



普通高等教育“十二五”规划教材
电子电气基础课程规划教材
省级精品课程教材



电路理论

■ 许爱德 那振宇 李作洲 主编



电子工业出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

[<http://www.phei.com.cn>]

电子电气基础课程规划教材

电 路 理 论

许爱德 那振宇 李作洲 主 编

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 · BEIJING

内 容 简 介

本书把电路理论分为“直流”电路和“交流”电路两部分,直流部分从第1章至第4章,包括电路基本定律和简单电阻电路、电路分析的基本方法和定理、运算放大器电路和动态电路的时域分析;交流部分从第5章至第10章,包括正弦稳态电路、谐振电路与频率响应、互感电路、三相电路、非正弦周期电流电路和二端口网络。通过先介绍直流电路中的相关概念、定理和方法,在引入频率的概念后,将这些概念、定理和方法自然地推广到交流电路中,在教学实践中收到了非常好的效果。

本书内容简洁,重点突出,逻辑清晰。课后习题按照知识点分类给出,便于教师布置作业和学生有针对性的练习,书末附有全部习题答案。

本书可作为高等院校电子信息类专业本科生“电路理论”、“电路基础”课程教材或教学参考书,也可供工程技术人员和电路爱好者参考。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

电路理论 / 许爱德, 那振宇, 李作洲主编. —北京: 电子工业出版社, 2015.1

电子电气基础课程规划教材

ISBN 978-7-121-24740-8

I. ①电… II. ①许…②那…③李… III. ①电路理论—高等学校—教材 IV. ①TM13

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 262308 号



责任编辑: 竺南直 特约编辑: 郭 莉

印 刷: 北京中新伟业印刷有限公司

装 订: 北京中新伟业印刷有限公司

出版发行: 电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本: 787×1 092 1/16 印张: 17 字数: 435 千字

版 次: 2015 年 1 月第 1 版

印 次: 2015 年 1 月第 1 次印刷

印 数: 3 000 册 定价: 36.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题, 请向购买书店调换。若书店售缺, 请与本社发行部联系, 联系及邮购电话: (010) 88254888。

质量投诉请发邮件至 zltz@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线: (010) 88258888。

前 言

《电路理论》是普通高等工科院校信息类专业第一门重要的专业基础课,也是后续课程学习和科学研究的基础。根据编者对目前国内外主流教材的调研,大多数教材涵盖范围广、知识点内容多;由于这些教材是面向所有电类专业,这实际上很难适应对信息类专业学生的授课需求。信息类专业包括电子信息工程、通信工程、电子科学与技术、光电工程、计算机科学与技术、网络工程、智能科学与技术等,与电气工程、电力自动化等专业相比,这些专业侧重信息的传输、处理和控制。因而,亟需一本面向信息类专业、具有专业针对性的《电路理论》教材。鉴于此,根据高等院校课程改革的要求,结合作者多年授课经验,在我校 2001 年出版的《电路基础理论》教材基础上,针对信息类专业学生编写了《电路理论》一书。

这部《电路理论》教材具有如下特点:

第一,区别于大多数教材的编写思路,全书把电路分为“直流”电路和“交流”电路两部分。直流部分从第 1 章至第 4 章,包括简单电阻电路、线性直流电路,运算放大器电路、动态电路时域分析。交流部分从第 5 章至第 10 章,包括正弦稳态电路、谐振电路与频率响应、含耦合电感电路、三相电路、非正弦周期电流电路和二端口网络。这样的章节安排事半功倍:先介绍线性直流电路中的相关概念、定理和方法,在引入频率的概念后,可以将直流电路中的这些概念、定理和方法自然地推广到交流电路中;在教学实践中收到了非常好的教学效果。

第二,针对信息类专业特点,充分考虑到后续课程衔接,有利于学生平稳过渡到后续专业课程。例如,针对电子通信专业后续课程,本书强调了动态电路的零输入响应、零状态响应、全响应、暂态响应和稳态响应等概念及其物理意义;由谐振电路详细介绍了频率响应的概念;通过非正弦周期电流电路自然引出了频谱的概念,建立信号的时域-频域对应关系,为《信号与系统》做铺垫;针对《低频电子线路》、《高频电子线路》、《电波与天线》等课程,重点讲解了输入、输出阻抗及等效阻抗的定义与求法;强调频率与电抗的关系,使学生深刻理解频率对电路特性的影响;对相量和利用相量图求解正弦稳态电路做了深入分析。本书作者从事电子通信专业教学和科研多年,补充或强调这些内容,有助于学生对后续课程的学习,在教学过程中受到了学生们的普遍认可。

第三,结合信息类专业特点,根据教学时数与前后课程衔接关系,对教学内容做了必要调整和删减。考虑到学生学完《复变函数与积分变换》后马上学习《信号与系统》,故删去了线性动态电路的复频域分析;考虑到《低频电子线路》或《模拟电子技术》课程中会系统讲授非线性电路,故删去这部分内容;受学时数限制,对图、树概念介绍做了简化处理,删去了电路方程矩阵形式等内容。这样,全书讲授内容控制在 9~10 章,能够最大程度上利用现有学时数,提升重点内容的教学效果。

此外,本书增加了例题数量,有的题目还给出了不同解法,以期让学生从不同角度深刻理解电路理论的概念、定理和解题方法。课后习题按照章节顺序给出,便于教师布置作业和学生有针对性练习。在行文上,本书注重启发性,力求将刻板乏味的电路理论讲述得生动易懂,便于学生自学。在本书最后,还推荐了一些与本课程相关的网络学习资源,启发和引导学生利用网络获取专业知识,激发学生学习兴趣、拓展学生视野。

本书由国家级电工电子教学中心电路理论课程组教师编写。全书共 10 章,第 1~4 章由许爱德编写,第 5~9 章由那振宇编写,第 10 章由李作洲编写。

为了方便教学,本书配有电子课件,任课教师可登录华信教育资源网(www.hxedu.com.cn)免费注册下载。

在成书过程中得到了大连海事大学教务处的的大力支持。感谢信息科学技术学院领导、课程组其他任课教师和同仁的倾力协助。此外,研究生潘军、丁晖,北京航空航天大学研究生徐芙蓉、天津大学研究生曾亚辉协助参与了部分内容的校对和作图,也在此表示感谢。

由于作者水平有限,难免有疏漏之处,恳请读者批评指正。

电路课程教研室

2014 年 8 月

目 录

第 1 章 电路基本定律和简单电阻电路	1
1.1 电路和电路模型	1
1.2 电路分析基本变量	3
1.2.1 电流	3
1.2.2 电压	4
1.2.3 关联、非关联方向	5
1.2.4 电功率	6
1.3 电路分析基本元件	7
1.3.1 电阻元件	7
1.3.2 电容元件	9
1.3.3 电感元件	11
1.3.4 电压源	12
1.3.5 电流源	13
1.3.6 受控源	15
1.4 基尔霍夫定律	16
1.4.1 基尔霍夫电流定律	16
1.4.2 基尔霍夫电压定律	17
1.5 电路的等效变换	20
1.5.1 纯电阻电路的等效变换	20
1.5.2 含电源电路的等效变换	26
1.5.3 输入电阻	30
习题 1	31
第 2 章 电阻电路的一般分析	42
2.1 结点法	42
2.2 回路法	47
2.3 齐次性和叠加原理	52
2.3.1 齐次性定理	52
2.3.2 叠加原理	53
2.4 替代定理	56
2.5 戴维南定理和诺顿定理	57
2.5.1 戴维南定理	57
2.5.2 诺顿定理	61
2.6 最大功率传输定理	62
习题 2	64
第 3 章 含有运算放大器的电路	71
3.1 运算放大器的电路模型	71
3.1.1 运算放大器简介	71

3.1.2	运算放大器符号及电路模型	71
3.1.3	理想运算放大器	73
3.2	含有理想运算放大器的电路分析	74
3.3	实际运放应用时的考虑	77
习题 3		78
第 4 章	动态电路时域分析	81
4.1	动态电路的暂态过程及初始值	81
4.1.1	暂态过程	81
4.1.2	初始值	82
4.2	一阶电路的零输入响应	85
4.3	一阶电路的零状态响应	91
4.4	一阶电路的全响应	94
4.5	一阶电路的阶跃响应	99
4.6	二阶电路的暂态过程	101
习题 4		108
第 5 章	相量法和正弦稳态电路分析	113
5.1	正弦量	113
5.1.1	正弦量的三要素	113
5.1.2	正弦量的相位差	114
5.1.3	正弦量的有效值	115
5.2	相量法的基本概念	116
5.2.1	复数的表示方法	116
5.2.2	复数的运算	117
5.2.3	正弦量的相量表示	118
5.2.4	相量的运算规则	120
5.3	电路定律的相量形式	121
5.3.1	欧姆定律的相量形式	121
5.3.2	基尔霍夫定律的相量形式	124
5.4	阻抗与导纳	126
5.4.1	阻抗的定义	126
5.4.2	RLC 串联电路的阻抗	127
5.4.3	阻抗的串联	129
5.4.4	导纳的定义	130
5.4.5	RLC 并联电路的导纳	130
5.4.6	导纳的并联	132
5.5	正弦稳态电路的功率	133
5.5.1	RLC 串联电路的瞬时功率分析	134
5.5.2	有功功率 P (Active Power)	136
5.5.3	无功功率 Q (Reactive Power)	136
5.5.4	视在功率 S (Apparent Power)	136
5.5.5	功率因数 λ (Power Factor)	137
5.5.6	复功率 $\bar{S}$ (Complex Power)	137

5.5.7	功率、电压和阻抗三角形的关系	138
5.6	正弦稳态电路分析	139
5.6.1	相量法求解正弦稳态电路	140
5.6.2	利用相量图辅助求解正弦稳态电路	143
5.7	最大功率传输定理	144
习题 5		147
第 6 章	谐振现象与频率响应	154
6.1	网络函数和频率响应	154
6.2	RLC 串联电路的谐振	155
6.2.1	谐振参数	156
6.2.2	谐振时电流和电压的特点	156
6.2.3	谐振时的功率和能量	157
6.2.4	RLC 串联电路的频率响应	158
6.3	RLC 并联电路的谐振	162
6.4	其他谐振电路	166
6.5	滤波器简介	167
习题 6		168
第 7 章	含有耦合电感的电路	171
7.1	互感和互感电压	171
7.1.1	磁耦合现象	171
7.1.2	耦合电感上的电压	172
7.1.3	自感电压与互感电压方向的确定	173
7.2	具有耦合电感电路的计算	176
7.2.1	耦合线圈的串联	176
7.2.2	耦合线圈的并联	178
7.3	空心变压器	182
7.4	理想变压器	186
7.4.1	理想变压器模型	186
7.4.2	理想变压器原、副线圈电流和电压关系	187
7.4.3	理想变压器的功率	187
7.4.4	理想变压器的变阻抗关系	188
习题 7		189
第 8 章	三相电路	193
8.1	三相电路的基本概念	193
8.1.1	三相电源的概念	193
8.1.2	三相电源的连接	194
8.1.3	三相负载的连接	196
8.2	对称三相电路的计算	197
8.3	三相电路的功率	200
8.3.1	复功率	200
8.3.2	有功功率	200
8.3.3	无功功率	200
8.3.4	视在功率	201

8.3.5	瞬时功率	201
8.3.6	三相电路功率的测量	201
8.4	不对称三相电路的概念	203
习题 8		205
第 9 章	非正弦周期电流电路分析	207
9.1	非正弦周期电流和电压	207
9.2	周期函数分解为傅里叶级数和信号频率	208
9.2.1	周期函数的傅里叶分解	208
9.2.2	信号频谱	209
9.3	周期函数波形与傅里叶系数的关系	212
9.4	非正弦周期量的有效值和平均功率	215
9.4.1	非正弦周期量的有效值	215
9.4.2	非正弦周期量的平均功率	216
9.5	非正弦周期电流电路的稳态分析	217
9.6*	傅里叶级数的指数形式	222
9.7	傅里叶变换初步	223
9.7.1	傅里叶变换的概念	223
9.7.2	傅里叶变换的简单应用	225
习题 9		226
第 10 章	二端口网络	229
10.1	二端口网络及其方程	229
10.1.1	引例	229
10.1.2	二端口网络定义	230
10.1.3	二端口网络参数及其方程	230
10.2	二端口网络的方程及参数	231
10.2.1	Y 参数矩阵	231
10.2.2	Z 参数矩阵	234
10.2.3	T 参数矩阵	236
10.2.4	H 参数矩阵	237
10.2.5	二端口网络参数矩阵之间的关系	238
10.3	二端口网络的等效电路	239
10.3.1	二端口网络 T 形等效电路	239
10.3.2	二端口网络 Π 形等效电路	240
10.4	二端口网络的连接	241
10.4.1	二端口网络的级联	241
10.4.2	二端口网络的并联	242
10.4.3	二端口网络的串联	242
10.5	回转器和负阻抗变换器	243
10.5.1	回转器	243
10.5.2	负阻抗变换器	244
习题 10		245
习题参考答案		250
网络资源		261

第 1 章 电路基本定律和简单电阻电路

本章主要介绍电路分析的一些基本概念和基本定律。首先引入电路模型的概念，然后明确下一步电路分析中会涉及到哪些变量，电路分析的基本元件有哪些。基本概念明确后，对电路中的电流和电压关系，通过基尔霍夫电流定律 KCL 和基尔霍夫电压定律 KVL 进行约束。最后，对于等效变换的概念进行了详细的介绍。

1.1 电路和电路模型

电在现代日常生活、工农业生产、科研和国防等许多方面都有十分广泛的应用。从技术领域来看，电的应用可分为能量和信息两大领域，它们都利用了电能几乎可以瞬时传送到远处的这一性质。电力系统涉及大规模电能的产生、传输和转换，构成现代工业生产、家庭生活电气化等方面的基础。这里，能量是主要的着眼点。电能也可以以极其微小而被精确控制的形式传送，具有携带信息的能力，如日常生活的电话通信、计算机间信息的交流等。电又是控制其他形式能量最有效的手段。这里，信息是主要的着眼点，电用做信息处理和交换的媒介已成为当代社会的显著特征。

无论是作为能量传输还是信息交换的模式，实际电路多种多样，大至长距离的电力输电线，小至芯片上的集成电路。各种实际电路都是由电阻器、电容器、线圈、电源等部件 (component) 和晶体管、集成电路等器件 (device) 相互连接而成的电流通路装置。从基本功能出发，把能够输出电能或电信号的器件，例如电池、发电机和各种信号源等统称为电源 (source)；把要求输入电能或电信号的器件，如电灯、电动机和各种收信设备等统称为负载 (load)。由于电路中的电压、电流是在电源的作用下产生的，因此电源又称为激励源或激励 (excitation)；由激励而在电路中产生的电压、电流称为响应 (response)。

有些实际电路十分复杂，例如，电能的产生、输送和分配是通过发电机、变压器、输电线等完成的，它们形成了一个庞大而复杂的电路，图 1-1 为电能输送示意图。又如集成电路 (Integration Circuit, IC)，采用现代微电子技术可将若干部件、器件不可分离地制作在一起，电气上相互连接，成为一个整体。现在，集成电路的集成度越来越高，在同样大小的芯片上可容纳的部件、器件数目越来越多，可达数百万个或更多。



上述电路都是比较复杂的，但有些电路非常简单，例如日常生活中使用的手电筒电路就是一个十分简单的电路，它是由干电池、灯、开关、手电筒壳（充当连接导体）组成的，如图 1-2(a)所示。各种部、器件可以用图形符号表示，表 1-1 列举了一些我国国家标准中的电

气图形符号。采用这些符号可绘出表明各部、器件相互连接关系的电气图 (electric diagram), 手电筒电路的电气图如图 1-2(b)所示。

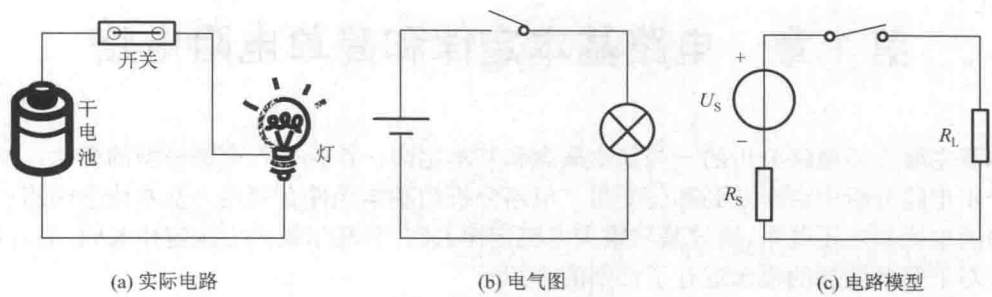


图 1-2 手电筒电路

表 1-1 部分电气图用图形符号

名称	符号	名称	符号	名称	符号
导线	—————	传声器		可变电阻器	
连接的导线		扬声器		电容器	
接地		二极管		电感器、绕组	
接机壳		稳压二极管		变压器	
开关		隧道二极管		铁心变压器	
熔断器		晶体管		直流发电机	
灯		电池		直流电动机	
电压表		电阻器			

人们设计制作某种部、器件是要利用它的某种物理性质，例如，制作一个电阻器是要利用它对电流呈现阻力的性质，然而，当电流通过时还会产生磁场，因而兼有电感的性质。其他部、器件也有类似的或更复杂的情况，这为分析电路带来困难。因此，必须在一定条件下，忽略它的次要性质，用一个足以表征其主要性能模型 (model) 来表示。把实际电路的本质特征抽象出来所形成的理想化了的电路，就是电路模型 (circuit model)，电路模型与实际电路的关系是前者只在一定程度上反映后者的本质性状。要建立电路模型，先要把最基本的电器件、部件的本质特征抽象成理想化电路元件 (circuit element)。实际电路的电路模型由理想电路元件相互连接而成，理想元件是组成电路模型的最小单元，是具有某种确定电磁性质并有精确数学定义的基本结构。在一定的工作条件下，理想电路元件及他们的组合足以模拟实际电路中部件、器件中发生的物理过程。

图 1-2(a)手电筒电路的电路模型如图 1-2(c)所示。图中电阻元件 R_L 作为小灯泡的电路模型，反映了将电能转换为热能和光能这一物理现象；干电池用电压源 U_s 和电阻元件 R_s 的串联组合作为模型，分别反映了电池内储化学能转换为电能以及电池本身耗能的物理过程；连接导线用理想导线（电阻为零）即线段表示。

今后本书所涉及电路均指由理想电路元件构成的电路模型，电路又常常称为**网络(network)**。同时将把理想化电路元件简称为电路元件。

1.2 电路分析基本变量

电路分析使我们能够得出给定电路的电性能。电路的电性能通常可以用一组表示为时间函数的变量来描述，电路分析的任务在于解得这些变量。这些变量中最常用到的便是**电流**、**电压**和**电功率**，同时对**电位**也做了介绍。

1.2.1 电流

电子和质子都是带电的粒子，电子带负电荷，质子带正电荷。所带电荷的多少称为**电荷量**，在国际单位制中，电荷量的单位是库仑（其符号为 C）， 6.24×10^{18} 个电子所具有的电荷量等于 1C。用符号 q 或 Q 表示电荷量。带电粒子有规律的运动便形成**电流**，电流有大小和方向。

每单位时间内通过导体横截面的电荷量定义为电流的大小，用符号 $i(t)$ 表示，即

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

为简便计，有时将 $i(t)$ 也写为 i 。在国际单位制中，电流的单位是安培（A），有时也取千安（ $1\text{kA}=10^3\text{A}$ ）、毫安（ $1\text{mA}=10^{-3}\text{A}$ ）、微安（ $1\mu\text{A}=10^{-6}\text{A}$ ）做单位。

习惯上把正电荷运动的方向规定为电流的实际方向。但在实际问题中，电流的实际方向可能是未知的，也可能是随时间变动的。为了解决这个问题，引入**参考方向(reference direction)**的概念，又称为电流的正方向。在电路图中，电流的参考方向可以任意指定，一般用箭头表示，也可用双下标表示，例如， i_{AB} 表示参考方向是由 A 到 B。本书统一规定：如果电流的实际方向和参考方向一致，电流为正值；如果两者相反，电流为负值，如图 1-3 所示。

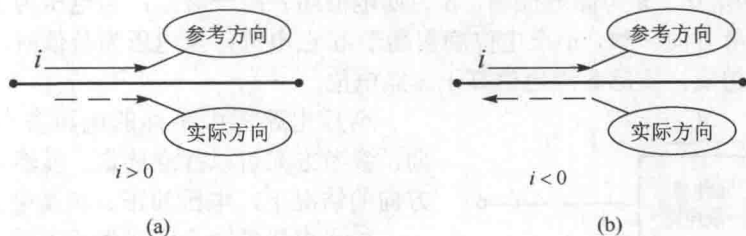


图 1-3 电流的参考方向

今后电路图中所标的电流方向都是指参考方向，并以此为准进行分析、计算。显然，在未标示参考方向的情况下，电流的正、负是毫无意义的。

如果电流的大小和方向不随时间变化，则这种电流称为**恒定电流**，简称**直流(Direct**

Current, DC), 可用符号 I 表示; 否则称为时变电流, 用符号 i 表示。若时变电流的大小和方向都随时间作周期性变化, 则称为交变电流, 简称交流 (Alternating Current, AC)。

1.2.2 电压

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 (如在被充电的电池处), 或储存在磁场中 (电感元件处) 等, 失去的能量是由电路中的电源提供的。因此, 在电路中存在着能量的流动, 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。

电压为单位正电荷从电路的一点 a 移动到另一点 b 时所获得或失去的能量, 用符号 u 表示, 即

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

其中 dq 为由 a 点转移到 b 点的电荷量, 单位为库仑 (C); dw 为转移过程中, 电荷 dq 所获得或失去的能量, 单位为焦耳 (J)。在国际单位制中, 电压的单位为伏特 (V), 有时也取千伏 ($1\text{kV}=10^3\text{V}$)、毫伏 ($1\text{mV}=10^{-3}\text{V}$) 做单位。

在分析和计算电路时还经常用到电位的概念。在电路中任选一点为参考点, 定义参考点的电位为零, 其他各点与参考点之间的电压定义为电位。电压有时也称为电位差, a 、 b 两点之间的电压为

$$u_{ab} = u_a - u_b$$

其中 u_a 为 a 点电位, u_b 为 b 点电位。如果正电荷由 a 转移到 b 获得能量, 则 a 点为低电位, b 点为高电位; 如果正电荷由 a 转移到 b 失去能量, 则 a 点为高电位, b 点为低电位。正电荷在电路中转移时电能的得或失表现为电位的升高或降落, 即电压升或电压降。

如同需要为电流规定参考方向一样, 也需要为电压规定参考方向 (即参考极性 or 正方向)。电路图中, 电压的参考方向用 “+” “-” 号表示, “+” 号表示高电位端, “-” 号表示低电位端, 如图 1-4 所示。也可用箭头表示, 箭头从高电位指向低电位。还可使用双下标表示, 如 u_{ab} 表示 a 、 b 之间的电压, a 为高电位端, b 为低电位端。统一规定: 当电压为正值时, 该电压的实际方向和参考方向一致, a 点电位确实高于 b 点电位; 当电压为负值时, 该电压的实际方向和参考方向相反, 实际 b 点电位高于 a 点电位。

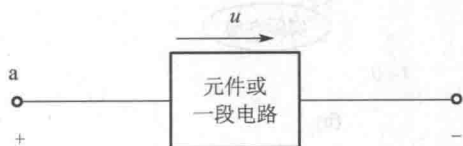


图 1-4 电压参考方向的表示

今后电路图中所标的电压方向都是指参考方向, 参考方向可以任意选定。显然, 在未标示参考方向的情况下, 电压的正、负是毫无意义的。

如果电压的大小和极性都不随时间而变动, 这样的电压就称为恒定电压或直流电压, 可用符号 U 表示。如果电压的大小和极性都随时间变化, 则称为时变电压, 用符号 u 表示, 若变化为周期性的, 则称为交流电压。

关于电位, 下面作进一步的说明。电位参考点的选择原则上是任意的, 但通常人们规定大地作为标准的零电位, 也就是说在一个包括电源、负载及连接导线的完整电路中, 如果电

路的某点与大地相连, 则电路中该点的电位为零。没有与大地相连接的电路, 参考点的选择可以是任意的。但是一个电路, 参考点只能选择一个。从电位的定义可知, 电位是一个“相对的量”, 是某点相对于参考点的物理量。参考点发生变化后, 该点的电位这个物理量, 也将发生“相对的”变化, 但两点之间的电压是确定的。在一个参考点已经选定的电路中, 高于参考点的电位为正电位, 低于参考点的电位为负电位。

根据上述特点, 电路有一种简化的习惯画法, 即电源不用图形符号表示而改为只标出其极性及其电压值。图 1-5(b)中, 2 端标出 $+u_s$, 意为电压源的正极接在 2 端, 其电压值为 u_s , 电源的负极则接在参考点 3 处, 不再标示。同理, 1 端的电位为 u_1 , 表示端子 1 和参考点 3 之间的电压为 u_1 , 1 是参考正极性, 3 是参考负极性。

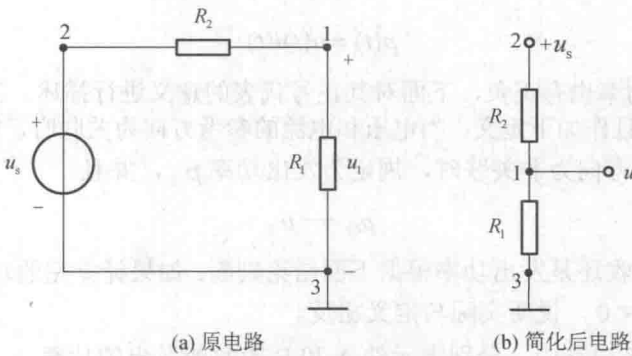


图 1-5 电路的习惯表示形式

注意: 在介绍完电流和电压后, 还会用到信号的概念。“信号”(signal)是指用来携带信息的电流或电压, 例如音频信号电压。供电网提供的电压、电流则不能看成是信号, 因为此时的电压、电流是用来提供电能, 进行能量变换的。

1.2.3 关联、非关联方向

由前面叙述知, 在电路分析时, 既要为元件或电路的电流假设参考方向, 也要为它们标注电压的参考极性, 二者是可以独立无关的任意假定的。但为了下一步分析问题的方便, 引入关联参考方向和非关联方向的概念。当电流参考方向是从电压参考方向的正极流入负极流出时, 称为电压和电流的参考方向是关联的 (associated); 反之称为非关联的 (no-associated), 如图 1-6 所示。

图中 N 代表元件或电路的一个部分, 并且所谓关联还是非关联一定是对某一个元件或电路而言的。如图 1-7 所示, 电压 u 、电流 i 的参考方向对 A 是非关联的, 对 B 就是关联的。

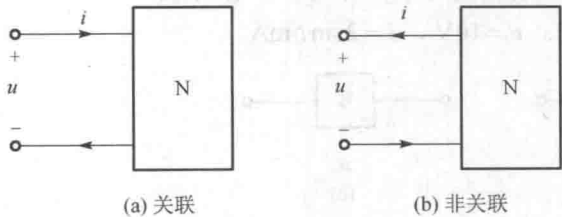


图 1-6 电压电流参考方向

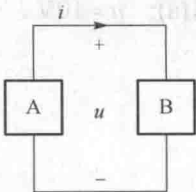


图 1-7 关联元件的针对性

1.2.4 电功率

电路中存在能量的流动, 某一段电路吸收或提供(发出)能量的速率即为功率, 用符号 p 表示。假设在 dt 时间内电荷 dq 从 a 点移动到 b 点所获得或失去的能量为 dw , 则功率为

$$p(t) = \frac{dw}{dt}$$

由式 (1-2) 知, $dw = u(t)dq$; 由式 (1-1) 知, $dq = i(t)dt$

故

$$p(t) = \frac{dw}{dt} = u(t) \frac{dq}{dt} = u(t)i(t)$$

即

$$p(t) = u(t)i(t) \quad (1-3)$$

从式 (1-3) 知功率也有正负, 下面对其正号代表的意义进行描述。工程上常常用吸收或发出来描述功率, 并且作如下定义: 当电压和电流的参考方向为关联时, 规定为吸收功率 $p_{\text{吸}}$; 当电压和电流的参考方向为非关联时, 规定为发出功率 $p_{\text{发}}$, 并且

$$P_{\text{吸}} = -P_{\text{发}}$$

实际上到底是吸收还是发出功率根据下面结论判断: 如果计算完的功率 $p > 0$, 说明实际与定义一致; 如果 $p < 0$, 说明实际与定义相反。

例 1-1 在图 1-8 电路中, 分别求元件 A 和 B 吸收或发出的功率。

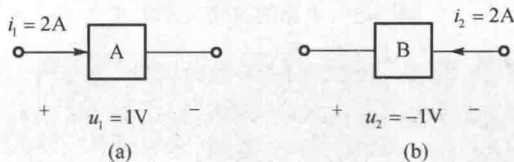


图 1-8 例 1-1

解 (a) u_1 和 i_1 的参考方向是关联的, 故

$$P_{\text{吸}} = u_1 i_1 = (1\text{V})(2\text{A}) = 2\text{W}$$

因为 $p_{\text{吸}} > 0$, 实际上 A 确实吸收功率 2W。

(b) u_2 和 i_2 的参考方向是非关联的, 故

$$P_{\text{发}} = u_2 i_2 = (-1\text{V})(2\text{A}) = -2\text{W}$$

因为 $p_{\text{发}} < 0$, 实际上 B 吸收功率 2W。

思考: 在图 1-9 中, 各元件吸收或发出的功率, 其电压、电流为:

图(a): $u = 10\text{V}$, $i = 5e^{-2t}\text{mA}$; 图(b): $u = 10\text{V}$, $i = 2\sin t\text{mA}$

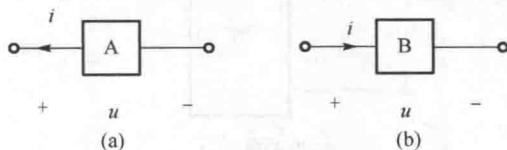


图 1-9

(a 发出 $50e^{-2t}\text{mW}$; b $20\sin t\text{mW}$, $P > 0$ 吸收、 $P < 0$ 发出)

1.3 电路分析基本元件

电路元件是电路模型中最基本的组成单元，它通过端子与外部连接，根据端子的不同可分为二端、三端、四端元件等。

电路元件的特性是通过与端子有关的电路物理量来描述，反映一种确定的电磁性质，例如：电阻元件的元件特性是电压与电流的代数关系 $u = f(i)$ ；电容元件的元件特性是电荷与电压的代数关系 $q = h(u)$ ；电感元件的元件特性是磁链与电流的代数关系 $\psi = g(i)$ 。如果表征元件特性的代数关系是一个线性关系，则该元件称为线性元件。如果表征元件特性的代数关系是一个非线性关系，则该元件称为非线性元件。

当实际电路的尺寸远小于使用时其最高工作频率所对应的波长时，对应电路称为实际电路的集总电路模型或简称为集总电路。集总电路中的元件称为集总参数元件，在元件外部不存在任何电场与磁场。在集总电路中，任何时刻，流入二端元件的一个端子的电流一定等于从另一个端子流出的电流，且两个端子之间的电压为单值量。当电路的尺寸大于最高频率所对应的波长或两者属于同一数量级时，便不能作为集总电路处理，应作为分布参数电路处理，电路中的元件称为分布参数元件。这在将来的相关课程中会详细介绍，本书只讨论集总电路的分析。

电路元件还可分为时不变元件和时变元件，如果元件参数是时间 t 的函数，对应的元件叫做时变元件；否则叫做时不变元件。此外，还可分为有源元件和无源元件，需要电源才能显示其特性的就是有源元件，而不用电源就能显示其特性的就叫做无源元件。

1.3.1 电阻元件

实际中用到的电阻器、白炽灯、电炉子等在一定条件下可以用线性电阻元件作为其模型。线性电阻元件是这样的二端理想元件，在任何时刻它两端的电压和电流关系（Voltage Current Relation, VCR）都符合欧姆定律，如图 1-10 所示。

$$u = Ri \quad (\text{关联方向}) \quad \text{或} \quad u = -Ri \quad (\text{非关联方向}) \quad (1-4)$$

其中 R 为电阻元件的参数，单位为欧姆 (Ω)。此外 R 也可以表示一个电阻元件。

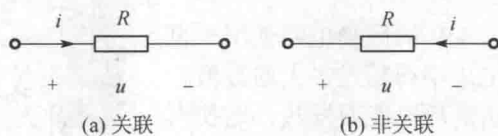


图 1-10 电阻元件

如果在直角坐标系中画出电压和电流的关系曲线，则这条曲线叫做电阻元件的伏安特性曲线，如图 1-11 所示。显然，线性电阻元件的伏安特性是一条经过坐标原点的直线，电阻值可由直线的斜率来确定。

电阻元件也可以用另一个参数——电导（conductance）来表示，电导用符号 G 表示，其定义为

$$G = \frac{1}{R}$$

在国际单位制中电导的单位是西门子，简称西（符号为 S）。用电导表示线性电阻元件时，欧姆定律为

$$i = Gu \text{ (关联方向) 或 } i = -Gu \text{ (非关联方向)} \quad (1-5)$$

非线性电阻的电阻值随着电压或电流的大小甚至方向而改变，不是常数。任何一个二端器件或装置，只要从端钮上看，能满足电阻元件的定义都可看成是电阻元件，不论其内部结构和物理过程如何，例如二极管，它是一个非线性电阻，其伏安特性如图 1-12 所示。

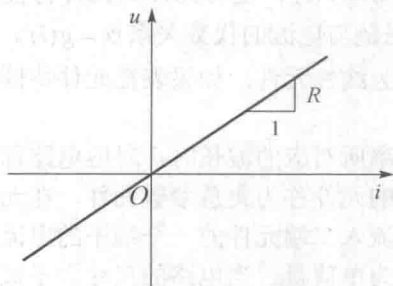


图 1-11 线性电阻的伏安特性曲线

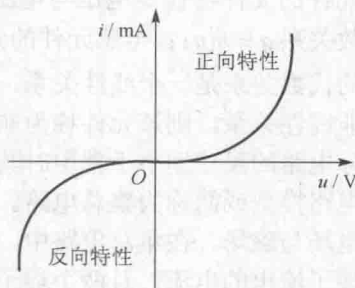


图 1-12 二极管的伏安特性曲线

当一个线性电阻元件的端电压不论为何值时，流过它的电流恒为零值，就把它称为“开路”，它相当于 $R = \infty$ 或 $G = 0$ 。当流过一个线性电阻元件的电流不论为何值时，它的端电压恒为零值，就称它为“短路”，它相当于 $R = 0$ 或 $G = \infty$ 。

对图 1-10(a)所示电路，根据功率的定义，电阻吸收的功率为

$$p = ui = Ri^2 = \frac{u^2}{R} \quad \text{或} \quad p = Gu^2 = \frac{i^2}{G} \quad (1-6)$$

正常情况下， R 和 G 是正实常数，故功率 p 恒为非负值。电阻是一种耗能元件，把吸收的电能转换成热能或其他形式的能量。一些有代表性的电阻如图 1-13 所示。

注意： $R < 0$ 为负电阻元件或负电阻，是一个发出电能的元件。如果要获得这种元件，需要专门设计。

例 1-2 有一个 100Ω 、 $1W$ 的碳膜电阻使用于直流电路，问在使用时电流、电压不得超过多大的数值？

解 电流流过电阻必然消耗电能而发热，这使人们能够利用电能来加热、发光，制成电灯、电烙铁、电炉等电阻器。但实际的电阻器以及电动机、变压器（它们都要用导线来制作，具有一定的电阻）等，本来不是为发热而设计的，但都因有电阻存在，不可避免地要发热，这是一种无谓的电能损失。如果在使用时，电流过大，温度过高，设备还会被烧坏。为了保证正常工作，制造工厂在电器的铭牌上都要标出它们的电压、电流或功率的限额，称为额定值，作为使用时的根据。电子电路中常用的线绕电阻与碳膜电阻不仅要标明电阻值，还要标明额定功率。市售的碳膜、金属膜电阻通常分为 $\frac{1}{8}W$ 、 $\frac{1}{4}W$ 、 $\frac{1}{2}W$ 、 $1W$ 及 $2W$ 。功率损耗较大时可用绕线电阻。本题解答如下：

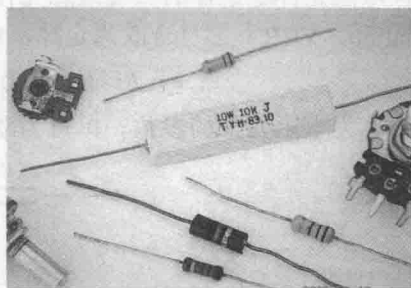


图 1-13 一些有代表性的电阻