

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



DIANLU

# 电 路

(少学时)

张长富 主编



中国电力出版社

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

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



DIANLU

# 电 路

(少学时)

主编 张长富  
编写 茹秀敏 熊军华  
张红涛 朱雪凌  
魏道红 李延频  
刘雪枫  
主审 刘耀华

江苏工业学院图书馆  
藏书章



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。

全书共分十三章，主要内容包括电路模型及其基本定律、电阻电路的分析方法和电路定理、线性定常动态电路分析、正弦交流电路和相量法、三相电路、具有互感的电路、非正弦周期电路和信号的频谱、拉普拉斯变换计算法、线性定常网络矩阵分析、状态变量分析法和状态方程、二端口网络、多端元件、非线性电路。为便于教学，每章后均附有习题，并在书后附有习题答案。

本书可作为普通高等院校相关专业的电路（少学时）课程教材，也可作为高职高专和函授教材，同时可作为相关工程技术人员的参考用书。

### 图书在版编目 (CIP) 数据

电路：少学时/张长富主编. —北京：中国电力出版社，2008  
普通高等教育“十一五”规划教材  
ISBN 978-7-5083-7651-6

I. 电… II. 张… III. 电路—高等学校—教材 IV. TM13

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 094587 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 8 月第一版 2008 年 8 月北京第一次印刷  
787 毫米×1092 毫米 16 开本 18.75 印张 452 千字  
定价 28.00 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。

本书根据教育部“电路、信号系统和电磁场课程指导小组”制定的“电路原理课程教学大纲”基本要求编写。本书作为讲义从1997年以来曾在本、专科,全日制和成人教育教学中使用,并结合多年来教学实践的体会和读者的意见,全面修订而成。本书保留了原讲义中的体系、结构和各章节中心明确、层次清楚、概念准确、论述简明、便于教学的特点,对基本内容、传统内容和新内容的协调予以充分考虑。根据少学时的特点,力图突出基本概念和基本原理,采用简练且有效的方式将问题交代清楚,以培养学生的自学能力。

本书第一章、二章、四章、五章、八章、九章、十三章分别由华北水利水电学院熊军华、张红涛、茹秀敏、朱雪凌、魏道红、李延频、刘雪枫编写,其余由华北水利水电学院张长富编写,并由张长富统稿。

本书初稿承蒙东北电力大学刘耀年教授仔细审阅,提出了许多宝贵意见和建议,在此表示衷心感谢。

限于编者水平,书中定有不少疏漏和差错,恳请读者批评指正。

编 者

2008年5月

## 目 录

## 前言

<b>第一章 电路模型及其基本定律</b> .....	1
第一节 电路模型及其主要物理量 .....	1
第二节 理想的电路元件 .....	4
第三节 两种电源 .....	9
第四节 电阻的星形连接和三角形连接的等效变换 .....	12
第五节 基尔霍夫定律 .....	14
第六节 几种典型函数的波形 .....	16
习题 .....	18
<b>第二章 电阻电路的分析方法和电路定理</b> .....	21
第一节 支路电流法 .....	21
第二节 回路电流法 .....	23
第三节 结点电压法 .....	26
第四节 叠加原理 .....	30
第五节 戴维南定理 .....	33
第六节 替代定理 .....	36
第七节 网络图的基本概念 .....	37
第八节 特勒根定理 .....	39
第九节 互易定理 .....	42
第十节 对偶原理和对偶电路 .....	44
习题 .....	45
<b>第三章 线性定常动态电路分析</b> .....	50
第一节 经典法 .....	50
第二节 电路的初始条件 .....	50
第三节 一阶 RC 电路的零输入响应 .....	53
第四节 一阶 RL 电路的零输入响应 .....	56
第五节 RC 电路的零状态响应、阶跃响应 .....	59
第六节 RL 电路的零状态响应 .....	62
第七节 一阶电路的冲激响应 .....	65
第八节 一阶电路的全响应 .....	67
第九节 二阶电路的零输入响应 .....	71
第十节 二阶电路的零状态响应和阶跃响应 .....	79
第十一节 二阶电路的冲激响应 .....	80
习题 .....	81

<b>第四章 正弦交流电路和相量法</b> .....	85
第一节 正弦交流电路的基本概念 .....	85
第二节 相量法 .....	87
第三节 单一参数的正弦交流电路 .....	91
第四节 $RLC$ 串联正弦交流电路 .....	95
第五节 $RLC$ 并联正弦交流电路 .....	98
第六节 复阻抗和复导纳的等效互换 .....	101
第七节 功率因数的提高 .....	102
第八节 正弦交流电路的稳态计算 .....	103
第九节 串联谐振电路 .....	106
第十节 并联谐振电路 .....	112
第十一节 正弦交流电路的最大功率传输 .....	114
习题 .....	115
<b>第五章 三相电路</b> .....	122
第一节 三相交流电的概念 .....	122
第二节 三相电源的连接方式 .....	123
第三节 对称三相电路的计算 .....	125
第四节 不对称三相电路的概念 .....	127
第五节 三相电路功率及其测量 .....	130
习题 .....	134
<b>第六章 具有互感的电路</b> .....	137
第一节 互感的概念 .....	137
第二节 具有互感电路的计算 .....	140
第三节 空心变压器 .....	145
第四节 理想变压器 .....	147
习题 .....	150
<b>第七章 非正弦周期电路和信号的频谱</b> .....	154
第一节 周期函数分解为傅里叶级数 .....	154
第二节 傅里叶级数的指数形式 .....	158
第三节 傅里叶积分 .....	160
第四节 非正弦周期电路有效值、平均值和平均功率 .....	162
第五节 非正弦周期电流电路的计算 .....	164
第六节 对称三相电路中的高次谐波 .....	168
习题 .....	171
<b>第八章 拉普拉斯变换计算法</b> .....	174
第一节 拉普拉斯变换的定义 .....	174
第二节 拉普拉斯变换的基本性质 .....	175
第三节 拉普拉斯反变换 .....	180
第四节 电路定律的运算形式 .....	184
第五节 利用拉普拉斯变换分析线性电路 .....	187

第六节	网络函数	191
第七节	复频率平面、极点和零点	194
第八节	卷积	200
	习题	202
<b>第九章</b>	<b>线性定常网络矩阵分析</b>	<b>206</b>
第一节	关联矩阵、回路矩阵、割集矩阵	206
第二节	结点法的矩阵形式	210
第三节	网络矩阵方程	212
第四节	具有受控源电路的结点分析	218
第五节	改进的结点法	220
第六节	回路法	222
第七节	割集法	224
	习题	226
<b>第十章</b>	<b>状态变量分析法和状态方程</b>	<b>228</b>
第一节	状态变量及状态方程式	228
第二节	状态方程的编写	229
	习题	235
<b>第十一章</b>	<b>二端口网络</b>	<b>237</b>
第一节	概述	237
第二节	二端口网络的方程和参数	238
第三节	二端口网络的转移(传递)函数	245
第四节	二端口网络的特性阻抗	247
第五节	二端口网络的等效电路	248
第六节	二端口网络的连接	249
	习题	250
<b>第十二章</b>	<b>多端元件</b>	<b>253</b>
第一节	概述	253
第二节	运算放大器	254
第三节	运算放大器电路分析	255
第四节	回转器	258
第五节	负阻抗变换器	261
第六节	RC有源滤波器的概念	262
	习题	263
<b>第十三章</b>	<b>非线性电路</b>	<b>265</b>
第一节	非线性元件	265
第二节	非线性电路的方程	269
第三节	小信号法与折线法	272
	习题	276
	<b>习题答案</b>	<b>278</b>
	<b>参考文献</b>	<b>289</b>

## 第一章 电路模型及其基本定律

### 内 容 提 要

本章主要介绍电路模型和理想的电路元件,包括电阻、电感、电容、独立电源和受控源等基本概念,并介绍基尔霍夫两定律及几种典型函数的波形。

### 第一节 电路模型及其主要物理量

电能工农业生产、科研、国防和日常生活中有着广泛的应用。在计算机、自控、通信等各种领域中应用电路来完成各种任务。为了对电路进行分析和计算,必须把实际部件加以近似化、理想化,用一个足以表征各部分主要特性的“模型”来表示。

什么叫“电路”呢?以电能与其它形式的能量,电信号与其它形式的信号的分配、相互转换及传输为目的的电工装置的总体。在电路中,有一个或几个输入电能或电信号的端口,把产生电能或电信号的装置称为电源也称激励源。电路中也有一个或几个输出电能或电信号的端口,在输出端口取用电能或电信号的装置称为电能接受器或称负载。连接电源和负载的部分称为导线,还有其它一些保护设备等。一个电路形成一个系统,把电源和负载组成的整个电路系统称为电网络,它和电路可以相互通用,但电网络和系统相联系,有更庞大的概念。

表征电源的抽象模型有两种,即独立电源和受控电源。根据负载在电路中所表现的物理性质加以简化,用一个或几个理想化的模型来表示称为理想化的电路元件。理想电路元件的电磁过程都集中在元件内部进行,即任何时刻,从有两端钮的理想元件某一端钮流入的电流恒等于从另一端钮流出的电流,并且元件端钮间电压值完全确定。满足上述情况的电路元件称为集总参数元件,简称集总元件。由集总元件构成的电路称为集总电路。用集总电路来近似实际电路是有条件的,即实际电路的尺寸要远小于电路工作时电磁波的波长。本书只考虑集总电路。图1-1为电路模型图。 $R$ 表示负载,电源用电压源 $U_s$ 和电阻元件 $R_s$ 的串联来表示。连接导线电阻忽略。

在电路分析中,用来表征电路的基本物理量有以下几种。

#### 1. 电流

把单位时间内通过导体截面的电量称为电流。如金属和电解液中,由于电场的作用,金属中的自由电子和电解液中的正、负离子有秩序地运动。电流的大小用电流强度表示(用符号 $i$ 表示),即

$$i = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta q}{\Delta t} = \frac{dq}{dt} \quad (1-1)$$

如果在任一瞬间通过导体截面的电量是相等的,而且方向也不随时间变化,则这种电流称为恒定电流,亦称直流,用 $I$ 表示。如果电流的大小和方向都随时间变化,称为交流电流。



在国际单位制中, 电流的单位是安培 (A)。当 1s (秒) 内通过导体截面的电荷量为 1C (库仑) 时, 则电流为 1A。计量微小电流时, 常以毫安 (mA) 或微安 ( $\mu\text{A}$ ) 为单位 ( $1\text{mA}=10^{-3}\text{A}$ ,  $1\mu\text{A}=10^{-6}\text{A}$ )。

习惯上把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中标出。如交流电路中电流随时间变化, 很难用一个固定的箭头来表示真实方向, 即使在直流电路中, 在求解复杂电路时, 也往往难以事先判断某支路中电流的实际方向。为此, 在分析与计算电路时, 可任意选定某一方向作为电流的正方向, 也称参考方向。如果电流的真实方向与参考方向一致, 电流为正值; 若两者相反, 则电流为负值。在未标电流参考方向的情况下, 电流的正、负毫无意义。为此, 在分析电路时, 先任意假设电流参考方向, 以最后计算的结果正、负来确定电流的真实方向。图 1-2 示出了电流参考方向与实际方向之间的关系。

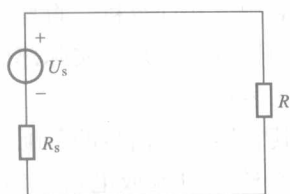


图 1-1 电路模型图

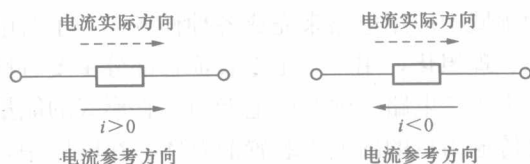


图 1-2 电流参考方向与实际方向之间的关系

## 2. 电位

单位正电荷在电场中某一点所具有的能量称为电位 (或把单位正电荷从电场中某一点 a 移到参考点 o 电场力所做的功叫做这一点 a 的电位), 其数学表达式为

$$V_a = \frac{\int_a^o \vec{F} d\vec{e}}{q} = \int_a^o \vec{E} d\vec{e} \quad (1-2)$$

电位是一个相对量, 是相对于参考电位而言。参考电位的选取是任意的。参考电位的选取不同, 电路中各点电位数值也不相同, 但两点间的电位差是不变的, 即

$$\begin{aligned} V_a - V_b &= \int_a^o \vec{E} d\vec{e} - \int_b^o \vec{E} d\vec{e} = \int_a^o \vec{E} d\vec{e} + \int_o^b \vec{E} d\vec{e} \\ &= \int_a^b \vec{E} d\vec{e} = U_{ab} \end{aligned} \quad (1-3)$$

两点之间的电位差称两点间电压。电压有正负之分。电位的单位是伏特 (V)。当电场力把 1C 的电荷量从一点移到参考点所做的功为 1J (焦耳) 时, 则该点电位为 1V。计算微小的电位时, 常以毫伏 ( $1\text{mV}=10^{-3}\text{V}$ ) 或微伏 ( $1\mu\text{V}=10^{-6}\text{V}$ ) 为单位。计量高电位时, 常以千伏 ( $1\text{kV}=10^3\text{V}$ ) 为单位。

## 3. 电压

为了衡量电场力对电荷做功的能力, 引入电压这一物理量。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。即单位正电荷从 a 点 (高电位) 移到 b 点 (低电位) 所失去的能量, 亦即电场中两点的电位差, 见式 (1-3)。电压单位同电位的一样, 为伏特 (V)。

电压方向是从高电位指向低电位。在电压与积分路径无关的前提下, 电压的值取决于起

点和终点的位置。

在交流电路中,或复杂的直流电路中,某一支路的电压的真实极性很难确定,如同电路中的电流的参考方向一样,需假设该支路电压的参考极性。电压参考极性选取是任意的。参考极性在元件或电路两端用“+”或“-”极性表示,“+”表示高电位,“-”表示低电位;也可以用一个箭头来表示。当某一支路电压的计算结果为正,说明该支路电压与参考极性方向相同;为负,则说明该支路电压真实极性与参考极性相反(见图1-3)。

在未标支路电压参考极性的前提下,电压的正、负毫无意义。电流的参考方向和电压的参考极性本可独立无关地任意假设,但为了方便采用关联的参考方向,即电流参考方向与电压参考极性由“+”到“-”方向一致。电流和电压的这种参考方向称为关联参考方向,如图1-4所示。

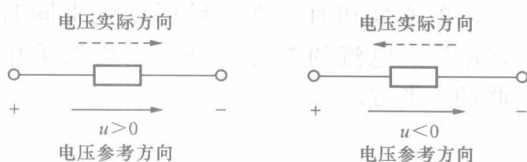


图1-3 电压参考方向与实际方向之间的关系

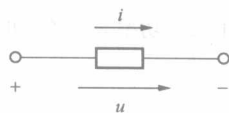


图1-4 电压和电流的关联参考方向

#### 4. 电动势

在电源内部,局外力把单位正电荷从低电位移至高电位所做的功称为电动势  $u_s$ 。由于静电场把单位正电荷从高电位移至低电位,运动的结果使静电场的电荷分布发生了变化,因而也就改变了各点的电场强度和电位,就不可能保持恒定的电流,为了保持恒定的电流必须有一种局外力(如化学力),在电源内部,把单位正电荷从低电位移至高电位,该局外力所做的功即为电动势。单位正电荷在移动过程中受到的阻力称为电源的内阻。电动势的方向是从低电位指向高电位。电动势单位同电位、电压一样。电压和电动势都表示做功,但方向不一样。电压指负载端,电动势指电源端。形成回路时电压总比电动势要小些(因电源的内阻),只有在开路时(电路中  $I=0$ )电压和电动势才相等。

#### 5. 功率

正电荷从电路元件的电压“+”极经元件到电压“-”极是电场力对电荷做功的结果,此时元件吸收能量。相反,正电荷从电路元件的电压“-”极经元件移到电压“+”极,元件向外释放能量。

从  $t_0$  到  $t$  时间内,元件吸收的电能  $W$  可由电压定义求得,即

$$W = \int_{q(t_0)}^{q(t)} u dq$$

在电压和电流关联参考方向下,由于  $i = \frac{dq}{dt}$ , 所以

$$W = \int_{t_0}^t u(\xi) i(\xi) d\xi$$

式中,  $u$  和  $i$  都是时间的函数,并且是代数量,因此,电能  $W$  也是时间的函数,也是代数量。

电能量对时间的变化率就是电功率。在电工中,电功率简称功率。

在国际单位制中,电流的单位是安培(A);电荷的单位是库仑(C);电压的单位是伏

特(V);功率的单位是瓦特(W)。

在电压和电流关联参考方向下,功率 $p$ 可写为

$$p = u(t)i(t)$$

式中, $p$ 是元件吸收的功率。当 $p > 0$ 时,元件吸收功率;当 $p < 0$ 时,元件释放功率。如果电压和电流的参考方向相反,则 $p$ 代表元件发出功率。此时, $p > 0$ ,元件发出功率; $p < 0$ ,元件吸收功率,如图1-5所示。



图1-5 功率与电流、电压关系示意图

以上介绍了电路分析中用到的几个物理量。电压、电流是电路的基本变量,是电路分析的主要对象。电路图(指复杂电路)中所标电流方向和电压的极性均为参考方向和参考极性,不一定是电路电流的真实方向和电压的真实极性。在电路图中凡未同时标出电压、电流的参考方向时,均系采用关联的参考方向。

## 第二节 理想的电路元件

电路理论是研究电路的普遍规律和普遍的计算方法的理论。在电路理论中,需要注意的是电路元件的电磁性质。为了方便和需要引入理想的电路元件。所谓理想的电路元件是指具有某种确定的电或磁的假想元件,这些假想元件及其组合可以近似但又足够准确地反映出电路元件的电磁性质和电路的电磁现象。

### 一、理想电阻元件

理想电阻元件是表征有热能损耗的二端电路元件,符号如图1-6所示。

电路基本规律包含两方面的内容:一方面是电路作为一个整体来看待,应服从什么规律;另一方面是电路的各个组成部分各有何表现。电阻元件是一种对电流呈现阻力的元件,有阻碍电流流动的本性。电流流过电阻必然会出现电压降。

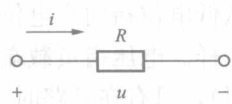


图1-6 理想电阻元件

#### 1. 无源线段电路的欧姆定律

(1) 该元件上电压 $u$ 与电流 $i$ 比值 $R$ 是一个常数,表征了该电路的特性,与 $u$ 、 $i$ 的大小无关。其 $u-i$ 关系曲线(即伏安特性曲线)是一条通过原点的直线,且于原点为对称。这种元件称为线性电阻元件。

非线性电阻元件的伏安特性曲线不是一条通过原点的直线,而是一条通过原点的曲线。

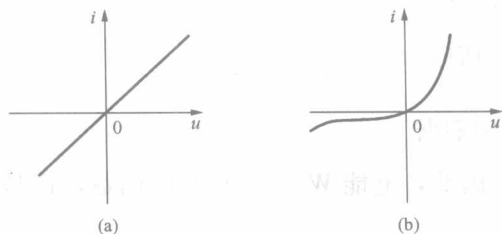


图1-7 伏安特性

(a) 线性电阻元件; (b) 非线性电阻元件

其电压与电流关系为 $u = f(i)$ 。

图1-7为线性电阻元件和非线性电阻元件的伏安特性。

(2)  $u$ 一定时, $R$ 越大, $i$ 越小, $R$ 的计算公式为

$$R = \rho \frac{l}{S}$$

式中, $\rho$ 为电阻率; $l$ 为导线长度,m; $S$ 为导

线截面,  $m^2$ ;  $R$  为导体电阻,  $\Omega$ 。

(3) 在  $u$ 、 $i$  关联参考方向下

$$p = ui$$

$p > 0$ , 元件吸收电能;  $p < 0$ , 元件释放电能。

2. 含源线段电路的欧姆定律

有源线段电路如图 1-8 所示, 以图 1-8 (a) 为例, 进行分析。

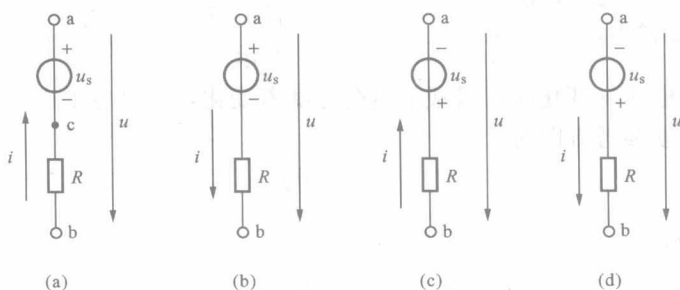


图 1-8 含源支路的欧姆定律

$$V_c + u_s = V_a$$

$$V_b - V_c = iR$$

$$u = V_a - V_b = u_s - iR$$

$$i = \frac{u_s - u}{R}$$

一般表达式为

$$i = \frac{\pm u_s \pm u}{R}$$

$u_s$  和  $u$  符号的确定: 当  $u_s$  与电流参考方向相反取“+”, 相同取“-”,  $u$  与电流方向一致时取“+”, 否则取“-”。

3. 闭合回路的欧姆定律

$$i = \frac{u_s}{R + R_s}$$

严格地说, 线性电阻是不存在的。如金属导体通过不同电流时, 导体的温度就不同, 而导体的电阻又是随温度而变化的, 因此导体通过不同电流时, 它的电阻也跟着变化, 不能保持常数。但在一定电压或电流范围内, 这种变化很小, 所以, 许多电阻器都可以用线性电阻作为其模型来表征。

## 二、理想电容元件

电容器是以不同介质隔开的两金属板的整体, 是表征储藏电场能量的电路元件。电容器带正电荷  $q$  的极板为高电位, 带负电荷  $q$  的极板为低电位, 如图 1-10 (a) 所示。若  $q$  和  $u$  的比值  $C$  与  $u$  无关, 是一个常数, 这种元件称为线性电容元件, 其关系表达式为

$$q = Cu \quad (1-4)$$

式中,  $C$  称为该元件的电容, 单位为法拉, 用 F 表示。

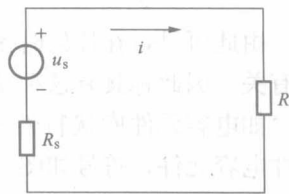


图 1-9 闭合回路的欧姆定律

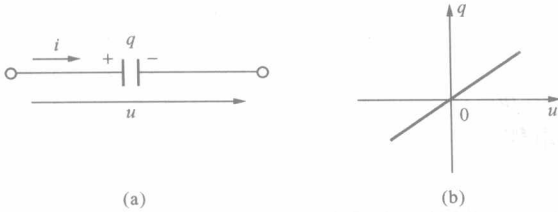


图 1-10 线性电容元件  
(a) 元件符号; (b) 库伏特性

通常采用微法 ( $1\mu\text{F}=10^{-6}\text{F}$ ) 和皮法 ( $1\text{pF}=10^{-12}\text{F}$ ) 作为电容的单位。

如果电容器的电荷  $q$  取为纵坐标,  $u$  取为横坐标, 画出电荷与电压关系曲线, 这条曲线称为电容元件的库伏特性。线性电容的库伏特性是一条通过原点的斜线, 且关于原点对称的, 如图 1-10 (b) 所示。

在电容极板间电压  $u$  变化时, 极板上电荷也随着变化, 在电容中出现电流。在电容元件上电压与电流取关联参考方向时

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

把  $q=Cu$  代入上式得

$$i = C \frac{du}{dt} \quad (1-5)$$

即  $i$  正比于  $u$  的变化率, 故电容元件称为动态元件。当元件上电压发生剧变 (即  $du/dt$  很大) 时, 电流也很大; 当电容电压不随时间变化时 (即直流) 电流为零, 这时电容元件相当于开路。故电容元件有隔断直流的作用。

对于线性电容元件, 其电压为

$$\begin{aligned} u(t) &= \int_{-\infty}^t \frac{1}{C} i(\xi) d\xi = \int_{-\infty}^0 \frac{1}{C} i(\xi) d\xi + \int_0^t \frac{1}{C} i(\xi) d\xi \\ &= u(0) + \int_0^t \frac{1}{C} i(\xi) d\xi \end{aligned}$$

其中,  $u(0) = \int_{-\infty}^0 \frac{1}{C} i(\xi) d\xi$ , 称为电容电压初始值。

由此可见, 在任何时刻电容元件的电压  $u(t)$  除与从 0 到  $t$  的电流值有关外, 还与  $u(0)$  值有关, 因此称具有这种功能的元件为“记忆”元件。

如电容元件库伏特性不是通过原点的斜线, 此元件称为非线性电容元件, 符号如图 1-11 所示。非线性电容元件的变量之间的关系为

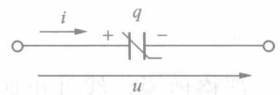


图 1-11 非线性电容元件

$$q = f(u)$$

在电压和电流的关联参考方向下, 线性电容元件吸收的功率为

$$p = ui = Cu \frac{du}{dt}$$

从  $t_0$  到  $t$  时间内, 电容元件吸收的电能为

$$\begin{aligned} W_C &= \int_{t_0}^t u(\xi) i(\xi) d\xi = \int_{t_0}^t Cu(\xi) \frac{du(\xi)}{d\xi} d\xi \\ &= C \int_{u(t_0)}^{u(t)} u(\xi) du(\xi) = \frac{1}{2} Cu^2(t) - \frac{1}{2} Cu^2(t_0) \end{aligned}$$

如取  $t_0$  为电压等于零的时刻, 即  $u(t_0) = 0$ , 此时电容元件处在未充电状态。在上述条件下, 电容元件在任何时刻  $t$  所储存的电场能量  $W_C(t)$  等于它所吸收的能量, 即

$$W_C(t) = \frac{1}{2}Cu^2(t)$$

从时间  $t_1$  到  $t_2$ , 电容元件吸收的电能为

$$\begin{aligned} W_C &= C \int_{u(t_1)}^{u(t_2)} u(\xi) du(\xi) = \frac{1}{2}Cu^2(t_2) - \frac{1}{2}Cu^2(t_1) \\ &= W_C(t_2) - W_C(t_1) \end{aligned}$$

理想电容元件在充电时储存能量, 在放电时释放能量, 并不消耗能量。电容元件是一种储存电场能量的元件, 不会释放出多于其吸收或储存的能量, 因此它又是一种无源元件。

“电容”有两重含义, 它既表示一个电容元件, 又表示这个元件的参数。

### 三、理想电感元件

理想电感元件是表征储存磁场能量的二端理想电路元件。选定线圈中电流的正方向与产生磁通的正方向符合右螺旋的关系。电感上电压  $u$  和自感电动势  $e_L$  的正方向与电流  $i$  正方向一致。 $\Phi_L$  和  $\Psi_L$  是由线圈本身产生的自感磁通和自感磁链。 $\Psi_L$  与  $i$  之比  $L$  是一个常数, 与  $i$  (或  $u$ ) 无关, 这种元件被称为线性电感元件, 如图 1-12 (a) 所示。

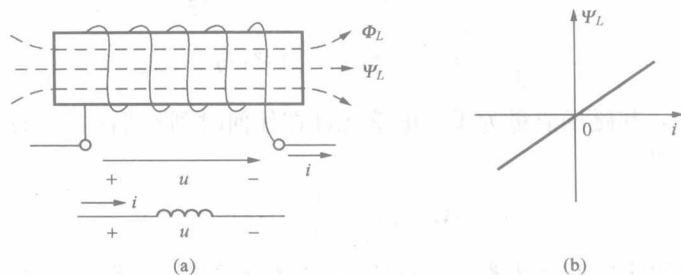


图 1-12 线性电感元件  
(a) 元件符号; (b) 韦安特性

线性电感满足下列关系

$$\Psi_L(t) = Li(t)$$

而

$$u(t) = -e_L(t) = \frac{d\Psi_L(t)}{dt} = L \frac{di(t)}{dt} \quad (1-6)$$

其中, 参数  $L$  称为自电感, 简称电感, 单位亨利 (H), 简称亨。通常还采用毫亨 (mH) 和微亨 ( $\mu\text{H}$ ) 作为电感的单位。 $\Psi_L$ - $i$  特性即韦安特性是一条通过原点的斜线, 如图 1-12 (b) 所示。直流时  $\frac{di}{dt} = 0$ , 故  $u = 0$ , 电感在直流电路中相当于短路,  $u$  和  $i$  之间的微分关系说明电感元件也称为动态元件。

在  $u$  与  $i$  关联参考方向下

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

如取  $t_0$  为计时起点, 且设为零, 则上式可写为

$$i(t) = i(0) + \frac{1}{L} \int_0^t u(\xi) d\xi$$

式中,  $i(0)$  称为电感中电流的初始值。

在任何时刻  $t$ , 电感元件的电流  $i(t)$  与初始值  $i(0)$  及从 0 到  $t$  所有电压值有关, 所以也称电感元件为记忆性元件。

如电感元件的韦安特性不是通过  $\Psi_L-i$  平面上过原点的一条斜线 (而是过原点的一条曲线), 即为非线性电感元件, 非线性电感元件的韦安特性可用下列公式表示, 即

$$\Psi_L = f(i)$$

或

$$i = h(\Psi_L)$$

线性电感元件简称“电感”, 它的符号  $L$  即表示一个电感元件, 又表示该元件的参数。

在电感和电流关联参考方向下, 线性电感元件吸收的功率为

$$p = ui = iL \frac{di}{dt}$$

从  $t_0$  到  $t$ , 电感元件吸收的电能为

$$\begin{aligned} W_L &= \int_{t_0}^t u(\xi) i(\xi) d\xi = \int_{t_0}^t Li(\xi) \frac{di(\xi)}{d\xi} d\xi \\ &= L \int_{i(t_0)}^{i(t)} i(\xi) di(\xi) = \frac{1}{2} Li^2(t) - \frac{1}{2} Li^2(t_0) \end{aligned}$$

如果  $i(t_0) = 0$ , 其磁场能量为零。电感元件在任何时刻  $t$  所储存的磁场能量  $W_L(t)$  等于它所吸收的能量, 即

$$W_L(t) = \frac{1}{2} Li^2(t)$$

电感元件吸收的能量不是被消耗, 而是以磁场能量的形式储存在磁场中。

在电路中, 空心线圈可以用电感元件表征其储存磁场能量的性质, 线圈的电阻也不可忽略, 因此用线性电阻元件和线性电感元件的串联组合表示空心线圈。



图 1-13 实际元件模型

实际电感器和电容器的模型如图 1-13 所示。

一个电感线圈看成一个理想电感元件模型是近似的。如果考虑线圈的阻值, 可以用一个理想电感元件  $L$  和理想电阻元件  $R$  串联表示, 见图 1-13。

如果电路中频率很高, 匝与匝间电容不能忽略, 模型中用一个跨接线圈两端电容来近似。一个实际电容器可以用理想电容元件来做模型, 在能量损失不容忽略时, 在模型中加一个并联电导。在电压频率很高时, 电流  $C \frac{du}{dt}$  产生不能忽略的磁场时, 在模型中增加一个电感  $L$ 。

为什么电感线圈的能量损失用串联电阻来表示, 而电容器的能量损失用并联电导来表示呢? 对电感线圈其能量损失取决于流过的电流, 因此与  $L$  串联电阻能较好地反映实际情况。对于电容器来说, 能量损失在介质中取决于两端电压, 因此用与  $C$  并联的电导来表示。

所谓元件模型只能近似地代表实际部件, 要使模型更精确地表示实际部件, 就需要增添

更多的理想元件，模型会很复杂。因此，在精确性与复杂性之间进行折衷处理。在电压、电流变化率很高时，已不能用集中理想元件来反映实际部件性质，应采用分布参数的概念来描述。

### 第三节 两种电源

电源有两种，独立电源和受控电源。

#### 一、独立电源

独立电源分为电压源和电流源。

##### 1. 电压源

电压源是一个二端理想元件，元件电压  $u_s$  是定值或是一定的时间函数，与流过的电流无关。流过它的电流不是由电压源本身确定，而是由与之相接的外电路来决定。

电压源在电路中的符号，如图 1-14 (a)， $u_s$  为电压源电压，其极性“+”表示高电位，“-”表示低电位。若  $u_s$  为常数，这种电压源称为直流电压源，其伏安特性如图 1-15 (b) 所示。

直流电压源的伏安特性是一条不通过原点与电流轴平行的直线。如果电压源没接外电路，此时  $i$  为零值，电压源两端电压为  $u_s$ ，电源处在开路（状态）。如果  $u_s=0$ ，电压源相当于短路。

电压源的电压和通过电压源的电流的参考方向通常取非关联的参考方向，此时，电压源发出的功率为

$$p(t) = u_s(t)i(t)$$

上述的电压源亦称理想电压源，实际是不存在的，因为电源总是有内阻的。通常用一个理想电压源  $u_s$  和内阻  $R_s$  相串联的模型来表征实际电压源，如图 1-15 所示。

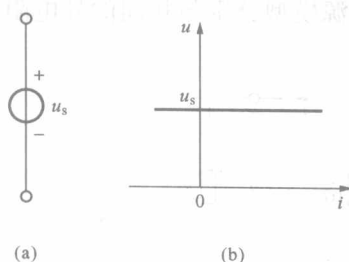


图 1-14 电压源符号和其伏安特性

(a) 元件符号；(b) 直流电压源伏安特性

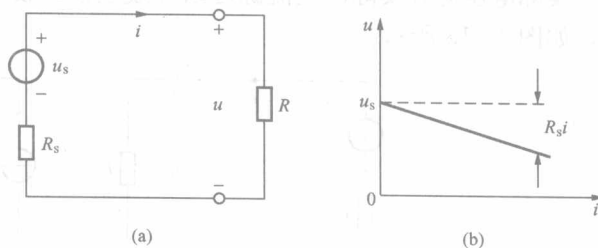


图 1-15 实际电压源

(a) 电路图；(b) 伏安特性

从该电源模型可求得  $u$ ，即电源端电压

$$u = u_s - R_s i$$

上式清楚地表明：电源端电压  $u$  低于  $u_s$ ，所低之值就是电源内阻上的压降  $R_s i$ ，电流越大，端电压  $u$  越低，其伏安特性是一条略微下倾的直线。实际电压源的内阻很小，在  $R_s \ll R$  ( $R$  为负载) 时， $R_s$  可以忽略，因此可把这种实际电压源称为理想电压源（即电压源）。

##### 2. 电流源

电流源也是一个二端理想元件，通过电流源的电流与电压无关。它的电流是定值或是一



定的时间函数,不会因其所连接的外电路的不同而改变。电流源的端电压不是由电流源本身确定的,而是由与之相连接的外电路决定,其符号和伏安特性如图 1-16 所示。

电流源中,电流是给定的,其电压大小与外电路有关。如果电流源电流和电压参考方向为非关联参考方向,此时,电源发出的功率为

$$p(t) = u(t)i_s(t)$$

上述的电流源也称理想电流源,实际上是不存在的。如光电池,被光激发产生的电流并不能全部外流,其中一部分将在光电池内部流动。因此,实际的电流源可以用一个理想电流源  $i_s$  和内阻  $R_s$  的并联模型来表征,内阻  $R_s$  表明了电源内部的分流效应,如图 1-17 (a) 所示。

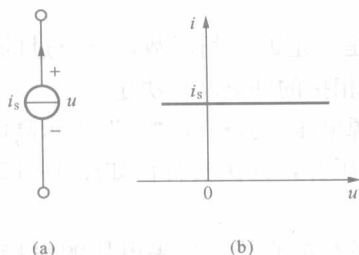


图 1-16 电流源

(a) 元件符号; (b) 伏安特性

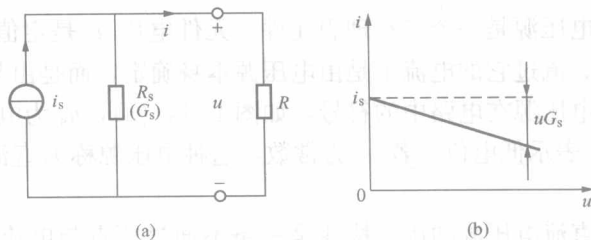


图 1-17 实际电流源

(a) 电路图; (b) 伏安特性

从电流源模型可求得

$$i = i_s - \frac{u}{R_s} = i_s - uG_s$$

上式表明:实际电流源往外输出的电流小于  $i_s$ 。端电压越大,其内阻  $R_s$  分流也越大,输出的电流就越小,其伏安特性如图 1-17 (b) 所示。

实际电压源和实际的电流源可以等效互换,设两个电源模型分别与相同的外电阻  $R$  相联,如图 1-18 所示。

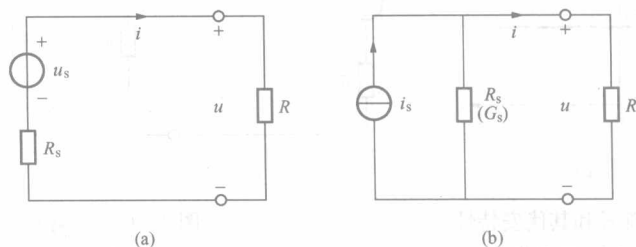


图 1-18 实际电源电路

(a) 实际电压源; (b) 实际电流源

对实际电压源而言

$$u = u_s - R_s i$$

即

$$i = \frac{u_s}{R_s} - \frac{u}{R_s}$$