



高等学校电子与电气工程
及自动化专业“十三五”规划教材

电路理论实验手册

主 编 刘 芬
副主编 袁臣虎 李现国

E. & E. E. & E.

33



西安电子科技大学出版社
<http://www.xduph.com>

高等学校电子与电气工程及其自动化专业“十三五”规划教材

电路理论实验手册

主 编 刘 芬

副主编 袁臣虎 李现国



西安电子科技大学出版社

内 容 简 介

本书是高等院校电类专业电路基础的实验教材,注重对学生系统实验方法和实验技能的训练以及对大学生实践能力的培养。

全书共分为5章。第1章概述了电路实验基础知识;第2章介绍了常用仪器设备;第3章是电路实验,按照直流电路、交流电路、动态电路和二端口网络的顺序编排,既有基础性实验又有提高性实验;第4章和第5章分别是Multisim 12电路分析软件和仿真实验,从典型实验入手,使学生快速掌握Multisim 12软件在电路仿真分析中的应用。

本书可作为高等院校电类专业的电路实验教材,也可供相关工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

电路理论实验手册/刘芬主编. —西安:西安电子科技大学出版社,2019.6
ISBN 978-7-5606-5324-2

I. ①电… II. ①刘… III. ①电路理论—实验—高等学校—教材
IV. ①TM13-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2019)第 081935 号

策划编辑 刘小莉

责任编辑 王 斌 雷鸿俊

出版发行 西安电子科技大学出版社(西安市太白南路2号)

电 话 (029)88242885 88201467 邮 编 710071

网 址 www.xduph.com 电子邮箱 xdupfxb001@163.com

经 销 新华书店

印刷单位 陕西天意印务有限责任公司

版 次 2019年6月第1版 2019年6月第1次印刷

开 本 787毫米×1092毫米 1/16 印张 11

字 数 259千字

印 数 1~3000册

定 价 24.00元

ISBN 978-7-5606-5324-2/TM

XDUP 5626001-1

*** 如有印装问题可调换 ***

前 言

“电路理论实验”课程是电类专业的基础性实践教学课程，目的是培养学生理论联系实际的能力。通过对本课程的学习，加深学生对电路理论的理解，进一步巩固所学的电路基本理论知识，熟悉常用仪器仪表的工作原理，掌握电路测量的基本方法，学会综合性实验的设计，从而提高学生的分析问题和解决问题的能力，为今后从事专业技术工作和科学研究工作打下良好的基础。按照国家教育部工科教学指导委员会关于电路课程的基本要求，我们编写了本书，以满足“电路理论实验”课程教学的需要。

本书共分为5章。第1、2章阐述了电路实验基础知识及常用仪器设备；第3章是电路实验，包括14个实验，按照直流电路、交流电路、动态电路和二端口网络的顺序编排，既有基础性实验又有提高性实验；第4、5章介绍了Multisim 12电路分析软件和仿真实验，从典型例题入手，使学生学会电路仿真和分析方法，尽快掌握Multisim 12在电路仿真分析中的应用。

本书由刘芬、袁臣虎、李现国编写。刘芬编写了第1、3章；李现国编写了第2章；袁臣虎编写了第4、5章；全书由刘芬担任主编并统稿。沈振乾老师对本书的编写提出了许多宝贵的意见。在编写过程中，我们参考了本校及兄弟院校的教材和文献，得到了天津工业大学电气学院吴旻等老师及工程实训中心孙红、李强等老师的帮助，并得到了西安电子科技大学出版社多位老师的大力支持，在此一并表示衷心的感谢。

限于编者的学识和水平，书中难免有疏漏和不妥之处，敬请同行专家及广大读者批评指正。

编 者
2019年1月

目 录

第 1 章 电路实验基础知识	1
1.1 概述.....	1
1.2 电路测量的基本知识.....	4
1.3 测量误差分析及处理.....	6
1.4 数字式仪表及其数据处理.....	11
1.5 模拟仪表(指针式仪表)的数据处理.....	13
第 2 章 常用仪器设备	17
2.1 ODP3032 线性可编程直流电源.....	17
2.2 DG1022 型双通道函数/任意波形发生器.....	25
2.3 DS1000E 系列数字示波器.....	36
2.4 AS2294D 型双通道交流毫伏表.....	43
2.5 功率表.....	47
第 3 章 电路实验	51
实验一 线性与非线性元件的伏安特性测量.....	52
实验二 基尔霍夫定律与电位测量.....	55
实验三 电压源与电流源的等效互换.....	58
实验四 线性电路叠加定理验证.....	63
实验五 二端网络的研究——戴维宁定理和诺顿定理.....	65
实验六 最大功率传输条件的研究.....	69
实验七 交流参数的测定——三表法、三电流表法.....	72
实验八 交流电路中的互感.....	76
实验九 三相电路电压与电流的测量.....	82
实验十 串联谐振电路.....	87
实验十一 RC 一阶电路的响应测试.....	91
实验十二 二阶电路的响应.....	95
实验十三 三相电路功率的测量.....	97
实验十四 二端口网络参数的测定.....	102

第 4 章 Multisim 12 电路分析软件	107
4.1 Multisim 12 窗口界面	107
4.2 电路的连接	118
4.3 虚拟仿真仪器	127
4.4 Multisim 12 在电路实验中的应用	137
第 5 章 仿真实验	147
实验一 功率因数校正	148
实验二 串联谐振电路的研究	151
实验三 负阻抗变换器及应用	155
实验四 回转器及其应用	160
实验五 双 T 形选频网络的研究与设计	164
实验六 衰减及阻抗匹配网络的设计	167

第1章 电路实验基础知识

1.1 概 述

一、电路实验的目的

实验是将事物置于控制的或特定的条件下加以观测,是对事物发展规律进行科学认识的必要环节,是科学理论的源泉、自然科学的根本、工程技术的基础。任何科学技术的发展都离不开实验。电路实验是对学生进行电路实验技能训练的一个重要环节,对提高学生分析问题和解决问题的能力具有十分重要的意义。此外,通过实验还可以培养学生勤奋进取、严肃认真、团结合作、理论联系实际的务实作风和为科学事业奋斗的精神。

电路实验课程的教学目的如下:

- (1) 加深对电路理论知识的理解和掌握。
- (2) 训练电路实验的基本技能,掌握电路测量的基本方法。
- (3) 掌握灵活运用实验手段,验证电路定律、定理的方法。
- (4) 培养良好的实验习惯,树立实事求是、严肃认真的科学作风。
- (5) 锻炼综合实验能力,为后续课程的学习和今后从事科学研究及专业技术工作打下必要的基础。

二、电路实验的基本要求

尽管每个实验项目的目的和内容不同,但为了培养良好的学风,要充分发挥学生的主动精神,促使其独立思考、独立完成实验,对电路实验预习、实验操作和实验报告三个阶段分别提出下列基本要求。

1. 实验预习

为了避免盲目性,参加实验者应对实验内容进行预习。预习的内容包括:

- (1) 必须熟悉《学生实验守则》和《实验室安全管理制度》。
- (2) 认真阅读实验指导书,明确实验目的和要求,掌握实验的基本原理,看懂实验电路,预测实验现象或实验数据,做到心中有数。
- (3) 认真阅读所需仪器及设备的使用说明书,了解注意事项,熟悉各旋钮、按键、开关的功能,以便安全、正确、顺利地进行实验。
- (4) 写好实验预习报告。实验预习报告一般包括实验目的、原理,实验设备,实验内容、步骤及注意事项等部分。

2. 实验操作

- (1) 参加实验者要自觉遵守《学生实验守则》和《实验室安全管理制度》。

(2) 根据实验内容合理安排实验, 仪器设备和实验装置安放要适当。检查所用器件和仪器是否完好, 然后按实验方案连接实验电路, 并认真检查, 确保无误后方可通电测试。

(3) 认真记录实验条件和所得数据、波形(并进行分析, 判断数据、波形是否正确)。若发生故障, 则耐心寻找故障原因并排除, 记录排除故障的过程和方法。

(4) 仔细审阅实验内容及要求, 确保实验内容完整, 测量结果准确无误, 现象合理。

(5) 实验中若发生异常现象, 应迅速切断电源, 报告指导教师和实验室有关人员。

3. 实验完成

实验完成后, 将实验报告给指导教师审阅签字, 经教师确认数据无误后方可拆除线路, 并清理实验现场。

1) 对实验报告的要求

实验报告是对实验工作的全面总结, 作为一名工程技术人员必须具有撰写实验报告的能力。做完实验后, 实验者需要将实验结果和实验情况完整地、真实地表达出来。实验规定一律用实验报告纸认真书写实验报告。实验报告要求结论正确、分析合理, 简述实验体会, 同时要求文理通顺、简明扼要、符号标准、字迹端正、图表清晰。

2) 实验报告的组成

实验报告应包括以下几个部分:

(1) 实验目的。

(2) 实验测试电路和实验原理。

(3) 实验用的仪器型号、主要工具。

(4) 实验的具体步骤、实验原始数据及实验过程的详细情况记录。

(5) 实验结果和分析, 包括报告书中所要求的理论计算、回答问题、设计记录表格等。必要时, 应对实验结果进行误差分析。

(6) 实验总结, 即完成指导书所要求的总结、问题讨论及心得体会。若有曲线, 应在坐标纸上画出。

三、电路实验室要求

为了在实验中培养学生严谨科学的作风, 确保人身和设备的安全, 顺利完成实验任务, 特制定以下规则:

(1) 教师应在每次实验前对学生进行安全教育。

(2) 严禁带电接线或拆线。

(3) 接好线后, 要认真复查, 确信无误后, 方可接通电源。若无把握, 需请教师审查。

(4) 发生事故时, 要保持镇静, 迅速切断电源, 保持现场, 并向教师报告。

(5) 欲增加或改变实验内容, 须事先征得教师同意。

(6) 非本次实验所用的仪器、设备, 未经教师允许不得动用。

(7) 损坏了仪器、设备, 必须立即向教师报告, 并做出书面检查。责任事故要酌情赔偿。

(8) 保持实验室整洁、安静。

(9) 实验结束后, 要关闭实验电闸, 并将实验用品分类整理好。

四、基本实验技能和要求

要求通过本课程的实验,使学生掌握实验的基本技能,希望学生在实验中注意培养和训练这些基本技能。

安全操作训练包括以下几个方面:

(1) 接线时最后接通电源部分(拆线时先拆电源部分),接完线后仔细复查。严禁带电拆、接线。出现事故时应立即断开电源,并向教师报告情况,检查原因。勿乱拆线路。

(2) 接完电路后,在开始实验前应做好准备工作,例如:

① 交流电源调压器位于最小位置上(逆时针到头)。

② 电压表、电流表或其他测量仪器(如万用表、数字万用表)的量程应置于经过估算的一挡或最大量程上。

(3) 经老师和同组同学的允许,每次开始操作前应告知同组同学,互相密切配合。加负荷或变电路参数时应监视各仪表,若有异常现象,如冒烟、有烤焦味、指针到极限位置、指针打弯等,都应立即断电检查。

(4) 注意各种仪器仪表的保护措施,若有些仪表用保险丝做过载保护,则不得随意更换。例如,监视仪表过载指示灯、过载跳闸机构等。

(5) 预操作(在实验之前先操作和观察一下),其目的在于:

① 观察电路运行和仪表指示是否正常。

② 观察所测电量数据的变化趋势,以便确定实验曲线取点。

③ 找出变化特殊点,作为数据的重点。

④ 熟悉操作步骤。

五、其他实验技能要求

1. 接线能力

(1) 合理安排仪表元件的位置,接线该长则长、该短则短,尽量做到接线清楚、容易检查、操作方便。

(2) 接线要牢固可靠。

(3) 先接电路的主回路,再接并联支路。

2. 合理读取数据点

应通过预操作,掌握被测曲线趋势和找出特殊点:凡变化急剧的地方取点密,变化缓慢处取点疏,应使取点数尽量少而又能反映客观情况。

(1) 正确、准确地读取电表指示数。

① 合理选择量程,应力求使指针偏转大于 $2/3$ 满量程较为合适;在同一量程中,指针偏转越大越准确。

② 在电表量程与表面分度一致时,可以直接读,不一致时则先读分度数,即记下指针指示的格数,再进行换算,并注意读出足够的有效数字,避免少读或多读。

(2) 配合实验结果的有效数字选择曲线坐标比例尺,避免夸大或忽略实验结果的误差。

六、实验设备的使用要求

(1) 了解设备的名称、用途、铭牌规格、规定值及面板旋钮情况。

(2) 重点掌握设备使用的极限值。

① 重点掌握设备情况,要注意其最大允许的输入值。例如,调压器、稳压电源有最大输出电流限制;电机有最大输出功率限制;信号源有最大输出功率及最大信号电流限制。

② 对测量仪器仪表,要注意最大允许的输入量。例如,电流表、电压表和功率表要注意最大的电流值或电压值,万用表、数字万用表、数字频率计、示波器等输入端都规定有最大允许的输入值,不得超过,否则会损坏设备。对于多量程仪表,要正确使用量程,千万不能用欧姆挡测量电压或用电流挡测量电压等。

③ 了解设备面板上各旋钮的作用,使用时应放在正确的位置,禁止无意识乱拨动旋钮。

④ 在正式使用设备前,应设法判断是否正常,有自校功能的可通过自校信号对设备进行检查,如示波器有自校正弦波或方波功能、频率计有自校准频率功能。

1.2 电路测量的基本知识

一、测量的概念

在科学实验与生产实践的过程中,为了获取表征被研究对象的特征的定量信息,必须准确地进行测量。测量就是以确定被测对象量值为目的的全部操作。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。例如,测得某元件两端的电阻值为 $470\ \Omega$,则被测数值为470, Ω (欧姆)为计量单位。

二、测量单位

测量时,要合理地选择相应的测量仪器、仪表及相应的量程,现将常见物理量名称、测量单位和符号,以及单位前常用词头列在表1-1及表1-2中。

表 1-1 常见物理量名称、测量单位和符号

物理量名称	测量单位	符 号
电 流	安培	A
电 压	伏特	V
电 阻 值	欧姆	Ω
电 容 值	法拉	F
电 感 值	亨利	H
相 位	弧度	rad
功率因数		$\cos\varphi$
功	焦耳	J
功率	瓦特	W
频率	赫兹	Hz
周期	秒	s

表 1-2 单位前常用词头

中文词头	符号	倍数
吉或千兆	G	10^9
兆	M	10^6
千	k	10^3
毫	m	10^{-3}
微	μ	10^{-6}
纳	n	10^{-9}
皮	p	10^{-12}

三、测量方法的分类

1. 从获得测量结果的不同方式分类

从获得测量结果的不同方式分类,测量方法可分为直接测量法、间接测量法和组合测量法。

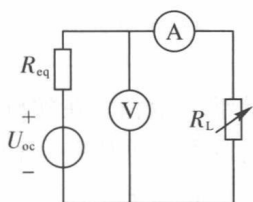
(1) 直接测量法。从测量仪器上直接得到被测量量值的测量方法被称为直接测量法。直接测量的特点是简便。此时,测量目的与测量对象是一致的。例如,用电压表测量电压、用电桥测量电阻值等。

(2) 间接测量法。通过测量与被测量有函数关系的其他量,才能得到被测量量值的测量方法,被称为间接测量法。例如,用伏安法测量电阻。

当被测量不能直接测量,或测量很复杂,或采用间接测量比采用直接测量能获得更准确的结果时,采用间接测量。间接测量时,测量目的和测量对象是不一致的。

(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,则通过联立求解各函数关系来确定被测量的数值,这种测量方式被称为组合测量法。

例如,在如图 1-1 所示的电路中,求线性有源一端口网络等效参数 R_{eq} 、 U_{oc} 。

图 1-1 求等效参数 R_{eq} 、 U_{oc}

解 在调 R_L 为 R_1 时,得到 I_1 、 U_1 ; 在调 R_L 为 R_2 时,得到 I_2 、 U_2 。可得

$$\begin{cases} U_1 + R_{eq} I_1 = U_{oc} \\ U_2 + R_{eq} I_2 = U_{oc} \end{cases}$$

解联立方程组,可求得 R_{eq} 、 U_{oc} 的数值。

2. 根据获得测量结果的数值的方法分类

根据读取测量结果的方法不同,测量方法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)的读数来确定测量结果的方法。在测量过程中,度量器不直接参与作用。例如,用电流表测量电流、用功率表测量功率等。直读测量法的特点是设备简单,操作简便,缺点是测量准确度不高。

(2) 比较测量法——测量过程中被测量与标准量(又称为度量器)直接进行比较而获得测量结果的方法。例如,用电桥测电阻,测量中作为标准量的标准电阻参与比较。比较测量法的特点是测量准确,灵敏度高,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,直接测量法与直读法以及间接测量法与比较测量法,彼此并不相同,但又互有交叉。在实际测量中采用哪种方法,应根据对被测量测量的准确度要求以及实验条件是否具备等多种因素具体确定。例如,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,这些都属于直读法。当要求测量准确度较高时,则用电桥法进行直接测量,这属于比较测量法。

1.3 测量误差分析及处理

一、测量误差的定义

不论用什么测量方法,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。

二、测量误差的分类

1. 根据误差的表示方法分类

根据误差的不同的表示方法,测量误差可分为绝对误差、相对误差、引用误差三类。

(1) 绝对误差是指测得值与被测量实际值之差,用 Δx 表示,即

$$\Delta x = x - x_0 \quad (1.3.1)$$

式中, x 为测得值; x_0 为实际值。

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符号相反,即

$$c = x_0 - x \quad (1.3.2)$$

我们知道了测量值和修正值 c , 由式(1.3.2)就可求出被测量的实际值 x_0 。绝对误差的表示方法只能表示测量的近似程度,但不能确切地反映测量的准确程度。为了便于比较测量的准确程度,我们提出了相对误差的概念。

(2) 相对误差是指测量的绝对误差与被测量(约定)真值之比(用百分数表示),用 γ 表示,即

$$\gamma = \frac{\Delta x}{x_0} \times 100\% \quad (1.3.3)$$

式中,分子为绝对误差,当分母所采用量值不同(如真值 A_0 、实际值 x_0 、示值 x 等)时,其相对误差又可分为相对真误差、实际相对误差和示值相对误差。

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,当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度,但用来表示仪表的准确度时,却不方便。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

$$\gamma_n = \frac{\Delta x}{x_m} \times 100\% \quad (1.3.4)$$

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(1.3.4)中的分子,则得到最大引用误差,用 γ_{nm} 表示,即

$$\gamma_{nm} = \frac{\Delta x_m}{x_m} \times 100\% \quad (1.3.5)$$

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 为仪表准确度等级指数。

根据《直接作用模拟指示电测量仪表及其附件》GB7676.2—87 的规定,电流表和电压表的准确度等级 α 如表 1-3 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 1-3 中的规定。

表 1-3 电流表、电压表的准确度等级表

准确度等级 α	0.05	0.1	0.2	0.3	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	5.0
基本误差/%	± 0.05	± 0.1	± 0.2	± 0.3	± 0.5	± 1.0	± 1.5	± 2.0	± 2.5	± 5.0

由表 1-3 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(1.3.5)说明,在应用指示仪表进行测量时,产生的最大绝对误差为

$$\Delta x_m \leq \pm \alpha\% \cdot x_m \quad (1.3.6)$$

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

$$\gamma_m = \frac{\Delta x_m}{x} \times 100\% \leq \pm \alpha\% \cdot \frac{x_m}{x} \times 100\% \quad (1.3.7)$$

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。当被测量量值愈接近仪表的量程,测量的误差愈小。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。

例 1-1 用一个量程为 30 mA、准确度等级为 0.5 级的直流电流表测得某电路中电流为 25.0 mA，求测量结果的最大示值相对误差。

解 根据式(1.3.6)可得其测量结果可能出现的最大示值相对误差为

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

2. 根据误差的性质分类

根据误差的不同的性质，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

系统误差是指在同一条件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 5 A，若该示值的修正值为 +0.01 A，而在测量过程中由于某种原因对测量结果未加修正，则产生 -0.01 A 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。例如，用一块已知其准确度为 α 及量程为 U_m 的电压表去测量某一电压 U_x ，则可按式(1.3.5)估计测量结果的最大相对误差 γ_m ，因为这时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及测量人员的不良习惯或感官不完善等。

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) 在重复测量时，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。由于系统误差的重现性，就决定了它是可以被修正的。

2) 随机误差

随机误差是指在同一量的多次测量中，以不可预知方式变化的测量误差的分量。随机误差就个体而言是不确定的，但其总体服从统计规律。随机误差一般服从正态分布规律。

随机误差的特点是：

(1) 有界性：有一定的测量条件下，误差的绝对值不会超过一定的界限。

(2) 单峰性：绝对值小的误差出现的概率大，而绝对值大的误差出现的概率小。

(3) 对称性：绝对值相等的正负(±)误差出现的概率一致。

(4) 抵偿性：在将全部误差相加时，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

粗大误差是指明显超出了规定条件下预期的误差。这种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，等等

引起的。例如，用了有问题的仪器、读错、记错或算错测量数据等。含有粗大误差的测量值称为坏值，应该去掉。

三、误差处理

在测量过程中，如果发现测量结果中存在系统误差，就应对测量深入地进行分析和研究，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

从误差来源上消除是消除系统误差的根本方法，它要求测量人员对测量过程中可能产生系统误差的各种因素进行仔细分析，并在测量之前从根源上加以消除。例如，仪器仪表的调整误差，在实验前应正确地、仔细地调整好测量用的一切仪器、仪表，为了防止外磁场对仪器仪表的干扰，应对所有实验设备进行合理的布局和接线等。

2. 用修正方法消除系统误差

用修正方法消除系统误差是指预先将测量设备、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(如电流表、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，即

$$\Delta x = x - x_0$$

$$c = -\Delta x$$

式中， c 为修正值。

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。它是指在测量条件不变的情况下，同一个数值已知且可调的标准量来代替被测量。在比较过程中，若仪表的状态和示值都保持不变，则仪表本身的误差和其他原因所引起的系统误差对测量结果基本上没有影响，从而消除了测量结果中仪表所引起的系统误差。

例 1-2 如图 1-2 所示，用替代法测量电阻 R_x ，图中 R_n 为标准电阻； R_x 为被测电阻； R_0 为限流电阻； E 为电源。

在测量时先把被测电阻 R_x 接入测量线路(开关 S 接到 1)，调节可调电阻 R_0 ，使电流表(A)的读数为某一适当数值，然后将开关 S 转接到位置 2，这时可调标准电阻 R_n 代替 R_x 被

接入测量电路, 调节 R_n 使电流表数值保持原来读数不变。如果 R_0 的数值及所有其他外界条件都不变, 则 $R_n = R_x$ 。显然, 其测量结果的准确度决定于可调标准电阻 R_n 的准确度及电流的稳定性。

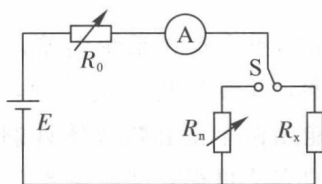


图 1-2 替代法

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。

例 1-3 图 1-3 是用零示法测量实际电压源开路电压 U_{oc} 的实用电路。图中, U_s 为直流电源; R 为标准电阻; \textcircled{G} 为检流计。

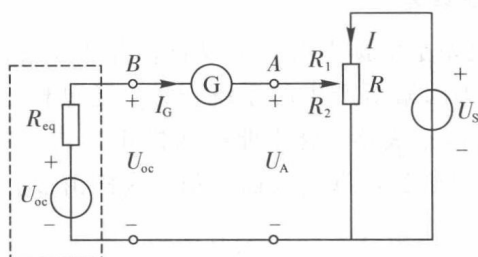


图 1-3 零示法

在测量时, 调节电阻 R 的分压比, 使检流计 \textcircled{G} 的读数为 0, 则

$$U_A = U_B = U_{oc}$$

即

$$U_{oc} = U_A = U_s \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

在测量过程中, 只需要判断检流计中是否有电流, 而不需要读数, 因此只要求它具有足够的灵敏度。同时, 只要直流电源 U_s 及标准电阻 R 稳定且准确, 其测量结果就会准确。

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误差。

例如, 在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, 则消除了外磁场对测量结果的影响。

此外还有组合法、微差替代法等。

1.4 数字式仪表及其数据处理

数字式仪表的工作原理是将被测量(模拟量)转换成数字量之后,用计数器和显示器显示出测量结果。这个转换过程称为模/数(A/D)转换。实现A/D转换的电路有逐次逼近式、斜坡式、积分式等多种类型。

数字式仪表面板上的显示窗口,可以直接显示出被测量的正负读数和单位。面板上的量程选择开关可用以选择测量类型及测量量程,有的数字仪表具有自动转换量程功能。

一、数字式仪表的主要技术指标

数字式仪表的主要技术指标包括显示位数、测量范围、误差、分辨力、输入阻抗、采样方式和采样时间等。

二、数字式仪表的显示位数

数字式仪表数码管的个数一般为4~5个,有的高精度的数字仪表可做到6个。但不能显示出满位“9”,而是以最高位显示数为“4”或“1”较多。判定数字仪表的位数有两条原则:

(1) 能显示0~9所有数字的位为整数位。

(2) 分数位的数值是以最大显示中最高位数字为分子,用满量程时最高位数字作分母。

例如,某数字式仪表的最大显示值为 ± 19999 ,满量程计数值为20000,这表明该仪表有4个整数位,而分数位的分子为1,分母为2,故称之为 $4\frac{1}{2}$ 位,读作四位半,其最高位只能显示0或1。

$3\frac{2}{3}$ 位(读作三又三分之二位)仪表的最高位只能显示0~2的数字,故最大可显示值为 ± 2999 。

三、数字式仪表的准确度

数字式仪表的准确度是测量结果中系统误差和随机误差的综合。它表示测量结果与真值的一致程度,也反映测量误差的大小。一般来讲,准确度愈高,测量误差愈小,反之亦然。

准确度的公式通常用数字式仪表在正常使用条件下的基本误差表示,常见的误差公式有以下两种表达方式

$$\Delta U = \pm (a\%U_x + b\%U_m) \quad (1.4.1)$$

$$\Delta U = \pm (a\%U_x + n) \quad (1.4.2)$$

式中, ΔU 为绝对误差; U_x 为测量指示值; U_m 为测量所用量程的满度值; a 为误差的相对项系数; b 为误差的固定项系数; n 为被测量最后一个单位值的最小变化量。

式(1.4.1)和式(1.4.2)都是把绝对误差分为两部分,前一部分($\pm a\%U_x$)为可变部分,称为“读数误差”,后一部分($\pm b\%U_m$ 及 $\pm n$)为固定部分,不随读数而变,为仪表所固有,