

高等学校培养应用型人才教材——计算机系列



# 电路与模拟电子技术

华容茂 主编  
杨家树 吴雪芬 副主编  
陈寿铨 主审

0-43  
1



中国电力出版社

www.infopower.com.cn

高等学校培养应用型人才教材——计算机系列

TN710-43  
1462a1

# 电路与模拟电子技术

华容茂 主编  
杨家树 吴雪芬 副主编  
陈寿铨 主审

中国电力出版社

## 内 容 提 要

本书根据国家教委制定的电路与电子技术课程教学基本要求,内容以计算机专业为主,适当涵盖相近的电子类、电气类、机电一体化类等电类专业的教学要求。主要介绍了电路与电路分析、正弦交流电路、电路的过渡过程、常用半导体器件、放大电路基础、功率放大器、集成运算放大器、正弦波振荡器和直流稳压电源等内容。在介绍基础知识、基本理论、基本技能训练的同时,注意融入新知识、新器件。

本书讲解全面,举例典型,力求以够用为度,重点在于应用。适合作为高等学校计算机专业的教材,也可作为非电类专业的相关课程教材或参考书,对于专业技术人员,也是一本很好的参考书。

## 图书在版编目(CIP)数据

电路与模拟电子技术/华容茂等编著. —北京:中国电力出版社, 2002

高等学校培养应用型人才教材——计算机系列

ISBN 7-5083-1387-9

I. 电... II. 华... III. ①电路理论-高等学校-教材  
②模拟电路-电子技术-高等学校-教材 IV. ①TM13 ②  
TN710

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2002) 第 099005 号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路 6 号 100044 <http://www.infopower.com.cn>)

汇鑫印务有限公司印刷

各地新华书店经售

\*

2003 年 2 月第一版 2003 年 2 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 18 印张 435 千字

定价 24.00 元

版 权 所 有 翻 印 必 究

(本书如有印装质量问题, 我社发行部负责退换)

# 高等学校培养应用型人才教材——计算机系列

## 编 委 会

主任委员:

宗 健 常明华

副主任委员:

顾元刚 陈 雁 杨翠南 林全新 华容茂 曹泰斌  
魏国英 邵晓根 庄燕滨 邓 凯 吴国经 常晋义  
许秀林 谢志荣 张家超 陶 洪 龚兰芳 刘广峰  
丁 雁 方 岩 王一曙

委 员: (以姓氏笔画为序)

丁志云 及秀琴 石振国 李 翊 吕 勇 朱宇光  
任中林 刘红玲 刘 江 刘胤杰 许卫林 杨劲松  
杨家树 杨伟国 郑成增 张春龙 闵 敏 易顺明  
周维武 周 巍 胡顺增 袁太生 高佳琴 唐学忠  
徐煜明 曹中心 曾 海 颜友钧

# 序 言

进入 21 世纪，世界高等教育已从精英教育走向了大众教育。我国也适应这一潮流，将高等教育逐步推向大众化。培养应用型人才已成为国家培养国际人才的重要组成部分，且得到了社会各界的广泛支持。于是一大批有规模、有实力、规范化、以培养应用型人才为己任的高等学校得到了长足发展。这类高校办学的一个显著的特点是按照新时代需求和当地的需要来培养学生，他们重视产学研相结合，并紧密地结合当地经济状况，把为当地培养应用型人才作为学校办学的主攻方向。

这类学校的教学特点是：在教授“理论与技术”时，更注重技术方法的教学。在教授“理论与实践”时，更注重理论指导下的可操作性，更注意实际问题的解决。因此，这些学生善于解决生产中的实际问题，受到地方企事业单位的普遍欢迎。

为满足这类高校的教学要求，达到培养应用型人才的目的，根据教育部有关重点建设项目的要求和相关教学大纲，我们组织了多年在这类高校中从教，并具有丰富工程经验的资深教授、高级工程师、教师来编写这套教材。

在这套教材的编写中，我们提倡“实用、适用、先进”的编写原则和“通俗、精练、可操作”的编写风格，以解决多年来在教材中存在的过深、过高且偏离实际的问题。

**实用**——本套教材重点讲述本行业中最广泛应用的知识、方法和技能。使学生学习后能胜任岗位工作，切实符合当地经济建设的需要和社会需要。

**适用**——本套教材是以工程技术为主的教材，所以它适用于培养应用型人才的所有高校（包括本科、专科、技术学院、高职等），既符合此类学生的培养目标，又便于教师因材施教。

**先进**——本套教材所选的内容是当今的新技术、新方法。使学生在掌握经典的技术和方法之后，可用教材中的新技术、新方法去解决工程中的技术难题，为学生毕业后直接进入生产第一线打下坚实的基础。

**通俗**——本套教材语言流畅、深入浅出、容易读懂。尽量避免艰深的理论和长篇的数学推导，尽量以实例来说明问题，在应用实例中掌握理论，使学生轻松掌握所学知识技能，达到事半功倍的效果。

**精练**——本套教材选材精练。详细而不冗长，简略得当，对泛泛而谈的内容将一带而过，对学生必须掌握的新技术、新方法详细讲，讲透、讲到位，为教师创造良好的教学空间和结合当地情况调整教学内容的余地。

**可操作**——本套教材所有的实例均是容易操作的，且是有实际意义的案例。把这些案例连接起来，就是一个应用工程的实例。通过举一反三的应用，使学生能够在更高层次上创造性地应用教材中的新思想、新技术、新方法去解决问题。

本套教材面向培养应用型人才的高等学校，同时亦可作为社会培训高级技术人员的教材和需要加深某些方面知识技能的人员的自学教材。

编委会

# 前 言

本书是根据国家教委制定的电路与电子技术课程教学基本要求，由十余所培养应用型人才为主要目的的高等学校从事计算机类、电子类和电气类课程的老师编写的。编写《电路与模拟电子技术》时，我们注意了以下几点：

1. 本书的内容以计算机专业的教学要求为主，适当涵盖相近电类专业：电子类、电气类、机电一体化类的教学要求。

2. 在介绍基础知识、基本理论、基本技能训练的同时，注意融入新知识、新器件。

3. 电路与电子技术研究的范畴已日益广泛、深入，但电路与电子技术课程作为一门技术基础课，必须精选内容，力求以必须够用为度，重点放在应用。

4. 在电子电路部分，则以中小规模集成电路为主、以外特性为主，对分立元件电路的介绍主要为培养同学看图、识图、分析原理的思路与方法。

在使用本教材时，希望注意以下几点：

1. 在介绍基本理论时，着重解决命题的提出及分析命题的思路、结论、中间的数学推导和过程，可以根据实际情况删繁就简。

2. 本教材是按课程总学时约 72 学时（包括 8~10 实验课时）安排。

凡注有“\*”号者，可根据学时多少，由教师灵活选择。

3. 课程中要注意各个教学环节的配合，必须安排好习题课与实验课，为了培养应用型人才，还应有 2~4 周的电工、电子技术的实习与课程设计。这可以分散安排或在数字电子技术与逻辑设计课程进行完后一次性安排。

本书由华容茂主编，杨家树、吴雪芬副主编。第 1 章由黄忠琴编写，第 2、3 章由杨家树编写，第 4、8 由吴雪芬编写，第 5 章由庄丽娟编写，第 6、7、9 由罗慧芳编写，第 10、11 章由马建如编写。全书由华容茂统稿，做了很多重要修改与补充，陈寿铨审阅了全部书稿，并提出了不少宝贵的意见，华婷、叶剑秋、王俊为本书的录入做了大量的工作，在此表示感谢。

由于编者水平有限，加之时间仓促，书中疏漏之处在所难免，恳请使用本书的老师和同学批评指正。

作 者

# 目 录

## 序 言 前 言

<b>第 1 章 电路与电路分析</b> .....	1
1.1 电路及其组成.....	1
1.2 电路的基本物理量.....	2
1.3 欧姆定律.....	4
1.4 电能与电功率.....	7
1.5 电路的 3 种工作状态.....	8
1.6 电源.....	10
1.7 基尔霍夫定律.....	13
1.8 电路的基本分析方法.....	15
1.9 受控源电路的分析.....	26
1.10 非线性电阻电路.....	28
习题.....	31
<b>第 2 章 正弦交流电路</b> .....	35
2.1 正弦交流电.....	35
2.2 正弦交流电的相量表示法.....	39
2.3 正弦交流电路中的元件.....	43
2.4 阻抗的串联和并联.....	51
2.5 交流电路的功率及功率因数.....	57
2.6 正弦交流电路的谐振.....	59
2.7 三相交流电路.....	63
习题.....	72
<b>第 3 章 电路的过渡过程</b> .....	75
3.1 换路定则和电路的初始状态.....	75
3.2 一阶 RC 电路的过渡过程.....	77
3.3 微分电路和积分电路.....	83
* 3.4 RL 电路中的过渡过程.....	86
3.5 小结.....	88
习题.....	89

<b>第 4 章 常用半导体器件</b> .....	92
4.1 半导体的基本知识.....	92
4.2 半导体二极管.....	96
4.3 特殊二极管.....	101
4.4 双极型三极管.....	103
4.5 场效应管.....	110
习题.....	115
<b>第 5 章 放大电路基础</b> .....	118
5.1 放大电路的组成和基本原理.....	118
5.2 图解分析法.....	121
5.3 工程估算法.....	125
5.4 共射放大器.....	129
5.5 射极输出器.....	134
5.6 共基电路及放大电路 3 种组态的比较.....	136
5.7 场效应管放大电路.....	140
5.8 多级放大电路.....	145
习题.....	151
<b>第 6 章 功率放大器</b> .....	157
6.1 概述.....	157
6.2 互补对称式功率放大电路.....	159
* 6.3 实际的功率放大电路介绍.....	163
* 6.4 集成功率放大器简介.....	165
习题.....	166
<b>第 7 章 集成运算放大器基础</b> .....	169
7.1 概述.....	169
7.2 集成运放中的偏置电路.....	170
7.3 差动放大电路.....	172
7.4 集成运放的主要技术指标.....	176
7.5 典型集成运放的介绍.....	178
习题.....	181
<b>第 8 章 负反馈放大器</b> .....	184
8.1 反馈的基本概念与分类.....	184
8.2 反馈放大器的一般表达式.....	189
8.3 负反馈对放大器性能的影响.....	192
8.4 深度负反馈条件下的近似估算法.....	197



习题	203
<b>第 9 章 集成运算放大器的应用</b>	<b>207</b>
9.1 理想运算放大器	207
9.2 基本运算电路	209
9.3 积分和微分运算	214
9.4 有源滤波器	215
9.5 电压比较器	220
9.6 集成运放的应用实例	224
9.7 集成运放的应用注意事项	226
习题	228
<b>第 10 章 正弦波振荡器</b>	<b>233</b>
10.1 概述	233
10.2 LC 正弦波振荡器	236
10.3 RC 正弦波振荡器	241
10.4 石英晶体振荡器	243
习题	246
<b>第 11 章 直流稳压电源</b>	<b>249</b>
11.1 整流滤波电路	249
11.2 硅稳压管稳压电路	257
11.3 串联型三极管稳压电路	260
11.4 集成三端稳压器	261
11.5 开关型稳压电路	265
习题	267
<b>部分习题参考答案</b>	<b>271</b>
<b>参考文献</b>	<b>275</b>

# 第 1 章 电路与电路分析

电路是电工、电子技术中的主要研究对象，内容非常丰富。本章首先对什么是电路、描绘电路的基本物理量及电路的基本定律、定理进行研究，再进一步研究直流电路的分析方法。学习直流电路不但为交流电路的分析打下理论基础而且也能为后学专业课程提供电路理论基础。

## 1.1 电路及其组成

电路是电流通过的路径，它是各种电气器件（电气器件包括发电机、电池、电动机、电灯、集成电路、控制电器等等）为了完成某一功能而按一定方式连接起来组成的总体。电路功能不同，电路模型就不同，但它们通常都由电源（信号源）、中间环节和负载 3 部分组成，如图 1-1 所示。

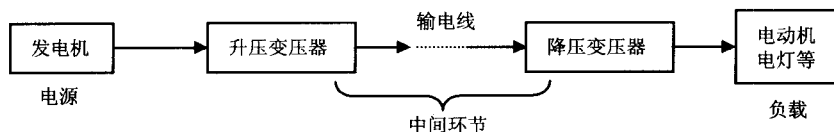


图 1-1 电力系统电路示意图

其中电源是提供电能的装置，它将其他形式的能量转换为电能，如发电机、电池、话筒等；负载是取用电能的装置，它将电能转换为其他形式的能，如电动机、电灯、扬声器等等；中间环节是传输、分配、控制电能的装置，如传输线、变压器、放大器、开关等。

一个完整的电路，电源（信号源）、中间环节和负载 3 部分是缺一不可的。按工作任务划分，电路的功能有两类：第一类是进行能量的转换、传输和分配，如电力系统（图 1-1）；第二类是信号的处理，如扩音系统（图 1-2）。

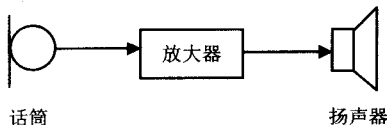


图 1-2 扩音系统

为了便于对实际电路进行分析，通常将实际元件理想化，即在一定条件下，突出其主要的电磁性质，忽略其次要性质。我们把实际的电气器件看做为电源、电阻、电感和电容等有限几种理想的电路元件，用这些元件构成的电路的物理模型叫电路模型，用规定的符号代表元件而连接成的图形叫电路图。如图 1-3 (a) 所示是手电筒的实际电路，其电路元件有干电池、灯泡、导线和开关。它的电路图如图 1-3 (b) 所示（该电路图是一个最简单

的电路图), 实际电路中的干电池用理想电压源  $E$  和内阻  $R_0$  表示, 灯泡用电阻  $R$  表示, 导线电阻忽略不计。

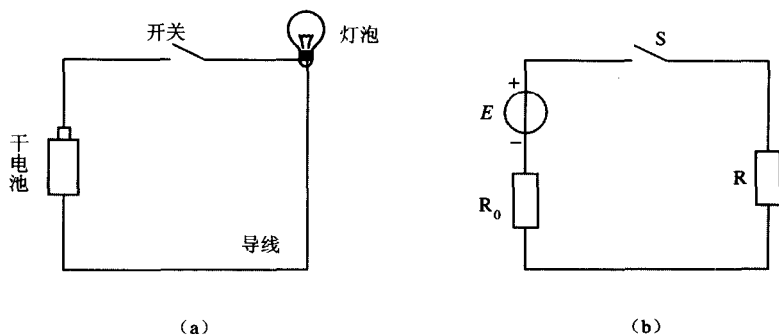


图 1-3 实际电路与电路模型

(a) 实际电路; (b) 电路

## 1.2 电路的基本物理量

### 1.2.1 电流

大量电荷的定向运动形成电流。为了衡量电流的强弱, 规定了电流强度这一物理量。电流强度在数值上是指在外电场的作用下, 单位时间内通过导体任意截面电荷量的代数和。图 1-4 表示一段圆柱金属导体, 在  $dt$  时间内, 通过导体截面  $S$  的电量为  $dq$ , 则电流强度为:

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

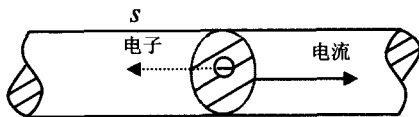


图 1-4 金属导体中的电流

式 (1-1) 中  $i$  为电流强度 (简称电流), 它是时间的函数。

在国际单位制中, 电荷量的单位是库仑 (C), 时间的单位是秒 (s), 电流的单位是安培 (A), 简称安。计算大电流时用千安 (kA) 作单位, 计算小电流时用毫安 (mA) 和微安 ( $\mu\text{A}$ ) 作单位。它们的关系是:

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

电流不但有强弱而且有方向, 通常规定电流的方向为正电荷的运动方向。电子的运动方向与电流的方向相反, 如图 1-4 所示。

在通常情况下, 电流是随着时间变化的。若电流强度的大小和方向均不随时间变化而变化, 即  $dq/dt = \text{常数}$ , 则这种电流为恒定电流, 简称直流。直流常用大写字母  $I$  来表示。因此, 式 (1-1) 可写成:

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

式(1-2)中  $q$  是时间  $t$  内通过截面  $S$  的电量。

由于在分析复杂电路时难以事先判断支路中电流的实际方向, 因此引入参考方向的概念。所谓参考方向, 就是在分析电路时先假定一个支路电流方向。当电流的实际方向与参考方向一致时, 电流为正值。反之, 电流为负值, 如图 1-5 所示。



图 1-5 电流的实际方向与参考方向

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

### 1.2.2 电压、电位与电动势

要在电路中形成电流, 电路必须闭合, 同时要有电场力的作用。图 1-6 中,  $a$  和  $b$  是电源的两个电极, 其中  $a$  带正电,  $b$  带负电,  $ab$  两极间就形成电场, 其方向由  $a$  指向  $b$ , 如果将  $a$ 、 $b$  两极用导体连接起来, 则在外电路(电源两极以外的电路)中电场力将正电荷通过导体由正极  $a$  移动到负极  $b$ , 即电场力对正电荷做了功。用电压来度量这种电场力对电荷做功的能力, 记做  $U_{ab}$ 。电压总是指两点之间而言, 所以用双下标表示, 如果正电荷顺电场方向由  $a$  移动到  $b$ , 那么  $U_{ab} > 0$ , 反之,  $U_{ab} < 0$ 。在电源内部(称内电路),

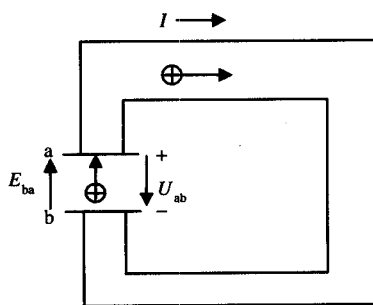


图 1-6 电压与电动势

外力将正电荷由  $b$  移动到  $a$ , 即外力对正电荷做了功, 用电动势来度量这种外力对电荷做功的能力, 记做  $E_{ba}$ , 其方向由负极指向正极。如果电流流过电源内部没有能量损耗, 这样的电源叫理想电源。理想电源的端电压用字母  $U_s$  表示, 数值上等于电源电动势  $E$ 。

电压有时也叫电位差, 可表示成  $U_{ab} = U_a - U_b$ 。式中  $U_a$  称为  $a$  点的电位,  $U_b$  称为  $b$  点的电位。在分析电路时常常设电路中某一点的电位为零(该点称为零参考点), 这样电路中其他各点与零参考点之间的电压就是各点的电位。由于零参考点是任意规定的, 所以电位是个相对量, 它与参考点的选择有关, 而电压是个绝对量, 与参考点的选择无关。

电位参考点的选择, 虽然从理论上讲可以任意选择, 但在不同的情况下, 有着不同的选择习惯。在电器中, 如果电路中有接地点, 通常选择接地点为参考点, 用符号“⊕”表示, 在电子电路中, 常取若干导线交汇点或机壳作为参考点, 用符号“⊥”表示。

在国际单位制中, 电压、电位和电动势的单位都是伏特(V), 简称伏。为了方便计算, 还可以用毫伏(mV)、微伏( $\mu$ V)和千伏(kV)作为单位, 它们的关系是:

$$1\text{kV} = 10^3\text{V} \quad 1\text{V} = 10^3\text{mV} \quad 1\text{mV} = 10^3\mu\text{V}$$

电压是标量，为了便于分析，也给电压和电动势规定了方向，在外电路中，电压的方向规定为由高电位指向低电位，即电压降落的方向；在内电路中电动势的方向规定为由低电位指向高电位，即电位升高的方向。在电路中经常用箭头法或极性法表示电压方向，如图 1-7 所示。



图 1-7 电压方向的表示方法

同样，在未知电位高低时，电压同电流一样，使用参考方向来分析。

【例 1-1】图 1-8 中各元件上电压均为已知，(1) 取  $U_a = 0$ ，求各点的电位；(2) 以  $U_d = 0$ ，求各点的电位。

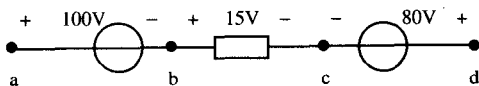


图 1-8 例 1-1 图

解：(1) 取  $U_a = 0$ ，由图可知：

$$\begin{aligned} U_{ac} &= U_a - U_c & U_c &= U_a - U_{ac} = 0 - 100 = -100\text{V} \\ U_{cd} &= U_c - U_d & U_d &= U_c - U_{cd} = (-100) - 15 = -115\text{V} \\ U_{bd} &= U_b - U_d & U_b &= U_{bd} + U_d = 80 + (-115) = -35\text{V} \\ U_{ab} &= U_a - U_b = 0 - (-35) = 35\text{V} \end{aligned}$$

(2) 取  $U_d = 0$ ，再由图可知：

$$\begin{aligned} U_{cd} &= U_c - U_d & U_c &= U_{cd} + U_d = 15\text{V} \\ U_{ac} &= U_a - U_c & U_a &= U_{ac} + U_c = 100 + 15 = 115\text{V} \\ U_{bd} &= U_b - U_d & U_b &= U_{bd} + U_d = 80 + 0 = 80\text{V} \\ U_{ab} &= U_a - U_b = 115 - 80 = 35\text{V} \end{aligned}$$

从以上分析可知，参考点不同，各点电位不同，但两点之间的电压不变。

## 1.3 欧姆定律

欧姆定律是用来确定电路中各部分电流与电压之间的关系的，是分析电路的基本定律之一。

### 1.3.1 无源电路欧姆定律

在图 1-9 中，设电阻  $R$  为线性电阻（关于线性电阻的概念在 1.10 节中介绍），电路两端所加电压为  $U$ ，通过电阻的电流为  $I$ ，若电压与电流的参考方向一致，如图 1-9 (a) 所示，则：

$$U = IR \quad (1-3)$$

若电压与电流的参考方向相反，如图 1-9 (b) 所示，则：

$$U = -IR \quad (1-4)$$

式 (1-3) 和式 (1-4) 就是无源电路的欧姆定律。若电压单位为伏特，电流单位为安培，则系数  $R$  称为电阻，其单位为欧姆  $\Omega$ 。

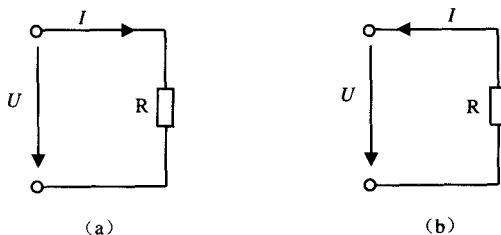


图 1-9 无源电路欧姆定律

(a) 参考方向一致；(b) 参考方向不一致

【例 1-2】如图 1-10 所示，已知  $R = 10\Omega$ ， $U_{AB} = 10V$ ，分别求 (a) 及 (b) 图中的电流  $I$ 。



图 1-10 例 1-2 图

解：对 (a) 图：

$$I = \frac{U_{AB}}{R} = \frac{10}{10} = 1A$$

对 (b) 图：

$$I = -\frac{U_{AB}}{R} = -\frac{10}{10} = -1A$$

电流为负值表示该电阻上实际电流方向与图中所标的参考方向相反。

### 1.3.2 有源电路欧姆定律

图 1-11 是一段含电源  $U_S$  和电阻  $R$  的电路，表达这段电路端点间的电压与通过该段电路的电流之间的函数关系称为“一段有源电路的欧姆定律”。在图 1-11 所示的参考方向下，有：

因为：

$$U_{AC} = U_A - U_C \quad U_{CB} = U_C - U_B$$

$$U_{AC} + U_{CB} = U_A - U_B$$

所以：

$$\begin{aligned} U_{AB} &= U_A - U_B \\ &= U_{AC} + U_{CB} \\ &= U_S + IR \end{aligned} \quad (1-5)$$

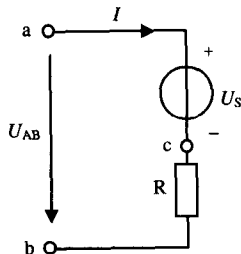


图 1-11 有源电路的欧姆定律

式(1-5)就是一般有源电路的欧姆定律表达式。

### 1.3.3 全电路欧姆定律

一个由电源和负载组成的闭合回路叫做全电路,如图1-12所示。由一段有源电路的欧姆定律:

$$\text{从 AB 两端向左看: } U_{AB} = U_{S1} - IR_1$$

$$\text{从 AB 两端向右看: } U_{AB} = U_{S2} + IR_2$$

由以上两式可得:

$$I = \frac{U_{S1} - U_{S2}}{R_1 + R_2} = \frac{\sum U_S}{\sum R} \quad (1-6)$$

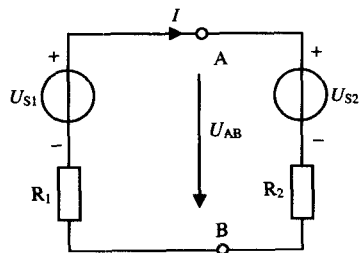


图 1-12 全电路欧姆定律

式(1-6)说明,闭合电路中的电流与回路中全部电源电动势代数之和成正比,与回路中全部电阻之和成反比。

【例 1-3】在图 1-12 中,已知  $U_{S1}=10\text{V}$ ,  $U_{S2}=15\text{V}$ ,  $R_1=4\Omega$ ,  $R_2=6\Omega$ , 求此闭合回路的电流。

解:选择回路电流方向如图 1-12 所示,则由式 1-6 可得

$$I = \frac{\sum U_S}{\sum R} = \frac{U_{S1} - U_{S2}}{R_1 + R_2} = \frac{10 - 15}{4 + 6} = -0.5\text{A}$$

计算出的  $I < 0$ , 说明参考方向与实际方向相反。

【例 1-4】计算图 1-13 (a) 所示电路中 B 点的电位。

解:设通过 AC 支路的电流为  $I$ , 则:

$$I = \frac{U_A - U_C}{R_1 + R_2} = \frac{6 - (-9)}{(100 + 50) \times 10^3} = 0.1 \times 10^{-3} \text{A} = 0.1 \text{mA}$$

$$U_{AB} = U_A - U_B = R_2 I$$

$$U_B = U_A - R_2 I = 6 - (50 \times 10^3) \times (0.1 \times 10^{-3}) = 6 - 5 = 1\text{V}$$

图 1-13 (a) 的电路也可画成图 1-13 (b) 所示的电路。

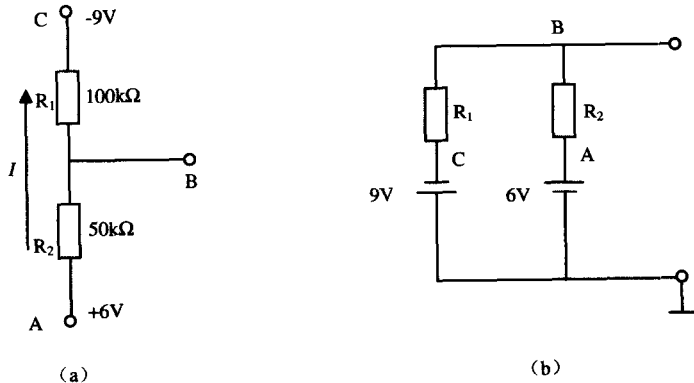


图 1-13 例 1-4 图

## 1.4 电能与电功率

### 1.4.1 电能

当电路中有电流通过时, 电路中各元件间就有能量转换。图 1-14 电路中, 通过电阻  $R$  的电流为  $I$ , 在  $R$  上产生的压降为  $U$ 。在直流电路中, 根据电压的定义, 电量  $q$  受电场力的作用由  $a$  点经过电阻  $R$  移动到  $b$  点, 电场力在该段所做的功为:

$$A = qU = UI t \quad (1-7)$$

上式也表示电阻  $R$  在  $t$  时间内消耗的电能。根据欧姆定律,  $U=IR$ , 上式也可转换为:

$$A = qU = UI t = I^2 R t = \frac{U^2}{R} t \quad (1-8)$$

同样的, 电源内阻  $R_0$  所消耗的电能  $A_0$  为:

$$A_0 = U_0 I t = I^2 R_0 t \quad (1-9)$$

由能量守恒定律, 电源发出的能量  $A_E$  为:

$$A_E = A + A_0$$

即:

$$E I t = U I t + U_0 I t$$

将两边同除以  $I t$ , 得电路的电压平衡方程式:

$$E = U + U_0 \quad (1-10)$$

即电源电动势数值上等于内、外电压降之和。

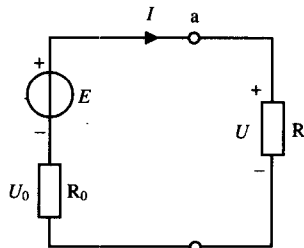


图 1-14 能量转换电路图

### 1.4.2 功率

在工程上, 我们习惯用电功率来衡量能量的交换。所谓电功率是指单位时间内电路各部分产生或消耗的能量 (简称为功率), 用大写字母  $P$  表示。根据定义, 电源发出的功率为:

$$P_E = \frac{A_E}{t} = \frac{A + A_0}{t} = P + P_0 \quad (1-11)$$

负载消耗的功率为:

$$P = \frac{A}{t} = UI = I^2 R = \frac{U^2}{R} \quad (1-12)$$

同理电源内阻消耗的功率为:

$$P = U_0 I = \frac{U_0^2}{R_0} = I^2 R_0 \quad (1-13)$$

在国际单位制中, 能量的单位是焦耳 (J), 功率的单位是瓦特 (W)。另外, 电功率的单位也常用千瓦 (kW) 表示, 电能常用千瓦时 (kW·h) 表示, 1 kW·h 就是 1 度电。



【例 1-5】有一 220V 60W 的电灯，接在 220V 的电源上，试求电灯的电阻和电灯在 220V 电压下工作时的电流。如果每晚用 3 小时，问一个月消耗电能多少？

解：流过电灯的电流：

$$I = \frac{P}{U} = \frac{60}{220} = 0.273\text{A}$$

电灯的电阻：

$$R = \frac{U}{I} = \frac{220}{0.273} = 806\Omega$$

一个月用电： $A = Pt = 0.06 \times 3 \times 30 = 5.4\text{kW}\cdot\text{h}$

### 1.4.3 功率正、负的意义

由电功率的表达式  $P=IU$  可知，当  $U$  与  $I$  选定参考方向后， $P$  就有正、负值，即电功率的正负值与电压、电流的参考方向有关。当电压与电流的参考方向选择一致时：

负载： $P = IU > 0$                   电源： $P = IU < 0$

当电压与电流的参考方向选择相反时：

负载： $P = IU < 0$                   电源： $P = IU > 0$

【例 1-6】在图 1-15 中，若已计算出 (1)  $U=9\text{V}$ ， $I=-3\text{A}$ ；(2)  $U=-9\text{V}$ ， $I=-3\text{A}$ 。试说明在这两种情况下，电路是产生还是消耗电功率。

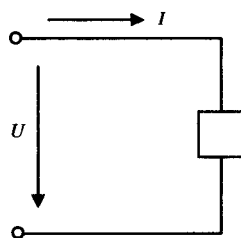


图 1-15 例 1-6 图

解：由于  $U$  和  $I$  所取方向一致，则电功率：

(1)  $P = UI = 9 \times (-3) = -27\text{W}$ ， $P$  为负值，此时电路产生电功率。

(2)  $P = UI = (-9) \times (-3) = 27\text{W}$ ， $P$  为正值，此时电路消耗电功率。

## 1.5 电路的 3 种工作状态

### 1.5.1 电路的有载工作状态

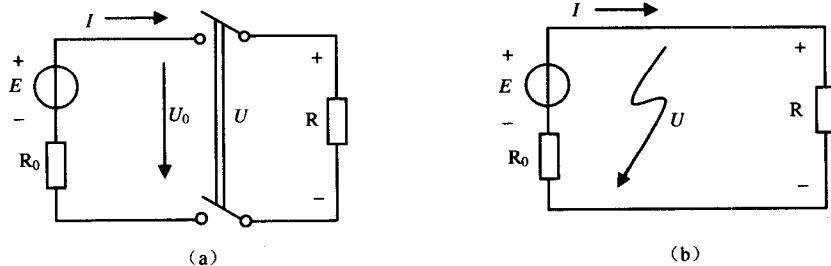


图 1-16 电路的工作状态

(a) 空载状态；(b) 有载状态