

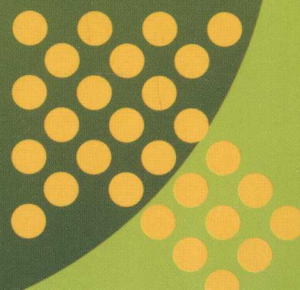
21世纪高等学校规划教材



DIANGONG JISHU

电工技术

栾学德 王丽萍 主 编
李秋潭 副主编



中国电力出版社
<http://jc.cepp.com.cn>

21世纪高等学校规划教材



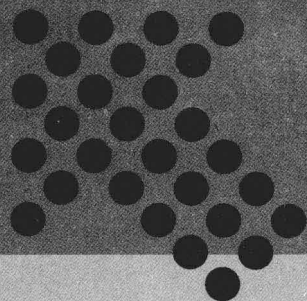
DIANGONG JISHU

电工技术

主 编 栾学德 王丽萍

副主编 李秋潭

主 审 张星慧



中国电力出版社

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

内 容 简 介

本书为 21 世纪高等学校规划教材。本书共分 13 章, 内容包括直流电路、正弦交流电路、非正弦周期电流电路、动态电路、磁路与变压器、异步电动机、直流电动机、控制电机、继电-接触器控制、可编程控制器、电工测量、电工基本操作技能、电工实训。在内容叙述上力求精练、详略得当、条理清晰、通俗易懂。

本书可作为高等学校工科专业基础课的教材, 也可以作为高等职业学校相关专业教材, 还可作为从事工厂、企业电气专业技术人员的参考用书。

图书在版编目 (CIP) 数据

电工技术/栾学德, 王丽萍主编. —北京: 中国电力出版社,
2010

21 世纪高等学校规划教材

ISBN 978 - 7 - 5083 - 9857 - 0

I. ①电… II. ①栾…②王… III. ①电工技术—高等学校—教材 IV. ①TM

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 225083 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 2 月第一版 2010 年 2 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 19 印张 460 千字

印数 0001—3000 册 定价 30.40 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

本书是针对工科本科生编写的技术基础课教材,适合培养应用型人才的教学需求。通过本课程的学习,可使学生获得电路分析与电工技术的基础理论、基本知识和基本技能,为后续课程和专业知识的学习及将来从事工程技术工作打下基础。

本书主要针对50~80学时(含实验实训)的电工技术基础课程编写。本书的编者是双师型教师,有着丰富的工程实践经验,能够从实用角度出发对问题进行论证和阐述,选取例题、习题也具有这个特点。总之,本教材注重了以下几方面。

(1) 注重电工技术的基础性、应用性和先进性,以电路、磁路的基本概念、基本理论和基本分析方法为重点,教学内容丰富,篇幅紧凑,基本概念和基本理论以讲清为度,主次分明,详略得当,通俗易懂。

(2) 以基本要求为依据,以够用、实用为尺度,对传统内容进行了处理,精简了不必要的理论讲解与推导,重点放在对知识应用性的介绍。

(3) 体现知识的先进性,将成熟的新技术,如可编程逻辑控制器(PLC)纳入教材,使学生初步了解其功能和应用。

(4) 为了便于读者掌握电气系统的分析及识图技能,本书在编写中以电工实用电路为主线,将必要的基础知识与电工实用电路融为一体,使读者能在识图中掌握电工技术的基础知识和电气元器件的基本性能,并把其应用到电气系统的设计和制作中。

(5) 注意将培养学生能力的要求贯穿于整个教学中。本教材通过教学目标、教学要求以及例题、习题、实训等多种途径帮助学生建立本课程学习的正确思路,抓住重点,明确思路,真正从“应用”角度加强对知识的掌握。

参加本书编写的有:栾学德(第1、2章),王丽萍(第3、5章),李秋潭(第10、11章),姜华(第7、8章),张虹(第4、6章),庄梅(第9、12章),杨洁(第13章),本书由栾学德担任主编,并统编全稿。此外,参加本书编写的还有:刘贞德、王立梅、管金华、齐丽丽、陈光军、刘均波、解立明、李耀明、杜德。本书由张星慧主审。

编写过程中,由于时间仓促,加之水平有限,书中错误和不妥之处在所难免,敬请各方面的读者予以批评指正,以便今后不断改进。

编 者

2009年5月

目 录

前言	
第 1 章 直流电路	1
1.1 引言	1
1.2 电路和电路模型	1
1.3 电路的基本物理量和关联参考方向	3
1.4 电路的复合物理量	7
1.5 电阻元件和电源	8
1.6 基尔霍夫定律	12
1.7 支路电流分析法	15
1.8 等效变换分析法	17
1.9 结点电压分析法	23
1.10 网络定理分析法	26
本章小结	32
习题一	33
第 2 章 正弦交流电路	39
2.1 正弦交流电路的基本概念	39
2.2 正弦量的相量表示	43
2.3 单一参数正弦交流电路的分析	45
2.4 复阻抗、复导纳及简单正弦电路的计算	51
2.5 正弦交流电路的功率	54
2.6 功率因数的提高	55
2.7 谐振电路	56
2.8 三相正弦交流电路	60
2.9 安全用电常识	67
本章小结	74
习题二	75
第 3 章 非正弦周期电流电路	77
3.1 非正弦周期信号	77
3.2 非正弦周期信号的分解	78
3.3 非正弦周期信号的最大值、有效值、平均值和平均功率	83
3.4 非正弦周期电流电路的分析和计算	85
本章小结	89
习题三	90

第4章 动态电路	92
4.1 过渡过程及换路定律	92
4.2 一阶 RC 电路的过渡过程	95
4.3 一阶 RL 电路的过渡过程	101
4.4 一阶电路的全响应	104
本章小结	109
习题四	109
第5章 磁路与变压器	113
5.1 磁场的基本物理量	113
5.2 铁磁性物质	114
5.3 磁路和磁路定律	116
5.4 铁芯线圈	119
5.5 变压器	122
本章小结	133
习题五	133
第6章 异步电动机	135
6.1 三相异步电动机的结构和工作原理	135
6.2 三相异步电动机的电磁转矩和机械特性	140
6.3 三相异步电动机的铭牌数据及选用	145
6.4 三相异步电动机的启动、调速和制动	148
6.5 其他用途的交流电动机	154
本章小结	157
习题六	158
第7章 直流电动机	160
7.1 直流电动机的结构和工作原理	160
7.2 直流电动机的励磁方式	163
7.3 直流电动机的机械特性	164
7.4 直流电动机的启动、调速和制动	167
7.5 直流电动机的铭牌数据	173
本章小结	174
习题七	175
第8章 控制电机	176
8.1 概述	176
8.2 伺服电动机	178
8.3 步进电动机	181
8.4 测速发电机	183
8.5 自整角机	185
本章小结	188
习题八	188

第 9 章 继电-接触器控制	190
9.1 常用低压控制电器	190
9.2 电器控制线路的绘制与阅读	197
9.3 三相笼型异步电动机的基本控制电路	197
9.4 典型机床的控制线路分析	205
本章小结	217
习题九	217
第 10 章 可编程控制器	220
10.1 PLC 的特点与基本组成	220
10.2 PLC 的工作原理	224
10.3 PLC 的编程语言	225
10.4 PLC 应用举例	229
本章小结	233
习题十	234
第 11 章 电工测量	235
11.1 电工仪表的分类和准确度	235
11.2 电工测量仪表的结构及工作原理	238
11.3 万用表	241
11.4 电流、电压、功率及电能的测量	243
11.5 电阻的测量	249
本章小结	251
习题十一	251
第 12 章 电工基本操作技能	253
12.1 常用电子元器件的识别、检测与使用	253
12.2 导线的连接与绝缘的恢复	262
12.3 焊接技术	272
本章小结	278
习题十二	278
第 13 章 电工实训	279
13.1 三相交流电相序的判别	279
13.2 三相异步电动机的拆装、维护与故障检修	280
13.3 三相异步电动机的点动和自锁控制	282
13.4 三相异步电动机的正、反转控制	284
13.5 电气控制系统的设计、安装与调试	286
13.6 PLC 控制小车自动往返运动	287
13.7 PLC 温度、液位控制	288
13.8 常用电工仪表的使用	290
参考文献	294

第1章 直流电路

内容提要

- (1) 电路和电路模型;
- (2) 电路的物理量及电压、电流的参考方向;
- (3) 电阻元件及电源;
- (4) 基尔霍夫电压定律和基尔霍夫电流定律;
- (5) 电路的分析方法——支路电流法、等效变换法、结点电压法及网络定律分析法等。

1.1 引言

电路在日常生活、生产和科学研究工作中得到了广泛应用。小到手电筒,大到计算机、通信系统和电力网络,都可以看到各种各样的电路。可以说,只要用电的物体,其内部都含有电路,尽管这些电路的结构各异,特性和功能也不相同,但都建立在一个共同的理论基础——电路理论上。

电路理论由两个分支构成:电路分析、电路设计。电路分析是在给定电路系统的结构和元件参数之后,求解电路输入(激励)与输出(响应)之间的规律;电路设计是在给定电路系统的输入(激励)与输出(响应)之间规律(或技术指标)的基础上,设计出电路系统(包括结构和元件参数)。本书在重点介绍电路分析的同时,也简要讨论电路的设计问题。

电路分析必须满足两大约束规律:拓扑约束(也称为结构约束)规律和元件约束规律。它们是电路分析与计算的基础,但它们又是建立在电荷守恒公理和能量守恒公理的基础之上的。在这些理论基础上,导出了一些重要的电路定理和各种基本分析方法。

电路理论是一门融合理论与工程应用的学科,我们既要学习和掌握它的基本概念、基本理论规律、基本分析方法,又要注重它的工程应用。

电路理论是现代电子信息技术的重要基础,它既为后续课程模拟电子技术、数字电子技术、信号与系统、自控原理、通信原理等奠定了坚实的基础,又培养了读者分析问题和解决问题的能力。

1.2 电路和电路模型

1.2.1 电路及其功能

电路在日常生活、生产和科学研究工作中得到了广泛应用。小到手电筒,大到计算机、通信系统和电力网络,都可以看到各种各样的电路。可以说,只要用电的物体,其内部都含有电路,只是电路的结构各异,特性和功能也不相同。电路的一种功能是实现电能的传输和转换,例如,电力网络将电能从发电厂输送到各个工厂、广大农村和千家万户,供各种电气设备使用。电路的另一种功能是实现电信号的传输、处理和存储,例如,电视接收天线将接

收到的含有声音和图像信息的高频电视信号，通过高频传输线送到电视机中，这些信号经过选择、变频、放大和检波等处理，恢复出原来的声音和图像信号，在扬声器发出声音并在显像管屏幕上呈现图像。

那么，什么是电路呢？所有的实际电路是由电气设备和元器件按照一定的方式连接起来，为电流的流通提供路径的总体，也称为网络。在实际电路中，电能或电信号的发生器称为电源，用电设备称为负载。由于电压和电流是在电源的作用下产生的，因此，电源又称为激励源，简称激励。由激励而在电路中产生的电压和电流称为响应。有时，根据激励和响应之间的因果关系，把激励称为输入，响应称为输出。手电筒电路就是一个最简单的实用电路。这个电路是由一个电源（干电池）、一个负载（小灯泡）、一个开关和连接导线组成的，如图 1-1 (a) 所示。

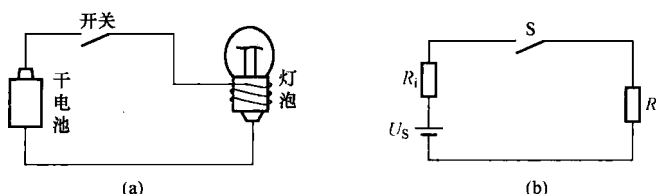


图 1-1 手电筒电路
(a) 实际电路；(b) 电路模型

1.2.2 电路模型

为了便于对实际电路进行分析，通常是将实际电路器件理想化（或称模型化），即在一定条件下，突出其主要的电磁性质，忽略其次要素，将其近似地看做理想电路元件，并用规定的图形符号表示。

例如，用电阻元件来表征具有消耗电能特征的各种实际元件，那么在电源频率不十分高的电路中，所有电阻器、电炉、电灯等实际电路元器件，都可以用电阻元件这个理想化的模型来近似表示。同样，在一定条件下，电感线圈忽略其电阻，就可以用电感元件来近似地表示；电容器忽略其漏电，就可以用电容元件近似地表示。此外，还有电压源、电流源两种理想电源元件。以上这些理想元件分别可以简称为：电阻、电感、电容和电源，它们都具有两个端钮，称为二端元件。其中，电阻、电感、电容又称为无源元件^①。常用的电路元件和符号如表 1-1 所列。

表 1-1

常用的电路元件和符号

元 件 名 称	符 号	元 件 名 称	符 号
电池		可变电容	
电压源		无铁芯的电感	
电流源		有铁芯的电感	
电阻		相连接的交叉导线	
可变电阻		不相连接的交叉导线	
电容		开关	

由理想元件组成的电路，就称为实际电路的电路模型。图 1-1 (b) 即为图 1-1 (a) 的

^① 电路中有两类元件，有源元件和无源元件。有源元件能产生或者能控制能量而无源元件不能，电阻、电容、电感等均为无源元件。发电机、电池、运算放大器、三极管、场效应管等为有源元件。

电路模型。又如如图 1-2 (a) 表示一个最简单的晶体管放大电路, 其电路模型如图 1-2 (b) 所示。今后如未加特殊说明, 所说的电路均指电路模型。

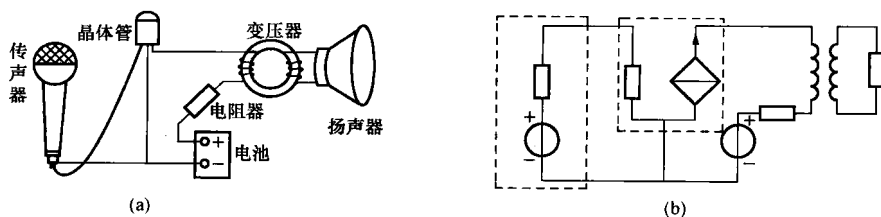


图 1-2 晶体管放大电路

(a) 实际电路; (b) 电路模型

以上用理想电路元件或它们的组合模拟实际器件的过程称为建模。建模时必须考虑工作条件, 并按不同精确度的要求把给定工作情况下的主要物理现象及功能反映出来。例如, 在直流情况下, 一个线圈的模型可以是一个电阻元件; 在较低频率下, 就要用电阻元件和电感元件的串联组合模拟; 在较高频率下, 还应计及导体表面的电荷作用, 即电容效应, 所以其模型还需要包含电容元件。可见, 在不同的条件下, 同一实际器件可能采用不同模型。模型取得恰当, 对电路的分析和计算结果就与实际情况接近; 模型取得不恰当, 则会造成很大误差, 有时甚至导致自相矛盾的结果。如果模型取得太复杂, 就会造成分析的困难; 反之, 如果取得太简单, 就不足以反映所需求解的真实情况。显然建模问题需要专门研究, 绝不能草率定论。

1.2.3 集总参数电路

可以认为理想电路元件的电磁过程都是集中在元件内部进行的, 即在任何时刻, 从具有两个端钮的理想元件的某一端钮流入的电流, 恒等于该时刻从另一端钮流出的电流, 并且元件两端钮间的电压值也是完全确定的, 与器件的几何尺寸和空间位置无关。凡端钮处电流和端钮间电压满足上述情况的电路元件称为集总参数元件 (Lumped parameter element), 由集总参数元件构成的电路称为集总参数电路。

用集总参数电路来近似实际电路是有条件的, 这个条件就是实际电路元件的几何尺寸 (d) 与电路工作频率所对应的波长 (λ) 相比, 满足 $d \ll \lambda$ 。例如, 我国电力用电的频率为 50Hz, 对应的波长为 6000km, 对以此为工作频率的实验室设备来说, 其尺寸与这一波长相比可以忽略不计, 可见用集总概念是完全可以的。反之, 不满足 $d \ll \lambda$ 条件的另一类电路称为分布 (Distributed) 参数电路, 其特点是电路中的电压和电流不仅是时间的函数, 也与器件的几何尺寸和空间位置有关, 由波导和高频传输线组成的电路是分布参数电路的典型例子。例如, 对于电视天线及其传输线来说, 其工作频率为 10^8 Hz 的数量级, 譬如 10 频道, 其工作频率约为 200MHz, 相应的工作波长为 1.5m, 这时的传输线就是分布参数电路。

本书只讨论集总参数电路, 为叙述方便起见, 今后常简称之为电路。

1.3 电路的基本物理量和关联参考方向

在电路分析与设计中, 为了定量地描述电路的状态或电路元件的特征, 普遍用两类物理量, 即基本物理量和复合物理量。

描述电路的基本物理量为电流、电压、电荷、磁链。其中，电流和电压都是标量，为了分析和计算的需要，应选定参考方向。

1.3.1 电流

1. 电流的基础知识

电荷的定向运动形成电流。电流的实际方向习惯上指正电荷运动的方向。电流的大小用电流强度来衡量，电流强度指单位时间内通过导体横截面积的电荷量，电流强度简称电流，其数学表达式为

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

式中， i 表示电流强度，单位是安 [培]，用 A 表示，在计量微小电流时，通常用毫安 (mA) 或微安 (μA) 作为单位；

dq 为微小电荷量，单位是库 [仑]，用 C 表示；

dt 为微小的时间间隔，单位是秒，用 s 表示。

按照电流的大小和方向是否随时间变化，分为恒定电流（简称直流 DC）和时变电流，分别用符号 I 和 $i(t)$ 表示。我们平时所说的交流 (AC) 是时变电流的特例，它满足两个特点，一是周期性变化，二是一个周期内电流的平均值等于零。

以后我们对其他物理量一般也用大写字母代表恒定量，用小写字母代表变动的量。

2. 电流的参考方向

在分析电路时往往不能事先确定电流的实际方向，而且时变电流的实际方向又随时间不断变化，在电路中很难标明电流的实际方向。为此，我们引入了电流参考方向这一概念。

参考方向的选择具有任意性。在电路中通常用实线箭头或双字母下标表示，实线箭头可以画在线外，也可以画在线上。为了区别，电流的实际方向通常用虚线箭头表示，如图 1-3 所示。而且规定：若电流的实际方向与所选的参考方向一致，则电流为正值，即 $i > 0$ ；若电流的实际方向与所选的参考方向相反，则电流为负值，即 $i < 0$ 。如图 1-3 所示，可见，

电流为一个具有正、负的代数量。

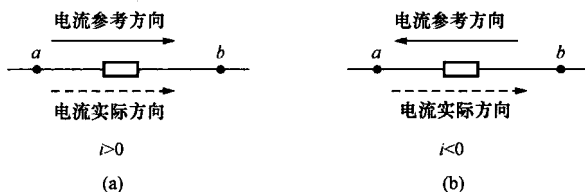


图 1-3 电流的参考方向与实际方向

图 1-3 (a) 中电流参考方向为从 a 到 b ，用双下标法表示为 i_{ab} ；(b) 中为从 b 到 a ，表示为 i_{ba} 。可见，对于同一电流，参考方向选择不同，其数值互为相反数，即

$$i_{ab} = -i_{ba} \quad (1-2)$$

1.3.2 电压

1. 电压的基础知识

电路分析中另一个基本物理量是电压。直流电压用大写字母 U 表示，交流电压用小写字母 u 表示，单位为伏 [特]，用 V 表示。为了便于计量，还可以用毫伏 (mV)、微伏 (μV) 和千伏 (kV) 等作为单位。在数值上，电路中任意 a 、 b 两点之间的电压等于电场力由 a 点移动单位正电荷到 b 点所做的功，即

$$U_{ab} = \frac{dW}{dq} \quad (1-3)$$

式中, dW 是电场力所做的功, 单位是焦耳 (J)。

2. 电位

在电路中任选一点作为参考点, 则其他各点到参考点的电压称为该点的电位, 用符号 V 表示。例如, 电路中 a 、 b 两点的电位分别表示为 V_a 和 V_b , 并且 a 、 b 两点间的电压与该两点电位有以下关系:

$$U_{ab} = V_a - V_b \quad (1-4)$$

式 (1-4) 表明, 两点间电压就是该两点的电位之差。电位与电压既有联系又有区别。其主要区别在于: 电路中任意两点间的电压, 其数值是绝对的, 与该两点间的路径无关; 而电路中某一点的电位是相对的, 其值取决于参考点的选择。在电子技术中, 通常用求解电位的方法判断半导体器件, 如二极管、三极管的工作状态。

今后如未说明, 通常选接地点作为参考点, 并且参考点的电位为零。

引入电位概念后, 两点间电压的实际方向即由高电位点指向低电位点。电压就是指电压降。

电路中电位相同的点称为等电位点。例如在如图 1-4 所示电路中, a 、 b 、 c 3 点电位分别为

$$V_a = 6 \times \frac{1}{3+1} = 1.5V$$

$$V_b = 6 \times \frac{3}{9+3} = 1.5V$$

$$V_c = 6 \times \frac{2}{2+2} = 3V$$

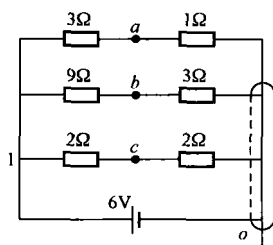


图 1-4 等电位点

其中 a 、 b 两点电位相等, 是等电位点。等电位点的特点是: 各点之间虽然没有直接相连, 但其电位相等, 两点间电压等于零。若用导线或电阻将等电位点连接起来, 导线和电阻元件中没有电流通过, 不会影响电路的工作状态。

b 、 c 两点电位不等, 这时若用导线将两点连接, b 、 c 两点强迫电位相等, 导线中有电流通过, 也即改变了电路的原有工作状态。

另外, 导线上的各点均为等电位点。图中虚线所包围的结点都是等电位点。

3. 电压的参考方向

电压的参考方向 (也称为参考极性) 的选择同样具有任意性, 在电路中可以用 “+”、“-” 号表示, 也可用双字母下标或实线箭头表示, 如图 1-5 所示。电压正、负值的规定与电流一样, 此处不再赘述。

值得注意: 今后在求电压、电流时, 必须事先规定好参考方向, 否则求出的值无意义。

4. 电压、电流的关联参考方向

通常, 对于电路中的某个元件, 电流参考方向和电压参考方向都是可以任意选定的, 彼

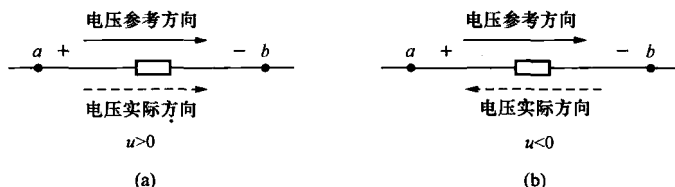


图 1-5 电压的参考方向与实际方向

此独立无关。但为了分析方便, 通常将某元件上电压和电流的参考方向选为一致, 即电流的参考方向由电压的 “+” 指向 “-”, 这样选定的参考方向称为电压与电流的关联参考方向, 简称关联

方向,如图 1-6 (a) 所示;否则,称非关联方向,如图 1-6 (b) 所示。

【例 1-1】 在如图 1-7 所示电路中, o 点为参考点,各元件上电压分别为 $U_{S1}=20\text{V}$, $U_{S2}=4\text{V}$, $U_1=8\text{V}$, $U_2=2\text{V}$, $U_3=5\text{V}$, $U_4=1\text{V}$ 。试求 U_{ac} 、 U_{bd} 、 U_{be} 和 U_{ae} 。

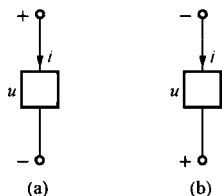


图 1-6 二端元件电压、电流的参考方向

(a) 关联方向; (b) 非关联方向

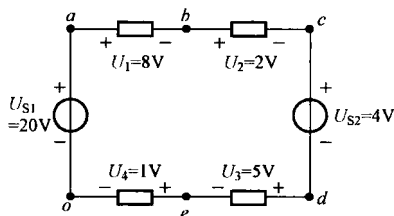


图 1-7 [例 1-1] 电路

解 选 o 点为参考点, o 点电位 $V_o=0$ 。其他各点到参考点的电位分别为

$$V_a = U_{S1} = 20\text{V}$$

$$V_b = -U_1 + U_{S1} = -8 + 20 = 12\text{V}$$

$$V_c = -U_2 - U_1 + U_{S1} = -2 - 8 + 20 = 10\text{V} \quad V_d = U_3 + U_4 = 5 + 1 = 6$$

$$V_e = U_4 = 1\text{V}$$

根据式 (1-4), 求出两点间电压分别为

$$U_{ac} = V_a - V_c = 20 - 10 = 10\text{V}$$

$$U_{bd} = V_b - V_d = 12 - 6 = 6\text{V}$$

$$U_{be} = V_b - V_e = 12 - 1 = 11\text{V}$$

$$U_{ae} = V_a - V_e = 20 - 1 = 19\text{V}$$

1.3.3 电荷

电荷是构成物质原子的一个电特征, 它表示带电粒子的电荷数, 可分为恒定电荷、时变电荷, 分别用 Q 和 $q(t)$ 表示, 单位为库 (C)。一个电子的电荷量是 $-1.602 \times 10^{-19}\text{C}$, 而质子的电荷是正的, 其电荷量与电子一样。当质子数与电子数相等时, 原子呈中性。

【例 1-2】 已知流入电路中某节点的总电荷由方程: $q(t) = 5t \sin 4\pi t (\text{mC})$ 确定, 试求 $t=0.5\text{s}$ 时的电流 $i(t)$ 。

解 因为

$$i(t) = \frac{dq(t)}{dt} = \frac{d}{dt}(5t \sin 4\pi t) = (5 \sin 4\pi t + 20\pi t \cos 4\pi t) \text{mA}$$

所以

$$i(t) \big|_{t=0.5\text{s}} = 5 \sin 2\pi + 10\pi 5 \cos 2\pi = 10\pi = 31.42 \text{mA}$$

【例 1-3】 已知一个电源以 2A 的电流流过灯泡 10s 的时间, 该灯泡发热、发光消耗能量 4.5kJ , 试求灯泡两端的电压 u 。

解 因为总电荷量

$$\Delta q(t) = i \Delta t = 2 \times (10 - 0) = 20 (\text{C})$$

所以

$$u = \frac{\Delta W}{\Delta q} = \frac{4.5 \times 10^3}{20} = 225 (\text{V})$$

1.3.4 磁链

一个匝数为 N 的线圈通过的电流为 $i(t)$ 时, 在线圈内部和外部建立磁场形成磁通 Φ_L , 磁通主要集中在内部, 与线圈相交链, 称为磁链, 用 Ψ_L 表示, 且 $\Psi_L = N\Phi_L$, 单位为

韦伯 (Wb)。

磁链与电压之间满足以下关系

$$u(t) = \frac{d\Psi(t)}{dt} \quad (1-5)$$

1.4 电路的复合物理量

通常在电路分析和设计中还广泛采用复合物理量——功率和能量来表征电路的状态和特性, 因为电路的工作状态总是伴随有电能与其他形式能量的互相转换。另一方面电子信息系统与电气设备中, 对其中电路部件是有功率限制的, 在实际使用时其电流和电压是不能超过额定值的, 否则会损坏部件或设备, 不能正常工作。

1.4.1 功率

电能对时间的变化率即为电功率, 简称功率。用 p 或 P 表示。功率的表达式为

$$p = \frac{dW}{dt} = \frac{dW}{dq} \frac{dq}{dt} = ui \quad (1-6)$$

应用式 (1-6) 计算元件功率时, 首先需要判断 u 、 i 的参考方向是否为关联方向, 若为关联方向, 则 $p=ui$; 若为非关联方向, 则 $p=-ui$ 。当计算出功率数值为正, 即 $p>0$ 时, 表明元件实际吸收或消耗功率; 当计算出功率数值为负, 即 $p<0$ 时, 表明元件实际发出或提供功率。与电压、电流是代数量一样, 功率 p 也是一个代数量。

可见, 功率的分析与计算要和电压、电流参考方向配合使用, 关联方向与非关联方向两种情况下, 公式前相差一个负号。

在 SI 制中, 电压单位为伏 (V), 电流单位为安 (A), 则功率单位为瓦特, 简称瓦, 用符号 W 表示, $1\text{kW}=10^3\text{W}$ 。

【例 1-4】 在如图 1-8 所示的电路中, 已知 $U_1=1\text{V}$, $U_2=-6\text{V}$, $U_3=-4\text{V}$, $U_4=5\text{V}$, $U_5=-10\text{V}$, $I_1=1\text{A}$, $I_2=-3\text{A}$, $I_3=4\text{A}$, $I_4=-1\text{A}$, $I_5=-3\text{A}$ 。试求各元件的功率, 并判断实际吸收还是发出功率。

解 根据题目所给已知条件可得

$$P_1 = U_1 I_1 = 1 \times 1 = 1\text{W} (\text{吸收功率 } 1\text{W})$$

$$P_2 = U_2 I_2 = (-6) \times (-3) = 18\text{W} (\text{吸收功率 } 18\text{W})$$

$$P_3 = -U_3 I_3 = -(-4) \times 4 = 16\text{W} (\text{吸收功率 } 16\text{W})$$

$$P_4 = U_4 I_4 = 5 \times (-1) = -5\text{W} (\text{发出功率 } 5\text{W})$$

$$P_5 = -U_5 I_5 = -(-10) \times (-3) = -30\text{W} (\text{发出功率 } 30\text{W})$$

由以上计算结果可以看出, 电路中各元件发出的功率总和等于吸收功率总和, 这就是电路的“功率平衡”。功率平衡是能量守恒定律在电路中的体现。

1.4.2 电能

电能是功率对时间的积累。其表达式可写为

$$W(t) = \int_{-\infty}^t p(\tau) d\tau = \int_{-\infty}^t u(\tau) i(\tau) d\tau \quad (1-7)$$

能量的单位是焦 [耳] (J), 定义为: 功率为 1W 的设备在 1s 时间内转换的电能。工程

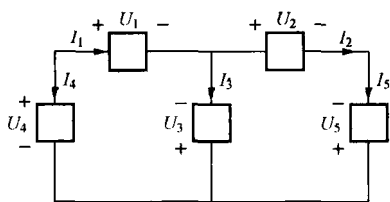


图 1-8 [例 1-4] 电路

上常采用千瓦小时 (kW · h) 作为电能的单位, 俗称 1 度电, 定义为: 功率为 1kW 的设备在 1h 内所转换的电能, $1 \text{ 度 (kW} \cdot \text{h)} = 3.6 \times 10^6 \text{ 焦耳 (J)}$ 。

【例 1-5】 一个 100W 的电灯泡, 4h 需要消耗多少能量?

解 由式 (1-7) 得

$$W(t) = Pt = 100 \times 4 \times 3600 = 1.44 \times 10^6 \text{ J} = 0.4 \text{ 度}$$

在实际应用中, 有时国际单位制 (SI 单位) 用起来太大或太小, 一般可加上如表 1-2 所示的国际单位制 SI 的词头, 构成 SI 的十进倍数或分数单位。

表 1-2 国际单位制前缀

所乘的 10 次幂	前 缀	符 号	所乘的 10 次幂	前 缀	符 号
10^{18}	艾	E	10^{-1}	分	d
10^{15}	拍	P	10^{-2}	厘	c
10^{12}	太	T	10^{-3}	毫	m
10^9	吉	G	10^{-6}	微	μ
10^6	兆	M	10^{-9}	纳	n
10^3	千	k	10^{-12}	皮	p
10^2	百	h	10^{-15}	飞	f
10^1	十	da	10^{-18}	阿	a

1.5 电阻元件和电源

1.5.1 电阻元件

1. 电阻元件的电压、电流关系——欧姆定律

导体对电子运动呈现的阻力称为电阻。对电流呈现阻力的元件称为电阻器, 如图 1-1 (a) 和图 1-2 (a) 所示电路中的灯泡、扬声器, 它们在电路中可用一个共同的模型——电阻元件来代替, 字母符号为 R , 电路符号如图 1-9 (a) 所示。电阻上的电压和电流有确定的对应关系, 可以用 $u-i$ 平面上的一条关系曲线, 即伏安曲线或数学方程式来表示。

如果电阻的伏安关系是一条通过原点的直线, 如图 1-9 (b) 所示, 则称为线性电阻。在如图 1-9 (a) 所示的关联方向下, 线性电阻的电压电流关系可用下式表示

$$u = Ri \quad \text{或} \quad i = Gu \tag{1-8}$$

式 (1-8) 是欧姆定律的表示式, 也就是说, 欧姆定律揭示了线性电阻电压与电流的约束关系。式中, R 和 G 是电阻的两个重要参数, 分别称为电阻和电导, 单位分别是欧 [姆] (Ω) 和西 [门子] (S)。 R 和 G 两参数间互为倒数关系。

线性电阻元件可简称为电阻。“电阻”一词及其符号 R 既表示电阻元件也表示该元件的参数。

如果电阻的伏安关系不是一条直线, 则称为非线性电阻, 半导体二极管就是一个非线性电阻器件, 当电压、电流为关联方向时, 其关系可用下式表示

$$i = I_S(e^{\frac{u}{U_T}} - 1) \tag{1-9}$$

式 (1-9) 中, I_S 为反向饱和电流; U_T 为温度电压当量, 常温下, $U_T \approx 26\text{mV}$ 。如图 1-10

所示是二极管的伏安关系曲线。

今后如未特别说明, 所讨论的电阻元件均指线性电阻。

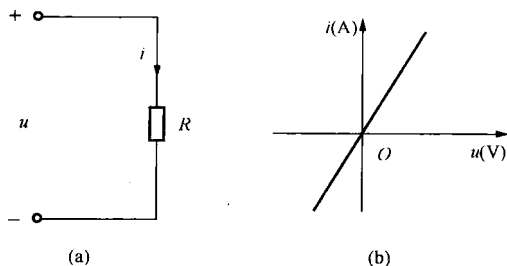


图 1-9 线性电阻的电路符号和伏安特性

(a) 电路符号; (b) 伏安特性

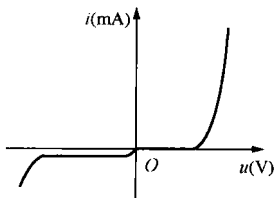


图 1-10 二极管的伏安特性

2. 开路和短路

有两个情况值得注意: 开路和短路。当一个二端元件(或电路)的端电压不论为何值时, 流过它的电流恒为零值, 此时该元件可看做一个 $R=\infty$ 的电阻, 或者说相当于一个断开的开关, 把它称为开路; 当流过一个二端元件(或电路)的电流不论为何值时, 它的端电压恒为零值, 此时该元件可看做一个 $R=0$ 的电阻, 或者说一个闭合的开关, 把它称为短路。

3. 电阻元件的功率

对于电阻元件来说, 若电压与电流为关联参考方向, 则在任何时刻, 电阻元件的功率为

$$p = ui$$

且

$$u = Ri$$

若电阻元件电压与电流参考方向相反, 电阻元件的功率

$$p = -ui$$

且

$$u = -Ri$$

综合上述两种情况, 可得线性电阻的功率计算公式为

$$p = \pm ui = i^2 R = \frac{u^2}{R} = Gu^2 \quad (1-10)$$

式(1-10)表明, 电阻的功率恒为正值, 说明电阻是耗能元件。

4. 电阻元件与电阻器

电阻元件是由实际电阻器抽象出来的理想化模型, 常用来模拟各种电阻器和其他电阻性器件。电阻和电阻器这两个概念的明显区别在于: 作为理想化的电阻元件, 其工作电压、电流和功率没有任何限制。而电阻器在一定电压、电流和功率范围内才能正常工作。电子设备中常用的碳膜电阻器、金属电阻器和线绕电阻器在生产制造时, 除注明标称电阻值(如 100Ω 、 $1k\Omega$ 、 $10k\Omega$ 等), 还要规定额定功率值(如 $1/8W$ 、 $1/4W$ 、 $1/2W$ 、 $1W$ 、 $2W$ 、 $5W$ 等), 以便用户参考。根据电阻 R 和额定功率 P_N , 可参照式(1-10)计算电阻器的额定电压 U_N 和额定电流 I_N 。例如, $R=100\Omega$, $P_N=1/4W$ 的电阻器的额定电压为

$$U_N = \sqrt{RP_N} = \sqrt{100 \times (1/4)} = 5V$$

其额定电流为

$$I_N = \sqrt{\frac{P_N}{R}} = \sqrt{\frac{1/4}{100}} = 50mA$$

同样, 电器设备也有额定值的问题。电器设备的额定值是由制造厂家给用户提供的, 它是设备安全运行的限额值, 又是设备经济运行的使用值。通常, 制造厂在一定条件下规定了电器设备的额定电压、额定电流和额定功率等, 电器设备只有在额定值情况下才能正常运行, 从而保证它的寿命。

外加电压大大高于额定电压, 电器设备的绝缘材料将被击穿, 造成短路或设备被烧毁。如果通过电器设备的电流超过额定值, 设备温度过高, 不仅影响寿命, 而且绝缘材料会因过热出现炭化, 破化其绝缘性能, 从而造成设备和人身事故。如果工作电压或工作电流比额定值小得多, 电器设备将处于不良工作状态, 甚至不能工作。例如 220V、100W 的灯泡, 接到 110V 的电压上, 灯光昏暗。电视机、洗衣机、电冰箱等如果电源电压过低, 也不能正常工作。

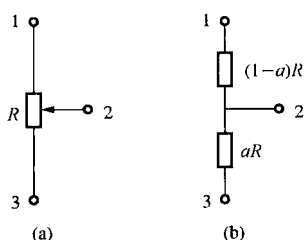


图 1-11 电位器

(a) 电路符号; (b) 电路模型

在电子设备中使用的碳膜电位器、实心电位器和线绕电位器是一种三端电阻器件, 它有一个滑动接触端和两个固定端, 如图 1-11 (a) 所示。在直流和低频工作时, 电位器可用两个可变电阻串联来模拟, 如图 1-11 (b) 所示。电位器的滑动端和任一固定端间的电阻值, 可以从零到标称值间连续变化, 可作为可变电阻器使用, 但应注意其工作电流不能超过额定电流值。

1.5.2 独立电源

将其他形式的能量转换成电能的设备称为电源。如果电源的参数都由电源本身的因素决定, 而不因电路的其他因素而改变, 则称为独立电源, 今后简称电源。

电源是电路的输入, 它在电路中起激励作用, 根据电源提供电量的不同, 可分为电压源和电流源两类。实际电源有电池、发电机、信号源等。电压源和电流源是从实际电源抽象得到的电路模型, 它们是二端有源元件。

1. 电压源

(1) 理想电压源。理想电压源 (简称电压源) 忽略了实际电压源的内阻, 是一种理想元件。它满足两个特点: 一是端电压为恒定值 (直流电压源) 或固定的时间函数 (交流电压源), 与所接外电路无关; 二是通过电压源的电流随外电路的不同而变化。其端电压一般用 U_s (直流电压源) 和 $u_s(t)$ (交流电压源) 表示, 电路符号如图 1-12 所示。在图 1-12 中, (a) 图为直流电压源的一般符号, “+”、“-”号表示电压源电压的参考极性; (b) 图是电池的电路符号, 其参考方向是由正极 (长线段) 指向负极 (短线段); (c) 图是交流电压源的电路符号。

根据理想电压源的端电压与外接电路无关的特点, 在理想电压源开路 and 接通外电路时, 其端电压即输出电压是相同的。但将端电压不为零的电压源短路是不允许的。这会导致很大的短路电流通过电压源而使其烧毁。

(2) 实际电压源。理想电压源实际是不存在的。实际电压源, 如干电池、蓄电池, 接通负载后, 其端电压会随其端电流的变化而变化, 这是因为实际电压源有内阻。对于一个实际的直流电压源, 可以用一个理想直流电压源 U_s 和内阻 R_i 相串联的模型来表示, 这就是实际电压源的电路模型, 如图 1-13 所示, 内阻 R_i 有时也称输入电阻。

实际电压源的端电压 (即输出电压) U 为

$$U = U_s - IR_i \quad (1-11)$$