

普通高等教育“十一五”规划教材  
PUTONG GAODENG JIAOYU SHIYIWU GUIHUA JIAOCAI



DIANLU FENXI JICHU

# 电路分析基础

王玫 主编



中国电力出版社

<http://jc.cepp.com.cn>

“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材



第 2 版

# 电路分析基础

第二版

王松林 主编



中国铁道出版社  
CHINA RAILWAY & POWER PRESS

普通高等教育“十一五”规划教材  
PUTONG GAODENG JIAOYU “SHIWU” GUIHUA JIAOCAI



TM133/83

2008

DIANLU FENXI JICHU

# 电路分析基础

主 编 王 玫  
副主编 宋卫菊 田丽鸿  
编 写 郁汉琪  
主 审 黄 林

Electrical Engineering



中国电力出版社

<http://jc.cepp.com.cn>

## 内 容 提 要

本书为普通高等教育“十一五”规划教材。

本书系统地阐述了电路的基本概念、基本理论和基本分析方法。全书共分十四章，主要内容包括电路的基本概念和基本定理、二端网络的等效变换、电阻电路的一般分析方法、线性电路的基本定理、动态电路的时域分析、正弦稳态电路的分析、三相电路、耦合电感和理想变压器、非正弦周期信号激励下的稳态电路、动态电路的复频域分析、无源网络的频率响应、二端口网络、磁路、简单非线性电阻电路。此外，还配有大量的例题和习题及参考答案。本书不仅内容全面、难易适中，而且叙述简明扼要、通俗易懂、清楚透彻，语言流畅，便于组织教学和学生自学。

本书可作为普通高等院校电气信息类、机械类等工科专业的本科教材，也可作为有关工程技术人员的参考书。

### 图书在版编目 (CIP) 数据

电路分析基础/王玫主编. —北京: 中国电力出版社,  
2008

普通高等教育“十一五”规划教材

ISBN 978-7-5083-6679-1

I. 电… II. 王… III. 电路分析—高等学校—教材  
IV. TM133

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 005185 号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路 6 号 100044 <http://jc.cepp.com.cn>)

北京市同江印刷厂印刷

各地新华书店经售

\*

2008 年 4 月第一版 2008 年 4 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 16 印张 386 千字

定价 25.60 元

### 敬告读者

本书封面贴有防伪标签，加热后中心图案消失  
本书如有印装质量问题，我社发行部负责退换

版权专有，翻印必究



# 前 言

为贯彻落实教育部《关于进一步加强高等学校本科教学工作的若干意见》和《教育部关于以就业为导向深化高等职业教育改革的若干意见》的精神，加强教材建设，确保教材质量，中国电力教育协会组织制订了普通高等教育“十一五”教材规划。该规划强调适应不同层次、不同类型院校，满足学科发展和人才培养的需求，坚持专业基础课教材与教学急需的专业教材并重、新编与修订相结合。本书为新编教材。

电路分析课程是通信、自动化、计算机等专业的一门重要的专业基础课。通过本课程的学习不仅可使学生获得有关电路的基本知识、基本理论和基本分析方法，而且可为后续课程的学习和从事相关专业技术工作打下坚实的基础。本书是普通高等教育“十一五”规划教材，依据国家教育部“本科电子与通信专业电路分析基本要求”编写。

编者多年来一直从事“电路分析基础”、“电工学”、“电路、信号与系统”、“电子技术”等课程的本科教学工作，在长期的教学工作中积累了丰富的经验和体会。在本教材的编写工作中，着重考虑应用型本科院校的特点，以学以致用、够用为度为原则，力求做到以下几方面要求。

(1) 注重基本知识、基本理论和基本分析方法的阐述，以培养学生分析问题和解决问题的能力。

(2) 本教材不仅具有合理的科学体系，而且紧密结合专业的实际需要。例如：“二端口网络”可供不设“网络理论”课程的专业选学；“简单非线性电阻电路”和“磁路”可作为“电子技术”和“电机原理”课程的衔接内容。书中内容丰富、全面，难易适中，可供电类各专业选用。

(3) 书中配有大量典型例题，每章还配有丰富的习题及参考答案，以加深对基本概念的理解。

(4) 书中叙述简明扼要、通俗易懂、清楚透彻，语言流畅，便于自学。

全书由南京工程学院教师编写。全书共十四章，其中，第一、二、三、四、八章由王玫编写，第五、十、十一、十三章由宋卫菊编写，第六、七、九、十二、十四章由田丽鸿编写。本书由王玫担任主编并负责统稿。东南大学黄林教授担任主审，对本书的初稿提出了十分宝贵的意见，在此表示衷心的感谢。

不同专业可根据自己的特点进行教学安排。

本书的出版得到了中国电力出版社和南京工程学院郁汉琪副教授的大力支持和帮助。此外，书中还参考了众多文献资料，得到许多启发和收获。在此谨表示诚挚的感谢。

由于编者水平有限，书中难免有疏漏和不妥之处，敬请读者和专家指正。

编 者

2007年11月于南京

## 目 录

前言	1
<b>第一章 电路的基本概念和基本定理</b>	<b>1</b>
第一节 实际电路和电路模型	1
第二节 电路中的基本物理量	2
第三节 电阻元件及欧姆定律	5
第四节 电容元件	7
第五节 电感元件	9
第六节 独立电源	12
第七节 受控电源	14
第八节 基尔霍夫定律	15
第九节 电位及其计算	19
第十节 电路中的对偶关系	21
习题一	21
<b>第二章 二端网络的等效变换</b>	<b>26</b>
第一节 无源电阻网络的等效	26
第二节 独立电源的连接和变换	32
第三节 含受控源电路的等效变换	36
习题二	37
<b>第三章 电阻电路的一般分析方法</b>	<b>40</b>
第一节 支路电流法	40
第二节 网孔分析法和回路分析法	42
第三节 节点分析法	47
习题三	51
<b>第四章 线性电路的基本定理</b>	<b>54</b>
第一节 叠加定理	54
第二节 替代定理	58
第三节 戴维南定理和诺顿定理	59
第四节 最大功率传输定理	66
习题四	67
<b>第五章 动态电路的时域分析</b>	<b>70</b>
第一节 换路定律和电路初始值的计算	70
第二节 一阶电路的零输入响应	73
第三节 一阶电路的零状态响应	77
第四节 一阶电路的全响应·三要素法	80

第五节 一阶电路的阶跃响应 .....	86
第六节 一阶电路的冲激响应 .....	90
第七节 二阶电路的响应 .....	94
习题五 .....	100
<b>第六章 正弦稳态电路的分析</b> .....	<b>106</b>
第一节 正弦交流电的基本概念 .....	106
第二节 正弦交流电的相量表示 .....	108
第三节 基尔霍夫定律的相量形式和 $R$ 、 $L$ 、 $C$ 元件的相量关系 .....	112
第四节 阻抗和导纳 .....	117
第五节 正弦稳态电路分析 .....	124
第六节 $R$ 、 $L$ 、 $C$ 元件的功率 .....	127
第七节 二端网络的功率 .....	129
第八节 正弦稳态电路中的最大功率传输 .....	134
习题六 .....	135
<b>第七章 三相电路</b> .....	<b>139</b>
第一节 三相电源 .....	139
第二节 三相电源的连接和三相负载的连接 .....	140
第三节 对称三相电路的计算 .....	143
第四节 不对称三相电路的计算 .....	145
第五节 三相电路的功率 .....	147
习题七 .....	148
<b>第八章 耦合电感和理想变压器</b> .....	<b>150</b>
第一节 耦合电感元件 .....	150
第二节 耦合电感的连接及去耦等效电路 .....	153
第三节 空芯变压器 .....	159
第四节 理想变压器 .....	163
习题八 .....	168
<b>第九章 非正弦周期信号激励下的稳态电路</b> .....	<b>171</b>
第一节 非正弦周期信号及其傅里叶级数的分解 .....	171
第二节 非正弦周期信号激励下电路中的有效值、平均功率 .....	174
第三节 非正弦周期信号激励下电路的稳态响应 .....	177
习题九 .....	179
<b>第十章 动态电路的复频域分析</b> .....	<b>181</b>
第一节 拉普拉斯变换 .....	181
第二节 拉普拉斯反变换 .....	183
第三节 用拉普拉斯变换分析线性动态电路 .....	186
习题十 .....	191
<b>第十一章 无源网络的频率响应</b> .....	<b>193</b>
第一节 网络函数 .....	193

第二节	$RC$ 电路和 $RL$ 电路的频率特性 .....	195
第三节	$RLC$ 串联谐振电路 .....	198
第四节	$GLC$ 并联谐振电路 .....	201
习题十一	.....	203
<b>第十二章</b>	<b>二端口网络</b> .....	<b>205</b>
第一节	二端口网络概述 .....	205
第二节	二端口网络的参数 .....	205
第三节	二端口网络的等效电路 .....	211
第四节	二端口网络的连接 .....	213
习题十二	.....	214
<b>第十三章</b>	<b>磁路</b> .....	<b>217</b>
第一节	磁场的基本物理量及全电流定律 .....	217
第二节	铁磁物质的磁化曲线 .....	219
第三节	磁路及磁路定律 .....	223
第四节	恒定磁通磁路的计算 .....	225
第五节	交变磁通磁路 .....	227
第六节	电磁铁 .....	229
习题十三	.....	230
<b>第十四章</b>	<b>简单非线性电阻电路</b> .....	<b>232</b>
第一节	非线性电阻元件 .....	232
第二节	非线性电阻电路的分析方法 .....	233
习题十四	.....	237
<b>参考答案</b>	.....	<b>239</b>
<b>参考文献</b>	.....	<b>246</b>



## 第一章 电路的基本概念和基本定理

### 内 容 提 要

本章主要介绍了电路模型、参考方向等基本概念以及电路中的基本物理量，即电压、电流和功率等；介绍了电阻、电感、电容、独立电源和受控电源五种电路元件的特性；阐述了电路中电压和电流应服从的两类约束，即元件的伏安关系和基尔霍夫定律；最后讨论简单电路的分析和计算方法。这些内容是全书的基础。

### 第一节 实际电路和电路模型

在各个电技术领域，人们可以通过各种电路来完成多种任务。例如：电力系统的电路，其作用是实现电能的转换、传输和分配；电子电路中的整流电路可以将交流电转换为直流电；滤波电路可以除去无用信号分量，完成信息处理任务；运算电路可以实现对信号的各种数学运算；计算机中的存储电路能存储数据和程序，等等。虽然电路种类及功能繁多，结构千差万别，但它们之间却有着基本的共性，遵循着同样的规律。正是在这种同样规律的基础上形成了“电路理论”这一学科。“电路分析基础”属于这一学科的入门课程。通过对这门课的学习，学生可以掌握电路的基本理论和基本分析方法，为学习后续电类理论和专业课程打下基础。

一个实际电路是由若干个电气装置或电路元器件（如电阻器、电感线圈、电容器、电源、半导体器件、集成电路等）按一定方式连接起来而构成的电流通路。图 1-1 (a) 所示为一个手电筒电路的示意图。当开关闭合时，电流通过灯泡使其发光。图 1-1 (a) 中干电池是提供电能的器件，称为电源；灯泡是耗能的器件，称为负载；连接电源和负载的中间部分是连接导体。显然，电路中的电流和电压是在电源的作用下产生的。因此，电源称为电路的“激励”，而电流和电压则称为电路的“响应”。

实际电路器件在工作时的电磁性质是比较复杂的，往往同时具有多种电磁效应。这给电路的分析和计算带来困难。为了简化问题，以便于探讨电路的普遍规律，在分析实际电路时，人们往往将实际的元器件理想化，抓住其主要特性，忽略其他次要因素，用一个足以表征其主要性能的理想化电路元件近似代替实际电路器件。在手电筒电路中，当有电流流过灯泡时，灯丝对电流产生阻碍作用，呈现电阻特性，但同时还会产生磁场，因而兼有电感性质。实际的干电池总有内阻，因而工作时其端电压会有所下降。连接导体多少有一点电阻，甚至还有电感。但灯泡的电感是很小的，可用一个理想电阻代替；一个新干电池的内阻比灯泡的电阻小得多，可以忽略不计，故可以用一个电压恒定的理想电压源代替；在连接导体不长且截面积足够大时，其

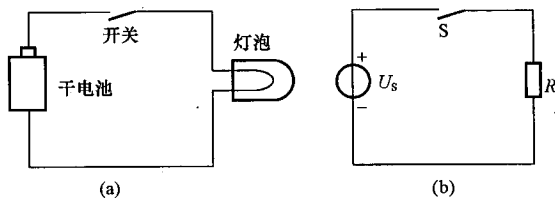


图 1-1 手电筒电路及其电路模型

(a) 手电筒电路示意图；(b) 电路模型

电阻完全可忽略不计, 作为理想导体。这样处理后的各电路元件只具有单一电磁特性, 可以用简单的电路符号及数学表达式来精确描述。

由各种理想电路元件组成的电路被称为电路模型。图 1-1 (b) 就是图 1-1 (a) 的电路模型。电路理论分析的对象是电路模型, 而不是实际电路。本书所指电路均为电路模型。

实际电路可分为集中参数电路和分布参数电路两大类。当实际电路的几何尺寸远小于电路工作频率所对应的信号波长时, 即可作为集中参数电路。我国电网供电频率为 50Hz, 对应的波长为 6000km, 这一波长远远大于电子电路的尺寸, 因此可以采用集中参数的概念。而对于远距离的输电线路和通信线路来说, 就必须考虑到电场和磁场沿线路的分布情况, 不能用集中参数来分析。集中参数电路理论是电路的最基本理论, 本书讨论的电路都是集中参数电路。

电路分析的主要任务是在已知电路结构和元器件参数的情况下, 分析和求解电路任意处的电压、电流和功率。

## 第二节 电路中的基本物理量

电路分析中所涉及的常用基本物理量主要有电流、电压和功率, 此外, 还有电位、能量、电量、磁链等。本节简述它们的物理概念, 着重介绍电压、电流的参考方向和正、负功率的含义。

### 一、电流及其参考方向

带电粒子(电荷)在电场力的作用下产生定向移动便形成电流。为了衡量电流的大小, 引入电流强度这一物理量。电流强度简称电流, 用  $i$  表示。其定义为: 单位时间内通过导体横截面的电荷量, 即

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

在国际单位制(SI)中, 电荷  $q$  的单位为 C (库仑), 时间  $t$  的单位为 s (秒), 电流  $i$  的单位为 A (安培)。常用的电流单位还有 mA (毫安) 和  $\mu\text{A}$  (微安)。

习惯上把正电荷运动的方向规定为电流的正方向。

如果电流的大小和方向都不随时间变化, 则称之为直流电流, 简称直流, 记作 DC, 用  $I$  表示。如果电流的大小和方向都随时间作周期性变化, 则称之为交变电流, 简称交流, 记作 AC, 用  $i$  表示。其他形式的电流总可以用直流叠加交流的方式来表示。

上述规定的电流方向是电流在电路中的真实方向。对简单电路而言, 电流的真实方向是可以直观地确定的。但在一个复杂电路中, 往往很难判断某段电路中电流的真实方向, 而对于大小和方向都随时间变化的交变电流, 要判断它们的真实方向就更加困难了。为此, 引入参考方向的概念。

电流的参考方向可以任意假设, 在图中用箭头表示, 它并不一定代表电流的真实流向。

通常规定: 如果电流的真实方向与参考方向相同, 则电流为正值; 如果电流的真实方向与参考方向相反, 则电流为负值。例如: 在图 1-2 所示电流参考方向的电路中, 方框泛指某电路的一部分, 假设电流  $i$  的参考方向为  $a \rightarrow b$ , 如箭头所示, 并以此方向



图 1-2 电流参考方向

进行电路计算。若计算得  $i$  为正值，则说明电流的真实方向与参考方向一致，即  $a \rightarrow b$ ；若计算得  $i$  为负值，则说明电流的真实方向与参考方向相反，即  $b \rightarrow a$ 。这就是说，可以用电流的正负值再结合其参考方向来表示电流的真实方向。因此，不标出电流的参考方向，电流值的正负是没有意义的。

## 二、电压及其参考方向

电荷在电路中能够产生定向移动，一定受到电场力的作用，也就是电场力对电荷做了功。为了衡量电场力做功的大小，引入电压这一物理量。电压用  $u$  表示，电路中  $a$ 、 $b$  两点间的电压等于电场力把单位正电荷从  $a$  点移到  $b$  点所做的功，即

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

式 (1-2) 中， $dq$  为从  $a$  点移到  $b$  点的电量； $d\omega$  为电场力将  $dq$  正电荷从  $a$  点移到  $b$  点所做的功； $u$  为电路中  $a$ 、 $b$  两点间的电压。在国际单位制 (SI) 中，电荷  $q$  的单位为 C (库仑)，功  $\omega$  的单位为 J (焦耳)，电压  $u$  的单位为 V (伏特)。常用的电压单位还有 kV (千伏)、mV (毫伏) 和  $\mu$ V (微伏)。

电压总与电路中的两个点有关，为了更加清楚，有时给电压  $u$  加上角标，将  $u$  写成  $u_{ab}$ 。如果正电荷从  $a$  点移到  $b$  点是失去能量，则  $a$  点是高电位，为正端，标以“+”， $b$  点是低电位，为负端，标以“-”， $u_{ab}$  则是电压降，其值为正。反之，如果正电荷从  $a$  点移到  $b$  点是获得能量，则  $a$  点是低电位，为负端，标以“-”号， $b$  点是高电位，为正端，标以“+”， $u_{ab}$  则是电压升，其值为负。

习惯上将电压降称为电压，将电压降的方向规定为电压的正方向。

如果电压的大小和方向都不随时间变化，则称之为直流电压，用  $U$  表示。如果电压的大小和方向都随时间作周期性变化，则称之为交流电压。其他形式的电压总可以用直流电压叠加交流电压的方式来表示。

对于一个复杂电路而言，电路某处电压的真实极性也称真实方向，往往也是很难判断的。为此，也需引入电压参考方向 (或参考极性) 的概念。

电压的参考方向也可以任意假设，在元件或电路的两端用“+”“-”符号表示，它并不一定代表电压的真实方向。通常规定：如果电压的真实方向与参考方向相同，则电压为正值；如果电压的真实方向与参考方向相反，则电压为负值。例如：在图 1-3 所示电压参考方向的电路中，假设电压  $u$  的参考方向为  $a$  端“+”， $b$  端“-”，并按此假定进行电路计算，若计算得  $u$  为正值，则说明电压的真实方向与参考方向相同， $a$  端电位高于  $b$  端电位；若计算得  $u$  为负值，则说明电压的真实方向与参考方向相反， $b$  端电位高于  $a$  端电位。这就是说，可以用电压的正、负值再结合电压的参考方向来表示电压的真实方向。因此，若不标出电压的参考方向，则电压值的正负也是没有意义的。

电路中同一个元件上的电压、电流的参考方向是相互独立的，均可任意假设。如果选择电流的参考方向是从标以电压正极的一端流向标以电压负极的一端，即为两者的参考方向一致，则称为关联参考方向，如图 1-4 (a) 所示；如果两者的参考方向不一致，则称为非关联参考方向，如图 1-4 (b) 所示。当采用关联参考方向后，就只需标出一套参考方向，即电流参考方向或电压参考方向，分别如图 1-4 (c) 和图 1-4 (d) 所示。

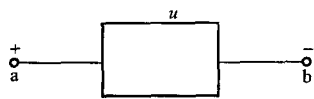


图 1-3 电压参考方向

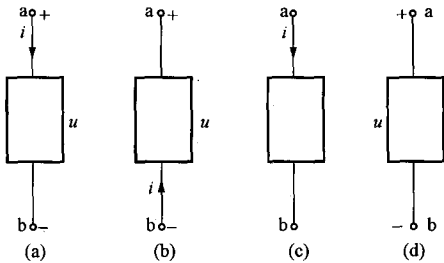


图 1-4 关联参考方向和非关联参考方向  
(a) 关联参考方向; (b) 非关联参考方向;  
(c) 电流参考方向; (d) 电压参考方向

### 三、功率和能量

电路工作时总是存在电能与其他形式能量之间的相互转换, 为了衡量电路中能量转换的速度, 引入功率这一物理量。功率用  $P$  表示。设在  $dt$  时间内电路转换的电能为  $d\omega$ , 则功率定义为

$$P = \frac{d\omega}{dt} \quad (1-3)$$

在国际单位制 (SI) 中, 能量  $\omega$  的单位为 J (焦耳), 时间  $t$  的单位为 s (秒), 功率  $P$  的单位为 W (瓦特)。

电路中, 人们更感兴趣的是功率与电压、电流之间的关系。对式 (1-3) 进一步推导可得

$$P = \frac{d\omega}{dt} = \frac{d\omega}{dq} \frac{dq}{dt} = ui \quad (1-4)$$

式 (1-4) 表明电路的功率等于该段电路电压与电流的乘积。直流情况下, 可表示为

$$P = UI \quad (1-5)$$

在国际单位制 (SI) 中, 电流  $i$  的单位为 A (安培), 电压  $u$  的单位为 V (伏特), 功率  $P$  的单位为 W (瓦特)。常用的功率单位还有 kW (千瓦)、mW (毫瓦) 等。

由于  $u$  和  $i$  的值都是代数量, 因此功率  $P$  可为正值也可为负值, 而功率正负也有其特定的物理含义。在关联参考方向下,  $P=ui$ , 若  $P>0$ , 则表明电压和电流的实际方向相同, 正电荷从高电位端移到低电位端, 电场力对正电荷做功, 电路吸收功率; 若  $P<0$ , 则表明电压和电流的实际方向相反, 正电荷从低电位端移到高电位端, 外力克服电场力做功, 电路将其他形式能量转换成电能释放出功率, 此时电路产生 (或提供) 功率。

在非关联参考方向下, 计算功率的公式应改为

$$P = -ui$$

同理可得, 若  $P>0$ , 则表示电路吸收功率; 若  $P<0$ , 则表示电路产生功率。

在关联参考方向下,  $t_0 \sim t$  时间内电路所吸收的能量为

$$\omega(t_0, t) = \int_{t_0}^t P(\xi) d\xi = \int_{t_0}^t u(\xi) i(\xi) d\xi \quad (1-6)$$

在国际单位制 (SI) 中, 能量  $\omega$  的单位为 J (焦耳)。

**【例 1-1】** 计算图 1-5 所示电路中各电路的功率, 并指出它们是吸收功率, 还是产生功率。

解 图 1-5 (a) 电路中电压、电流为关联参考方向, 则

$$P = UI = 3 \times 2 = 6(\text{W}) > 0 (\text{吸收功率})$$

图 1-5 (b) 电路中电压、电流为非关联参考方向, 则

$$P = -UI = -(-2) \times 4 = 8(\text{W}) > 0 (\text{吸收功率})$$

图 1-5 (c) 电路中电压、电流为关联参考方向, 则

$$P = UI = 1 \times (-5) = -5(\text{W}) < 0 (\text{产生功率})$$

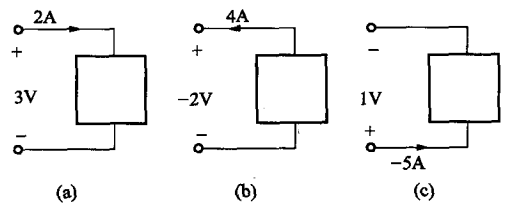


图 1-5 例 1-1 图

**【例 1-2】** 图 1-6 所示电路中，方框表示一段电路，功率箭头指向方框表示吸收功率，箭头向外表示产生功率。求各段电压并说明它们的实际极性。

解 (1) 对方框 A 电路，电流  $I$  与电压  $U_{ab}$  为关联参考方向，吸收功率  $P_A = U_{ab}I$ ，则

$$U_{ab} = \frac{P_A}{I} = \frac{8}{2} = 4(\text{V})$$

说明 a、b 两点间电压的实际极性是 a 点“+”，b 点“-”。

(2) 对方框 B 电路，电流  $I$  与电压  $U_{bc}$  为关联参考方向，产生功率  $P_B = -U_{bc}I$ ，则

$$U_{bc} = -\frac{P_B}{I} = -\frac{12}{2} = -6(\text{V})$$

说明 b、c 两点间电压的实际极性是 b 点“-”，c 点“+”。

(3) 对方框 C 电路，电流  $I$  与电压  $U_{ca}$  为关联参考方向，吸收功率  $P_C = U_{ca}I$ ，则

$$U_{ca} = \frac{P_C}{I} = \frac{4}{2} = 2(\text{V})$$

说明 c、a 两点间电压的实际极性是 c 点“+”，a 点“-”。

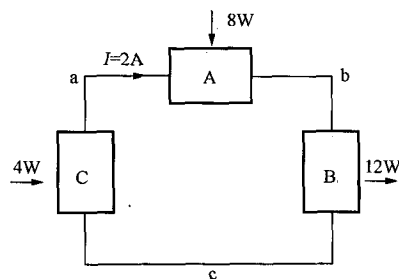


图 1-6 例 1-2 图

### 第三节 电阻元件及欧姆定律

#### 一、电路元件

前已阐述，电路元件的组合就构成多种多样的电路。本书涉及八种常用电路元件，即电阻元件、电感元件、电容元件、电压源、电流源、受控电源、耦合电感、理想变压器。前五种元件只有两个端钮，故称为二端元件；后三种有多个端钮，故称为多端元件。每种电路元件端钮上的电压和电流之间都存在确切的关系，称为伏安关系或伏安特性，简称 VAR 或 VAC。它可以用数学式来描述，也可以在  $u-i$  平面或  $i-u$  平面中用曲线描述，称为伏安特性曲线。

#### 二、电阻元件的伏安关系及欧姆定律

电阻元件是对电流呈现阻力的元件，它反映电路器件消耗电能的性能。电阻元件可以是线性的或非线性的，时变的或非时变的。如果电阻元件上的电压与电流的关系是线性关系，则是线性电阻元件，否则是非线性电阻元件；如果其电压与电流的关系是不随时间变化的，则是时不变电阻元件，否则是时变电阻元件。本书只涉及线性和非线性的时不变电阻元件。本节重点介绍线性电阻元件，有关非线性电阻的电路将在第十四章中介绍。

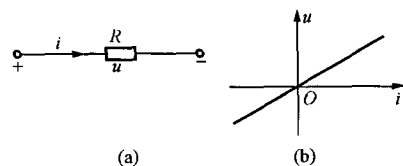


图 1-7 线性电阻元件符号及伏安关系曲线

(a) 符号；(b) 伏安关系曲线

线性电阻元件的电路符号如图 1-7 (a) 所示。在关联参考方向下，线性电阻元件的伏安关系服从欧姆定律，即

$$u = Ri \quad (1-7)$$

式中： $u$  是电阻元件两端的电压，V； $i$  是流过电阻元件的电流，A； $R$  是电阻，为常数，单位为  $\Omega$ （欧姆）。此外还常用  $k\Omega$ （千欧）、 $M\Omega$ （兆欧）为单位。

欧姆定律表明了线性电阻的特性：当电流通过时，要消耗电能，沿电流方向两个端钮上就会出现电压降，此电压降与流过的电流大小成正比，比例常数为  $R$ ，就是电阻元件的电阻值，简称电阻。在  $u-i$  平面中电阻元件的伏安特性曲线是一条在第 1、3 象限内通过坐标原点，斜率为  $R$  的直线，如图 1-7 (b) 所示。

在非关联参考方向下，欧姆定律的表达形式应为

$$u = -Ri \quad (1-8)$$

在  $u-i$  平面中电阻元件的伏安特性曲线是一条在第 2、4 象限内通过坐标原点，斜率为  $-R$  的直线。

电阻既有阻止电流通过的一面，又有允许电流通过的一面，这就是它的电导特性。电导用  $G$  表示，它是电阻的倒数，即

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

在国际单位制 (SI) 中，电导的单位是 S（西门子）。当用电导表示欧姆定律时，在关联参考方向下，欧姆定律可表示为

$$i = \frac{u}{R} = Gu \quad (1-9)$$

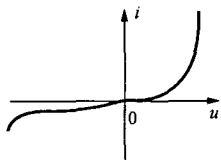


图 1-8 半导体二极管伏安特性曲线

线性电阻有两种特殊状态：开路和短路。如果一个二端线性电阻元件不论其端钮电压为何值而电流恒等于零，则该电阻元件处于开路状态，相当于  $R=\infty$  或  $G=0$ 。如果一个二端线性电阻元件不论流过的电流为何值而其端钮上电压恒等于零，则该电阻元件处于短路状态，相当于  $R=0$  或  $G=\infty$ 。

在电子电路中也常用到各种非线性电阻元件，它们的共同特点是，伏安关系是非线性方程，伏安特性曲线是非线性曲线。半导体二极管是典型的非线性电阻元件，其伏安特性曲线如图 1-8 所示。

### 三、电阻元件的功率和能量

线性电阻元件在任一时刻吸收的功率可按式 (1-4) 结合欧姆定律得到计算公式

$$P = ui = i^2R = \frac{u^2}{R} \quad (1-10)$$

可见，不论电流、电压为正值或负值，均有  $P \geq 0$ ，即电阻元件总是消耗功率的。对于一个实际的电阻器，使用时不能超过其所标功率，否则可能被烧毁。因此，各种电气设备如灯泡、电炉、电阻器等都规定有额定功率、额定电流（或额定电压）。

在  $t_0 \sim t$  时间范围内电阻元件吸收的能量为

$$w(t_0, t) = \int_{t_0}^t P(\xi) d\xi = R \int_{t_0}^t i^2(\xi) d\xi = \frac{1}{R} \int_{t_0}^t u^2(\xi) d\xi \quad (1-11)$$

能量通常用焦耳作单位，但在电力系统中，则常用“kW·h”（千瓦·小时）作电能的计量单位，即 1kW 功率在 1h 里所耗散的电能。1kW·h 又称为 1 度电。

**【例 1-3】** 有一个  $200\Omega$ 、 $\frac{1}{8}W$  的电阻元件，使用时电流不得超过多大数值？它能承受

的最大电压是多少?

解 由  $P=I^2R$  得

$$I = \sqrt{\frac{P}{R}} = \sqrt{\frac{1}{200 \times 8}} = \frac{1}{40}(\text{A}) = 25(\text{mA})$$

$$U = IR = 200 \times \frac{1}{40} = 5(\text{V})$$

计算表明:使用时电流不得超过 25mA, 它能承受的最大电压是 5V。

#### 第四节 电 容 元 件

电容元件是具有储存电场能量性质的元件, 是实际电容器的理想化模型。实际电容器一般由两块相互绝缘的金属平行板所构成, 并从两极板分别引出外接端。当外接端加有电压  $u$  时, 两极板上分别存储有等量的异性电荷  $+q$  和  $-q$ , 如图 1-9 所示。当两极板之间的电压变化时, 所储存的电荷量随之而变化。把电荷量  $q$  与所加电压  $u$  的比值定义为电容器的电容量, 简称电容, 用  $C$  表示, 即

$$C = \frac{q}{u} \quad (1-12)$$

如果  $C$  是常数, 则  $q$  与  $u$  成正比。它们的关系在  $q-u$  平面上是一条通过坐标原点的直线, 直线的斜率是  $C$ , 如图 1-10 所示, 具有这种性质的电容称为线性电容。线性电容元件的符号如图 1-11 所示。电容  $C$  是电容元件的一个参数, 电容元件又通常简称为电容。

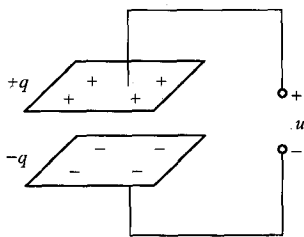


图 1-9 平行板电容器

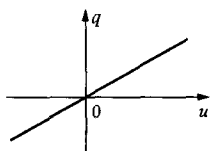


图 1-10 线性电容元件的  $q-u$  特性

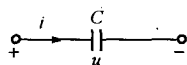


图 1-11 线性电容元件的符号

在国际单位制 (SI) 中, 电量  $q$  的单位是 C (库仑), 电压  $u$  的单位是 V (伏特), 电容  $C$  的单位是 F (法拉)。常用的电容单位还有  $\mu\text{F}$  (微法)、 $\text{pF}$  (皮法)。其中  $1\mu\text{F}=10^{-6}\text{F}$ ,  $1\text{pF}=10^{-12}\text{F}$ 。

实用中的大多数电容器都属于线性电容, 而填充了特殊介质使得  $C$  不是常数的电容器属于非线性电容。此外, 还有时不变电容和时变电容。本书只讨论线性时不变电容。

实际电容器标定电容量和额定工作电压两个参数, 在工作电压超过额定工作电压时, 电容器中间的绝缘介质就有可能被击穿或因漏电剧增而导致损坏, 使用中应特别注意。

##### 一、电容元件的伏安关系

在图 1-11 所示电路中,  $u$  和  $i$  采用关联参考方向, 根据电流的定义, 有

$$i = \frac{dq}{dt}$$

将式 (1-12) 代入上式, 即得出线性电容的伏安关系式为

$$i = \frac{d(Cu)}{dt} = C \frac{du}{dt} \quad (1-13)$$

式(1-13)表明:

(1) 任一时刻流过电容的电流取决于该时刻电容两端电压的变化率。如果加在电容两端的电压为不随时间变化的直流电压,即电压的变化率为零,则电容中的电流也为零,电容元件相当于开路。只有电容两端的电压随时间变化,才会有电容电流。而且,电容电压变化越快,电容电流就越大。所以说,电容元件具有隔直流、通交流的作用。值得注意的是,电容电流是位移电流,而非有电子流真正流过电容内部的绝缘介质。

(2) 如果在任何时刻电容电流皆为有限值,则电容电压不会发生跃变。因为,若电容电压发生跃变,那么  $du/dt$  就趋于无穷大,就有电容电流  $i \rightarrow \infty$ , 这在实际工程中显然是不可能的。因此,在绝大多数应用场合,总是可以认为电容电压  $u_C$  是处处连续的,即对任一时刻  $t$  而言,有

$$u_C(t_-) = u_C(t_+)$$

上式称为换路定理,它是分析动态电路的重要依据。

由于电容电流取决于电容电压的变化率,只有在动态电压条件下才能有电容电流,故电容元件称为动态元件。

电容元件 VAR 的另一种形式为

$$u(t) = \frac{1}{C} \int_{-\infty}^t i(\xi) d\xi \quad (1-14)$$

式(1-14)表明:某一时刻  $t$  的电容电压,取决于电容电流从  $-\infty$  到  $t$  的积分,即与电流过去的全部历史有关。电容元件具有记忆电流的功能,故又称为记忆元件。

在任意选定  $t_0$  作为初始时刻后,式(1-14)还可表示为

$$u(t) = \frac{1}{C} \int_{-\infty}^{t_0} i(\xi) d\xi + \frac{1}{C} \int_{t_0}^t i(\xi) d\xi = u(t_0) + \frac{1}{C} \int_{t_0}^t i(\xi) d\xi \quad (1-15)$$

式(1-15)中  $u(t_0)$  是初始时刻  $t_0$  的电容电压,称为初始电压,它是电容电流从  $-\infty$  到  $t_0$  的积分,反映了  $t_0$  时刻之前电容电流的全部情况。

## 二、电容元件的功率和储能

在关联方向下,电容元件吸收的瞬时功率为

$$p(t) = u(t)i(t) = Cu \frac{du}{dt} \quad (1-16)$$

当  $p(t) > 0$  时,相当于电容电压的变化率为正,即电容中的电荷量是增长的,表示电容元件从电路中吸收能量,并储存在电场中;反之,当  $p(t) < 0$  时,表示电容元件释放出储存在电场中的能量。电容元件自身不消耗能量。

电容元件的储能  $w_C$  是对瞬时功率的时间积分,即

$$w_C(t) = \int_{-\infty}^t p(\xi) d\xi = \int_{-\infty}^t Cu \frac{du}{d\xi} d\xi = \frac{1}{2} Cu^2(t) - \frac{1}{2} Cu^2(-\infty) \quad (1-17)$$

由于在  $t = -\infty$  时电容未被充电,故  $u(-\infty) = 0$ , 则式(1-17)可写为

$$w_C = \frac{1}{2} Cu^2(t) \quad (1-18)$$

式(1-18)表明:电容在某一时刻的储能,只取决于该时刻的电容电压,而与电容电流无关。只要电容上有电压,它就有储能。并且,尽管电容的瞬时功率有正有负,但储能总为正值。



综上所述，电容元件是一种储能、动态、记忆元件。

**【例 1-4】** 电路如图 1-12 (a) 所示，电容电压  $u$  波形如图 1-12 (b) 所示，绘出电容电流  $i$  的波形。

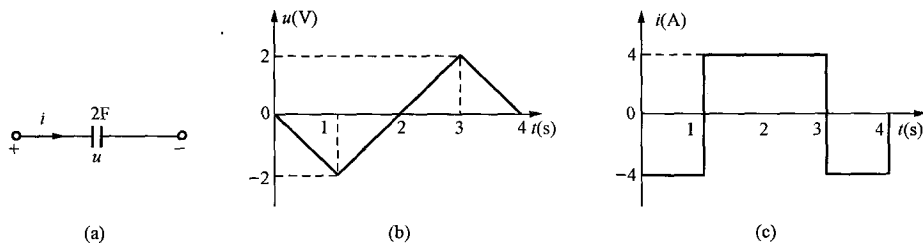


图 1-12 例 1-4 图

(a) 电路图; (b)  $u$  波形图; (c)  $i$  波形图

**解** 写出电容电压分段表达式为

$$u = \begin{cases} -2t & (\text{V}) & (0 \leq t \leq 1\text{s}) \\ 2t - 4 & (\text{V}) & (1\text{s} \leq t \leq 3\text{s}) \\ -2t + 8 & (\text{V}) & (3\text{s} \leq t \leq 4\text{s}) \\ 0 & (\text{V}) & (t \geq 4\text{s}) \end{cases}$$

根据式 (1-13) 分段计算得

$$i = C \frac{du}{dt} = \begin{cases} -4 & (\text{A}) & (0 < t < 1\text{s}) \\ 4 & (\text{A}) & (1\text{s} < t < 3\text{s}) \\ -4 & (\text{A}) & (3\text{s} < t < 4\text{s}) \\ 0 & (\text{A}) & (t > 4\text{s}) \end{cases}$$

由上式可绘出电容电流  $i$  的波形，如图 1-12 (c) 所示。

## 第五节 电感元件

电感元件是具有储存磁场能量性质的元件，是实际电感线圈的理想化模型。

用导线绕制成螺线管后，便构成了电感线圈，如图 1-13 所示。当一个匝数为  $N$  的线圈通以变化的电流  $i$  时，线圈内部以及周围便建立起磁场，形成磁通  $\Phi$ ，磁通与  $N$  匝线圈相交链，则称为磁链  $\Psi$ ，即  $\Psi = N\Phi$ 。由于电流  $i$  的变化，引起磁通  $\Phi$  和磁链  $\Psi$  的变化。将磁链  $\Psi$  与电流  $i$  的比值定义为电感线圈的电感量，简称电感，用  $L$  表示，即

$$L = \frac{\Psi}{i} \quad (1-19)$$

在国际单位制 (SI) 中，磁通  $\Phi$  和磁链  $\Psi$  的单位都是 Wb (韦伯)，电流  $i$  的单位是 A (安培)，电感的单位是 H (亨利)。常用的电感单位还有 mH (毫亨)、 $\mu\text{H}$  (微亨)，其中  $1\text{mH} = 10^{-3}\text{H}$ ， $1\mu\text{H} = 10^{-6}\text{H}$ 。

电感  $L$  是电感元件的一个参数，电感元件又通常简称为电感。如果  $L$  是常数，则  $\Psi$  与  $i$  成正比。它们的关系在  $\Psi-i$  平面上是一条通过坐标原点的直线，如图 1-14 所示，具有这种性质的电感称为线性电感。线性电感元件的符号如图 1-15 所示。