

21^{世纪}

高等学校电子信息类规划教材



电路分析

金巨波 刘显忠 主编
张永瑞 主审



西安电子科技大学出版社
<http://www.xduph.com>

21 世纪高等学校电子信息类规划教材

电 路 分 析

金巨波 刘显忠 主编

姜 伟 温海洋 史秀娟 刘荣军 副主编

张永瑞 主审

西安电子科技大学出版社

2009

内 容 简 介

本书是为满足应用型人才培养的教学需求而编写的。

全书共分 10 章, 主要内容包括电路与电路的基本定律、电阻电路的等效变换、电阻电路的一般分析方法、电路基本定理、动态电路的时域分析、正弦稳态电路的分析、电路的频率响应和谐振现象、非正弦周期电流电路、二端口网络、非线性电阻电路等。各章配有典型例题和习题, 书末附有部分习题参考答案。

本书知识全面、重点突出、讲解透彻、通俗易懂, 可作为电子、通信、计算机及相关专业的教材, 也可供相关工程技术人员参考。

★本书配有电子教案, 需要者可登录出版社网站, 免费下载。

图书在版编目(CIP)数据

电路分析/金巨波, 刘显忠主编. —西安: 西安电子科技大学出版社, 2009. 2

21 世纪高等学校电子信息类规划教材

ISBN 978 - 7 - 5606 - 2165 - 4

I. 电… II. ①金… ②刘… 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 192935 号

策 划 毛红兵

责任编辑 王 瑛 毛红兵

出版发行 西安电子科技大学出版社(西安市太白南路 2 号)

电 话 (029)88242885 88201467 邮 编 710071

网 址 www.xduph.com 电子邮箱 xdupfxb001@163.com

经 销 新华书店

印刷单位 陕西华沐印制科技有限责任公司

版 次 2009 年 2 月第 1 版 2009 年 2 月第 1 次印刷

开 本 787 毫米×1092 毫米 1/16 印 张 13.5

字 数 315 千字

印 数 1~4000 册

定 价 19.00 元

ISBN 978 - 7 - 5606 - 2165 - 4/TN · 0475

XDUP 2457001 - 1

*** 如有印装问题可调换 ***

本社图书封面为激光防伪覆膜, 谨防盗版。

前 言

在我国现阶段，应用型本科教育的实质就是在本科教育阶段培养社会发展所需要的中、高级应用型人才。其培养目标主要为技师、工程师、经济师，使其能够适应高新技术的发展，具有自我学习、提高的能力。为此，应用型本科教材的编写就要体现和满足这一人才的培养模式和培养目标。

本书即是围绕上述宗旨编写的，充分体现“应用、实用、适用”的特色。在编写过程中着重考虑应用型本科院校的教学特点，力图做到以下几点：

(1) 保证对电路的基本概念、基本原理及应用的分析讲述透彻，内容由浅入深，语言精练、流畅。

(2) 突出实际应用，在选择例题和习题上注重工程实际应用的电路问题，进一步提高学生分析问题和解决问题的能力。

(3) 各章首有本章要点，可起到有效引导学生学习的作用；每章后有习题，书末附有部分习题参考答案，便于学生课后练习和自学。

(4) 本书在附录中介绍了计算机辅助电路分析软件——MATLAB 的基础知识及该软件在电路分析中的应用。

本书由金巨波、刘显忠担任主编，金巨波负责全书的统稿工作。参加本书编写的人员还有姜伟、温海洋、史秀娟、刘荣军、张靓、张莉、张鹏和姜波。

西安电子科技大学的张永瑞教授担任本书的主审，其对全书进行了仔细的审阅，并提出了具体修改意见。此外，在本书编写过程中，哈尔滨理工大学的郭鼎印教授和哈尔滨商业大学的赵殿礼副教授也给予了大力支持，在此表示衷心的感谢。

由于编者水平有限，书中不妥之处敬请读者批评指正。

编 者
2008 年 7 月

目 录

第 1 章 电路与电路的基本定律	1
1.1 实际电路与电路模型	1
1.2 电路的基本物理量	2
1.2.1 电 流	2
1.2.2 电 压	3
1.2.3 电 功率	4
1.3 电路的基本元件	5
1.3.1 电阻元件	5
1.3.2 电容元件	6
1.3.3 电感元件	8
1.4 独立电源	9
1.5 基尔霍夫定律	11
1.5.1 基尔霍夫电流定律	11
1.5.2 基尔霍夫电压定律	12
习题 1	13
第 2 章 电阻电路的等效变换	17
2.1 电阻的串联、并联及混联等效	17
2.1.1 电阻的串联等效	17
2.1.2 电阻的并联等效	18
2.1.3 电阻的混联等效	19
2.2 电阻 Y 形连接和 Δ 形连接	21
2.3 独立电源的连接和等效变换	23
2.3.1 电流源的连接	23
2.3.2 电压源的连接	24
2.3.3 两种实际电源模型间的等效变换	26
2.4 受控源	28
习题 2	31
第 3 章 电阻电路的一般分析方法	36
3.1 支路电流法	36
3.2 网孔电流法	37
3.3 节点电压法	39
习题 3	41
第 4 章 电路基本定理	44
4.1 叠加定理	44

4.2 替代定理	46
4.3 戴维宁定理和诺顿定理	48
4.3.1 戴维宁定理	48
4.3.2 诺顿定理	49
4.4 最大功率传输定理	54
习题 4	57
第 5 章 动态电路的时域分析	60
5.1 换路定律	60
5.2 一阶电路的零输入响应	62
5.2.1 RC 电路的零输入响应	62
5.2.2 RL 电路的零输入响应	65
5.3 一阶电路的零状态响应	66
5.3.1 RC 电路的零状态响应	66
5.3.2 RL 电路的零状态响应	67
5.4 一阶电路的全响应	69
5.5 一阶电路的阶跃响应	71
5.6 一阶电路的冲激响应	72
5.7 二阶电路的分析	74
习题 5	78
第 6 章 正弦稳态电路的分析	82
6.1 相量法	82
6.1.1 复数	82
6.1.2 正弦量	84
6.1.3 相量法基础	86
6.2 电路基本定律的相量形式	88
6.2.1 基尔霍夫定律的相量形式	88
6.2.2 基本元件 VAR 的相量形式	90
6.3 阻抗和导纳及其连接方式	94
6.3.1 阻抗和导纳	94
6.3.2 阻抗、导纳的串联和并联	96
6.4 正弦稳态电路的分析	99
6.5 正弦稳态电路的功率	101
6.6 三相电路	104
6.6.1 三相电源及其连接	104
6.6.2 三相电路的分析	106
6.6.3 三相功率	108
6.7 变压器电路	109
6.7.1 互感耦合电路	109
6.7.2 含有耦合电感电路的计算	112
6.7.3 空芯变压器	116
6.7.4 理想变压器	118
习题 6	122

第 7 章 电路的频率响应和谐振现象	127
7.1 网络函数与频率响应	127
7.1.1 网络函数	127
7.1.2 网络函数的计算方法	128
7.1.3 网络函数与正弦波	128
7.1.4 网络函数的频率特性	130
7.2 RC 电路的频率特性	131
7.2.1 一阶低通电路的频率特性	131
7.2.2 RC 一阶高通电路的频率特性	135
7.3 电路的谐振分析	136
7.3.1 串联电路的谐振	136
7.3.2 并联电路的谐振	141
7.3.3 实用简单的并联谐振电路	143
习题 7	145
第 8 章 非正弦周期电流电路	147
8.1 非正弦周期信号及其分析	147
8.2 周期函数分解为傅里叶级数	148
8.2.1 傅里叶级数	148
8.2.2 周期函数的对称性	150
8.3 非正弦周期电流电路中电流和电压的有效值	152
8.4 非正弦周期电流电路的平均值和平均功率	153
8.5 非正弦周期电流电路的分析	155
习题 8	158
第 9 章 二端口网络	160
9.1 二端口网络概述	160
9.2 二端口方程和参数	160
9.2.1 Z 参数方程	160
9.2.2 Y 参数方程	162
9.2.3 H 参数方程	164
9.2.4 T 参数方程	165
9.2.5 二端口参数之间的关系	168
9.3 二端口网络的等效电路	168
9.4 二端口网络的连接	169
习题 9	173
第 10 章 非线性电阻电路	175
10.1 非线性电阻元件	175
10.2 非线性电阻电路的方程	177
10.3 小信号分析法	179
习题 10	180
附录	183
部分习题参考答案	199
参考文献	207

第1章 电路与电路的基本定律

【本章要点】

本章首先介绍电路模型、电路的基本物理量和常用元件，然后介绍电路的基本定律——基尔霍夫定律。

1.1 实际电路与电路模型

实际电路是由若干电器设备或部件按一定的方式连接而构成的电流通路。电路的种类繁多，形式各异。电路的功能主要有两种：一是实现电能的转换、传输和分配，如电力系统中的发电机将其他形式的能量转换为电能，经变压器、输电线传输到各部门，然后又把电能转换成光能、热能等其他形式的能量加以利用；二是实现信号的处理、转换和传输，如收音机或电视机电路，是将接收到的电信号经过调谐、滤波、放大等处理，使其成为人们所需要的其他信号。电路的这种功能在现代自动控制技术、通信技术和计算机技术中都得到了广泛的应用。

图1-1(a)所示的日常生活中使用的手电筒电路，就是一个最简单的实际电路。它由3部分组成：①是提供电能的能源，简称电源；②是用电装置，统称其为负载，它将电能转换为其他形式的能量；③是连接电源与负载传输电能的金属导线，简称导线。电源、负载和连接导线是任何实际电路都不可缺少的3个组成部分。

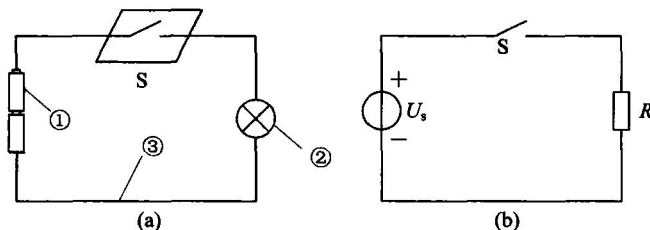


图1-1 实际电路和电路模型

实际电路器件在工作时的电磁性质是比较复杂的。任何一个实际电路器件在电压、电流作用下，均有消耗电能、存储电场能量、存储磁场能量的基本效应，这些多种电磁效应交织在一起，给分析问题带来了困难。为了使问题简化，以便于探讨电路的普遍规律，在分析和研究具体电路时，需要建立电路模型。电路模型是在一定条件下对实际电路的科学抽象与近似描述，它能够准确地反映实际电路的电磁现象与性质。

电路模型由各种理想电路元件组成, 每种理想电路元件是只具有单一电磁性质的假想元件, 具有精确的定义与相应的数学模型, 并用规定的图形符号表示。实际电路元件虽然种类繁多, 但在电磁性能方面可将它们归为两类: 一类是有源元件, 如干电池、发电机等, 它们将非电能量转换成电能, 所以可用“电压源”这样一个理想器件来表示; 另一类是无源元件, 如电炉主要是消耗电能的, 所以可用“电阻元件”来表示, 其他主要是存储磁场能量或存储电场能量的, 可用“电感元件”或“电容元件”来表示等。

用规定的电路符号表示各种理想元件而得到的电路模型图称为电路原理图, 简称电路图。电路图只反映电器设备在电磁方面相互联系的实际情况。图 1-1(b) 就是一个按规定符号画出的图 1-1(a) 的电路图。需要指出的是, 理想元件不完全等同于电路器件, 而一个电路器件在不同的条件下的电路模型也可能不同。

1.2 电路的基本物理量

电流、电压、电荷、磁通(或磁链)、功率和能量是描述电路工作状态和元件工作特性的 6 个变量, 它们一般都是时间的函数。其中电流和电压是电路分析中最常用的两个基本变量。本节着重讨论电流、电压的参考方向问题, 以及如何用电流、电压表示电路的功率和能量。

1.2.1 电流

电子和质子都是带电的粒子, 电子带负电荷, 质子带正电荷。所带电荷的多少称为电量, 在国际单位制(SI)中, 电量的单位是库[仑](符号为 C, 6.24×10^{18} 个电子所具有的电量等于 1 C)。带电粒子的定向运动形成电流。为了表征和描述电流的大小, 我们把单位时间内通过导体横截面的电荷量定义为电流强度, 简称电流, 用符号 i 来表示, 即

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

习惯上规定正电荷移动的方向为电流的实际方向。

若电流的大小和方向都不随时间改变, 则这种电流称为恒定电流, 简称直流, 一般用大写字母 I 表示。在这种情况下, 通过导体横截面的电荷量 q 与时间 t 成正比, 即

$$q = I \cdot t \quad (1-2)$$

在国际单位制中, 电流的单位为安[培](符号为 A, $1 \text{ A} = 1 \text{ C/s}$, 其中 s 代表秒)。在通信和计算机技术中常用毫安(mA)、微安(μA)作为电流的单位, 它们的关系是:

$$1 \text{ mA} = 10^{-3} \text{ A}$$

$$1 \mu\text{A} = 10^{-6} \text{ A}$$

电流是一个有方向的物理量, 在电路分析中, 电流的大小和方向是描述电流变量不可缺少的两个方面。但对于一个给定的电路, 要直接给出某一电路元件中电流的实际方向是十分困难的, 如交流电路中电流的实际方向经常在改变, 即使在直流电路中, 要指出复杂电路中某一电路元件电流的实际方向也不是一件容易的事。在进行电路分析时, 为了编写电路方程, 我们常常需要预先假设一个电流方向。这个预先假设的电流方向称做参考方

向,如图1-2所示。电流的参考方向可以任意选定,但一经选定就不能再改变。若经过计算求得 $i>0$,则表示实际方向与参考方向一致; $i<0$,则表示实际方向与参考方向相反。

如图1-2所示,当 $i=5\text{ A}>0$ 时,表示电流的实际方向从 a 到 b (如图1-2(a)所示);当 $i=-5\text{ A}<0$ 时,表示电流的实际方向从 b 到 a (如图1-2(b)所示)。

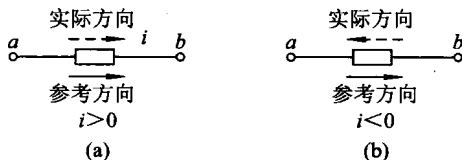


图1-2 电流的实际方向与参考方向的关系

在进行电路分析时,必须先标出电流的参考方向,才能正确进行方程的编写和求解,题目中给出的电流的方向均是参考方向。只有选定了电流的参考方向,电流的正、负值才有意义。

1.2.2 电压

电荷在电路中流动,就必然和电路元件进行能量交换,电荷在电路中的某些部件(如电源)处获得能量,而在某些部件(如电阻元件)处失去能量。为描述和表征电荷与元件间交换能量的规模和大小,引入“电压”这一物理量。

电压是指电场力将单位正电荷从某点移到另一点所作的功。由定义可知, a 、 b 两点间的电压 u_{ab} 可表示为

$$u_{ab} = \frac{dw_{ab}}{dq} \quad (1-3)$$

式中: dw_{ab} 表示电场力将 dq 的正电荷从 a 点移动到 b 点所作的功,单位为焦[耳](J);电压的单位为伏[特](V),在工程应用中亦常用千伏(kV)、毫伏(mV)等单位。

在直流时,式(1-3)应改写为

$$U_{ab} = \frac{W_{ab}}{Q} \quad (1-4)$$

电压也是一个有方向的物理量。我们规定: dq 的正电荷由 a 点移动到 b 点,若失去 dw_{ab} 的能量,则 a 高 b 低,即 a 端为正, b 端为负,如图1-3(a)所示;反之, dq 的正电荷由 a 点移动到 b 点,若得到 dw_{ab} 的能量,则 a 低 b 高,即 a 端为负, b 端为正,如图1-3(b)所示。

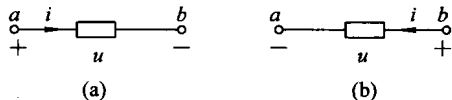


图1-3 电压的定义

像需要为电流指定参考方向一样,也需要为电压指定参考方向(也称参考极性)。两点之间的电压参考方向可以用正(+)、负(-)极性表示,正极指向负极的方向就是电压的参考方向,如图1-4(a)所示。在图1-4(a)中,如果 a 点电位高于 b 点电位,即电压的实际方向是由 a 到 b ,两者的方向一致,则 $u>0$;如果实际电位是 b 点高于 a 点,两者的方向相反,则 $u<0$ 。有时为了图示方便,可用一个箭头表示电压的参考方向,如图1-4(b)所示;

还可以用双下标表示,如图 1-4(c)所示, u_{ab} 表示 a 、 b 两点间的参考方向是从 a 指向 b 的。

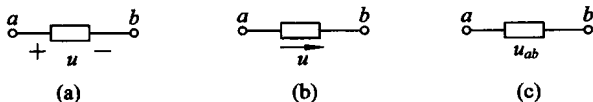


图 1-4 电压的参考极性

一个元件的电流或电压的参考方向可以独立地任意指定。若指定流过元件的电流的参考方向是从标以电压正极性的一端指向负极性的一端,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,如图 1-5(a)所示;当两者不一致时,称为非关联参考方向,如图 1-5(b)所示。

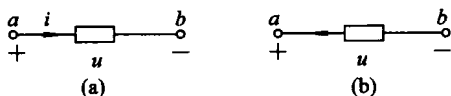


图 1-5 参考方向

(a) 关联参考方面; (b) 非关联参考方向

1.2.3 电功率

正电荷从一段电路的高电位点移到低电位点是电场力对电荷做功,该段电路吸收了电能;正电荷从电路的低电位点移到高电位点是非电场力克服了电场力做功,即这段电路将其他形式的能量转换成电能。把单位时间内电路吸收或发出的电能定义为该电路的功率,用 p 表示,即

$$p = \frac{dw}{dt} \quad (1-5)$$

国际单位制中,功率的单位为瓦[特](W),常用的单位还有千瓦(kW)、毫瓦(mW)等。一段电路在电流、电压参考方向关联的条件下,由式(1-1)、(1-3),得

$$p = \frac{dw}{dt} = \frac{dw}{dq} \frac{dq}{dt} = ui \quad (1-6)$$

即电路的功率等于该段电路的电压与电流的乘积。在直流时,式(1-6)应写为

$$P = UI \quad (1-7)$$

一段电路,在 u 和 i 取关联参考方向下,若 $p > 0$,则说明这段电路上电压和电流的实际方向是一致的,正电荷在电场力作用下做功,电路吸收了功率;若 $p < 0$,则说明这段电路上电压和电流的实际方向不一致,有外力克服电场力做功,电路发出功率。

例 1-1 电路如图 1-6 所示,已知 $U_1 = 1 \text{ V}$, $U_2 = -6 \text{ V}$, $U_3 = -4 \text{ V}$, $U_4 = 5 \text{ V}$, $U_5 = -10 \text{ V}$, $I_1 = 1 \text{ A}$, $I_2 = -3 \text{ A}$, $I_3 = 4 \text{ A}$, $I_4 = -1 \text{ A}$, $I_5 = -3 \text{ A}$,试求各元件的功率,并判断各元件是吸收功率还是发出功率。

解 根据已知条件得

$$P_1 = U_1 I_1 = 1 \times 1 = 1 \text{ W} \quad (\text{吸收 } 1 \text{ W 功率})$$

$$P_2 = U_2 I_2 = (-6) \times (-3) = 18 \text{ W} \quad (\text{吸收 } 18 \text{ W 功率})$$

$$P_3 = -U_3 I_3 = -(-4) \times 4 = 16 \text{ W} \quad (\text{吸收 } 16 \text{ W 功率})$$

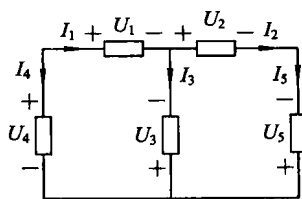


图 1-6 例 1-1 用图

$$P_4 = U_4 I_4 = 5 \times (-1) = -5 \text{ W} \quad (\text{发出 } 5 \text{ W 功率})$$

$$P_5 = -U_5 I_5 = -(-10) \times (-3) = -30 \text{ W} \quad (\text{发出 } 30 \text{ W 功率})$$

由以上计算结果可以看出, 电路中各元件发出功率的总和与吸收功率的总和相等, 这就是电路的“功率平衡”。

1.3 电路的基本元件

1.3.1 电阻元件

电阻元件是一种理想元件, 它反映电路器件消耗电能这一物理性能。在电路中, 若元件有两个端钮与外电路相连接, 则这样的元件称为二端元件。常见的电阻元件就是二端元件。

在集总参数电路中, 通常只关心元件端钮上的特性, 即确定其端电压与电流之间的关系, 这种关系称为元件约束, 欧姆定律反映了任时刻元件的这种约束关系。在电压与电流的关联参考方向下, 欧姆定律表达式为

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

或

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

式中

$$G = \frac{1}{R} \quad (1-10)$$

R 为元件的电阻, 其单位为欧[姆](Ω), 常用的单位还有千欧($k\Omega$)、兆欧($M\Omega$)等; G 与电阻互为倒数, 称为元件的电导, 其单位为西[门子](S)。

若电阻 R 的伏安关系不随时间变化, 那么称其为时不变电阻, 否则为时变电阻。在 $u-i$ 坐标平面上, 绘出的电压、电流关系曲线称为元件的伏安特性曲线, 简称为伏安特性。线性时不变电阻元件的伏安特性是一条通过原点的直线, 如图 1-7(b) 所示, 电阻元件在电路中的符号如图 1-7(a) 所示。

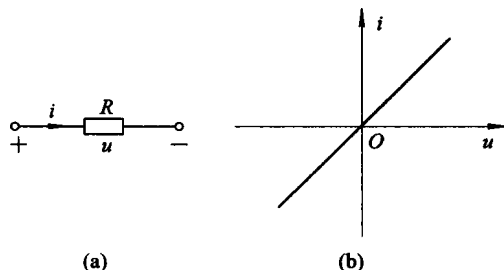


图 1-7 线性电阻及其伏安特性

如图 1-8 所示是某二极管伏安特性曲线, 显然, 二极管是一种非线性电阻元件。

在电阻元件的电压及电流参考方向选择非关联参考方向时, 欧姆定律应表示成

$$u = -Ri \quad (1-11)$$

或

$$i = -Gu \quad (1-12)$$

线性时不变电阻元件也简称为电阻。这里,“电阻”一词及其符号 R 既表示电阻元件也表示该元件的参数。同一个电阻元件,既可以用电阻 R 表示,也可以用电导 G 表示。

实际的电阻器、电炉、白炽灯等元器件,或多或少的都是非线性的,但这些元件在一定的工作范围内,它们的电阻值变化很小,可以近似地看做线性电阻元件,如线绕电阻器、金属膜电阻等。在后面的叙述中,若无特殊说明,一般所说的电阻元件均指线性电阻元件,简称为电阻。有关非线性电阻元件的内容将在后面介绍。

将式(1-8)代入式(1-7)可得到计算电阻元件功率的另外两个公式,即

$$p = i^2 R \quad (1-13)$$

或

$$p = \frac{u^2}{R} \quad (1-14)$$

在应用以上两式时一定要注意, i 必须是流过电阻 R 的电流, u 必须是电阻 R 两端的电压。显然,对于正电阻元件,式(1-13)、(1-14)恒为正,表明正电阻是耗能元件。

有两种特殊情况必须注意:开路与短路。当一个二端元件(或电路)的端电压无论为何值时,流过其电流恒为零,则称为开路,相当于 $R = \infty (G = 0)$ 。当流过二端元件(或电路)的电流无论为何值时,其端电压恒为零,则称为短路,相当于 $R = 0 (G = \infty)$ 。

1.3.2 电容元件

理想电容元件是只储存电能的理想化元件,它是实际电容器的理想化模型。

最简单的电容器是在两片平行金属板中填充不同介质(如云母、绝缘纸、电解质等)构成的平行平板电容器。当在极板上加以电压后,极板上分别聚集起等量的正、负电荷,并在介质中建立电场而具有电场能量。将电源移去后,电荷可继续聚集在极板上,电场继续存在。所以电容器是一种能储存电荷或者说储存电场能量的部件。

一个二端元件,如果在任意时刻 t ,其储存的电荷 $q(t)$ 与其端电压 $u(t)$ 之间的关系能用 $q-u$ 平面上的一条曲线所确定,则称此二端元件为电容元件,简称电容。

线性电容元件的图形符号如图 1-9(a)所示,图中电压的正(负)极性所在极板上储存的电荷为 $+q(-q)$,两者的极性一致。此时,有

$$q = Cu$$

式中, C 是电容元件的电容量。当电荷和电压的单位分别用 C 和 V 表示时,电容的单位为法[拉](F)。电容较小时,又常用微法(μF)或皮法(pF)作单位,它们之间的关系如下:

$$1 \mu F = 10^{-6} F, 1 pF = 10^{-12} F$$

图 1-9(b)中以 q 和 u 为坐标轴,画出了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直线。假设电容上的电压和电流取关联参考方向,如图 1-9(a)所示,当电容两端电压发生变化时,电容上的电荷 $q = Cu$ 也相应发生变化,从而导致连接电容的导线上有电荷移动,即有电流流过,考虑到 $i = \frac{dq}{dt}$,故有

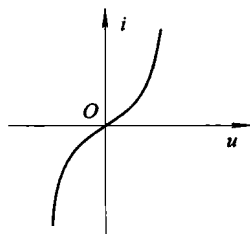


图 1-8 二极管的伏安特性

$$i = C \frac{du}{dt}$$

表明某一时刻电容的电流与该时刻电容电压的变化率成正比,即只有变化的电压才能引起电流,因此电容是一种动态元件。当电容上电压不随时间变化时,电流为零。故电容在直流情况下其两端电压恒定,相当于开路,或者说电容有隔断直流(简称隔直)的作用。

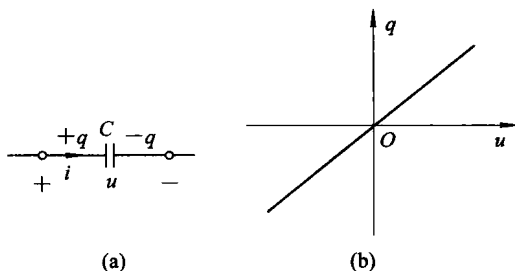


图 1-9 电容元件及其库伏特性

若电容上的电流 i 为已知,则在任意时刻 t ,由式 $i = C \frac{du}{dt}$ 可得电容上积累的电压为

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

式中, $u(t_0)$ 称为电容的初始电压。某一时刻 t , 电容上电压的值与 t 时刻以前电流的全部历史有关。即使 t 时刻电流为零, 电容上电压仍可能存在。这说明电容有记忆作用, 因而常称电容为记忆元件。与之相比, 电阻元件的电压仅与该瞬间的电流值有关, 是无记忆的元件。

下面再来研究电容元件的储能情况。电容的记忆特性反映了它具有储存电场能量的本领。当电压 u 与电流 i 取关联参考方向时, 电容元件吸收的功率为

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

从 $t = -\infty$ 到 t 时刻, 电容元件吸收的电场能量为

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

假设 $u(-\infty) = 0$, 则电容元件在任何时刻 t 储存的电场能量 $w_c(t)$ 将等于它吸收的能量, 可写为

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

上式说明, 在任意时刻 t , 电容元件的储能只与该时刻 t 的电压有关。电容元件充电时, 在此期间内电压增长, 电场能量随之增加, 电容吸收的能量储存于电场中; 电容元件放电时, 在此期间内电压下降, 电场能量减少, 电容把储存于电场中的能量放出。若元件原来没有充电, 则在充电时吸收并储存起来的能量一定又在放电完毕时全部释放, 它不消

耗能量。所以，电容元件是一种储能元件。

实际电容器的介质不可能是理想的，它除了具有上述主要性质外，还或多或少地存在着漏电流及介质损耗。因此，在实际电容器的电路模型中除了具有电容元件外，有时还添加电阻元件。在工作电压为低频的情况下，可以用一个电容作为它的电路模型；当其漏电流不能忽略时，则需要用一个电阻与电容的并联作为它的电路模型；在工作频率很高的情况下，还需要增加一个电感来构成电容器的电路模型。

1.3.3 电感元件

理想电感元件是只储存磁能的理想化元件，它是实际电感线圈的理想化模型，有时也称自感元件。

电感器是由导线绕制而成的线圈。当线圈中通有电流时，其内部及周围都产生磁场。磁场中储存着能量，因而，电感线圈是一种储存磁场能量的器件。

由物理学可知，电流通过电感线圈时将伴有磁通。

如图 1-10 所示的线圈，其中的电流 i 产生的磁通 Φ_L 与 N 匝线圈交链，则磁链 $\Psi_L = N\Phi_L$ 。由于磁通 Φ_L 和磁链 Ψ_L 都是由线圈本身的电流 i 产生的，因此分别称其为自感磁通和自感磁链。如果忽略导线耗能等次要因素，则可用理想电感元件来反映电感线圈的这一储能特性。而磁链 Ψ_L 与电流 i 之间的关系最能体现这种元件的储能特性。

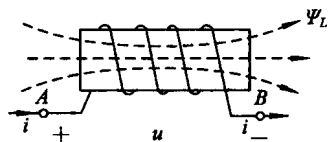


图 1-10 磁链与感应电压

一个二端元件，如果在任意时刻 t ，其磁链 Ψ_L 与电流 i 之间的关系能用 $\Psi-i$ 平面上的一条曲线所确定，则称此二端元件为电感元件，简称电感。

线性电感元件的自感磁链 Ψ_L 与元件中的电流 i 存在以下关系：

$$\Psi_L = Li$$

式中， L 称为电感元件的电感量。在国际单位制(SI)中，磁通和磁链的单位是韦[伯](Wb)，当电流的单位采用 A 时，则自感或电感的单位是亨[利](H)。电感量较小时，又常用毫亨(mH)或微亨(μH)作单位，它们之间的关系如下：

$$1 \text{ mH} = 10^{-3} \text{ H}, 1 \mu\text{H} = 10^{-6} \text{ H}$$

图 1-11(b)中以 Ψ_L 和 i 为坐标轴，画出了电感元件的韦安特性。线性电感元件的韦安特性是 Ψ_L-i 平面上的一条通过原点的直线。假设电感上的电压、电流取关联参考方向，如图 1-11(a)所示，当通过电感的电流发生变化时，磁链 $\Psi_L = Li$ 也会相应发生变化，

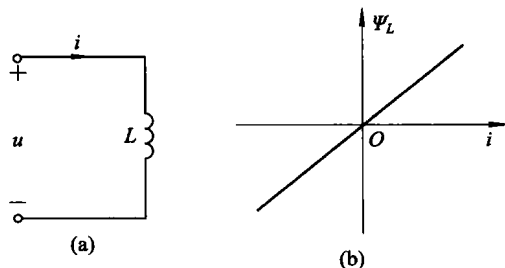


图 1-11 电感元件及其韦安特性

根据电磁感应定律, 电感两端产生感应电压 u , 且 $u = \frac{d\Psi_L}{dt}$, 考虑到 $\Psi_L = Li$, 且 L 为时不变电感, 故有

$$u = L \frac{di}{dt}$$

表明某一时刻电感的电压与该时刻电感电流的变化率成正比, 即只有当电流随时间变化时, 才有电压。电流变化越快, 电压越高; 电流不变时, 电压等于零, 因而对直流电流来讲, 电感相当于短路。

电感的电压电流关系也可以表示成积分形式, 即

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

若以 t_0 为计时起点, 则上式可以表示成

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

可以看出, 电感元件是动态元件, 也是记忆元件, 同时还可以看出, 电感电流也具有连续性质, 即电感电流只能连续变化, 不能跃变。

下面再来研究电感元件的储能情况。电感是一个储存磁能的元件。在电压和电流的关联参考方向下, 线性电感元件吸收的功率为

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

假设 $i(-\infty) = 0$, 电感元件无磁场能量, 则在 $-\infty$ 到 t 时间段内电感吸收的磁场能量为

$$\begin{aligned} w_L(t) &= \int_{-\infty}^t p d\xi = \int_{-\infty}^t Li \frac{di}{d\xi} d\xi = \int_0^{i(t)} Li di \\ &= \frac{1}{2} Li^2(t) \end{aligned}$$

这就是线性电感元件在任何时刻的磁场能量表达式, 表明电感在某一时刻 t 的储能只与该时刻 t 的电感电流有关, 即电感电流反映了电感的储能状态。当电流增加时, 元件吸收能量; 当电流减小时, 元件发出能量。可见, 电感元件不把吸收的能量消耗掉, 而是以磁场能量的形式储存在磁场中。电感电流的连续性与记忆性正是电感储能本质的体现。

实际电感线圈的导线总是有些电阻的, 就是说, 它既有储能性质, 又有一些能量损耗。因此, 实际电感器的电路模型中, 除了上述电感元件之外, 有时还应增添电阻元件。电感器上除了标明其电感外, 还标明它的额定电流。因为当电流超过一定值时, 线圈将有可能由于温度过高而被烧坏。

1.4 独立电源

实际电源有两类: 一类电源(如电池、稳压电源、发电机等)在接上一定范围的负载后, 其输出电流随负载的变化而变化, 但电源两端的电压保持为规定值, 这类电源称为独立电

压源, 简称电压源; 另一类电源(如光电池), 当负载在一定范围内变化时, 其端电压随着变化, 但电源的输出电流保持为规定值, 这类电源称为独立电流源, 简称为电流源。

1. 电压源

电压源是一种理想的二端元件, 其端口电压总能保持给定的电压 $u_s(t)$, 而与通过它的电流无关。电压源的图形符号如图 1-12(a) 所示, 图中正、负号是其参考极性。若 $u_s(t)$ 为恒定值, 则称其为直流电压源或恒定电压源, 有时用图 1-12(b) 所示的图形符号表示, 其中长的一端为“+”极, 短的一端为“-”极。

电压源输出电流的大小和方向均由外电路及电压源的数值共同决定。以 3 V 直流电压源为例, 连接不同电阻及其伏安特性如图 1-13(a)、(b)、(c) 所示。

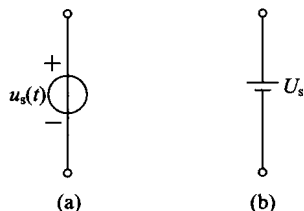


图 1-12 电压源的图形符号
(a) 一般符号; (b) 直流电压源符号

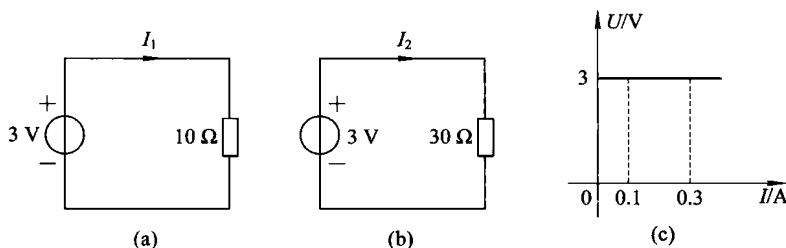


图 1-13 电压源的伏安特性

2. 电流源

如果一个二端元件接到任意电路后, 该元件提供的电流始终保持规定值, 与它两端的电压无关, 则此二端元件称为电流源。电流源的图形符号如图 1-14 所示。

电流源端电压的大小由外电路及电流源的数值共同决定。以 0.1 A 直流电流源为例, 连接不同电阻及其伏安特性如图 1-15(a)、(b)、(c) 所示。

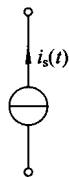


图 1-14 电流源的图形符号

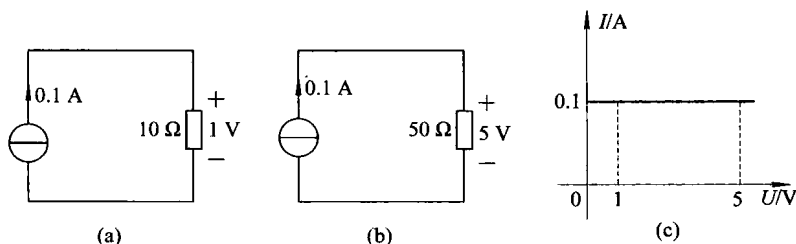


图 1-15 电流源的伏安特性

在后面的电路分析中, 有时需要电压源和电流源不起激励作用, 这时就要把它们置零。将电压源和电流源的特性与短路和开路的特性曲线相比较, 可以看出: 电压源为零与电阻为零(短路)是等效的; 电流源为零与电阻无穷大(开路)是等效的。所以, 电压源置零用短路代替, 电流源置零用开路代替。

上述电压源和电流源常被称为独立电源, 是相对于第 2 章要介绍的受控电源来说的。