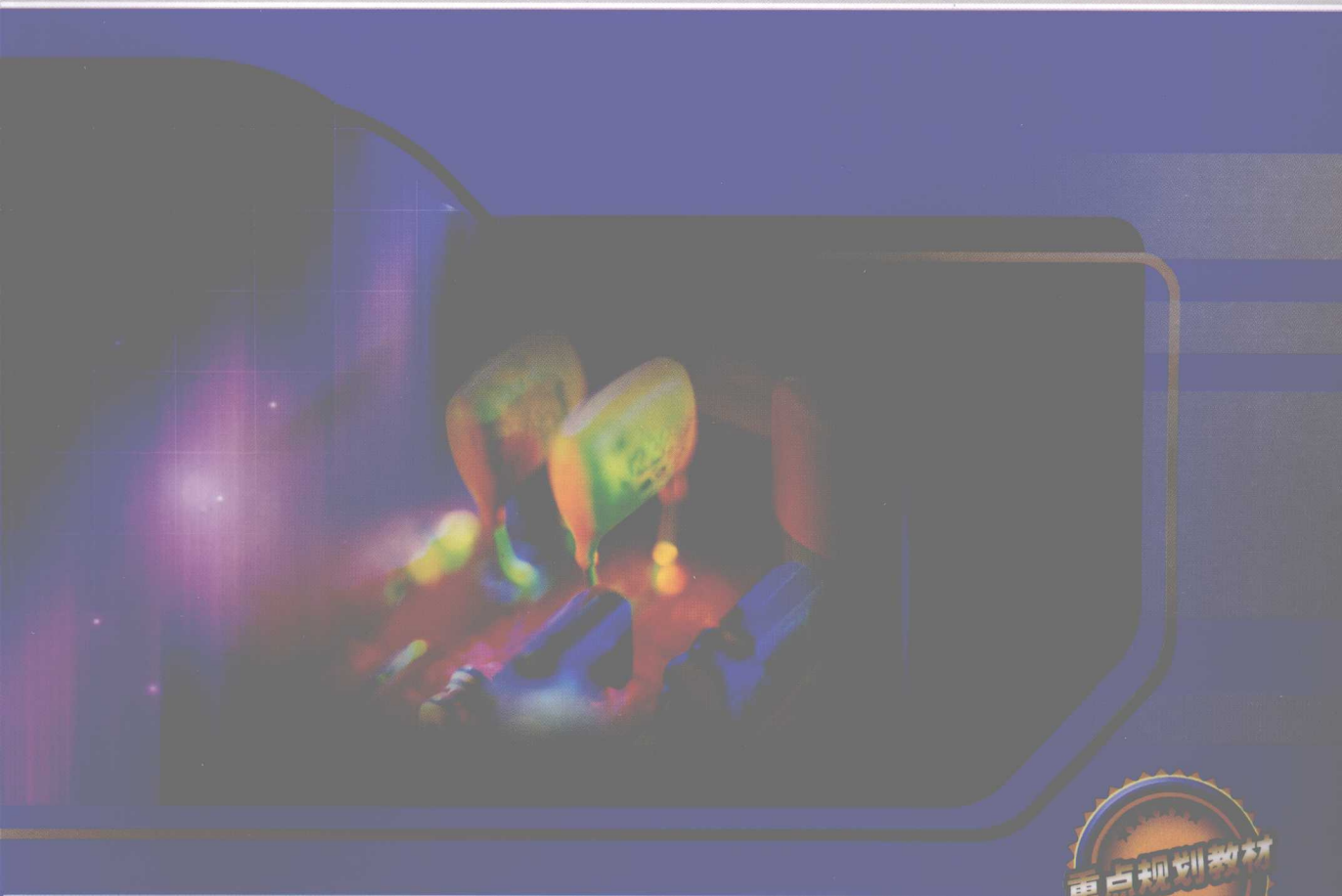




国家级电工电子教学基地“十一五”规划教材

电工技术

席志红 主编



 哈尔滨工程大学出版社
Harbin Engineering University Press



电工技术

席志红 主编 李鸿林 张忠民 徐 伟 汤春明 参编 王淑钧 主审

江苏工业学院图书馆
藏书章

 **哈尔滨工程大学出版社**
Harbin Engineering University Press

内 容 简 介

本书是根据国家教委高等工科院校电工学课程指导小组审定的“电工技术教学基本要求”编写的。编写过程中编者根据对1997年出版的原教材的使用意见,并参照当前电工技术的新发展,以及高等院校教学的新形式对书中部分章节进行了较大幅度地调整和修改,并增加部分新内容。其主要内容包括:电路的基本理论及分析方法,电路的暂态过程,交流电路的特征及分析方法,磁路及常用电器,电机及其控制,PLC可编程序控制器,安全用电,通用变频器基础及应用等。

本书可作为高等工科院校非电类专业本科教学之用,也可供工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

电工技术/席志红主编. —哈尔滨:哈尔滨工程大学出版社,2008.5

ISBN 978 - 7 - 81133 - 259 - 9

I . 电… II . 席… III . 电工技术 - 高等学校 - 教材
IV . TM

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 044200 号

出版发行 哈尔滨工程大学出版社
社 址 哈尔滨市南岗区东大直街 124 号
邮政编码 150001
发行电话 0451 - 82519328
传 真 0451 - 82519699
经 销 新华书店
印 刷 肇东粮食印刷厂
开 本 787mm × 1 092mm 1/16
印 张 18
字 数 412 千字
版 次 2008 年 4 月第 1 版
印 次 2008 年 4 月第 1 次印刷
定 价 29.00 元

<http://press.hrbeu.edu.cn>

E-mail: heupress@hrbeu.edu.cn

前言

本书是在哈尔滨工程大学出版社 1997 年出版的原教材的基础上,根据我们多年的教学经验及对原书的使用意见,结合电工技术发展的趋势,并针对当前高等院校教学的新形势重新编写的。同原书相比,本书中部分章节有较大幅度地调整和修改,并有新内容补充。此次修订之后,又增加了新内容。

在编写过程中,我们注重理论联系实际,阐述简单明了,力求使本书内容丰富,知识面广,通俗易懂,知识具有延展性。书中前五章为电路的基本理论,属于经典部分。编写时,我们注重理论连贯,内容紧凑。个别章节的内容与传统的讲授方式不尽相同,并增加部分教学大纲之外的内容供学生参考、阅读,使其知识能向更深、更广的层次延伸。在磁路与变压器、电机及电机控制部分,注重理论的通用性,并增加部分内容与实例以开阔学生的知识面。在 PLC 可编程序控制器部分,根据 PLC 目前应用普及,品种较多,且各自不同的特点,重点介绍电器的基本结构、工作原理、分析及设计的基本方法、通用指令等,并配以实例。书中还对安全用电基本知识进行了介绍。最后,针对目前工业变频器的飞速发展和普及应用的形势,还对变频调速的基础知识和通用变频器基本原理及应用作以简单介绍,以使学生对这一新技术有一定的掌握。

本书还附有实验指导教程,另行出版。有关电工测量及实践部分内容可参阅实验指导教程。

由于编者水平有限,实际经验不足,书中难免有许多缺欠之处,尤其在新技术新内容上更有不成熟之处,恳请各位读者批评指正。

编 者

2008 年 4 月

目 录

1 电路的基本概念和基本定律	1
1.1 电路的组成和作用	1
1.2 电路模型	2
1.3 电路的物理量和参考方向	2
1.4 电路元件	5
1.5 基尔霍夫定律	14
1.6 电路中电位的概念及计算	17
习题	19
2 电路的基本分析方法	23
2.1 无源电路的等效变换	23
2.2 有源电路的等效变换	25
2.3 支路电流法	29
2.4 节点电压法	30
2.5 叠加原理	33
2.6 等效电源定理	35
2.7 负载获得最大功率的条件	39
2.8 含受控电源电路的分析	40
2.9 非线性电阻电路的分析	43
习题	45
3 电路的暂态分析	50
3.1 换路定则及电压、电流的初始值	50
3.2 一阶电路的暂态响应	53
3.3 三要素法	63
3.4 微分电路与积分电路	65
* 3.5 RLC 串联二阶电路的动态响应	67
习题	71
4 正弦交流电路	74
4.1 正弦交流电的基本概念	74
4.2 正弦量的相量表示法	77
4.3 单一参数交流电路	81
4.4 电阻、电感与电容元件串联的交流电路	86
4.5 阻抗的串联与并联	92
4.6 正弦交流电路中的谐振	98
4.7 功率因数的提高	102
4.8 非正弦周期信号电路	106
习题	108

5 三相正弦交流电路	113
5.1 三相电源	113
5.2 三相负载	116
5.3 三相功率	120
习题	122
6 磁路与变压器	124
6.1 磁路的基本概念和基本定律	124
6.2 交流铁芯线圈	131
6.3 变压器	133
* 6.4 电磁铁	141
习题	143
7 异步电动机	145
7.1 三相异步电动机的构造	145
7.2 三相异步电动机的铭牌数据	147
7.3 三相异步电动机的工作原理	149
7.4 三相异步电动机的运行	152
7.5 三相异步电动机的电磁转矩和机械特性	156
7.6 三相异步电动机的起动	159
7.7 三相异步电动机的调速	163
7.8 三相异步电动机的反转与制动	166
7.9 单相异步电动机	168
习题	171
8 直流电机	174
8.1 直流电机的结构及铭牌参数	174
8.2 直流电机的工作原理	176
8.3 直流电动机的分类和机械特性	177
8.4 直流电动机的运行	181
习题	184
9 常用控制电器及控制线路	185
9.1 常用控制电器和保护电器	185
9.2 鼠笼式异步电动机的直接起动控制	193
9.3 鼠笼式异步电动机的正反转控制线路	195
9.4 自动往复行程控制	197
9.5 异步电动机的时间控制	198
9.6 异步电动机的顺序控制	200
9.7 电器原理图的识图	201

习题	203
10 可编程控制器	206
10.1 概述	206
10.2 可编程控制器的结构及工作原理	208
10.3 可编程控制器的编程元件、梯形图及指令系统	212
10.4 可编程控制器的应用	230
习题	236
11 供电与安全用电	241
11.1 电力系统简介	241
11.2 工业企业供电	242
11.3 安全用电	243
11.4 电气防火、防爆	246
12 通用变频器基础及其应用	248
12.1 变频调速基本原理及控制方式	248
12.2 通用变频器的基本结构和主要功能	254
12.3 松下 VFO 超小型变频器介绍	256
12.4 VFO 变频器变频控制示例	271
参考文献	277

1 电路的基本概念和基本定律

电路的基本概念和定律是分析电路的重要基础。

本章主要讨论的是电压电流参考方向、基尔霍夫定律、电源的工作状态及电路中电位的概念以及计算等。这些内容均是分析与计算电路的基础。其中参考方向是个极其重要的概念,将贯穿于本课程的始终;电路元件的特性以及电路的基本定律,即基尔霍夫定律是电路分析的基本依据。

本章与下一章内容虽然主要是就直流电路提出的,但只要稍加扩展,原则上也适用于交流电路的分析和计算。

1.1 电路的组成和作用

电流流过的全部通路称为电路,也可称为网络。电路是由一些用电设备或器件组成的总体。电路通常由电源、负载和中间环节三部分组成。

电路的结构是多种多样的,因而它们所完成任务也是不同的,最典型的例子就是简单照明电路和扩音机电路。

在图 1-1 所示的简单照明电路中,电池把化学能转换成电能,提供给电灯,电灯再把电能转换成光能作照明之用。



图 1-1 简单照明电路

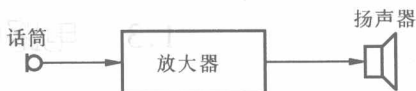


图 1-2 扩音机电路

在图 1-2 所示电路中,话筒把声音转换成为相应的电压和电流,即电信号,而后通过电路传递到扬声器,把电信号还原成声音。其中由于话筒输出的电信号较弱,因此在话筒和扬声器之间加入放大器,放大电信号。在这里话筒是输出信号的设备,相当于电源,扬声器相当于负载。

从上边两个例子可以看出,虽然电路类型有所不同,但它们均包含有电源、负载、导线三部分,所有电路基本结构也是这样。当然实际电路除了以上三个基本部分以外,还常根据需要增添一些辅助设备,如接通断开电路的控制电器(如刀开关)、保障安全用电的保护电器等。

图 1-1 所示电路的作用是实现电能的传输和转换。图 1-2 所示电路的作用是传递和处理信号等。因此,电路的作用有以上两个方面。

不论是电能的传输和转换,还是信号的传递和处理,其中电源或信号源的电压或它们的

电流称为激励,推动电路工作。由激励在电路各部分产生的电压和电流称为响应。所谓电路分析,就是在已知电路结构和元件参数的条件下讨论电路的激励与响应之间的关系。

1.2 电路模型

实际电路均是由一些按需要起不同作用的实际电路元件或器件所组成,如发电机、变压器、电池、晶体管及各种电感、电阻、电容等。它们的电磁性质比较复杂,最简单的例子如白炽灯。它除了具有消耗电能的性质(电阻性)之外,当通过电流时还会产生磁场,即还具有电感性,但电感微小,可忽略不计,于是可把白炽灯认为是一电阻元件。

为了简化对实际电路进行分析和数学描述,可将实际元件理想化,即在一定条件下,突出其主要电磁性质,忽略次要因素,把它近似地看作理想元件。由一些理想元件所组成的电路,就是实际电路的电路模型,它是对实际电路的电磁性质的科学抽象和概括。在理想元件(也称元件)中主要有电阻元件、电感元件、电容元件和电源元件等,这些元件分别由相应的参数来表示。

例如常用的手电筒,其实际电路元件有干电池、电珠、开关。电珠是电阻元件,其参数为电阻 R ,干电池是电源元件,其参数是电动势 E 和内电阻 R_0 ,筒体是连接干电池和电珠的中间环节(还包括开关),其电阻忽略不计,认为是一无电阻的理想导体。这样,它的理想电路模型如图 1-3 所示。

今后分析的都是电路模型,简称电路。电路图中,各种电路元件用规定的图形符号来表示。

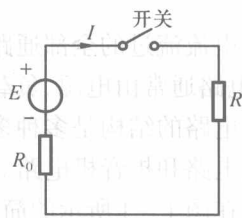


图 1-3

1.3 电路的物理量和参考方向

描述电路的物理量有电流、电压、功率等。这些物理量在物理学中都已学过,本节作简要复习,重点介绍电流与电压的参考方向这一概念。

1.3.1 电流

电流是由电荷(带电粒子)有规则地定向运动而形成的。电流在数值上等于单位时间内通过某一导体横截面的电荷量,电流的方向规定为正电荷运动的方向。设在极短的时间 dt 内通过导体横截面 s 的微小电荷量为 dq ,则电流为

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

上式表示的电流是随时间变化的,是时间的函数。 i 称为瞬时电流,若电流不随时间变化,即 dq/dt 为常数,则这种电流称为恒定电流,简称直流,用大写字母 I 表示。式(1-1)可改写为

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

电荷在电场力作用下运动形成电流。电荷本身既不能被创造也不会被消灭,这种特性称



为电荷守恒性。

电流强度的单位是安培,用 A 表示,对于较小电流,则用毫安(mA)、微安(μA) 来表示,它们之间的关系是 $1\text{ A} = 10^3\text{ mA} = 10^6\text{ }\mu\text{A}$ 。

电流的方向是客观存在的。在分析较复杂的直流电路时,往往难于事先判定某支路中电流的实际方向;对交流电路而言,电流的方向又是随时间变化的,因此在电路中无法用一恒定方向来表示电流的实际方向。为解决这个问题,引入了参考方向这一概念。参考方向是在电路元件上任意选定某一方向作为电流的正方向,所选电流方向即参考方向并不一定与电流的实际

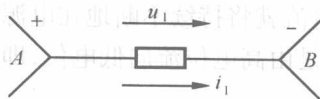


图 1-4

方向一致。当参考方向和实际方向一致时,电流为正值,反之为负值。电流的参考方向有两种表示方法,一是使用箭头,一是双下标。如图 1-4, i_{AB} 即表示电流的参考方向是由 A 指向 B;使用箭头时,是用有箭头的线段及相应的文字来表示电流的参考方向,如 i_1 。

1.3.2 电压与电动势

在图 1-5 中,电池正极板 a 带正电荷,负极板 b 带负电荷,于是在极板 a、b 之间就存在电场。若用导线将电源极板与负载灯泡相连,则正电荷就在电场力的作用下从 a 极经导线、灯泡移至 b 极形成电流并使灯泡发光,说明电场做功。为衡量电场力对电荷做功能力的大小,引入电压物理量,其定义为 a、b 两点间的电压 U_{ab} 在数值上等于把单位正电荷从 a 移至 b 电场力所做的功。用公式表示:

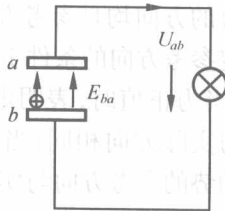


图 1-5

$$U_{ab} = \frac{W}{Q} \quad (1-3)$$

式中字母都用大写字母表示,说明 a、b 两点间的电压是直流电压。在电场内两点间电压也常称为两点间电位差,即

$$U_{ab} = U_a - U_b \quad (1-4)$$

式中 U_a 和 U_b 分别为 a、b 两点的电位。

在图 1-5 中,如果电池内部没有非电力,那么正电荷在电场的作用下,从高电位 a 向低电位 b 移动。这样,电极 b 因正电荷的增多而使电位逐渐升高,其结果是 a 和 b 两电极的电位差逐渐减少至零。与此同时,连接导体中的电流也相应地减小至零。

为了维持电流不断地在连接导体中流通,并保持恒定,则必须使 a、b 间的电压 U_{ab} 保持恒定,也就是要使电极 b 上所增加的正电荷经过另一路流向电极 a,但由于电场力的作用,电极 b 上的正电荷不能逆电场而上。因此,必须要有能克服电场力而使电极 b 上的正电荷流向电极 a 的另一种力。电源就能产生这种力,我们称之为电源力。电源力在电源内部不断地把 b 极上的正电荷从低电位点移至高电位点。只有克服电场力做功,才能维持电路中持续不断的电流流通。为了衡量电源力对电荷做功的能力,我们引入电动势这一物理量。其定义为电源电动势 E_{ba} ,它在数值上等于电源力把单位正电荷从电源的低电位点 b 经电源内部移至高电位点 a 所做的功,用公式表示:

$$E_{ba} = \frac{W}{Q} \quad (1-5)$$

比较式(1-5)和式(1-3),可知电动势和电压具有相同的单位,但两者的物理概念却不同。在电源内部电源力做功,将非电能转化为电能,建立电动势维持两极间的电压;而在外电路电场力做功,将电能转化为非电能。由于电动势的作用,电源两极间存在电压,只要电路接通,电流就将持续不断地在电源内部由负极流向正极,即由低电位流向高电位;而在外电路,电流是由高电位流向低电位,即电位下降的方向。随时间变化的电压表示为

$$u_{ab} = \frac{dw}{dq} \quad (1-6)$$

式中, q 为从 a 点移至 b 点随时间变化的电量; w 为电场力移动电荷 q 所做的功; u_{ab} 为瞬时电压。

电压和电动势均是标量,但在分析电路时,和电流一样,也具有方向。电压的方向规定由高电位(“+”极性)端指向低电位(“-”极性)端,即为电位降低的方向。电源电动势的方向规定为在电源内部由低电位(“-”极性)端指向高电位端(“+”极性),即为电位升高的方向。

和电流一样,在电路图中所标的电压和电动势的方向均是参考方向(也称参考极性)。在指定参考方向的条件下,它们还是有正负之分的。当为正值时,表明电压或电动势的参考方向与实际方向相同;当为负值时,表明电压或电动势的参考方向与实际方向相反。电压和电动势的参考方向表示方法有三种,如图1-6所示。在国际单位制中,电压的单位为伏特(V),

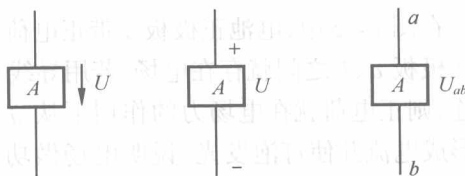


图 1-6

也可用千伏(kV)、毫伏(mV)、微伏(μ V)做单位,其关系为 $1 \text{ kV} = 10^3 \text{ V}$, $1 \text{ V} = 10^3 \text{ mV} = 10^6 \mu\text{V}$ 。电功的单位为焦耳(J),电荷的单位为库仑(C)时,电压的单位为伏特(V)。

按参考方向求得的电压和电流值有两种可能,若为正值,说明参考方向与实际方向一致;若为负值,则说明参考方向与实际方向相反。这两种情况均不影响电路分析的正确性。应注意的是在电路分析中,必须先设定电压和电流及电源电动势的参考方向,否则电路分析的结果很容易出错。

在电路分析中,为使分析计算方便,对同一电路的无源元件如电阻,若设定了电压的参考方向,若电流的参考方向与电压的参考方向保持一致,即所谓的关联参考方向(一致性);若电压和电流参考方向相反,则谓非关联参考方向(非一致性)。这里要提醒的是,电源由于其特性,在电路分析中,电源两端的电压和电流一般是非关联方向。

1.3.3 功率

功率的符号为 $p(t)$ 简写成 p ,直流时的功率常用 P 来表示。功率的定义是电能对时间的变化率,即

$$p = \frac{dw}{dt} \quad (1-7)$$

上式变化得

$$p = \frac{dw}{dt} = \frac{dw}{dq} \times \frac{dq}{dt} = ui \quad (1-8)$$

即功率等于电压和电流的乘积。其单位为瓦特(W) 或者千瓦(kW)、毫瓦(mW)。

在图 1-7 所示电路中,电源电动势 E 和电阻 R 两端的电压 U 以及电路中电流 I 的参考方向均和实际方向相同,用式(1-8)求得电阻 R 上消耗的功率 $P_R = UI$ 和电源产生的功率 $P_E = \frac{W_E}{t} = EI$ 相等。这符合功率平衡关系。由此可知,当元件上的电压和电流的实际方向相同时,该元件消耗功率;反之,发出功率。即元件上的电压和电流取关联参考方向时

$$P = UI \quad (1-9)$$

若不知道电路中元件电压和电流的实际方向,应如何根据参考方向来计算该元件的功率,又怎样根据计算结果来判断该元件在电路中是电源还是负载。这就要归结到讨论功率正、负值的问题,以及如何根据功率的正负来判定该元件在电路中的性质(消耗功率还是产生功率)。

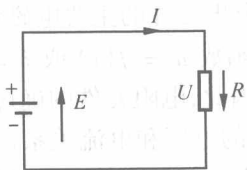


图 1-7

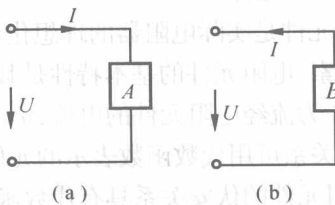


图 1-8

在图 1-8(a) 中元件 A 的电压和电流设为关联方向,则根据 $P = UI$ 公式计算其功率时,若 U 和 I 的参考方向都与实际方向相同(U 、 I 均取正值),或相反(U 、 I 均取负),则 $P > 0$,这说明元件 A 的性质是负载;若 U 或 I 的参考方向与实际方向相反,即 U 、 I 中有一个正值和一个负值,则 $P < 0$,这说明 元件 A 产生或发出功率,因此元件 A 是电源。如图 1-8(b) 所示,若元件 B 上的电压和电流的参考方向为非关联方向时,则功率公式变为

$$P = -UI \quad (1-10)$$

若 U 、 I 均取正值或负值则 $P < 0$,说明元件 B 的电压和电流的实际方向相反,故元件 B 产生功率,是电源。若 U 、 I 中一个取正值,一个取负值,则 $P > 0$,说明元件 B 吸收(消耗)功率,是负载。综上所述,可得如下结论:

① 当元件两端的电压和电流的参考方向为关联方向时,用 $P = UI$ 来计算元件功率;当参考方向为非关联方向时,用 $P = -UI$ 来计算。

② 当 $P > 0$,该元件在电路中消耗功率,是负载;当 $P < 0$,该元件在电路中产生功率,是电源。

在电路中,通常负载都是并联运行的,原因是多方面的。其中主要是因为电源端电压几乎是不变的,所以负载的两端电压也是差不多不变的。因此,当负载增加,即它取用的总电流和总功率均增加,则电源输出的功率和电流也相应增加。

1.4 电路元件

由于电路实体的形式多种多样,为找出它们的共同规律,为研究具体的电路分析和计算

的方法,我们把电路中各个实际的电路元件都用表征其物理性质的理想元件来取代,这种用理想元件组成的电路称为电路实体的电路模型。

实际电路元件的物理性质,从能量转换的角度来看,有电能的产生、电能消耗以及电场能量和磁场能量的储存。理想元件就是用来表征上述这些单一物理性质的元件,它有理想无源元件和理想电源元件两类。

1.4.1 理想无源元件

理想无源元件包括理想电阻元件、理想电容元件及理想电感元件三种,简称电阻元件(电阻)、电容元件(电容)、电感元件(电感)。这样,上述三个名词既代表了三种理想电路元件,又是表征它们量值大小的参数。严格地说,实际的电路元件都不是理想的,但在大多数情况下,可将它们近似地看成理想的电路元件。

(1) 电阻元件

电阻元件是实际电阻器的理想化模型。所谓理想,就是突出元件的主要电磁性质,而忽略其次要因素。电阻元件的基本特性是其电压与电流可用代数函数 $u = f(i)$ 或 $i = g(u)$ 来表示,其中 i 为流经电阻元件的电流, u 为电阻元件的端电压。因此,电阻元件的确切定义为电压和电流的关系可用代数函数表示的元件称为电阻元件。元件的电压和电流关系常简称为伏安关系。电阻元件的伏安关系具有代数函数形式,这意味着电阻元件某瞬时的电流只与该瞬时的电压有关,而与该瞬时以前的情形无关,因此电阻常称为瞬时元件或无记忆元件。

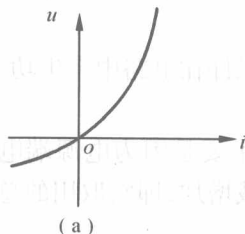
电阻元件的伏安关系可用 $u - i$ 平面上的图形来表示,称为元件的伏安特性曲线。图 1-9(a) 是某电阻元件的伏安特性曲线,这种元件称为非线性电阻元件,我们将在第二章中讨论。如果元件的电流与电压成正比,则其伏安特性曲线是一条通过原点的直线,如图 1-9(b) 所示,则该元件称为线性电阻元件。线性电阻元件的符号可用图 1-10 表示。在图中所示的关联参考方向条件下,线性电阻的欧姆定律可写成

$$u = Ri \quad (1-11a)$$

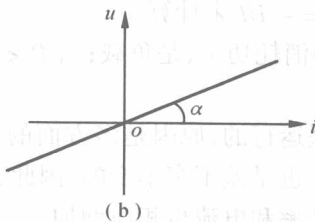
或

$$i = Gu \quad (1-11b)$$

其中, $G = 1/R$, R 表示元件的电阻值,单位是欧姆,简称欧,用 Ω 表示; G 表示元件的电导值,单位是西门子,简称西,用 S 表示。电阻值和电导值统称为元件的参数。在应用式(1-11)时,一定要注意 u 、 i 取关联方向。若 u 、 i 取非关联方向,则应有 $u = -Ri$ 或 $i = -Gu$ 。



(a)



(b)

图 1-9 电阻元件伏安特性



图 1-10

在图 1-9(b) 中,电阻值为

$$R = \frac{u}{i} = \frac{m_u}{m_i} \tan \alpha$$

其中, m_u 和 m_i 分别为电压轴和电流轴的比例尺; α 是伏安特性直线与电流轴的夹角。可见, 线性电阻元件的电阻值(电导值) 是一个与电流、电压无关的常数, 因此用电阻值(电导值) 便足以表示元件的性质与作用。给定线性电阻元件的电阻值(电导值) 后, 其电流与电压的关系便可确定。 $R = 0 (G = \infty)$ 的一段电路称为短路。若通以有限电流, 其端电压恒为零, 可见短路的伏安特性线与电流轴重合。电路中出现 $R = \infty (G = 0)$ 的地方称为开路。在有限电压作用下, 开路处电流恒为零, 其伏安特性线与电压轴重合。

由式(1-8)和式(1-11)可得电阻元件的功率表达式为

$$p = ui = i^2 R = \frac{u^2}{R} \quad (1-12a)$$

或

$$p = u^2 G = \frac{i^2}{G} \quad (1-12b)$$

通常 $R > 0$, 因此 $p > 0$ 。这说明电阻元件总在消耗电功率, 它是一种耗能元件, 具有把电能转换成热能的特性。

在 t_1 至 t_2 期间内, 电阻元件消耗的电能为

$$W = \int_{t_1}^{t_2} p dt = \int_{t_1}^{t_2} ui dt = R \int_{t_1}^{t_2} i^2 dt = G \int_{t_1}^{t_2} u^2 dt \quad (1-13)$$

在直流电情况下, 式(1-13)为

$$W = P(t_2 - t_1) = UI(t_2 - t_1) = I^2 R(t_2 - t_1) = GU^2(t_2 - t_1)$$

实际电阻元件在工作时, 如果电流太大或电压过高, 会因发热厉害而被烧毁, 因此电阻都规定有电流、电压或功率的额定值(又叫标称值)。额定值是电器工作的最佳值, 是制造厂家提供的, 是规定设备运行时所允许的上限值, 故使用时不能超过, 当然也不宜低于额定值工作。在电工技术中, 用下标“N”表示额定值。

例 1-1 有一电阻炉, 额定功率为 800 W, 额定电压为 220 V, 求其额定电流及其电阻值。

解 根据 $P = UI = I^2 R$ 可求得额定电流及电阻值分别为

$$I_N = \frac{P_N}{U_N} = \frac{800}{220} = 3.64 \text{ A}$$

$$R = \frac{U_N^2}{P_N} = \frac{220^2}{800} = 60.5 \Omega$$

(2) 电容元件

如图 1-11(a)(b) 所示, 电容是用来表征电容器储存电场能这一物理性质的理想元件, 当电路的某一部分只具有储存电场能的性质时, 这部分电路便可理想的电容元件来代替。当电路中有电容器存在时, 它的两个被绝缘体隔开的金属极板上会聚集起等量的异号电荷。电压 u 越高, 聚集的电荷 q 越多, 产生的电场越强, 储存的电场能就越多, q 与 u 的比值

$$C = \frac{q}{u} \quad (1-14)$$

称为电容, q 的单位为库伦(C), u 的单位为伏特(V), C 的单位为法拉(F)。由上式可知, 电容数学上的定义: 电量 $q(t)$ 与电压 $u(t)$ 之间具有代数函数关系的元件。电容元件的特性可用 $q-u$ 平面上的图形来表示, 称为库伏曲线如图 1-11(c)(d) 所示。这条曲线可能是过原点的直线, 也可能是曲线。前者称为线性电容元件, 后者称为非线性电容元件。若无特殊声明, 今后涉及的电容均为线性电容元件。在国际单位制中, 电容的单位是法拉。但由于在实际应用

中电容的数值都较小,因此,电容常用的单位是微法(μF)、皮法(pF)。法拉(F)、微法(μF)和皮法(pF)之间的关系是

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

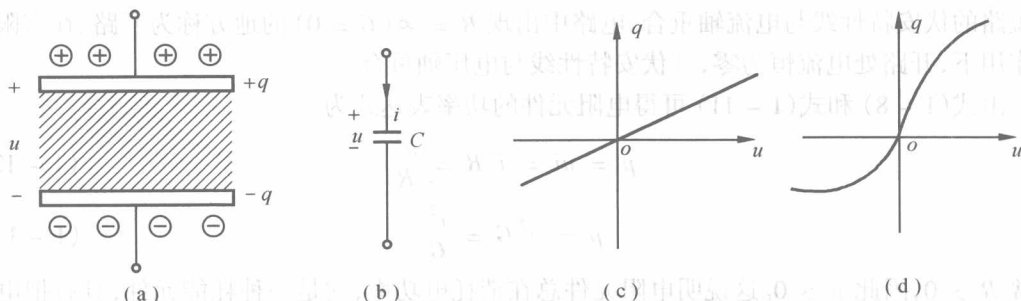


图 1-11

在直流电路中,电容元件端电压不变,储存在极板上的电量及介质的电场都不随时间变化,导线中没有电荷移动,因而没有电流,故电容元件对直流相当于开路。但是,如果在电容元件两端加上交流电压,当电压增加,元件储存的电量增加,这个过程叫充电;当电压减小,元件储存的电量减小,这个过程叫做放电。元件在反复充放电的过程中,储存的电荷随之增加或减少,因而在导线中必然有电荷的移动从而形成电流。由式(1-1)可知

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

又由式(1-14)得 $q(t) = Cu(t)$,因而电容元件在 u 和 i 为关联方向条件下的伏安关系式为

$$i = C \frac{du}{dt} \quad (1-15)$$

上式表明,电容元件的电流与其端电压的导数成正比。

如果用电流表示电压,则式(1-15)的关系又可以写成

$$u(t) = \frac{1}{C} \int_{-\infty}^t i dt = \frac{1}{C} \int_{-\infty}^0 i dt + \frac{1}{C} \int_0^t i dt$$

如令

$$u(0) = \frac{1}{C} \int_{-\infty}^0 i dt$$

则得

$$u(t) = u(0) + \frac{1}{C} \int_0^t i dt \quad (1-16)$$

式中 $u(0)$ 是 $t = 0$ 时的电容电压。式(1-16)表明,在 t 时刻的电容电压不仅与初始电压 $u(0)$ 有关,而且与 0 至 t 时间内电流的所有可能值有关。由于电容器的这种性质,人们把电容器叫做有记忆本领的元件。如果 $t = 0$ 时,电容电压为零,由式(1-16)得

$$u(t) = \frac{1}{C} \int_0^t i dt$$

电容元件的瞬时功率为

$$p(t) = ui = Cu \frac{du}{dt}$$

电容元件吸收的电能 W_c 等于对瞬时功率的积分, 即

$$W_c = \int_{-\infty}^t p dt = \int_{-\infty}^t Cu \frac{du}{dt} \cdot dt = \frac{1}{2} C [u^2(t) - u^2(-\infty)] \quad (1-17)$$

若 $u(-\infty) = 0$, 则有

$$W_c = \frac{1}{2} Cu^2 \quad (1-18)$$

上式表明, 电容储存的能量与电压的平方成正比, 与电压建立的过程无关。电压增加时, 瞬时功率为正, 能量增加, 电源供给的能量转换为电场能量储存在电容中; 电压减小时, 瞬时功率为负, 能量减少, 储存的电场能量以某种方式释放出来。因此, 电容是不消耗能量的储能元件。

各种电容器上一般都标有电容的标称值、误差和额定工作电压。后者是电容器长期 ($\geq 10\,000\text{ h}$) 可靠安全工作的最高电压, 用“WV”表示。当电压达到某一值时, 电容器中的介质便会被击穿, 这个电压称为击穿电压。电容器的额定工作电压一般设为击穿电压的 $2/3$ 到 $1/3$ 左右。此外, 有的电容器还标有试验电压, 它是电容器短时间内 ($5\text{ s} \leq t \leq 1\text{ min}$) 能承受而不会被击穿的电压, 用“TV”来表示。额定工作电压(WV) 一般为试验电压(TV) 的 $50\% \sim 70\%$ 。电容器上标明的额定工作电压和试验电压通常为直流电压。

例 1-2 图 1-12 中所示电容 $C = 1\text{ F}$, 已知 $u(0) = 0$, 外加电流波形如图(a) 所示, 求: 电压 u 并画出其波形。

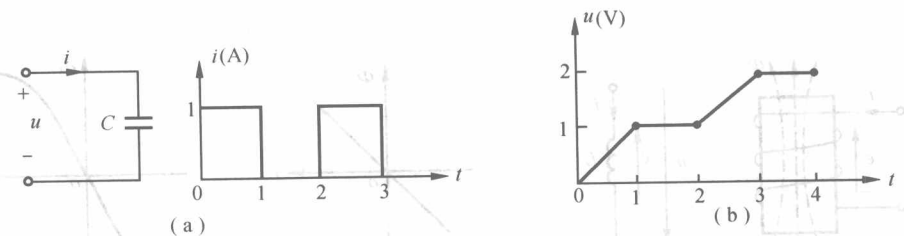


图 1-12

解 外加电流 i 的表达式为

$$i = \begin{cases} 1\text{ A} & 0 < t < 1 \\ 0 & 1 < t < 2 \\ 1\text{ A} & 2 < t < 3 \\ 0 & 3 < t \end{cases}$$

由式(1-16)式可得

$$u(t) = u(0) + \frac{1}{C} \int_0^t i dt = \begin{cases} u(0) + \int_0^t 1 dt = t \text{ V} & 0 \leq t \leq 1 \\ u(1) + \int_1^t 0 dt = u(1) = 1 \text{ V} & 1 \leq t \leq 2 \\ u(2) + \int_2^t 1 dt = 1 + t - 2 = (t - 1) \text{ V} & 2 \leq t \leq 3 \\ u(3) + \int_3^t 0 dt = u(3) = 2 \text{ V} & t \geq 3 \end{cases}$$

电容电压 $u(t)$ 波形如图(b) 所示。由此题可知,来了一个电流脉冲后,电容电压增加 1 V,由电压的数值即可知道通过电容电流脉冲的个数。通过此例我们可进一步体会到电容电压记忆电流的作用。

(3) 电感元件

电感是用来表征电感线圈储存磁场能这一物理性质的理想元件。当电路中有电感(线圈) 存在时,电流通过线圈会产生比较集中的磁场。

在图 1-13(a) 中,设线圈的匝数为 N ,电流 i 通过线圈时产生的磁通为 Φ ,二者乘积称为线圈的磁链,它与电流的比值

$$\Psi = N\Phi \quad (1-19)$$

$$L = \frac{\Psi}{i} \quad (1-20)$$

称为电感器(线圈) 的电感量。式中, Ψ 和 Φ 的单位为韦伯(Wb), i 的单位为安培(A), L 的单位为亨利(H)。当 L 为常数时, Φ 、 i 之间的关系(又称韦安特性) 是一条通过原点的直线,如图 1-13(c) 所示,这种电感称为线性电感,否则便是非线性电感,如图 1-13(d) 所示。通常空芯线圈是线性电感,而铁芯线圈都是非线性电感。

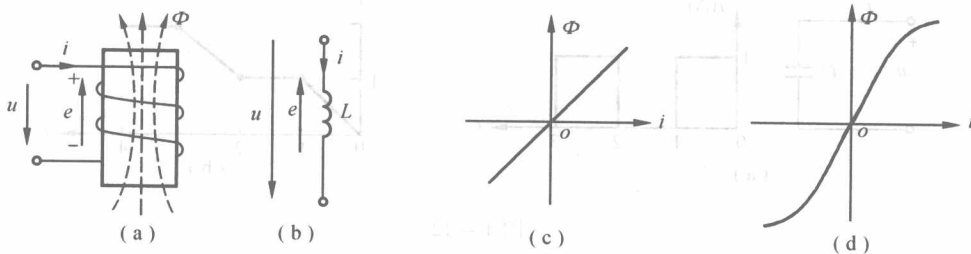


图 1-13

当电感线圈中的电流 i 变化时,磁通 Φ 将随之改变,于是,变化的磁通又会在该线圈中产生感生电动势,设它的参考方向与电流 i 的参考方向相反,如图所示。根据楞次定律可知感生电动势将抵抗电流的变化。在图 1-13(a) 中,当 i 增加时, e 的实际方向与参考方向一致, e 取正值;当 i 减小时, e 的实际方向与参考方向相反, e 取负值。因此,感生电动势 e 的大小可由下式确定

$$e = \frac{d\Psi}{dt} = N \frac{d\Phi}{dt} \quad (1-21)$$

对于线性电感,由式(1-20) 可得