

高 等 学 校 教 材

# 电路实验与实践

(第二版)

王 勤 王 芸 主编  
沈晓帆 谷 嫚 胡光霞 罗 韬 参编

高等教育出版社

高 等 学 校 教 材

# 电路实验与实践

Dianlu Shiyān yu Shíjiān

(第二版)

王 勤 王 芸 主编  
沈晓帆 谷 嫚 胡光霞 罗 韬 参编

高等教育出版社·北京

内容提要

本书是为高等学校工科电类专业编写的电路实验教材。全书共分 11 章, 内容涉及电测量的基本知识、常用电测量仪表及仪器设备的应用、常用电子元器件的识别与检测、供电与安全用电、元器件的装配与焊接技术, 以及直流电路、交流电路、谐振电路、RC 电路、非正弦周期性电流电路、二端口网络等方面的实验和综合设计性实验及 OrCAD PSpice 电路仿真。内容注重实用性和新颖性, 是以加强学生实践能力和创新能力培养为教学目标而编写的。

本书可作为大专院校电类专业的实验教材, 也可供有关工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

电路实验与实践/王勤, 王芸主编; 沈晓帆等编.  
--2 版. --北京: 高等教育出版社, 2014.8  
ISBN 978-7-04-040008-3

I. ①电… II. ①王… ②王… ③沈… III. ①电路-实验-高等学校-教材 IV. ①TM13-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 142747 号

策划编辑 袁 坤      责任编辑 张江漫      封面设计 李卫青      版式设计 马敬茹  
责任校对 杨凤玲      责任印制 张福涛

|      |                   |      |                                                                     |
|------|-------------------|------|---------------------------------------------------------------------|
| 出版发行 | 高等教育出版社           | 网 址  | <a href="http://www.hep.edu.cn">http://www.hep.edu.cn</a>           |
| 社 址  | 北京市西城区德外大街 4 号    |      | <a href="http://www.hep.com.cn">http://www.hep.com.cn</a>           |
| 邮政编码 | 100120            | 网上订购 | <a href="http://www.landraco.com">http://www.landraco.com</a>       |
| 印 刷  | 北京天来印务有限公司        |      | <a href="http://www.landraco.com.cn">http://www.landraco.com.cn</a> |
| 开 本  | 787mm×1092mm 1/16 |      |                                                                     |
| 印 张  | 15.25             | 版 次  | 2004 年 7 月第 1 版                                                     |
| 字 数  | 370 千字            |      | 2014 年 8 月第 2 版                                                     |
| 购书热线 | 010-58581118      | 印 次  | 2014 年 8 月第 1 次印刷                                                   |
| 咨询电话 | 400-810-0598      | 定 价  | 22.70 元                                                             |

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题, 请到所购图书销售部门联系调换

版权所有 侵权必究

物 料 号 40008-00

## 第2版前言

本书是南京航空航天大学国家级电工电子实验教学示范中心系列教材之一。本书第一版于2003年出版,此次出版的第二版,是为了配合实现电路实验的开放教学,同时在加强学生基本能力训练的基础上,注重循序渐进的原则,促进学生主动思考、自主学习,提高运用所学知识独立解决工程问题的能力及创新精神,以适应新时期电工电子课程体系和教学内容改革的要求。

“电路实验”课程是高等学校工科电类专业的重要基础课,也为后续专业课程学习准备必要的电路知识和实践技能。因此,新版在教材内容上保持重视基本内容、基本概念和基本实验方法的同时,在结构体系上做了部分修改,增设了“综合设计性实验”一章,强调电路理论与实践应用的有机结合,要求学生检索和学习相关背景资料和应用实例,将电路理论知识和实践知识有机结合、综合运用,在开放的实验室自主完成相关实验项目,力求使学生在实践中掌握实验方法和实践技能,在研究中提高能力和激发创造性。同时新版介绍的电路仿真软件 OrCAD PSpice 采用了较新版本,并将软件实验与硬件实验紧密结合,使实验教学方法更加充实、更加完善,而且通过“虚”——“实”结合、相互补充的实践教学方式强化学生工程实践能力,增强实验教学的效果。

本书不隶属和局限于某一特定的“电路”理论教材。为此,书中的每个实验都介绍了相关原理,从而本书可独立使用。

全书共分11章,第1章至第5章系统介绍了电路实验基础知识及实验的一般方法,内容包括:电工测量的基本知识、电子仪器、电工仪表的使用、电子元器件的认知与应用、电子测量方法、电子线路原理图与印刷电路板设计技术以及介绍了虚拟仪器的概念。第6至第9章涉及电路基本实验,主要用于学生验证电路理论中的一些重要基本原理,突出对学生基本实验能力与技能的培养,强调理论对实验的指导作用。第10章为综合设计性实验,既要求学生活学活用本课程所学的基本理论和基本方法,也需要补充少量其他课程的部分知识,这样有助于提高学生的求知欲,也有利于强化学生综合运用所学知识分析解决实际问题的能力。第11章 OrCAD PSpice 电路仿真,结合软件使用方法和仿真实验内容,主要目的是使学生了解计算机在电路理论中的应用,使学生学到新的电子设计技术,提高设计水平和实验效率,拓展学生所学知识的应用范围,进一步提高学生的职业综合素质。本书可作为大学电类各专业本、专科电路实验教材,也可作为高年级学生课程设计及相关专业人员的参考书。

本书是南京航空航天大学国家级电工电子实验教学示范中心多年来电路实验教学的成果,由富有经验的教师和工程技术人员共同编写,参加编写的教师有:王勤、王芸、沈晓帆、谷嫚、胡光霞、罗韬。

本书由东南大学胡仁杰教授担任主审,对全书作了仔细的审阅,提出了许多宝贵的建设性意见。在本书的编写过程中,得到潘双来教授的大力支持与悉心帮助。自本校1981年“电路实验”单独设课以来,先后有20多位教师参加本课程的教学、教材讨论以及实验室工作,他们为编写本书提供了大量资料和意见,做了大量的工作。在教材第一版的使用过程中,课程的教师和学生

## II 第2版前言

生提出了积极的反馈意见和建议。本书的编写也参考了许多兄弟院校的教材和文献。编者在此一并致以衷心感谢。

由于编写时间较为仓促,加上编者水平有限,书中不妥和疏漏之处在所难免,诚恳地希望使用或参考该教材的同行、读者和学生提出批评和建议。编者联系方式:wangy@nuaa.edu.cn。

编 者

2014年1月

# 第1版前言

本书是国家电工电子教学基地实验系列教材之一,是培养实验能力和技能的基础教材。

培养实验能力和实际技能是高等工科院校教育的重要内容之一,实验是帮助学生学习和运用理论处理实际问题,验证、消化和巩固基本理论,获得实验技能和科学研究方法的重要环节。

“电路实验”是自动控制、电气技术及测试技术等专业所学课程中的基本课程。它不仅要求学生验证抽象的电路理论知识,还要求学生必须掌握电工测量方法的基本知识、电工测量仪器仪表的使用及基本实验设计技能。

本书是为高等学校工科电类专业编写的一本实验教材,是适应当前教学改革的需要,总结了近年来的实践教学改革的经验编写的。所编写的实验内容主要满足电路课程对实践环节的要求。针对电类专业的特殊性,本书在内容安排上将遵循循序渐进的原则,选题上注重实用性、延续性、趣味性和新颖性,并尽可能反映当代电路理论。

本书不隶属和局限于某一特定的“电路”理论教材。为此,书中的每个实验都介绍了相关原理,从而本书可独立使用。

全书共分10章,第1至第5章系统介绍了电路实验基础知识及实验的一般方法,第6章至第9章涉及电路基本实验、综合设计性实验,突出能力与技能的培养,强调理论对实验的指导作用。其中基本实验主要用于学生验证电路理论中的一些重要基本原理;简单的综合设计性实验部分既要求学生运用所学的基本理论和基本方法,也补充少量其他课程的部分知识,这样既有助于提高学生的求知欲,也有利于提高学生分析问题和解决实际问题的能力。第10章PSPICE在电路实验中的应用,主要目的是使学生初步了解计算机在电路理论中的应用,也作为教学中计算机应用不断线的总体规划的一个环节,为日后进一步学习相关的EDA知识打下基础。本书可作为大学电类各专业本、专科电路实验教材,也可作为高年级学生课程设计及相关专业技术人员的参考书。

本书是在南京航空航天大学国家电工电子教学基地建设多年来电路实验教学的基础上编成的,由富有经验的教师和工程技术人员共同编写,参加编写的教师有:王勤、余定鑫、王芸、沈晓帆、任为民、谷嫚。由王勤任主编,余定鑫任副主编。

自1981年“电路实验”单独设课以来,先后有20多位教师参加本课程的教学、教材讨论以及实验室工作,他们为编写本书提供了大量资料,提出了许多建议,做了大量的工作。曲民兴教授、潘双来教授为本书大纲的制定、编写提出了宝贵意见,在此一并致以衷心感谢。

本书由东南大学魏维柱担任主审,对全书作了仔细的审阅,提出了许多宝贵意见。

由于我们学识有限,书中不妥之处在所难免,诚恳地希望使用或参考该教材的同行、读者提出坦率的批评和建议。意见请寄南京航空航天大学自动化学院。

编者

2003年10月

# 目 录

|                               |     |
|-------------------------------|-----|
| 绪论 .....                      | 1   |
| 第 1 章 电测量的基本知识 .....          | 6   |
| 1.1 实验误差分析和仪表的准确度 .....       | 7   |
| 1.2 实验数据处理 .....              | 13  |
| 第 2 章 常用电测量仪表及仪器设备的应用 .....   | 20  |
| 2.1 电测量指示仪表 .....             | 20  |
| 2.2 电子仪器设备的应用 .....           | 35  |
| 2.3 虚拟仪器的概念 .....             | 47  |
| 2.4 直流仪表的使用 .....             | 48  |
| 第 3 章 常用电子元件的检测 .....         | 51  |
| 3.1 电阻器与电位器 .....             | 51  |
| 3.2 电容器 .....                 | 55  |
| 3.3 电感器 .....                 | 59  |
| 3.4 晶体管与集成电路 .....            | 61  |
| 3.5 常用元器件的识别与检测 .....         | 66  |
| 第 4 章 供电与安全用电 .....           | 67  |
| 4.1 发电与输电概述 .....             | 67  |
| 4.2 配电系统 .....                | 68  |
| 4.3 安全用电 .....                | 77  |
| 4.4 日光灯 .....                 | 84  |
| 4.5 日光灯的安装操作实践 .....          | 87  |
| 第 5 章 元器件的装配与焊接技术 .....       | 89  |
| 5.1 印制电路板的设计与制作 .....         | 89  |
| 5.2 元器件的装配和焊接 .....           | 90  |
| 5.3 电子组装技术简介 .....            | 95  |
| 5.4 电子线路原理图与印制电路板设计技术简介 ..... | 97  |
| 第 6 章 直流电路 .....              | 101 |
| 6.1 基尔霍夫定律和最大功率传输定理 .....     | 101 |
| 6.2 叠加定理、戴维宁定理和诺顿定理 .....     | 104 |
| 6.3 特勒根定理与互易定理 .....          | 108 |
| 6.4 运算放大器和受控电源 .....          | 111 |
| 第 7 章 交流电路 .....              | 119 |
| 7.1 交流电路参数的测定 .....           | 119 |
| 7.2 功率因数的提高 .....             | 125 |

## II 目录

|                   |                                       |            |
|-------------------|---------------------------------------|------------|
| 7.3               | 三相电路 .....                            | 128        |
| 7.4               | 互感电路 .....                            | 135        |
| <b>第 8 章</b>      | <b>谐振电路、RC 电路 .....</b>               | <b>140</b> |
| 8.1               | 常用电子仪器的使用 .....                       | 140        |
| 8.2               | 谐振电路 .....                            | 145        |
| 8.3               | RC 网络的频率特性 .....                      | 150        |
| 8.4               | 一阶电路的方波响应 .....                       | 156        |
| 8.5               | 二阶电路的方波响应 .....                       | 162        |
| <b>第 9 章</b>      | <b>非正弦周期性电流电路、二端口网络 .....</b>         | <b>166</b> |
| 9.1               | 二端口网络参数的测定 .....                      | 166        |
| 9.2               | RC 有源滤波器及非正弦周期信号的谐波分析 .....           | 169        |
| 9.3               | 双 T 形选频网络的研究与设计 .....                 | 173        |
| 9.4               | 负阻抗变换器及其应用 .....                      | 175        |
| <b>第 10 章</b>     | <b>综合设计性实验 .....</b>                  | <b>180</b> |
| 10.1              | 电阻网络设计与实现 .....                       | 181        |
| 10.2              | 万用表电路的设计与组装 .....                     | 182        |
| 10.3              | 延迟开关的设计 .....                         | 186        |
| 10.4              | 感性负载断电保护电路的设计 .....                   | 187        |
| 10.5              | 移相电路设计 .....                          | 188        |
| 10.6              | 回转器电路设计与应用 .....                      | 192        |
| <b>第 11 章</b>     | <b>OrCAD PSpice 电路仿真 .....</b>        | <b>196</b> |
| 11.1              | OrCAD PSpice 软件组成简介 .....             | 196        |
| 11.2              | OrCAD PSpice 的开发环境 .....              | 197        |
| 11.3              | 用 OrCAD PSpice 软件进行直流电路仿真 .....       | 206        |
| 11.4              | 用 OrCAD PSpice 软件进行正弦稳态电路仿真 .....     | 213        |
| 11.5              | 用 OrCAD PSpice 软件进行无源滤波器的频率特性分析 ..... | 220        |
| 11.6              | 用 OrCAD PSpice 软件进行电路瞬态响应的研究 .....    | 223        |
| 11.7              | 用 OrCAD PSpice 软件进行周期信号的傅里叶分析 .....   | 229        |
| <b>参考文献 .....</b> |                                       | <b>232</b> |



## 绪 论

科学实验是人类认识自然、检验理论正确与否的重要手段。通过实验取得重大的成果在科学史上屡见不鲜。科学的实验与实践形成了丰富的电路理论,而这种理论又是电力电子技术发展的重要基础。1785年库仑用实验方法测定静电作用和静磁相互作用,发表了库仑定律,为静电学奠定了科学基础。1800年伏特第一个制成用铜片、浸盐水的纸片、锌片依次重叠起来获得连续电流的电堆。1820年奥斯特和安培先后在实验中发现电流的磁效应和电磁作用都是电流与电流作用的“电动力”。1826年欧姆发表重要实验报告,提出电路的实验定律“欧姆定律”。1834年法拉第通过十几年的实践,发现了电磁感应现象,动磁生电的奥秘由此揭开。1873年麦克斯韦用数学方法创立了电磁场理论,而赫兹在1888年通过电磁波的发生和接收实验,证明了电磁波的存在。1876年爱迪生在新泽西州建立了世界上第一所工业实验室,组织一批专门人才,从而开创了现代科学研究的正确途径。终其一生,爱迪生共获1093项发明。1881年瓦堡发表磁滞回线的实验观察结果,这是最早的磁滞现象的研究。对电子学产生革命性影响的晶体管,最初是以巴丁、希拉顿和肖克莱为首的一大批理论家和实验家经过一系列艰苦的实验,克服了材料、工艺、测量技术等方面的种种困难,并对当时的若干理论问题进行了深入探讨及发展后,于1947年底在实验室里研制出来的。

20世纪50年代初期半导体晶体管的出现,20世纪60年代半导体集成电路的出现,直至今日超大规模集成电路的使用,反映了微电子技术的飞跃发展。由于各种电力电子器件的出现,使得电子技术不仅在计算机、通信、信号测量与变换等领域中占主导地位,而且在电力系统、工业控制系统中亦得到广泛的应用。这些成就就是由无数的科学家、工程技术人员在实验中研究开发成功的。可以说,在电工技术、电子技术的发展中,每一类新概念、新理论的建立,每一项新产品的开发成功,每一种新技术的应用与推广,都不能离开实验与实践。

理论是实验工作的指导,为实验提供了科学依据,实验现象和结果需要从理论上加以分析提高。实验是一项手脑并用、理论与实际密切配合、富于创造性的劳动过程。21世纪,面向新知识经济的大学生任重道远。电路实验和实践的内容涉及电路的基本理论、工程实践等基础内容。我们期望学生通过实验与实践的训练,能将理论与实践相结合,巩固所学习的理论知识;掌握电路的连接、电工测量及故障排除等实验技巧;能正确使用常用的电工仪器仪表;能正确地采集和处理实验数据;能分析、观察并解决实验中遇到的问题。在实验和实践的过程中,培养严肃认真的科学态度和细致踏实的作风及创新意识和能力。

学校在建设实验室、装备实验设备方面投入了大量的人力、物力,为学生创造了一个优良的实验环境和条件,同学们应珍惜这一良好的条件,积极地参与、利用,并虚心地接受指导老师的指导,遵守实验室规则,做好实验,认真探讨、总结,写好报告,为今后学习专业课程和研究打下坚实的基础。以下是几点要求。

## 一、实验前的预习

1. 必须熟悉学生实验守则和安全操作规程。
2. 认真阅读实验指导书,明确实验目的、内容,对实验原理要从理论概念上弄清楚。对实验可能出现的现象及结果等要有一个事先的分析和估计,尽可能做到心中有数。
3. 预先阅读所需用的仪器设备使用说明书,了解操作注意事项,熟悉各旋钮、按键、开关的功能和作用,以便进行实验时能顺利操作和测试。
4. 写好实验预习报告,将实验中要求测量的数据表格预先画好,以便有条理地进行测试。对于要求预先进行理论计算的内容也要完成,并将数据填入表格。

## 二、实验时的操作

1. 仪器设备合理布局。其原则是:摆放布局合理,即位置、距离、跨线要求短;便于操作,读数方便;连线简单。
2. 正确搭接线路。首先要检查所接线路的元件及参数是否符合要求,然后按要求搭接线路,接线时,宜按照电路图先接主要串联电路(从电源一端开始,顺次而行,再回到电源的另一端),然后再连分支电路。同时,要考虑元件和仪表的极性、参考方向、公共地端与电路图的对应位置等。严禁带电接线、拆线或改接线路。接好线路后首先要复查,确认无误后,才能接通电源进行实验。
3. 安全操作。进入实验室,应了解和遵守实验室的安全操作规程。在实验过程中,应随时注意安全,当人体接触 36 V 以上的直流和交流电压时均有触电危险。因此,通电后不可用手触及带电体,同时通电后要集中精力,首先看现象,再操作、读数。如果出现异常现象,如烧保险、冒烟、焦味、异常响声、仪表卡表等,应立即切断电源,保持现场,请示指导老师后再进行故障处理,排除故障后方能继续进行实验操作。
4. 科学读取数据。读取数据时,姿势要正确,指针式仪表要做到“眼、针、影一直线”。数据应记录在事先准备好的原始记录数据表格中,要记下所用仪表仪器的倍率,做完实验后要根据实测仪表偏转格数乘以倍率得出读数,同时要根据所选用仪表量程和刻度盘实际情况,合理取舍读数的有效数字,不可增多或删除有效位数。原始数据不得随意修改。当需要绘制曲线时,读数的多少和测试点的分布应以足够描出光滑而完整的曲线为准则。读数的分布随曲线的曲率而异,在曲率较大处应多读几点,在曲率较小处可少读几点。读取数据后,可先把曲线粗略地描绘一下,如发现不足之处,就应进行补测。

## 三、实验后的整理

实验完成后,不要忙于拆除线路。应先断开电源,待检查实验所得的数据没有遗漏和明显错误后再拆线。一旦发现异常,需要在原有的实验线路下查明原因,并做出相应的分析。

全部实验结束后,应该将所用的实验设备复归原位,导线整理成束,清理实验台,然后离开实验室。

#### 四、实验故障分析及排除

排除实验中出现的故障,是培养学生综合分析问题能力的一个重要方面,需要具备一定的理论基础和较熟练的实验技能以及丰富的实际经验。

##### 1. 排除实验故障的一般原则或步骤

(1) 出现故障时应立即切断电源,关闭仪器设备,避免故障扩大。

(2) 根据故障现象,分析、判断故障性质。实验故障大致可分为两大类:一类是破坏性故障,可造成仪器、设备、元器件等损坏,其现象常常是冒烟、烧焦味、爆炸声、发热等。另一类是非破坏性故障,其现象是无电流、电压,指示灯不亮,电流、电压数值或波形不正常等。

(3) 根据故障性质,确定故障的检查方法。对于破坏性故障不能采用通电检查的方法,应切断电源,然后用万用表的电阻挡检查电路的通断情况,看有无短路、断路或阻值不正常等现象。对于非破坏性故障,也应先切断电源进行检查,确认没有破坏性再采用通电检查的方法。通电检查主要使用电压表检查电路有关部分的电压是否正常,用示波器观察波形是否正常等。

(4) 进行检查时首先应知道正常情况下电路各处的电压、电流、电阻、波形,做到心中有数,然后再用仪表进行检查,逐步缩小产生故障的范围,直到找到故障所在的部位。

##### 2. 产生故障的原因

产生故障的原因很多,一般可归纳如下:

- (1) 电路连接不正确或接触不良,导线或元器件引脚短路或断路;
- (2) 元器件、导线裸露部分相碰造成短路;
- (3) 测试条件错误;
- (4) 元器件参数不合适或引脚错误;
- (5) 仪器使用、操作不当;
- (6) 仪器或元器件本身质量差或损坏。

例如:在进行  $RLC$  串联谐振实验时,起初电流值随频率升高而增加,后来迅速下降到很低的数值,重新做实验再也得不到谐振现象。

分析:这是一种非破坏性故障,没有发现烟、味、声、热等现象。重做时,电路中有电流但不出现谐振现象,说明  $R$ 、 $L$ 、 $C$  不是开路而可能是短路,用万用表检查各元件是否短路,最后检查出电容器  $C$  短路。分析产生故障的原因:根据现象判断电容器  $C$  原来是好的,短路是在实验过程中造成的。原因是当信号源电压较高时,如果电路中的电阻  $R$  很小(如  $1\ \Omega$ ),谐振时电容器上的电压就可达到信号源电压的  $Q$  倍,超过电容器的耐压值使电容器被击穿短路。

这个例子也告诉我们,在实验前对电路中的电压、电流要有一个初步的估计,选用元器件时要考虑元器件的额定值。确定测试条件时,应考虑到是否会引起不良的后果。比如用万用表的电流挡去测量电路的电压,会造成故障或损坏仪表。

#### 五、实验数据的记录与处理

实验线路接好后,需要在实际测量之前进行一下预测,此时不必仔细读数据和记录,主要观察各个被测量的变化情况和出现的现象。通过预测可以让实验者有一个实验全过程的数量概念,了解被测量的变化范围,从而选择合适的仪表量程。

预测结束,就可以进行实际实验操作,观察现象,完成预习报告中要求的内容。实验数据应该记录在拟订好的表格里,并注明名称和单位。如果需要重新测量,则要在原来的表格边重新记录所得到的数据,不要轻易涂改原始数据,以便比较和分析。在测量过程中,应该尽可能地及时对数据做初步分析,以便及时发现问题,当即采取措施,以提高实验的质量。

### 六、实验后的总结报告

实验报告是实验工作的全面总结,要用简明的形式将这项工作完整和真实地表达出来。因此,实验报告的质量好坏将体现实验者对实验内容的理解能力、动手能力和综合素质水平。

实验报告应对实验的任务、原理、方法、设备和过程等主要方面有明确的叙述,应按规范绘制各种图表曲线,对实验结果应有分析、归纳、判断。叙述条理要清楚,其中的公式、图、表、曲线应有符号、编号、标题、名称等说明,使人阅读后对其总体和各主要细节均能了解,并且只有一种理解。

实验报告的格式和内容包括以下几个方面。

|       |       |
|-------|-------|
| 实验名称: | 实验日期: |
| 实验组别: | 班级:   |
| 实验者:  | 学号:   |

1. 实验目的。
2. 实验设备。仪器仪表及元器件,包括名称、型号、规格及编号。
3. 实验原理。包括原理说明、电路原理图和实验接线图等。
4. 实验内容及步骤。实验者可按实验指导书上的步骤编写,也可根据实验原理由实验者自行编写,但一定要按实际操作步骤详细如实地写出来。
5. 实验数据及处理。根据实验原始记录和实验数据处理要求,画出数据表格,整理实验数据。表中各项数据如系直接测得,要注意有效数字的表示;如系计算所得,必须列出所用公式,并以一组数据为例进行计算,其他可直接填入表格。如需绘制曲线图,要按图示法的要求选择合适的坐标和刻度绘图。另外,实验原始数据要附在实验报告后。

6. 实验结果分析、总结、收获体会、意见和建议。

7. 回答思考问题。

撰写实验报告应该做到:简明扼要,文理通顺,字迹端正,图表清晰,结论正确,分析合理,讨论力求深入。

实验报告书写力求格式正规化、标准化,绘制曲线的坐标纸切忌规格不一。

曲线必须注明坐标、量纲、比例,数据计算必须用国际标准单位。

### 七、特别注意人身和设备的安全问题

由于本课题的特点,离开电与仪器、仪表等设备是不可能进行的,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。在实验中要求切实遵守实验室的各项安全操作规程,认真听指导教师讲解实验注意事项。特别注意强电实验时,不得擅自接通电源,不得触及带电部分,严禁带电拆卸连接导线,必须牢记“先接线后合电源,先断电源后拆线”的操作程序。

实验前应阅读所用的仪器仪表的简介,实验时按照仪器仪表的使用方法去使用,注意额定值,不了解性能及使用方法不得擅自使用。使用时,必须轻拿轻放,保持表面清洁,如发现异常现象(声响、发热、焦臭)应立即切断电源。

## 一、测量的概念

科学实验离不开测量,测量是指以获取被测对象量值为目的的全部操作。人们从获得的测量值中可找到有用的信息,从而用它来认识事物,解决问题,掌握事物发展变化的规律。

被测量的量值一般由两个部分组成,即数值(包括大小和符号)和相应的单位。例如:测得某元件两端的电压为 $8.6\text{ V}$ ,则测量值的数值为 $8.6$ , $\text{V}$ (伏[特])为其计量单位。

测量的实质是将被测量与标准的同类单位量进行比较。如电流的测量值为 $3.2\text{ A}$ ,这表明被测量是电流单位量 $\text{A}$ (安[培])的 $3.2$ 倍。

## 二、测量单位制

测量时采用国际单位制(SI),这是我国法定的计量单位制。国际单位制包括七个基本单位,两个辅助单位和其他导出单位。

七个基本单位是:米(m)、千克(kg)、秒(s)、安[培](A)、开[尔文](K)、摩尔(mol)、坎德拉(cd)。

两个辅助单位是:弧度(rad)和球面度(sr)。

其他所有物理量的单位均可用七个基本单位导出,称为导出单位。例如电磁量的单位可由前四个基本单位导出。常用的电磁学的单位有:牛[顿](N)、焦[耳](J)、瓦[特](W)、库[仑](C)、伏[特](V)、法[拉](F)、欧[姆]( $\Omega$ )、西[门子](S)、韦[伯](Wb)、亨[利](H)、特[斯拉](T)等。

## 三、测量的分类

### 1. 测量方式

从如何得到最终测量结果的角度分类,有三种测量方式。

#### (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,测量结果是被测量与标准量直接比较,或者是通过使用事先刻好刻度的仪表获得的。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存在某种函数关系,则可先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。例如伏安法测量电阻,先用电压

表、电流表测出电压和电流值,然后由欧姆定律  $R=U/I$  计算出电阻值,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。

### (3) 组合测量

当有多个被测量,且它们与几个可直接或间接测量的物理量之间满足某种函数关系时,可通过联立求解函数关系式(方程组)获得被测量的数值,这种测量方式称为组合测量方式。例如含源一端口电阻网络  $N$  与负载连接,如图 1-1 所示。在图示参考方向下,其端口的电压电流关系式为:  $u = u_{OC} - R_0 i$ 。

为了测量  $N$  的开路电压  $u_{OC}$  和等效电阻  $R_0$ ,可先后改变负载值,两次测取端口电压和电流值  $u_1, i_1$  和  $u_2, i_2$ ,并将它们代入上式,得到下述方程组

$$\begin{cases} u_1 = u_{OC} - R_0 i_1 \\ u_2 = u_{OC} - R_0 i_2 \end{cases}$$

解此方程组便可求得参数  $u_{OC}$  和  $R_0$ 。

### 2. 测量方法

从如何获取测量值的角度分类,测量方法有两种。

#### (1) 直读测量法

直接根据仪器仪表的读数得到测量值的方法称为直读测量法(简称直读法),例如,用电流表测量电流,用功率表测量功率等。直读法的特征是度量器(标准量)不直接参与测量过程。

直读法的优点是设备简单、操作简便;缺点是测量的准确度不高。

#### (2) 比较测量法

将被测量与标准量(或称度量器)直接进行比较而获得测量结果的方法称为比较测量法,例如,用电位差计测量电压,用电桥测量电阻等。该方法的特征是标准量(度量器)直接参与测量过程。

比较测量法具有测量准确、灵敏度高的优点,适合精密测量。但其缺点是测量操作过程较为麻烦,所用仪器设备的价格较高。

应注意测量方式和测量方法概念上的区别。例如用功率表测量功率既是直接测量方式又属于直读法,而用电桥测量电阻则是直接测量方式,不属于直读法而属于比较测量法。

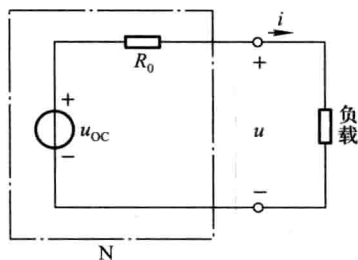


图 1-1 含源一端口网络  
与负载连接

## ►► 1.1 实验误差分析和仪表的准确度

在实际测量中,由于测量仪器、工具的不准确,测量方法的不完善以及各种因素的影响,实验中测得的值和它的真实值并不完全相同,这种矛盾在数值上的表现即为误差。随着科学水平的提高和人们的经验、技巧和专业知识的丰富,误差可以被控制得越来越小,但是不能使误差降为零,这就是所谓的误差公理:一切实验结果都具有误差,误差自始至终存在于一切科学实验过程中。

### 1.1.1 误差的定义及其表达式

#### 一、绝对误差

绝对误差是一个被测量的测定值与其真值之差,也称为真误差,可表示为

$$\Delta X = X - X_0 \quad (1-1)$$

式中,  $X$ ——被测量的测定值;

$X_0$ ——被测量的真值;

$\Delta X$ ——测量的绝对误差。

一般来说,真值  $X_0$  是一个理想的概念,除理论真值和计量学约定真值外,真值是无法精确得知的,只能使测量结果尽量地接近真值。因此,实际应用中通常用实际值来代替真值  $X_0$ 。

实际值又称约定真值,它是根据测量误差的要求,用高级或高数级的标准仪器或计量器具测得的值。比如说,当标准仪器误差仅为被比较仪器误差的  $\frac{1}{3} \sim \frac{1}{20}$  时,则可认为标准仪器的测量值为约定真值,即实际值  $X_0$ 。

另外,在实际测量中常常用到校正值的概念,它与绝对误差数值相等,符号相反,即

$$g = X_0 - X = -\Delta X \quad (1-2)$$

在高准确度的仪器仪表中,常常给出校正值或校正曲线,因此,当知道了测定值  $X$  及相应的校正值  $g$  以后,便可求出被测量的真值,即

$$X_0 = X + g \quad (1-3)$$

#### 二、相对误差

绝对误差的表示方法有其不足之处,因为它不能确切地反映出测量的准确程度,例如测量两个电阻,其中电阻  $R_1 = 10 \Omega$ ,绝对误差  $\Delta R_1 = 0.1 \Omega$ ;电阻  $R_2 = 1000 \Omega$ ,绝对误差  $\Delta R_2 = 1 \Omega$ 。从例子中可以看到,尽管  $\Delta R_1$  小于  $\Delta R_2$ ,但不能由此得出测量电阻  $R_1$  较测量电阻  $R_2$  的准确度高的结论。因为  $\Delta R_1 = 0.1 \Omega$  相对于  $10 \Omega$  来讲为  $1\%$ ,而  $\Delta R_2 = 1 \Omega$  相对于  $1000 \Omega$  来讲为  $0.1\%$ ,即  $R_2$  的测量比  $R_1$  的测量更准确。由此又引出了相对误差(又称误差率)的概念,定义为:测量的绝对误差与被测量的真值的比值,即

$$\gamma = \frac{\Delta X}{X_0} \times 100\% \approx \frac{\Delta X}{X} \times 100\% \quad (1-4)$$

相对误差通常用于衡量测量(或量具及测量仪器)的准确度。相对误差越小,准确度越高。与绝对校正值  $g$  相对应,还有相对校正值  $\theta$ ,它与相对误差等值反号,即

$$\theta = -\gamma = \frac{g}{X_0} \approx \frac{X_0 - X}{X} \quad (1-5)$$

由此可以求出被测量的实际值为

$$X_0 = X(1 + \theta) \quad (1-6)$$



### 三、引用误差

引用误差是一种简化的实用方便的相对误差的表现形式,常在多挡和连续刻度的仪器和仪表中应用。这类仪表的可测范围不是一个点,而是一个量程。这时若按式(1-4)计算,由于分母的改变,计算很麻烦。为了计算和划分准确度等级的方便,通常取该仪器仪表量程中的测量上限(满刻度值)作为分母。由此引出“引用误差”的概念:绝对误差与测量仪器量程(满刻度值)的百分比称为引用误差,即

$$\gamma_N = \frac{\Delta X}{X_N} \times 100\% \quad (1-7)$$

式中,  $\gamma_N$ ——引用误差;

$X_N$ ——测量仪表的量程。

通常电工仪表的精度等级( $\alpha\%$ )分为 0.1、0.2、0.5、1.0、1.5、2.5、5.0 七级。

### 四、分贝误差

在无线电、声学等计量中,常用分贝误差来表示相对误差,因此,分贝误差实际上是相对误差的另一种表示方法。设两个电压的比值为

$$\alpha = \frac{U_2}{U_1}$$

在工程上有时采用对数的形式来表示,即

$$A = 20 \lg \alpha \quad (1-8)$$

$A$  的单位为 dB。在式(1-8)中,如果比值  $\alpha$  产生一个误差  $\Delta\alpha$ ,则对应  $A$  产生一个误差  $\Delta A$ ,故有

$$A + \Delta A = 20 \lg(\alpha + \Delta\alpha)$$

将上式与式(1-8)相减,得

$$\Delta A = 20 \lg \left( 1 + \frac{\Delta\alpha}{\alpha} \right) \quad (1-9)$$

该式给出了比值的相对误差  $\Delta\alpha/\alpha$  与分贝误差(dB)之间的关系,由于

$$\lg(1+\Delta) = 0.43431 \ln(1+\Delta)$$

当  $\Delta \ll 1$  时,  $\ln(1+\Delta) \approx \Delta$ , 从式(1-9)得

$$\Delta A = 8.686 \left( \frac{\Delta\alpha}{\alpha} \right) \quad (1-9a)$$

$$\frac{\Delta\alpha}{\alpha} \approx 0.1151 \Delta A \quad (1-9b)$$

由于功率比的分贝定义为  $A = 10 \lg \alpha$ ,  $\alpha = \frac{P_2}{P_1}$ , 故求功率比的分贝误差时,式(1-9)、式(1-9a)、式(1-9b)将变为

$$\Delta A = 10 \lg \left( 1 + \frac{\Delta\alpha}{\alpha} \right) \quad (1-10)$$

$$\Delta A \approx 4.343 \left( 1 + \frac{\Delta\alpha}{\alpha} \right) \quad (1-10a)$$