

21 世纪 高 职 高 专 规 划 教 材

电 子 信 息 基 础 系 列



电路实验

曹才开 陆秀令 龙卓珉 等编著

清华大学出版社



21 世纪 高 职 高 专 规 划 教 材

电 子 信 息 基 础 系 列

电路实验

曹才开 陆秀令 龙卓珉 等编著



清华大学出版社
北京

前言

电路实验

电路实验是实践教学中进行基本技能训练的重要环节,电工测量技术是电类专业学生必须具备的测量知识。本书是根据教育部最新制定的《高职高专教育电工技术基础课程教学基本要术》,由湖南省高校电子技术教学研究会组织省内部分高等院校教师在多年电路实验教学研究和教材建设的基础上编写而成的。与曹才开主编的《电路分析》教材配套使用。

全书共 10 章,前两章介绍了电工测量的基础知识和常用电工测量仪器与设备的基本原理和使用方法。第 3~9 章为电路“硬件”实验项目,根据由浅入深、提高学生创新能力和综合动手能力的思想,设计了一批基本技能训练项目、设计性实验项目和综合性实验项目。这些实验项目较系统地训练了学生的基本操作技能、常用仪器设备的使用、工程测量知识、电路设计技术及各种测量方法,巩固了电路理论知识,培养了严谨的科学态度和工程意识。第 10 章为电路“虚拟”实验,该章首先简介了电子工作平台(EWB),然后基于 EWB 开发了 11 个电路“虚拟”实验项目。由于“虚拟”实验仪器全、元件多、功能多,这样,“虚拟”实验又是“硬件”实验的补充和完善。适当开设一些虚拟实验项目,不但可以缓解高校实践经费不足的困难,而且有利于学生掌握现代检测技术。

本书突出基本技能训练,突出工程应用,突出新的测量手段和方法,突出创新意识,较好地处理了电路实践教学内容继承与更新、先进性与实用性的关系。

本书由曹才开担任总策划,陆秀令、龙卓珉协助实验项目的选择和设计工作。参加本书编著工作的有:曹才开(第 1、8、10 章,附录),张佐钊、曹才开(第 2 章),龙卓珉、冯国珍(第 3、5、7 章),张松华(第 4 章),陆秀令(第 6 章),黄宏格(第 9 章)。各章实验项目的实做验证工作由相应编写各章的人员完成。

在本书的编写过程中,得到了湖南省高校电子技术教学研究会和参编学校的大力支持,谨致以衷心感谢。

由于编者水平有限,书中的缺点和错误在所难免,敬请各位读者批评指正。

编 者

2005 年 6 月

目 录

电路实验

第 1 章 电工测量的基础知识	1
1.1 电工测量的一般知识	1
1.1.1 电工测量的意义及发展趋势	1
1.1.2 电工测量的主要内容及方法	2
1.1.3 有效数字	3
1.2 测量误差	5
1.2.1 测量误差的几个名词术语	5
1.2.2 测量误差的来源	6
1.2.3 测量误差的表示	6
1.2.4 测量误差的分类	10
1.3 系统误差的消除方法	11
1.3.1 从产生系统误差的来源上消除	11
1.3.2 利用修正的方法来消除	11
1.3.3 利用特殊的测量方法来消除	12
*1.4 测量结果的误差估计	16
1.4.1 直接测量结果的误差估计	17
1.4.2 间接测量结果的误差估计	17
1.4.3 已定系统误差的合成	21
1.4.4 不确定度的评定	22
1.4.5 测量结果的表示	25
本章小结	28
习题	29
第 2 章 常用电工测量仪器与设备	31
2.1 电工测量仪器的基本知识	31

2.1.1	电工仪表的分类和符号	31
2.1.2	电工仪表的结构及工作原理	34
2.1.3	电工仪表的选用常识	41
2.2	万用表	42
2.2.1	万用表的分类	43
2.2.2	万用表的工作原理	43
2.2.3	万用表的使用方法	54
2.2.4	使用万用表的注意事项	55
2.3	电压表	61
2.3.1	电压表的分类	61
2.3.2	电压表的工作原理	64
2.3.3	电压表的使用方法	71
2.3.4	使用电压表的注意事项	72
2.4	电流表	73
2.4.1	电流表的分类	73
2.4.2	电流表的工作原理	73
2.4.3	电流表的使用方法	77
2.4.4	使用电流表的注意事项	78
2.5	功率表	78
2.5.1	功率表的工作原理	78
2.5.2	功率表的测量方法	79
2.5.3	使用功率表的注意事项	80
2.6	晶体毫伏表	81
2.6.1	晶体毫伏表的工作原理	81
2.6.2	晶体毫伏表的使用方法	82
2.6.3	使用晶体毫伏表的注意事项	82
2.7	示波器	83
2.7.1	示波器的分类	83
2.7.2	示波器的工作原理	84
2.7.3	示波器的使用方法	87
2.7.4	示波器的选用及使用注意事项	92
2.8	信号源	94
2.8.1	信号发生器的分类	94
2.8.2	信号发生器的工作原理	95

2.8.3 信号源的使用方法	100
2.8.4 使用信号源的注意事项	101
本章小结	101
习题	102
第3章 直流电阻电路的实验项目	104
3.1 电路元件伏安关系的测量	104
3.2 示波器的使用	107
3.3 基尔霍夫定律的验证	108
3.4 线性有源二端网络等效参数测定(设计性实验)	110
3.5 磁电式表头的应用(设计性实验)	111
3.6 电路电位的研究(设计性实验)	113
3.7 叠加定理的验证	115
3.8 受控源电路的研究(综合实验)	116
本章小结	120
习题	121
第4章 动态与谐振电路的实验项目	122
4.1 RC 一阶电路的零输入响应与零状态响应	122
4.2 RLC 串联电路谐振特性	125
4.3 二阶电路响应的研究	130
4.4 RC 电路的方波响应(设计性实验)	133
本章小结	134
习题	135
第5章 正弦交流电路的实验项目	136
5.1 R 、 L 、 C 单个元件的频率特性及相位关系	136
5.2 正弦电路中电阻器、电感器和电容器参数的测量	139
5.3 功率因数的提高(设计性实验)	141
5.4 RLC 单口网络的等效阻抗与导纳的测量(综合实验)	144
本章小结	146
习题	147

第 6 章 具有耦合电感电路的实验项目	148
6.1 互感系数 M 的测量	148
6.2 两个耦合电感线圈的串并联	152
6.3 变压器的研究	158
6.4 用谐振法测量互感线圈参数(设计性实验)	161
本章小结	162
习题	163
第 7 章 三相交流及非正弦电路的实验项目	164
7.1 负载为星形联结的三相电路的电流和电压的测量	164
7.2 负载为三角形联结的三相电路的电流和电压的测量	166
7.3 对称三相负载中的功率的测量	168
7.4 非正弦周期电流电路的测量(综合实验)	170
本章小结	173
习题	173
*第 8 章 电路有源器件的实验项目	174
8.1 负阻抗变换器及其应用	174
8.2 回转器及其应用(综合实验)	177
8.3 广义阻抗变换器及其应用	182
8.4 有源理想变压器(综合实验)	185
本章小结	189
习题	190
第 9 章 双口网络的实验项目	192
9.1 电阻双口网络的 Y 参数测量	192
9.2 电阻双口网络的 Z 参数测量	195
9.3 电阻双口网络的 H 参数测量	197
9.4 电阻双口网络的 A 参数测量	200
9.5 RLC 双口网络的 A 参数测量	202
9.6 双口网络的等效电路测定(设计性实验)	205
本章小结	206
习题	206

第 10 章 电路虚拟实验	208
10.1 引言	208
10.2 EWB 软件简介	209
10.2.1 基本功用	210
10.2.2 EWB 软件的应用环境与运行	210
10.2.3 电路图输入方式	211
10.2.4 EWB 5.0 软件的元器件模型库	212
10.2.5 EWB 5.0 软件的虚拟仪器、仪表库	212
10.2.6 EWB 5.0 软件的电路仿真模式	213
10.2.7 EWB 5.0 软件的通用性与兼容性	214
10.2.8 Electronics Workbench 软件界面	214
10.2.9 基本操作技巧	217
10.3 电路虚拟实验项目	221
10.3.1 基尔霍夫电压定律(KVL)	221
10.3.2 基尔霍夫电流定律(KCL)	223
10.3.3 直流电路的网孔电流分析法(综合实验)	224
10.3.4 直流电路的节点分析法(综合实验)	227
10.3.5 直流电路的戴维南定理	229
10.3.6 直流电路的诺顿定理	233
10.3.7 二阶电路响应的测量	236
10.3.8 一阶电路三要素分析法(综合实验)	238
10.3.9 交流电路的戴维南等效电路(综合实验)	241
10.3.10 双 T 网络的测量(综合实验)	248
10.3.11 集成运算放大器线性应用(综合实验)	253
本章小结	258
习题	258
附录 A 实验须知	260
附录 B 电路实验课前的指导	261
附录 C 实验报告示范	264
参考文献	267

电工测量的基础知识

电工测量是教学中进行基本技能训练的重要环节,是电类专业学生必须具备的测量知识。本章将介绍电工测量的基础知识,包括电工测量的主要内容及方法、有效数字的概念、测量误差的基本知识、系统误差的消除方法和测量结果的误差估计。

1.1 电工测量的一般知识

1.1.1 电工测量的意义及发展趋势

电工测量是指以电工技术理论为依据,以电工电子测量仪器和设备为手段,对各种电量进行的测量。现今,电工测量已成为一门发展迅速、应用广泛、精确度愈来愈高、对现代科学技术的发展起着巨大推动作用的实验课程。电工测量是电类专业学生必须具备的测量知识。

电工测量是教学中进行基本技能训练的重要环节。因此,要认真学好电工测量基础知识,常用测量仪器和设备的使用方法,测量误差分析和做好每次实验。电工测量是电子测量的基础,也是其他工程测量的基础。

电工测量目前是以电工电子测量仪器和设备为基本测量工具。这种“硬件”电工测量对培养学生实际动手能力,训练基本工程测量,学会常用仪器设备的基本操作方法,认识实际测量过程中的各种故障和测量误差都是十分必要的。但是,若只采用硬件技术(或以硬件为主)进行电工测量和实验,其昂贵的费用是难以承受的,也不利于学生掌握现代检测技术。

自 20 世纪 90 年代以来,在计算机技术的推动下,现代检测技术以智能化、自动化为发展方向,以虚拟仪器为标志的通用化、智能化和网络化测量仪器及检测系统得到迅猛发展。虚拟仪器技术综合运用了计算机技术、数字信号处理技术、标准总线技术和软件工程技术,代表了测量仪器与自动检测系统的未来发展方向。虚拟仪器技术已用于教学、科

研、航天航空和生物各个领域,成为一个高新技术领域。虚拟仪器的研究对于现代教学、现代测控技术的发展具有十分重要的意义,对培养学生跟上新技术的发展具有极大的促进作用。基于 EWB 的虚拟电工电子实验技术是电路原理设计和功能测试的计算机软件模拟技术,现代电子系统的设计与分析只能是应用 EDA 技术。其过程是在分布式网络环境下,在 EDA 平台上进行设计、综合、模拟仿真,待设计实现后,再在实际条件下进行测试。由此可见,让学生掌握这些新科学、新技术,提高实践教学质量,适应社会需要是十分重要的。

“硬件”测量与“虚拟”测量是相互促进的。在“硬件”实践中,学会了常用的电工仪器的使用方法,这有助于“虚拟”实验的开设;反之,通过“虚拟”实验,进一步熟悉常用仪器的使用。另一方面,“硬件”的使用所掌握的基本工程测量技术又是“虚拟”实验的基础知识,由于“虚拟”实验仪器全、元件多、功能多,这样,“虚拟”实验又是“硬件”实验的补充和完善。

1.1.2 电工测量的主要内容及方法

1. 电工测量的主要内容

电工测量主要包括如下几项内容。

- (1) 电能量的测量。包括电流、电压(电位)、功率等。
- (2) 电信号特性的测量。包括频率、周期、相位、幅度、逻辑状态等。
- (3) 电路元器件参数的测量。包括电阻、电容、电感、 Q 值、互感量、双口网络参数等。
- (4) 电路性能的测量。包括电压源伏安特性、电流源伏安特性、无源单口网络伏安特性、有源单口网络伏安特性、变压器端口伏安特性、电动机性能、增益、衰减量、灵敏度、频率特性、电路响应、信号波形等。
- (5) 电路定理的验证。包括欧姆定律、KVL、KCL、叠加原理、戴维南定理、诺顿定理等。
- (6) 电路分析方法的测量。包括节点电压法、网孔分析法、一阶电路三要素法、无源单口网络等效阻抗的测量等。
- (7) 各种非电量通过传感器转化为电量后的测量。包括温度、位移、压力、重量等。

2. 电工测量的基本方法

电工测量的方法正确与否,直接关系到测量工作能否正常进行及测量结果是否可靠。所以,测量方法是测量过程中至关重要的一步。电工测量有以下方法。

(1) 直接测量法。指能直接得到被测量值的测量方法。例如,用万用表电阻挡测量某只电阻器的阻值,这种方法即为直接测量法。

(2) 间接测量法。指通过对与被测量成函数关系的其他量进行测量,取得被测量值的测量方法。例如,通过测量电阻 R 两端的电压 U 和流过电阻中的电流 I ,然后利用 $R =$

U/I 的关系求得电阻值的方法,即为间接测量法。

应当指出,从直接式仪器仪表上获得测量结果的方法不一定就是直接测量法,将被测量与标准量进行比较进而获得测量结果的方法也不一定就是间接测量法。

目前有些教科书还列有“组合测量法”,但间接测量法与组合测量法之间并没有根本的区别,它们只是间接的层次不同而已,所以本书没有专门把组合测量作为一种方法来阐述。

1.1.3 有效数字

1. 数据的舍入规则

由于测量误差的不可避免,以及在数据处理过程中应用无理数(e 、 π 等)时不可能取无穷位,所以通常得到的测量数据和测量结果均是近似数,其位数各不相同。为了使测量结果的表示确切统一,计算简便,在数据处理时需对测量数据和所用常数进行舍入(或修约)处理。数据的舍入规则是:

- (1) 小于5舍去,即舍去部分的数值小于所保留末位的0.5个单位,末位不变。
- (2) 大于5进1,即舍去部分的数值大于所保留末位的0.5个单位,在末位增加1。
- (3) 等于5则应用偶数法则,即舍去部分的数值等于所保留末位的0.5个单位,末位是偶数,则末位不变;末位是奇数,则末位增加1。例如,将下列数据舍入到小数第二位。

12.4344→12.43($0.004 < 0.005$,舍去)

63.73501→63.74($0.00501 > 0.005$,进1)

0.69499→0.69($0.00499 < 0.005$,舍去)

25.3250→25.32($0.0050 = 0.005$,末尾为偶数舍去)

17.6955→17.70($0.005 = 0.005$,末位为奇数进1)

123.105→123.10($0.0050 = 0.005$,末位为0,按偶数处理,故舍去)

注意:舍入应一次舍入到位,不能逐位舍入,否则会得到错误的结果。例如上例中0.69499,错误做法是:

$$0.69499 \rightarrow 0.6950 \rightarrow 0.695 \rightarrow 0.70$$

而正确的结果为0.69。

上述数据舍入规则也被称为“四舍五入”,但这与平时所讲的四舍五入法是有区别的。区别在于“等于5”的舍入处理上,之所以采用“偶数法则”,是为了在比较多的数据舍入处理中,使产生正负舍入误差的概率近似相等,从而使测量结果受舍入误差的影响减小到最低程度。

2. 有效数字

所截取得到的近似数,其绝对误差(截取或舍入误差)的绝对值不超过近似数末位的半个单位,则该近似数从左边第一个非零数字到最末一位数字为止的全部数字,称之为有

效数字。

从上述定义可看出,有效数字是和数据的准确度(或误差)密切相关的,它所隐含的极限误差不超过有效数字末位的半个单位。

例如:

3.1416 五位有效数字,极限(绝对)误差 ≤ 0.00005

3.142 四位有效数字,极限误差 ≤ 0.0005

8700 四位有效数字,极限误差 ≤ 0.5

8.7×10^3 两位有效数字,极限误差 $\leq 0.05 \times 10^3$

0.87 两位有效数字,极限误差 ≤ 0.005

0.807 三位有效数字,极限误差 ≤ 0.0005

由这几个示例可看出,0,1,2,3,4,5,6,7,8,9十个数字都有可能是有效数字,而0还与位置有关。开头的0不是有效数字,因为它们仅与选取的测量单位有关,而与测量误差或准确度无关。例如,某电压为15mV也可表示为0.015V,这里前边两个0都不是有效数字。

舍入处理后的近似数,中间的0和末尾的0都是有效数字。末尾的0很重要,不能随意添加。多写则夸大了测量准确度,少写则夸大了测量误差。

对于测量数据的绝对值比较大,而有效数字位数又比较少的测量数据,应采用科学计数法,即 $a \times 10^n$, a 的位数由有效数字的位数所决定。

3. 测量结果有效数字位数的确定

测量结果(或读数)的有效位数应由该测量的不确定度来确定,即测量结果的最末一位与不确定度的位数对齐。例如,某物理量的测量结果的值为63.44且该量的测量不确定度(不确定度概念将在1.4.4节中讨论) $U=0.4$,则根据上述原则,该测量结果的有效位数应保留到小数后一位即63.4,测量结果表示为 63.4 ± 0.4 。

说明一点,测量结果在某些特殊场合可用不标注不确定度(误差)的测量报告值表示,即根据有效数字的“0.5误差法则”确定测量结果的有效数。在上例中,因为 $0.4 < 0.5$,所以测量结果的有效数字应保留到个位,即测量报告值为63。当 $U=0.8$ 时,测量报告值则只有一位有效数字,即 0.6×10^2 ;当 $U=4.5$ 时,测量报告值仍为 0.6×10^2 。显然,这种表示方法不确切。

例 1.1 将下列数值中的有效数字保留到小数后两位:828.358、828.354、828.745、828.735。

解 处理后的数字如下:

828.358 $\rightarrow$ 828.36 828.354 $\rightarrow$ 828.35

828.745 $\rightarrow$ 828.74 828.735 $\rightarrow$ 828.74

例 1.2 假设测量数值分别为 823.03454 和 823.995, 已知测量误差为 0.05, 试处理上述的有效数字。

解 因为测量精度保留到小数后两位, 故测量数值也应与其对齐, 处理后的有效数字如下:

$$823.03454 \rightarrow 823.03 \qquad 823.995 \rightarrow 824.00$$

1.2 测量误差

1.2.1 测量误差的几个名词术语

1. 真值

真值是表征物理量与给定特定量的定义一致的量值。真值客观存在, 但是, 它是不可测量的。随着科学技术的不断发展, 人们对客观事物认识的不断提高, 测量结果的数值会不断接近真值。在实际的计量和测量工作中, 经常使用“约定真值”和“相对真值”。约定真值是按照国际公认的单位定义, 利用科学技术发展的最高水平所复现的单位基准。约定真值常常是以法律形式规定或指定的。就给定目的而言, 约定真值的误差是可以忽略的, 如国际计量局保存的国际千克原器。相对真值也叫实际值, 是在满足规定准确度时用来代替真值使用的值。

2. 标称值

标称值是计量或测量器具上标注的量值。如标准砝码上标出的 1kg, 标准电池上标出的 1.0186V。由于制造上不完备、测量不准确及环境条件的变化, 标称值并不一定等于它的实际值, 所以, 在给出量具标称值的同时, 通常应给出它的误差范围或准确度的等级。

3. 示值

由测量仪器(设备)给出或提供的量值, 也称测量值。

4. 准确度

准确度是测量结果中系统误差和随机误差的综合, 表示测量结果与真值的一致程度。准确度涉及到真值, 由于真值的不“可知性”, 所以它只是一个定性概念, 而不能用于定量表达。定量表达应该用“测量不确定度”。这里应注意, 过去经常讲的两个术语“测量精密度”和“测量正确度”在《国际通用计量学基本术语》(1993 年第二版)中再未列出, 故最好不用。

5. 重复性

在相同条件下, 对同一被测量进行多次连续测量所得结果之间的一致性。所谓相同条件就是重复条件, 它包括:

- (1) 相同测量程序;
- (2) 相同测量条件;

- (3) 相同观测人员;
- (4) 相同测量设备;
- (5) 相同地点。

6. 误差公理

在实际测量中,由于测量设备不准确,测量方法(手段)不完善,测量程序不规范及测量环境因素的影响,都会导致测量结果或多或少地偏离被测量的真值。测量结果与被测量真值之差就是测量误差。测量误差的存在是不可避免的,也就是说“一切测量都具有误差,误差自始至终存在于所有科学实验的过程之中”,这就是误差公理。人们研究测量误差的目的就是寻找产生误差的原因,认识误差的规律、性质,进而找出减小误差的途径与方法,以求获得尽可能接近真值的测量结果。

1.2.2 测量误差的来源

1. 仪器误差

仪器(仪表)本身的误差称为仪器误差,这是测量误差的主要来源之一。指针式仪器(仪表)的零点漂移、刻度误差以及非线性引起的误差,数字式仪表的量化误差,比较式仪器中标准量本身的误差均属于此类误差。

2. 方法误差

由于测量方法不合理而造成的误差称为方法误差。例如,用普通万用表测量高内阻回路的电压是不合理的,但若由于认识不清而采用了这种测量方法,则由此引起的误差就是方法误差。

3. 理论误差

由于测量方法建立在近似公式或不完整的理论基础之上,或是用近似值来计算测量结果,则由此引起的误差便称为理论误差。

4. 影响误差

由于环境因素与要求的条件不一致而造成的误差,称为影响误差。影响误差也是测量误差的主要来源之一。例如,当环境温度、预热时间或电源电压等因素要求一不致时,将会产生误差,这就是影响误差。

5. 人身误差

由于测量者的分辨能力、疲劳程度、固有习惯或责任心等因素而引起的误差,称为人身误差。例如,对最后一位数的估读能力差,或念错读数,或习惯斜视等引起的误差均属于此类误差。

1.2.3 测量误差的表示

测量误差可表示为四种形式。

1. 绝对误差

绝对误差定义为示值与真值之差,即

$$\Delta A = A_x - A_0 \quad (1.1)$$

式中, ΔA 为绝对误差; A_x 为示值,在具体应用中,示值可以用测量结果的测量值,标准量具的标称值,标准信号源的调定值或定值代替; A_0 为被测量的真值,由于真值的不可知性,常常用约定真值和相对真值代替。

绝对误差可正可负,且是一个有单位的物理量。绝对误差的负值称之为修正值,也叫补值,一般用 C 表示,即

$$C = -\Delta A = A_0 - A_x \quad (1.2)$$

测量仪器的修正值一般是通过计量部门检定给出。从定义不难看出,仪器(示值)加上修正值(补值)就可获得相对真值,即实际值。实际值表示为

$$A_0 = C + A_x$$

例 1.3 某电流表的量程为 1mA ,通过检定知其修正值为 -0.02mA 。用该电流表测量某一电流,示值为 0.78mA ,试问被测电流的实际值和测量中存在的绝对误差各为多少?

解 求被测电流的实际值

$$A_0 = C + A_x = -0.02 + 0.78 = 0.76\text{mA}$$

求绝对误差

$$\Delta A = A_x - A_0 = 0.78 - 0.76 = 0.02\text{mA}$$

本例中,绝对误差也可以由修正值直接求得,即 $\Delta A = -C = 0.02\text{mA}$ 。

2. 相对误差

(1) 真值相对误差或实际值相对误差与示值相对误差

相对误差定义为绝对误差与真值之比,一般用百分数形式表示,即

$$\gamma_0 = \frac{\Delta A}{A_0} \times 100\% \quad (1.3)$$

这里真值 A_0 也用约定真值或相对真值代替。但在约定真值或相对真值无法知道时,往往用测量值(示值)代替,即

$$\gamma_x = \frac{\Delta A}{A_x} \times 100\% \quad (1.4)$$

应注意,在误差比较小时, γ_0 和 γ_x 相差不大,无需区分,但在误差比较大时,两者相差悬殊,不能混淆。为了区分,通常把 γ_0 称为真值相对误差或实际值相对误差,而把 γ_x 称为示值相对误差。

在测量实践中,测量结果准确度的评价常常使用相对误差,因为它方便直观。相对误差愈小,准确度愈高。

(2) 分贝误差

分贝误差用 γ_{dB} 表示,这是一种用分贝(dB)表示的相对误差。当绝对误差值 $\Delta A \ll 1$ 时,它与示值相对误差 γ_x 之间存在如下的简单关系。

对于电流、电压类的电参数:

$$\gamma_{\text{dB}} = 8.69 \gamma_x \text{ dB} \quad (1.5)$$

对于功率类的电参数

$$\gamma_{\text{dB}} = 4.3 \gamma_x \text{ dB} \quad (1.6)$$

例如, DW—3 型高频微伏表测电压时的误差为 1.5 dB, 如用示值相对误差表示, 则为

$$\gamma_x = \gamma_{\text{dB}} / 8.69 = 1.5 / 8.69 \approx 0.17 = 17\%$$

综上所述,除分贝误差外,其他的相对误差都是一个只有大小和符号而没有量纲的百分数。

3. 引用误差

引用误差是为了评价测量仪表的准确度等级而引入的,因为绝对误差和相对误差均不能客观正确地反映测量仪表的准确度高低。引用误差定义为绝对误差与测量仪表量程之比,用百分数表示,即

$$\gamma_n = \frac{\Delta A}{A_m} \times 100\% \quad (1.7)$$

式中, γ_n 为引用误差; A_m 为测量仪表的量程。

测量仪表的各指示(刻度)值的绝对误差有正有负,有大有小。所以,确定测量仪表的准确度等级应用最大引用误差,即最大绝对值 $|\Delta A|_m$ 与量程之比。若用 γ_{nm} 表示最大引用误差,则有

$$\gamma_{\text{nm}} = \frac{|\Delta A|_m}{A_m} \times 100\% \quad (1.8)$$

国家标准 GB776—1976《测量指示仪表通用技术条件》规定,电测量仪表的准确度等级指数 a 分为 0.1、0.2、0.5、1.0、1.5、2.5、5.0 等 7 级。它们的基本误差(最大引用误差)不能超过仪表准确度等级指数 a 的百分数,即

$$\gamma_{\text{nm}} \leq a\% \quad (1.9)$$

依照上述规定,不难得出,电测量仪表在使用时所产生的最大可能误差可由下式求出:

$$\Delta A_m = \pm A_m \times a\%$$

$$\gamma_x = \pm (A_m / A_x) \times a\%$$

例 1.4 某 1.0 级电压表,量程为 300V,当测量值分别为 $U_1 = 300\text{V}$, $U_2 = 200\text{V}$, $U_3 = 100\text{V}$ 时,试求这些测量值的(最大)绝对误差和示值相对误差。

解 绝对误差为

$$\Delta U_1 = \Delta U_2 = \Delta U_3 = \pm 300 \times 1.0\% = \pm 3\text{V}$$

示值相对误差分别为

$$\gamma_{U_1} = (\Delta U_1 / U_1) \times 100\% = (\pm 3/300) \times 100\% = \pm 1.0\%$$

$$\gamma_{U_2} = (\Delta U_2 / U_2) \times 100\% = (\pm 3/200) \times 100\% = \pm 2.0\%$$

$$\gamma_{U_3} = (\Delta U_3 / U_3) \times 100\% = (\pm 3/100) \times 100\% = \pm 3.0\%$$

由上例看出,测量仪表产生的示值测量误差不仅与所选仪表等级指数有关,而且与所选仪表的量程有关。量程 A_m 和测量值 A_x 相差愈小,测量准确度愈高。所以在选择仪表量程时,测量值应尽可能接近仪表满度值,一般不小于满度值的 $2/3$ 。这样,测量结果的相对误差将不会超过仪表准确度等级指数百分数的 1.5 倍。这一结论只适合于以标度尺上量限的百分数划分仪表准确度的一类仪表,如电流表、电压表、功率表;而对于测量电阻的普通型欧姆表是不适合的,因为欧姆表的准确等级度等级是以标度尺长度的百分数划分的。可以证明欧姆表的示值接近其中值电阻时,测量误差最小,准确度最高。

4. 容许误差

容许误差是指测量在使用条件下可能产生的最大误差范围,它是衡量测量仪表的最重要的指标。测量仪器的准确度、稳定度等指标都可用容许误差来表征。按照标准 SJ943—1982《电子仪器误差的一般规定》的规定,容许误差可用工作误差、固定误差、影响误差、稳定性误差来描述。

(1) 工作误差

工作误差是在额定工作条件下仪器误差的极限值,即来自仪器外部的各种影响量和仪器内部的影响特性为任意可能的组合时,仪器误差的最大极限值。这种表示方式的优点是使用方便,即可利用工作误差直接估计测量结果误差的最大范围。不足的是由于工作误差是在最不利组合下给出的,而在实际测量中最不利组合的可能性极小,所以,由工作误差估计的测量误差一般偏大。

(2) 固有误差

固有误差是当仪器的各种影响量和影响特性处于基准条件下仪器所具有的误差。由于基准条件比较严格,所以,固有误差可以比较准确地反映仪器所固有的性能,便于在相同条件下对同类进行比较和校准。

(3) 影响误差

影响误差是当一个影响量处在额定使用范围内,而其他所有影响量处在基准条件时仪器所具有的误差,如频率误差、温度误差等。

(4) 稳定性误差

稳定性误差是在其他影响和影响特性保持不变的情况下,在规定的时间内,仪器输出的最大值或最小值与其标称值的偏差。

容许误差通常用绝对误差来表示。测量仪表的各刻度值的绝对误差有明显的特征:其一是有与示值 A_x 无关的固定值,当被测量为零时可以发现它;其二是绝对误差随示值