

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



DIANLU YU DIANZI JISHU

电路与电子技术

张 俐 刘明丹 主 编
初永良 漆向军 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



DIANLU YU DIANZI JISHU

电路与电子技术



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。

全书共分十四章,包括电路理论基础和电子技术基础两部分,主要内容为直流电路,正弦交流电路,电路的过渡过程分析,变压器,交流电动机及其控制,可编程控制器,电子基本元器件,基本放大电路,集成运算放大器,整流电路、滤波电路及稳压电路,门电路和组合逻辑电路,触发器和时序逻辑电路,数/模、模/数转换, Multisim 8 软件简介。本书既注重基本知识和基本内容的全面性、完整性,同时对知识的关键点、难点也进行了较深入的分析和讨论。

本书可作为普通高等院校理工科非电类专业基础课程的教材,也可供其他工科专业选用和广大读者阅读参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

电路与电子技术/张俐,刘明丹主编. —北京:中国电力出版社, 2010. 1

普通高等教育“十一五”规划教材

ISBN 978 - 7 - 5083 - 9822 - 8

I. ①电… II. ①张…②刘… III. ①电路理论-高等学校-教材②电子技术-高等学校-教材 IV. ①TM13②TN01

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 223190 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

*

2010 年 3 月第一版 2010 年 3 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 25 印张 613 千字

定价 39.80 元

敬告读者

本书封面贴有防伪标签,加热后中心图案消失

本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究



前言

“电路与电子技术”课程是理工科高等学校非电类专业的重要技术基础课程之一。

由于科学技术的飞速发展,电气技术作为一门非常实用的技术,得到了迅速的发展和广泛的应用,并且已经日益渗透到其他学科和领域,在我国社会主义现代化建设中占有极其重要的地位。

本书是非电专业的技术基础课,通过本课程的系统学习,可使学生获得必要的电气技术基本理论和基本知识,受到相关的基本技能训练,学习和掌握一定的电气专业技术,培养学生工程实践素质、理论运用于实践的能力,为后续相关课程的学习以及从事与本专业有关的工程技术、科学研究等工作奠定理论基础和实践基础。

本书内容包括电路理论基础和电子技术基础两部分。本书的特点是:以介绍电路和电子技术的基本概念、分析方法及其工程运用为目的;保证基础,精选内容,深入浅出,通俗易懂,图文并茂;基本概念清楚,重点突出,难点不难,便于教与学;结构合理,系统性强,能使学生建立完整有序的知识体系,为后续课程的学习和实践打下良好的基础;面向更新,力求以反映新技术、新动向为编写原则,以先易后难、先静态后动态,以例题说明应用定理及解题的规律和方法,遵循人们普遍的认识规律,引导读者循序渐进、由浅入深的形式进行内容的编排。

本书在内容的组织上,既注重基本知识和基本内容的全面性、完整性,同时对知识的关键点、难点也进行了较深入的分析和讨论。为此,首先学习电路的基本理论,包括相关的定理、定律与分析方法,介绍了应用性较强的工厂常用电机和控制技术,引进了新的控制技术——可编程控制器、软控制技术等;在电子技术方面,介绍了模拟电路和数字电路的基础知识。考虑到目前电子技术的飞速发展,适当地加强了新技术的内容,例如第十四章中引入了 Multisim 8 软件在电路与电子技术中的应用知识。在每章之前有内容简介,每章之后有小结和习题。

本书共分十四章,主要内容有直流电路,正弦交流电路,电路的过渡过程分析,变压器,交流电动机及其控制,可编程控制器,电子基本元器件,基本放大电路,集成运算放大器,整流电路、滤波电路和稳压电路,门电路和组合逻辑电路,触发器和时序逻辑电路,数/模和模/数转换, Multisim 8 软件简介。书中带“*”的章节可根据不同专业和各校教学要求决定取舍。在电路电子技术课程的讲授过程中,由于各专业对该课程的要求不同,学时安排也有区别,所以各院校可根据具体的教学要求对以上教学内容作适当的调整。

本书由张俐、刘明丹任主编,初永良、漆向军任副主编。书中,第一、三章由四川农业大学刘明丹老师编写,第二、四、五章由东北农业大学张俐老师编写,第六~八章由东北农业大学初永良老师编写,第九、十、十三章由哈尔滨理工大学吕艳玲老师编写,第十一、十二、十四章由四川农业大学漆向军老师编写。

本书由东北电力大学张文生教授审稿并提出许多宝贵意见,在此表示衷心的感谢。

限于编者的水平所限,书中难免有不妥和疏漏之处,敬请读者批评指正。

编者

2009年2月



目

录

前言

第一章 直流电路	1
第一节 电路的基本概念与基本定律.....	1
第二节 电路的分析方法	18
本章小结	33
习题	35
第二章 正弦交流电路	38
第一节 正弦交流电的基本概念	38
第二节 正弦量的相量表示法	41
第三节 R 、 L 、 C 的正弦交流电路	44
第四节 简单正弦交流电路分析	49
第五节 正弦交流电路的功率及功率因数	55
第六节 复杂正弦交流电路分析	58
*第七节 交流电路的频率特性	59
第八节 三相交流电路	64
本章小结	78
习题	81
第三章 电路的过渡过程分析	85
第一节 换路定则及初始值	85
第二节 一阶电路的零输入响应	87
第三节 一阶电路的零状态响应	89
第四节 一阶电路的全响应	91
第五节 一阶电路的三要素法	93
第六节 微分电路和积分电路	94
本章小结	96
习题	96
第四章 变压器	99
第一节 磁路的基本概念	99
第二节 磁性材料.....	102
第三节 交流铁芯线圈电路.....	103
第四节 电磁铁.....	107
第五节 变压器.....	109
小结.....	120
习题.....	121

第五章 交流电动机及其控制	125
第一节 三相异步电动机的基本结构及工作原理.....	125
第二节 三相异步电动机特性分析.....	132
第三节 三相异步电动机的使用.....	139
第四节 三相异步电动机的选择与经济运行.....	152
第五节 单相异步电动机及其应用.....	155
第六节 控制电动机.....	158
第七节 电气控制技术.....	167
本章小结.....	181
习题.....	183
第六章 可编程控制器	186
第一节 概述.....	186
第二节 PLC 的组成及各部件的作用	188
第三节 PLC 的工作原理	190
第四节 PLC 的编程语言	192
第五节 PLC 的控制系统的设计过程	194
本章小结.....	195
习题.....	196
第七章 电子基本元器件	198
第一节 半导体的基本知识.....	198
第二节 二极管.....	201
第三节 半导体三极管.....	203
本章小结.....	206
习题.....	207
第八章 基本放大电路	210
第一节 基本放大电路.....	210
第二节 放大电路的分析方法.....	212
第三节 射极输出器.....	219
第四节 多级放大电路.....	222
第五节 差动放大电路.....	224
第六节 功率放大电路.....	228
本章小结.....	230
习题.....	231
第九章 集成运算放大器	234
第一节 集成运算放大器简介.....	234
第二节 集成运放在信号运算方面的应用.....	238
第三节 集成运放在信号处理方面的应用.....	245
第四节 集成运放应用中的几个问题.....	268
本章小结.....	271

习题	272
第十章 整流电路、滤波电路及稳压电路	278
第一节 整流电路	278
第二节 滤波电路	284
第三节 稳压电路	288
本章小结	299
习题	300
第十一章 门电路和组合逻辑电路	303
第一节 基本逻辑门电路	303
第二节 逻辑函数及表达方式	307
第三节 TTL 与非门	313
第四节 组合逻辑电路的分析与设计	315
第五节 组合逻辑电路	318
本章小结	325
习题	326
第十二章 触发器和时序逻辑电路	328
第一节 触发器	328
第二节 寄存器	334
本章小结	344
习题	344
第十三章 数/模、模/数转换	347
第一节 数/模转换器	347
第二节 模/数转换器	355
本章小结	366
习题	367
第十四章 Multisim 8 软件简介	368
第一节 Multisim 8 软件简介	368
第二节 Multisim 8 基本界面	368
第三节 对元器件的操作	372
第四节 Multisim 8 软件在电路与电子技术中的应用	375
参考文献	391

第一章 直流电路

本章主要介绍电路的基本概念、电路的组成、电路的基本物理量,电压源与电流源及其等效变换、基尔霍夫定律、支路电流法、节点电压法、叠加定理、戴维南定理及诺顿定理等常用的定理和电路分析方法。

直流电路中的很多概念、定理及解题方法也适用于正弦交流电路及其他各种线性电路。故本章的内容是学习本课程后续各章的基础。

第一节 电路的基本概念与基本定律

一、电路的作用与构成

电流的路径叫做电路。电路是由一些电气设备、元件(例如发电机、电动机、电炉、电阻、电感和电容等)和电子元器件(例如晶体管和集成电路等)按一定方式连接而成的。电路的种类繁多、用途各异,但其基本作用可以概括为两大类,下面通过实例加以说明。

(一) 电路能够实现电能的输送和转换

通过电路实现电能的输送和转换的应用极为广泛,以电力系统为例,它主要是由电源、负载和中间环节三个组成部分,其电路及作用如图1-1(a)所示。

在输配电电路中,作为电源的发电机是供应电能的设备。它能够把水能、热能、核能转化为电能。除了发电机外,电池也是常用的电源。作为负载的电动机、电炉、电灯等是取用电能的设备,它们分别把电能转化为机械能、热能、光能等。中间环节包括变压器、输电线路、控制装置和保护装置,是连接电源和负载的部分,它起传输分配电能和控制保护电路的作用。

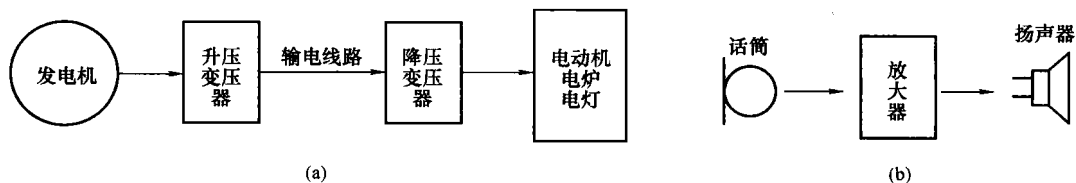


图 1-1 电路示意图

(a) 电力系统; (b) 扩音机

(二) 电路能够实现信号的传递和转换

用电路实现信号的传递与转换的应用也相当广泛,以扩音机为例加以说明,其电路如图1-1(b)所示。扩音机作用是由话筒把声音(通常称为信息)转化为相应的电压和电流(即电信号),经由放大器放大后,通过电路传递到扬声器,把电信号还原为声音。信号的这种转换和放大,称为信号的处理。

在扩音机电路中,话筒是输出信号的设备,称为信号源,相当于电源,但与发电机、电池这种电源不同,信号源输出的电信号(电压和电流)的变化规律是取决于所加的信息。扬

声器是接收和转换信号的设备，相当于负载。

在电能的传输和转换或者信号的传递和处理的过程中，把电源或信号源的电压或电流称为激励，它推动电路工作；把激励在电路各部分产生的电压或电流称为响应。电路分析，就是在已知电路的结构和元件参数的条件下，探讨电路的激励和响应之间的关系。

二、电路模型

功能各异的实际电路，需要的元件及器件各不相同。在电路分析中，我们并不直接研究实际电路，而是研究实际电路的数学模型，即电路模型。任何一个电路都具有的四个基本组成

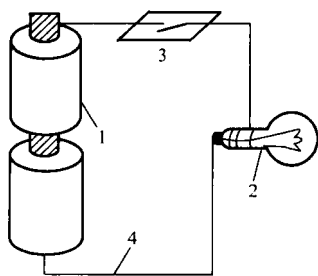


图 1-2 手电筒电路

1—电源；2—负载；
3—控制元件；4—连接导线

部分。如图 1-2 所示的手电筒电路，是最简单的直流电路，由电源、负载、控制元件、连接导线四部分组成。实际电路是由许多不同的电子、电器器件按某种要求相互连接而成。

对于某一具体器件来说，其电磁性质可能较为复杂，如图 1-2 所示为手电筒电路，它通电后能将电能转化为光能和热能，这种消耗电能的性质可看作具有电阻的性质，与此同时由于有电流的通过，在其周围还会产生电场和磁场，储存电场能和磁场能，所以还具有电容和电感的性质，但在所有这些性质中占主导地位的是电阻性质，其他性质对电路的研究影响甚微，由此可以认为负载灯泡是一电阻元件。

为了便于对实际电路进行分析和用数学描述，将实际元件理想化（或称为模型化），即在一定条件下突出其主要的电磁性质，忽略其次要因素，把它近似地看作理想电路元件。由一些理想电路元件所组成的电路，就是实际电路的电路模型，它是对实际电路电磁性质的科学抽象和概括。在理想电路元件（今后理想两字常略去不提）中主要有电阻元件、电感元件、电容元件和电源元件等。

今后所分析的电路都是指电路模型，简称电路。在电路图中，各种元件用规定的图形符号来表示。

三、电路的基本物理量及参考方向

电流、电压是电路的基本物理量。电路分析的任务就是求解电路方程，计算电路中的电流、电压、功率。本节着重说明电压、电流的参考方向及其意义。

（一）电流

1. 电流的定义

单位时间内通过导体横截面的电荷量定义为电流强度，简称为电流。用字母 i 表示，即

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

2. 电流的单位

电流的单位：在微电系统中（如晶体管电路中），常用 mA（毫安）、 μ A（微安）表示；在强电系统中，常用 A（安）、kA（千安）表示。它们之间的换算关系是

$$1\text{kA} = 10^3\text{A}$$

$$1\text{mA} = 10^{-3}\text{A}$$

$$1\mu\text{A} = 10^{-6}\text{A}$$

3. 电流的实际方向及参考方向

电流不但有大小,而且有方向,规定正电荷运动的方向为电流的实际方向。在一些很简单的电路中,电流的实际方向是显而易见的,它是从电源正极流出,经负载流向电源负极的。但在一些稍复杂的电路里,如图 1-3 所示的桥形电路中, R_5 上的电流实际方向就不是一看便知的。不过, R_5 上电流的实际方向只有 3 种可能:①从 a 流向 b;②从 b 流向 a;③既不从 a 流向 b,又不从 b 流向 a (R_5 上电流为零)。所以说,对电流这个物理现象可以用代数量来描述它。简言之,电流是代数量,当然可以像研究其他代数量问题一样选择正方向,即参考方向。假定正电荷运动的方向为电流的参考方向,用箭头标在电路图上。若无特殊说明,就认为电路图上所标箭头是电流的参考方向。对电路中电流设参考方向还有另一方面的原因,那就是在交流电路中电流的实际方向在不断地改变,因此很难在这样的电路中标明电流的实际方向,而引入电流的参考方向也就解决了这一难题。在对电路中电流确定出参考方向以后,若经计算得出电流为正值,说明所设参考方向与实际方向一致;若经计算得出电流为负值,说明所设参考方向与实际方向相反。电流值的正与负在设定参考方向的前提下才有意义。

4. 电流的实际测量

在直流电路中,测量电流时要根据电流的实际方向将电流表 PA1、PA2 串联接入待测支路里,即如图 1-4 所示那样接入电路,两侧所标“+”、“-”号是直流电流表的正、负极。在交流电流中,交流电流应使用交流电流表进行测量。

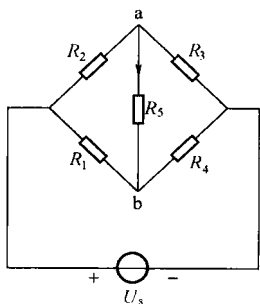


图 1-3 桥形电路

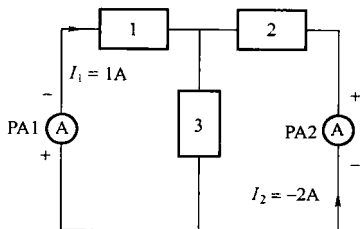


图 1-4 直流电流测试电路

例 1-1 图 1-5 (a) 中的方框用来泛指元件。设 1A 的电流由 a 向 b 流过图中所示元件,试问如何表示这一电流?

解 有两种表示方式:

- (1) 用图 1-5 (b) 表示: $i_1 = 1\text{A}$ 。这是因为电流的参考方向与实际方向一致。
- (2) 用图 1-5 (c) 表示: $i_1 = -1\text{A}$ 。这是因为电流的参考方向与实际方向相反。

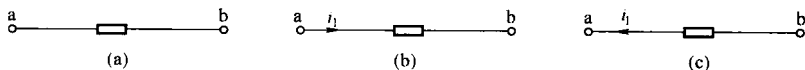


图 1-5 例 1-1 图

(二) 电压

1. 电压的定义

两点之间的电位之差即是两点间的电压。从电场力做功概念定义,电压就是将单位正电

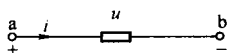


图 1-6 定义电压示意图

荷从电路中一点移至电路中另一点电场力做功的大小,如图 1-6 所示。用数学式表示,即为

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

式中: dq 为由 a 点移至 b 点的电荷量, C ; dw 为移动电荷 dq 电场力所做的功, J 。

2. 电压的单位

电压的单位是 V (伏特), $1V$ 电压相当于为移动 $1C$ (库仑) 正电荷电场力所做的功为 J (焦耳)。在电力系统中单位 V 较小, 常用 kV (千伏) 作电压单位。在无线电电路中电压单位 V 太大, 常用 mV (毫伏)、 μV (微伏) 作电压单位。

3. 电压的实际方向与参考方向

首先介绍一下电位概念, 在分析和计算电路时, 常常将电路中的某一点选作参考点, 并将参考点的电位规定为零, 于是电路中其他任何一点与参考点之间的电压就是该点的电位。

从电位、电压定义可知它们都是代数量, 因而也有参考方向问题。电路中, 规定电位真正降低的方向为电压的实际方向。但在复杂的电路中, 元件两端电压的实际方向是不易判别的, 而在交流电路里两点间电压的实际方向是经常改变的, 这给实际电路问题的分析计算带来困难, 所以也常常对电路中两点间电压设出参考方向。所谓电压参考方向, 就是所假设的电位降低之方向, 在电路图中用 “+”、“-” 号标出, 或用带下脚标的字母表示。如电压 u_{ab} , 其角标中第一个字母 a 表示假设电压参考方向的正极性端, 第二个字母 b 表示假设电压参考方向的负极性端。以后如无特殊说明, 电路图中 “+”、“-” 标号就认为是电压的参考方向。在设定电路中电压参考方向以后, 若经计算得电压 u_{ab} 为正值, 说明 a 点电位实际比 b 点电位高; 若 u_{ab} 为负值, 说明 a 点电位实际比 b 点电位低。同电流一样, 两点间电压数值的正与负是在设定参考方向的条件下才有意义。电压大小、方向均恒定不变时为直流电压, 常用大写 U 表示。

习惯上, 电压 U 的参考方向规定为由高电位端指向低电位端, 即为电位降低的方向。电源电动势 E 的参考方向规定为在电源内部由低电位端指向高电位端, 即为电位升高的方向。

4. 电压的实际测量

电压的实际测量有直流和交流之分。

对直流电压的测量, 是根据电压的实际方向, 将直流电压表并联接入电路, 使直流电压表的正极接所测电压的实际高电位端, 负极接所测电压的实际低电位端。譬如, 理论计算得 $U_{ab} = 5V$, $U_{bc} = -3V$, 要测量这两个直流电压, 电压表应如图 1-7 所示那样接入电路中, $PV1$ 、 $PV2$ 为电压表, 两边的 “+”、“-” 标号分别为直流电压表的正、负极性端。交流电压的测量应使用交流电压表进行。

例 1-2 在图 1-8 (a) 局部电路中, 如果已知元件两端的电压值为 $2V$, 且已知正电荷由该元件的 b 点移向 a 点获得能量, 试问如何表示这一电压?

解 有两种表示方式:

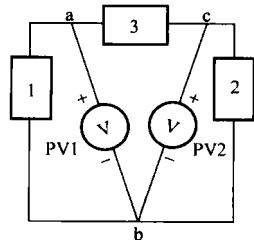


图 1-7 直流电压测量电路

(1) 图 1-8 (b) 表示: $U=2\text{V}$ 。这是因为电压的参考方向与实际方向一致。

(2) 图 1-8 (c) 表示: $U=-2\text{V}$ 。这是因为电压的参考方向与实际方向相反。

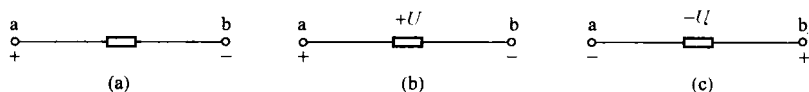


图 1-8 例 1-2 图

(三) 电功率

在电路的分析与计算中, 研究能量的分配和交换是重要内容之一, 而功率可直接反映出支路及整个电路的能量变化情况。

1. 功率的定义

单位时间做功大小称为功率, 或者说做功的速率称为功率。在电路问题中涉及的电功率即是电场力做功的速率, 以符号 $p(t)$ 表示。功率的数学定义式可写为

$$p(t) = \frac{dw}{dt} \quad (1-3)$$

式中: dw 为 dt 时间内电场力所做的功。

2. 功率的单位

功率的单位为 W (瓦)。1W 功率就是每秒做功 1J, 即 $1\text{W}=1\text{J/s}$; 常用的单位还有 mW (毫瓦)、kW (千瓦) 等。

3. 功率的计算

在电路中, 人们更关注的是功率与电流、电压之间的关系。以图 1-9 所示电路为例加以讨论。图中矩形框代表任意一段电路, 其内可以是电阻, 可以是电源, 也可以是若干电路元件组合。电流的参考方向设成从 a 流向 b, 电压的参考方向设成 a 为高电位端, b 为低电位端, 这样所设的电流电压参考方向称为关联参考方向。设在 dt 时间内, 在电场力作用下由 a 点移动到 b 点的正电荷量为 dq , a 点至 b 点电压 u 意味着单位正电荷从 a 移动到 b 点电场力所做的功, 那么移动 dq 正电荷电场力做的功为 $dw=udq$ 。电场力做功说明电能损耗, 损耗的这部分电能被 ab 这段电路所吸收。下面具体推导出 ab 这段电路吸收的电功率与其电压、电流之间的关系。由

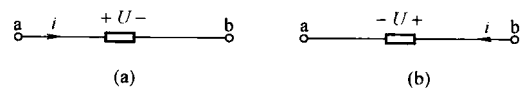


图 1-9 关联参考方向图

$$u = \frac{dw}{dq}$$

得

$$dw = u dq$$

再由

$$i = \frac{dq}{dt}$$

得

$$dt = \frac{dq}{i}$$

根据功率定义 $p(t)=dw/dt$, 得到

$$p(t) = ui \quad (1-4)$$

4. 功率计算中电压与电流的关联参考方向

分析电路时, 电流和电压都要假设参考方向, 而且可以任意假设, 互不相关。但为了分

析方便,我们常采用关联参考方向,即电压参考方向与电流参考方向一致,也就是电流从电压标“+”号的端钮流入,如图1-9(a)、(b)所示。

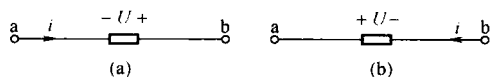


图1-10 非关联参考方向图

如果电流、电压的参考方向相反,则为非关联参考方向,如图1-10(a)、(b)所示。此时,在计算吸收功率的公式中需冠以负号,即

$$p(t) = -ui \quad (1-5)$$

需要强调的是,当按电阻的发热惯例进行计算时(即吸收功率):在电压、电流参考方向关联的条件下,采用式(1-4);而在电压、电流为非关联参考方向的情况下,采用式(1-5)。经计算:若 p 为正值,该段电路吸收功率; p 为负值,该段电路吸收负功率,即该段电路向外发出功率,或者说产生功率。例如算得 ab 这段电路功率为 -3W ,那么说成 ab 段电路吸收 -3W ,即产生 3W 的功率。应特别注意根据电压、电流参考方向是否关联,来选用相应计算吸收功率的公式。一段电路所吸收的电功率为该段电路两端电压、电流之乘积。代入 u 、 i 数值,当按发电机惯例进行计算时(即供出功率),无论 u 、 i 参考方向关联或非关联,所用公式与计算吸收功率时的公式恰恰相反,即 u 、 i 参考方向关联,计算产生功率用 $-ui$ 计算; u 、 i 参考方向非关联,计算产生功率用 ui 计算。这是因为“吸收”与“供出”二者就是相反的含义,所以计算吸收功率与发出功率的公式符号相反是理所当然的事。

例1-3 如图1-11所示电路,已知 $i=1\text{A}$ 、 $u_1=3\text{V}$ 、 $u_2=7\text{V}$ 、 $u_3=10\text{V}$ 。试求 ab 、 bc 、 ca 三部分电路上各吸收的功率 p_1 、 p_2 、 p_3 。其中, u_{s1} 和 u_{s2} 为电压源。

解 对 ab 段、 bc 段,电压、电流参考方向关联,对 ca 段电路,电压、电流参考方向非关联,所以电路吸收功率

$$p_1 = u_1 i = 3 \times 1 = 3\text{W}$$

$$p_2 = u_2 i = 7 \times 1 = 7\text{W}$$

$$p_3 = -u_3 i = -10 \times 1 = -10\text{W}$$

实际上 ca 这段电路产生功率为 10W 。

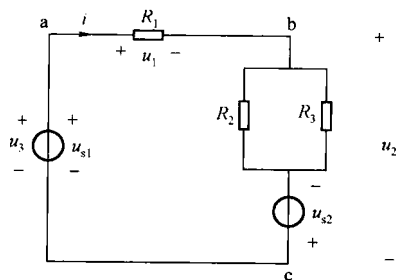


图1-11 例1-3图

由例1-3可以看出: $p_1 + p_2 + p_3 = 0$,即对一完整的电路来说,它产生的功率与消耗的功率总是相等的,称之为功率平衡。这一点通过能量守恒原理是容易理解的。

这里还需要指出:对电路中的电流、电压事先设参考方向是非常必要的,后面我们将会知道,不设电流、电压参考方向,电路中基本定律就不便应用,电路问题的分析计算就无法进行下去。

如何设电路中电流、电压参考方向是容易掌握的,原则上可以任意假设,不过为了避免公式中出现过多的负号(负号容易遗漏而引起计算差错),习惯上凡是一看便知的电流、电压实际方向,就设参考方向与实际方向一致;对于不易看出实际方向的,也不必花费时间去判别,只需在这些支路上任意假设一个参考方向即可;另外,还习惯把元件上电流、电压参考方向设成关联;有时为了简化,一个元件只设出电流或电压一个量的参考方向,意味着省略不设量的参考方向与设出量的参考方向关联。

四、欧姆定律

欧姆定律(Ohm's Law, 简记OL)是电路分析中重要的基本定律之一。它说明流过线

性电阻的电流与该电阻两端电压之间的关系，反映了电阻元件的特性。这里我们联系电流、电压参考方向讨论欧姆定律。

图 1-12 (a) 是理想电阻模型，设电压、电流参考方向关联；图 1-12 (b) 是它的伏安特性，是在 $u-i$ 平面一、三象限过原点的直线。写该直线的数学解析式，即有

$$u(t) = Ri(t) \quad (1-6)$$

此式就是欧姆定律公式。电阻的单位为 Ω (欧姆)。如果特性曲线的斜率不随时间而变化，则称为线性非时变电阻。

如果电阻 R 上的电流电压参考方向非关联，如图 1-13 所示，则欧姆定律公式中应冠以负号，即

$$u(t) = -Ri(t)$$

把电阻的倒数称电导，以符号 G 表示，即

$$G = \frac{1}{R} \quad (1-7)$$

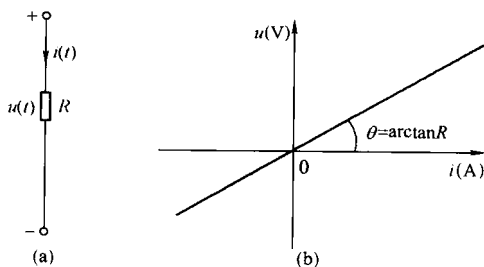


图 1-12 理想电阻模型及伏安特性
(a) 理想电阻模型；(b) 伏安特性曲线

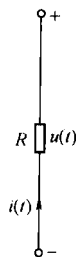


图 1-13 电流电压参考方向非关联

在国际单位制中，电导的单位是 S (西门子，简称西)。从物理概念上看，电导是反映材料导电能力强弱的参数，电阻、电导是从相反的两个方面来表征同一材料特性的两个电路参数。应用电导参数来表示电流和电压之间关系时，欧姆定律形式可写为

$$i(t) = Gu(t) \quad (1-8)$$

如果电阻 R 上的电流、电压参考方向非关联，如图 1-13 所示，则式 (1-8) 应冠以负号，即

$$i(t) = -Gu(t)$$

五、基尔霍夫定律

分析与计算电路的基本定理，除了欧姆定律之外，还有基尔霍夫电流定律和基尔霍夫电压定律。前者应用于节点，后者应用于回路。下面先介绍几个相关名词。

支路 (branch): 电路中的每一分支称为支路，一条支路流过一个电流，称为支路电流。图 1-14 所示的电路中共有三条支路。

节点 (node): 是指电路中有三条或三条以上的支路相连接的点。图 1-14 中共有 a 和 b 两个节点。

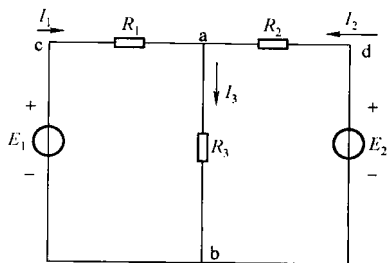


图 1-14 电路举例

回路 (loop): 是指由一条或多条支路所组成的闭合电路。图 1-14 中共有三个回路: adbca, abca, abda。

网孔 (mesh): 回路平面内不含有其他支路的回路就叫做网孔。图 1-14 所示电路中, 回路 abca 和 abda 就是网孔, 而回路 adbca 平面内含有 ab 支路, 所以它就不是网孔。

1. 基尔霍夫电流定律的基本形式

基尔霍夫电流定律可表述为: 在集总参数电路中, 任一时刻流出 (或流入) 任一节点的各支路电流的代数和恒等于零。

写成数学表达式为

$$\sum i = 0$$

该式为基尔霍夫第一定律, 简称为 KCL (Kirchhoff's Current Law)。

KCL 是从实践中总结出来的一个重要的客观规律, 它是电流连续性原理在集总参数电路中的表现形式。电流连续性原理指的是, 在单位时间内、在电路的任一节点上, 流入的电荷必须等于流出的电荷, 亦即电荷在任一节点上既不能积累、也不会消失。

电路的分析计算都是在事先指定参考方向的情况下进行。但一经确定之后, 在分析过程中, 不能随意改动。如图 1-15 所示电路中, 若设流入电流为正, 可写出 KCL 方程为

$$i_1 + i_4 - i_2 - i_3 - i_5 = 0$$

移项可得

$$i_1 + i_4 = i_2 + i_3 + i_5$$

可见, 也可按这样的方法列写 KCL 方程: 流出节点的电流总和等于流入节点的电流总和, 即

$$\sum i_o = \sum i_i \quad (1-9)$$

这就是基尔霍夫电流定律的另一种表示形式。

2. 基尔霍夫电流定律的推广形式

KCL 还可以推广运用到电路中任何一个假想的闭合面, 如图 1-16 所示。这种闭合面可称为电路的广义节点。若指定流入闭合面的电流为正, 则有

$$i_1 + i_2 - i_3 = 0$$

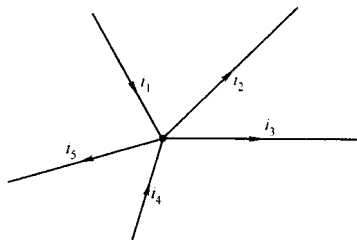


图 1-15 KCL 定律

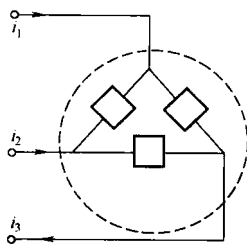


图 1-16 广义节点

例 1-4 已知图 1-17 所示电路中, $i_1 = 2\text{A}$, $i_2 = 1\text{A}$, $i_3 = -4\text{A}$, $i_4 = 3\text{A}$ 。试求其他各支路的电流。

解 电路中各支路电流参考方向如图 1-17 选定。

在节点 A 处, 利用 KCL 得

$$i_5 = i_1 + i_4 = 2 + 3 = 5\text{A}$$

对广义节点, 利用 KCL 得

$$i_9 = i_1 - i_3 = 2 - (-4) = 6\text{A}$$

节点 B

$$i_6 = -(i_1 + i_2) = -(1 + 2) = -3\text{A}$$

节点 C

$$i_7 = i_2 + i_3 = 1 - 4 = -3\text{A}$$

节点 D

$$i_8 = -(i_3 + i_4) = -(-4 + 3) = 1\text{A}$$

3. 基尔霍夫电压定律的基本形式

基尔霍夫电压定律可表示为：在集总参数电路中，在任一时刻，沿任一回路方向，回路中各支路电压降代数和恒等于零。用式子表示为

$$\sum u = 0$$

该式为基尔霍夫第二定律，简称为 KVL (Kirchhoff's Voltage Law)。

KVL 实质上是电压单值性的表现，是能量守恒原理和电荷守恒原理运用于集总电路的结果。电压单值性就是指电路中任意两点间的电压值与计算路径无关。

建立 KVL 方程时，必须先任意选一个回路参考方向，并在电路中标明。凡支路电压参考方向与回路参考方向一致者，该支路电压取正，反之取负。如图 1-18 所示。对回路 abcd，写出 KVL 方程

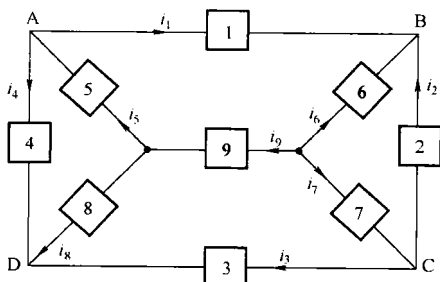


图 1-17 例 1-4 图

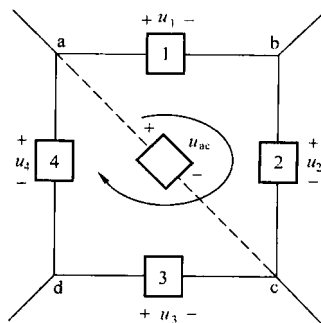


图 1-18 KVL 定律

$$u_1 + u_2 - u_3 - u_4 = 0$$

即

$$\sum u = 0$$

(1-10)

4. 基尔霍夫电压定律的推广形式

KVL 不仅适用于由实际元件构成闭合回路，也可以推广应用于假想的非闭合回路。如图 1-18 所示，假想在 ac 间接有一条支路，于是就出现两个假想回路，当选择回路参考方向分别为 abca 和 acda 时，其 KVL 方程为

$$u_1 + u_2 - u_{ac} = 0$$

或

$$u_{ac} - u_3 - u_4 = 0$$

移项即为

$$u_{ac} = u_1 + u_2$$

$$u_{ac} = u_3 + u_4$$

可见，ac 间的电压可按 abc 路径计算，也可按 adc 路径计算，电路中两点间的电压与计算路径无关。结论：求解电路中两点间的电压时，可以在该两点间选择任意路径，写出该路径上的电压降之和即可。

KCL 只限定每个节点上流入和流出的电流必须相等，KVL 只限定了任一闭合回路中各支路电压降的代数和必须为零，它们都没有涉及各支路元件的性质，因此与元件的性质无

关, 即无论是线性还是非线性电路, 这两个定律都适用。

例 1-5 图 1-19 为一条含源支路, 设 U_s 及 R 已知。

(1) 根据电路写出 U 、 I 的表达式;

(2) 若 U 的参考方向与图示方向相反, 重写 U 和 I 的表达式。

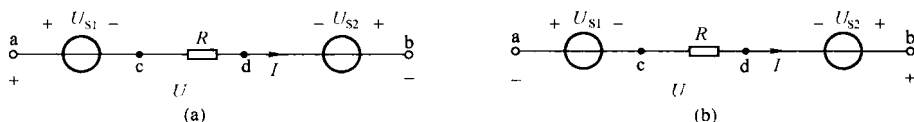


图 1-19 例 1-5 图

解 (1) 表达式为

$$U = U_{ab} = U_{ac} + U_{cd} + U_{db} = U_{s1} + RI - U_{s2}$$

$$I = \frac{U_{ab} + U_{s2} - U_{s1}}{R}$$

(2) 参考方向改变后

$$U = U_{ba} = U_{s2} - IR - U_{s1}$$

$$I = \frac{U_{s2} - U_{s1} - U}{R}$$

例 1-6 图 1-20 所示某电路中的一个回路, 通过 A、B、C、D 四个节点与电路的其他部分相连接, 求电阻 R 的大小。

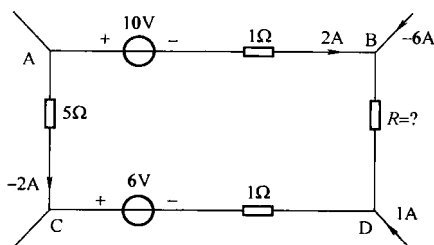


图 1-20 例 1-6 图

解 先按 KCL 求出图中的未知电流

$$I_{BD} = 2 + (-6) = -4A$$

$$I_{DC} = I_{BD} + 1A = (-4 + 1)A = -3A$$

再按 KVL 求出电阻 R 上的电压

$$\begin{aligned} U_{BD} &= -1 \times 2 - 10 + 5 \times (-2) + 6 - 1 \times I_{DC} \\ &= -13V \end{aligned}$$

从而求出电阻值

$$R = \frac{U_{BD}}{I_{BD}} = \frac{-13}{-4} = \frac{13}{4} (\Omega)$$

需要说明的是, 图中虽然未标出电阻 R 上的电流和电压的参考方向, 但在解题过程中用 I_{BD} 和 U_{BD} , 其下标已表明了电压和电流的参考方向。

六、电路的基本元件

电阻元件、电感元件、电容元件都是组成电路模型的基本元件。电阻元件具有消耗电能的性质 (电阻性), 其他电磁性质均可忽略不计; 电感元件具有通过电流要产生磁场而储存磁场能量的性质; 电容元件具有加上电压要产生电场而储存电场能量的性质。电阻元件是耗能元件, 后两者是储能元件。

(一) 电阻元件

电阻元件是电路的基本元件之一, 它是从对电流呈现阻力的实际元件中抽象出来的模型。例如, 在金属材料绕制的电阻器中, 电流实际上是由电子的定向移动形成的。事实上电子在受电场力作用作定向运动过程中, 必然会碰撞对电流要呈现一定的阻力, 当然也就有能