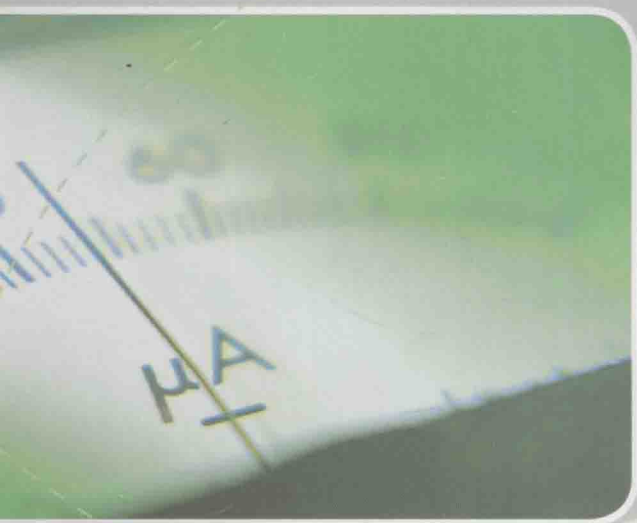


高等职业学校电子信息类、电气控制类专业规划教材

电子测量与仪器

(第2版)

李明生 主编



高等教育出版社
HIGHER EDUCATION PRESS

高等职业学校电子信息类、电气控制类专业规划教材

电子测量与仪器

Dianzi Celiang yu Yiqi

第2版

李明生 主编



高等教育出版社·北京
HIGHER EDUCATION PRESS BEIJING

内容提要

本书是高等职业学校电子信息类、电气控制类专业规划教材《电子测量与仪器》(高等教育出版社,2004年出版)的修订版。

全书共分9章。第1章介绍电子测量和仪器的基本知识;其余章节分别介绍信号源、示波测量技术、电压测量、频率和时间的测量、频域测量及其仪器、电子元器件参数测量及仪器、逻辑分析仪和基于计算机的仪器。

本书采用出版物短信防伪系统,用封底下方的防伪码,按照本书最后一页“郑重声明”下方的使用说明进行操作可查询图书真伪并赢取大奖。本书同时附有防伪码和学习卡,配套学习卡资源,按照本书最后一页“郑重声明”下方的学习卡使用说明,登录 <http://sve.hep.com.cn>,上网学习,下载资源。

本书可作为高等职业学校电子信息类及相关专业教材,亦可作为有关岗位培训教材或工程技术人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

电子测量与仪器 / 李明生主编. —2版. —北京:
高等教育出版社, 2010. 7
ISBN 978-7-04-029790-4

I. ①电… II. ①李… III. ①电子测量—高等学校:
技术学校—教材②电子测量设备—高等学校:技术学校—
教材 IV. ①TM93

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 110038 号

策划编辑 陆 明
版式设计 马敬茹

责任编辑 陆 明
责任校对 胡晓琪

封面设计 于 涛
责任印制 尤 静

出版发行 高等教育出版社
社 址 北京市西城区德外大街 4 号
邮政编码 100120

经 销 蓝色畅想图书发行有限公司
印 刷 北京市南方印刷厂

购书热线 010-58581118
咨询电话 400-810-0598
网 址 <http://www.hep.edu.cn>
<http://www.hep.com.cn>
网上订购 <http://www.landracom.com>
<http://www.landracom.com.cn>
畅想教育 <http://www.widedu.com>

开 本 787×1092 1/16
印 张 17
字 数 410 000

版 次 2004 年 1 月第 1 版
2010 年 7 月第 2 版
印 次 2010 年 7 月第 1 次印刷
定 价 27.40 元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究

物料号 29790-00

第2版前言

《电子测量与仪器》一书出版已六年了。在这六年中,电子测量技术与高等职业教育获得了长足的发展,生源、教学与毕业生的岗位等诸方面也出现了许多新的特点。为了适应新形势的要求,对本教材做了适当修订。除了保持原版本的特点外,新版本做了以下尝试:

1. 教材内容注意与生源的实际情况相衔接,与毕业生的工作岗位的实际要求相衔接。进一步降低教材的理论难度,全书只以组成框图讲清仪器的工作原理。仪器本身的讨论只保证学生能正确操作和使用即可。

2. 教材编写与行业职业技能鉴定标准相结合,兼顾考工要求。将考工要求的基本内容写进教材,使学生学完本课程后能达到考工要求。

3. 加大每章后的习题量,增加适量的考工题目。

4. 将第9章的“微机化仪器”改为“基于计算机的仪器”,增加了相关内容,以适应形势的发展。

5. 教材修订过程中,重点章节注意通过“案例思考”安排教学内容,为学生接受和掌握教学内容提供了明确的思路。

6. 教材中章节前面打*号的内容可适当选讲,第8章(逻辑分析仪)、第9章(基于计算机的仪器)作选讲内容,可以不讲,亦可作为科普材料介绍。

本书由淮安信息职业技术学院李明生主编,裴立云和齐学红参编。其中裴立云修订了第2、3章,齐学红修订了第4、7章,李明生修订了其余章节并对全书进行了统稿。

自本书第一版出版后,得到了许多工作在高等职业教育教学第一线教师们的关心,他们提出了一些宝贵的意见和建议,在此一并表示衷心感谢。

本书配套学习卡,可登录“中等职业教育教学在线(<http://sve.hep.com.cn>)”获取相关教学资源。学习卡兼有防伪功能,可查询图书真伪,详细说明见书末“郑重声明”页。

由于编者学识和水平有限,不当和错误之处在所难免,敬请批评指正,以便进一步完善本教材,读者意见反馈信箱:jhlms@ sina.com。

编者

2010年4月

第1版前言

“电子测量与仪器”是高等职业学校电子信息类专业的主干专业课程之一。课程的总体要求是:电子测量的基本原理和基本测量方法,常用电子测量仪器的基本组成及工作原理,仪器的基本操作及基本应用。通过本课程的学习,学生应熟练掌握常用电子测量仪器的操作技能,具有正确使用仪器完成基本测量任务的能力。考虑到电子测量技术发展的形势及社会对高职学生职业技能的需求,本教材对常用测量仪器的典型产品介绍,力求选择当前国内外较为先进的仪器;同时在教学中安排数字存储示波器、逻辑分析仪等内容,介绍相关新的测量仪器和测量技术。教材内容力求体现先进性、实用性,理论上以必需、够用为度,以应用为目的,结合实际,强化训练,强调对学生创新精神和实践能力的培养。

本教材主要内容包括电子测量的基本原理、基本方法,电子测量仪器的工作原理、使用和基本应用。全书共分9章。第1章介绍电子测量和仪器的基本知识;第2章为信号源,介绍正弦信号源、合成信号发生器、函数发生器、脉冲信号源和任意波形发生器;第3章为示波测量技术,介绍了示波测量的基本原理,重点讨论通用示波器和数字存储示波器的工作原理和基本测量方法;第4章为电压测量,介绍了电压测量的原理、方法和要求,模拟电压表、数字电压表和数字万用表的工作原理;第5章为频率、时间和相位的测量,介绍通用电子计数器的工作原理、基本应用和测量误差及数字相位计等内容;第6章为频域测量及其仪器,介绍了频域测量的内容,频率特性测试仪(扫频仪)、频谱分析仪和失真度测量仪的组成、工作原理和应用;第7章为电子元器件参数测量仪器,介绍了晶体管参数测试的重要仪器——晶体管特性测试仪,介绍采用电桥法、谐振法及数字化方法测量集总参数元件及其所使用的仪器——万用电桥、Q表等;第8章为逻辑分析仪,介绍了逻辑分析仪的组成、工作原理和应用;第9章为微机化仪器,介绍智能仪器、虚拟仪器、自动测试系统和网络化仪器。

本教材的参考学时数为70课时。教学时,建议根据当地实际情况,对仪器的选型进行适当取舍或增补,适度掌握理论教学的深度,注意加强实践环节,探索以学生为中心的教学方法,以提高学生的职业能力和创新能力。

本书由淮安信息职业技术学院李明生担任主编,李伟参编。其中,李伟编写了第2、3、4、9章,李明生编写了第1、5、6、7、8章。全书由李明生统稿。本书由湖南铁道职业技术学院赵承荻老师担任主审。

本书在编写过程中还参考了Tektronix公司、HAMEG GmbH以及扬中光电仪器厂等单位相关产品技术说明书,在此一并表示感谢。

由于编者学识水平有限,不当和错误之处在所难免,请批评指正。

编者

2003年7月

目 录

第 1 章 电子测量和仪器的基本知识	1	4.5 电压表的选择和使用	129
1.1 测量及电子测量的意义	1	本章小结	130
1.2 电子测量的内容和特点	1	习题	131
1.3 电子测量方法的分类	3	第 5 章 频率和时间的测量	133
1.4 测量误差的基本概念	4	5.1 概述	133
1.5 测量结果的表示及有效数字	8	5.2 通用电子计数器的基本组成	135
1.6 电子测量仪器的基本知识	9	5.3 通用电子计数器的测量原理	137
本章小结	14	5.4 电子计数器的测量误差	141
习题	14	5.5 通用电子计数器典型产品介绍	145
第 2 章 信号源	17	5.6 通用电子计数器实训实例	156
2.1 概述	17	* 5.7 数字相位计	157
2.2 正弦信号源	18	本章小结	160
* 2.3 合成信号发生器	30	习题	161
* 2.4 脉冲信号发生器	35	第 6 章 频域测量及其仪器	164
2.5 函数信号发生器	38	6.1 概述	164
* 2.6 任意波形发生器	43	6.2 线性系统频率特性的测量	164
本章小结	46	6.3 频谱分析仪	174
习题	47	6.4 谐波失真度的测量	180
第 3 章 示波测量技术	48	本章小结	189
3.1 概述	48	习题	189
3.2 示波测量的基本原理	50	第 7 章 电子元器件参数测量及仪器	191
3.3 通用示波器	54	7.1 电子器件特性及参数测量仪器	191
3.4 数字存储示波器	70	7.2 集总参数阻抗的测量	211
3.5 示波器的选择和使用	83	本章小结	226
3.6 示波器的基本测量方法	86	习题	227
本章小结	95	* 第 8 章 逻辑分析仪	229
习题	96	8.1 数据域分析的基本知识	229
第 4 章 电压测量	99	8.2 逻辑分析仪	231
4.1 概述	99	本章小结	240
4.2 模拟交流电压表	104	习题	240
4.3 数字电压表	113		
4.4 数字多用表	123		

* 第 9 章 基于计算机的仪器	241	9.5 网络化仪器	259
9.1 概述	241	本章小结	263
9.2 智能仪器	242	习题	264
9.3 虚拟仪器	245		
9.4 自动测试系统	250	参考文献	265

第1章 电子测量和仪器的基本知识

学习目标

1. 了解电子测量的意义、内容和特点。
2. 了解电子测量的基本方法。
3. 了解测量误差的来源与分类。
4. 掌握测量误差的表示方法。
5. 理解有效数字的概念,会对测量结果进行简单的数据处理。
6. 了解电子测量仪器的分类及仪器误差的表示方法。初步掌握电子测量仪器正确使用的方法。

1.1 测量及电子测量的意义

测量是人类对客观事物取得数量概念的认识过程。在这种认识过程中,人们依据一定的理论,借助于专门的设备,通过实验的方法求出被测量的量值或确定一些量值的依从关系。

通常,测量结果的量值由两部分组成:数值(大小及符号)和相应的单位名称。没有单位的量值是没有物理意义的。

一般来说,测量是一种比较过程,把被测量与同种类的单位量通过一定的测量方法进行比较,以确定被测量是该单位的若干倍。被测量的数值与所选单位成反比。

随着测量学的发展和无线电电子学的应用,诞生了以电子技术为手段的测量,即电子测量。

电子测量涉及极宽频率范围内所有电量、磁量以及各种非电量的测量。目前,电子测量不仅因为其应用广泛而成为现代科学技术中不可缺少的测量手段,同时也是一门发展迅速、对现代科学技术的发展起着重大推动作用的独立学科。从某种意义上说,近代科学技术的水平是由电子测量的水平来保证和体现的;电子测量的水平,是衡量一个国家科学技术水平的重要标志之一。

1.2 电子测量的内容和特点

1.2.1 电子测量的内容

本课程中,电子测量的内容是指对电子学领域内电参量的测量,主要有:

- ① 电能量的测量,如电流、电压、功率等的测量。
- ② 电路、元器件参数的测量,如电阻、电感、电容、阻抗的品质因数、电子器件参数等的测量。
- ③ 电信号特性的测量,如频率、波形、周期、时间、相位、谐波失真度、调幅度及逻辑状态等的测量。
- ④ 电路性能的测量,如放大倍数、衰减量、灵敏度、通频带、噪声指数等的测量。
- ⑤ 特性曲线的显示,如幅频特性、器件特性等的显示。

上述各种待测参数中,频率、电压、时间、阻抗等是基本电参数,对它们的测量是其他许多派生参数测量的基础。

另外,通过传感器可将很多非电量,如温度、压力、流量、位移等转换成电信号后进行测量,但这不属于本书讨论的范围。

1.2.2 电子测量的特点

同其他测量相比,电子测量具有以下几个突出优点。

1. 测量频率范围宽

电子测量除测量直流电量外,还可以测量交流电量,其频率范围可低至 10^{-4} Hz,高至 10^{12} Hz左右。但应注意,在不同的频率范围内,即使测量同一种电量,所需要采用的测量方法和使用的测量仪器也往往不同。

2. 仪器量程宽

量程是仪器所能测量各种参数的范围。电子测量仪器具有相当宽广的量程。例如,一台数字电压表可以测出从纳伏(nV)级至千伏(kV)级的电压,其量程达9个数量级;一台用于测量频率的电子计数器,其量程可达17个数量级。

3. 测量准确度高

电子测量的准确度比其他测量方法高得多,特别是对频率和时间的测量,误差可减小到 10^{-13} 量级,是目前人类在测量准确度方面达到的最高指标。电子测量的准确度高是它在现代科学技术领域得到广泛应用的重要原因之一。

4. 测量速度快

由于电子测量是通过电磁波的传播和电子运动来进行的,因此可以实现测量过程的高速度,这是其他测量所不能比拟的。只有测量的高速度,才能测出快速变化的物理量。这对于现代科学技术的发展具有特别重要的意义。例如,原子核的裂变过程、导弹的发射速度、人造卫星的运行参数等的测量,都需要高速度的电子测量。

5. 易于实现遥测

电子测量的一个突出优点是可以通过各种类型的传感器实现遥测。例如,对于遥远距离或环境恶劣的、人体不便于接触或无法达到的区域(如深海、地下、核反应堆内、人造卫星等),可通过传感器或通过电磁波、光、辐射等方式进行测量。

6. 易于实现测量自动化和测量仪器微机化

由于大规模集成电路和微型计算机的应用,使电子测量出现了崭新的局面,例如在测量中能实现程控、自动量程转换、自动校准、自动诊断故障和自动修复,对于测量结果可以自动记录、自动进行数据运算、分析和处理。目前已出现了许多类型带微处理器的自动化示波器、数字频率计、数字

式电压表以及受计算机控制的自动化集成电路测试仪、自动网络分析仪和其他自动测试系统。

电子测量的一系列优点,使它获得极其广泛的应用。今天,几乎找不到哪一个科学技术领域没有应用电子测量技术。大到天文观测、宇宙航天,小到物质结构、基本粒子,从复杂的生命、遗传问题到日常的工农业生产、商业运作都越来越多地采用电子测量技术与设备。

1.3 电子测量方法的分类

在 IT 领域中,有很多电参量需要测量。一个电参量的测量可以通过不同的方法来实现。电子测量方法的分类形式有多种,这里仅就最常用的分类形式作简要介绍。

1.3.1 按测量方式分类

1. 直接测量

用预先按已知标准量定度好的测量仪器对某一未知量直接进行测量,从而得到被测量值的测量方法称为直接测量。例如,用通用电子计数器测频率,用电压表测量电路中的电压,都属于直接测量。

2. 间接测量

对一个与被测量有确定函数关系的物理量进行直接测量,然后通过代表该函数关系的公式、曲线或表格,求出被测量值的方法,称为间接测量。例如,要测量已知电阻 R 上消耗的功率,先测量加在 R 两端的电压 U ,然后再根据公式 $P = \frac{U^2}{R}$ 求出功率 P 之值。

3. 组合测量

在某些测量中,被测量与几个未知量有关,测量一次无法得出完整的结果,则可改变测量条件进行多次测量,然后按被测量与未知量之间的函数关系组成联立方程,求解,得出有关未知量。此种测量方法称为组合测量,它是一种兼用直接测量与间接测量的方法。

上面介绍的三种方法中,直接测量的优点是测量过程简单、迅速,在工程技术中采用比较广泛。间接测量多用于科学实验,在生产及工程技术中应用较少,只有当被测量不便于直接测量时才采用。组合测量是一种特殊的精密测量方法,适用于科学实验及一些特殊的场合。本书中讨论的测量内容基本上都属于直接测量。

1.3.2 按被测信号的性质分类

1. 时域测量

时域测量是测量被测对象在不同时间的特性,这时把被测信号看成时间的函数。例如,使用示波器显示被测信号的瞬时波形,测量它的幅度、宽度、上升和下降沿等参数。时域测量还包括一些周期性信号的稳态参量测量,如正弦交流电压,虽然它的瞬时值会随时间变化,但是交流电压的振幅值和有效值是稳态值,可用指针式仪表测量。

2. 频域测量

频域测量是测量被测对象在不同频率时的特性。这时把被测对象看成频率的函数。信号通

过非线性电路会产生新的频率分量,能用频谱分析仪进行分析。放大器的幅频特性,可用频率特性图示仪予以显示。放大器对不同频率的信号会产生不同的相移,可使用相位计测量放大器的相频特性。

3. 数据域测量

数据域测量是对数字系统逻辑特性进行的测量。利用逻辑分析仪能够分析离散信号组成的数据流,可以观察多个输入通道的并行数据,也可以观察一个通道的串行数据。

4. 随机测量

随机测量是利用噪声信号源进行动态测量,例如各类噪声、干扰信号等。这是一种比较新的测量技术。

电子测量技术还有许多分类方法,如动态与静态测量技术、模拟和数字测量技术、实时与非实时测量技术、有源与无源测量技术等。本书讨论的内容大部分属于时域测量,频域测量的内容仅有一小部分,不涉及随机测量。

1.4 测量误差的基本概念

测量的目的就是希望获得被测量的实际大小,即真值。所谓真值,就是在一定时间和环境的条件下,被测量本身所具有的真实数值。实际上,由于测量设备、测量方法、测量环境和测量人员的素质等条件的限制,测量所得到的结果与被测量的真值之间会有差异,这个差异就称为测量误差。测量误差过大,可能会使得测量结果变得毫无意义,甚至会带来坏处。人们研究误差的目的,就是要了解产生误差的原因和发生的规律,寻求减小测量误差的方法,使测量结果精确可靠。

1.4.1 测量误差的表示方法

测量误差有两种表示方法:绝对误差和相对误差。

1. 绝对误差

(1) 定义

由测量所得到的被测量值 x 与其真值 A_0 之差,称为绝对误差,即

$$\Delta x = x - A_0 \quad (1.1)$$

式中, Δx 为绝对误差。

由于测量结果 x 总含有误差, x 可能比 A_0 大,亦可能比 A_0 小,因此 Δx 既有大小,又有正、负。其量纲和测量值相同。

要注意,这里说的被测量值是指仪器的示值。一般情况下,示值和仪器的读数有区别。读数是指从仪器刻盘度、显示器等读数装置上直接读到的数字,示值是指该读数表示的被测量的量值,常常需要加以换算。

式中, A_0 表示真值。真值是一个理想的概念,一般来说,是无法精确得到的。因此,实际应用中通常用实际值 A 来代替真值 A_0 。

实际值又称为约定真值,它是根据测量误差的要求,用高一级或数级的标准仪器或计量器具测量所得之值,这时绝对误差可按下式计算

$$\Delta x = x - A \quad (1.2)$$

(2) 修正值

与绝对误差的绝对值大小相等,但符号相反的量值,称为修正值,用 c 表示。

$$c = -\Delta x = A - x \quad (1.3)$$

对测量仪器进行定期检定时,用标准仪器与受检仪器相比对,以表格、曲线或公式的形式给出受检仪器的修正值。在日常测量中,使用该受检仪器测量所得到的结果应加上修正值,以求得被测量的实际值,即

$$A = x + c \quad (1.4)$$

2. 相对误差

绝对误差虽然可以说明测量结果偏离实际值的情况,但不能确切反映测量的准确程度,不便于看出对整个测量结果的影响。例如,对分别为 10 Hz 和 1 MHz 的两个频率进行测量,绝对误差都为 +1 Hz,但两次测量结果的准确程度显然不同。因此,除绝对误差外,还有相对误差。

绝对误差与被测量的真值之比,称为相对误差(或称相对真误差),用 γ 表示

$$\gamma = \frac{\Delta x}{A_0} \times 100\% \quad (1.5)$$

相对误差量纲为一,有大小及符号。由于真值是难以确切得到的,通常用实际值 A 代替真值 A_0 来表示相对误差,用 γ_A 来表示

$$\gamma_A = \frac{\Delta x}{A} \times 100\% \quad (1.6)$$

式中, γ_A 称为实际相对误差。

在误差较小、要求不严格的场合,也可用测量值 x 代替实际值 A ,由此得出示值相对误差,用 γ_x 来表示

$$\gamma_x = \frac{\Delta x}{x} \times 100\% \quad (1.7)$$

式中, Δx 由所用仪器的准确度等级定出。由于 x 中含有误差,所以 γ_x 只适用于近似测量。当 Δx 很小时, $x \approx A$, 有 $\gamma_x \approx \gamma_A$ 。

经常用绝对误差与仪器满刻度值 x_m 之比来表示相对误差,称为引用相对误差(或称满度相对误差),用 γ_m 表示

$$\gamma_m = \frac{\Delta x}{x_m} \times 100\% \quad (1.8)$$

测量仪器使用最大引用相对误差来表示它的准确度,这时有

$$\gamma_{mm} = \frac{\Delta x_m}{x_m} \times 100\% \quad (1.9)$$

式中, Δx_m 为仪器在该量程范围内出现的最大绝对误差; x_m 为满刻度值; γ_{mm} 为仪器在工作条件下不应超过的最大相对误差,它反映了该仪表综合误差的大小。

电工测量仪表按 γ_{mm} 值分为 0.1、0.2、0.5、1.0、1.5、2.5、5.0 7 个等级。1.0 级表示该仪表的最大引用相对误差不会超过 $\pm 1.0\%$,但超过 $\pm 0.5\%$,也称准确度等级为 1.0 级。准确度等级常用符号 S 表示。

相对误差亦可用对数的形式进行表达。以分贝来度量误差大小的表达方式称为分贝误差。

如果被测量是网络的电流或电压传输函数 A ,把它表示为分贝的形式,则为

$$A_{\text{dB}} = 20\lg A(\text{dB}) \quad (1.10)$$

设 A 的测量值为 x , 它含有误差, 即 $x = A + \Delta x$, 它的分贝形式 x_{dB} 会偏离 A_{dB} 一个数值 γ_{dB} , 即

$$\begin{aligned} x_{\text{dB}} - A_{\text{dB}} &= \gamma_{\text{dB}} \\ x_{\text{dB}} &= 20\lg(A + \Delta x) = 20\lg A \left(1 + \frac{\Delta x}{A}\right) \\ &= 20\lg A + 20\lg(1 + \gamma_A) \end{aligned}$$

所以

$$\gamma_{\text{dB}} = 20\lg(1 + \gamma_A) \approx 20\lg(1 + \gamma_x) \quad (1.11)$$

式中, γ_{dB} 是只与相对误差有关的量, 由于 γ_A 有正、负号, γ_{dB} 也有正、负号。

当 A 为功率传输函数时, 相对误差的分贝形式为

$$\gamma_{\text{dB}} = 10\lg(1 + \gamma_A) \approx 10\lg(1 + \gamma_x) \text{ dB} \quad (1.12)$$

例 1.1 两个电压的实际值分别为 $U_{1A} = 100 \text{ V}$, $U_{2A} = 10 \text{ V}$; 测量值分别为 $U_{1x} = 98 \text{ V}$, $U_{2x} = 9 \text{ V}$ 。求两次测量的绝对误差和相对误差。

解:

$$\begin{aligned} \Delta U_1 &= U_{1x} - U_{1A} = (98 - 100) \text{ V} = -2 \text{ V} \\ \Delta U_2 &= U_{2x} - U_{2A} = (9 - 10) \text{ V} = -1 \text{ V} \end{aligned}$$

$|\Delta U_1| > |\Delta U_2|$ 。两者的相对误差分别为

$$\begin{aligned} \gamma_{A1} &= \frac{\Delta U_1}{U_{1A}} = -\frac{2}{100} \times 100\% = -2\% \\ \gamma_{A2} &= \frac{\Delta U_2}{U_{2A}} = -\frac{1}{10} \times 100\% = -10\% \end{aligned}$$

$|\gamma_{A1}| < |\gamma_{A2}|$ 。说明 U_2 的测量准确度低于 U_1 。

例 1.2 已知某被测电压为 80 V , 用 1.0 级、 100 V 量程的电压表测量。若只做一次测量就把该测量值作为测量结果, 可能产生的最大绝对误差是多少?

解: 在实际生产过程中, 经常将一次直接测量的结果作为最终结果, 所以讨论这个问题很具有实践意义。仪表的准确度等级表示该仪表的最大引用相对误差, 该仪表可能出现的最大绝对误差为

$$\Delta x_m = \pm 1.0\% \times 100 \text{ V} = \pm 1 \text{ V}$$

由式(1.9)可知, 测量的绝对误差满足

$$\begin{aligned} \Delta x &\leq x_m \cdot S\% \\ \gamma_x &\leq (x_m \cdot S\%) / x \end{aligned}$$

式中, S 为仪表的准确度等级。

测量中总要满足 $x \leq x_m$, 可见当仪表的准确度等级确定后, x 越接近 x_m , 测量的示值相对误差越小, 测量准确度越高。因此, 在测量中选择仪表量程时, 应使指针尽量接近满偏, 一般最好指示在满度值 $2/3$ 以上的区域。应该注意, 这个结论只适用于正向线性刻度的电压表、电流表等类型的仪表。而对于反向刻度的仪表即随着被测量数值增大而指针偏转角度变小的仪表, 如万用电表的电阻挡, 由于在设计或检定仪表时均以中值电阻为基准, 故在使用这类仪表进行测量时应尽可能使表针指在中心位置附近区域, 因为此时测量准确度最高。

例 1.3 被测电压的实际值在 10 V 左右, 现有量程和准确度等级分别为 150 V、0.5 级和 15 V、1.5 级两只电压表, 问用哪只电压表测量比较合适?

解: 若用 150 V、0.5 级电压表, 由式(1.9)可求得测量的最大绝对误差为

$$\Delta x_{m1} = \pm 0.5\% \times 150 \text{ V} = \pm 0.75 \text{ V}$$

示值范围为 $(10 \pm 0.75) \text{ V}$, 则测量的相对误差为

$$\gamma_{A1} = \pm \frac{0.75}{10} \times 100\% = \pm 7.5\%$$

用 15 V、1.5 级电压表测量, 则最大绝对误差为

$$\Delta x_{m2} = \pm 1.5\% \times 15 \text{ V} = \pm 0.225 \text{ V}$$

示值范围为 $(10 \pm 0.225) \text{ V}$, 则测量的相对误差为

$$\gamma_{A2} = \pm \frac{0.225}{10} \times 100\% = \pm 2.25\%$$

显然, 应选用 15 V、1.5 级电压表测量。由此例可见, 测量中应根据被测量的大小, 合理选择仪表量程并兼顾准确度等级, 而不能片面追求仪表的准确度级别。

1.4.2 测量误差的来源

如前所述, 在一切实际测量中都存在一定的测量误差。现在来讨论测量误差的来源。

1. 仪器误差

由于仪器本身及其附件的电气和机械性能不完善而引入的误差称为仪器误差。仪器仪表的零点漂移、刻度不准确和非线性等引起的误差以及数字式仪表的量化误差都属于此类。

2. 理论误差和方法误差

由于测量所依据的理论不够严密或用近似公式、近似值计算测量结果所引起的误差称为理论误差。例如, 峰值检波器的输出电压总是小于被测电压峰值所引起的峰值电压表的误差就属于理论误差。

由于测量方法不适宜而造成的误差称为方法误差。如用低内阻的万用表测量高内阻电路的电压时所引起的误差就属于此类。

3. 影响误差

由于温度、湿度、振动、电源电压、电磁场等各种环境因素与仪器、仪表要求的条件不一致而引起的误差。

4. 人为误差

由于测量人员的分辨力、视觉疲劳、不良习惯或缺乏责任心等因素引起的误差称为人为误差, 如读错数字、操作不当等。

1.4.3 测量误差的分类

根据性质, 可将测量误差分为系统误差、随机误差和疏失误差。

1. 系统误差

在一定条件下, 误差的数值(大小及符号)保持恒定或按照一定规律变化的误差称为系统误差。

系统误差决定了测量的准确度。系统误差越小,测量结果越准确。

2. 随机误差

在相同条件下进行多次测量,每次测量结果出现无规律的随机变化的误差,这种误差称为随机误差或偶然误差。在足够的多次的测量中,随机误差服从一定的统计规律,具有单峰性、有界性、对称性、相消性等特点。

随机误差反映了测量结果的精密度。随机误差越小,测量精密度越高。

随机误差和系统误差共同决定测量结果的精确度,要使测量的精确度高,两者的值都要求很小。

3. 疏失误差

疏失误差是指在一定条件下,测量值明显偏离实际值时所对应的误差。疏失误差又称粗大误差,或简称粗差。

疏失误差是由于读数错误、记录错误、操作不正确、测量中的失误及有不能允许的干扰等原因造成的误差。

疏失误差明显地歪曲了测量结果,就其数值而言,它远远大于系统误差和随机误差。

对于上述三类误差,应采取适当措施进行防范和处理,减小以至消除它们对测量结果的影响。对于含有疏失误差的测量值,一经确认,应首先予以剔除。对于系统误差,在测量前应细心做好准备工作,检查所有可能产生系统误差的来源,并设法消除;或决定它的大小,在测量中采用适当的方法引入修正值加以抵消或削弱。例如,为了消除或削弱固定的系统误差,可采用零示法、替代法、补偿法、交换法等测量方法。对于随机误差,可在相同条件下进行多次测量,对测量结果求平均值来减小它的影响。

1.5 测量结果的表示及有效数字

1.5.1 测量结果的表示

这里只讨论测量结果的数字式表示,它包括一定的数值(绝对值的大小及符号)和相应的计量单位。例如 7.1 V、465 kHz 等。

有时为了说明测量结果的可信度,在表示测量结果时,还要同时注明其测量误差值或范围。例如, (4.32 ± 0.01) V, (465 ± 1) kHz 等。

1.5.2 有效数字及有效数字位

测量结果通常表示为一定的数值,但测量过程总存在误差,多次测量的平均值也存在误差。如何用近似数据恰当地表示测量结果,就涉及有效数字的问题。

有效数字是指从最左面一位非零数字算起,到含有误差的那位存疑数字为止的所有数字。在测量过程中,正确地写出测量结果的有效数字,合理地确定测量结果位数是非常重要的。对有效数字位数的确定应掌握以下几方面的内容:

① 有效数字位与测量误差的关系,原则上可以从有效数字的位数估计出测量误差,一般规定误差不超过有效数字末位单位的一半。例如 1.00 A,则测量误差不超过 ± 0.005 A。

② “0”在最左面为非有效数字。例如 $0.03\text{ k}\Omega$, 两个零均为非有效数字。“0”在最右面或两非零数字之间均为有效数字, 不得在数据的右面随意加“0”。如将 1.00 A 改为 1.000 A , 则表示已将误差极限由 0.005 A 改成 0.0005 A 。

③ 有效数字不能因选用的单位变化而改变。如测量结果为 2.0 A , 它的有效数字为 2 位。如改用 mA 做单位, 将 2.0 A 改写成 2000 mA , 则有效数字变成 4 位, 是错误的, 应改写成 $2.0 \times 10^3\text{ mA}$, 此时它的有效数字仍为 2 位。

1.5.3 数字的舍入规则

测量数据中超过保留位数的数字, 应予删略。删略的原则是“四舍五入”, 其具体内容如下: 若需保留 n 位有效数字, n 位以后位余下的数, 若大于保留数字末位 (即第 n 位) 单位的一半, 则舍去的同时在第 n 位加 1; 若小于该位单位的一半, 则第 n 位不变; 若刚好等于该单位的一半, 如第 n 位原为奇数则加 1 变为偶数, 原为偶数不变, 此即“求偶数法则”。

例 1.4 将下列数字保留 3 位: (1) 25.53 ; (2) 33.46 ; (3) 53.45 ; (4) 68.4501 ; (5) 43.35 。

解: (1) $25.53 \rightarrow 25.5$; (2) $33.46 \rightarrow 33.5$; (3) $53.45 \rightarrow 53.4$;

(4) $68.4501 \rightarrow 68.5$; (5) $43.35 \rightarrow 43.4$ 。

由上述可见, 经过数字舍入后, 末位是欠准数字, 末位以前的数字为准确数字。末位欠准的程度不超过该位单位的一半。

决定有效数字位数的标准是误差范围, 并不是位数写得越多越好。写多了会夸大测量的准确度。

在写带有绝对误差的数字时, 有效数字的末位应和绝对误差取齐即两者的欠准数字所在的数字位必须相同。如 $(6500 \pm 1)\text{ kHz}$ 是正确的, 亦可写成 $6.500\text{ MHz} \pm 1\text{ kHz}$, 但不能写成 $6.5\text{ MHz} \pm 1\text{ kHz}$ 。当前面有效数字的单位和误差所用单位相同时, 前面有效数字可以不再标出单位名称。

* 1.5.4 数字近似运算法则

在数据处理过程中, 常常要对数据进行近似运算。运算时要遵循一定的规则:

① 在加、减法运算中, 准确度最差的项就是小数点后有效数字位数最少的那一项, 计算结果有效数字的取舍以该项为准。

② 在乘、除法运算中, 所得结果的有效数字位数与参加运算各项中有效数字位数最少者相同, 而与小数点无关。

在对参加运算的数据取舍时, 可多留一位, 否则会引起积累误差。

例 1.5 进行下列运算: (1) $13.44 + 20.382 + 4.6$; (2) $\frac{603.21 \times 0.32}{4.011}$ 。

解: (1) $13.44 + 20.382 + 4.6 = 13.44 + 20.38 + 4.6 = 38.42 \approx 38.4$

(2) $\frac{603.21 \times 0.32}{4.011} \approx \frac{603 \times 0.32}{4.01} \approx 48.1 \approx 48$

1.6 电子测量仪器的基本知识

电子测量仪器是利用电子元件和线路技术组成的装置, 用以测量各种电磁参量或产生供

测量用的电信号或能源。

1.6.1 电子测量仪器的分类

电子测量仪器一般分为专用仪器和通用仪器两大类,本课程主要讨论后者。通用仪器是为了测量某一个或某一些基本电参量而设计的,它能用于各种电子测量。通用仪器按照功能,可作如下分类。

1. 信号发生器

信号发生器主要用来提供各种测量所需的信号。根据用途的不同,有各种波形、各种频率和各种功率的信号发生器。如调频调幅信号发生器、脉冲信号发生器、扫频信号发生器、函数发生器等。

2. 电平测量仪器

电平测量仪器主要用于测量电信号的电压、电流、电平。如电流表、电压表、电平表、多用表等。

3. 信号分析仪器

信号分析仪器主要用来观测、分析和记录各种电量的变化。如各种示波器、波形分析仪和频谱分析仪等。

4. 频率、时间和相位测量仪器

频率、时间和相位测量仪器主要用来测量电信号的频率、时间间隔和相位差。这类仪器有各种频率计、相位计、波长表以及各种时间、频率标准等。

5. 网络特性测量仪

网络特性测量仪有阻抗测试仪、频率特性测试仪及网络分析仪等,主要用来测量电气网络的各种特性。这些特性主要指频率特性、阻抗特性、功率特性等。

6. 电子元器件测试仪

元器件测试仪主要用来测量电子元器件的各种电参数是否符合要求。根据测试对象的不同,可分为晶体管测试仪、集成电路(模拟、数字)测试仪和电路元件(如电阻、电感、电容)测试仪等。

7. 电波特性测试仪

电波特性测试仪主要用于对电波传播、干扰强度等参量进行测量的仪器。如测试接收机、场强计、干扰测试仪等。

8. 逻辑分析仪

逻辑分析仪是专门用于分析数字系统的数据域测量仪器。利用它对数字逻辑电路和系统在实时运行过程中的数据流或事件进行记录和显示,并通过各种控制功能实现对数字系统的软、硬件故障分析和诊断。面向微处理器的逻辑分析仪,则用于对微处理器及微型计算机的调试和维护。

9. 辅助仪器

辅助仪器主要用于配合上述各种仪器对信号进行放大、检波、隔离、衰减,以便使这些仪器更充分地发挥作用。各种交直流放大器、选频放大器、检波器、衰减器、记录器及交直流稳压电源等均属于辅助仪器。