



普通高等教育“十一五”国家级规划教材



# 电路基础

● 黄学良 主编

机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

# 电 路 基 础

主编 黄学良  
参编 王 琼 滕岩峰 魏维柱  
主审 周庭阳 袁晓辉

江苏工业学院图书馆  
藏书章



机 械 工 业 出 版 社

本书是普通高等教育“十一五”国家级规划教材。本书根据教育部最新颁布的高等学校电类专业“电路分析基础”和“电路理论基础”课程的基本要求,结合新的课程体系和教学内容的需要,在充分考虑了现代电子科技日新月异的发展及其取得的成果并结合编者多年来教学实践经验,特地为工科院校电子与电气信息类专业本科生编写而成的。

本书共分9章。系统介绍了电路基本定律及电阻电路分析、正弦稳态电路分析、动态电路分析3大部分。为了加强与电子类、信息类、电气类课程的联系,书中相应包含了非线性电阻电路分析、电路频率特性分析、磁路分析3方面的内容。另外,本书还在附录中介绍了一些常见的电路计算机辅助分析软件以及MATLAB在电路分析中的应用。

本书可作为电子、电气、通信、自控、计算机等专业本科生电路课程教材,也可供相关科技人员参考。

本书配有电子课件,欢迎选用本书作教材的老师索取。

索取邮箱: EdmondYan@sina.com

EdmondYan@hotmail.com

### 图书在版编目(CIP)数据

电路基础/黄学良主编. —北京:机械工业出版社,  
2007.8

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

ISBN 978-7-111-21608-7

I. 电… II. 黄… III. 电路理论—高等学校—教材  
IV. TM13

中国版本图书馆CIP数据核字(2007)第082968号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

责任编辑: 贡克勤 版式设计: 冉晓华 责任校对: 陈延翔

封面设计: 张 静 责任印制: 洪汉军

北京铭成印刷有限公司印刷

2007年8月第1版第1次印刷

184mm×260mm·18.75印张·463千字

标准书号: ISBN 978-7-111-21608-7

定价: 28.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

销售服务热线电话: (010)68326294

购书热线电话: (010)88379639 88379641 88379643

编辑热线电话: (010)88379725

封面无防伪标均为盗版

# 前 言

为了有利于培养面向 21 世纪的通用型人才,教育部在 1998 年颁布了新修订的《普通高等学校本科专业目录》和《工科本科引导性专业目录》。新的专业目录比原专业目录中专业种类数减少了一半以上。为了建设新的专业,各高等院校纷纷制定了新的工科院校电子与电气信息类专业培养方案。本书是编者根据教育部最新颁布的高等学校电类专业“电路分析基础”和“电路理论基础”课程的基本要求,结合新的课程体系和教学内容的需要,在充分考虑了现代电子科技日新月异的发展及其取得的成果并结合编者多年来教学实践经验,特地为工科院校电子与电气信息类专业本科生编写的。

本书突出知识重点,兼顾知识点覆盖,强化基础训练和实验操作。全书内容包括电路基本定律及电阻电路分析、正弦稳态电路分析和动态电路分析 3 大部分。为了适应通信类等专业的要求,书中适当加强了电路频率分析特性方面的内容;考虑到加强与电子类课程的联系,本书包含了非线性电阻电路分析方面的内容;为了加强与电气类课程的联系,书中包含了磁路方面的内容。全书共分 9 章及 3 个附录。正文具体内容分配为:电路的基本概念和基本定律、直流电路的分析、正弦稳态电路(含互感电路和三相电路)、电路的频率特性、非正弦周期电流电路、电路暂态过程的时域分析、电路的拉普拉斯变换分析、二端口网络、非线性电阻电路。附录 A 介绍了磁路方面的知识,附录 B 介绍了一些常见的电路计算机辅助分析软件,附录 C 介绍了 MATLAB 在电路分析中的应用。

在编写过程中,编者本着先易后难、逐步深入的原则,重视学科的系统性,力求准确清楚地讲解电路理论中的基本概念。对于课程基本要求中的主干内容,如电压(电流)参考方向、欧姆定律、基尔霍夫电压(电流)定律、节点法、回路法、戴维宁定理、三要素法、相量法等内容,从多个方面进行阐述,以便读者理解深刻、熟练掌握。

本书所配例题具有典型性并能适当兼顾工程实际,且在每个章节后配有一定数量、难易适当的习题,并在书后给出了大部分习题的参考答案,以供读者选用。书中正文、例题、习题密切结合,便于读者自学,以适应启发式教学方法的需要。

本书总的讲课时数约为 96 学时。可作为电子、电气、通信、自控、计算机等专业本科生的电路课程教材,也可供相关科技人员参考。

本书由东南大学黄学良主编,参加编写工作的有东南大学王琮、滕岩峰、魏维柱。浙江大学周庭阳教授、东南大学袁晓辉教授任主审。东南大学钱俞寿教授、机械工业出版社贡克勤老师参与审稿,编者一并致以衷心的感谢。从本书设想到最后定稿,许多同事都给予了帮助,在此表示感谢。

在本书的策划与编辑过程中,得到了机械工业出版社相关老师的热情帮助,在此表示诚



挚的谢意。

限于编者水平加之经验不足，书中难免存在不足和错漏之处，敬请读者批评指正。意见  
请寄：东南大学电气工程学院(邮编 210096)。

本书配有电子课件，欢迎选用本书作教材的老师索取。

索取邮箱：EdmondYan@sina.com

EdmondYan@hotmail.com

编 者

# 目 录

## 前言

## 第 1 章 电路的基本概念和电压、

### 电流的约束关系 ..... 1

- 1.1 电路的基本概念 ..... 1
- 1.2 电路的主要物理量 ..... 4
- 1.3 电路的无源元件 ..... 6
- 1.4 电路的有源元件 ..... 12
- 1.5 常用多端电路元件介绍 ..... 14
- 1.6 基尔霍夫定律 ..... 17
- 习题 ..... 19

## 第 2 章 直流电路的分析 ..... 23

- 2.1 电阻的串并联等效变换 ..... 23
- 2.2 电阻的星形与三角形联结的  
等效变换 ..... 26
- 2.3 支路电流法 ..... 29
- 2.4 电源的等效变换 ..... 31
- 2.5 叠加定理 ..... 34
- 2.6 替代定理 ..... 36
- 2.7 等效电源定理 ..... 37
- 2.8 节点电压法 ..... 44
- 2.9 网孔电流法与回路电流法 ..... 48
- 2.10 特勒根定理 ..... 52
- 2.11 互易定理 ..... 53
- 习题 ..... 55

## 第 3 章 正弦电流电路 ..... 62

- 3.1 正弦量的基本概念 ..... 62
- 3.2 正弦量的相量表示法 ..... 64
- 3.3  $R$ 、 $L$ 、 $C$  元件的交流电特性 ..... 69
- 3.4 电路定律的相量形式 ..... 74
- 3.5 复阻抗和复导纳 ..... 75
- 3.6 正弦电流电路的分析 ..... 80
- 3.7 正弦电流电路的功率 ..... 83
- 3.8 含互感电路的分析 ..... 91
- 3.9 理想变压器 ..... 98
- 3.10 三相电路 ..... 102
- 习题 ..... 112

## 第 4 章 电路的频率特性 ..... 119

- 4.1 电路的频率特性及网络函数 ..... 119
- 4.2  $RC$  选频电路的频率特性 ..... 120
- 4.3  $LC$  振荡回路的基本参量 ..... 127
- 4.4 串联谐振电路 ..... 128
- 4.5 并联谐振电路 ..... 137
- 习题 ..... 145

## 第 5 章 非正弦周期电流电路 ..... 149

- 5.1 非正弦周期量的傅里叶级数展开 ..... 149
- 5.2 非正弦周期量的有效值、  
平均值和平均功率 ..... 152
- 5.3 非正弦周期电流电路的分析 ..... 155
- 5.4 对称三相电路中的高次谐波 ..... 157
- 习题 ..... 159

## 第 6 章 电路暂态过程的时域分析 ..... 161

- 6.1 电路暂态过程及其初始条件 ..... 161
- 6.2 一阶电路的零输入响应 ..... 164
- 6.3 一阶电路的零状态响应 ..... 168
- 6.4 一阶电路的全响应和三要素法 ..... 173
- 6.5 阶跃函数和阶跃响应 ..... 177
- 6.6 冲激函数和冲激响应 ..... 180
- 6.7 二阶电路的暂态过程 ..... 184
- 习题 ..... 189

## 第 7 章 电路的拉普拉斯变换分析 ..... 195

- 7.1 拉普拉斯变换的定义 ..... 195
- 7.2 拉普拉斯变换的基本性质 ..... 199
- 7.3 拉普拉斯反变换 ..... 204
- 7.4 复频域电路 ..... 210
- 7.5 电路的拉普拉斯变换分析法 ..... 213
- 习题 ..... 216

## 第 8 章 二端口网络 ..... 220

- 8.1 二端口网络的基本概念 ..... 220
- 8.2 二端口网络的网络参数 ..... 221
- 8.3 二端口网络的网络函数 ..... 229
- 8.4 二端口网络的等效电路 ..... 231
- 8.5 二端口网络的连接 ..... 235
- 习题 ..... 239



|                          |     |                       |     |
|--------------------------|-----|-----------------------|-----|
| <b>第9章 非线性电阻电路</b> ..... | 244 | A.3 恒定磁通有分支磁路的计算      | 262 |
| 9.1 非线性电路元件 .....        | 244 | A.4 交变磁通磁路的计算 .....   | 263 |
| 9.2 非线性电阻电路的图解法 .....    | 246 | 习题 .....              | 266 |
| 9.3 小信号分析法 .....         | 248 | 附录B 常用电路计算机辅助         |     |
| 9.4 分段线性化法 .....         | 250 | 分析软件介绍 .....          | 267 |
| 习题 .....                 | 252 | 附录C MATLAB在电路分析中的应用   | 269 |
| <b>附录</b> .....          | 254 | <b>部分习题参考答案</b> ..... | 283 |
| 附录A 磁路 .....             | 254 | <b>参考文献</b> .....     | 293 |
| A.1 磁路及其定律 .....         | 254 |                       |     |
| A.2 恒定磁通无分支磁路的计算         | 259 |                       |     |

# 第 1 章

## 电路的基本概念和电压、电流的约束关系

本章在物理电学的基础上，从分析电路的角度和要求出发，介绍电路的基本概念和物理量，论述常用电路元件的特性及其构成电路后电压、电流的约束关系。这些约束关系贯穿全书，是后续各章的基础。

### 1.1 电路的基本概念

电荷定向移动形成电流 (Current)。电流流过的路径称为电路 (Circuit)。

#### 1.1.1 电路的组成及其功能

实际电路由各种电气设备组成，这些设备主要有发电设备(称为电源)，如各种发电机、电池等；用电设备(称为负载)，如各种电动机、电炉、电灯等。还有传输、控制、测量、保护等辅助装置，如变压器、输电线、开关、各种仪表、熔断器等。电源和负载是构成任一完整电路的两个基本部分。

电力系统是一个复杂的实际电路，图 1-1 为电力系统的示意图。在火力发电厂中，发电机由汽轮机带动运转，将机械能转换成电能，经变压器将电压升高，由输电线送往用电地方，再经变压器将电压降低，送至各种用电设备，把电能转换成热能、光能、机械能等。



图 1-1 电力系统示意图

图 1-2 为一台接收机电路示意图。接收装置将微弱的电磁波信号接收下来，经过放大、

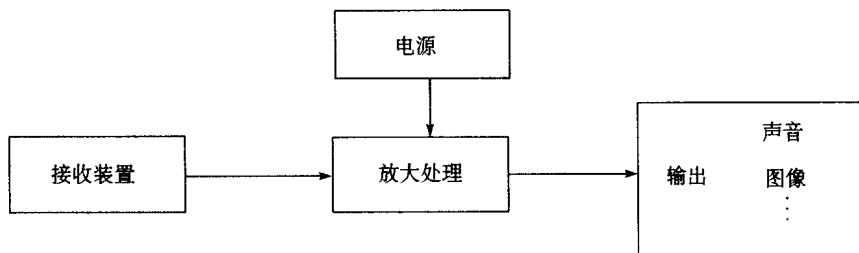


图 1-2 接收机电路示意图



变换处理后, 送到扬声器、显示器、记录器等设备。当然这些装置工作也必须有电源, 但这里转换的能量是很小的, 主要的作用是处理与传递信号。

从上面列举的两个电路实例, 可归纳出电路的主要功能及基本要求为

- 1) 转换与传输能量, 要求在转换与传输过程中损耗小, 效率高。
- 2) 处理与传递信号, 要求在处理与传递过程中失真小, 灵敏度高。

不论是哪种功能, 都需要有电源或信号源, 它是电路中产生电压或电流的动力, 称为激励。由激励在电路各部分产生的电压或电流称为响应。分析电路就是找出电路中激励与响应的关系。

### 1.1.2 电路模型(Circuit Model)

将组成实际电路的各种器件理想化, 即在一定的条件下突出主要的电磁性质, 进行科学的抽象和概括, 定义了电路各种理想元件。例如将电路的连接导线, 忽略其电阻, 看作理想导线。这些理想元件按其性质可分成线性元件和非线性元件; 按其与时关系可分成时变元件和非时变元件; 按其在电路中的作用可分成有源元件和无源元件; 按其对外连接端点数可分成二端元件、三端元件、多端元件等。

由理想元件构成的电路图就是电路模型。图1-3为一个简单照明电路的电路模型, 其中将实际电源突出它的电磁性质, 抽象成电动势和内电阻两个理想元件串联, 白炽灯则由一个理想电阻元件来表征, 它们之间的各条连接线均是理想导线。

图1-4a表示一个实际线圈, 它可以抽象化成图1-4b所示的电路模型, 其中 $R$ 代表线圈的电阻,  $L$ 代表线圈的电感,  $C$ 代表线圈的匝间电容。根据实际使用情况, 还可以进行简化。若损耗小可以忽略时, 其电阻 $R$ 可省去。电容 $C$ 不大, 在频率较低时, 其影响也可略去。因此, 对于同一个实际电路器件, 在不同使用条件下, 可以用不同的电路模型来描述。

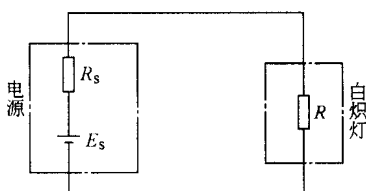


图 1-3 电路模型

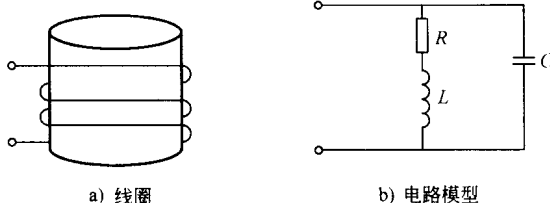


图 1-4 线圈及其电路模型

### 1.1.3 两条公理和一条假设

本书所论述的电路分析遵循两条公理和一条假设。

#### 1. 电荷守恒

电荷在电路中作定向移动形成电流。在运动过程中经过各个电路元件, 在有的元件上吸收能量, 有的元件上放出能量。实践证明, 电荷的数量在运动过程中保持不变, 即电荷守恒。

#### 2. 能量守恒

电路是转换与传输能量的装置, 在转换与传输过程中遵循能量守恒定律。

### 3. 集中假设

实际电路及其器件在空间上有一定的几何尺寸，若电路或器件的最大尺寸  $d$  与工作电流电磁波的波长  $\lambda$  比较，满足  $d \ll \lambda$  时，则此电路或器件可看成集中在空间一点，即它的实际几何尺寸不影响电路中的电磁关系，这就是“集中假设”，或称“集总假设”，类似于力学研究中的“质点假设”。

电磁波的传播速度与光速相同 ( $v_c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$ )，它的波长为

$$\lambda = \frac{v_c}{f} \quad (1-1)$$

我国和许多国家电力系统所用的标准频率  $f$  为 50Hz，此频率又称为工频 (Power Frequency)，则  $\lambda = \frac{3 \times 10^8}{50} \text{ m} = 6 \times 10^6 \text{ m}$ ，这比一般实际电路的尺寸要大得多，是满足集中假设的。而对几千公里的远距离输电线或通信电缆来说，就不能满足集中假设。另外，如果工作电流的频率特别高，由式 (1-1) 知其波长会很短，即使实际电路尺寸不大，也可能不满足集中假设。对满足集中假设的电路或元件称为集中电路或集中元件，这是本书讨论的范围。对不满足集中假设的电路，则采用分布参数电路模型分析，留在后续课程中研究。

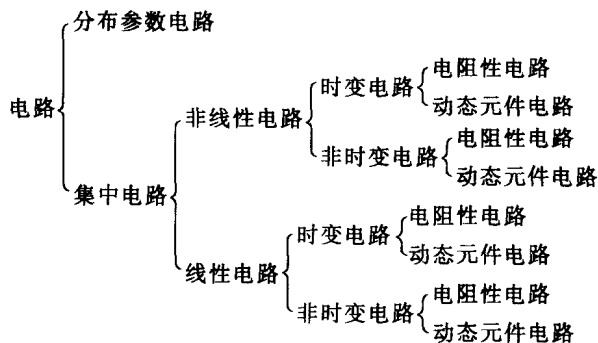
#### 1.1.4 电路的分类

电路按其是否满足集中假设分成集中电路和分布参数电路两大类。

在集中电路中按其组成元件的性质又分为线性电路和非线性电路。

不论是线性电路还是非线性电路，按其组成元件参数是否随时间变化，又分为时变电路与非时变电路。

因此电路分类可归纳如下：



需要说明的是，从不同的角度，电路有不同的分类，并可由此得出不同的电路名称。

按电路中的电流是否随时间变化，可分成直流电路和交流电路，交流电路中又分为正弦交流电路和非正弦交流电路。

若按电路的用途，分有放大电路、整流电路、滤波电路、振荡电路等。

本书所说的电路均指非时变集中电路，而且又都是已完成器件建模的实际电路的理想模型，重点为非时变集中线性电路。



## 1.2 电路的主要物理量

描述电路情况的主要物理量有电流  $i$ 、电压  $u$ 、电荷  $q$ 、磁链  $\psi$ 、电功率  $p$ 、电能  $w$  等。它们一般都是时间的函数。其中分析电路最常用的物理量是电流、电压和电功率。

### 1.2.1 电流及其参考方向

电流是描述电荷定向流动的物理量。导线中的电流强度定义为每单位时间通过导线横截面的电荷量。电流强度简称电流，用字母  $i$  表示，即

$$i(t) = \frac{dq}{dt} \quad (1-2)$$

式中， $dq$  为在  $dt$  时刻流过导线横截面的电荷量。

如果电流是恒定的，即其量和流向不随时间变化，称为直流电流，一般用大写字母  $I$  表示；若其大小与方向随时间变化，则称为交流电流，记为  $i(t)$ 。在国际单位制(SI)中，电流的单位是安培(A)。分析电路时还会用到千安(kA)、毫安(mA)、微安( $\mu A$ )等。它们之间的换算关系为

$$1 A = 10^{-3} kA = 10^3 mA = 10^6 \mu A$$

电荷有正、负之分，正或负电荷定向流动都形成电流，规定正电荷流动的方向(即负电荷流动的反方向)为电流的方向。在电路图上用箭头标示电流的方向。

对于比较复杂的电路，很难凭观察来确定各条支路中电流的实际方向。例如图 1-5 所示的电桥电路，在电桥不平衡时，检流计 P 中有电流流过，此电流是由 a 流向 b，还是由 b 流向 a 很难确定。所以在计算时，可先任意假定一个电流的正方向，称为参考方向。图中假设电流  $i$  由 a 流向 b，也可以用双下标字母表示，记作  $i_{ab}$ ，代表电流由 a 流向 b。按此方向进行电路计算，计算出结果为  $i_{ab} > 0$  或  $i_{ab} < 0$ ，若  $i_{ab} > 0$ ，则表示电路中实际电流的方向与参考方向相同，若  $i_{ab} < 0$ ，则表示电路中实际电流的方向与参考方向相反，此时负号和图中箭头同时保留，不必改动。

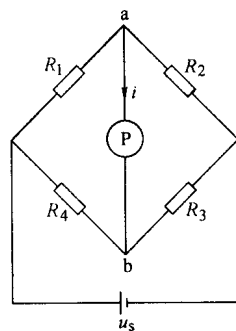


图 1-5 电流的参考方向

对于交流电流，其实际方向是不断变化的，图中标示的参考方向即代表正半周电流的实际方向。

### 1.2.2 电压(Voltage)及其参考方向

电压是指电路中单位正电荷处在两点时所携带的能量之差，即

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

式中， $dw$  为  $dq$  电荷在  $t$  时刻由一点移到另一点所释放出的能量。在国际单位制中，能量的单位为焦耳(J)，电压的单位为伏特(V)。

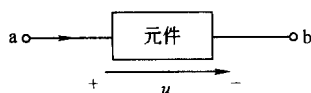


图 1-6 电压的参考方向

在图 1-6 所示的一段电路中, 正电荷由 a 点运动到 b 点时, 在该段电路释放出电势能, 则电压  $u_{ab}$  为正; 若电势能增加, 则电压  $u_{ab}$  为负。

在分析电路时, 如同电流的参考方向一样, 电路两点间或任一元件两端的电压也要给定一个方向, 即电压的参考方向。电路图中电压的参考方向可用箭头表示, 也可以用“+”、“-”或双下标字母  $u_{ab}$  表示。有了参考方向, 电压的正负才有意义。计算结果电压数值为正时, 表明其参考方向与实际方向一致; 电压数值为负时, 表明其参考方向与实际方向相反。

电流与电压都有大小和方向, 但它们都是标量, 不是矢量, 因为它们的方向并不是指在空间上有一定方向, 而是沿着电路或元件的走向。电流与电压参考方向的设定是分析电路的一个必要环节, 参考方向可以人为地指定, 但一经指定并在电路图上标明后, 在整个电路分析过程中都必须以此为准, 不能变动。对于一个电路元件, 其电流与电压取相同的参考方向, 称为关联参考方向。如图 1-6 中  $i$  与  $u_{ab}$  的参考方向相同, 即为关联参考方向。

在电路计算时, 还会出现电动势和电位两个物理量。例如在图 1-7 所示的电路中, 对电源可用电动势  $E_s$  表示。电动势的规定正方向与电压的规定正方向相反。 $E_s = 15\text{V}$  表示单位正电荷由电源负极移动到正极吸收 15J 能量。

所谓电位是相对于电路参考点(令该点为零电位)而言的某点电压, 通常用  $\perp$  表示参考点。所以计算电位就是选定参考点后, 计算各点相对于参考点之间的电压。例如图 1-7 中, 选定 C 点为参考点, 则 B 点的电位  $V_B = U_2 = 5\text{V}$ , A 点的电位  $V_A = U_1 + U_2 = E_s = 15\text{V}$ 。当选取不同的参考点时, 电路中各点有不同的电位, 但任意两点间的电压不变。

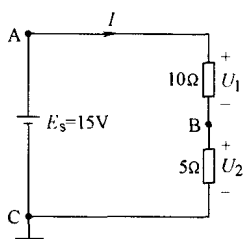


图 1-7 电位的计算

### 1.2.3 电功率(Power)与电能(Energy)

电路是转换与传输能量的装置。在电路工作时, 总是伴随着电能与其他形式能量的转换。各种电气设备工作时电压、电流和功率都有一定的限制, 超过容许值可能会损坏。所以分析电路要计算电路中各元件的功率。

单位时间内电场力所作的功称为电功率, 简称功率, 用字母  $p$  表示。电功率是表征电路中能量转换速率的物理量, 即

$$p = \frac{dw}{dt} = \frac{dw}{dq} \frac{dq}{dt} = ui \quad (1-4)$$

对一段电路或一个元件, 当电压  $u$  与电流  $i$  取关联参考方向时, 其  $u$  与  $i$  的乘积就是此刻该段电路或元件吸收(消耗)的电能。 $p$  值为正时, 表示该元件确实吸收电能, 此元件为负载;  $p$  值为负时, 表示该元件实际发出(供给)电能, 此元件为电源。

在直流电路中, 电压与电流均不随时间变化, 有

$$P = UI \quad (1-5)$$

在国际单位制中, 功率的单位为瓦特, 简称瓦(W)。在功率较大时, 用千瓦(kW)表示; 在功率较小时, 常用毫瓦(mW)、微

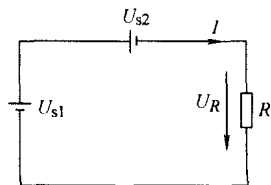


图 1-8 例 1-1 电路



瓦( $\mu\text{W}$ )表示。它们之间换算关系为

$$1\text{W} = 10^{-3}\text{kW} = 10^3\text{mW} = 10^6\mu\text{W}$$

**例 1-1** 在图 1-8 所示电路中, 设  $I=1\text{A}$ ,  $U_{s1}=6\text{V}$ ,  $U_{s2}=2\text{V}$ , 计算各元件的功率。

**解**  $U_R = U_{s1} - U_{s2} = (6 - 2)\text{V} = 4\text{V}$

各元件的功率分别为

$$P_R = U_R I = 4 \times 1\text{W} = 4\text{W}$$

吸收 4W

$$P_{U_{s1}} = (-U_{s1})I = (-6) \times 1\text{W} = -6\text{W}$$

发出 6W, 起电源作用

$$P_{U_{s2}} = U_{s2}I = 2 \times 1\text{W} = 2\text{W}$$

吸收 2W, 起负载作用

整个电路满足  $\sum P = P_R + P_{U_{s1}} + P_{U_{s2}} = 0$ , 符合能量守恒定律。

电能是一段时间中转换能量之和, 用字母  $W$  表示, 即

$$W = \int_{t_0}^t p(\xi) d\xi \quad (1-6)$$

对直流电路, 功率不随时间变化, 有

$$W = P\Delta t = UI\Delta t \quad (1-7)$$

式中,  $P$  的单位为瓦(W);  $\Delta t$  的单位为秒(s);  $W$  的单位为焦耳(J)。电能的实用单位为 kWh。

## 1.3 电路的无源元件

电路元件是构成电路的基本单元。按其在电路中所起的作用, 可分为有源元件和无源元件。常用的无源元件有电阻元件、电容元件、电感元件和互感元件等, 它们在电路中通常作为负载。

### 1.3.1 电阻(Resistance)

#### 1. 电阻的物理概念

白炽灯泡、电炉、电烙铁等电气设备在一定条件下可用电阻元件(简称电阻)作为其电路模型。电阻在电路中起阻碍电流流动的作用。在电场力作用下, 电荷通过电阻时, 要克服阻力做功。一般电阻只要有电流流过, 电阻就要吸收电能, 所以电阻元件是一个消耗电能的元件。

导体的电阻阻值由其材料的性质及几何尺寸决定, 即

$$R = \rho \frac{l}{S} \quad (1-8)$$

式中,  $\rho$  为材料的电阻率;  $l$  为导体的长度;  $S$  为导体的横截面积。

#### 2. 电阻元件的伏安关系

非时变线性电阻的阻值为常数, 其电路如图 1-9a 所示。当其电压  $u$  和电流  $i$  取关联参考方向时, 根据符合欧姆定律, 得

$$u = Ri \quad (1-9)$$

式中,  $R$  为元件的电阻值。当电压单位用

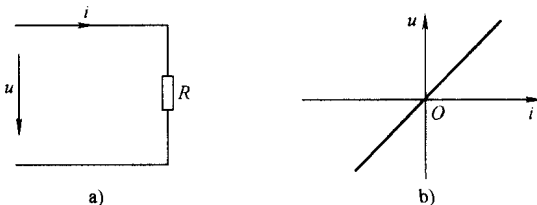


图 1-9 电阻的图形符号及伏安关系

(V)、电流单位用(A)时,电阻的单位为欧姆( $\Omega$ )。其伏安关系为过原点的一条直线,如图1-9b所示。

电阻的倒数用  $G$  表示,称为电导(Conductance),即

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

电导的单位为西门子(S)。

用电导表示,式(1-9)可写成

$$i = Gu \quad (1-11)$$

电阻吸收的功率为

$$p = ui = i^2 R = u^2 G \quad (1-12)$$

线性电阻元件有两个特殊的极端情况值得注意。其一为不论它的端电压为何值,流过的电流都是零,则此电阻两端称为“开路”。其二是不论它的电流为何值,电阻两端的电压都是零,则此电阻两端称为“短路”。开路和短路状态的伏安关系分别如图1-10a、b所示,在  $u$ - $i$  平面上分别与电压轴或电流轴重合。

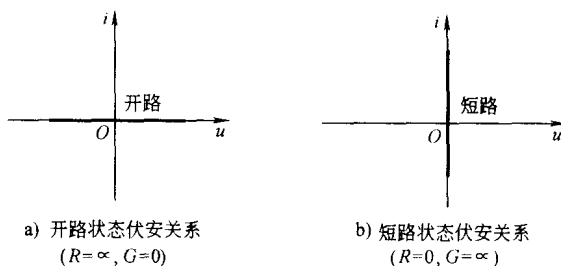


图 1-10 开路与短路状态的伏安关系

线性电阻元件的伏安关系若在  $i$ - $u$  平面上位于二、四象限,则  $R = \frac{u}{i} < 0$  为负值,称为线性负电阻,当有电流通过时,它将发出

电能。如果要获得负电阻,一般需要专门设计。

非线性电阻的伏安关系在  $u$ - $i$  平面上是一条曲线,它的电阻值随着流过的电流或两端电压而改变。图1-11a表示的半导体二极管是一个典型的非线性电阻,其伏安关系如图1-11b所示。

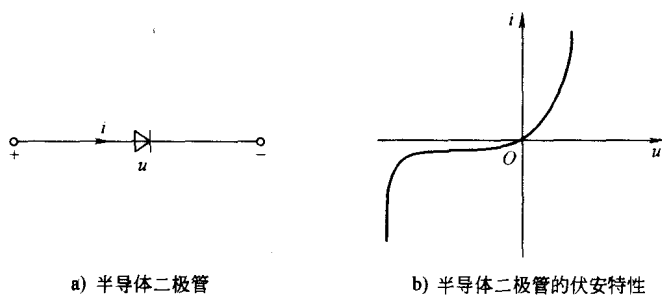


图 1-11 半导体二极管及其伏安特性

### 1.3.2 电容(Capacitance)

#### 1. 电容的物理概念

电容器在工程技术中应用广泛。它由两块金属极板隔以绝缘介质构成,根据介质不同,可分为云母电容器、油浸电容器、纸质电容器、电解电容器等。当两块极板接通电源后,正、负电荷分别聚集在两个极板上,在极板间建立电场,将能量储存在电场中。当电源移去



后, 电荷仍聚集在极板上, 继续储存能量。所以电容器是一种能容纳电荷而储存电场能量的器件。在电路中用电容元件来模拟这种物理现象。图 1-12a 为线性电容元件的图形符号。

电容量的定义为当两个极板间为单位电压时, 每个极板上容纳的电荷量, 即

$$C = \frac{q}{u} \quad (1-13)$$

式中,  $q$  为每个极板上的电荷量(两个极板电荷量相同, 一个带正电荷, 另一个带负电荷);  $u$  为极板间电压。当电荷量单位为库仑(C), 电压单位为伏(V)时, 电容的单位为法拉(F)。由于法拉的单位太大, 工程上常用微法( $\mu\text{F}$ )或皮法(pF)作单位, 其换算关系为

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

电容器容量的大小决定于电容器的结构, 平行板电容器电容量为

$$C = \frac{\epsilon S}{d} \quad (1-14)$$

式中,  $\epsilon$  为绝缘介质的介电系数;  $S$  为每个极板的面积;  $d$  为极板间的距离。

电容器极板上的电荷量  $q$  与极板间电压  $u$  之间的关系称为库伏特性。线性电容  $C$  为常数, 所以它的库伏特性为过原点的直线, 如图 1-12b 所示。如果电容的库伏特性不是直线, 即它的电容量随极板间电压而变, 此电容就是非线性电容。半导体变容二极管就是非线性电容的一例。

## 2. 电容元件的伏安关系

对电容充电时, 电容上电压升高, 当电容放电时, 电容上电压降低, 就是说当电容在充放电时, 电容上电压在变化, 此时电容所在电路就有电流产生。当电容元件的电压  $u$  和电流  $i$  取关联参考方向时, 如图 1-12a 所示, 电容的伏安关系为

$$i = \frac{dq}{dt} = C \frac{du}{dt} \quad (1-15)$$

式(1-15)表明, 只有当电容上电压随时间变化时, 电容上才有电流, 因此电容为动态元件。当电容量  $C$  一定时, 电容两端电压变化愈快, 也就是充放电愈快, 则电容电流愈大。电容两端电压不变时, 则电流为零。在直流稳态情况下, 电容两端电压恒定, 电流为零, 电容相当于开路, 这就是电容的隔直作用。

式(1-15)写成积分形式为

$$u(t) = u(t_0) + \int_{t_0}^t i(\xi) d\xi \quad (1-16)$$

式(1-16)表明, 某时刻电容上电压不但与当前电容上电流有关, 而且与此时刻前所有对电容器的充放电电流都有关系。因此, 电容元件是一种有“记忆”作用的元件。与电阻相比不同, 电阻元件某时刻电压仅与该时刻电阻中电流有关, 电阻无记忆作用。

当电容极板间电压为  $u$  时, 其电场储能为

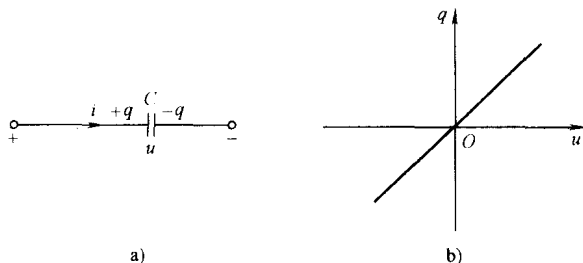


图 1-12 电容元件的电路符号及库伏特性

$$W_c = \frac{1}{2} Cu^2 \quad (1-17)$$

### 1.3.3 电感(Inductance)

#### 1. 电感的物理概念

用导线绕制的线圈在电气设备或电子装置中得到广泛的应用,例如变压器、电机中的绕组,电视机中的高压包、示波器中的偏转线圈等。当线圈中通以随时间变化的电流时,产生的磁场也随时间变化,在线圈中就产生感应电压。

图 1-13a 表示一个空心线圈,当电流  $i$  通过时产生磁场。设线圈匝数为  $N$ , 每匝的磁通为  $\Phi$ , 则线圈中的磁通链(又称磁链)  $\psi$  为

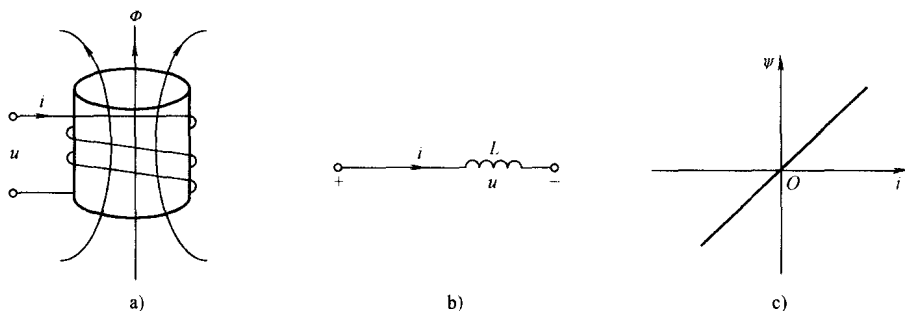


图 1-13 线性电感的图形符号及韦安特性

$$\psi = N\Phi \quad (1-18)$$

磁通链的大小和方向由产生它的电流  $i$  的大小和方向决定。

线圈电感量的定义为线圈中通过单位电流所产生的磁通链,有时又称自感,用字母  $L$  表示,即

$$L = \frac{\psi}{i} \quad (1-19)$$

式中,电流  $i$  的单位为安培(A);磁通链  $\psi$  的单位为韦伯(Wb);电感  $L$  的单位为亨利(H)。在电路分析中, $L$  的单位有时用毫亨(mH)、微亨( $\mu\text{H}$ ),它们的换算关系为

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

电感线圈磁通链  $\psi$  与通过电流  $i$  之间的关系称为韦安特性。空心线圈或周围介质为非磁性材料时,线圈电感为常数,这就是线性电感,在电路中的图形符号如图 1-13b 所示。线性电感的韦安特性为过原点的直线,如图 1-13c 所示。当线圈周围介质为磁性材料,例如有铁心时,线圈电感不是常数,随着线圈电流而变化,这就是非线性电感。

线圈电感量由线圈结构决定,例如螺管线圈的电感为

$$L = \frac{\mu N^2 S}{l} \quad (1-20)$$

式中, $N$  为线圈匝数; $S$  为线圈的横截面积; $l$  为线圈的长度; $\mu$  为周围介质的磁导率。对空心线圈, $\mu = \mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}\text{H/m}$ ,若周围介质为磁性材料,则  $\mu \gg \mu_0$ ,且不为常数。

#### 2. 电感的伏安关系

当电感两端电压  $u$  与电流  $i$  取关联参考方向时,其伏安关系为



$$u = L \frac{di}{dt} \quad (1-21)$$

式(1-21)表明, 电感两端的电压与电流的变化率成正比, 因此电感也为动态元件。当电感量  $L$  一定时, 流过电感的电流变化愈快, 即电流产生穿过线圈的磁通变化愈快, 则电感两端感应电压愈大。当流过的电流是不随时间变化的直流电流时, 穿过线圈的磁通不变化, 线圈中不产生感应电动势, 电感两端的电压为零。所以电感元件对直流稳态相当于短路。

当流过电感的电流为  $i$  时, 电流建立磁场的储能为

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

### 1.3.4 互感 (Mutual Inductance)

#### 1. 互感的物理概念

当穿过线圈的磁通链由线圈本身的电流和其他线圈电流共同产生时, 其他线圈电流变化也会引起此线圈磁通链变化, 从而在线圈中产生感应电压, 称为互感电压。

图 1-14 表示两个有互感的线圈  $w_1$  和  $w_2$ , 穿过线圈  $w_1$  的磁通链  $\psi_1$  由两部分合成, 其中  $\psi_{11}$  为线圈  $w_1$  的电流  $i_1$  产生,  $\psi_{12}$  为线圈  $w_2$  的电流  $i_2$  产生, 即

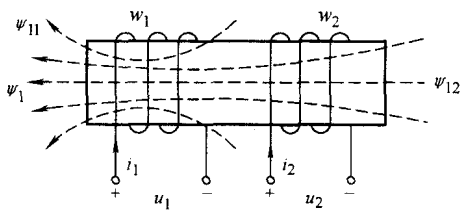


图 1-14 互感线圈

$$\psi_1 = \psi_{11} + \psi_{12}$$

类似于电感量的定义, 定义线圈  $w_2$  对线圈  $w_1$  的互感为

$$M_{12} = \frac{\psi_{12}}{i_2} \quad (1-23)$$

互感是两个有耦合的线圈之间相互存在的, 所以反过来电流  $i_1$  产生的磁通也会穿过线圈  $w_2$ , 即有

$$M_{21} = \frac{\psi_{21}}{i_1} \quad (1-24)$$

可以证明,  $M_{12}$  与  $M_{21}$  是相等的, 即

$$M_{21} = M_{12} = M \quad (1-25)$$

式中,  $M$  为两个耦合线圈的互感量, 简称互感或耦合电感。它与电感 (或自感)  $L_1$  和  $L_2$  本质上是相同的。图 1-15 为互感的电路图形符号,  $L_1$ 、 $L_2$  代表自感,  $M$  代表互感, “·” 号表示互感的同名端。以图 1-15 为例, 说明同名端的含义: 当变化的  $i_1$  流入线圈  $w_1$  时, 线圈  $w_1$ 、线圈  $w_2$  中将同时感应出电压。若  $di_1/dt > 0$ , 则线圈  $w_1$  中  $i_1$  的流入端与线圈  $w_2$  中感应电压的正极性端称为同名端。易知, 这时  $i_1$  的流入端为线圈  $w_1$  中感应电压的正极性端, 故同名端又称同极性端。由楞次定律可判断出线圈的同名端, 如图 1-16 所示。

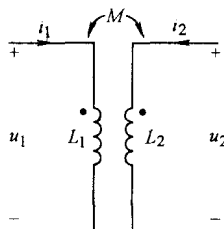


图 1-15 互感的图形符号

若线圈的绕向不知, 可用实验测定其同名端。图 1-17a 表示交流法测定同名端, 图中 1、