

高等职业教育教材

电工与电子技术

DIANGONGYUDIANZIJISHU

■ 王瑞清 马宏革 主编



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

高等职业教育教材

电工与电子技术

主 编	王瑞清	马宏革	
副主编	陈亚娜	杨志慧	
参 编	张智慧	王继明	赵继龙
	刘小兰	温赐奇	李一默
主 审	朱运利		



机械工业出版社

本书系统地介绍了电工电子技术的基本概念、基本理论、基本方法及其在实际中的应用。全书分3篇共13章。第一篇为电工基础,包括电路的基本概念和定律、电路的等效互换、线性电路的一般分析方法和基本定理及正弦交流电路;第二篇为电子技术基础,包括半导体器件、基本放大电路和多级放大电路、负反馈放大电路、集成运算放大器电路、直流稳压电路、数字电路基础知识、组合逻辑电路、集成触发器和时序逻辑电路;第三篇为电工电子技术实验与技能训练,包括基尔霍夫定律、叠加定理、戴维南定理、荧光灯电路的连接和功率因数的提高、三相交流电路、常用电子仪器的使用、单管放大电路分析、两级放大电路的分析、负反馈放大器、直流稳压电路、晶闸管调压电路、组合逻辑电路的测试和设计、集成触发逻辑功能测试等。

本书充分体现了高职高专教育的特点,集电工电子技术和应用于一体。全书叙述简明,概念清楚;知识结构合理,重点突出;内容深入浅出,通俗易懂,图文并茂;例题习题丰富。为了加强学生实践能力的培养,本书同时配有电工电子技术实验与技能训练等内容。

本书可作为各类高等职业学校机电类专业电工与电子技术课程教材或参考书,也可供计算机类、电子电气类、仪器仪表类专业人员及有关工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

电工与电子技术/王瑞清、马宏革主编. —北京:机械工业出版社, 2005.8

高等职业教育教材

ISBN 7-111-17022-9

I. 电… II. ①王…②马… III. ①电工技术-高等学校:技术学校-教材②电子技术-高等学校:技术学校-教材 IV. ①TM②TN

中国版本图书馆CIP数据核字(2005)第081687号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

责任编辑:曲彩云 责任印制:侯新民

廊坊市长虹印刷有限公司印刷·新华书店北京发行所发行

2005年8月第1版第1次印刷

787mm×1092mm $\frac{1}{16}$ ·19.75印张·478千字

定价:33.00元

前 言

本书是根据教育部制定的高等职业教育培养目标和规格的有关文件精神及电工电子课程的教学基本要求,结合电工电子系列课程建设实际,按照相关专业教学大纲的要求,结合多年来从事高职高专电工电子技术教学工作实践,参考电工电子技术在相关领域的应用编写而成的。

电工电子技术课程是高等学校工科类专业的一门技术基础课。它的任务是使学生通过本课程的学习,获得电工电子技术必要的基本理论、基本知识和基本技能,了解电工电子技术的应用和发展,为学习后续相关课程以及从事与本专业有关的工程技术工作和科学研究工作打下一定的基础。

本书配有一定数量的实验与技能训练项目,把基本理论与实际应用有机地结合在一起。通过实验与实训,不仅可以验证理论的正确性,而且能使熟悉常用电工电子仪器的使用、掌握电工电子电路故障的寻迹与维修、电子小产品的制作等技能。电工电子实验与技能训练项目也是很好的岗前培训内容。

本书集电工电子技术和应用于一体,在内容和结构上对电工电子课程进行了优化整合。在本书编写过程中,作者根据自己多年的教学经验及对课程改革的实践尝试,从时代发展、技术进步、知识结构、课程体系上进行总体考虑,力图实现以下目标:

叙述简明,内容深入浅出,通俗易懂,图文并茂,例题、习题丰富,便于教学;内容精练,基本概念清楚,重点突出,难点不难;系统性强,使学生建立完整有序的概念;知识结构合理,为进一步学习有关后续课程和实际应用打下良好基础;理论教学与实践教学紧密结合,注重学生智力开发和能力培养;力图反映新技术、新动向,以适应电工电子技术发展变化的需要。

本教材的理论教学时数约为 120 学时,实践教学时数约为 30 学时,在教学时可根据各专业的实际情况进行适当取舍。

参加本书编写工作的有王瑞清、马宏革、杨志慧、陈亚娜、张智慧、王继明、赵继龙、刘小兰、温赐奇、李一默等。本书由王瑞清、马宏革任主编,负责全书的组织、修改和定稿工作;由杨志慧、陈亚娜任副主编。由北京轻工职业技术学院副教授朱运利任主审。

同时,编写本教材过程中,得到了包头轻工职业技术学院各级领导的关心和大力支持,我们也曾参考了部分优秀教材,在此,谨对参考书目作者和学院领导表示感谢。

由于编者水平有限,书中缺陷和疏漏在所难免,恳请使用本教材的教师和读者提出宝贵意见,以便修改。

编 者
2005 年 6 月

目 录

前言

第一篇 电工基础 1

第一章 电路的基本概念和定律 1

第一节 电路与电路模型 1

第二节 电流与电压及其参考方向 2

第三节 电位 4

第四节 电功率与电能 5

第五节 电阻元件和欧姆定律 6

第六节 电压源与电流源 8

第七节 基尔霍夫定律 10

习题一 13

第二章 电路的等效互换 16

第一节 电阻的串、并、混联 16

第二节 两种电源模型的等效互换 21

习题二 23

第三章 线性电路的一般分析方法

和基本定理 25

第一节 支路电流法 25

第二节 叠加定理 27

第三节 戴维南定理 29

习题三 32

第四章 正弦交流电路 35

第一节 正弦量的基本概念 35

第二节 正弦量的相量表示法 41

第三节 电容元件和电感元件 45

第四节 三种元件伏安特性的相量形式 50

第五节 基尔霍夫定律的相量形式 57

第六节 RLC 串联电路 59

第七节 RLC 并联电路 63

第八节 正弦交流电路中的功率 65

第九节 串联、并联谐振 67

第十节 三相正弦交流电路 73

习题四 82

第二篇 电子技术基础 86

第五章 半导体器件 86

第一节 半导体的基本知识 86

第二节 半导体二极管 90

第三节 晶体管 94

习题五 99

第六章 基本放大电路和多级

放大电路 102

第一节 基本放大电路的组成及

工作原理 102

第二节 放大器的偏置电路与静态

工作点稳定 105

第三节 微变等效电路法 109

第四节 共集电极放大电路 113

第五节 多级放大电路 115

习题六 118

第七章 负反馈放大电路 122

第一节 反馈的基本概念 122

第二节 四种负反馈电路举例 123

第三节 负反馈对放大器性能的影响 126

第四节 深度负反馈电路放大倍数的

估算 127

习题七 128

第八章 集成运算放大器应用电路 130

第一节 集成运算放大器的应用基础 130

第二节 集成运算放大器的线性应用 132

习题八 137

第九章 直流稳压电路 138

第一节 直流稳压电源 138

第二节 整流及滤波电路 139

第三节 直流稳压电路 146

第四节 晶闸管及可控整流电路 150

习题九 157

第十章 数字电路基础知识 160

第一节 数制和编码 160

第二节 逻辑代数 165

习题十 179

第十一章 组合逻辑电路 182

第一节 组合逻辑电路的分析和设计·····	182	实验十 单相整流、滤波和稳压电路·····	243
第二节 组合逻辑电路中的竞争 和冒险·····	188	实验十一 晶闸管调压电路·····	246
习题十一·····	190	实验十二 组合逻辑电路的测试 和设计·····	248
第十二章 集成触发器·····	194	实验十三 集成触发逻辑功能测试·····	251
第一节 基本 RS 触发器·····	194	附录·····	254
第二节 时钟控制的触发器·····	195	附录 1 电阻器、电容器及其标称值·····	254
第三节 主从触发器·····	198	附录 2 半导体分立器件型号 命名法·····	258
第四节 不同触发器间的转换·····	205	附录 3 部分半导体器件型号和参数·····	260
习题十二·····	206	附录 4 国产半导体集成电路型号 命名法·····	263
第十三章 时序逻辑电路·····	209	实训·····	264
第一节 时序逻辑电路的分析方法·····	209	实训一 常用的电工工具及使用·····	264
第二节 计数器·····	215	实训二 导线的连接与绝缘层的恢复·····	268
习题十三·····	220	实训三 常用电工仪表的使用·····	273
第三篇 实验与技能训练·····	221	实训四 照明线路的敷设与安装·····	277
实验一 基尔霍夫定律·····	221	实训五 动力线路的敷设与安装·····	282
实验二 叠加定理·····	223	实训六 常用电子元件·····	285
实验三 戴维南定理·····	225	实训七 焊接工艺与技术·····	288
实验四 荧光灯电路的连接和其功率 因数的提高·····	227	实训八 晶体管收音机原理及组装·····	291
实验五 三相交流电路·····	229	实训九 数字电子计时器·····	296
实验六 常用电子仪器的使用·····	231	实训十 交通灯控制逻辑电路设计·····	300
实验七 单管放大电路分析·····	236	参考文献·····	307
实验八 两级放大电路分析·····	239		
实验九 负反馈放大器·····	241		

第一篇 电工基础

第一章 电路的基本概念和定律

本章介绍了电路和电路模型，电路的主要物理量，电流、电压参考方向的基本概念，着重阐述了电阻元件、电压源、电流源的元件特性和反映元器件连接特性的基本定律——基尔霍夫定律。

第一节 电路与电路模型

一、电路

电路是电流的流径，它是由一些电气设备和元器件按一定方式连接而成的。复杂的电路呈网状，又称网络。电路和网络这两个术语是通用的。

电路的组成方式不同，功能也不同，它的一种作用是实现电能的传输和转换，各类电力系统就是典型实例。图 1-1a 是一种简单的实际电路，它由干电池、开关、小灯泡和连接导线等组成。当开关闭合时，它把电能转化为热能和光能；开关和连接导线的作用是把干电池和小灯泡连接起来，构成电流通路。

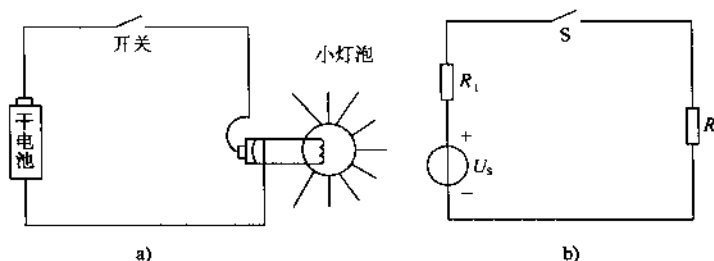


图 1-1 电路的组成

电路的另一作用是实现信号的处理，收音机和电视机电路就是这类实例。收音机和电视机中的调谐电路是用来选择所需要信号的。由于收到的信号很弱，需要放大电路对信号进行放大。调谐电路和放大电路的作用就是完成对信号的处理。

电路中提供电能或信号的器件，称为电源，如图 1-1a 中的干电池。电路中吸收电能或输出信号的器件，称为负载，如图 1-1a 中的小灯泡。在电源和负载之间引导和控制电流的导线和开关等是传输控制器件。因此，电路是通过传输控制器件将电源和负载连接起来而构成的。电路的基本作用是实现电能传输和信号处理。

二、理想电路元件

组成电路的实际电气器件是多种多样的，其电磁性能的表现往往是相互交织在一起的。

但在研究时,为了便于分析,常常在一定条件下对实际器件加以理想化,只考虑其中起主要作用的某些电磁现象,而将次要现象忽略,或者将一些电磁现象分别表示。如图 1-1a 中,在电流的作用下,小灯泡不但发热消耗电能,而且在其周围还会产生一定的磁场。由于产生的磁场较弱,因此,可以只考虑其消耗电能而忽略其磁场效应;干电池不但在其正负极间能保持有给定的电压对外部提供电能,而其内部也有一定的电能损耗,可以将其提供电能的性能与内部电能损耗分别表示;对闭合的开关和导线只考虑导电性能而忽略其本身的电能损耗。

如上所述,在一定的条件下,我们用足以反映其主要电磁性能的一些理想电路元件或它们的组合来模拟实际电路中的器件。理想电路元件是一种理想化的模型,简称为电路元件。每一种电路元件都只表示一种电磁现象,各具有某种确定的电磁性能和精确的数学定义。我们常见的电路元件是一些所谓的集中参数元件,元件特性由其端点上的电流和电压来确切表达。当构成电路及电路本身的尺寸远小于电路工作时的电磁波的波长时,称这些元件为集中参数元件。由集中参数元件组成的电路称为集中参数电路。例如,电阻元件是一种只表示消耗电能的元件;电感元件是表示其周围空间存在着磁场而可以储存磁场能量的元件;电容元件是表示其周围空间存在着电场而可以储存电场能量的元件等。

上述这些电路元件通过引出端互相连接。对具有两个引出端的元件,称为二端元件;对具有两个以上引出端的元件,称为多端元件。

三、电路模型

实际电路可以用一个或若干理想电路元件经导体连接起来模拟,这便构成了电路模型。图 1-1b 是图 1-1a 的电路模型。实际器件和电路的种类繁多,而理想电路元件只有有限的几种,用理想电路元件建立的电路模型将使电路的研究大大简化。建立电路模型时应使其外部特性与实际电路的外部特性尽量近似,但两者的性能并不一定也不可能完全相同。同一实际电路在不同条件下往往要求用不同的电路模型来表示。例如,一个线圈在低频时可以只考虑其中的磁场和耗能,甚至有时只考虑磁场就可以了。但在高频时则应考虑电场的影响,在直流时就只需考虑耗能了。所以建立电路模型一般应指明它们的工作条件。

在电路理论中,我们研究的是由理想元件所构成的电路模型及其一般性质。借助于这种理想化的电路模型可分析和研究实际电路——无论它是简单的还是复杂的,都可以通过理想化的电路模型来充分描述。理想化的电路模型也简称为电路。

思 考 题

1. 什么叫电路模型?建立电路模型时应该注意什么问题?
2. 电工分析研究的主要对象是什么?

第二节 电流与电压及其参考方向

一、电流及其参考方向

带电粒子(电子、离子)的定向运动,称为电流。电流的量值(大小)等于单位时间内穿过导体横截面的电荷量,用符号 i 表示,即

$$i = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta q}{\Delta t} = \frac{dq}{dt} \quad (1-1)$$

式中 Δq ——极短时间 Δt 内通过导体横截面的电荷量。

电流的实际方向为正电荷的运动方向。

当电流的量值和方向都不随时间变化时，则 dq/dt 为定值，这种电流为直流电流，简称直流 (DC)。直流电流常用英文大写字母 I 表示。对于直流，式 (1-1) 可写成

$$I = \frac{q}{t} \quad (1-2)$$

式中 q ——时间 t 内通过导体横截面的电荷量。

量值和方向随着时间按周期性变化的电流，称为交流电流，常用英文小写字母 i 表示。

在国际单位制 (SI) 中，电流的 SI 主单位是安 [培]，符号为 A。电流的十进倍数单位和分数单位，常用的有千安 (kA)，毫安 (mA)，微安 (μA) 等。它们之间的换算关系是

$$1A = 10^3 mA = 10^6 \mu A$$

在复杂电路的分析中，电路中电流的实际方向很难预先判断出来；电流的实际方向还会不断改变。因此，很难在电路中表明电流的实际方向。为此，在分析与计算电路时，常可任意规定某一方向作为电流的参考方向或正方向，并用箭头表示在电路图上。规定了参考方向以后，电流就是一个代数量了，若电流的实际方向与参考方向一致（如图 1-2a 所示）则电流为正值；若两者相反（如图 1-2b 所示），则电流为负值。这样，就可以利用电流的参考方向和正、负值来表明电流的实际方向。应当注意，在未规定参考方向的情况下，电流的正、负号是没有意义的。

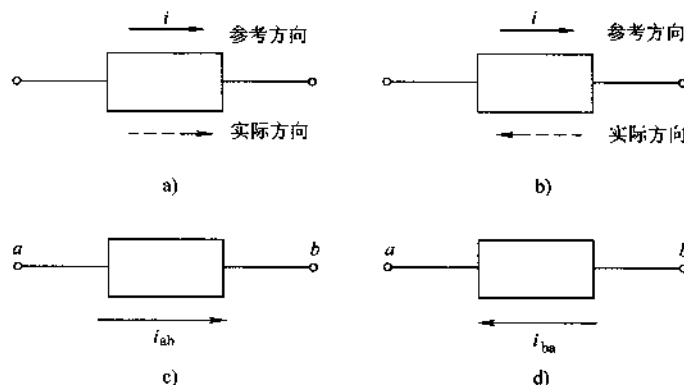


图 1-2 电流的参考方向

电流的参考方向除用箭头在电路图上表示外，还可以用双下标表示，如对某一电流，用 i_{ab} 表示其参考方向由 a 指向 b （如图 1-2c 所示）。用 i_{ba} 表示其参考方向由 b 指向 a （如图 1-2d 所示）。显然，两者相差一个负号，即

$$i_{ab} = -i_{ba}$$

二、电压及其参考方向

当导体中存在电场时，电荷在电场力的作用下运动，电场力对运动电荷做功，运动电荷的电能将减少，电能转化为其他形式的能量。电路中 A 、 B 两点间的电压是单位正电荷在电场力的作用下由 A 点移动到 B 点所少的电能，即

$$u_{AB} = \lim_{\Delta q \rightarrow 0} \frac{\Delta W_{AB}}{\Delta q} = \frac{dW_{AB}}{dq} \quad (1-3)$$

式中 Δq ——由 A 点移到 B 点的电荷量, ΔW_{AB} 为移动过程中电荷所减少的电能。

电压的实际方向是使正电荷电能减少的方向, 当然也是电场力对正电荷做功的方向。

在国际单位制中, 电压的 SI 单位是伏 [特], 符号为 V。电压的十进倍数和分数单位, 常用的有千伏 (kV)、毫伏 (mV)、微伏 (μV) 等。

量值和方向都不随时间变化的直流电压, 用大写字母 U 表示。量值和方向随着时间按周期性变化的交流电压, 用小写字母 u 表示。

与电流类似, 在电路分析中也要规定电压的参考方向, 通常用三种方式表示:

(1) 采用正 (+)、负 (-) 极性表示, 称为参考极性, 如图 1-3a 所示。这时从正极性端指向负极性端的方向就是电压的参考方向。

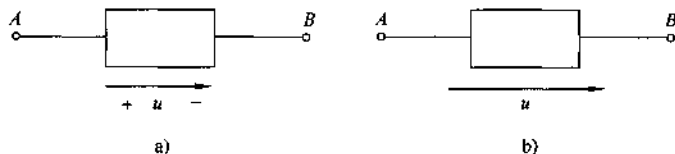


图 1-3 电压的参考方向

(2) 采用实线箭头表示, 如图 1-3b 所示。

(3) 采用双下标表示, 如 u_{AB} 表示电压的参考方向由 A 指向 B。

电压的参考方向指定之后, 电压就是代数量。当电压的实际方向与参考方向一致时, 电压为正值; 当电压的实际方向与参考方向相反时, 电压为负值。

分析电路时, 首先应该规定各电流、电压的参考方向, 然后根据所规定的参考方向列写电路方程。无论电流、电压是直流还是交流, 它们均是根据参考方向写出的。参考方向可以任意规定而不影响计算结果, 因为参考方向相反时, 解出的电流、电压值也要改变正负号, 最后得到的实际结果仍然相同。

任一电路的电流参考方向和电压参考方向可以分别独立地规定。但为了分析方便, 常同一元件的电流方向与电压参考方向一致, 即电流从电压的正极性端流入该元件而从它的负极性端流出。这时, 该元件的电压参考方向与电流参考方向是一致的, 称为关联参考方向 (如图 1-4 所示)。

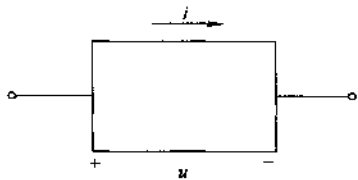


图 1-4 电流和电压的关联参考方向

思 考 题

1. 为什么要在电路图上规定电流的参考方向? 请说明参考方向与实际方向的关系。
2. 电压参考方向都有哪些表示方法?

第三节 电 位

分析电子电路, 常用到电位这一物理量。在电路中任选一点, 叫做参考点, 则某点的电

位就是由该点到参考点的电压。也就是说,如果参考点为 o , 则 a 点的电位

$$V_a = U_{ao}$$

至于参考点本身的电位,乃是参考点对参考点的电压,显然为零,所以参考点又叫零点电位点。

如果已知 a 、 b 两点的电位为 V_a 、 V_b , 则此两点间的电压

$$U_{ab} = U_{ao} + U_{ob} = U_{ao} - U_{bo} = V_a - V_b \quad (1-4)$$

即两点间的电压等于这两点的电位的差,所以电压又叫电位差。

参考点选择不同,同一点的电位就相应不同,但电压与参考点的选择无关。至于如何选择参考点,则要视分析计算问题的方便而定。电子电路中需选各有关部分的公共线作为参考点,常用符号“ $\perp$ ”表示。

思 考 题

1. 为什么要在电路图上规定电流的参考方向? 请说明参考方向与实际方向的关系。
2. 电压参考方向都有哪些表示方法?

第四节 电功率与电能

电功率是电路分析中常用到的一个物理量。传递转换电能的功率叫电功率,简称功率,用 p 或 P 表示。习惯上,都把发出或接受电能说成发出或接受功率。

下面分析任一支路的功率关系。当支路电流、电压实际方向一致时,因为电流的方向是正电荷运动的方向,而正电荷沿电压方向移动时能量减少,所以这时该支路接受功率。当支路电流、电压实际方向相反时,该支路发出功率。又因

$$i = \frac{dq}{dt}, \quad u = \frac{dw}{dq}$$

$$p = \frac{dw}{dt} = \frac{dw}{dq} \frac{dq}{dt}$$

所以转换能量的速率即功率

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

即任一支路功率等于其电压与电流的乘积。

用式 (1-5) 计算功率时,如果电流、电压选用关联参考方向,则所得的 p 应看成支路接受的功率,即计算所得功率为正值时,表示支路实际接受功率;计算所得功率为负值时,表示支路实际发出功率。

同样,如果电流、电压选择非关联参考方向,则按式 (1-5) 所得的 p 应看成支路发出的功率,即计算所得功率为正值时,表示支路实际发出功率;计算所得功率为负值时,表示支路接受功率。

在直流情况下,式 (1-5) 可表示为

$$P = UI$$

SI 制中,电压的单位为 V,电流的单位为 A,则功率的单位为瓦特,简称瓦,符号为 W, $1W = 1V \cdot A$ 。功率的十进倍数和分数单位,常用的有千瓦 (kW)、兆瓦 (MW) 和毫瓦

(mW) 等。

根据式 (1-5), 从 t_0 到 t 时间内, 电路吸收 (消耗) 的电能为

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

直流时, 有

$$W = P (t - t_0)$$

电能的 SI 主单位是焦 [耳], 符号为 J, 它等于功率为 1W 的用电设备在 1s 内所消耗的电能。在实际生活中还采用千瓦时 ($\text{kW} \cdot \text{h}$) 作为电能的单位, 它等于功率为 1kW 的用电设备在 1h (3600s) 内所消耗的电能, 简称为 1 度电。

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

能量转换与守恒定律是自然界的基本规律之一, 电路当然遵守这一规律。一个电路中, 每一瞬间, 接受电能的各元件功率的总和等于发出电能的各元件功率的总和; 或者说, 所有元件接受的功率总和为零。这个结论叫做“电路的功率平衡”。

例 1.1 图 1-5 所示为直流电路, $U_1 = 4\text{V}$, $U_2 = -8\text{V}$, $U_3 = 6\text{V}$, $I = 4\text{A}$, 求各元件接受或发出的功率 P_1 、 P_2 和 P_3 , 并求整个电路的功率 P 。

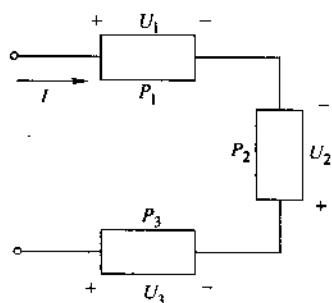


图 1-5 例 1.1 图

解: P_1 的电压参考方向与电流参考方向相关联
故

$$P_1 = U_1 I = 4\text{V} \times 4\text{A} = 16\text{W} \text{ (接受 } 16\text{W)}$$

P_2 和 P_3 的电压参考方向与电流的参考方向非关联,
故

$$P_2 = U_2 I = (-8)\text{V} \times 4\text{A} = -32\text{W} \text{ (接受 } 32\text{W)}$$

$$P_3 = U_3 I = 6\text{V} \times 4\text{A} = 24\text{W} \text{ (发出 } 24\text{W)}$$

整个电路的功率 P , 设接受功率为正, 发出功率为负,
故

$$P = (16 + 32 - 24)\text{W} = 24\text{W}$$

思考题

1. 当元件电流、电压选择关联参考方向时, 什么情况下元件接受功率? 什么情况下元件发出功率?

2. 有两个电源, 一个发出的电能为 $1000\text{kW} \cdot \text{h}$, 另一个发出的电能为 $500\text{kW} \cdot \text{h}$ 。是否可以认为前一个电源的功率大, 后一个电源的功率小?

第五节 电阻元件和欧姆定律

电路是由元件连接而成的, 研究电路时首先要了解各种电路元件的特性。表示电路元件

特性的数学关系称为元件约束。

如果一个元件通过电流时总是消耗能量，那么其电压的方向总是与电流的方向一致的。电阻元件就是按此而定义，用来反映能量消耗。电阻元件是一个二端元件，它的电流和电压的方向总是是一致的，它的电流和电压的大小成代数关系。

电流和电压的大小成正比的电阻元件叫线性电阻元件。元件的电流与电压的关系曲线叫做元件的伏安特性曲线。线性电阻元件的伏安特性为通过坐标原点的直线，这个关系称为欧姆定律。在电流和电压的关联参考方向下，线性电阻元件的伏安特性如图 1-6 所示，欧姆定律的表达式为

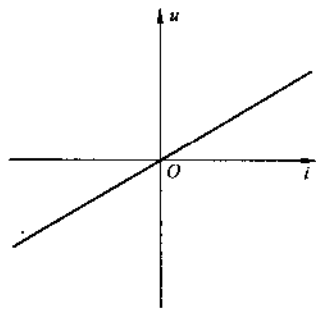


图 1-6 线性电阻的伏安特性

$$u = iR \quad (1-7)$$

式中 R ——元件的电阻，它是一个反映电路中电能消耗的电路参数，是一个正实常数；

式中电压单位用 V 表示；电流用 A 表示时；电阻的单位是欧 [姆]，符号为 Ω ；电阻的十进倍数单位有千欧 (k Ω)、兆欧 (M Ω) 等。

电流和电压的大小不成正比的电阻元件叫非线性电阻元件，本书只讨论线性电阻元件电路。

令 $G = 1/R$ ，则式 (1-7) 变为

$$i = uG \quad (1-8)$$

式中 G ——电阻元件的电导，单位是西 [门子]，符号为 S。

如果线性电阻元件的电流和电压的参考方向不关联，则欧姆定律的表达式为

$$u = -iR \quad (1-9)$$

或

$$i = -Gu \quad (1-10)$$

在电流和电压关联参考方向下，任何瞬时线性电阻元件接受的电功率为

$$p = ui = Ri^2 = \frac{u^2}{R} = Gu^2 \quad (1-11)$$

由于电阻 R 和电导 G 都是正实数，功率 p 恒为非负值。既然功率 p 不能为负值，这就说明任何时刻电阻元件不可能发出电能，它所接受的全部电能都转换成其他形式的能。所以线性电阻元件是耗能元件。

如果电阻元件把接受的电能转换成热能，则从 t_0 到 t 时间内，电阻元件的热 [量] Q ，也就是这段时间内接受的电能 W 为

$$Q = W = \int_{t_0}^t p dt = \int_{t_0}^t Ri^2 dt = \int_{t_0}^t \frac{u^2}{R} dt \quad (1-12)$$

若电流不随时间变化，即电阻通过直流电流时，上式化为

$$Q = W = P (t - t_0) = PT = RI^2 T = \frac{U^2}{R} T \quad (1-13)$$

式中 $T = t - t_0$ ——电流通过电阻的总时间。

以上两式称为焦耳定律。

实际上，所有电阻器、电灯、电炉等器件，它们的伏安特性曲线在一定程度上都是非线性的。但在一定条件下，这些器件的伏安特性近似为一直线，用线性电阻元件作为它们的电

路模型可以得到令人满意的结果。

线性电阻元件有两种特殊情况值得注意：一种情况是电阻值 R 为无限大，电压为任何有限值时，其电流总是零，这时把它称为“开路”；另一种情况是电阻为零，电流为任何有限值时，其电压总是零，这时把它称为“短路”。

例 1.2 有 220V, 100W 灯泡一个，其灯丝电阻是多少？每天用 5h，一个月（按 30 天计算）消耗的电能是多少度？

解：灯泡灯丝电阻为

$$R = \frac{U^2}{P} = \frac{220^2}{100} \Omega = 484 \Omega$$

一个月消耗的电能

$$W = PT = (100 \times 10^{-3} \times 5 \times 30) \text{ kW} \cdot \text{h} = 15 \text{ kW} \cdot \text{h} = 15 \text{ 度}$$

思考题

1. 线性电阻元件的伏安关系是怎样的？
2. 线性电阻元件接受功率的计算公式有哪些？

第六节 电压源与电流源

电压源、电流源是两种有源元件。电阻元件是一种无源元件。

电压源是一个理想二端元件，其图形符号如图 1-7a 所示， u_s 为电压源的电压，“+”、“-”为电压的参考极性。电压 u_s 是某种给定的时间函数，与通过电压源的电流无关。因此电压源具有两个特点：

(1) 电压源对外提供的电压 $u(t)$ 是某种确定的时间函数，不会因所接的外电路不同而改变，即 $u(t) = u_s(t)$ 。

(2) 通过电压源的电流 $i(t)$ 随外接电路的不同而不同。

常见的电压源有直流电压源和正弦交流电压源。直流电压源的电压 u_s 是常数，即 $u_s = U_s$ (U_s 是常数)。图 1-7b 为直流电压源的波形曲线。正弦交流电压源的电压 $u_s(t)$ 为

$$u_s(t) = U_m \sin \omega t$$

图 1-7c 是正弦电压源电压 $u_s(t)$ 的波形曲线。

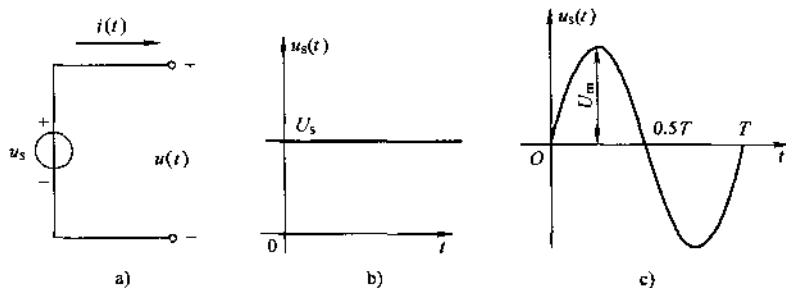


图 1-7 电压源电压波形

图 1-8 是直流电压源的伏安特性, 它是一条与电流轴平行且纵坐标为 U_s 的直线, 表明其端电压恒等于 U_s , 与电流大小无关。当电流为零, 亦即电压源开路时, 其端电压仍为 U_s 。

如果一个电压源的电压 $u_s = 0$, 则此电压源的伏安特性与电流轴重合的直线, 它相当于短路。电压为零的电压源相当于短路。

由图 1-7a 知, 电压源发出的功率为

$$p = u_s i$$

$p > 0$ 时, 电压源实际上是发出功率, 电流实际方向是从电压源的低电位端流向高电位端; $p < 0$ 时, 电压源实际上是接受功率, 电流的实际方向是从电压源的高电位端流向低电位端, 电压源是作为负载出现的。电压源中电流可以从 0 变到 ∞ 。

实际, 电压源其端电压会随电流的变化而变化。当电池接上负载电阻时, 其端电压会降低, 这是由于电池有内阻的缘故。

电流源也是一个理想二端元件, 图形符号如图 1-9a 所示, i_s 是电流源的电流, 电流源旁边的箭头表示电流 i_s 的参考方向。电流 i_s 是某种给定的时间函数, 与其端电压 u 无关。因此电流源有以下两个特点:

(1) 电流源向外电路提供的电流 $i(t)$ 是某种确定的时间函数, 不会因外电路不同而改变, 即 $i(t) = i_s$, i_s 是电流源的电流。

(2) 电流源的端电压 $u(t)$ 随外接的电路不同而不同。

如果电流源的电流 $i_s = I_s$ (I_s 是常数), 则为直流电流源。它的伏安特性是一条与电压轴平行且横坐标为 I_s 的直线, 如图 1-9b 表示, 表明其输出电流恒等于 I_s , 与端电压无关。当电压为零, 亦即电源短路时, 它发出的电流仍为 I_s 。

如果一个电流源的电流 $i_s = 0$, 则此电流源的伏安特性为与电压重合的直线, 它相当于开路。电流为零的电流源相当于开路。

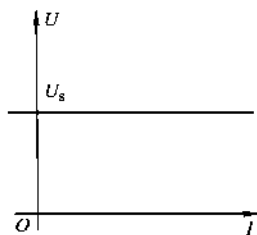


图 1-8 直流电压源的伏安特性

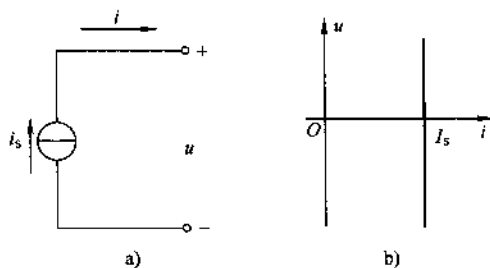


图 1-9 电流源及直流电流源的伏安特性

由图 1-9a 知, 电流源发出的功率为

$$p = u i_s$$

$p > 0$ 时, 电流源实际上是发出功率; $p < 0$ 时, 电流源实际上是接受功率, 此时, 电流源是作为负载出现的。电流源中的端电压可从 0 变到 ∞ 。

恒流源电子设备和光电池器件的特性都接近电流源。

电压源和电流源, 其源电压和源电流都是给定的时间函数, 不受外电路的影响, 故称为独立源。在电子电路的模型中还常常遇到另一种电源, 它们的源电压和源电流不是独立的,

是受电路中另一处的电压或电流控制,称为受控源或非独立源。

例 1.3 计算图 1-10 所示电路中电流源的端电压 U_1 , 5Ω 电阻两端的电压 U_2 和电流源、电阻、电压源的功率 P_1 , P_2 , P_3 。

解:

$$U_2 = 5 \times 2\text{V} = 10\text{V}$$

$$U_1 = U_2 + U_3 = (10 + 3)\text{V} = 13\text{V}$$

电流源的电流、电压选择为非关联参考方向,所以

$$P_1 = U_1 I_s = (13 \times 2)\text{W} = 26\text{W} \text{ (发出)}$$

电阻的电流、电压选择为关联参考方向,所以

$$P_2 = (10 \times 2)\text{W} = 20\text{W} \text{ (接受)}$$

电压源的电流、电压选择为关联参考方向,所以

$$P_3 = (2 \times 3)\text{W} = 6\text{W} \text{ (接受)}$$

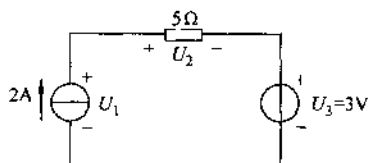


图 1-10 例 1.3 图

思 考 题

1. 直流电压源的电流是怎样变化的?
2. 直流电流源的端电压怎样确定? 举例说明。

第七节 基尔霍夫定律

分析电路时除了解各元件的特性外,还应掌握它们相互连接时对电流和电压带来的约束,这种约束称为互连约束或拓扑约束。表示这类约束关系的是基尔霍夫定律。

基尔霍夫定律是集中参数电路的基本定律,它包括电流定律和电压定律。为了便于讨论,先介绍几名词。

(1) 支路: 电路中流过同一电流的一个分支称为一条支路。如图 1-11 中有 6 条支路,即 aed , $cfdb$, agc , ab , bc , bd 。

(2) 节点: 三条或三条以上支路的连接点。如图 1-11 中就有 4 个节点,即 a , b , c , d 。

(3) 回路: 由若干支路组成的闭合路径,其中每个节点只经过一次,这条闭合路径称为回路。如图 1-11 中就有 7 个回路,即 $abdea$, $bcfdb$, $abdfcga$, $agcbdea$, $abcfdea$, $agcfdea$ 。

(4) 网孔: 网孔是回路的一种。将电路画在平面上,在回路内部不另有支路的回路称为网孔。如图 1-11 中就有 3 个网孔,即 $abdea$, $bcfdb$, $abcfdea$ 。

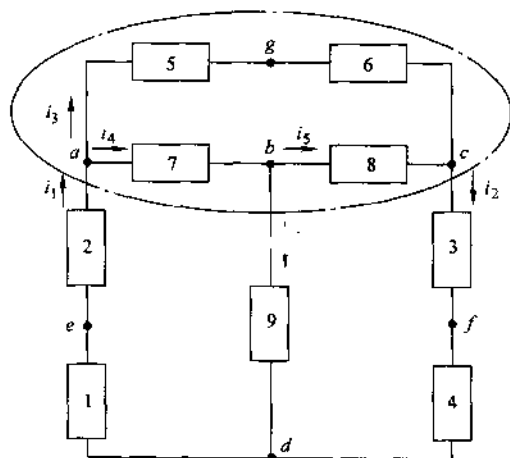


图 1-11 电路实例

一、基尔霍夫电流定律 (KCL)

在集中参数电路中, 任何时刻, 流出(或流入)一个节点的所有支路电流的代数和恒等于零, 这就是基尔霍夫电流定律, 简称为 KCL。

对图 1-11 中的节点 a , 应用 KCL 则有

$$-i_1 + i_3 + i_4 = 0 \quad (1-14)$$

写出一般式子, 为

$$\sum i = 0 \quad (1-15)$$

把式 (1-14) 改写成下式, 即

$$i_1 = i_3 + i_4$$

上式表明: 在集中参数电路中, 任何时刻, 流入一个节点电流之和等于流出该节点电流之和。

在式 (1-15) 中, 流出节点的电流前取 “+” 号, 流入节点的电流前面取 “-” 号, 而电流是流出节点还是流入节点均按电流的参考方向来判定。

KCL 原是适用于节点的, 也可以把它推广运用于电路的任一假设的封闭面。例如, 图 1-11 所示封闭面 S 所包围的电路, 有三条支路与电路的其余部分连接, 其电流为 i_1 , i_6 , i_2 , 则

$$i_6 + i_2 = i_1$$

因为对一个封闭面来说, 电流仍然是连续的, 所以通过该封闭面的电流的代数和也等于零。这就是说, 流出封闭面的电流等于流入封闭面的电流。基尔霍夫定律也是电荷守恒定律的体现。

KCL 给电路中的支路电流加上了线性约束, 以图 1-11 节点 a 为例, 若已知 $i_1 = -5\text{A}$, $i_3 = 3\text{A}$, 则按式 (1-14) 就有 $i_4 = -8\text{A}$, 不能取其他值。也就是说, 式 (1-14) 为这三个电流施加了一个约束关系。

二、基尔霍夫电压定律 (KVL)

在集中参数电路中, 任何时刻, 沿着任一个回路绕行一周, 所有支路电压的代数和恒等于零, 这就是基尔霍夫电压定律, 简称为 KVL, 用数学表达式表示为

$$\sum u = 0$$

在写出式 (1-16) 时, 先要任意规定回路绕行的方向, 凡支路电压的参考方向与回路绕行方向一致者, 此电压前面取 “+” 号, 支路电压的参考方向与回路绕行方向相反者, 则电压前面取 “-” 号。回路的绕行方向可用箭头表示, 也可用闭合节点序列来表示。

在图 1-11 中, 对回路 $abcga$ 应用 KVL, 有

$$u_{ab} + u_{bc} + u_{ca} + u_{ga} = 0 \quad (1-16)$$

如果一个闭合节点序列不构成回路, 例如, 图 1-11 中的节点序列 $acga$, 在节点 ac 之间没有支路, 但节点 ac 之间有开路电压 u_{ac} , KVL 同样适用于这样的闭合节点序列, 即有

$$u_{ac} + u_{cg} + u_{ga} = 0 \quad (1-17)$$

所以, 在集中参数电路中, 任何时刻, 沿任何闭合节点序列, 全部电压之代数和恒等于零。这是 KVL 的另一种形式。

将式 (1-17) 改写为

$$u_{ac} = -u_{cg} - u_{ga} = u_{cg} + u_{ga}$$