



高等学校教材

DIANLU YU DIANZI JISHU  
SHIYAN JIAOCHENG

# 电路与电子技术 实验教程

伍爱莲 万家佑 编著  
朱光波 常仁松

华中科技大学出版社  
<http://www.hustp.com>

高等学校教材

# 电路与电子技术实验教程

伍爱莲 万家佑 编 著  
朱光波 常仁松

华中科技大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

电路与电子技术实验教程/伍爱莲 万家佑 朱光波 常仁松 编著  
武汉:华中科技大学出版社,2006年2月  
ISBN 7-5609-3655-5

I. 电…

II. ①伍… ②万… ③朱… ④常…

III. 电路技术-电子技术-实验-教程

IV. TN

电路与电子技术实验教程 伍爱莲 万家佑 朱光波 常仁松 编著

责任编辑:亢博剑

封面设计:潘 群

责任校对:刘 竣

责任监印:张正林

出版发行:华中科技大学出版社

武昌喻家山 邮编:430074 电话:(027)87557437

录 排:华中科技大学惠友文印中心

印 刷:华中科技大学印刷厂

开本:787×1092 1/16

印张:16.75

字数:392 000

版次:2006年2月第1版

印次:2006年2月第1次印刷

定价:23.80元

ISBN 7-5609-3655-5/TN·97

(本书若有印装质量问题,请向出版社发行部调换)

## 内 容 简 介

本书是普通高等学校实验教材。根据高等学校“电工技术(电工学Ⅰ)”和“电子技术(电工学Ⅱ)”两门课程的教学要求编写而成。全书共分为五章和四个附录。

第1章为电路与电子技术实验基础知识。第2章为电路原理实验,介绍了包括直流、交流、三相电动机等内容的19个实验。第3章为模拟电子实验,共介绍了13个实验。第4章为数字电子实验,包含了验证、应用与设计等类型的共16个实验。第5章为综合应用实验共10个实验,主要介绍了一些常用电器的电路设计。实验内容、题量和难易程度覆盖了不同层次、不同专业的教学要求,可供不同专业的任课教师选用。

附录部分讲述了常用仪器的工作原理及使用方法、各电量的测量方法、电路的调试、电子元器件的识别与选用等实验知识。

本书可作为高等学校自动化、电气、信息、机电、计算机等专业电路与电子技术基础实验教材,也可供从事电路与电子技术工作的工程技术人员参考。

# 前 言

电路与电子技术实验,是高等学校电类及相近专业实践性教学环节的一个重要组成部分。学习这门课程,旨在将学生已学的电路与电子技术理论知识与实际工程有机地结合起来,加深学生对已学课程的理解,逐步培养和提高学生独立工作以及分析、解决实际问题的能力,并为学习后续专业课程和今后从事相关工作打好基础。通过本实验课程的学习,不仅使学生具有科学实验的动手能力,而且要培养学生一丝不苟、严谨求实的科学研究作风。本教程是以加强基本训练、加强各种电路分析与应用、加强工程实践能力的培养、反映本学科的发展水平为指导思想,根据教学大纲的要求,总结多年来的教学实践并结合当前教学改革的需要编写而成。

本教程以“电工技术(电工学Ⅰ)”和“电子技术(电工学Ⅱ)”教学基本要求为依据,编写了相关的实验基础知识,力求启发学生独立思考,自己动手实践,提高学生对实验课的兴趣,调动学生对实验课的积极性。

本书是在陈居正教授编写的《电工与电子技术实验》讲义基础上,参照该课程的教学基本要求,重新编写而成。该书共分五章和四个附录,第1章为电路与电子技术实验基础知识,介绍了实验操作规程、注意事项、数据处理等基础知识。第2章为电路原理实验,共编写了19个实验项目。第3章为模拟电子实验,编写了13个实验项目。第4章为数字电子实验,编写了16个实验项目。第5章为综合设计实验,编写了10个实验项目。附录A介绍了常用仪器的使用,附录B介绍了基本电量的测量,附录C介绍了电子电路的调试,附录D介绍了电子元器件的识别与选用。该书的实验项目略多于基本要求所规定的内容,以满足各专业不同的教学需要。使用本书的各院校及任课老师可以根据不同专业的教学要求、设备条件和学生水平等实际情况,选做相应的实验项目。

本书由伍爱莲教授及万家佑、朱光波、常仁松等老师共同编著,陈居正教授审稿。第1章、第4章、附录A~附录D由万家佑编写,第2章由朱光波编写,第3章由常仁松编写,第5章由伍爱莲教授编写。陈居正教授仔细审阅了全稿,指出了书中诸多错误和不妥之处,并提出了宝贵的修改意见,在此深表感谢。同时,对本书提出宝贵意见和建议的肖若愚、李登科、江淑齐等老师深表谢意。

由于作者学识水平有限,实验改革经验不足,书中难免会有一些错误和不足之处,恳请读者提出批评和改进意见。我们的E-mail:zwxwjy2002@yahoo.com。

武汉科技大学中南分校

信息工程学院《电路与电子技术实验》

教程编写组

2006年2月

# 目 录

|                           |      |
|---------------------------|------|
| 第 1 章 电路与电子技术实验基础知识       | (1)  |
| 1.1 电路与电子技术实验须知           | (1)  |
| 1.2 电路与电子实验测量方法           | (3)  |
| 1.3 误差分析及测量结果的处理          | (4)  |
| 1.4 电路中接地的分析              | (9)  |
| 第 2 章 电路原理实验              | (13) |
| 2.1 基本电工仪表的使用及测量误差的计算     | (13) |
| 2.2 电路元件伏安特性的测绘           | (16) |
| 2.3 电位、电压的测定及电路电位图的绘制     | (20) |
| 2.4 基尔霍夫定律的验证             | (22) |
| 2.5 叠加原理的验证               | (23) |
| 2.6 电压源与电流源的等效变换          | (25) |
| 2.7 戴维南定理的验证              | (28) |
| 2.8 受控源实验的研究              | (31) |
| 2.9 $RL$ 串联电路及功率因数的提高     | (35) |
| 2.10 $RC$ 电路的过渡过程及其应用的实验  | (38) |
| 2.11 二阶动态电路响应的研究          | (42) |
| 2.12 $RLC$ 串联电路的频率特性及谐振现象 | (44) |
| 2.13 $RC$ 选频网络特性测试        | (48) |
| 2.14 双口网络测试               | (50) |
| 2.15 互感电路测量               | (54) |
| 2.16 单相铁心变压器特性的测试         | (57) |
| 2.17 三相电路功率的测量            | (59) |
| 2.18 三相鼠笼式异步电动机点动和自锁控制    | (63) |
| 2.19 三相鼠笼式异步电动机正反转控制      | (66) |
| 第 3 章 模拟电子实验              | (70) |
| 3.1 晶体管特性鉴别和测试            | (70) |
| 3.2 单管交流放大电路              | (74) |
| 3.3 射极输出电路                | (78) |
| 3.4 差动放大电路                | (80) |
| 3.5 场效应管放大电路              | (83) |
| 3.6 负反馈放大电路               | (86) |
| 3.7 集成运算放大器               | (90) |
| 3.8 $RC$ 振荡电路             | (93) |

|              |                              |              |
|--------------|------------------------------|--------------|
| 3.9          | LC 正弦波振荡器 .....              | (95)         |
| 3.10         | OTL 互补对称功率放大电路 .....         | (97)         |
| 3.11         | 集成电路(压控振荡器)构成的频率调制器 .....    | (100)        |
| 3.12         | 集成直流稳压电源 .....               | (103)        |
| 3.13         | 晶闸管可控整流电路 .....              | (106)        |
| <b>第 4 章</b> | <b>数字电子实验 .....</b>          | <b>(110)</b> |
| 4.1          | 晶体管开关特性、限幅器与钳位器 .....        | (110)        |
| 4.2          | TTL 与非门参数测试及使用 .....         | (113)        |
| 4.3          | TTL 与非门的逻辑功能与应用 .....        | (116)        |
| 4.4          | 集成逻辑电路的连接和驱动 .....           | (118)        |
| 4.5          | 组合逻辑电路的分析与设计 .....           | (122)        |
| 4.6          | 编码器、译码器及数字显示 .....           | (124)        |
| 4.7          | 数据选择器 .....                  | (129)        |
| 4.8          | 双稳态触发器 .....                 | (131)        |
| 4.9          | 数字比较器 .....                  | (135)        |
| 4.10         | 计数器 .....                    | (138)        |
| 4.11         | 移位寄存器 .....                  | (142)        |
| 4.12         | 脉冲分配器 .....                  | (148)        |
| 4.13         | 多谐振荡器 .....                  | (151)        |
| 4.14         | 单稳态触发器与施密特触发器 .....          | (153)        |
| 4.15         | 555 定时器及应用 .....             | (158)        |
| 4.16         | D/A、A/D 转换器 .....            | (161)        |
| <b>第 5 章</b> | <b>综合设计实验 .....</b>          | <b>(166)</b> |
| 5.1          | 抢答电路 .....                   | (166)        |
| 5.2          | 简易公用电话计数器 .....              | (168)        |
| 5.3          | 数字秒表电路 .....                 | (171)        |
| 5.4          | 电子打铃器 .....                  | (174)        |
| 5.5          | 交通灯定时控制系统 .....              | (179)        |
| 5.6          | 洗衣机自动控制电路 .....              | (184)        |
| 5.7          | 出租车计价器 .....                 | (187)        |
| 5.8          | 电子密码锁 .....                  | (191)        |
| 5.9          | 简易电子琴 .....                  | (192)        |
| 5.10         | 信号波形产生电路 .....               | (194)        |
| <b>附录 A</b>  | <b>常用仪器的使用 .....</b>         | <b>(200)</b> |
| A.1          | 电子示波器 .....                  | (200)        |
| A.2          | 函数信号发生器 .....                | (213)        |
| A.3          | 直流稳压电源 .....                 | (215)        |
| A.4          | 数字式万用表 .....                 | (216)        |
| A.5          | 交流毫伏表 .....                  | (218)        |
| <b>附录 B</b>  | <b>电路与电子技术实验中电量的测量 .....</b> | <b>(220)</b> |

|             |                                |              |
|-------------|--------------------------------|--------------|
| B.1         | 阻抗的测量 .....                    | (220)        |
| B.2         | 电容的测量 .....                    | (223)        |
| B.3         | 电感的测量 .....                    | (224)        |
| B.4         | 电压的测量 .....                    | (225)        |
| B.5         | 电流的测量 .....                    | (233)        |
| <b>附录 C</b> | <b>调试与故障检测技术 .....</b>         | <b>(236)</b> |
| C.1         | 电路的调试技术 .....                  | (236)        |
| C.2         | 检查故障的一般方法 .....                | (238)        |
| <b>附录 D</b> | <b>常用电子元器件的识别与主要性能参数 .....</b> | <b>(242)</b> |
| D.1         | 电阻器和电位器 .....                  | (242)        |
| D.2         | 电容器 .....                      | (245)        |
| D.3         | 电感器 .....                      | (250)        |
| D.4         | 半导体器件 .....                    | (252)        |
| D.5         | 集成电路 .....                     | (256)        |
| <b>参考文献</b> | <b>.....</b>                   | <b>(259)</b> |

# 第 1 章 电路与电子技术实验基础知识

## 1.1 电路与电子技术实验须知

### 1.1.1 电路与电子技术实验课程的目的

电路与电子技术实验是一门重要的实践性技术基础课程。开设本课程的目的在于帮助学生将所学的理论与实际联系起来,在老师的指导下完成教学大纲规定的实验任务。通过学习电路与电子技术实验使学生熟悉常用仪器、仪表的使用方法,掌握电路与电子技术实验的基本操作技能以及正确处理实验数据、分析实验结果的方法,从而启发学生分析、解决问题的能力,培养学生实事求是的科学态度以及勇于探索 and 创新的开拓精神。

### 1.1.2 电路与电子技术实验的要求

为了更好的培养学生独立分析、解决问题以及开拓创新的能力,我们对电路与电子技术实验的各阶段提出了具体的要求。

#### 1. 实验前的准备

为了使实验能够顺利的进行并达到实验目的,要求实验者应对实验内容进行预习。明确实验目的,熟悉实验原理与实验内容,列出实验设备,拟定实验步骤,制订实验结果记录表,分析实验注意事项。对设计性实验,要求做好实验电路设计,在完成上述工作的基础上,做出预习报告。

#### 2. 实验操作

(1) 参加实验者要自觉遵守实验室规则。

(2) 根据实验内容正确选择所需的实验仪器、仪表并设计合理的布局方式。按拟定的实验方案连接实验电路和测试线路。仔细检查,确认无误后方可通电。

(3) 通电后首先观察电路工作是否正常,如有发热、冒烟、异味、火花和声响等异常现象,应立即断开电源,维持现状并报告老师,与老师一起查找原因,排除故障。

(4) 认真记录实验数据、波形,遇到问题应独立思考,耐心排除,总结产生故障的原因及排除方法。

(5) 小组成员应分工协作,一人操作,一人记录。在实验内容完成一半时,记录者与操作者应调换分工,使每位同学均能受到实验技能的训练。

(6) 记录的实验数据应给老师检查,确认无误后方可拆线,结束本次实验。

(7) 实验完毕应整理好所用的仪器、仪表和元件导线等,若损坏元件、设备应立即向老师说明情况,养成严肃认真、有始有终的良好作风。

#### 3. 填写实验报告

实验报告是对实验过程的总结与归纳,是对工程技术人员撰写论文能力的培养。实验报

告要求用简明的语言表达整个实验过程,应文理通顺、字迹工整、图表清晰、结论正确、分析合理。

实验报告应包括以下具体内容。

(1) 实验名称,实验者及同组人姓名、专业、班级,实验日期。

(2) 实验目的。

(3) 实验原理(包括实验原理图)。

(4) 实验设备(注明型号)。

(5) 实验内容与步骤。包括各实验项目名称及根据实验记录整理成的数据表格,或绘制的曲线或观察到的各种波形等。

(6) 实验结果分析。说明是否符合相关理论。如不符或有误差,应分析其原因。

### 1.1.3 实验故障分析与处理

在实验中出现一些故障是常见的,此时应通过自己的分析,检查出故障的原因,使实验顺利地继续进行下去,从而培养学生独立分析问题、解决问题的能力。

#### 1. 故障的原因

一般来说,实验中的故障原因有如下几种。

(1) 学生对实验系统或实验原理不熟悉而造成线路连接错误。

(2) 元件的极性判断错误,集成电路的引脚线接错。

(3) 开关工作位置不正确。

(4) 电位器没有调在合适位置。

(5) 电源、实验电路、测试仪器、仪表之间的公共参考点连接错误或开路。

(6) 接触不良或导线损坏造成的断路。

(7) 仪器、仪表使用不当。

(8) 集成电路逻辑功能不清楚,对多余引脚处理不当。

#### 2. 故障排除方法

(1) 观察法,即不用任何仪器,通过看、听、嗅、摸等手段来发现问题,从而排除故障。

观察法分两种情况:通电观察和断电观察。主要从以下几方面入手。

① 仪器的选用和使用是否正确。

② 电源电压大小和极性是否符合要求。

③ 电解电容的极性、二极管和三极管的管脚、集成电路的引脚是否接好。

④ 实验线路是否完好。

⑤ 导线是否接触良好。

(2) 仪器仪表逐点(级)检测法,主要从以下几方面入手。

① 用万用表检测电路中元件的好坏。

② 万用表测静态工作点是否正常。

③ 用示波器观察各级的输出波形是否正常。

(3) 替换法。当故障比较隐蔽时,可以采用替换法,即用好的部件、元器件、插件板或仪器设备逐一替换实验电路中相应的部分,以便缩小故障范围,进一步查找故障。

当然,实际调试时寻找故障原因的方法会很多,上面三种是最常用的。对于简单的故障,用一种方法就可以排除,而对于较复杂的故障,则需要几种方法相互配合,才能找出故障点。

在一般情况下寻找故障的常规做法有如下一些。

- ① 先用观察法,排除明显故障。
- ② 再用万用表检查电路的静态工作点。
- ③ 用示波器观察各级的输出波形。
- ④ 最后再用替换法进行元件或仪器替换。

总之,在实验过程中遇到故障时,要耐心细致地分析、查找故障点和故障原因,必要时可以请老师帮助指导检查。

## 1.2 电路与电子实验测量方法

### 1.2.1 测量的内容

测量是通过一定的方法对客观事物的某些参数进行表征的过程。也就是通过实验的方法把被测量与它的标准量进行比较的过程。电路与电子实验测量包括电量的测量和非电量的测量。

### 1.2.2 测量的方法

#### 1. 按测量的途径来分

(1) 直接测量,是一种可以直接得到被测值的测量方法。如用万用表测某元件的工作电压等。这是一种最简单测量方法。

(2) 间接测量,是利用直接测量的值与被测值之间的某种已知函数关系,得到被测值的测量方法。例如,测量放大电路的放大倍数  $A_u$ ,一般是分别测量输出电压  $u_o$  与输入电压  $u_i$  后计算出  $A_u = u_o/u_i$ 。这种方法常用于被测值不便直接测量的情况,或者间接测量值比直接测量值更准确的情况。

(3) 组合测量,是兼用直接测量和间接测量的一种测量方法。在某些测量中,被测值与几个未知值有关系,此时应通过改变测量条件进行多次测量,然后按被测量与未知量之间的函数关系,组成方程组,从而求出各未知量。

#### 2. 按测量的性质来分

(1) 时域测量,主要是测量被测量随时间的变化规律,被测量是时间的函数。如交流电压、电流等。它们的稳态值和有效值多用仪表直接测量,它们的瞬时值可以用示波器来测量,同时可以观察其波形,获得它们随时间的变化规律。

(2) 频域测量,主要是测量被测量的频率特性和相位特性,此时被测量是频率的函数。比较常见的有电路的相频特性和幅频特性。

(3) 数字域测量,是利用逻辑分析仪对数字量进行测量。它具有多个输入通道,可以同时观测许多单次并行的数据。如微处理器地址线、数据线上的信号,可以显示时序波形,也可以用“1”或“0”显示其逻辑状态。

(4) 随机测量,主要是对电路中的噪声、干扰信号进行测量。在测量的过程中经常用到各种变换技术。如变频、分频、检波、A/D 转换、D/A 转换等。

### 1.2.3 测量方法和测量仪器的选择

对同一元件或电路有多种不同的测量方法。测量方法与测量仪器的选择正确与否,直接关系到测量结果的可信度,也关系到测量的经济性和可行性。不当和错误的测量方法,除了得不到正确的测量结果外,还会损坏测量仪器和被测设备。即使有了先进的测量仪器,并不一定能获得准确的测量结果。必须根据测量对象、测量要求和测量条件,选择正确的测量方法与合适的测量设备,组成合理的测量系统。只有细心的操作,才能得到准确的测量结果。

## 1.3 误差分析及测量结果的处理

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特征的定量信息,必须准确地进行测量。在测量过程中,由于各种原因,测量结果和待测量的客观真值之间总存在一定差别,即测量误差。因此,分析误差产生的原因,如何采取措施减少误差,使测量结果更加准确,对实验人员及科技工作者来说是必须了解和掌握的。

### 1.3.1 误差的来源与分类

#### 1. 测量误差的来源

测量误差的来源主要有以下几个方面。

(1) 仪器误差,是指测量仪器本身的电气或机械等性能不完善所造成的误差。如校准误差、刻度误差等。显然,消除仪器误差的方法是配备性能优良的仪器并定时对测量仪器进行校准。

(2) 使用误差,也称操作误差,是指测量过程中因操作不当而引起的误差。减小使用误差的办法是测量前详细阅读仪器使用说明书,掌握仪器的使用方法,严格遵守操作规程,提高实验技巧和对各种仪器的操作能力。例如,万用表表盘上的符号: $\perp$ 、 $\Pi$ 、 $\angle 60^\circ$ 分别表示万用表垂直位置使用、水平位置使用、与水平面倾斜成 $60^\circ$ 位置使用,使用时应按规定放置万用表,否则会带来误差,至于用欧姆挡测电阻前不调零所带来的误差,则更是显而易见的。

(3) 方法误差,又称为理论误差,是指由于使用的测量方法不完善、理论依据不严密、对某些经典测量方法作了不适当的修改简化所产生的,即凡是在测量结果的表达式中没有得到反映的因素,而实际上这些因素在测量过程中又起到一定的作用所引起的误差。例如,用伏安法测电阻时,若直接以电压表示值与电流表示值之比做测量结果,而不计仪器本身内阻的影响,就会引起此误差。

(4) 影响误差,主要指测量者以及环境的影响而引起的误差。如人的感觉器官、运动器官的限制造成的误差以及环境的温度、湿度、机械震动、声音等影响所造成的误差。

#### 2. 测量误差的分类

测量误差按性质和特点可分为系统误差、随机误差和过失误差三大类。

(1) 系统误差,是指在相同条件下重复测量同一量时,误差的大小和符号保持不变,或按照一定的规律变化的误差。系统误差一般可通过实验或分析方法查出,查明其变化规律及产生原因,从而减少或消除系统误差。电路与电子技术实验中系统误差常来源于测量仪器的调整不当和使用方法不当。

(2) 随机误差,又称偶然误差,是指在相同条件下多次重复测量同一量时,误差数值大小

和符号无规律的变化的误差。随机误差不能用实验方法消除。但从随机误差的统计规律中可了解它的分布特性,并能对其大小及测量结果的可靠性作出估计,或通过多次重复测量,然后取其算术平均值来减小随机误差。

(3) 过失误差,是由于测量者对仪器不了解或粗心,导致读数不正确而引起的误差,测量条件的突然变化也会引起过失误差。含有过失测量值称为坏值或异常值。必须根据统计检验方法的某些准则去判断哪个测量值是坏值,然后将其消除。

### 1.3.2 误差的表示方法

误差可以用绝对误差和相对误差来表示。

#### 1. 绝对误差

设被测量的真值为  $A_0$ , 测量仪器的示值为  $X$ , 则绝对误差  $\Delta X$  为

$$\Delta X = X - A_0$$

在某一时间及空间条件下,被测量的真值虽然是客观存在的,但一般无法测得,只能尽量接近它。故常用高一级标准测量仪器的测量值  $A$  代替真值  $A_0$ , 则绝对误差

$$\Delta X = X - A$$

在测量前,测量仪器应由高一级标准仪器进行校正,校正量常用修正值  $C$  表示。对于被测量值,高一级标准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,只是符号相反,即

$$C = -\Delta X = A - X$$

利用修正值便可得该仪器所测量的实际值

$$A = X + C$$

例如,用电压表测量电压时,电压表的示值为  $1.1\text{V}$ , 通过鉴定得出其修正值为  $-0.01\text{V}$ 。则被测电压的真值为

$$A = 1.1 + (-0.01) = 1.09(\text{V})$$

修正值给出的方式可以是曲线、公式或数表。对于自动测量仪器,修正值则预先编制成有关程序,存于仪器中,测量时对误差进行自动修正,所得结果便是实际值。

#### 2. 相对误差

绝对误差值的大小往往不能确切地反映出被测量值的准确程度。例如,测量  $100\text{V}$  电压时,  $\Delta X_1 = 2\text{V}$ , 测量  $10\text{V}$  电压时,  $\Delta X_2 = 0.5\text{V}$ , 虽然  $\Delta X_1 > \Delta X_2$ , 可实际  $\Delta X_1$  只占被测量量的  $2\%$ , 而  $\Delta X_2$  却占被测量的  $5\%$ 。显然, 后者的误差对测量结果的影响相对较大。因此, 工程上常采用相对误差来比较测量结果的准确程度。

相对误差又分为实际相对误差、示值相对误差和引用相对误差。

(1) 实际相对误差, 是用绝对误差  $\Delta X$  与被测量的实际值  $A$  的比值的百分数来表示的相对误差, 记为

$$\gamma_A = \frac{\Delta X}{A} \times 100\%$$

(2) 示值相对误差, 是用绝对误差  $\Delta X$  与仪器示值  $X$  的百分数来表示的相对误差, 记为

$$\gamma_X = \frac{\Delta X}{X} \times 100\%$$

(3) 引用相对误差, 是用绝对误差  $\Delta X$  与仪器的满刻度值  $X_m$  之比的百分数来表示的相对

误差,记为

$$\gamma_m = \frac{\Delta X}{X_m} \times 100\%$$

电工仪表的准确度等级是由  $\gamma_m$  决定的,如 1.5 级的电表,表明  $\gamma_m \leq \pm 1.5\%$ 。我国电工仪表按值共分七级:0.1、0.2、0.5、1.0、1.5、2.5、5.0。若某仪表的等级是 S 级,它的满刻度值为  $X_m$ ,则测量的绝对误差为

$$\Delta X \leq X_m \times S\%$$

其示值相对误差为

$$\gamma_m \leq \frac{X_m}{X} S\%$$

在上式中,总是满足  $X \leq X_m$  的,可见当仪表等级 S 选定后,  $X$  愈接近  $X_m$ , 上限值愈小,测量就愈准确。因此,当我们使用这类仪表进行测量时,一般应使被测量的值尽可能在仪表满刻度值的 1/2 以上。

### 1.3.3 测量结果的处理

测量结果通常用数字或图形表示。下面分别进行讨论。

#### 1. 测量结果的数据处理

##### (1) 近似数和有效数字。

测量结果常常用图形和数据来表示,由于存在误差,若用数据来表示测量结果,测量数据总是近似值,它通常由可靠数字和欠准数字两部分组成,所以在进行数据处理时,除要注意有效数字的正确取舍外,还应符合数据处理方法,以减少测量中随机误差的影响。要从复杂的测量结果中得出可靠的实验结果,找出各物理量之间的变化关系及变化规律,就需要对实验数据进行分析、整理、归纳计算等处理,最后用数据表格清晰地表示出来。若以图形表示测量结果,则应考虑坐标的选择和作图的方法。例如,由电流表测得电流为 12.6mA,这是个近似数,12 是可靠数字,而末位 6 为欠准数字,即 12.6 为三位有效数字。有效数字对测量结果的科学表述极为重要。

对有效数字的正确表示,应注意以下几点。

① “0”在数字中可能是有效数字,也可能不是有效数字。

如 0.450kV 这个数据,它前面的“0”不是有效数字,它的有效数字只有三位。它可以写成 450V,有效数字还是三位。可见,0.450kV 前面的“0”仅与单位有关,后面的“0”是由测量设备的准确度来确定的,是不能随意增减的。

② 对后面带“0”的大数目数字,写法不同,其有效数字位数也不同。例如,3000 如写成  $30 \times 10^2$ ,则成为两位有效数字;若写成  $3 \times 10^3$ ,则成为一位有效数字;若写成  $3000 \pm 1$ ,就是四位有效数字。

③ 如已知误差,则有效数字的位数应与误差所在位相一致,即有效数字的最后一位数应与误差所在位对齐。如仪表误差为  $\pm 0.02V$ ,测得数为 3.2832V,其结果应写作 3.28V。因为小数点后面第二位“8”所在位已经产生了误差,所以从小数点后面第三位开始后面的“32”已经没有意义了,写结果时应舍去。

④ 当给出的误差有单位时,则测量结果的写法应与其一致。如频率计的测量误差为“ $\pm$ ”数 kHz,如测得某信号的频率为 7100kHz,可写成 7.100MHz 和  $7100 \times 10^3 \text{ Hz}$ ,若写成

7100000Hz 或 7.1MHz 是不行的,因为后者的有效数字与仪器的测量误差不一致。

⑤ 在计算中,常数的有效数字的位数未加限制,可根据测量数据的有效数字的位数而定。

(2) 数据舍入规则。

为了使正、负舍入误差出现的机会大致相等,现已广泛采用“小于 5 舍,大于 5 入,等于 5 时取偶数”的舍入规则。

① 被舍去的数字大于 5,则舍 5 进 1,即末位数加 1。如 0.265 保留两位有效数字时,其结果为 0.27。

② 被舍去的数字小于 5,则只舍 5 不进,即末位数不变。如 0.264 保留两位有效数字时,其结果为 0.26。

③ 被舍去的数字等于 5,若前面一位数字为偶数(0,2,4,6,8)时应舍去后面的数字(即末位不变),当前面的数字为奇数(1,3,5,7,9)时,末位数字应加 1(即将末位凑为偶数)。这样,由于舍入概率相同,当舍入次数足够多时,舍入的误差就会抵消。同时,这种舍入规则,使有效数字的尾数为偶数的机会增多,能被除尽的机会比奇数多,有利于准确计算。

(3) 有效数字的运算规则。

当测量结果需要进行中间运算时,有效数字的取舍,原则上取决于参与运算的各数中精度最差的那一项。一般应遵循以下规则。

① 当几个近似值进行加、减运算时,在各数中(采用同一计量单位),以小数点后位数最少的那一个数(如无小数点,则为有效位数最少者)为准,其余各数均舍入至比该数多一位后再进行加减运算,结果所保留的小数点后的位数,应与各数中小数点后位数最少者的位数相同。

② 进行乘除运算时,在各数中,以有效数字位数最少的那一个数为准,其余各数及积(或商)均舍入至比该因子多一位后进行运算,而与小数点位置无关。运算结果的有效数字的位数应取舍成与运算前有效数字位数最少的因子相同。

③ 将数平方或开方后,结果可比原数多保留一位。

④ 用对数进行运算时,应使取对数前后的有效数字位数相等。

⑤ 若计算式中出现如  $e$ 、 $\pi$  等常数时,可根据具体情况来决定它们应取的位数。

(4) 数据的表示法。

① 数据的列表表示。将所得的数据列成表格,简单明了地表示出相关物理量之间的关系。这种方法便于实验者随时检查结果是否合理,以便及时发现问题,减少和避免错误。在分析数据时,还可以发现相关物理量的变化规律,进而得出实验结论。列表的要求如下。

a. 简单明了,便于分析相关物理量之间的关系。

b. 在标题栏中要标明各物理量的单位。

c. 表中的数据要正确反映测量结果的有效数字。

d. 除原始数据外,计算过程中的一些中间结果和最后结果也可以写入表中。

e. 表格中的数值应反映各物理量的变化规律,包括最大值、最小值,在变化明显的部分应多选取几个数值。

② 测量结果的曲线表示。在分析两个(或多个)物理量之间的关系时,往往用曲线比用列表、公式表示更形象和直观。因此,测量结果常要用曲线来表示。在实际测量过程中,由于各种误差的影响,测量数据将出现离散现象,如将测量点直接连接起来,将不是一条光滑的曲线,而是呈折线状,如图 1.3.1 虚线所示,但我们应用有关误差理论,可以把各种随机因素引起的曲线波动抹平,使其成为一条光滑均匀的曲线,这个过程称为曲线的修匀。

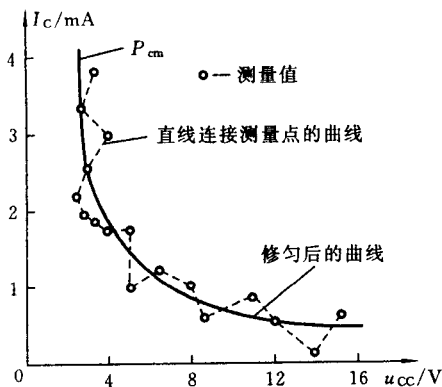


图 1.3.1 测量点波动情况

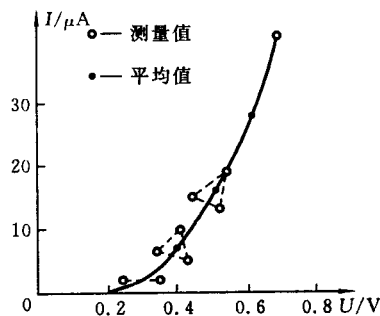


图 1.3.2 平均法修整曲线

图 1.3.1 为直线连接测量点时曲线的波动情况,图 1.3.2 为分组平均法修匀曲线。在要求不太高的测量中,常采用一种简便、可行的工程方法——分组平均法来修匀曲线。这种方法是将各测量点分成若干组,每组含 2~4 个数据点,然后分别估取各组的几何重心,再将这些重心连接起来。图 1.3.2 就是每组取 2~4 个数据点进行平均后的修匀曲线。这条曲线,由于进行了测量点的平均,在一定程度上减少了偶然误差的影响,使之较为符合实际情况。曲线应画在坐标纸上,比例要适当,坐标轴上应注明物理量的符号、单位、起始值、比例和曲线名称。

### 1.3.4 仪器阻抗对测量的影响

被测电路的输入或输出阻抗与测量仪器的输入或输出阻抗,如果没有合理的匹配将造成测量误差,下面作简单叙述。

#### 1. 测量仪器与被测电路的连接方式

##### (1) 测量仪器和被测电路并联。

现用示波器和数字电压表测量电路的内部电压为例,在图 1.3.3 中,被测电路的输出阻抗为  $Z_s$ ,内部电压为  $U$ 。用输入阻抗为  $Z_m$  的示波器,或者数字电压表测量时,测量点 A、B 间的电压  $U'$  分以下几种情况。

当  $Z_m \gg Z_s$  时,  $U' \approx U$ , 此时误差非常小;当  $Z_m = Z_s$  时,  $U' = U/2$ , 指示值为实际电压的 1/2。因此,在这种情况下,必须使测量仪器的输入阻抗比被测电路的输出阻抗大很多。

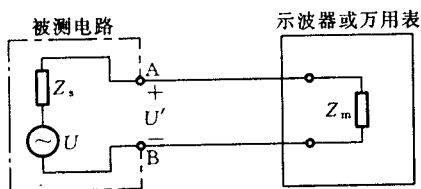


图 1.3.3 测量电压引起的阻抗

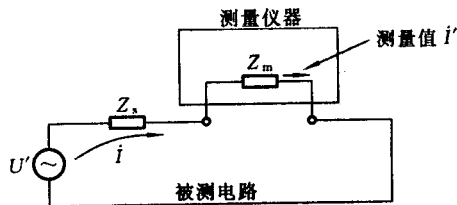


图 1.3.4 测量电流引起的阻抗

另外,一般  $Z_m$  和  $Z_s$  是频率的函数(通常多是频率越高,阻抗越低),尤其在高频测量时必须注意这一点。

##### (2) 测量仪器和被测电路串联。

如图 1.3.4 所示,测量电流时,若未接  $Z_m$  前的真值电流为  $I$ ,串接  $Z_m$  后电流为  $I'$ ,则

$$i'(\text{测量值}) = \frac{i}{1 + \frac{Z_m}{Z_s}} \quad i(\text{真值}) = \frac{U}{Z_s}$$

若  $Z_m \gg Z_s$ , 则  $i' \approx i$ , 测量值近于真值; 若  $Z_m = Z_s$ , 则  $i' \approx i/2$ , 测量指示值为真值的  $1/2$  倍。因此, 在这种情况下, 测量仪器的输入阻抗应远小于被测电路的输出阻抗。由此可见, 如果忽略了测量仪器的阻抗, 会对结果产生较大影响, 实验中应给予足够的重视。

## 2. 阻抗匹配

如图 1.3.5 所示, 用信号发生器进行测量时, 当被测电路输入阻抗  $Z_m$  和信号发生器的输出阻抗  $Z_s$  相等时, 称为阻抗匹配, 匹配的目的在于使负载  $Z_m$  上得到最大功率, 特别在高频电路中, 此种匹配还为了在负载端不产生反射。

在高频、脉冲传输系统中, 传输线多数采用  $50\Omega$ , 它比用  $600\Omega$  系统时, 电抗成分影响小, 因此, 前沿陡的脉冲及高频的测量比较准确。

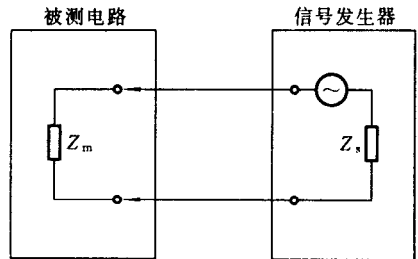


图 1.3.5 阻抗匹配

# 1.4 电路中接地的分析

## 1.4.1 接地的含义

在电路与电子技术实验中, 电路、仪器是否接地以及接地是否正确, 不仅关系到工作是否正常, 实验结果是否正确, 同时还关系到仪器设备和人身的安全。一般电子技术中的接地有两种含义。第一种含义是指接真正的大地, 即与地球保持等电位, 而且常常局限于所在实验室附近的大地。对于交流供电电网, 地线通常是指三相电力变压器的中线(又称零线), 它是在发电厂接大地。第二种含义是指接电子测量仪器、设备、被测电路等的公共连接点, 即系统的参考零电位。这个公共连接点通常与机壳直接连接在一起, 或通过一个大电容(有时还并联一个有形或无形的大电阻)与机壳相连(这在交流意义上也相当于短路)。因此, 至少在交流意义上, 可以把一个测量系统中的公共连接点, 即电路的地线与仪器或设备的机壳看成地线。

研究接地问题包括两方面的内容: 保证实验者人身安全的保护接地和保证正常实验、抑制噪声的技术接地。

### 1. 保护接地

为了保护人身安全, 通常要将仪器设备在正常情况下不带电的金属外壳接地(与大地相连), 如图 1.4.1 所示, 图中,  $Z_1$  是电路与机壳的阻抗, 若机壳未接地, 机壳与地之间就有很大的阻抗  $Z_2$ ,  $U_1$  为仪器中电路与地之间的电压,  $U_2$  为机壳与地之间的电压,  $U_2 = Z_2 U_1 / (Z_1 + Z_2)$ , 因机壳与地绝缘, 故此时  $U_2$  较高。特别是  $Z_1$  很小或绝缘击穿时,  $U_1 \approx U_2$ , 如果人体接触机壳, 就有可能触电。如果将机壳接地, 即  $Z_2 = 0$ , 则机壳上的电压为零, 可保证人身安全。实验室中的仪器采用三眼插座即属于这种接地。这时, 仪器外壳经插座上等腰三角形顶点的插孔与地线相连。

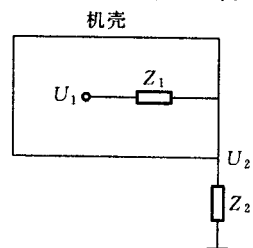


图 1.4.1 仪器外壳接地