



高等学校精品规划教材

电路分析基础

张秀然 吴仕宏 主编

DIANLU FENXI JICHU



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

高等学校精品规划教材

电路分析基础

主 编 张秀然 吴仕宏
副主编 董贵菊 张 青 孟 伟
主 审 朴在林



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书是根据新教学大纲的具体要求编写的,内容符合非电专业教材《电路分析基础》教学大纲要求。全书共五章。第一章电路分析的基本概念和基本定律,重点介绍了电路和电路图、独立源、基尔霍夫定律、电阻联接及电源等效变换等;第二章线性电阻电路的分析,讲述了回路电流和节点电压两种解题方法,介绍了叠加定理、等效电源定理等电路理论的基本定理;第三章正弦交流电路,重点讲述了正弦交流电的三要素、正弦量的相量表示法和复阻抗、复导纳及其等效变换并介绍了正弦交流电的功率、正弦稳态电路的计算和功率因数的提高方法;第四章谐振与互感,介绍了串、并联谐振、互感、含互感电路计算方法及空心变压器和理想变压器;第五章三相电路,主要介绍了三相电路的特点、三相电路的计算及其功率。

本教材适用于高等工科院校各类非电专业电路课程,也可作为电气工程技术人员和电气技术爱好者参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

电路分析基础/张秀然,吴仕宏主编. —北京:中国
水利水电出版社, 2005
高等学校精品规划教材
ISBN 7-5084-2529-4

I. 电... II. ①张...②吴... 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 (2004) 第 122195 号

书 名	高等学校精品规划教材 电路分析基础
作 者	张秀然 吴仕宏 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: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 63202266 (总机)、68331835 (营销中心)
经 售	全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京密云红光印刷厂
规 格	787mm×1092mm 16 开本 11.5 印张 273 千字
版 次	2005 年 1 月第 1 版 2005 年 1 月第 1 次印刷
印 数	0001—5000 册
定 价	18.00 元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

前 言

《电路分析基础》一书是根据新教学大纲的具体要求编写的高等学校精品规划教材之一。该书的内容符合非电专业教材《电路分析基础》教学大纲，适用于高等工科院校各类非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，并在各章之前介绍了历史上对本学科有重要贡献的科学家的生平事迹。同时，对一些问题的分析思路和解答方法做了适当的修改，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 50~60 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、西北农业科技大学、东北电业职工大学等五个单位。

本书编写人员有：张秀然、吴仕宏、董贵菊、张青、孟伟、张宁、刘文奎，全书由沈阳农业大学朴在林教授主审。

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。

编 者

2005 年 1 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	10
第四节 基尔霍夫定律	12
第五节 电阻的联接及电源等效变换	21
第六节 受控源	29
习题	30
第二章 线性电阻电路的分析	35
第一节 回路电流法	35
第二节 节点电压法	42
第三节 叠加定理	53
第四节 替代定理	58
第五节 等效电源定理	59
第六节 对偶原理	70
第七节 互易定理	72
习题	74
第三章 正弦交流电路	78
第一节 正弦交流电	78
第二节 正弦量的相量表示法	82
第三节 R 、 L 、 C 中通交流电	87
第四节 复阻抗、复导纳及其等效变换	94
第五节 正弦交流电路中的功率	105
第六节 正弦稳态电路的计算	110
第七节 功率因数的提高	116
习题	119
第四章 谐振与互感	124
第一节 串联电路的谐振	124
第二节 并联电路的谐振	132

第三节 互感	135
第四节 含互感电路的计算	140
第五节 空心变压器	145
第六节 理想变压器	150
习题	157
第五章 三相电路	160
第一节 三相电路的特点	160
第二节 对称三相电路的计算	163
第三节 不对称电路的计算	168
第四节 三相电路的功率	169
习题	172
参考文献	174

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,即:电阻和电源的串联、并联, Y— Δ 变换及电源的等效变换;引进电流和电压的参考方向及基尔霍夫两个定律,即:电流定律和电压定律。

历史人物传略

伏特 (Alessandro Antonio Volta, 1745~1827 年), 意大利物理学家, 发明了电池和电容器。电池是最早提供连续流动电能的装置。

伏特生于意大利科摩的一个贵族家庭, 18 岁时就进行电路试验。1796 年他发明了电池, 这对电的使用是一次革命性的进展。1800 年他发表的著作标志着电路理论基础已奠定。伏特一生中得到了很多荣誉。伏特 (电压或电位差的单位) 就是以他的名字命名的。

安培 (Andra-Marie Ampere, 1775~1836 年), 法国数学家和物理学家, 电动力学基础的奠基者。1820 年, 他定义了电流并研究出测量电流的方法。

安培出生于法国的里昂。他非常爱好数学, 而许多著名的数学著作是用拉丁文写的, 所以在他 12 岁时, 只用几个星期就掌握了拉丁文。安培是一个很聪明的科学家并写了很多著作, 他推导出许多电磁学的定律, 发明了电磁铁和安培表。安培 (电流的单位) 就是以其名字命名的。

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 (如电力系统和通信系统), 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他形式的能量转换的过程。电路的种类虽然很多, 但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，理想电源元件及其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_s 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。

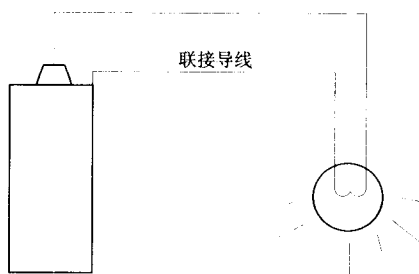


图 1-1 一个简单的实际电路

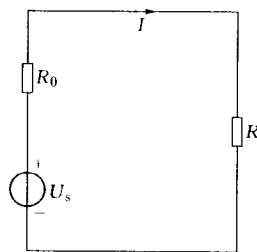


图 1-2 图 1-1 的电路模型

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总参数电路模型。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，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。

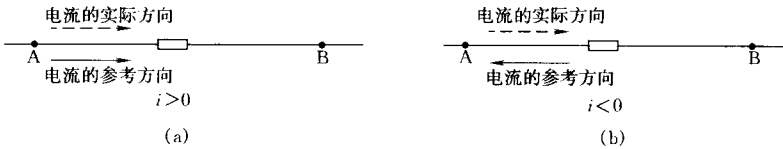


图 1-4 电流的参考方向与它的实际方向间的关系

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。

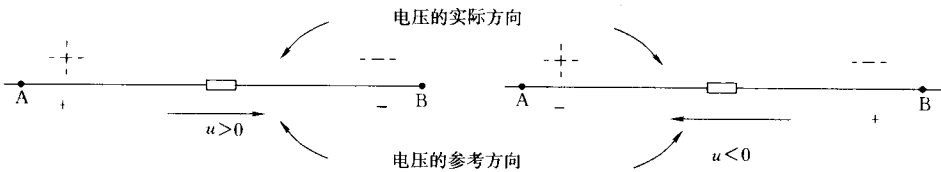


图 1-5 电压的参考方向与它的实际方向间的关系

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（见图 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。

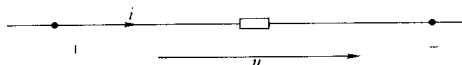


图 1-6 电压和电流的关联参考方向

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，是电场力对电荷做功的结果；这是元件吸收能量。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

$$d\omega = u dq$$

又因

$$dq = i dt$$

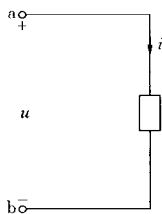


图 1-7 电功率

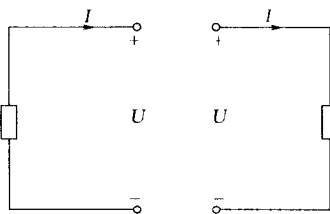


图 1-8 例 1-1 图

故

$$d\omega = u i dt$$

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

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

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 $U = 32V$ ，电流均为 $I = 0.1A$ 。试求其功率。

解 右侧元件为关联参考方向, 则

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

$P > 0$ 表明元件吸收功率。

左侧元件 U 、 I 为非关联参考方向, 则

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

$P > 0$ 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。

历史人物传略

欧姆 (Georg Simon Ohm, 1787~1854 年), 德国物理学家, 1826 年由实验得出最基本的表述电压、电流、电阻三者之间关系的欧姆定律。他的这些工作最初曾不被某些批评者所接受。

欧姆出生于巴伐利亚的埃尔兰根, 有着艰辛的童年, 欧姆一生从事电学的研究, 建立了著名的欧姆定律。1841 年, 伦敦皇家学院授予他 Copley Medal 奖。1849 年, 慕尼黑大学授予他物理学首席教授职位。出于对他的敬意, 电阻单位即以欧姆命名

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, 其单位为欧姆, 简称欧, 用字母 Ω 表示。

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。

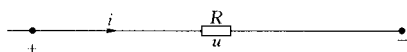


图 1-9 线性电阻元件的图形符号

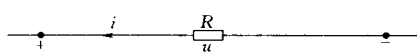


图 1-10 电阻元件在非关联参考方向下

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

$$u = -Ri \text{ 或 } i = -Gu$$

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。

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

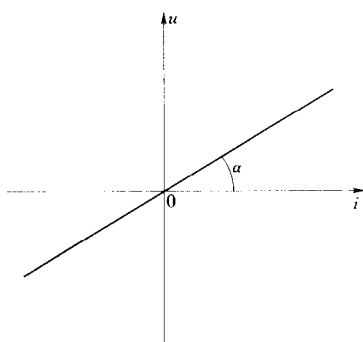


图 1-11 线性电阻元件伏安特性

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

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他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叠的电路模型。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。

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，则磁通链为

$$\Psi_L = N\varphi_L$$

线性电感元件的图形符号及其韦安特性如图 1-12 所示。

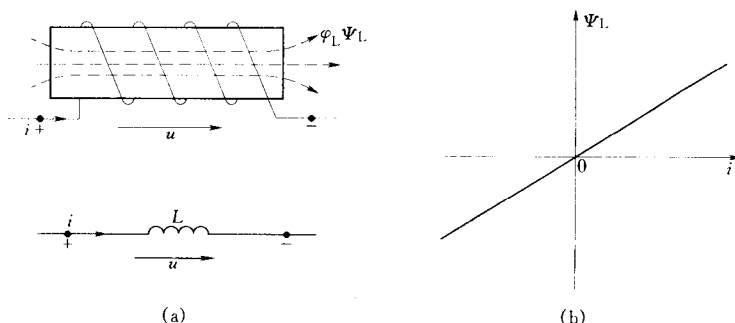


图 1-12 线性电感元件的图形符号及其韦安特性

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, 简称亨, 用字母 H 表示。有时还采用毫亨 (mH) 和微亨 (μ H) 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, 感应电压为

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

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

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

式 (1-5) 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

$$W_L = \int_{t_0}^t u(\xi) i(\xi) d\xi = \int_{t_0}^t Li(\xi) \frac{di(\xi)}{d\xi} d\xi$$

$$= L \int_{i(t_0)}^{i(t)} i(\xi) di(\xi) = \frac{1}{2} Li^2(t) - \frac{1}{2} Li^2(t_0) \quad (1-7)$$

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) 和式 (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 $\Psi-i$ 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, 一般来说电感就不再是常数。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他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。

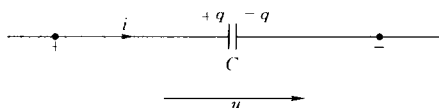


图 1-13 线性电容元件的图形符号

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。

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。

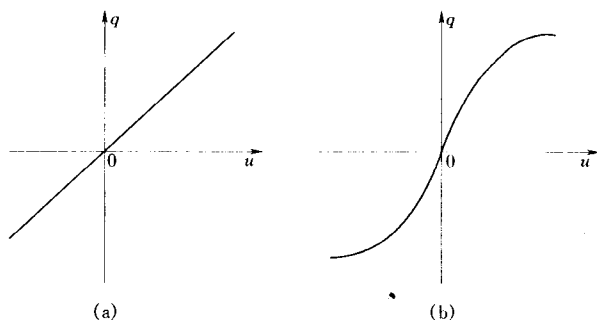


图 1-14 库伏特性

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，则电流为

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

式 (1-9) 代入上式后得

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

式 (1-10) 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

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

式 (1-11) 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

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

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。常用的电源有：各类电池、发电机和各种信号源。电源中：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，下面介绍独立电源，它包括理想电压源和理想电流源。

一、电压源

电压源在一个二端元件，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号如图 1-15 所示，其中 u_s 为电压源的电压，而“+”、“-”号是其参考极性。

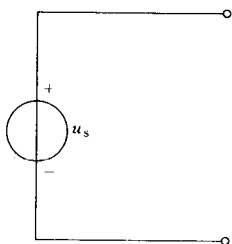


图 1-15 电压源

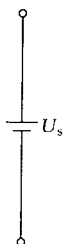


图 1-16 直流电压源

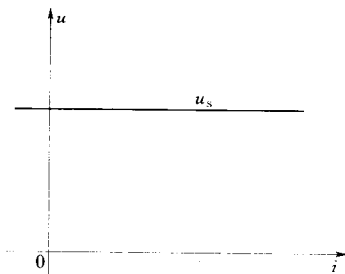


图 1-17 电压源伏安特性

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 所示，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 所示，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， $p_s = u_s i$ 。

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

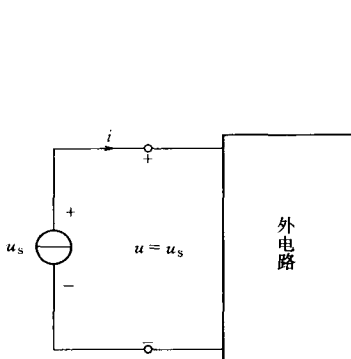


图 1-18 电压源联接外电路

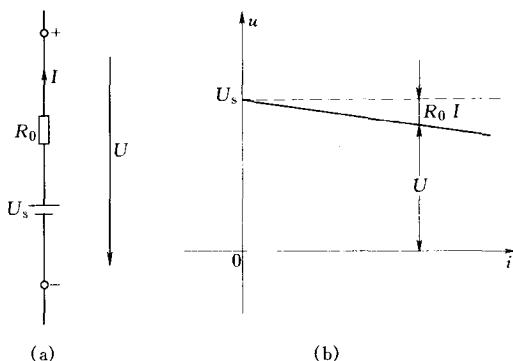


图 1-19 电池的电路图及其伏安特性曲线

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)。

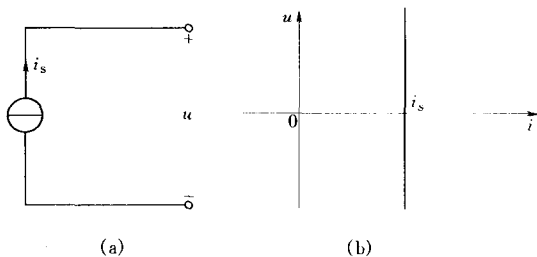


图 1-20 电流源及其伏安特性

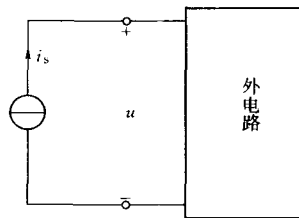


图 1-21 电流源联接外电路

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同决定的。

电流源中，电流是给定的，但电压的实际极性和大小与外电路有关。如果电压 u 的参考方向与电流源 i_s 的参考方向相反，如图 1-21 所示 $p_s > 0$ ，为供电状态，说明这个电