

高等学校教材 | GAODENG XUEXIAO JIAOCAI

彭厚德 夏 锴 贺国权 主编

电工电路 实验与仿真

DIANGONG DIANLU SHIYAN YU FANGZHEN



西南交通大学出版社
[Http://press.swjtu.edu.cn](http://press.swjtu.edu.cn)

高等学校教材

电工电路实验与仿真

彭厚德 夏 锴 贺国权 主编

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第125376号

电工电路实验与仿真

主编 贺国权 夏 锴 彭厚德

责任编辑
何永祥 何永祥

责任编辑
何永祥 何永祥

出版

西南交通大学出版社

地址：成都

邮编：610031

电话：028-87600253

网址：http://www.swjtu.cn

定价

32.00元

ISBN 978-7-294-31582-2

2011年8月第1版

2011年8月第1次印刷

西南交通大学出版社

· 成 都 ·

地址：成都

电话：028-87600253

内 容 介 绍

全书涵盖了电路实验和电工学实验的内容,主要包括:电工电路实验基础知识,基础性实验,综合性实验,设计性实验及实训, Multisim 仿真软件使用及其在电工电路分析设计中的应用实例。

本书可作为高等学校电类和非电类专业的本、专科学生的电工电路实验和课程设计的教材,也可作为相关专业技术人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

电工电路实验与仿真 / 彭厚德, 夏锴, 贺国权主编.
—成都: 西南交通大学出版社, 2011.8
ISBN 978-7-5643-1285-5

I. ①电… II. ①彭… ②夏… ③贺… III. ①电工技
术—实验②电路—实验 IV. ①TM1-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 152376 号

电工电路实验与仿真

彭厚德 夏 锴 贺国权 主编

责任编辑	黄淑文
封面设计	何东琳设计工作室
出版发行	西南交通大学出版社 (成都二环路北一段 111 号)
发行部电话	028-87600564 87600533
邮政编码	610031
网 址	http://press.swjtu.edu.cn
印 刷	四川经纬印务有限公司
成品尺寸	185 mm×260 mm
印 张	15.25
字 数	379 千字
版 次	2011 年 8 月第 1 版
印 次	2011 年 8 月第 1 次
书 号	ISBN 978-7-5643-1285-5
定 价	28.00 元

图书如有印装质量问题 本社负责退换
版权所有 盗版必究 举报电话: 028-87600562

前 言

电工电路实验是电工学和电路课程重要的实践性教学环节,为了适应普通高等教育应用型人才培养的需要,结合教育部高等学校电子信息科学与工程类基础课程教学指导分委员会颁布的电工电路课程实验教学的基本要求,编写了这本实践性教材。《电工电路实验与仿真》紧密结合应用型高等院校的办学定位,注重理论联系实际,突出应用性,强调学以致用,以提高学生的技术应用能力与实践素质。

本书涵盖了电路实验和电工学实验的内容,其中以电路实验为主要部分,从传统理论验证性的实验任务逐步过渡到综合性、设计性的实验及实训。本书内容共分为5章,第1章为电工电路实验基础知识,主要介绍测量的基本知识、常用电工仪表的分类和选择、实验故障分析与处理的一般方法、实验安全操作规程、实验目的及要求、实验报告的撰写;第2章为基础性实验,主要介绍了22个基础实验的原理及实验内容;第3章为综合性实验,主要介绍了11个综合性实验的原理及实验内容;第4章为设计性实验及实训,主要介绍了13个设计性实验及实训内容;第5章为计算机辅助分析与设计,主要介绍了Multisim软件及仿真分析方法,并给出了仿真实例。

本书可作为高等学校电类和非电类专业的本、专科学生的电工电路实验和课程设计的教材,也可作为相关专业技术人员的参考书。

本书第1、2、4章和附录A、B由彭厚德编写,第3章由贺国权和彭厚德共同编写,第5章由夏锴编写,全书由贺国权统稿。

由于编者水平有限,书中难免存在不足,恳请读者批评指正。

编 者

2011年5月

目 录

第1章 电工电路实验基础知识	1
1.1 测量的基本知识	1
1.2 有效数字及其运算	3
1.3 测量误差的表示方法及分类	6
1.4 测量不确定度及测量结果的表示	10
1.5 常用电工仪表的分类和选择	17
1.6 实验数据的获取	18
1.7 实验故障分析与处理的一般方法	19
1.8 实验安全操作规程	20
1.9 实验应达到的目的	21
1.10 实验的基本要求	21
1.11 实验报告撰写	23
第2章 基础性实验	25
实验1 基本电工仪表的使用及测量误差的计算	25
实验2 典型电信号的观察与测量	30
实验3 减小仪表测量误差的方法	32
实验4 欧姆定律的验证	36
实验5 电阻的混联电路	38
实验6 直流电路电位及其与电压的关系研究	40
实验7 直流电阻的测量	42
实验8 直流电阻电路故障的检查	45
实验9 仪表量程扩展	47
实验10 电阻器与理想直流电源模型的伏安特性测试	50
实验11 基尔霍夫定律的验证	53
实验12 电压源与电流源的等效变换	55
实验13 直流电路叠加原理的验证	57
实验14 戴维宁定理和诺顿定理	58
实验15 互易定理	62
实验16 L 、 C 元件在交、直流电路中的特性	64
实验17 电容的充、放电观察	66
实验18 RC 一阶电路的响应测试	67
实验19 RLC 元件在正弦交流电路中的阻抗特性研究	70
实验20 互感电路观测	74

实验 21	三相电路的连接及功率的测定	77
实验 22	负载匹配条件	80
第 3 章	综合性实验	83
实验 1	正弦稳态交流电路相量的研究	83
实验 2	交流电路电感、电容元件参数测定	84
实验 3	RL 和 RC 元件串联电路	87
实验 4	互感电路参数的测定	91
实验 5	无源二端口网络的测定	94
实验 6	功率因数的改善	96
实验 7	功率因数及相序的测量	98
实验 8	单相变压器特性研究	101
实验 9	异步电动机继电-接触控制的基本电路实验	105
实验 10	三相异步电动机顺序控制实验	109
实验 11	三相鼠笼式异步电动机的使用	112
第 4 章	设计性实验及实训	118
实验 1	等效变换	118
实验 2	诺顿定理的研究	120
实验 3	仪用对称三相电压源电路设计	124
实验 4	在不同地方分别控制同一台电动机的启动和停止	125
实验 5	多台电动机顺序控制电路	126
实验 6	RC 电路的方波响应	127
实验 7	用谐振法测量互感线圈参数	129
实验 8	双口网络的等效电路测定	130
实验 9	受控源电路的研究	132
实训 10	常用电工工具的使用	135
实训 11	常用电工仪表的使用	136
实训 12	熔断器的检测与更换	138
实训 13	室内照明电路安装	139
第 5 章	Multisim 软件的使用	142
5.1	Multisim 概述	142
5.2	Multisim 菜单栏和工具栏	149
5.3	Multisim 电路创建	156
5.4	Multisim 仪器仪表使用	161
5.5	Multisim 的基本分析方法	174
5.6	Multisim 的高级分析方法	188
5.7	Multisim 在电工电路中的应用	204
习 题		219

附录 A 常用电工仪表的使用 220

 A.1 模拟万用表的使用 220

 A.2 数字万用表的使用 222

 A.3 示波器的使用 225

 A.4 信号发生器的使用 229

 A.5 功率表的使用 230

 A.6 功率因数表的使用 232

 A.7 电子毫伏表的使用 232

附录 B 部分电气图形符号 235

参考文献 236

第1章 电工电路实验基础知识

1.1 测量的基本知识

测量是人类对客观事物取得数量的一种认识过程，是人类认识自然、改造自然不可缺少的重要手段。人类对任何研究对象要进行定量地评价，都必须通过测量来实现。

所谓测量，就是把待测的物理量与一个被选作标准的同类物理量进行比较，确定它是标准量的多少倍。这个标准量称为该物理量的单位，这个倍数称为待测量的数值。或者说测量是以确定被测对象数值为目标而进行的一种操作过程。

电工、电路实验中应用到的测量技术主要是电子测量技术，它具有频率范围宽、量程广、精确度高、测量速度快、易于实现测量过程自动化等其他测量技术无法比拟的优点。

1.1.1 测量的常用术语

(1) 量值：由数值与相应的计量单位的乘积表示的量，由数值和单位组成，两者缺一不可，如 $2\ \Omega$ 、 $10\ \text{V}$ 等。任何物理量，如果只有数值而没有单位是没有物理意义的。

(2) 被测量：被测量的物理量。它可以是待测量，也可以是已知量。如测量电阻时，电阻即为被测量。

(3) 真值：某物理量在给定条件下被完美地确定或被严格定义的值，也可以理解为没有误差的值。它是一个理想的概念，实际上是不可能确切得知的，只能随着人们认识的不断提高和测量技术手段的不断发展而逐渐接近它。

(4) 示值：对于测量仪器，就是指示值或记录值；对于标准器具，是标称值或名义值；对于供给仪器，是设置值或标称值。

(5) 额定值：由仪器或设备的制造者为设备或仪器在一定条件下正常运行时规定的数值，有时又称铭牌值。

(6) 读数：仪器刻度盘或显示器上直接读取的数字。应注意读数与示值的区别。例如以 100 分度表示 $50\ \text{V}$ 的指针式电压表，当指针指在 30 时，读数是 30，而示值为 $15\ \text{V}$ 。

(7) 测量值：由测量得出的数值。它可以是从计量器具上直接得出的量值，也可以通过必要的换算或查表等（如倍率换算、借助相应的图标或曲线等）所得出的量值。

(8) 误差：测量结果与被测量的真值在数值上存在的差异。

1.1.2 测量方法

测量方法是否正确,直接关系到测量工作能否顺利进行和测量结果是否有效。测量前,应根据测量任务提出的精度要求和其他技术指标,进行认真的分析和研究,找出切实可行的测量方法,选择合适的测量仪表、仪器或装置,然后进行测量。

测量方法可以按不同的方式进行分类。根据测量时被测量是否随时间变化可分为静态测量和动态测量;根据测量条件可分为等精度测量和非等精度测量;根据测量器件是否与被测介质接触可分为接触式测量和非接触式测量;根据测量结果取得的方式可分为直接测量、间接测量和组合测量;根据测量方式可分为直读式测量、零位式测量和微差式测量。下面介绍几种方法。

1. 等精度测量和非等精度测量

等精度测量是指在同一(相同)条件下进行的多次测量。例如同一个人,用同一台仪器,每次测量时周围环境条件相同,等精度测量每次测量的可靠程度相同。反之,若每次测量时的条件不同,或测量仪器改变,或测量方法、条件改变,这样所进行的一系列测量叫做非等精度测量。非等精度测量的结果,其可靠程度自然也不相同。电工、电路实验中大多采用等精度测量。

2. 直接测量

在使用仪表进行测量时,对仪表的读数不需要经过任何运算就能直接表示测量所需的结果,称为直接测量。例如,用欧姆表测量电阻元件的电阻;用温度计测量温度;用电压表测量电压等。这种方法广泛应用于工程中。

3. 间接测量

先用直接测量方法测量几个与被测量有确切函数关系的物理量,然后通过函数关系式求出被测量的值,称为间接测量。例如用伏安法测量电阻时,先用电压表测出电阻两端的电压、用电流表测出流过电阻的电流,然后利用欧姆定律计算电阻。这种方法多在实验室中使用。

4. 组合测量

在直接测量和间接测量所得到的实验数据的基础上,通过联立求解各量之间的函数关系方程式得到被测量的数值,称为组合测量。例如电阻温度系数 α 和 β 的测量。电阻值 R 与温度 t 之间的关系为

$$R = R_{20} [1 + \alpha(t - 20) + \beta(t - 20)^2]$$

式中, t 为电阻温度的摄氏度数; R_{20} 是 20°C 时的电阻值; α 、 β 是待求的电阻温度系数。若分别测量 20°C 的电阻值 R_{20} 和温度 t_1 、 t_2 及其电阻值 R_{t_1} 和 R_{t_2} ,联立求解下列方程:

$$\begin{cases} R_{t_1} = R_{20} [1 + \alpha(t_1 - 20) + \beta(t_1 - 20)^2] \\ R_{t_2} = R_{20} [1 + \alpha(t_2 - 20) + \beta(t_2 - 20)^2] \end{cases}$$

即可得到电阻的温度系数 α 和 β 。

5. 直读式测量

根据测量仪表的指示值直接读出被测量的数值,这种方法称为直读式测量。例如,用电流表测电流,用温度计测温度等。这种方法简便、快捷,被广泛应用,但仪表的准确度限制了测量的准确度。

6. 零位式测量(或称补偿式测量、平衡式测量)

测量时,用指零仪的零位指示检测、测量系统的平衡状态,在测量系统达到平衡时,用已知的基准量决定未知量的测量方法。这种方法实质上是将被测量与已知标准量在仪器中进行比较,从而获得被测量的数值。测量时,要调整标准量,即进行平衡操作,直到被测量与标准量相等,即指零仪回零。例如用电桥测电阻。

7. 微差式测量

这种方法是先将被测量 x 与已知标准量 N 进行比较,得到差值 $\Delta x = x - N$,然后用高灵敏度的直读式仪表测量微差 Δx ,可得到被测量 $x = N + \Delta x$ 。由于微差 $\Delta x \ll N$, $\Delta x \ll x$,虽然直读式仪表测量 Δx 时,精度可能不高,但测量 x 的精度仍然很高。

1.1.3 测量方法的选择原则

在实验中,测量方法的选择应遵循以下原则:

- (1) 足够的灵敏度;
- (2) 适当的准确度;
- (3) 对被测电路状态的影响要尽量小;
- (4) 测量简便可靠;
- (5) 测量前的准备工作和测量后的数据处理尽可能简便;
- (6) 对被测量性质作深入了解,如参数是否线性、数量级如何、对波形和频率有无要求、对测量过程的稳定性有无要求等。

根据以上要求,合理选择测量方法及有关的仪器仪表和设备。

1.2 有效数字及其运算

实验中总要记录很多数据并进行计算,但是记录时应取几位、运算后应保留几位,这是实验数据处理的重要问题,为此引入了有效数字的概念。

1.2.1 有效数字的定义及有效位数的认定

1. 有效数字的定义

测量时得到的准确读数，再加上一位可疑读数，统称为测量结果的有效数字。由此可见，有效数字的最后一位数字是不确定的。有效数字的多少表示了测量所能达到的准确程度，这与所用的测量工具有关。即当被测物理量和测量仪器选定后，测量值的有效数字位数就已经确定了。例如，某电流表的读数为 78.3 mA，电子秒表测量的时间值为 36.24 s，它们的最后一位就是可疑读数，也叫做欠准数。虽然最后一位欠准可疑，但不是无中生有，而是有根有据有意义的。显然有一位欠准数字，会使测量值更接近真实值，更能反映客观实际。因此，测量值保留到这一位是合理的，即使估计位是 0，也不能舍去。测量结果应当而且只能保留一位欠准数字。将测量数据有效数字的个数定义为有效位数。例如，78.3 mA 称为三位有效数字；36.24 s 称为四位有效数字。

2. 有效位数的认定

(1) 有效数字的位数与小数点的位置无关。如 4.76 mA 与 0.004 76 A 都是三位有效数字，可见，由大单位转换为小单位或由小单位转换为大单位时，原数的有效位数不变。

(2) 以第一个非零数字为标准，它左边的 0 不是有效数字，而它右边的 0 是有效数字。如 0.0157 是三位有效数字，0.1570 是四位有效数字。可见，作为有效数字的“0”不可省略不写。例如，不能将 15.70 mA 写成 15.7 mA，因为它们的准确程度不同。

在计算式中，对常数 e 、 π 、 $\sqrt{2}$ 等的有效数字位数，可认为是无限的，在计算中可根据需要取位。

1.2.2 有效数字的运算规则

有效数字在进行运算时，参加运算的分量可能很多。各分量数值的大小和有效数字的位数也不相同，而且在运算过程中，有效数字的位数会越乘越多，除不尽时有效数字的位数也无止境。即便是使用计算器，也会遇到中间数的取位问题以及如何更简洁的问题。测量结果的有效位数，只能允许保留一位欠准确数字，直接测量是如此，间接测量的计算也是如此。根据这一要求，为了达到：① 不因计算而引进误差，影响结果；② 尽量简洁，不作徒劳的运算，简化有效位数的运算，约定下列规则：

1. 加法或减法运算

$$276.\underline{1} + 2.66\underline{8} = 278.\underline{768} = 278.\underline{8}$$

$$56.\underline{72} - 2.23\underline{8} = 54.\underline{482} = 54.\underline{48}$$

大量计算表明，几个数相加减时，其运算后的末位，应当和参加运算各数中最先出现的可疑位一致。即最后运算结果的可疑数字与各数值中最先出现的可疑数字对齐。可见，若干个直接测量值进行加法或减法计算时，选用精度相同的仪器最为合理。

2. 乘法和除法运算

$$683.72 \times 21.6 = 14\,768.352 = 1.48 \times 10^4$$

$$2\,569.4 \div 19.5 = 131.7641\cdots = 132$$

由此得出结论：几个有效数字进行乘法或除法运算时，运算结果的有效数字的位数与参与运算的各个量中有效数字的位数最少者相同。可见，若干个直接测量值进行乘法或除法计算时，应按照有效位数相同的原则选择不同精度的仪器最为合理。

3. 乘方和开方运算

$$(4.256)^2 = 18.113\,536 = 18.11$$

$$\sqrt{32.8} = 5.727\,13 = 5.73$$

由此可见，乘方和开方运算的有效数字的位数与其底数的有效数字的位数相同。

4. 三角函数、对数运算

对于这类运算，可将函数的自变量末位数变化 1，两个运算结果产生差异的最高位就是应保留的有效位的最后一位。

例如：已知 $x = 43^\circ 26'$ ，求 $\sin x = ?$

由计算器（或查表）可知：

$$\sin 43^\circ 26' = 0.687\,510\,098\,5$$

$$\sin 43^\circ 27' = 0.687\,721\,305\,1$$

由此可知应取： $\sin 43^\circ 26' = 0.687\,5$

1.2.3 有效位数的修约

根据有效数字的运算规则，为使计算简化，在不影响最后结果应保留有效数字的位数（或欠准确数字的位置）的前提下，可以在运算前、后对数据进行修约，其修约的原则是“四舍六入五看右左”。所谓“四舍”，就是在拟舍弃的数字中，若左边第一个数字小于 5 时，则舍去，即所拟保留的末位数字不变。“六入”，就是在拟舍弃的数字中，若左边第一个数字大于 5 时，则进一，即所拟保留的末位数字加一。“五看右左”，就是有效数字末位的后面一位为 5 时，要先看 5 的后面，若为非零的数则“入”，若为零则往左看，拟保留的末位数为奇数则“入”，为偶数则“舍”。中间运算过程较结果要多保留一位有效数字。

还应注意，拟舍去的数字若为两位以上的数字，不能连续地多次修约，而只能按上述规则一次修约得出结果来。

例如，要求下面的每个数都保留四位有效数字。

$$25.6732 \rightarrow 25.67$$

$$345.67 \rightarrow 345.7$$

$$132.351 \rightarrow 132.4$$

$$645.85 \rightarrow 645.8$$

这样处理可使“舍”和“入”的机会均等，避免在处理较多数据时因入多舍少而带来的

系统误差。

值得指出的是，在修约最后结果的不确定度时，为确保结果的可靠性，往往根据实际情况执行“宁大勿小”的原则，即对不确定度来说，采取“只入不舍”的原则。比如，对于 $u(x_1) = 0.032 \text{ mA}$ 和 $u(x_2) = 0.038 \text{ mA}$ ，都应收为 $u(x) = 0.04 \text{ mA}$ 。

1.2.4 数字的科学计数法

根据有效位数的规定，在十进制单位换算中，其测量数据的有效位数不变。如用电流表测量某一支路的电流为 2.35 mA ，若以安为单位，可以表示成 0.00235 A ，这个数仍然是三位有效数字。为了避免单位换算中位数很多时写一长串，或计数时出现错位，常常采用科学计数法。通常是在小数点前保留 1 位整数，写成 $a \times 10^n$ 的形式（其中 $1 \leq a < 10$ ）， n 称为该数的数量级。例如：

$$3.7 \mu\text{A} = 3.7 \times 10^{-3} \text{ mA} = 3.7 \times 10^{-6} \text{ A}$$

$$6721 \text{ kV} = 6.721 \times 10^3 \text{ kV} = 6.721 \times 10^6 \text{ V}$$

实验中，最后结果要求采用科学计数法表示。

1.3 测量误差的表示方法及分类

任何测量仪器的测得值都不可能完全准确地等于被测量的真值。在实际测量过程中，由于人们对于客观事物认识的局限性、测量工具的不准确、测量手段的不完善、环境因素的影响或测量工作中的疏忽等，都会使测量结果与被测量的真值在数值上存在差异，这个差异称为测量误差。随着科学技术的不断发展，对测量精确度的要求越来越高。测量工作的价值取决于测量的精确程度。当测量误差超过一定限度时，由测量工作和测量结果所得出的结论将是毫无意义的，甚至会给工作带来危害。对测量误差的控制成为衡量测量技术水平乃至科学技术水平的一个重要方面。但是，由于误差存在的必然性和普遍性，人们只能将它控制在尽量小的范围，而不能完全消除它。

实验证明，无论选用何种测量仪器，也无论采用哪种测量方法，误差总是存在的。换句话说，只要有测量，就必然有测量结果，而有测量结果，就必然存在误差。误差自始至终存在于一切科学实验和测量的全过程中，不含误差的测量结果是不存在的，这就是误差公理。

1.3.1 研究误差的目的

研究误差的目的，归纳起来有以下几个方面：

(1) 正确认识误差产生的原因和性质，以减少测量误差。

(2) 正确处理测量数据，以得到更加接近真值的结果。

(3) 合理地制订测量方案，组织科学实验，正确地选择测量方法和测量仪器，以便在条

件允许的情况下得到理想的测量结果。

(4) 在设计仪器时, 由于理论不完善, 计算时采用近似公式, 忽略了微小因素的作用, 从而导致了仪器原理设计误差, 它必然影响测量的准确性。因此设计时必须要用误差理论进行分析并适当控制这些误差因素, 使仪器的测量准确程度达到设计要求。

可见, 误差理论已经成为从事测量技术和仪器设计、制造技术的科技人员所必不可少的重要理论知识, 它同任何其他科学理论一样, 将随着科学技术的发展进一步得到发展和完善。因此, 正确认识与处理测量误差是十分重要的。

1.3.2 测量误差的表示方法

1. 绝对误差

绝对误差定义为被测量的示值 A_x 与真值 A_0 之差, 用 ΔA 表示, 即

$$\Delta A = A_x - A_0 \quad (1.3.1)$$

式中 ΔA ——绝对误差;

A_x ——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 ——被测量的真值, 由于真值的不可知性, 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。绝对误差的负值称为修正值, 也称补值, 一般用 C 表示, 即

$$C = -\Delta A = A_0 - A_x \quad (1.3.2)$$

测量仪器的修正值一般是通过计量部门检定给出。不难看出, 测量时利用示值和已知的修正值相加就可获得相对真值, 即实际值。

2. 相对误差

相对误差定义为绝对误差与被测量真值之比的百分数, 用 γ 表示, 即

$$\gamma = \frac{\Delta A}{A_0} \times 100\% \quad (1.3.3)$$

式中, A_0 也常用约定真值和相对真值代替。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

$$\gamma_x = \frac{\Delta A}{A_x} \times 100\% \quad (1.3.4)$$

应注意, 在误差比较小时, γ 与 γ_x 相差不大, 无需区别; 但在误差比较大时, 两者相差悬殊, 不能混淆。为了区别, 通常把 γ 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, 一般保留两位有效数字。

在实际测量中, 通常用相对误差表示测量的准确程度, 因为它方便、直观。仪表指示值越大, 相对误差越小, 测量的准确度越高。

3. 引用误差

引用误差定义为绝对误差 ΔA 与测量仪表量程 A_m 之比的百分数, 用 γ_n 表示, 即

$$\gamma_n = \frac{\Delta A}{A_m} \times 100\% \quad (1.3.5)$$

由于测量仪表各指示(刻度)值的绝对误差有大有小、有正有负, 所以各刻度处的引用误差不同。定义全标尺上绝对误差的最大绝对值 $|\Delta A|_m$ 与测量仪表量程 A_m 之比的百分数为最大引用误差(也称为仪表的基本误差), 用 γ_{nm} 表示, 即

$$\gamma_{nm} = \frac{|\Delta A|_m}{A_m} \times 100\% \quad (1.3.6)$$

最大引用误差是仪表在正常工作条件下不应超过的最大相对误差(绝对值)。GB776—76《电测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 共七级, 它们的基本误差不能超过仪表准确度等级指数的百分数, 即

$$\gamma_{nm} \leq a\% \quad (1.3.7)$$

不难看出, 电工测量仪表在使用时所产生的最大可能误差可由下式求出:

$$\text{最大绝对误差} \quad \Delta A_m = \pm A_m \times a\% \quad (1.3.8)$$

$$\text{最大相对误差} \quad \gamma_x = \pm (A_m / A_x) \times a\% \quad (1.3.9)$$

1.3.3 误差的分类及减小误差的方法

误差处理应视其产生条件的不同, 采用不同的处理方法。这首先需要了解各种不同类型误差的特点、产生的原因、服从的规律, 从而有针对性地解决问题, 将误差减小甚至消除。

根据误差的性质和产生的原因, 可分为系统误差、随机误差和粗大误差。

(1.3.1) 系统误差

系统误差是指在一定条件下多次测量的结果总是向同一方向偏离, 其数值一定或按一定规律变化。系统误差的特征是具有一定的规律性, 可采取相应的措施削减或消除它。系统误差的来源有以下几个方面:

① 仪器误差。它是由于仪器自身的缺陷或没有按规定条件使用仪器而造成的误差。例如仪器安装不符合要求、环境条件未达到仪器的要求、仪器零点不准确等。

② 理论误差。它是由于测量所依据的理论公式本身的近似性, 或实验条件不能达到理论公式所规定的要求, 或测量方法等带来的误差。

③ 人身误差。它是由于实验者本人心理或生理特点造成的误差。

除上述几种系统误差来源之外, 还有其他的系统误差来源。例如实验装置、环境等因素。

在任何一项实验工作和具体测量中，必须要想尽一切办法，最大限度地消除或减小一切可能存在的系统误差，或者对测量结果进行修正。需要改变实验条件和实验方法，并反复对测量结果进行对比，才能发现系统误差。系统误差的消除或减小是一个比较复杂的问题，没有固定不变的方法，要具体问题具体分析，各个击破。产生系统误差的原因可能不止一个，一般应找出影响测量的主要因素，有针对性地消除或减小系统误差。以下介绍几种常用的方法。

① 检定修正法：指将仪器、量具送计量部门检验取得修正值，以便对某一物理量测量后进行修正的一种方法。

② 替代法：指同一测量装置测定待测量后，在测量条件不变的情况下，用一个已知标准量替换被测量来减小系统误差的一种方法。例如，为了消除用伏安法测电阻时电压表、电流表的内阻引起的误差，可以采用这种方法。

③ 异号法：指对实验时在两次测量中出现符号相反的误差，采取平均值后消除的一种方法。例如，在外界磁场下，仪表读数会产生一个附加误差，若将仪表转动 180° 再进行一次测量，外磁场将对读数产生相反的影响，引起负的附加误差，将两次测量结果取平均，正负误差可以抵消，从而可以减小系统误差。

2. 随机误差（也称偶然误差）

在实际测量条件下，多次测量同一被测量时，误差的符号时正时负，误差的绝对值时大时小，以不可确定的方式变化着的误差叫做随机误差。当测量次数增多时，随机误差就显示出明显的规律性。实践和理论都已证明，随机误差服从一定的统计规律——正态分布，如图 1.3.1 所示。其特点：

① 单峰性：绝对值小的误差出现的概率比绝对值大的误差出现的概率大。

② 对称性：绝对值相等的正负误差出现的概率相同。

③ 有界性：绝对值很大的误差出现的概率趋于零。

④ 抵偿性：误差的算术平均值随着测量次数的增加而趋于零。

因此，增加测量次数可以减小随机误差，但不能完全消除。在实际测量中，常用多次测量的算术平均值代替真值来减小随机误差。

引起随机误差的原因很多，主要有人的感官的灵敏度、仪器精密度的限制、周围环境因素的干扰等。例如，仪器显示数值的估计读数位偏大或偏小；仪器调节平衡时，平衡点确定不准；空间电磁场的干扰、电源电压的波动引起测量的变化等。

当然，由于测量者过失，如实验方法不合理、用错仪器、操作不当、读错数值或记错数据等引起的误差，不属于随机误差。

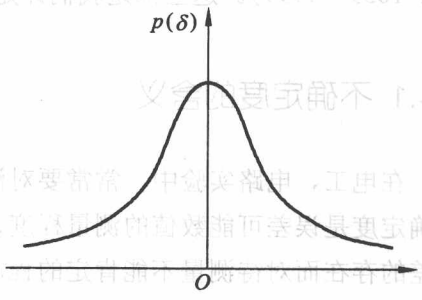


图 1.3.1 随机误差分布图

（横坐标表示绝对误差，纵坐标表示某误差出现的概率）

3. 粗大误差

测量结果明显超出规定条件下预期值的误差称为粗大误差。这是在实验过程中,由于某种差错使得测量值明显偏离正常测量结果的误差。例如实验方法不合理、用错仪器、操作不当、读错数值或记错数据,或者环境条件突然变化而引起测量值的错误等。粗大误差是一种人为的过失误差,不属于测量误差。只要测量者秉着严肃认真的态度,随时注意实验条件对实验原理要求的满足程度,实验装置、实验电路的正确性,观测方法是否正确,仪器操作是否正确;并认真、细致读取数据等,过失误差是可以避免的。另外,在实验数据处理中,可按误差理论来剔除异常数据,消除粗大误差。

1.4 测量不确定度及测量结果的表示

测量的最终目的,不但要获得待测量在测量条件下的近真值,而且还要对近真值的可靠性做出评定(即指出误差范围),这就要求我们必须掌握不确定度的有关概念。下面将结合测量结果的评定,对不确定度的概念、分类、合成等问题进行讨论。

1993年,国际标准化组织、国际电工委员会、国际计量局等7个国际组织联合发布了《测量不确定度表示指南》,我国也制定了《测量不确定度评定与表示指南》的国家技术规范(JJF 1059—1999)。这些都是我们评定测量结果的不确定度的理论依据和计算规范。

1.4.1 不确定度的含义

在电工、电路实验中,常常要对测量的结果做出综合的评定,故采用不确定度的概念。不确定度是误差可能数值的测量程度,表征所得测量结果代表待测量的程度,也就是因测量误差的存在而对待测量不能肯定的程度,因而是测量质量的表征,用不确定度能够对测量数据做出比较合理的评定。

对一个实验的具体数据来说,不确定度是指测量值(近真值)附近的一个范围,测量值与真值之差(误差)可能落于其中。不确定度小,测量结果的可依赖程度高;不确定度大,测量结果的可依赖程度低。

在实验和测量工作中,不确定度一词近似于不确知、不明确、不可靠、有质疑,是作为估计而言的。因为误差是未知的,不可能用指出误差的方法去说明可依赖程度,而只能用误差的某种可能的数值去说明可依赖程度,所以不确定度更能表示测量结果的性质和测量的质量。用不确定度评定测量结果的误差,其中包含了各种来源不同的误差对测量结果的影响,而它们的计算又反映了这些误差所服从的分布规律,这就更准确地表述了测量结果的可靠程度,因而有必要采用不确定度的概念。

对测量不确定度的评定,常以估计标准偏差表示其大小,这时称其为标准不确定度。