



普通高等教育“十二五”规划教材

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

电工学及电气设备

(第五版)

华北水利水电学院 侯树文 主编

Higher Education



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

普通高等教育“十二五”规划教材
普通高等教育“十一五”国家级规划教材

电工学及电气设备

(第五版)

华北水利水电学院 侯树文 主编



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书是《电工学及电气设备》第五版。全书共分十一章，内容包括电路原理、电子技术、变压器、电机和电气设备等。

本书是高等学校水利工程、农业水利、港航工程、水利水电建筑工程等专业的通用教材，也可以作为其他有关专业的教学用书。

本书还可供中等专业学校师生和有关工程技术人员参考。

图书在版编目（C I P）数据

电工学及电气设备 / 侯树文主编. — 5版. — 北京：
中国水利水电出版社，2012. 5
普通高等教育“十二五”规划教材. 普通高等教育“
十一五”国家级规划教材
ISBN 978-7-5084-9755-6

I. ①电… II. ①侯… III. ①电工学—高等学校—教材②电气设备—高等学校—教材 IV. ①TM

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第094847号

书 名	普通高等教育“十二五”规划教材 普通高等教育“十一五”国家级规划教材 电工学及电气设备（第五版）
作 者	华北水利水电学院 侯树文 主编
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (发行部)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京瑞斯通印务发展有限公司
规 格	184mm×260mm 16开本 15印张 356千字
版 次	1980年7月第1版 1980年7月第1次印刷 2012年5月第5版 2012年5月第1次印刷
印 数	0001—3000册
定 价	29.00元

凡购买我社图书，如有缺页、倒页、脱页的，本社发行部负责调换

版权所有·侵权必究

第一版前言

本书是根据1978年1月原水利电力部的教学计划和教材规划的要求，按照同年5月《电工学及电气设备》教材编写大纲讨论会拟定的大纲编写的。作为高等院校水利水电工程建筑专业、水利水电工程施工专业和农田水利工程专业的通用教材，也可作为其它有关专业的教学用书。

全书分为两篇，共十三章。第一篇为电工学部分，包括第一章至第八章；第二篇为电气设备部分，包括第九章至第十三章。在编写中，努力贯彻“少而精”原则，大力精选内容。电工学部分突出强调其物理概念，着重讲清基本理论和分析问题的基本方法，并辅以例题和习题，为进一步学习电专业知识打下必要的理论基础。电气设备部分则密切结合大、中型水电站和电力排灌站的实际情况，介绍其主要电气设备的作用原理和结构，一、二次接线的要求、接线形式、设备布置方式等，力求使读者对工程全貌有清晰概念，对设备、装置有明确了解。对近年来国内、外出现的新型电气设备也作了简单介绍。对于某些章节可供不同专业的实际需要参考选用。

本书第一篇由浙江大学吴官熙同志编写，第二篇中第十二章及第十三章的第三节由西北农学院袁清阁同志编写，其余由华北水利水电学院周喜农同志编写，并由吴官熙、周喜农同志担任主编。全书由武汉水利电力学院李宇贤、谭乐嵩、李琼华同志主审，华东水利学院、福州大学及编写院校参加了审稿会。

本书第二篇在编写过程中，曾得到湖南省水利电力勘测设计院、长江流域规划办公室及有关厂、校的大力协助，提供了宝贵的资料和意见，在此，我们表示衷心地感谢。

对于书中不妥或错误之处，恳切希望同志们批评指正。

编者

1979年6月

第五版前言

本书是在第四版基础上修订而成，可以作为水利工程、农业水利工程、港口与航道工程、水利水电建筑工程等专业的通用教材，也可以作为其他有关专业的教学用书。

在长期的教学实践中，本书的编写结构与教学内容得到了老师和同学们充分肯定和好评。因此，本次修订只对书中的部分内容及表达进行了相应的修改和补充，以期更好地满足教学要求。

本书修订工作全部由侯树文完成。值此本书修订之际，编者向多年来关心和使用本书的老师和同学们致以诚挚的谢意！对于本书的不妥之处，恳请批评指正。

编者

2012年3月

第二版前言

《电工学及电气设备》第一版于1980年出版。1983年3月在武汉召开了高等学校水利水电类专业电类教材编审委员会会议，会上审订了《电工学及电气设备教学大纲》。《电工学及电气设备》第二版是根据该大纲修订而成的，作为高等院校农田水利工程专业、水利水电工程建筑专业的通用教材，也可作为其他有关专业的教学用书。

全书分为四篇，共十四章。前三篇为电工学，包括第一章至第九章；第四篇为电气设备，包括第十章至第十四章。在编写中，认真贯彻“少而精”原则，精选教学内容。电工学部分突出物理概念，着重讲清基本理论和分析问题的基本方法，并辅以较多的例题。每章均有小结及思考题与习题，以利于精讲多练，培养自学能力，为进一步学习电类课程打下必要的理论基础。电气设备部分则密切结合大、中型水电站和电力排灌站的实际情况，介绍其主要电气设备的作用、原理和结构，一次和二次接线的要求、接线形式，以及设备布置方式等，力求使读者对工程全貌有清晰概念，对设备、装置有明确了解。对于近年国内外出现的新型电气设备也作了简单介绍。

本书第一、三篇由浙江大学吴官熙同志编写；第二篇由武汉水利电力学院洪文秀同志编写；第四篇中的第十三章和第十四章的第三节由陕西机械学院袁清阁同志编写，其余由华北水利水电学院陈中川、周念祖和张葵兰同志编写。全书由吴官熙同志担任主编，由华东水利学院李学坚同志担任主审。华东水利学院季一峰同志参予了第四篇书稿的审稿工作，提了不少宝贵意见，谨致谢意。

华北水利水电学院周喜农同志在病故前为本书的编写做了许多准备工作。

对于书中不妥或错误之处，恳请同志们批评指正。

编者

1986年3月

第三版前言

本书是在第二版的基础上修订而成，可作为高等学校水利工程、农田水利、港航工程、水利水电工程建筑等专业的通用教材，也可作为其它有关专业的教学用书。

全书共分十一章，前八章为电工学部分，后三章为电气设备部分。在编写过程中，对传统内容进行了较大幅度的压缩整理，在满足大纲的前提下，使教材更加精炼，同时增补了数字电子电路、电子电路的计算机分析与仿真简介等内容，力图使教材更加充实，更具先进性和普遍性。此外，对习题作了适当调整，并对电气设备部分增补了习题。

本书第一、二章由华北水利水电学院王治昆同志编写，第三、四、五章由华北水利水电学院侯树文同志编写，第六、七、八章由扬州大学孙贵根同志编写，第九、十、十一章由郑州工业大学马家敏同志编写。全书由侯树文同志担任主编，由河海大学尹延凯教授担任主审。特别要感谢尹延凯教授，在本书的审定过程中做了大量细致的工作。不仅对本书中的错误和不足提出了十分具体、准确的意见，还对本书进一步修订提出了具有指导性的建议。

限于编者水平，书中错误和不妥之处，恳请读者批评指正。

编者

1998年8月

第四版前言

本书是在第三版基础上修订而成，可以作为水利工程、农业水利、港航工程、水利水电建筑等专业的通用教材，也可以作为其它有关专业的教学用书。

在长期的教学实践中，本书的结构与内容得到了老师和同学们的充分肯定。所以本次修订更加注重概念的表达和叙述的流畅，使之理论更加严谨，学习更具有可读性。同时，对书中的部分内容进行了必要的修改和补充，以期更能满足教学要求。

本书的修订工作全部由侯树文完成，值此本书修订之际，编者向多年来关心和使用本书的老师和同学们致以诚挚的谢意！对于本书的不妥之处，恳请批评指正。

编者

2008年9月

目 录

第五版前言

第一版前言

第二版前言

第三版前言

第四版前言

第一章 电路分析基础	1
第一节 电路的基本概念	1
第二节 电压源、电流源及等效变换	5
第三节 基尔霍夫定律	8
第四节 电路的基本分析方法	10
第五节 电路的基本定理	14
第六节 一阶电路的时域响应	19
小结	25
思考题与习题一	25
第二章 正弦交流电路	31
第一节 正弦交流电的基本概念	31
第二节 正弦交流电的相量表示	36
第三节 单一元件的交流电路	39
第四节 单相交流电路分析	43
第五节 三相交流电路的基本概念	53
第六节 三相交流电路分析	55
小结	59
思考题与习题二	60
第三章 基本电子器件	64
第一节 半导体的类型及导电性	64
第二节 PN 结与半导体二极管	65

第三节	双极型半导体三极管及特性	68
第四节	绝缘栅场效应管简介	71
小结	.....	72
思考题与习题三	.....	72
第四章	放大电路基础及应用	74
第一节	基本放大电路分析	74
第二节	微变等效电路分析法	79
第三节	差动放大电路	83
第四节	运算放大器及电路分析	85
第五节	电源电路	93
小结	.....	104
思考题与习题四	.....	105
第五章	数字电路基础及应用	112
第一节	基本门电路	112
第二节	逻辑关系表达及运算	115
第三节	组合逻辑电路	118
第四节	基本触发器	122
第五节	时序逻辑电路	125
第六节	数字逻辑芯片及应用	130
第七节	电子电路计算机仿真与设计简介	141
小结	.....	144
思考题与习题五	.....	144
第六章	变压器	148
第一节	变压器及其工作原理	148
第二节	变压器的运行	152
第三节	三相变压器的参数及意义	154
第四节	特殊变压器	156
小结	.....	157
思考题与习题六	.....	158
第七章	异步电动机	161
第一节	三相异步电动机及工作原理	161
第二节	三相异步电动机的电磁转矩	167
第三节	三相异步电动机的运行	170
小结	.....	174
思考题与习题七	.....	175

第八章 同步电机	177
第一节 同步发电机概述	177
第二节 同步发电机的电枢反应	179
第三节 同步发电机的并网运行	185
第四节 同步电动机	189
第五节 同步电机的励磁	191
小结	192
思考题与习题八	192
第九章 电力系统的基本概念	195
第一节 电力系统及电力系统的额定电压	195
第二节 电力系统短路的基本概念	198
第三节 电力系统中性点的运行方式	199
小结	201
思考题与习题九	201
第十章 电气设备	202
第一节 概述	202
第二节 水轮发电机	202
第三节 电力变压器	205
第四节 开关电器	208
第五节 电压互感器和电流互感器	215
第六节 载流导体和绝缘子	217
第七节 电气设备的防雷保护与接地	218
小结	220
思考题与习题十	220
第十一章 电气主接线和自用电	222
第一节 电气主接线	222
第二节 自用电及接线	225
第三节 电气二次回路的概念	225
小结	227
思考题与习题十一	227
参考文献	228

第一章 电路分析基础

本章内容是《电工学及电气设备》的理论基础，其中所介绍的基本概念，基本定理、定律及对电路的分析与计算方法，在交流电路及后续内容中，都具有普遍的适用性。因此，本章内容占有十分重要的位置。

第一节 电路的基本概念

一、电路的组成及作用

实际电路形式各异、数量繁多，概括起来电路是由电器元件、电工设备和电子模块为实现某种特定功能构造的集合体。但是，在分析、研究电路问题时，并不注重这些元件的结构和形状，而是把它们加以科学地抽象，用电路符号来表示。这些电路符号表示了不同类型元件电气性能的一般性和普遍性。

如图 1-1 (a) 所示，是由两个干电池、一个灯泡通过导线和一个开关所构成的手电筒电路，用电路符号表示后，电路如图 1-1 (b) 所示。图中 R 表示灯泡， E 表示电源电势。

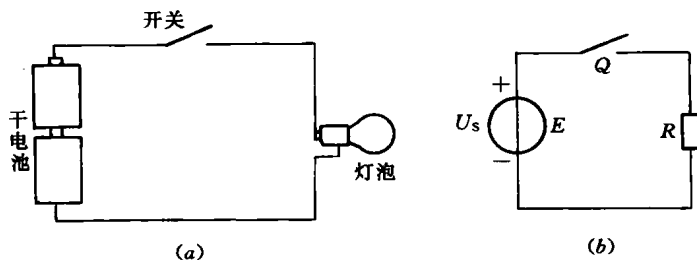


图 1-1 手电筒电路

电路的基本作用各有不同，但其主要功能都是进行电能的转换、传输和分配，以及信号的传递和处理，下面举例说明。

1. 电能的转换、传输和分配

最典型的例子是电力系统。发电厂的发电机组把水能或热能转换成电能，通过变压器、输电线路传送给各用户，用户又把电能转换成机械能、热能或光能等。发电机称为发电设备；变压器、输电线路称为输电设备；把电能转换成机械能的电动机、转换成光能的电灯、转换成热能电炉等称为用电设备，也称为负载。发电设备、输电设备、用电设备统称为电工设备。它们都是电路元件。

2. 信号的传递和处理

常见的例子很多，如扩音机把较弱的声音信号变成较强的信号。电视机接收各发射



台发出的不同信号并进行放大、处理，转换成声音和图像。计算机也是由电路组成，它能对键盘或其它输入设备输入的信号进行传递、处理，转换成图形或字符，输出在显示器或打印机上。所有这些都是通过电路把施加的输入信号变换成为所需要的输出信号。

在研究电路时，经常遇到“网络”这个名词。通常网络的涵义是从拓扑学观点考察电路。一般在研究复杂的电路问题时，常把电路称为网络。而在研究比较简单或某一具体电路时较多地使用电路这个名词。

二、电路的基本物理量

1. 电流

电荷的定向运动形成电流。电流的大小用电流强度来衡量，电流强度为单位时间内通过导体任一横截面的电量，工程上简称电流。电流不仅表示一种物理现象，而且还是一个物理量，常以字母 i 或 I 表示。

若设在 Δt 时间内通过导体截面的电量为 Δq ，则电流表示为 $i = \Delta q / \Delta t$ 。

若电荷运动的速率是随时间而变化的，此时电流是时间的函数，这种随时间变化的电流叫变动电流，瞬时值表示成 $i = dq/dt$ 。

如果此电流随时间的变化是周期性的，则称其为周期电流，若周期电流满足 $i = \frac{1}{T} \int_0^T i dt = 0$ ， T 为周期电流的周期，则称为交流电流，简称交流。

若电流不随时间变化，即在相同的时间间隔内通过的电量相等，则这种电流便称为恒定电流，简称直流。直流电流的表示式为

$$I = Q/t$$

式中 Q ——电量，C；

t ——时间，s；

I ——电流，A。

在国际单位制中电流的单位是安培（A），简称安。为了使用上的方便，常用的单位还有千安（kA）、毫安（mA）、微安（ μA ）。它们的关系是

$$1\text{kA} = 10^3\text{A} = 10^6\text{mA} = 10^9\mu\text{A}$$

2. 电位及电压

电位是相对于确定的参考点来说的。电路中某点 A 的电位是指单位正电荷在电场力作用下，自该点沿任意路径移动到参考点所做的功。 A 点的电位用 V_A 表示。

对电位来说，参考点是至关重要的：第一，电位是相对的物理量，不确定参考点，讨论电位就没有意义；第二，在同一电路中当选定不同的参考点时，同一点的电位值是不同的。在分析电路时，电位的参考点只能选取一个。参考点选定后，各点的电位值就确定了，这就是所谓的“电位单值性”。在电工学中，如果所研究的电路里有接地点，通常选择接地点作为电位的参考点，用符号“ $\perp$ ”表示。在电子线路中常取若干导线交汇点或机壳作为电位的参考点，并用符号“ $\perp$ ”表示。

电路中两点之间的电位差称为这两点间的电压，用符号 u 或 U 表示。例如电路中 A 、 B 两点之间的电压



$$U_{AB} = V_A - V_B \quad (1-1)$$

在国际单位制中电压的单位是伏特 (V)，简称伏。为了使用上的方便，常用的单位还有千伏 (kV)、毫伏 (mV)、微伏 (μV)。它们的关系是

$$\begin{aligned} 1\text{kV} &= 10^3 \text{V} \\ 1\text{V} &= 10^3 \text{mV} = 10^6 \mu\text{V} \end{aligned}$$

3. 电动势

电动势是指单位正电荷在电源力作用下，自低电位端经电源内部移到高电位端所做的功。其电源可以是化学作用而产生的，也可以是电磁感应作用而产生的。例如电池和发电机。

电动势用符号 e 或 E 表示，其单位也是伏特 (V)。

4. 功率

在电路的分析与计算中，还经常用到另外一个物理量——功率。

功率是指单位时间内电场力所做的功。用 p 或 P 表示。

由物理学的知识知道，电场力使电荷 Δq 从 A 点移动到 B 点所做的功

$$\Delta w = (V_A - V_B) \Delta q$$

写成微分形式

$$dw = (V_A - V_B) dq$$

而 $i = dq/dt$ ，即 $dq = idt$ 代入上式得

$$dw = (V_A - V_B) idt = U_{AB} idt$$

则电场力从 $t_0 \sim t$ 时段所做的功

$$w = \int_{t_0}^t U_{AB} i dt$$

那么单位时间内电场力所做的功即功率为

$$p = dw/dt = U_{AB} i \quad (1-2)$$

当电压的单位是伏特，电流的单位是安培时，功率的单位是瓦特，简称瓦 (W)。除瓦之外还有千瓦 (kW)、毫瓦 (mW)，它们之间的关系是

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

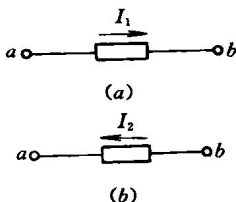
三、电压、电流的关联参考方向

在分析和解决较为复杂的电路问题时，各元件上电压、电流的实际方向在分析计算之前很难确定。为此，先假定一个参考方向。

1. 电流的参考方向

习惯上规定正电荷运动的方向为电流的方向。

在电路中，某些元件电流的真实方向往往事先无法判明，特别是对于交流电路，由于电流的方向随时间交变，某一瞬时电流的真实方向更无法判明。为此，在分析计算电路问题时，必须先假定某一元件电流的方向作为参考方向（正方向）。



电流的参考方向一般用箭头表示，如图 1-2 所示。显然， $I_1 = -I_2$ 。图 1-2 电流的参考方向



电流的参考方向确定后，如果计算出的电流为正值，说明电流的实际方向与参考方向一致；若计算出的电流为负值，则说明电流的实际方向与参考方向相反。因而，电流是一个代数量，绝对值代表电流的大小，符号表示方向。在没有假定参考方向以前，分析电流的正负是毫无意义的。

2. 电压的参考方向

电路中两点之间电压的方向，是从高电位端指向低电位端的方向，即电位降的方向。

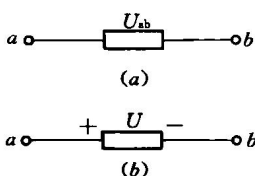


图 1-3 电压的参考方向

在分析电路问题时，也要假定电压的参考方向。和电流一样，电压的参考方向也是任意假定的。一般电压的参考方向用正（+）、负（-）极性符号表示，有时还用双下标形式表示，如图 1-3 所示。

图 1-3 (a)、(b) 中两种表示方法都是指：由假定的高电位端（a 端）指向低电位端（b 端）。当电压的参考方向确定后，分析或计算出的电压若为正值，说明电压的实际方向与参考方向相同；若为负值，说明电压的实际方向和参考方向相反。因此，电压也是代数量。

3. 电动势的参考方向

电动势的方向是指电位升高的方向，即从低电位指向高电位的方向，刚好与电压的方向相反。也就是说对于同一电源，如果按其真实方向表示出电压、电动势的方向，则此时的电压、电动势均为正值。因此将有 $E=U_s$ ，它们反应的是同一客观事实：电源正极电位高于电源负极电位。

作为分析与计算电路的一种方法，同样也可以为电动势假定一个参考方向。因此，它和电压、电流一样也是代数量，参考方向的表示方法也相同。如果选取电压 U_s 的参考方向与电动势 E 的参考方向相反，则 $U_s=E$ ；若两者的参考方向相同，则 $U_s=-E$ ，如图 1-4 所示。

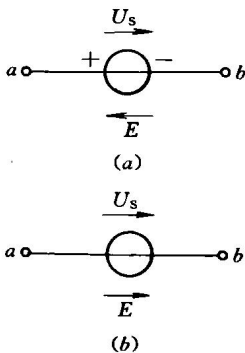


图 1-4 电压与电势的关系

4. 电压、电流的参考方向

从原则上讲，电压、电流的参考方向都是可以任意假定的。但对于电阻元件来说，电压和电流的实际方向总有一个固定关系，即电压是从高电位端指向低电位端；电流是从高电位端流入，从低电位端流出。因此，为了分析、计算的方便，一般情况下，负载元件选取电压的参考方向与电流的参考方向一致，此时，称电压的参考

方向与电流的参考方向均为正；反之，若选取电压的参考方向与电流的参考方向不一致，有如下两种情况：

情况 1：当假定电压的参考方向为正时，则称电流的参考方向为负；

情况 2：当假定电流的参考方向为正时，则称电压的参考方向为负。

一般地，对于一段电路上的功率 $P=UI$ ：

当 $P=UI>0$ 时，表明该段电路吸收（或消耗）功率，即可以视为负载；

当 $P=UI<0$ 时，表明该段电路发出（或释放）功率，即可以视为电源。



第二节 电压源、电流源及等效变换

实际电路中使用的电源种类很多,但按照它们的特点及其共性,可将电源归纳为两大类:电压源及电流源。电压源与电流源是二端有源元件,是组成电路的重要元件之一,是电路中电能的来源。

一、电压源及伏安特性

1. 理想电压源

电源的端电压与输出的电流无关,即 $\frac{\partial u_s}{\partial i} = 0$, 端电压是给定的时间函数,即 $u = u_s(t) = e(t)$, 称其为理想电压源。理想电压源的电流取决于外电路中负载的大小。其电路符号如图 1-5 (a) 所示。如果理想电压源的电压为常数,即 $u_s = U_s$, 这种电源称为直流电压源(又名恒压源)。直流电压源还可以用图 1-5 (b) 的符号表示,而图 1-5 (b) 也是电池的图形符号,短线段表示电源的低电位端,长线段表示电源的高电位端。理想电压源的伏安特性如图 1-5 (c) 所示。

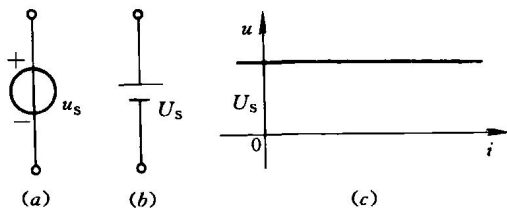


图 1-5 理想电压源及伏安特性

2. 实际电压源特性

实际电路中,理想电压源是不存在的。因为实际电压源内部总是存在着一定的内电阻。因此,电源端电压将随着输出电流的增加而略有下降。这种实际的电压源可以用一个理想电压源与内阻 R_0 的串联来表示,其电路模型如图 1-6 (a) 所示。

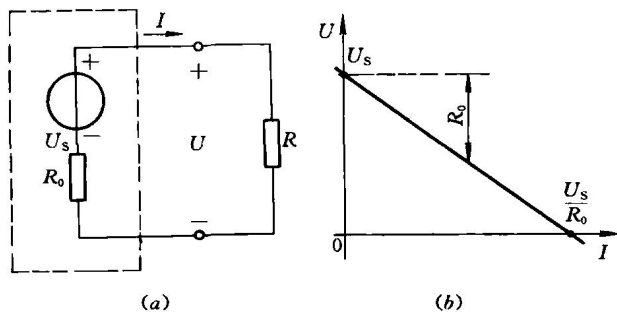


图 1-6 电压源及伏安特性

按图中电压和电流的参考方向,并由物理学中全电路欧姆定律

$$I = \frac{U_s}{R + R_0} \quad (1-3)$$

得 $IR = U_s - IR_0$

因 $U = IR$

故有 $U = U_s - IR_0 \quad (1-4)$

则其电压源的伏安特性如图 1-6 (b) 所示,它是一条斜线。

在直流电路中,电压、电流等都大写表示。如果将式 (1-4) 两边同乘以电流 I , 就得到了直流电压源的功率平衡方程。

$$UI = U_s I - I^2 R_0$$

其中, $I^2 R_0$ 是内电阻上消耗的电功率, $UI = I^2 R$ 是负载上消耗的电功率,这些都是由电压源提供的,其大小为 $U_s I$ (由于 U_s 与 I 的方向相反,所以电压源输出电功率)。



二、电流源及伏安特性

1. 理想电流源

电源输出的电流与端电压无关, 即 $\frac{\partial i_s}{\partial u} = 0$, 输出电流是给定的时间函数, 即 $i = i_s(t)$, 称其为理想电流源。理想电流源的电压取决于外电路中负载的大小, 其电路符号如图 1-7 (a) 所示。如果理想电流源的电流为常数, 即 $i = I_s$, 这种电源称为直流电流源 (又名恒流源)。理想电流源的伏安特性如图 1-7 (b) 所示。这是一条平行于电压轴的直线, 说明它的输出电流 $i_s = I_s$, 与端电压及负载均无关。

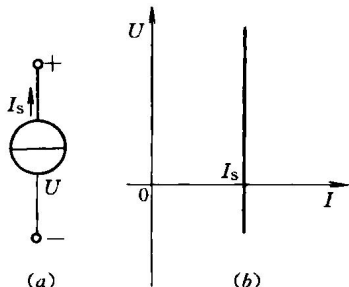


图 1-7 理想电流源及伏安特性

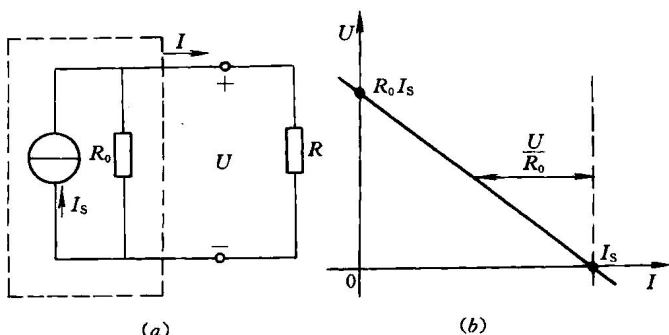


图 1-8 电流源及伏安特性

2. 实际电流源特性

理想电流源在实际电路中是不存在的, 而实际电流源也是有内阻的, 其输出电流随端电压的增加而减小。实际的电流源可以用一个恒流源与内阻并联表示, 其电路模型如图 1-8 (a) 所示。

由图 1-8 可知, 内阻 R_0 上分得的电流为 U/R_0 , 所以输出电流

$$I = I_s - U/R_0 \quad (1-5)$$

其电源的伏安特性曲线如图 1-8 (b) 所示, 它也是一条斜线。

在直流电路中, 如果将式 (1-5) 两边同乘以端电压 U , 就得到了直流电流源电路的功率平衡方程, 即

$$UI = UI_s - U^2/R_0$$

其中, UI_s 是电流源产生的功率, U^2/R_0 是内阻消耗的功率, UI 是实际电流源输出的功率, 亦即负载上消耗的功率。

通常, 人们对电压源是比较熟悉的, 也易于学习掌握它, 而对电流源则比较生疏。但是, 电流源确实客观存在, 特别是在电子线路中有着广泛的应用。

三、电压源与电流源的等效变换

实际电源既有理想电压源与内阻串联而成的电压源, 又有理想电流源与内阻并联的电流源, 如图 1-9 所示。

由图 1-9 (a) 所示电路可写出电压源的伏安特性方程为 $U = U_s - IR_0$, 等式两边同除以内阻 R_0 并移项得

$$I = U_s/R_0 - U/R_0$$