

高职高专电气自动化技术专业规划教材

GAOZHI GAOZHUAN DIANQI ZIDONGHUA JISHU ZHUANYE GUIHUA JIAOCAI



# 电路分析基础

郭瑞平 主 编 陈亚光 李香服 魏晓娅 副主编



中国电力出版社

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

高职高专电气自动化技术专业规划教材

GAOZHI GAOZHUAN DIANQI ZIDONGHUA JISHU ZHUANYE GUIHUA JIAOCAI

# 电路分析基础

主 编 郭瑞平  
副主编 陈亚光 李香服 魏晓娅  
编 写 于桂君 孙 荟  
主 审 刘耀年



中国电力出版社

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

## 内 容 提 要

本书为高职高专电气自动化技术专业规划教材。

本书是根据高职高专教育的教学基本要求,并充分考虑高职高专的教育特点而编写的。全书共分九章,主要内容包括:电路的基础知识、电阻电路的等效变换和分析方法、正弦稳态电路的相量分析法、互感电路和三相交流电路、动态电路的时域分析、电工测量的基本知识以及工厂供电与安全用电。每章后附有习题,并在书末附了部分习题的参考答案。

本书基本概念表述清楚,基本分析方法归类恰当、步骤明确,易于读者理解和掌握。本书可作为高职高专电气自动化技术等相关专业教材,也可以作为从事相关专业的工程技术人员的参考用书。

## 图书在版编目(CIP)数据

电路分析基础/郭瑞平主编. —北京:中国电力出版社, 2010.8

高职高专电气自动化技术专业规划教材

ISBN 978-7-5123-0561-8

I. ①电… II. ①郭… III. ①电路分析—高等学校:技术学校—教材 IV. ①TM133

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第127990号

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

\*

2010年10月第一版 2010年10月北京第一次印刷

787毫米×1092毫米 16开本 12.5印张 302千字

定价 20.00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

# 高职高专电气自动化技术专业规划教材

## 编 委 会

主 任 吕景泉

副主任 狄建雄 凌艺春 谭有广 周乐挺 郝汉琪

秘书长 李兆春

委 员 (按姓氏笔画排序)

|     |     |     |     |     |
|-----|-----|-----|-----|-----|
| 丁学恭 | 马伯华 | 王 燕 | 王 薇 | 王永红 |
| 刘玉娟 | 刘玉梅 | 刘保录 | 孙成普 | 孙忠献 |
| 何 颖 | 何首贤 | 张 池 | 张永飞 | 张学亮 |
| 张跃东 | 李方园 | 陆锦军 | 陈 赵 | 姚永刚 |
| 姚庆文 | 郭 健 | 钱金法 | 常文平 | 韩 莉 |

# 前言

---

高职高专教育在我国高等教育中承担着重要角色，它担负着为国家的工业、农业和国防现代化建设培养应用型工程技术人才的重任。而电路分析基础课程是高职高专院校电气信息类专业必修的重要技术基础课程，通过本门课程的学习可使学生掌握电工基础知识和电路的基本分析方法，为后续专业课程的学习打下良好的基础。

本书是根据教育部制定的“高职高专教育电工技术基础课程教学基本要求”，并结合高职高专院校电气信息类各专业的实际需求而编写的。针对高职高专的教育特点，本书在编写上遵循“以应用为目的，以必需够用为度”的原则，力求做到基本理论表述清楚，不追求过深的理论分析和数学推导，降低理论深度；同时注意内容结构的合理性，力求做到理论和实践相结合，突出对实践能力的培养。

本书由从事多年高职高专教学工作的教师编写。参加编写的有辽宁科技学院郭瑞平（第四、五章）、陈亚光（第六、七章）、于桂君（第二、八章），河北工业职业技术学院李香服（第三章）、孙荟（第九章），石家庄科技信息职业学院魏晓娅（第一章）。本书由郭瑞平主编并负责全书的组织和统稿工作。刘耀年教授审阅了全书的初稿，并提出了许多宝贵意见和建议，在此深表感谢！

由于编者水平有限，书中难免有错误和不妥之处，恳请各位读者批评指正。

编者

2010年7月

# 目 录

## 前言

|                      |    |
|----------------------|----|
| 第一章 电路的基础知识          | 1  |
| 第一节 电路和电路模型          | 1  |
| 第二节 电路的主要物理量         | 2  |
| 第三节 基本电路元件           | 5  |
| 第四节 基尔霍夫定律           | 13 |
| 习题一                  | 17 |
| 第二章 电阻电路的等效变换        | 21 |
| 第一节 等效电路的概念          | 21 |
| 第二节 电阻网络的等效变换        | 22 |
| 第三节 理想电源网络的等效变换      | 28 |
| 第四节 实际电源模型的等效变换      | 30 |
| 第五节 含电阻和受控源网络的等效变换   | 32 |
| 习题二                  | 33 |
| 第三章 电路的一般分析方法        | 36 |
| 第一节 支路电流法            | 36 |
| 第二节 网孔电流法            | 37 |
| 第三节 节点电压法            | 39 |
| 第四节 叠加定理和齐次定理        | 42 |
| 第五节 戴维南定理和诺顿定理       | 46 |
| 第六节 最大功率传输定理         | 51 |
| 习题三                  | 52 |
| 第四章 正弦稳态电路分析         | 57 |
| 第一节 正弦量的基本概念         | 57 |
| 第二节 正弦量的相量表示法        | 60 |
| 第三节 伏安关系和基尔霍夫定律的相量形式 | 64 |
| 第四节 阻抗和导纳            | 68 |
| 第五节 正弦稳态电路的分析        | 72 |
| 第六节 正弦稳态电路的功率        | 78 |
| 第七节 正弦交流电路的谐振        | 86 |
| 第八节 非正弦周期电路          | 91 |
| 习题四                  | 99 |

|                        |     |
|------------------------|-----|
| 第五章 互感电路               | 105 |
| 第一节 互感电路的基本概念          | 105 |
| 第二节 含有耦合电感电路的分析        | 110 |
| 第三节 含空心变压器电路的分析        | 116 |
| 第四节 理想变压器              | 120 |
| 习题五                    | 123 |
| 第六章 三相交流电路             | 128 |
| 第一节 三相电源               | 128 |
| 第二节 对称三相电路的计算          | 130 |
| 第三节 不对称三相电路的计算         | 134 |
| 第四节 三相电路的功率            | 136 |
| 习题六                    | 140 |
| 第七章 动态电路               | 142 |
| 第一节 动态电路及其方程           | 142 |
| 第二节 动态电路的初始值           | 143 |
| 第三节 一阶电路的零输入响应         | 146 |
| 第四节 一阶电路的零状态响应         | 151 |
| 第五节 一阶电路的全响应           | 154 |
| 第六节 一阶电路的三要素分析法        | 155 |
| 第七节 一阶电路的阶跃响应          | 157 |
| * 第八节 $RLC$ 串联电路的零输入响应 | 160 |
| 习题七                    | 165 |
| 第八章 电工测量的基本知识          | 169 |
| 第一节 电工指示仪表             | 169 |
| 第二节 电工测量的基本方法          | 172 |
| 第三节 测量误差               | 173 |
| 第四节 数字仪表               | 175 |
| 习题八                    | 176 |
| 第九章 工厂供电与安全用电          | 177 |
| 第一节 工厂供电               | 177 |
| 第二节 安全用电               | 179 |
| 习题九                    | 186 |
| 部分习题答案                 | 187 |
| 参考文献                   | 192 |

# 第一章

## 电路的基础知识

### 第一节 电路和电路模型

#### 一、电路的基本组成及其功能

电路是电流的通路。实际电路是由一些电气设备或器件按照一定方式连接而成的,有的电路非常简单,有的电路则十分复杂,但它们通常都是由电源、负载和中间环节三部分组成。

电源是提供电能或产生电信号的装置。电源可以将其他形式的能量,如化学能、热能、机械能、原子能等转换为电能,它是激发和产生电流或电压的源泉。

负载是将电能转换为其他形式能量的设备。负载通常又称为用电器,它能够把从电源接收到的电能转换为人们所需要的能量形式,如电灯把电能转变成光能,电动机把电能转换为机械能,被充电的蓄电池把电能转换为化学能等。

中间环节是连接电源和负载的部分。中间环节包括连接导线、控制开关、测量仪表等辅助设备,中间环节在电路中起着传输和分配能量、控制和保护电气设备的作用。

图 1-1 (a) 所示为手电筒电路示意图,它由电源(干电池)、负载(灯泡)和中间环节(连接导线和开关)三部分组成,这是最简单的典型实际电路。

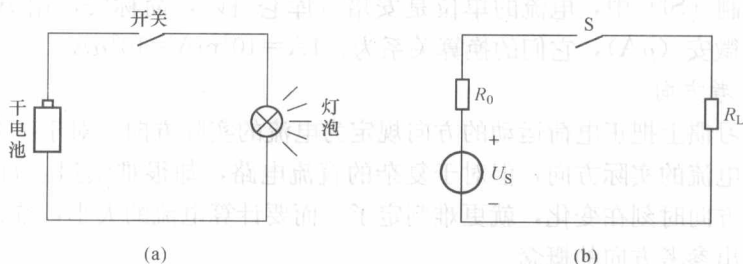


图 1-1 手电筒电路及其电路模型

(a) 手电筒电路; (b) 电路模型

实际应用中的电路种类繁多,用途各异,但其基本功能大致可概括为两个方面:一是完成电能的产生、传输、分配和转换;二是实现信号的产生、传递、变换和处理。

#### 二、理想电路元件和电路模型

实际电路中的每个电气设备或器件,在工作时所发生的电磁现象和能量转换关系一般都比较复杂。例如一个电阻器,当有电流时它将电能转换成热能而消耗(主要性能),同时电流会产生磁场(次要性质),因而伴随着能量储存。一个实际电源总有内阻,因使用时它在提供电能(主要性能)的同时还伴随着能量的消耗(次要性质)。在分析电路时,如果对电路设备或器件的所有电磁性质都予以考虑,必然会带来很大困难。因此为了简化对实际电路的分析和计算,在一定条件下,必须突出实际器件的主要电磁性质,忽略次要性质,将其用

理想电路元件来代替。

理想电路元件是具有单一电磁性质的假想元件，只表征实际器件的主要性质，并有精确的数学定义。理想电路元件简称电路元件。

由理想电路元件组成的与实际电路相对应的电路就是实际电路的电路模型。本书以后研究的电路都是电路模型，简称为电路。图 1-1 (b) 是手电筒电路的电路模型。

## 第二节 电路的主要物理量

电路分析的含义是在电路结构和元件参数给定的条件下，计算电路中的物理量。描述电路工作情况的基本物理量有电流、电压、电功率、电能、磁通、磁通链等，本节重点介绍电流、电压和电功率三个主要物理量。

### 一、电流

#### 1. 电流的定义

带电粒子有规则的定向运动形成电流。电流的大小可用电流强度来衡量，电流强度简称为电流，其定义为单位时间内通过导体横截面的电荷量，即

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

一般情况下，不随时间变化的物理量用大写字母表示，随时间变化的物理量用小写字母表示。大小不随时间变化的电流称为直流电流，对于式 (1-1)，其直流形式可写为

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

在国际单位制 (SI) 中，电流的单位是安培 (库伦/秒)，简称安，用 A 表示。另外还有毫安 (mA)、微安 ( $\mu\text{A}$ )，它们的换算关系为： $1\text{A} = 10^3\text{mA} = 10^6\mu\text{A}$ 。

#### 2. 电流的参考方向

在电路中，习惯上把正电荷运动的方向规定为电流的实际方向。对于一个简单的直流电路，可以判断出电流的实际方向，但对于复杂的直流电路，却很难做到。如果是交流电路，由于电流的实际方向时刻在变化，就更难判定了。而要计算电流的大小，首先必须知道电流的方向，因而引出参考方向的概念。

所谓电流的参考方向，是人们任意假定的电流方向，在电路图中用箭头表示。如果电流的实际方向与参考方向一致，电流为正值；反之，电流为负值，如图 1-2 所示。在选定的电流参考方向下，根据电流值的正或负，就可以判断出它的实际方向。电流的参考方向也可以用双下标字符表示，如  $i_{AB}$ ，它表示电流的参考方向由 A 指向 B。

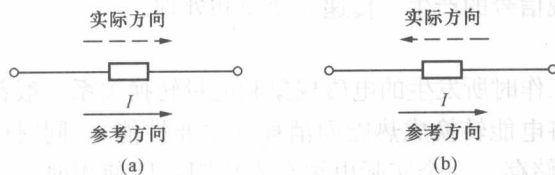


图 1-2 电流的参考方向与实际方向

(a) 参考方向与实际方向一致， $I > 0$ ；

(b) 参考方向与实际方向相反， $I < 0$

### 二、电压与电位

#### (一) 电压

##### 1. 电压的定义

电场力将单位正电荷从某点移动到另一点所做的功定义为两点间的电压，即

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

直流电压可表示为

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

在国际单位制 (SI) 中, 电压的单位是伏特 (焦耳/库仑), 简称伏, 用 V 表示。另外还有千伏 (kV)、毫伏 (mV) 和微伏 ( $\mu\text{V}$ ), 它们的换算关系为:  $1\text{kV}=10^3\text{V}=10^6\text{mV}$ 。

## 2. 电压的参考方向

电压也称电位差。电压的实际方向规定为从高电位指向低电位, 即为电压降的方向。但在分析电路时, 也需选取电压的参考方向。当电压的参考方向与实际方向一致时, 电压为正值 ( $U>0$ ); 反之, 当电压的参考方向和它的实际方向相反时, 电压为负值 ( $U<0$ ), 如图 1-3 所示。

电压的参考方向也是任意指定的。在电路中, 电压的参考方向可用箭头来表示, 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 的; 也可用极性 “+”、“-” 表示, “+” 表示高电位, “-” 表示低电位。

## 3. 电压、电流的关联参考方向

前面已经指出, 电流和电压参考方向可以任意选定。但为了方便起见, 对于一个元件或一段电路, 通常将电压的参考方向和电流的参考方向选为一致 (或相同), 称为关联参考方向。电压的参考方向和电流的参考方向不一致时, 则称为非关联参考方向。

最后需着重指出, 电流和电压的参考方向是电路分析中一个十分重要的概念, 在对电路进行分析和计算之前, 首先必须在电路中标出参考方向。如没有参考方向, 电流和电压数值的正与负没有任何意义。

## (二) 电位

在电路分析和实际工作中, 经常要对某两点的电性能进行比较, 以确定电路的工作状况。比如, 判断晶体三极管是处于放大、截止还是饱和工作状态, 就要用到电位的概念。通常的做法是, 先选定电路中的某个公共接点作为参考点, 并规定该点的电位为 0, 然后再计算或测量出电路中某点与参考点之间的电压, 这个电压就称之为电位。在电路图或电子仪器和设备中, 参考点用符号 “ $\perp$ ” 来表示。

电位的基本单位与电压相同, 也是伏特, 电位的符号用 V 加单下标的方法来表示, 如  $V_A$ 、 $V_B$  分别表示 A 和 B 点的电位。

电路中任意两点之间的电位之差叫做电位差, 用字母加双下标的方法表示, 如  $U_{AB}=V_A-V_B$  就表示 A 点的电位和 B 点的电位之间的差值。显然, 电路中任意两点之间的电位差就是该两点之间的电压。

那么电位和电压有什么区别呢? 先来分析下面这个例题。

**【例 1-1】** 在图 1-4 中, 分别设 a、b 为参考点, 求 a、b、c、d 各点电位。

**解** 根据电位的概念, 设 a 点为参考点时, 则有  $V_a=0\text{V}$ , 则

$$V_b = U_{ba} = -5 \times 6 = -30(\text{V})$$

$$V_c = U_{ca} = 2 \times 20 = 40(\text{V})$$

$$V_d = U_{da} = 5 \times 3 = 15(\text{V})$$

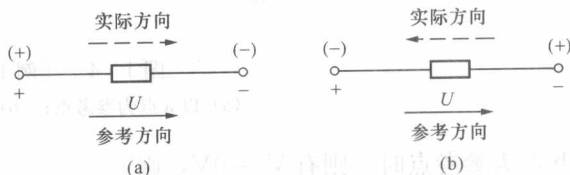


图 1-3 电压的参考方向与实际方向

(a) 参考方向与实际方向一致,  $U>0$ ;

(b) 参考方向与实际方向相反,  $U<0$

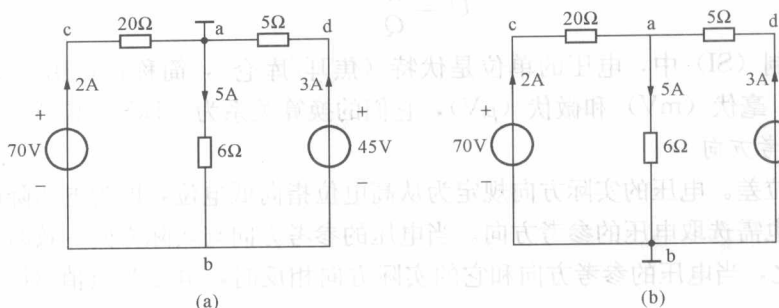


图 1-4 [例 1-1] 图

(a) 以 a 点为参考点; (b) 以 b 点为参考点

设 b 点为参考点时, 则有  $V_b = 0\text{V}$ , 则

$$V_a = U_{ab} = 5 \times 6 = 30(\text{V})$$

$$V_c = U_{cb} = 70(\text{V})$$

$$V_d = U_{db} = 45(\text{V})$$

而两点间的电压则为

$$U_{ab} = 5 \times 6 = 30(\text{V})$$

$$U_{ca} = 2 \times 20 = 40(\text{V})$$

$$U_{da} = 5 \times 3 = 15(\text{V})$$

$$U_{cb} = 70\text{V}$$

$$U_{db} = 45\text{V}$$

关于电位和电压需要特别说明以下两点:

(1) 电路中某一点的电位与参考点的选择有关, 参考点的位置一经确定, 各点的电位即为定值。

(2) 电位的大小是相对的, 即随参考点的改变而改变; 而任意两点间的电压值则是绝对的。

### 三、电功率与电能

#### (一) 电功率

电路在工作过程中纵伴随着电能与其他形式能量间的转换, 功率是衡量这种能量转换速率的物理量。元件吸收的功率定义为单位时间内电场力移动电荷所做的功, 即

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

式 (1-5) 中功的单位用焦耳 (J), 时间的单位用秒 (s), 电功率的单位是瓦特 (W), 常用单位还有千瓦 (kW)、毫瓦 (mW)。它们的换算关系为:  $1\text{kW} = 10^3\text{W} = 10^6\text{mW}$ 。

在电路分析中, 需更关注的是功率与电压、电流的关系。根据电压、电流的定义不难得出三者之间的关系为

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

需要指出的是: 式 (1-6) 是在电压、电流取关联参考方向下得出的, 若元件的电压、

电流为非关联参考方向, 则元件吸收的功率为

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

由于根据式 (1-6) 和式 (1-7) 计算的功率都是吸收功率, 所以, 当  $p > 0$  时, 表明元件确实吸收功率; 当  $p < 0$  时, 则表明元件实际发出功率。

## (二) 电能

电场力在时间区间  $[t_0, t]$  内所做的功, 称为电能, 即

$$W = \int_{t_0}^t p(\xi) d\xi \quad (1-8)$$

直流电路中电阻在时间  $t$  内消耗的电能

$$W = UI t = I^2 R t = \frac{U^2}{R} t \quad (1-9)$$

**【例 1-2】** 在图 1-5 所示电路中, 方块代表电路元件, 方块内的数字表示元件序号, 电流、电压的参考方向已经指定, 并已知  $U_1 = U_3 = U_4 = 1\text{V}$ ,  $U_2 = -2\text{V}$ ,  $I_1 = 1\text{A}$ ,  $I_3 = 3\text{A}$ ,  $I_4 = -4\text{A}$ , 试计算每个元件上的功率, 并说明元件的性质。

**解** (1) 元件 1 的电压  $U_1$  和电流  $I_1$  为关联参考方向, 所以

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

由于  $P_1 > 0$ , 元件 1 吸收  $1\text{W}$  的功率, 为负载。

(2) 元件 2 的电压  $U_2$  和电流  $I_1$  为关联参考方向, 所以

$$P_2 = U_2 I_1 = -2 \times 1 = -2(\text{W})$$

由于  $P_2 < 0$ , 元件 2 产生  $2\text{W}$  的功率, 为电源。

(3) 元件 3 的电压  $U_3$  和电流  $I_3$  为非关联参考方向, 所以

$$P_3 = -U_3 I_3 = -1 \times 3 = -3(\text{W})$$

由于  $P_3 < 0$ , 元件 3 产生  $3\text{W}$  的功率, 为电源。

(4) 元件 4 的电压  $U_4$  和电流  $I_4$  为非关联参考方向, 所以

$$P_4 = -U_4 I_4 = -1 \times (-4) = 4(\text{W})$$

由于  $P_4 > 0$ , 元件 4 吸收  $4\text{W}$  的功率, 为负载。

在整个电路中, 产生的总功率为  $2+3=5(\text{W})$ ; 吸收的总功率为  $1+4=5(\text{W})$ 。表明电路中产生的功率等于吸收的功率, 即功率是平衡的。

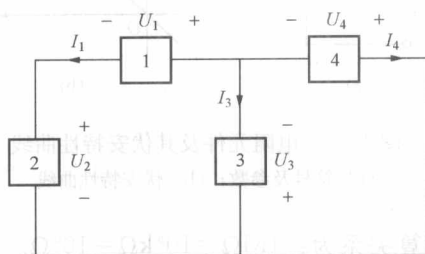


图 1-5 [例 1-2] 电路图

## 第三节 基本电路元件

电路元件是构成电路的基本单元。本节介绍电路中的电阻元件、电感元件和电容元件三类无源元件以及独立电源和受控电源两类有源元件。

### 一、电阻元件

电阻元件是一种耗能元件。电阻器、灯泡和电炉等在一定条件下, 可以用二端电阻元件作为其模型。

### 1. 电阻元件的定义

在任一时刻, 如果一个二端元件两端的电压  $u$  与通过它的电流  $i$  之间的关系可用  $u-i$  平面上的一条曲线来确定, 则此二端元件称为电阻元件。

在电路分析中, 通常把电路元件的电压与其电流之间的关系称为伏安关系。如果电阻元件的伏安关系曲线是通过坐标原点的一条直线, 且不随时间变化, 则该元件称为线性时不变电阻元件。本书只讨论线性时不变电阻元件, 简称电阻元件。

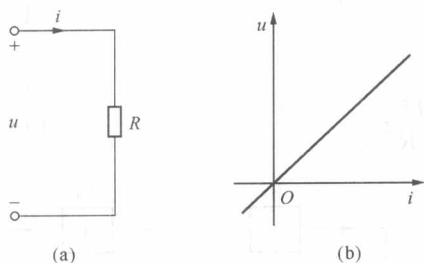


图 1-6 电阻元件及其伏安特性曲线

(a) 符号及参数; (b) 伏安特性曲线

### 2. 电阻元件的伏安关系

电阻元件的符号及其参数如图 1-6 (a) 所示。

在  $u$ 、 $i$  为关联参考方向下, 电阻元件的伏安关系为

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

$$\text{或} \quad i = Gu \quad (1-11)$$

式 (1-10) 即欧姆定律, 它表明电阻元件的端电压与通过它的电流成正比。比例常数  $R$  称为电阻。电阻的基本单位是欧姆, 用字母  $\Omega$  表示。常用的单位还有千欧 ( $k\Omega$ ) 和兆欧 ( $M\Omega$ ), 它们之间的换算关系为:  $1M\Omega = 10^3 k\Omega = 10^6 \Omega$ 。习惯上常把电阻元件简称为电阻, 所以“电阻”这个名词既表示电阻元件, 又表示元件的参数。

式 (1-11) 中的  $G$  称为电阻元件的电导, 电导  $G = 1/R$ , 单位为西门子, 用字母  $S$  表示。 $R$  和  $G$  都是表征电阻元件特性的参数, 它们均为正常数。关联参考方向下, 电阻元件的伏安特性曲线如图 1-6 (b) 所示。

需要特别指出的是, 如果  $u$ 、 $i$  取非参考方向, 则电阻元件的伏安关系应为

$$u = -Ri \quad (1-12)$$

$$\text{或} \quad i = -Gu \quad (1-13)$$

### 3. 电阻元件的功率

电阻元件的功率计算公式为

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

式 (1-14) 中的负号对应于非关联参考方向。式 (1-14) 表明: 无论是关联参考方向, 还是非关联参考方向, 电阻元件的功率  $p$  总是正值, 所以电阻元件总是吸收并消耗功率, 因此电阻元件是一种耗能元件和无源元件。

## 二、电感元件

电感元件是表征电感器 (线圈) 储存磁场能量现象的模型。当忽略线圈的电阻及线圈匝与匝之间的电容时, 电感器就可以用二端电感元件作为其模型。

### 1. 电感元件的定义

在任一时刻, 如果一个二端元件的磁通链  $\Psi$  与通过它的电流  $i$  之间的关系 (韦安关系) 可用  $\Psi-i$  平面上的一条曲线来确定, 则此二端元件称为电感元件。如果  $\Psi-i$  平面上的特性曲线是通过原点的一条直线, 且不随时间变化, 该元件称为线性时不变电感元件。本书只讨论线性时不变电感元件。电感元件的符号及其参数如图 1-7 (a) 所示。

## 2. 电感元件的伏安关系

对于任何电路元件，最关心的是其伏安关系。因为元件的伏安关系是分析电路的依据，是求解电路时不可缺少的公式。

当电感电流  $i$  的参考方向与它产生的磁通  $\Phi$  的参考方向符合右手螺旋法则时，电感元件的韦安关系为

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

电感元件的韦安特性曲线如图 1-7 (b) 所示。

另外，如果线圈中的电流  $i$  所产生的磁通  $\Phi$  与线圈的匝数  $N$  全部交链，则有

$$\Psi = N\Phi \quad (1-16)$$

式 (1-15) 中， $L$  称为电感元件的电感系数，它是表征电感元件特性的参数， $L$  为正常数。电感的基本单位是亨利，通常用字母 H 表示，常用的单位还有毫亨 (mH) 和微亨 ( $\mu\text{H}$ )，它们之间的换算关系为： $1\text{H} = 10^3\text{mH} = 10^6\mu\text{H}$ 。习惯上常把电感元件简称为电感，所以“电感”这个名词既表示电感元件，又表示元件的参数。

当电感的电流随时间变化时，电感中的磁通链也相应发生变化，于是在电感两端产生感应电压。若电压和电流取关联参考方向、电流和磁通的参考方向符合右手螺旋法则，根据电磁感应定律及式 (1-16) 可得

$$u = -e = N \frac{d\Phi}{dt} = \frac{d\Psi}{dt} \quad (1-17)$$

式 (1-17) 中， $e$  为电流  $i$  变化时在电感两端产生的感应电动势。

将式 (1-15) 代入式 (1-17) 可得，电感元件的伏安关系为

$$u = L \frac{di}{dt} \quad (1-18)$$

或

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

$$i(t) = i(t_0) + \frac{1}{L} \int_{t_0}^t u(\tau) d\tau \quad (1-19)$$

式 (1-19) 中， $i(t_0)$  称为电感的初始电流。若  $u$ 、 $i$  为非关联参考方向，则上述伏安关系中需要加负号。

## 3. 电感元件的特性

根据电感元件的伏安关系，可以得出电感元件的以下特性：

(1) 电感元件的电压取决于电流的变化率。只有当电流随时间发生变化时，电感两端才有电压产生；直流电流通过电感时，其电压为零，此时的电感相当于短路。

(2) 由式 (1-18) 可知，如果某时刻电感的电压为有限值，则其电流变化率必然为有限值，即电流在该时刻必然连续，而不能突（跃）变。

(3) 由式 (1-19) 可知，电感元件具有“记忆”其电压的作用，即任何时刻的电感电流与该时刻以前电压的“全部历史”有关。

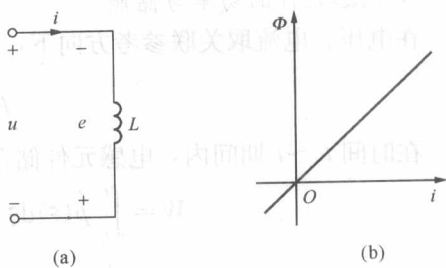


图 1-7 电感元件及其韦安特性曲线

(a) 符号及参数；(b) 韦安特性曲线

#### 4. 电感元件的功率与储能

在电压、电流取关联参考方向下, 电感元件的功率为

$$p = ui = Li \frac{di}{dt} \quad (1-20)$$

在时间  $t_0 \sim t$  期间内, 电感元件储存的磁场能量为

$$\begin{aligned} W &= \int_{t_0}^t p(\xi) d\xi = \int_{t_0}^t L \frac{di}{d\xi} d\xi \\ &= \frac{1}{2} Li(t)^2 - \frac{1}{2} Li(t_0)^2 = W(t) - W(t_0) \end{aligned} \quad (1-21)$$

式 (1-21) 中, 当  $W(t) > W(t_0)$  时, 表明在此期间内电感吸收能量, 并以磁场能量的形式储存在电感中; 当  $W(t) < W(t_0)$  时, 表明在此期间内电感释放能量。值得注意的是, 电感能够释放的能量总是等于它原来储存的能量, 因此电感元件是一种储能元件和无源元件。

当电感的初始电流  $i(t_0) = 0$  时, 则有

$$W(t) = \frac{1}{2} Li(t)^2 \quad (1-22)$$

式 (1-22) 表明, 电感元件在任何时刻的储能只取决于该时刻的电流, 而与该时刻的电压无关。无论电流为正值还是负值, 电感储存的能量均大于零。

### 三、电容元件

#### 1. 电容元件的定义

电容元件是表征电容器储存电场能量现象的模型。当忽略电容器的漏电现象时, 可以用二端电容元件作为其模型。

在任一时刻, 如果一个二端元件的电荷  $q$  与其端电压  $u$  之间的关系 (库伏关系) 可用  $q-u$  平面上的一条曲线来确定, 则此二端元件称为电容元件。如果  $q-u$  平面上的特性曲线是通过原点的一条直线, 且不随时间变化, 则该元件称为线性时不变电容元件。本书只讨论线性时不变电容元件, 简称电容元件。电容元件的符号及其参数如图 1-8 (a) 所示。

#### 2. 电容元件的伏安关系

对于电容元件, 最关心的是其伏安关系。下面推导电容元件的伏安关系。

如果选定电容元件的  $+q$  极板端为电压的参考正极,  $-q$  极板端为电压的参考负极, 则电容元件的库伏关系为

$$q = Cu \quad (1-23)$$

电容元件的库伏特性曲线如图 1-8 (b) 所示。式 (1-23) 中,  $C$  为元件的电容系数, 它是表征电容元件特性的参数,  $C$  为正常数。

电容的基本单位是法拉, 用字母  $F$  表示。常用的单位还有微法 ( $\mu F$ ) 和皮法 ( $pF$ )。它们之间的换算关系为:  $1F = 10^6 \mu F$ ,  $1\mu F = 10^6 pF$ 。习惯上常把电容元件简称为电容, 所以“电容”这个名词既表示电容元件, 又表示元件的参数。

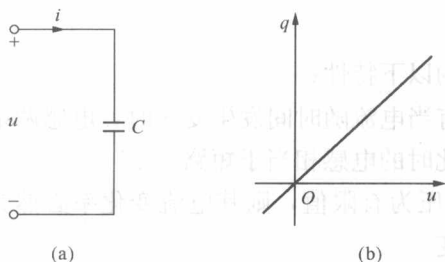


图 1-8 电容元件及其库伏特性曲线

(a) 符号及参数; (b) 库伏特性曲线

当电压  $u$  和电流  $i$  为关联参考方向时, 将式 (1-23) 代入式 (1-1) 可得电容元件的伏安关系为

$$i = \frac{dq}{dt} = C \frac{du}{dt} \quad (1-24)$$

或

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

$$u(t) = u(t_0) + \frac{1}{C} \int_{t_0}^t i(\xi) d\xi \quad (1-25)$$

式 (1-25) 中,  $u(t_0)$  称为电容的初始电压。若  $u$ 、 $i$  为非关联参考方向, 则上述伏安关系式中需要加负号。

### 3. 电容元件的特性

根据电容元件的伏安关系, 可以得出电容元件的以下特性。

(1) 电容元件的电流取决于电压的变化率。只有当电压随时间发生变化时, 电容才有电流通过; 若电压恒定不变, 其电流为零, 此时的电容元件相当于开路。因此, 电容具有隔直流的作用。

(2) 由式 (1-24) 可知, 如果某时刻电容的电流为有限值, 则其电压变化率必然为有限值。即电压在该时刻必然连续, 而不能突 (跃) 变。

(3) 由式 (1-25) 可知, 电容元件具有“记忆”其电流的作用, 即任何时刻的电容电压与该时刻以前电流的“全部历史”有关。

### 4. 电容元件的功率与储能

在电压、电流取关联参考方向下, 电容元件的功率为

$$p = ui = Cu \frac{du}{dt} \quad (1-26)$$

在时间  $t_0 \sim t$  期间内, 电容元件储存的磁场能量为

$$W = \int_{t_0}^t p(\xi) d\xi = \int_{t_0}^t C \frac{du}{d\xi} u d\xi$$

$$= \frac{1}{2} Cu(t)^2 - \frac{1}{2} Cu(t_0)^2 = W(t) - W(t_0) \quad (1-27)$$

式 (1-27) 中, 当  $W(t) > W(t_0)$  时, 表明在此期间内电容吸收能量, 并以磁场能量的形式储存在电容中; 当  $W(t) < W(t_0)$  时, 表明在此期间内电容释放能量。值得注意的是, 电容能够释放的能量总是等于它原来储存的能量, 因此电容元件是一种储能元件和无源元件。

当电容的初始电压  $u(t_0) = 0$  时, 则有

$$W(t) = \frac{1}{2} Cu(t)^2 \quad (1-28)$$

式 (1-28) 表明, 电容元件在任何时刻的储能只取决于该时刻的电压, 而与该时刻的电流无关。无论电压为正值还是负值, 电容储存的能量均大于零。

## 四、独立电源

独立源电源 (简称独立电源) 是为电路提供电能的源泉。独立电源有电压源和电流源两种, 所谓独立是指电压源的电压和电流源的电流只由其本身的结构所决定, 而与外部条件无关。

### (一) 理想电压源

理想电压源 (简称电压源) 是从实际电源抽象出来的一种模型。当忽略发电机、蓄电池

的内阻,即能量损耗时,就可以用电压源作为其模型。

### 1. 电压源的定义

一个二端元件,如果对外能够提供恒定或按给定规律变化的电压,而与通过它的电流无关,则该元件称为电压源。电压源的符号及其参数如图 1-9 (a) 所示。其中“+”、“-”号表示电压源电压的参考极性, $u_s$  称为电压源的参数。当电压源的电压为恒定值时,则称为恒压源或直流电压源,直流电压源也可采用图 1-9 (b) 所示符号。

### 2. 电压源的性质

根据定义可知,电压源具有两个基本性质:

(1) 电压源的端电压保持定值或者是一定的时间函数,而与通过它的电流无关。

(2) 电压源的电流取决于它所连接的外电路。

由性质 (1) 可以得到电压源的伏安关系为

$$u = u_s \quad (i \text{ 任意}) \quad (1-29)$$

直流电压源的伏安特性曲线如图 1-9 (c) 所示,它是一条平行于  $i$  轴的直线。

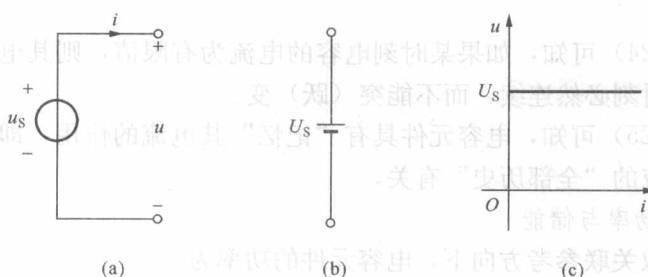


图 1-9 电压源及其伏安特性曲线

(a) 符号及参数; (b) 直流电压源; (c) 伏安特性曲线

### 3. 电压源的功率

习惯上,电压源的电压和电流常取非关联参考方向,此时电压源发出的功率为  $p = -u_s i$ ,如果计算结果为正值,表明电压源在电路中实际是吸收功率,此时的电压源相当于负载。

**【例 1-3】** 求图 1-10 所示各电路中的电流  $I$  和电压  $U$ ,并求电压源发出的功率。

**解** 在图 1-10 (a) 所示电路中,因 a、b 两端开路,故

$$I = 0, U = 10\text{V}$$

而电压源发出的功率

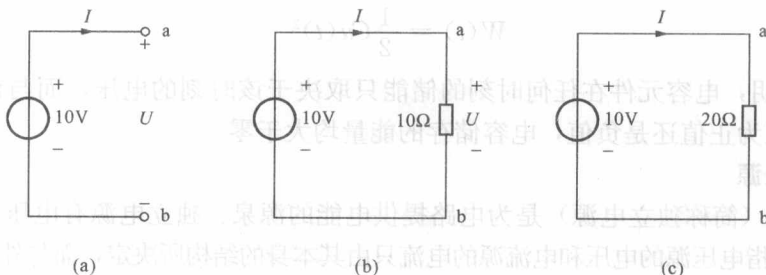


图 1-10 [例 1-3] 电路图