

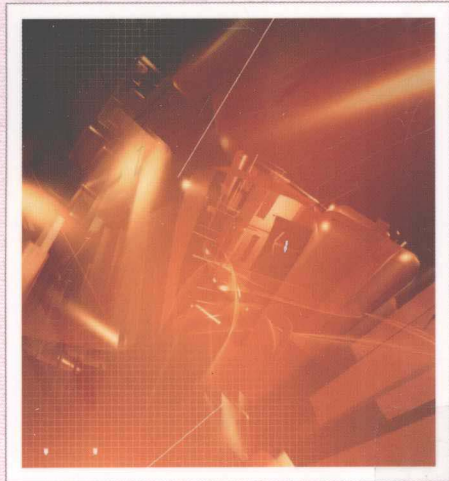
高等职业教育电气自动化专业“双证课程”培养方案规划教材

The Projected Teaching Materials of “Double-Certificate Curriculum” Training for Electrical Automation Discipline in Higher Vocational Education

# 电路基础

姚年春 侯玉杰 主编

索迹 杨青霞 许国仿 副主编



Basis of Circuits

- ◆ 降低理论深度
- ◆ 增加电路仿真
- ◆ 叙述深入浅出

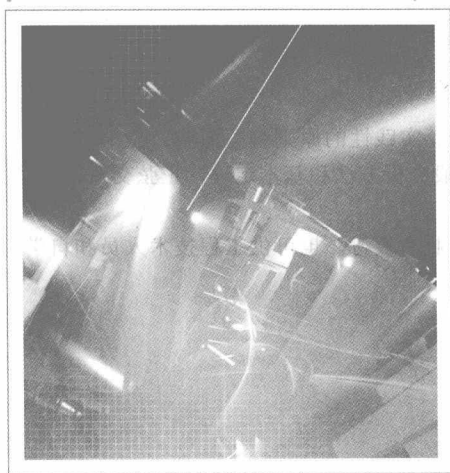


人民邮电出版社  
POSTS & TELECOM PRESS

目 录

## 高等职业教育电气自动化专业“双证课程”培养方案规划教材

The Projected Teaching Materials of "Double-Certificate Curriculum" Training for Electrical Automation Discipline in Higher Vocational Education



# 电路基础

姚年春 侯玉杰 主编

索迹 杨青霞 许国仿 副主编

人 民 邮 电 出 版 社

北 京

## 图书在版编目(CIP)数据

电路基础 / 姚年春, 侯玉杰主编. -- 北京: 人民邮电出版社, 2010.8

高等职业教育电气自动化专业“双证课程”培养方案  
规划教材

ISBN 978-7-115-22426-2

I. ①电… II. ①姚… ②侯… III. ①电路理论—高等学校: 技术学校—教材 IV. ①TM13

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第051783号

## 内 容 提 要

本书按照高职高专教育的培养目标和特点, 本着突出实用性、实践性的原则编写而成。全书主要内容包括电路的基本概念和定律, 电路的等效变换, 线性电路的一般分析方法和基本定理, 正弦交流电路, 互感电路及理想变压器, 非正弦周期性信号电路, 瞬态电路等。

本书可作为高职高专电气自动化、电子、通信、计算机类专业的教材, 也可供工程技术人员和自学者参考。

高等职业教育电气自动化专业“双证课程”培养方案规划教材

### 电 路 基 础

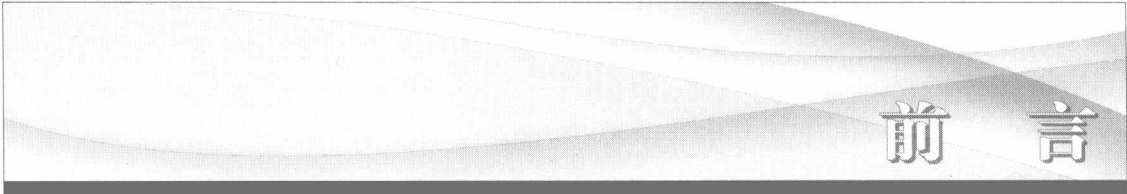
- ◆ 主 编 姚年春 侯玉杰  
副 主 编 索 迹 杨青霞 许国仿  
责任编辑 潘新文
- ◆ 人民邮电出版社出版发行 北京市崇文区夕照寺街14号  
邮编 100061 电子函件 315@ptpress.com.cn  
网址 <http://www.ptpress.com.cn>  
三河市海波印务有限公司印刷
- ◆ 开本: 787×1092 1/16  
印张: 12 2010年8月第1版  
字数: 294千字 2010年8月河北第1次印刷

ISBN 978-7-115-22426-2

定价: 24.00 元

读者服务热线: (010)67170985 印装质量热线: (010)67129223

反盗版热线: (010)67171154



# 前言

本书是根据编者多年的教学经验,结合现在高职高专教育的特点和教育部相关教学改革要求编写而成。在编写过程中,力求做到基本概念讲解清晰,原理分析准确,减少理论验证,做到深入浅出,通俗易懂,以更好地适应现代高职高专教育人才培养模式和教学内容体系改革的需要。

为配合理论教学需要,本书列举了较多例题,目的在于加深学生对所学理论的进一步理解及应用,掌握对具体电路的分析能力,进而掌握一般电路的分析计算方法。本书在例题和习题的选择上力求典型,具体,实用性强,以激励学生的学习兴趣,调动学习的积极性。

本书每节后附有一定数量的习题,覆盖了每节中要求理解和掌握的学习内容,其中许多题目是编者根据多年来的教学实践体会而精心挑选的,目的在于使学生有效巩固最近所学的基本概念,进一步加强对相关知识点的深入理解,达到举一反三的效果。

仿真软件的应用已经非常普及,本书介绍了电路的计算机仿真内容,将计算机仿真与电路分析的理论教学相结合。传统的教材内容侧重于用一般教学方法描述和求解电路,而计算机仿真可以在分析结果的可视化方面补充理论分析,能直观地呈现电路的输入输出的参数和数值,有利于对电路性质、电路基本概念和基本定律的理解和掌握,为今后学习电类相关课程打下良好的基础。在电路仿真实验中读者可通过选取元件、连线、仿真调试和结果分析完成仿真实验,这样可在实验条件欠缺或时间紧张的情况下,通过仿真实验达到与真实实验相似的学习效果。

本书由姚年春、侯玉杰主编,索迹、杨春霞、许国仿、王美任副主编。本书在编写过程中借鉴了不少同行的优秀教材,从中受到了不少教益和启发,在此对各位作者表示衷心的感谢。

由于编者水平有限,编写时间仓促,书中难免有错误和不当之处,殷切希望广大读者批评指正,并将意见和建议及时反馈给我们,以便修订时完善。

编 者

2010年1月

# 目 录

## 第 1 章 电路模型和电路定律 ..... 1

- 1.1 电路和电路模型 ..... 1
  - 1.1.1 电路 ..... 1
  - 1.1.2 电路模型 ..... 1
- 1.2 电流和电压的参考方向 ..... 2
  - 1.2.1 电路的基本物理量 ..... 2
  - 1.2.2 电流和电压的参考方向 ..... 2
  - 1.2.3 电压和电压的参考方向 ..... 3
  - 1.2.4 关联参考方向 ..... 4
- 1.3 电阻、电感和电容 ..... 6
  - 1.3.1 电阻元件 ..... 6
  - 1.3.2 电感元件 ..... 7
  - 1.3.3 电容元件 ..... 10
- 1.4 电压源和电流源 ..... 13
  - 1.4.1 理想电压源 ..... 13
  - 1.4.2 理想电流源 ..... 14
- 1.5 受控电源 ..... 17
- 1.6 基尔霍夫定律 ..... 19
- 习题 ..... 22

## 第 2 章 电阻电路的等效变换 ..... 25

- 2.1 等效变换 ..... 25
  - 2.1.1 二端电路 ..... 25
  - 2.1.2 二端电路的等效 ..... 26
- 2.2 电阻的串联、并联和混联 ..... 26
  - 2.2.1 电阻的串联 ..... 26
  - 2.2.2 电阻的并联 ..... 27
  - 2.2.3 电阻的混联 ..... 29
- 2.3 电阻的 Y 形连接和  $\Delta$  形连接的等效变换 ..... 31
- 2.4 电压源、电流源的串联和并联 ..... 35
  - 2.4.1 电压源的串联 ..... 35

- 2.4.2 电流源的并联 ..... 35

- 2.5 实际电源的两种模型及其等效变换 ..... 36
- 2.6 输入电阻 ..... 40
  - 2.6.1 输入电阻的定义 ..... 40
  - 2.6.2 输入电阻的计算方法 ..... 40

- 习题 ..... 41

## 第 3 章 电阻电路的一般分析方法 ..... 44

- 3.1 支路电流法 ..... 44
- 3.2 回路电流法和网孔法 ..... 45
  - 3.2.1 回路电流法和网孔法 ..... 46
  - 3.2.2 支路电流与回路电流的关系 ..... 46
  - 3.2.3 回路电流法列写的方程 ..... 46
- 3.3 节点电压法 ..... 48
  - 3.3.1 节点电压 ..... 50
  - 3.3.2 节点电压法 ..... 50
  - 3.3.3 带有受控源的电路的节点电压法 ..... 51
- 3.4 电路的等效变换 ..... 52
  - 3.4.1 电路等效的一般概念 ..... 52
  - 3.4.2 理想电源转移 ..... 52
- 3.5 叠加定理 ..... 53
  - 3.5.1 叠加定理的表述 ..... 53
  - 3.5.2 使用叠加定理应注意的一些问题 ..... 54
  - 3.5.3 应用叠加定理求解电路的步骤 ..... 54
- 3.6 等效电源定理 ..... 56
  - 3.6.1 戴维南定理 ..... 56
  - 3.6.2 戴维南定理的解题步骤 ..... 57
  - 3.6.3 戴维南定理的实践意义 ..... 59

|            |                  |            |
|------------|------------------|------------|
| 3.6.4      | 诺顿定理             | 59         |
| 3.6.5      | 诺顿定理的应用          | 59         |
| 3.7        | 最大功率传输定理         | 62         |
| 3.7.1      | 最大功率传输定理         | 62         |
| 3.7.2      | 最大功率传输定理的应用      | 63         |
|            | 习题               | 64         |
| <b>第4章</b> | <b>正弦交流电路</b>    | <b>66</b>  |
| 4.1        | 正弦交流电的基本概念       | 66         |
| 4.1.1      | 正弦交流电的三要素        | 66         |
| 4.1.2      | 相位差              | 66         |
| 4.2        | 利用相量表示正弦交流电      | 67         |
| 4.2.1      | 复数的概念            | 67         |
| 4.2.2      | 利用相量表示正弦交流电      | 67         |
| 4.3        | 正弦交流电路的相量分析      | 68         |
| 4.3.1      | 电路元件伏安关系的相量表示    | 69         |
| 4.3.2      | 基尔霍夫定律的相量表示      | 75         |
| 4.3.3      | RLC 串联电路的阻抗      | 75         |
| 4.3.4      | 导纳               | 77         |
| 4.3.5      | 复阻抗和复导纳的等效互换     | 79         |
| 4.3.6      | 阻抗的串联和并联         | 81         |
| 4.3.7      | 正弦稳态电路的分析        | 83         |
| 4.4        | 正弦稳态电路中的功率       | 88         |
| 4.4.1      | 瞬时功率             | 88         |
| 4.4.2      | 平均功率 $P$         | 89         |
| 4.4.3      | 无功功率 $Q$         | 89         |
| 4.4.4      | 视在功率 $S$         | 89         |
| 4.4.5      | 任意阻抗的功率计算        | 90         |
| 4.4.6      | 功率因数的提高          | 91         |
| 4.5        | 正弦交流电路中的谐振       | 93         |
| 4.5.1      | 串联电路的谐振          | 93         |
| 4.5.2      | 并联电路的谐振          | 97         |
| 4.6        | 正弦稳态电路的分析        | 100        |
| 4.6.1      | 电阻电路与正弦电流电路的分析比较 | 100        |
| 4.6.2      | 典型例题             | 101        |
|            | 习题               | 105        |
| <b>第5章</b> | <b>三相正弦交流电路</b>  | <b>108</b> |
| 5.1        | 三相电源             | 108        |

|            |                |            |
|------------|----------------|------------|
| 5.2        | 对称三相电路的计算      | 111        |
| 5.3        | 不对称三相电路的概念     | 115        |
| 5.4        | 三相电路的功率        | 117        |
| 5.4.1      | 三相电路的功率        | 117        |
| 5.4.2      | 对称三相电路的功率      | 118        |
| 5.4.3      | 功率标注           | 118        |
| 5.4.4      | 三相功率的测量        | 120        |
|            | 习题             | 122        |
| <b>第6章</b> | <b>非正弦周期电路</b> | <b>125</b> |
| 6.1        | 非正弦周期信号        | 125        |
| 6.2        | 周期函数分解为傅里叶级数   | 125        |
| 6.3        | 有效值、平均值和平均功率   | 128        |
| 6.3.1      | 非正弦周期量的有效值和平均值 | 128        |
| 6.3.2      | 非正弦周期量的平均功率    | 129        |
| 6.4        | 非正弦周期交流电路的计算   | 130        |
|            | 习题             | 135        |
| <b>第7章</b> | <b>动态电路分析</b>  | <b>138</b> |
| 7.1        | 换路与电路初始值       | 138        |
| 7.2        | 一阶电路动态过程的三要素   | 139        |
| 7.3        | 一阶电路的动态分析      | 141        |
| 7.3.1      | 零输入响应与零状态响应    | 141        |
| 7.3.2      | 单位阶跃函数         | 141        |
| 7.3.3      | 电路的冲激响应与阶跃响应   | 142        |
| 7.4        | 二阶电路的零输入响应     | 142        |
|            | 习题             | 147        |
| <b>第8章</b> | <b>磁路和变压器</b>  | <b>149</b> |
| 8.1        | 磁场的基本物理量       | 149        |
| 8.1.1      | 磁感应强度与磁通       | 149        |
| 8.1.2      | 磁导率            | 150        |
| 8.1.3      | 磁场强度 $H$       | 150        |
| 8.2        | 铁磁材料的磁性能       | 151        |
| 8.2.1      | 磁化曲线与磁滞回线      | 151        |
| 8.2.2      | 铁磁材料的磁性能       | 152        |
| 8.2.3      | 铁磁材料的种类和用途     | 153        |
| 8.3        | 磁路和磁路欧姆定律      | 154        |
| 8.3.1      | 磁路             | 154        |
| 8.3.2      | 磁通势            | 154        |

|                              |            |                       |            |
|------------------------------|------------|-----------------------|------------|
| 8.3.3 磁路欧姆定律·····            | 154        | 9.1.2 认识 EWB 的界面····· | 168        |
| 8.3.4 涡流·····                | 155        | 9.2 用 EWB 进行仿真·····   | 169        |
| 8.4 变压器·····                 | 157        | 9.3 仿真练习 验证欧姆定律·····  | 171        |
| 8.4.1 变压器的结构·····            | 157        | 9.3.1 启动 EWB·····     | 171        |
| 8.4.2 变压器的功能·····            | 158        | 9.3.2 建立仿真电路·····     | 172        |
| 8.4.3 变压器的外特性与效率·····        | 159        | 9.3.3 仿真测试·····       | 172        |
| 8.4.4 特殊变压器·····             | 160        | 9.4 基尔霍夫定律的验证·····    | 172        |
| 8.4.5 变压器的额定值、功率、<br>效率····· | 162        | 9.5 叠加定理的验证·····      | 174        |
| 8.5 理想变压器·····               | 164        | 9.6 戴维南定理的验证·····     | 175        |
| 习题·····                      | 166        | 9.7 感性负载及功率因数的提高····· | 176        |
| <b>第 9 章 EWB 电路仿真·····</b>   | <b>167</b> | 9.8 三相交流电路·····       | 178        |
| 9.1 EWB 简介·····              | 167        | <b>参考文献·····</b>      | <b>183</b> |
| 9.1.1 EWB5.12 的安装和启动·····    | 167        |                       |            |

# 第1章

## 电路模型和电路定律

### 1.1

#### 电路和电路模型

##### 1.1.1 电 路

电路是由电器元件（如电阻、电感、电容等）组成，为完成某种预期目标而连接形成的电流通路，图 1-1 所示是最简单的一种实际照明电路，它由三部分组成。

（1）提供电能的电源（图中为干电池），或叫激励源。电源把其他形式的能量转换成电能。

（2）用电设备（图中为灯泡），简称负载。负载把电能转换为其他形式的能量。

（3）连接导线。导线提供电流通路，电路中产生的电压和电流称为响应。

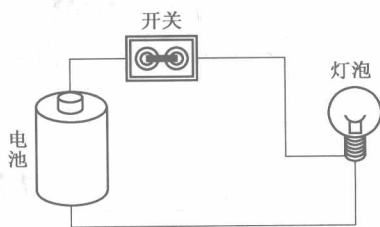


图 1-1 手电筒电路

任何实际电路都由这三部分组成。实际电路功能总地来说分为两类：①进行能量的传输、分配与转换（如电力系统中的输电电路）；②进行信息的传递与处理（如信号的放大、滤波、调谐、检波等）。

##### 1.1.2 电路模型

电路模型由理想电路元件组成，所谓理想电路元件，指的是抽掉了实际电气器件的外形、尺寸等差异性，反映其电磁性能共性的最小电路单元。发生在实际电路器件中的能量转换关系可分为以下几种：①消耗电能；②供给电能；③储存电场能量；④储存磁场能量。基本的理想电路元件主要有以下几种。

- (1) 电阻。电阻反映电能转换成热能等能量的特征, 电路符号如图 1-2 所示。
- (2) 电容。电容反映产生电场, 储存电场能量的特征。电路符号如图 1-3 所示。
- (3) 电感。电感反映产生磁场, 储存磁场能量的特征。电路符号如图 1-4 所示。

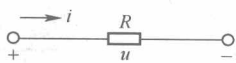


图 1-2 电阻

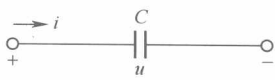


图 1-3 电容

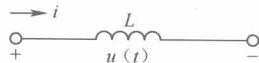


图 1-4 电感

- (4) 电源。电源将其他形式的能量转变成电能。

注意:

- ① 具有相同的电磁性能的实际电路部件, 在一定条件下可用同一模型表示;
- ② 同一实际电路部件在不同的工作条件下, 其模型可以有不同的形式。

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, 还应计及导体表面的电荷作用, 即电容效应, 所以其模型还需要包含电容元件。

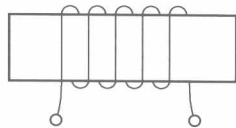


图 1-5 线圈模型

实际电路的电路模型取得恰当, 对电路的分析和计算结果就与实际情况接近; 若模型取得不恰当, 则会造成很大误差, 有时甚至导致自相矛盾的结果。如果模型取得太复杂就会造成分析的困难; 如果取得太简单, 又不足以反映所需求解的真实情况。

## 1.2

## 电流和电压的参考方向

### 1.2.1 电路的基本物理量

电路理论中涉及的物理量主要有电流、电压、电荷、磁通、电功率和电磁能量等。在电路分析中人们主要关心的物理量是电流、电压和电功率。

### 1.2.2 电流和电压的参考方向

所谓电流, 是带电粒子有规则的定向运动形成的电子流, 单位时间内通过导体横截面的电荷量即为电流强度  $i$ , 电流强度的单位为 A (安培)。

电流的实际方向: 规定正电荷的运动方向为电流的实际方向。

电流的参考方向: 假定正电荷的运动方向为电流的参考方向。

电流参考方向的表示如下。

- ① 用箭头表示, 箭头的指向为电流的参考方向, 如图 1-6 所示。
- ② 用双下标表示, 如  $i_{AB}$ , 电流的参考方向由 A 指向 B, 如图 1-7 所示。



图 1-6 用箭头表示电流参考方向



图 1-7 用双下标表示电流参考方向

参考方向和实际方向的关系如图 1-8 所示。

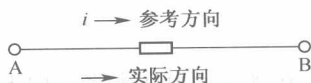
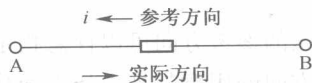
(a)  $i > 0$ (b)  $i < 0$ 

图 1-8 参考方向和实际方向的关系

电流的参考方向可以任意指定。指定参考方向的用意是把电流看成代数量。在指定的电流参考方向下, 电流值的正和负就可以反映出电流的实际方向。

### 1.2.3 电压和电压的参考方向

电位  $\varphi$ : 单位正电荷  $q$  从电路中一点移至参考点 ( $\varphi = 0$ ) 时电场力做功的大小。

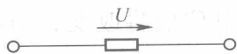
电压  $U$ : 单位正电荷  $q$  从电路中一点移至另一点时电场力做功 ( $W$ ) 的大小, 即两点之间的电位之差。

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

电压的单位为 V (伏特), 也可用 kV (千伏), mV (毫伏),  $\mu\text{V}$  (微伏)。 $1\text{kV} = 10^3\text{V}$ ,  $1\text{mV} = 10^{-3}\text{V}$ ,  $1\mu\text{V} = 10^{-6}\text{V}$ 。

- ① 电路中电位参考点可任意选择;
- ② 参考点一经选定, 电路中各点的电位值就是唯一的;
- ③ 当选择不同的电位参考点时, 电路中各点电位值将改变, 但任意两点间电压保持不变。

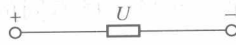
电压的实际方向——规定真正降低的方向为电压的实际方向; 电压的参考方向——假定的电位降低方向为电压的参考方向。电压参考方向的 3 种表示如图 1-9 所示。



(a) 用箭头表示



(b) 用双下标表示



(c) 用正负极性表示

图 1-9 电压参考方向的 3 种表示方法

- ① 用箭头表示, 箭头的指向为电压的参考方向。
- ② 用双下标表示, 如  $U_{AB}$ , 表示电压参考方向由 A 指向 B。
- ③ 用正负极性表示, 表示电压参考方向由+指向-。

参考方向和实际方向的关系如图 1-10 所示。

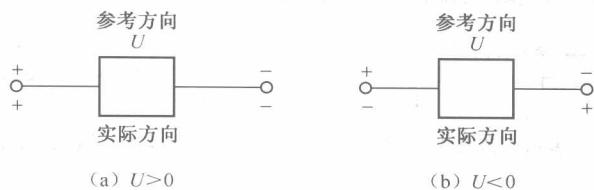


图 1-10 参考方向和实际方向的关系

需要指出：① 电压的参考方向可以任意指定。

② 指定参考方向的用意是把电压看成代数量。在指定的电压参考方向下，电压值的正和负就可以反映出电压的实际方向。

【例 1-1】如图 1-11 所示，有 4C 的正电荷由 a 点均匀移动至 b 点电场力做功 8J，由 b 点移动到 c 点电场力做功为 12J。

(1) 若以 b 点为参考点，求 a、b、c 点的电位和电压  $U_{ab}$ 、 $U_{bc}$ ；

(2) 若以 c 点为参考点，再求以上各值。

解：(1) 以 b 点为电位参考点如图 1-11 (a) 所示

$$\varphi_b = 0, \quad \varphi_a = \frac{W_{ab}}{q} = \frac{8}{4} = 2(\text{V})$$

$$\varphi_c = \frac{W_{ab}}{q} = -\frac{W_{bc}}{q} = -\frac{12}{4} = -3(\text{V})$$

$$U_{ab} = \varphi_a - \varphi_b = 2 - 0 = 2(\text{V})$$

(2) 以 c 点为电位参考点如图 1-11 (b) 所示

$$\varphi_c = 0, \quad \varphi_a = \frac{W_{ac}}{q} = \frac{8+12}{4} = 5(\text{V})$$

$$\varphi_b = \frac{W_{bc}}{q} = -\frac{12}{4} = 3(\text{V})$$

$$U_{ab} = \varphi_a - \varphi_b = 5 - 3 = 2(\text{V})$$

$$U_{bc} = \varphi_b - \varphi_c = 3 - 0 = 3(\text{V})$$

本题的计算说明：① 电路中电位参考点可任意选择；参考点一经选定，电路中各点的电位值就是唯一的。② 当选择不同的电位参考点时，电路中各点电位值将改变，但任意两点间电压保持不变。

## 1.2.4 关联参考方向

“参考方向”在电路分析中起着十分重要的作用。对一段电路或一个元件上电压的参考方向和电流的参考方向可以独立地加以任意指定。如果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，即两者采用相同的参考方向称关联参考方向；当两者不一

致时,称为非关联参考方向,如图 1-12 所示。

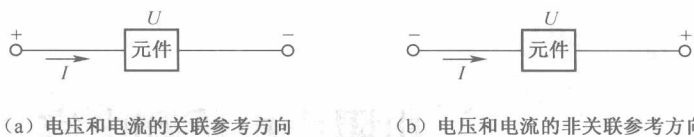


图 1-12 参考方向

在电路分析和计算中,如果不标示电压、电流的参考方向,方程式中各量的正、负就无法确定。

**【例 1-2】** 如图 1-13 (a) 所示,若已知元件吸收功率为  $-20\text{W}$ , 电压  $U=5\text{V}$ , 求电流  $I$ 。



图 1-13 电压、电流参考方向

**解:** 图 1-13 (a) 中元件两端的电压、电流为关联参考方向,将其假想为一个负载,在关联参考方向下,有

$$I = \frac{P}{U} = \frac{-20}{5} = -4(\text{A})$$

电流得负值,说明通过元件中的电流的实际方向与参考方向相反,因此该元件实际上是一个电源。

**【例 1-3】** 元件  $R$  上电压参考方向如图 1-14 所示,请说明电压的实际方向。

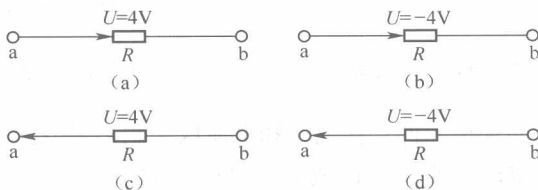


图 1-14 例 1-3 图

**解:**

(1) 图 1-14 (a) 中,  $U=4\text{V}>0$ , 为正值,说明电压的实际方向和参考方向相同,即电压的方向从 a 到 b;

(2) 图 1-14 (b) 中,因  $U=-4\text{V}<0$ , 为负值,说明电压的实际方向和参考方向相反,即电压的方向从 b 到 a;

(3) 图 1-14 (c) 中,因  $U=4\text{V}>0$ , 为正值,说明电压的实际方向和参考方向相同,即电压的方向从 b 到 a;

(4) 图 1-14 (d) 中,因  $U=-4\text{V}<0$ , 为负值,说明电压的实际方向和参考方向相反,即电压的方向从 a 到 b。

## 1.3

## 电阻、电感和电容

## 1.3.1 电阻元件

## 1. 定义

电阻元件是表征材料或器件对电流的阻力、损耗能量的元件。其上的电压、电流关系（伏安关系）可用  $U$ - $I$  关系方程来描述：

$$f(u, i) = 0 \quad (1-2)$$

$U$  元件的伏安关系可用  $U$ - $I$  平面的一条曲线来描述，如图 1-15 所示。

## 2. 线性电阻元件

线性电阻的电路符号图如图 1-16 所示。

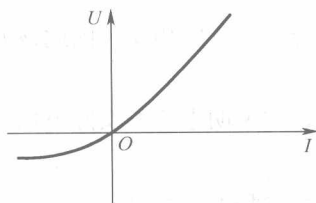


图 1-15 电阻元件的伏安关系

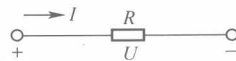


图 1-16 线性电阻电路符号图

线性电阻元件是这样的理想元件，在电压和电流取关联参考方向下，在任何时刻它两端的电压和电流关系服从欧姆定律，即  $U = RI$  或  $I = U/R = GU$ 。

式中， $R$  为电阻，单位为  $\Omega$ （欧姆）， $G$  为电导，单位为  $S$ （西门子）。

线性电阻元件的伏安特性是通过原点的一条直线，如图 1-17 所示。需要指出的是，欧姆定律只适用于线性电阻（ $R$  不随时间而变化）；如电阻上的电压与电流参考方向非关联，公式中应冠以负号，如图 1-18 所示。

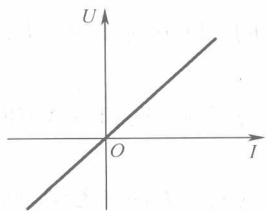


图 1-17 线性电阻元件的伏安特性

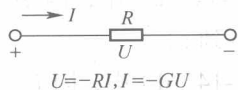


图 1-18 线性电阻上的电压、电流参考方向非关联

### 3. 电阻元件上消耗的功率与能量

电阻元件在任何时刻总是消耗功率的, 消耗的功率如图 1-19 和图 1-20 所示。

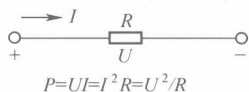


图 1-19 电阻元件上的电压、电流参考方向关联

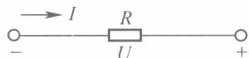


图 1-20 电阻元件上的电压、电流参考方向非关联

从  $t_0$  时刻到  $t$  时刻电阻消耗的能量为

$$w_R = \int_{t_0}^t p d\xi = \int_{t_0}^t u i d\xi \quad (1-3)$$

### 4. 电阻的开路与短路

(1) 开路。当一个线性电阻元件的端电压不论为何值, 流过它的电流恒为零时, 就称为“开路”。开路时的伏安特性在  $U-I$  平面上与电压轴重合, 此时有

$$I = 0, U \neq 0, R = \infty \text{ 或 } G = 0$$

(2) 短路。当流过一个线性电阻元件的电流不论为何值, 它的端电压恒为零时, 就称为“短路”, 短路的伏安特性在  $U-I$  平面上与电流轴重合, 此时有

$$I \neq 0, U = 0, R = 0 \text{ 或 } G = \infty$$

## 1.3.2 电感元件

### 1. 定义

电感元件是表征产生磁场、储存磁场能量的元件。一般把金属导线绕在一骨架上构成一实际电感元件, 当电流通过线圈时, 将产生磁通。电感元件的特性可用  $\Psi \sim i$  平面上的一条曲线 (韦安特性曲线) 来描述, 如图 1-21 所示。

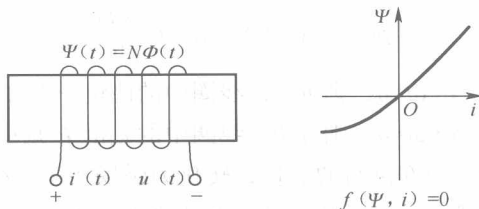


图 1-21 韦安特性曲线

## 2. 线性电感元件

线性电感元件电路符号如图 1-22 所示。任何时刻,通过线性电感元件的电流  $i$  与其磁链  $\Psi$  成正比。韦安  $\Psi$  特性曲线是过原点的直线,如图 1-23 所示。图中  $L$  称为电感器的自感系数,单位为 H (亨),常用  $\mu\text{H}$ 、 $\text{mH}$  表示。

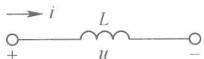


图 1-22 线性电感元件电路符号

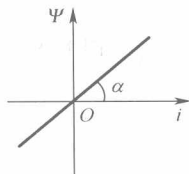


图 1-23 线性电感元件韦安特性曲线

## 3. 线性电感元件的伏安关系

(1) 伏安关系的微分形式。若电感的端电压  $u$  和电流  $i$  取关联参考方向,根据电磁感应定律与楞次定律则有

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

- ① 电感电压  $u$  的大小取决于  $i$  的变化率,与  $i$  的大小无关,电感是动态元件;
- ② 当  $i$  为常数(直流)时,  $u=0$ 。电感相当于短路;
- ③ 实际电路中电感的电压  $u$  为有限值,则电感电流  $i$  不能跃变,必定是时间的连续函数。

(2) 伏安关系的积分形式。伏安关系的积分形式为

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

上式表明电感元件有记忆电压的作用,故称电感为记忆元件。

- ① 当  $u, i$  为非关联方向时,上述微分和积分表达式前要冠以负号;
- ② 上式中  $i(t_0)$  称为电感电流的初始值,它反映电感初始时刻的储能状况,也称为初始状态。

## 4. 电感的功率和储能

(1) 电感的功率。当  $u, i$  取关联参考方向时,电感的功率  $p$  为

$$p(t) = u(t)i(t) = i(t) L \frac{di(t)}{dt} \quad (1-6)$$

- ① 当电流增大时,  $i>0, di/dt>0$ , 则  $u>0$ , 线圈中的磁链  $\Psi$  增加,  $p>0$ , 电感吸收功率。
- ② 当电流减小时,  $i>0, di/dt<0$ , 则  $u<0$ , 线圈中的磁链  $\Psi$  减小,  $p<0$ , 电感发出功率。

电感能在一段时间内吸收外部供给的能量,转化为磁场能量储存起来,在另一段时间内又把能量释放回电路,因此电感元件是无源元件,也是储能元件,它本身不消耗能量。

(2) 电感的储能。对功率表达式积分得电感的储能  $W$  为

$$\begin{aligned}
 W_L &= \int_{-\infty}^t P(t) d\xi = \int_{-\infty}^t Li \frac{di}{d\xi} d\xi = \frac{1}{2} Li^2(\xi) \Big|_{-\infty}^t \\
 &= \frac{1}{2} Li^2(t) - \frac{1}{2} Li^2(-\infty) \quad \text{若 } i(-\infty) = 0 \quad \frac{1}{2} Li^2(t) = \frac{1}{2L} \Psi^2(t) \geq 0
 \end{aligned} \quad (1-7)$$

从  $t_0$  到  $t$  电感储能的变化量

$$W_L = \frac{1}{2} Li^2(t) - \frac{1}{2} Li^2(t_0) = \frac{1}{2L} \Psi^2(t) - \frac{1}{2L} \Psi^2(t_0) \quad (1-8)$$

上式表明:

- ① 电感的储能只与当时的电流值有关, 电感电流不能跃变, 反映了储能不能跃变;
- ② 电感储存的能量一定大于或等于零。

【例 1-4】如图 1-24 (a) 所示,  $L = 1\text{H}$ , 电流  $i$  的波形如图 1-24 (b) 所示。求电感电压  $u$  和吸收的功率  $p$  的波形, 并写出  $u$  和  $p$  函数表达式, 以及  $t = 3\text{s}$  时的磁场能量  $W_L(3)$ 。

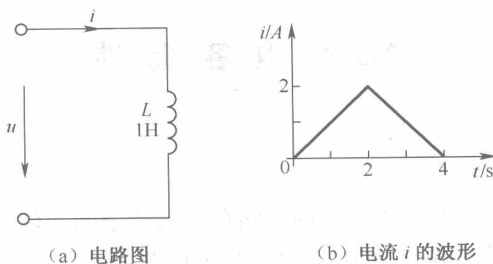


图 1-24 例 1-4 图

解:

(1) 电感的电流  $i$  的函数表达式为

$$i = \begin{cases} 0 & t < 0 \\ t & 0 \leq t < 2 \\ -t + 4 & 2 \leq t < 4 \\ 0 & t \geq 4 \end{cases}$$

根据  $u$ 、 $i$  微分关系, 有电感两端的电压

$$u = L \frac{di}{dt} = \begin{cases} 0 & t < 0 \\ 1 & 0 \leq t < 2 \\ -1 & 2 \leq t < 4 \\ 0 & t \geq 4 \end{cases}$$

波形如图 1-25 (a) 所示。

(2) 电感吸收的功率  $p$  为

$$p = ui = \begin{cases} 0 & t < 0 \\ t & 0 \leq t < 2 \\ t - 4 & 2 \leq t < 4 \\ 0 & t \geq 4 \end{cases}$$

波形如图 1-25 (b) 所示。由  $p$  的曲线看出, 在  $0 \leq t < 2\text{s}$  内,  $p > 0$ , 说明此时电感吸收功率;

在  $2\text{s} \leq t < 4\text{s}$  内,  $p < 0$ , 说明此时电感发出功率。

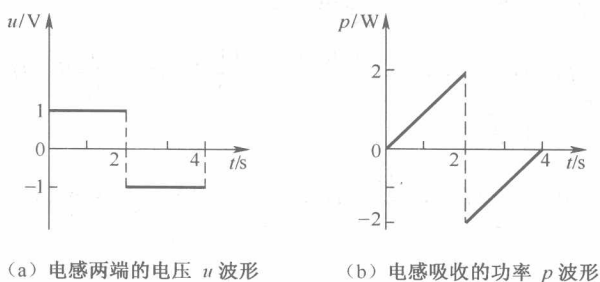


图 1-25 电感两端的电压和吸收的功率

(3)  $t = 3\text{s}$  时,  $i(3) = 1\text{A}$ , 所以  $t = 3\text{s}$  时的磁场能量为

$$w_L(3) = \frac{1}{2} L [i(3)]^2 = \frac{1}{2} \times 1 \times 1^2 = 0.5(\text{J})$$

### 1.3.3 电 容 元 件

#### 1. 定义

电容元件 (Capacitor) 是表征产生电场、储存电场能量的元件。在外电源的作用下, 电容器两极板上分别带上等量异号电荷, 撤去电源, 板上电荷仍可长久地集聚下去, 其特性可用  $q-u$  平面上的一条曲线来描述, 称为库伏特性, 如图 1-26 所示。

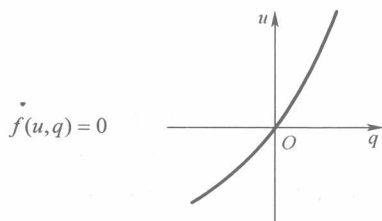


图 1-26 库伏特性曲线

#### 2. 线性电容元件

线性电容元件电路符号如图 1-27 所示。任何时刻, 线性电容元件极板上的电荷 ( $q$ ) 与电压 ( $u$ ) 成正比。库伏 ( $q-u$ ) 特性是过原点的直线, 如图 1-28 所示。

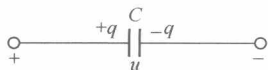


图 1-27 线性电容元件电路符号

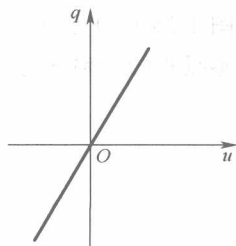


图 1-28 库伏特性曲线