

21世纪电学科高等学校教材

电路理论 基础

张秀然 等 主编



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

21世纪电学科高等学校教材

电路理论基础

主 编 张秀然 董桂菊 郭 永
副主编 张 青 俎云霄 沈明霞
主 审 张长利



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书是由全国高等农业院校电学科教材研究会组织编写的系列教材之一。该书的内容符合全国高等农业院校电学科教材研究会审定的《电路理论基础》教学大纲的要求。

本书主要内容有：电路分析的基本概念和基本定律、线性电阻电路的分析、正弦交流电路、谐振与互感、三相电路、非正弦周期电流电路、一阶电路和二阶电路、拉普拉斯变换、二端口网络、网络图论和网络方程等。

本教材适用于高等工科院校各类电专业的电路课程教材，也可作为电气工程技术人员和电气技术爱好者的参考书。

图书在版编目（CIP）数据

电路理论基础/张秀然等主编. —北京：中国水利水电出版社，2001

21 世纪电学科高等学校教材

ISBN 7-5084-0763-6

I. 电… II. 张… 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（2001）第 053350 号

书 名	21 世纪电学科高等学校教材 电路理论基础
作 者	张秀然 等 主编
出版、发行	中国水利水电出版社（北京市三里河路 6 号 100044） 网址：www.waterpub.com.cn E-mail：sale@waterpub.com.cn 电话：（010）63202266（总机）、68331835（发行部） 全国各地新华书店
经 售	
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	水利电力出版社印刷厂
规 格	787×1092 毫米 16 开本 18.75 印张 445 千字
版 次	2001 年 9 月第一版 2001 年 9 月北京第一次印刷
印 数	0001—5400 册
定 价	29.00 元

凡购买我社图书，如有缺页、倒页、脱页的，本社发行部负责调换

版权所有·侵权必究

前 言

《电路理论基础》一书是由全国高等农业院校电学科教材研究会组织编写的系列教材之一。该书的内容符合全国高等农业院校电学科教材研究会审定的《电路理论基础》教学大纲，适用于高等工科院校各类电专业电路课程教材，以及电气工程技术人员和电气技术爱好者参考用书。

在本教材编写过程中，作者总结和吸收了各院校教学和教学改革的有益经验，注重理论的系统性和实用性，力求重点突出和具有启发性。同时，修改了对一些问题的分析思路和解答方法，使之更适合于课堂讲授和学生自学。书中例题、习题丰富，图形、文字符号均采用最新国家标准。本教材参考学时为 90~120 学时。

参加本教材编写的单位有：沈阳农业大学、东北农业大学、河北农业大学、内蒙古农业大学、南京农业大学、黑龙江“八一”农垦大学等六所院校。

本书编写人员：张秀然、董桂菊、郭永、俎云霄、张青、沈明霞、肖志刚、吴仕宏、梁春英，全书由东北农业大学张长利主审。

由于编者水平和时间所限，书中疏漏和不足之处在所难免，恳请读者批评指正。

作 者

2001 年 7 月

目 录

前 言

第一章 电路分析的基本概念和基本定律	1
第一节 电路和电路图	1
第二节 参考方向	2
第三节 独立源	9
第四节 基尔霍夫定律	11
第五节 电阻的联接及电源等效变换	20
第六节 受控源	27
习题	29
第二章 线性电阻电路的分析	33
第一节 回路电流法	33
第二节 节点电压法	40
第三节 叠加定理	50
第四节 替代定理	55
第五节 等效电源定理	56
第六节 对偶原理	67
第七节 互易定理	68
习题	71
第三章 正弦交流电路	75
第一节 正弦交流电	75
第二节 正弦量的相量表示法	79
第三节 R 、 L 、 C 中通交流电	83
第四节 复阻抗、复导纳及其等效变换	89
第五节 正弦交流电路中的功率	99
第六节 正弦稳态电路的计算	104
第七节 功率因数的提高	110
习题	113
第四章 谐振与互感	117
第一节 串联电路的谐振	117
第二节 并联电路的谐振	125
第三节 互感	128
第四节 含互感电路的计算	134
第五节 空心变压器	140

第六节 理想变压器	145
习题	152
第五章 三相电路	155
第一节 三相电路的特点	155
第二节 对称三相电路的计算	158
第三节 不对称三相电路的计算	162
第四节 三相电路的功率	164
习题	166
第六章 非正弦周期电流电路	169
第一节 非正弦周期电流和电压	169
第二节 有效值、平均值和平均功率	171
第三节 非正弦周期电流电路的分析	175
习题	178
第七章 一阶电路和二阶电路	181
第一节 过渡过程的概念	181
第二节 一阶电路的零输入响应	185
第三节 一阶电路的零状态响应	190
第四节 一阶电路的全响应及三要素法	193
第五节 一阶电路的阶跃响应和冲激响应	198
第六节 一阶电路对正弦激励的响应	204
第七节 二阶电路的零输入响应	206
习题	211
第八章 拉普拉斯变换	215
第一节 引言	215
第二节 拉普拉斯变换的定义	215
第三节 拉普拉斯变换的基本性质	216
第四节 拉普拉斯反变换	221
第五节 电路基本定律及元件伏安关系的复频域形式	225
第六节 用拉普拉斯变换分析线性电路	228
第七节 网络函数	233
第八节 网络函数的零点和极点	236
第九节 卷积	238
习题	240
第九章 二端口网络	244
第一节 二端口网络	244
第二节 二端口网络的参数方程	245
第三节 二端口网络的等效电路	255
第四节 二端口网络的联接	258

第五节 回转器	261
习题	262
第十章 网络图论和网络方程.....	265
第一节 网络图的基础知识	265
第二节 关联矩阵、回路矩阵、割集矩阵	269
第三节 节点电压方程的矩阵形式	275
第四节 回路电流方程的矩阵形式	281
第五节 割集电压方程的矩阵形式	282
第六节 状态方程	284
第七节 特勒根定理	288
习题	291
参考文献	294

第一章 电路分析的基本概念和基本定律

本章从引入电路模型的概念开始,介绍常用的二端元件电阻、电感、电容、独立电源、受控源等元件及其伏安特性;简单电路等效变换的方法:包括电阻和电源的串联、并联,Y— Δ 变换及电源的等效变换;同时引进电流和电压的参考方向及基尔霍夫两个定律:电流定律和电压定律。

第一节 电路和电路图

实际电路是由电气器件相互联接而构成的,按照在电路中所起的作用不同,这些器件可以分为电源、负载和传输控制器件三大类。电源提供电能或电信号,负载使用电能或接收电信号,电源和负载的联接部分则是传输控制器件。

实际电路的形式和作用是多多种多样的,其物理尺寸也相差甚大。有的可以延伸到数百公里以上(如电力系统和通讯系统),有的则只分布于几平方毫米以内(如集成电路的芯片)。就其目的而言,或者是为了实现电能的传输和分配,或者是为了处理各种电信号。而不论哪一种实际电路,随着电流的通过,电路中总是进行着电能与其它形式的能量转换的过程。电路的种类虽然很多,但他们都是建立在同一理论上,这个理论基础就是电路理论。研究电路理论的目的是计算电路中流过各器件的电流和端子间的电压,而不涉及器件内部发生的物理过程。

在分析和研究电路的工作时,总是把构成电路的实际器件抽象成一些理想化的模型。这些理想化的模型叫做理想电路元件。理想电路元件是具有某种确定的电或磁性质的假想元件,他们以及他们的组合可以反映出实际电路元件的电特性及电路的电磁现象。

当实际电路的线性尺寸远小于电路工作时电磁波的波长或者说电磁波通过电路的时间是瞬时的,则整个电路的实际尺寸可以略而不计,因而可以把它集总在一起,用足以反映其电磁性质的一个或有限个分立的电阻、电感、电容等元件来加以描述,这种理想电路元件就叫做集总参数元件,或叫集总元件。在集总参数元件中,电阻、电感、电容是三种最基本的元件。这些元件在任何时刻对外界均不提供能量,因此又叫做无源元件。而有些元件可以对外界提供能量,这种元件我们称之为有源元件,两种基本的有源元件是电压源和电流源。

电路元件有很多种,具有两个端钮的叫做二端元件,具有两个以上端钮的叫做多端元件。在集总参数的情况下,在任何时刻,从二端元件的某一端钮流入的电流必然等于从另一端钮流出的电流;并且,元件两个端钮之间的电压值也是完全确定的。同样,对于一个多端元件,在任何时刻,从任一端钮流入的电流值及任意两个端钮之间的电压值也都是完全确定的。由集总参数元件构成的电路叫做集总参数电路。本书只讨论集总参数电路。

实际元件可以用理想元件或其组合来近似代替,从而构成了与实际电路相对应的电路

模型。今后所说的电路一般均指这种抽象电路而非实际电路。

图 1-1 所示的一个简单的实际电路，其中有一个电源（干电池），一个负载（小灯泡）和两根联接导线；其电路模型如图 1-2 所示，电阻元件 R 表示小灯泡，干电池则用电压源 U_0 和电阻元件 R_0 的组合表示，而联接导线消耗电能很少，一般可以认为其电阻为零。

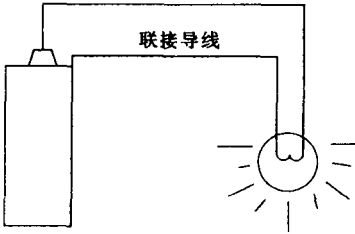


图 1-1 一个简单的实际电路

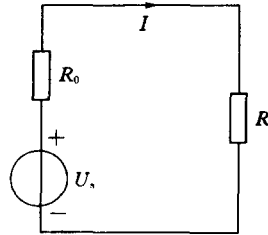


图 1-2 图 1-1 的电路模型

应当注意：一个实际电路的元件，根据不同情况，可以抽象成为不同形式的集总参数电路，即代之以不同形式的集中参数电路模型。例如，在工作频率比较低时，一个线圈就可以用电阻和电感元件的串联组合构成的模型来描述；当频率较高时，线圈绕线之间的电容效应就不能忽视。这种情况下表征这个线圈的较准确的模型还应当包含电容元件。

第二节 参 考 方 向

电流在导线中或在电路元件中流动的实际方向只有两种可能。习惯上规定正电荷移动的方向为电流的实际方向。在图 1-3 中，当正电荷从 A 端移向 B 端，电流的实际方向由 A 端指向 B 端，反之，则认为电流是从 B 端流向 A 端。

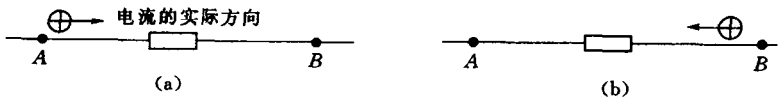


图 1-3 电流方向

在电路分析中，当电路比较复杂时，某一段电路中电流实际方向很难预先判断出来，有时电流的实际方向还在不断地改变，因此无法直接标明电流的实际方向。由于这些原因，引入了电流“参考方向”的概念。

在图 1-4 中，选定其中某一方向作为电流的方向，这个方向叫做电流的参考方向。当然所选的电流方向并不一定就是电流实际的方向。当电流的实际方向与参考方向一致时，电流为正值 ($i > 0$)；如果电流的实际方向与参考方向相反，则电流为负值 ($i < 0$)。这样一来，我们就把电流看成是一个代数量，它既可以是正值，也可以是负值。

电流的参考方向是任意指定的，在电路中一般用实心箭头表示；也可用双下标表示，如 i_{AB} ，表示其参考方向是由 A 指向 B 。

应当强调指出，今后在电路图中所标明的电流方向都是电流的参考方向，它并不一定是电流的实际方向。但是，只要指定了电流的参考方向之后，根据电流的正负，就完全可

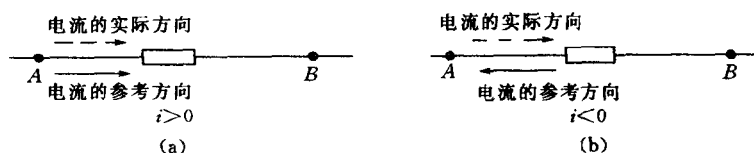


图 1-4 电流的参考方向与它的实际方向间的关系

以确定电流的实际方向。电流的参考方向也叫做电流的正方向。

同理，两点之间的电压实际方向（即高电位点指向低电位点的方向）只有两种可能，可以选定其中任意一个方向为电压的参考方向。同时，把电压看成代数数量。当电压的参考方向与它的实际方向一致时，电压为正值 ($u > 0$)；反之，当电压的参考方向与它的实际方向相反时，电压为负值 ($u < 0$)，见图 1-5。

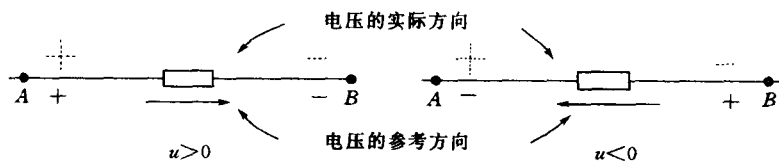


图 1-5 电压的参考方向与它的实际方向间的关系

电压的参考方向也是任意指定的。在电路中，电压的参考方向除了可用“+”、“-”极性表示外，还可以用一个实心箭头表示（如图 1-5）；也可用双下标表示，如 u_{AB} 表示 A 和 B 之间电压的参考方向，是由 A 指向 B。

电流，电压的参考方向在标定时具有任意性，从两者间关系看，应该是彼此独立的。为了处理问题方便，在同一段电路中，尽可能使电流的参考方向与电压的参考方向取为一致，即电流的参考方向从标以电压“+”极性的一端流入，并从标以“-”极性的一端流出，在这种情况下，我们说电流与电压的参考方向一致，并称其为关联参考方向。如图 1-6 所示。在关联参考方向下，只需标明电压或电流二者之一的参考方向即可。

参考方向的引入，对于确定元件是吸收还是发出功率，至关重要。

正电荷从电路元件的电压“+”极，经元件移到电压“-”极，是电场力对电荷作功的结果，这时元件吸收能量。相反地，正电荷从电路元件的电压“-”极经元件移到电压“+”极，元件向外发出能量。电路元件吸收或发出能量对时间的变化率就是电功率，有时简称为功率。

设图 1-7 中的方框为电路的一部分，如果通过它的电流是 i ，它两端的电压是 u ，电流和电压在关联参考方向下，如图中所示。根据电压的定义可知，当正电荷 dq 由 a 点移到 b 点时，这部分电路吸收的能量为

$$dw = udq$$

又因

$$dq = idt$$

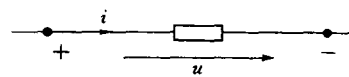


图 1-6 电压和电流的
关联参考方向

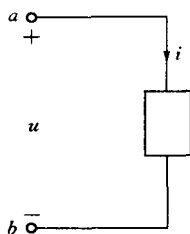


图 1-7 电功率

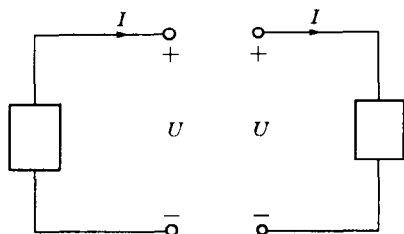


图 1-8 例 1-1 图

故

$$dw = uidt$$

这是这部分电路在时间 dt 内所吸收的电能。

在单位时间内这部分电路的电功率，用字母 p 表示，可得

$$p = \frac{dw}{dt} = ui \quad (1-1)$$

在国际单位制中，电功率的单位是瓦特，简称瓦 (W)。

式 (1-1) 中， p 是电路吸收的功率。即在关联参考方向下，当 $p > 0$ 时表示这部分电路吸收 (消耗) 功率，而 $p < 0$ 时则表示这部分电路发出 (供给) 功率；若电压和电流在非关联参考方向下， $p > 0$ 表示发出功率，而 $p < 0$ 表示吸收功率。以上有关功率的讨论不仅适用于一段电路，而且也适用于一个元件。

【例 1-1】 在图 1-8 中有两个二端元件，其电压均为 $U = 32 \text{ V}$ ，电流均为 $I = 0.1 \text{ A}$ 。试求他们的功率。

解 右侧元件为关联参考方向

$$P = UI = 32 \times 0.1 = 3.2 \text{ (W)}$$

$P > 0$ 表明元件吸收功率。

左侧元件 U 、 I 为非关联参考方向

$$P = UI = 3.2 \text{ (W)}$$

$P > 0$ 表明元件发出功率。

如前所述，在实际电路中可用反映其主要电磁性质的一些理想元件替代实际器件。这些理想元件是通过端钮与外部相联接的。下面将讨论无源二端理想元件：线性电阻元件、线性电感元件和线性电容元件。

一、电阻元件

电阻是反映能量消耗的电路元件。在电路理论中，电阻元件是用以模拟电阻器和其他实际部件电阻特性的。线性电阻元件是一个二端元件，其端电压与电流之间的关系服从欧姆定律，在关联参考方向下，如图 1-9 所示，其 u 、 i 关系为

$$u = Ri \quad (1-2)$$

R 称为元件的电阻，其单位为 Ω (欧姆)，简称欧。

令 $G = \frac{1}{R}$ ，则式 (1-2) 变为

$$i = Gu$$

式中 G 称为电阻元件的电导。其单位为西门子，简称西，用字母 S 表示。

式 (1-2) 是电阻元件的电压和电流在关联参考方向下而得到的 (见图 1-9)，若电阻元件的电压和电流取非关联参考方向，见图 1-10，则欧姆定律应写成

$$u = - Ri$$

或

$$i = - Gu$$

可见，公式在参考方向不同时是不同的，这一点读者应特别注意。

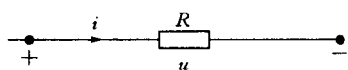


图 1-9 线性电阻元件的图形符号

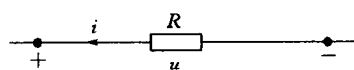


图 1-10 电阻元件在非

关联参考方向下

如果把电阻元件的电压取为纵坐标 (或横坐标)，电流取为横坐标 (或纵坐标)，对应于一系列的电压和电流值就得到一条代表电流与电压之间的函数关系曲线，这种曲线叫做电阻的伏安特性曲线，简称伏安特性。见图 1-11。线性电阻元件的伏安特性是通过坐标原点的一条直线，其电阻值可由它的伏安特性的斜率来确定，是一个常数。即

$$R = \frac{u}{i} = \frac{m_u}{m_i} \tan \alpha$$

其中 m_u ， m_i 分别为电压和电流在 $u-i$ 平面坐标上的比例尺， α 为伏安特性直线与电流轴间的夹角。

在电压和电流的关联参考方向下，任何时刻线性电阻元件吸收的电功率可按下式计算

$$p = ui = Ri^2 = Gu^2$$

因电阻 R 、电导 G 的值为正实常量，所以功率 p 恒为非负值。说明任何时刻电阻元件吸收的电能量全部转换成其它形式

的能量被加以利用或损耗掉。因此，线性电阻元件不仅是无源元件。而且还是耗能元件。

由欧姆定律还可看出，任一时刻电阻的电压仅与该时刻的电流有关，而与该时刻以前的电流值无关。这就是说，电阻的电压 (或电流) 不能“记忆”前一时刻电流 (或电压) 在电阻上所起的作用。所以电阻又是无记忆元件。

与线性电阻元件不同，非线性电阻元件的伏安特性不是一条通过原点的直线，例如二极管的伏安特性。因元件上电压和元件电流间不服从欧姆定律，且元件的电阻将随电压或电流改变而改变，所以不能再用一个参数 R 或 G 来表示。只能通过它的伏安特性来描述。

如果电阻元件的伏安特性不随时间改变，则称为非时变电阻元件；反之，伏安特性随时间改变的，则称为时变电阻元件。

今后，为叙述方便，把线性电阻元件简称为电阻。这样，“电阻”这个术语以及它相应的符号 R ，一方面表示一个电阻元件；另一方面也表示这个元件的参数。

二、电感元件

线性电感元件是一个二端理想元件，它是用导线绕制而成的线圈的电路模型。当忽略导线电阻，便成了理想的电感元件。现在我们来研究其中电压 u 和电流 i 的关系。

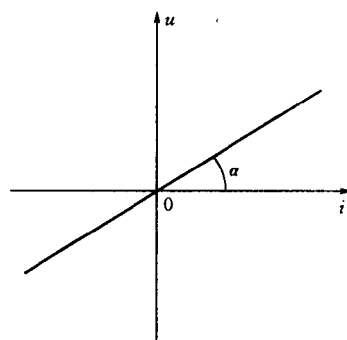


图 1-11 线性电阻元件伏安特性

线圈中通以电流之后，在元件内部将产生磁通 φ_L ，若磁通 φ_L 与线圈 N 匝都交链，则磁通链

$$\psi_L = N\varphi_L$$

见图 1-12 (a)。

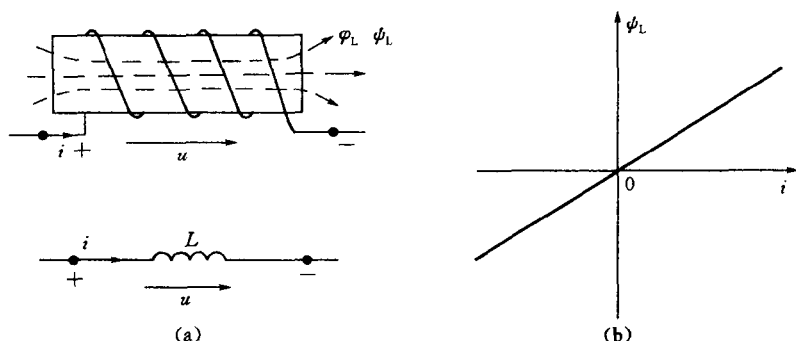


图 1-12 线性电感元件的图形符号及其韦安特性

φ_L 和 ψ_L 均由线圈本身的电流所产生，所以称其为自感磁通和自感磁通链，在国际单位制中，磁通和磁通链的单位是韦伯 (Wb)。

当选定磁通 φ_L 和磁通链 ψ_L 的参考方向与电流 i 的参考方向之间满足右手螺旋定则，则有

$$\psi_L = Li \quad (1-3)$$

式中 L 称为该元件的自感或电感，其单位是亨利 (H)，简称亨。有时还采用毫亨 (mH) 和微亨 (μH) 作为自感的单位。

在直角坐标系中，以电感元件的自感磁链 ψ_L 为纵坐标 (或横坐标)，电流 i 为横坐标 (或纵坐标)，对于一系列的自感磁链和电流值得到一条代表自感磁链与电流之间的函数关系曲线，这种曲线叫做电感的韦安特性曲线，简称韦安特性。线性电感元件的韦安特性是一条通过坐标原点的直线，如图 1-12 (b) 所示。线性电感的电感值可由它的韦安特性的斜率来确定，是一个常数。

在电感元件中电流 i 随时间变化时，磁通链 ψ_L 也随之而改变，元件两端感应有电压，此感应电压等于磁通链的变化率；在电压和电流的关联参考方向下，则电压的参考方向与磁通链的参考方向间为右手螺旋关系，见图 1-12 (a)。根据楞次定律，感应电压

$$u = \frac{d\psi_L}{dt}$$

将式 (1-3) 代入上式后得

$$u = L \frac{di}{dt} \quad (1-4)$$

式 (1-4) 表明：任何时刻，线性电感元件上的端电压不是与电流 i 成正比，而是与电流 i 对时间的变化率 $\frac{di}{dt}$ 成正比。电流变化快，感应电压高；电流变化慢，感应电压低。在恒定电流情况下 (直流)，由于电流恒定不变，端电压等于零。电感呈短路状态。

在电压和电流的关联参考方向下，电感元件中的电流也可表示为电压的函数，对式

(1-4) 积分可得

$$\begin{aligned} i(t) &= \frac{1}{L} \int_{-\infty}^t u(\xi) d\xi = \frac{1}{L} \int_{-\infty}^{t_0} u(\xi) d\xi + \frac{1}{L} \int_{t_0}^t u(\xi) d\xi \\ &= i(t_0) + \frac{1}{L} \int_{t_0}^t u(\xi) d\xi \end{aligned} \quad (1-5)$$

上式说明：电感电流在某时刻 t 的量值取决于初始值 $i(t_0)$ 和从 t_0 到 t 为止的所有电压值。可见，电感是一种记忆元件。

现在从能量的角度来作分析。在图 1-12 (a) 所示的关联参考方向下，线性电感元件吸收的瞬时功率为

$$p = ui = Li \frac{di}{dt} \quad (1-6)$$

从 t_0 到 t 时间内，电感元件吸收的电能为

$$\begin{aligned} W_L &= \int_{t_0}^t u(\xi) i(\xi) d\xi = \int_{t_0}^t Li(\xi) \frac{di(\xi)}{d\xi} d\xi \\ &= L \int_{i(t_0)}^{i(t)} i(\xi) di(\xi) = \frac{1}{2} Li^2(t) - \frac{1}{2} Li^2(t_0) \end{aligned} \quad (1-7)$$

如果选取 t_0 为电流等于零的时刻，即有 $i(t_0) = 0$ ，则式 (1-7) 变为

$$W_L = \frac{1}{2} Li^2(t) \geq 0 \quad (1-8)$$

这意味着电感元件对外电路不提供能量，因而它是无源元件。

从式 (1-6)、(1-7) 可知，由于 $\frac{di}{dt}$ 可以大于零，也可以小于零，因而瞬时功率 p 可正可负。当 $p > 0$ 时，电感吸收能量，并转换成磁场能量储存在磁场中；当 $p < 0$ 时，电感释放磁场能量。并转换成电能送回电源。可见，电感元件并不消耗能量，而是“吞吐”能量，所以它是一种储能元件。

空心线圈可以用线性电感元件来表征其储存磁场能量的特性。由于空心线圈的电感一般不大，而线圈导线电阻的损耗有时则不可忽略，故往往用线性电阻元件和线性电感元件的串联组合作为空心线圈的模型。

非线性电感元件的韦安特性曲线不是一条通过 ψ - i 坐标原点的直线。非线性电感元件的典型例子就是具有铁心的线圈。在线圈中放入铁心后，一般说来电感就不再是常数。不过，如果铁心中含有较大的空气隙，或者在铁磁材料的非饱和状态下工作，那么韦安特性仍近似是线性的。所以，在这种情况下，铁心线圈可以当做线性电感元件来处理。

以后，为了叙述方便，把线性电感元件简称为电感。所以“电感”这个术语以及它的相应符号 L ，一方面表示一个电感元件；另一方面也表示这个元件的参数。

三、电容元件

电容器是储存电场能量的电路元件，其主要参数就是电容。然而电容却不仅仅是电容器的参数，在实际电路中到处都有分布电容。例如线圈的分布电容和传输线的线间分布电容等。这些分布电容的作用，在低频或短线条件下并不明显，但在高频或长线条件下，将成为影响实际电路性能的重要因素。

在电路理论中,为了模拟电容器和其它实际部件的电容特性,引入了电容元件。实际电容器是由两块金属板间隔以不同的介质(如云母、绝缘纸、电解质等)所组成。加上电源后,极板上分别聚集起等量异性的电荷,在介质中建立起电场,并储存有电场能量,电源移去后,电荷仍可以继续聚集在极板上,电场继续存在。

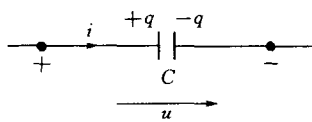


图 1-13 线性电容元件的图形符号

线性电容元件在电路中的图形符号如图 1-13 所示。图中 $+q$ 和 $-q$ 是该元件正、负极板上的电荷量。当电容元件上电压的参考方向规定由正极板指向负极板时,则任何时刻正极板上的电荷 q 与两极板间的电压 u 有如下关系

$$q = Cu \quad (1-9)$$

式中 C 称为元件的电容。单位为法拉,简称法(F)。有时还采用 μF (10^{-6}F) 和 pF (10^{-12}F) 作为电容的单位。

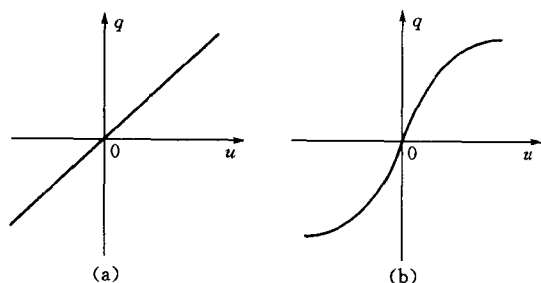


图 1-14 库伏特性

在直角坐标系中,以电容元件的电荷 q 为纵坐标(或横坐标),电压 u 为横坐标(或纵坐标),对于一系列的电荷和电压值就得到一条代表电荷与电压之间的函数关系的曲线,这种曲线叫做电容的库伏特性曲线,简称库伏特性。线性电容的库伏特性是一条通过坐标原点的直线[见图 1-14(a)]。其电容可由它的库伏特性的斜率来确定,是一个常数。非线性电容元件的库伏特性不是直线,如图 1-14(b) 所示。

这里只讨论线性电容。

当极板间电压 u 变化时,极板上电荷也随之而变,于是电容器电路中出现电流。当电压与电流在关联参考方向下时,见图 1-13,则电流

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

把式 (1-9) 代入上式后得

$$i = C \frac{du}{dt} \quad (1-10)$$

上式说明:在任何时刻,线性电容元件中的电流与其两端电压对时间的变化率成正比。当元件上电压发生剧变(即 $\frac{du}{dt}$ 很大)时,电流也很大;当电压不随时间变化时,则电流为零。在直流情况下,由于电压恒定不变,电流为零,电容呈开路状态。

电压 $u(t)$ 也可表示成电流 $i(t)$ 的函数,对式 (1-10) 两边积分可得

$$\begin{aligned} u(t) &= \frac{1}{C} \int_{-\infty}^t i(\xi) d\xi = \frac{1}{C} \int_{-\infty}^{t_0} i(\xi) d\xi + \frac{1}{C} \int_{t_0}^t i(\xi) d\xi \\ &= u(t_0) + \frac{1}{C} \int_{t_0}^t i(\xi) d\xi \end{aligned} \quad (1-11)$$

上式表明:某时刻电容元件的电压 $u(t)$ 不仅取决于 $[t_0, t]$ 时间间隔内所有的电流值,而

且与初始电压 $u(t_0)$ 有关。说明电容也为一种记忆元件。

在电压电流为关联参考方向下，如图 1-13 所示，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

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

如果我们选取 t_0 为电压等于零的时刻，即有 $u(t_0) = 0$ ，则上式为

$$W_C = \frac{1}{2} Cu^2(t) \geq 0 \quad (1-12)$$

上式说明电容元件对外电路不提供能量，因而它是无源元件。

从以上公式可推出：随 $\frac{du}{dt}$ 大于或小于零，瞬时功率可正可负。这意味着 $p > 0$ 时电容吸收能量，并全部转换成电场能量储存起来； $p < 0$ 时，电容元件释放电场能量。可见电容元件也不消耗能量，而与电感元件相似，起能量“吞吐”作用，因而电容元件是另一种储能元件，与电感元件的差别在于电容元件储存的是电场能量而不是磁场能量。

今后，为了叙述方便，把线性电容元件简称为电容。所以，“电容”这个术语以及它的相应符号 C ，一方面表示一个电容元件；另一方面也表示这个元件的参数。

第三节 独立源

凡发出电压或电流、向外界提供电能的元件，都是有源元件。常用电源有各类电池、发电机和各种信号源。电源中有：能够独立地向外电路提供电能的电源，称为独立电源；不能独立地向外电路提供电能的电源称为非独立电源，又称受控源，下面予以介绍的是独立电源，它包括理想电压源和理想电流源。

一、电压源

电压源是一个二端元件，其端电压在任意瞬时与其电流无关，或者恒定不变（直流情况），或者按照某一固有的函数规律随时间而变化，即 $u = u_s(t)$ 。

电压源在电路中的图形符呈如图 1-15 所示，其中 u_s 为电压源的电压，而“+”、“-”号是其参考极性。

对于直流电压源，通常电压用 U_s 表示。有时直流电压源是干电池，在这种情况下可用图 1-16 的符号表示。

图 1-17 为电压源在 $i-u$ 平面上的伏安特性，它是一条不通过原点且与电流轴平行的直线，表明其端电压不随其电流而变。

根据电路中电压源所联接的外电路的不同，如图 1-18，通过它的电流可以是任意的，也就是说，流过它的电流不是由理想电压源本身就能确定的，而是与相联接的外电路所共同决定的。电压源中电流的实际方向既可以从电压的高电位流向低电位，也可以从低电位流向高电位。电流 i 与电压源 u_s 在非关联参考方向下，如图 1-18，电压源输出的瞬时功率为正值，即 $p_s > 0$ 这时电源处于供电的工作状态。

$$p_s = u_s i$$

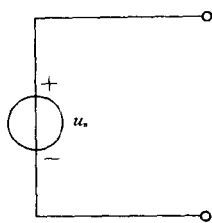


图 1-15 电压源

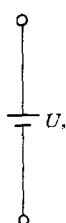


图 1-16 直流电压源

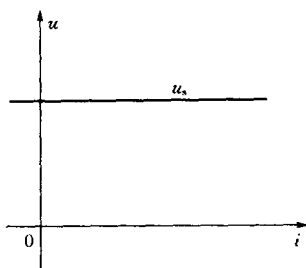


图 1-17 电压源伏安特性

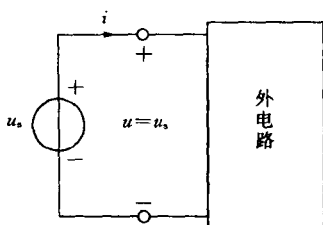


图 1-18 电压源联接外电路

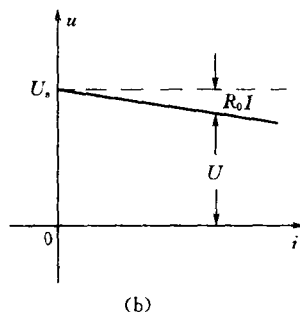
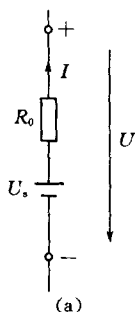


图 1-19 电池的电路图及其伏安特性曲线

电流 i 与电压源 u_s 在关联参考方向下, $p_s > 0$, 这时电源处在充电工作状态, 其实它已变成了负载。

前面谈的电压源是理想电压源。实际电压源的伏安特性并不完全是如图 1-17 所示那样的与横轴平行的直线, 而是电压源的端电压随电流增大而降低。例如当电池接上负载后, 其电压就会降低, 这是由于电池内部有电阻的缘故。为了模拟这一实际现象, 可以用理想电压源串联一个内阻的电压源模型来取代实际电源, 如图 1-19(a) 所示。由此模型可得端电压为

$$U = U_s - IR_0$$

上式表明, 端电压 U 与负载电流 I 和内阻 R_0 有关。内阻 R_0 越小, 则实际电压源越接近于理想电压源。实际电压源的伏安特性如图 1-19 (b) 所示。

二、电流源

电流源也是一个二端元件, 其电流在任意瞬时与其端电压无关; 或者恒定不变 (直流情况), 或者按照某一固有的函数规律随时间而变化。即

$$i(t) = i_s(t)$$

电流源在电路中的图形符号如图 1-20 (a) 所示, 其中 i_s 表示电流源的电流, 实心箭头所指的方向为 i_s 的参考方向。在电流源为常量的情况下, 其伏安特性在 $i-u$ 平面上是一条与电压轴平行的直线。见图 1-20 (b)。

在电路中, 由于电流源所联接的外电路不同, 见图 1-21, 使电流源的端电压也不同, 也就是说, 它的端电压不是由理想电流源本身就能确定的, 而是由与之相联接的外电路所共