年6月第一版 开本:B5(720×1000)

2009年6月第一次印刷 印张:12 3/4

印数:1—5 000 字数:189 000

定 价:26.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

我们通常所说的电子信息技术包括三个支柱:信息的获取——电子测量技术;信息的传输——电子通信技术;信息的处理——电子计算机技术。显然,如果没有对原始数据准确、可靠的测量,那么对任何信息的转换、处理和传输都将失去实际意义,因此电子测量技术是电子信息产业基础中的基础。

科学技术的飞速发展,特别是信息技术、精密工程的发展,催生了众多的新工艺、新材料、新产品,给人们的生产生活带来了日新月异的变化,然而所有这些新工艺、新材料、新产品都离不开测量技术,测量技术是这些产品质量的重要保证。

随着我国电子信息产业的飞速发展,电子测量技术及相关的仪器仪表已成为信息化带动工业化的重要纽带。

目前,我国的中等教育正在从应试教育向素质教育转化,这是我国教育领域的一次具有深远意义的变革。长期以来,从教师到学生,重视理论知识,轻视实践环节;重视书本知识,轻视动手能力是普遍现象。“高分低能”限制了某些有潜力的学生向深层次的发展。因此,本书从实用的角度出发,向广大读者介绍常用的电子测量方法及技巧。为了使测量器具的特征和测量方法形象化,本书还采用了大量照片,同时尽可能将我们身边的实例用插图的形式加以说明,从而使未接触测量实践的读者避免无所适从的感觉。

在编写本书时,我们力图使本书具有如下特点:

(1) 在学习中实践,在实践中学习,通过对实验结果的分析来验证所学理论。

(2) 一改科技图书的沉闷与枯燥,辅以大量照片和图表,帮助读者理解和记忆所学知识。

(3) 着眼于方法的介绍,而不是简单地阐述原理,结合实际应用,使读者能



够将所学知识融会贯通并学以致用。

如果本书有助于读者学习和掌握电子测量的各种技术,则吾将幸甚。

由于编者水平有限,书中难免有不当之处,敬请读者批评指正。最后,谨对在编写过程中给予帮助的同人和科学出版社的编辑表示感谢。

前 言

编 者

本书是作者多年从事电子测量技术工作的经验总结,也是作者多年从事电子测量技术工作的经验总结。本书共分五章,第一章介绍电子测量的基本概念,第二章介绍电子测量的基本方法,第三章介绍电子测量的基本仪器,第四章介绍电子测量的基本应用,第五章介绍电子测量的基本实验。

本书可作为高等院校电子测量技术专业的教材,也可供从事电子测量技术工作的工程技术人员参考。

本书由作者编写,由科学出版社出版。本书在编写过程中,得到了许多同行专家的指导和帮助,在此表示衷心的感谢。

本书在编写过程中,得到了许多同行专家的指导和帮助,在此表示衷心的感谢。

本书在编写过程中,得到了许多同行专家的指导和帮助,在此表示衷心的感谢。

本书在编写过程中,得到了许多同行专家的指导和帮助,在此表示衷心的感谢。

本书在编写过程中,得到了许多同行专家的指导和帮助,在此表示衷心的感谢。

本书在编写过程中,得到了许多同行专家的指导和帮助,在此表示衷心的感谢。

本书在编写过程中,得到了许多同行专家的指导和帮助,在此表示衷心的感谢。

本书在编写过程中,得到了许多同行专家的指导和帮助,在此表示衷心的感谢。

本书在编写过程中,得到了许多同行专家的指导和帮助,在此表示衷心的感谢。

本书在编写过程中,得到了许多同行专家的指导和帮助,在此表示衷心的感谢。

本书在编写过程中,得到了许多同行专家的指导和帮助,在此表示衷心的感谢。

目 录

第 1 章 测量基础知识	1
1.1 概 述	1
1.1.1 意 义	1
1.1.2 定 义	2
1.2 单 位	2
1.2.1 电学单位制的发展史	5
1.2.2 导出量的国际单位制	6
1.2.3 标准的等级	7
1.3 标准器	8
1.3.1 标准电池	9
1.3.2 标准电阻器	10
1.3.3 标准电容器	10
1.3.4 标准电感器	11
1.3.5 标准电压/电流发生器	11
1.4 测量方法	13
1.4.1 直接测量与间接测量	13
1.4.2 比较测量与绝对测量	13
1.4.3 代换测量	14
1.5 测量值的表示方法	15
1.6 误差的产生与消除	16
1.6.1 什么是误差	16
1.6.2 误差的种类	17
1.6.3 测量装置的允许误差	18

1.6.4	有效数字	20
第2章 常用测量仪器原理与使用方法 23		
2.1	万用表	23
2.1.1	什么是万用表	23
2.1.2	模拟式与数字式万用表的比较	24
2.1.3	模拟式万用表至今仍被使用的理由	26
2.1.4	模拟式万用表的结构与使用方法	27
2.1.5	数字式万用表的结构与使用方法	32
2.2	指示式电工仪表	36
2.2.1	指示式电工仪表的分类	36
2.2.2	观察分度盘	37
2.2.3	指示式电工仪表的结构	38
2.3	示波器	41
2.3.1	示波器的原理	41
2.3.2	模拟示波器与数字示波器	42
2.3.3	示波器的应用	45
2.3.4	新型示波器	56
2.3.5	如何选购示波器	59
2.4	波形记录仪	59
2.4.1	记录仪的种类	59
2.4.2	直动式记录仪	60
2.4.3	自动平衡记录仪	61
2.4.4	X-Y 记录仪	62
2.4.5	多笔式记录仪的相位补偿机构	62
第3章 电路元件参数测量 65		
3.1	元件特性	65
3.1.1	等效电路	65
3.1.2	参数的依赖性	67

3.2 电阻的测量	68
3.2.1 低阻电阻的测量	68
3.2.2 中阻电阻的测量	69
3.2.3 高阻电阻的测量	71
3.2.4 接地电阻的测量	71
3.2.5 特殊电阻的测量	72
3.3 阻抗的测量	73
3.3.1 电压表-电流表法	74
3.3.2 电桥法	74
3.3.3 谐振法	75
3.3.4 自动电桥法	76
3.3.5 阻抗测量仪器的技术指标	77
3.4 电容与电感的测量	78
3.4.1 用万用电桥测量电容与电感	78
3.4.2 用 Q 表测量电容与电感	79
3.5 半导体特性的测量	81
3.5.1 三极管静特性的测试	81
3.5.2 特性曲线测试仪的结构	82
3.5.3 电流放大系数的简易测量法	83
3.5.4 半导体元器件测量时的注意事项	84
第 4 章 电流与电压的测量	85
4.1 动圈式仪表	85
4.2 交流电流与电压的测量	87
4.2.1 半波整流电路	87
4.2.2 全波整流式电流表	87
4.2.3 全波整流式电压表	89
4.2.4 峰值电压表	89
4.2.5 峰峰值电压表	89
4.2.6 不切断电路时电流的测量	89

4.3	高频电流与电压的测量	90
4.3.1	集肤效应	90
4.3.2	杂散电容	92
4.3.3	高频电流的测量	93
4.3.4	高频电压测量仪表	94
4.4	数字式电压测量方式	96
4.4.1	双重积分式 A/D 转换器	96
4.4.2	D/A 转换器	98
4.4.3	逐次比较式 A/D 转换器	100
4.5	高电压测量	102
4.5.1	交流高电压的测量	102
4.5.2	直流高电压的测量	104
4.5.3	脉冲高电压的测量	106
4.5.4	高电压时大电流的测量	107
第 5 章	功率的测量	111
5.1	基本定义	111
5.2	传输型功率测量	112
5.3	吸收型功率测量	115
5.4	热敏电阻传感器和功率计	115
5.5	热电偶式功率计	118
5.6	二极管功率传感器	120
5.7	峰值功率测量	122
5.8	多次反射的影响	122
5.9	技术指标	124
5.10	校 准	125
第 6 章	频率的测量	127
6.1	频率的各种测量方法	127
6.1.1	电容充放电法	127

6.1.2	利用示波器的测量方法	128
6.1.3	频率电桥法	128
6.1.4	频率计法	128
6.2	频率计数器	129
6.2.1	频率计数器的动作原理	129
6.2.2	高分辨率的低频测量	130
6.2.3	微波测量法	130
6.3	基于频率标准的校正	132
6.3.1	频率计数器和校正	132
6.3.2	频率的一次标准	132
6.3.3	标准的提供	133
第 7 章	波形的测量	135
7.1	概 述	135
7.2	波形的种类	135
7.2.1	正弦波	136
7.2.2	复合周期信号波形	138
7.3	如何观测波形	140
7.3.1	使用示波器观测波形	140
7.3.2	使用示波管观测波形	142
7.3.3	用频谱分析仪观测波形	144
7.3.4	用 FFT 分析仪观测波形	146
第 8 章	测量用信号源	149
8.1	正弦波振荡器	149
8.1.1	射频信号发生器	149
8.1.2	音频振荡器	150
8.1.3	性能和技术指标	151
8.2	函数发生器	153
8.2.1	阈值判决振荡器	153

8.2.2	用函数发生器产生正弦波	155
8.2.3	调 制	156
8.2.4	技术指标	157
8.3	频率合成器	157
8.3.1	直接合成	158
8.3.2	间接合成	159
8.3.3	取样正弦波合成	163
8.4	任意波形合成器	165
8.4.1	工作原理	165
8.4.2	任意波形发生器的技术指标	167
8.5	脉冲发生器	168
8.5.1	概 述	168
8.5.2	基本方块图	168
8.5.3	前面板和背面板	169
8.5.4	特殊脉冲发生器	170
第 9 章	数据域测试技术	173
9.1	数据域简介	173
9.2	逻辑分析仪的基本工作	174
9.2.1	异步工作方式	174
9.2.2	同步工作方式	175
9.2.3	方块图	176
9.2.4	仿真分析	179
9.2.5	高级语言的源相关	180
9.3	主要功能的利用	181
9.3.1	设 置	181
9.3.2	触发问题	185
9.3.3	计数器资源	188
9.3.4	定 序	188
9.3.5	多个装置之间的触发	190

第 1 章

测量基础知识

1.1 概 述

测量就是使用各种仪表测量长度、质量,以及其他物理量。测量技术不仅与电气有关,还涉及机械、化学等领域,道理非常深奥。现在,随着模-数转换器与传感器的研制开发,敏感地捕获周围的环境状态已经成为可能,可方便地利用获取的信息,进行装置的自动化以及人们所期望的控制。

1.1.1 意 义

自然科学的研究与测量两者间的关系是密不可分的。在科学史上,常因理论值与精确测量的实验值间的微小差异,导致理论的更新和发展。由于科学的新发现而产生新的测量方法,新测量方法的发现,使科学家得以揭示更多的宇宙奥秘而导出更多的物理定律。如法拉第(Faraday)在实验中发现了电磁感应定律,库仑(Coulomb)发现了平方反比定律。

工程师可利用科学上的发现来制造种种节省人力的机械,以促进生产力的发展,提高我们的生存能力,增加人民生活的舒适度,促进社会经济的发展。

仪器与测量在当今的工业社会中愈来愈重要,由于大多数物理量都能通过转换器转变为电量,从而可以使用电子仪表加以测量。测量的结果可直接显示出来,也可以记录下来以供分析,或者把所得的资料反馈,再控制原输入系统的

功能,从而构成一个自动程序控制系统。所以电子仪表的应用非常广泛,它不仅能应用于科学研究,而且能应用于工程技术和医学领域。因此,电子仪表是实验室和研究机构不可缺少的工具。

1.1.2 定义

在古代,测量长度的单位大多利用人身体的某一部分。最原始的长度单位是用足底的长度或手指宽度等,如图 1.1 所示。经过漫长的历史变迁,使用足底长度测量逐渐演变成今天仍然使用的英尺(ft, $1\text{ft}\approx 30\text{cm}$)计量,而用手指宽度测量则以大拇指宽度作为基准单位,进而演变成今天的英寸(in, $1\text{in}\approx 2.54\text{cm}$)计量。

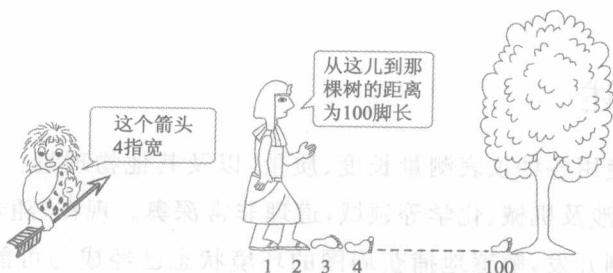


图 1.1 古代的长度测量单位

我们来考虑一下作为被测物体的基准物理量或单位。为了表示某物理量的数量,必须有与该物理量相同种类的比较基准,这个基准量称为单位。求取某物理量是基准单位的多少倍的操作称为测量,完成这种操作的装置是测量器具。

1.2 单位

在各种测量的量的家族中,我们描绘出与基本量相关的导出量的关系图,如图 1.2 所示。在该示意图中,导出量局限于与电测量系统相关的量,以及若干具有普遍意义的量。目前,大约有 30 个这样的量得到认可。

各种物理量至少在理论上都可以视为测量系统中的基本量,而 SI(国际单位制)是建立在长度、质量、时间、电流、温度和发光强度这几个量的基础上。某些单位制,如用于电磁量的厘米-克-秒(cgs)制或米-千克-秒(mks)制只承认 3 个基本单位。这两种单位制都与米单位制相联系。在较古老的 cgs 制(实际上

是两种,即静电 cgs 制和电磁 cgs 制)中,基本单位是厘米、克和秒。在 mks 制中,基本单位是米、千克和秒。后一种单位制是现今普遍采用的国际单位制的基础。美国国家标准局(目前为美国国家标准技术研究院(NIST))于 1964 年采纳了国际单位制。

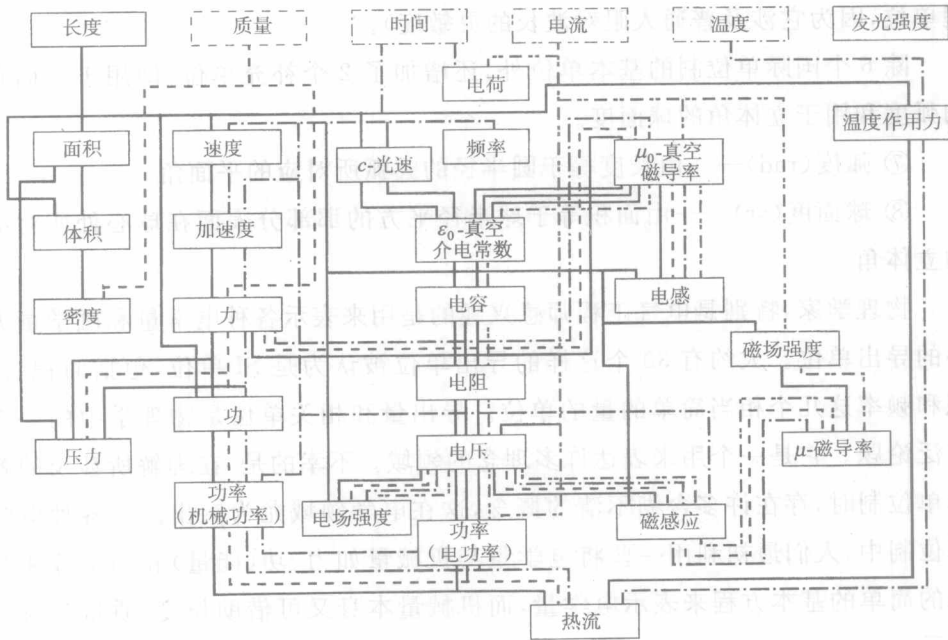


图 1.2 导出量与基本量的关系

① 米(m)——长度单位。米是与氦-86 原子[在氮的三相点(63.15K)上激发]的 $2P_{10}$ 和 $5d_5$ 能级之间跃迁(橘红色谱线)相对应的在真空中辐射的 1 650 763.73 个波长的长度。

② 千克(kg)——质量单位,它等于国际千克原器的质量。

③ 秒(s)——时间单位。秒是与铯-133 原子基态两个超精细能级之间跃迁相对应的辐射的 9 192 631 770 个周期的持续时间。

④ 安[培](A)——电流单位。在真空中对截面可忽略的两根相距 1m 的无限长平行圆直导线内通以恒定电流,则恒定电流将在两根导线之间每米长度上产生 $2 \times 10^{-7} \text{ N}$ 的力,此时每根导线中的电流为 1A。

⑤ 开[尔文](K)——热力学温度单位。它等于水的三相点热力学温度的

1/273.16[1968年的国际实用温标(IPTS68)和国际实用摄氏温标涉及水的三相点,且至少涉及5个其他参考点]。

⑥ 坎[德拉](cd)——发光强度单位。坎[德拉]是在 $101.32 \text{ N} \cdot \text{m}^{-2}$ 的压力下处于铂凝固温度的黑体的 $1/600\,000 \text{ m}^2$ 表面在垂直方向上的发光强度(在国际单位制中,坎[德拉]被视为发光强度的基本单位,尽管它不完全是一个物理单位,因为它涉及普通人眼对波长的灵敏度)。

除6个国际单位制的基本单位外,还增加了2个补充单位,即用于平面角的弧度和用于立体角的球面度。

⑦ 弧度(rad)——由长度等于圆半径的圆弧所对应的平面角。

⑧ 球面度(sr)——由面积等于球半径平方的那部分表面在球心处所对应的立体角。

物理学家,特别是电气工程师感兴趣的是用来表示各种电学量和磁学量大小的导出单位。大约有30个这样的导出单位被认为是SI单位,包括面积、体积和频率这几个相当简单的量的单位。导出量和相关单位是物理学中的一个广泛论题。它是一个用来表达许多理念的领域。不幸的是,在理解所涉及的各种单位制时,存在许多含糊不清的概念,这在电学领域尤为突出。在各种电学单位制中,人们最初利用一些将电学量与机械量如力、功(能量)和功率等相联系的简单的基本方程来表示电学量,而机械量本身又可借助长度、质量和时间表示。

图1.2示出导出量与基本量的关系。可以用量纲术语更详细地表示这种关系。根据有关定义和物理方程,可以反映出这种关系的更多细节。导出量的家族由代表几个基本量的点划线表示。每个导出量(在方框中示出)均与一个或多个基本量相联系。这些关系由物理方程表示,并可以通过用量纲术语对该关系加以验证。两条这样的链,即力学量和电学量在功率方面是等效的,它们本身也具有通过热流反映出的共同点,即将机械功率转化为等效的热以及将电功率完全转化为热耗散。

在国际单位制家族中,较为重要的是真空磁导率的作用,以及真空介电常数的作用。按定义,电流被认为是一个基本量,尽管它与长度、质量和时间相关。按定义,它是通过将 $4 \times 10^{-7} \text{ H/m}$ 这一数值赋予真空磁导率与力学量相联系。实验中,电流与力学量的关系可以借助电流平衡或贝拉特(pellat)型测力

计来建立。电压是通过欧姆定律的关系式由电流和电阻导出的。在早期的工作中,电阻的单位是由自感器或互感器的电抗建立。最近,利用可计算的电容器已获得更高的精度。

真空介电常数值 ϵ_0 由真空磁导率 μ_0 和光速 c 导出,关系式为 $\epsilon_0 = 1/(\mu_0 c^2)$ 。目前使用的真空介电常数值是 $8.8542 \times 10^{-12} \text{ F/m}$ 。

1.2.1 电学单位制的发展史

电学单位制的发展经历了差不多一个半世纪。在此期间,至少提出过 8 种得到认可的单位制。结果,由于术语变更、处理问题的观念和方法的多样性,加之所讨论问题的复杂性、缺乏标准化以及人们对不同观点的理解,电学单位制存在着许多混淆。我们现今所了解的电学单位制源于 1827 年提出的欧姆定律 $E=IR$ 。1833 年,高斯(Gauss)率先用实验方法将磁学量与力学单位相联系。随后,韦伯(Weber)利用力学长度、质量和时间提出了测量电流和电阻的方法。这些将电量(或热、光等)与长度、质量和时间的所谓力学单位相联系的方法称为“绝对”法,早期从事该领域研究的人选择这一术语并没有什么特殊原因。

英国科学促进协会下属的电气标准委员会成立于 1861 年,其影响力已有许多年。这个委员会在早期的主席 C. 麦克斯韦的领导下建立了同时适用于静电单位和电磁单位的厘米-克-秒(cgs)制以及全部用米制表示的实用单位。顾名思义,电学单位的 cgs 制直接与力学单位相联系,因此属于“绝对”单位制。选择实用单位的大小对于工程应用要比静电单位和电磁单位的某些更极端的值更加方便。

在建立 cgs 制之后很多年,基本单位伏[特]、欧[姆]和安[培]在诸如标准电池、汞电阻和银电解式电量计(也称为库仑计)这样一些标准中得到具体体现。依据这些标准的电学单位称为国际单位并一直沿用到 1948 年。包括美国在内的一些国家将这些单位称为“法定”单位。

在使用 cgs 制的漫长时期内,由英国、德国和美国的国家实验室制定出借助力学单位来确定伏[特]、欧[姆]和安[培]的高精度方法。最终,欧[姆]和伏[特]的单位值用托马斯(Thomas)或类似形式的标准 1Ω 电阻器,以及韦斯通电池(非常接近 1V)得到体现,且一直沿用到现在。自 1948 年 1 月 1 日开

始,称为绝对伏[特]和绝对欧[姆]的一组新值被指定为电压和电阻的国家标准。这里必须说明在过渡期内它们与使用了半个世纪的一些国际单位的关系。尽管目前这些值仍与1948年的相同,但它们因采用更精确的确定方法而略有变化。

1954年,第十届国际计量大会提出基于米、千克、秒、安[培]、开氏度(现为开[尔文])和坎[德拉]的国际单位制(SI)。

国际单位制的电学单位是基于国际电工委员会(IEC)采纳的 mksa 制,它是由乔治(Giorgi)于1901年建议的4量纲 mks 演变而来的。mksa 制包括安[培],因而称为米-千克-秒-安[培]制。

1.2.2 导出量的国际单位制

表1.1列出国际单位制的导出单位。表1.2列出国际单位制的十进制倍数和分数的词头。

表 1.1 国际单位制

基本单位			导出单位			
物理量	名称	符号	物理量	名称	符号	公式
长度	米	m	电荷量	库[仑]	C	$A \times s$
质量	千克	kg	电容	法[拉]	F	$a \times s/V$
时间	秒	s	电感	亨[利]	H	$V \times s/A$
电流	安[培]	A	电位	伏[特]	V	W/A
温度	开[尔文]	K	电阻	欧[姆]	Ω	V/A
发光强度	坎[德拉]	cd	能量(功/热)	焦[耳]	J	$N \times m$
物质的量	摩[尔]	mol	力	牛[顿]	N	$kg \times m/s^2$
			频率	赫[兹]	Hz	c/s
			照度	勒[克斯]	lx	lm/m^2
			光通量	流[明]	lm	$cd \times sr$
			磁通量	韦[伯]	Wb	$V \times s$
			磁通密度	特[斯拉]	T	Wb/m^2
			功率	瓦[特]	W	J/s
			压力	帕[斯卡]	Pa	N/m^2
辅助单位						
平面角	弧度	rad				
立体角	球面度	sr				