



DIANLU YU  
DIANZI JISHU SHIYAN

# 电路与电子技术 实验

主 编 ● 殷志坚 熊朝松  
占华林 罗 强

江西科技师范大学教材出版基金资助

# 电路与电子技术实验

殷志坚 熊朝松  
占华林 罗 强   ◎ 主 编

西南交通大学出版社

· 成 都 ·

图书在版编目(CIP)数据

电路与电子技术实验 / 殷志坚等主编. —成都:

西南交通大学出版社, 2017.8

ISBN 978-7-5643-5629-3

I. ①电… II. ①殷… III. ①电路—实验—高等学校—教材②电子技术—实验—高等学校—教材 IV.

①TM13-33②TN-33

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第179977号

### 电路与电子技术实验

殷志坚 熊朝松  
占华林 罗强 主 编

责任编辑 / 黄淑文

封面设计 / 何东琳设计工作室

西南交通大学出版社出版发行

(四川省成都市二环路北一段111号西南交通大学创新大厦21楼 610031)

发行部电话: 028-87600564 028-87600533

网址: <http://www.xnjdcbs.com>

印刷: 成都中铁二局永经堂印务有限责任公司

成品尺寸 185 mm × 260 mm

印张 21 字数 524 千

版次 2017年8月第1版 印次 2017年8月第1次

书号 ISBN 978-7-5643-5629-3

定价 49.00 元

课件咨询电话: 028-87600533

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

电工电路课程和电子技术课程是实践性很强的基础课程。随着电子技术日新月异的发展,按照高等学校电工、电子技术基础课程教学的基本要求,以及社会对新世纪高等学校培养人才的需求,同时为了增强学生基本实验技能、培养学生的动手能力,我们在总结多年高校实验教学经验的基础上,编写了这本实验教材。该教材适用于高等学校电气类、电子信息类及相关专业的电子技术课程实验教学,也可供相关的专科和从事电工电子技术工作的工程技术人员参考。

本书着重介绍电工电路、模拟电路和数字电路课程的基本实验内容和实验方法。每一个实验都以相关的基本理论为基础,提出实验目的、实验原理、实验内容。学生通过预习,对与实验相关的理论进行分析;通过实验,验证理论结果;通过对测试数据进行分析,找出实验中出现的問題;利用仿真软件进行电路仿真,找出产生误差的原因。在内容编排上:①安排了预习内容和思考题,增强学生独立思考和解决问题的能力;②以实验内容为核心,用实验原理进行阐述,介绍实验方法,使教材自成体系;③以常用实验仪器和设备为基础,通过固定电路板和学生自己搭接电路相结合的方式,使学生既掌握基本理论,又提高实践动手能力;④对实验内容进行电路仿真,并与实测数据比较,从而提高实验效果。

本书共介绍了71个实验,分成5篇,第1篇为电路基础实验,第2篇为数字电路实验,第3篇为模拟电路实验,第4篇为综合创新性设计实验,第5篇为Multisim在电路分析中的应用。分别介绍了电路基础、数字电路、模拟电路课程中的基本实验和基本测试方法,对常用的电子仪器和电路进行了介绍和分析。

本书由殷志坚(编写概述和第1篇)、熊朝松(编写第2篇、第5篇)、占华林(编写第3篇)、罗强(编写第4篇)主编。本书获得江西科技师范大学教材出版基金资助,在编写过程中,得到了江西科技师范大学通信电子学院电工电子实验中心全体老师的大力支持,在此表示感谢。

限于编者水平有限和编写时间仓促,书中不妥和疏漏之处在所难免,敬请读者指正。

编 者

2017年5月

# 目 录

0 概 述	001
0.1 实验目的与要求	001
0.2 实验安全	001
0.3 实验程序	002
0.4 测量误差的分析	005
0.5 数据的一般处理方法	008
第 1 篇 电工实验	010
1.1 电工测量仪表的使用	010
1.2 线性与非线性元件伏安特性的测定	017
1.3 直流电路中电位及其与电压关系的研究	020
1.4 基尔霍夫定律的验证	022
1.5 叠加原理与互易定理的验证	024
1.6 戴维南定理和诺顿定理实验	026
1.7 电压源与电流源的等效变换	029
1.8 受控源特性的研究	033
1.9 一阶电路实验	037
1.10 二阶电路过渡过程实验	039
1.11 $LC$ 元件在直流电路和交流电路中的特性研究	042
1.12 交流电路参数的测定	045
1.13 正弦交流电路中 $RLC$ 的特性实验	047
1.14 $RL$ 和 $RC$ 串联电路实验	050
1.15 串联谐振电路实验	053
1.16 改善功率因数实验	056
1.17 互感电路实验	059
1.18 三相电路及功率的测量	062
1.19 $R-C$ 选频网络实验	066
1.20 无源二端口网络实验	068
1.21 单相变压器实验	071

1.22	三相异步电动机的使用和启动	074
1.23	异步电动机继电—接触控制的基本电路实验	079
1.24	三相异步电动机 Y- $\Delta$ 启动控制实验	083
1.25	三相异步电动机顺序控制实验	086
1.26	三相异步电动机能耗制动控制实验	088
<b>第 2 篇</b>	<b>数字电路实验</b>	<b>091</b>
2.1	门电路逻辑功能及测试	091
2.2	TTL 和 CMOS 集成门电路参数测试	096
2.3	TTL 集电极开路门和三态门逻辑功能测试及应用	101
2.4	集成门电路的逻辑变换及应用	105
2.5	译码器及其应用	106
2.6	数据选择器及其应用	111
2.7	加法器及其应用	116
2.8	触发器及其应用	120
2.9	计数器及其应用	125
2.10	MSI 移位寄存器及其应用	131
2.11	555 定时器及其应用	136
2.12	D/A、A/D 转换器	141
<b>第 3 篇</b>	<b>模拟电路试验</b>	<b>147</b>
3.1	常用电子仪器的使用方法	147
3.2	单级放大电路	151
3.3	两级放大电路	161
3.4	射极跟随器(共集电极电路)	165
3.5	场效应管放大电路的测试	169
3.6	负反馈放大电路	173
3.7	差动放大电路	178
3.8	集成运算放大器性能指标的测试	183
3.9	比例求和运算电路	188
3.10	波形发生电路	195
3.11	有源滤波器	203
3.12	电压比较器	210
3.13	集成电路 RC 正弦波振荡器	214
3.14	集成电路 LC 正弦波振荡器	217
3.15	互补对称功率放大器	219

3.16	集成功率放大器	226
3.17	串联型直流稳压电路	227
3.18	集成稳压器	230
3.19	晶闸管可控整流电路	234
<b>第4篇</b>	<b>综合创新设计实验</b>	<b>238</b>
4.1	基本运算电路设计	238
4.2	积分电路与微分电路设计与应用	240
4.3	精密整流电路的研究	241
4.4	比例、求和运算电路设计	243
4.5	方波和三角波发生器设计	244
4.6	有源滤波电路设计	245
4.7	信号变换电路的研究	245
4.8	D/A 转换电路设计	248
4.9	电子负载电路的研究与设计	248
4.10	恒流源电路的研究与设计	251
4.11	智力竞赛抢答器电路设计	252
4.12	电子秒表	254
4.13	拔河游戏机	258
4.14	汽车尾灯控制电路	263
<b>第5篇</b>	<b>Multisim 在电路分析中的应用</b>	<b>268</b>
5.1	线性与非线性元件伏安特性的测定	268
5.2	LC 串联谐振回路特性的仿真测试	271
5.3	二阶电路动态变化过程的仿真分析	274
5.4	晶体管单管放大电路的仿真	280
5.5	差动放大器电路	287
5.6	比例求和、积分和微分运算电路	291
5.7	555 集成定时电路的仿真分析	297
<b>附录1</b>	<b>常用电阻器</b>	<b>301</b>
1.1	电阻器和电位器的型号命名法	301
1.2	电阻种类及几种常用电阻的结构和特点	301
1.3	电阻器的主要性能指标	302
1.4	电路图中电阻器符号及参数标记规则	303
1.5	电阻器的色标	304

附录 2	常用电容器	306
2.1	电容器的型号命名法	306
2.2	电容器种类及几种常用电容的结构和特点	306
2.3	电容器的主要特性指标	307
2.4	电路图中电容器符号及参数标记规则	308
2.5	电容器的色标	309
2.6	电容器的检测	310
附录 3	半导体器件	311
3.1	半导体二极管	311
3.2	半导体三极管	316
附录 4	集成电路型号命名规则	320
4.1	我国生产的 TTL 集成电路型号命名规则	320
4.2	主要外国公司生产的 TTL 集成电路型号命名规则	320
附录 5	部分 TTL 集成电路管脚排列图	323
参考文献		328



# 0 概 述

学生进行电子实验的目的是掌握一般实验程序、测量误差概念及测量数据的一般处理方法，掌握常用电子仪器的基本原理、使用方法及电信号主要参数的测试方法，同时在实验过程中掌握初步的电子工艺知识与制作等有关实验的必备知识与技能，提高实验效果和动手能力。

## 0.1 实验目的与要求

### 1. 实验目的

充分的实验准备工作、正确的实验操作方法和撰写合格的实验报告，是工科学生应掌握的一种基本技能。实验数据必然存在误差，应了解产生系统误差、偶然误差（随机误差）和过失误差的主要原因，并掌握尽量减小上述误差的一般方法。实验数据是分析实验结果、反映实验效果的主要依据，应掌握读取、记录和处理实验数据的一般方法。

就教学而言，电子技术实验是培养电子、电气类专业应用型人才的基本内容之一和重要手段。所以，“应用”是它直接的、唯一的目的。具体地讲，通过它可以巩固和深化应用技术的基础理论和基本概念，并付诸实践。在实验过程中，要培养理论联系实际学风、严谨求实的科学态度和基本工程素质（其中应特别注重动手能力的培养），以适应实际工作的需要。

### 2. 实验要求

电工实验要求：

- (1) 能读懂基本电子电路图，有分析电路作用或功能的能力。
- (2) 有设计、组装和调试基本电子电路的能力。
- (3) 会查阅和利用技术资料，有合理选用元器件（含中规模集成电路 MSI）并构成小系统电路的能力。
- (4) 有分析和排除基本电子电路一般故障的能力。
- (5) 掌握常用电子测量仪器的选择、使用方法和各类电路性能（或功能）的基本测试方法。
- (6) 能够独立拟定基本电路的实验步骤，写出严谨、有理论分析、实事求是、文字通顺且字迹端正的实验报告。

## 0.2 实验安全

实验安全包括人身安全和设备安全。

## 0.2.1 人身安全

(1) 实验时不得赤脚,实验室的地面应有绝缘良好的地板(或地垫);各种仪器设备应有良好的地线。

(2) 仪器设备、实验装置中通过强电的连接导线应有良好的绝缘外套,芯线不得外露。

(3) 实验电路接好并检查无误后方可接入电源。应养成先接实验电路后接通电源、实验完毕先断开电源后拆实验电路的操作习惯。另外,在接通交流 220 V 电源前,应通知实验合作者。

(4) 在进行强电或具有一定危险性的实验时,应由两个以上人员合作。测量高压时,通常采用单手操作并站在绝缘垫上。

(5) 万一发生触电事故应立即迅速切断电源。如距离电源开关较远,可用绝缘器具将电源线切断,使触电者立即脱离电源并采取必要的急救措施。

## 0.2.2 仪器安全

(1) 使用仪器前,应认真阅读使用说明书,掌握仪器的使用方法和注意事项。

(2) 使用仪器,应按要求正确地接线。

(3) 实验中要有目的地旋动仪器面板上的开关(或旋钮),旋动时切忌用力过猛。

(4) 实验过程中,精神必须集中。当嗅到焦臭味、见到冒烟或火花、听到劈啪声、感觉到设备过烫或出现熔断器熔断等异常现象时,应立即切断电源,在故障未排除前不准再次开机接通电源。

(5) 搬动仪器设备时,必须轻拿轻放。未经允许不准随意调换仪器,更不准擅自拆卸仪器设备。

(6) 仪器使用完毕,应将面板上各旋钮、开关置于合适的位置,如电压表量程开关应旋至最高档位等。

# 0.3 实验程序

实验一般可分为三个阶段,即实验准备、实验操作和撰写实验报告。

## 0.3.1 实验准备

实验能否顺利地进行并取得预期的效果,在很大程度上取决于实验前的准备是否充分。

### 1. 实验准备一

实验前,应按实验任务书的要求写出实验预习报告,具体要求如下:

(1) 认真阅读教材中与本实验有关的内容和其他参考资料,独立完成实验预习报告。

(2) 根据实验目的与要求,设计或选用实验电路和测试电路。所设计的电路,估算要正确,设计步骤要清楚,画出的电路要规范,电路中图形符号和元器件数值标注要符合现行国家标准。

(3) 列出本次实验所需元器件、仪器设备和器材详细清单。

(4) 拟出详细的实验步骤,包括实验电路的调试步骤与测试方法,设计好实验数据记录表格。

## 2. 实验准备二

在实验前,应主动到开放实验室或相应课程实验室,熟悉测试仪器的使用方法。

## 3. 实验准备三

实验开始,应认真检查所领到的元器件型号、规格和数量,并进行预测量。检查并校准电子仪器状态,若发现故障应及时报告指导教师。

### 0.3.2 实验操作

正确的操作方法和操作程序是提高实验效果的可靠保障。因此,要求在每一个操作步骤之前都要做到目的明确。操作时,既要迅速,又要认真。注意事项如下:

(1) 应调整好直流电源电压,使其极性和大小满足实验要求;调整好信号源电压,使其大小满足实验要求。

(2) 实验中要眼观全局。先看现象,例如,仪表有无超量程和其他不正常现象,然后再读取数据。对于指针式仪表,读数前要认清仪表量程及刻度,读数时,身体姿势要正确——眼、指针和针影应成一线。

(3) 利用单元模板插接电路时,要求接插迅速、接触良好和电路布局合理,要为调试操作创造方便条件,避免因接入测量探头而造成短路或其他故障。

(4) 在通电的情况下,不得拔、插(或焊接)半导体器件,应在关闭电源后进行。

(5) 任何电路均应首先调试静态,然后进行动态测试。测试时,手不得接触测试表笔(或探头)的金属部分,最好用高频同轴电缆(或屏蔽导线)作测试线,地线要接触良好且应尽量短些。

### 0.3.3 撰写实验报告

#### 1. 撰写实验报告的目的

按照一定的格式和要求,表达实验过程和结果的文字材料称为实验报告。它是实验工作的全面总结和系统概括。

写实验报告的过程,就是对电路的设计方法和实验方法加以总结,对实验数据加以处理,对所观察的现象加以分析并从中找出客观规律和内在联系的过程。如果做了实验而未写出实验报告,就等于有始无终、半途而废。

对工科学生而言,撰写实验报告也是一种基本技能训练。通过写实验报告,能够深化对技术基础理论的认识,提高技术基础理论的应用能力,掌握电子测量的基本方法和电子仪器的使用方法,提高记录、处理实验数据和分析、判断实验结果的能力,培养严谨的学风和实事求是的科学态度,锻炼科技文章写作能力等。此外,实验报告也是实验成绩考核的重要依据之一。

总之,撰写报告是实验工作不可缺少的一个重要环节,切不可忽视。

## 2. 实验报告的内容

因实验的性质和内容有别，报告的结构并非千篇一律。就电子技术实验而言，实验报告一般应由以下几部分组成。

### 1) 实验名称

每篇报告均应有其名称，并应列在报告的最前面，使人一看便知该报告的性质和内容。实验名称应写得简练、鲜明、准确。简练，就是字数要尽量少；鲜明，就是令人一目了然；准确，就是能恰当地反映实验的性质和内容。

### 2) 实验目的

实验目的指明为什么要进行本次实验。要求写得简明扼要，常常是列出几条。在一般情况下，要写出三个层次的内容，即通过本次实验要掌握什么、熟悉什么、了解什么。

应当指出，有时为了突出主要目的，次要内容可以不写入报告。

### 3) 实验内容

实验内容应包括实验电路、设计性实验还应按要求明确设计任务与方案，对设计的电路还要有调试方法、步骤和内容。

### 4) 数据记录

实验数据是在实验过程中从仪器、仪表上所读取的数值，可称为原始数据。要根据仪表的量程和精密等级确定实验数据的有效数字位数。实验数据一般是先记录在准备报告或实验笔记本上，然后加以整理，写入精心设计的表格中。所设计的表格要能反映数据的变化规律及各参量间的相关性。表格的项目栏要注明被测物理量的名称（或文字符号）和量纲，表格说明栏中的数字小数点要上下对齐，给人以清晰的感觉。在整理实验数据时，如发现异常数据，不得随意舍掉，应进行复测加以验证。

### 5) 实验结果

将实验数据代入公式，求出计算结果。有时为了更直观地表达各变量间的相互关系，还可采用作图法反映实验结果。实验数据必然存在误差，因此，应进行误差估算。估算的目的：一是对提出误差要求的实验，要验证实验结果是否超差；二是找出影响实验结果准确性的主要因素，对超差或异常现象做出合理的解释，提出改进措施。

### 6) 讨论

讨论包括回答思考题及对实验方法、实验装置等提出改进建议。

## 3. 写实验报告应注意的几个问题

(1) 要写好实验报告，首先要做好实验。实验做得不成功，在文字上花多大功夫也是补救不了的。

(2) 写实验报告必须有严肃认真、实事求是的科学态度。不经过重复实验不得任意修改数据，更不得伪造数据。分析问题和得出结论既要实际出发，又要有理论依据，没有理论

分析的实验报告算不上好报告，但照抄书本也不可取。

(3) 在处理实验数据时，必然遇到实验测量误差和有效数字位数问题，应按照有关要求去做。

(4) 图与表是表达实验结果的有效手段，比文字叙述直观、简捷，应充分利用；实验电路的画法应符合规定。

(5) 实验报告是一种说明文体，它不要求艺术性和形象性，而要求用简练和确切的文字、技术术语恰当地表达实验过程和实验结果。

## 0.4 测量误差的分析

被测量有一个真实值，简称为真值，它由理论给定或由计量标准规定。在实际测量时，由于受到测量仪器的精度、测量方法、环境条件和测量者能力等因素的限制，测量值与真值之间不可避免地存在差异，这种差异称为测量误差。

学习有关测量误差知识的目的，就在于在实验中合理地选用测量仪器和测量方法，以便获得符合误差要求的测量结果。

### 0.4.1 测量误差的分类

根据误差的性质及其产生的原因，测量误差一般分为三类。

#### 1. 系统误差

在规定的测量条件下，对同一量进行多次测量时，如果误差的数值保持恒定或按某种确定的规律变化，则称这种误差为系统误差。例如，电表零点不准，温度、湿度、电源电压等因素变化所造成的误差均属于系统误差。

系统误差有一定的规律性，可以通过试验和分析，找出产生的原因，设法予以削弱或消除。

#### 2. 随机误差

在规定的测量条件下，对同一量进行多次测量时，如果误差的数值发生不规则的变化，则称这种误差为随机误差。例如，热骚动、外界电源干扰和测量人员感觉器官无规律的微小变化等因素所引起的误差，便属于随机误差。

尽管每次测量某量时，其随机误差的变化是不规则的，但是，实践证明，如果测量的次数足够多，则随机误差平均值的极限就会趋于零。所以，多次测量某量的结果，它的算术平均值就接近其真值。

#### 3. 过失误差（又称粗大误差）

过失误差是指在一定的测量条件下，测量值显著地偏离真值时的误差。它的误差值一般都明显地超过在相同测量条件下的系统误差和偶然误差。例如，读错刻度、记错数字、计算错误及测量方法不对等引起的误差。通过反复实验或分析，确认存在过失误差的测量数据，应予以剔除。

## 0.4.2 误差的表示方法

### 1. 绝对误差

如果用  $x_0$  表示被测量的真值， $x$  表示测量仪器的示值（即标称值），则绝对误差  $\Delta x$  为  $\Delta x = x - x_0$ 。若用高一级标准的测量仪器测得的值作为被测量的真值，则在测量前，测量仪器应由高一级标准的测量仪器进行校正，校正量常用修正值表示，即对于某被测量，用高一级标准的仪器的示值减去测量仪器的示值，所得的差值就是修正值。实际上，修正值就是绝对误差，仅符号相反而已。例如，用某电流表测量电流时，电流表的示值为 10 mA，修正值为 +0.05 mA，则被测电流的真值应为 10.05 mA。

### 2. 相对误差

为了衡量测量结果的准确度，引入了相对误差（ $\gamma$ ）概念。相对误差是绝对误差与被测量真值的比值，常用百分数表示，即  $\gamma = (\Delta x / x_0) \times 100\%$ ，当  $\Delta x \ll x_0$  时， $\gamma = (\Delta x / x) \times 100\%$ 。例如，用频率计测量频率，频率计的示值为 500 MHz，频率计的修正值为 -500 Hz，则相对误差为

$$\gamma = \frac{500}{500 \times 10^6} \times 100\% = 0.0001\%$$

又如，用修正值为 -0.5 Hz 的频率计，测得频率为 500 Hz，则相对误差为

$$\gamma = \frac{0.5}{500} \times 100\% = 0.01\%$$

从上述两个例子可以看到，尽管后者的绝对误差远小于前者，但是后者的相对误差却远大于前者。因此，前者的测量准确度实际上高于后者。

### 3. 容许误差（又称允许误差、满度相对误差）

测量仪器的准确度通常用容许误差表示。它是根据技术条件的要求，规定某一类仪器的误差不应超过的最大范围。仪器（含量具）技术说明书中所标明的误差，都是指容许误差。

在指针式仪表中，容许误差就是满度相对误差（ $\gamma_m$ ），定义为

$$\gamma_m = (\Delta x / x_m) \times 100\%$$

式中， $x_m$  为表头满刻度读数。

指针式表头的误差，主要取决于它的结构和制造精度，而与被测量的大小无关。因此，用上式表示的满度相对误差，实际上是绝对误差与一个常数的比值。我国电工仪表，按  $\gamma_m$  值分为 0.1、0.2、0.5、1.0、1.5、2.5 和 5 七级。

例如，用一只满度为 150 V、1.5 级的电压表测量电压，其最大绝对误差为  $150 \text{ V} \times (\pm 1.5\%) = \pm 2.25 \text{ V}$ 。若表头的示值为 100 V，则被测电压的真值在  $100 \text{ V} \pm 2.25 \text{ V} = 97.75 \sim 102.25 \text{ V}$  范围内；若表头的示值为 10 V，则被测电压的真值在  $10 \text{ V} \pm 2.25 \text{ V} = 7.75 \sim 12.25 \text{ V}$  范围内。可见，用大量程的仪表测量小示值时，误差较大。

在无线电测量仪器中，容许误差由基本误差和附加误差组成。所谓基本误差，是指仪器在规定工作条件下，在测量范围内出现的最大误差。规定工作条件又称为定标条件，一般包括环境条件（温度、湿度、大气压力、机械振动及冲击等）、电源条件（电源电压、频率、稳压系数及纹波等）和预热时间、工作位置等。所谓附加误差，是指定标条件的一项或几项发生变化时，仪器附加产生的误差。附加误差又可分为两种：一种为使用条件（如温度、电源



电压等)发生变化时仪器产生的误差;另一种为被测对象参数(如频率、负载等)发生变化时仪器产生的误差。例如,DA22型高频毫伏表,其基本误差为:1 mV档小于 $\pm 1\%$ ;3 mV档小于 $\pm 5\%$ ,等等。频率附加误差为:在5 kHz~500 MHz范围内小于 $\pm 5\%$ ;在500 MHz~1 000 MHz范围内小于 $\pm 30\%$ 。温度附加误差为:每10 $^{\circ}\text{C}$ 增加 $\pm 3\%$ (1 mV档增加 $\pm 5\%$ )。

### 0.4.3 削弱或消除系统误差的主要措施

对于随机误差和过失误差的消除方法,前面已做过简要介绍。下面进一步说明产生系统误差的原因,并从中找到削弱或消除它的措施。

#### 1. 仪器误差

仪器误差是指仪器本身电气或机械等性能不完善所造成的误差。例如,仪器校准不佳、定度不准等。消除的方法是在使用前要预先校准或确定出它的修正值。这样,在测量结果中可引入适当的补偿值,即可消除仪器误差。

#### 2. 装置误差

装置误差是指测量仪器和其他设备,由于放置不当、使用方法不正确及因外界环境条件改变所造成的误差。为了消除它,测量仪器的安放必须遵守使用规则。如普通万用表应水平放置,而不能垂直放置使用;电表与电表之间必须有适当距离,不宜重叠或靠得太近;应注意避开过强的外部电磁场的影响等。

#### 3. 人身误差

人身误差是测量者个人的感觉器官和运动器官不完善所引起的误差。例如,有人读指示刻度习惯于超过或欠少,无论怎样调试总是调不到真正的谐振点上等。为了消除这类误差,应提高测量技能、改变不正确的测量习惯、改进测量方法和采用先进的数字化仪器等。

#### 4. 方法误差或理论误差

这是一种由于测量方法所依据的理论不够严格,或采用了不适当的简化和近似公式等所引起的误差。例如,用伏安法测量电阻时,若直接以电压表的示值和电流表的示值之比作为测量结果,而未计及电表本身内阻的影响,所测阻值往往存在不能容许的误差。

#### 5. 削弱或消除系统误差的方法

系统误差按其表现特性还可分为固定误差和变化误差的两类:在一定条件下,多次重复测量所得到的误差值是固定的,称为固定误差;得到的误差值是变化的,则称为变化误差。下面仅介绍消除固定误差的两种方法。

##### 1) 替代法

在测量时,先对被测量进行测量,记录测量数据。然后,用一已知标准量代替被测量,通过改变标准量的数值,使测量仪器恢复到原来记取的测量数据上,这时已知标准量的数值就等于被测量的值。这种方法由于测量条件相同,因此可以消除包括测量仪器内部结构、各种外界因素和装置不完善等所引起的系统误差。例如,测量一只电阻器的准确值(除用专用仪器外),可用替代法。

测量步骤如下：先接上被测电阻  $R_x$ ，调整电路中电位器  $R_p$  使指示电流达到某个确定值（如 0.5 mA）；然后，换接上标准电阻箱，调整电阻箱阻值，使指示电流表仍达到原来的确定值（0.5 mA），则标准电阻箱的示值等于被测电阻  $R_x$  的准确值。用此法可测直流电流表的内阻，被测量的误差与标准电阻箱的误差相同。

## 2) 正负误差抵消法

利用在相反的两种情况下分别进行测量，使两次测量所产生的误差等值而异号，然后取两次测量的平均值便可消除误差。例如，在有外磁场的场合测量电流值，可把电流表转动  $180^\circ$  再测一次，取两次测量数据的平均值，就可抵消由于外磁场影响而引起的误差。

### 0.4.4 一次测量时的误差估计

在许多工程测量中，通常对被测量只进行一次测量。这时，测量结果中可能出现的最大误差与测量方法有关。测量方法有直接法和间接法两类。直接法是指直接对被测量进行测量并取得数据的方法；间接法是指通过测量与被测量有一定函数关系的其他量，然后换算得到被测量的方法。当采用直读式仪器并用直接法进行测量时，其最大可能的测量误差是仪器的容许误差，例如，前面提到的用满度值为 150 V、1.5 级指针式电压表测量电压时的情况。当采用间接法进行测量时，应先由上述直接法估计出直接测量的各量的最大可能误差，然后再根据函数关系找出被测量的最大可能误差。如函数关系式为  $x = a \pm b$ ，则  $x + \Delta x = (a + \Delta a) \pm (b + \Delta b)$ ，所以  $\Delta x = \Delta a + \Delta b$ 。该等式说明：不论  $x$  等于  $a$  与  $b$  的和或差， $x$  的最大可能绝对误差都等于  $a$ 、 $b$  最大可能误差的算术和，故相对误差为  $\gamma_x = \Delta x / x = (\Delta a + \Delta b) / (a \pm b)$ 。必须指出的是，当  $x = a - b$  时，如果  $a$ 、 $b$  两个量很接近，那么被测量的相对误差可能大到不能允许的程度。所以，在选择测量方法时，应尽量避免用两个量之差来求第三个量。

## 0.5 数据的一般处理方法

### 0.5.1 有效数字的处理

#### 1. 有效数字的概念

在记录和计算数据时，必须掌握有效数字的正确取舍。不能认为一个数据中，小数点后位数越多，这个数据就越准确；也不能认为计算测量结果中，保留的位数越多，准确度就越高。因为测量数据都是近似值，并用有效数字表示。所谓有效数字，即对一个数而言，指从左边第 1 个非零数字开始至右边最后一个数字为止所包含的数字。例如，测得的频率为 0.023 8 MHz，它是由 2、3、8 三个有效数字表示的，其左边的两个零不是有效数字，因为可通过单位变换，将这个数写成 23.8 kHz。其末位数字“8”，通常是在测量中估计出来的，因此称它为欠准确数字，其左边的各个有效数字是准确数字。准确数字和欠准确数字对测量结果都是不可少的，它们都是有效数字。

#### 2. 有效数字的正确表示

(1) 在有效数字中，只应保留一个欠准确数字。因此，在记录测量数据时，只有最后一



位有效数字是欠准确数字，这样记取的数据表明被测量可能在最后一位数字上变化 $\pm 1$ 单位。例如，用一只刻度为50分度（量程为50V）的电压表，测得的电压为41.8V，则该电压是用三位有效数字来表示的，其中4和1两个数字是准确数字，而8则是欠准确数字，因为8是根据最最小刻度估计出来的，它可能被估读为7，也可能估读为9。所以上述测量结果可以表示 $(41.8 \pm 0.1)$  V。

(2) 欠准确数字中，要特别注意“0”的情况。例如，测量某电阻值为13.600 k $\Omega$ ，表明前面1、3、6、0是准确数字，最后一位0是欠准确数字。如果改写成13.6 k $\Omega$ ，则表明1、3是准确数字，而6是欠准确数字。上述两种写法，尽管表示同一数值，但实际上反映了不同的测量准确度。

如果用10的方幂表示一个数据，10的方幂前面的数字都是有效数字。例如， $13.6 \times 10^3 \Omega$ ，该数据有4位有效数字。

(3)  $\pi$ 、 $\sqrt{2}$ 等常数具有无限位有效数字，在运算中根据需要取适当的位数。

(4) 对于计量测定或通过计算所得数据，在所规定的精度范围以外的那些数字，一般都应按“四舍五入”的规则处理。

如果只取 $n$ 位有效数字，那么第 $n+1$ 位及其以后的各位数字都应该舍去。古典“四舍五入”法则，对于第 $n+1$ 位为5则只入不舍，这样会产生较大的累计误差。目前广泛采用的“四舍五入”法则对5的处理是：当被舍的数字等于5，而5之后有数字时，则可舍5进1；若5之后为0时，只有在5之前为奇数时，才能舍5进1；若5之前为偶数（含零），则舍5不进位。

下面是把有效数字保留到小数点后第二位的几个数据（括号外为原始数据，括号内为经处理的数据）：

36.850 4 (36.85)、5.226 8 (5.23)、118.245 (118.24)、71.995 (72.00)、5.925 1 (5.93)。

### 3. 有效数字的运算

#### 1) 加、减运算

由于加、减运算的数据必为相同单位的同一物理量，所以其精确度最差的就是小数点后面有效数字位数最少的。因此，在进行运算前，应将各数据所保留的小数点后的位数处理成与精度最差的数据相同的位数，然后再进行运算。

#### 2) 乘、除运算

运算前对各数据的处理应以有效数字位数最少的数据为标准。所得的积或商，其有效数字位数应与有效数字位数最少的那个数据相同。

## 0.5.2 有效数字的图解处理

在许多场合中，如模拟电子技术实验，对最终测量结果的要求并不十分严格。在这种情况下，用图解法处理测量数据比较简单易行。此外，在电子测量中，测量的目的往往不只是单纯地要求某个或几个量的值，而是在于求出某两个量 $x$ 和 $y$ （或更多个量）之间的函数关系，如晶体管特性曲线的测量。对于这种确定函数关系的测量，一般不对测量精度进行估计，适宜采用图解法处理。

图解法处理时应按照一定的规则进行，具体处理视应用情况而定。