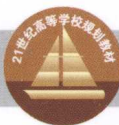


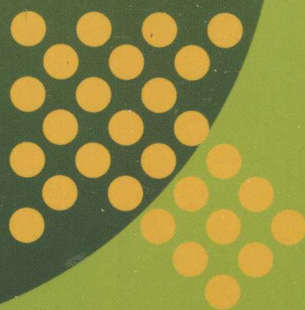
21世纪高等学校规划教材



DIANGONG DIANZI JISHU

电工电子技术

刘均波 主编



中国电力出版社

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

TM/214

2010

21世纪高等学校规划教材

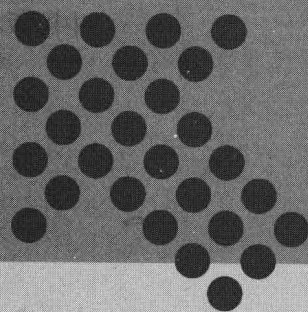


DIANGONG DIANZI JISHU

电工电子技术

主编 刘均波

主审 陈汝合



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。

本书分上、下两篇。上篇为电工技术部分,包括 1~6 章,分别是电路的组成及其分析方法、交流电路分析的基本方法、变压器、电动机、电动机的控制系统、实用电工知识简介;下篇为电子技术,包括 7~12 章,分别是放大器基础、集成运算放大器及其应用、电源电路、门电路和组合逻辑电路、触发器和时序逻辑电路、大规模集成电路。本书注意精选教材内容、注重理论联系实际、突出应用。在内容叙述上,力求通俗易懂、深浅适度,适宜教学和读者的自主学习。

本书可作为应用型本科院校机械类、电气信息类专业的教材,也可作为高职高专相关专业教材,还可作为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

电工电子技术/刘均波主编. —北京:中国电力出版社,2009

21 世纪高等学校规划教材

ISBN 978-7-5083-9615-6 刘均波 主编

I. 电… II. 刘… III. ①电工技术—高等学校—教材 ②电子技术—高等学校—教材 IV. TM TN

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 195812 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 1 月第一版 2010 年 1 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 20.75 印张 503 千字

印数 0001—3000 册 定价 33.20 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

“电工电子技术”是一门理论性、专业性、应用性均较强的课程，所涉及的教学内容广，内容本身也较难掌握。针对这些特点，我们在编写教材时，时刻把握住编写思路与宗旨，即“保证基本理论和基本分析方法，注意精选教材内容，注重理论联系实际。在内容叙述上，力求通俗易懂，深浅适度，适宜教学和读者的自主学习。”通过本课程的学习，可使学生获得电工与电子技术的基础理论、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。

本书主要面对 64~90 学时（含实验实训）的电工电子技术基础课程编写。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，例题、习题的选取也具有这个特点。总之，本教材注重了以下几方面的问题。

（1）在教材体系上更加实用合理。本书编排体系为电路基础、电动机和电气控制、电子技术三大部分内容。各部分之间既相互独立，又相互联系。教学时可根据专业、课程设置以及学时等要求加以选择。考虑到目前大多数院校课时的限制，本书对传统内容进行了适当精简，如压缩了变压器和电动机内容，淡化分立元件的介绍，而突出新技术、新成果，如将可编程逻辑器、大规模集成电路等内容纳入教材。

（2）在内容选取上突出工程实用性。为了加强学生的工程实践能力，每章后还附有大量的习题。在内容的编排上，力求通俗易懂，深入浅出，层次分明，语言流畅，便于自学。

（3）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，并将其应用到电气系统的设计和制作当中。

本书由刘均波主编并执笔，由陈汝合担任主审。此外，参加编写的还有王丰、张虹、解立明、杜德、王立梅、庄梅、张淑玲、王维兰、盖君清、刘玉民、赵乐森、管金华、高寒等。

在编写过程中，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，敬请广大读者予以批评指正，以便今后不断改进。

编者

2009 年 6 月

目 录

前言

上篇 电 工 技 术

第1章 电路的组成及其分析方法	1
1.1 电路的组成及其模型	1
1.2 电路的物理量	3
1.3 电路的基本元件	7
1.4 基尔霍夫定律	12
1.5 电路的基本分析方法	14
1.6 动态电路的过渡过程	24
本章小结	31
习题一	31
第2章 交流电路分析的基本方法	35
2.1 正弦交流电路的基本概念	35
2.2 正弦量的相量表示	38
2.3 单一参数正弦交流电路的分析	40
2.4 复阻抗与复导纳及简单正弦电路的计算	42
2.5 正弦交流电路的功率	44
2.6 功率因数的提高	45
2.7 谐振电路	46
2.8 三相正弦交流电路	50
2.9 非正弦交流电路	56
本章小结	64
习题二	65
第3章 变压器	68
3.1 磁场的基本物理量	68
3.2 铁磁性物质	69
3.3 磁路和磁路定律	71
3.4 铁芯线圈	74
3.5 变压器	77
本章小结	85
习题三	86

第 4 章 电动机	88
4.1 三相异步电动机的结构和工作原理	88
4.2 三相异步电动机的电磁转矩和机械特性	92
4.3 三相异步电动机的铭牌和技术数据	97
4.4 三相异步电动机的启动、调速和制动	98
4.5 单相异步电动机	102
4.6 直流电动机及其控制	103
4.7 三相异步电动机的选用	107
4.8 三相异步电动机的维护	111
4.9 三相异步电动机的常见故障与处理方法	113
本章小结	114
习题四	116
第 5 章 电动机的控制系统	116
5.1 常用低压控制电器	116
5.2 电气系统的基本控制环节	120
5.3 PLC 的特点与基本组成	124
5.4 PLC 的工作原理	129
5.5 PLC 的编程语言	130
5.6 PLC 的应用举例	133
本章小结	136
习题五	137
第 6 章 实用电工知识简介	140
6.1 常用电工仪器仪表	140
6.2 安全用电常识	153
6.3 导线的连接与绝缘的恢复	160
6.4 焊接技术	169
本章小结	175
习题六	175
下 篇 电 子 技 术	
第 7 章 放大器基础	177
7.1 半导体二极管及其应用电路	177
7.2 半导体三极管的特性	185
7.3 三极管放大电路	189
7.4 场效应管	199
本章小结	203
习题七	203

第 8 章 集成运算放大器及其应用	208
8.1 集成运算放大器的特性	208
8.2 集成运算放大器的组成	209
8.3 集成运算放大器应用电路	217
本章小结	225
习题八	225
第 9 章 电源电路	228
9.1 直流稳压电源	228
9.2 晶闸管整流电路	234
9.3 晶闸管逆变电路	243
9.4 开关型稳压电源	246
本章小结	248
习题九	248
第 10 章 门电路和组合逻辑电路	250
10.1 逻辑代数基础	250
10.2 逻辑门电路	253
10.3 逻辑函数	258
10.4 组合逻辑电路的分析与设计	260
10.5 常用中规模集成组合逻辑电路原理及其应用	262
本章小结	275
习题十	275
第 11 章 触发器和时序逻辑电路	280
11.1 双稳态触发器	280
11.2 寄存器	285
11.3 计数器	288
11.4 集成 555 定时器的原理及应用	293
本章小结	299
习题十一	300
第 12 章 大规模集成电路	304
12.1 数/模和模/数转换器	304
12.2 存储器及其应用	309
12.3 用大规模集成电路实现组合逻辑电路	315
本章小结	319
习题十二	319
参考文献	322

上篇 电 工 技 术

第 1 章 电路的组成及其分析方法

内 容 提 要

- (1) 电路的组成及其模型;
- (2) 电路的基本物理量和复合物理量;
- (3) 构成电路的基本元件——电阻、电容、电感和电源;
- (4) 电路的基本分析方法——支路电流法、等效变换法、网络定理分析法;
- (5) 一阶动态电路的分析。

1.1 电路的组成及其模型

1.1.1 电路的组成及其功能

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,都可以看到它的各种形式。可以说,只要是用电的物体,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。电压和电流是在电源的作用下产生的,可见,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。

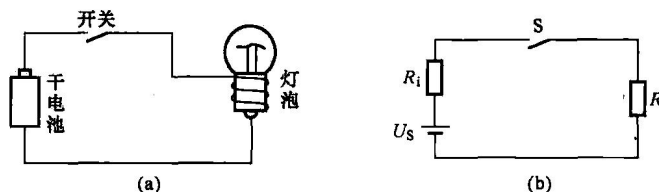


图 1-1 手电筒电路

(a) 实际电路; (b) 电路模型

1.1.2 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,忽略其次要因素,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,我们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。常用电路元件和符号如表 1-1 所列。

表 1-1

常用电路元件和符号

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,称为实际电路的电路模型。图 1-1 (b) 即为图 1-1 (a) 的电路模型。又如图 1-2 (a) 所示为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。

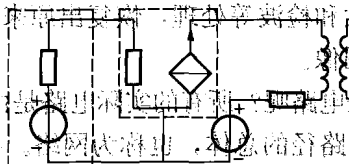
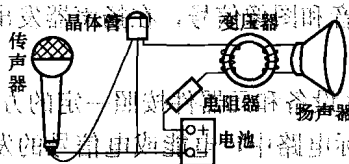


图 1-2 晶体管放大电路

(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来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,应用电阻元件和电感

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、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、晶体管、场效应管等为有源元件。

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,显然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。建模问题需要专门研究,绝不能草率定论。

1.1.3 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,其尺寸与这种波长相比可以忽略不计,因而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,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,今后常简称为电路。本书主要讨论其稳态电路,即直流电路,本书其余部分则讨论动态电路,即交流电路。

1.2 电路的物理量

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。

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。

1.2.1 电路的基本物理量

1.2.1.1 电流 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。

(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。电流强度的单位是安[培],用 A 表示,在计量微小电流时,通常用毫安(mA)或微安(μ A)作为单位。

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,而且由于时变电流的实际方向又随时间不断变化,因此在电路中很难标明电流的实际方向。为此引入电

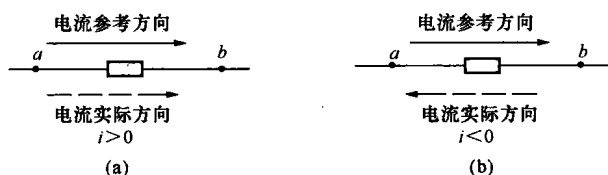


图 1-3 电流的参考方向与实际方向

流的“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 $i < 0$ 。显然，电流就成为一个具有正、负的代数量。

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 $u(t)$ 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。

(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：

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

式 (1-1) 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。可见电压就是指电压降。

电路中电位相同的点称为等电位点。等电位点的特点是，两个等电位点之间的电压等于零。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。

(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。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) 电压与电流的关联参考方向。通常，对于一个元件或一段电路，电压和电流参考方向都是可以任意选定的，彼此独立无关。但为了分析方便，习惯上将某一元件或某段电路的电压和电流的参考方向选得一致，即选定电流从标以电压“+”极性端流入而从标以“-”极性端流出，这样选定的电压和电流的参考方向称为关联参考方向，简称关联方向，如图 1-4 (a) 所示。否则，称非关联方向，如图 1-4 (b) 所示。

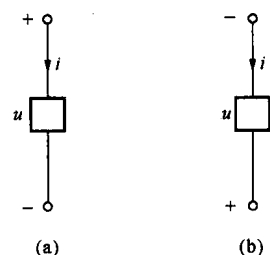


图 1-4 电压、电流的参考方向
(a) 关联方向；(b) 非关联方向

【例 1-1】如图 1-5 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} 。

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

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

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

$$V_c = -U_2 - U_1 + U_{S1} = -2 - 8 + 20 = 10\text{V}$$

$$V_d = U_3 + U_4 = 5 + 1 = 6\text{V}$$

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

根据式 (1-1), 求出两点间电压分别为

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

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

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

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

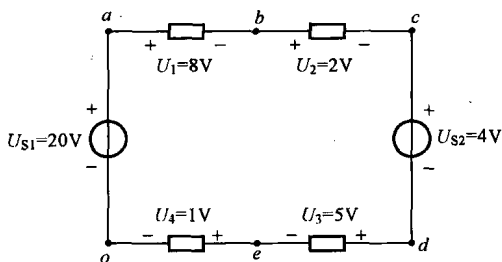


图 1-5 [例 1-1] 电路

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

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

【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

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

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:

$$u(t) = \frac{d\psi(t)}{dt} \quad (1-2)$$

1.2.2 电路的复合物理量——功率和能量

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. 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

$$p = \frac{dW}{dt} = \frac{dW}{dq} \frac{dq}{dt} = ui \quad (1-3)$$

应用式(1-3)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1-6所示电路中,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。

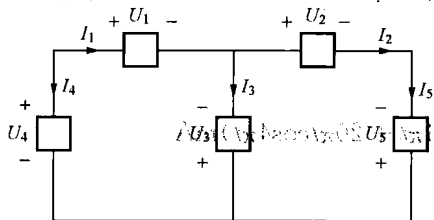


图1-6 [例1-4] 电路

解:根据题目所给已知条件可得

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

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

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

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

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

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。

2. 电能

电能是功率对时间的积累,其表达式可写为

$$W(t) = \int_{-\infty}^t p(\tau) d\tau = \int_{-\infty}^t u(\tau) i(\tau) d\tau \quad (1-4)$$

能量的单位是焦[耳](J),定义:功率为1W的设备在1s内转换的电能。工程上常采用千瓦时($\text{kW} \cdot \text{h}$)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, $1\text{度}(\text{kW} \cdot \text{h}) = 3.6 \times 10^6 \text{焦耳}(\text{J})$ 。

【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

1.3 电路的基本元件

1.3.1 电阻元件

1. 电阻元件的电压、电流关系及功率

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,电阻器的电路模型是电阻元件,字母符号为 R ,电路符号如图1-7(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1-7(b)所示,则称为线性电阻。在如图1-7(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:

$$u = Ri \quad \text{或} \quad i = Gu \quad (1-5)$$

式(1-5)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 两参数在数值上互为倒数关系。

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。今后如未特别说明,所讨论的电阻元件均指线性电阻。

在任意时刻,电阻上消耗的功率为

$$p = \pm ui = i^2 R = \frac{u^2}{R} = Gu^2 \quad (1-6)$$

式中的“+”、“-”号与电压及电流的参考方向有关。式(1-6)表明,对于线性正电阻($R > 0$)来说,瞬时功率恒为非负值。它在任一时刻吸收的能量也非负,即满足

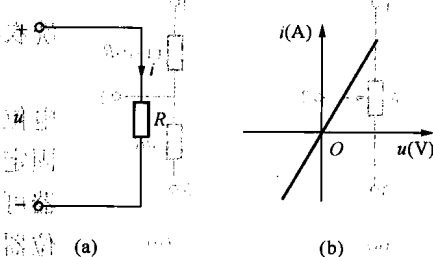


图 1-7 线性电阻的电路符号和伏安特性
(a) 电路符号; (b) 伏安特性

$$W(t) = \int_{-\infty}^t p(\tau) d\tau = \int_{-\infty}^t u(\tau) i(\tau) d\tau \geq 0 \quad (1-7)$$

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，故把它称为开路；当流过二端元件（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，故把它称为短路。

3. 电阻器与额定值

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。实际的电阻器必须在一定的电压、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），以使用户参考。

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，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，破坏其绝缘性能，也能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，就不能正常工作。

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 1-8 (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 1-8 (b) 所示。电位器的滑动端和任一固定端间的电阻值，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。

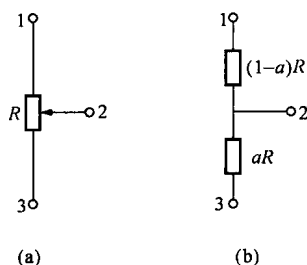


图 1-8 电位器

(a) 电路符号；(b) 电路模型

1.3.2 电容元件

电容是电路中最常见的基本元件之一。两块金属板之间用介质隔开就构成了实际的电容器。电容器在工程上应用非常广泛，种类规格也很多，常用的有电解电容器、瓷片电容器等。电容元件是各种实际电容器的电路模型，它是一种理想元件，简称电容，用 C 表示。其电路符号如图 1-9 (a) 所示。

电容具有充、放电的特性，当在其两端加上电压，两个极板间就会建立电场，储存电场能量，这是充电过程；反之，若给储存有电能的电容提供放电回路，它就会释放其中的能量，这是电容的放电过程。电容放电时，相当于一个电压源。

电容是一种能够储存电场能量的元件，储存能量的多少通常用电容量（简称电容）这个

参数来表征, 该参数也用 C 表示。在国际单位制中, 电容的单位为法 [拉], 用 F 表示。此外还有微法 (μF)、纳法 (nF) 和皮法 (pF), 它们与 F 的关系是

$$1F = 10^6 \mu F = 10^9 nF = 10^{12} pF$$

电容极板上储存的电荷量 q 与两极板间建立起的电压 u 成线性关系, 写成表达式为

$$q = Cu \quad (1-8)$$

与式 (1-8) 对应的库-伏特性如图 1-9 (b) 所示。

如图 1-9 (a) 所示, 当电压、电流选为关联方向时, 其伏安关系为

$$i = \frac{dq}{dt} = C \frac{du}{dt} \quad (1-9)$$

式 (1-9) 说明, 电容元件上的电压与电流是一种微分关系, 即电流与该时刻电压的变化率成正比。显然, 电压变化越快, 即变化频率越大, 电流就越大; 如果电压不变化, 即加上直流电压, 则 $i=0$, 电容相当于开路。这正是电容的一个明显特征: 通高频, 阻低频; 通交流, 隔直流。利用该特性, 可用电容制成滤波器。

电容的储能式为

$$W_C = \frac{1}{2} Cu^2(t) \quad (1-10)$$

式 (1-10) 表明: 任意时刻电容的储能总是大于或等于零, 由此可知, 电容属于无源元件。

在实际中, 考虑到电容器的容量及耐压, 常常要将电容器串联或并联起来使用。

电容并联时, 其等效电容等于各并联电容之和。电容的并联相当于极板面积的增大, 增大了电容量。当电容器的耐压符合要求而容量不足时, 可将多个电容并联起来使用。

电容串联时, 等效电容的倒数等于各串联电容倒数之和。电容串联时, 其等效电容比串联时的任一个电容都小。这是因为电容串联相当于加大了极板间的距离, 从而减小了电容。若电容的耐压值小于外加电压, 则可将几个电容串联使用。

电容串联时, 各个电容上的电压与其电容的大小成反比。电容小的所承受的电压高, 电容大的所承受的电压反而低。这一点在使用时要注意。

电容可采用既有并联又有串联的接法, 以获得所需要的电容量和耐压。

1.3.3 电感元件

实际的电感器 (也称为线圈) 是用导线绕制而成的。根据用途的不同, 电感器也有很多的种类, 但它们可用电感元件这个理想化模型来代替, 电感元件简称电感, 用 L 表示。其电路符号如图 1-10 (a) 所示。

电感同样具有储存和释放能量的特点。当在电感中通入交流电流 i 时, 电感周围就会建立磁场, 即储存了磁场能量, 而在电感两端会出现感应电压 u 。电感储存能量的多少通常用电感系数 (简称电感) 表征, 该参数也用 L 表示。在国际单位制中, 电感的单位为亨

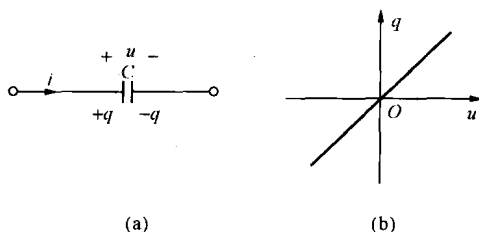


图 1-9 电容元件

(a) 电路符号; (b) 库-伏特性

[利], 用 H 表示, 此外还有毫亨 (mH)、微亨 (μH), 它们与 H 的关系是

$$1\text{H} = 10^3\text{mH} = 10^6\mu\text{H}$$

在如图 1-10 (a) 所示关联参考方向下, 电感的磁链与电流成线性关系, 即

$$\Psi(t) = Li(t) \quad (1-11)$$

与式 (1-11) 对应的韦-安特性如图

1-10 (b) 所示。

关联方向下, 电感元件的伏安关系为

$$u = L \frac{di}{dt} \quad (1-12)$$

上式表明, 电感元件的伏安关系为微分关系, 即感应电压与该时刻电流的变化率成正比。

电流的变化率越大, 则 u 越大。倘若电流不变化, 即在直流电路中, 则电压 $u=0$, 电感

相当于短路。显然, 电感具有通低频、阻高频的作用, 也可用来制成滤波器。

电感的储能公式为

电感的储能公式为

$$W_L = \frac{1}{2} Li^2(t) \quad (1-13)$$

式 (1-13) 表明: 任意时刻电感的储能总是大于或等于零, 由此可知, 电感也属于无源元件。

对于无互感的电感来说, 当其串并联时, 其等效电感的求解方法与电容的串并联正好相反。此处不再赘述。

1.3.4 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

电路理论中常将实际电压源的内阻忽略, 得到理想电压源。理想电压源满足两个特点: 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则随外电路的不同而变化。其电路符号如图 1-11 所示。图 1-11 (a) 为直流电压源的一般符号, “+”、“-”号表示电压源电压的参考极性。图 1-11 (b) 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)。图 1-11 (c) 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, 否则会导致很大的短路电流通过电压源而使其烧毁。

理想电压源实际上是不存在的。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,

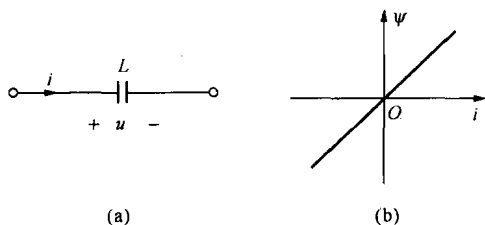


图 1-10 电感元件
(a) 电路符号; (b) 韦-安特性