

普通高等院校电工电子实验实践系列教材

# 电工电子 实验技术 (上册)

郭宇锋 成谢锋 总主编

常春耘 顾艳丽 王正元 孙科学 编著

刘陈 主审

Electrotechnics and Electronics  
Experiment Technology (Volume 1)

人民邮电出版社  
POSTS & TELECOM PRESS

高校系列

高等院校电工电子实验实践系列教材

# 工电子 实验技术 (上册)

郭宇锋 成谢锋 总主编

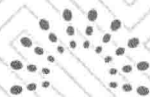
常春耘 顾艳丽 王正元 孙科学 编著

刘陈 主审

Electrotechnics and Electronics  
Experiment Technology (Volume 1)

人民邮电出版社

北京



高校系列

## 图书在版编目(CIP)数据

电工电子实验技术. 上册 / 常春耘等编著. -- 北京:  
人民邮电出版社, 2014. 10  
普通高等院校电工电子实验实践系列教材  
ISBN 978-7-115-36500-2

I. ①电… II. ①常… III. ①电工技术—实验—高等  
学校—教材②电子技术—实验—高等学校—教材 IV.  
①TM-33②TN-33

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第187167号

## 内 容 提 要

本书共分8章,第1章讲述开设实验课程的目的、要求及实验基础知识,第2章介绍电路基本电量的测量方法,第3章包含13个电路分析基础实验,第4章讲述模拟电路的一般设计方法和各基本指标参数的调试和测试方法,第5章选取了8个经典模拟电路基础实验,第6章是模拟电路的提高型实验,第7章介绍常用电子仪器 and 测量仪表的基本原理和方法,第8章介绍仿真软件 Multilism 及其在电路及模拟电路实验中的应用。附录介绍了常用电子元件的一般知识,为学生在实验中合理选择元器件提供帮助。

本书可作为大学本科计算机科学与技术、信息科学与技术等理工科专业非电类学生的实验指导教材,也可作为电大、函授、自考及继续教育电类专业的实验教材。

- 
- ◆ 编 著 常春耘 顾艳丽 王正元 孙科学  
主 审 刘 陈  
责任编辑 武恩玉  
责任印制 彭志环 杨林杰
  - ◆ 人民邮电出版社出版发行 北京市丰台区成寿寺路11号  
邮编 100164 电子邮件 315@ptpress.com.cn  
网址 <http://www.ptpress.com.cn>  
北京鑫正大印刷有限公司印刷
  - ◆ 开本: 787×1092 1/16  
印张: 15.25 2014年10月第1版  
字数: 373千字 2014年10月北京第1次印刷

---

定价: 35.00元

读者服务热线: (010)81055256 印装质量热线: (010)81055316

反盗版热线: (010)81055315

广告经营许可证: 京崇工商广字第0021号

电路分析基础和模拟电子技术是两门很重要的技术基础课，它为从事电气信息技术领域的学习、工作和研究奠定基础。由于这两门课的实践性较强，与之相应的电工电子实验课在人才培养过程中起着不可替代的作用。该课程不仅可以巩固和加深所学的理论知识，而且还能培养了学生运用知识的能力，进行工程实践的能力，为学生今后从事实际工作打下坚实的基础。

多年来，我们一直希望能对自己多年教授的电工电子实验的心得体会进行总结，结合实验教学改革的要求，编写一本有益于电工电子实验教学的教材，本书就是在这样的指导思想下编写的。

本书精选内容，突出重点，强化基本实验能力，其内容的深度和广度符合现阶段我国普通高等学校电气工程、自动化、通信工程、电子信息工程、计算机、电子科学与技术等专业的教学要求，以电子元器件的选择、基本电子仪器的使用、基本电路参数的测量方法等基本实验能力为基础，以有工程应用背景的设计性实验为重点，在内容的选取上，注意处理与理论教学和后续实验课程的衔接，同时为更好地适应电工电子技术的发展趋势，引入了电子电路仿真软件的教学内容。

另外，本书在学生已学知识的基础上由浅入深展开，对基础性、验证性实验，注重实验原理、实验方法和实验技能的讲解，配有详细的预习要求，便于学生养成良好的实验习惯，培养学生自主实验能力及提高学生的实验素养，对设计性、综合性实验，从实际应用的要求出发，注意培养学生的工程意识，培养学生的电路设计能力、实验现象的观测能力、实验故障的排除能力及实验结果的分析能力。

本书第3章、第4章、第6章及附录由常春耘编写，第1章、第2章、第5章由顾艳丽编写，第7章由王正元编写，第8章由孙科学编写，常春耘负责全书统稿和定稿，由许文龙老师审阅并提出很多修改意见，郭宇锋教授、成谢锋教授负责主审。本书在编写过程中得到了电工电子教学实验中心各位老师的支持与帮助，也参考了许多同行专家的著作，在此表示诚挚的谢意。

由于编者水平有限，书中难免有不妥和错误之处，敬请读者批评指正。

# 目 录

第 1 章 实验基本知识	1	4.3 模拟电路的调测	80
1.1 实验课开设的目的及要求	1	4.4 噪声干扰及其抑制	84
1.2 实验报告的撰写与要求	2	第 5 章 模拟电路基础实验	88
1.3 实验中常见故障及其一般排除方法	5	5.1 晶体二极管及其基本应用	88
第 2 章 电气测量的基本知识	8	5.2 晶体管单级电压放大电路	91
2.1 测量及测量误差	8	5.3 场效应管单级放大电路	96
2.2 实验数据的处理	14	5.4 两级电压串联负反馈放大器	100
2.3 电路基本参数和基本电量的测量	20	5.5 差动放大器	104
第 3 章 电路分析基础实验	27	5.6 集成运算放大器的线性运用	107
3.1 线性电阻和非线性电阻伏安特性	27	5.7 集成运算放大器的非线性应用——正弦波形产生电路	113
3.2 基尔霍夫定律、叠加定理的验证	30	5.8 集成运算放大器的非线性应用——方波发生器	116
3.3 戴维南定理与诺顿定理的实验验证	33	第 6 章 模拟电路提高型实验	119
3.4 受控源电路的研究	36	6.1 晶体管共射放大电路的设计	119
3.5 常用电子仪器的使用	41	6.2 串联电压负反馈放大电路的设计	124
3.6 一阶电路的阶跃响应	45	6.3 差动放大电路的设计	130
3.7 二阶电路的响应	49	6.4 波形变换电路的设计	133
3.8 正弦信号相位差的测量	52	6.5 有源滤波器的设计	135
3.9 传输网络频率特性的研究	55	6.6 集成直流稳压电源的设计	142
3.10 RLC 串联谐振电路	60	6.7 交流信号幅度判别电路的设计	146
3.11 工频交流参数的测量	64	第 7 章 常用电子仪器的使用	150
3.12 互感线圈及变压器参数的测定	67	7.1 DF1731SD2A 型双路稳压电源	150
3.13 RC 双 T 电路	70	7.1.1 DF1731SD2A 型双路稳压电源技术参数	150
第 4 章 模拟电路的设计与调测	74	7.1.2 工作原理	150
4.1 模拟电路的设计	74	7.1.3 DF1731SD2A 稳压电源使用方法	151
4.2 模拟电路的装配	80	7.1.4 操作实例	153
		7.2 DT830 数字万用表	153

7.2.1 DT830 数字万用表性能 参数与特点 .....	153	8.2 Multisim 电路设计流程 .....	182
7.2.2 DT830 数字万用表使用 方法 .....	154	8.3 电路原理图设计工具 .....	184
7.3 SX2172 型交流毫伏表 .....	155	8.3.1 Multisim 用户界面简介 .....	184
7.3.1 使用方法 .....	155	8.3.2 菜单和命令 .....	185
7.3.2 注意事项 .....	155	8.3.3 定制用户界面 .....	188
7.4 DG1022 型双通道函数/任意 波形发生器 .....	156	8.3.4 创建电路图 .....	190
7.4.1 概述 .....	156	8.3.5 子电路和层次设计 (Subcircuits and Hierarchy) ...	192
7.4.2 使用方法 .....	156	8.3.6 Multisim 11 中电路设计 向导的使用 .....	193
7.5 DS5022ME 数字双通道示波器 ..	167	8.4 仿真仪表 .....	198
7.5.1 DS5022ME 性能参数与特点 ..	168	8.4.1 仪表工具箱 .....	198
7.5.2 DS5022ME 前面板图及 操作说明 .....	168	8.4.2 仪表的缺省设置 .....	198
7.5.3 波形显示的自动设置 .....	169	8.4.3 常用仿真仪表介绍 .....	199
7.5.4 垂直系统调节 .....	170	8.5 仿真分析 .....	210
7.5.5 水平系统设置 .....	172	8.6 Multisim 11 仿真实例 .....	213
7.5.6 触发系统设置 .....	172	8.6.1 复杂电路分析仿真 .....	213
7.5.7 触功能控制菜单 .....	174	8.6.2 RLC 串联谐振电路仿真 .....	214
7.5.8 参考(REF)设置方法 .....	176	8.6.3 单级晶体管放大电路的 特性仿真分析 .....	217
7.6 台式数字万用表 GDM8341 使用 ..	176	8.6.4 组合逻辑功能测试与仿真 .....	219
7.6.1 概述 .....	176	8.6.5 时序逻辑功能测试与仿真 .....	221
7.6.2 GDM8341 使用方法 .....	177	附录 A DGDZ-2 型电工电子综合 实验箱使用说明 .....	223
第 8 章 Multisim 11 的应用 .....	181	附录 B 常用电子元件的一般知识 .....	225
8.1 Circuit Design Suite 的组成与 基本功能 .....	182	参考文献 .....	238

## 1.1 实验课开设的目的及要求

### 一、实验课目的

由于本书中的实验内容只涉及电路实验和模拟电路实验,因此本章中所提实验均指电路及模拟电路实验。电路及模拟电路实验是一门重要的实践性基础课程,本课程将给学生提供一个理论知识和工程实际相结合的平台,使学生能更好地将理论知识转化为实践能力。该课程以应用理论为基础,专业技术为指导,侧重于理论指导下的操作技能的培养和综合运用能力的提高,旨在将所学理论知识过渡到实践和应用,为后续技术基础课、专业课等课程的学习打下良好的基础。通过学习,学生将了解常用电子仪器、仪表的性能、工作原理及其使用方法;掌握基本的电测量方法以及现代电路计算机仿真技术等;巩固和加深对电路分析理论和模拟电子技术基础理论的理解;掌握模拟电路基本单元电路的设计、装配和调测方法。本课程主要培养学生的基本实验技能,包括正确选用仪器与仪表,制定合理的实验方案,实验电路的装配、调测,实验中各种现象的观察和判断,实验数据的正确读取和处理,误差分析,实验报告的撰写等各方面能力;使学生逐步树立工程和技术观点,提高学生应用理论知识和实验经验分析和解决工程实际问题的能力;培养他们严谨细致、勇于克服困难和开拓创新等方面的科技素质。因而,通过本课程的学习,学生能够在基本实验理论、实验方法和实验技能3个方面得到较为系统的训练。

### 二、实验的基本要求

电路和模拟电路实验一般分为实验前预习、实验操作、实验后撰写实验报告3个阶段,具体要求如下。

#### 1. 实验前预习

为了提高实验的效率,减少实验的盲目性,达到实验目的与要求,实验前要做好充分的预习,预习内容包括:

(1) 明确实验目的、任务与要求。

(2) 阅读、复习相关理论知识,看懂实验原理、方法;根据实验要求设计实验电路;拟定

实验方案和实验步骤;预习实验思考题和注意事项,以便在实验操作过程中观察、解决和注意。

(3)设计实验数据表格,估算实验结果的理论值,以便在实验中能及时发现问题,列出实验中使用的元器件清单(标注型号、规格、量程、容量、数量),对未使用过的仪器仪表和设备,要阅读说明书,掌握一般的使用方法。

## 2. 实验操作

进入实验室做实验,要遵守实验室的各项规定,注意人身安全和设备安全,按照实验任务的要求完成相应的实验操作和数据观测。一般分为以下3个步骤:

### (1) 实验电路的连接

实验电路的连接应遵循以下3个原则:

①合理布局(使实验对象、仪器仪表之间的位置和距离,跨接导线长短等因素对实验结果的影响最小);便于操作、调整和读取数据;连接头不能过于集中,整体美观、简洁。

②连接顺序应视电路复杂程度和操作者技术熟练程度自定。对初学者来说,可按照电路原理图一一对应接线。较复杂的电路,可先连接串联部分,后连接并联部分,最后连接电源端;连接时注意元器件、仪器仪表的同名端、极性和公共参考点等应与电路原理图设定的位置一致。

③对连接好的电路,一定要认真细致地检查,确保电路准确无误后才能通电测量。

### (2) 实验调测与读取数据

根据实验内容的要求,认真观测实验现象,准确记录相应的实验数据和波形。在实验过程中,要分析判断实验获得的数据是否符合预习时理论分析计算的结果。如果实验获得的数据或波形与预期的相差较大或完全不符,应根据实验现象,分析电路故障并及时排除。实验中遇到故障很常见,发现和排除电路故障是工程技术人员必备的技能,实验操作可以很好地培养和锻炼学生的此项技能。

### (3) 拆除实验线路、整理实验现场

实验操作结束,实验结果经确认无误后,就可以拆除实验线路。拆除线路时,应先将各输入量回零,然后切断电源(包括仪器、仪表的电源),确认电路不带电后,再拆除线路并整理实验现场。

## 3. 撰写实验报告

撰写实验报告的过程是对实验进行总结和提高自己的过程,通过这个过程可以加深对实验现象和实验内容的理解,更好地将理论和实践结合起来。同时学习实验报告的撰写,也为以后课程设计报告、毕业论文以及科技论文的写作打下基础。

## 1.2 实验报告的撰写与要求

实验课虽然是一门以实际操作为主的课程,但课前的准备及课后的总结也是不可忽视的。准备充分,实验才能顺利进行;认真总结,才能获得最大的收获。所以撰写实验预习报告和实验报告也是实验课中的重要环节。

### 一、实验报告写作的基本要求

#### 1. 对文体的要求

实验报告是一种科技文体,科技文体的基本特点是客观真实、准确简练。要求实验报告中



的数据必须经过数据处理和数据分析的过程, 数据处理是指将原始数据处理成有效位数合理、准确反映测量误差的数据, 数据分析是指分析数据的正确性和误差产生原因。在电工电子类的实验课中, 初学的同学常常将原始数据不加处理就写入实验报告, 影响了实验报告的准确性。

### 2. 对电路图的要求

在电工电子制图中有纯原理图和工程原理图之分, 在实验或设计中主要使用的是工程原理图。工程原理图不但要反映电路的功能和原理, 还要反映所用元器件及其相互间的连接关系。所以要求在绘制电路图时, 既要画出元件的符号, 又要标明符号各个端子的序号, 同时, 还要标注元件的型号和参数。在报告中绘制电路图时, 如果电路简单而所需图幅较小, 可不采用国标要求的图幅尺寸, 将图直接画在报告书中, 但是要求一幅图独占报告页面的若干行, 不可在与图平行的空白处填写报告中的其他内容, 以免影响读图。

### 3. 对波形图的要求

实验报告在叙述设计过程和实验情况时, 常常需要画出一些波形来反映设计依据或测试结果。绘制波形图的要求如下:

#### (1) 给波形命名

必须为所绘制的波形命名。命名方式有两种: 一种是直接采用波形所示的信号的名称, 如  $U_i$ 、 $U_{O1}$ 、CLK 等; 另一种是根据波形所示信号的位置命名, 方法是用“符号编号”加“:”再加“元件的管脚号”。例如, “ $D_1:12$ ”表示在  $D_1$  所代表的元件的第 12 管脚处测得的波形; “C”表示在所代表的三极管的 C 极测得的波形。波形的名称应标注在波形的最左侧或者纵坐标的箭头上方。

#### (2) 波形参数的完整性

实验中应根据实验目的和测试要求合理掌握记录被测信号的波形的详略程度。在记录信号的电参数时, 一般应完整记录电压的幅度、频率、形状等参数, 如果需要, 还应记录信号波形的电位值。例如在测试脉冲信号的电参数时, 必须记录它的高电平值和低电平值; 又如, 在测量放大器的动态范围时, 就需要观测和记录信号的最高和最低电压值, 以便确定输出信号的失真是否饱和失真还是截止失真。在记录周期信号的波形时, 一般应画出信号的两个完整的周期, 以反映信号的周期性。在记录两个或更多信号之间的相位关系时, 应使几个信号的时间轴对齐。

## 二、实验预习报告格式

实验前应预习实验指导书中的有关内容, 了解实验原理, 明确实验步骤及注意事项, 完成预习报告。预习报告的内容包括:

1. 实验名称
2. 实验目的
3. 实验原理及实验电路图
4. 实验用仪器与器件
5. 实验内容、步骤及方法
6. 原始数据记录表格
7. 实验中有关测试数据的理论值计算
8. 注意事项

预习报告的功能有两个: 一是通过预习真正了解实验的目的, 为本次实验制订出合理的实验方案, 进入实验室后即可按照预习报告进行实验; 二是为实验后的总结提供原始资料。

因此,撰写预习报告时不能流于形式,应严肃地对待每一项内容,在认真考虑实验的每个环节、步骤后,撰写出可行的、有实用价值的预习报告。

### 三、电路实验报告格式

实验报告应该是:内容具体完整,观点明确,叙述条理清晰,层次布局合理,书写工整,实验结果的表达方式明了有效(可采用数据表格、图形或曲线表示),可读性强、可信度高。

验证性实验报告的内容一般应包括:

1. 实验名称
2. 实验目的
3. 实验电路图及实验原理
4. 实验用仪器仪表
5. 测试数据表格及数据处理结果(包括误差计算和分析)
6. 曲线图或波形图
7. 对实验结果的分析结论
8. 回答问题

设计性实验报告的内容一般应包括:

1. 实验名称
2. 实验目的
3. 技术指标
4. 电路设计
  - (1) 整体设计
  - (2) 单元电路设计
  - (3) 电路原理图及元件明细表
5. 测试用仪器仪表
6. 测试数据表格及数据处理结果(包括误差计算和分析)
7. 曲线图或波形图
8. 对实验结果的分析结论,是否满足设计指标要求
9. 回答问题
10. 实验后的体会、经验与教训

以上是一份较完整实验报告内容的大致范围。同学们不一定要拘泥于一定格式,但必须包括以下3个方面内容:

- (1) 为什么做此实验?
- (2) 怎样进行实验?要指明关键问题所在。
- (3) 实验得到什么的结果?对实验结果及误差进行分析。

### 四、撰写实验报告注意事项

- (1) 写实验报告要用实验报告纸。
- (2) 数据记录和数据处理要注意数据的有效位数。
- (3) 曲线和波形应认真地画在坐标纸上。绘制曲线不能简单地在坐标图上把相邻的数据

点用直线相连, 应进行“曲线拟合”。纵、横坐标代表的物理量、单位及坐标刻度均要标清楚。需要互相对比的曲线或波形应画在同一坐标平面上, 每条曲线(或波形)必须标明参变量或条件。画好的曲线(或波形)图应贴在相应实验内容的数据表下面。如果图集中安排在报告的最后一页, 则每个图必须标明是哪个实验内容的何种曲线(或波形)。

(4) 实验数据的原始记录应用钢笔(或圆珠笔)写上实验者的姓名, 并由指导教师检查签字后方为有效。实验报告必须附有教师签字的原始数据纸, 否则视为无效报告。正式报告中的数据表格要认真填写, 不能用原始记录纸代替。

### 1.3 实验中常见故障及其一般排除方法

对初学或实验经验还不丰富的实验者来说, 在实验中出现这样那样的问题、发生这样那样的故障在所难免, 也很正常。正是通过对电路故障的分析、诊断和排除, 才能逐步提高实验者运用所学理论知识分析和解决实际问题的能力。

#### 一、故障产生的原因

实验中产生故障的原因各种各样, 大致可归纳为以下几个方面。

##### 1. 仪器设备

- (1) 仪器自身工作状态不稳定或损坏;
- (2) 超出了仪器的正常工作范围, 或调错了仪器旋钮的位置;
- (3) 测量线损坏或接触不良(虚连接或内部断线);
- (4) 仪器旋钮由于松动, 偏离了正常的位置。

##### 2. 器件与连接

- (1) 用错了器件或选错了标称值;
- (2) 连线出错, 导致原电路的拓扑结构发生改变;
- (3) 连接线接触不良或损坏;
- (4) 在同一个测量系统中有多点接地, 或随意改变了接地位置;
- (5) 实验线路布局不合理, 电路内部产生干扰。

##### 3. 错误操作

- (1) 未严格按照操作规程使用仪器。如读取数据前没有先检查零点或零基线是否准确, 读数的姿势、表针的位置、量程不正确等。
- (2) 片面理解问题, 盲目地改变了电路结构, 未考虑电路结构的改变可能对测量结果带来的影响和后果。
- (3) 采用不正确的测量方法, 选用了不该选用的仪器。

#### 二、故障分类

##### 1. 开路故障

开路故障一般现象为无电压、无电流、指示仪表无偏转、示波器不显示波形等。

产生原因: 焊点虚焊、接线柱松动引起接触不良; 引线折断或导线接头根部折断; 电源熔断器熔断或其元件损坏、断线等。

## 2. 短路故障

短路故障现象为电路中电流剧增、表指针打弯、熔断器熔断、电路元件冒烟、有烧焦气味等。

产生原因：接线时接头相碰或裸露部分相碰；印刷电路板焊接点相触；接线错误；过电压、过电流破坏了绝缘层等。

## 3. 其他故障

元件质量差；因使用年长日久、潮湿发霉而引起老化变质，使电压过高或过低；实验装置工作不正常等。故障现象反映为测试数据与预先估计相差较远。

# 三、查找故障的一般方法

## 1. 先查人为故障，后查设备故障

查找电路故障时，必须确立一个观点：实验人员、实验用仪表、被测电路共同组成一个测试“系统”，系统中任何一部分出现问题都将导致测试数据的错误，所以当测试数据出现问题时，绝不能仅将测试系统作为查找问题的对象，首先应检查有无人为故障，初学者尤其要注意这一点。例如，在实验教学中经常发现，有的同学测量交流参数时将直流电源关掉，测量时发现得到的数据不正确，便急于从电路上找问题，其实这种故障是由于概念错误造成的人为故障（测量交流参数时失去了直流电源）。这些同学这样做的原因是错误地将分析电路时的交流和直流等效电路的方法套用在实验中，认为实验时交流和直流也分开考虑。这种由于概念上的错误而导致的实验数据的测试失误在被测电路中是找不出故障原因的。所以查找故障要先检查操作者有没有概念上或操作上的错误。

## 2. 先查仪表，后查被测电路

当确定无人为故障后，应检查用于测试的外接仪表有无故障。如测试线是否连接正确，选用仪器仪表及挡位是否合适等。

## 3. 先查装配，后查电路参数

当确定故障存在于电路后，应先检查电路的装配是否正确。初学者在实验中用错元件、接错导线的事经常发生。直接检查装配有无错误比通过测试电路参数分析出装配错误节省时间。尤其是在实验中，首次测试某些数据发现错误时，要检查装配情况。

## 4. 先检查直流参数，后检查交流参数

有源模拟电路中直流偏置是电路正常工作的基础，直流参数不正常，交流参数必然不正常，所以只有在直流参数正常的情况下，才能去测试交流参数。实验中有的同学直流参数不符合设计要求，常常跳过直流参数的调整而去调测交流参数，他们误认为直流参数一时调不出来可以先去调整交流参数，等交流参数调好了再去调直流参数。这种观点是错误的，原因在于没有认识到直流工作点的意义。

上述查找故障的顺序可以概括为：先人为后设备，先仪表后电路，先装配后参数，先直流后交流。

# 四、排除故障的一般方法

## 1. 断电观察法

在实验中出现电阻、变压器烧坏，电容器炸裂，电表卡针，电路断线等故障时，通过断

电观察往往能很快找出电路损坏的部分或发热器件。更换器件时，不能单纯调换已损坏的器件就算了事，应进一步查对实验电路图，搞清损坏器件的部位和原因，彻底排除故障，才能再次通电。

## 2. 断电测量电阻法

如果仅凭观察不易发现问题，可利用万用表的欧姆挡逐个测试各元器件是否损坏，插件是否接触不良，导线是否断线或者短路，某器件的电阻值是否发生了变化，电容、二极管是否被击穿等。该类故障多发生在具有高电压、大电流及含有有源器件的电路中。根据实验原理，电路中某两点应该导通（或电阻极小），而万用表测出是开路（或电阻很大）；或某两点应该是开路（或电阻很大），但测得的结果为短路（或电阻很小），则故障必在此两点间。

## 3. 通电测电压法

对实验电路加上电源和信号，利用万用表的电压挡测量电源是否有电压，若有电压则继续沿着信号流的方向向后顺序检查各元件、各支路是否有正常电压降，这样可以逐步缩小故障出现范围，最后断定故障所在。

## 4. 信号寻迹法

使用适当频率和幅度的信号源作为测试信号电压，加到实验装置的输入端，然后利用一台示波器从信号输入端开始，逐一观测各元器件、各支路是否有正常的波形和幅度，从而可观测到反常迹象，找出故障所在。当电路级数很多时，可以先将整个系统分为若干段，先将某一中间段作为输出的测试点。如果发现输出数据不正常，就说明是这个测试点的前面有故障，就要向前排查；如果测试数据正常，说明故障出现在后端，应向后排查。这样做可以大大提高排除故障的效率。这种方法特别适用于检查电子线路中的故障。

## 5. 对比检测故障

如果有两个相同的电路，其中一个正常，一个出现故障，则可以用正常的电路作为参考，逐段逐点进行对比，找出与正常电路参数不同的地方，然后再进一步分析参数不相同的原因，从而找出故障所在。

## 6. 替代法

当怀疑某一元件有故障时，可选另一个正常的元件代替被怀疑的元件，替代后如果故障消失，则说明被替代的元件有误，若替代后故障还在，则不能断定被代替元件有问题，还要进一步检测。

用替代法查找故障时应注意：

在选择检测方法时，要针对故障类型和实验线路结构情况选用。如短路故障或电路工作电压较高（200V 以上），不宜用通电法检测。而当被测电路中含有微安表、场效应管、集成电路、大电容等元件时，不宜用断电法（电阻挡）检测。因为在这两种情况下，若检测方法不当，可能会损坏仪表、元件，甚至触电。有时实验电路中有多种或多个故障，并且相互掩盖或影响，但只要耐心细致地去分析查找，总是能够检测出来的。

## 2.1 测量及测量误差

### 一、测量的概念

所谓测量，就是把被测物理量与另一作为单位的同类标准量直接或间接作比较，判定被测量值是标准量的多少倍，从而确定被测量值的大小。例如，我们测得电压值为 220V，这就是说，电压等于以伏为电压单位的 220 倍。

#### 1. 测量方法的分类

测量方法的分类形式很多，根据获得被测量值的方法不同，可将测量分为直接测量和间接测量两大类。此外，在此两类方法的基础上还发展了一类组合测量。

##### (1) 直接测量

能够通过测量仪器、仪表直接显示出被测量的数值，这类测量称为直接测量。例如，用电压表测量电压，用电桥测量电阻，用数字式频率计测量频率等。直接测量简单易行，所需测量的时间短，并有可能达到很高的测量精度。

##### (2) 间接测量

被测量的量与其他几个物理量存在函数关系，需要用上述直接测量方法分别测出其他几个相关的物理量的值，再通过一定的公式计算得到被测量。这类测量称为间接测量。例如，直接测出电阻的阻值  $R$  及其两端的电压  $V$ ，由公式  $I=V/R$  便可求出被测电流  $I$  的值。

一般都采用直接测量，仅在直接测量不方便，误差大或缺乏直接测量的仪器等情况下才采用间接测量。

##### (3) 组合测量

测量中，使各个未知量以不同的组合形式出现，根据直接测量和间接测量所得的数据，通过解一组联立方程来求出未知量的数值，这类测量称为组合测量。例如测量线性二端网络的等效参数可以采用组合测量法。测量线路如图 2.1 所示。在被测网络端口接一可变电阻  $R_w$ ，测得  $R_w$  两端的电压  $U_1$  和  $R_w$  的

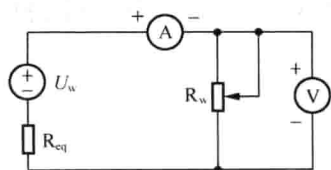


图 2.1 组合测量法测量电路

电流  $I_1$  后，改变电阻  $R_w$  值，测得相应的  $U_2$ 、 $I_2$ ，则可列出方程组

$$\begin{cases} U_{oc} - R_{cq} I_1 = U_1 \\ U_{oc} - R_{cq} I_2 = U_2 \end{cases} \quad (2.1.1)$$

解得:

$$U_{oc} = \frac{U_1 I_2 - U_2 I_1}{I_2 - I_1}$$

$$R_{cq} = \frac{U_1 - U_2}{I_2 - I_1}$$

## 2. 测量的基本内容

电路及模拟电路实验所要测量的基本量包括以下5个方面:

- (1) 与电能有关的电量, 如电压、电流、电功率;
- (2) 电路元件参数, 如电感量、电阻值、电容量、品质因数等;
- (3) 电信号的特性, 如信号的波形、频率、相位、幅度等;
- (4) 电路的特性, 如电路的频率特性、时延特性、瞬变特性等;
- (5) 电子电路的电压增益、频率响应特性、输入电阻、输出电阻等。

实验离不开测量, 测量就一定会存在误差, 为了得到准确的实验结果, 就必须了解测量误差的定义、来源、分类、表示方法和处理方法, 这样才能根据具体情况找出减小误差的实验方法, 从而提高实验数据的精度。

## 二、测量误差的定义、来源及分类

### 1. 测量误差的定义

测量误差: 被测量值有一个真实值, 称为真值, 它可以由理论给定值或标准计量仪器测定值来代表。在实际测量中, 由于测量仪器的精确度有限, 测量方法不完善, 测量者的能力及生理限制以及测量环境等各种因素的影响, 测量值和真值之间总存在一定的差异, 这种差异称为测量误差。

### 2. 测量误差的来源

(1) 仪器误差: 因仪器自身机电性能不完善引起的误差称为仪器误差。此项误差范围已由仪器的技术说明书给出。

(2) 使用误差: 又称操作误差, 是在使用时对仪器的安装、调节、操作不当造成的误差。例如, 把规定水平放置的仪表垂直放置, 使用时未按要求对仪器进行预热、校零, 仪器引线过长等都会引起使用误差。减小和消除使用误差的方法是严格按照仪器的技术规程操作, 熟练掌握实验操作技巧, 提高对实验现象的观察和分析能力。

(3) 测量方法误差: 测量中依据的理论不严密, 或者不适当地简化测量公式所引起的误差称为方法误差。例如, 在某些情况下利用电压表测电压(电压表内阻接近于或小于被测端间等效电阻)时, 或用电流表测电流(电流表内阻接近于或大于被测支路的等效电阻)时完全不考虑电表内阻对测量的影响, 就会导致误差。

(4) 影响误差: 主要是指外界环境(温度、湿度、电磁场等)超出仪器允许的工作条件引起的误差。为避免此项误差的产生, 应保证电子仪器所要求的额定工作条件。

(5) 人身误差: 测试者能力和生理条件限制(如读表时习惯性偏高或偏低)所引起的误差。为消除此项误差, 要求实验者必须提高操作技巧, 改变不良习惯。

### 3. 测量误差的分类

从不同角度出发, 测量误差有各种分类方法。

(1) 根据误差的表示方法分为绝对误差、相对误差和引用误差。

① 绝对误差, 是指测量值与被测量实际值之差, 用  $\Delta x$  表示, 即

$$\Delta x = x - x_0 \quad (2.1.2)$$

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, 它的定义是绝对误差的负值。

$$c = x_0 - x \quad (2.1.3)$$

知道了测量值和修正值  $c$ , 由式 (2.1.2) 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, 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 (约定) 真值之比 (用百分数表示), 用  $\gamma$  表示

$$\gamma = \frac{\Delta x}{x_0} \times 100\% \quad (2.1.4)$$

相对误差是一个比值, 其数值与被测量所取的单位无关; 能反映误差大小与方向; 能确切地反映出测量准确程度。因此, 在测量过程中, 要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测量的准确程度, 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, 所以采用引用误差表征仪表的准确度。

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  $\gamma_n$  表示

$$\gamma_n = \frac{\Delta x}{x_m} \times 100\% \quad (2.1.5)$$

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  $\Delta x_m$  作为式 (2.1.5) 中的分子, 则得到最大引用误差, 用  $\gamma_{nm}$  表示

$$\gamma_{nm} = \frac{\Delta x_m}{x_m} \times 100\% \quad (2.1.6)$$

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

$$\gamma_{nm} = \frac{\Delta x_m}{x_m} \times 100\% \leq \alpha\% \quad (2.1.7)$$

式中,  $\alpha$  表示仪表准确度等级指数, 即表示仪表准确度等级的数字。

根据 GB7676.2—87《直接作用模拟指示电测量仪表及其附件》的规定, 电流表和电压表的准确度等级  $\alpha$  如表 2.1 所示。由表可见, 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。



表 2.1 电测量仪表的准确度等级

准确度等级 指数 $\alpha$	0.05	0.1	0.2	0.3	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	5.0
基本误差 (%)	$\pm 0.05$	$\pm 0.1$	$\pm 0.2$	$\pm 0.3$	$\pm 0.5$	$\pm 1.0$	$\pm 1.5$	$\pm 2.0$	$\pm 2.5$	$\pm 5.0$

由式 (2.1.6) 可知, 在应用指示仪表进行测量时, 产生的最大绝对误差为

$$\Delta x_m \leq \pm \alpha\% \cdot x_m \quad (2.1.8)$$

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

$$\gamma_m = \frac{\Delta x_m}{x} \times 100\% \leq \pm \alpha\% \cdot \frac{x_m}{x} \times 100\% \quad (2.1.9)$$

因此, 根据仪表准确度等级和测得示值, 可计算直接测量中示值最大相对误差。当被测值越接近仪表的量程, 测量的误差越小。因此测量时, 应使被测量值尽可能在仪表量程的 2/3 以上。

例: 用一个量程为 30mA、准确度为 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 (2.1.8) 计算出仪表的最大绝对误差为

$$\Delta x_m = \pm \alpha\% \cdot x_m = \pm 0.005 \times 30 = \pm 0.15 \text{mA}$$

由式 (2.1.9) 可得其测量结果可能出现的示值最大相对误差为

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

(2) 按测量误差的性质可分为: 系统误差、随机误差和粗大误差三类。

① 系统误差是指在同一被测量的多次测量过程中, 保持恒定或以可预知方式变化的测量误差的分量。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 +0.01A, 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。例如, 用一只已知其准确度为  $\alpha$  及量程为  $U_m$  的电压表去测量某一电压  $U_x$ , 则可按式 (2.1.9) 估计测量结果的最大相对误差  $\gamma_{xm}$ , 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的确切大小及符号。因此, 这种误差就称为未定系统误差。

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:

a. 系统误差是一个非随机变量, 是固定不变的, 或是一个不确定的时间函数, 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。

b. 系统误差的重复性。对于固定不变的系统误差, 重复测量时误差显然是重复出现的。系统误差为时间函数时, 它的重现性体现在当测量条件实际相同时, 误差可以重现。

c. 可修正性。由于系统误差的重现性, 就决定了它是可以修正的。

② 随机误差是指在同一量的多次测量过程中, 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 (大量个体的总和) 服从一定的统计规律 (数