



普通高等教育“十五”国家级规划教材

( 高职高专教育 )

# 电路基本分析

(第2版)

石生 主编

韩肖宁 副主编



高等教育出版社

普通高等教育“十五”国家级规划教材  
(高职高专教育)

# 电路基本分析

(第2版)

石 生 主 编  
韩肖宁 副主编

高等教育出版社

## 内容提要

本书是普通高等教育“十五”国家级规划教材(高职高专教育),依据教育部最新制定的“高职高专教育电工技术基础课程教学基本要求”编写而成。全书共10章,其中第9章动态电路的复频域分析为选修内容,其余分别为:电路的基本概念和定律、电阻电路的等效变换法、电路分析的网络方程法、正弦交流电路、谐振与互感电路、三相电路、非正弦周期电流电路、动态电路的时域分析和复频域分析、二端口网络。

本书可供高等职业学校、高等专科学校、成人高等学校以及本科院校举办的二级职业技术学院和民办高等学校电气类、电工类、通信类各专业使用,也可供其他专业和有关科技人员参考。

## 图书在版编目(CIP)数据

电路基本分析 / 石生主编. —2版. —北京: 高等教育出版社, 2003.12(2005重印)  
ISBN 7-04-013177-3

I. 电... II. 石... III. 电路分析-高等学校: 技术学校-教材 IV. TM133

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 097649 号

---

出版发行	高等教育出版社	购书热线	010-58581118
社 址	北京市西城区德外大街4号	免费咨询	800-810-0598
邮政编码	100011	网 址	<a href="http://www.hep.edu.cn">http://www.hep.edu.cn</a>
总 机	010-58581000		<a href="http://www.hep.com.cn">http://www.hep.com.cn</a>
经 销	北京蓝色畅想图书发行有限公司	网上订购	<a href="http://www.landaco.com">http://www.landaco.com</a>
印 刷	国防工业出版社印刷厂		<a href="http://www.landaco.com.cn">http://www.landaco.com.cn</a>
开 本	787×1092 1/16	版 次	2000年7月第1版
印 张	18.5		2003年12月第2版
字 数	450 000	印 次	2005年2月第2次印刷
		定 价	21.50元

---

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究

物料号 13177-00

## 出版说明

为加强高职高专教育的教材建设工作,2000年教育部高等教育司颁发了《关于加强高职高专教育教材建设的若干意见》(教高司[2000]19号),提出了“力争经过5年的努力,编写、出版500本左右高职高专教育规划教材”的目标,并将高职高专教育规划教材的建设工作分为两步实施:先用2至3年时间,在继承原有教材建设成果的基础上,充分汲取近年来高职高专院校在探索培养高等技术应用性专门人才和教材建设方面取得的成功经验,解决好高职高专教育教材的有无问题;然后,再用2至3年的时间,在实施《新世纪高职高专教育人才培养模式和教学内容体系改革与建设项目计划》立项研究的基础上,推出一批特色鲜明的高质量的高职高专教育教材。根据这一精神,有关院校和出版社从2000年秋季开始,积极组织编写和出版了一批“教育部高职高专规划教材”。这些高职高专规划教材是依据1999年教育部组织制定的《高职高专教育基础课程教学基本要求》(草案)和《高职高专教育专业人才培养目标及规格》(草案)编写的,随着这些教材的陆续出版,基本上解决了高职高专教材的有无问题,完成了教育部高职高专规划教材建设工作的第一步。

2002年教育部确定了普通高等教育“十五”国家级教材规划选题,将高职高专教育规划教材纳入其中。“十五”国家级规划教材的建设将以“实施精品战略,抓好重点规划”为指导方针,重点抓好公共基础课、专业基础课和专业主干课教材的建设,特别要注意选择一部分原来基础较好的优秀教材进行修订使其逐步形成精品教材;同时还要扩大教材品种,实现教材系列配套,并处理好教材的统一性与多样化、基本教材与辅助教材、文字教材与软件教材的关系,在此基础上形成特色鲜明、一纲多本、优化配套的高职高专教育教材体系。

普通高等教育“十五”国家级规划教材(高职高专教育)适用于高等职业学校、高等专科学校、成人高校及本科院校举办的二级职业技术学院、继续教育学院和民办高校使用。

教育部高等教育司

2002年11月30日

## 第 2 版序言

本书系教育部高职高专规划教材《电路基本分析》的修订本,第 1 版于 2000 年出版,2002 年获全国普通高等学校优秀教材二等奖。出版三年来,作者注意收集各方面读者的意见,包括普通高等专科学校、高等职业学校、成人高等学校以及本科院校的二级职业技术学院和民办高等学校的广大读者对原版本提出了许多建设性的意见,在此表示深切的谢意。更为重要的是,三年来,全国高职高专办学规模不断扩大,教学改革不断深化,对本课程的教学提出了新要求,因此本次修订的原则是:一方面要保持本书原有的体系和特色,另一方面要适应高职高专教学内容和体系改革的要求。

与第 1 版相比,第 2 版在以下方面做了较大变动:

(1) 电容、电感元件及其特性由第一章调整到第四章正弦交流电路,目的在于使学生一开始集中精力掌握电路的基本定律和基本分析方法。

(2) 全书降低了对含受控源电路分析的要求,原则上一个电路只出现一个受控源。

(3) 对直流电路、正弦交流电路和动态电路的时域分析等核心内容,加强了典型例题的分析和讲述。第 1 版例题分析讲述概括性强,考虑到读者的要求,第 2 版在这方面描述得较为详细。

(4) 对全书的习题进行了调整,第 1 版基本习题偏少,而有一定难度的习题较多,第 2 版增加了一些与基本内容配合的、较容易的习题,同时适当降低了其他习题的难度。

第 1 版继承了原国家教委“电工电子系列课程改革”的成果,突出主体内容,注重工程应用等特色,仍是本次修订所遵循的。

受编者水平和教学经验所限,修订后,难免还有不足和错误之处,恳请读者指正。

石 生 韩肖宁

2003 年 8 月

# 第 1 版序言

本书在教育部高等工程专科“电工电子系列课程改革”课题组指导下编写而成,课题组多次研讨通过的“电路基本分析方法”课程改革方案和配套的教材编写大纲是起草本书的基本依据。改革方案提出:本课程要注重素质教育,注重应用性人才能力的培养,把立足点放到工程技术应用性上,内容应删繁就简、削枝强干、突出主线、突出重点,作到既为学习后续课程服务,又直接服务于工程技术应用能力的培养。在本书出版之前,相应的初稿(讲义)已在南京动力高等专科学校等五所高工专院校试用,取得了较好的教学效果,同时也征得了对本书的修改意见。在本书修改和统稿之前,作者根据教育部制定的《高职高专教育电工技术基础课程教学基本要求》作了相应的修改,本书在内容体系、深度、广度以及教学的适应性等方面,都能与此“基本要求”相一致。

本书以线性电路最基本的三部分内容:电阻电路分析、电路的正弦稳态分析和动态电路分析为主体,介绍基本电路理论及电路的基本分析方法,力求做到概念准确、内容精炼、重点突出、注重理论联系实际、注重方法论的叙述。在讲解上,力求做到通俗易懂、便于自学。书中给出了较多的例题、习题,以帮助学生掌握和巩固所学知识。

本书可供高等工程专科、高等职业技术学院、成人高等学校电气类、电子类、通信类各专业作为教材使用,也可供有关科技人员和相近专业的本科学生、自学考试者参考。

书中凡是标有(\*)号的章节,属于加宽或加深的内容,供不同学校和专业选用。

本课程的改革方案和教材编写大纲由太原电力高等专科学校李崇贺教授、石生教授起草。第一、二、三章由石生教授编写,第四、五、六章由太原电力高等专科学校韩肖宁副教授编写,第八、九章由南京电力高等专科学校范瑛编写,第七、十章由承德石油高等专科学校赵会军编写。全书由石生、韩肖宁共同统稿,修改和定稿。韩肖宁还负责全书的绘图工作。

本书送审稿承蒙南京电力高等专科学校徐熙文副教授仔细审阅,提出了许多宝贵意见,在此表示深切的感谢。

本书的初稿(讲义)经南京动力高等专科学校、南京电力高等专科学校、郑州电力高等专科学校、山东电力高等专科学校、太原电力高等专科学校试用后,提出了许多宝贵意见,对本书的修改帮助很大,对于所有提出意见的同志,在此表示衷心的感谢。

在本课程的改革方案、教材编写大纲的研讨过程中,得到教育部高等工程专科“电工电子系列课程”改革课题组长、南京电力高等专科学校原副校长牛维扬,上海理工大学孔凡才教授等许多专家、教授和同行的帮助,在此表示衷心的感谢。

纵然如此,本书受编者学识水平和教学经验的限制,难免有疏漏和错误之处,恳请读者批评指正。

石 生 韩肖宁

2000年3月

# 目 录

<b>第一章 电路的基本概念和定律</b> .....	1	<b>第五节 阻抗与导纳</b> .....	86
第一节 电路中的物理现象和电路模型 .....	1	<b>第六节 正弦交流电路的相量图法求解</b> .....	97
第二节 电路中的基本物理量 .....	3	<b>第七节 正弦交流电路中的功率</b> .....	102
第三节 电阻元件及其特性 .....	6	<b>第八节 正弦交流电路的相量法求解</b> .....	112
第四节 电路中的独立电源 .....	8	本章小结 .....	117
第五节 基尔霍夫定律 .....	12	习题四 .....	119
本章小结 .....	15	<b>第五章 谐振与互感电路</b> .....	126
习题一 .....	16	第一节 谐振电路 .....	126
<b>第二章 电阻电路的等效变换法</b> .....	18	第二节 互感电路 .....	135
第一节 串、并联等效变换 .....	18	第三节 理想变压器及其电路的计算 .....	146
第二节 电阻星形联结与三角形联结的 等效变换 .....	21	本章小结 .....	149
第三节 电源的等效变换 .....	23	习题五 .....	150
第四节 受控源及其等效变换 .....	26	<b>第六章 三相电路</b> .....	154
第五节 叠加定理与替代定理 .....	29	第一节 三相电源与三相负载 .....	154
第六节 戴维宁定理与诺顿定理 .....	33	第二节 三相电路的功率 .....	160
本章小结 .....	39	第三节 对称三相电路的计算 .....	163
习题二 .....	39	第四节 不对称三相电路的特点及分析 .....	166
<b>第三章 电路分析的网络方程法</b> .....	44	本章小结 .....	169
第一节 $2b$ 方程法 .....	44	习题六 .....	170
第二节 电路的拓扑结构 .....	46	<b>第七章 非正弦周期电流电路</b> .....	172
第三节 支路(电流)法 .....	48	第一节 非正弦周期信号的谐波分析 .....	172
第四节 节点分析法 .....	49	第二节 有效值、平均值和平均功率 .....	178
第五节 网孔分析法 .....	54	第三节 非正弦周期电流电路的分析 .....	182
第六节 回路分析法 .....	57	第四节 对称三相电路中的高次谐波 .....	186
本章小结 .....	58	本章小结 .....	191
习题三 .....	59	习题七 .....	192
<b>第四章 正弦交流电路</b> .....	62	<b>第八章 动态电路的时域分析</b> .....	194
第一节 正弦量 .....	62	第一节 电路的动态过程与动态响应 .....	194
第二节 正弦量的相量表示 .....	69	第二节 电路初始条件的确定 .....	195
第三节 电容元件和电感元件 .....	74	第三节 求解一阶电路动态响应的三 要素法 .....	198
第四节 电路基本定律的相量形式 .....	79		

第四节 一阶电路响应的分类 .....	204	本章小结 .....	252
第五节 一阶电路的阶跃响应 .....	210	习题九 .....	253
* 第六节 一阶电路的冲激响应 .....	214		
第七节 二阶 RLC 电路的零输入响应 .....	219	<b>第十章 二端口网络</b> .....	257
本章小结 .....	227	第一节 二端口网络的方程和参数 .....	257
习题八 .....	228	第二节 二端口网络的等效电路 .....	268
		第三节 二端口网络的级联 .....	273
<b>* 第九章 动态电路的复频域分析</b> .....	233	本章小结 .....	274
第一节 拉普拉斯变换及其基本性质 .....	233	习题十 .....	275
第二节 拉普拉斯反变换的部分分式 展开法 .....	238	<b>部分习题答案</b> .....	278
第三节 动态电路的复频域模型 .....	242	<b>参考书目</b> .....	284
第四节 线性电路的复频域法求解 .....	246		



# 第一章

## 电路的基本概念和定律

### 本章提要

本章介绍电路和电路模型,阐述电路的基本概念和基本变量,定义电阻、独立电压源和独立电流源等理想电路元件并讨论其属性,最后介绍电路分析中最重要的定律——基尔霍夫定律。这些内容是全书的基础。

### 第一节 电路中的物理现象和电路模型

#### 一、实际电路

在电视机、音响设备、通信系统、计算机和电力网络中可以看到各种各样的电路,这些电路的特性和作用各不相同,但它们都是物理实体,称为实际电路。实际电路是由一些电气器件或设备按一定方式连接起来的,以完成能量的传输、转换或信息的处理、传递。能量传输、转换的典型实例是电力系统,发电机将其他形式的能源转换为电能,再通过变压器和输电线路将电能输送给工厂、农村和千家万户的用电设备,这些用电设备再将电能转换为机械能、热能、光能或其他形式的能量。通信系统则是建立在信息的发送者和接收者之间用来完成信息的处理和传递的实际电路。图 1-1 所示的日光灯电路实体,是一个常见的实际电路,其中,  $L$  是镇流器,它是一个铁心线圈,  $R$  是日光灯管,实际上是将电能转换为光和热的耗能元件电阻器,  $C$  是电容器,  $Q$  是启辉器,  $S$  是开关,另外还有 220 V 交流电源以及将这些器件连接起来的导线。

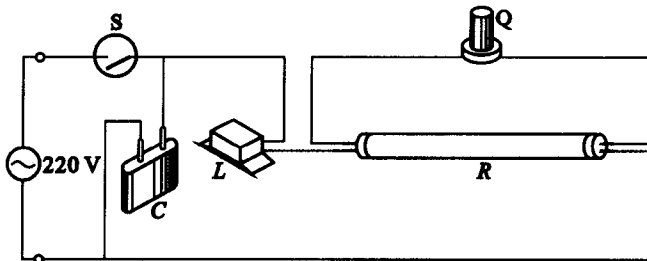


图 1-1 日光灯实际电路

## 二、理想电路元件、电路模型

对各种各样的实际电路进行分析的办法有两种：一种是用电气仪表对实际电路进行测量；另一种更主要的办法是将实际电路抽象为电路模型，而后用电路理论进行分析计算。

将实际电路抽象为电路模型，需要将实际电路及其中的每一个实际电路器件的主要电磁性质进行科学的抽象和概括。理想电路元件正是将实际电路器件的主要电磁属性进行科学抽象后得到的。此处科学抽象的办法是：定义一些理想化的电路元件来近似地模拟电气器件的电磁特性。例如无论是照明用电灯、加热用电炉，还是将电能转换为机械能的电动机等电路器件，其消耗电能这一电磁特性在电路模型中均可用理想电阻元件  $R$  来表现；定义电容元件是一种只储存电场能量的理想元件；电感元件是一种只储存磁场能量的理想元件。用电阻、电容、电感等理想电路元件来近似模拟实际电路中每个电气器件和设备，再根据这些器件的连接方式，用理想导线将这些电路元件连接起来，就得到该实际电路的电路模型。图 1-2(c) 就是图 1-2(a) 的电路模型。图 1-2(b) 是图 1-2(a) 的电原理图。表 1-1 是部分电气图用图形符号。

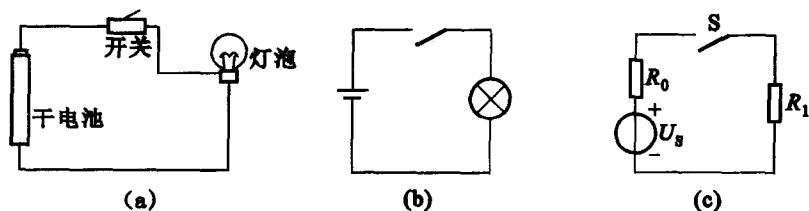

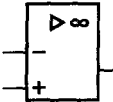


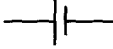






图 1-2 实际电路与电路模型

表 1-1 部分电气图用图形符号(根据国标 GB4728)

名称	符号	名称	符号	名称	符号
导线	—	传声器		电阻器	
连接的导线		扬声器		可变电阻器	
接地		二极管		电容器	
接机壳		稳压二极管		线圈, 绕组	
开关		隧道二极管		变压器	
熔断器		晶体管		铁心变压器	

续表

名称	符号	名称	符号	名称	符号
灯		运算放大器		直流发电机	
电压表		电池		直流电动机	
独立电流源		独立电压源		回转器	

### 三、电路的分类

电路可分为集总参数电路和分布参数电路,集总参数电路是指电路本身的几何尺寸  $l$  相对于电路的工作频率所对应的波长  $\lambda$  小得多,以至在分析电路时可以忽略元件和电路本身几何尺寸的电路,如工频 50Hz 时,波长  $\lambda=6\ 000\ \text{km}$ ,因而在工频情况下,多数电路满足  $l \ll \lambda$ ,可认为是集总参数电路。分布参数电路是指电路本身的几何尺寸相对于工作波长不可忽略的电路。集总参数电路又按其元件参数是否为常数,分为线性电路和非线性电路。本课程重点学习集总参数线性电路的分析方法。

## 第二节 电路中的基本物理量

电路中的物理量很多,诸如电荷、磁链、电压、电位、电流、时间、功率、能量等等。本节主要讨论电路的基本物理量:电流、电压、功率和能量。

### 一、电流及电流的参考方向

带电粒子或电荷在电场力作用下的定向运动形成电流,其大小用物理量电流表示,电流在数值上等于单位时间内通过某一截面的电荷量,即

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

在国际单位制(SI)中,时间  $t$  的单位为秒,符号为 s,电荷量  $q$  的单位为库[仑],符号为 C,电流  $i$  的单位为安[培],符号为 A。由式(1-1)可见,当电路中某一截面在 1 s 时间内通过 1 C 电荷量时,电路中该处的电流为 1 A。

根据实际需要,电流的单位还可用 kA(千安)、mA(毫安)、 $\mu\text{A}$ (微安)等,它们与 SI 单位 A 的关系是

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

关于电流的方向,人们把正电荷运动的方向规定为电流的实际方向。当负电荷或电子运动时,电流的实际方向就是负电荷运动方向的相反方向。

电流的实际方向是客观存在的,但在分析复杂电路时,很难用实际方向进行分析计算,原因之一是分析计算之前很难事先判定某支路中电流的实际方向,原因之二是当电流是交流量时,电

流的实际方向不断随时间变化。解决的办法是引入参考方向的概念,对于电流这种具有两个可能方向的物理量,可以任意选定一个方向作为某支路电流的参考方向,用箭头表示在电路图上,以此参考方向作为电路计算的依据,计算完毕后,对于某一条支路,若在设定的参考方向下算出  $i > 0$ ,表明电流的实际方向与设定的参考方向一致;反之,若算出  $i < 0$ ,表明电流的实际方向与所选的参考方向相反。图 1-3(a)和(b)表明参考方向与实际方向的关系,图的上方为实际方向,下方为参考方向。

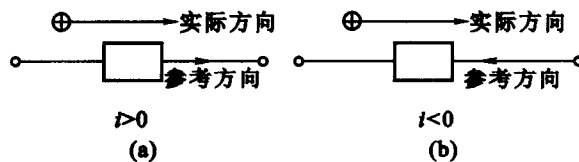


图 1-3 电流实际方向和参考方向的关系

## 二、电压、电位及电压的参考方向

在电路中,如果设正电荷由 a 点移到 b 点时电场力所作的功为  $dA$ ,则 a、b 两点间 a 点到 b 点的电压

$$u_{ab} = \frac{dA}{dq} \quad (1-2)$$

换句话说,电场力把单位正电荷由 a 点移到 b 点所作的功在数值上等于 a、b 两点间的电压。如果  $u_{ab} > 0$ ,由式(1-2)可知,当  $dq > 0$  时, $dA > 0$ ,表明这时电场力作正功,做功的结果是正电荷在 a 点具有的电位能  $W_a$  减小为其在 b 点的电位能  $W_b$ ,差额  $W_a - W_b$  等于这段电路所吸收的能量。若取电场或电路中任一点为参考点,则由某点 a 到参考点的电压  $u_{a0}$  称为 a 点的电位  $V_a$ ,电位参考点可以任意选取,工程上常选择大地、设备外壳或接地点作为参考点。参考点电位为零。

电压与电位的关系为:a、b 两点之间的电压等于这两点之间的电位差,即

$$u_{ab} = V_a - V_b \quad (1-3)$$

参考点选得不同,各点的电位也随之而异,但不会影响两点间的电位差。在电路分析计算中,参考点一经选定,则不再改变。

在 SI 中,电压(电位)的单位是伏[特],符号为 V。与电流一样,电压的常用单位也有 kV(千伏)、mV(毫伏)等。

由高电位点指向低电位点的方向,是电压的实际方向。从式(1-3)可见,当 a 点到 b 点的指向与电压实际方向一致时,a 点到 b 点的电压  $u_{ab} > 0$ 。在电路图上,电路两点间电压的实际方向常用一种表明极性的方法来表示:在高电位点标以“+”号并称此点为“正”极,反之,在低电位点标以“-”号并称之为“负”极。这种按两点电位的实际高低所标的极性称为电压的实际极性。由于在复杂电路的分析计算之前,很难事先知道哪一点电位高,哪一点电位低,也就是说,很难事先知道一段电路的实际电压方向。在交流电路中,实际电压的方向是随时间不断变化的,因此必须引入电压的参考方向的概念。在一段电路中,任意选定一点的极性为“+”,另一点的极性为“-”,这样选定的极性称作电压的参考极性,从任意选定的“+”极指向“-”极的方向称为电压的参考方向(用箭头表示)。当电压符号的下标为两点的名称时,则第一下标到第二下标的指向就

是电压的参考方向。以此参考方向来计算电路,若算得结果是  $u > 0$ , 则表示电压的实际方向与所选定的参考方向一致;若算得  $u < 0$ , 则表示电压的实际方向与参考方向相反。图 1-4 说明了电压的参考方向与参考极性的关系,图的上部为参考方向,下方为参考极性。掌握了电压的参考方向和参考极性的关系后,常将两者统称为电压的参考方向。

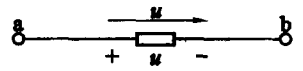


图 1-4 电压参考方向和参考极性的关系

关于电流和电压的参考方向,还有几点需要说明:

(1) 电流、电压的参考方向可以任意选定。但一经选定,在电路分析计算过程中不应改变。

(2) 今后计算电路,一般要先标出参考方向再进行计算,在电路图中,所有标有方向的电流、电压均可认为是电流、电压的参考方向,而不是指实际方向。

(3) 一般地讲,同一段电路的电流和电压的参考方向可以各自选定,不必强求一致。但为了分析方便,常选定同一元件的电流参考方向与电压参考方向一致,即电流从正极性端流入该元件而从它的负极性端流出。这样选择的某一段电路的电压和电流的参考方向,称为相关联的参考方向。图 1-5(a)、(b)为关联参考方向的示例。

(4) 电磁学中电动势的实际方向规定由负极指向正极,即电动势的实际方向是电位升高的方向,用符号  $e$  表示电动势,则电动势的参考方向与电压的参考方向之间的关系由图 1-6 所示,图 1-6(a)和(b)满足  $u = e$ , 而图 1-6(c)满足  $u = -e$ 。

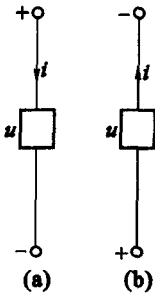


图 1-5 电压电流的关联参考方向

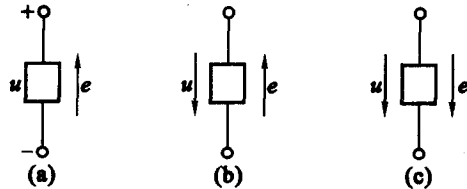


图 1-6 电压和电动势的参考方向

若 a、b 两点间电压的计算结果为  $u_{ab} = 0$ , 则表示 a、b 两点间等电位。若两等电位点之间原无导线连接,则用导线连接这两点后,此导线中无电流通过。高压带电作业时,要求人与导线等电位,这样人体无电流通过,因此,不会造成人体触电事故。

### 三、电功率与电能

电场力推动正电荷在电路中运动时,电场力作功,同时电路吸收能量,电路在单位时间内吸收的能量称为电路吸收的电功率,简称功率。

图 1-7 所示 ab 电路段,电流和电压的参考方向一致,在  $dt$  时间内通过电路段的电荷量为  $dq = idt$ ,  $dq$  的电荷量由 a 端移到 b 端,电场力作功为  $dW = u \cdot dq$ ,即在此过程中,电路段吸收的能量为

$$dW = u \cdot i \cdot dt \quad (1-4)$$

吸收的功率为

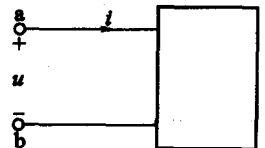


图 1-7 电路的功率

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

这说明,当电流、电压取相关联的参考方向时,电路段吸收的功率等于  $u$  与  $i$  两者的乘积。由此可见,当  $u, i$  参考方向一致时,若求得  $p > 0$ , 则电路实际吸收功率,若  $p < 0$ , 则电路吸收负功率,即实际发出功率;当  $u, i$  参考方向不一致时,若求得  $p > 0$ , 则电路实际发出功率,若  $p < 0$ , 则电路实际吸收功率。

在 SI 中,功率的单位是瓦[特],符号为 W,由式(1-5)可知,  $1 \text{ W} = 1 \text{ V} \cdot 1 \text{ A}$ ,工程上常用的功率单位还有 MW(兆瓦)、kW(千瓦)和 mW(毫瓦)等,它们与 W 的关系分别是

$$1 \text{ MW} = 10^6 \text{ W}, \quad 1 \text{ kW} = 10^3 \text{ W}, \quad 1 \text{ mW} = 10^{-3} \text{ W}$$

能量是功率对时间的积分,由  $t_0$  至  $t$  时间内电路吸收的能量由下式表示

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

当式(1-6)中  $p$  的单位为瓦时,能量  $W$  的单位为焦[耳],符号为 J,它等于功率为 1 W 的用电设备在 1 s 内消耗的电能。工程和生活中还常用千瓦时(kW·h)作为电能的单位,  $1 \text{ kW} \cdot \text{h}$  过去也称 1 度(电)。

$$1 \text{ kW} \cdot \text{h} = 10^3 \text{ W} \times 3600 \text{ s} = 3.6 \times 10^6 \text{ J} = 3.6 \text{ MJ}.$$

各种电气设备常在铭牌上给出电压、功率或电流的额定值,电气设备在额定电压下能正常、安全地工作,超过额定电压有可能引发绝缘损坏,电压过低时功率不足(如电灯变暗),超过额定功率或额定电流时,会引起设备因过热而损坏。

### 第三节 电阻元件及其特性

集总参数电路由电路元件连接而成。电路元件是实际电气器件的理想模型,掌握电路元件的特性是研究电路的基础,本节介绍最基本的无源元件——电阻元件。

电阻元件是一种最常见的电路元件,在某些特定的场合,电阻元件又有其特定的用途。如人们利用某些材料的电阻值随温度变化的特性通过测量阻值来测量温度、通过测量电阻应变片的阻值来得到物体因受力而发生应变的程度等等。

有两个端钮与外部相连的元件称作二端元件。若一个二端元件任一时刻的电压与电流的关系,可由  $u-i$  平面的一条曲线确定,则此二端元件称为二端电阻元件,也就是说,二端电阻元件的数学定义式为

$$f(u, i) = 0 \quad (1-7)$$

式(1-7)表明了电阻元件的电压与电流的约束关系(Voltage Current Relationship,简称 VCR)。由于电压、电流在 SI 单位制中的单位是伏和安,所以在  $u-i$  坐标平面上表示电阻元件特性的曲线——电压电流关系曲线又俗称为伏安特性曲线。

若电阻元件的伏安特性曲线不随时间变化,则该元件为时不变电阻,否则为时变电阻。若电阻元件的伏安特性曲线为一条经过原点的直线,称为线性电阻,否则为非线性电阻。

图 1-8(a)、(b)、(c)分别表示二端非线性电阻、线性时变电阻和非线性时变电阻的伏安特性曲线。

本书集中讨论的是下面描述的二端线性时不变电阻,简称线性电阻。

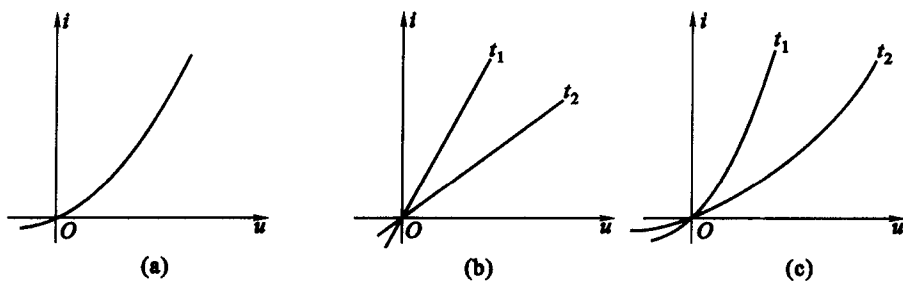


图 1-8 电阻的伏安特性曲线

### 一、线性电阻

线性电阻作为一种理想电路元件,它在电路图中的图形符号如图 1-9 所示。图中电流、电压的参考方向满足相关联的约束,在此参考方向之下,可得到图 1-10 所示的线性电阻元件的伏安特性曲线,此曲线是一条过原点的直线,在该直线上任一点的电压与电流之比等于该直线的斜率  $\tan\alpha$ ,它是一个与电压、电流无关的常数,将该常数  $R = \frac{u}{i}$  定义为线性电阻元件的电阻。因此,线性电阻的电压、电流关系由欧姆定律描述,其数学表达式为

$$u = Ri \quad (1-8)$$

或

$$i = Gu \quad (1-9)$$

式中,  $R$  称为元件的电阻,在 SI 中,其单位为欧[姆]( $\Omega$ );  $G$  称为元件的电导,在 SI 中,其单位为西[门子](S),两者满足倒数关系  $G = \frac{1}{R}$ 。线性电阻常用一个参数( $R$  或  $G$ )来描述,其符号与实际电阻器符号相同,但含义不同。

线性电阻元件有两种需特殊情况:开路 and 短路。无论电压为何有限值,电流恒等于零时二端电阻的状态,称为开路。开路时,图 1-10 中的  $\tan\alpha = \infty$ ,特性曲线与  $u$  轴重合,此时  $R$  为无限大。而无论电流为何有限值,电压恒等于零时二端电阻的状态,称为短路。短路时,  $\tan\alpha = 0$ ,特性曲线与  $i$  轴重合,此时  $R = 0$ 。

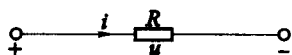


图 1-9 线性电阻元件

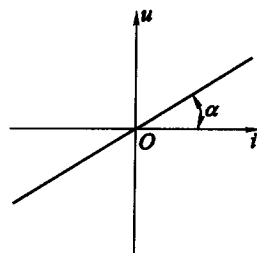


图 1-10 线性电阻元件的伏安特性

### 二、线性电阻元件吸收的功率

由上节讨论可知,当任何一个元件电压、电流取关联参考方向时,该元件吸收的功率为  $p =$

$ui$ , 图 1-9 所示的电阻元件及参考方向可得出线性电阻元件吸收的功率为

$$\left. \begin{aligned} p &= u \cdot i = Ri^2 = i^2/G \\ p &= u \cdot i = u^2/R = Gu^2 \end{aligned} \right\} \quad (1-10)$$

实际的电阻器件及由此抽象而来的电阻元件总是吸收功率的,不可能发出功率,称之为正电阻,而正电阻的电压和电流的实际方向总是一致的,与图 1-9 所示的参考方向相吻合。当  $R < 0$  (或  $G < 0$ ) 时,称为负电阻,由式(1-10)算出的负电阻吸收的功率  $p < 0$ ,表明负电阻可以发出功率,负电阻的电压和电流的实际方向总是相反的,某些电子器件(例如运算放大器等)构成的电子电路可以实现负电阻,它向外提供的能量来自电子电路工作时所需的电源。

需要特别指出的是:式(1-8)、(1-9)和(1-10)是在电压、电流采用关联参考方向下推导出的,若采用非关联参考方向,以上各式应改为

$$u = - Ri \quad (1-11)$$

$$i = - Gu \quad (1-12)$$

$$p = - ui = Ri^2 = Gu^2 \quad (1-13)$$

按照式(1-6),从  $t_0$  到  $t$  时间内,电阻元件吸收的电能  $W$  为

$$W = \int_{t_0}^t p dt = \int_{t_0}^t Ri^2 dt = \int_{t_0}^t Gu^2 dt \quad (1-14)$$

当电阻元件通过直流时,  $i = I$  不随时间变化,上式简化为

$$W = p(t - t_0) = RI^2 T = GU^2 T \quad (1-15)$$

式中,  $T = (t - t_0)$ ,  $I$  和  $U$  分别表示直流电流和直流电压。

**例 1-1** 某家用电器,一昼夜耗电  $1.8 \text{ kW} \cdot \text{h}$ ,工作电压为  $220 \text{ V}$ ,求该电器的功率和电阻值。

**解:** 该电器的功率,即每秒钟消耗的能量为  $p = \frac{1.8 \times 10^3 \times 3\,600}{24 \times 3\,600} \text{ W} = 75 \text{ W}$

该电器的电阻值为

$$R = \frac{U^2}{p} = \frac{48\,400}{75} \Omega \approx 645.3 \Omega$$

## 第四节 电路中的独立电源

电路中的耗能元件流过电流时,会不断消耗能量,因此,电路中必须有提供能量的元件——电源。常用的直流电源有干电池、蓄电池、直流发电机、直流稳压电源和直流稳流电源等。常用的交流电源有交流发电机、电力系统提供的正弦交流电源、交流稳压电源和产生多种波形的各种信号发生器等。为了得到各种实际电源的电路模型,本节介绍两种电路元件——独立电压源和独立电流源。

### 一、独立电压源

此处的独立二字是相对于下一章将要介绍的受控电源的受控二字而言的,简略地讲,所谓独



立电源是指其对外特性由电源本身的参数决定,而不受电源之外的其他参数控制。

### 1. 理想电压源

理想电压源是由内部损耗很小,以至可以忽略的实际电源抽象得到的理想化二端电路元件。如果一个实际电源的输出电压与外接电路无关,即电压源输出电压的大小和方向与流经它的电流无关,也就是说无论接什么样的外电路,输出电压总保持为某一个给定值或某一个给定的时间函数,则该电压源称为理想电压源。如果干电池的内阻为零,则无论外接负载如何,此干电池的端电压总保持常数,可见内阻可忽略的干电池就是一个最简单的理想电压源。

图 1-11(a)为理想电压源的电路符号,图 1-11(b)和(c)分别为直流理想电压源及其伏安特性曲线。它是一条与电流轴平行的直线,其纵坐标为直流理想电压源的电压参数  $U_s$ 。

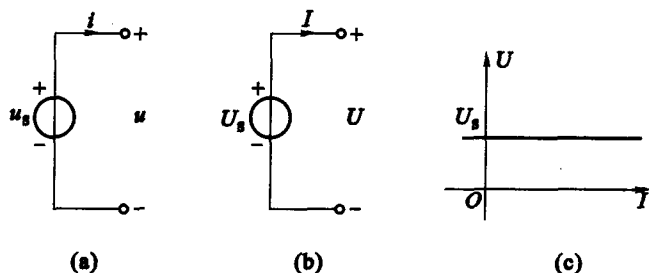


图 1-11 理想电压源及伏安特性曲线

由理想电压源的特性可知,当它与外电路相接时,流经它的电流及电源的功率由外电路确定。如果它的电压  $U_s = 0$ ,则此电压源的伏安特性曲线与电流轴重合,相当于短路,即电压为零的电压源相当于短路。电压源作为一个电路元件,可以向外电路发出功率也可以从外电路吸收功率,当其电压、电流采用关联参考方向时,它与其他电路元件一样,满足吸收的功率  $p = ui$ 。当  $p > 0$  时,电压源实际吸收功率;  $p < 0$  时,电压源实际对外发出功率。

### 2. 实际电源的电压源模型

理想电压源实际上是不存在的,无论是干电池还是发电机,在对外提供功率的同时,不可避免地存在内部的功率损耗。也就是说,实际电源是存在内阻的。以干电池为例,带上负载后,端电压将低于定值电压  $U_s$ ,负载电流越大,端电压越低,图 1-12(a)表示实际电源与外电路相接,图(b)表示其伏安特性。由图 1-12(b)所示的实际电源的对外特性可见,  $u$  是  $i$  的一次函数,可表示为

$$u = u_s - Ki$$

不随时间变化的电流、电压(直流)分别用大写的  $U$  和  $I$  表示,故上式记为

$$U = U_s - KI$$

与上述特性曲线及其表达式相应的电路模型如图 1-12(c)所示。

可见,实际电源的电压源模型是由理想电压源  $U_s$  与  $R_s = K$  的内阻串联构成的,其对外的伏安特性为

$$U = U_s - R_s I \quad (1-16)$$

当实际电源不接负载时,其端电压等于  $U_s$ ,此时内阻  $R_s$  不消耗功率,电压降等于零,称为开路状态,开路的端电压记为  $U_\infty$ 。当实际电源被短路时,如图 1-13 所示,其端电压  $U = 0$ ,此