



“十三五”普通高等教育本科规划教材

Fundamentals of Electric Circuits

电路基础

章宝歌 主 编
田 莉 马铁信 副主编



配套课件



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS



“十三五”普通高等教育本科规划教材

电路基础

主 编 章宝歌
副主编 田 莉 马铁信
编 写 汤旻安
主 审 朱常青



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本教材为“十三五”普通高等教育本科规划教材。

本教材依据高等学校电路课程教学基本要求和课程体系改革编写。本教材共分11章,主要包括电路的基本概念与基本定律、电路的等效变换、电路的一般分析方法、电路定理、正弦交流电路、耦合电感电路、三相电路、非正弦周期信号电路、动态电路的时域分析、二端口网络、NI Multisim 10 电路仿真等。在每章开头有教学概述和学习重点,章后还附有小结以及精选的难度适中的习题,以方便读者学习和巩固所学内容。

本教材内容精炼、重点突出,既可作为高等院校电类、非电类的专科生、本科生的电路课程教材或参考书,也可供有关科技、工程领域技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

电路基础/章宝歌主编. —北京:中国电力出版社, 2015. 8

“十三五”普通高等教育本科规划教材

ISBN 978-7-5123-8041-7

I. ①电… II. ①章… III. ①电路理论-高等学校-教材
IV. ①TM13

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 158800 号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街 19 号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)

三河市航远印刷有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2015 年 8 月第一版 2015 年 8 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 17.75 印张 427 千字

定价 36.00 元

敬告读者

本书封底贴有防伪标签,刮开涂层可查询真伪

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

电路基础是工科电子信息类专业的一门重要专业基础课,目的是使学生理解电路的基本工作原理,掌握电路的基本分析方法,为学习“电子技术”和“信号与系统分析”等后续有关课程建立必要的电学基础。本教材为“十三五”普通高等教育本科规划教材,是依据高等学校电路课程教学基本要求和课程体系改革编写的。随着教学改革的发展,学时压缩,要求教材少而精,为此,本教材在编写过程中,参考了大量优秀的教材,并结合自身的教学实践经验,力求概念清晰,阐述简明,内容精炼,重点突出。

本教材写作过程中遵循先易后难、循序渐进的原则,在课程结构安排上采用先讨论直流电路分析,再讨论单相正弦稳态电路分析和三相正弦稳态电路分析,然后独立讨论暂态电路分析,最后介绍 NI Multisim 10 电路仿真分析的体系。本教材可作为大专院校电类、非电类的专科生、本科生的电路课程教材或参考书,也可作为实际工程领域工程技术人员的参考书。

本教材内容注重电路原理的基础性,以电路原理的基本内容和基本概念为重点出发,把基本概念放在第一位,力求够用、实用,突出理论与实际相结合,真正实现启迪思维、开拓能力、即学即用的目标。书中配有相关的思考题和例题,以加强电路的基本方法和基本定律的应用。同时为了强调技术应用能力与专业的紧密结合,精选了部分实际应用知识,以增强知识的延伸。为了提高教师的教学效果和学生的学习效果,本教材的各章开头有教学概述和学习重点,各章结尾还有小结,并精选了大量的配套习题,难度适中,有利于增强分析问题和解决问题的能力。

本教材共分 11 章,第 6、7、8、10 章和附录 B、附录 C 以及习题参考答案由章宝歌编写,第 2~5 章和附录 A 由田莉编写,第 1、9、11 章由汤旻安编写,在编写过程中,兰州工业学院马铁信提出了很多指导建议。本教材由章宝歌任主编并负责统稿。同时,在教材的编写过程中,得到了兰州交通大学自动化与电气工程学院电工学教研室的全体老师热情帮助和大力支持,山东大学朱常青老师在百忙之中审阅了本书的全稿,在此一并表示诚挚的感谢。

限于编者的水平和精力,本书难免还存在一些不当和不足之处,恳请广大同行和读者不吝赐教,给予批评指正。

编 者
2015 年 7 月

目 录

前言

第1章 电路的基本概念与基本定律	1
1.1 电路与电路模型	1
1.2 电路分析的变量	2
1.3 电路元件	6
1.4 基尔霍夫定律	12
本章小结	15
习题	16
第2章 电路的等效变换	19
2.1 电阻的串并联等效变换	19
2.2 电阻的星形与三角形连接的等效变换	22
2.3 含独立源电路的等效变换	25
2.4 含受控源电路的等效变换	32
本章小结	33
习题	34
第3章 电路的一般分析方法	37
3.1 网络图论的基本概念	37
3.2 支路电流法	40
3.3 回路电流法	43
3.4 节点电压法	48
本章小结	52
习题	53
第4章 电路定理	57
4.1 叠加定理	57
4.2 替代定理	61
4.3 等效电源定理	62
4.4 特勒根定理	69
4.5 互易定理	71
4.6 对偶原理	74
本章小结	75
习题	76
第5章 正弦交流电路	79
5.1 正弦量的基本概念	79

5.2	正弦量的相量法	82
5.3	电路定律的相量形式	85
5.4	复阻抗和复导纳	88
5.5	正弦稳态电路的分析	93
5.6	交流电路的功率	95
5.7	电路中的谐振	101
	本章小结	104
	习题	106
第 6 章	耦合电感电路	109
6.1	互感现象及耦合电感的伏安特性	109
6.2	空心变压器和理想变压器	113
6.3	耦合电感电路的去耦等效	118
	本章小结	122
	习题	123
第 7 章	三相电路	129
7.1	三相电源	129
7.2	三相电路的连接	130
7.3	对称三相电路的分析计算	134
7.4	不对称三相电路的分析计算	137
7.5	三相电路的功率与测量方法	139
	本章小结	142
	习题	143
第 8 章	非正弦周期信号电路	148
8.1	非正弦周期信号	148
8.2	非正弦周期信号的分解	149
8.3	有效值、平均值和平均功率	153
8.4	非正弦周期电流电路的稳态分析	156
8.5	对称三相电路中的高次谐波	160
8.6	滤波器	162
	本章小结	165
	习题	166
第 9 章	动态电路的时域分析	170
9.1	暂态电路和经典分析法	170
9.2	一阶电路的零输入响应	175
9.3	一阶电路的零状态响应	180
9.4	一阶电路的全响应	185
9.5	一阶电路的三要素求解法	188
9.6	二阶电路的动态过程	193
	本章小结	197

习题	198
第 10 章 二端口网络	203
10.1 二端口网络的概念	203
10.2 二端口网络的方程与参数	204
10.3 二端口网络的等效电路	210
10.4 二端口网络的连接	213
10.5 多端元件	217
本章小结	221
习题	223
第 11 章 NI Multisim 10 电路仿真	225
11.1 NI Multisim 10 操作环境	225
11.2 NI Multisim 10 基本操作	231
11.3 NI Multisim 10 在电路中的仿真应用	235
本章小结	250
习题	252
附录 A 阻抗星形-三角形连接转换	255
附录 B 线性电路动态过程拉普拉斯变换法	257
附录 C 常用物理量及其主单位	262
部分习题参考答案	264
参考文献	273

第1章 电路的基本概念与基本定律

电路是电工技术和电子技术的基础。本章从电路模型入手,通过电阻电路讨论电路的基本物理量、电压和电流及其参考方向、电路的基本定律、理想元件等,这些内容都是分析与计算各类电路的基础。



学习重点

理解电路模型的概念;理解参考方向的概念;掌握基尔霍夫定律;掌握理想元件的特性;掌握元件性质的判断方法;会在参考方向下利用电路定律分析计算基本电路。

1.1 电路与电路模型

1.1.1 电路的组成与作用

电路即电流的通路,它是为了满足某种用途由某些电器设备或器件按一定的方式相互连接组成的。

电路一般包括电源、负载和中间环节三个组成部分。电源是将非电能量转换为电能量的供电设备,例如电池、发电机和信号源等,负载是将电能转换为非电能量的用电设备,例如电动机、照明灯、信号灯和电炉等,负载的大小用负载取用的功率大小来衡量。中间环节则起着沟通电路、输送电能与电信号的作用,包括导线、开关和熔断器等一些实现对电路连接、控制、测量及保护的装置与设备。

电路的作用一般分为以下两类:

(1) 实现电能的传输和转换。如电力系统,它将发电机产生的电能通过输电线输送到各用户,供给动力、电热、电解、电镀和照明用电,如图 1-1 (a) 所示。由于这类电路电压较高,电流、功率较大,常称为强电电路。

(2) 用于进行电信号的传递和处理。如收音机和电视机,它们的接收天线(信号源)把载有语音、图像信息的电磁波接收后转换为相应的电信号,而后通过电路把信号进行传递和处理(调谐、变频、检波、放大等),送到扬声器和显像管(负载),还原为原始信息,如图 1-1 (b) 所示。这类电路通常电压较低,电流、功率较小,常称为弱电电路。

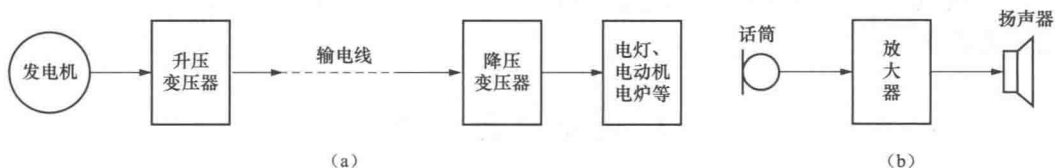


图 1-1 电路示意图

(a) 电力系统示意简图; (b) 扩音机电路

不论是电能的传输和转换,或者是信号的传递和处理,其中电源或信号源的电压或电流称为激励,它推动电路工作,而激励在电路各部分产生的电压和电流称为响应。

所谓电路分析,就是在已知电路结构和元件参数的条件下,讨论激励与响应之间的关系。

1.1.2 电路元件与电路模型

各种实际的电器设备和元件在工作时,其物理特性是比较复杂的。电路的电磁过程很难用简单的数学表达式来描述。例如,一个实际电感线圈,当有电流通过时,不仅会产生磁场,形成磁场,而且还会消耗电能,即线圈不仅具有电感性质,而且具有电阻性质。不仅如此,电感线圈的匝与匝之间还存在分布电容,具有电容性质。

为了研究电路的一般规律,常常需要将实际元件理想化,忽略其次要因素,用反映它们主要物理性质的理想元器件来代替。这种由理想元器件组成的电路称为电路模型,它是对实际电路物理性质的抽象和概括。

理想电路元件(简称电路元件)分为两类:有源元件和无源元件。基本的有源元件有电压源和电流源,基本的无源元件有电阻元件、电感元件、电容元件,如图1-2所示。这些理想电路元件具有单一的物理特性和严格的数学定义。实际电气器件消耗电能的物理特性用电阻元件来表征,实际电气器件存储磁场能的物理特性用电感元件来表征,实际电气器件存储电场能的物理特性用电容元件来表征,等等。因此,根据不同的工作条件,可以把一个实际电气器件用一个理想电路元件或几个理想电路元件的组合来模拟,从而把一个由实际电气器件连接成的实际电路转化为一个由理想电路元件组合而成的电路模型。建立实际电路的电路模型是分析研究电路问题的常用方法。

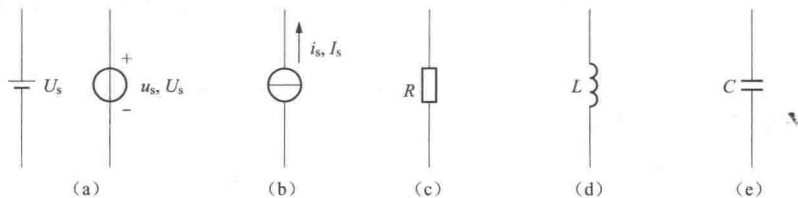


图 1-2 理想电路元件模型

(a) 电压源; (b) 电流源; (c) 电阻元件; (d) 电感元件; (e) 电容元件



思考题

1. 电路由哪几部分组成? 它们分别在电路中起什么作用?
2. 某负载为一可变电阻器, 由电压一定的蓄电池供电, 当负载电阻增加时, 该负载是增加了还是减小了?

1.2 电路分析的变量

电流、电压、电荷、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, 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、电压表示电路功率和能量问题。

1.2.1 电流及其参考方向

把单位时间内通过导体横截面的电荷量定义为电流强度，用以衡量电流的大小。电流强度常简称为电流，用符号 i 表示，即

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

正电荷运动的方向或负电荷运动的反方向为电流的实际方向。

如果电流的大小和方向都不随时间变化，则称为直流电流，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

$$I = \frac{q}{t} \quad (1-2)$$

在国际单位制 (SI) 中，电流、电荷和时间的单位分别为 A (安 [培]，简称安)、C (库 [仑]，简称库) 和 s (秒)。在通信和计算机技术中常用 mA (毫安)、 μA (微安) 作为电流单位。

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。在简单直流电路中，可以根据电源的极性判别出电压和电流的实际方向，但在复杂直流电路中，电压和电流的实际方向往往是无法预知的；而在交流电路中，电压和电流的实际方向是随时间不断变化的。为此，引入电流参考方向的概念。

图 1-3 所示为电路元件接入电路 a、b 两点间，流经电路元件的电流 i 的参考方向用箭头表示，电流的参考方向可以任意选定，但一经选定，就不再改变。

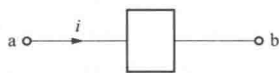


图 1-3 电流的参考方向

如经过计算其电流值为正值，表示参考方向与电流的真实方向一致；如电流值为负值，表示参考方向与真实方向相反。

电流是代数量，既有数值又有与之相应的参考方向才有明确的物理意义，只有数值而无参考方向的电流是没有意义的。所以在求解电路时，必须首先选定电流的参考方向。

今后，电路图中箭头所标电流方向都是电流的参考方向。

1.2.2 电压及其参考方向

单位正电荷由 a 点移到 b 点时电场力所做的功称为这两点间的电位差，即这两点间的电压，用符号 u 表示，即

$$u = \frac{dW}{dq} \quad (1-3)$$

习惯上把电位降落的方向 (高电位指向低电位) 规定为电压的方向。通常电压的高电位端标为 “+” 极，低电位端标为 “-” 极。

如果电压的大小和方向都不随时间改变，则这种电压称为恒定电压或直流电压，用大写字母 U 表示。在这种情况下，电场力做的功与电荷量成正比，即

$$U = \frac{W}{q} \quad (1-4)$$

在国际单位制 (SI) 中，电压、能量 (功) 的单位分别为 V，(伏 [特]，简称伏) 和 J (焦 [耳])。1V=1J/C。在通信和计算机技术中常用 mV (毫伏)、 μV (微伏) 作为电压的单位。

像需要为电流选定参考方向一样,电压也需要选定参考方向(也称参考极性)。在电路图上用“+”表示参考极性的高电位端,“-”表示参考极性的低电位端,如图1-4(a)所示。电压的参考极性同样是任意选定的。如经过计算,电压值为正值,表示电压的参考极性与真实极性一致;如电压值为负值,则表示电压的参考极性与真实极性相反。

电压参考方向也可用 u 的双下标表示,如对于图1-4(a)来说,可用 u_{ab} 表示 a 点为参考正极性端“+”, b 点为参考负极性端“-”。当 $u>0$ 时,从 a 到 b 为电位降或电压降;当 $u<0$ 时,从 a 到 b 为电位升或电压升。有时也可用箭头表示电压的参考方向,如图1-4(b)所示箭头的方向是电位降的方向。

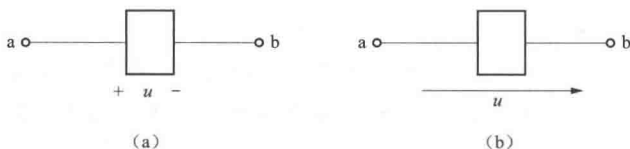


图1-4 电压的参考方向

(a) 用“+”和“-”表示;(b) 用箭头表示

与电流参考方向类似,不标注电压参考方向的情况下,电压的正负是毫无意义的,所以在求解电路时必须首先选定电压的参考方向。

1.2.3 关联参考方向

在电路分析中,电流与电压的参考方向是任意选定的,两者之间独立无关。但是为了方便起见,对于同一元件或同一段电路,习惯上采用关联参考方向,即电流的参考方向与电压参考“+”极到“-”极的方向选为一致,如图1-5所示。关联参考方向又称为一致参考方向。

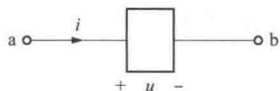


图1-5 关联参考方向

当电流、电压采用关联参考方向时,电路图上只需标电流参考方向和电压参考极性中的任意一种即可。

1.2.4 功率和能量

电路的基本作用之一是实现能量的传输。能量对时间的变化率称为功率,用字母 p 表示,即

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

应用式(1-1)、式(1-3)和式(1-5),得

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

对于如图1-6(a)所示的二端电路,当电压、电流采用关联参考方向时,可用式(1-6)求取其吸收功率。若求出的功率值为正值,表示该二端电路吸收了功率;若求出的功率值为负值,表示该二端电路供出了功率。

若二端电路的电压、电流采用非关联参考方向,如图1-6(b)所示,则可把电压或电流看成是关联参考方向时的负值,故电路吸收功率的公式应改为

$$p = -ui \quad (1-7)$$

根据电压、电流是否为关联参考方向, 可选用相应的功率计算公式。但不论是式 (1-6) 还是式 (1-7) 都是按吸收功率进行运算的。若计算出功率为正值, 均表示吸收了功率; 若计算出功率为负值, 均表示供出了功率。

若二端电路为直流电路, 则电路吸收功率亦不随时间而改变。式 (1-6) 和式 (1-7) 可分别改写为

$$P = UI \quad (1-8)$$

$$P = -UI \quad (1-9)$$

在国际单位制 (SI) 中, 功率的单位是 W (瓦 [特], 简称瓦)。1W=1J/s。

【例 1-1】 如图 1-7 所示二端电路, 某时刻端子上的电压、电流值已知, 求该时刻各电路的吸收功率

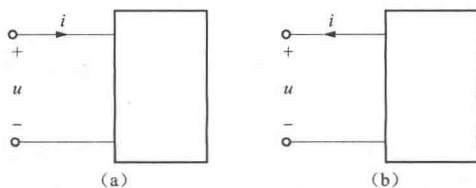


图 1-6 二端网络功率的计算方法
(a) 关联参考方向; (b) 非关联参考方向

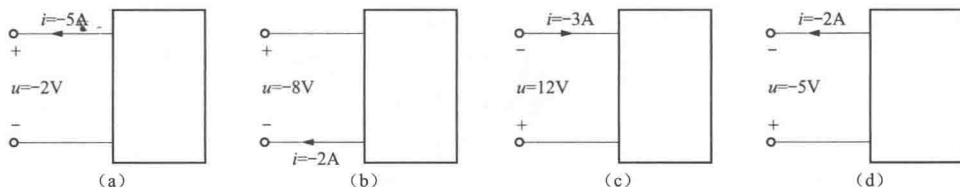


图 1-7 [例 1-1] 图

解 (1) 图 1-7 (a) 中, 电压、电流为非关联参考方向, 故用式 (1-7) 求解, 即

$$P = -ui = -(-2) \times (-5) = -10(\text{W})$$

图 1-7 (a) 所示电路吸收 -10W , 说明电路供出 10W 功率。

图 1-7 (b) 中, 电压、电流为关联参考方向, 故用式 (1-6) 求解, 即

$$P = ui = (-8) \times 2 = -16(\text{W})$$

图 1-7 (b) 所示电路吸收 -16W , 说明电路供出 16W 功率。

图 1-7 (c) 所示电压、电流为非关联参考方向, 故用式 (1-7) 求解, 即

$$P = -ui = -12 \times (-3) = 36(\text{W})$$

说明图 1-7 (c) 电路吸收 36W 功率。

图 1-7 (d) 所示电压、电流为关联参考方向, 故用式 (1-6) 求解, 即

$$P = ui = (-2) \times (-5) = 10(\text{W})$$

说明图 1-7 (d) 所示电路吸收 10W 功率。



思考题

1. 有一元件接于某电路的 a、b 两点之间, 已知 $U_{ab} = -5\text{V}$, 试问 a、b 两点哪点电位高?
2. U_{ab} 是否表示 a 端的电位高于 b 端的电位?

1.3 电 路 元 件

理想电路元件是组成电路模型的最小单元,电路元件本身就是一个最简单的电路模型。在电路中,电路元件的特性是由它端子上的电压、电流关系来表征的,通常称为伏安特性,它可以用数学关系式表示,也可描绘成电压、电流关系曲线——伏安特性曲线。

电路元件分为两大类:无源元件和有源元件。无源元件是指在接入任一电路进行工作的全部时间范围内总的输入能量不为负值的元件。不满足这个条件的元件即为有源元件。

本教材涉及的无源元件有电阻元件、电感元件和电容元件、互感元件和理想变压器元件。有源元件有独立源、受控源。本节首先介绍无源元件中的电阻元件、电感元件和电容元件以及有源元件,其余元件将在后面有关章节分别介绍。

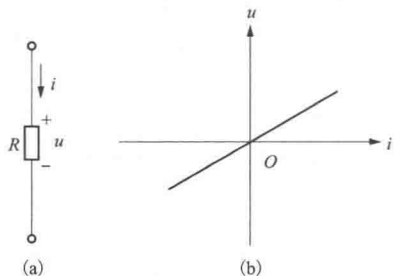


图 1-8 电阻元件

(a) 接入电路的图形符号; (b) 伏安特性

1.3.1 电阻元件

电气设备中不可逆地将电能转换成热能、光能或其他形式能量的特征可用“电阻”这个理想电路元件来表征,例如电灯、电炉等都可以用电阻来代替。

电阻的图形符号如图 1-8 (a) 所示。当电流通过电阻时将受到阻力,沿电流方向产生电压降,如图 1-8 (a) 所示。电压降与电流之间的关系遵从欧姆定律,在关联参考方向下,其表达式为

$$u = Ri \quad (1-10)$$

式中, R 是表示电阻元件阻碍电流变化这一物理性质的参数,电阻的单位是(欧姆 Ω)。

电阻元件也可用电导参数来表征,它是电阻 R 的倒数,用字母 G 表示,即

$$G = \frac{1}{R} \quad (1-11)$$

电导的单位是 S (西门子)。

在直角坐标系中,如果电阻元件的电压-电流特性(伏安特性)为通过坐标原点的一条直线,[见图 1-8 (b)] 就定义为线性电阻。这条直线的斜率就等于线性电阻的电阻值,是一个常数。

如果电阻元件的电阻值随着通过它的电流(或其两端的电压)的大小和方向变化,其伏安特性是曲线,则称为非线性电阻。

电流通过电阻元件时电阻消耗的电功率在 u 、 i 的参考方向一致时为

$$p = ui = Ri^2 = \frac{u^2}{R} \quad (1-12)$$

由于电阻元件的电流和电压降的实际方向总是一致的,所以算出的功率任何时刻都是正值,消耗电能,因此电阻是一种耗能元件。

1.3.2 电感元件

电感元件是用来表征电路中储存磁场能这一物理性质的理想元件。当有电流流过电感线圈时,其周围将产生磁场。磁通是描述磁场的物理量,磁通与产生它的电流方向间符合右手

螺旋定则,如图 1-9 (a) 所示。

如果线圈有 N 匝,并且绕得比较密集,可以认为通过各匝的磁通相同,与线圈各匝相交链的磁通 Φ 总和称为磁链 ψ ,即 $\psi = N\Phi$ 。 ψ 与通过线圈的电流 i 的比值为

$$L = \frac{\psi}{i} = \frac{N\Phi}{i} \quad (1-13)$$

式中: ψ (或 Φ) 的单位为 Wb (韦伯); i 的单位为 A (安); L 为线圈的电感,是电感元件的参数,单位为 H (亨)。

由式 (1-13) 可画出磁链与电流之间的函数关系曲线 (电感的韦安特性)。

如果 ψ 与 i 的比值是一个大于零的常数,其韦安特性是一条通过坐标原点的直线,如图 1-9 (b) 所示。这种电感称为线性电感,否则便是非线性电感。

如果线圈的电阻很小可以忽略不计,而且线圈的电感为线性电感时,该线圈便可用图 1-9 (c) 所示的理想电感元件来代替。

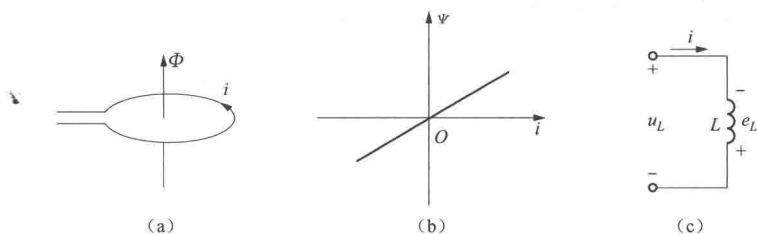


图 1-9 电感元件

(a) Φ 、 i 方向; (b) 韦安特性; (c) 接入电路图形符号

根据电磁感应定律,当线圈中的电流变化时,磁通与磁链将随之变化,并在线圈中产生感应电动势 e_L ,而元件两端就有电压 u_L 。 e_L 的方向与磁链方向间符合右手螺旋定则, e_L 的值正比于磁链的变化律,即

$$e_L = -\frac{d\psi}{dt} \quad (1-14)$$

在图 1-9 (c) 中,关联参考方向采用下述规定: u_L 与 i 的参考方向一致, i 与 e_L 的参考方向都与磁链的参考方向符合右手螺旋定则,因而, i 与 e_L 的参考方向也应该一致。在此规定下,可得

$$e_L = -L \frac{di}{dt} \quad (1-15)$$

根据基尔霍夫电压定律有

$$u_L = -e_L \quad (1-16)$$

由此可知电感电压和电流的关系为

$$u_L = L \frac{di}{dt} \quad (1-17)$$

式 (1-17) 表明,电感电压与电流的变化律成正比。如果通过电感元件的电流是直流电流,则 $\frac{di}{dt} = 0$, $u_L = 0$,因此,在直流电路中,电感元件相当于短路。

将式 (1-17) 等号两边积分并整理,可得电流 i 与电压 u_L 的积分关系式

$$i = \frac{1}{L} \int_{-\infty}^t u_L dt = \frac{1}{L} \int_{-\infty}^0 u_L dt + \frac{1}{L} \int_0^t u_L dt = i(0) + \frac{1}{L} \int_0^t u_L dt \quad (1-18)$$

式中 $i(0)$ ——计时时刻 $t=0$ 时的电流值, 又称初始值。

式 (1-18) 说明了电感元件在某一时刻的电流值不仅取决于 $[0, t]$ 区间的电压值, 而且与电流的初始值有关。因此, 电感元件有“记忆”功能, 是一种记忆元件。

在电压、电流关联参考方向下, 电感元件吸收的电功率为

$$p = u_L i = Li \frac{di}{dt} \quad (1-19)$$

当 i 的绝对值增大时, $i \frac{di}{dt} > 0$, $p > 0$, 说明此时电感从外部输入电功率, 把电能转换成了磁场能; 当 i 的绝对值减小时, $i \frac{di}{dt} < 0$, $p < 0$, 说明此时电感向外部输出电功率, 把磁场能又转换成了电能。可见, 电感中储存磁场能的过程也是能量的可逆转换过程。

若电流 i 由 0 增加到 I 值, 电感元件吸收的电能为

$$W = \int_0^I Li di = \frac{1}{2} LI^2 \quad (1-20)$$

若电流 i 由 I 值减小到 0, 则电感元件吸收的电能为

$$W' = \int_I^0 Li di = -\frac{1}{2} LI^2 \quad (1-21)$$

W' 为负值, 表明电感放出能量。比较式 (1-20) 和式 (1-21) 可见, 电感元件吸收的能量与放出的能量相等。电感元件既能吸收能量, 又能释放能量, 因此是储能元件。

实际的空心电感线圈, 当它的耗能作用不可忽略且电源频率不高时, 常用电阻元件与电感元件的串联组合模型来表示。

当电感线圈中插入铁心时, 因电感的韦安特性不为直线, 故电感不是常数, 属于非线性电感。

1.3.3 电容元件

电容是用来表征电路中储存电场能这一物理性质的理想元件。凡用绝缘介质隔开的两个导体就构成了电容器。如果忽略中介介质的漏电现象, 则可看作一理想电容元件, 其接入电路图形符号如图 1-10 (a) 所示。

当电容元件两端加有电压 u 时, 它的两极板上就会聚集等量异性的电荷 Q , 在极板间建立电场。电压 u 越高, 聚集的电荷 q 越多, 产生的电场越强, 储存的电场能也越多。 q 与 u 的比值

$$C = \frac{q}{u} \quad (1-22)$$

称为电容, 为电容元件的参数。电容的单位为法 [拉] (F), 由于 F (法) 的单位太大, 使用中常采用 μF (微法) 或 pF (皮法)。

由式 (1-22) 可画出一条电荷 q 与电压 u 之间的函数关系曲线 (电容的库伏特性)。当 q 与

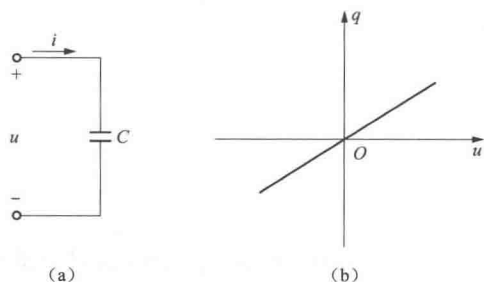


图 1-10 电容元件

(a) 接入电路图形符号; (b) 库伏特性

u 的比值是一个大于零的常数, 其库伏特性是一条通过坐标原点的直线, 如图 1-10 (b) 所示。这种电容称为线性电容, 否则便是非线性电容。

当电容元件两端的电压随时间变化时, 极板上储存的电荷就随之变化, 与极板连接的导线中就有电流。若 u 与 i 的参考方向如图 1-10 (a) 所示, 则

$$i = \frac{dq}{dt} = C \frac{du}{dt} \quad (1-23)$$

式 (1-23) 表明, 线性电容的电流 i 与端电压 u 对时间的变化率 $\frac{du}{dt}$ 成正比。对于直流电压, 电容的电流为零, 故电容元件对直流来说相当于开路。

将式 (1-23) 两边积分并整理, 可得电容元件上的电压与电流的关系, 即

$$u = \frac{1}{C} \int_{-\infty}^t i dt = \frac{1}{C} \int_{-\infty}^0 i dt + \frac{1}{C} \int_0^t i dt = u(0) + \frac{1}{C} \int_0^t i dt \quad (1-24)$$

式中: $u(0)$ 为初始值。

式 (1-24) 说明了电容元件在某一时刻的电压值不仅取决于 $[0, t]$ 区间的电流值, 而且与电压的初始值有关, 因此, 电容元件有“记忆”功能, 也是一种记忆元件。

在电压、电流关联参考方向下, 电容元件吸收的电功率为

$$p = ui = Cu \frac{du}{dt} \quad (1-25)$$

当 u 的绝对值增大时, $u \frac{du}{dt} > 0$, $p > 0$, 说明此时电容从外部输入电功率, 把电能转换成了电场能; 当 u 的绝对值减小时, $u \frac{du}{dt} < 0$, $p < 0$, 说明此时电容向外部输出电功率, 电能又转换成了电能。可见, 电容中储存电场能的过程是能量的可逆转换过程。

若电压 u 由零增加到 U 值, 电容元件吸收的电能为

$$W = \int_0^U Cu du = \frac{1}{2} CU^2 \quad (1-26)$$

若电压 u 由 U 值减小到零值, 则电容元件吸收的电能为

$$W' = \int_U^0 Cu du = -\frac{1}{2} CU^2 \quad (1-27)$$

W' 为负值, 表明电容放出能量。比较式 (1-26) 和式 (1-27) 可见, 电容元件吸收的电能与放出的电能相等, 故电容元件不是耗能元件, 也是储能元件。

对实际电容器, 当其介质损耗不能忽略时, 可用一个电阻元件与电容元件的并联组合模型来表示。

对于电阻元件、电感元件和电容元件, 需要注意以下几个问题:

(1) 上面所列的电压、电流瞬时值的关系式是在 u 和 i 的参考方向一致的情况下得出的; 当 u 和 i 的参考方向不一致时, 各式前应加“—”号。

(2) 本章所讲的都是线性元件。 R 、 L 和 C 都是常数, 即相应的 u 和 i 、 ψ 和 i 及 q 和 u 之间都是线性关系。

(3) 比较电感元件和电容元件的特征可以看出, 它们的表达形式完全相同, 只是电感电流与电容电压或电感电压与电容电流的对换, 这种现象或关系称为“对偶”。电感元件和电容元件是一对对偶元件。对偶现象在电路中随处可见, 掌握对偶关系将对学习和掌握一些概

念及分析电路大有益处,可以达到事半功倍的目的。

【例 1-2】 有一电感元件, $L=0.2\text{H}$, 通过的电流 i 的波形如图 1-9 (a) 所示。求电感元件中产生的自感电动势 e_L 和两端电压 u 的波形。

解 当 $0 \leq t \leq 4\text{ms}$ 时, $i=1\text{mA}$, 所以

$$e_L = -L \frac{di}{dt} = -0.2(\text{V})$$

$$u = -e_L = 0.2\text{V}$$

当 $4\text{ms} \leq t \leq 6\text{ms}$ 时, $i = (-2t+12) \text{mA}$, 所以

$$e_L = -L \frac{di}{dt} = -0.2 \times (-2) = 0.4(\text{V})$$

$$u = -e_L = -0.4\text{V}$$

e_L 和 u_L 的波形如图 1-11 (b) 和图 1-11 (c) 所示。

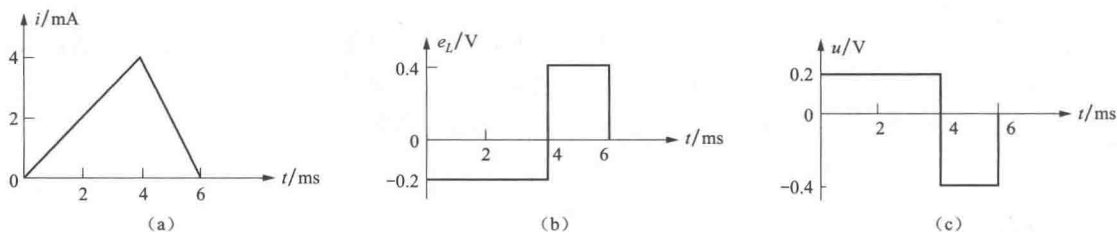


图 1-11 [例 1-2] 图

(a) 电流波形; (b) e_L 波形; (c) u 波形

由图 1-11 可见:

- (1) 电流正值增大时, e_L 为负; 电流正值减小时, e_L 为正。
- (2) 电流的变化率小, 则 e_L 也小; 电流的变化率大, 则 e_L 也大。
- (3) 电感元件两端电压和电流的波形是不一样的。

【例 1-3】 在 [例 1-2] 中, 试计算电感元件在电流增大的过程中从电源吸取的能量和在电流减小的过程中放出的能量。

解 在电流从 0 增大到 I 值的过程中电感元件所吸取的能量和在电流从 I 值减小到 0 的过程中所放出的能量是相等的, 即

$$\frac{1}{2}LI^2 = \frac{1}{2} \times 0.2 \times (4 \times 10^{-3})^2 = 16 \times 10^{-7}(\text{J})$$

1.3.4 独立源

独立电源元件 (简称独立电源) 能独立地给电路提供电压和电流, 而不受其他支路的电压或电流的支配。独立电源元件即理想电源元件, 它是从实际电源中抽象出来的。当实际电源本身的功率损耗可以忽略不计, 而只起产生电能的作用时, 这种电源便可用一个理想电源元件来表示。理想电源元件分理想电压源和理想电流源两种。

1. 理想电压源

理想电压源的基本性质如下:

(1) 端电压总保持一恒定值 U_s 或为某确定的时间函数 $u_s(t)$, 而与流过它的电流无关, 所以也称为恒压源。