

21世纪电工电子学课程系列教材

电路理论基础

(第3版)

主 编 赖旭芝

副主编 宋学瑞 陈 宁

李中华 张婵娟



中南大学出版社
www.csupress.com.cn

电路理论基础

(第3版)

主 编 赖旭芝

副主编 宋学瑞 陈 宁

李中华 张婵娟

中南大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

电路理论基础/赖旭芝主编. —3 版. —长沙:中南大学出版社,2009
(21 世纪电工电子学课程系列教材)
ISBN 978-7-81105-689-1

I. 电... II. 赖... III. 电路理论—高等学校—教材 IV. TM13

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 227358 号

电路理论基础

(第 3 版)

主编 赖旭芝

☐责任编辑 肖梓高

☐责任印制 汤庶平

☐出版发行 中南大学出版社

社址:长沙市麓山南路

邮编:410083

发行科电话:0731-88876770

传真:0731-88710482

☐印 装 长沙利君漾印刷厂

☐开 本 730×960 1/16 ☐印张 25.5 ☐字数 462 千字 ☐插页:

☐版 次 2009 年 12 月第 1 版 ☐2009 年 12 月第 1 次印刷

☐书 号 ISBN 978-7-81105-689-1

☐定 价 48.00 元

图书出现印装问题,请与经销商调换

21 世纪电工电子学课程系列教材编委会

主任 陈明义

成员 (以姓氏笔画为序)

文援朝 李 飞 陈 宁 陈明义 宋学瑞

刘 辉 罗桂娥 覃爱娜 赖旭芝

总 序

我的面前摆放着十多本封面五颜六色的电工电子学系列课程教材,它们是中南大学信息科学与工程学院电子科学与技术系电工电子学系列课程教学团队多年辛勤劳动和教学实践的结晶。

电流所经过的路径叫电路。大学生学习(电工电子)电路课程的意义犹如行人、游人、司机学习行路知识和人们探求人生之路的真谛一样重要。无论是“电路”、“前进道路”还是“人生道路”,都有一个“路”字。俗话说,“路是人走出来的”。人生之路是探索出来的,行路见识是体验出来的,电路知识是学习得来的。研究发现,人类社会的许多自然现象、科技和人文问题都可用电路的方法来模拟,人类自身的许多活动和智能行为也可用电路的方法通过硬件与软件来模仿。因此,电工电子学系列课程作为技术基础课程对高校人才培养所起的重要作用是不言而喻的。电工电子学的基础知识、基础理论和基本技能正通过教学活动和人的智能活动向各个学科领域扩展和渗透,发挥着越来越大的作用。通过本系列课程学习,学生能够获得关于电工电子学的基本理论、基本知识和基本技能,为后续专业课程的学习和毕业后参加工作打下基础。

现由中南大学出版社出版的这套电工电子学系列教材,是根据电工电子学系列课程教学体系而编写的,其教学目标在于培养学生的创新能力,满足不同专业学生的培养要求和个性化人才培养的需求。该系列教材分为3大类别:第1为基础知识类,第2为扩展知识类,第3为实践技能类。其中,基础知识教材又分为电类、机电类、非电类、文理类4个层次共9个模块;扩展知识类教材主要是电工电子学新知识的扩展与延伸,共有10个模块;实践技能类教材分为实验、实习和课程设计3个模块。

中南大学信息科学与工程学院电子科学与技术系教学人员在全校电工电子学系列课程教学中取得了不俗成绩。2002年电工电子学系列课程获得湖南省优秀课程;2005年电工电子学教学实验中心获省级示范实验中心,2007年电工电子学实习基地被评为省级优秀实习基地。现在3门课程获得校级精品课,1门课程获得省级精品课,3部教材获得“十一五”国家规划教材。他们还获得省级教学成果一等奖2项、二等奖1项、三等奖1项;参加该系列课程学习的6名学生获得全国大学生电子设计竞赛一等奖,12名学生获得全国大学生电子设计竞赛二等奖,3名学生获得第二届“博创杯”全国大学生嵌入式设计大赛二等奖,

2 名学生获全国大学生“挑战杯”创业大赛金奖。这些成果不仅表明这支电工电子学系列课程教学团队具有很强的实力和很高的水平,而且也从一个侧面反映出该系列课程教学的丰硕成果。

这套电工电子学系列教材的编写精益求精,内容系统全面,取材新颖,反映了本学科及其教材研究 and 应用的新进展,值得进一步推广使用。我相信,该系列新版教材的问世和使用,将为我国电工电子学科和教材的发展做出更大的贡献。

蔡自兴

中南大学教授、博士生导师
全国高等学校首届国家教学名师
国际导航与运动控制科学院院士

2008 年 6 月 5 日

于长沙岳麓山下

再版前言

电路理论课是国家教育部规定的电子信息类专业的专业基础课与专业主干课,也是电气工程、控制科学与工程、计算机科学与技术等各类专业必修的专业基础课或专业主干课。根据工科电路课程教学指导委员会指定的《电路》课程教学基本要求,结合我们多年的教学实践经验,编写了《电路理论基础》这本教材。

为了使教材条理清晰和重点突出,全书主要内容分为4部分。第1部分为直流电路,即第1~4章,主要介绍了电路的基本元件和电路定律、电路的等效变换、电阻电路的一般分析方法和电路基本定理等内容;第2部分为交流电路,即第5~9章,详细描述了正弦交流电路相量法,正弦交流电路的分析、含有耦合电感电路的分析、三相电路和非正弦周期电流电路的分析;第3部分为动态电路,即第10~12章,主要介绍了一阶电路、二阶电路和复频域分析;第4部分为高级电路篇,即第13~15章,重点阐述了二端口网络、电路的矩阵形式和非线性电阻的分析。

本教材内容的选择与编排力求与有关专业的前设和后续课程有良好的衔接,各专业可根据本专业的特点取舍教学内容,教材计划教学时数为64~96学时。

这次编写也得到了电子所其他老师的支持和帮助。可以说该书是电子所电路课程组集体劳动的成果。编写大纲经过了电路组及21世纪电工电子学课程系列教材编委会的多次讨论,吸收了许多合理的建议,在此表示诚挚的感谢。

本书共15章,赖旭芝编写了第1章、第2章和第3章;宋学瑞编写了第9章、第10章和第11章;陈宁编写了第5章、第6章和第15章;李中华编写了第12章、第13章和第14章;张婵娟编写了第4章、第7章和第8章。

书中标有星号(*)的章节均属参考内容,教学时可以根据实际需要和可能有所取舍,不一定都要讲授。

由于编者水平有限,书中难免有错误和不当之处,恳请读者批评指正。

编者

2009年10月8日

目 录

第 1 章 电路模型与电路定律	(1)
1.1 电路和电路模型	(1)
1.2 电路变量及其参考方向	(2)
1.3 电路元件	(6)
1.4 独立电源	(15)
1.5 受控源	(16)
1.6 基尔霍夫定律	(18)
1.7 电路的图	(22)
本章小结	(27)
复习思考题	(27)
第 2 章 电路的等效变换	(33)
2.1 电路的等效变换	(33)
2.2 电阻的串联和并联	(33)
2.3 电阻的 Y 形连接和 Δ 形连接的等效变换	(36)
2.4 电压源、电流源的串联和并联	(39)
2.5 实际电源的两种模型及其等效变换	(41)
2.6 输入电阻	(44)
本章小结	(46)
复习思考题	(46)
第 3 章 电阻电路的一般分析方法	(50)
3.1 支路电流法	(50)
3.2 网孔电流法和回路电流法	(52)
3.3 结点电压法	(60)
本章小结	(67)
复习思考题	(68)

第4章 电路基本定理	(73)
4.1 叠加定理	(73)
4.2 齐性定理和替代定理	(77)
4.3 戴维宁定理和诺顿定理	(78)
4.4 特勒根定理和互易定理	(88)
本章小结	(95)
复习思考题	(95)
第5章 相量法	(100)
5.1 正弦量的基本概念	(100)
5.2 正弦量的相量表示	(105)
5.3 相量法的分析基础	(113)
本章小结	(118)
复习思考题	(118)
第6章 正弦交流电路的分析	(121)
6.1 阻抗和导纳	(121)
6.2 阻抗和导纳的串联和并联	(126)
6.3 电路的相量图法	(128)
6.4 正弦稳态电路的分析	(132)
6.5 正弦稳态电路的功率	(136)
6.6 功率因数的提高	(142)
6.7 正弦稳态最大功率传输条件	(145)
6.8 正弦电路的谐振	(148)
本章小结	(158)
复习思考题	(159)
第7章 耦合电路	(166)
7.1 含耦合电感的正弦电路	(166)
7.2 含耦合电感电路的计算	(169)
7.3 空芯变压器电路的分析*	(174)
7.4 理想变压器	(177)
本章小结	(181)

复习思考题	(181)
第8章 三相电路	(186)
8.1 三相电路	(186)
8.2 对称三相电路的计算	(192)
8.3 不对称三相电路的概念	(195)
8.4 三相电路的功率	(200)
本章小结	(204)
复习思考题	(205)
第9章 非正弦周期电流电路	(209)
9.1 非正弦周期信号及傅里叶级数展开*	(209)
9.2 有效值、平均值和平均功率	(216)
9.3 非正弦周期电流电路的计算	(220)
9.4 对称三相电路中的高次谐波*	(226)
本章小结	(228)
复习思考题	(229)
第10章 一阶电路分析	(232)
10.1 电路中的过渡过程及换路定律	(232)
10.2 一阶电路的零输入响应	(237)
10.3 一阶电路的零状态响应	(246)
10.4 一阶电路的全响应及三要素法	(252)
10.5 阶跃响应和冲激响应	(261)
本章小结	(268)
复习思考题	(269)
第11章 二阶电路分析*	(275)
11.1 二阶电路的零输入响应	(275)
11.2 二阶电路的零状态响应与阶跃响应	(285)
11.3 二阶电路的冲激响应	(288)
本章小结	(290)
复习思考题	(291)

第 12 章 复频域分析	(294)
12.1 拉普拉斯变换及基本性质*	(294)
12.2 拉普拉斯反变换的部分分式展开*	(298)
12.3 电路元件和电路定律的复频域形式	(302)
12.4 应用拉普拉斯变换法分析线性电路	(305)
12.5 网络函数	(309)
本章小结	(313)
复习思考题	(315)
第 13 章 二端口网络	(319)
13.1 二端口网络的基本概念	(319)
13.2 二端口网络的参数和方程	(320)
13.3 二端口网络的等效电路	(329)
13.4 二端口网络的连接	(332)
13.5 回转器和负阻抗变换器*	(334)
本章小结	(338)
复习思考题	(338)
第 14 章 电路方程的矩阵形式*	(341)
14.1 割集的基本概念	(341)
14.2 关联矩阵、回路矩阵、割集矩阵	(343)
14.3 结点电压方程的矩阵形式	(349)
14.4 回路电流方程的矩阵形式	(353)
14.5 割集电压方程的矩阵形式	(357)
14.6 状态变量分析	(359)
本章小结	(364)
复习思考题	(364)
第 15 章 非线性电阻电路	(369)
15.1 非线性电阻	(369)
15.2 非线性电阻电路的串联和并联	(372)
15.3 小信号分析法	(375)
15.4 分段线性化方法*	(378)

本章小结	(381)
复习思考题	(381)
各章复习思考题答案	(384)
参考文献	(392)

第1章 电路模型与电路定律

本章从引入电路模型的概念开始,首先提出电流和电压的参考方向;接着讲解吸收、发出功率的表达式和计算方法;然后介绍常用的电路元件、反映电路连接关系的基尔霍夫定律以及有关图论的初步知识。

1.1 电路和电路模型

电在日常生活、生产和科学研究工作中得到了广泛应用,在收录机、电视机、录像机、音响设备、计算机、通信系统和电力网络中都可以看到各种各样的电路。这些电路的特性和作用各不相同。虽然电路功能不同,实际电路也千差万别,但不同的电路都遵循着同样的基本电路规律。

根据电路的功能将电路分为两种:一种是实现电能传输和分配,并将电能转换成其他形式的能量,如电力系统或通信系统;另一种功能是对信号进行处理,通过电路把输入的信号(又称为激励)进行变换或加工变为所需要的输出(又称为响应),如放大电路把微弱信号进行放大,如收音机、电视机的放大电路,调谐电路,存储电路,整流滤波电路等。

为了实现电能的产生、传输及使用的任务把所需要的电路元件按一定的方式连接起来,即构成电路。所以,电路是由电器设备构成的总体。它提供了电流流通的路径,在电路中随着电流的通过,进行着能量的转换、传输、分配。一个完整的电路要有3个基本组成部分,第1个组成部分是电源,它是产生电能或信号的设备,是电路中的信号或能量的来源,工作时将其他形式的能量变为电能,例如发电机、干电池等,电源又被称为激励;第2个组成部分是负载,它是用电设备,消耗电能的装置,工作时将电能变为其他形式的能量,例如电动机、电阻器等;第3个组成部分是电源与负载之间的连接部分,这部分除连接导线外,还可能控制、保护电源用的开关和熔断器等。

由电阻器、电容器、线圈、变压器、晶体管、运算放大器、传输线、电池、发电机和信号发生器等一些电气器件和设备按一定的方式连接而成的电流的通路,称为实际电路。实际电路是为完成某种预期的目的而设计、安装、运行的。在实际电路中,如果其器件和部件的外形尺寸,较之电路工作时通过其中的电磁波的波长来说非常小,以致可以忽略不计,这种元件就称为集总元件,由它们构成的

电路叫集总电路,一般这种电路中的元件是理想化的,是不占有空间尺寸的。实际电路的电路模型是由理想电路元件相互连接而成的,理想电路元件是组成电路模型的最小单位,是具有某种确定的电磁性质的假想元件,它是一种理想化的模型并具有精确的数学定义。在一定假设条件下,可以用足以反映其电磁性质的理想电路元件或它们的组合来模拟实际电路中的器件。

电路理论讨论的不是实际电路而是它的电路模型。通过对电路模型的分析计算来预测实际电路的特性,从而改进实际电路的电气特性和设计出新的电路。

在电路分析中,有3种最基本的无源理想电路元件:只表示消耗电磁能、转换电磁能为其他形式能量的电阻元件;只表示电场现象的电容元件;只表示磁场能量的电感元件。此外,还有电压源、电流源等两种理想电源元件。这些元件都具有两个端子与外电路相连,称为二端元件。理想二极管也是二端元件,常用于电子器件的模型中。除二端元件外,还有四端元件,如受控源、理想变压器和互感器等。人们从实践中总结出这些少数几种理想元件,用来构成实际电路的电路模型。以后将陆续介绍这些理想电路元件及其特性。

实际电路用电路模型表示后,就可绘出用理想电路元件组成的电路图。每个理想电路元件都有一定的符号表示,如电阻元件用长条形符号表示;电容元件用两根平行的直线表示;理想导线用线段来表示等。如图1-1(a)所示电路是一个简单的手电筒实际电路,干电池可用一个电阻模型与一个电压源模型的组合来构成,而灯泡可用一个电阻模型来替代,则可得它的电路模型如图1-1(b)所示。

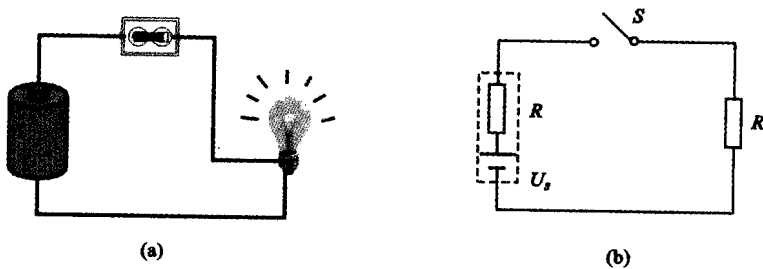


图 1-1 手电筒的实际电路与电路模型

1.2 电路变量及其参考方向

电路理论研究电路中发生的电磁现象,并用电流、电荷、电压和磁通等物理量描述其过程。它主要用于计算电路中流过各器件的端子电流和端子之间的

电压,以及元件的功率,一般不涉及内部发生的物理过程。

1.2.1 电流及其参考方向

1. 电流的定义

电流又称为电流强度,定义为单位时间内通过电荷的变化率,用符号 i 表示,即

$$i = \frac{dq}{dt} \quad (1-1)$$

习惯上把正电荷运动的方向规定为电流的方向。如果电流的大小和方向不随时间变化,则这种电流叫做恒定电流,简称直流,可用符号 I 表示。如果电流的大小和方向都随时间变化,则称为交变电流,简称交流,用 i 表示。在国际单位制中,电荷的单位是库仑(C),电流的单位是安培(A)。

2. 电流的参考方向

上面已经提到正电荷运动的方向规定为电流的方向,但在实际问题中,电流的真实方向往往难以在电路图中标出。例如,当电路中的电流为交流时,就不可能用一个固定的箭头来表示真实方向,即使电流为直流,在求解较复杂电路时,也往往难以事先判断电流的真实方向。为了解决这种困难,电路中引入电流参考方向这一概念。电流参考方向就是假设电路中元件的电流方向。电流参考方向的表示方法有两种,一种方法是用箭头,如图 1-2(a)所示;另一种方法是用双下标,如图 1-2(b)所示。根据电流参考方向的规定,当电流为正值时,该电流的实际方向与参考方向一致;当电流为负值时,该电流的实际方向与参考方向相反。这样,可利用电流的正负值结合着参考方向来表明电流的真实方向,例如 $i = -2\text{A}$,表示正电荷以 2C/s 的速率逆着参考方向移动。在分析电路时,我们尽可先任意假设电流的参考方向,并以此为准进行分析、计算,从最后答案的正、负值来确定电流的实际方向。在未标示电流参考极性的情况下,电流的正负是毫无意义的。

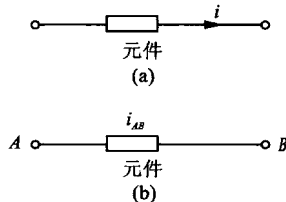


图 1-2 电流参考方向

1.2.2 电压及其参考方向

电荷在电路中流动,就必然有能量的交换发生。电荷在电路的某些部分(例如电源处)获得能量而在另外一些部分(如电阻元件处)失去能量。电荷在电源处获得的能量是由电源的化学能、机械能或其他形式的能量转换而来的。

电荷在电路某些部分所失去的能量,或转换为热能(电阻元件处),或转换为化学能(电池处),或贮藏在磁场中(电感元件处)等。失去的能量是由电源提供的,因此,在电路存在着能量的流动,电源可以提供能量,有能量流出;电阻等元件吸收能量,有能量流入。为便于研究这个问题,在分析电路时引用电压这一物理量。

1. 电压的定义

电路中 A 、 B 两点间的电压表明单位正电荷由 A 点转移到 B 点时所获得或失去的能量,即

$$u = \frac{dW}{dq} \quad (1-2)$$

如图 1-3 所示,其中 q 为由 A 点转移到 B 点的电荷; W 为转移过程中电荷 q 所获得或失去的能量,单位为焦耳(J),电压的单位为伏特(V)。

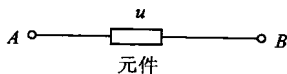


图 1-3 电压的定义

如果正电荷由 A 转移到 B , 获得能量,则 A 点为低电位,即负极, B 点为高电位,即正极。如果正电荷由 A 转移到 B , 失去能量,则 A 点为高电位,即正极, B 点为低电位,即负极。

同样,如果电压的大小和方向不随时间变化,则这种电压叫恒定电压,简称直流电压,可用符号 U 表示。如果电压的大小和方向都随时间变化则被称为交变电压,用 u 表示。

2. 电压的参考方向

如同需要为电流规定参考方向一样,同样也需要为电压规定参考方向。电压参考方向的表示方法有 3 种,第 1 种方法是用箭头,如图 1-4(a)所示;第 2 种方法是用双下标,如图 1-4(b)所示, A 点表示高电位端, B 点表示低电位端;第 3 种方法是在元件或电路的两端用“+”“-”符号来表示,“+”号表示高电位端,“-”号表示低电位端,如图 1-4(c)所示。

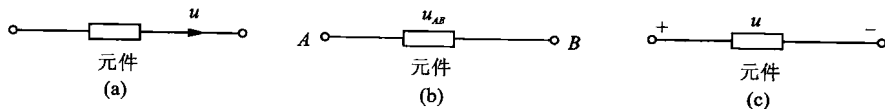


图 1-4 电压的参考方向

根据电压参考方向的规定,当电压为正值时,该电压的实际方向与参考方向相同;当电压为负值时,该电压的实际方向与参考方向相反。在未标示电压参考极性的情况下,电压的正负也是毫无意义的。

和电流标示参考方向一样,在电路图中,对元件所标的电压参考方向也可以任意选定,参考方向不一定代表电压的实际方向,它们配合着电压的正值或负值,表明电压的真实极性。

在电路分析中,虽然同一段元件的电压和电流的参考方向可以各自选定,不必强求一致。但为了分析方便,常选定元件的电压和电流的参考方向一致,即电流从正极性端流入该元件,而从它的负极性端流出,这样假定的电压电流参考方向为关联参考方向,如图1-5所示,这种相关联的参考方向的设定为分析计算带来方便。相反,则为非关联参考方向,如图1-6所示。

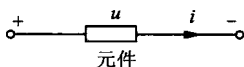


图1-5 关联参考方向

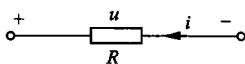


图1-6 非关联参考方向

1.2.3 功率和能量

在电路分析中,功率和能量的计算也是非常重要的。因为,尽管在基于系统的电量分析和设计中,电压和电流是有用的变量,但是系统有效的输出经常是非电气的,这种输出用功率和能量来表示比较合适。另外,所有实际器件对功率的大小都有限制。因此,在设计过程中只计算电压和电流是不够的。

元件从 t_0 到 t 时间内吸收的能量 W ,可以根据电压的定义求得为

$$W = \int_{q(t_0)}^{q(t)} u dq \quad (1-3)$$

由于 $i = dq/dt$, 把它代入式(1-3), 有

$$W = \int_{t_0}^t u i dt \quad (1-4)$$

式中 u 和 i 都是时间的函数,因此,能量也是时间的函数。元件的功率是单位时间内所做的功,即

$$P = \frac{dW}{dt} = ui \quad (1-5)$$

其中, P 是功率,单位为瓦特(W)。式(1-5)表示基本电路元件的功率等于流过元件的电流和元件两端电压的乘积。根据电压和电流参考方向的定义,可知电压和电流可能为正,也可能为负,因此,功率也就可正可负。如何根据功率的正负判断元件是吸收功率还是发出功率,电压和电流参考方向是否关联对判断元件吸收或发出功率起重要的作用。

当元件的电压和电流为关联参考方向时,式(1-5)表示元件吸收功率,即