



普通高等教育“十三五”规划教材
电工电子基础课程规划教材

电路实验与仿真

■ 余佩琼 主 编

■ 吴丽丽 孙惠英 李剑清 吴根忠 编

■ 南余荣 主 审



中国工信出版集团



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY
<http://www.phei.com.cn>

普通高等教育“十三五”规划教材
电工电子基础课程规划教材

电路实验与仿真

余佩琼 主编

吴丽丽 孙惠英 李剑清 吴根忠 编

南余荣 主审



电子工业出版社
Publishing House of Electronics Industry
北京·BEIJING

内 容 简 介

本书根据教育部电工电子基础课程教学指导委员会制定的课程教学基本要求,结合多年来实验教学改革及实验室建设经验编写。全书共5章和1个附录,主要包括:电路实验基础知识、13个电路基础实验、计算机虚拟仿真实验平台 Multism13 及其在电路实验中的应用、7个虚拟仿真设计实验、6个可撕实验报告、电路实验装置使用介绍等,并提供配套电子课件、仿真实验参考设计方案、仿真程序代码等。

本书可作为高等学校本科电子、电气、计算机、自动化、机械等专业相关实验课程的教材,也可供相关领域的科技工作者学习参考。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

电路实验与仿真 / 余佩琼主编. — 北京: 电子工业出版社, 2016.6

ISBN 978-7-121-28941-5

I. ①电… II. ①余… III. ①电路理论—实验—高等学校—教材 ②电子电路—计算机仿真—实验—高等学校—教材 IV. ①TM13-33 ②TN702-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 120405 号

策划编辑: 王羽佳

责任编辑: 周宏敏

印 刷: 三河市双峰印刷装订有限公司

装 订: 三河市双峰印刷装订有限公司

出版发行: 电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编: 100036

开 本: 787×1092 1/16 印张: 11.5 字数: 340 千字

版 次: 2016 年 6 月第 1 版

印 次: 2016 年 6 月第 1 次印刷

印 数: 3 000 册 定价: 29.90 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题, 请向购买书店调换。若书店售缺, 请与本社发行部联系, 联系及邮购电话: (010) 88254888, 88258888。

质量投诉请发邮件至 zltts@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

本书咨询联系方式: (010) 88254535, wylj@phei.com.cn。

前 言

电路实验课程是电路课程的实践性环节, 为了加强电路实验的教学, 适应教学改革的要求, 我们根据教育部高等学校电工电子基础课程教学指导委员会制定的电路课程教学基本要求, 结合近年来在电路实验教学改革和实验室建设方面的经验和成果编写了本书。

本书内容共 5 章。第 1 章介绍电路测量的基础知识。第 2 章为实际操作内容, 主要是在电工技术实验装置上进行电路实验, 选编了 13 个基本电路操作实验, 使用时可根据专业和课时的要求进行选择。第 3 章介绍电路设计和仿真软件 Multisim13 的使用。第 4 章编写了 7 个仿真设计实验, 给学生提供了计算机仿真分析和设计训练, 为学生在后续的相关课程及电路实践创新活动中利用仿真工具进行更深入的电路分析和设计打下基础。由于实验学时所限, 仿真软件 Multisim13 的使用主要是学生自学, 教师引导学生利用课外时间完成仿真设计实验, 达到多层次电路实验教学的目的, 且虚实结合、虚实互补。第 5 章为与基础实验配套的 6 个可撕式电路实验报告, 方便学生撰写预习报告及实验总结报告。

本书向使用本书作为教材的教师提供配套电子课件、仿真实验参考设计方案、仿真程序代码等教学资源, 请登录华信教育资源网 (<http://www.hxedu.com.cn>) 免费注册下载。

由于实验学时和实验条件的限制, 实验内容不能面面俱到, 因此在编写教材中给予了适当的侧重和取舍。

由于编者水平有限, 本实验教程中难免有不当之处, 恳请读者批评指正。

编 者

2016 年 6 月

目 录

第 1 章 电路实验基础知识	1
1.1 测量误差	1
1.1.1 误差定义	1
1.1.2 测量误差的分类	2
1.1.3 误差的来源	3
1.1.4 系统误差的计算	4
1.1.5 系统误差的消除方法	5
1.2 实验数据的处理	7
1.2.1 有效数字	7
1.2.2 测量数据的记录	9
1.2.3 测量数据的整理	10
1.3 曲线拟合	11
1.3.1 一元线性回归	11
1.3.2 一元非线性回归	12
1.4 减小仪表测量误差的方法	13
1.4.1 仪表内阻引入的测量误差	13
1.4.2 减少仪表内阻引入的测量误差的方法	14
1.5 功率的测量	17
1.5.1 间接测量	17
1.5.2 直接测量	17
1.5.3 三相有功功率的测量	18
1.5.4 三相无功功率的测量	20
第 2 章 基础实验	24
2.1 实验一 电路元件伏安特性的测试	24
2.2 实验二 基尔霍夫定律与叠加定理的研究	28
2.3 实验三 戴维南定理的研究	31
2.4 实验四 受控源的实验研究	35
2.5 实验五 一阶电路过渡过程的研究	41
2.6 实验六 二阶电路过渡过程的研究	46
2.7 实验七 交流电路等效参数的测量	48
2.8 实验八 日光灯电路的测量及电路功率因数的提高	52
2.9 实验九 R 、 L 、 C 元件的频率特性研究	56
2.10 实验十 RLC 串联谐振电路的研究	58
2.11 实验十一 互感线圈电路参数的测定	62
2.12 实验十二 三相电路的设计与研究	66
2.13 实验十三 负阻抗变换器及其应用	70

第3章 Multisim13 在电路实验中的应用简介	77
3.1 概述	77
3.2 Multisim13 的基本功能	77
3.2.1 基本操作界面	77
3.2.2 操作命令	78
3.2.3 工具栏	81
3.3 常用虚拟仪器的使用说明	82
3.3.1 数字万用表	82
3.3.2 函数信号发生器	82
3.3.3 瓦特计	83
3.3.4 示波器	83
3.3.5 波特测试仪	85
3.3.6 测量探针	86
3.3.7 电流探针	87
3.4 Multisim13 仿真电路的创建	88
3.4.1 文件操作	88
3.4.2 元器件操作	88
3.4.3 电路图显示方式的设置	90
3.4.4 Multisim13 仿真实例	90
第4章 Multisim 仿真设计实验	94
4.1 实验十四 戴维南定理和诺顿定理的仿真设计研究	94
4.2 实验十五 动态电路的仿真研究	96
4.3 实验十六 谐振电路的仿真研究	102
4.4 实验十七 正弦稳态交流电路的仿真研究	107
4.5 实验十八 三相电路的仿真研究	109
4.6 实验十九 相序仪的仿真分析与设计	114
4.7 实验二十 无源滤波电路的仿真设计研究	117
第5章 实验报告	121
电路实验报告(一)	121
实验原始数据记录(一)	127
电路实验报告(二)	129
实验原始数据记录(二)	135
电路实验报告(三)	137
实验原始数据记录(三)	143
电路实验报告(四)	145
实验原始数据记录(四)	151
电路实验报告(五)	153
实验原始数据记录(五)	159
电路实验报告(六)	161
实验原始数据记录(六)	167
附录A 电路实验装置使用介绍	169

第1章 电路实验基础知识

1.1 测量误差

实验中要测量一系列的物理量,在一定时间、空间条件下,这些被测量的真实值称为真值,是客观存在的确定数值。测量值和真值往往不完全符合,两者的差异程度用测量误差来表示。测量误差与所用的测量设备和测量方法有关,正确使用测量设备、选用合适的测量方法以及正确处理测试的数据,可以获得高准确度的测量结果。反之,测量误差会加大,甚至造成错误的测量结果。

1.1.1 误差定义

1. 绝对误差

被测量的给出值(A_x)与它的真值(A_0)之间的差值称为绝对误差。绝对误差(Δx)可表示为

$$\Delta x = A_x - A_0 \quad (1-1-1)$$

测得值 A_x 可以是仪器的示值或量具的标称值。被测量的真值 A_0 虽然是客观存在的,但一般无法确切求得,通常只能尽量逼近它。所以,在实际测量中常用高两级及以上的标准仪器或计量器具作标准,将其测得的值 A 代表真值 A_0 , A 称为被测量的实际值。于是可得到绝对误差的实际计算公式为

$$\Delta x = A_x - A \quad (1-1-2)$$

除上述的绝对误差外,在实际测量中还常用到修正值这一概念,它与绝对误差的数值相等、符号相反,即修正值:

$$\alpha = -\Delta x = A - A_x \quad (1-1-3)$$

在某些高准确度的仪器仪表中,常用表格、曲线或公式的形式给出修正值。因此,当知道了测得值及相应的修正值 α 以后,即可求出被测量的真值 A :

$$A = A_x + \alpha \quad (1-1-4)$$

在某些自动测量仪器中,修正值可以编成程序预先存储在仪器中,在测量时仪器可以对测量结果自动进行校正。

2. 相对误差

绝对误差的表示方法有其局限性,因为它不能确切反映测量结果的准确程度。例如,测量100A电流时,绝对误差为2A;测量2A电流时,绝对误差为0.1A。从绝对误差衡量,前者的误差大,后者的误差小。但绝不能由此得出后者的测量准确程度高的结论。由此,又引出了相对误差或误差率的概念,定义如下:

$$\gamma = \frac{\Delta x}{A} \times 100\% \quad (1-1-5)$$

在误差的实际计算中,常用测量值 A_x 代替实际值 A ,从而得到相对误差的近似公式:

$$\gamma \approx \frac{\Delta x}{A_x} \times 100\% \quad (1-1-6)$$

相对误差是有大小和方向但无量纲的量。因它能确切反映测量的准确程度，因此，在实际测量中一般用相对误差来评价测量结果。

例 1-1 电流表测量 100A 电流时，绝对误差为 2A；测量 2A 电流时，绝对误差为 0.1A。求测量结果表明的示值相对误差。

解：由式 (1-1-6)，求得测量 100A 电流时，相对误差为

$$\gamma_1 \approx \frac{2}{100} \times 100\% = 2\%$$

测量 2A 电流时，相对误差为

$$\gamma_2 \approx \frac{0.1}{2} \times 100\% = 5\%$$

显然，测量 100A 电流时的准确度高。

3. 引用误差

引用误差是一种简化的和实用方便的相对误差，常在多挡和连续刻度的仪器仪表中应用。这类仪器仪表可测范围不是一个点，而是一个量程。这时若按式 (1-1-5) 或式 (1-1-6) 计算，由于分母的改变，所以计算很烦琐。为了计算和划分准确度等级的方便，通常取该仪器仪表量程中的测量上限（即满刻度值）作为分母。由此引出定义：

$$\gamma_n = \frac{\Delta x_{\max}}{A_m} \times 100\% \quad (1-1-7)$$

式中， A_m 为仪表的量程（即标尺刻度的最大值）， $\Delta x_{\max}$ 为仪表读数的最大绝对误差。

通常电工仪表准确度等级分为 0.1、0.2、0.5、1.0、1.5、2.5 和 5.0 七个等级。若某仪表的准确度等级为 S 级，则由该仪表测量的绝对误差一定满足下式：

$$\Delta x \leq A_m \cdot S\% \quad (1-1-8)$$

测量的相对误差

$$\gamma \leq \frac{A_m \cdot S\%}{A_x} \quad (1-1-9)$$

由式 (1-1-9) 可见，当仪表的等级 S 选定后，被测量的 A_x 越接近 A_m ，则相对误差就越小。故在测量中应合理选择仪表的量程，使指针工作在满刻度的 2/3 以上的区域则比较合理。

1.1.2 测量误差的分类

根据测量误差的性质和特点，可分为系统误差、随机误差和疏忽误差三大类。

1. 系统误差

在相同条件下多次测量同一量时，误差的绝对值和符号保持不变，或在条件改变时，按某种确定规律变化的误差，称为系统误差。例如，标准器量值的不准确、仪器示值的不准确而引起的误差。

在一次测量中，如果系统误差很小，那么测量结果就可以是相当准确的。测量的准确度用系统误差来表征，系统误差越小，则测量的准确度就越高。如果存在着某项系统误差而人们却不知道，则是危险的，因为不一定能通过对测量数据的统计处理来发现它是否存在。特别是系统恒差，即当实验条件变化仍保持恒定的系统误差，仅凭数据的统计处理是既不能发现、也不能消除的。

2. 随机误差

随机误差又称为偶然误差。在相同的测量条件下,对同一个量重复进行多次测量时,误差的绝对值和符号均发生变化,其值时大时小,其符号时正时负,没有确定的变化规律,也不能事先预定,但是具有抵偿性的误差。

随机误差是由测量环境中电磁场的微变、热起伏、空气扰动、大地微震、测量人员感觉器官的各种无规律的微小变化等多种因素综合影响所造成的。因此,在测量过程中,尽管测量条件“不变”,若仔细地进行多次重复测量,就能发现各次测量结果不完全一样,其原因就是由于各种随机因素造成的。随机误差只有在大量重复的精密测量中才能发现,它是按统计学规律分布的。通过对测量数据进行统计处理可以减小真值,但不能用实验的方法加以消除。

随机误差决定了测量的精密度。随机误差愈小,测量结果的精密度就愈高。在电路实验中,由于测量装置没有足够的灵敏度,一般不易发现。

3. 疏忽误差

测量中不应有的错误所造成的误差,如读错、记错、误操作或不正确的测量等造成的误差。含有疏忽误差的测量称为坏值,应予以剔除。

1.1.3 误差的来源

1. 基本误差

基本误差是由测量设备本身缺陷、测量仪器不准等引起的误差。例如,比较法中由于零仪器的灵敏度不够所产生的误差。

2. 附加误差

附加误差是由测量仪表放置和使用不当或测量环境的变化等原因所造成的误差。例如,电表零点不准引起的误差;测量环境的温度、湿度、电源电压、频率等的变化所带来的误差。

3. 方法误差

方法误差也称理论误差,是由测量时使用的方法不完善、所依据的理论不严密或采用了某些近似公式等原因所造成的误差。例如,用图 1-1-1 所示电路测量电阻元件的电压和电流,就存在方法误差。在图 1-1-1(a)中,电流表测出的电流,除通过电阻的电流外,还包含通过电压表的电流。在图 1-1-1(b)中,电压表测出的电压,除电阻两端的电压外,还包含电流表两端的电压。只有当图 1-1-1(a)中电压表的内阻远大于电阻 R ,或当图 1-1-1(b)中电流表的内阻远小于电阻 R 时,由测量方法所造成的误差才比较小,可以忽略。

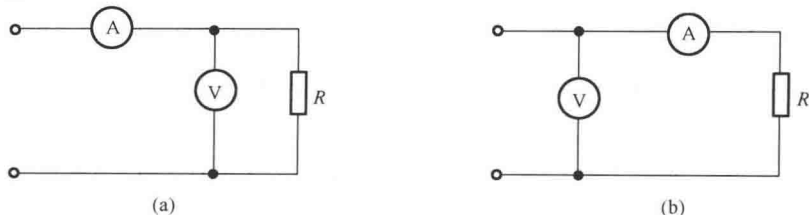


图 1-1-1 电压电流测量电路

4. 个人误差

个人误差是由测量人员的感觉器官不完善和不正确的测量习惯所导致的误差。例如,用耳机来判

断交流电桥是否达到平衡状态, 由于人耳最小分辨能力的限制, 可能在电桥还没有完全平衡时, 就误认为已经平衡, 从而造成测量误差。

1.1.4 系统误差的计算

在电路与电磁场实验中, 由于所用仪器仪表和度量器的灵敏度比较低, 这时主要考虑系统误差, 随机误差相对来说很小, 可以忽略。

1. 直接测量中的系统误差

在直接测量中, 主要是仪器仪表本身的基本误差造成测量结果的系统误差。

测量结果的绝对误差为

$$\Delta x = \gamma_0 \cdot A_m \quad (1-1-10)$$

式中, γ_0 为仪表的准确度等级, A_m 为仪表量程。

测量结果的相对误差为

$$\frac{\Delta x}{A_x} = \frac{A_m \times \gamma_0}{A_x} \quad (1-1-11)$$

式中, A_x 为仪表读数。

2. 间接测量中的系统误差

在间接测量中, 如果一个未知量 A_x 与某几个量 ($A_1, A_2, A_3, \dots, A_n$) 间有确切的函数关系, 设为

$$A_x = f(A_1, A_2, A_3, \dots, A_n) \quad (1-1-12)$$

通过直接测量 $A_1, A_2, A_3, \dots, A_n$ 的值, 再按式 (1-1-12) 求出未知量 A_x 的测量方法叫间接测量。将上式按泰勒级数展开, 并略去高阶导数, 间接测量结果 A_x 的绝对误差为

$$\Delta x = \frac{\partial f}{\partial A_1} \Delta_1 + \frac{\partial f}{\partial A_2} \Delta_2 + \dots + \frac{\partial f}{\partial A_n} \Delta_n \quad (1-1-13)$$

而 A_x 的相对误差为

$$\frac{\Delta x}{A_x} = \frac{\partial f}{\partial A_1} \frac{\Delta_1}{A_x} + \frac{\partial f}{\partial A_2} \frac{\Delta_2}{A_x} + \dots + \frac{\partial f}{\partial A_n} \frac{\Delta_n}{A_x} \quad (1-1-14)$$

式中, $\Delta_1, \Delta_2, \dots, \Delta_n$ 分别代表 $A_1, A_2, \dots, A_n$ 各测量值的绝对误差, 其值可正可负。按最不利情况考虑时, A_x 的相对误差应取绝对值之和, 故

$$\frac{\Delta x}{A_x} = \pm \left[\left| \frac{\partial f}{\partial A_1} \frac{\Delta_1}{A_x} \right| + \left| \frac{\partial f}{\partial A_2} \frac{\Delta_2}{A_x} \right| + \dots + \left| \frac{\partial f}{\partial A_n} \frac{\Delta_n}{A_x} \right| \right] \quad (1-1-15)$$

设被测量值 A_x 与直接测量结果 A_1, A_2 的函数关系为 $A_x = A_1 \pm A_2$, 由于 $\frac{\partial f}{\partial A_1} = \frac{\partial f}{\partial A_2} = 1$, 故被测量值 A_x 的相对误差为

$$\frac{\Delta x}{A_x} = \pm \frac{|A_1| + |A_2|}{A_1 \pm A_2} \quad (1-1-16)$$

由式 (1-1-16) 可以看出, 当 $A_x = A_1 - A_2$ 且 A_1 与 A_2 值很接近时, 将出现很大的间接测量误差。故在间接测量中应当尽量避免求两个读数差的计算。

1.1.5 系统误差的消除方法

产生系统误差的原因多种多样,因此消除系统误差只能针对具体的测量目标。首先分析产生系统误差的可能来源,然后再考虑在测量过程中采取什么具体措施借以消除或减小系统误差。下面介绍一些消除系统误差的常用方法。

1. 消除产生系统误差的来源

这是消除或减弱系统误差的最有效方法。它要求实验者对整个测量过程要有一个全面仔细的分析,弄清楚可能产生系统误差的各种因素,然后在测量前从根源上加以消除。现举几个实例来说明。

(1) 为了防止调整误差,测量前要正确调整好仪器,如仪表的零位、检流计的水平位置等。

(2) 为了防止仪器之间的相互干扰,要合理布置仪器的安放位置。

(3) 为了避免周围电磁场及有害震动的影响,必要时可采用屏蔽或减震措施。

(4) 为了避免仪器使用不当,在使用前要查阅有关技术资料,以保证仪器仪表在规定的正常条件下工作,如使用频率范围、电源电压波形、接地方法等。

(5) 为了减小测试人员主观因素造成的系统误差,除注意提高每个人员的素质以外,还可以改善设备条件,如使用数字式仪器常可避免测试者的读数误差。

2. 用修正方法消除系统误差

(1) 由仪表基本误差所引起的系统误差,可引入修正值加以消除。仪表的修正值是用更高准确度等级的仪表和度量器通过检定和校准来获得的。在某些准确度较高的仪器仪表中,常附有用曲线或表格形式给出的修正值。

(2) 由测量方法所引起的系统误差,可以通过理论计算或实验方法确定它的大小和符号,取其反号值作为修正值加在相应的测量结果上,则可消除测量方法引起的系统误差。

(3) 由测量环境的条件变化,如温度、湿度、频率、电源电压等所引起的系统误差,也可以通过实验方法和理论计算作出修正值曲线或表格,在测量时根据具体的环境条件,对测量数据引入修正值。

3. 应用测量技术消除系统误差

1) 替代法(置换法)

替代法是在测量条件不变的情况下,用一个数值已知且可调的标准量来代替被测量,并调节标准量使仪器的示值不变。这时,被测量就等于标准量的数值。由于在两次测量过程中仪器的状态和示值都不变,所以由仪器所引起的定值系统误差将被消除。

例如,用替代法在电桥上测量电阻,如图 1-1-2 所示。测量时,先将开关 S 接在位置 a,使被测电阻 R_x 接入电桥,调节桥臂 R 使电桥平衡,得被测电阻阻值为

$$R_x = \frac{R_1}{R_2} R \quad (1-1-17)$$

然后将开关 S 接在位置 b,使可变的标准电阻 R_N 接入电桥,保持桥臂 R_1 、 R_2 和 R 的参数不变,调节 R_N 的大小使电桥平衡,这时有

$$R_N = \frac{R_1}{R_2} R \quad (1-1-18)$$

考虑到电桥参数 R_1 、 R_2 和 R 在两次测量时是相同的,所以

$$R_x = R_N \quad (1-1-19)$$

由于上式不包含桥臂参数,从而消除了由它们引起的误差。这时测量误差主要取决于标准电阻 R_N 的准确程度。

2) 零示法

零示法是在测量中使被测量与标准量达到相互平衡,以使指示仪表示零的一种比较测量法。这种测量方法可以消除指示仪表不准所造成的系统误差。

例如,图 1-1-3 所示电路是用零示法测量电压的实例。图中 E_N 是标准电池, R_1 与 R_2 组成标准可调分压器, G 是检流计,测量时改变 R_1 与 R_2 的分压比,当标准电压 U_N 与被测电压 U_x 平衡时,检流计 G 将示零。这时,被测量电压的值为

$$U_x = U_N = \frac{R_2}{R_1 + R_2} E_N \quad (1-1-20)$$

在测量过程中,检流计只判断有无电流,而不是用来测量电流的,故检流计的准确度对测量结果没有影响。这时,测量误差主要取决于检流计的灵敏度、标准电池和标准分压器的准确度。

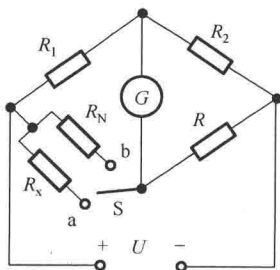


图 1-1-2 替代法测电阻

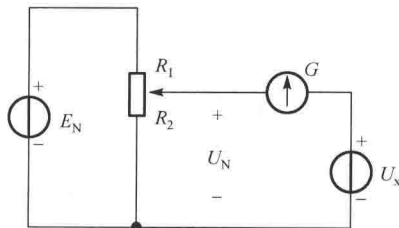


图 1-1-3 零示法测电压

3) 微差法

前面所述的零示法需要连续可调的标准电压,但在实际测量中不一定能实现。这时只要求标准量与被测量相差微小,那么它们的相互抵消作用也会减弱指示仪表的误差对测量结果的影响。

设被测量为 A_x , 标准量为 B_N , 被测量与标准量的微差为

$$\delta = A_x - B_N \quad (1-1-21)$$

式中, δ 的数值可由指示仪表读出。根据上式,被测量 A_x 的绝对误差为

$$\Delta A_x = \Delta B_N + \delta \quad (1-1-22)$$

被测量 A_x 的相对误差为

$$\frac{\Delta A_x}{A_x} = \frac{\Delta B_N}{A_x} + \frac{\Delta \delta}{A_x} = \frac{\Delta B_N}{B_N + \delta} + \frac{\delta}{A_x} \frac{\Delta \delta}{\delta} \quad (1-1-23)$$

根据微差法, A_x 与 B_N 在数值上非常接近,所以 $\delta \ll B_N$, $\delta \ll A_x$, 由此可得测量误差为

$$\frac{\Delta A_x}{A_x} \approx \frac{\Delta B_N}{B_N} + \frac{\delta}{A_x} \frac{\Delta \delta}{\delta} \quad (1-1-24)$$

由式 (1-1-24) 可见,由于 $\delta \ll A_x$, 指示仪表的基本误差 $\Delta \delta / \delta$ 对测量结果的影响被大大削弱,故微差法的测量误差主要取决于标准量的相对误差,而这个值一般是很小的。

4) 换位抵消法

又称对照法,这种方法利用交换被测量系统中元件的位置或测量方向等方法,使产生系统误差的原因以相反的方向影响测量结果,从而消除系统误差。

例如, 用一个等比电桥 ($R_1:R_2=1:1$) 测量电阻 R_x , 如图 1-1-4 所示。先按图 1-1-4(a) 的接法, 调节可变标准电阻 R_N 至 R'_N , 若电桥平衡, 则

$$R_x = \frac{R_1}{R_2} R'_N \quad (1-1-25)$$

然后, 将 R_x 与 R_N 换位, 按图 1-1-4(b) 的接法。若 R_1 与 R_2 因存在误差而不相等, 则在换位后的图 1-1-4(b) 中的电桥将不平衡, 这时可调 R_N 至 R''_N , 使电桥恢复平衡, 于是

$$R_x = \frac{R_2}{R_1} R''_N \quad (1-1-26)$$

将式 (1-1-25) 与式 (1-1-26) 两式相乘, 得

$$R_x = \sqrt{R'_N \cdot R''_N} \quad (1-1-27)$$

由式 (1-1-27) 可见, R_x 的测量值与桥臂电阻 R_1 与 R_2 的误差无关, 它只取决于标准电阻 R_N 的误差。

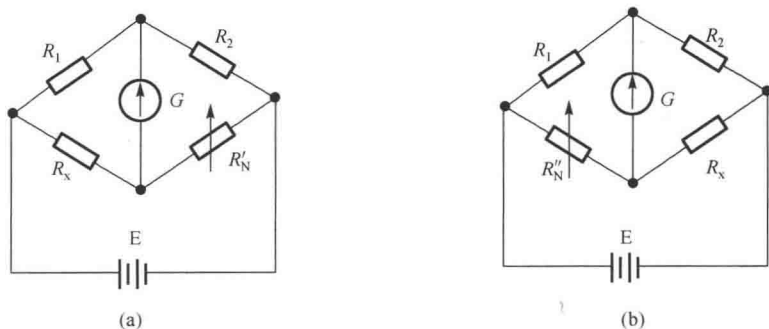


图 1-1-4 等比电桥测量电阻

5) 正负误差补偿法

不同的实验条件下, 对同一个被测量进行两次测量, 使其中一次测量的误差为正, 而另一次测量的误差为负, 取这两次测量数据的平均值作为测量结果, 则可消除这种系统误差。

1.2 实验数据的处理

1.2.1 有效数字

实验中记录的测量数据应满足测量精度的要求, 由若干位可靠数字和一位可疑数字组成的数据称为有效数字。例如, 电压的测量结果为 1.034V, 该结果由四位有效数字组成。当不加注明时, 应理解为: 其中前三位有效数字是准确知道的, 最后一位有效数字“4”是靠估计读出的, 所以称为欠准数字。在测量中, 取读数时只能取一位估计数, 多取是无效的。应注意数值中小数点的位置并不是决定准确度的标准, 小数点的位置只与所用单位的大小有关, 例如 1.44mV 与 0.00144V 的准确度完全一样。

在电气测量中, 由于误差的存在, 仪器分辨力的限制, 在读取数据和处理数据的过程中不可避免地要涉及到如何确定有效数字的位数, 以及对多余有效数字的正确舍入问题。

1. 有效数字位数的确定

决定有效数字位数的标准是误差，并非写的位数愈多愈好，多写位数就夸大了测量准确度，少记位数将带来附加误差。

1) 电表读数有效数字位数的确定

例如，用交流毫伏表 3V 量程测量电压，指针偏转位置在 2.4~2.5V 之间，如图 1-2-1 所示。毫伏表读为 2.45V 是准确的，显然 0.1V 单位的数值是可信的，而 0.01V 单位的数值是估计的欠准数字。欠准数字只能取一位，若读为 2.455V，则夸大了测量的精度；反之，若只读 2.4V，则降低了仪表的精度。

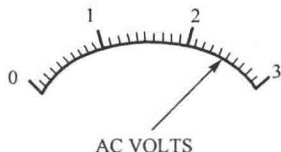


图 1-2-1 交流毫伏表指针偏转示意图

2) 测量结果及其误差的有效数字位数的确定

当同时给出测量结果和误差时，二者的欠准数字位数必须相同。例如，某电压的测量结果应表示成： $112.46\text{V} \pm 0.03\text{V}$ 。

3) 有效数字位置数的确定

(1) 数值应当用数量级 (10^n) 表示。例如，某电压为 103.1V，当用毫伏作单位时，写成 103100mV 是不正确的，因为 103100mV 写法表示不可靠程度为 $\pm 1\text{mV}$ ，所给电压的不可靠程度为 $\pm 0.1\text{V}$ ，所以正确写法应为 $1.031 \times 10^5\text{mV}$ 。为统一起见，把 103.1V 写成 $1.031 \times 10^2\text{V}$ 较好。

(2) 关于数据中的数字“0”的处理。数据左边的“0”不能算作有效数字，如 0.05040V 左边两个“0”不是有效数字，该数据有 4 位有效数据，当换成 mV 单位时，写成 50.40mV，前面的“0”就消失了。

(3) 非零数字之间的“0”是有效数字。如 300.6mA 中的两个“0”是有效数字，此数据共有 4 位有效数字。

数据末尾的数字“0”是否为有效数字，需依据是否保留末位一个欠准数字而定。如 21000Ω ，此表示法比较含混，后面三个“0”无法知道是否为有效数字。为明确起见，通常采用“ 10^n ”来表示，如将上例写为 $2.100 \times 10^4\Omega$ ，则表示有效数字是四位。

2. 数据的修约规则

在确定了一个数值的有效数字位数后，其尾部多余的数字应按一定的规则加以修约。在修约时，不采用传统的“四舍五入”方法，因为对数字“5”只入不舍是不合理的。所遵循的规则要点如下。

(1) 若拟舍去的数字最左边一位小于 5，则予以舍去；若大于 5，则将保留的最末一位数字加 1。例如，欲将 12.34 取为三位有效数字，修约结果为 12.3。又如，需将 37.36 修约到只保留一位小数时，修约结果为 37.4。

(2) 若拟舍去的数字中的最高位置为 5，当欲保留的最末一位为奇数时，5 入，即将此末位数加 1；若末位数为偶数时，则 5 舍，即末位数保持不变。例如，将 12.35 和 12.65 修约到只保留 1 位小数，修约后的结果分别为 12.4 和 12.6。

上述的规则可概括为“小于 5 舍，大于 5 入，等于 5 时采用偶数法则”。

当舍入次数足够多时，奇数与偶数的出现概率是相同的，所以舍和入的概率也是相同的。每个数据经舍入后，末位必定是欠准数字，末位前面的是准确数字。其舍入误差不会大于末位单位的一半，这个“一半”即为该数据的最大舍入误差。上面所举的数字实例中，其舍入误差小于 0.05，此称为“0.5 误差原则”。

3. 有效数字的运算法则

为了避免修约误差的积累，保证数据处理结果的准确度，在对数据进行算术运算时需遵循如下法则。

1) 加减运算

几个数据进行加减运算时,有效数字的位数以各数中小数点后位数最少的那个为准,其余各数均舍入至比该数多保留一位小数。进行加减计算后,计算结果所保留小数点后的位数,则应与原各数中小数点后位数最少的那个数相同。

例 1-2 计算 $18.56 + 0.00632 + 1.531$

解: 根据上述原则,应取 18.56 作为运算的有效数字位数的标准,故做修约处理后的算式及计算结果为

$$18.56 + 0.006 + 1.531 = 20.097$$

将计算结果修约到小数点后两位,则结果为 20.10。

例 1-3 计算 $14.533 - 11.31$

解: 做修约处理后的算式及计算结果为

$$14.533 - 11.31 = 3.223$$

计算结果应保留 2 位小数,故应取为 3.22。

2) 乘除运算

几个数进行乘除运算时,其有效数字的位数以各数中位数最少的那个数为标准,其余各数均修约到比该数多保留一位有效数字。对修约后的各数进行乘除运算,计算结果有效数字位数与有效数字位数最少的那个数相同。若有效数字最少的数据中的第一位为“8”或“9”,则计算结果有效数字的位数可比它多取一位。

例 1-4 计算 $0.0212 \times 21.43 \times 1.04628 \div 1.812$

解: 做修约处理后的算式及计算结果为

$$0.0212 \times 21.43 \times 1.046 \div 1.812 = 0.262$$

计算结果取 3 位有效数字,与 0.0212 的有效数字位数相同。

3) 乘方或开方运算

乘方或开方运算中,所得结果的有效数字的位数可比原数多一位。

例 1-5 $276^2 = 76176 = 7618 \times 10^1$

例 1-6 $\sqrt{875} = 29.58$

1.2.2 测量数据的记录

1. 数字式仪表读数的记录

从数字式仪表上可直接读出被测量的量值,读出值即可作为测量结果予以记录而无需再经换算。需要注意的是,对数字式仪表而言,在不同的量程时,测量值的有效数字位数不同,若测量时量程选择不当则会丢失有效数字。因此应合理选择数字式仪表的量程。例如,用某数字电压表测量 1.872V 的电压,在不同的量程时的显示值如表 1-2-1 所示。

由此可见,在不同的量程时,测量值的有效数字位数不同,量程不当将损失有效数字。在此例中唯选择“2V”量程才是恰当的。实际测量时一般是使被测量值小于但接近于所选择的量程,而不可选择过大的量程。

表 1-2-1 数字式仪表的有效数字

量程	2V	20V	200V
显示值	1.872	1.87	1.8
有效数字位数	4	3	2

2. 指针式仪表测量数据的记录

直接读取的指针式仪表和数字式仪表不同,其指示值一般不是被测量的值,而要经过换算才可得到所需的测量结果。下面介绍有关的概念和方法。

1) 指针式仪表的读数

指示仪表的指示值称为直接读数,简称为读数,它是指示仪表指针所指出的标尺值并用格数表示。图 1-2-2 所示为某电压表的均匀标度尺有效数字读数示意图,图中指针的两次读数分别为 15.5 格和 134.0 格,它们的有效数字位数分别为 3 位和 4 位。测量时应首先记录仪表的读数。

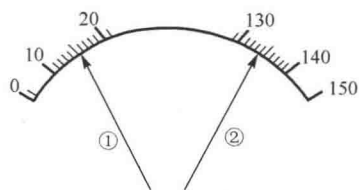


图 1-2-2 指示仪表有效数字读数示意图

2) 指针式仪表的仪表常数

指针式仪表的表度尺每分格所代表的被测量的大小称为仪表常数,也称为分格常数,用 C_x 表示,其计算式为

$$C_x = \frac{x_m}{\alpha_m} \quad (1-2-1)$$

式中, x_m 为选择的仪表量程, α_m 为指针式仪表满刻度格数。

可以看出,对于同一仪表,选择的量程不同则分格常数也不同。数字式仪表也有仪表常数的概念,它是指数字式仪表的每个字所代表的被测量的大小。

3) 被测量的示值

示值是指仪表的读数对应的被测量的测量值,它可由下式计算得出:

$$\text{示值} = \text{读数 (格)} \times \text{仪表常数 } (C_x) \quad (1-2-2)$$

应注意的是,示值的有效数字的位数应与读数的有效数字位数一致。

1.2.3 测量数据的整理

在实验中所记录的测量原始数据通常还需加以整理,以便于进一步的分析,做出合理的评估,给出切合实际的结论。

1. 数据的排列

为了分析计算的便利,通常希望原始实验数据按一定的顺序排列。若记录下的数据未按期望的次序排列,则应予以整理,譬如将原始数据按从小到大或从大到小的顺序进行排列。当数据量较大时,这种排序工作最好由计算机完成。

2. 坏值的剔除

在测量数据中,有时会出现偏差较大的测量值,这种数据称为离群值。离群值可分为两类,一类是因为粗大误差而产生,因为随机误差过大而超过了给定的误差界限,这类数据为异常值,属于坏值,应予以剔除。另一类是因为随机误差较大而产生,超过规定的误差界限,这类测量值属于极值,应予以保留。需要说明的是,若确知测量值为粗大误差,则即便其偏差不大,未超过误差界限,也必须予以剔除。

在很多情况下,仅凭直观判断通常难以对粗大误差和正常分布的较大误差进行区分,这时可采用统计检验的方法来判别测量数据中的异常数据。

3. 数据的补充

在测量数据的处理过程中,有时会遇到缺损的数据,或者需要知道测量范围内未测出的中间数值,这时可采用插值法(也称为内插法)计算出这些数据。常用的插值法有线性插值法、一元拉格朗日插值法和牛顿插值法等。

1) 线性插值法

设被测量为 x 和 y , 若变量 x 和 y 之间为线性函数关系,可采用线性插值法。其做法是:由两对已知值 (x_i, y_i) 求出它们所决定的直线方程欲插入的 x 值对应的 y 值,计算公式为

$$y = y_1 + \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}(x - x_1) \quad (1-2-3)$$

2) 拉格朗日插值法

当函数 $y(x)$ 的 x_i, y_i 值 ($i=0, 1, 2, \dots, n$) 已知,而 x_i 值不等距,需求 x 值对应的 y 值时,可用拉格朗日插值法。插值公式为

$$y(x) = \sum_{j=0}^n \prod_{\substack{i=0 \\ i \neq j}}^n y_i \frac{x - x_i}{x_j - x_i} \quad (1-2-4)$$

3) 牛顿插值法

当函数 $y(x)$ 的 x_i, y_i 值 ($i=0, 1, 2, \dots, n$) 已知,且相邻的 x_i 值等距(即增量为恒定)时,求与 x_i 对应的 y_i 值最好用牛顿插值法。牛顿插值法包括前插公式和后插公式,可参阅有关文献,这里就不介绍了。

1.3 曲线拟合

在对多个电量进行测试时,常需要明确这几个电量(变量)间的函数关系。在获取若干组自变量和因变量的实验数据后,可用回归分析法进行曲线拟合,以确定变量间函数关系的形式及有关参数的大小。当自变量为一个和两个时,分别求解的是一元回归方程和二元回归方程。这里只介绍一元回归方程的求法。

1.3.1 一元线性回归

当自变量 x 和因变量 y 都是一个,且将测量数据在直角坐标系中作图所得轨迹呈直线状时,便可按一元回归来处理数据。一元线性回归方程的表达式为

$$y = a + bx \quad (1-3-1)$$

决定上式中常数 a 和 b 的方法有两种,即图解法和最小二乘法。

1. 图解法

若根据实验数据作出的曲线呈现直线状,可在直线上任取两点 $Q_1(x_1, y_1)$ 和 $Q_2(x_2, y_2)$, 将这两点的数据代入式(1-3-1),解得

$$a = \frac{x_1 y_2 - x_2 y_1}{x_1 - x_2}, \quad b = \frac{y_1 - y_2}{x_1 - x_2} \quad (1-3-2)$$