

普通高等教育“十一五”规划教材

# 电路与模拟电子技术

(第二版)

杨家树 主编 华路纲 副主编 华容茂 主审



中国电力出版社

[www.infopower.com.cn](http://www.infopower.com.cn)

普通高等教育“十一五”规划教材

TN710  
146

# 电路与模拟电子技术

(第二版)

杨家树 主编 华路网 副主编 华容茂 主审



中国电力出版社  
[www.infopower.com.cn](http://www.infopower.com.cn)

## 内容提要

本书是根据国家教育部制定的电路与电子技术课程教学要求,在第一版的基础上加以修订、扩充而来的。主要内容包括: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、正弦波谐振器和直流稳压电源等。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,实例典型,侧重应用。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(第二版)/杨家树主编. —2版. —北京:中国电力出版社,2006.8

普通高等教育“十一五”规划教材

ISBN 7-5083-4497-9

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

中国版本图书馆CIP数据核字(2006)第072276号

**丛 书 名:**普通高等教育“十一五”规划教材

**书 名:**电路与模拟电子技术(第二版)

**出版发行:**中国电力出版社

地 址:北京市三里河路6号

邮政编码:100044

电 话:(010)68362602

传 真:(010)68316497,88383619

本书如有印装质量问题,我社负责退换

服务电话:(010)88515918(总机)

传 真:(010)88518169

E-mail: infopower@cepp.com.cn

**印 刷:**北京市同江印刷厂

**开本尺寸:**185×260 **印 张:**18.25 **字 数:**434千字

**书 号:**ISBN 7-5083-4497-9

**版 次:**2006年8月北京第2版

**印 次:**2006年8月第6次印刷

**印 数:**14001—18000册

**定 价:**25.00元

版权所有,翻印必究

## 第二版前言

本书第一版作为高等学校培养应用型人才教材,自2003年2月出版发行以来,在一些高等院校计算机信息类专业、机电工程类专业的教学工作中经受了实践的考验。许多教师对本书第一版给予了充分的肯定,认为其知识结构符合计算机等专业对电子学课程的基本要求,在“够用”的前提下保证了知识体系的完整性,教学内容符合应用型人才的培养目标,课时安排合理;同时也对其中存在的一些疏漏、错误提出了中肯的意见,对教材内容乃至例题、习题的选取提出了许多有益的建议,在此表示衷心的感谢。

根据教育部制定的对于电工技术和模拟电子技术这两门课程的教学要求,针对计算机信息类专业应用型人才的培养目标,在第一版的基础上进行了总结提高,并吸纳了热心读者的反馈意见,修订和编写了本书的第二版。

在第二版中主要进行了如下修订和调整:

1. 对第一版中的部分内容进行了增删。如在第1章中删除了“部分电路欧姆定律”和“全电路欧姆定律”部分,突出了元件伏安特性的概念;在第4章的“三极管电流放大作用”部分中增加了一个说明三极管电流放大作用的实验和数据分析,为三极管的电流放大作用提供实验佐证,避免了关于三极管电流放大原理的比较晦涩的理论分析。类似的修改在第二版教材中有十余处。

2. 在教学内容中涉及元件或集成电路的部分引入了一些新型元件作为实例,不再采用目前已经不生产、不流通的老旧型号,改用目前广泛使用的主流元器件型号的资料。

3. 对第一版中一些错误和疏漏以及不够恰当的表述进行了更正和修改,针对教学基本要求增删了一些例题与习题。

第二版由杨家树和华路纲在第一版的基础上完成了主要的修订与统稿工作,而第一版的原作者为本次的修订提供了宝贵的意见和建议,并承担了部分修订工作。本书原主编华容茂教授在第二版的修订编写工作中承担了主要的审阅任务,并提出一些修改意见,为第二版教材得以出版付出了辛勤劳动。

在编写、修订第二版的数月中,编者尽了最大的努力要将本书以最新、最好的面貌奉献给关心、支持本书的广大读者,但限于编者的水平,书中难免存在不够恰当、不够妥善之处,甚至还会存在未被我们注意到的谬误,恳请使用本教材的师生和其他读者给予积极的批评指正。

在此谨对所有关心本书的读者表示诚挚的谢意!

编者

# 第一版前言

本书是根据教育部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 章由吴雪芬编写，第 5 章由庄丽娟编写，第 6、7、9 章由罗慧芳编写，第 10、11 章由马建如编写。全书由华容茂统稿，并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，在此一并表示感谢。

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。

编者

# 目 录

第二版前言

第一版前言

第 1 章 电路与电路分析 .....	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 .....	5
1.5 电路的 3 种工作状态 .....	7
1.6 电源 .....	9
1.7 基尔霍夫定律 .....	12
1.8 电路的基本分析方法 .....	14
1.9 受控电源电路的分析 .....	25
1.10 非线性电阻电路 .....	27
小结 .....	29
习题 .....	30
第 2 章 正弦交流电路 .....	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 .....	42
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
小结 .....	72
习题 .....	72
第 3 章 电路的过渡过程 .....	76
3.1 换路定则和电路的初始状态 .....	76
3.2 一阶 RC 电路的过渡过程 .....	78
3.3 微分电路和积分电路 .....	84
*3.4 RL 电路中的过渡过程 .....	86
小结 .....	88

习题 .....	89
<b>第 4 章 常用半导体器件 .....</b>	<b>92</b>
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 .....	100
4.4 双极型三极管 .....	102
4.5 场效应管 .....	110
小结 .....	115
习题 .....	116
<b>第 5 章 放大电路基础 .....</b>	<b>119</b>
5.1 放大电路的组成和基本原理 .....	119
5.2 图解分析法 .....	122
5.3 工程估算法 .....	126
5.4 分压偏置共射放大器 .....	130
5.5 射极输出器 .....	135
5.6 共基电路及放大电路 3 种组态的比较 .....	137
5.7 场效应管放大电路 .....	141
5.8 多级放大电路 .....	145
小结 .....	152
习题 .....	153
<b>第 6 章 功率放大器 .....</b>	<b>159</b>
6.1 概述 .....	159
6.2 互补对称式功率放大电路 .....	161
*6.3 实际的功率放大电路介绍 .....	165
*6.4 集成功率放大器简介 .....	167
小结 .....	167
习题 .....	168
<b>第 7 章 集成运算放大器基础 .....</b>	<b>170</b>
7.1 概述 .....	170
7.2 集成运放中的偏置电路 .....	172
7.3 差动放大电路 .....	173
7.4 集成运放的主要技术指标 .....	179
7.5 典型集成运放的介绍 .....	180
小结 .....	183
习题 .....	184

<b>第 8 章 负反馈放大器</b> .....	187
8.1 反馈的基本概念与分类 .....	187
8.2 反馈放大器的一般表达式 .....	191
8.3 负反馈对放大器性能的影响 .....	195
8.4 深度负反馈条件下的近似估算法 .....	200
小结 .....	205
习题 .....	206
<b>第 9 章 集成运算放大器的应用</b> .....	209
9.1 理想运算放大器 .....	209
9.2 基本运算电路 .....	211
9.3 积分和微分运算 .....	217
9.4 有源滤波器 .....	219
9.5 电压比较器 .....	224
9.6 集成运放的应用实例 .....	228
9.7 集成运放的应用注意事项 .....	231
小结 .....	232
习题 .....	233
<b>第 10 章 正弦波振荡器</b> .....	238
10.1 概述 .....	238
10.2 LC 正弦波振荡器 .....	241
10.3 RC 正弦波振荡器 .....	246
10.4 石英晶体振荡器 .....	249
小结 .....	251
习题 .....	251
<b>第 11 章 直流稳压电源</b> .....	254
11.1 整流滤波电路 .....	254
11.2 硅稳压管稳压电路 .....	263
11.3 串联型三极管稳压电路 .....	265
11.4 集成三端稳压器 .....	267
11.5 开关型稳压电路 .....	271
小结 .....	273
习题 .....	274
<b>部分习题参考答案</b> .....	277
<b>参考文献</b> .....	281



# 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，以及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，而且也后续专业课程的学习提供了电路理论基础。

## 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（包括发电机、电池、电动机、电灯、集成电路、控制电器等）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）、中间环节和负载这三部分组成，如图 1-1 所示。

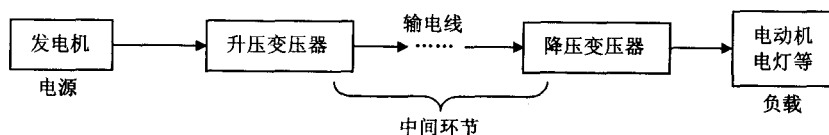


图 1-1 电力系统电路示意图

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量，如电动机、电灯、扬声器等；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）、中间环节和负载这三部分是缺一不可的。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）；第二类是进行信号的传输与处理，如扩音系统（图 1-2）。

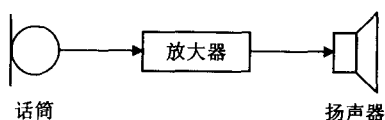


图 1-2 扩音系统

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作为电源、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。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。

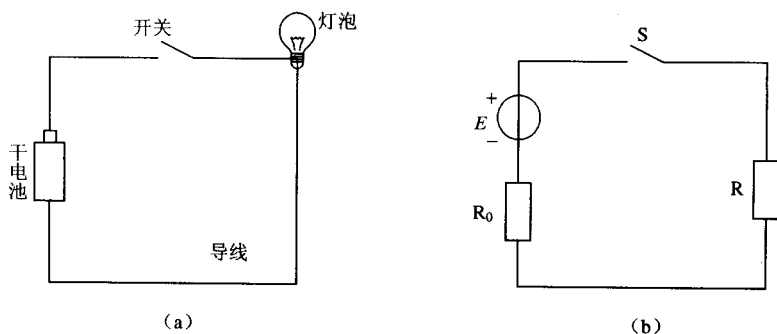


图 1-3 实际电路与电路模型

(a) 实际电路; (b) 电路图

## 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横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:

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

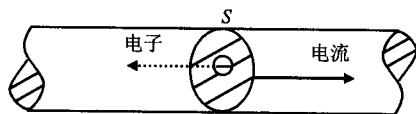


图 1-4 金属导体中的电流

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的变化而变化, 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, 因此引入了参考方向的概念。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,  $a$ 、 $b$  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, 记作  $U_{ab}$ 。电压总是指两点之间而言, 所以用双下标表示, 如果正电荷沿电场方向由  $a$  移动到  $b$ , 那么  $U_{ab} > 0$ ; 反之,  $U_{ab} < 0$ 。在电源内部(称内电路), 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, 记作  $E_{ba}$ , 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  $E_{ba}$ 。

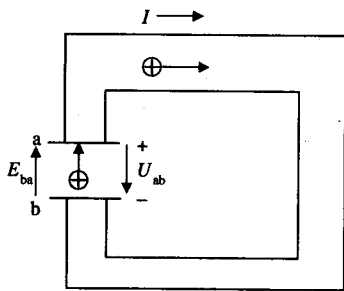


图 1-6 电压与电动势

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“ $\perp$ ”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“ $\perp$ ”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。

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。



图 1-7 电压方向的表示方法

【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) 取  $U_d = 0$ ，求各点的电位。

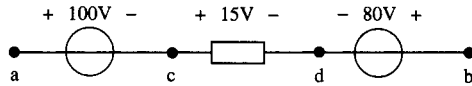


图 1-8 例 1-1 图

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，零参考点不同，各点电位不同，但两点之间的电压不变。

### 1.3 欧姆定律

通常，流过导体的电流  $I$  与导体两端的电压  $U$  成正比，电压  $U$  与电流  $I$  的比值称为电阻  $R$ ：

$$\frac{U}{I} = R \quad (1-3)$$

这就是欧姆定律。在国际单位制中电阻的单位是欧姆 ( $\Omega$ )。当流过这段导体的电流为 1A，导体两端的电压为 1V 时，该导体的电阻值即为 1 $\Omega$ 。满足欧姆定律的电阻的电阻值是一个与电流  $I$  和电压  $U$  无关的常数，它由导体的材料特性（电阻率）和导体的物理特性（长度

和横截面积) 决定, 并与外界条件 (温度) 有关。我们把满足欧姆定律的电阻称为线性电阻。在电子电路中, 广泛使用各种阻值的电阻器, 是用各种不同的导体材料通过适当的加工技术制成的, 对于阻值较大的电阻, 通常使用千欧 ( $k\Omega$ ) 和兆欧 ( $M\Omega$ ) 为单位。

欧姆定律确定了电路中电阻两端电流与电压之间的关系, 是分析电路的基本定律之一。使用欧姆定律时, 要注意电阻上电流与电压的参考方向, 若方向相反, 则在运算表达式中应加上“-”号。在图 1-9 中, 设电阻  $R$  为线性电阻, 电阻两端所加电压为  $U$ , 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:

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

若电压与电流的参考方向相反, 如图 1-9 (b) 所示, 则:

$$U = -IR \quad (1-5)$$

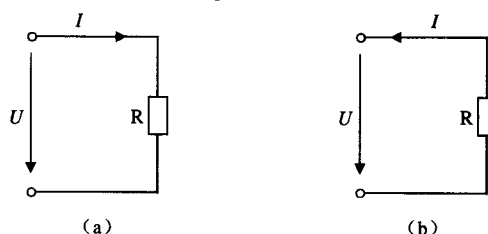


图 1-9 欧姆定律

(a) 与参考方向一致; (b) 与参考方向不一致

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



图 1-10 例 1-2 图

解: 对图 (a)

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

对图 (b)

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

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。如果电流或电压的代数值本身含有符号, 则必须将符号代入表达式, 才能算出正确的结果。

## 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 1-11 所示的电路中, 电量为  $q$  的正电荷受电场力作用由高电位  $a$  点经过电阻  $R$  移动到低电位  $b$  点, 则电场力所做的

功为:

$$A = qU = UI t \quad (1-6)$$

式中:  $U = IR$ 。

若从低电位到高电位, 则外力做功, 即电场力做负功:

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

式(1-6)也表示电阻  $R$  在  $t$  时间内消耗的电能。根据欧姆定律,  $U = IR$ , 式(1-6)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:

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

由能量守恒定律可得, 电源发出的能量  $A_E$  为:

$$A_E = A + A_0$$

即:

$$E I t = UI t + U_0 I t$$

将两边同除以  $I t$ , 可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。

## 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, 一段电路的吸收的功率为:

当  $U$  与  $I$  的参考方向相同时, 根据式(1-6)得:

$$P = \frac{A}{t} = UI \quad (1-11)$$

当  $U$  与  $I$  的参考方向相反时, 根据式(1-7)得:

$$P = \frac{A}{t} = -UI \quad (1-12)$$

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 1-3】** 有一额定电压为 220V 额定功率为 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: 流过电灯的电流为: 
$$I = \frac{P}{U} = \frac{60}{220} = 0.273 \text{ A}$$

电灯的电阻为: 
$$R = \frac{U}{I} = \frac{220}{0.273} = 806 \Omega$$

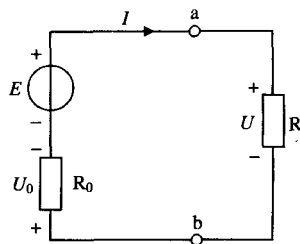


图 1-11 能量转换电路图

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

### 1.4.3 功率正、负的意义

一段电路的功率是一个带符号的代数值，若功率为正，则表明电流流经该电路时电场力做功，电能转换成了其他形式能量，电能被消耗，这是负载的特征；若功率为负，则表明在这段电路上电场力做了负功，即外力克服电场力做功，是其他形式能量转换成了电能，电能增加了，这是电源的特征。所以，根据一段电路的功率的正负可以判断该段电路中含有负载还是电源。电阻的基本特征是吸收、消耗电能，将电能转换成热能，所以电阻的功率总是正的。而实际电源可以工作于产生电能的状态，即放电状态，也可以工作于吸收电能的状态，即充电状态；前者为电源状态，后者为负载状态。

功率的正负最终由电压  $U$  与电流  $I$  的参考方向是否相同和电压、电流本身的代数符号决定。

【例 1-4】在图 1-12 中，若 (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。

解：由于  $U$  和  $I$  所取方向相反，则电功率：

(1)  $P=-UI=-9\times(-3)=27\text{W}$ ,  $P$  为正值，此时电路吸收电功率。

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

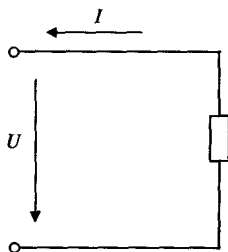


图 1-12 例 1-4 图

## 1.5 电路的 3 种工作状态

### 1.5.1 电路的有载工作状态

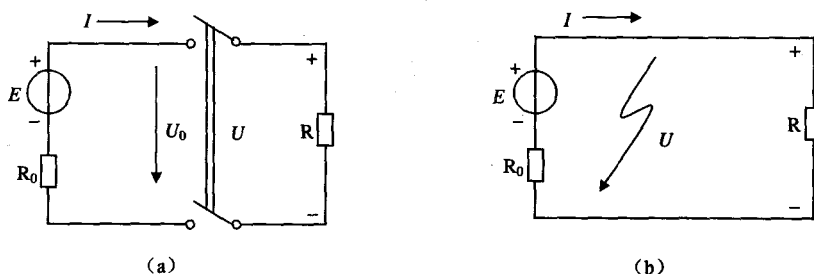


图 1-13 电路的工作状态

(a) 空载状态；(b) 有载状态

将图 1-13 (a) 的开关合上，电源就向负载供电，电路处在有载工作状态。有载工作时的电路具有以下特点：

$$U = IR \quad U = E - IR_0 \quad P = IU$$

### 1.5.2 电路的空载工作状态

在图 1-13 (a) 中, 将开关打开, 电源与负载断开, 这时电路处在空载状态 (也称开路状态), 处在空载状态时的电路具有以下特点:

$$I = 0 \quad U = 0 \quad U_0 = E \quad P = 0$$

### 1.5.3 电路的短路状态

在图 1-13 (b) 所示的电路中, 当电源两端被电阻接近零的导线短接时, 电路就处于短路工作状态, 短路工作时的电路具有以下特点:

$$U = 0 \quad I = I_s = \frac{E}{R_0} \quad P = P_0 = I^2 R_0$$

其中:  $I_s$  称为短路电流。

由于电源内阻很小, 因此电源短路时, 其短路电流将大大超过额定电流, 以致电源和短路电流所经过的线路烧坏, 这是十分危险的。为防止短路事故的发生, 通常在电源的输出端接上熔断器, 当电路短路时, 熔断器中的熔丝 (又称为保险丝) 可快速切断电源, 避免出现重大事故。

**【例 1-5】**某电池组的电动势  $E=24\text{V}$ , 内阻  $R_0=0.1\Omega$ , 正常使用时的负载电阻为  $R=1.9\Omega$ , 求额定工作电流  $I$  及当负载电阻被短路时的电流  $I_s$ 。

$$\text{解: } I = \frac{E}{R + R_0} = \frac{24}{1.9 + 0.1} = 12\text{A}$$

$$I_s = \frac{E}{R_0} = \frac{24}{0.1} = 240\text{A} \gg 12\text{A}$$

### 1.5.4 电气设备的额定值

电气设备一般均由导体、绝缘材料等组成, 当电气设备通过电流时, 导体就要发热, 于是电气设备的温度升高。如果所加电压太高或通过的电流太大, 就有可能使绝缘材料老化并击穿, 从而导致电气设备的损坏。反之, 如果所加电压或通过的电流比额定值小很多, 则不仅不能达到合理的工作状态 (如电压太低、电灯亮度不够、电动机转速不高等), 也不能充分利用电气设备的工作能力。

因此, 对于实际的电气设备, 为了达到最好的技术经济效能, 制造厂家对它的性能、使用条件等都用一些技术数据加以规定, 这些技术数据称为电气设备的额定值。如额定电压、额定电流、额定功率等。这些额定值一般都被标注在设备的铭牌上或产品说明书中。例如, 一盏白炽灯的规格有  $220\text{V}/40\text{W}$  或  $220\text{V}/60\text{W}$  等; 一台电动机为  $380\text{V}/7\text{kW}$  等。电气设备均应在额定状态或接近额定状态下运行, 以确保正确合理地使用。

**【例 1-6】**有一个阻值为  $2\text{k}\Omega$ , 额定功率为  $0.125\text{W}$  的碳膜电阻, 试求其额定电流。

$$\text{解: 因为: } P = IU = I^2 R$$



所以：
$$I = \sqrt{\frac{P}{R}} = \sqrt{\frac{0.125}{2000}} = 7.9 \times 10^{-3} \text{ A} = 7.9 \text{ mA}$$

## 1.6 电 源

### 1.6.1 电源的实际模型

电源是一个供能的二端元件，一个实际电源可以有两种表示模型：一种是用电压的形式来表示，称为电压源；另一种是用电流的形式来表示，称为电流源。

#### 1. 电压源

一个电源含有电动势  $E$  和内阻  $R_0$ 。在分析电路时，常常把它们分开，组成由  $E$ （或  $U_S$ ）和  $R_0$  串联的电源模型，即实际电压源模型，如图 1-14 (a) 所示。

这时电源的端电压为：

$$U = E - IR_0 \quad \text{或} \quad U = U_S - IR_0 \quad (1-13)$$

式 (1-13) 说明，实际电压源的端电压  $U$  不等于电动势  $E$ ，而与负载电流有关，电流愈大，内阻上的电压降愈大，端电压愈低，其伏安特性是一条下降的直线，如图 1-14 (b) 所示。

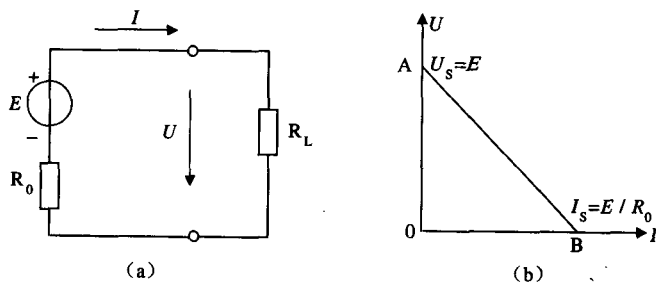


图 1-14 实际电压源及其外特性

(a) 实际电压源；(b) 外特性

如果电流流过实际电压源内部几乎没有损耗，即  $R_0=0$ ，那么该电压源称为理想电压源（或恒压源）。直流理想电压源的端电压始终等于电源电动势，与电流的大小无关。其电路模型与外特性如图 1-15 所示。

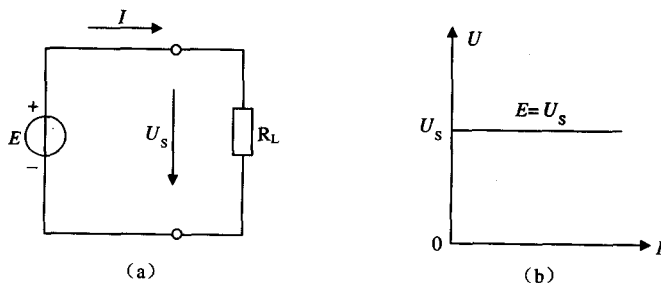


图 1-15 理想电压源及其外特性

(a) 理想电压源；(b) 外特性