

21 世纪高等学校规划教材
Textbook Series of 21st Century



电 路

DIANLU

杨欢红 杨尔滨 刘蓉晖



中国电力出版社
<http://jc.cepp.com.cn>



电 路

DIANLU

主 编 杨欢红 杨尔滨
编 写 刘蓉晖
主 审 陈洪亮



中国电力出版社

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



内 容 提 要

本书为 21 世纪高等学校规划教材。

全书共分十四章，主要内容包括：电路的基本概念和定律、线性电阻电路的分析、电路定理、含运算放大器的电阻电路、正弦稳态电路的分析、含有耦合电感的电路、三相电路、非正弦周期电流电路、电路的时域分析、线性电路的复频域分析、网络函数、电路方程的矩阵形式、二端口网络和非线性电路分析概论。书后附有电路计算机辅助分析简介及电路理论专业词汇汉英对照。本书的特点是充分注意基础性、应用性和启发性，内容精练、概念清晰、叙述流畅、例题典型丰富。

本书可作为普通高等学校电气信息类等相关专业的教材，也可作为高职高专及函授教材和工程技术人员的参考用书。

电路

申

图书在版编目 (CIP) 数据

电路/杨欢红主编. —北京: 中国电力出版社, 2007

21 世纪高等学校规划教材

ISBN 978-7-5083-6009-6

I. 电… II. 杨… III. 电路—高等学校—教材
IV. TM13

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 125779 号

主 编 杨欢红
副主编 王 亮
参 审 王 亮

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

*

2007 年 10 月第一版 2007 年 10 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 25 印张 613 千字

定价 35.00 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

本书是编者在多年讲授电路课程的基础上,汲取了教研室集体教学智慧,并根据高等工业学校《电路课程教学基本要求》编写而成的。

电路课程理论严密、逻辑性强、有广阔的工程背景,是电气工程与自动化等专业必修的一门重要的专业基础课,又是后续技术基础课和专业课程的基础,还是电类专业研究生入学考试课程。学习电路课程,对培养学生的科学思维能力,提高学生分析问题和解决问题的能力,都有重要的作用。

学习电路课程,需要大学物理、高等数学、线性代数、复变函数、积分变换等物理学和数学基础,因此有一定的难度。学习的关键是要牢固掌握基本要求和基本概念,以及电路分析计算的方法和技巧。根据电路基本理论,运用数学方法,对电路进行分析和计算。

本书内容精练、概念清晰、叙述流畅、例题典型丰富。本书的特点是充分注意基础性、应用性、启发性。

本书内容包括电路的基本概念和定律、线性电阻电路的分析、电路定理、含有运算放大器的电阻电路、正弦稳态电路的分析、含有耦合电感的电路、三相电路、非正弦周期电流电路、电路的时域分析、线性电路的复频域分析、网络函数、电路方程的矩阵形式、二端口网络、非线性电路分析概论。本教材可作为普通高等院校电类专业《电路》课程的教材,书中打“*”的内容可视专业情况选学。为适应电路课程的教学改革需要,根据上海电力学院多年的电路课程设计要求,本书特增加了电路计算机辅助分析,是利用当今先进的电路仿真软件 EWB (Electronics Workbench) 或 Multisim 对电路模型进行仿真分析,测试电压、电流,观察波形,从而加深电路原理的理解。

参加本书编写的有杨欢红、杨尔滨和刘蓉晖。全书共分十四章,其中杨欢红编写第一~七章,刘蓉晖编写第八~九章,杨尔滨编写第十~十四章及附录。全书由杨欢红、杨尔滨主编并负责统稿,由上海交通大学陈洪亮教授主审。编写本书时,参考了许多国内外电路教材版本及相关的教学参考书,陆文雄教授提供了许多宝贵意见,在此表示诚挚的谢意。

由于编者水平和时间所限,书中难免有不足之处,恳请读者批评指正。

编者

2007年7月

目 录

前言

第一章 电路的基本概念和定律	1
第一节 电路模型	1
第二节 电流和电压的参考方向	3
第三节 功率和能量	4
第四节 无源二端元件	5
第五节 独立源和受控源	10
第六节 基尔霍夫定律	12
习题	15
第二章 线性电阻电路的分析	18
第一节 电阻的等效变换	18
第二节 电源的等效变换	24
第三节 支路电流法	27
第四节 回路电流法	29
第五节 结点电压法	32
习题	36
第三章 电路定理	40
第一节 叠加定理	40
第二节 替代定理	43
第三节 戴维宁定理和诺顿定理	45
第四节 特勒根定理	50
习题	54
第四章 含有运算放大器的电阻电路	58
第一节 运算放大器的电路模型	58
第二节 含有运算放大器电路的分析	59
习题	63
第五章 正弦稳态电路的分析	66
第一节 正弦量的基本概念	66
第二节 相量法的基本概念	68
第三节 电路的相量模型	71
第四节 复阻抗与复导纳	74
第五节 正弦稳态电路的分析	81
第六节 正弦稳态电路的功率	83

第七节 谐振电路	90
习题	93
第六章 含有耦合电感的电路	99
第一节 互感	99
第二节 含有互感电路的计算	102
第三节 空心变压器	107
第四节 理想变压器	109
习题	112
第七章 三相电路	116
第一节 三相电路的基本概念	116
第二节 对称三相电路的计算	120
第三节 不对称三相电路	125
第四节 三相电路的功率及测量	127
习题	130
第八章 非正弦周期电流电路	134
第一节 非正弦周期量	134
第二节 非正弦周期信号的谐波分析	135
第三节 有效值、平均值和平均功率	141
第四节 非正弦周期电流电路的计算	145
第五节 非正弦周期电流电路中的谐振现象	148
第六节 对称三相电路中的高次谐波	150
习题	156
第九章 电路的时域分析	159
第一节 电路的过渡过程	159
第二节 初始值的计算	161
第三节 一阶电路的零输入响应	165
第四节 一阶电路的零状态响应	173
第五节 一阶电路的全响应	182
第六节 一阶电路的等效化简和三要素法	186
第七节 阶跃函数与阶跃响应	190
第八节 冲激函数与冲激响应	194
第九节 二阶电路的零输入响应	200
第十节 二阶电路的零状态响应和阶跃响应	209
第十一节 二阶电路的冲激响应	211
习题	212
第十章 线性电路的复频域分析	217
第一节 概述	217
第二节 拉普拉斯变换的定义	218
第三节 拉普拉斯变换的基本性质	220

第四节	拉普拉斯反变换	224
第五节	运算电路模型	229
第六节	用拉氏变换求解线性动态电路——运算法	233
习题		237
第十一章	网络函数	242
第一节	网络函数的定义	242
第二节	网络函数的极点和零点	244
第三节	零、极点与冲激响应的关系	245
第四节	零、极点与频率响应的关系	247
* 第五节	卷积积分	250
习题		252
第十二章	电路方程的矩阵形式	256
第一节	概述	256
第二节	电网络的图	257
第三节	支路方程的矩阵形式	266
第四节	结点分析法	267
第五节	回路分析法	274
第六节	割集分析法	275
第七节	结点列表法	277
第八节	状态方程的矩阵形式	279
习题		284
第十三章	二端口网络	288
第一节	二端口网络的概念	288
第二节	二端口网络方程和参数	289
第三节	二端口网络的等效电路	295
第四节	二端口网络的转移函数	297
第五节	二端口网络连接方式	300
第六节	理想回转器与负阻抗变换器	302
习题		304
第十四章	非线性电路分析概论	308
第一节	非线性电阻	308
第二节	非线性电阻电路方程	311
第三节	非线性电阻电路的图解法分析	312
第四节	小信号分析法	315
第五节	分段线性化法	317
* 第六节	数值求解方法	320
第七节	非线性电容和非线性电感	322
* 第八节	非线性动态电路方程	324
习题		326

第一章 电路的基本概念和定律

本章要求 深刻理解理想电路元件、电路模型、参考方向及关联参考方向等概念；熟练掌握功率的计算，判断功率的吸收与发出；掌握电阻、电容、电感、独立电源和受控源的伏安特性；熟练掌握基尔霍夫定律（KCL 和 KVL），并能灵活地运用于电路的分析计算。

本章重点 功率的计算，并判断功率的吸收与发出；基本元件的伏安特性；基尔霍夫电流、电压定律。

第一节 电 路 模 型

一、电路 (circuit)

所谓电路，是由电气器件相互连接所构成的电流通路。复杂的电路又称网络。在日常工作和生活中，到处可以见到实际电路，如通信电路、计算机电路、自动控制电路、电力电路、电气照明电路等，实际电路由实际电路元件构成，实际电路元件包括电阻器、电容器、电感线圈、晶体管、变压器、运算放大器和电源设备等。

随着电流的通过，在电路中进行着将其他形式的能量转换成电能、电能的传递和分配，以及把电能转换成所需的其他形式能量的过程。典型的例子是电力系统，发电厂的发电机把热能、原子能或水能等转换成电能，通过变压器、输电线传输给各用电单位，在那里又把电能转换成机械能、光能、热能等，这样构成了一个极为复杂的电路或系统。提供电能的设备称为电源，用电设备称为负载。电压和电流是在电源的作用下产生的，因此，电源又称为激励。由激励而在电路中产生的电压和电流称为响应。根据激励和响应之间的因果关系，有时把激励称为输入，响应称为输出。

除了能传输电能外，电路还具有信号处理、测量、控制、计算等功能。如收音机电路，电路接收无线电信号，经调谐、检波、放大等处理，从扬声器中可收听到电台的声音。

二、电路模型 (circuit model)

实际电路种类繁多、功能各异，几何尺寸相差很大，如电力系统、通信系统可以跨越省界国界，而集成电路芯片可以小到不大于指甲，在上面有成千上万个晶体管相互连接成为一个电路，为了便于对电路进行定性分析和定量计算，就需要建立实际电路的模型。

实际电路元件虽然品种很多，但在电磁现象方面却有共同的地方，为此，引入理想电路元件。理想电路元件是具有某种电磁性质的假想元件，把消耗电能的性质用“电阻元件”来表征，如各种电阻器、电灯、电炉等；把储存电场能量的性质用“电容元件”来表征，如各种类型的电容器；把储存磁场能量的性质用“电感元件”来表征，如各种线圈；把供给电能的性质用“电源元件”来表征，如电池和发电机。因此，实际电路中每一个元件都用理想电路元件或它们的组合来代替，得到的就是对应于原实际电路的电路模型。通常所说的电路分析，就是对由理想电路元件组成的电路模型的分析。

理想电路元件有电阻、电容、电感、独立电源、受控源以及理想变压器、回转器等，其中电阻、电容、电感、独立电源为主要的二端理想电路元件。电路模型中常用电路元件的图形符号见表 1-1。

表 1-1

电路模型中常用电路元件的图形符号

名 称	符 号	名 称	符 号
理想导线		连接的导线	
电阻		可变电阻	
非线性电阻		理想二极管	
电感		电容	
独立电压源		独立电流源	
受控电压源		受控电流源	
回转器		理想变压器和耦合电感	
理想开关		理想运算放大器	
接地点			

图 1-1 (a) 所示为含有一个电源即干电池，一个负载即小灯泡和两根连接导线的简单电路，其电路模型如图 1-1 (b) 所示，其中小灯泡用电阻元件 R 来表示，干电池用直流电压源 U_S 和电阻元件 R_S 的串联来表示，连接导线用理想导线（其电阻设为零）来表示。

用理想电路元件或它们的组合模拟实际器件，建模时必须考虑实际电路的使用条件和所要求的精确度。例如，在直流情况下，一个线圈的模型可以是一个电阻元件；在较低频率下，就要用电阻元件和电感元件的串联组合模拟；在较高频率下，除了电阻和电感，还需要包含电容元件。可见，在不同的条件下，同一实际器件可能采用不同的模型。本书不讨论电路的建模问题。今后本书所说电路一般均指由理想电路元件构成的电路模型，而非实际电路，同时将把理想电路元件简称为电路元件。

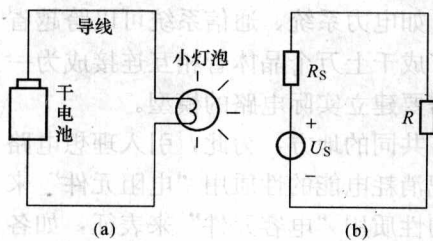


图 1-1 实际电路与电路模型

(a) 实际电路；(b) 电路模型

理想电路元件的电磁过程被认为都是在元件内部进行的，所以在任何时刻，流入二端理想电路元件的

一端钮的电流恒等于从另一端钮流出的电流，两端钮之间的电压为单值量。满足上述情况的电路元件又称集总（参数）元件。由集总元件构成的电路称为集总电路。

用集总电路来模拟实际电路是有条件的，这个条件就是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，不满足集总电路条件的是分布（参数）电路，由电磁场课程讲授。

第二节 电流和电压的参考方向

一、电流的参考方向 (current reference direction)

电路的基本变量有电流、电压、电荷、磁通、功率和能量，最主要的是电流、电压和功率。在电路分析中，事先不一定能断定某一段电路中的电流或电压的实际方向，有时实际方向还随时间变动，因此很难在电路中标明实际方向，需要指定电流或电压的参考方向。

图 1-2 所示为电路的一部分，其中长方框表示一个二端元件，电流的实际方向是正电荷流动的方向，其实际方向或是由 A 指向 B，或是由 B 指向 A。任意指定某一方向作为电流 i 的参考方向，当然，所选的电流方向不一定就是电流的实际方向，根据所指定的参考方向，若电流的参考方向与实际方向一致，则电流为正，即 $i > 0$ ，如图 1-2 (a) 所示；反之，若电流的参考方向与实际方向相反，则电流为负，即 $i < 0$ ，如图 1-2 (b) 所示。因此，在指定的参考方向下，电流值的正和负就可反映出电流的实际方向。

电流的参考方向可以任意指定，一般用箭头表示，也可以用双下标表示，例如 i_{AB} 表示参考方向是由 A 指向 B。

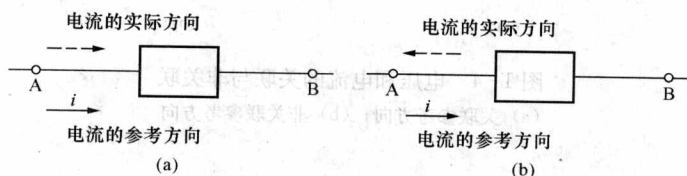


图 1-2 电流的实际方向与参考方向的关系

(a) $i > 0$; (b) $i < 0$

二、电压的参考方向 (voltage reference direction)

同理，对电路中两点之间的电压也可以指定参考方向或参考极性。电压的实际方向是从高电位指向低电位，但电压的实际方向往往事先不知道，因此指定任意一个方向作为某段电路或某一元件上电压的参考方向，若电压的参考方向与实际方向一致，则电压为正，即 $u > 0$ ，如图 1-3 (a) 所示；反之，若电压的参考方向与实际方向相反，则电压为负，即 $u < 0$ ，如图 1-3 (b) 所示。因此，在指定的参考方向下，电压值的正和负就可反映出电压的实际方向。

电压的参考方向可以任意指定，一般用箭头表示 [如图 1-3 (a) 所示]；也可以用“+”、“-”极性来表示 [如图 1-3 (b) 所示]，从“+”极性端指向“-”极性端的方向就是电压的参考方向，因此电压的参考方向又称参考极性；用“+”、“-”或箭头表示时两者择一即可。电压的参考方向还可以用双下标表示，例如 u_{AB} 表示参考方向是由 A 指向 B。

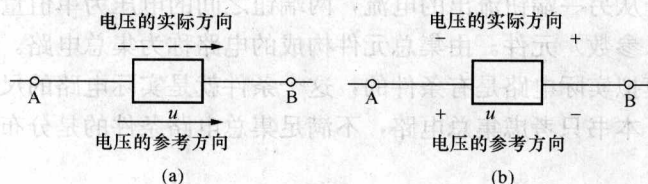


图 1-3 电压的实际方向与参考方向的关系

(a) $u > 0$; (b) $u < 0$

三、关于电流和电压的参考方向的几点说明

(1) 电流和电压的参考方向可任意选定，但一旦选定后，在电路的分析和计算过程中不能改变。

(2) 引入电流和电压的参考方向后，当电流和电压为时间的函数时，若某一时刻由函数所确定的电流或电压的值为正，则表示在该时刻的实际方向与参考方向一致，反之，若由函数所确定的值为负，则表示在该时刻的实际方向与参考方向相反。

(3) 对一段电路或一个元件上电流的参考方向和电压的参考方向可各自任意选定，如果指定的电流的参考方向从电压的“+”极性端流入，从“-”极性端流出，或都用箭头表示时，它们的参考方向一致，则把电流和电压的这种参考方向称为关联参考方向，如图 1-4 (a) 所示；当两者参考方向不一致时，称为非关联参考方向，如图 1-4 (b) 所示。

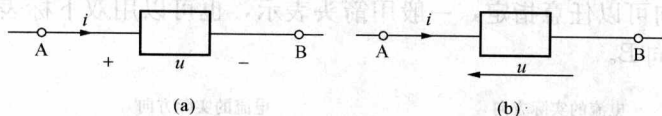


图 1-4 电压和电流的关联与非关联

(a) 关联参考方向；(b) 非关联参考方向

第三节 功率和能量

在电路的分析和计算中，能量和功率 (power and energy) 的计算是十分重要的。这是因为电路在工作状态下总伴随有电能与其他形式能量的相互转换；另一方面，电器设备、电路元件本身都有功率的限制，在使用时要注意其电流或电压值是否超过额定值，过载会使设备或元件损坏，或是不能正常工作。

功率与电压和电流密切相关。当正电荷从电压的“+”极性端经该电路或元件移到“-”极性端，这是电场力对正电荷做功的结果，在 dt 时间内通过的电荷量为

$$dq = i dt \quad (1-1)$$

由物理学知道，电压 u 为电场力将单位正电荷从“+”极性端移到“-”极性端所作的功，因此移动 dq 电荷电场力所作的功为

$$dW = u dq = u i dt \quad (1-2)$$

即为正电荷 dq 从“+”极性端移到“-”极性端时减少的能量，这部分能量为该段电路所

吸收, 吸收的功率为

$$p(t) = \frac{dW}{dt} = ui \quad (1-3)$$

式 (1-3) 中, u 和 i 都是时间的函数, 而且是代数量。由于电压、电流的方向均为参考方向, 它们的量值或正或负, 因此功率 p 也有正或负两种可能。

若电流和电压为关联参考方向, 如图 1-5 (a) 所示, 当 $p > 0$ 时, 表示正电荷确实是从高电位移向低电位, 电场力作正功, 这段电路或元件吸收 (消耗) 功率; 反之, 当 $p < 0$ 时, 表示正电荷实际从低电位移向高电位, 是外力克服电场力作功, 表示这段电路或元件吸收负的功率, 实际上是发出 (释放) 功率。

若电流和电压为非关联参考方向, 如图 1-5 (b) 所示, 当 $p > 0$ 时, 这段电路或元件发出功率; 反之, 当 $p < 0$ 时, 表示发出负的功率, 实际上是吸收功率。

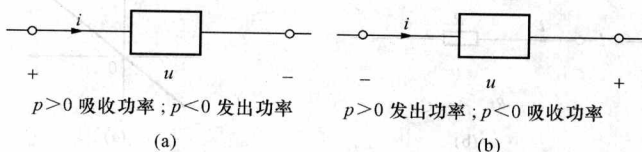


图 1-5 元件的功率

(a) 关联参考方向; (b) 非关联参考方向

功率是能量对时间的导数, 能量是功率对时间的积分, 能量表达式为

$$W = \int_{t_0}^t u(\tau) i(\tau) d\tau \quad (1-4)$$

电流的单位为 A (安培, 简称安), 电压的单位为 V (伏特, 简称伏), 时间的单位为 s (秒) 时, 电荷的单位为 C (库仑, 简称库), 功率的单位为 W (瓦特, 简称瓦), 能量的单位为 J (焦耳, 简称焦)。

第四节 无源二端元件

电路元件是电路中最基本的组成单元。理想电路元件是通过端钮与外部电路相连接的, 根据端钮的个数, 可分为二端、三端和四端元件等。电路元件还可分为无源元件 (passive element) 和有源元件 (active element), 线性元件和非线性元件, 时不变元件和时变元件等。主要的理想电路元件中, 电阻元件、电容元件和电感元件为无源二端理想元件, 独立电压源和独立电流源为有源二端理想元件, 受控源为多端元件。

一、电阻元件 (resistor element)

电阻器、灯泡、电炉等在一定条件下可以用二端线性电阻元件表示其模型。线性电阻元件满足: 当电压和电流取关联参考方向时, 如图 1-6 (a) 所示, 在任何时刻它两端的电压和电流关系服从欧姆定律, 即有

$$u = Ri \quad \text{或} \quad i = Gu \quad (1-5)$$

式中 R ——元件的电阻;

G ——元件的电导, $G = \frac{1}{R}$ 。

R 、 G 是正实常数。当电流的单位用 A，电压的单位用 V 表示时，电阻的单位为 Ω （欧姆，简称欧），电导的单位为 S（西门子，简称西）。

如果电阻元件上电压和电流取非关联参考方向，如图 1-6 (b) 所示，则欧姆定律应写为

$$u = -Ri \quad \text{或} \quad i = -Gu \quad (1-6)$$

电阻元件上电压和电流的函数关系称为伏安特性，线性电阻的伏安特性曲线是一条通过原点的直线，如图 1-7 (a) 所示。非线性电阻的伏安特性曲线不是一条通过原点的直线，如图 1-7 (b) 所示，是半导体二极管的伏安特性曲线。非线性电阻元件的电压电流关系一般可写成

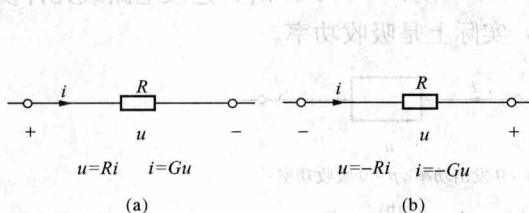


图 1-6 线性电阻元件
(a) 关联参考方向；(b) 非关联参考方向

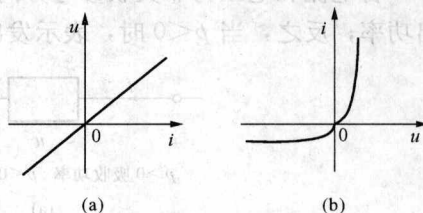


图 1-7 电阻元件的伏安特性曲线
(a) 线性电阻；(b) 非线性电阻

$$u = f(i) \quad \text{或} \quad i = h(u)$$

元件上的电阻将随电压或电流的改变而改变，它不能只用一个参数 R 或 G 来表示，具体内容将在第十四章中介绍。

当电压 u 和电流 i 取关联参考方向时，电阻元件消耗的功率为

$$p = ui = Ri^2 = \frac{u^2}{R} = Gu^2 = \frac{i^2}{G} \quad (1-7)$$

R 和 G 是正实常数，故功率 p 恒为正值。这说明，任何时刻电阻元件绝不能发出电能，而只能吸收电能，是一种无源元件，而且还是耗能元件。

电阻元件从 t_0 到 t 的时间内吸收的电能为

$$W = \int_{t_0}^t Ri^2(\tau) d\tau$$

电阻元件一般把吸收的电能转换成热能消耗掉。

二、电容元件 (capacitor element)

电容器的应用极为广泛，电容器都是由间隔以不同介质（如云母、绝缘纸、电解质等）的两块金属极板组成。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，这些等量异号的电荷在介质中形成电场并具有电场能量。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场能量的部件。实际电容器因介质不是理想绝缘体，往往会出现一些漏电现象，如果不考虑这种微弱的漏电现象，电容器就可看作是一种理想的二端元件，称为电容元件，电路符号如图 1-8 (a) 所示。

当将电压 u 加在电容元件上，极板上分别带有正负电荷 $+q$ 和 $-q$ ，如果电容元件上的电荷 q 和电压 u 的关系曲线（库伏特性）在 $q-u$ 平面上是一条通过原点的直线，如图 1-8

(b) 所示, 则此电容元件称为线性电容元件。非线性电容元件的库伏特性不是一条通过原点的直线。对于线性电容元件有

$$q = Cu \quad (1-8)$$

式 (1-8) 中, C 为正实常数, 称为电容, 它与两端电压 u 的大小无关, 如果电荷的单位为 C (库仑), 电压的单位为 V, 则电容的单位为 F (法拉, 简称法)。实际上电容器的电容往往比 1F 小得多, 故常用 μF (微法) 或 pF (皮法) 为单位, 它们的换算关系为: $1\mu\text{F} = 10^{-6}\text{F}$, $1\text{pF} = 10^{-12}\text{F}$ 。

如果电容的电压和电流取关联参考方向, 如图 1-8 (a) 所示, 则有

$$i = \frac{dq}{dt} = C \frac{du}{dt} \quad (1-9)$$

表明电流与电压的变化率成正比。如果电压 u 恒定不变, 即直流情况下, $\frac{du}{dt} = 0$, 电流为零, 电容相当于开路。故电容有隔直通交的作用。

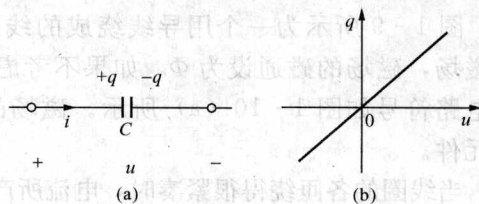


图 1-8 电容元件及其库伏特性

(a) 电容元件电路符号; (b) 线性电容元件库伏特性

根据式 $i = \frac{dq}{dt}$, 电容元件的电荷可表示为

$$q(t) = \int_{-\infty}^t i(\tau) d\tau = \int_{-\infty}^{t_0} i(\tau) d\tau + \int_{t_0}^t i(\tau) d\tau = q(t_0) + \int_{t_0}^t i(\tau) d\tau \quad (1-10)$$

对于电压, 由于 $u = \frac{q}{C}$, 因此有

$$u(t) = u(t_0) + \frac{1}{C} \int_{t_0}^t i(\tau) d\tau \quad (1-11)$$

其中, $q(t_0)$ 和 $u(t_0)$ 为 t_0 时刻电容的电荷量和电压。

式 (1-10) 和式 (1-11) 表明在任一时刻 t , 电容的电荷量和电压并不取决于该时刻的电流值, 而与电流的全部过程有关, 所以电容对电流具有记忆作用。与之相比, 电阻元件的电压仅与该瞬间的电流值有关, 是无记忆元件。

在电压和电流关联参考方向的情况下, 线性电容元件吸收的功率为

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

电容从初始时刻 t_0 至任一时刻 t 期间吸收的电场能量为

$$\begin{aligned} W_C &= \int_{t_0}^t p(\tau) d\tau = \int_{t_0}^t Cu(\tau) \frac{du(\tau)}{d\tau} d\tau \\ &= \int_{u(t_0)}^{u(t)} Cu(\tau) du(\tau) = \frac{1}{2} Cu^2(t) - \frac{1}{2} Cu^2(t_0) \\ &= W_C(t) - W_C(t_0) \end{aligned} \quad (1-12)$$

电容吸收的能量以电场能量的形式储存在元件中。电容元件充电时, 电压增大, 则 $W_C(t) > W_C(t_0)$, 故在此期间内元件吸收能量; 电容元件放电时, 电压减小, 则 $W_C(t) < W_C(t_0)$, 元件释放能量。电容元件是一种储能元件, 它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。同时, 电容也是一种无源元件, 它不会释放出

多于它吸收或储存的能量。

当 $t_0 = 0, u(0) = 0$ 时, 电容在任何时刻 t 储存的电场能量将等于它吸收的能量, 可写成

$$W_C = \frac{1}{2} C u^2(t) \quad (1-13)$$

它表明电容所储存的能量只与该时刻的电压瞬时值有关, 而与电压建立过程无关。

三、电感元件 (inductor element)

用导线绕制的线圈在工程中广泛应用, 例如, 常用的空心或带有铁芯的线圈。当一个线圈通以电流后产生的磁场随时间变化时, 在线圈中就产生感应电压。

图 1-9 所示为一个用导线绕成的线圈, 当线圈中有电流 i 通过时, 线圈周围建立起磁场, 磁场的磁通设为 Φ 。如果不考虑导线的电阻, 这就是理想电感元件, 电感元件的电路符号如图 1-10 (a) 所示。磁场的存在, 说明电感线圈是一种能储存磁场能量的元件。

当线圈的各匝绕得很紧凑时, 电流所产生的磁通 Φ 和 N 匝线圈交链, 则磁链为

$$\Psi = N\Phi \quad (1-14)$$

它表示与整个线圈相交链的磁通的总和。这种由线圈本身的电流所产生的磁通 Φ 和磁链 Ψ 分别称为自感磁通和自感磁链。 Φ 和 Ψ 方向与 i 的参考方向成右螺旋关系, 如图 1-9 所示。如果在 $\Psi-i$ 平面上, 韦安特性是一条通过原点的直线, 如图 1-10 (b) 所示, 则此电感元件称为线性电感元件。非线性电感元件的韦安特性不是一条通过原点的直线。对于线性电感元件有

$$\Psi = Li \quad (1-15)$$

式中, L 为正实常数, 与通过它的电流 i 的大小无关, 称为自感系数, 简称电感。当电流的单位为 A, 磁通和磁链的单位为 Wb (韦伯, 简称韦), 则电感的单位为 H (亨利, 简称亨)。有时也采用 mH (毫亨) 或 μH (微亨)。它们的换算关系为: $1\text{mH} = 10^{-3}\text{H}$, $1\mu\text{H} = 10^{-6}\text{H}$ 。

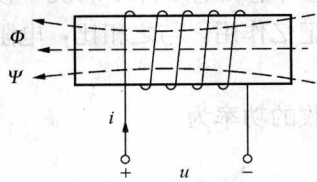


图 1-9 电感线圈

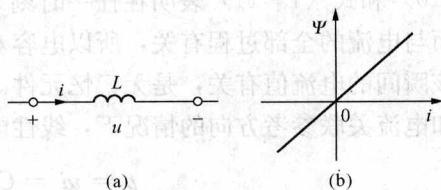


图 1-10 电感元件及其韦安特性

(a) 电感元件电路符号; (b) 线性电感元件韦安特性

当磁链随时间变化时, 在线圈两端产生感应电压, 如果感应电压 u 的参考方向与 Ψ 成右螺旋关系, 即取电压和电流为关联参考方向, 如图 1-10 (a) 所示, 根据电磁感应定律, 有

$$u = \frac{d\Psi}{dt} = \frac{d(Li)}{dt} = L \frac{di}{dt} \quad (1-16)$$

表明电压与电流的变化率成正比。电流变化快, 则感应电压大; 电流变化慢, 则感应电压小。如果电流 i 恒定不变, 即直流情况下, $\frac{di}{dt} = 0$, 电压为零, 电感相当于短路。故电感有

隔交通直的作用。

根据式 $u = \frac{d\Psi}{dt}$, 电感元件的磁链和电流可表示为

$$\Psi(t) = \int_{-\infty}^t u(\tau) d\tau = \int_{-\infty}^{t_0} u(\tau) d\tau + \int_{t_0}^t u(\tau) d\tau = \Psi(t_0) + \int_{t_0}^t u(\tau) d\tau \quad (1-17)$$

$$i(t) = \frac{\Psi}{L} = i(t_0) + \frac{1}{L} \int_{t_0}^t u(\tau) d\tau \quad (1-18)$$

其中, $\Psi(t_0)$ 和 $i(t_0)$ 为 t_0 时刻电感的磁通链和电流。

式 (1-17) 和式 (1-18) 表明在任一时刻 t , 电感的磁通链和电流并不取决于该时刻的电压值, 而与电压的全部过程有关。所以电感对电压具有记忆作用。

在电压和电流的关联参考方向的情况下, 线性电感元件吸收的功率为

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

电感从初始时刻 t_0 至任一时刻 t 期间吸收的磁场能量为

$$\begin{aligned} W_L &= \int_{t_0}^t p(\tau) d\tau = \int_{t_0}^t Li(\tau) \frac{di(\tau)}{d\tau} d\tau \\ &= \int_{i(t_0)}^{i(t)} Li(\tau) di(\tau) = \frac{1}{2} Li^2(t) - \frac{1}{2} Li^2(t_0) \\ &= W_L(t) - W_L(t_0) \end{aligned} \quad (1-19)$$

电感吸收的能量以磁场能量的形式储存在元件中。电感元件充电时, 电流增大, 则 $W_L(t) > W_L(t_0)$, 故在此期间内元件吸收能量; 电感元件放电时, 电流减小, 则 $W_L(t) < W_L(t_0)$, 元件释放能量。电感元件是一种储能元件, 它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。同时, 电感也是一种无源元件, 它不会释放出多于它吸收或储存的能量。

当 $t_0 = 0, i(0) = 0$ 时, 电感在任何时刻 t 储存的磁场能量将等于它吸收的能量, 可写成

$$W_L = \frac{1}{2} Li^2(t) \quad (1-20)$$

它表明电感所储存的能量只与该时刻的电流瞬时值有关, 而与电流建立过程无关。

例 1-1 图 1-11 (a) 所示电路中, 电感上的电压波形如图 1-11 (b) 所示, 已知 $i(0) = 0$, 画出电流 $i(t)$ 的波形。

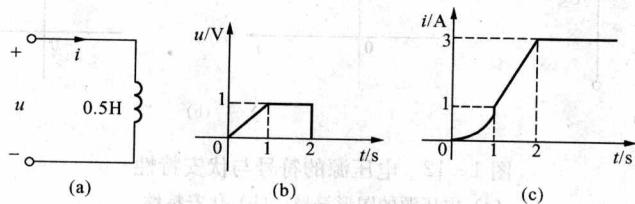


图 1-11 例 1-1 图

(a) 电路; (b) 电压波形; (c) 电流 $i(t)$ 波形

解 $u(t)$ 用分段函数表示为