

“十二五”国家重点图书出版规划项目
电子与信息工程系列

TECHNOLOGY AND APPLICATION OF ELECTRONIC MEASUREMENT

电子测量技术与应用

主 编 徐 杰
副主编 谢玉鹏 王安华



哈尔滨工业大学出版社
HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

013062861

“十二五”国家重点图书出版规划项目
电子与信息工程系列

TM93
182

TECHNOLOGY AND APPLICATION OF ELECTRONIC MEASUREMENT

电子测量技术与应用

主 编 徐 杰
副主编 谢玉鹏 王安华



TM 93
182



哈尔滨工业大学出版社
HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS



北航

C1670635

1088300810

目更收献出并图点重寒国“五十二”

区系野工息前已千申

内容简介

本书系统地介绍了电子测量技术的基本原理及测量方法,内容包括:基础知识、测量误差与数据处理、时域测量、时频测量、信号发生器、电压测量、阻抗测量、频域测量、数据域测量、现代电子测量技术、无损检测、传感器技术基础及课程设计,共13章,每章均附有思考题与习题。

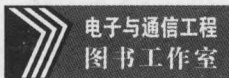
本书按高等学校电子信息科学与工程类专业的教学特点与需求编写,注重理论与实践相结合,内容系统,深入浅出,实例清晰易懂,每章均详细介绍了不同的测量方法,并提供了测量不同参数的课程设计。本书可以作为高等学校理工类本科生与研究生教材或参考书,也可供相关领域的科技工作者阅读与参考。

图书在版编目(CIP)数据

电子测量技术与应用/徐杰主编. —哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2013.8
ISBN 978-7-5603-4144-6

I. ①电… II. ①徐… III. ①电子测量技术-高等学校-教材 IV. ①TM93

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 146854 号



责任编辑 许雅莹
封面设计 刘长友
出版发行 哈尔滨工业大学出版社
社 址 哈尔滨市南岗区复华四道街10号 邮编 150006
传 真 0451-86414749
网 址 <http://hitpress.hit.edu.cn>
印 刷 黑龙江省委党校印刷厂
开 本 787mm×1092mm 1/16 印张 19.5 字数 475千字
版 次 2013年8月第1版 2013年8月第1次印刷
书 号 ISBN 978-7-5603-4144-6
定 价 34.00 元

(如因印装质量问题影响阅读,我社负责调换)

前 言

PREFACE

随着电子技术和计算机技术的不断发展,电子测量技术的发展也突飞猛进。测量是通过实验方法对客观事物取得定量数据的过程。电子测量是测量领域的主要组成部分,是指以电子技术为基本手段的一种测量技术,是测量技术与电子技术相结合的产物。电子测量主要是运用科学的原理、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,同时还可以通过各种传感器把非电量转换成电量进行测量。实际上,电子科学技术具有极快的速度,非常精细的分辨能力,很宽的作用范围,并具有很强大的信息处理能力,这些显著有效的特点使测量技术的发展有了不断进步。

全书共 13 章,主要分为四部分:第一部分是基础知识及理论,包括第 1 章和第 2 章,介绍了电子测量的基础知识和误差理论;第二部分是电子测量基本参数的测量,包括第 3~8 章,主要介绍了波形显示、时间、频率、电压、阻抗及频域特性等基本电参数的测量;第三部分主要介绍了现代电子测量的方法,包括第 9~12 章,主要介绍数据域的测量、现代电子测量技术、无损检测及测量中经常用到的检测器件传感器;第四部分由第 13 章组成,主要是利用已学过的理论知识设计实际测量电路以达到理论与实践相结合的目的。

本书根据作者多年从事电子测量技术的教学与研究经验编写而成,既注重理论分析,又重视学以致用,内容既有系统性,又具有先进性与实用性。可以作为高等学校理工类本科生与研究生教材或参考书,也可供相关领域的科技工作者阅读与参考。

本书的编写分工为:第 1 章、第 2 章、第 3 章由黑龙江科技大学徐杰编写,第 4 章、第 10 章由黑龙江科技大学谢玉鹏编写,第 5 章由黑龙江科技大学王娟编写,第 6 章、第 11 章、第 12 章由黑龙江科技大学王安华编写,第 7 章、第 13 章由黑龙江科技大学赵晓妍编写,第 8 章、第 9 章由黑龙江科技大学杜艳秋编写。本书徐杰任主编,谢玉鹏、王安华任副主编。徐杰统稿,赵金宪主审。

在本书编写过程中,参考了国内外大量的书籍与论文,在此向本书所引用论文与书籍的作者表示衷心的感谢。

书中难免有不当之处,敬请广大读者指正。

编 者

2013 年 4 月于哈尔滨

目 录

CONTENTS

第1章 基础知识	1
1.1 电子测量概述	1
1.2 测量标准	9
1.3 本课程的任务和学习方法	10
思考题与习题	12
第2章 测量误差及数据处理	13
2.1 测量误差	13
2.2 测量数据的处理	15
2.3 测量不确定度	29
思考题与习题	36
第3章 时域测量	37
3.1 时域测量引论	37
3.2 示波管	41
3.3 波形显示原理	43
3.4 通用示波器	48
3.5 取样技术在示波器中的应用	55
3.6 数字示波器	58
3.7 数字示波器的应用	64
思考题与习题	65
第4章 时频测量	67
4.1 概 述	67
4.2 频率和时间的测量原理	69
4.3 电子计数器的组成原理和测量功能	71
4.4 电子计数器的测量误差	75
4.5 测量频率的其他方法	79
4.6 电子计数器性能的改进方法	88
思考题与习题	96
第5章 信号发生器	97
5.1 信号发生器概述	97

5.2 低频信号发生器	103
5.3 高频信号发生器	109
5.4 函数信号发生器	114
5.5 合成信号发生器	120
思考题与习题	124
第6章 电压测量	125
6.1 概 述	125
6.2 交流电压的测量	127
6.3 数字电压表概述	136
6.4 数字多用表	142
6.5 数字电压表的误差与干扰	144
思考题与习题	144
第7章 阻抗测量	146
7.1 概 述	146
7.2 电桥法测量阻抗	153
7.3 谐振法测量阻抗	165
7.4 利用变换器测量阻抗	174
思考题与习题	177
第8章 频域测量	178
8.1 频域测量概述	178
8.2 频率特性测试仪	179
8.3 外差式频谱仪	184
8.4 傅里叶分析仪	190
8.5 频谱仪在频域测试中的应用	192
思考题与习题	195
第9章 数据域测量	196
9.1 数据域测量的基本概念	196
9.2 数据域测量技术	199
9.3 逻辑分析仪	203
思考题与习题	212
第10章 现代电子测量技术	213
10.1 自动测量技术概述	213
10.2 智能仪器	214
10.3 接口总线	222
10.4 现代电子测量技术中的通信技术	236
10.5 虚拟仪器技术	237
10.6 现代电子测量技术中的硬件平台	239
10.7 现代电子测量技术中的软件平台	239
思考题与习题	242

第 11 章 无损检测	243
11.1 无损检测概述	243
11.2 超声波检测	244
11.3 射线检测	245
11.4 涡流检测	246
11.5 磁粉检测	247
11.6 液体渗透检测	248
11.7 无损检测新技术	250
思考题与习题	250
第 12 章 传感器技术基础	251
12.1 传感器的定义和组成	251
12.2 传感器的分类	251
12.3 常用传感器	252
12.4 传感器应用技术	263
12.5 传感器的发展趋势	265
思考题与习题	266
第 13 章 课程设计	267
13.1 运算放大电路参数测量	267
13.2 信号发生器技术指标的测量	272
13.3 电容的测量	280
13.4 智能电子计数器的设计	286
13.5 电压的数字测量	293
思考题与习题	302
参考文献	303

第 1 章

基础知识

1.1 电子测量概述

1.1.1 电子测量及其特点

测量是通过实验方法对客观事物取得定量数据的过程。借助专门的设备和仪器,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。通过大量观察和测量,人们能够准确地认识各种客观事物,并归纳、总结、建立各种定理和定律。因而测量是人类认识自然、改造自然的重要手段。

有人说,科学的进步和发展是离不开测量的。如果没有望远镜就没有天文学;如果没有显微镜就没有细胞学;如果没有指南针就没有航海事业……科学家们在描述测量时曾说:“测量是认识世界的主要工具”,“没有测量,就没有科学,科学始于测量”,“当你能够测量你所关注的实物,而且能够用数量来描述的时候,你就对其有所认识”。这些足以说明测量在科学研究与发展中的重要地位。测量结果不仅用于验证理论,而且可以发现新问题,能够催生新的科学理论。同样,在社会生产实践、现代化的工业生产、高新技术和国防建设、医学生物领域和农业生产生活中,处处离不开测量。从产品的开发设计、生产调试、质量检测直至维护保养等各个阶段都有测量的身影。事实证明,测量技术是衡量一个国家,一个时期科学技术发展水平的重要标志。

电子测量是测量领域的主要组成部分,是指以电子技术为基本手段的一种测量技术,是测量技术与电子技术相结合的产物。电子测量主要是运用科学的原理、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,同时还可以通过各种传感器把非电量转换成电量进行测量。实际上,电子科学技术具有极快的速度,非常精细的分辨能力,很宽的作用范围,并具有很强大的信息处理能力,这些显著有效的特点使电子测量技术有了飞速的发展。由于电子测量方法比其他测量方法更加方便、快捷、准确,所以电子测量不仅用于电学各个专业,例如,电压、电流、阻抗及频率等参数的测量,同时也广泛应用于物理学、化学、光学、机械学、热力学、生物学及日常生产生活的各个领域。例如,它可以通过压力型的传感器把非电量——重量转换为电压信号进行测量研究,然后得出重量的测量结果。数字温度计、电子血压计、流量计等都是对非电量的测量。

电子测量技术具有以下几个显著的特点。

1. 高准确度及灵敏度

电子测量的准确度比其他测量方法的准确度要高得多。在用电子测量仪器对电阻、电

压、频率、时间等参数的测量中,由于采用原子频标或恒温晶体振荡器等作为基准,可以使测量的准确度达到 10^{-15} 数量级,这是人类目前在测量准确度方面达到的最高标准。正因为电子测量的误差可以这么小,所以测量仪器的灵敏度很高。在测量的过程中,人们经常应用电子测量仪器将测量参数转换为频率信号后再进行测量。

2. 频率范围和量程范围宽

电子测量对象的频率覆盖范围很宽,其频率低可以达到 10^{-6} Hz以下,高可以达到 10^{12} Hz以上。当然不同的频率范围内,电子测量采用的原理和技术方法也不同,需要选择不同的测量仪器进行测量。例如,信号发生器就分为超低频、低频、高频和超高频等多种不同类型。

量程是指测量范围的上、下限值之比或上、下限值之差。由于被测量的值相差很大,因此测量量程要足够大。对于一台电子测量仪器,一般要求最高测量量程与最低测量量程相差几个或几十个数量级。例如,数字万用表对电阻的测量范围,小到 10^{-5} ,大到 10^8 ,量程达到13个数量级;而电子计数器的高低量程相差可达17个数量级。量程范围宽是电子测量仪器的一个突出优点。

3. 测量速度快

电子测量是基于电子运动和电磁波传播的,加上应用电子计算机的高速处理,使得电子测量无论在测量速度方面,还是在测量结果的传输处理方面,都能以极高的速度进行。通过电子及计算机等技术对测量手段的优化,测量的速度是其他测量方法不能比拟的。

4. 测量方便灵活

电子测量可以根据不同的对象、不同的要求、应用不同的方法完成测量任务。无论是电量还是非电量,无论是远距离还是近距离,无论是有线还是无线,即使是那些高速运动的,人类无法接触的地方,测量都成为可能。电子测量过程快速方便易行,测量结果显示方式灵活多样。利用传感器技术、自动化技术和计算机技术可以实现电子测量的自动化与智能化,为电子测量技术带来新的生机与活力。

1.1.2 电子测量的内容、方法及仪器

1. 电子测量的内容

电子测量的内容庞大、繁多,通常将电参数的测量分为电磁测量和电子测量两大类。电磁测量主要是指交直流电量(如交直流电流、电压)的指示测量法、比较测量法以及电磁量的测量方法等。电子测量主要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 and 非电量为测量对象的测量过程。电子测量的内容很广,小到基本粒子、物质结构,大到航天航空。电子测量内容按照具体测量对象主要包括以下几个方面。

(1) 电能量的测量

电能量的测量包括各种频率、波形下的电压、电流、电场强度和功率等的测量。

(2) 电路元件参数的测量

电路元件参数的测量包括电阻、电感、电容、阻抗、品质因数、损耗因数及电子器件参数等的测量。

(3) 电信号特征的测量

电信号特征的测量包括信号的波形和失真度、频率、周期、相位、调幅度、调频指数、信号带宽、噪声及数字信号的逻辑状态等的测量。

(4) 电子设备的性能测量

电子设备的性能测量包括放大倍数、衰减、通频带、灵敏度、幅频特性、性频特性、传输特性及信噪比等的测量。

(5) 非电量的电测量

非电量的电测量包括位移、速度、温度、压力、流量等非电量的电测量。在实际的生产生活中经常需要对各种非电量进行测量,通过传感器将非电量转换为相应的电流、电压、频率等电量后再测量。

在上面的各种测量对象中,频率、电压、相位、阻抗等是基本测量参数,是其他参量测量的基础,其中电压测量是最基本、最重要的测量内容。例如,电流的测量有时不是很容易,因此经常通过电阻的作用将其转换成电压来进行测量。

2. 电子测量的一般方法

一个物理量的测量是可以通过不同的方法来实现的,其测量的方法很多。但只有采用正确的测量方法,合适的仪器设备,才会得到正确的测量结果。

测量过程实际是比较的过程。测量是通过实验的方法,将被测量与已知量进行比较,以求得被测量。按照测量结果获取的手段不同,可分为直接测量、间接测量和组合测量;根据测量结果读取的方式则可以分为直读法、微差法、零值法和置换法;按照被测量在测量期间的状态可以分为静态测量、稳态测量和动态测量;按照被测量的性质又可以分为时域测量、频域测量、数据域测量和随机测量。

(1) 根据测量结果获取的手段分类

① 直接测量。直接测量是指在测量过程中,通过被测量与标准量进行比较,测量结果可以直接从测量仪器仪表中读取的方法,而且不再需要经过量值的变换或计算。这种直接测量的特点使测量过程简单迅速,广泛应用在实际工程测量中,例如应用电压表测量晶体管的工作电压,用欧姆表或直流电桥测量电阻阻值,用计数式频率计测量频率等。

② 间接测量。间接测量是指在不能够直接测量被测量的情况下,可以通过直接测量与被测量有函数关系(公式、曲线或表格)的量,再根据上述函数关系计算间接得到被测量值的测量方法。例如,应用伏安法测量电阻,首先利用电压表、电流表测量出电阻两端的电压和流过的电流,再根据欧姆定律间接计算出电阻的阻值;在测量导体的电阻率时,同样先测量导体的横截面积、长度、导体的电阻,经过计算才能间接地确定该导体的电阻率。间接测量费时费力,经常在直接测量不方便或直接测量不精确的情况下使用。

③ 组合测量。组合测量是指如果某被测量与多个未知量有关系,只通过依次测量无法求得被测量的值,可以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,从而得到未知量的测量方法。这是一种将直接测量与间接测量组合的方法。组合测量方法具有测量复杂,用时较长的特点,但是组合测量得到的测量结果一般有较高的准确度,比较适合在科学研究与实验中使用。

(2) 根据测量结果读取的方式分类

① 直读法。直读法指在测量过程中,能够直接从仪表刻度上或者从显示器上直接读取

被测量的方法,被测量的数值包括大小和单位。这种方法一般是在测量的过程中,用仪器仪表的指针的偏差来表示被测量的大小,有时又称偏差式测量方法。用这种方法测量时,作为比较的标准量实物并不在仪表内,而是在测量之前用标准量对仪器仪表进行了校验,实际测量时只是根据指针的偏差大小确定被测量。例如,用万用表测量电压、电流等,该方法简单方便,速度快。

② 零值法。零值法又称零示法或平衡法,测量时用被测量与已知的标准量进行比较,使两种量对测量仪器的作用相互抵消,从而达到平衡,并且由指零的仪表进行判断。当指零仪表指示零值时,表明被测量与标准量相等,达到平衡,以此获得被测量的值。例如,应用直流电桥(惠斯登电桥)测量电阻就是采用该测量方法获取未知电阻的阻值。该方法具有测量精度高的特点。

③ 微差法。微差法又称差值法或虚零法,这种方法实际上是一种不完全的零值法。测量中通过被测量与标准量之间的微小差值来求取被测量的方法。这种方法具有直读法测量快的特点,又有零值法测量准确度高的优点,因此应用很广泛。

④ 置换法。置换法也称为替代法,该方法是将被测量与已知标准量先后置入同一测量系统中,如果两次测量时系统的工作状态保持一致,则认为之前接入的被测量与之后接入的标准量在数值上完全相等。

上面所述的零值法、微差法和置换法均是通过被测量与标准量直接进行比较而获得测量结果的方法,都属于比较法。

(3) 根据被测量在测量期间的状态分类

① 静态测量。静态测量是指在测量期间,被测量的值可以认为是恒定不变的,输出值与输入值的对应关系上是不考虑时间变量的,一般指直流信号的测量。因此,静态测量过程不受时间的限制,测量的原理和方法简单。

② 稳态测量。稳态测量是将一个波形恒定不变的周期性交流电信号作为电子测量系统的被测对象,这样的周期性交流电信号也称为稳态信号,因此该方法称为稳态测量。稳态测量是电子测量中使用最多的一种测量方法。

③ 动态测量。动态测量是指被测量在测量期间随时间瞬变,也称为瞬态测量。动态测量有两种方式,一种是测量有源量,测量幅值随时间呈周期性变化的电信号;另外一种是无源量,采用典型的脉冲或阶跃信号作为被测系统的激励,观测系统的输出响应,也就是研究其瞬态特性。实际科学应用中经常用到动态测量。例如,飞行导弹的弹道轨迹测量、飞机速度和加速度的测量等都属于动态测量。

(4) 根据被测量的性质分类

① 时域测量。时域测量是指对以时间为函数关系的被测量的测量方法,主要测量被测对象的幅度与实践特性,以得到信号波形和瞬态响应。例如,电压、电流中的稳态值可以利用仪表直接测量;而它们中随时间变化的瞬时值则可以通过示波器等仪器显示其波形,得到变化的规律。

② 频域测量。频域测量是指对以频率为函数关系的被测量的测量方法,目的是获得信号的频谱和系统的传递函数。例如,可以通过频谱分析仪测量物理量的幅频特性、相频特性、谐波等。时域测量与频域测量又称为模拟测量。

③ 数据域测量。数据域测量是指对数字量进行的测量。例如应用逻辑分析仪可以观

测某条数据线上的时序波形,还可以得到多条数据线上的逻辑状态。

④ 随机测量。随机测量是指对各类噪声及干扰信号等随机量的测量。

除了上述几种常见的分类方法,还可以按照被测量的属性分为电量测量和非电量测量,按照对测量结果的误差要求不同分为误差要求不高的工程测量和要求较高的精密测量,按照测量条件是否变化分为等权测量和不等权测量。

上述的各种测量方法各有特色,在应用时该选择哪种测量方法呢?实际中,一般遵循的原则是:首先,应清楚地了解被测量的物理特性、测量所允许的时间、测量的环境,然后再根据实际情况选择满足精度要求的测量仪器,当然这应该是以对所选用的测量仪器的工作性能有一定的了解。其次,测量的方法应该在测量该物理量时是可行的,并且具有一定的数据处理能力,这样才能得到正确可靠的测量结果。

3. 电子测量仪器

用于检测或测量一个量,或为达到测量目的而提供的测量器具称为测量仪器,比如各种指示仪器、比较仪器、信号发生器等。凡是利用电子技术实现测量的仪器设备,统称为电子测量仪器。它能够实现对物理量的转换、完成信号处理与传输,并将测量结果进行各种方式的显示。其中,对电压、电流等电学量的测量,是通过测量各种电效应来实现的。根据电子测量仪器包含的基本功能,电子测量仪器的一般结构如图 1.1 所示。



图 1.1 电子测量仪器的一般结构

(1) 电子测量仪器的发展

电子测量仪器随着电子技术、计算机技术与自动化技术的发展有了翻天覆地的变化。围绕着如何实现自动测试这一核心技术,其发展大体上经历了模拟仪器、数字仪器、智能仪器 and 虚拟仪器四个阶段。

模拟仪器是早期的电子测量仪器,如指针式的电压表、电流表、频率计等,现在某种情况下依然可用。模拟仪器应用和处理的信号一般为模拟量,即使被测信号是数字量,也往往是先将其转换为与之成正比的模拟量,再用指针表头指示。这类仪器一般功能单一固定,体积大、测量速度较慢,精度相对较低,主要依靠人工操作。

数字仪器比较普及,它主要是将被测的模拟量转换为数字信号进行测量和处理,并以数字方式输出测量结果。例如,数字式电压表、数字式频率计、数字示波器等。数字仪器与模拟仪器相比具有速度快,精度高,测量结果处理方便,显示清晰直观易读,并且便于远距离传输的特点。

随着微处理器技术的进步和发展,数字仪器正在逐步地变为内部含有微处理器的智能电子仪器,使电子测量仪器朝着自动智能方向发展。

自动测试系统(Automatic Test System, AST)是在测量要求越来越高的情况下产生的,可以自动测量、传输、连续实时地显示与处理大量测试数据的现代化自动测量仪器,其中智能仪器和虚拟仪器都属于自动测试系统。智能仪器不同于传统电子测量仪器,其内含微

处理器和通用标准接口(General Purpose Interface Bus, GPIB),具体结构如图 1.2 所示。智能仪器既能实现自动测量又具有一定的数据处理能力,其功能模块以硬件和软件形式存在,例如,智能化数字电压表。

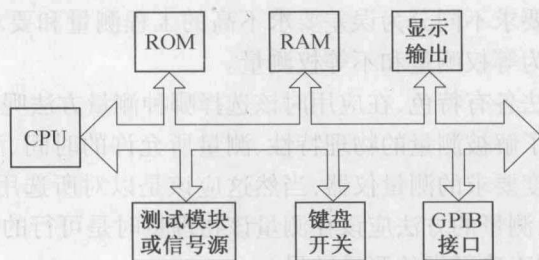


图 1.2 智能仪器结构框图

虚拟仪器(Virtual Instruments, VI)是近年来出现的以计算机技术为核心,并将检测技术和通信技术有机结合的产物。它是指在计算机上添加一层软件和一些硬件模块,并强调软件的作用,提出软件就是仪器的概念,能使用户操作计算机就像操作真实仪器一样,如图 1.3 所示。虚拟仪器是以软件代替硬件,以图形代替代码,以组态代替编程,以虚拟仪器代替真实仪器,组件自动测试系统的技术得到迅速发展。此时的电子测量仪器具有性能优异、功能多,大部分都与计算机结合,实现智能化与自动化的特点。

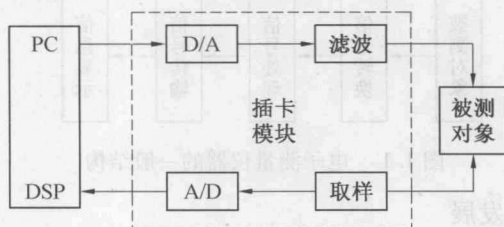


图 1.3 虚拟仪器

崭新的一代智能仪器和自动测试系统,能够对若干电参数进行自动测量、自动量程选择、数据记录和处理、数据传输、误差修正、自检自校、故障诊断及在线测试等,不仅改变了若干传统测量的概念,更对整个电子技术和其他科学技术产生了巨大的推动作用。现在,电子测量技术已成为电子科学领域重要且发展迅速的分支学科。

随着科学技术的发展,电子测量技术也将不断的进步与发展,新的测量方法和理论、新的测量仪器也必将出现。

(2) 电子测量仪器的分类

电子测量仪器的品种繁多,通常分为通用仪器和专用仪器两大类。专用电子测量仪器有特定的用途,只用于一个或几个专门目的而设计的电子测量仪器,例如彩色电视信号发生器及光纤测试仪器等。通用电子测量仪器的应用范围广泛,它们是为测量某一个或几个电参数而设计的,例如电子示波器等。

① 按照电子测量仪器的功能划分,可分为以下几种:主要用于测量电压、电流和功率等电能参数的电平测量仪器;测量各种元器件的参数及特性曲线等的电子元器件测量仪器;提供测量所需的各类信号,例如各种低频、高频信号发生器,产生函数的信号源测试仪器;用于测量电信号的频率、相位和时间间隔等特征的频率、时间、相位测量仪器;用于测量、观测、

分析、记录各种被测量的波形及随时间变化规律的波形测量仪器;用于测试电气系统的各种特性的模拟电路特性测试仪器;数据域测量中不可缺少的数字电路特性测试仪器。

② 按照被测量性质的测量方法的应用分类,主要分为时域测试仪器、频域测试仪器、调制域测试仪器、数据域测试仪器和随机域测量仪器。

时域测试仪器:用于测试电信号在时域中的各种特性。例如,示波器用来观察信号的时基波形;电压表、电流表用来测量电信号的电压、电流;计数器、频率计、相位计及时间计数器等可以用来测量信号的频率、周期、相位和时间间隔;还可以测量脉冲占空比、上升沿、下降沿及失真度等。

频域测试仪器:主要用于测量信号的频谱、功率谱、相位及噪声功率谱等,例如频谱分析仪。

调制域测试仪器:调制域主要描述信号的频率、周期、相位及时间间隔随时间变化的关系。主要仪器有调制域分析仪,用于测量频率漂移、调频和调相的线性及失真度,脉宽调制信号、锁相环路的捕捉等。

数据域测试仪器:主要用于测试各种二进制的数字流,这类仪器关心的不是信号波形、幅度、相位等信息,而是信号在某特定时刻的状态,是“1”还是“0”,特定时刻指的是时钟、读/写、输入/输出、选通及芯片选择等信号的有效沿。该仪器可以实现多通道输入,当测试计算机的地址或者数据线时可多达64路。

随机域测量仪器:主要实现对各种噪声、干扰信号等随机量的测量。

(3) 电子测量仪器的性能指标

电子测量仪器的品种类别如此之多,如何评价一台仪器的优劣,主要依据电子测量仪器的性能指标。

① 不确定度。俗话说精度或准确度是指测量仪器的读数或测量结果与被测量的真值之间的一致程度。这是一个笼统的概念,一般用相对误差表示,意为精度高,相对误差小,准确度高。因此,在学术上一般不采用准确度来衡量评价测量仪器的性能,而是采用不确定度来评价。不确定度表示合理赋予被测量之值的分散性,表示对测量结果正确性的可疑程度。不确定度小也可理解为准确度高,但不确定度可以在不依赖先知道真值的条件下定量地求得,因此可以用来作为性能指标。

② 灵敏度。灵敏度又称为分辨力或分辨率,表示测量仪器对被测量变化的敏感程度,一般定义为测量仪器指示值增量与被测量的比值,指示值增量一般为指针的偏转角度、数码的变化、位移的大小等。在数字仪表中另一种定义的形式为测量仪表所能区分的被测量的最小变化量。例如,经常说数字电压表的分辨率为 $1\mu\text{V}$,这种电压表能区分出最小 $1\mu\text{V}$ 的电压变化。因此,分辨率越小,灵敏度越高。

③ 稳定性。稳定性是指在规定的区间,其他外界条件恒定不变的情况下,保证仪器示值不变的能力,有时也称为稳定误差。造成示值变化的原因主要是仪器各个内部元器件的特性不同、参数不稳定和老化等因素。当然,由于电源电压、频率、环境温度、湿度、气压、震动等外界条件变化也会造成示值变化。

④ 线性度。线性度是测量仪器输入输出特性之一,表示仪器的输出量随输入量变化的规律。如果输出与输入在该平面上是一条过原点的直线,则称为线性刻度特性,否则称为非线性刻度特性。例如常用的模拟电压表具有上凸的非线性刻度特性曲线,而数字电压表具

有线性刻度特性,如图 1.4 所示。

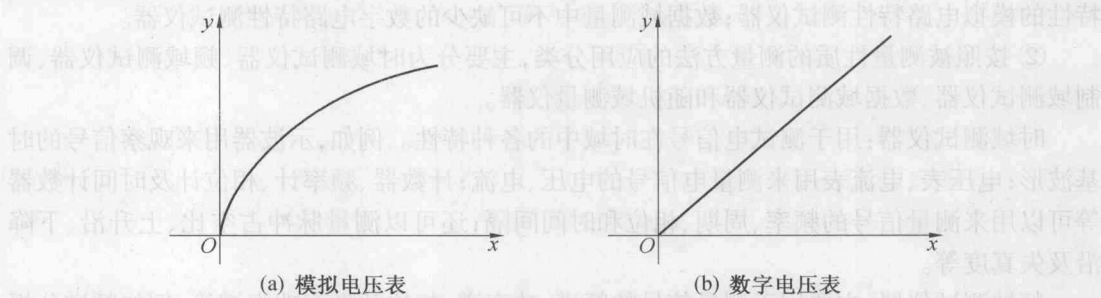


图 1.4 模拟电压表与数字电压表的刻度特性

⑤ 动态特性。动态特性是指仪器的输出响应随输入变化的能力。

以上所述的几种性能指标并不能用来评价所有的电子测量仪器,有些仪器除了这些指标还有其他的技术要求,例如,有些仪器需要考核输入阻抗、频率范围等。

1.1.3 电子测量与计量的关系

为了保证在不同的地方,用不同的手段测量同一量时,所得的结果是一致的,就要求有统一的单位以及体现这些单位的基准、标准及用基准和标准来校准的测量器具,并用法律的形式进行制定。一般把计量定义为:计量是利用技术和法制手段实现单位统一和量值准确可靠的测量。计量是一种特殊的测量,是测量工作发展的客观需要,是保证量值统一和准确一致的一种测量,它有三个主要的特征:统一性、准确性和法制性。计量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证书。因此,计量的范围主要包含了计量单位的统一,基准和标准的建立、保存、传递、复制和使用,测量方法和测量的准确度,计量器具及仪器设备,保证量值统一所采取的计量管理和法制规程等。

这样看来,计量与测量有联系,但又有区别。测量是通过实验方法对客观事物取得定量数据的过程,也就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进行比较,从而得到待测量值的过程。测量过程中所使用的器具和仪器就直接或间接地体现了已知量。测量过程中认为被测量的真实数值是存在的,误差与采用的测量方法、实际操作和测量仪器及比较标准的已知量都有关系。计量要求在测量的过程中作为比较标准的各类量具、仪器仪表必须进行定期地检验和校准,这样才能保证测量结果的准确性、可靠性和统一性。计量认为误差来源于仪器,必须保证测量的仪器是标准的,也就是说在测量精度上计量仪器至少要受检量具和仪器高出一个数量级,这样才能保证使用受检量具和仪器进行测量时得到的结果是可靠的。因此,计量的任务是确定测量结果的可靠性,它的主要内容是校准。

所以说计量是测量的基础和依据,没有测量,就谈不上计量,测量是联系生产实际的重要途径;没有计量,测量所得到的数据的准确性和可靠性得不到保证,测量就失去价值。计量工作是国民经济中一项极为重要的技术基础工作,在工农业生产、科学技术、国防建设、国内外贸易以及人民生活等各个方面都起着重要的作用。

1.2 测量标准

1.2.1 标准的定义和分类

计量基准器具简称计量基准,基准是指当代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。具有最高计量特性的计量器具,是统一量值的最高依据。

计量基准只用于鉴定各种量具的精度,不直接参与测量。计量基准分为主基准、副基准和工作基准。

主基准也称为原始基准或国家基准,用来复现和保存计量单位,是目前所能达到的最高准确度的计量器具,经国家批准,作为统一国家计量单位量值的最高依据。副基准指通过直接或间接与国家基准比对,确定其量值并经过国家鉴定批准的计量器具。它的地位仅次于国家基准,平时用来代替国家基准使用,并可验证国家基准的变化。工作基准是经与主基准或副基准校准或比对,并经国家鉴定批准,实际用以检定下属计量标准的计量器具。工作基准一般设置在国家计量机构中,也可视需要设置在工业发达的省级或部门的计量技术机构中。

计量标准器具简称计量标准,指准确度低于计量基准并根据工作基准复现出不同等级的便于经常使用的计量标准量具或仪器。也可以说是用来检定其他计量标准或工件计量器具的计量器具。计量标准的量值由计量基准传递而来,准确度低于计量基准,高于工作计量器具。按照准确度的等级进行分类,如天平测量中的标准砝码等级:1级、2级、3级、4级、5级。也可以按照具有的法律地位分为三类:企事业单位使用的计量标准,是指企业、事业单位组织建立的作为本单位量值依据的各项计量标准;社会公用计量标准,是指县以上地方政府计量部门建立的作为统一本地区量值的依据,并对社会实施计量监督,具有公证作用的各项计量标准;部门使用的计量标准,是指省级以上政府有关主管部门组织建立的统一本部门量值依据的各项计量标准。计量标准通过标准的逐级传递,达到对日常工作计量器具的检定,以确保其量值的精度。

工作用计量器具不用于检定工作,不用于量值的传递,只用来直接测量被测量量值的计量工具。

1.2.2 计量单位制

在不同地方,采用不同的测量方法对同一量进行测量时,需要保证测量结果应该一致,因而出现了公认的统一单位。任何测量都要有一个统一的体现计量单位的量作为标准,这样的量称为计量标准。计量单位是有明确定义和名称并令其数值为1的固定的量,并必须以严格的科学理论为依据进行定义。单位是表征测量结果的重要组成部分,又是对两个不同类量值进行比较的基础。法定计量单位是国家以法令形式规定使用的计量单位,是统一计量单位制和单位量值的依据和基础,因而具有统一性、权威性和法制性。我国的计量单位一律采用中华人民共和国法定计量单位,并且是以国际单位制为基础的。在国际单位制中,分为基本单位、导出单位和辅助单位。基本单位是指那些可以彼此独立地加以规定的物理

量单位,共有 7 个,其物理量的名称、单位名称及单位符号见表 1.1。由基本单位通过定义、定律及其他函数关系派生出来的单位称为导出单位。例如,在电学量中,除了电流,其他物理量的单位都是导出单位。例如,频率的单位是赫兹(Hz),定义为周期为 1 s 的周期信号的频率,即 $\text{Hz} = 1/\text{s}$;电荷量库仑(C),定义为“1 安培的电流在 1 秒内传送的电荷量”,即 $\text{C} = \text{A} \cdot \text{s}$;电压的单位伏特(V),定义为“在载有 1 安培恒定电流导线的两点间消耗 1 瓦特的功率”,即 $\text{V} = \text{W}/\text{A}$ 。在国际单位制中既可以作为基本单位又可以作为导出单位的单位称为辅助单位,包含两个辅助单位,分别是平面角的单位弧度(rad) 和立体角的单位球面度(sr)。由基本单位、导出单位和辅助单位构成的完整体系,称为单位制。

表 1.1 国际单位制的基本单位

量的名称	单位名称	单位符号
长度	米	m
时间	秒	s
质量	千克	kg
电流	安培	A
热力学温度	开尔文	K
发光强度	坎德拉	cd
物质的量	摩尔	mol

1.3 本课程的任务和学习方法

1.3.1 本课程的任务

本课程主要讨论以下几方面的内容:

1. 基础知识

主要阐述测量的定义与意义,电子测量的内容、特点与方法,电子测量仪器的发展、分类和主要技术指标。计量的概念、基准等定义。

2. 测量误差与数据处理

主要介绍测量的基本理论基础,包括测量误差的概念、分类、合成、分配和表示方法,测量数据的处理等方面。

3. 时域测量

主要介绍时域测量中示波管、波形显示的基本原理,通用示波器及数字示波器的使用方法。

4. 时频测量

该部分内容主要介绍时频关系、时频标准,频率测量的方法,电子计数法测频、测周原理及电子计数器的测量功能,还包括电子计数器的测量误差分析。

5. 信号发生器

信号发生器简称为信号源,是为电子测量提供符合一定技术要求电信号的仪器设备,是最基本的电子测量仪器之一。在该部分内容中主要介绍了信号发生器的分类、性能指标,各