



普通高等教育实验实训规划教材

电路实验与 计算机仿真

张建红 主编
贺琳 编写



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS



电路实验与 计算机仿真

张建红 主编

贺琳 编写

常州大学图书馆
藏书章



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

实验实训 教学参考

教材编写 教材编写

内 容 提 要

全书共分为 5 章和附录部分,第 1 章电工测量基础知识、第 2 章常用仪器仪表的使用、第 3 章电路实验、第 4 章 Multisim10、第 5 章电路仿真实验。书后附录部分主要介绍了 EEL—II 型电工技术实验装置的结构及其使用方法。

本书实验内容丰富,可作为全日制高等学校电气工程及其自动化、电子信息、自动化等专业的本科和专科学生电路课程的实验教材,也可供有关实验指导教师和工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

电路实验与计算机仿真/张建红主编;贺琳编写. —北京:中国电力出版社,2017.12

普通高等教育实验实训规划教材

ISBN 978-7-5198-1025-2

I. ①电… II. ①张…②贺… III. ①电路—实验—高等学校—教材②电子电路—计算机仿真—高等学校—教材 IV. ①TM13-33②TN702.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 183164 号

出版发行:中国电力出版社

地 址:北京市东城区北京站西街 19 号(邮政编码 100005)

网 址:<http://www.cepp.sgcc.com.cn>

责任编辑:王惠娟

责任校对:常燕昆

装帧设计:郝晓燕 张 娟

责任印制:吴 迪

印 刷:北京雁林吉兆印刷有限公司

版 次:2017 年 12 月第一版

印 次:2017 年 12 月北京第一次印刷

开 本:787 毫米×1092 毫米 16 开本

印 张:9

字 数:217 千字

定 价:20.00 元

版 权 专 有 侵 权 必 究

本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

前言

实验教学是高等教育的基本教学内容，是帮助学生学习并运用理论知识解决实际问题、掌握科学研究方法、获得实验技能的重要环节。

为了加强电路实验教学，本书根据《电路实验教学大纲》以及由邱关源主编、高等教育出版社出版的《电路》（第五版）基本要求，结合实验室引进的 EEL—II 型电工技术实验装置，编写了这本能够满足电气工程及其自动化、电子信息、自动化等相关专业实验教学的实验课程教材。

全书共分为 5 章，第 1 章电工测量基础知识介绍了有关测量和误差的基本概念。第 2 章常用仪器仪表的使用介绍了万用表、交流毫伏表、函数信号发生器、示波器等电子测量仪器的原理及其使用方法。第 3 章电路实验共有 23 个实验，每个实验项目都给出了实验目的、实验原理、实验方法和内容。第 4 章 Multisim10 介绍了电路仿真软件 Multisim10 的基本功能和使用方法，使学生能够初步掌握利用仿真软件对电路进行分析并计算。第 5 章电路仿真实验中每个实验都给出了具体的实验方法和操作步骤，便于学生课前预习。通过虚拟仿真实验，既提高了实物实验的正确性，同时也培养了学生独立思考和创新能力。书后附录部分介绍了 EEL—II 型电工技术实验装置的结构及其使用方法。

本书由张建红任主编，贺琳参与编写，并共同负责确定全书的内容、章节，张建红负责全书的统稿工作。其中，贺琳编写第 1 章、第 2 章和第 4 章，张建红编写第 3 章、第 5 章和附录部分。本书的编写也得到了长春工程学院电工教研室和电工电子基础实践教学中心各位老师的大力支持，在此一并表示感谢。

由于时间仓促，编者水平有限，书中难免存在不妥和疏漏之处，恳请广大读者批评指正。

编者

2017 年 6 月

1.1 电路实验与计算机仿真的研究	31
1.2 电路实验与计算机仿真的研究	31
1.3 电路实验与计算机仿真的研究	31
1.4 电路实验与计算机仿真的研究	31
1.5 电路实验与计算机仿真的研究	31
1.6 电路实验与计算机仿真的研究	31
1.7 电路实验与计算机仿真的研究	31
1.8 电路实验与计算机仿真的研究	31
1.9 电路实验与计算机仿真的研究	31
1.10 电路实验与计算机仿真的研究	31
1.11 电路实验与计算机仿真的研究	31
1.12 电路实验与计算机仿真的研究	31
1.13 电路实验与计算机仿真的研究	31
1.14 电路实验与计算机仿真的研究	31
1.15 电路实验与计算机仿真的研究	31
1.16 电路实验与计算机仿真的研究	31
1.17 电路实验与计算机仿真的研究	31
1.18 电路实验与计算机仿真的研究	31
1.19 电路实验与计算机仿真的研究	31
1.20 电路实验与计算机仿真的研究	31
1.21 电路实验与计算机仿真的研究	31

目 录

前言

第 1 章 电工测量基础知识 1

1.1 测量的概念 1

1.2 测量的分类 1

1.3 测量误差 2

1.4 测量数据的处理 6

第 2 章 常用仪器仪表的使用 10

2.1 万用表 10

2.2 函数信号发生器 16

2.3 交流毫伏表 19

2.4 示波器 22

第 3 章 电路实验 40

3.1 电阻元件伏安特性的测绘 40

3.2 电位、电压的测定 43

3.3 基尔霍夫定律的验证 44

3.4 线性电路叠加性和齐次性的研究 46

3.5 电压源、电流源及其电源等效变换的研究 49

3.6 戴维南定理——有源二端网络等效参数的测定 51

3.7 最大功率传输条件的研究 54

3.8 受控源研究 56

3.9 一阶电路暂态过程的研究 61

3.10 二阶电路暂态过程的研究 63

3.11 交流电路频率特性的测定 65

3.12 交流串联电路的研究 68

3.13 日光灯电路及功率因数的提高 70

3.14 RC 网络频率特性和选频特性的研究 73

3.15 R、L、C 串联谐振电路的研究 76

3.16 直流双口网络的研究 78

3.17 三相电路电压、电流的测量 81

3.18 三相电路功率的测量 83

3.19 相序指示器电路的设计与实现 86

3.20 负阻抗变换器 87

3.21 回转器特性测试 89

3.22	单相电能表的校验	92
3.23	简单万用表线路计算和校验	94
第 4 章	Multisim10	101
4.1	Multisim10 简介	101
4.2	Multisim10 的开发环境	102
4.3	Multisim10 的虚拟仪器	111
4.4	基于 Multisim 10 的例子	114
4.5	利用 Multisim 10 进行电阻、电容、电感的电原理性分析	118
第 5 章	电路仿真实验	123
5.1	基尔霍夫定律仿真实验	123
5.2	叠加定理仿真实验	124
5.3	RLC 串联谐振电路仿真实验	128
5.4	日光灯电路及功率因数提高仿真实验	130
附录	EEL-II 型电工技术实验装置使用说明	133
参考文献		138

第1章 电工测量基础知识

1.1 测量的概念

电工测量,是指借助于仪器设备将被测量的电学量与作为测量单位的同类标准进行比较,从而得到一个以测量数值和测量单位共同表示的被测电量大小的过程。

电工测量的关键是测量方法的选择、测量数据的分析和处理以及测量设备的选用。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。

1.2 测量的分类

测量可从不同的角度出发进行分类。

1. 按被测量的获得方式不同分类

按被测量的获得方式的不同,测量可分为直接测量法、间接测量法和组合测量法。

(1) 直接测量法。在测量过程中,能够直接将被测量与同类标准量进行比较,或能够直接用事先刻度好的测量仪器对被测量进行测量,从而直接获得被测量的数值的测量方式称为直接测量法。

直接测量法的特点是简便,此时,测量目的与测量对象是一致的。例如用电压表测量电压、用电能表测量电能以及用直流电桥测量电阻等。直接测量法广泛应用于工程测量中。

(2) 间接测量法。在测量过程中,当被测量不能直接测量,或测量很复杂,可通过直接测量与被测量有一定函数关系的物理量,然后按函数关系计算出被测量的数值,这种间接获得测量结果的方式称为间接测量法。例如用伏安法测量电阻,就是利用电压表和电流表分别测量出电阻两端的电压和通过该电阻的电流,然后根据欧姆定律 $R=U/I$ 计算出被测电阻 R 的大小。间接测量法广泛应用于科研、实验室及工程测量中。

(3) 组合测量法。在测量中,若被测量有多个,而且它们和可直接(或间接)测量的物理量有一定的函数关系,通过联立求解各函数关系来确定被测量的数值,这种测量方式称为组合测量法。

2. 根据度量器参与测量过程的方式来划分

根据度量器参与测量过程的方式来划分,测量又可分为直读测量法和比较测量法。

(1) 直读测量法(直读法)。直接根据仪表(仪器)的读数来确定被测量数值的测量方法称为直读测量法。在测量过程中,度量器不直接参与测量过程,而是间接地参与。例如,用欧姆表测量电阻时,从指针在表盘上指示的刻度可以直接读出被测电阻的数值,这一读数被认为是可信的,因为欧姆表的表盘刻度事先用标准电阻进行了校验,标准电阻已将它的量值和单位传递给了欧姆表,间接地参与了测量过程。直读测量法的特点是设备简单,操作容易,缺点是测量的准确度不高。

(2) 比较测量法。在测量过程中将被测量与标准量(又称度量器)直接进行比较,从而

获得被测量数值的方法称为比较测量法。例如用天平测量物体质量时,作为质量度量器的砝码始终都直接参与了测量过程。在电工测量中,比较测量法具有很高的测量准确度,可以达到 $\pm 0.001\%$,适用于精密测量。但测量操作过程比较麻烦,相应的测量仪器较贵。

综上所述,直读法与直接测量法,比较法与间接测量法,彼此并不相同,但又互有交叉。实际测量中采用哪种方法,应根据对被测量的测量准确度要求以及实验条件是否具备等多种因素具体确定。如测量电阻,当对测量准确度要求不高时,可以用万用表直接测量或伏安法间接测量,它们都属于直读法。当要求测量准确度较高时,则用电桥法进行直接测量,它属于比较测量法。

1.3 测量误差

1.3.1 测量误差的定义

不论采用哪一种测量方法,也不论怎样进行测量,测量的结果与被测量的实际数值总存在差别,我们把这种差别,也就是测量结果与被测量真值之差,称为测量误差。从不同角度发出,测量误差有多种分类方法。

1.3.2 测量误差的分类

根据测量误差的性质和特性,测量误差可分为系统误差、随机误差和粗大误差三类。

1. 系统误差

系统误差又叫规律误差,是指在同一条件下(测量环境、测量人员、测量技术和仪器等都相同的情况下),多次测量同一量值时,误差的大小和符号均保持不变,或者当条件改变时,按某一确定的已知规律(确定函数)变化的误差。

系统误差包括已定系统误差和未定系统误差。已定系统误差是指符号和绝对值已经确定的系统误差。例如,用电流表测量某电流,其示值为 5A ,若该示值的修正值为 $+0.01\text{A}$,而在测量过程中由于某种原因对测量结果未加修正,从而产生 -0.01A 的已定系统误差。未定系统误差是指符号或绝对值未经确定的系统误差。因为只估计了误差的上限和下限,并不知道测量电压误差确切大小及符号。因此,这种误差称为未定系统误差。

系统误差产生的原因有测量仪器、仪表不准确,环境因素的影响,测量方法或依据的理论不完善以及外界因素(如温度、电场、磁场)的影响等。

系统误差的特点是:

(1) 系统误差是一个非随机变量,是固定不变的,或是一个确定的时间函数。也就是说,系统误差的出现不服从统计规律,而服从确定的函数规律。

(2) 重复测量时,系统误差具有重现性。对于固定不变的系统误差,重复测量时误差也是重复出现的。系统函数为时间函数时,它的重现性体现在当测量条件实际相同时,误差可以重现。

(3) 可修正性。系统误差的重现性决定了它是可以修正的。

2. 随机误差

随机误差是指在同一测量条件下,多次重复测量同一测量值时,每次测量误差的绝对值和符号都以不可预知的方式变化的误差。

随机误差是由于某些偶然因素造成的,又称为偶然误差。这些因素产生的原因或者目前

尚不清楚,或者还无法掌握,或者一时不便控制,如实验室中的温度、气压、电磁场微变等。

随机误差就个体而言是不确定的,既不能用实验的方法消除,也不能修正。但其总体服从统计规律。随机误差一般服从正态分布规律,可通过数理统计的方法来处理。如图 1-1 所示的随机误差正态分布曲线。

随机误差的特点是:

(1) 有界性:在一定的测量条件下,误差的绝对值不会超过一定的界限。

(2) 单峰性:绝对值小的误差比绝对值大的误差的概率密度大,曲线中期望值处有一个极值。

(3) 对称性:绝对值相等的正、负误差概率密度分布曲线对称于纵轴。

(4) 抵偿性:在相同条件下,当测量次数 n 趋于 ∞ 时,全体误差的代数和为 0,具有相互抵消的特性。

在精密测量中,一般采用取多次测量值的算术平均值的方法消除随机误差。

3. 粗大误差

粗大误差又叫疏忽误差,是由于实验者的粗心,错误读取数据,或使用了有缺陷的计量器具,或计量器具使用不正确,或环境的干扰等引起的,是指明显超出了规定条件下预期的误差。

含有粗大误差的测量值称为坏值或异常值,应该在数据处理时去掉。

根据误差的表示方法,测量误差可分为绝对误差、相对误差、引用误差三类。

(1) 绝对误差是指测量值与被测量实际值之差,用 Δx 表示,即

$$\Delta x = x - x_0 \quad (1-1)$$

式中 x ——测量值;

x_0 ——实际值。

绝对误差是具有大小、正负和量纲的数值。

在实际测量中,除了绝对误差外,还经常用到修正值的概念,它的定义是与绝对误差等值反号,即

$$c = -\Delta x = x_0 - x \quad (1-2)$$

知道了测量值和修正值 c ,由式(1-2)就可求出被测量的实际值 x_0 ,测量仪表的修正值一般是通过计量部门检定给出的。

绝对误差只是反映了测量结果与真实值的偏差程度,但不能反映测量的准确程度。

为了便于比较测量的准确程度,引入了相对误差的概念。

(2) 相对误差是指测量的绝对误差与被测量实际值之比(一般用百分数表示),用 γ 表示,即

$$\gamma = \frac{\Delta x}{x_0} \times 100\% \quad (1-3)$$

式(1-3)中,分子为绝对误差,当分母所采用量值不同(被测量的真实值 A_0 , 高级以上的测量仪器或计量器具测量所得的实际值 x_0 、示值 x 等)时相对误差又可分为:真实值相对误差、实际值相对误差和示值相对误差。

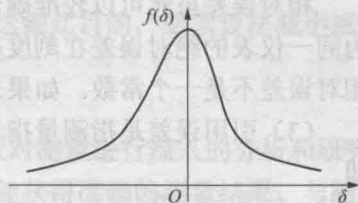


图 1-1 随机误差正态分布曲线

δ —随机误差; $f(\delta)$ —误差出现的次数

相对误差是一个比值,其数值与被测量所取的单位无关,能反映误差的大小和方向,能确切地反映测量准确程度。因此,在测量过程中,欲衡量测量结果的误差或评价测量结果准确程度时,一般都用相对误差表示。

相对误差虽然可以较准确地反映量的准确,但用来表示仪表的准确度时,不甚方便。因为同一仪表的绝对误差在刻度范围内变化不大,这样就使得在仪表标度尺的各个不同部位的相对误差不是一个常数。如果采用仪表的量程 x_m 作为分母就解决了上述问题。

(3) 引用误差是指测量指示仪表的绝对误差与其量程之比(用百分数表示),用 γ_n 表示,即

$$\gamma_n = \frac{\Delta x}{x_m} \times 100\% = \frac{\Delta x}{x_{\max} - x_{\min}} \times 100\% \quad (1-4)$$

式中 $x_{\max}$ 、 $x_{\min}$ ——测量仪表量程的上限值和下限值。

在实际测量中,由于仪表各标度尺位置指示值的绝对误差的大小、符号不完全相等,若取仪表标度尺工作部分所出现的最大绝对误差作为式(1-4)中的分子,则得到最大引用误差,用 γ_{nm} 表示。

$$\gamma_{nm} = \frac{\Delta x_m}{x_m} \times 100\% \quad (1-5)$$

最大引用误差常用来表示电测量指示仪表的准确度等级,它们之间的关系是

$$\gamma_{nm} = \frac{\Delta x_m}{x_m} \times 100\% \leq \alpha\%$$

式中 α ——仪表准确度等级指数。

国标中,将电工指示仪表(如电流表和电压表)的准确等级分为7级,如表1-1所示。仪表的基本误差在标度尺工作部分的所有分度线上不应超过表1-1中的规定。

表 1-1

电工指示仪表准确等级

准确度等级 α	0.1	0.2	0.5	1.0	1.5	2.5	5.0
基本误差(%)	± 0.1	± 0.2	± 0.5	± 1.0	± 1.5	± 2.5	± 5.0

由表1-1可见,准确度等级的数值越小,允许的基本误差越小,表示仪表的准确度越高。

式(1-5)说明,在应用指示仪表进行测量时,产生的最大绝对误差为

$$\Delta x_m \leq \pm \alpha\% \cdot x_m \quad (1-6)$$

当用仪表测量被测量的示值为 x 时,可能产生的最大示值相对误差为

$$\gamma_m = \frac{\Delta x_m}{x} \times 100\% \leq \alpha\% \cdot \frac{x_m}{x} \times 100\% \quad (1-7)$$

因此,根据仪表准确度等级和测量示值,可计算直接测量中最大示值相对误差。当被测量量值越接近仪表的量程,测量的误差越小。因此,测量时应使被测量量值尽可能在仪表量程的2/3以上,不能小于仪器量程的1/3。

例:用一个量程为30mA、准确度等级为0.5级的直流电流表测得某电路中电流为25.0mA,求测量结果的示值相对误差。

解: 根据式(1-7)可得其测量结果可能出现的示值最大相对误差为

$$\gamma_m = \frac{\Delta x_m}{x} \times 100\% = \pm \frac{0.15}{25.0} \times 100\% = \pm 0.6\%$$

1.3.3 减小或消除误差的方法

测量的目的就是要尽可能地测出被测量的实际值, 为了达到此目的, 必须设法减小或消除测量误差。

1. 减小系统误差的方法

在测量过程中, 如果发现测量结果中存在系统误差, 就应对测量进行深入的分析和研究, 以便找出产生系统误差的根源, 并设法将它们消除, 这样才能获得准确的测量结果。与随机误差不同, 系统误差是不能用概率论和数理统计的数学方法加以削弱和消除的。目前, 对系统误差的消除尚无通用的方法可循, 这就需要对具体问题采取不同的处理措施和方法。一般来说, 对系统误差的消除在很大程度上取决于测量人员的经验、学识和技巧。下面仅介绍人们在测量实践中总结出来的消除系统误差的一般原则和基本方法。

(1) 从误差来源上消除系统误差。这是消除系统误差的根本方法, 在测量实践中要根据测量准确度的要求, 选用不同准确度等级的仪器仪表, 合理选择量程, 并尽可能地使仪表读数接近满量程的位置。为了减小仪器仪表的附加误差, 应使仪表尽量在规定的工作条件下使用, 要求测量人员对测量过程上可能产生系统误差的各种因素进行仔细分析, 全面考虑实验室的各种外界因素如温度、湿度、磁场、电场等对仪器指示的影响, 对测量结果进行校正以提高其准确度。

(2) 用修正方法消除系统误差。这种方法是预先将测量设备、测量方法、测量环境(如温度、湿度、外界磁场……)和测量人员等因素所产生的系统误差, 通过检定、理论计算及实验方法确定下来, 并取其相反值做出修正表格、修正曲线或修正公式。在测量时, 就可根据这些表格、曲线或公式, 对测量所得到的数据引入修正值。这样由以上原因所产生的系统误差就能减小到可以忽略的程度。

实际上, 在我们的实验过程中, 通常要用到仪表(电流表、电压表、功率表等)进行测量, 这样便引入了仪表误差, 该误差是不可避免的, 但可以修正为系统误差。

(3) 应用测量技术消除系统误差。在实际测量中, 还可以采用一些有效的测量方法, 来消除和削弱系统误差对测量结果的影响。

1) 替代法。替代法的实质是一种比较法, 在测量条件一定的条件下, 保持仪表读数不变, 用一个数值已知并且可调的标准量去代替被测量, 这样测量结果就和测量仪表误差、外界条件的影响无关。例如用电桥测电阻时, 先用电桥测量被测电阻, 调节桥臂电阻使电桥平衡, 然后将被测电阻用可变标准电阻替换, 调节标准电阻使电桥再次达到平衡, 这时标准电阻箱上的读数就是被测电阻的阻值, 这样就可以消除用电桥测量电阻时电桥自身可能存在的误差。替代法被广泛应用在测量元件参数上。

2) 零示法。零示法是一种广泛应用的测量方法, 主要用来消除因仪表内阻影响而造成

的系统误差。在测量中, 使被测量对仪表的作用与已知的标准量对仪表的作用相互平衡, 以使仪表的指示为零, 这时的被测量就等于已知的标准量。

3) 正负误差补偿法。在测量过程中, 当发现系统误差为恒定误差时, 可以对被测量在不

同的测量条件下进行两次测量,使其中一次所包含的误差为正,而另一次所包含的误差为负,取这两次测量数据的平均值作为测量结果,从而就可以消除这种恒定系统误差。

例如,用安培表测量电流时,考虑到外磁场对仪表读数的影响,可以将安培表转动 180° 再测量一次,取这两次测量数据的平均值作为测量结果。如果外磁场是恒定不变相互抵消的,就消除了外磁场对测量结果的影响。

2. 减小随机误差的方法

从统计学规律看,把同一测量重复多次,取其算数平均值作为被测量的值,就可以减小随机误差。并且测量次数越多,随机误差越小;测量次数趋于无穷大,则随机误差趋于零。

3. 消除粗大误差的方法

由于粗大误差是明显的错误,因此比较容易被发现,测量后要进行详细的分析,凡是含有粗大误差的测量值应该在数据处理时立即舍弃。

1.4 测量数据的处理

要从一组测量数据求得最接近真实值的结果,就要对这些数据进行处理,即对这些数据进行整理、计算和分析,从而去粗取精、去伪存真。这个过程是建立在误差理论基础上的,称为测量数据的处理。

在测量和数字计算中,用几位数字来表示测量结果或计算结果是很重要的,它涉及有效数字和计算规则等问题。

1.4.1 测量数据的有效数字

在测量过程中,仪表的指示值及间接测量结果的计算用多少位有效数字来表示是很重要的,这就涉及有效数字的表示及其运算规则。

1. 有效数字的定义

一个数据,从左边第一个非零数字起至右边的所有数位均为有效数字位。如:0.15、0.015 有两位有效数字,而 0.150 则有三位有效数字。

由于测量误差不可避免,所以测量所得到的数据都不可能完全准确,而是近似数。近似数由两部分组成:一部分是可靠数字,另一部分是欠准数字。有效数字就是一个由可靠数字和最末一位欠准数字两部分组成的数字。通常测量时,只应保留一位欠准数字(对于指针式仪表,一般估读到最小刻度的十分位;而对于数字式仪表,则与所选的量程有关),其余数字均为可靠数字。例如,某仪表的读数为 118.5 格,其中 118 是可靠数字,而末位数 5 是估读的欠准数字。118.5 的有效数字位数是四位。

2. 有效数字的正确表示

(1) 有效数字的位数与小数点无关,小数点的位置仅与所用单位有关。例 510Ω 和 $5.10k\Omega$ 都是三位有效数字。

(2) 在数字之间或在数字之后的“0”是有效数字,而在数字之前的则不是有效数字。

(3) 若近似数的右边带有若干个“0”,通常把这个近似数写成 $a \times 10^n$ 形式, $1 \leq a < 10$ 。利用这种写法,可从 a 含有几个有效数字来确定近似数的有效位数,如测得某电流为 12.0A,为三位有效数字,不可以记为 12 000mA (五位有效数字),也不可记为 12A,因为这反映了测量精确程度的变化,但可以写成 $12.0 \times 10^3 \text{mA}$ 。在计算式中,对常数 π 、 e 、 $\sqrt{2}$ 等的有效数

字，可认为无限制，在计算中根据需要取位。

3. 数值修约规则

若近似数的位数很多，则确定有效位数后，其多余的数字应按“四舍六入五留双”的规则进行修约。

若以保留数字的末位为单位，它后面的数字大于 0.5 单位者，末位进一；小于 0.5 单位者，末位不变；恰为 0.5 单位者，则使末位数凑成偶数，即末位为奇数时进一，末位为偶数时则末位数不变。

还要注意，拟舍弃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出结果来。

例如，按上述修约规则，将下面各个数据修约成三位有效数字。

拟修约值	修约值
56.6482	56.6（小于 5 舍）
472.601	473（大于 5 入）
4.21500	4.22（5 前奇数进 1）
4.22500	4.22（5 前偶数舍去）

4. 有效数字的运算

(1) 加减运算。参加运算的各个数字所保留的位数，应以其中小数点后位数最少（即绝对误差最大）的数据位数为准，其余各数据修约后均保留比它多一位数。所得的最后结果与小数点后位数最少的位数相同。

例如： $17.6+0.0823+5.432$ 可写成
 $17.6+0.08+5.43=23.1$

(2) 乘除运算。各参与运算的数据所保留的位数，以各数中有效位数最少的为准，其余各数或乘积（或商）均修约到比它多一位，而与小数点位置无关。最后结果应与有效位数最少的数据位数相同。

例如： $0.0121\times 25.3\times 1.06=0.324\ 497\ 8\approx 0.324$

1.4.2 测量数据的读取与记录

1. 模拟仪表（指针式仪表）的数据处理

指针式仪表的指示值是指指针所指的刻度值，通常是用格数表示的，一般情况下这个指示值并不是被测量的测量值，而需要换算才可以得到测量结果。

(1) 指针式仪表的读数是指直接读取仪表指针所指示的标尺值（单元格）。

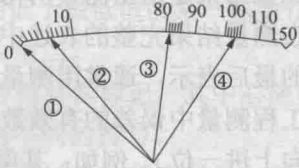


图 1-2 均匀标度尺有效数字读数示意图

表 1-2 有效数字读数原则

序号	指针位置	读数区间	有效数字位数
①	0~1 格	0.1~0.9 格	1 位有效数字
②	1~10 格	1.0~9.9 格	2 位有效数字
③	10~100 格	10.0~99.9 格	3 位有效数字
④	100~150 格	100.0~150.0 格	4 位有效数字

图 1-2 为均匀标度尺有效数字读数示意图, 图中指针指示的不同位置的读数分别为 0.2 格、6.9 格、81.8 格、104.0 格。

应注意有效数字的位数 (只含一位欠准数字), 具体的读数原则与规律总结在表 1-2 中。

(2) 计算仪表的分格常数。仪表的分格常数是指电测量指示仪表的标度尺每分格所代表的被测量的大小, 也称仪表常数。用符号 “ C_a ” 表示, 其计算公式为

$$C_a = \frac{x_m}{a_m} \quad (1-8)$$

式中 C_a ——分格常数;

x_m ——仪表量程;

a_m ——仪表满偏格数。

(3) 被测量的示值是指仪表的分格常数乘以读数后所得的数值。即

$$\text{示值} = \text{仪表分格常数 } C_a \times \text{读数 } a \text{ (格)}$$

注意: 示值有效数字的位数和读数的有效数字的位数相同。

2. 数字仪表的数据处理

数字仪表的示值无需换算即可作为测量结果使用。但值得注意的是, 示值越接近量程, 误差越小, 此外, 量程选择不当将会丢失有效数字, 所以我们应该谨慎选择数字式仪表的量程。

比如用数字万用表电压挡测量 1.476V 的电压, 选用不同量程分别得到如表 1-3 所示的不同结果。

表 1-3

选用不同量程对应结果

量程 (V)	2	20	200
显示值 (V)	1.476	01.47	001.4
有效数字	4	3	2

1.4.3 测量结果的整理

测量结果是指由测量所得到的被测量量值。

在测量结果完整的表述中, 应包括测量误差和有关影响量的值。电路实验中, 对于测量结果的最后表示, 通常用测量值和相应的误差共同来表示。

工程测量中误差的有效数字一般只取一位, 并采用进位法 (即只要该舍弃的数字是 1~9 都应向上进一位)。例如: 某电压表的准确度等级为 0.25 级, 则在 100V 量程时的最大误差绝对值为

$$\Delta U_m = \pm 0.25\% \times 100 = \pm 0.25V \approx 0.3V$$

可见, 测量值的有效数字取决于测量结果的误差, 即测量值的有效数字的末位数与测量误差末位数为同一个数位。

1.4.4 测量结果的表示

测量数据经过有效数字的修约和运算处理后, 应进一步整理以分析实验规律, 得出实验结果, 常用的数据整理方法有列表法和绘图法两种。

1. 实验数据列表法

列表是将一组实验数据中的自变量、因变量的各个数值依一定的形式和顺序一一对应列

出来。

列表法的优点是简单易作,形式紧凑,数据便于比较,同一表格内可以同时表示几个变量的关系,使实验结论更加直观,易于分析。

一个完整的表格应包括表的序号、名称、项目、说明及数据来源。列表时,应注意以下几点:

- (1) 表的名称、数据来源应作说明,使人一看便知其内容。
- (2) 表格中项目应有名称单位,如电压(U/V)、电流(I/A)等。
- (3) 数值的书写应整齐统一,并用有效数字的形式表示,同一竖行上的数值小数点上下对齐。
- (4) 自变量间距的选择应注意测量中因变量的变化趋势,且自变量取值应便于计算、便于观察、便于分析,并按增大或减小的顺序排列。
- (5) 表中数据应该是剔除坏值之后的有效数据。

2. 绘图表示法

绘图表示法可以更加形象和直观地看出函数变化规律,能够简明、清晰地反映几个物理量之间的关系,迅速发现规律,更有助于分析研究问题。

绘图表示法的主要步骤是:第一步是把测量数据点标在适当的坐标系中,第二步是根据各点描画出曲线。作图时应注意以下几个问题。

(1) 合理地选取坐标。根据自变量的变化范围及其所表示的函数关系,可以选用直角坐标、对数坐标等,最常用的是直角坐标。横坐标代表自变量,纵坐标代表因变量,坐标末端需标明所代表的物理量及单位。

(2) 坐标分度原则。

1) 在直角坐标中,线性分度应用最为普遍。分度的原则是,使图上坐标分度对应的示值的有效数字位数能反映实验数据的有效数字位数。

2) 纵坐标与横坐标的分度不一定取得一样,应根据具体情况来选择。纵坐标与横坐标的比例也很重要,二者分度可以不相同,根据具体情况适当选择。

3) 坐标分度值不一定从零开始。在一组数据中,坐标可用低于最低值的某一整数作起点,高于最高值的某一整数作终点,以使图形能占满全幅坐标纸为适当。

(3) 根据数据描点。数据可用空心图、实心图、三角形等符号作标记,其中心应与测量值相重合。同一曲线上各数据点用同一符号,不同的曲线则用不同的符号。

根据各点作曲线时,应注意到曲线一般光滑匀整,曲线所经过的地方应尽量与所有的点相接近,但不一定通过图上所有的点,只要均匀地分布在曲线两侧即可,不应连成折线或多弯线。

第 2 章 常用仪器仪表的使用

学习使用常用仪器仪表是电工电子课程中重要一环，只有学会了仪器仪表的使用，才能对这门课程的内容有更深入的了解，才能通过实验对理论课程中描述的现象有感性的认识，将来才能应用这些仪器仪表解决实际问题。

常用的电子仪器仪表有：

- (1) 万用表：主要用于测量交直流电压、常用电子元件（如电阻、电容、三极管等）的参数等；
- (2) 函数信号发生器：为交流放大电路、信号处理电路提供模拟信号；
- (3) 交流毫伏表：测量正弦信号的幅值；
- (4) 示波器：观察波形，检查波形失真，测量信号的频率、幅值、相位差等。

2.1 万 用 表

2.1.1 万用表简介

万用表，顾名思义，因为可以测量很多物理量而得名，因此又称多用表、复用表。其特点是用途广、使用简单、携带方便。可用来测量直流电压、直流电流、交流电压、交流电流、电阻、电容、二极管、三极管，有的还可以测量温度、频率等。因此万用表可以间接检查各种电子元件的好坏，检查、调试大多数的设备。

万用表的种类很多，目前广泛使用的万用表主要有模拟式万用表和数字式万用表。下面对常用的模拟式万用表和数字式万用表的原理及其使用做以介绍。

2.1.2 万用表分类

1. 模拟万用表

现以 MF-47 型万用表为例，介绍模拟万用表的原理及其使用。

(1) 基本原理。如图 2-1 所示，模拟式万用表测量过程是先通过一定的测量机构将被测的模拟电量转换成电流信号，再由电流信号去驱动表头指针偏转，通过相应的刻度板的读数即可指示出被测量的大小。



图 2-1 模拟式万用表的测量过程

(2) MF-47 型万用表的结构组成。MF-47 型普通万用表面板如图 2-2 所示。从图 2-2 可以看出，模拟式万用表面板上主要由刻度盘、挡位选择开关、旋钮和一些插孔组成。

MF-47 型普通万用表是磁电式多量程万用表，能测量直流电流、直流电压、交流电压以及直流电阻等多种基本电量的便携式仪表，被广泛地应用于电子实验技术和电器的维修与测试中。

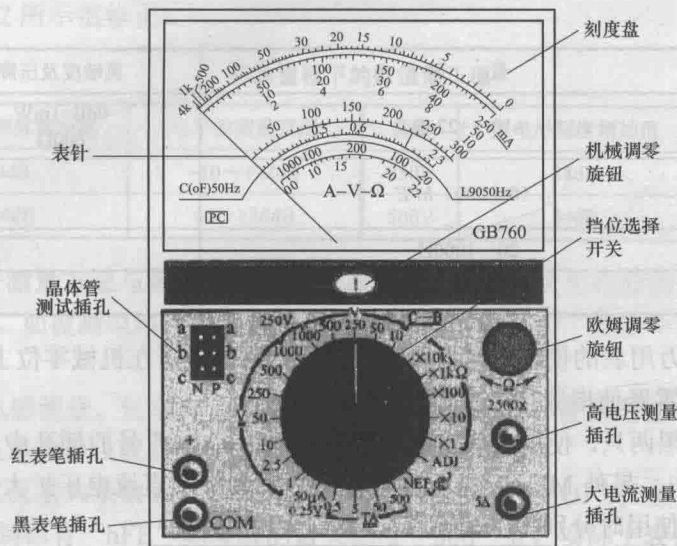


图 2-2 MF-47 型万用表的面板布置示意图

模拟式万用表的形式很多，但基本结构是类似的。模拟式万用表的结构主要由表头、测量电路、转换开关三个主要部分组成。

1) 表头。表头的作用是指示被测量值的大小。万用表的表头一般都采用灵敏度高、准确度好的磁电式直流微安表，它是模拟式万用表的关键部分，其性能是决定万用表技术指标的重要因素。

直流微安表其指针的偏转需要直流电流的驱动，而偏转大小是和驱动电流成正比的。当被测量值与表盘刻度对应一致时，则读数就能直接反映出被测量数值。

2) 测量电路。测量电路的作用是将被测量转换成表头所需的驱动电流。万用表之所以能完成多种电量的测量，是由于对应于每一种电量及量程都有与其相适应的测量电路。它通常由直流电流测量电路、直流电压测量电路、交流电压测量电路和直流电阻测量电路组合而成。

3) 转换开关。万用表的转换开关是一个多挡位的旋转开关，用来选择测量项目和量程（或倍率）。一般的万用表测量项目包括：“mA”（直流电流）、“V”（直流电压）、“V”（交流电压）、“Ω”（电阻）。每个测量项目又划分为几个不同的量程（或倍率）以供选择。

(3) MF-47 型万用表的技术性能。表 2-1 为 MF-47 型万用表主要技术指标。

表 2-1 MF-47 型万用表主要技术指标			
测量种类	量 限	灵敏度及压降	精度等级
直流电流	0~0.05mA~0.5mA~5mA~50mA~500mA~5A	0.3V	2.5
直流电压	0~0.25V~1V~2.5V~10V~50V~250V~500V~1000V~2500V	20000Ω/V	2.5 5
交流电压	0~10V~50V~250V (45~65~5000Hz) ~500V~1000V~2500V (45~65Hz)	4000Ω/V	5
直流电阻	R×1Ω R×10Ω R×100Ω R×1kΩ R×10kΩ	R×1Ω中心刻度为 16.5Ω	2.5 10