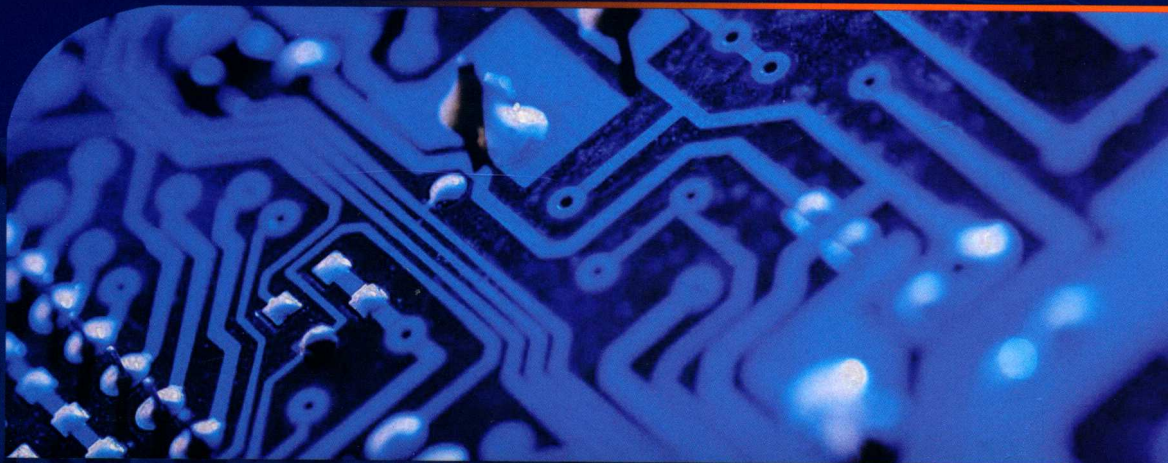




新工科暨卓越工程师教育培养计划电子信息类专业系列教材  
电工电子国家级实验教学示范中心（长江大学）系列教材  
丛书顾问/ 郝 跃

DIANLU FENXI SHIYAN JIAOCHENG  
**电路分析实验教程**

- 主 编/ 金 波 刘 焰
- 副 主 编/ 李克举 蔡昌新 余仕求



华中科技大学出版社  
<http://www.hustp.com>



新工科暨卓越工程师教育培养计划电子信息类专业系列教材  
电工电子国家级实验教学示范中心（长江大学）系列教材  
丛书顾问/郝 跃

DIANLU FENXI SHIYAN JIAOCHENG

# 电路分析实验教程

- 主 编/金 波 刘 焰
- 副 主 编/李克举 蔡昌新 余仕求



华中科技大学出版社

<http://www.hustp.com>

中国·武汉

## 内 容 简 介

本书按照教育部高等学校电子电气基础课程教学指导委员会制订的电路分析基础课程的基本要求,结合目前该课程实际教学情况而编写。

全书共4章和3个附录。第1章电路实验绪论,介绍了实验课的目的、基本要求、误差分析与实验数据处理;第2章实际操作实验,主要讲述了电路实际操作实验(共有17个实验);第3章EWB电路仿真软件快速入门,主要讲述了怎样操作EWB仿真软件;第4章EWB的仿真实验,在掌握仿真软件的基础上完成8个实验;附录A至附录C介绍了实验仪器TFG6920A函数/任意波形发生器的使用说明、TBS1102B-EDU数字存储示波器的使用说明、UTP8305Z电源的使用说明。

本书实验内容较多,可满足不同层次的教学要求,适用于本科电类专业实验教学,也可供本行业相关人员学习参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

电路分析实验教程/金波,刘焰主编. —武汉:华中科技大学出版社,2019.8  
新工科暨卓越工程师教育培养计划电子信息类专业系列教材  
ISBN 978-7-5680-5635-9

I. ①电… II. ①金… ②刘… III. ①电路分析-实验-高等学校-教材 IV. ①TM133-33

中国版本图书馆CIP数据核字(2019)第177418号

### 电路分析实验教程

Dianlu Fenxi Shiyān Jiāochéng

金 波 刘 焰 主 编

策划编辑:王红梅

责任编辑:王红梅

封面设计:秦 茹

责任校对:曾 婷

责任监印:徐 露

出版发行:华中科技大学出版社(中国·武汉)

电话:(027)81321913

武汉市东湖新技术开发区华工科技园

邮编:430223

录 排:武汉市洪山区佳年华文印部

印 刷:武汉华工鑫宏印务有限公司

开 本:787mm×1092mm 1/16

印 张:10

字 数:241千字

版 次:2019年8月第1版第1次印刷

定 价:29.80元



华中出版

本书若有印装质量问题,请向出版社营销中心调换  
全国免费服务热线:400-6679-118 竭诚为您服务  
版权所有 侵权必究

随着科学技术的不断发展,工业化生产不断呈现复杂性和多样性,新的产业也不断涌现,这使技术人才的需求越来越趋向专业化和个性化。这就给我国当前的高等教育提出了前所未有的挑战,培养学生实验能力与实际操作技能显得越来越重要。实验教学可帮助学生验证、消化和巩固基本理论,运用理论处理实际问题,获得实验技能和科学研究方法。为了达到对现代人才培养的基本要求,同时让学生适应最新的实验设备,结合我校具体情况和教育部有关文件精神,我们编写了《电路分析实验教程》。

全书共分为4章。第1章介绍了实验课的目的、基本要求、误差分析与实验数据处理。第2章为本书的核心,主要讲述了电路实际操作实验,共有17个实验。根据学生实验学时,可从中挑选一部分作为学生实际操作实验。为了使学生能更好地完成实验,在本书第3章比较完整地介绍了EWB电路仿真软件。通过学习,学生就能对第4章中与电路分析有关的实验进行仿真。在第4章中共有8个实验。当然,学生只要学会了EWB电路仿真软件,就能对与电路有关的内容进行仿真,并为学习其他仿真软件打好基础。附录A至附录C介绍了实验中常用的仪器。

本书具有以下特色。

(1) 注重理论在实验中的指导作用,强调对实验结果能够做出理论分析和正确解释。除了对电路理论进行验证外,力争使实验内容成为理论课的延伸和扩展。因此,只有学好了理论课才能做好实验,实验也才有针对性和目的性。

(2) 书中既有基础性实验,又有扩展性实验。每一个实验均设有预习要求及思考题,力争让学生每完成一个实验,就能把该实验的知识点掌握好。

(3) 注重基本技能、测量方法、实验方法的训练和培养。常用的仪器设备反复应用于不同的实验项目中,强调仪器设备为实验内容服务,让学生学会合理选用仪器设备的某些功能来达到实验目的。

本书是在长江大学电信学院多年的电路分析实验教学经验的基础上编写而成的,力图反映近年来电路实验教学改革及实验室建设的成果。参加本书编写的有刘焰(编写第2章2.1~2.3节、第3章、第4章4.1~4.3节)、蔡昌新(编写第1章)、余仕求(编写第2章2.8节、2.11节)、李克举(编写附录)、金波(编写其余所有章节)。本书由金波、刘焰担任主编,由刘焰统稿。

由于编者水平有限,书中难免有错误与不妥之处,恳请读者批评指正,欢迎读者提出宝贵意见。

编者

2019年1月于长江大学

# 目 录

<b>1 电路实验绪论</b> .....	(1)
1.1 实验目的及基本要求 .....	(1)
1.2 误差分析与实验数据处理 .....	(5)
<b>2 实际操作实验</b> .....	(13)
2.1 基尔霍夫定律与电位的测定 .....	(13)
2.2 电阻的星形连接与三角形连接的等效变换 .....	(16)
2.3 电源的等效变换 .....	(20)
2.4 电阻衰减器的设计 .....	(25)
2.5 齐性原理、叠加定理和互易定理的验证 .....	(29)
2.6 戴维南定理的研究 .....	(33)
2.7 RC 移相电路的测试 .....	(37)
2.8 交流电路中元件的等效参数的测量 .....	(41)
2.9 日光灯电路与功率因数的提高 .....	(46)
2.10 最大功率传输与匹配网络设计 .....	(51)
2.11 三相电路的研究 .....	(55)
2.12 互感电路的测试 .....	(61)
2.13 RLC 谐振电路的测试 .....	(66)
2.14 RC 选频网络特性的测试 .....	(70)
2.15 一阶电路的响应 .....	(74)
2.16 二阶电路的响应 .....	(78)
2.17 常用仪器的使用 .....	(82)
<b>3 EWB 电路仿真软件快速入门</b> .....	(86)
3.1 EWB 的元器件 .....	(86)
3.2 EWB 的虚拟仪器 .....	(89)
3.3 EWB 的基本分析方法 .....	(92)
3.4 EWB 应用举例 .....	(95)
<b>4 EWB 的仿真实验</b> .....	(99)
4.1 基尔霍夫定律的仿真 .....	(99)
4.2 叠加定理与齐性原理的仿真 .....	(101)
4.3 戴维南定理和诺顿定理的仿真 .....	(103)
4.4 电路的交流分析 .....	(106)
4.5 RLC 谐振电路仿真 .....	(109)

4.6	RC 选频网络特性测试仿真 .....	(114)
4.7	一阶和二阶电路的仿真 .....	(118)
4.8	动态电路的瞬态分析 .....	(125)
<b>附录 A</b>	<b>TFG6920A 函数/任意波形发生器使用说明 .....</b>	<b>(131)</b>
A.1	概述 .....	(131)
A.2	使用前准备 .....	(131)
A.3	前、后面板 .....	(131)
A.4	按键功能介绍 .....	(132)
A.5	数据输入 .....	(133)
A.6	基本操作 .....	(134)
<b>附录 B</b>	<b>TBS1102B-EDU 数字存储示波器使用说明 .....</b>	<b>(138)</b>
B.1	概述 .....	(138)
B.2	主要性能指标 .....	(139)
B.3	主要特点 .....	(139)
B.4	连接能力 .....	(139)
B.5	基本操作介绍 .....	(140)
<b>附录 C</b>	<b>UTP8305Z 电源使用说明 .....</b>	<b>(144)</b>
C.1	概述 .....	(144)
C.2	UTP8305Z 电源主要特性 .....	(144)
C.3	面板介绍 .....	(145)
C.4	功能介绍 .....	(147)
<b>参考文献</b>	<b>.....</b>	<b>(154)</b>

# 1

## 电路实验绪论

### 1.1 实验目的及基本要求

#### 1.1.1 实验目的

电路实验的目的就是让学生通过自己动手提高实践能力;引导学生分析、理解并应用实验过程中观察到的波形及现象;对实验获取的数据,能够正确地处理并进行误差分析;对一些实际问题,能够自行设计并完成整个实验过程。具体可归纳如下。

(1) 增加感性认识,巩固和扩展电路理论知识,培养应用基本理论去分析、处理实际问题的能力。

(2) 训练学生掌握最基本的电量和电路参数的测量方法。

(3) 提高分析、查找和排除电路故障的能力,学习正确处理实验数据、分析误差的方法,并能写出严谨、有理论分析、实事求是、文理通顺的实验报告。

(4) 培养学生独立设计实验的初步能力,学习仿真软件在电路中的使用。

(5) 培养学生养成良好的实验习惯及安全用电的操作习惯。

(6) 培养学生的创新精神和创新意识。

#### 1.1.2 实验要求

为了顺利完成实验任务,确保人身、设备安全,培养严谨、踏实、实事求是的科学作风和爱护国家财产的优良品质,实验时应遵守必要的实验规则。

##### 1. 认真预习

实验前必须认真预习,完成指定的预习任务。这包括对实验原理的理解;对实验电路方案的选定,对电路中参数的核算;为了与理论值比较,对电路还要进行理论分析;对本次实验要达到的目的和实验步骤要十分清楚。以往的实践证明,没有充分的预习,直接到实验室去做实验,盲目性很大,既浪费时间又没有什么收获。所以,养成预习的习惯十分重要,这是做好每一个实验的关键。

##### 2. 了解实验设备

使用仪器设备前,应熟悉其性能、操作方法及各种注意事项。可以在书本上、网上

查找有关仪器设备的资料,还可以到开放实验室对照实物学习操作。

### 3. 用电安全

由于本实验课程自始至终都要与电打交道,因此必须对用电安全予以特别的重视,切实防止发生人身和设备的安全事故,强调遵守以下要求:

- (1) 不得擅自接通电源;
- (2) 身体不触及带电部分;
- (3) 实验中遵循“先接线后合电源,先断电源后拆线”的操作程序;
- (4) 操作时做到手合电源,眼观全局,先看现象,再读数据;
- (5) 发生异常现象(发热、声响、焦臭等)时,应立即切断电源,保持现场,报告指导教师处理;
- (6) 若造成仪器设备的损坏,实验人员需填写事故报告单并按实验室有关规定处理;
- (7) 不了解设备的性能和用法时,不可使用该设备。

### 4. 服从管理

实验过程中应服从教师的管理,未经许可不得做与本实验无关的事情(包括其他实验),不得动用与本实验无关的设备。

### 5. 实验结束后的工作

实验结束后,应及时拉闸断电,整理仪器设备,填写仪器设备使用记录本。

## 1.1.3 实验教学方式

### 1. 本课程的教学方式

本课程与“电路分析”理论课同步教学(如果受到实验条件限制也可分步进行),分为必做实验和选做实验两部分内容。选做实验可在实验课中进行,也可在实验室开放时间内完成。

### 2. 学习成绩评定方法

本课程的学习成绩由平时成绩、笔试成绩和实验操作成绩等两部分构成。

- (1) 平时成绩的评定依据是各次实验后完成的实验报告。
- (2) 实验操作考试的一般形式是给定某个实验任务,由学生自主独立地完成该项实验,然后由教师根据实验完成情况给出相应的实验操作成绩。

### 3. 实验报告

实验报告是实验工作的全面总结,也是工程技术报告的模拟训练。要用简明的形式将实验的过程和结果完整、真实地表达出来。实验报告的基本要求是文理通顺、简明扼要、书写工整、图表规范、分析合理、讨论深入、结论正确。

在每次实验完成后,学生应能写出合乎要求的实验报告。能正确绘制各种图表,具有分析、处理实验数据的初步能力,能对实验结果作出较为合理的解释。

### 4. 实验课的进行方式

实验课通常分为课前预习、进行实验和课后完成实验报告等三个阶段。

课前预习是实验课的准备阶段。预习是否充分,是关系到实验能否顺利进行及能否收到预期效果的关键,因此,课前预习必须予以强调,引起重视。

进行实验时,学生需在指定的时间到实验室完成实验,实验过程中应遵守操作规程和实验室的有关规定。

实验结束后应按前述的格式和要求在规定的时间内完成实验报告。实验报告是学生平时成绩的重要依据。不交实验报告者不能参加下一次实验。

#### 1.1.4 实验报告的编写

实验报告是对实验全过程的陈述和总结。编写电路分析实验报告,要求语言通顺、字迹清晰、原理简洁、数据准确、物理单位规范、图表齐全、结论明确。通过编写实验报告,将书本的理论知识与实验结果相互配合,加深对理论知识的理解。同时,找出理论分析与实验结果的差异,从而培养学生的工程实践能力和独立思考能力。

实验报告分为三个部分。

##### 1. 第一部分

第一部分应该包括实验目的、实验原理和测试方案等内容。

##### (1) 实验目的。

每一个实验都有一个主题,可以是验证某些定理,或是测试电路中的某些参数,或是通过实验来了解电路的性能等,这些就是实验要达到的目的。

##### (2) 实验原理。

实验原理是实验的理论依据。通过理论陈述、公式计算对实验电路进行理论分析。同时要对电路中参数的选取以及电路参数对电路产生的影响进行分析。可以说,每一个成功的实验都是在相应的理论指导下进行的。如果连实验的理论基础都不清楚,这个实验将无法完成。即便是在老师的指导下做完了实验,也将不知道为什么要这样做,不会分析实验结果。

##### (3) 测试方案。

测试方案是根据实验电路拟定的测试方案和步骤,包括针对被测试对象选择合适的测试仪表和工具,准备实验数据记录表格,制定最佳的测试方案。测试方案决定着理论分析与实验结果之间的差异程度。

例如,用伏安法测量电阻时,可以采用图 1-1 所示的两种测试方案。不论采用哪种方案,由于仪表本身具有一定的电阻,按照  $R'_x = \frac{U_V}{I_A}$  来计算都会引起方法上的误差。

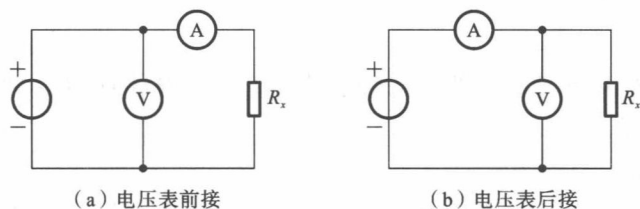


图 1-1 用伏安法测电阻

在图 1-1(a)中,由于电压表接在电流表之前,电压表测量的电压不仅是被测电阻上的电压,还包含了电流表上的电压,因此按欧姆定律计算出的电阻值为

$$R'_x = R_x + r_A$$

用这种连接方法引起的方法误差,以相对误差表示为

$$\gamma = \frac{R'_x - R_x}{R_x} = \frac{r_A}{R_x} \quad (1-1)$$

在图 1-1(b)中,由于电压表接在电流表之后,电流表测量的电流不仅是被测电阻中的电流,还包含了电压表中的电流,因此按欧姆定律计算出的电阻值为

$$R'_x = R_x // r_V = \frac{R_x r_V}{R_x + r_V}$$

用这种连接方法引起的方法误差,以相对误差表示为

$$\gamma = \frac{R'_x - R_x}{R_x} = -\frac{R_x}{R_x + r_V} \quad (1-2)$$

由式(1-1)和式(1-2)可知,第一种测试方案适合于测量阻值较大的电阻,而第二种测试方案适合于测量阻值较小的电阻。

## 2. 第二部分

第二部分通常包括实验原始记录及整理、实验步骤、实验故障及排除等内容。

### (1) 实验原始记录及整理。

实验原始记录是对实验结果进行分析研究的主要依据,实验原始记录应包含实验测试所得的原始数据和信号波形,或计算机仿真的电路图和分析的数据、图表、波形等。将这些原始记录进行整理后,可以得到实验的各种数据表、曲线图等。

### (2) 实验步骤。

对于一般的实验步骤可简述,对于特殊、关键的实验步骤要陈述其理论依据。

### (3) 实验故障及排除。

如果在实验中出现故障,要说明故障现象、出现故障的原因和排除故障所采取的措施。

## 3. 第三部分

第三部分是对实验结果进行的分析、总结,应包括误差分析、实验结论和实验收获等内容。

### (1) 误差分析。

实验结果与理论计算的结果一般是有差异的,这就需要进行测量上的误差估算。说明产生误差的原因。

### (2) 实验结论。

实验结论包括是否完成了实验任务,是否达到了实验目的,实验结果与电路分析理论是否一致等内容。

### (3) 实验收获。

通过实验,学生是否在实践中培养、电路理论知识理解、仪器和仪表的使用等各方面有所提高?同时,是否可以对实验内容和方法提出建议,回答老师提出的思考题?这些都是实验后的收获。

## 1.2 误差分析与实验数据处理

### 1.2.1 测量的基本知识

在科学技术和生产实践的任何部门,测量都是非常重要的基础工作。科学研究工作经常需要对一些事物进行实验、探测及证明,这些就是一系列的测量实验工作。很难想象,如果没有适当的测量方法和仪器,科技工作者进行复杂的科研和生产实践将是多么的困难。实际上,测量技术的进步会大大提高科技发展的速度;反过来,科技的进步又会给测量理论水平的提高、技术的完善创造良好的条件。

凡是利用电子技术进行的测量都称为电子测量,它能用在电类专业的各种测量活动中。例如,对电信号传输特性的测量和电路设备的参数的测量。同样的,它也能广泛地应用在非电类专业的各种测量工作中。利用能量转换器件,把非电量转换为电量进行测量研究,而后得出或反映出非电量的测量结果。

电子测量方法除用于电类专业和非电类专业测量外,还广泛地用于科技和生产实践的其他领域。这主要是由于电子测量方法有以下特点:

- (1) 可得到很高的精确度和灵敏度;
- (2) 响应速度极快;
- (3) 频率范围大;
- (4) 容易实现遥控、遥测等智能测量。

由于测量方法进入数字化时代,现代的电子测量仪器、仪表在技术和性能上已取得非常大的进展。数字化测量主要利用微处理器集成电路,这不仅使测量获得了极高的精确度,还使得测量进入了自动化、智能化阶段。例如,电子计算机和测量仪器相结合,可组成很完美的测量系统。

#### 1. 测量的内容

测量的内容是极其庞大、繁多的,甚至可以说是无所不包的。所以,在此只能对电路测量的内容做简略叙述如下。

- (1) 电能量的测量(电流、电压、功率、电磁场强度等);
- (2) 电路参数的测量(电阻、电感、电容、阻抗、品质因数等);
- (3) 信号参数的测量(波形、频率、相位、调制系数、失真度等);
- (4) 设备性能的测量(放大倍数、灵敏度、频带、噪声系数等);
- (5) 器件特性曲线的显示(幅频特性、伏安特性等)。

#### 2. 测量的分类

在测量时,利用测量仪器和设备,可以采用各种不同的测量方法。所有这些测量方法可以归纳为两大类:直接测量和间接测量。

##### (1) 直接测量。

能够用测量仪器、仪表直接获得测量结果的测量方式称为直接测量。在这种方式下,测量结果是将被测测量与标准量直接比较所得,或者是通过使用事先标好刻度的仪表获得的。也就是说,采用这种方法,测量结果可以由一次测量的实验数据得到。例如用

直流电桥测量电阻,用电压表测量电压等均属于直接测量。

### (2) 间接测量。

若被测量与几个物理量之间存在某种函数关系,则可通过直接测量得到这几个物理量的值,再由函数关系计算出被测量的数值,这种测量方式称为间接测量。也就是说,如果未知量不能直接测量,而是根据别的量的测量结果以及这些量与未知量的关系,再用计算公式换算而得到测量结果的,就是用间接测量方法测得的。例如用伏安法测电阻,先用电压表、电流表测出电压和电流值,然后由欧姆定律  $R=U/I$  算出电阻值,这一测量过程就属于间接测量。间接测量时,测量目的与测量对象不一致。

直接测量法简单而常用,是间接测量法的基础。间接测量法是当被测量不能或不方便直接测量时,或者当用间接测量法会得出比直接测量法更为精确的结果时才采用的。

## 1.2.2 测量误差的基本概念

测量实验之后,不可缺少地要对测量所得数据进行处理和做误差分析。所以,测量实验人员必须了解和掌握:对测量数据进行整理、统计、计算或绘制曲线;能够对测量误差做出分析,了解误差的原因和特性,评定数据的可靠度,确定测量误差的正确表示法等。

### 1. 测量误差的定义及基本表示法

在测量过程中,总是尽力找出被测量的真实值,但由于测量仪器本身的不精确、测量方法的不完善、测量条件的不稳定,以及人员操作的失误等原因,都会使测量值和真实值存在差异,这就会造成测量误差。测量误差通常可分为绝对误差和相对误差两种。

#### (1) 绝对误差。

绝对误差可以表示为

$$\Delta x = x - x_0 \quad (1-3)$$

式中: $\Delta x$  为绝对误差; $x$  为测量值; $x_0$  为真实值。

绝对误差  $\Delta x$  是正(负),表示测量值大(小)于真实值。事实上,由于微观量值的不确定性,绝对的真实值是不可测知的,所以式(1-3)中的真实值  $x_0$ 。总是用更高一级的标准仪表的测量值来代替的。

#### (2) 相对误差。

绝对误差的表示方法有它的不足之处,这就是它往往不能确切地反映测量准确程度的原因。例如,测量两个频率,其中一个频率  $f_1=1000$  Hz,其绝对误差  $\Delta f_1=1$  Hz;另一个频率  $f_2=1000000$  Hz,其绝对误差  $\Delta f_2=10$  Hz,尽管  $\Delta f_2 > \Delta f_1$ ,但是我们并不能因此得出  $f_1$  的测量值较  $f_2$  的测量值准确的结论。恰恰相反,由于  $f_1$  的测量误差对  $f_1=1000$  Hz 来讲占 0.1%,而  $f_2$  的测量误差仅占  $f_2=1000000$  Hz 的 0.001%。也就是说, $f_2$  的测量误差实际小于  $f_1$  的测量误差。因而,为了弥补绝对误差的不足,又提出了相对误差的概念。

所谓相对误差是指绝对误差与真实值的比值,通常用百分数表示。若用  $\gamma$  表示相对误差,则有

$$\gamma = \frac{\Delta x}{x_0} \times 100\% \quad (1-4)$$

如上述  $f_1$  的测量相对误差为  $0.1\%$ ，而  $f_2$  的测量相对误差为  $0.001\%$ 。相对误差是一个只有大小和符号，而没有单位的量。

一个仪器的准确程度，也可以用误差的绝对形式和相对形式共同表示。例如，某脉冲信号发生器输出脉冲宽度的误差表示为  $\pm 10\% \pm 0.025 \mu\text{s}$ 。也就是说，该脉冲发生器的脉宽误差由两部分组成，第一部分为输出脉宽的  $\pm 10\%$ ，这是误差中的相对部分；第二部分  $\pm 0.025 \mu\text{s}$  与输出脉宽无关，可看成是误差中的绝对部分。显然，当输出窄脉冲时，误差的绝对部分起主要作用；当输出宽脉冲时，误差的相对部分起主要作用。

常用电工仪表的测量精度分为  $\pm 0.1$ 、 $\pm 0.2$ 、 $\pm 0.5$ 、 $\pm 1.0$ 、 $\pm 1.5$ 、 $\pm 2.5$ 、 $\pm 5.0$  等七级，分别表示它们引用的相对误差所不超过的百分比。

### 1.2.3 误差的来源和分类

#### 1. 误差来源

误差的主要来源有仪器误差、使用误差、环境影响误差和方法误差等，说明如下。

(1) 仪器误差是由于仪器本身的电器和机械性能不完善所产生的误差。

(2) 使用误差是指人们在使用仪器的过程中出现的误差。例如，安装、调节和使用不当等造成的误差。

(3) 环境影响误差是指测量过程受到温度、湿度、电磁场、机械振动、声、光等的影响所造成的误差。

(4) 方法误差是指使用的测量方法不完善或理论不严密所造成的误差。

#### 2. 误差的分类

测量误差常分为粗大误差、系统误差和随机误差等三大类，说明如下。

(1) 粗大误差也称为疏失误差，是由于测量人员的粗心或测量条件发生突变引入的误差。其量值与正常值明显不同。例如实验时读取数有错误，记录有错误。含有粗大误差的量值常称为坏值或异常值。实验数据中出现异常值时，必须慎重处理其去留。应当根据统计方法的某些准则，判断测量数据中哪些是必须消除的坏值。

(2) 系统误差是由仪器的固有误差、测量工作条件、人员的技能等整个测量系统引入的有规律的误差。对于系统误差，可以用改进测量方法，用标准仪表进行校正，采取措施改善测量条件等办法来减小或消除它，从而得到更为准确的测量结果。常用  $x \pm \Delta$  表示由系统误差造成的测量误差。其中， $x$  是测量的结果值； $\Delta$  是误差极限（边界）； $\pm \Delta$  是误差的范围。

一般来说，测量实验的条件确定之后，系统误差就是恒定值。当条件改变时，系统误差也随之改变。然而，可以尽力找出误差源，进行校正改善，或者采用另一种适当的测量方法，削弱或基本消除系统造成的误差。削弱系统误差的方法一般有零示法、替代法、交换法、补偿法、微差法。

(3) 随机误差又称偶然误差，在相同的条件下，多次重复测量同一个量，各次测量的误差时大时小、时正时负，呈杂乱的变化，这就是随机误差。人们无法校正和消除这种误差。

虽然随机误差不可预测，变化杂乱，但从多次重复测量中可以发现这些误差总体服从一种统计规律。从其统计规律中能找出这种误差的分布特性，并能对测量结果的可靠性做出评估。

### 1.2.4 评定测量结果

通常用准确度、精密度和精确度来说明测量结果。

#### 1. 准确度

准确度说明测量值与真实值的接近程度,反映系统误差的大小。一般地,准确度是指某事物与其要达到的效果的吻合程度。例如,钟表时间与标准时间的吻合程度。

#### 2. 精密度

精密度一般是指某事物的完善、精致和细密程度。评价一个仪表很精密,是指它的设计和构造精巧、严密和考虑周到。精密度和准确度有相对的独立性。例如,一只精密的钟表如果不与标准时间校对,就可能不准确;但精密的东西却容易做到准确,暂时准确的东西并非一定是精密的结果。

在测量学中,用准确度说明系统误差的大小,用精密度说明随机误差的大小。系统误差小的测量必然准确度高。对同一个量进行多次重复测量,如果各次测量数据互相接近而且集中,则表明随机误差小、精密度高。

#### 3. 精确度

精确度是精密度和准确度的总称,表示既精密又准确。

### 1.2.5 工程测量误差的估计

在间接测量时,最大相对误差可以采用以下公式计算。

#### 1. 被测量为几个量的和

被测量为几个量的和时,有

$$y = x_1 + x_2 + x_3$$

式中,各个量的变化  $\Delta y$ 、 $\Delta x_1$ 、 $\Delta x_2$ 、 $\Delta x_3$  之间存在下述关系:

$$\Delta y = \Delta x_1 + \Delta x_2 + \Delta x_3$$

若将各个量的变化量看做绝对误差,则相对误差为

$$\frac{\Delta y}{y} = \frac{\Delta x_1}{y} + \frac{\Delta x_2}{y} + \frac{\Delta x_3}{y}$$

被测量的最大相对误差应出现在每个量的相对误差均为同一符号的情况下,并用  $\gamma_y$  表示,则有

$$\gamma_y = \left| \frac{\Delta x_1}{y} \right| + \left| \frac{\Delta x_2}{y} \right| + \left| \frac{\Delta x_3}{y} \right| = \left| \frac{x_1}{y} \gamma_1 \right| + \left| \frac{x_2}{y} \gamma_2 \right| + \left| \frac{x_3}{y} \gamma_3 \right| \quad (1-5)$$

式中:  $\gamma_1 = \frac{\Delta x_1}{x_1}$ 、 $\gamma_2 = \frac{\Delta x_2}{x_2}$ 、 $\gamma_3 = \frac{\Delta x_3}{x_3}$  为  $x_1$ 、 $x_2$ 、 $x_3$  这三个量的相对误差。

由式(1-5)可以看出,数值较大的量对总的相对误差的影响比较大。

#### 2. 被测量为两个量的差

被测量为两个量的差时,有

$$y = x_1 - x_2$$

若从最不利的情况考虑,经推导可得最大相对误差:

$$\gamma_y = \left| \frac{x_1}{y} \gamma_1 \right| + \left| \frac{x_2}{y} \gamma_2 \right| \quad (1-6)$$

式中,  $x_1$  与  $x_2$  数值非常接近时, 即使每个量的相对误差很小, 被测量的相对误差也可能很大, 所以这种测量应该尽量避免。

例如: 按图 1-2(a) 所示的连接方法测得等效电感为  $L'$ , 按图 1-2(b) 所示的连接方法测得等效电感为  $L''$ , 根据电路理论, 两线圈之间的互感应为

$$M = \left| \frac{L' - L''}{4} \right|$$

设用电桥测出

$$L' = 1.20 \text{ mH}, \quad L'' = 1.15 \text{ mH}$$

又已知两次测量的精度均为  $\pm 0.5\%$ , 则由上式可得

$$M = \frac{1.20 - 1.15}{4} \text{ mH} = \frac{0.05}{4} \text{ mH} = 0.0125 \text{ mH}$$

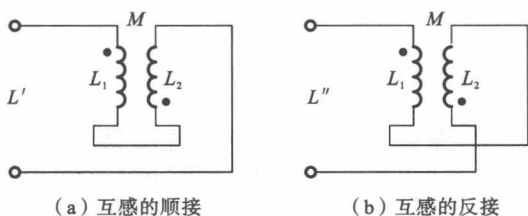


图 1-2 用顺接和反接测量线圈的互感

由式(1-6)可得

$$\gamma_M = \left| \frac{L'}{M} \gamma_{L'} \right| + \left| \frac{L''}{M} \gamma_{L''} \right| = \frac{1.20}{0.0125} \times 0.5\% + \frac{1.15}{0.0125} \times 0.5\% = 94\%$$

显然, 这样的测量结果是没有价值的。

在上述测量中, 如果  $L'$  和  $L''$  的数值相差很大, 取  $L' = 1.72 \text{ mH}$ ,  $L'' = 0.12 \text{ mH}$ , 则有

$$M = \frac{1.72 - 0.12}{4} \text{ mH} = \frac{1.60}{4} \text{ mH} = 0.40 \text{ mH}$$

由式(1-6)可得

$$\gamma_M = \left| \frac{L'}{M} \gamma_{L'} \right| + \left| \frac{L''}{M} \gamma_{L''} \right| = \frac{1.72}{0.4} \times 0.5\% + \frac{0.12}{0.4} \times 0.5\% = 2.3\%$$

在这种情况下, 所得出的测量误差在工程上一般是容许的。

### 3. 被测量等于多个量的积或商

被测量为多个量的积或商时, 有

$$y = x_1^n + x_2^m$$

对上式取对数, 有

$$\ln y = n \ln x_1 + m \ln x_2$$

再微分得

$$\frac{dy}{y} = n \frac{dx_1}{x_1} + m \frac{dx_2}{x_2}$$

于是, 测量时的最大相对误差为

$$\gamma_y = |n\gamma_1| + |m\gamma_2| \quad (1-7)$$

由式(1-7)可知, 指数较大的量对误差的影响也较大。

例如: 为了测量电路中负载的功率, 可以采用间接测量法来测量。用电压表测量负

载两端的电压,然后根据下面的公式计算功率:

$$P = \frac{U^2}{R}$$

采用间接测量法测量的最大相对误差为

$$\gamma_P = |2\gamma_U| + |\gamma_R|$$

式中: $\gamma_U$  为电压表测量时的最大相对误差; $\gamma_R$  为负载电阻的最大相对误差。

假设用数字万用表测得电压为 8 V,直流电压表内阻为 10 M $\Omega$ ,精度为 0.8%,选用的负载电阻为 0.05 级,100  $\Omega$ 。则负载的功率近似等于

$$P = \frac{U^2}{R} = \frac{64}{100} \text{ W} = 0.64 \text{ W}$$

测量时电压表的基本误差为

$$\gamma_P = |2\gamma_U| + |\gamma_R| = 2 \times 0.8\% + 0.05\% = 1.65\%$$

### 1.2.6 测量数据的处理

通过实际测量并取得测量数据后,通常要对这些数据进行计算、分析、整理,有时还要把数据归纳成一定的表达式或画成表格、曲线等,也就是要进行数据处理。

数据处理是建立在误差分析的基础上的。在数据处理的过程中要进行去粗取精、去伪存真的工作,并通过分析、整理引出正确的科学结论,这些结论还要在实践中进一步检验。

#### 1. 有效数字

由于在测量中不可避免地存在误差,并且仪器的分辨能力有一定的限制,因此测量数据不可能完全准确。同时,在对测量数据进行计算时,遇到像  $\pi$ 、 $e$ 、 $\sqrt{2}$  等无理数时,在实际计算中也只能取近似值,因此我们得到的数据通常只是一个近似数。当我们用这个数表示一个量时,为了表示得确切,通常规定误差不得超过末位单位数字的一半,由此引入有效数字的概念。对于这种误差不大于末位单位数字一半的数,从它左边第一个不为零的数字起,直到右边最后一个数字止,都是有效数字。例如 375,123.08,3.10 等,只要其误差不大于末位单位数字之半,它们都是有效数字。

值得注意的是,数字左边的零不是有效数字,而数字中间和右面的零都是有效数字。例如 0.0038 k $\Omega$ ,左面的三个零就不是有效数字,因为该值可以通过单位变换变为 3.8  $\Omega$ ,可见其只有两位有效数字。而对于 3.860 V 这样的数字,最右边的一个零也是有效数字,它对应着测量的准确程度,我们不能随意把它改写成 3.86 V 或 3.8600 V,如果改变的话,就意味着测量准确程度发生变化。

此外,对于像 391000 Hz 这样的数字,假如在百位数上就包含了误差,即可以说只有四位有效数字,这时百位数字上的零是有效数字不能去掉,但十位和个位数上的零虽然不再是有效数字,可是它们要用来表示数字的位数,也不能任意去掉,这时为了区别右面三个零的不同,通常采用有效数字乘上十的乘幂的形式,例如将上述 391000 Hz 写成有效数字应为  $3.910 \times 10^5$  Hz,它清楚地表明有效数字只有四位,误差绝对值不大于 50 Hz。

#### 2. 数字的舍入规则

当需要  $n$  位有效数字时,对超过  $n$  位的数字就要根据舍入规则进行处理。例如对

某电压进行了四次测量,每次测量值均可用四位有效数字表示,分别为  $V_1=38.71\text{ V}$ ,  $V_2=38.68\text{ V}$ ,  $V_3=38.70\text{ V}$ ,  $V_4=38.72\text{ V}$ , 它们的平均值为

$$\bar{V} = \frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 V_i = 38.7025\text{ V}$$

对每个测量值而言,小数点后面第二位都含有误差,那么它们的平均值在小数点后面第二位当然也会包含误差,则在小数点后第三、四位的数字就没有什么意义了,因此应该根据舍入规则把这两个数字处理掉。

目前广泛采用如下舍入规则:

- (1) 当保留  $n$  位有效数字时,若后面的数字小于第  $n$  位单位数字的 0.5 就舍掉;
- (2) 当保留  $n$  位有效数字时,若后面的数字大于第  $n$  位单位数字的 0.5,则第  $n$  位数字进 1;
- (3) 当保留  $n$  位有效数字时,若后面的数字正好为第  $n$  位单位数字的 0.5,则第  $n$  位数字为偶数或零时就舍掉后面的数字;第  $n$  位数字为奇数时,第  $n$  位数字加 1。

上面的舍入规则可简单地概括为“小于 5 舍,大于 5 入,等于 5 时取偶数”。

**【例】** 将下列数字保留 3 位有效数字。

- (1) 45.77            (2) 43.035            (3) 38050            (4) 47.15

则有:(1) 45.77→45.8(因  $0.07 > 0.05$ ,所以末位进 1);

(2) 43.035→43.0(因  $0.035 < 0.05$ ,所以舍掉);

(3) 38050→ $380 \times 10^2$ (因第四位为 5,而第三位为 0,即偶数,所以舍掉);

(4) 47.15→47.2(因第四位为 5,而第三位为 1,即奇数,所以第三位进 1)。

## 1.2.7 测量数据的记录

目前使用的仪表大部分是数字式仪表,本小节主要讨论它的测量数据记录方法。

### 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,而无需再经计算。需要注意的是,对数字式仪表而言,若测量时量程选择不当,则会丢失有效数字。因此在测量时,合理选择数字式仪表的量程尤为重要。例如,用某数字电压表测量  $1.682\text{ V}$  的电压,在不同量程时的显示值如表 1-1 所示。

表 1-1 数字式仪表的有效数字

量程/V	2	20	100
显示值	1.682	01.68	001.6
有效数字位数	4	3	2

从表 1-1 可见,量程选择不当将导致损失有效数字。在此例中只有选择“2V”的量程才是恰当的。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最为合适,注意不可选择过大的量程。

### 2. 测量结果的完整填写

在电路分析实验中,最终的测量结果通常由测得值和相应的误差共同表示。这里的误差是指仪表在相应量程时的最大绝对误差。