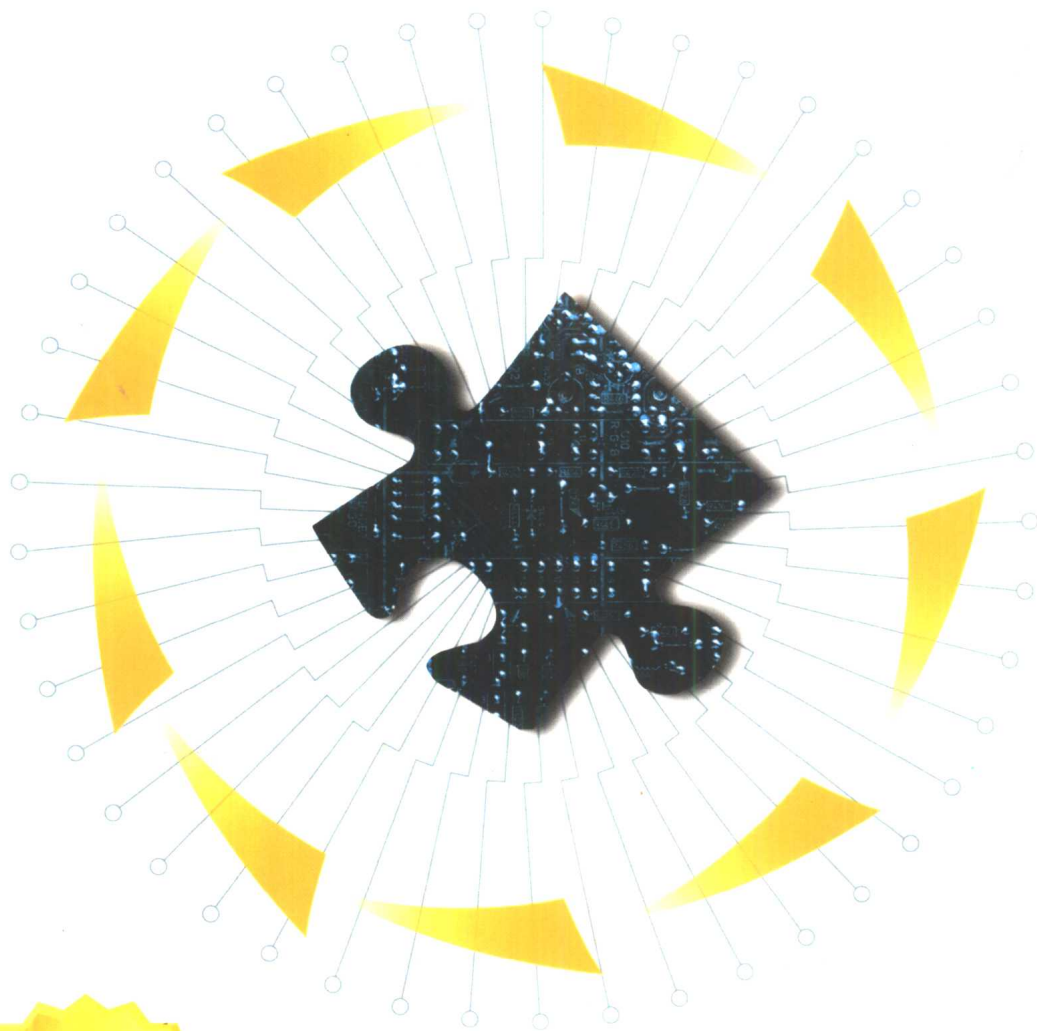


中国高等职业技术教育研究会推荐

高职系列教材

应用电路分析

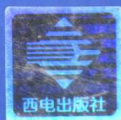
■ 刘守义 张永枫 主编



面向

21 世纪

高级应用型人才



西安电子科技大学出版社

[http:// www.xduph. com](http://www.xduph.com)

□中国高等职业技术教育研究会推荐

高职系列教材

应用电路分析

刘守义 张永枫 主编

西安电子科技大学出版社

2000

内 容 简 介

本书是由中国高等职业技术教育研究会推荐出版的高职系列教材之一。

全书共分8章,第1章为“直流电与电阻元件”,内容包括直流电压电流表的安装与试验(实训)、直流电路、电阻元件、电源;第2章为“正弦交流电与电抗元件”,内容包括日光灯的安装与实验(实训)、正弦交流电的基本参量及相量表示法、正弦交流参量的基本运算、纯电阻电路、电容元件、电感元件、正弦交流电路的一般分析方法、互感与变压器、LC谐振电路、LC回路频率特性测试(实训)、三相电路;第3章为“线性网络分析”,内容包括叠加定理及实验、戴维南定理及实验、线性网络的分析方法;第4章为“一阶动态电路分析”,内容包括简易电子门铃的制作与电路测试(实训)、RC放电电路、RC充电电路、微分电路与积分电路、一阶动态电路及其分析方法;第5章为“非正弦周期信号的傅立叶分析”,内容包括方波信号的频率分解(实训)、非正弦周期信号的产生及其傅立叶分解、非正弦周期信号的有效值与平均功率;第6章为“异步电动机”,内容包括三相异步电动机的正反转控制(实训)、异步电动机的基本结构、三相异步电动机的转动原理、三相异步电动机电路分析、三相异步电动机的转矩特性、三相异步电动机的运行与控制、三相异步电动机的选择与使用;第7章为“直流电动机”,内容包括并励直流电动机的调速与反转(实训)、直流电动机的结构、直流电动机的工作原理、直流电动机的机械特性;第8章为“控制电机”,内容包括直流伺服电动机调速系统(实训)、三相步进电动机控制(实训)。

本书可作为高职、高专与成人教育电类相关专业电工、电路分析等课程理论与实践教学教材。

图书在版编目(CIP)数据

应用电路分析/刘守义等主编. —西安:西安电子科技大学出版社,2000.9

高职系列教材

ISBN 7-5606-0912-0

I. 应… I. 刘… III. 电路分析-高等学校-教材 IV. TN702

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2000)第 38521 号

责任编辑 徐德源

出版发行 西安电子科技大学出版社(西安市太白南路2号)

电 话 (029)8227828

邮 编 710071

http://www.xduph.com

E-mail: xdupfxb@pub.xaonline.com

经 销 新华书店

印 刷 西安市第三印刷厂

版 次 2000年8月第1版 2000年8月第1次印刷

开 本 787毫米×1092毫米 1/16 印张 13.75

字 数 321千字

印 数 1~4 000册

定 价 14.00元

ISBN 7-5606-0912-0/TN·0157

*** 如有印装问题可调换 ***

本书封面贴有西安电子科技大学出版社的激光防伪标志,无标志者不得销售。

序

在即将跨入 21 世纪的前夕,中共中央、国务院召开了第三次全国教育工作会议,并颁发了《中共中央、国务院关于深化教育改革全面推进素质教育的决定》,进一步明确了高等职业教育的重要地位,指出“高等职业教育是高等教育的重要组成部分。要大力发展高等职业教育。”在这一方针的指引下,我国高等职业教育取得了空前规模的发展。至 1999 年,从事高等职业教育的高等职业学校、高等专科学校和独立设置的成人高校已达 1345 所,占全国高校总数的 69.2%;专科层次的在校生占全国高校在校生的 55.37%,毕业生占高校毕业生总数的 68.5%。这些数字表明,高等职业教育在我国高等教育事业中占有极其重要的地位,在我国社会主义现代化建设事业中发挥着极其重要的作用。随着社会的发展、科技的进步,以及我国高等教育逐步走向大众化,我国的高等职业教育必将进一步发展壮大。

在高等职业教育大发展的同时,也有着许多亟待解决的问题。其中最主要的是按照高等职业教育培养目标的要求,培养一批“双师型”的中青年骨干教师;编写出一批有特色的基础课和专业主干课教材;创建一批教学工作优秀学校。

为解决当前高职教材严重匮乏的问题,西安电子科技大学出版社与中国高等职业技术教育研究会联合策划、组织编写了计算机及应用电子技术两个专业的教材,现已出版。本系列教材,从策划到主编、主审的遴选,从成立专家组反复讨论大纲,研讨职业教材特色到书稿的字斟句酌,每走一步都比较扎实、十分精心。作者在编写中紧密联系实际,尽可能地吸收新理论、新技术、新工艺,并按照案例引入、改造拓宽、课题综合(通过一个大型的课题,综合运用所学内容)的思路,进行编写,努力突出高职教材的特点。本系列教材内容取材新颖、实用;层次清楚,结构合理;文笔流畅,装帧上乘。这套教材比较适合高等职业学校、高等专科学校和成人高校等高等职业教育的需要。

教材建设是高等职业院校基本建设的主要工作之一,是教学内容改革的重要基础。为此,有关高职院校都十分重视教材建设,组织教师积极参加教材编写,为高职教材从无到有,从有到优而辛勤工作。但高职教材的建设还刚刚起步,还需要做艰苦的工作,我们殷切地希望广大从事高等职业教育的教师,在教书育人的同时,组织起来,共同努力,编写出一批高职教材的精品,为推出一批有特色的、高质量的高职教材作出积极的贡献。

中国高等职业技术教育研究会会长

李宗尧

高等职业技术教育“计算机及应用电子技术专业” 教材编审专家委员会

主 任：闵光太(中国高等职业技术教育研究会副会长，
金陵职业大学校长，教授)

副主任：俞克新(中国高等职业技术教育研究会秘书长，研究员)

孙建京(北京联合大学教务长，副教授)

余苏宁(深圳职业技术学院计算机应用工程系副主任，副教授)

李荣才(西安电子科技大学出版社总编辑，教授)

计算机组

组 长：余苏宁(兼)

成 员：(按姓氏笔画排列)

丁桂芝(天津职业大学计算机工程系主任，副教授)

朱振元(长沙大学高级工程师)

张 燕(金陵职业大学计算机系讲师)

唐连章(广州大学副教授)

韩伟忠(金陵职业大学计算机系主任，副教授)

樊月华(北京联合大学应用技术学院副教授)

颜 彬(江汉大学副教授)

应用电子技术组

组 长：孙建京(兼)

成 员：(按姓氏笔画排列)

付植桐(天津职业大学副教授)

刘守义(深圳职业技术学院电子通信工程系副主任，高工)

李建民(江汉大学应用物理系副主任，副教授)

高泽涵(广州大学机电工程系副主任，高级实验师)

鲁宇红(金陵职业大学副校长，副教授)

熊幸明(长沙大学工程系主任，副教授)

总策划：梁家新

策 划：马乐惠 徐德源 云立实

前 言

本书是由中国高等职业技术教育研究会与西安电子科技大学出版社联合策划、组织编写的高职、高专应用电子技术系列教材之一。国内十余家有一定影响的高职院校专家对本书的编写大纲进行了认真审核,深圳职业技术学院承担了本书的编写工作。本书在编写过程中,总结了几年来不同院校、不同专业电工、电路分析课程的教学经验,力求体现高职教育的特点。

本书可作为高职、高专与成人教育电类相关专业电工、电路分析课程理论与实践教学教材。

1. 本书特点

本书在如下方面注意体现高职教育的特点。

1) 将理论教学与实践教学融于一体

全书将教、学、做的教学模式在教材中体现出来,按照理论教学与实践教学的实际进程编写教材。实践部分中有理论分析,理论部分有实践作为依托。全书共安排了9个实训项目和相关实验,插于不同的章节,保证理论教学与实践教学同步进行。为保证教材的通用性,书中设计的实训、实验项目一般院校都有条件完成。

2) 由实践到理论,再由理论到实践

本书的叙述体系力图反映认识知识的客观规律。根据目前高职学生的实际水平,从最基本的应用系统出发,由实际问题入手通过技能训练引入相关知识和理论。教材体系力求按照人们的认识规律用实际应用系统通过问题来引导,而不是靠理论体系的逻辑引导。书中所有的定理、定律及一般概念均由实践或实验项目引出。比如用“直流电压、电流表安装与实验”的实训项目引出直流电路及电阻元件的概念;用“日光灯的安装与实验”实训项目引出交流电路及电抗元件的概念等。对相关定理,均通过学生实验或教师演示实验的结果得出,而不采用数学推导。

3) 注意理论上的“度”

电路分析是理论体系非常强的一门课程,其理论基础对学习后续课程起着十分重要的作用。书中对电路分析的基本概念、基本理论、基本工作原理和基本分析方法都作了必要和适当的阐述。在体现高职教材特色方面,本书在内容上以满足后续课程学习的需要为“度”。为使学生既理解电路分析的基本原理,学会分析电路的基本方法,又避免理论上的繁琐推导,本书对相关的基本定理与电路分析方法,凡是可以以文字、图表、实验、实训解决的问题均不作数学推导。同时通过实例、例题、习题来加深理论的应用。

本书第6、7、8章介绍了异步电动机、直流电动机与控制电机的结构与工作原理,以适合电子类专业对电机部分相关理论知识与技能学习的需要。

2. 教学安排

本教材十分适合教、学、做相结合的教学方法，书中设计的实训与实验内容，在可能的情况下应尽量完成。因条件所限不能进行的实训可以通过其他手段完成。理论教学与实训教学应有机结合。理论教学与实训教学可以分开，但内容上应尽可能衔接。

本书学时数在 72~90 之间(含实训)。具体安排如下：第 1 章 8~10 学时；第 2 章 12~16 学时；第 3 章 10~12 学时；第 4 章 10~14 学时；第 5 章 8~10 学时，第 6 章 10~12 学时，第 7 章 6~8 学时，第 8 章 6~8 学时。使用者可根据具体情况增减学时。

参加本教材编写的人员有：张永枫(第 2、3 章)、张亦慧(第 4、5 章)、周山雪(第 6、7、8 章)、刘守义(第 1 章，总体策划及全书统稿)。

深圳职业技术学院戴士弘教授参与了本书的策划并审定了全书，江汉大学张绪宽副教授审定了全书。杨宏丽、毛丰江、苏全、韩秀清校对了本书的有关章节，李惠英绘制了部分电路图。在此向为本书出版作出贡献的朋友表示感谢。

由于时间紧迫和编者水平的限制，书中的错误和缺点在所难免，热忱欢迎使用者对本书提出批评与建议。

编者

2000 年 6 月

于深圳职业技术学院

目 录

第 1 章 直流电与电阻元件	1	2.7 互感与变压器	53
实训 1 直流电压、电流表的安装与实验	1	2.7.1 互感及互感器	53
1.1 直流电路	3	2.7.2 变压器及其工作原理	56
1.1.1 电路变量	4	2.8 LC 谐振电路	61
1.1.2 欧姆定律	5	实训 3 LC 回路频率特性测试	61
1.1.3 基尔霍夫定律	7	2.8.1 串联谐振	63
1.2 电阻元件	9	2.8.2 并联谐振	65
1.2.1 线性电阻与非线性电阻	9	2.8.3 谐振电路的应用	66
1.2.2 电阻的串联与并联	11	2.9 三相电路	68
1.3 电源	14	2.9.1 三相交流电源	68
1.3.1 电压源	15	2.9.2 负载的星形联接(Y 形)	70
1.3.2 电流源	16	2.9.3 负载的三角形联接(Δ 形)	74
1.3.3 电压源与电流源的等效变换	17	2.9.4 三相电路的功率	75
1.3.4 受控源	19	习题与思考题 2	76
1.3.5 负载获取最大功率的条件	22	第 3 章 线性网络分析	84
习题与思考题 1	24	3.1 叠加定理及实验	84
第 2 章 正弦交流电与电抗元件	27	3.2 戴维南定理及实验	87
实训 2 日光灯的安装与实验	27	3.3 线性网络的分析方法	91
2.1 正弦交流电的基本参量及相量表示法	30	3.3.1 支路分析法	91
2.2 正弦交流参量的基本运算	33	3.3.2 节点分析法	93
2.3 纯电阻电路	36	3.3.3 网孔分析法	96
2.3.1 电流与电压的关系	36	3.3.4 回路分析法	98
2.3.2 电阻的功率	36	习题与思考题 3	101
2.4 电容元件	38	第 4 章 一阶动态电路分析	105
2.4.1 电容电压与电流的关系	38	实训 4 简易电子门铃的制作与电路测试	105
2.4.2 电容的储能	39	4.1 RC 放电电路	107
2.5 电感元件	40	4.1.1 RC 放电电路实验	107
2.5.1 电感电压与电流的关系	41	4.1.2 RC 放电电路分析	109
2.5.2 电感的储能	42	4.2 RC 充电电路	113
2.6 正弦交流电路的一般分析方法	43	4.2.1 RC 充电电路实验	113
2.6.1 阻抗的串联与并联	43	4.2.2 实验结果总结	114
2.6.2 电阻、电感及电容元件串联的交流电路	46	4.3 微分电路与积分电路	117
2.6.3 功率因数的提高	51	4.3.1 微分电路与积分电路实验	117
		4.3.2 实验结果的分析与计算	119

4.4 一阶动态电路及其分析方法	121	6.3 三相异步电动机电路分析	155
4.4.1 RC 电路的全响应	121	6.4 三相异步电动机的转矩特性	159
4.4.2 RC 电路暂态分析的三要素法	124	6.5 三相异步电动机的运行与控制	163
4.4.3 RL 电路的过渡过程	127	6.5.1 三相异步电动机的启动、正转 与反转	163
习题与思考题 4	129	6.5.2 三相异步电动机的调速	166
第 5 章 非正弦周期信号的傅立叶 分析	133	6.5.3 三相异步电动机的制动	168
实训 5 方波信号的频率分解	133	6.6 三相异步电动机的选择、使用	169
5.1 非正弦周期信号的产生及其 傅立叶分解	134	6.6.1 三相异步电动机的选择	169
5.1.1 电路中产生非正弦信号 的原因	135	6.6.2 三相异步电动机的铭牌数据	170
5.1.2 非正弦周期量的分解	136	6.6.3 三相异步电动机的连接	172
5.2 非正弦周期信号的有效值、 平均功率	137	习题与思考题 6	175
5.2.1 非正弦周期信号的有效值	137	第 7 章 直流电动机	178
5.2.2 非正弦周期量的平均功率	138	实训 7 并励直流电动机的启动、调速 与反转	178
5.3 非正弦周期电流的线性电路计算	139	7.1 直流电动机的结构	181
习题与思考题 5	143	7.2 直流电动机的工作原理	183
第 6 章 异步电动机	145	7.3 直流电动机的机械特性	186
实训 6 三相异步电动机的正、反转 控制	145	7.4 直流电动机的基本运行过程	189
6.1 异步电动机的基本结构	148	7.5 直流电动机的使用	195
6.2 三相异步电动机的转动原理	151	习题与思考题 7	197
6.2.1 异步电动机转动的基本过程	151	第 8 章 控制电机	199
6.2.2 旋转磁场	152	实训 8 直流伺服电动机调速系统实训	199
6.2.3 异步电动机的转速与转差率	155	实训 9 三相步进电动机控制实训	205
		习题与思考题 8	210
		参考文献	211

第 1 章 直流电与电阻元件

在中学阶段,通过物理学我们对直流电路已有了一定的认识,建立了电压、电流、电阻的初步概念,并且能进行电压、电流的基本测量。本章首先通过“直流电压、电流表的安装与实验”实训课程来强化我们在电路中的动手能力,进一步熟悉电表的调整与校验及直流电相关量的测试方法。通过实训加深对电压、电流表内部电路的基本原理的理解。在中学物理的基础上,本章对电路变量、欧姆定律、基尔霍夫定律等作了更加深入的阐述。

实训 1 直流电压、电流表的安装与实验

1. 实训目的

- (1) 了解电路的基本概念。
- (2) 体验电路基本变量的相互关系。
- (3) 学会电路连接与测试的基本方法。
- (4) 学会电压、电流表的校准与使用。

2. 实训设备、器件与实训电路

(1) 实训设备与器件:直流稳压电源 1 台、数字万用表 2 块、 $100\ \mu\text{A}$ 表头 1 只、单刀双位开关 2 只、电阻若干。

(2) 实训电路与说明:实训电路如图 1-1 所示。其中(a)图为电压表电路,电路中虚框内部的作用是将 $100\ \mu\text{A}$ 的表头改装为量程为 $10\ \text{V}$ 的电压表。(b)图为电流表电路。电路中虚框内部的作用是将 $100\ \mu\text{A}$ 的表头改装为量程为 $100\ \text{mA}$ 的电流表。图中, E 为电压可调的直流稳压电源, B_1 为数字万用表, B_2 为 $100\ \mu\text{A}$ 表头, r 为表头内部线圈的直流电阻,称为表头内阻。

3. 实训步骤与要求

1) 电路连接

按图 1-1(a)连接电路。注意电源与电表的极性不要接反。电路接好后不要打开稳压电源的电源开关。

2) 通电前准备

将数字万用表置直流电压 $20\ \text{V}$ 档。将开关 S 的中心头指向“2”。调节可变电阻 RP_3 的可变触点,使其电阻最大。调节稳压电源的输出控制旋钮,将其输出调到最小位置。

本步骤的目的是防止打开稳压电源开关时,流过 B_2 的电流超过其量程。

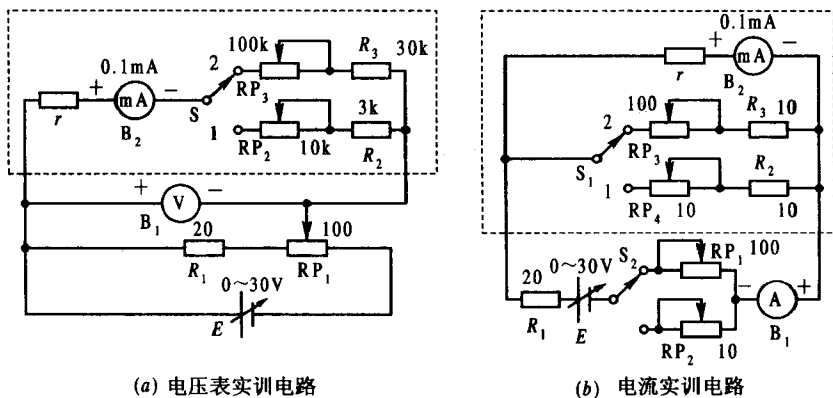


图 1-1 实训电路图

(a) 电压表实训电路; (b) 电流实训电路

3) 标准电压产生

打开稳压电源的电源开关。缓慢调节输出旋钮, 改变稳压电源的输出, 使数字万用表的读数为 10 V。

至此, 我们得到了一个 10 V 的标准电压输出, 其准确度由数字万用表的精度决定。

4) 电压表调节

调节 RP_3 , 使电流表 B_2 的读数至满刻度。体会一下 RP_3 的变化与表头指针偏转的关系。

至此, 通过调节并确定串接在表头上的电阻, 我们将 $100\ \mu\text{A}$ 的表头改装为满度值为 10 V 的电压表。可以看出, 电压表实际上是由一个高灵敏度的电流表与电阻串接而成。改变串接的电阻, 即改变了电压表的量程。

5) 刻度校准

调节稳压电源输出, 使数字万用表的读数依次为 5 V、7.5 V、2.5 V, 在此过程中, 电流表的读数应依次为 $50\ \mu\text{A}$ 、 $75\ \mu\text{A}$ 、 $25\ \mu\text{A}$ 。如果读数准确, 将电流表的表盘改成电压表表盘, 则电压表的安装与调试成功。

6) 测量表头内阻

从电路中取下数字万用表。调节稳压电源输出, 使电压表读数为 10 V ($100\ \mu\text{A}$)。将万用表置直流 200 mV 档, 测量表头两端电压 U_{AB} 。万用表的读数乘以 10 (除以 0.1), 即为表头内阻 r 的欧姆数。

注意, 不能用万用表的欧姆档直接测量表头的内阻。

7) 验证欧姆定律

将万用表置直流电压 20 V 档, 用万用表测量电阻 $RP_3 + R_3$ 两端的电压, 记下读数, 设读数为 U 。将电阻 R_3 右端从电路中取下, 用万用表欧姆档测量 $RP_3 + R_3$ 的电阻, 记下读数, 设读数为 R 。

我们可以发现, U 与 R 的比值恰等于电流表 B_2 的读数 I ($100\ \mu\text{A}$)。

4. 实训总结与分析

(1) 按照图 1-1, 我们可以将各种设备与器件连接起来。在图 1-1 中, 稳压电源用一内阻为 0 的电压源来表示, 表头用一内阻为 0 的电流表与一内阻 r 表示, 导线的电阻为 0, 开关闭合时电阻为 0, 断开时电阻无穷大。其实, 导线都有电阻, 表头的线圈具有电感, 但我们在给出的电路中都忽略了。因此, 图 1-1 是一种将实际电路中各种器件或设备理想化并用相关的参数予以表征以后画出的电路, 称为实际电路的理想模型。给出电路的理想模型可以方便地对实际电路进行分析和数学描述。按照电路模型连接实际应用电路、将实际应用电路等效成理想电路模型、通过数学描述对理想电路模型进行分析, 以上三方面是本门课程的重要学习内容。

(2) 在以上实训中, 我们学会了将一个读数较小的电流表, 改装为一个电压表或电流表。电压表是将一电阻与表头串联, 与之串联的电阻越大, 其测量的量程也越大。电流表是将一个较小的电阻与表头并联, 并联的电阻越小, 其测量的量程越大。其定量的关系, 是我们必须掌握的。读者在学习了本章后面的内容后可以自己分析。

(3) 如果将 R_1 视为电源的负载, 则测量 R_1 两端的电压时, 电压表与 R_1 并联, 测量流过 R_1 的电流时, 电流表与 R_1 串联。测电压并联测电流串联是电路测试必须遵守的基本原则。我们在今后的学习或工作中, 必须严格遵守这一原则, 违反这个原则将会产生严重后果。

(4) 表头内阻 r 是表头的重要参数, 如果事先知道了表头内阻, 在改装电表时, 可以直接计算出与之并联或串联的电阻。实训步骤 6) 中测量表头内阻 r 是通过测量其上的电压来间接得到, 测试原理依据的是中学就学过的欧姆定律。步骤 7) 通过测量电阻 $RP_3 + R_3$ 的阻值、两端的电压、流过其间的电流并找出它们之间的关系, 验证了欧姆定律。

在步骤 6) 中强调不能用万用表欧姆档直接测量表头内阻, 这是因为用万用表测量表头电阻时, 将有电流流过被测量的表头, 这个电流很可能超过表头的量程而使表头损坏。

通过以上操作, 我们接触了一个简单的应用电路, 对电路中的基本物理变量电压与电流有了初步的认识, 掌握了测量电压与电流的基本方法。读者可以根据前面的实训安排, 将图 1-1(a) 中的电流表改装成满度值为 1 V 的电压表。根据图 1-1(b) 将电流表扩展为满度值为 10 mA 与 100 mA 的电流表。实训前, 请事先编写好实训步骤。

5. 思考与讨论

- (1) 如要利用电流表来测量电阻的阻值, 电路应如何连接?
- (2) 要将电压表、电流表、欧姆表组合成一个三用表, 应考虑哪些问题?

1.1 直流电路

实训 1 中, 我们接触的电路都是直流电路。直流电路是指电路稳定以后, 电路中的电压与电流的大小与方向均不发生变化的电路, 或者说是只包含直流电源与电阻的电路。直流电路是电路的最基本形式, 直流电路中的一些基本定律与定理在其他应用电路中也是适用的。掌握直流电路的分析方法, 是研究其他电路的基础。

1.1.1 电路变量

电路中的基本变量包括电流、电压与电动势。我们对电路中的电流、电压等变量有了一定的认识,从定义、单位、量纲、方向、正负意义等几方面进一步深入认识电路变量,对分析电路有着重要的意义。

1. 电流

电流定义为电荷的定向移动。人们把单位时间内通过导体横截面的电荷定义为电流强度,用以衡量电流的大小,电流强度简称为电流,用符号 i 表示。

设在极短的时间 dt 内,通过导体横截面的电荷量为 dq ,则电流为

$$i = \frac{dq}{dt} \quad (1.1)$$

在国际单位制中,时间 t 的单位为 s(秒),电量 q 的单位为 C(库仑),电流的单位为 A(安培)。

一般情况下,在不同时刻, dq 与 dt 的比值不同, i 是时间 t 的函数。如果 dq 与 dt 的比值不随时间变化,即任意时刻,通过导体截面积的电量都是相等的且电荷流动的方向也不发生变化,则这种电流称为恒定电流,简称直流,其强度用 I 表示。显然

$$I = \frac{q}{t} \quad (1.2)$$

如果通过导体截面的电荷随时间变化,而电荷移动的方向不发生变化,这种电流称为脉动直流。如果电流的大小与方向都随时间变化,则称为交变电流,简称交流。

从图 1-2 中,可以看出直流、脉动直流与交流的区别。

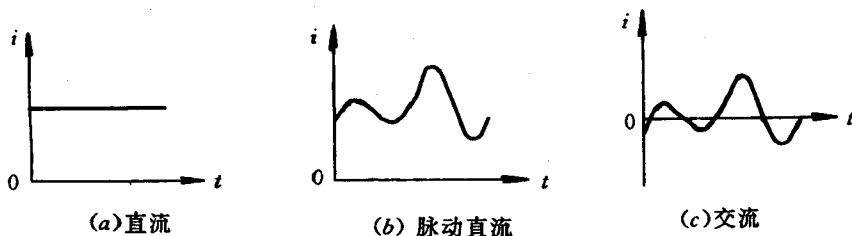


图 1-2 直流、脉动直流与交流
(a) 直流; (b) 脉动直流; (c) 交流

直流是电流的一种特殊形式,人们正是通过对直流电路的分析,找出分析一般电路的方法。

在导体中,任意时刻电荷的移动有确定的方向,人们规定正电荷移动的方向为电流的实际方向。在分析电路时,电流的实际方向往往难以事先确定,为了解决这样的困难,人们可以根据需要任意假定某一方向为电流的正方向,或称为参考方向,并用箭头在电路中标示出来。当所标示的方向与电流实际方向一致时电流为正,与实际电流方向相反时为负。因此,只有在标出了电流的参考方向以后,电流的数值才有正负的区别。

2. 电位与电压

1) 电位

电荷在导体中运动是因为受到了存在于导体中的电场力的作用,显然,电场力要对电荷做功。如果在电路中任意确定一个电位参考点 0,人们定义空间某点 A 的电位 V_A 在量值上等于将单位正电荷从 0 点移到 A 点电场力所做的功。

在国际单位中,电位的单位为 V(伏特)。

显然, V_A 是一个相对的量,它的量值与所选取的参考点有关。

2) 电压

电压与电位联系紧密。电路中任意两点间的电位差称为这两点间的电压。

$$U_{AB} = V_A - V_B \quad (1.3)$$

显然, A、B 两点间的电压 U_{AB} 在数值上等于电场力把单位正电荷从 A 点移到 B 点所做的功。电压的单位与电位完全一样。电压与电位的根本区别是电压与参考点的选取无关。比如在图 1-3 中,选取电压源负端为电位 0 点,可以测得 A 点的电位 V_{A1} 为 7.5 V, B 点电位 V_{B1} 为 5 V, A、B 间电压 $U_{AB} = V_{A1} - V_{B1} = 5 \text{ V} - 2.5 \text{ V} = 2.5 \text{ V}$ 。如选取电压源正端为电位 0 点,可以测得 A 点电位 V_{A2} 为 -2.5 V, B 点电位 V_{B2} 为 -5 V, A、B 间电压 $U_{AB} = V_{A2} - V_{B2} = (-2.5 \text{ V}) - (-5 \text{ V}) = 2.5 \text{ V}$ 。选取的电位 0 点不同, A、B 点的电位发生变化,但 A、B 两点间的电压却不变。

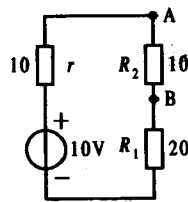


图 1-3

电流、电压与电位都是标量,为了分析问题的方便,电路中也规定电压的方向。如果规定电场力做功取正值,则电位降低的方向(正电荷在电场力作用下流动的方向)为电压的正方向。在电路中,我们可以根据需要任意选某一方向为电压的参考正方向,电压的数值为正时电压的实际方向与选取的参考正方向一致,数值为负时与选取的参考正方向相反。

3. 电动势

在图 1-3 中,为了维持电流的不断流动,并保持恒定,电源的存在是必不可少的条件。电源的作用是将从高电位 A 点流至低电位 B 点的电荷通过非电场力的作用又从低电位搬运到高电位。人们用电动势这个物理量来衡量电源将正电荷从电源负端搬运到电源正端的这种能力。电源的电动势在量值上等于电源力将单位正电荷从电源的低电位端通过电源内部搬运到电源高电位端所做的功。显然,电动势的单位与电位或电压的单位完全相同。

在只有一个电源的电路中,正电荷在电源内部是从电源的负极流向正极,因此人们规定电源电动势的方向由电源负端指向正端,即从电源的低电位端指向高电位端。这样,在图 1-3 中,对于闭合环路来说,电流的方向与电动势的方向完全一致。

必须指出,电压与电动势虽然具有同样的量纲,但两者却有着本质的区别。电动势是描述电源的物理量,它可以离开具体电路独立存在。在恒流电路中,电压是电路中的变量,它随电路参数的改变而改变。

1.1.2 欧姆定律

流过电阻的电流通常与电阻两端的电压成正比,这是我们早已熟识的欧姆定律,在实

训 1 中, 我们验证了这一定律。

在电路中, 当规定的电压正方向与电流正方向一致时, 欧姆定律的数学表示式为

$$U = IR \quad (1.4)$$

在国际单位制中, R 的单位为 Ω 。当两者规定的正方向不一致时, 欧姆定律的数学表示式为

$$U = -IR$$

例 1.1 列出图 1-4 中 4 个电路欧姆定律的数学表达式, 并求电阻 R 。

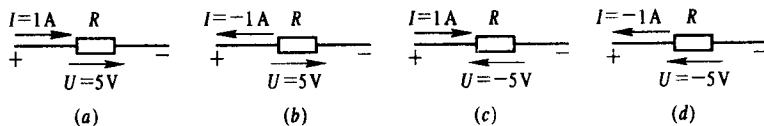


图 1-4 例 1.1 图

解 图 1-4(a)中, 电压与电流的规定方向一致, 且与实际方向一致, 为此有:

$$R = \frac{U}{I} = \frac{5}{1} = 5 \Omega$$

在图 1-4(b)中, 电压与实际方向一致, 为正值, 电流与实际方向相反, 为负值。为此有:

$$R = \frac{U}{-I} = -\frac{5}{-1} = 5 \Omega$$

在图 1-4(c)中, 电压与实际方向相反, 为负值, 电流与实际方向一致, 为正值。为此有:

$$R = \frac{-U}{I} = -\frac{-5}{1} = 5 \Omega$$

同理, 对图 1-4(d)有:

$$R = \frac{-U}{-I} = \frac{-5}{-1} = 5 \Omega$$

例 1.2 图 1-5 为实训 1 中电压表实验电路图。已知电流表处于满度状态, 电源电压为 10 V, 设电流表内阻为 500Ω , 求与电表串联的电阻 R 为多大, 电阻耗散的功率是多少? 如要将电压表的量程扩大至 100 V, 与电流表串联的电阻为多大?

解 根据欧姆定律

$$r + R = \frac{E}{I} = \frac{10}{100 \times 10^{-6}} = 10^5 \Omega$$

所以

$$R = 10^5 - 500 = 99.5 \text{ k}\Omega$$

电阻耗散的功率为

$$P = I^2 R = (100 \times 10^{-6})^2 \times 99.5 \times 10^3 = 0.995 \text{ mW}$$

当量程扩大至 100 V 时

$$r + R = \frac{10}{100 \times 10^{-6}} = 10^6 \Omega$$

所以

$$R = 10^6 - 500 = 999.5 \text{ k}\Omega$$

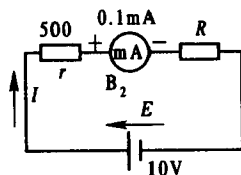


图 1-5 例 1.2 图

上面两个例题, 电路中都只有一个环路, 用欧姆定律可以方便地对电路变量进行分析与数学计算。如果电路出现如图 1-6 的节点(电路中, 有 3 个以上支路相交的点, 如图中的 B、D 两点), 此时电路出现 ABCA、ABDA、BDCB 共 3 个环路, 单纯用欧姆定律来分析就比较困难。这时候, 我们可以应用下小节中的基尔霍夫定律。

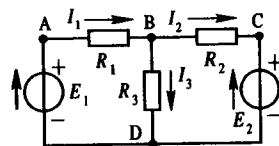


图 1-6 具有节点的多环路电路

1.1.3 基尔霍夫定律

1. 基尔霍夫电流定律

为了深入认识基尔霍夫电流定律, 我们来做实验。

图 1-6 中的电阻按图 1-7 取值, 电源 E_1 与 E_2 由具有两路输出电压可调的稳压电源提供。

实验按如下步骤进行:

(1) 如图 1-7 所示, 将图 1-6 中的节点 B 拆开, 在每条支路中串入一只数字万用表。

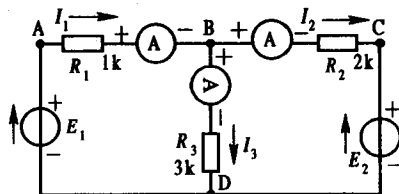


图 1-7 基尔霍夫定律实验电路图

(2) 将万用表置直流电流 20 mA 档。

(3) 打开稳压电源开关, 将 E_1 调至 10 V, E_2 调至 5 V 档。

(4) 读出 3 个电流表的读数。 I_1 读数的正负符号不变, 将 I_2 、 I_3 读数的正负符号颠倒(流入节点的电流取正, 流出节点的电流取负), 然后算出 3 个读数的代数和。

此时我们可以发现, 3 个电流的代数和为 0。

(5) 改变稳压电源 E_1 与 E_2 的输出电压值, 重复步骤(4), 此时每个电流表的读数均发生变化, 但其代数和为 0 的结论并不改变。

为此我们得出, 在任意瞬间, 流入节点的电流, 恒等于流出节点的电流。如果取流入节点的电流为正, 流出节点的电流为负, 则一个节点上电流的代数和恒等于 0。

(6) 按图 1-8 连接电路。

图 1-8 中, 圆环包围了 A、B、C 共 3 个节点。如果把圆环看成是一个闭合面, 则该面外共有 3 条支路。其中, I_1 为流入闭合面的电流, I_2 与 I_3 为流出闭合面的电流。我们来看看它们之间遵循什么关系。

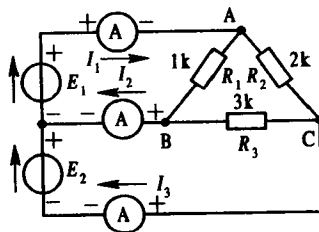


图 1-8 基尔霍夫实验图 2

(7) 重复步骤(2)、(3)、(4)、(5), 可以得到这样的结论: 电路中, 流入任意闭合面的电流, 恒等于从闭合面流出的电流。

通过上述实验, 我们得出: 电路中, 对任意节点或闭合面来说, 流入节点或闭合面的电流, 恒等于流出节点或闭合面的电流。这就是基尔霍夫电流定律, 也称为基尔霍夫第一定律。

如果将流入节点的电流取正, 流出节点的电流取负, 则基尔霍夫定律的数学表示式为

$$\sum I = 0 \quad (1.5)$$

2. 基尔霍夫电压定律

为了认识基尔霍夫电压定律, 我们进行如下实验:

(1) 按图 1-9 连接电路。

(2) 打开稳压电源 E_1 与 E_2 的开关并使它们的输出在 (5~10)V 之间。

(3) 用数字万用表测量回路 ABDA 中每两点间的电压 U_{AB} 、 U_{BD} 、 U_{DA} 。测量时, 表笔的正端置于电压角标的第一个字母在电路中对应的测试点, 表笔负端置于电压角标第二个字母在电路中对应的点。将测量值填入表 1-1 中。

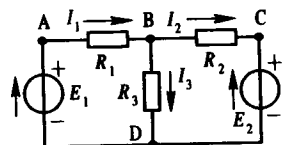


图 1-9 基尔霍夫电压定律实验图

表 1-1 基尔霍夫电压定律实验测量数据表

	相临两点间电压				$\sum U$
环路 ABDA	U_{AB}	U_{BD}	U_{DA}		
环路 ABCDA	U_{AB}	U_{BC}	U_{CD}	U_{DA}	
环路 BDCB	U_{BD}	U_{DC}	U_{CB}		

(4) 按步骤(3)的方法与要求再依次测量回路 ABCDA 与回路 BDCB 中相临两点间的电压, 并将测量值填入表 1-1。

(5) 分别将 3 个环路相临两点间的电压求代数和, 我们发现, 它们的值均为 0。

通过以上演示, 我们得出如下结论: 在任意瞬间, 在任意闭合回路中, 沿任意环行方向(顺时针或逆时针), 回路中各段电压的代数和恒等于 0。这就是基尔霍夫电压定律。其数学表达式为

$$\sum U = 0 \quad (1.6)$$

在分析电路时, 为了正确写出(1.6)式, 可按如下方法进行:

(1) 规定环路的绕行方向(顺时针或逆时针)。

(2) 规定每条支路电流的参考方向。

(3) 沿绕行方向确定环路上电阻两端电压的正负符号, 如果标注的流过电阻的电流方向与绕行方向一致时, 则电阻上的电压取正值(电位降取正), 相反则取负值。

(4) 沿绕行方向确定电源电压的正负符号。如果电动势的方向与环路方向一致则取负(电位升取负)值, 相反则取正值。

例 1.3 写出图 1-9 中, ABDA、ABCD、BCDB 3 个环路的基尔霍夫电压定律等式。