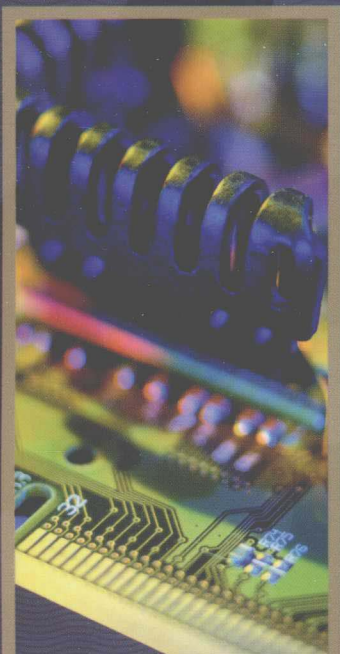


► 高等学校教材

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



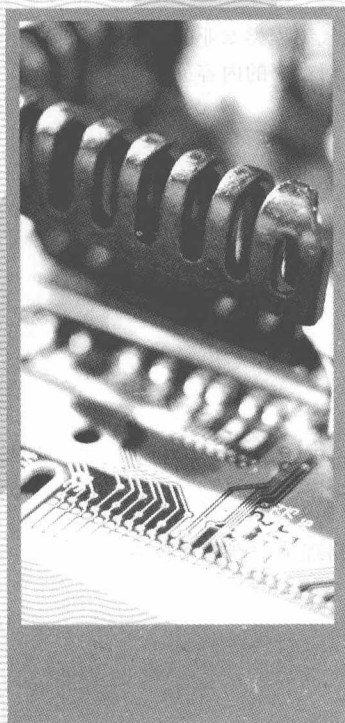
电工技术基础 与工程应用 · 电路理论

■ 戚新波 主 编
■ 姚 娟 马临超 副主编



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

► 高等学校教材



电工技术基础 与工程应用 · 电路理论

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书根据高等院校电子/电气相关专业“十二五”规划教材建设的精神和教学的需要,以职业岗位群的基本知识和核心技能为出发点,本着理论以“必需、够用”为度,突出应用性、综合性和先进性,同时引入仿真,通过大量反映生产实际的例子对其进行仿真,培养学生选择、设计和调试电路的能力,增强工程意识。

全书主要内容包括电路及其分析方法、线性电路的暂态分析、正弦交流电路的分析与应用、三相电路、EDA 技能训练、磁路与变压器等知识。

本书可用做高等院校相关专业学生教材,也可供电子、电气工程类专业的工程技术人员参考使用。在教学过程中,可以根据不同专业的不同要求对本书的内容进行自由组合。

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

电工技术基础与工程应用·电路理论/戚新波主编. —北京:电子工业出版社,2011.3
ISBN 978-7-121-12903-2

I. ①电… II. ①戚… III. ①电工技术-高等学校-教材②电路理论-高等学校-教材 IV. ①TM

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 019181 号

策划编辑:张 剑

责任编辑:毕军志

印 刷:北京京师印务有限公司

装 订:

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:787×1092 1/16 印张:11 字数:251.4 千字

印 次:2011 年 3 月第 1 次印刷

印 数:4 000 册 定价:19.00 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 zlls@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

本书编者为长期从事高等职业教育的教师和生产一线的工程技术人员，本教材以职业岗位群的基本知识和核心技能为出发点，本着理论以“必需、够用”为度，在注重基本理论、基本概念、基本分析方法的基础上，突出应用性、综合性和先进性，同时引入仿真，通过大量反映生产实际的例子对其进行仿真，培养学生选择、设计和调试电路的能力，增强工程意识。

本书由戚新波任主编，姚娟、马临超任副主编。河南机电高等专科学校马临超编写第1章、第2章和第3章的第1节至第4节；河南机电高等专科学校戚新波编写第3章的第5节至第10节、第4章和第5章的第1节和第2节；河南机电高等专科学校姚娟编写第5章第3节至第6节和第6章，各章编写后由戚新波教授统稿。

本书中的选学内容（标以“*”号）是指加深加宽内容，供学有余力的学生阅读，可在教师指导下让学生通过自学掌握，不必全在课堂讲授。

本书在编写过程中，曾得到河南省电力公司和河南机电高等专科学校其他同行们的支持和帮助，在此一并致谢。

由于编者水平有限，书中错误和不妥之处在所难免，恳请读者批评、指正。

编者
2010.11

目 录

第 1 章 电路及其分析方法	1
1.1 电路的基本概念与电源状态	1
1.1.1 电路及电路模型	1
1.1.2 电路的基本物理量与电路元件	3
1.1.3 电源状态	12
1.2 基尔霍夫定律及应用	14
1.2.1 基尔霍夫电流定律	15
1.2.2 基尔霍夫电压定律	16
1.3 电路的基本分析	17
1.3.1 电路的等效变换	17
1.3.2 电路的基本分析方法	26
1.4 非线性电阻电路的分析	30
1.4.1 非线性电阻的阻值	30
1.4.2 图解法	31
小结	32
习题 1	34
第 2 章 线性电路的暂态分析	37
2.1 换路定理和初始条件的计算	37
2.2 一阶电路的零输入响应	39
2.2.1 RC 电路的零输入响应	39
2.2.2 RL 电路的零输入响应	43
2.3 一阶电路的零状态响应	44
2.3.1 RC 电路在直流激励下的零状态响应	45
2.3.2 RL 电路在直流激励下的零状态响应	47
2.4 一阶电路的全响应	49
2.5 一阶线性电路暂态分析的三要素法	52
小结	53
习题 2	54
第 3 章 正弦交流电路的分析及应用	59
3.1 正弦交流电的基本概念	59
3.1.1 正弦交流电量的参考方向	59

3.1.2	正弦量的三要素	60
3.1.3	正弦交流量的有效值	62
3.2	正弦交流电的表示法	62
3.2.1	正弦交流的相量表示法	62
3.2.2	正弦量的复数表示法	64
3.2.3	正弦量的相量表示	66
3.3	单一参数的正弦交流电路	66
3.3.1	电阻元件的交流电路	66
3.3.2	电感元件的交流电路	68
3.3.3	电容元件的交流电路	71
3.4	电阻、电感、电容元件串联的交流电路	73
3.5	电阻、电感、电容元件并联的交流电路	76
3.5.1	电压、电流的关系	76
3.5.2	导纳	76
3.5.3	相量图	77
3.6	阻抗的串联和并联	78
3.6.1	阻抗的串联	78
3.6.2	阻抗的并联	79
3.7	几种实际电气器件的电路模型	81
3.8	正弦交流电路中的谐振	82
3.8.1	串联谐振	83
3.8.2	并联谐振	85
3.9	正弦交流电路的功率	87
3.9.1	瞬时功率	87
3.9.2	有功功率	88
3.9.3	无功功率	88
3.9.4	视在功率	89
3.9.5	功率因数的意义	91
*3.10	非正弦交流电及谐波分析	93
3.10.1	非正弦周期量的分解	94
3.10.2	正弦周期量的最大值、平均值和有效值	95
3.10.3	非正弦周期电流电路的计算	96
小结		98
习题3		99
第4章	三相电路	103
4.1	三相电源及其连接方式	103
4.2	三相发电机绕组的连接方式	105
4.2.1	星形连接	105
4.2.2	三角形连接	106

4.3	三相负载及连接方式	107
4.3.1	三相负载的星形连接	107
4.3.2	三相负载的三角形连接	109
4.4	三相电路的分析	111
4.4.1	对称负载	111
4.4.2	不对称负载	111
4.4.3	三相电的功率	114
	小结	116
	习题4	116
第5章 EDA 技能训练——Electronics Workbench 操作入门		118
5.1	软件简介	118
5.2	Electronics Workbench 软件界面	119
5.2.1	主窗口	119
5.2.2	电路元器件库	120
5.3	Electronics Workbench 基本操作方法介绍	121
5.3.1	创建电路	121
5.3.2	使用仪器	122
5.3.3	元器件库中的常用元件	124
5.3.4	元器件库和元器件的创建与删除	125
5.3.5	子电路的生成与使用	125
5.3.6	帮助功能的使用	126
5.3.7	基本分析方法	126
5.4	Electronics Workbench 电路理论仿真初级操作实训	126
5.4.1	用虚拟工作台仿真电路的步骤	126
5.4.2	仿真实例1: RC 低通滤波器电路的仿真	127
5.4.3	仿真实例2: 共发射极单级放大电路的仿真	128
5.4.4	电路的描述	130
5.4.5	实验结果的输出	130
5.5	SPICE 方式分析电路	130
5.6	Electronics Workbench 电路理论仿真高级操作实训	133
5.6.1	直流电路的仿真	133
5.6.2	正弦交流电路的仿真	135
5.6.3	非正弦交流电路的仿真	137
5.6.4	暂态电路的仿真	138
5.6.5	运算放大器电路的仿真举例	141
5.6.6	二端口网络的仿真举例	142
	小结	142
	习题5	143

第 6 章	磁路与变压器	145
6.1	磁路及其分析方法	145
6.1.1	磁场的基本物理量	145
6.1.2	铁磁性物质的磁性能	147
6.1.3	铁磁性物质的分类和用途	149
6.1.4	磁路的分析方法	149
6.2	交流铁芯线圈电路	150
6.2.1	电磁关系	150
6.2.2	功率损耗	152
6.2.3	交流铁芯线圈的等效电路	153
6.3	变压器	153
6.3.1	变压器的工作原理	153
6.3.2	变压器的外特性	158
6.3.3	变压器的损耗与效率	159
6.3.4	特殊变压器	159
6.3.5	变压器绕组的极性	161
6.4	电磁铁	161
	小结	164
	习题 6	166



第 1 章 电路及其分析方法

电路的基本定律和分析方法,是学习电子电路、电动机理论、电气控制和信息技术等知识的理论基础。本章主要介绍电路及其模型,电路元件的概念,电压、电流参考方向的概念,电源及其互换,基尔霍夫定律、叠加定理、戴维南定理等电路的基本概念及电路的主要分析方法。

1.1 电路的基本概念与电源状态

1.1.1 电路及电路模型

电路就是电流通过的路径,主要用来实现电能的传输、变换及信号的传递和处理等功能。电路有时也称为电网络。人们在工作和生活中会遇到很多实际电路,例如,手电筒电路、照明电路、电动机控制电路、电视机电路,等等。电路是为了完成某种预期目的,由电源、负载、电源至负载的中间环节三个基本部分相互连接而成的电流通路装置。

如图 1-1 所示为一个简单的实际电路,这是一个由干电池、灯泡、开关及连接导线组成的手电筒电路。

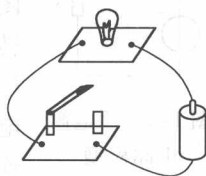


图 1-1 手电筒电路示意图

在图 1-1 中,干电池作为电源向电路提供电能;灯泡作为负载,是电路中消耗电能的设备;连接导线、开关作为中间环节,其作用是输送、分配电能和对信号进行处理。由于电路中产生的电压、电流是在电源的作用下产生的,因此电源有时又称为激励源或激励;由激励而在电路中产生的电压、电流称为响应。有时,根据激励与响应之间的因果关系,把激励称为输入,响应称为输出。

根据电路的运行条件,有的可以按集总参数电路来处理,有的则必须按分布参数电路来处理。集总参数电路的观点和理论认为:电路中的电磁量,如电流和电压等,只是时间的函数,因而描述电路的方程是常微分方程(对电阻性电路,是实数代数方程)。分布参数电路的观点和理论认为:电路中的电磁量是时间和空间坐标的函数,因而描述电路的方程是偏微分方程。集总参数元件假定:在任何时刻,流入二端元件的一个端子的电流一定等于从另一端流出的电流,两个端子之间的电压为单量值。由集总参数元件构成的电路即为集总参数电路。本书只讨论集总参数电路。

用集总参数电路的观点分析研究电路时,认为电路中的一些电磁现象



或电磁过程，例如，电能的消耗、电场能量与磁场能量的储存或释放等，只存在于电路中的某些部件上，并且都能用相应的电路元件（集总参数元件）表示在电路图中。电路的几何尺寸和空间位置是无要紧要的，在不改变电路各部分相互连接关系的前提下，可以将电路图画成看起来最习惯或最便于分析计算的形式。

有些实际电路十分复杂，组成电路的实际器件或设备各式各样，种类繁多，但它们在工作过程中都与电磁现象有关，我们必须在一定的条件下对实际器件加以理想化，忽略它的次要性质，用一个足以表征其主要性质的模型来表示，这样实际器件的模型可由一种理想电路元件或由几种理想元件组合构成，即电路模型。

所谓理想元件，简单地说就是只具有一种物理性质的抽象元件，是组成电路模型的最小单元。例如，只存在对电流呈现阻力即消耗电能发热，而无任何其他性质的元件称为理想电阻元件，简称电阻元件。例如，像灯泡、电阻器等实际器件一般就可用电阻元件代替。同样，只有储存电场能量性质，而无任何其他性质的元件称为电容元件；只有储存磁场能量性质，而无任何其他性质的元件称为电感元件；只有提供电能性质，而无任何其他性质的元件称为理想电源，等等。在电路模型中各理想元件的端子是用“理想导线”连接起来的。根据元件对外端子的数目，理想电路元件可分为二端、三端、四端元件等。

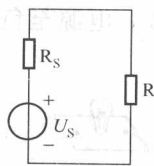


图 1-2 手电筒电路模型

有了理想元件和电路模型的概念以后，图 1-1 所示的手电筒实际电路可以用图 1-2 所示的电路模型等效。图中的电阻元件 R 作为灯泡的电路模型，反映了将电能转换为热能或光能这一物理现象；干电池采用理想电压源 U_s 和电阻元件 R_s 的串联组合作为电路模型，分别反映了电池内储化学能转换为电能及电池本身耗能的物理性质。连接导线用理想导线（其电阻设为零）或线段表示。

用理想电路元件或它们的组合模拟实际器件就是建立其模型，简称建模。建模时必须考虑其实际工作条件，并按不同准确度的要求把给定工作情况下的主要物理现象和功能反映出来。例如，一个线圈的建模：在直流情况下，它在电路中仅反映为导线内电流引起的能量消耗，因此，它的模型就是一个电阻元件；在电流变化的情况下，线圈电流产生的磁场会引起感应电压，故电路模型除电阻元件还应包含一个与之串联的电感元件；当电流变化较快时（包括高频交流），则还应考虑线圈导体表面的电荷作用，即电容效应。所以其模型中还需要包含电容元件。可见，在不同的工作条件下，同一实际器件可能采用不同的模型。模型取得恰当，对电路进行分析计算的结果就与实际情况接近；模型取得不恰当，则会造成很大误差甚至导致错误的结果。如果模型取得太复杂则会造成分析困难，取得太简单则可能无法反映真实的物理现象。

今后本书所涉及的电路均指由理想电路元件构成的电路模型。同时将理想电路元件简称为电路元件。



1.1.2 电路的基本物理量与电路元件

电路元件是电路中最基本的组成单元,按其与外部连接的端子数目可分为二端、三端、四端元件等。元件的特性通过与端子有关的电路物理量描述,电路理论中涉及的物理量主要有电流、电压、电动势、功率、电荷和磁通,在进行电路的分析和计算时,需要知道电压和电流的方向。关于电压和电流的方向,有实际方向和参考方向之分,要加以区别。

根据不同的元件特性可把电路元件分为线性与非线性元件,时不变元件和时变元件,无源元件和有源元件,等等。

1. 电路的基本物理量

1) 电流

电荷在电场作用下的运动形成电流。在金属导体中电荷是自由电子,在电解液中电荷是正、负离子,在半导体中电荷是自由电子和空穴。

电流的大小用电流强度来衡量,它在数值上等于单位时间内通过某一截面 S (见图 1-3) 的电量的代数和,习惯上以正电荷移动的方向定义为电流的实际方向。设在极短时间 dt 内,穿过导体某一截面 S 的电量代数和为 dq , 则电流强度可表示为

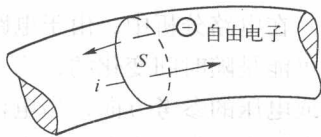


图 1-3 自由电子定向运动

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

式 (1-1) 说明, 电流强度是电荷对时间的变化率。

大小和方向都不随时间变化的电流称为直流 (—或 DC), 用大写字母 I 表示为 $I = \frac{q}{t}$ 。如果电流的大小和方向都随时间周期性变化的称为交流 (～

或 AC), 用小写字母 i 表示为 $i = \frac{dq}{dt}$ 。

电流强度通常简称为电流。这样“电流”一词不仅代表一种物理现象,也代表一个物理量。在国际单位制 (SI) 中,电量的单位是库仑 (C),时间的单位是秒 (s),电流的单位为安培 (A),简称安。电流的单位还有千安 (kA),毫安 (mA) 和微安 (μA),它们之间的换算关系是:

$$1\text{kA} = 10^3\text{A} \quad 1\text{mA} = 10^{-3}\text{A} \quad 1\mu\text{A} = 10^{-6}\text{A}$$

2) 电压

电压的定义是: 电场力把单位正电荷从 a 点 (高电位点) 移到 b 点 (低电位点) 所做的功, 就称为 ab 两点之间的电压, 用 u 表示, 即

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

式中, w 是电场力把正电荷从 a 点移到 b 点所做的功, 表明正电荷由 a 点移到 b 点所失去的电能; q 是被移动正电荷的电量; u 是电路中 ab 两点之间



的电压。

在国际单位制中,电能的单位是焦耳(J),电量的单位是库仑(C),则电压的单位是伏特(V)。电压的单位还有千伏(kV),毫伏(mV)和微伏(μV),它们之间的换算关系为

$$1\text{kV} = 10^3\text{V} \quad 1\text{mV} = 10^{-3}\text{V} \quad 1\mu\text{V} = 10^{-6}\text{V}$$

电路中 ab 两点之间的电压也称为 ab 两点之间的电位差,即

$$u_{ab} = u_a - u_b \quad (1-3)$$

式中, u_a 为 a 点的电位; u_b 为 b 点的电位。

按电压随时间变化的情况,电压也可分为恒定电压和交流电压。我们把大小和极性都不随时间变化的电压,称为直流电压,用大写字母 U 表示;把大小和极性都随时间周期性变化的电压称为交变电压,用小写字母 u 表示。

必须指出,在确定电路中某点电位时,必须首先选择参考点,而当参考点选择不同时,电路中各点的电位随之改变,但任意两点之间的电压将始终不变。

3) 电流和电压的参考方向

在电路分析中,由于电路元件的电流或电压的实际方向可能是未知的,也可能是随时间变化的,为了方便电路分析,任意假定某一个方向作为电流或电压的参考方向,当电流或电压的实际方向与参考方向一致时,电流或电压为正值,当电流或电压的实际方向与参考方向相反时,电流或电压为负值。

如图 1-4 所示,表示一个电路的一部分,其中的长方框表示一个二端元件。流过这个元件的电流为 i ,其实际方向可能是由 A 到 B,或是由 B 到 A。在该图中用实线箭头表示电流的参考方向,用虚线箭头表示电流的实际方向。指定参考方向后电流变为代数量。如图 1-4 (a) 中所示,电流 i 的实际方向与参考方向一致,故电流为正值,即 $i > 0$ 。在图 1-4 (b) 中,电流 i 的实际方向与指定的电流参考方向不一致,故电流为负值,即 $i < 0$ 。这样,在指定的电流参考方向下,电流值的正和负就可以反映出电流的实际方向。另一方面,只有规定了参考方向以后,才能写出随时间变化的电流的函数式。电流的参考方向可以任意指定,一般用箭头表示,也可以用双下标表示,例如, i_{AB} 表示参考方向是由 A 到 B。

同理,对电路两点之间的电压也可指定参考方向或参考极性。在表达两点之间的电压时,用正极性 (+) 表示高电位,负极性 (-) 表示低电位,而正极指向负极的方向就是电压的参考方向。指定电压的参考方向后,电压就变成了一个代数量,在图 1-5 中,电压 u 的参考方向是由 A 指向 B,也就是假定 A 点的电位比 B 点的电位高;如果 A 点的电位确实高于 B 点的电位,即电压的实际方向是由 A 到 B,两者的方向一致,则 $u > 0$ 。若实际电位是 B 点高于 A 点,则 $u < 0$ 。有时为了方便,也可用一个箭头表示电压的参考方向。还可以用双下标来表示电压,如 u_{AB} 表示 A 与 B 之间的电压,其参考方向为 A 指向 B。

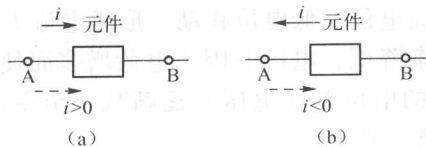


图 1-4 电流的参考方向

在求解电路时，必须在电路图中标出各电流、电压的参考方向，并以此为准进行分析计算，最后根据计算的结果结合图中的参考方向来确定电流、电压的真实方向。需要特别指出，在未标出参考方向的前提下，谈论电流、电压的正负是没有意义的，故必须养成在分析电路时先标出参考方向的习惯。

一个元件的电流或电压的参考方向可以独立地任意指定。如图 1-6 (a) 中，如果指定流过元件的电流的参考方向是从电压正极指向负极，即两者的参考方向一致，则把电流和电压的这种参考方向称为关联参考方向；当两者不一致时，称为非关联参考方向。在图 1-6 (b) 中，N 表示电路的一个部分，它有两个端子与外电路连接，电流 i 的参考方向自电压 u 的正极流入电路，从负极流出，两者的参考方向一致，为关联参考方向；图 1-6 (c) 所示电流和电压的参考方向是非关联参考方向。

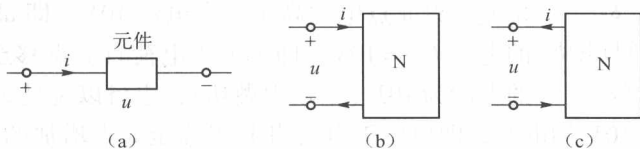


图 1-6 关联与非关联参考方向

需要指出，无论讨论关联参考方向，还是非关联参考方向，均指同一个元件的端电压和流过该元件的电流之间的关系。

4) 电动势

要使电路中通过持续电流，需要有两个基本条件：一个是电路要构成闭合回路；另一个是电路中要有电源。电源把其他形式的能转化为电能，电源内部在“外力”作用下移动单位正电荷所做的功称为电源的电动势，用 E 表示。

所谓“外力”，即为电源产生的一种电源力。在电池中，电源力是指电极和电解液发生化学反应时所产生的化学力，在发电机中指电磁感应所产生的电磁力。电源力移送电荷的过程就是电源把其他形式的能量转变为电能的过程，即电源力对电荷做功的过程。不同的电源产生的电源力的大小不同，即对电荷做功的能力也不同。

如在图 1-7 中 a 和 b 是电源的两个电极，a 极带正电荷，b 极带负电荷，则在 ab 两电极之间就产生电场，电场内就存在电压 U_{ab} ，

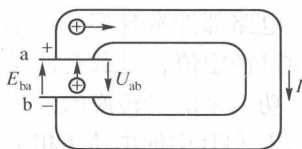


图 1-7 电源的电压和电动势



表示电源的“端电压”。 U_{ab} 使正电荷从高电位向低电位移动，形成电流 I 。这样，电极 a 因正电荷减少而使电位逐渐降低，电极 b 因正电荷增多而使电位逐渐升高，其结果是 a 和 b 两电极的电位差（电压）逐渐减小至零，与此同时连接导体中的电流 I 也相应地减小至零。

为了维持导体中不断有电流通过并保持恒定，则必须使 ab 之间的电压 U_{ab} 保持恒定，就要使电极 b 上所增加的正电荷送回电极 a。但由于电场力的作用，电极 b 上的正电荷不能逆电场而上，因此，必须有另一种能克服电场力的外力（即电源的电源力）才能使电极 b 上的正电荷送回电极 a。衡量电源力对正电荷做功能力大小的物理量即为电动势 E_{ba} 。 E_{ba} 在数值上等于电源力把单位正电荷从电源的低电位端 b 经电源内部移到高电位端 a 所做的功，也就是单位正电荷从 b 点（低电位）移到 a 点（高电位）所获得的电能。这就说明在电源力的作用下，电源不断地把其他形式的能量转换为电能。

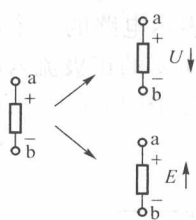


图 1-8 电压与电动势对外端

显然，电动势与电压在意义上是两个不同的物理量。因此，我们规定电压从高电位到低电位为正，而电动势则规定从低电位到高电位为正。但在电路图上，它们都呈现为对外两端点之间有电位差，在这个意义上是相同的。如图 1-8 所示，各图中两点 ab 之间有电位差，设 a 点电位高于 b 点电位 10V，即 ab 两点之间的电压 $U_{ab} = 10V$ ，即单位正电荷自 a 点移至 b 点消耗的电能 10J（电场力做功）；也可以说是 ab 之间接有电动势 $E_{ba} = 10V$ 的电源，即单位正电荷自 b 点移至 a 点增加的电能 10J（外力做功），这对外电路呈现的电位差分析是没有影响的，因为它们对外电路都呈现同一的电现象，即 a 点电位高于 b 点电位 10V。

这样，在数学表达式中有

$$U_{ab} = -E_{ab}$$

$$E_{ab} = -E_{ba}$$

$$U_{ab} = -E_{ab} = E_{ba}$$

因此，在电路分析中，我们往往把电动势当做电压来处理，从而可以减少分析中的电路变量。

在国际单位制（SI）中，电动势的单位为 V（伏特，简称伏）。

5) 电功率

在电路的分析和计算中，功率的计算是十分重要的。这是因为电路在工作状况下总伴随有电能与其他形式能量的相互交换；另一方面，电气设备、电路部件本身都有功率的限制，在使用时要注意其电流值或电压值是否超过额定值，过载会使设备或部件损坏，或不能正常工作。

功率是能量转换的速率，电路中任何元件的功率 P ，都可用元件的端电压 U 和其中的电流 I 相乘求得。

不过，在写表达式求解功率时，要注意 U 与 I 的参考方向是否一致。

若 U 与 I 的参考方向一致，则 $P = UI$ (1-4)



若 U 与 I 的参考方向相反, 则 $P = -UI$ (1-5)

另外, U 和 I 的值还有正负之分。当把 U 和 I 的值代入上列两式去计算后, 所得的功率也会有正负的不同。功率的正负表示了元件在电路中的作用不同。若功率为正值, 则表明该元件在电路中是负载, 将电能转换成了其他的能量, 电流流过该元件时是电场力做功; 若功率是负值时, 则表明该元件在电路中是电源, 将其他形式的能量转换成电能, 电流流过该元件时是电源力做功。

在图 1-9 中, 已知某元件两端的电压 u 为 5V, A 点电位高于 B 点电位, 电流 i 的实际方向为自 A 点到 B 点, 其值为 2A。在图 1-9 (a)

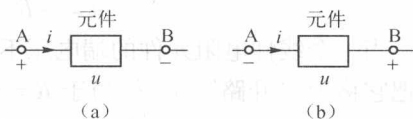


图 1-9 元件的功率

中 u 和 i 为关联参考方向, u, i 表示瞬时电压和电流, 瞬时功率 $p = 5 \times 2 = 10\text{W}$, 为正值, 此元件吸收的功率为 10W。如果指定的 u 和 i 的参考方向为非关联参考方向, 如图 1-9 (b) 所示, 则此时 $u = -5\text{V}, i = 2\text{A}$, 瞬时功率 $p = -ui = -(-5) \times 2 = 10\text{W}$, 所以此元件还是吸收了 10W 的功率, 与图 1-9 (a) 求得的结果一致。

在同一个电路中, 发出的功率和吸收的功率在数值上是相等的, 这就是电路的功率平衡。

在国际单位中, 功率的单位是瓦特 (焦耳/秒), 简称“瓦”, 用大写字母“W”表示, 还有千瓦 (kW)、毫瓦 (mW) 等单位。它们的换算关系如下。

$$1\text{kW} = 10^3\text{W} = 10^6\text{mW}$$

2. 电路元件

由前面所述, 电路元件可分为无源二端理想元件和有源理想二端元件, 下面将讨论的无源二端理想元件有线性电阻元件、线性电容元件、线性电感元件, 有源理想二端元件有电压源和电流源。

1) 无源二端元件

(1) 电阻元件。电阻是表征电路中电能消耗的理想元件。例如, 电阻器、灯泡、电炉等在只考虑它的热效应而忽略它的磁效应时, 可以用理想电阻元件作为其模型。理想电阻元件在电压和电流取关联参考方向时, 在任何时刻它两端的电压和电流服从欧姆定律:

$$u = Ri \quad (1-6)$$

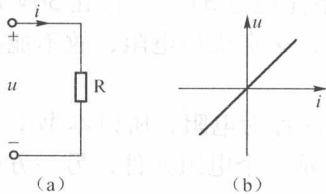


图 1-10 线性电阻元件的图形符号及伏安特性曲线

线性电阻元件的图形符号如图 1-10 (a) 所示。式 (1-6) 中 R 为电阻元件的参数, 称为元件的电阻。 R 是一个正实常数。当电压单位用 V, 电流单位用 A 时, 电阻的单位为 Ω (欧姆, 简称欧)。

由于电压和电流的单位是伏和安, 因此电阻元件的特性称为伏安特性, 如



图 1-10 (b) 所示, 它是通过原点的一条线。直线的斜率与元件的电阻 R 有关。

电阻的倒数称为电导, 即 $G = \frac{1}{R}$, 这时式 (1-6) 变成

$$i = Gu \quad (1-7)$$

电导的单位是 S (西门子, 简称西)。 R 和 G 都是电阻元件的参数。

如果电压、电流参考方向取非关联参考方向, 则

$$u = -Ri \text{ 或 } i = -Gu$$

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, 就把它称为“短路”, 它相当于 $R = 0$ 或 $G = \infty$ 。

当电压 u 和电流 i 取关联参考方向时, 电阻元件消耗的功率为

$$\begin{aligned} P &= ui = Ri^2 = \frac{u^2}{R} \\ &= Gu^2 = \frac{i^2}{G} \end{aligned} \quad (1-8)$$

R 和 G 是正实常数, 故功率 P 恒为非负值。所以线性电阻元件是一种无源元件。

【例 1-1】 10mA 的电流流过 500Ω 的电阻 R , 求电阻 R 的电压降和消耗的功率。

解 由欧姆定律可得电压

$$U = IR = 10 \times 10^{-3} \times 500 = 5V$$

电阻消耗的功率为

$$P = UI = 5 \times 10 \times 10^{-3} = 50 \times 10^{-3} W = 50mW$$

【例 1-2】 有一个 100Ω , $0.25W$ 的碳膜电阻, 使用时电流不得超过多大数值? 能否接在 $50V$ 的电源上使用?

解 由 $P = RI^2$ 得

$$I = \sqrt{\frac{P}{R}} = \sqrt{\frac{0.25}{100}} = \sqrt{\frac{1}{4 \times 100}} = \frac{1}{20} A = 50mA$$

由 $U = RI$ 得

$$U = 100 \times 50 \times 10^{-3} = 5V$$

即在使用时电流不能超过 $50mA$, 电压不能超过 $5V$ 。若接在 $50V$ 电源上使用, 将远远超过了电阻允许的最大电压, 必定烧坏电阻, 故不能接在 $50V$ 电源上使用。

今后, 为了叙述方便, 把线性电阻元件简称为电阻, 所以本书中“电阻”这个术语以及它的相应符号 R 一方面表示一个电阻元件, 另一方面也表示此元件的参数。

(2) 电容元件。电容元件是实际电容器的理想化模型。电容元件是用来表征电路中电场能储存这一物理性质的理想元件。如图 1-11 (a) 所示



为一电容器，当电路中有电容器存在时，电容器极板（由绝缘材料隔开的两个金属导体）上会聚集起等量异号电荷。电压 u 越高，聚集的电荷 q 就越多，产生的电场越强，储存的电场能就越多。 q 与 u 的比值为

$$C = \frac{q}{u}$$

式中， q 的单位为库 [仑] (C)； u 的单位为伏 [特] (V)； C 称为电容，其单位为法 [拉] (F)。由于法 [拉] 的单位太大，工程上多用微法 (μF) 或皮法 (pF) 为单位，它们的换算关系为 $1\mu\text{F} = 10^{-6}\text{pF}$ ， $1\text{pF} = 10^{-12}\text{F}$ 。

线性电容元件的库伏特性曲线是一条通过 $u-q$ (或 $q-u$) 平面的坐标原点的直线，如图 1-11 (b) 所示。

当极板上的电荷量 q 或电压 u 发生变化时，在电路中就要引起电流流过，其大小为

$$i = \frac{dq}{dt} = C \frac{du}{dt} \quad (1-9)$$

上式是在 u 和 i 的参考方向相同的情况下得出的，否则要加负号。

当电容器两端加恒定电压时，则由上式可知 $i = 0$ ，电容元件相当于开路。将式 (1-9) 两边积分，便可得出电容元件上的电压与电路中电流的一种关系式，即

$$u = \frac{1}{C} \int_{-\infty}^t idt = \frac{1}{C} \int_{-\infty}^0 idt + \frac{1}{C} \int_0^t idt = u_0 + \frac{1}{C} \int_0^t idt \quad (1-10)$$

式 (1-10) 中， u_0 是初始值，即在 $t=0$ 时电容元件上的电压。若 $u_0 = 0$ 或 $q_0 = 0$ ，则

$$u = \frac{1}{C} \int_0^t idt \quad (1-11)$$

若将式 (1-9) 两边乘上 u ，并积分，则得

$$\int_0^t u idt = \int_0^t C u du = \frac{1}{2} C u^2 \quad (1-12)$$

这说明当电容元件上的电压增加时，电场能量增大，在此过程中，电容元件从电源取用能量（充电），式 (1-12) 中的 $\frac{1}{2} C u^2$ 就是电容元件极板间的电场能量。当电压降低时，则电场能量减小，即电容元件向电源放还能量（放电）。

一般的电容器除有储能作用外，也会消耗一部分电能，这时，电容器的模型就必须是电容元件和电阻元件组合，由于电容器消耗的电功率与所加的电压直接相关，因此其模型应是两者的并联组合。

(3) 电感元件。电感元件是实际电感器的理想化模型。电感是用来表征电路中磁场能储存这一物理性质的理想元件，例如，当电路中有电感器（线圈）存在时，电流通过线圈会产生比较集中的磁场，因而必须考虑磁场

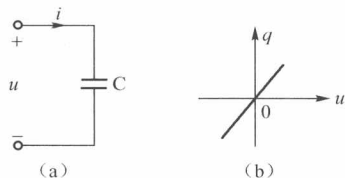


图 1-11 线性电容元件的电路符号及其库伏特性曲线