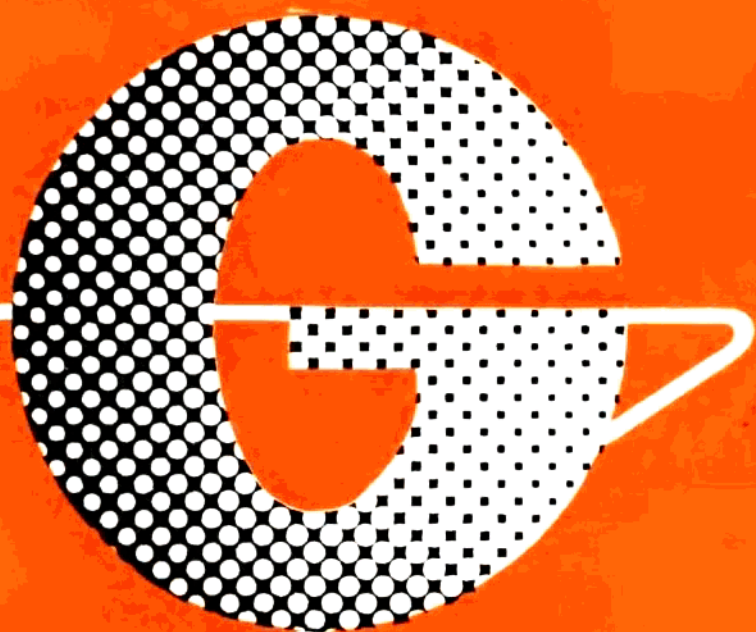


高等专科学校试用教材

电工基础



湘潭机电专科学校 叶国恭 主编

机械工业出版社

前 言

本书是根据机械电子工业部全国高等专科学校电气工程专业教材编审委员会的决定,按照《电工基础》课程组1988年8月上海会议商定的基本内容和基本要求编写的。

高等工业专科教育的目标是为工厂生产第一线培养工艺和应用技术人材。根据近几年来办专科的经验与专科毕业生参加工作后的反映,技术基础课的教学内容和要求应当是:在保证必要的理论基础的同时,提高针对性,努力培养学生对生产中实际问题的分析判断能力。因此,本书在描述电磁过程和电磁现象时强调了物理概念,相对减少一些数学论证。

本书编入的内容绝大部分属于经典内容,使学生在有限的时间内,比较牢固地掌握这些内容,为进一步学习电类专业课打好基础。

本书是按理论教学时数110学时编写的。主要内容有电路基本概念和基本定律;电路模型的等效变换;线性网络的一般分析方法;正弦稳态电路的分析;二端口网络和多端元件;电路的计算机辅助分析简介;磁路和铁心线圈电路;非线性电阻电路等。每章配有较多的习题。书末附有部分习题答案、名词索引与中英文名词对照。

本书中量的名称和符号、单位的名称和符号均贯彻国家法定计量单位及有关国家标准。

本书由叶国恭主编,并编写第一、二、三、四、九、十二章;陈菊红编写第五、六、七章;李中峰编写第八、十、十一章。全书共十二章。陈跃进工程师负责全书的绘图。

本书由江南大学龚正毅教授主审,湖南纺织专科学校程应森副教授也详细审阅了本书初稿,并提出了许多宝贵意见。本书经1989年10月在湖南召开的审稿会议通过,参加审稿会议的学校有:江南大学、南京机械专科学校、哈尔滨机电专科学校、郑州机械专科学校、湖南纺织专科学校以及湘潭机电专科学校等。

本书的编写参考了国内已出版的许多教材,从中得到不少启发与教益。此外,还参考了一些兄弟院校的讲义、教材,汇集了许多老师的教学经验。在此,编者谨向有关老师深表谢意。

本书适用于高等专科院校、成人院校电气(包括应用与制造)类专业师生及有关专业技术人员。

由于水平所限,一定有不少缺点和错误,希望读者批评指正。

编者

1989年12月

目 录

第一章 电路的基本概念和基本定律.....1	§ 5-2 正弦量的相量表示法.....107
§ 1-1 电路及电路模型.....1	§ 5-3 电阻元件伏安关系的相量形式.....104
§ 1-2 电路中常用的物理量及参考方向.....4	§ 5-4 电感元件及其伏安关系的相量形式.....105
§ 1-3 电阻元件.....9	§ 5-5 电容元件及其伏安关系的相量形式.....108
§ 1-4 独立电源.....12	§ 5-6 基尔霍夫定律的相量形式.....112
§ 1-5 受控电源.....14	§ 5-7 R 、 L 、 C 串联电路及复阻抗.....113
§ 1-6 基尔霍夫定律.....16	§ 5-8 R 、 L 、 C 并联电路及复导纳.....116
习题一.....20	§ 5-9 无源二端网络的等效复阻抗和复导纳.....119
第二章 电路的等效变换.....27	§ 5-10 正弦电流电路的分析计算.....122
§ 2-1 电阻的串联电路.....27	§ 5-11 正弦电路的功率.....126
§ 2-2 电阻的并联电路.....29	§ 5-12 实际元件的电路模型.....136
§ 2-3 电阻的混联电路.....31	§ 5-13 串联电路的谐振.....137
§ 2-4 电压源、电流源的串联和并联.....33	§ 5-14 并联电路的谐振.....141
§ 2-5 实际电源的两种电路模型及其等效变换.....35	习题五.....143
§ 2-6 电源的转移.....40	第六章 互感电路.....149
§ 2-7 电阻的三角形和星形联接及其等效变换.....41	§ 6-1 互感及互感电压.....149
§ 2-8 对称电路.....43	§ 6-2 互感线圈的联接及等效电路.....153
习题二.....44	§ 6-3 互感电路的计算.....156
第三章 网络的基本分析方法和定理.....50	§ 6-4 空心变压器.....159
§ 3-1 支路电流法.....50	习题六.....161
§ 3-2 回路电流法.....52	第七章 三相电路.....165
§ 3-3 节点电压法.....57	§ 7-1 三相交流电压的产生.....165
§ 3-4 叠加定理.....63	§ 7-2 三相电源的联接.....166
§ 3-5 置换定理.....68	§ 7-3 三相负载的联接.....168
§ 3-6 戴维南定理和诺顿定理.....70	§ 7-4 对称三相电路的计算.....170
§ 3-7 最大功率传输和传输效率.....75	§ 7-5 不对称三相电路的计算.....174
习题三.....78	§ 7-6 三相电路功率及其测量.....177
第四章 非线性电阻电路.....83	习题七.....180
§ 4-1 非线性电阻元件.....83	第八章 非正弦周期电流电路.....183
§ 4-2 图解法.....85	§ 8-1 非正弦周期电流.....183
§ 4-3 分段线性化法.....89	§ 8-2 周期非正弦函数分解为傅里叶级数.....184
§ 4-4 小信号分析法.....91	§ 8-3 非正弦量的有效值、平均值及非正弦电路的功率.....190
习题四.....94	
第五章 正弦稳态分析.....96	
§ 5-1 正弦量的基本概念.....96	

§ 8-4 非正弦周期电流电路的计算.....193	习题十285
§ 8-5 滤波器.....197	第十一章 电路的计算机辅助分析简介...288
习题八200	§ 11-1 网络图的基本概念288
第九章 动态电路分析205	§ 11-2 拓扑矩阵290
§ 9-1 概述.....205	§ 11-3 基尔霍夫定律的矩阵形式292
§ 9-2 动态电路初始值的计算.....206	§ 11-4 节点电压方程的矩阵形式294
§ 9-3 一阶电路的响应.....209	§ 11-5 电网络的计算机辅助分析举例298
§ 9-4 三要素法及其应用举例.....219	习题十一302
§ 9-5 微分电路和积分电路.....226	第十二章 磁路和铁心线圈电路305
§ 9-6 电容电压和电感电流的突变.....232	§ 12-1 磁路的基本概念和基本定律305
§ 9-7 R 、 L 、 C 串联电路的零输入响 应.....236	§ 12-2 铁磁物质的磁化313
§ 9-8 拉普拉斯变换.....245	§ 12-3 磁路定律316
§ 9-9 电路定理的运算形式.....253	§ 12-4 直流磁路的计算318
§ 9-10 运算法256	§ 12-5 交流磁路323
习题九259	§ 12-6 铁心线圈电路328
第十章 二端口网络和多端元件265	§ 12-7 电磁铁吸力计算333
§ 10-1 二端口网络265	习题十二335
§ 10-2 二端口网络的方程和参数266	附表12-1 常用铁磁材料基本磁化数据 表337
§ 10-3 网络函数274	附表12-2 几种电工钢片铁损数据表339
§ 10-4 二端口网络的特性阻抗276	名词索引与中英名词对照341
§ 10-5 二端口网络的等效电路279	部分习题答案352
§ 10-6 运算放大器280	参考文献362
§ 10-7 理想变压器283	

第一章 电路的基本概念和基本定律

§ 1-1 电路及电路模型

电气设备和电路器件按照一定方式组合起来,构成电流的通路,叫做电路。实际电路是由电源、负载、联接导线及控制开关和测量、监视电器等构成的整体。手电筒电路是典型的简单实际电路,如图1-1所示,其中电池是提供电能的装置,叫电源;灯泡是消耗电能的装置,叫负载;联接导线和按钮是电路的传输和控制部分。

实际电路按其功能可分为两大类:一类电路的任务是产生、传输、分配和使用电能,由发电机、变压器、输电线以及各类用户构成的电力网,是这类电路的典型实例。发电机将其他形式的能量转换成电能,而在用户中又把电能转换成机械能、光能、热能等。对这类电路要求尽可能减少损耗,以提高效率。另一类电路的任务是对电信号进行传递和处理,如通信设备、电视机、计算机等;对这些电路我们最关心的是如何准确地传递和处理信号,即保证信号的不失真。

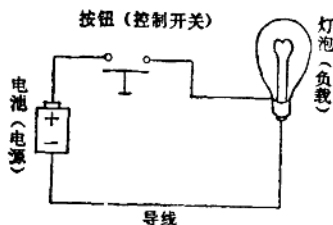


图1-1 手电筒电路

电路的功能是通过电流、电压这两个最基本的物理量来体现的。探求电流、电压之间关系,分析已知具体结构的电路以及它们产生的电功率和实现具有确定功能的电路的方法,构成了电路学。由上所述,可知电路学包括两个分支:前者叫电路分析,后者叫电路综合,本书只讨论电路分析。电路分析的任务是对工程中各不同种类、不同功能的电路,找出其共有的规律,从而形成电路共有的基本理论和基本研究方法。为了分析方便,常将实际电气设备和器件用足以反映其电磁性质的一些理想化的电路元件的组合来代替,构成电路模型。理想化电路元件是具有某种确定单一性质的理想元件。例如理想电阻元件表示电路中的电能损耗,即具有将电能转换为其他形式能量的性质的元件;理想电容元件表示电路中的电场效应,即具有储存和释放电场能量的性质的元件;理想电感元件表示电路中的磁场效应,即具有储存和释放磁场能量的性质的元件。能将其他形式能量(如化学能、机械能或太阳能等)转换为电能的装置,称为电源元件,电路中常引用的理想电源有理想电压源、理想电流源和理想受控源等。应当指出,电路分析的对象是电路模型而不是实际的电路。一个实际电路在不同的工作条件下必须用不同的电路模型表示。

每一种理想化的电路元件(有时省略“理想化”而简称电路元件),事实上又都是某一种实际装置的理想化模型,它们具有各自的精确定义,以后我们将一一详细讨论。

电路元件按其能否对外提供电能,可分为有源与无源两类。例如,电阻元件、电感元件和电容元件就是无源元件。电压源、电流源、受控源是有源元件。

电路元件还按其与其外界联接的端钮数可分为二端元件和多端元件。通常在电路分析中，常引用的电阻元件、电感元件和电容元件是三种最基本的二端无源元件。近代广泛应用的运算放大器则是一个多端元件。

当实际电路的几何尺寸远小于电路中的电磁波的波长时，整个电路的实际尺寸可以略而不计，这种电路往往可用有限数目的理想化的电路元件来构成其模型。组成这种电路模型的元件叫集中元件。例如，前面所述的电阻元件、电感元件和电容元件就是最基本的二端集中元件。对二端集中元件来说，任何时刻，从其一端流入的电流必然等于从另一端流出的电流；并且，元件两个端钮间的电压值也是完全确定的。对多端集中元件而言，任何时刻，从任一端钮流入的电流值及任意两个端钮间的电压值也都是完全确定的。有时电路的尺寸相对于电磁波的波长来说并不是微不足道的。例如在电子计算机中，当频率为500MHz时，相应的波长为0.6m，用由一定数目的集中元件组成的模型来分析这种电路时误差就很大；在微波电路中，信号波长以厘米或毫米计，集中模型更不能表示实际器件的外部特性了，这时必须考虑电流电压的空间分布。这样的元件，叫分布元件，例如长的输电线就是分布元件。

集中元件的特性可以用参数来描述。电阻参数 R 表示电阻元件的电压和电流的关系；电感参数 L 表示电感元件的电流和磁链的关系；电容参数 C 表示电容元件的电荷和电压的关系。

为了分析和计算的方便，用规定的符号表示集中元件，并以无电阻的理想导线联接各集中元件构成电路图。图1-2是图1-1实际电路的电路图。电路图并不反映实际电路（元件）的大小尺寸，因为集中元件模型成立时，电路（元件）的大小尺寸就无关紧要了。表1-1列出了我国国家标准中规定的一些常用电路图形符号。

电路可按其中元件的参数值是否随时间变化而分为定常和时变两类。

电路除上述分类外，尚有其他不同的分类方法。如按构成模型的元件特性和电流电压的变化规律，电路可分成以下几类：

线性电路与非线性电路。凡元件参数不随电流电压的变化而变动的元件，称为线性元件。由线性元件构成的电路，叫线性电路；否则叫非线性电路。

集中参数电路和分布参数电路。前已述及，当实际电路的几何尺寸远小于电磁波的波长时，我们可以把 R 、 L 、 C 三种参数“集中”起来分别用集中元件代表它们，这种由有限个数目的集中元件联接而成的电路模型，称为集中参数电路；另一方面，如果不能把这些参数“集中”起来用有限数目的集中元件构成模型，这种电路就称为分布参数电路。应当指出，工程上遇到的电路常常可以作为线性集中参数电路，故线性集中参数电路理论是电路的最基本理论。

此外，电路还可以分为直流电路和交流电路，电阻性电路和动态电路，正弦交流电路和非正弦交流电路，单相电路和三相电路等等。这些将在后续章节中逐一具体讨论。

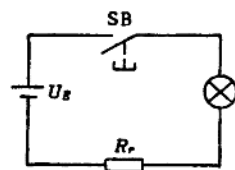
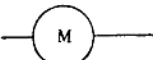
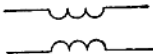
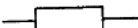
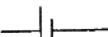
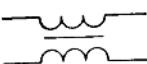
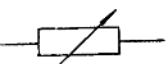
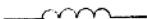
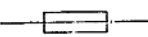
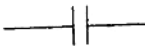


图1-2 手电筒电路的电路图

表1-1 常用电路图形符号

名 称	符 号	名 称	符 号	名 称	符 号
导线		安培表		稳压二 极管	
联接导线		伏特表		电动机	
零电位点		瓦特表		双绕组 变压器	
电阻器		电池		带铁心 的双绕组 变压器	
可变电阻器		开关		绕 组	
电感器		熔断器		晶体管	
电容器		照明灯		传声器	
电压源		二极管		扬声器	
电流源					

§ 1-2 电路中常用的物理量及参考方向

一、电流

带电粒子在电场力作用下作有秩序的运动形成电流。设在 dt 时间内通过电路某横截面的电荷为 dQ , 则有

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

式中 i 为电流强度, 简称电流。

因此, 电流是一种物理现象, 又是一个物理量。如果电流强度是不随时间变化的, 则用大写字母 I 表示, 称为恒定电流或直流电流, 且有

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

式中 Q 为经历时间 t 流过电路某横截面的电荷。

习惯上将正电荷的运动方向作为电流的实际方向, 它恰好与金属导体中电子(带负电荷)运动的方向相反。显然, 流过一根导体的电流, 其大小处处相等, 这叫电流的连续性, 如图1-3所示。

应当注意, 电流传输的快慢与电荷在导体中移动的速度是两个不同的概念, 前者是电磁波的传播速度。

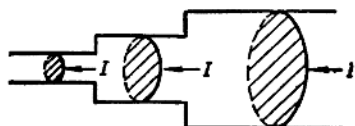


图1-3 电流的连续性

在国际单位制中, 电荷的基本单位是库仑(C),

一个电子的电荷是 $1.6021 \times 10^{-19} \text{C}$, 即 6.242×10^{18}

个电子的电荷是 1 C; 时间的基本单位是秒(s); 电流的基本单位是安[培](A)。对于较小的电流, 常用毫安(mA)或微安(μA), 它们的关系是

$$1 \text{ A} = 10^3 \text{ mA} = 10^6 \mu\text{A}$$

对于较大的电流, 则用千安(kA), 且

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

电流是确定电路工作状态的基本物理量, 要确切地表明电路工作状态, 应同时给出电流的大小和方向, 有电流量值而没有指明方向的答案是不完备的。虽然, 对于很简单的直流电路, 根据电源的“+”“-”极性在电路图上预先标明电流的实际方向并不困难。但当电路比较复杂时, 有些电流的实际方向就很难看出。

交流电路的电流的实际方向是随时间交替地变化的, 就更无法在电路图上标明每一时刻电流的实际方向。为了解决这个问题, 在电路计算中可假定一个正电荷的运动方向, 习惯上常称为正方向或参考方向。电流的参考方向是任意选定的, 在电路中一般用箭头表示, 也可以用双下标表示, 如 i_{ab} , 其参考方向是从 a 指向 b , 如图1-4所示。当计算结果是电流的量值为正时, 则表明电流的实际方向与假定的参考方向一致; 反之, 若计算结果是电流的量值为负, 则表明电流的实际方向与假定的参考方向相反。应当指出, 今后电路图中所标明的方向均是参考方向。

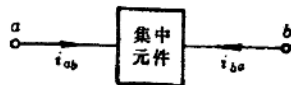


图1-4 电流的参考方向

电流的实际方向是存在于电路中的客观事实，不会因所选参考方向的改变而改变。因此，对同一电流来说，若选定参考方向相反，则其值大小不变，但符号相反，即有

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

实际电路中电流的量值用电流表测量。对于直流电路，因直流电流表的两个联接端钮标有“+”、“-”标记，根据电流表指针的偏转情况，可以判断电流的实际方向。

例1-1 若已知每秒有5 C正电荷由导线从a移到b。问

- (1) 若电流参考方向是由a指向b，导线中的电流是多少？
- (2) 若电流参考方向是由b指向a，导线中的电流又是多少？
- (3) 若移动是每秒5 C负电荷，则在两种参考方向下的电流是否变化？

解：(1) 若电流参考方向是由a指向b，则参考方向恰好与正电荷运动方向相同，故导线中的电流

$$I_{ab} = 5 \text{ A}$$

(2) 若电流的参考方向是从b指向a，则参考方向与正电荷运动方向相反，故导线中的电流

$$I_{ba} = -5 \text{ A}$$

(3) 若在导线中是每秒5 C负电荷从a移到b，可以看成是每秒有5 C正电荷从b移到a。因此，当电流参考方向是从a指向b时，导线中的电流

$$I_{ab} = -5 \text{ A}$$

当导线中电流的参考方向是从b指向a时，导线中的电流

$$I_{ba} = 5 \text{ A}$$

二、电压

电荷在电场力作用下移动的物理过程是电场力移动电荷做功，从而使电场能量减少的过程。图1-5中画出了一段导体，设正电荷dQ在电场力 F_e 的作用下，由a移到b，电场力作的功是dA，我们把电场力移动单位正电荷由a点到b点所作的功，称为a、b两点间的电压，用带双下标的字母 u_{ab} 表示，即

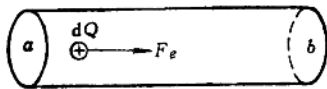


图1-5 电压的定义

$$u_{ab} = \frac{dA}{dQ} \quad (1-3)$$

一般用小写字母 u 表示随时间变化的电压，如果电压不随时间变化，这种电压叫直流电压，通常用大写字母 U 表示，且

$$U = \frac{A}{Q} \quad (1-4)$$

式中 A 为移动电荷 Q 时电场力作的功。

电压与电流同是决定电路工作状态的基本物理量，它不但有大小而且有方向。电压的实际方向也就是在电场力作用下正电荷移动的方向。由于电压的实际方向有时难以看出，因此，在电路计算中，也可在两点间任意假定一个在电场力作用下的正电荷运动方向，习惯上称为电压的正方向或参考方向（或叫参考极性），如图1-6所示。当计算结果电压的量值为正时，电压的实际方向与参考方向相同；反之，当电压量值为负时，其实际方向就与参考方向

相反。在不规定参考方向的情况下,谈论电压的正负量值是没有意义的。

电压作为反映电场力作功这一客观事实,当然是确定的。对于同一电压,若选定的参考方向相反,应有

$$u_{ab} = -u_{ba}$$

在国际单位制中,电压的基本单位是伏〔特〕(V)。常用的电压单位还有千伏(kV)、毫伏(mV)、微伏(μ V)等,它们的关系为

$$1 \text{ kV} = 10^3 \text{ V}$$

$$1 \text{ mV} = 10^{-3} \text{ V}$$

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

实际电路中的电压量值,用电压表测量。

直流电路中可用直流电压表测量电压。根据电压表的“+”“-”标志和指针偏转情况,可以判断电压的实际方向。

关于电流、电压的参考方向,还要强调说明:

(1) 电流和电压的参考方向可以任意选取,但一经选定,在分析和计算电路的过程中,不能随意改变。

(2) 电流和电压的数学表达式是对应一定参考方向的。同一电流(或电压),在参考方向不同时,它的数学表达式差一负号。

(3) 计算结果得出的电流和电压是正值时,表示在该时刻的电流和电压的实际方向与参考方向相同;反之,若得负值,表示实际方向与参考方向相反。

(4) 一般说,同一段电路(或元件)的电流和电压的参考方向可以各自独立选取,不必强求一致(或不一致)。当选取一致的参考方向时,叫关联参考方向,如图1-7 b所示;当选取不一致的参考方向时,叫非关联参考方向,如图1-7 a所示。

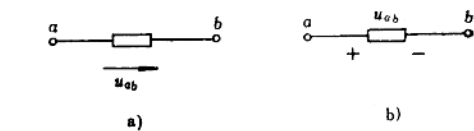


图1-6 电压的参考方向或参考极性

a) 参考方向 b) 参考极性

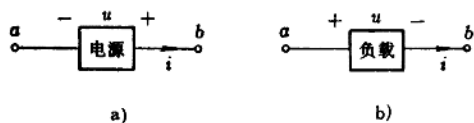


图1-7 u 、 i 参考方向的关系

a) 关联参考方向 b) 非关联参考方向

例1-2 一个电阻元件的电流是10mA,

在20 s内消耗的电能是5 J,问该电阻元件的端电压是多少?

解: 设电阻元件的端电压是 U ,由

$$U = \frac{A}{Q} \quad \text{和} \quad I = \frac{Q}{t}$$

$$\text{得} \quad U = \frac{A}{It} = \left(\frac{5}{10 \times 10^{-3} \times 20} \right) \text{ V} = 25 \text{ V}$$

即该电阻元件的端电压是25 V。

三、电位

类似于描述地球引力场中物体的位能是相对于地平面而言,电荷在电场中某处的电位能是相对于选取的参考点(设用字母 o 表示)而言的。参考点可以任意选取。工程技术上一般选取地球或电气设备的外壳为参考点。我们将电场力在电路中某点移动单位正电荷到参考点所作的功,称为电路中该点的电位,用字母 φ 表示,即

$$\varphi = \frac{dA}{dQ}$$

式中 dA 为电场力移动电荷 dQ 到参考点所作的功。

显然，电路中某点 a 的电位值就等于该点到参考点的电压 u_{ao} ，即

$$\varphi_a = u_{ao}$$

故电位与电压有相同的单位。

一个电路只能选取一个参考点。参考点一经选定，电路中各点电位便相应地确定下来，即对于一定的参考点来说，电位具有单值性，这说明应用电位也可以表征电路的工作状态，这种描述电路工作方式的方式，在电子技术中是经常采用的。在图 1-8 中，我们

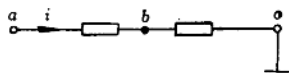


图 1-8 电压与电位的关系

可以看出电位与电压的关系，因为

$$\varphi_a = u_{ao} = u_{ab} + u_{bo}$$

又

$$\varphi_b = u_{bo}$$

所以

$$u_{ab} = \varphi_a - \varphi_b \quad (1-5)$$

由此得电路中任意两点间的电压等于这两点的电位差，故电压又叫电位差。当电压为正值时，按照选定的参考方向， b 点电位比 a 点是降低了，电位降低的量值等于 a 、 b 两点间的电压，故电压又叫电位降或电压降。还可以看出，电压的实际方向（正电荷在电场力作用下移动的方向）是从高电位点指向低电位点。从式（1-5）可以得出一个重要的性质，即电路中任意两点间的电压与路径无关。当所选参考点不同时，电路中各点的电位就不同，但任何两点间的电压仍是不变的。

四、电动势

我们在讨论电流、电压时，总是说在电场力作用下，正电荷是从高电位向低电位运动。如果要在电路中形成连续电流，就必须同时有正电荷从低电位向高电位的运动。正电荷在什么情况下会从低电位向高电位运动呢？由于正电荷从低电位向高电位运动的结果是电位能量值增加了，因而是将其他形式能量转换成了电能。前已述及，具有这种功能的装置叫电源。这是由于在电源内部有一种电源力（局外力）作用在电荷上，使正负电荷分离，从而在电源两端形成电位差。如图 1-9 所示，图中 F_s 表示电源力， F_e 表示电场力，由于电源力的作用，在电源的一端出现正电荷（这一端称为电源的正极），另一端出现负电荷（该端称为电源的负极）。在化学电源中，电源力是由化学作用产生的，在发电机中，电源力是由电磁感应产生的。

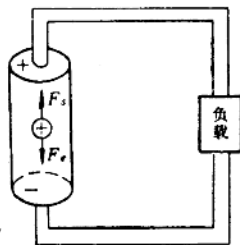


图 1-9 电荷在电源和负载中运动

在化学电源中，电源力是由化学作用产生的，在发电机中，电源力是由电磁感应产生的。

设电源力使电源正极上有正电荷 dQ ，电源将其他形式能量转换成的电能为 dW_s 。在电源内部电源力将单位正电荷从电源负极移到电源正极所作的功，称为电源的电动势，用字母 e 表示，即

$$e = \frac{dW_s}{dQ}$$

常用小写字母 e 表示随时间变化的电动势。如果电动势不随时间变化，则用大写字母 E 表示，即

$$E = \frac{W_s}{Q} \quad (1-6)$$

显然, 电动势有与电压相同的单位。

电源电动势的实际方向规定为作用在正电荷上的电源力方向, 即从电源负极(低电位)指向正极(高电位)的方向, 或电位升的方向。如图1-10 a 所示的电源的电动势和 its 两端电压的参考方向与实际方向一致, 因而电动势和端电压的量值亦均为正值。如果电源内部除电源力外, 没有其他因素引起能量的转换, 根据电动势和电压的定义, 由能量守恒定律可知: 电源电动势和电源两端电压在量值上应当相等。另一种情况是当电源两端断开时, 电源中就没有电流, 因而不会有能量的转换, 电源的这种情况叫开路(简称为 oc)。上述两种情况下, 电源电动势等于电源的开路电压, 即

$$e = u_{oc} \quad \text{或} \quad E = U_{oc} \quad (1-7)$$

应该指出, 如果电源电动势和其端电压中有一个的参考方向与实际方向不同, 如图1-10 b 所示, 电动势 e 的参考方向与实际方向相反, 那么, u 、 e 的参考方向就相同, 则有

$$e = -u_{oc} \quad \text{或} \quad E = -U_{oc} \quad (1-8)$$

例1-3 假如一只电池(可以近似地看做是电压源)对16 C 电荷提供的能量是80 J, 问电池的端电压是多少? 而电池的电动势又是多少?

解: 由式(1-4)可知电池的端电压为

$$U = \frac{A}{Q} = \left(\frac{80}{16} \right) \text{V} = 5 \quad \text{V}$$

若设电池的电动势 E 的参考方向与电池端电压 U 的参考方向相反, 则有

$$E = U = 5 \quad \text{V}$$

五、电功率与电能

在电路中, 电场力移动电荷, 使电能转换成其他形式能量, 而电源力移动电荷使其他形式能量转换成电能。单位时间内电能转换的速率, 称为电功率, 简称功率, 用小写字母 p 表示随时间变化的电功率。设在 dt 时间内电路转换的电能为 dW , 则有

$$p = \frac{dW}{dt} \quad (1-9)$$

当功率不随时间变化时, 常用大写字母 P 表示, 且有

$$P = \frac{W}{t} \quad \text{或} \quad W = Pt \quad (1-10)$$

式中 W 为在时间 t 内转换的电能。

在国际单位制中, 电功率的基本单位是瓦[特], 符号为 W。此外, 常用千瓦(kW)、毫瓦(mW)、兆瓦(MW)等单位。而电能的基本单位是焦[耳], 符号是 J。在实用上还采用千瓦时(kW·h)作为电能的单位。1kW·h 等于电功率为1kW 的电工设备在1 h 内所转换的电能, 俗称为1度电。即

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

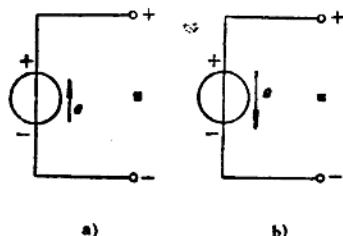


图1-10 电动势和电压的关系

- a) u 、 e 参考方向一致
b) u 、 e 参考方向相反

根据电流和电压的定义,我们可以导出电功率与电流、电压的关系式。如图1-11 a 所示的一段电路,该电路的两端电压为 u ,通过的电流为 i ,且设 u 、 i 的参考方向一致,那么,设在 dt 时间内移动电荷为 dQ ,则有

$$dW = u dQ$$

由此得这一段电路吸收的功率为

$$P = \frac{dW}{dt} = u \frac{dQ}{dt} = ui \quad (1-11)$$

由于 u 、 i 参考方向相同,当 u 、 i 的量值为正时,则 P 为正,说明这段电路是吸收了电能,即电场力移动电荷作了正功,消耗了电能;如 u 、 i 量值有一个为负值,则 P 为负,说明这段电路吸收负功率,是电场力作负功,实际上是局外力克服电场力作功,产生了电能,它相当于一个电源。

如图1-11 b 所示的一段电路, u 、 i 参考方向相反,只要按式 $P = -ui$ 计算,则 P 仍代表电路所吸收的功率,即 P 为正时,电路吸收功率,它是负载;当 P 为负时,电路吸收负功率,它是电源。

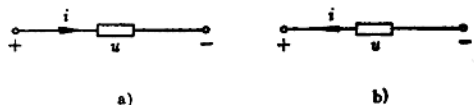


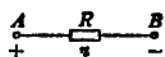
图1-11 功率与电压电流的关系

- a) u 、 i 参考方向一致, $P = ui$
b) u 、 i 参考方向相反, $P = -ui$

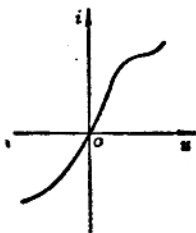
§ 1-3 电 阻 元 件

前已述及,电路是由电气设备和电路器件构成的电流通路。而电气设备和电路器件,大都以导体(或半导体)为材料制成。电流通过电路,导体总会发热而消耗电能,或将电能转化为其他形式能量而消耗电能。电阻元件就是用以反映电路中电能消耗这一物理现象的理想元件,它简称为电阻,用字母 R 表示,其电路符号如图

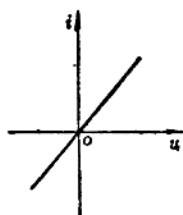
1-12 a 所示。显然,电阻元件的特性可以用其端钮上电流和电压的关系来表示。由于电压、电流的基本单位是伏和安,所以元件的电压、电流关系(简称为 VAR),也叫伏安特性。电阻元件的伏安特性可以用 $u-i$ 坐标平面上通过原点的曲线表示,



a)



b)



c)

图1-12 电阻元件符号和伏安特性曲线

- a) 电阻元件电路符号 b) 非线性电阻伏安特性
c) 线性电阻伏安特性

一般是在 u 、 i 取关联参考方向时画出,如图1-12 b、c 所示。

由电阻元件的伏安特性可知,某一时刻电阻元件中的电流只与该时刻的电压有关,而与该时刻以前的电压无关,因此,电阻元件是无记忆元件。若通过电阻的电流发生变化,则其电压也即刻发生变化,故电阻元件又称为即时元件。

按电阻元件的伏安特性曲线形状不同,电阻元件有线性与非线性之分。

线性电阻元件的伏安特性曲线是 $u-i$ 平面上通过原点的直线,如图1-12 c 所示。用代数式表示时,则有

$$\left. \begin{aligned} u &= Ri \\ i &= Gu \end{aligned} \right\} \quad (1-12)$$

或

式中 R 为电阻元件的参数, 简称电阻; G 为电导, 它等于 $1/R$ 。

在国际单位制中, 电阻的基本单位是欧[姆], 符号为 Ω 。电阻常用的单位还有 千欧($k\Omega$), 兆欧($M\Omega$); 电导的基本单位是西[门子](S)。

对线性电阻元件来说, 参数 R 和 G 是不随电流和电压的大小而改变的常量。线性电阻中电流和电压的这一规律, 常称为欧姆定律。式 (1-12) 是 u 、 i 参考方向关联时, 欧姆定律的数学表达式。当 u 、 i 参考方向相反时, 线性电阻的欧姆定律的数学表达式为

$$\left. \begin{aligned} u &= -Ri \\ i &= -Gu \end{aligned} \right\} \quad (1-13)$$

或

图1-13表示了 u 、 i 参考方向和欧姆定律表达式形式之间的关系。

由于电阻元件上电流、电压的实际方向始终一致, 故电阻元件吸收功率的计算式为

$$p = ui \quad (1-14)$$

将式 (1-12) 代入式 (1-14), 得电阻元件吸收功率计算公式的另外两种形式为

$$\left. \begin{aligned} p &= Ri^2 \\ p &= \frac{u^2}{R} = Gu^2 \end{aligned} \right\} \quad (1-15)$$

或

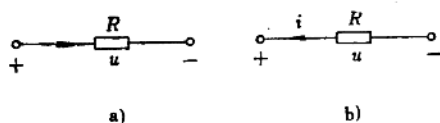


图1-13 欧姆定律的两种表达式

a) $u = Ri$ b) $u = -Ri$

式中 R 与 G 都是正值, 所以 p 总为正值, 也就是说电阻中吸收的功率不会是负值, 因而电阻元件是耗能元件。它对外不会提供电能, 显然, 电阻元件是典型的无源元件。

至于电阻元件在 t_1 到 t_2 的这段时间内所消耗的电能 W 可以按下式计算

$$W = \int_{t_1}^{t_2} p dt \geq 0$$

电工和电子技术中, 广泛使用着各种电阻器, 用以限制和调节电流, 这些实际装置的理想化模型就是电阻元件。虽然实际电阻器所表现的电磁性质中仍有磁场和电场效应, 但在工程电路的分析中, 在一定的条件下, 例如频率不太高, 这时将实际电阻器用理想电阻元件来代替, 由此产生的误差是允许的。

电阻器有线绕的, 也有用合成碳膜制成的。线绕电阻器为了使其电阻值在正常使用条件下保持稳定, 常采用合金导线绕制。实验证明, 均匀导线的电阻值 R 与长度 l 成正比, 而与导线横截面积 S 成反比, 即

$$\left. \begin{aligned} R &= \rho \frac{l}{S} \\ R &= \frac{l}{\gamma S} \end{aligned} \right\} \quad (1-16)$$

或

式中 ρ 和 γ 为表示材料导电性质的系数。 ρ 称为电阻率, 在国际单位制中, 电阻率的基本单位是欧米 ($\Omega \cdot m$), 实用单位是 $\Omega \cdot mm^2/m$; γ 是 ρ 的倒数, 称为电导率, 在国际单位制中

γ 的基本单位是西每米 (S/m)。

顺便指出, 导体的电阻还与温度有关, 用电阻温度系数表示。其计算公式为

$$R_2 = R_1 [1 + \alpha (t_2 - t_1)]$$

式中 R_1 是温度为 t_1 时的电阻; R_2 是温度为 t_2 时的电阻; α 是电阻温度系数, 单位为 $1/^\circ\text{C}$ 。

实践表明, 温度升高时, α 值减小, 但温度变动范围不大时, α 的变化不大, 可以忽略, 一般手册给出的电阻温度系数 α 是对应于 20°C 时的数值。利用金属导体电阻随温度变化的性质, 可以制成温度计。近代发现有些金属合金在适当低温下, 例如在 -200°C 时, 电阻会突然降为零, 成为超导体。

例1-4 已知镍铬合金的电阻率 ρ 为 $1.1 \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$, 试计算长 1 m 截面积为 2 mm^2 的镍铬合金电阻丝的电阻值是多少? 若要绕制一个 44Ω 的电阻器, 问需要这种电阻丝多少米?

解: 由式 (1-16) 知金属导体电阻的计算公式为

$$R = \rho \frac{l}{s}$$

得

$$l = \frac{sR}{\rho} = \left(\frac{2 \times 44}{1.1} \right) \text{m} = 80 \text{ m}$$

故绕制一个 44Ω 电阻器需用 80 m 电阻丝。设每米电阻丝的电阻为 R_0 , 则

$$R_0 = \frac{44}{80} \Omega = 0.55 \Omega$$

前已述及, 一般电气设备和电路元器件都是有电阻的, 因而电流通过时会发热。如果电流过大, 则电气设备内部将会产生过量的热, 使温度超过允许的限度, 最后导致电气设备损坏。同样, 如果电压过高, 电气设备内部的绝缘有可能被击穿, 也使设备损坏。因而, 对电气设备都有一定的电流限额、电压限额和功率限额。这些限额分别叫做电气设备的额定电流 I_n 、额定电压 U_n 和额定功率 P_n 。这些额定值常见于电气设备的铭牌或使用说明书上。使用电气设备时, 一定要使电气设备实际工作的最大电压、电流、功率不超过其额定值。由于功率、电压和电流之间有一定关系, 所以电气设备的额定值没有必要全部给出。例如白炽灯泡常标出额定电压和额定功率 (如 220 V , 25 W), 电阻器则标出电阻值和功率 (如 $20 \text{ k}\Omega$, 0.5 W)。

例1-5 一只额定功率为 2 W 、额定电阻为 $5 \text{ k}\Omega$ 的电阻器, 求该电阻器的最大安全电压和电流。

解: 因为电阻上消耗的功率与电阻两端的电压以及通过电阻的电流之间的关系是

$$P = UI = I^2 R = \frac{U^2}{R}$$

已知电阻器的电阻为 $5 \times 10^3 \Omega$, 最大安全功率 $P_{\max}$ 为 2 W , 故该电阻器允许的最大安全电压 $U_{\max}$ 和最大安全电流 $I_{\max}$ 应为

$$U_{\max} = \sqrt{P_{\max} R}$$

和

$$I_{\max} = \sqrt{\frac{P_{\max}}{R}}$$

代入题中给的已知数据, 得

$$U_{\max} = \sqrt{2 \times 5 \times 10^3} \text{ V} = 100 \text{ V}$$

$$I_{\max} = \sqrt{\frac{2}{5 \times 10^3}} \text{ A} = 0.02 \text{ A}$$

可以看出, 计算结果完全符合欧姆定律, 因为

$$\frac{U_{\max}}{I_{\max}} = \left(\frac{100}{0.02} \right) \Omega = 5000 \Omega = 5 \text{ k}\Omega$$

如果电阻元件的电阻 R (或电导 G) 随电压、电流的变化而改变, 这种电阻就是非线性电阻。含非线性电阻的电路, 叫非线性电阻电路。对于非线性电阻和非线性电阻电路, 我们将在第四章讨论。

§ 1-4 独立电源

电源元件是能将其他形式能量转换为电能的实际电气设备的理想化模型, 因其能向外提供电能, 故是有源元件。在电路理论中, 我们定义以下二种类型独立的理想有源元件。

一、电压源

若一个二端元件, 其端电压始终保持为定值 U_E 或保持为一确定的时间函数 $u_E(t)$, 而与流过它的电流值多少无关, 其电流的大小由与之联接的外电路决定, 则该二端元件称为独立电压源。独立二字的意义是指这种电源上的电压是独立的, 不受外部负载改变的影响。独立电压源也称理想电压源, 简称电压源, 其电路图形符号如图1-14所示。图1-14 a 是电压源的通用符号, 图 b 是电压源端电压保持常值 U_E 时, 即直流电压源常用的符号。实验室的稳压电源和大功率的发电机在一定条件下可以近似地看做电压源。

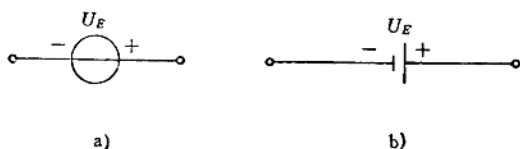


图1-14 电压源的电路符号
a) 通用符号 b) 直流电压源符号

电压源上的电流和电压参考方向一般选取非关联参考方向, 此时, 其输出端钮的 u 、 i 关系, 叫电压源的外特性。直流电压源的外特性曲线是一条与电流轴平行的直线, 如图1-15所示。

电压源的主要特性在于其端电压与流经电源的电流无关。如果

$$u_E(t) = 10 \sin 314 t \text{ V}$$

即电压源电压是按正弦函数规律变化的, 那么不管流过电压源的电流是多少, 该电压源的端电压仍保持原来的量值 and 变化规律。

由图1-15所示某瞬间电压源的外特性曲线可以看出, 不管该瞬间电流的大小如何, 电压源的端电压仍保持恒定不变。电压源的另一特性是电流的大小仅由外电路决定。当外电路开路时, 电压源的电流为零; 当外电路短路时, 由于电压源的内阻为零, 故电压源电流将增至无限大。当然, 实际上电压源短路的电路模型是没有意义的, 这样, 电气设备和器件将因电流过大而烧坏。实际发电机和电子电工技术中应用的各类电源的端电压, 均随输出电流的增大而下降, 因而不可能输出无限大电流。

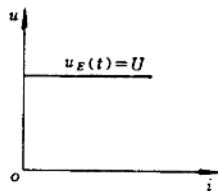


图1-15 直流电压源的外特性

如将电压源的端电压置零,就意味着该电压源上电压已不存在,但通过电压源的电流却可以是任意的,这一特性与二点间短路的电路特性完全相似,故零值电压源实际上就是短路,如图1-16所示。

还要指出,当电压源吸收正功率时,它处于负载状态,此时它的电动势叫反电动势,电压源内部电荷移动的原因已不是电源力而是电场力了。

二、电流源

若一个二端元件,其输出的电流始终保持为定值 I_E 或为一确定的时间函数 $i_E(t)$,而与电源两端的电压值是多少无关,其端电压决定于与之联接的外电路,则称此元件为独立电流源。独立二字的意义是指这种电源供给的电流是独立的,不受外部负载改变的影响。独立电流源也称为理想电流源,简称电流源,其电路图形符号如图1-17 a所示。输出电流保持恒定的电流源,叫直流电流源。直流电流源的外特性曲线是一条与电压轴平行的直线,如图1-17 b所示。光电池和某些能产生恒定电流的电子装置在一定条件下可以近似地看做电流源。

电流源的特性有两个:一是它输出的电流不受外电路影响;二是电流源的端电压决定于外电路。当外电路短路时,电流源的端电压为零;当外电路开路时,由于电流源的输出电流不受开路影响,它的端电压将变为无限大,这是不允许的。当然,实际上电流源开路的电路模型是没有意义的,因为高电压也将使电气设备和器件受到破坏。

如将电流源中的电流置零,就意味着该电流源中电流已不存在,而电流源上的电压值却可以是任意的,这一特性与二点间开路的电路特性完全相似,故零值电流源实际上就是开路。

如图1-18所示。

上述二种独立电源,在电路中常作为电路的输入,是引起电路中产生电流电压的原因,因此,常常称其为电路的激励,而电路中由激励产生的电流、电压就称为电路的响应。

例1-6 求图1-19所示电路中各元件的电流、电压、功率。已知图中 $I_E = 3\text{ A}$, $U_E = 5\text{ V}$ 。

解: 电路中电流电压参考方向如图1-19所示。

对图 a 中的电流源,有

$$I = I_E = 3 \quad \text{A}$$

$$U = U_E = 5 \quad \text{V}$$

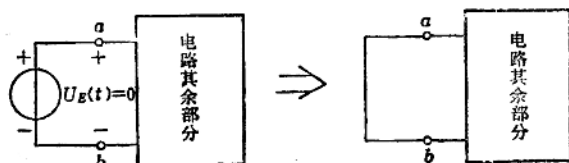


图1-16 零值电压源相当于短路

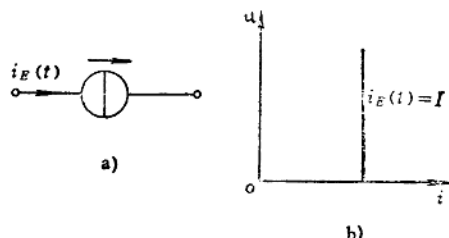


图1-17 电流源电路符号和直流电流源的外特性

a) 电路符号 b) 外特性

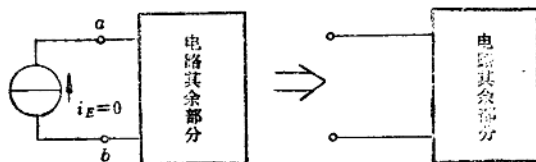


图1-18 零值电流源相当于开路