

+ - + - + - +  
- + - + - + -  
+ - + - + - +  
- + - + - + -  
+ - + - + - +  
- + - + - + -

胡国庆 陈新龙 编著

# 电工电子实践教程

+ - + - + - + - +  
- + - + - + - + -  
+ - + - + - + - +  
- + - + - + - + -  
+ - + - + - + - +  
- + - + - + - + -  
+ - + - + - + - +  
- + - + - + - + -



清华大学出版社

胡国庆 陈新龙 编著

# 电工电子实践教程

|   |   |   |   |   |   |   |
|---|---|---|---|---|---|---|
| + | - | + | - | + | - | + |
| - | + | - | + | - | + | - |
| + | - | + | - | + | - | + |
| - | + | - | + | - | + | - |
| + | - | + | - | + | - | + |
| - | + | - | + | - | + | - |

清华大学出版社  
北京

## 内 容 简 介

本书为作者已出版的《电工电子技术基础教程》、《电工电子技术(上、下)》(“十五”国家级规划教材)的配套实验教材,包括操作技能、基础性实验、设计性实验、综合性实验、现代电子电路设计5篇。教学内容上分为基本技能训练、基础性验证实验、设计性实验、综合性实验4个层次。电子技术单元中的单个基础性验证实验按照验证性实验、示范性实验(用于教师重点讲解)、自主性实验3个层次组织编写。实验手段方面,除实物实验外,引入了MAX+plus II计算机辅助仿真分析与设计,引入了Protel 99 SE原理电路、印刷电路板设计的教学内容,通过实例展示了原理图的绘制、从原理图到PCB图的更新、自动布线的实现等印刷电路板设计的完整过程。

本书可作为电工电子技术、电工学、数字电子技术、电路及电子技术等课程的实验教材,也可作为渴望提高电工电子实践能力和社会读者的科技读物。

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签,无标签者不得销售。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13501256678 13801310933

## 图书在版编目(CIP)数据

电工电子实践教程/胡国庆,陈新龙编著. —北京:清华大学出版社,2007.8

ISBN 978-7-302-15362-7

I. 电… II. ①胡… ②陈… III. ①电工技术—高等学校—教材 ②电子技术—高等学校—教材 IV. ①TM ②TN

中国版本图书馆CIP数据核字(2007)第079949号

责任编辑:刘 彤

责任校对:时翠兰

责任印制:何 芊

出版发行:清华大学出版社 地 址:北京清华大学学研大厦A座

<http://www.tup.com.cn> 邮 编:100084

[c-service@tup.tsinghua.edu.cn](mailto:c-service@tup.tsinghua.edu.cn)

社总机:010-62770175 邮购热线:010-62786544

投稿咨询:010-62772015 客户服务:010-62776969

印刷者:北京国马印刷厂

装订者:北京市密云县京文制本装订厂

经 销:全国新华书店

开 本:185×260 印 张:16.5 字 数:388千字

版 次:2007年8月第1版 印 次:2007年8月第1次印刷

印 数:1~3000

定 价:25.00元

本书如存在文字不清、漏印、缺页、倒页、脱页等印装质量问题,请与清华大学出版社出版部联系调换。联系电话:(010)62770177 转 3103 产品编号:019483-01

## 电工电子实践教程

电工电子技术课程是高等工科院校实践性很强的技术基础课程,实践教学环节是该课程教学过程中非常重要的环节,如何在实践教学过程中培养学生独立分析问题解决问题的能力、创新思维的能力和理论联系实际的能力,是课程改革与实践教学改革探讨的重大课题。

本教材为作者已出版的《电工电子技术基础教程》、《电工电子技术(上、下)》(“十五”国家级规划教材)的配套实验教材(目录中的主教材指《电工电子技术基础教程》),具有如下几个方面的特点:

(1) 教学内容上分为基本技能训练、基础性验证实验、设计性实验、综合性实验 4 个层次。

(2) 为方便教学的组织与实施,单个基础性验证实验按照验证性实验、示范性实验(用于教师重点讲解)、自主性实验 3 个层次组织编写。

(3) 实验手段方面,除实物实验外,引入了 MAX+plus II 计算机辅助仿真分析与设计。

(4) 为进一步拓宽读者的知识面,本书引入了 Protel 99 SE 原理电路、印刷电路板设计的教学内容,通过实例展示了原理图的绘制、从原理图到 PCB 图的更新、自动布线的实现等印刷电路板设计的完整过程。

全书共 5 篇:

第一篇为操作技能篇,介绍了电参数测量的一般方法、测量数据的记录与处理、常用电子仪器仪表的操作、电子电路的焊接、装配与调试、低压电器与低压配电线路。

第二篇为基础实验篇,包括电路、模拟电子技术、数字电子技术教学单元的基础性验证实验 21 个。电子技术单元中的单个基础性验证实验包括实验目的、实验仪器及器材、实验预习要求(部分实验包含思考题、注意事项)、实验内容及要求、相关基础知识等内容。

第三篇为设计性实验篇,主要包括模拟电子技术、数字电子技术方面的设计性实验 6 个。单个设计性实验提供了相近要求(或降低要求)的验证性实验方案。

第四篇为综合性实验篇,详细介绍了1个数字电子技术方面的综合性实验,给出了数字电子技术综合性实验参考课题及具体要求、实现提示,提供了2个电工电子综合设计课题的方案。

第五篇为现代电子电路设计篇,主要介绍了MAX+plus II计算机辅助仿真分析与设计,Protel 99 SE原理电路、印刷电路板的设计。

具体教学实施时,标“\*”的实验为作者推荐的应尽量保证开设的实验,其余的实验可根据各自专业的特点选做或将多个实验综合开设。

本书沿袭了主教材的建设模式,全书内容将逐步在电工电子技术远程教育网(<http://dgdz.ccee.cqu.edu.cn>)上开放式教学。

本书第1、2、5、6、8章由胡国庆编写,其余章节由陈新龙编写。全书由胡国庆担任主编。在本书的建设过程中,有许多老师及同学对本书提出了宝贵的、建设性的意见与建议,并参与了本教材及电工电子技术远程网站建设的许多工作,在此谨表示感谢。

由于编者水平有限、见解不多,不妥甚至错误之处在所难免,敬请读者批评指正。

编 者

2007年4月

# CONTENTS 目 录

## 电工电子实践教程

主编 王明华 副主编 李 强 李 伟 李 伟

### 第一篇 操作技能篇

|                              |    |
|------------------------------|----|
| 第 1 章 实验数据的测量及分析 .....       | 3  |
| 1.1 电参数测量的一般方法 .....         | 3  |
| 1.1.1 电气标准器 .....            | 3  |
| 1.1.2 测量值及其误差 .....          | 4  |
| 1.1.3 电阻的测量方法 .....          | 4  |
| 1.1.4 电容的测量方法 .....          | 6  |
| 1.1.5 电感的测量方法 .....          | 7  |
| 1.1.6 电压的测量方法 .....          | 7  |
| 1.1.7 电流的测量方法 .....          | 8  |
| 1.1.8 单相交流电路功率的测量 .....      | 10 |
| 1.1.9 三相交流电路功率的测量 .....      | 10 |
| 1.2 测量数据的记录与处理 .....         | 12 |
| 1.2.1 测量数据的记录 .....          | 12 |
| 1.2.2 误差处理 .....             | 12 |
| 1.2.3 实验报告的编写 .....          | 13 |
| 1.3 常用电子仪器仪表的操作简介 .....      | 14 |
| 1.3.1 直读式电工测量仪表的工作原理简述 ..... | 14 |
| 1.3.2 万用表 .....              | 16 |
| 1.3.3 示波器 .....              | 18 |
| 1.3.4 函数发生器 .....            | 21 |
| 1.3.5 晶体管交流毫伏表 .....         | 22 |

|            |                         |           |
|------------|-------------------------|-----------|
| 1.3.6      | 直流稳压电源 .....            | 23        |
| 1.3.7      | 功率表 .....               | 24        |
| * 1.4      | 实验一：常用电子仪器仪表的使用 .....   | 25        |
| <b>第2章</b> | <b>电子电路的安装与调试 .....</b> | <b>28</b> |
| 2.1        | 常用分立电子元器件简介 .....       | 28        |
| 2.1.1      | 电阻器 .....               | 28        |
| 2.1.2      | 电容器 .....               | 30        |
| 2.1.3      | 电感器 .....               | 32        |
| 2.1.4      | 晶体管 .....               | 33        |
| 2.2        | 集成电路简介 .....            | 36        |
| 2.2.1      | 集成电路的种类 .....           | 36        |
| 2.2.2      | 集成电路的封装形式 .....         | 37        |
| 2.2.3      | 集成电路的使用常识 .....         | 38        |
| 2.2.4      | 常用模拟集成电路 .....          | 39        |
| 2.2.5      | 数字集成电路系列 .....          | 40        |
| 2.2.6      | 用数字系统来实现模拟信号的处理 .....   | 40        |
| 2.3        | 电子电路的焊接、装配与调试 .....     | 41        |
| 2.3.1      | 锡焊技术 .....              | 41        |
| 2.3.2      | 装配技术 .....              | 42        |
| 2.3.3      | 调试技术 .....              | 44        |
| 2.3.4      | 故障的查找和排除 .....          | 45        |
| 2.4        | 实验一：简易门铃电路的制作 .....     | 47        |
| 2.5        | 低压电器与低压配电线路 .....       | 49        |
| 2.5.1      | 常用低压电器 .....            | 49        |
| 2.5.2      | 低压配电线路 .....            | 52        |
| 2.6        | 实验二：日光灯电路的安装与调试 .....   | 52        |

## 第二篇 基础实验篇

|            |                            |           |
|------------|----------------------------|-----------|
| <b>第3章</b> | <b>电路基础实验 .....</b>        | <b>57</b> |
| * 3.1      | 实验一：基尔霍夫定律与叠加原理 .....      | 57        |
| 3.2        | 实验二：戴维宁定理与诺顿定理的验证 .....    | 62        |
| * 3.3      | 实验三：交流电路参数测定 .....         | 65        |
| 3.4        | 实验四：三相星形联接电路 .....         | 68        |
| 3.5        | 实验五：功率因数的提高(日光灯电路研究) ..... | 72        |
| 3.6        | 实验六：一阶 RC 电路的暂态过程 .....    | 75        |
| <b>第4章</b> | <b>模拟电子技术基础实验 .....</b>    | <b>78</b> |
| * 4.1      | 实验一：晶体管共射极单管放大电路 .....     | 78        |
| * 4.2      | 实验二：集成运放的基本应用(一) .....     | 82        |



|            |                            |            |
|------------|----------------------------|------------|
| 4.3        | 实验三:集成运放的基本应用(二) .....     | 88         |
| 4.4        | 实验四:运放电路中的反馈问题 .....       | 92         |
| 4.5        | 实验五:直流稳压电路 .....           | 98         |
| <b>第5章</b> | <b>数字电子技术基础实验 .....</b>    | <b>102</b> |
| *5.1       | 实验一:集成逻辑门的测试 .....         | 102        |
| 5.2        | 实验二:集电极开路(OC)门与三态门 .....   | 110        |
| 5.3        | 实验三:组合逻辑电路分析与设计(SSI) ..... | 115        |
| *5.4       | 实验四:MSI译码器及其应用 .....       | 122        |
| 5.5        | 实验五:MSI数据选择器及其应用 .....     | 128        |
| 5.6        | 实验六:MSI半加器、全加器及其应用 .....   | 132        |
| 5.7        | 实验七:集成触发器及其应用 .....        | 136        |
| 5.8        | 实验八:移位寄存器及其应用 .....        | 145        |
| *5.9       | 实验九:计数器及其应用 .....          | 151        |
| 5.10       | 实验十:555定时器及其应用 .....       | 157        |

### 第三篇 设计性实验篇

|            |                         |            |
|------------|-------------------------|------------|
| <b>第6章</b> | <b>设计性实验 .....</b>      | <b>165</b> |
| 6.1        | 实验一:电压电流转换电路 .....      | 165        |
| 6.2        | 实验二:电压比较器的设计与调试 .....   | 167        |
| 6.3        | 实验三:4人智力竞赛抢答电路设计 .....  | 170        |
| 6.4        | 实验四:交通信号灯故障监视电路设计 ..... | 172        |
| 6.5        | 实验五:六十进制计数器电路设计 .....   | 174        |
| 6.6        | 实验六:秒脉冲电路设计 .....       | 177        |

### 第四篇 综合性实验篇

|            |                       |            |
|------------|-----------------------|------------|
| <b>第7章</b> | <b>综合性实验 .....</b>    | <b>183</b> |
| 7.1        | 交通信号灯控制电路设计 .....     | 183        |
| 7.2        | 数字电子技术综合性实验参考课题 ..... | 185        |
| 7.3        | 电工电子综合设计 .....        | 186        |
| 7.3.1      | 可设定的恒温温度控制器 .....     | 187        |
| 7.3.2      | 单片机模拟的汽车方向灯系统 .....   | 192        |

### 第五篇 现代电子电路设计篇

|            |                              |            |
|------------|------------------------------|------------|
| <b>第8章</b> | <b>MAX+plus II应用基础 .....</b> | <b>199</b> |
| 8.1        | MAX+plus II使用简介 .....        | 199        |
| 8.1.1      | MAX+plus II的安装 .....         | 199        |

|       |                                |     |
|-------|--------------------------------|-----|
| 8.1.2 | 常用菜单简介 .....                   | 200 |
| 8.1.3 | MAX+plus II 仿真的实现 .....        | 200 |
| 8.1.4 | MAX+plus II 工程应用设计过程 .....     | 203 |
| 8.2   | MAX+plus II 仿真实例 .....         | 204 |
| 8.2.1 | 主教材例 9.3.1 电路的仿真实现 .....       | 204 |
| 8.2.2 | 主教材例 10.3.4 电路的仿真实现 .....      | 213 |
| 第 9 章 | 印刷电路板的制作 .....                 | 220 |
| 9.1   | 电路板的制作概述 .....                 | 220 |
| 9.2   | Protel 99 SE 原理电路的设计与实现 .....  | 222 |
| 9.2.1 | Protel 软件简介 .....              | 222 |
| 9.2.2 | Protel 99 SE 电路板设计步骤 .....     | 222 |
| 9.2.3 | Protel 99 SE 原理图设计过程 .....     | 223 |
| 9.2.4 | 主教材图 7-3-7 所示原理电路的设计实现 .....   | 225 |
| 9.3   | Protel 99 SE 印刷电路板的设计与实现 ..... | 237 |
| 9.3.1 | 前期准备工作 .....                   | 237 |
| 9.3.2 | 通过原理图更新 PCB 图 .....            | 241 |
| 9.3.3 | 布局元件 .....                     | 243 |
| 9.3.4 | 自动布线 .....                     | 245 |
| 9.3.5 | 后期工作 .....                     | 246 |
| 附录    | 本书中涉及的元器件引脚及功能说明 .....         | 248 |
| 参考文献  | .....                          | 255 |

# 第一篇

---

## 操作技能篇



# 实验数据的测量及分析

实际电路中的各个物理量可通过建立模型求得,其结果为理论值。除此以外,还常常可以用实验的方法求得,其结果为测量值。

本章从测量的一般知识出发,介绍了实验数据的测量及分析方法、常用电子仪器仪表的操作,为电工电子实践教程的基础章。

## 1.1 电参数测量的一般方法

本节从电气标准器出发,介绍电压、电流等常见电参数的测量方法。

### 1.1.1 电气标准器

使用过模拟万用表测量过电阻的读者总有这样一条经验:每次换挡测量电阻时,总是需要将两表笔短接,然后将指示调到零点才可进行测量。这是为什么呢?究其主要原因,是因为测量必须以什么为标准进行。

如何理解测量必须以什么为标准进行呢?可通过下面的例子予以说明。例如用数字万用表测量日常照明电(其值为220V左右),测得为225V;显然,测得的225V为仪表显示数字,在万用表内部,其值为适合于仪表工作的某个值(如2.25V);再用这个万用表去测量一节电池的电压(其值为1.5V左右),测得为1.48V;同理,测得的1.48V为仪表显示数字,在万用表内部,其值为适合于仪表工作的某个值(假定也为2.25V);内部相同的信号值,其外部显示值可能差别非常大。可见,测量是个相对过程,应以电气标准器为基准进行测量。

充当测量仪表测量标准的设备称为电气标准器,实用的标准器主要有:标准电阻器、标准电池、标准电感、标准电容等。

需要说明的是,实际的测量仪表内部并不含电气标准器,只是用电气标准器进行校准

即可。如用数字万用表测量范围为  $0 \sim 10\text{V}$  的电压,其内部信号范围假定为  $0 \sim 5\text{V}$ ,可采用如下方法校准:将标准电池( $1\text{V}$ )作为输入,调整内部电路使内部输入信号为  $0.5\text{V}$  即可。

通过上面的分析,我们明白了使用模拟万用表换挡测量电阻时,总是需要将两表笔短接,然后将指示调到零点的原因。那是因为两表笔短接,其阻值为零,以它为基准可进行正确测量。

### 1.1.2 测量值及其误差

通过建立实际电路的电路模型求解电路,求得的结果为理论值;用电工测量仪表去测量得到的结果为测量值。一般情况下,测量值与理论值总是有一定出入,称为误差。

需要说明的是,测量不可能没有误差,误差是一种客观存在。

误差常用绝对误差与相对误差来描述。

绝对误差  $\epsilon$  等于测量值  $M$  与被测量的真实值  $T$  的差的绝对值,即

$$\epsilon = |M - T| \quad (1-1-1)$$

相对误差  $\partial$  等于绝对误差  $\epsilon$  与被测量的真实值  $T$  之比,即

$$\partial = \frac{\epsilon}{T} \times 100\% \quad (1-1-2)$$

如用一个电压表测量实际值为  $10\text{V}$  的标准电压信号,其测量值为  $9.8\text{V}$ ,则其绝对误差  $\epsilon$  为  $0.2\text{V}$ ,相对误差  $\partial$  为  $2\%$  (相对误差常用  $\%$  表示)。

另外,在应用实践中,误差还常用绝对误差与测量仪器量程(满刻度值)之比来描述,称之为引用误差  $\partial_N$ ,即

$$\partial_N = \frac{\epsilon}{T_N} \times 100\% \quad (1-1-3)$$

导致误差的原因非常复杂,主要可分为过失误差、系统误差和偶然误差等。过失误差是指测量过程中的过失导致的误差(如读数错误、记录错误等);系统误差是指因为测量设备、测量方法等系统因素导致的误差;偶然误差是指在测量过程中偶然因素(如测量条件的偶然变化)导致的误差。

为提高测量的准确度,排除人为因素,应尽量选用灵敏度高的设备并采用正确的测量方法。设备的灵敏度总是有限的,因此,采用正确的测量方法尤为关键。电工测量是电工电子技术的主要应用之一,形成了许多行之有效的测量方法(如偏位法、零位法、补偿法等)。除直接测量被测物理量外,还可采用间接方法测量。当上述方法依旧受限时,还可以利用信号处理技术将信号进行变换后进行测量。如将被测电压信号变换为频率,通过测量频率(如计数)测量电压。

当然,电工测量总是为实际生产服务,测量准确度超过实际要求过高是没有意义的。因此,当用一般设备、简单测量方法进行测量便可满足要求时,便没有必要利用高技术含量的方法另外进行测量了。

### 1.1.3 电阻的测量方法

工程和实验中被测器件或设备的电阻值范围很宽,从测量的角度将电阻分为 3 类:

- 小电阻,  $1\Omega$  以下的电阻(如短导线电阻);

- 中值电阻,  $1\Omega \sim 1M\Omega$  之间的电阻;
- 大电阻,  $1M\Omega$  以上的电阻, 如不良导体和绝缘材料的电阻。

针对不同范围的被测对象, 常用的测量方法有: 伏安法、电桥法、万用表、兆欧表等。

用万用表测量电阻见 1.3.2 节。兆欧表又称摇表, 常用于测量绝缘材料的绝缘电阻, 阻值在兆欧级。兆欧表是一种利用磁电式流比计的线路来测量高电阻的仪表, 有兴趣的读者请参看相关书籍, 在此仅介绍伏安法和电桥法。

### 1. 用伏安法测量电阻

可用电流表、电压表来测量被测支路或元件的电阻, 这种方法称为“伏安法”, 即用电流表测量被测支路或元件中流过的电流, 用电压表测量被测支路或元件两端的电压, 然后根据欧姆定律  $R' = U/I$  计算出测量值。利用伏安法测量电阻的参考电路如图 1-1-1 所示。

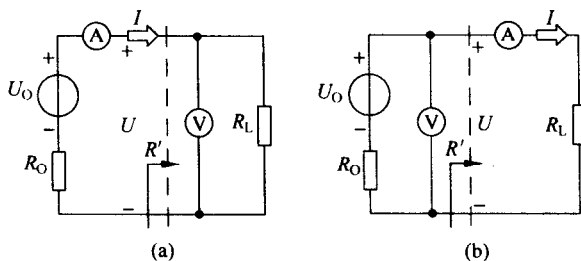


图 1-1-1 用伏安法测量电阻

当电压、电流表均为理想时, 图 1-1-1 所示测量电路测量值

$$R' = U/I = R_L$$

实际电压表内阻总是有限值, 电流表总是存在内阻。设电压表内阻为  $R_V$ , 电流表内阻为  $R_I$ , 则图 1-1-1 所示测量电路的等效电路如图 1-1-2 所示。

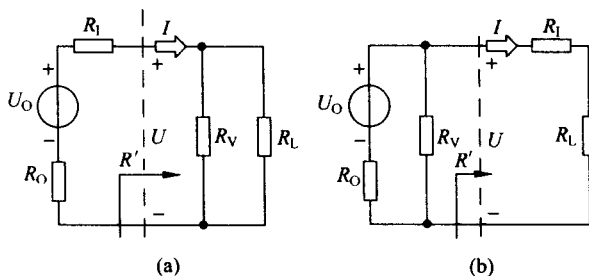


图 1-1-2 用伏安法测量电阻的等效电路

求解图 1-1-2, 可知图 1-1-1(a) 所示测量电路的测量值

$$R' = U/I = R_L // R_V \quad (1-1-4)$$

电压表内阻一般比较大, 当被测对象阻值较小时, 有

$$R' = U/I = R_L // R_V \approx R_L \quad (1-1-5)$$

可见, 图 1-1-1(a) 所示测量电路适用于测量阻值较小的电阻。

图 1-1-1(b) 所示测量电路的测量值

$$R' = U/I = R_L + R_I \quad (1-1-6)$$

电流表内阻一般比较小,当被测对象阻值较大时,有

$$R' = U/I = R_L + R_I \approx R_L \quad (1-1-7)$$

可见,图 1-1-1(b)所示测量电路适用于测量阻值较大的电阻。

“伏安法”测量电阻的优点是:测量时通过被测电阻的电流,可使它与这个电阻工作时通过的电流完全相同,这对于电阻数值与电流有关的非线性元件(如钨丝灯泡)的测量,可得出比较准确的实际电阻值。

## 2. 用电桥测量电阻

电桥是一种比较式仪表,测量时将被测量与已知标准量进行比较,从而确定被测量的大小。其准确度和灵敏度都较高。电桥分为直流电桥和交流电桥两大类。直流电桥可用来测量中值电阻,交流电桥除可以测量电阻外,还可以测量电容与电感。

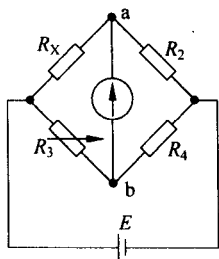


图 1-1-3 用电桥测量电阻

图 1-1-3 所示为用单臂直流电桥(惠斯登电桥)来测量中值电阻(约  $1\Omega$  到  $0.1M\Omega$ )的电路。图中,  $R_X$  为被测电阻,  $R_3$  为可调电阻。测量时,选取一定的倍率  $R_2/R_4$ , 然后调节比较臂的电阻  $R_3$ , 使电桥平衡, 即检流计指针在零位, a、b 两点为等电位, 可求出电桥平衡条件如下:

$$R_X R_4 = R_2 R_3$$

所以,测量值

$$R_X = \frac{R_2}{R_4} R_3 \quad (1-1-8)$$

### 1.1.4 电容的测量方法

现在的数字万用表都具有测量电容的功能,可用万用表对电容元件进行测量。对没有电容测量功能的模拟万用表,可用万用表的电阻挡对电容进行定性测量,方法如下:

用万用表欧姆挡  $R \times 1k$  或  $R \times 10k$  挡测电容器的容量,开始指针快速正偏一个角度,然后逐渐向  $\infty$  方向退回。再互换表笔测量,偏转角度比上次更大,这就表明充放电过程正常。指针开始偏转角度越大,回  $\infty$  的速度越慢,表明电容量越大。

此外,还可用电桥测量电容,具体如图 1-1-4 所示。图中,  $R_X$ 、 $C_X$  串联<sup>①</sup>作为电桥的一臂,无损耗的标准电容器( $C_0$ )和标准电阻( $R_0$ )串联后作为另一臂,  $R_2$  和  $R_4$  为电桥的另外两臂。

由电路理论,电桥平衡的条件为

$$\left(R_X - j \frac{1}{\omega C_X}\right) R_4 = \left(R_0 - j \frac{1}{\omega C_0}\right) R_2$$

由此得

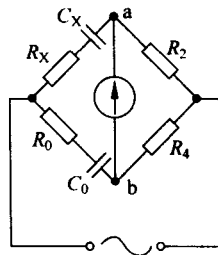


图 1-1-4 用电桥测量电容

①  $R_X$ 、 $C_X$  串联为实际电容器的模型,  $R_X$  是电容器的介质损耗所反映出的一个等效电阻。



$$R_x = \frac{R_2 R_0}{R_4} \quad (1-1-9)$$

$$C_x = \frac{R_4}{R_2} C_0 \quad (1-1-10)$$

电桥平衡时,上面两式应同时满足。选  $C_0$  和  $R_0$  为可调参数,反复调节  $R_2/R_4$  和  $R_0(C_0)$ ,直至检流计指针为零。由式 1-1-9、式 1-1-10 计算出测量值。

### 1.1.5 电感的测量方法

也可用电桥来测量电感,具体如图 1-1-5 所示。图中,  $R_x$ 、 $L_x$  串联作为电桥的一臂,无损耗的标准电感( $L_0$ )和标准电阻( $R_0$ )串联后作为另一臂,  $R_2$  和  $R_4$  为电桥的另外两臂。

由电路理论,电桥平衡的条件为

$$(R_x + j\omega L_x)R_4 = (R_0 + j\omega L_0)R_2$$

由此得

$$R_x = \frac{R_2 R_0}{R_4} \quad (1-1-11)$$

$$L_x = \frac{R_2}{R_4} L_0 \quad (1-1-12)$$

电桥平衡时,上面两式应同时满足。选  $L_0$  和  $R_0$  为可调参数,反复调节  $R_2/R_4$  和  $R_0(L_0)$ ,直至检流计指针为零。由式 1-1-11、式 1-1-12 计算出测量值。

也可用图 1-1-6 所示电桥来测量电感。

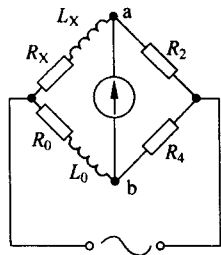


图 1-1-5 用电桥测量电感图 1

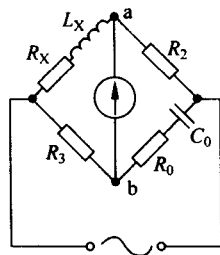


图 1-1-6 用电桥测量电感图 2

由电路理论,电桥平衡的条件为

$$(R_x + j\omega L_x) \left( R_0 - j \frac{1}{\omega C_0} \right) = R_2 R_3$$

由此得

$$R_x = \frac{R_2 R_3 R_0 (\omega C_0)^2}{1 + (\omega R_0 C_0)^2} \quad (1-1-13)$$

$$L_x = \frac{R_2 R_3 C_0}{1 + (\omega R_0 C_0)^2} \quad (1-1-14)$$

电桥平衡时,上面两式应同时满足。选  $R_2$  和  $R_0$  为可调参数,调节  $R_2$ 、 $R_0$  至检流计指针为零。由式 1-1-13、式 1-1-14 计算出测量值。

### 1.1.6 电压的测量方法

在工程应用中,为了解电路状态,常常需要测量某一支路或元件上的电压。可将万用

表(或电压表)并联在该支路或元件上来测量其电压,其测量原理如图 1-1-7。

图中,  $R_L$  表示被测支路或元件,  $U_0$ 、 $R_0$  表示除被测电路外的戴维宁等效电路。

显然,任何测量方法总是存在着误差。可通过下面的例题来理解。

**【例 1.1.1】** 在图 1-1-7 所示测量电路中,已知电压表内阻  $R_V$  为  $100\text{k}\Omega$ ,  $R_L = R_0 = 10\text{k}\Omega$ ,  $U_0 = 10\text{V}$ , 求测量值及误差; 若电压表内阻为  $1\text{M}\Omega$ , 误差为多少?

**解法**

(1) 计算理论值  $T$

$$T = \frac{U_0 R_L}{R_0 + R_L} = \frac{10 \times 10}{10 + 10} = 5(\text{V})$$

(2) 计算测量值  $M$

$$M = \frac{U_0 (R_L // R_V)}{R_0 + R_L // R_V} = \frac{10 \times 10 // 100}{10 + 10 // 100} \approx 4.76(\text{V})$$

(3) 计算绝对误差及相对误差

由式 1-3-1、式 1-3-2, 有

$$\epsilon = |M - T| = |4.76 - 5| = 0.24(\text{V})$$

$$\partial = \epsilon / T = \frac{0.24}{5} = 4.8\%$$

(4) 当  $R_V = 1\text{M}\Omega$  时, 有

$$M = \frac{U_0 (R_L // R_V)}{R_0 + R_L // R_V} = \frac{10 \times 10 // 1000}{10 + 10 // 1000} \approx 4.97(\text{mA})$$

$$\partial = \epsilon / T = \frac{0.03}{5} = 0.6\%$$

可见,电压表的内阻应尽量大。电压表的内阻愈大,测量误差就愈小。

根据被测电压的大小,为减小误差,应选用合适的量程来测量,一般应使被测值超过满量程的一半以上。当使用测量仪表的最大量程测量依旧不能满足要求时,需要扩大电压表的量程,方法如图 1-1-8 所示。当电压表的内阻比被测对象大得多时,串联电阻加上电压表的内阻的和与电压表的内阻比为电压表的量程的扩大倍数。如电压表当前满量程为  $50\text{V}$ , 内阻为  $1\text{M}\Omega$ , 若串联电阻  $R$  为  $1\text{M}\Omega$ , 则串联电阻  $R$  后的测量量程为原电压表量程的两倍,即满量程为  $100\text{V}$ 。

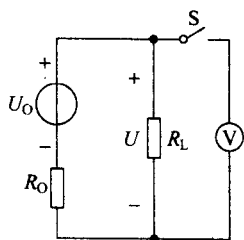


图 1-1-7 电压测量的原理图

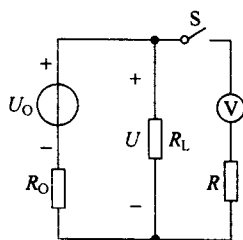


图 1-1-8 扩大电压表的量程

### 1.1.7 电流的测量方法

测量某一支路或元件上电流的电路如图 1-1-9 所示。