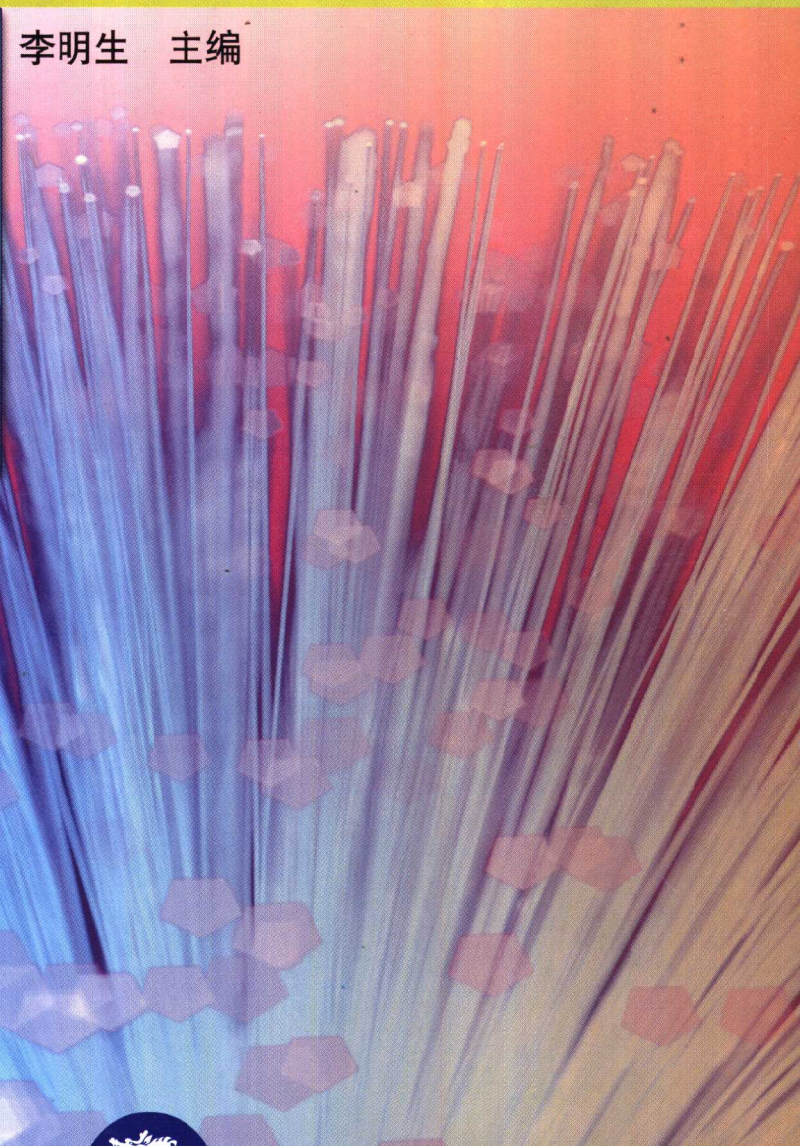


高等职业学校电子信息类、电气控制类专业系列教材

# 电子测量与仪器

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、电气控制类专业系列教材

# 电子测量与仪器

李明生 主编

高等教育出版社

## 内容提要

本书是高等职业学校电子信息类、电气控制类专业系列教材之一。

本书为适应目前高等职业学校教学改革的需要,注意扩宽知识面,适当降低理论知识的难度,突出实用性,加强实践教学环节,介绍新型测量仪器,引进新的测量技术,注重培养学生的综合职业能力。全书共分9章。主要内容有:电子测量和仪器的基本知识,信号源,示波测量技术,电压测量,频率、时间和相位的测量,频域测量及其仪器,电子元器件参数测量及仪器,逻辑分析仪和微机化仪器。

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. —北京:高等教育出版社,2004.1

ISBN 7-04-013658-9

I.电... II.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. TM93

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 097443 号

---

出版发行	高等教育出版社	购书热线	010-64054588
社 址	北京市西城区德外大街4号	免费咨询	800-810-0598
邮政编码	100011	网 址	<a href="http://www.hep.edu.cn">http://www.hep.edu.cn</a>
总 机	010-82028899		<a href="http://www.hep.com.cn">http://www.hep.com.cn</a>
经 销	新华书店北京发行所		
印 刷	北京未来科学技术研究所 有限责任公司印刷厂		
开 本	787×1092 1/16	版 次	2004年1月第1版
印 张	15.5	印 次	2004年1月第1次印刷
字 数	370 000	定 价	19.70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**



# 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

策划编辑 韦晓阳  
责任编辑 王莉莉  
封面设计 于 涛  
责任绘图 尹文军  
版式设计 王艳红  
责任校对 康晓燕  
责任印制 杨 明

## 郑重声明

高等教育出版社依法对本书享有专有出版权。任何未经许可的复制、销售行为均违反《中华人民共和国著作权法》，其行为人将承担相应的民事责任和行政责任，构成犯罪的，将被依法追究刑事责任。为了维护市场秩序，保护读者的合法权益，避免读者误用盗版书造成不良后果，我社将配合行政执法部门和司法机关对违法犯罪的单位和个人给予严厉打击。社会各界人士如发现上述侵权行为，希望及时举报，本社将奖励举报有功人员。

**反盗版举报电话：**(010) 58581897/58581698/58581879/58581877

**传 真：**(010) 82086060

**E - mail：**dd@hep.com.cn 或 chenrong@hep.com.cn

**通信地址：**北京市西城区德外大街4号

高等教育出版社法律事务部

**邮 编：**100011

**购书请拨打电话：**(010)64014089 64054601 64054588

# 目 录

<b>第1章 电子测量和仪器的基本知识</b> .....	1	4.4 数字多用表 .....	114
1.1 测量及其意义 .....	1	4.5 电压表的选择和使用 .....	118
1.2 电子测量的意义和特点 .....	1	本章小结 .....	120
1.3 电子测量方法的分类 .....	3	习题 .....	120
1.4 测量误差的基本概念 .....	4	<b>第5章 频率、时间和相位的测量</b> .....	122
1.5 测量结果的表示及有效数字 .....	8	5.1 概述 .....	122
1.6 电子测量仪器的基本知识 .....	10	5.2 通用电子计数器的基本组成 .....	125
本章小结 .....	12	5.3 通用电子计数器的测量原理 .....	127
习题 .....	12	5.4 电子计数器的测量误差 .....	132
<b>第2章 信号源</b> .....	14	5.5 通用电子计数器典型产品介绍 .....	136
2.1 概述 .....	14	5.6 数字相位计 .....	141
2.2 正弦信号源 .....	15	本章小结 .....	145
2.3 合成信号发生器 .....	22	习题 .....	145
2.4 函数信号发生器 .....	27	<b>第6章 频域测量及其仪器</b> .....	147
2.5 脉冲信号发生器 .....	31	6.1 概述 .....	147
2.6 任意波形发生器 .....	34	6.2 线性系统频率特性的测量 .....	147
本章小结 .....	37	6.3 频谱分析仪 .....	161
习题 .....	37	6.4 谐波失真度的测量 .....	167
<b>第3章 示波测量技术</b> .....	39	本章小结 .....	172
3.1 概述 .....	39	习题 .....	173
3.2 示波测量的基本原理 .....	39	<b>第7章 电子元器件参数测量及仪器</b> .....	174
3.3 通用示波器 .....	44	7.1 电子器件特性及参数测量仪器 .....	174
3.4 取样示波器 .....	61	7.2 集总参数阻抗的测量 .....	186
3.5 数字存储示波器 .....	66	本章小结 .....	200
3.6 示波器的选择和使用 .....	77	习题 .....	200
3.7 示波器的基本测量方法 .....	80	<b>第8章 逻辑分析仪</b> .....	202
本章小结 .....	89	8.1 数据域分析的基本知识 .....	202
习题 .....	90	8.2 逻辑分析仪 .....	204
<b>第4章 电压测量</b> .....	93	本章小结 .....	214
4.1 概述 .....	93	习题 .....	214
4.2 模拟交流电压表 .....	98		
4.3 数字电压表 .....	106		

<b>第9章 微机化仪器</b> .....	215	9.4 自动测试系统 .....	225
9.1 概述 .....	215	9.5 网络化仪器 .....	235
9.2 智能仪器 .....	216	本章小结 .....	239
9.3 虚拟仪器 .....	220	习题 .....	239
<b>参考文献</b> .....			240



# 第1章 电子测量和仪器的基本知识

## 学习目标

1. 了解电子测量的内容、特点和基本方法。
2. 了解测量误差的来源与分类。
3. 掌握测量误差的表示方法。
4. 了解电子测量仪器的分类及仪器误差的表示方法。
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。

## 1.1 测量及其意义

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。

一般地说,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。

在科学技术发展过程中,测量结果不仅用于验证理论,而且是发现新问题、提出新理论的依据。历史事实证明:科学的进步、生产的发展与测量理论技术手段的发展和进步是相互依赖、相互促进的。测量手段的现代化,已被公认是科学技术和生产现代化的重要条件和明显标志。

## 1.2 电子测量的意义和特点

### 1.2.1 电子测量的意义

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。

### 1.2.2 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。

### 1.2.3 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、商业部门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

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。

### 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。

## 1.3.3 选择测量方法的原则

根据被测量本身的特性、所需要的精确程度、环境条件及所具有的测量设备等因素,综合考虑,选择合适的测量方法。只有选择正确的测量方法,才能使测量得到精确的测量结果;否则,可能会出现下列问题:

- ① 得出错误的测量数据,测量结果不能信赖。
- ② 损坏测量仪器、仪表或被测设备、元器件。

在选择测量方法时,如果必要,还要制订正确的测量方案。

错误的测量方法会导致某些不良后果,这可以通过下例来说明:

测量某高内阻(如 500 k $\Omega$ )电路的电压,应该使用高输入电阻的数字电压表,才能使测量结果较为准确。如使用普通的模拟式电压表,则会产生很大的误差,得到歪曲实际的测量结果。

由此可看出,选择正确的测量方法、仪器设备及编制测试程序是十分重要的。

## 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, $\Delta x$  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  $\Delta x$  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。读数是指从仪器刻度盘、显示器等读数装置上直接读到的数字, 示值是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查时, 用标准仪器与受检仪器相对比, 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, 不利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  $\gamma$  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  $\gamma_A$  来表示

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

式中,  $\gamma_A$  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  $\gamma_x$  来表示

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

式中,  $\Delta x$  由所用仪器的准确度等级定出。由于  $x$  中含有误差, 所以  $\gamma_x$  只适用于近似测量。当  $\Delta x$  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  $\gamma_m$  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

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

式中,  $\Delta x_m$  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;  $\gamma_{\text{mm}}$  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  $\gamma_{\text{mm}}$  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  $x_{\text{dB}}$  会偏离  $A_{\text{dB}}$  一个数值  $\gamma_{\text{dB}}$ , 即

$$x_{\text{dB}} - A_{\text{dB}} = \gamma_{\text{dB}}$$

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

所以

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

式中,  $\gamma_{\text{dB}}$  是只与相对误差有关的量, 由于  $\gamma_A$  有正、负号,  $\gamma_{\text{dB}}$  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

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

**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



$$\Delta x \leq x_m \cdot S\%$$

$$\gamma_x \leq (x_m \cdot S\%) / x$$

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, 如万用表的欧姆挡, 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  $10\text{ V}$  左右, 现有量程和准确度等级分别为  $150\text{ V}$ 、 $0.5$  级和  $15\text{ V}$ 、 $1.5$  级两只电压表, 问用哪只电压表测量比较合适?

**解:** 若用  $150\text{ V}$ 、 $0.5$  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

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

用  $15\text{ V}$ 、 $1.5$  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

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

显然, 应选用  $15\text{ V}$ 、 $1.5$  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误差。现在来讨论误差的来源。

##### 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. 人身误差

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身误差,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,  $(4.32 \pm 0.01) \text{V}$ ,  $(465 \pm 1) \text{kHz}$  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  $1.00\text{ A}$ ,则测量误差不超过  $\pm 0.005\text{ A}$ 。

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  $1.00\text{ A}$  改为  $1.000\text{ A}$ ,则表示已将误差极限由  $0.005\text{ A}$  改成  $0.0005\text{ A}$ 。

③ 有效数字不能因选用的单位变化而改变。如测量结果为  $2.0\text{ A}$ ,它的有效数字为二位。如改用  $\text{mA}$  做单位,将  $2.0\text{ A}$  改写成  $2000\text{ mA}$ ,则有效数字变成四位,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二位。

### 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 将下列数字保留三位:(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看齐即两者的欠准数字所在的数字位必须相同。如  $(6\,500 \pm 1)\text{ kHz}$  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