

试 用 教 材

电 路 与 电 机

主 编 方 德 政

编 者 陈 离 郑友琴 陆伟新

机械工业部电工学协作组

前 言

前言

这套电工、电子教材是按高等学校工科机械专业150学时教学大纲，并结合精密机械、光学仪器、计量仪器、探测物理和非电自动化等专业所需要的教学内容编写的，适用于200~220学时教学的有关专业。整套教材由机械工业部电工学协作组组织编写，作为部属高校有关专业试用教材；分“电路与电机”、“模拟电子电路”和“数字电子电路”三册出版。

“电路与电机”共十一章，在电路部分加强了基础理论，电机部分加强了微电机。为便于教学，有利培养学生自学和分析问题的能力，教材中编写了自学内容和供选学的参考资料。任课教师可根据各专业特点和学时多少，灵活取舍。教材选编了较多的例题、实例，以及思考题和习题。

“电路与电机”由上海机械学院电工教研室方德政负责主编，一至四章由陈离编写，五至七章由郑友琴编写，八至十一章由陆伟新编写。全书的统稿由陈离执笔。

湖南大学杨貽馨副教授，东北重型机械学院王守宇同志负责主审。审稿会于1983年12月在上海召开，参加审稿会的有：湖南大学、合肥工业大学、吉林工业大学、甘肃工业大学、哈尔滨科技大学、陕西机械学院、东北重型机械学院、沈阳机电学院、哈尔滨电工学院、山东纺织工学院、广东机械学院、安徽工学院、武汉工学院、洛阳工学院、江苏工学院、内蒙古工学院、河北机电学院、太原重型机械学院和上海机械学院等十九所高等院校。会议由杨貽馨同志和王守宇同志主持，在审稿会上承各兄弟院校提出不少宝贵意见。编者根据这些意见进行了修改，最后由王守宇同志和湖南大学魏之馨同志复审定稿，在此一并致以诚挚的谢意。

由于我们业务水平有限，必然还存在不少缺点和错误。殷切期望使用本教材的教师和读者给予批评指正。

编者

1984年4月

湖南机械学院 第三版

目 录

第一篇 电路

第一章 电路的基本概念和基本定律

1-1 电路和电路模型	(1)
1-2 参考方向	(2)
1-3 欧姆定律	(5)
1-4 基尔霍夫定律	(5)
1-5 电功率和能量	(10)
1-6 电压源和电流源	(12)
1-7 受控电源	(16)
1-8 非线性电阻	(21)
思考题与习题	(23)

第二章 线性网络的分析方法和定理

2-1 电阻电路的等效变换	(29)
2-2 支路电流法	(37)
2-3 网孔电流法	(40)
2-4 节点电位法	(47)
2-5 迭加原理	(53)
2-6 替代定理	(55)
2-7 戴维南定理和诺顿定理	(57)
2-8 补偿原理	(62)
2-9 桥形电路分析	(64)
2-10 双口网络	(68)
思考题与习题	(78)

第三章 正弦交流电路

3-1 正弦交流电量的基本概念	(86)
3-2 正弦量的相量和复数表示法	(90)
3-3 电阻元件的正弦交流电路	(94)
3-4 电感元件的正弦交流电路	(97)
3-5 电容元件的正弦交流电路	(102)
3-6 RLC 串联正弦交流电路	(107)
3-7 RLC 并联正弦交流电路	(117)
3-8 互感电路	(122)

3-9 正弦交流电路的计算	(127)
3-10 交流阻抗电桥	(133)
思考题与习题	(138)

第四章 谐振

4-1 串联谐振	(146)
4-2 串联谐振的频率特性	(151)
4-3 并联谐振	(154)
思考题与习题	(160)

第五章 三相交流电路

5-1 三相电动势	(162)
5-2 三相电源的联接	(163)
5-3 三相电路负载的联接	(165)
5-4 三相电路的功率及其测量	(174)
思考题与习题	(179)

第六章 周期性非正弦电路

6-1 周期性非正弦信号的谐波分析	(183)
6-2 周期性非正弦信号的有效值和平均功率	(186)
6-3 周期性非正弦电路的谐波分析法	(189)
6-4 周期信号的频谱	(192)
6-5 滤波器	(197)
思考题与习题	(205)

第七章 线性电路的时域分析

7-1 暂态的产生、换路定则	(210)
7-2 RC 电路的暂态过程	(213)
7-3 RC 电路的脉冲响应	(220)
7-4 RL 电路的暂态过程	(224)
7-5 三要素法	(227)
7-6 RLC 串联电路的零输入响应	(231)
7-7 RLC 串联电路对阶跃激励的零状态响应	(237)
思考题与习题	(241)

第二篇 电机

第八章 磁路和变压器

8-1 磁路基本概念	(248)
------------	-------

8—2 磁路计算.....	(254)
8—3 铁心线圈.....	(257)
8—4 变压器.....	(263)
8—5 电磁铁.....	(270)
思考题与习题.....	(274)
第九章 异步电动机	
9—1 三相异步电动机的构造.....	(276)
9—2 三相异步电动机的工作原理.....	(278)
9—3 三相异步电动机的转矩和机械特性.....	(281)
9—4 三相异步电动机的使用.....	(287)
9—5 异步电动机的继电器接触器控制.....	(296)
9—6 单相异步电动机.....	(307)
思考题与习题.....	(310)
第十章 直流电机	
10—1 直流电机的构造和分类.....	(313)
10—2 直流电机的工作原理.....	(317)
10—3 直流电机的电动势与电磁转矩.....	(319)
10—4 他励(或并励)电动机的机械特性.....	(320)
10—5 他励(或并励)电动机的起动与反转.....	(322)
10—6 他励(或并励)电动机的调速.....	(323)
10—7 他励(或并励)电动机的制动.....	(327)
思考题与习题.....	(328)
第十一章 控制电机	
11—1 伺服电动机.....	(329)
11—2 力矩电动机.....	(332)
11—3 测速发电机.....	(333)
11—4 自整角机.....	(335)
11—5 微型同步电动机.....	(337)
11—6 步进电动机.....	(339)
11—7 旋转变压器.....	(341)
11—8 控制电机应用举例.....	(344)
思考题与习题.....	(346)
附录 安全用电常识	(346)

第一篇 电路

第一章 电路的基本概念和基本定律

1—1 电路和电路模型

电路是由若干个电气设备或器件按一定的方式组合起来,提供电流流通的通路。电路也称为电网络,简称网络。

电路的功用主要有两类。一类是以电能的产生、传输、分配和消耗为其全部工作内容,称为力能电路,其中最典型的例子是电力供电与各用电设备组成的复杂电力系统。力能电路常常是大功率的。为了节约能源,如何降低损耗、提高效率,就是力能电路中很突出的问题。另一类电路是信号电路。它用于电信号的产生、变换和处理,即把信号源施加的输入信号通过电路的变换,“加工”成为人们所需要的输出信号。例如把输入信号不失真地实现线性放大的放大电路;把淹没在噪声中的模拟信号“加工”为比较纯净信号的滤波电路;进行各类数学运算的运算电路等。虽然信号电路中也进行着电能的产生、传输和消耗,但上述过程并不是它的最终目的,而且与力能电路相比较能量消耗也小得多。在精密仪器、精密机械领域,信号电路占有极其重要的地位,它所涉及的内容也更为广泛。如怎样保证信号传输的质量,如何使负载得到尽可能强的信号等,都是信号电路需要考虑的主要问题。当然,信号电路和力能电路在能量转换过程方面是一致的,因而两者的基本规律和分析方法是相同的。

通常,把由非电能或非电信号转换为电能或电信号的供电设备和器件称为电源(或信号源、传感器)。把用电设备和器件称为负载。一个完整的电路总是由电源、负载以及联接导线、开关等电气设备或器件组成。

电气设备和器件的种类繁多,即便是很简单的电气设备,在工作时所发生的物理现象也是很复杂的。例如,一个实际的线绕电阻器,电流通过时,除了对电流呈现阻力外,还会产生微弱的磁场,因而兼有电感的性质;联接导线总有一点电阻,甚至还有电感……。所以,直接使用实际器件组成的接线图来进行电路分析和研究往往是困难的,甚至是不可能的。

各种电气设备和器件在工作时所发生的物理现象虽然很复杂,但这些复杂的物理现象是由一些基本的物理现象综合而成的。于是在电路理论中提出了由各种电路模型(或称电路理想元件,简称元件)组成的电路图进行电路分析的方法。电路模型具有以下特点:首先,每一种电路模型所反映的电现象可以用数学表达式精确地描述;其次,任何一台实际电气设备或一个实际器件中所发生的物理现象,都可以由各种电路模型的综合来描述。例如电阻 R 反映了电能的消耗,或对电流呈现阻力的性质,用数学表达式

$$R = \frac{v}{i}$$

来描述。恒压源 e 和恒流源 i_s ，分别以电动势形式和电流形式反映了其他形式能量转换为电能的性质，用数学表达式

$$v = e$$

$$i = i_s$$

来描述。其他主要的电路模型还有：电感 L ，反映电流产生磁场效应的性质；电容 C ，反映电荷形成电场效应的性质；受控电源反映电子线路中输入电量对输出电量的控制等。它们的数学表达式将在后面陆续讨论。另外，在电路分析中出现的导线和开关也是一种理想化的导线和开关，它们只反映了各电路模型的联通，不存在其他物理现象。

实际电气装置或器件在一定的条件下都可以用各种电路模型的综合来描述。例如上述线绕电阻器可以用电阻和电感的组合来表示。另外，在特定条件下突出实际装置的主要性质，忽略它的次要性质，用一个描述其主要性质的电路模型来表示也是可以的。

电路分析、研究的对象并不是实际电路的接线图，而是从大量实际电路中抽象出来的，由电路模型组成的电路图。电路分析的任务就是根据电路图分析电路中的电流，以及各个元件上的电压、电功率等。

我们着手分析的虽然是抽象的电路图，而不管它的具体工作目的，但是分析计算得出的结论或规律却具有广泛现实意义。

为便于今后讨论，现以图1—1网络为例介绍一些名词。

网络中没有分支的一段电路称为支路。例如 R_4 是其中的一条支路， E_1 、 R_1 也组成一条支路。这个网络共有六条支路。没有电源的支路叫做无源支路。如分别由 R_4 、 R_5 、 R_6 组成的三条支路。含有电源的支路叫做有源支路。如分别由 E_1 与 R_1 、 E_2 与 R_2 及 E_3 与 R_3 组成的支路。

三条或三条以上的支路联接在一起的点称为节点。这个网络有A、B、C、D四个节点。

由若干条支路组成的闭合电路叫做回路。这个网络共有下列七个回路：AA'BCA、BB'DCB、ACDD'F'A、AA'BB'DD'F'A、AA'BB'DCA、AA'BCDD'F'A、ACBB'DD'F'A。

没有被支路穿过的回路称为网孔。显然，网孔是回路的一种特例，上述七个回路中只有前面三个才能算作网孔。

有时分析图1—1完整的网络，有时也讨论图1—2所示完整网络的一部分，称为子网络，也叫做部分电路。子网络作为完整网络中的一部分，总要引出一些接线端，以便与其它部分联接，这种接线端称为子网络的端钮，简称端。如果对某两个端钮来说，由其中一端流进的电流与在另一端流出的电流相等，则这一对端钮叫做子网络的一个端口，简称口。在图1—2中，子网络 N_A 既是两端网络，也是单口网络， N_B 是四端网络，如果 i_1 和 i_2 ， i_3 和 i_4 的大小相

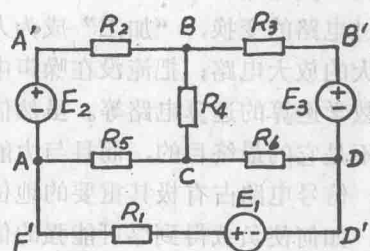


图1—1 比较复杂的电路图

等, 则它便是双口网络; N_c 只是三端网络, 没有端口。子网络内部可能含有电源, 也可能不含电源。前者称为有源网络, 后者称为无源网络。

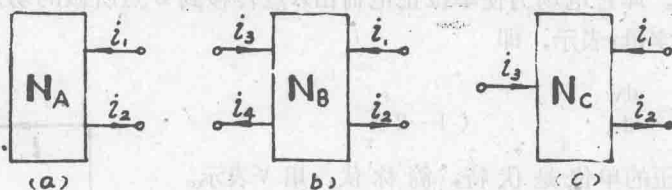


图1—2 子网络的端钮

1—2 参考方向

一、电流

电荷在电场作用下的定向运动就是电流。单位时间内通过导体横截面的电量定义为电流强度, 简称为电流, 用 i 表示, 即

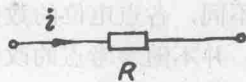
$$i = \frac{dq}{dt} \quad (1-1)$$

人们已规定, 正电荷运动的方向为电流的实际方向。大小和方向都不随时间变化的电流叫做直流电流, 用符号 I 表示。如果电流的大小和方向都随时间变化, 则称为交变电流。

在米·千克·秒国际单位制中, 电流的单位是安培, 简称安, 用 A 表示。1安 = 1库仑/秒。根据实际的需要, 电流的大小可以分别用安 (A)、毫安 (mA) 和微安 (μA) 度量, 它们之间的关系为

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

不仅电流的大小, 而且其方向都对电路的工作状态有很大影响。所以在测定或计算电流时, 应包括电流的大小和方向, 但在实际问题中往往难以事先判断电流的实际方向。例如图1—1中 BC 支路电流的方向就很难直接看出。又如, 交流电路中的电流方向随时间变化, 更难用一个固定的箭头来表示实际的方向。为



此引用参考方向这一概念。参考方向可以任意假定, 在电路图中用箭头表示。如果电流的实际方向与参考方向一致, 电流为正值; 如果两者相反, 电流为负值。这样就可以利用电流的正负值和参考方向确定电流的实际方向。例如, 若图1—3中已标定参考方向的电流 i 为 $-2A$, 则表示正电荷以每秒 2 库仑的速率逆着参考方向箭头移动。在分析电路时, 可先任意假设电流的参考方向, 并以此为准去进行分析、计算, 最后从答案的正、负值来确定电流的实际方向。显然, 在未标定参考方向的情况下, 电流的正负是毫无意义的。有的书上, 也称参考方向为正方向。

二、电压、电位

电荷是带电粒子。它在电路中流动，就必然伴随着发生能量的转换。例如，图1-4电路接通就有电流流通。库仑电场力使单位正电荷由A点转移到B点所做的功定义为电压。电压又称为电位差，用字母 v 表示，即

$$v = \frac{dw}{dq} \quad (1-2)$$

在国际单位制中，电压的单位是伏特，简称伏，用V表示。1伏=1焦耳/库仑。根据实际的需要，电压的大小可以分别用千伏(KV)、伏(V)、毫伏(mV)和微伏(μV)度量，它们之间的关系为：

$$1(V) = 10^{-3}(KV) = 10^3(mV) = 10^6(\mu V)$$

人们已规定，电场力作用下正电荷运动的方向为电压的实际方向，所以电压的实际方向也是电场中电位能减小的方向。如图 图1-4 电压和电动势 1-4中，A点为高电位，B点为低电位，电压 v 的方向就是电位降的方向。按电压随时间变化的情况，也分直流电压和交变电压等。

在电路图中，对元件两端或一部分电路两端所标的电压参考方向也可以任意假定，不一定代表电压的实际方向。电压的实际方向由电压参考方向和电压的正值或负值确定。

顺便指出，在标定电路中无源元件（如电阻、电感、电容等元件）的电压和电流参考方向时，两者常采用一致的参考方向，如图1-4中电阻元件上电位降落的参考方向与元件电流的参考方向一致。

电路的工作状态可以通过电路中各节点的电位反映。分析电路时也经常要用到节点电位的概念。电气设备的调试和检修的一个主要方法就是测量各点的电位值，看其是否符合设计要求。可以指定电路中任一点（只能指定一点）的电位为零，称为参考点或零电位点。习惯上参考点就叫做“地”，用符号“ $\perp$ ”表示。为了测试和计算方便，通常都选电路中与机壳相联的节点或关联的支路数最多的节点为参考点。

参考点选定以后，电路中各点的电位也就随着确定，这就是电位的单值性。所选定的参考点不同，各点电位的数值不同；但是电路中任何两个节点之间的电压等于这两点之间的电位差，并不随参考点的改变而改变。

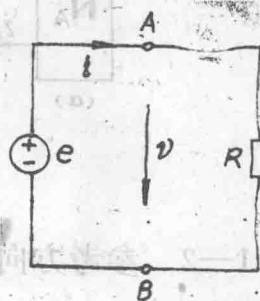
三、电动势

电源力（非库仑电场力）将单位正电荷从电源的低电位点移到高电位点所做的功定义为电源的电动势，用 e 表示，即

$$e = \frac{dw}{dq} \quad (1-3)$$

电动势的单位也是伏特。大小和方向不随时间变化的电动势称为直流电动势。大小和方向随时间变化的电动势称为交变电动势。

电动势的实际方向规定为电源力推动正电荷运动的方向，也就是电位升高的方向。由图



1—4可见, 电源电动势与电源端电压的方向相反。所以在图示方向的情况下, 它们从不同的角度反映了一个客观事实, 即A点电位比B点电位高。

与电流、电压类似, 电路图中标定的电动势方向都是参考方向, 不一定是它们的实际方向。

1—3 欧姆定律

线性电阻元件的伏安关系是

$$v = Ri$$

(1—4)

上式就是欧姆定律的数学表达式。在国际单位制中, 电阻的单位是欧姆, 简称欧, 用 Ω 表示。1欧姆 = 1伏/安。根据实际的需要, 电阻的单位可以分别用 (Ω)、千欧 ($K\Omega$) 和兆欧 ($M\Omega$) 来度量, 它们之间的关系是

$$1(\Omega) = 10^{-3}(K\Omega) = 10^{-6}(M\Omega)$$

线性电阻元件伏安关系 (简称VCR*) 的图形如图1—5所示, 是一根斜直线, 并且通过坐标原点; 斜线与电流轴正方向夹角的正切就是电阻 R 。这些基本特性说明线性电阻元件是线性无源元件。

电阻的倒数称为电导

$$G = \frac{1}{R}$$

电导的单位是西门子, 简称西, 用S表示。1西 = 1 $\frac{1}{\Omega}$ 欧。

有的书上称电导的单位是姆欧, 用 $\oslash$ 表示。两种代号的量纲是相同的。

图1—5 线性电阻的伏安关系

用电导表示的欧姆定律是

$$i = Gv \quad (1-5)$$

1—4 基尔霍夫定律

基尔霍夫定律是电路理论中最基本的定律之一。正确、灵活地应用基尔霍夫定律分析电路, 在学习电路理论的过程中很重要。基尔霍夫定律有两条: 基尔霍夫电流定律, 简称KCL*; 以及基尔霍夫电压定律, 简称KVL*。

*注: VCR是Voltage Current Relationship的缩写。

*注: KCL是Kirchhoff's Current Law的缩写。

KVL是Kirchhoff's Voltage Law的缩写。

一、基尔霍夫定律 (KCL)

基尔霍夫电流定律指出, 在任意时刻流入电路中任一个节点的电流总和等于从该节点流出的电流总和。KCL是电流连续性原理的反映。例如, 图1—6 (a) 电路中, 对于节点A, 在图示的各支路电流参考方向下, 可写出

$$i_1 + i_2 = i_3$$

上式也可写成

$$i_1 + i_2 - i_3 = 0$$

即

$$\sum i = 0$$

(1—6)

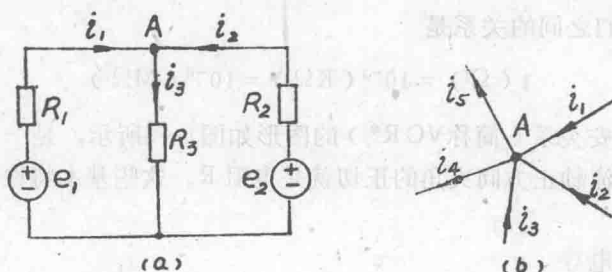


图 1—6 基尔霍夫电流定律

上式是基尔霍夫电流定律的数学表达式, 常称为节点电流方程。通常把流入节点的支路电流取正号, 流出节点的支路电流取负号。可见, 与节点关联的各支路电流的代数和等于零。这个结论与各支路是什么元件毫无关系。例如图1—6 (b) 只是某一个完整电路的一部分 (即部分电路), 而且各支路元件也没有画出, 但由基尔霍夫电流定律可以写出

$$i_1 + i_2 + i_3 - i_4 - i_5 = 0$$

或

$$i_1 + i_2 + i_3 = i_4 + i_5$$

基尔霍夫电流定律不仅能用于节点, 也可以推广应用于把电路分割为相互独立的两部分的任意一假设的封闭面, 这样的封闭面称为广义节点。例如, 图1—7所示封闭面S所分割的电路, 有三条支路与电路的其余未画出部分相联接, 其电流为 i_1 、 i_2 、 i_3 , 根据图中标出的电流参考方向, 有

$$i_1 + i_2 - i_3 = 0$$

因为对一个封闭面来说, 电流仍然必需是连续的, 所以流出该封闭面电流的代数和也等于零, 即式 (1—6) 仍适用。

例1—1 图1—8表示某电路的节点A与四条支路关联, 已知 $I_1 = 5(\text{A})$, $I_2 = -3(\text{A})$, $I_3 = 1(\text{A})$, 试求支路电流 I_4 的大小。

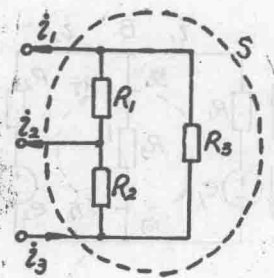


图1—7 KCL应用于—封闭面

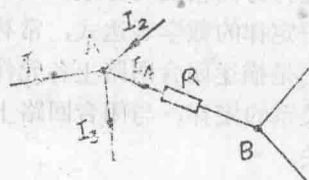


图1—8 例1—1

解：在应用基尔霍夫电流定律时，必须标出所有电流的参考方向。对于待求支路电流，参考方向是任意假定的。设 I_4 的参考方向为流进节点A，由式(1—6)可得

$$I_1 + I_2 - I_3 + I_4 = 0 \quad (1-7)$$

将已知数据代入，得

$$(5) + (-3) - (1) + I_4 = 0 \quad (1-8)$$

$$I_4 = -1(\text{A})$$

I_4 的负值说明 I_4 的实际方向与参考方向相反。在这种情况下，完全没有必要把图中所标的方向改过来。图中所标的参考方向配合着 $I_4 = -1(\text{A})$ ，足以说明 I_4 的实际方向。

式(1—7)节点电流方程中各项前的正、负号取决于电流参考方向与节点的相对关系，流入为正，流出为负。

式(1—8)括弧内的正、负号则是电流本身数值的正负号，两者不要混淆。

例1—2 图1—9中，各个元件参数均为已知，求当开关K打开时 R_4 中的电流。

解：设定 I_4 的参考方向如图所示。因为开关打开，可以画出只与 R_4 支路相割的封闭面S。由式(1—6)得

$$I_4 = 0$$

由本例可知，两部分电路之间如果只有一条导线联接，那么该导线中的电流一定为零。

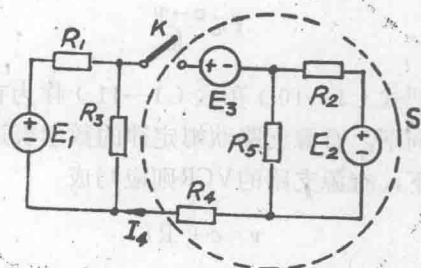


图1—9 例1—2

二、基尔霍夫电压定律(KVL)

基尔霍夫电压定律指出，在任意时刻，电路中任何一个闭合回路内，各段电压降的代数和等于零。KVL是电位单值性的反映。例如，图1—10中ABCD A 闭合回路，任意选定顺时针的绕行方向如虚线所示，这样可写出

$$v_1 - v_2 + v_{12} - v_{21} = 0$$

$$\text{即} \quad \Sigma v = 0 \quad (1-9)$$

式中某些项出现负号,是由于相应元件电压降的参考方向与绕行方向相反的缘故。式(1-9)是基尔霍夫电压定律的数学表达式,常称为回路电压方程。它是描述闭合回路上各元件或各段电路电压降关系的定律,与闭合回路上是什么样的元件无关。

根据电路中节点电位的单值性,基尔霍夫电压定律不仅应用于闭合的回路,也可以应用于各段电压闭合,但电路形式并不闭合的电路。

如图1-11(a)所示,由电动势和电阻串联的有源支路中, v_R 、 e 的电压降 v_R 和支路电压 v 组成电压闭合图形。由式1-9可写出

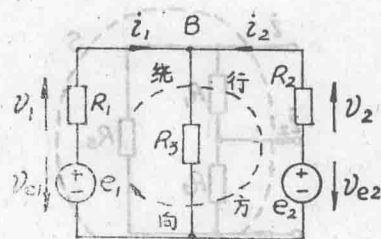


图1-10基尔霍夫电压定律

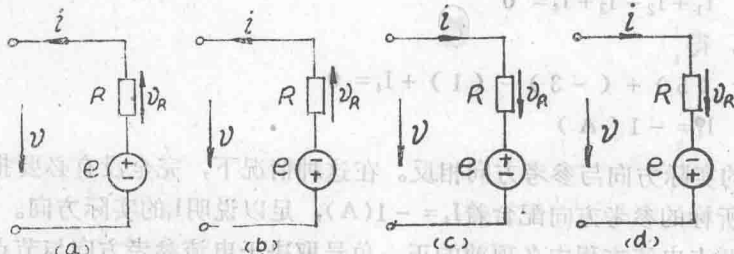


图1-11 有源支路欧姆定律

$$\text{即} \quad e - v - v_R = 0$$

$$v = e - Ri$$

$$(1-10)$$

$$\text{或} \quad i = \frac{e - v}{R}$$

$$(1-11)$$

通常把式(1-10)和式(1-11)称为有源支路的欧姆定律。必须注意,在 v 、 i 、 e 不同参考方向下,有源支路欧姆定律的数学表达式是不同的。例如,在图1-11(c)所标示的参考方向下,有源支路的VCR则应写成

$$v = e + Ri$$

例1-3 试列出图1-12中ABCD回路的回路电压方程。

解: 标出与ABCD回路关联的各支路电流 i_1 、 i_2 、 i_3 、 i_4 的参考方向。应用KVL,由式(1-9)写出该回路的电压方程。

$$v_{R1} - e_1 - v_{R2} - v_{R3} - e_2 - v_{R4} + e_3 + v_{R5} - e_4 = 0$$

或写成

$$v_{R1} - v_{R2} - v_{R3} - v_{R4} + v_{R5} = e_1 + e_2 - e_3 + e_4$$

根据电阻元件电压和电流的关系,电压方程也可以写成

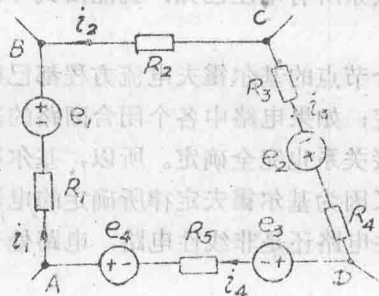


图1-12 例1-3

图1-13 例1-4

例1-4 图1-13所示为某电路的三条支路, $E_1 = 2$ 伏, $E_2 = 6$ 伏, $E_3 = 4$ 伏, $R_1 = 1.5$ 欧, $R_2 = 1.6$ 欧, $R_3 = 1.2$ 欧。各电流、电压的参考方向已标在电路图中。已知 $I_1 = 1$ 安, $I_2 = -3$ 安, 求电压 V_{AB} 、 V_{BD} 、 V_{AC} 各为多少。

解: 由 ABPA、BDQB 和 ACBPA 分别组成三个电压闭合图形。应用 KVL, 由式(1-9) 写出它们的回路电压方程分别为

$$V_{AB} + E_1 - V_{R1} = 0$$

$$V_{BD} + E_2 + V_{R2} = 0$$

$$V_{AC} - E_3 + V_{R3} + E_1 - V_{R1} = 0$$

根据电阻元件的电压和电流关系, 上列三个电压方程也可以写成

$$V_{AB} = R_1 I_1 - E_1$$

$$V_{BD} = -R_2 I_2 - E_2$$

$$V_{AC} = E_3 - R_3 I_3 - E_1 + R_1 I_1$$

另外, 根据基尔霍夫电流定律, 由式(1-6)得

$$I_1 + I_2 + I_3 = 0$$

所以

$$I_3 = -I_1 - I_2 = (-1) - (-3) = 2(\text{A})$$

把已知参数和电流代入式(1-12)、(1-13)、(1-14), 得待求电压为

$$V_{AB} = 1.5 \times 1 - 2 = -0.5(\text{V})$$

$$V_{BD} = -1.6 \times (-3) - 6 = -1.2(\text{V})$$

$$V_{AC} = 4 - 1.2 \times 2 - 2 + 1.5 \times 1 = 1.1(\text{V})$$

KCL 和 KVL 在电路分析、计算中应用极为普遍。在应用基尔霍夫定律时, 首先要在电路图上标定支路电流、元件电压的参考方向。欲求某支路电流时, 往往用 KCL, 可以寻找与该

支路关联的节点，只要与该节点关联的其余所有支路电流已知，就能直接由式（1—6）计算该电流。欲求某元件电压时，则用 KVL，可以寻找与该元件电压关联的闭合回路或闭合电压图形，只要与该闭合回路或闭合电压图形关联的其余所有电压已知，就能由式（1—9）计算该电压。

通过本节的讨论可以得出结论：如果电路中各个节点的基尔霍夫电流方程都已确定，则该电路各支路与节点的相互联接关系也就完全被确定；如果电路中各个闭合回路的基尔霍夫电压方程都已确定，则各支路与闭合回路的相互联接关系也完全确定。所以，基尔霍夫定律所确定的电流方程和电压方程描述了电路的结构。又因为基尔霍夫定律所确定的电流方程和电压方程与各支路是什么元件无关，因此不论是线性电路还是非线性电路，电路处于稳态还是暂态，基尔霍夫定律都是普遍适用的。

1—5 电功率和能量

一、电功率

电荷是携带能量的微粒子，电路中有电流就必然进行着能量的转换。所以除了分析与计算电路中的电压和电流外，还要研究电路中各部分的能量关系及计算方法。在工程上，常用电功率来表示能量的转换率，即单位时间内作的功。

观察图1—14所示由电源（即电动势）与负载（即电阻）串联组成的最简单电路的能量转换。电源 e 提供电功率，负载 R 则消耗电功率。然而情况往往是复杂的。蓄电池、发电机等有源元件有可能提供功率，但也有可能象蓄电池充电那样消耗功率；电阻、电感、电容等无源元件有可能消耗功率，也有可能象储能元件电感和电容放电那样提供功率。为了反映元件在电路中的不同

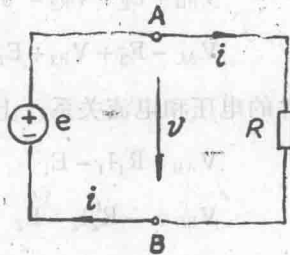


图1—14 电路中的能量转换

工作状态，在功率的量值前面标以“+”、“-”符号加以区别。任何元件功率值为正值时规定为消耗功率，负值时则规定为提供功率。

根据电流、电压和电功率的定义，元件的电功率。

$$p = \pm v \cdot i \quad (1-15)$$

其中 v 是元件的端电压， i 是流过元件的电流。当 v 和 i 的参考方向一致，则 $v \cdot i$ 前取“+”号，相反则取“-”号。

在国际单位制中，功率的单位是瓦特，简称瓦，用 W 表示， $1W = 1V \cdot A$ ，根据实际的需，功率的大小可以分别用千瓦（ KW ）、瓦（ W ）和毫瓦（ mW ）来度量，它们之间的关系为

$$1(W) = 10^{-3}(KW) = 10^3(mW)$$

图1—15电路有二个有源元件，根据图中已标定的电流、电压参考方向，它们的功率分别为

$$p_{e_1} = -v_1 \cdot i = -e_1 \cdot i$$

$$p_{e_2} = v_2 \cdot i = e_2 \cdot i$$

如果图中各电量的实际方向与参考方向都一致，这时 p_{e_1} 的功率值为负值、表示 e_1 提供功率； p_{e_2} 为正值，表示 e_2 消耗功率。这样图1—15表示了电源 e_1 通过电阻 R 向蓄电池 e_2 充电的情况。

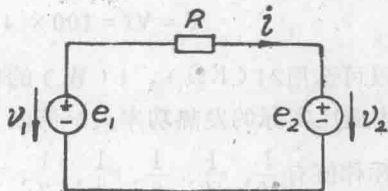


图1—15 e_1 向 e_2 充电

二、电流的热效应

电流通过电阻时，就要消耗一定的电能，并转换成热能，这种现象称为电流的热效应。若有一电流 i 流过电阻 R ，则在时间 t 内电阻产生的热量为

$$Q = 0.239 \int_0^t i^2 R dt \quad (1-16)$$

上式就是焦耳—楞次定律的数学表达式。式中 i 、 R 、 t 的单位分别为安、欧、秒时，热量 Q 的单位是卡。系数0.239叫做热功当量，表示1焦耳的功相当于0.239卡热量。

电流的热效应用途很广，利用它可以制成电炉、电烙铁等电热器。但它也有不利的一面，通电的导线由于存在一定的电阻而导致温度升高，温度过高会加速绝缘材料的老化变质，如橡胶硬化，绝缘纸烧焦等，从而引起漏电，严重时甚至会烧毁电气设备。因此各种电气设备，为了安全运行，要有一定功率、电压、电流限额，称为这些设备的额定功率、额定电压、额定电流。在使用时不能超过这些定值，否则将会损坏设备。由于功率、电压和电流有一定的关系，所以在给定额定值时可以省略几项，例如电灯泡、电烙铁等只给出额定电压和额定功率（如220V, 40W）；固定电阻器除给出阻值外，只给出额定功率（如1W、 $\frac{1}{2}$ W、 $\frac{1}{4}$ W、 $\frac{1}{8}$ W等）。各种电气设备的额定值通常都标明在产品铭牌上。

导体中通过电流过大，导体会由于过热而熔断，利用电流的热效应而制成的熔断器可作为电气设备的保护装置。当线路中由于某种原因电流过大时，熔丝最先熔断，迅速切断电路，使电气设备得到保护，所以熔丝也叫保险丝。必须注意，熔丝的粗细要选择适当才能达到保护电气设备的目的。若选用熔丝太粗，它的额定电流比被保护设备的额定电流大，那么当电流已超过设备的额定值时，不能使熔丝熔断，起不到保护设备的作用。反之，如选用过细的熔丝，那么在设备正常工作电流时，熔丝就会烧断，影响正常工作。因此必须根据电工手册中所列各种熔丝的规格，选择适当的熔丝，才能既保证正常工作，又保证安全用电。

例1—5 某电子线路中有一个降压电阻，已知通过它的电流为4（mA），要求在该电阻上的电压为100（V），试选择此电阻。

解：根据欧姆定律，其电阻值为

$$R = \frac{V}{I} = \frac{100}{4 \times 10^{-3}} = 25 (\text{K}\Omega)$$

电阻上消耗的功率为

$$P = VI = 100 \times 4 \times 10^{-3} = 0.4 (\text{W})$$

所以可选用 $24 (\text{K}\Omega)$ ， $1 (\text{W})$ 的电阻。选用电阻的阻值应符合规定的标称值系列，其额定功率应比实际的发热功率大一倍以上。关于阻值的标称值系列见表1—1。成品电阻器额定功率的标称值有 $\frac{1}{20}$ 、 $\frac{1}{10}$ 、 $\frac{1}{8}$ 、 $\frac{1}{4}$ 、 $\frac{1}{2}$ 、1、2、5、10、20、30、50、100 (W) 等。

表1—1 电阻、云母、瓷介容标称值系列

E24系列 误差 $\pm 5\%$	1.0	1.1	1.2	1.3	1.5	1.6
	1.8	2.0	2.2	2.4	2.7	3.0
	3.3	3.6	3.9	4.3	4.7	5.1
	5.6	6.2	6.8	7.5	8.2	9.1
E1.2系列 误差 $\pm 10\%$	1.0	1.2	1.5	1.8	2.2	2.7
	3.3	3.9	4.7	5.6	6.8	8.2
E6系列 误差 $\pm 20\%$	1.0	1.5	2.2	3.3	4.7	6.8

说明：表中所列数值乘以1、10、100、1000……就得出标称值，如 51Ω 、 100Ω 、 $3.5\text{K}\Omega$ 、 $470\text{K}\Omega$ 、 $1.5\text{M}\Omega$ 等。

1—6 电压源和电流源

电路中向负载供给电能的电源有两类。有一类电源，当负载电阻在一定范围内变化时，其输出电流随着改变，但电源两端的电压几乎不变，如常用的电池、稳压电源等，通常把这类电源称为电压源。而另一类电源，当负载电阻在一定范围内变化时，电源两端的电压随着变化，但电源的输出电流却几乎不变，通常把这类电源称为电流源。光电池就是电流源的一个例子，在具有一定照度的光线照射下，光电池将被激发产生一定值的电流，只要照度不变，即使负载电阻在一定范围内变化，电流几乎不变。有些电子器件和电子设备也属于电流源。电路理论中把电源的模型分为两类，即恒压源和恒流源（或称理想电压源和理想电流源）。

一、恒压源和恒流源

恒压源的性质是：电源两端的电压 v 是一定的时间函数 $e(t)$ ，其大小和变化规律完全取决于电源本身，与它的输出电流无关。如果恒压源端电压是常数 E ，就称为直流恒压源。恒压源的输出电流并不是由它本身就能确定的，要视端电压和负载情况而定。图1—16 (a) 是恒压源在电路图中的符号，其中“+”、“-”号就是它的参考方向。图 (b) 是直流情况