

普通高等教育“十一五”规划教材
PUTONG GAODENG JIAOYU SHIYIWU GUIHUA JIAOCAI



DIANGONGXUE

电工学

(上册)

电工技术

张文生 主编
丁巧林 王鲁杨 副主编



中国电力出版社
<http://jc.cepp.com.cn>

普通高等教育“十一五”规划教材
PUTONG GAODENG JIAOYU SHIYIWU GUIHUA JIAOCAI



DIANGONGXUE

电工学

(上册)

电工技术

主 编 张文生
副主编 丁巧林 王鲁杨
编 写 周 军 张光烈
主 审 曾建唐



中国电力出版社

<http://jc.cepp.com.cn>

内 容 提 要

本书为普通高等教育“十一五”规划教材。

本套书由东北电力大学、华北电力大学、上海电力学院合作编写，分为上册（电工技术）、下册（电子技术）。

上册系统介绍了电工技术的必备知识，共分十一章，主要内容包括电路的基本概念和基本定律、电路的基本分析方法、正弦交流稳态电路、三相电路、非正弦周期电流电路、电路的暂态分析、磁路和变压器、三相异步电动机、同步发电机、继电器接触器控制系统、可编程控制器及其应用。各章配有丰富的例题、习题、练习与思考题，部分章节有参考答案，便于自学。

本书主要作为高等院校非电类专业本科教材，也可作为高职高专教育、成人教育、电大等相关专业的教学用书，同时可作为有关工程技术人员的参考书。

图书在版编目 (CIP) 数据

电工学. 上册/张文生主编. —北京: 中国电力出版社, 2007. 1

普通高等教育“十一五”规划教材

ISBN 978 - 7 - 5083 - 4805 - 6

I. 电... II. 张... III. 电工学—高等学校—教材 IV. TM1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 150380 号

中国电力出版社出版、发行

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

北京市同江印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2007 年 2 月第一版 2007 年 2 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 18 印张 436 千字

印数 0001—3000 册 定价 27.00 元

版 权 专 有 翻 印 必 究

(本书如有印装质量问题, 我社发行部负责退换)

前 言

为贯彻落实教育部《关于进一步加强高等学校本科教学工作的若干意见》和《教育部关于以就业为导向深化高等职业教育改革的若干意见》的精神,加强教材建设,确保教材质量,中国电力教育协会组织制订了普通高等教育“十一五”教材规划。该规划强调适应不同层次、不同类型院校,满足学科发展和人才培养的需求,坚持专业基础课教材与教学急需的专业教材并重、新编与修订相结合。本书为新编教材。

本书由东北电力大学、华北电力大学、上海电力学院共同执笔,结合各校多年教改的经验和成果,参照教育部颁布的“电工学”课程教学基本要求及近几届全国电工学教学年会电工学教材改革的基本精神编写的。在编写时注意了以下原则:

(1) 注意贯彻理论与实际相结合的原则,以利于培养学生分析问题和解决问题的能力。

(2) 注意贯彻少而精的原则,认真精选内容,做到主次分明、详略得当。上册理论教学时数约为70学时,实践教学时数约为20学时。

(3) 体现循序渐进的原则,由浅入深、由易到难、由简到繁,对于教材中的关键点、难点、重点尽量做透彻阐述。

(4) 教材内容的安排与有关课程密切配合,避免互相脱节和不必要的重复。

(5) 叙述行文尽量做到通俗易懂,便于自学。

本书是国内三所电力学科院校首次合作编写的电工学教材,编写时既注意了电力系统内非电类专业学生学习的特点,也充分考虑了系统外非电类各专业的需求,突出了交流电路分析、三相电路、非正弦周期电流电路、三相变压器等内容。考虑到发电厂、电力系统及相关领域学生的需要,特别增加了同步发电机一章内容。

教材中尽可能多地介绍了当今电工电子前沿技术及最新成果,如异步电动机软起动技术、变频变压调速技术,同步发电机的新型励磁方式、可编程序控制器等内容。

全书由东北电力大学张文生教授任主编,华北电力大学丁巧林副教授、上海电力学院王鲁杨副教授任副主编。第一、三、四、七章由丁巧林编写、第二、五、八、九章由王鲁杨编写,第六、十、十一章由张文生编写,东北电力大学周军副教授、张光烈副教授参加了部分章节的编写、修改工作,最后由张文生组织和统稿。本书由北京市高等学校教学名师曾建唐教授主审,并提出了很多宝贵意见,在此表示感谢。

全书在中国电力出版社指导下完成,并且在编写过程中作者借鉴了有关参考资料。在此,对中国电力出版社各位编辑及参考资料的作者一并表示感谢。

由于时间仓促及编者水平有限,书中疏漏与错误在所难免,恳请广大读者提出宝贵意见,以便修改。

编 者

2006年9月

目 录

前 言

第一章 电路的基本概念和基本定律	1
1.1 电路和电路模型	1
1.2 电流、电压及其参考方向	2
1.3 功率的计算	6
1.4 电阻元件与欧姆定律	7
1.5 理想电源	9
1.6 受控电源	12
1.7 基尔霍夫定律	14
1.8 电位及其计算	19
1.9 电阻的串、并联及其等效变换	21
习题	27
第二章 电路的基本分析方法	32
2.1 电压源与电流源及其等效变换	32
2.2 支路电流法	35
2.3 节点电压法	37
2.4 叠加定理	41
2.5 等效电源定理	44
习题	51
第三章 正弦交流稳态电路	54
3.1 电感元件和电容元件	54
3.2 正弦电流和电压	59
3.3 相量法的基础	62
3.4 电阻、电感、电容单一元件的交流电路	68
3.5 <i>R</i> <i>L</i> <i>C</i> 串联的交流电路	72
3.6 阻抗及其串、并联等效化简	78
3.7 正弦稳态电路的功率	85
* 3.8 功率因数的提高	90
* 3.9 复杂正弦交流电路的分析与计算	93
* 3.10 正弦交流电路的频率特性	95
习题	101

第四章 三相电路	109
4.1 三相电源和三相负载.....	109
4.2 相电压(相电流)、线电压(线电流)及其关系.....	113
4.3 简单对称三相电路的计算.....	116
4.4 对称三相电路的功率计算.....	119
习题.....	121
第五章 非正弦周期电流电路	123
5.1 非正弦周期电压和电流.....	123
5.2 非正弦周期量的分解.....	124
5.3 非正弦周期量的有效值、平均值和功率.....	127
5.4 非正弦周期电路的计算.....	133
习题.....	135
第六章 电路的暂态分析	137
6.1 换路定则及初始值的确定.....	137
6.2 一阶电路的零输入响应.....	140
6.3 一阶电路的零状态响应.....	145
6.4 一阶电路的全响应.....	149
6.5 一阶电路暂态分析的三要素法.....	150
6.6 RC 电路对系列矩形脉冲的响应.....	153
习题.....	155
第七章 磁路和变压器	158
7.1 磁路及其基本定律.....	158
7.2 交流铁心线圈电路.....	165
7.3 变压器.....	169
习题.....	181
第八章 三相异步电动机	184
8.1 三相异步电动机的构造.....	184
8.2 三相异步电动机的工作原理.....	186
8.3 三相异步电动机的定、转子电路分析.....	191
8.4 三相异步电动机的转矩与机械特性.....	194
8.5 三相异步电动机的起动、反转和制动.....	199
8.6 三相异步电动机的调速.....	207
8.7 三相异步电动机的铭牌.....	210
8.8 单相异步电动机.....	213
习题.....	215

* 第九章 同步发电机	217
9.1 同步发电机的构造	217
9.2 同步发电机的空载运行	219
9.3 同步发电机的电枢反应	221
9.4 同步发电机的有载运行	224
9.5 同步发电机单机运行时的功率调节	227
9.6 同步发电机的并联运行	229
9.7 同步发电机的励磁方式	232
习题	234
第十章 继电接触器控制系统	235
10.1 常用低压控制电器	235
10.2 三相异步电动机直接起动的控制线路	244
10.3 实用电气控制系统举例	249
习题	250
第十一章 可编程序控制器及其应用	252
11.1 可编程序控制器的结构和工作原理	252
11.2 PLC 的基本指令和编程	257
11.3 可编程序控制器控制系统的设计及应用举例	266
习题	269
附录 习题参考答案	272
参考文献	278

第一章 电路的基本概念和基本定律

本章主要讨论电路模型、电流和电压的参考方向、功率的计算、理想电路元件、基尔霍夫定律、电路中电位的概念及计算等，这些内容都是正确分析和计算电路的基础。

1.1 电路和电路模型

1.1.1 电路的组成与作用

电路(circuit)是电流的通路,实际电路是为了实现某种功能由电气设备或电气器件相互连接而成的整体。常见的电气设备有发电机、变压器、电动机、电热炉等;常见的电子器件有二极管、三极管、晶闸管等。它们可统称为电路元件(circuit elements)。

实际电路形式多样,千差万别,功能各不相同。例如图1-1(a)所示的电力系统电路,在发电厂内发电机把热能、水能、核能等能量转换为电能,再经变压器升压后由输电线路完成电能的传输,建在用户端的变电站经变压器降压后将电能分配给负荷。通过负荷(电动机、电热炉、家用电器等等)把电能最后转化为机械能、热能或其他形式的能量。又如图1-1(b)所示的扩音机电路,话筒将语言

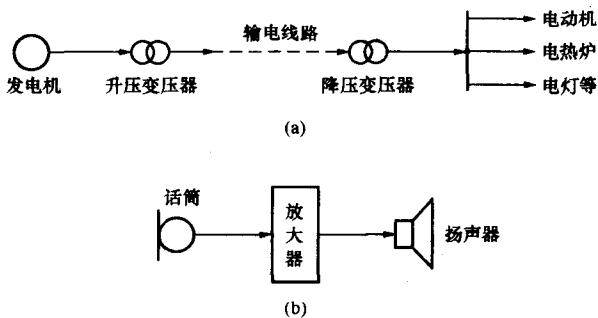


图 1-1 电路示意图
(a) 电力系统电路; (b) 扩音机电路

或音乐信号转化为相应的电压和电流,通过放大器将信号放大后传递到扬声器,扬声器再把经放大的电信号还原为语言或音乐。类似的例子还有电视机、收音机中的信号接收和放大电路、控制计算机中的电路,可以实现对采集的外部信号进行分析、计算、处理和储存等功能,仪表电路可以对电压和电流等电信号进行测量等等,不胜枚举。

无论电路多么复杂、大小有所不同,但按电路结构总可将其划分为三部分,即提供电能或电信号的电源(source)部分、吸收电能或电信号的负载(load)部分、其余电路的中间环节(middle part)部分。有时为了分析方便也可以将电路简单划分为两部分,即电源部分和吸收电能或接收电信号的负载部分。

电路中的电压和电流是在电源或信号源的作用下产生的,因此,电源又称为激励(excitation)。由激励在电路中产生的电压和电流统称为响应(response)。有时根据激励和响应之间的因果关系,把激励又称为输入(input),响应称为输出(output)。

1.1.2 电路模型

电路模型(circuit model)是对实际电路进行科学抽象的结果,简称电路。电路是由理

想电路元件和理想导线相互连接而成的整体。理想电路元件(ideal circuit element)是人为假想的理想化元件,具有特定的电磁特性和数学定义,可用相应的电路参数来表征,是构成电路模型的最小元素。例如理想电阻元件、理想电感元件、理想电容元件、理想电压源、理想电流源及理想受控源等等,这些元件统称为电路元件。在后面的学习中,将逐个介绍这些常用的电路元件。

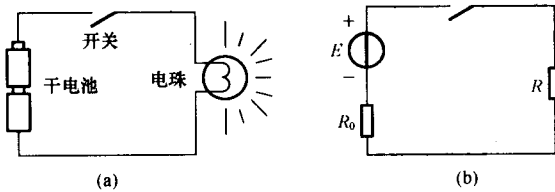


图 1-2 手电筒电路及其电路模型

(a) 手电筒电路; (b) 电路模型

将一个实际电路抽象为电路模型的过程,也是突出电路及电路器件的主要电磁特性和忽略其次要因素的过程,又称建模过程,其结果与实际电路的工作条件以及对计算精度的要求有关。例如手电筒电路:其实际电路器件有干电池、电珠、开关和筒体,接线图如图 1-2 (a) 所示;电路模型如图 1-2 (b) 所示,其中,

理想电阻元件 R 是电珠的电路模型,理想电压源 E 和理想电阻元件 R_0 的串联组合是干电池的电路模型,筒体起传导电流的作用,其电阻忽略不计,用理想导线表示。可见,实际电路器件的电路模型是由理想电路元件或理想电路元件的串、并联组合与理想导线组成的。在后面的学习中还将介绍一些常见电路器件的电路模型。

图 1-2 (b) 所示的电路模型又称电路图(circuit diagram)。在电路图中,将理想电路元件用特定的电路符号表示;理想导线可以画成直线、折线或曲线,其特点是处处等电位。

对于给定的实际电路问题,通常采用模型分析法进行分析计算,分三步完成。第一步,将实际电路抽象为相应的电路模型;第二步,对电路模型进行分析计算;第三步,将所得结果与实际电路结合,做出科学解释。

电路理论所研究的主要对象是电路模型,其主要任务就是研究电路的基本规律及其计算方法,并用电压、电流、功率等物理量进行表征,一般不涉及元件内部发生的物理过程。

练习与思考

1. 实际电路是怎样组成的,主要作用是什么?
2. 如何理解理想电路元件与实际电路器件的含义?它们的关系如何?
3. 电路模型与实际电路的主要区别是什么?组成它们的基本元素一样吗?
4. 模型分析法分几步完成对实际电路问题的分析计算?每一步的任务是什么?

1.2 电流、电压及其参考方向

在电路分析中涉及的物理量主要有电流、电压、电荷、磁链、功率和能量等。这些物理量在物理学中都曾有介绍,这里仅对在本课程中常用的电流、电压、功率作简要复习。重点介绍电流、电压的参考方向和功率的计算。

1.2.1 电流及其参考方向

电荷的定向移动形成**电流** (current)。我们把单位时间内通过导体横截面的电荷量定义为**电流强度** (current density)，用以衡量电流的大小。电流强度通常简称为**电流**，用 $i(t)$ 或 i 表示，即

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

大小和方向随时间而变化的电流称为**交变电流**，简称交流 (alternating current，简称为 ac 或 AC)，一般用小写字母 $i(t)$ 表示。大小和方向都不随时间改变的电流，称为**恒定电流**，或**直流电流** (direct current，简称为 dc 或 DC)，直流电流用大写字母 “ I ” 表示。

在国际单位制中，电荷 $q(t)$ 的单位是 C (库仑)、时间 t 的单位是 s (秒)、电流 $i(t)$ 的单位是 A (安培)。

电流的方向是客观存在的，习惯上把正电荷移动的方向规定为电流的方向，为了与以后常用的参考方向相区别，又把正电荷移动的方向称为电流的**实际方向**。

对结构比较复杂的直流电路，可能无法直接判断各电流的实际方向。在交流电路中，电流的大小和方向随时间时刻在变化，也无法准确得知其实际方向。这就给电流的计算带来不便。为此，在分析和计算电路时，可先任意选定某一方向作为电流的方向，并把这个方向称为**电流的参考方向或正方向** (reference direction)。图 1-3 所示为电流参考方向的两种表示方法 (其中方框表示一个元件或者是一部分电路)：用箭头 “ \rightarrow ” 表示，如图 (a) 所示；用带双下标的字母表示，如图 1-3 (b) 所示，“ i_{ab} ” 表示 i 的参考方向由 a 指向 b。

由于参考方向是人为任意选定的，可能与实际方向相同，也可能与实际方向相反，我们用电流的正、负值加以区别。当参考方向与实际方向相同时，电流取正值，即 $i > 0$ ；当参考方向与实际方向相反时，电流取负值，即 $i < 0$ 。或者按选定的参考方向对电路进行计算：当计算结果 $i > 0$ 时，表示参考方向与实际方向相同； $i < 0$ 时，表示参考方向与实际方向相反，如图 1-4 所示。

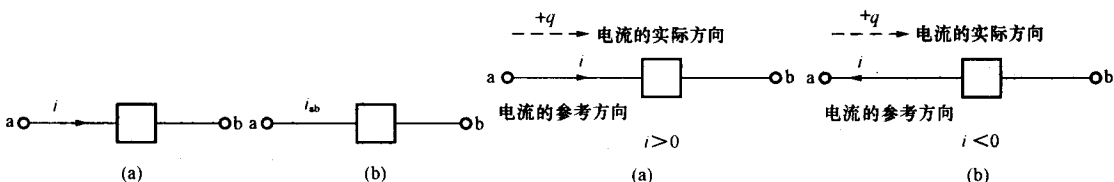


图 1-3 电流的参考方向

(a) 用箭头表示；(b) 用双下标表示

图 1-4 电流的参考方向与实际方向的关系

(a) 参考方向与实际方向相同；(b) 参考方向与实际方向相反

1.2.2 电压及其参考方向

电压 (voltage) 是用来描述电场力对电荷做功能力的物理量。如果电场力将单位正电荷 dq 从电场的高电位点 a 经过电路移动到低电位点 b 所做的功是 dw ，则 ab 两点之间的电压为

$$u = \frac{dw}{dq} \quad (1-2)$$

如果电压的大小或方向随时间变化，则称为**交流电压** (alternating voltage)，用 $u(t)$ 或 u 表示；如果电压的大小和方向都不随时间变化，则称为**恒定电压**或**直流电压** (direct voltage)，用大写字母 U 表示。

在国际单位制中,功的单位是 J (焦耳)、电荷的单位是 C (库仑)、电压的单位是 V (伏特)。

电压是个标量,为了表示电场力对电荷做功的方向,习惯上将由高电位指向低电位的方向规定为电压的方向,并称作电压的实际方向或实际极性。

与电流一样,在分析计算电路以前,要先给电压任意选定一个方向(极性, polarity), 并把这个方向(极性)称作电压的参考方向(参考极性)。图 1-5 所示为电压参考方向的三种表示方法:用符号“+”表示参考高电位,用符号“-”表示参考低电位,如图 1-5 (a) 所示;用箭头“→”所指方向表示电位降落方向,如图 1-5 (b) 所示;用带双下标的字母表示,如图 1-5 (c) 所示,其中“ u_{ab} ”表示 a 点是参考高电位, b 点是参考低电位。当参考方向与实际方向相同时,电压取正值,即 $u > 0$; 当参考方向与实际方向相反时,电压取负值,即 $u < 0$, 如图 1-6 所示。

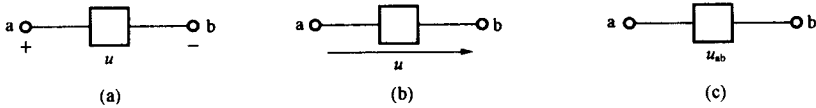


图 1-5 电压的参考方向

(a) 用符号“+”、“-”表示; (b) 用箭头“→”表示; (c) 用带双下标的字母表示



图 1-6 电压参考方向与实际方向的关系

(a) 参考方向与实际方向相同; (b) 参考方向与实际方向相反

显然,有了参考方向以后,电流和电压都变成了代数数量。以后对电路进行计算时,要养成先选参考方向后计算的习惯。计算结果的大小表示电压或电流的大小;正、负号与参考方向结合起来确定电压或电流的实际方向。

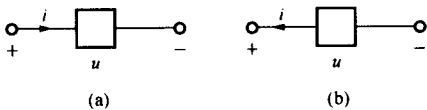


图 1-7 电流与电压参考方向的关系

(a) 关联参考方向; (b) 非关联参考方向

由于电压和电流的参考方向是任意指定的,对于同一元件,电压与电流参考方向的关系有两种可能性:当电流参考方向从电压的参考“+”极性端流入,经过元件从电压的参考“-”极性端流出时,称电流与电压为**关联参考方向**(conform with the passive sign convention);当电流参考方向从电压的参考“-”极性端流入,经过元件从电压的参考“+”极性端流出时,称电流与电压为**非关联参考方向**,如图 1-7 所示。

实际电路中的电压和电流的变化范围是很大的,可以采用辅助单位如 mA (毫安)、 μA (微安)、kA (千安)、MA (兆安) 及 mV (毫伏)、kV (千伏) 等计量。

1.2.3 电动势

电动势 (electromotive force) 是用来描述非电场力对电荷做功能力的物理量。如果非

电场力将单位正电荷 dq 从电场的低电位点 b 经过电源内部移动到高电位点 a 所做的功是 $d\omega$, 则 ab 两点之间的电动势为

$$e = \frac{d\omega}{dq} \quad (1-3)$$

如果电动势的大小或方向随时间变化, 则称为交变电动势, 用 $e(t)$ 或 e 表示; 如果电动势的大小或方向不随时间变化, 则称为恒定电动势或直流电动势, 可用大写字母 E 表示。

在国际单位制中, 电动势的单位与电压的单位相同。

习惯上将由电源的低电位端经过电源指向高电位端的方向规定为电动势的方向。在电路计算中, 电动势的方向通常是已知的, 其参考方向与实际方向是一致的。

【例 1-1】 已知某一直流电压源的电动势 $E=6\text{V}$, 内阻忽略不计, 如图 1-8 所示。求图中两种参考方向下的端电压 U 。

解 图 1-8 (a) 中, 端电压 U 参考极性与电动势实际极性相同, 所以

$$U = 6\text{V}$$

图 1-8 (b) 中, 端电压 U 参考极性与电动势实际极性相反, 所以

$$U = -6\text{V}$$

可见, 当端电压的参考方向与电动势的实际极性一致时, 端电压就等于电动势。以后我们将更多地用端电压描述电压源的特性。

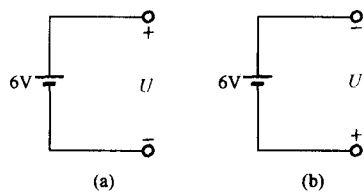


图 1-8 例 1-1 的电路

练习与思考

- 图 1-3 (a) 所示电路中, 如果 $i = -2\text{A}$, 则电流的实际大小和实际方向如何?
- 图 1-3 (b) 所示电路中, 如果 $i_{ab} = -1\text{A}$, 电流的实际方向是由 a 流向 b 端吗?
- 图 1-5 (a) 所示电路中, 如果 $u = 5\text{V}$, 则 a 端电位比 b 端电位高还是低? a 、 b 两端电位差是多少? 如果 $u = -5\text{V}$, 结果又将如何?
- 图 1-5 (c) 所示电路中, 如果 $u_{ab} = -6\text{V}$, 则 a 端电位比 b 端电位高还是低? a 、 b 两端电位差是多少?
- 如图 1-9 所示电路中, 说明哪几种情况属于关联参考方向, 哪几种情况属于非关联参考方向?

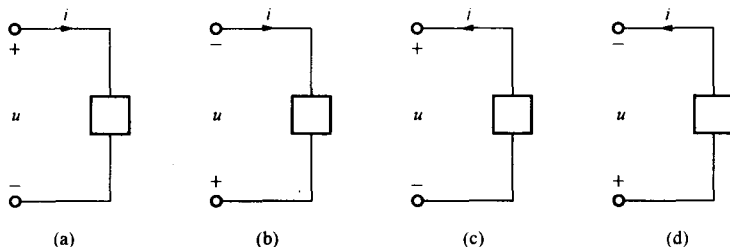


图 1-9 练习与思考 5 图

1.3 功率的计算

由于电路在正常工作状态下总伴随着电能与其他形式能量的相互转换,所以在电路分析中,能量与功率的计算十分重要。

根据能量守恒定律可知,当电路的某些元件消耗能量时,电路的其他元件一定在提供能量。把单位时间内某一元件提供或消耗的能量称为该元件的电功率 (electric power),简称功率,用 $p(t)$ 或 p 表示,则

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

对于直流电路,功率为

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

在国际单位制中,当能量的单位为 J (焦耳),时间的单位为 s (秒) 时,电功率的单位是 W (瓦特,简称瓦)。

功率与电压、电流有密切关系。例如对于电阻元件,当正电荷从电压的“+”极性端经过元件移动到电压的“-”极性端时,电场力对电荷做功,此时元件消耗能量或吸收功率 (dissipate power); 对于电源元件,当正电荷从电压的“-”极性端经元件移动到电压的“+”极性端时,非电场力对电荷做功(电场力对电荷做负功),此时元件提供能量或发出功率 (supply power)。

以上结论对参考方向下的功率计算有重要意义。

(1) 当电压和电流取关联参考方向时,如图 1-7 (a) 所示,公式 $p(t) = ui$ 的物理意义是表示元件吸收功率。但由于 u 、 i 在参考方向下都是代数量,所以计算结果有两种可能性。当 $p > 0$ 时,表示元件吸收(消耗)功率;当 $p < 0$ 时,表示元件实际提供(发出)功率。

(2) 当电压和电流的参考方向为非关联参考方向时,如图 1-7 (b) 所示,公式 $p(t) = ui$ 的物理意义是表示元件提供功率,当 $p > 0$ 时,表示元件确实提供(发出)功率;当 $p < 0$ 时,表示元件实际吸收(消耗)功率。

【例 1-2】 计算图 1-10 中各元件的功率,并判断元件实际是提供功率还是吸收功率。

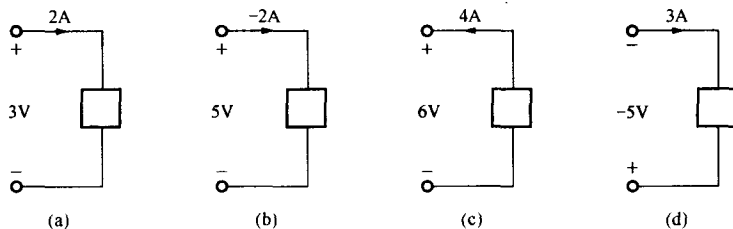


图 1-10 例 1-2 图

解 图 1-10 (a): 电压与电流为关联参考方向,元件吸收的功率为

$$P = 3 \times 2 = 6\text{W}, \text{即实际吸收功率 } 6\text{W}.$$

图 1-10 (b): 电压与电流为关联参考方向,元件吸收的功率为

$$P = 5 \times (-2) = -10\text{W}, \text{即实际提供功率 } 10\text{W}.$$

图 1-10 (c): 电压与电流为非关联参考方向,元件提供的功率为

$$P = 6 \times 4 = 24\text{W}, \text{即实际提供功率 } 24\text{W}.$$

图 1-10 (d): 电压与电流为非关联参考方向, 元件提供的功率为

$$P = (-5) \times 3 = -15\text{W}, \text{即实际吸收功率 } 15\text{W}.$$

可见, 一个元件消耗的功率等于其提供功率的负值; 或者提供的功率等于消耗功率的负值。

需要说明的是, 以上电路图中表示元件的方框, 也可以表示一部分电路。因此对某一元件的功率计算方法, 同样适用于某一部分电路的功率计算。

练习与思考

1. 当元件的电压与电流取关联参考方向时, $p = ui$ 表示元件消耗功率。那么 $p = -ui$ 的物理意义是什么?
2. 当元件的电压与电流取非关联参考方向时, $p = ui$ 表示元件提供功率。那么 $p = -ui$ 的物理意义是什么?
3. 如果已知元件电流和电压的实际方向, 如何判断元件是提供功率还是吸收功率?

1.4 电阻元件与欧姆定律

1.4.1 电路元件

电路元件是构成电路模型的最小单元, 每一个元件通过其端子与外部电路相连接, 元件的电磁特性可通过端电压与端电流的关系 (伏安特性) 进行描述。

电路元件的分类方法很多, 例如根据其外部连接的端子数目可分为二端元件、三端元件及多端元件; 根据伏安特性的特点可分为线性元件和非线性元件; 根据功率特性可分为耗能元件和储能元件等等。

常见的二端元件有电阻元件、电感元件、电容元件、电压源、电流源等, 而受控源则属于多端元件。

1.4.2 电阻元件

电阻元件 (resistor) 是反映电路耗能特性的元件, 二端线性电阻元件 (linear resistor) 的电路符号如图 1-11 (a) 所示, 在任一瞬间其端电压和电流的关系服从欧姆定律 (Ohm's law)。当电压与电流取关联参考方向时, 如图 1-11 (b) 所示, 其电压与电流的关系即伏安特性 (voltage-current relation 或 volt-ampere relation) 可表示为

$$u = Ri \quad \text{或} \quad i = Gu \quad (1-6)$$

当电压与电流取非关联参考方向时, 如图 1-11 (c) 所示, 其伏安特性可表示为

$$u = -Ri \quad \text{或} \quad i = -Gu \quad (1-7)$$

式中: 比例系数 R 是元件的参数, 称为电阻 (resistance), 对于线性电阻元件, R 是一个正实常数, 电阻的单位是欧姆 (Ω)。而 $G = \frac{1}{R}$, 称为元件的电导 (conductance), 电导的单位是 S (西门子)。

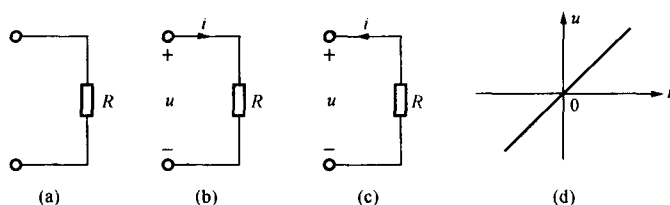


图 1-11 电阻元件及其伏安特性曲线

(a) 电路符号; (b) 关联参考方向; (c) 非关联参考方向; (d) 伏安特性曲线

电阻元件的伏安特性还可以用 $u-i$ 平面上的曲线表示, 简称伏安特性曲线 (volt-ampere characteristic)。对于线性电阻元件, 其伏安特性曲线是一条过原点的直线, 如图 1-11 (d) 所示 ($R \geq 0$)。

当电压与电流取关联参考方向时, 如图 1-11 (b) 所示, 电阻元件消耗的功率为

$$p = ui = Ri^2 = \frac{u^2}{R} = Gu^2 \quad (1-8)$$

当电压与电流取非关联参考方向时, 如图 1-11 (c) 所示, 电阻元件消耗的功率等于提供功率的负值, 即

$$p = -ui = Ri^2 = \frac{u^2}{R} = Gu^2 \quad (1-9)$$

可见, 当 R 和 G 都是正实常数时, 电阻元件消耗的功率恒大于零。因此电阻元件是一种耗能元件。

以后为了叙述方便, 把电阻元件简称为电阻, “电阻”和“ R ”即表示电阻元件的参数, 又表示一个电阻元件。伏安特性是求解电路的基本依据, 为书写方便, 可将伏安特性简写为 VCR 或 VAR。

实际的电阻性用电设备有两类, 在一定条件下可以用线性电阻元件作为其电路模型。一类是在电子电路中常用的各种电阻元件, 实验室用的各种标准电阻、滑线变阻器等; 另一类是借电阻发热而达到其应用目的的用电设备, 例如白炽灯、电热炉、电烙铁等等。其伏安特性曲线可通过实验测得。其他电路器件及各种导线实际上都有一定的电阻, 当它的存在对计算结果产生一定影响时, 要考虑在其电路模型中计及其电阻值。

【例 1-3】 如图 1-12 所示电路, 求电压 U 或电流 I 。

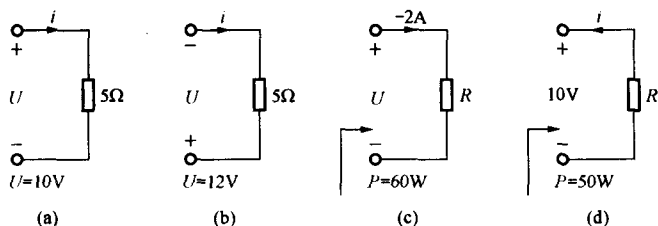


图 1-12 例 1-3 的电路图

解 直流电路, 电压、电流用大写字母表示。

图 1-12 (a): U 与 I 为关联参考方向, 由式 (1-6) 可得

$$I = \frac{U}{R} = \frac{10}{5} = 2A$$

图 1-12 (b): U 与 I 为非关联参考方向, 由式 (1-7) 可得

$$I = -\frac{U}{R} = -\frac{12}{5} = -2.4\text{A}$$

图 1-12 (c): U 与 I 为关联参考方向, 由式 (1-8) 可得

$$U = \frac{P}{I} = \frac{60}{-2} = -30\text{V}$$

图 1-12 (d): U 与 I 为非关联参考方向, 吸收的功率等于提供功率的负值, 所以

$$I = -\frac{P}{U} = -\frac{50}{10} = -5\text{A}$$

【例 1-4】 有一台额定值^①为 220V/1500W 的电热炉, 接在 220V 的电源上, 求流过电热炉端线的电流及此时电热炉的电阻。如果用电热炉加热 3h (小时), 将消耗多少电能?

解 将电热炉看成是一个电阻元件, 则流过电热炉端线的电流及此时电热炉的电阻

$$I = \frac{P}{U} = \frac{1500}{220} = 6.818\text{A}$$

$$R = \frac{U^2}{P} = \frac{U}{I} = 32.267\Omega$$

加热 3h (小时), 将消耗电能

$$W = Pt = 1500 \times 3 = 4.5\text{kW} \cdot \text{h}$$

练习与思考

1. 一个额定功率为 10W 的 20k Ω 电阻器, 求它的额定电压和额定电流是多少?
2. 有一个额定值为 60W、220V 的白炽灯。分别将其接在 220、110、380V 的电源上, 求三种情况下流过电灯的电流及其电阻值。比较电灯的亮度, 说明会有什么后果?
3. 已知人体电阻的最小值为 800 Ω , 当通过人体的电流超过 50mA 就会造成死亡。求安全工作电压的最大限值是多少?

1.5 理想电源

1.5.1 理想电压源

理想电压源是实际电源的理想化模型, 简称**电压源** (voltage source), 电路符号如图 1-13 (a) 所示。它是一个二端元件, 所提供的电压 $u_s(t)$ 随时间按一定规律变化, 其大小和极性与外电路无关, 是独立的。当 $u_s(t)$ 为恒定值时, 这种电压源称为直流电压源或恒定电压源, 可用大写字母 U_s 表示, 电路符号可用图 1-13 (b)、(c) 表示, 其中长划表示电压源的“+”极性端, 短划表示电压源的“-”极性端。下面以直流电压源为例讨论其伏安特

^① 额定值是制造厂为了使产品能在给定的工作条件下正常运行而规定的正常允许值。大多数电气设备的寿命与绝缘材料的绝缘强度和耐热性能有关。当所加电压超过额定值过多时, 绝缘材料可能被击穿; 当电流超过额定值过多时, 由于发热过多, 将使绝缘加速老化, 使设备使用寿命受到影响。

性和功率特性。

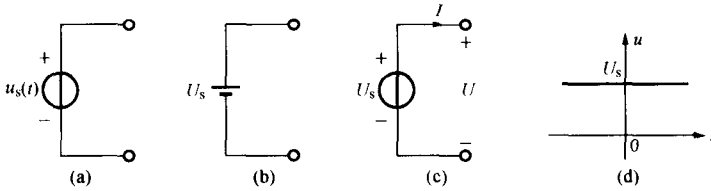


图 1-13 理想电压源及其伏安特性曲线

取电压源端电压、端电流参考方向如图 1-13 (c) 所示, 则其端电压 (terminal voltage)

$$U = U_s \quad (1-10)$$

可见, 理想电压源的端电压就等于电压源的电压, 端电流 I 随外接电路的改变而改变, 其大小和方向由外接电路和 U_s 共同决定。

理想电压源的伏安特性曲线如图 1-13 (d) 所示, 对于直流电压源, 其伏安特性是一条与电流轴平行的直线, 电压不变, 电流可为正、为负或为零。

特别地, 当 $U_s = 0$ 时, 理想电压源的端电压 $U = 0$, 对外电路而言, 相当于短路。

如图 1-13 (c) 所示, 流过电压源的电流与端电压取非关联参考方向, 电压源提供的功率

$$P = U_s I \quad (1-11)$$

当 $P > 0$ 时, 称电压源为电源状态; 当 $P < 0$ 时, 称电压源为负载状态。

1.5.2 理想电流源

理想电流源也是实际电源的理想化模型, 简称电流源 (current source), 电路符号如图 1-14 (a) 所示, 它也是一个二端元件, 它所提供的电流 $i_s(t)$ 随时间按一定规律变化, 其大小和方向是独立的, 与外接电路无关。当 $i_s(t)$ 为恒定值时, 这种电流源称为直流电流源或恒定电流源, 用 I_s 表示。以下以直流电流源为例讨论其伏安特性和功率特性。

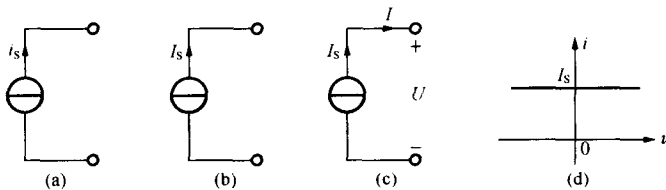


图 1-14 理想电流源及其伏安特性曲线

(a) 电路符号; (b) 直流电流源; (c) 端电压、端电流参考方向; (d) 伏安特性曲线

取端电流、端电压参考方向如图 1-14 (c) 所示, 则端电流

$$I = I_s \quad (1-12)$$

可见, 理想电流源的输出电流就等于电流源的电流, 端电压 U 是不定的, 随外接电路的改变而改变, 其大小和极性由外接电路和 I_s 共同决定。

理想电流源的伏安特性如图 1-14 (d) 所示, 对于直流电流源, 伏安特性是一条与电压轴平行的直线, 电流不变, 电压可正、可负, 也可为零。

特别地, 当 $I_s = 0$ 时, 理想电流源的端电流 $I = 0$, 对外电路而言, 相当于断路或开路。

如图 1-14 (c) 所示, 电流源的端电压与电流取非关联参考方向, 电流源提供的功率