

电路分析基础

上册

中国人民解放军空军雷达学校

一九七八年八月

前 言

本书是以我校工程班学员为主要对象而编写的。内容有八章，分上、下两册出版。上册包括直流电路、正弦交流电路、三相交流电路和非正弦交流电路。下册包括振荡电路、四端网络、过渡过程、磁路和变压器。全书侧重于线性电路的分析方法，注意了联系雷达专业实际。在编写过程中，参考了工科院校全国统编教材纲目以及军队院校和地方大专院校的相应教材。书中打*号的内容为选学内容，可根据教学对象和学时的多少酌情取舍。

由于编印仓卒，编者水平不高，书中缺点错误一定不少，请读者指正。

电 工 教 研 室

一九七八年八月

目 录

第一章 直流电路

第一节 电路的基本概念和物理量	1
一、电流	2
二、电压与电位	3
三、产生稳定电流的条件·电动势	4
第二节 电路的基本定律	5
一、欧姆定律	5
二、电功率·焦耳定律	10
三、基尔霍夫定律	13
第三节 简单电路的分析	16
一、电阻串联电路	16
二、电阻并联电路	19
三、电阻混联电路	21
四、电路中电位的计算	26
五、电源输出最大功率的条件	28
六、电压源、电流源及其等效变换	29
* 七、含源支路的串、并、混联	33
* 八、受控源	36
第四节 线性网络分析的一般方法	38
一、支路电流法	39
二、网孔电流法	44
三、结点电位法	49
四、弥尔曼定理	55
第五节 线性网络的几个定理	58
一、迭加定理	58
* 二、互易定理	62
三、代文宁定理	64
* 四、运用代文宁定理分析受控源电路	71
五、诺顿定理	73
* 第六节 非线性直流电路的分析方法	74
一、图解法	75
二、等效线性电路法	78

第二章 正弦交流电路

第一节 正弦交流电的基本概念	81
一、概述	81
二、正弦交流电的产生	83
三、正弦交流电的三要素	85
四、相位差	87
五、周期性交流电的有效值和平均值	89
第二节 理想元件的特性	92
一、纯电阻正弦交流电路	93
二、纯电感的基本特性	98
三、纯电感正弦交流电路	99
四、纯电容的基本特性	103
五、纯电容正弦交流电路	104
第三节 正弦交流电路的矢量图解法	108
一、正弦量的矢量表示法	108
二、同频率正弦量的矢量加减法	110
三、矢量形式的基尔霍夫定律	114
四、多种元件串联的正弦交流电路	115
五、多种元件并联的正弦交流电路	122
六、位形图	127
七、矢量图解法的应用举例	129
第四节 符号法基础	133
一、复数基础	134
二、正弦量的复数表示法	137
三、复数阻抗与复数导纳·欧姆定律的复数形式	141
四、无源二端网络的等效电路	146
五、正弦交流电路中的功率	153
六、基尔霍夫定律的复数形式	160
第五节 用符号法计算正弦交流电路	161
一、简单正弦电路的计算举例	161
二、复杂正弦电路的计算举例	167
三、负载从电源获得最大功率的条件	173
* 四、交流电桥的基本原理	175
五、有互感的交流电路	179

第三章 三相交流电路

第一节 三相交流电的基本概念	191
一、三相交流电动势的产生	191

二、三相交流电的表示法	192
第二节 三相电路的联接及其特点	193
一、三相电路的联接	193
二、三相电路中的电流电压关系	195
三、三相电路中的功率	199
第三节 三相电路的计算	202
一、对称三相电路的计算	202
二、不对称三相电路的计算	206
三、关于负载的实际联接	213

第四章 非正弦交流电路

第一节 谐波分析法基础	216
一、非正弦周期性函数的分解	216
二、非正弦周期量的有效值和表示波形特征的因数	222
第二节 非正弦交流电路的计算	225
一、电流和电压的计算	225
二、功率的计算	230
* 第三节 福里哀级数的复数形式和频谱的概念	232
一、福氏级数的复数形式	232
二、频谱的概念	234

第一章 直流电路

电路就是电流通过的路径。在雷达、计算机、通讯等各个电子技术领域中使用许多电路来完成各种各样的功能。各种实际电路是由电阻器、电容器、半导体管、变压器、磁芯等元件及电源组成的。为了能对电路进行分析、计算，我们必须用某种“模型”来表征一个实际元件(或电源)的主要特性。实际元件的运用都与电磁现象有关，因此，构成电路模型的有三个最基本的理想元件：表示电磁能转换为热能的电阻元件、表示电场储能的电容元件和表示磁场储能的电感元件。此外，还有电压源和电流源等两种理想的电源模型。许多元件和电路在一定条件下可以用电阻性模型表示。例如灯泡、电烙铁等，可以看成是纯电阻元件；半导体管以及许多数字集成电路、逻辑电路也可以用纯电阻元件和理想电源来表示。实际元件用模型表示后，就可以绘出只由理想元件组成的电路图。各种理想元件都用一定的符号来表示。例如电阻元件用长条形符号表示，理想电压源用电池符号表示，理想导线用线段表示(图1—1)。今后我们研究的电路都是由理想元件构成的电路——电路模型。对电路模型加以分析，就能了解实际电路的性能并能设计出所需要的电路。

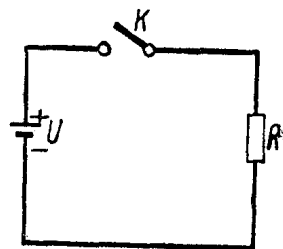


图1—1

实际的电路可能是极其复杂的。按其结构来分，可分为无分支电路和有分支电路。图1—1是无分支电路。图1—2是有分支电路。在有分支电路中，每个分支电路都是电路的一部分，

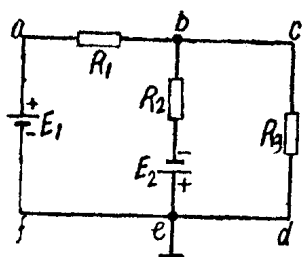


图1—2

叫做支路。图1—2就是由三个支路构成的电路，其中be、baf、bcde就是支路。三个支路或更多支路的联结点称为结点。图1—2中，b点和e点就是结点。电路中沿支路构成的任何一个闭合路径称为回路。图1—2中abefa、bcdeb、abcdefa都是回路。该电路共有三个回路。显然，电路至少要有有一个回路，这种简单的电路叫单回路电路。多回路的电路有时又称为网络。

本章研究在直流电源作用下的线性电阻性电路，这是最简单最基本的电路。这章内容很重要，一方面，在雷达和其它电子设备中有许多电路是直流电路；同时，对线性电阻性直流电路的分析是分析其他类型电路的基础。本章先说明电路的基本概念和基本定律，然后以此为基础，阐述线性网路分析的一般方法和几个重要定理。

第一节 电路的基本概念和物理量

在开始电路分析之前，先复习一下电流、电压等基本概念和物理量，它们是分析电路时

的主要对象。

一、电流

电荷的流动叫做电流。导体中的电流是载流子有规则的运动形成的。金属导体中，载流子是自由电子，它们在电场作用下便能作规则的运动，其运动方向与电场的方向相反。在另一类导体（如电解液）中，载流子是正、负离子，在电场作用下，正离子顺着电场方向运动，负离子逆着电场方向运动。正是由于载流子在电场作用下有规则的运动，才能使电荷由一处移到另一处而形成电流。

为了衡量电流的大小，引用电流强度这个量。规定：单位时间内通过导体横截面的电量为电流强度，用符号 i 表示（图1—1—1）。电流强度有时也简称电流，所以电流这个名词不仅代表一种物理现象，而且也是一个物理量。

若在一小段时间 dt 内，通过导体横截面的电量为 dq ，根据定义，可得

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

电流的强度和方向都不随时间而变化的电流，称为直流电流，简写作（ $D、C$ 或 $d、c$ ）。直流电流的强度可用下式计算

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

实用单位制中，电流强度的单位是安培，简称安，用符号 A 代表。在 1 秒钟内，流过导体横截面的电量为 1 库仑，那么导体内的电流强度就是 1 安培，即

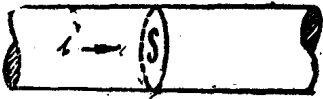


图1—1—1

$$1 \text{ [安]} = \frac{1 \text{ [库]}}{1 \text{ [秒]}}$$

在分析电路时，不仅要注意电流的大小，还要分清电流的方向。在同一电场的作用下，正电荷和负电荷移动的方向是相反的。那么如何规定电流的方向呢？公认的规定是：以正电荷流动的方向作为电流的方向。在金属导体中，我们把负电荷的流动想象为正电荷沿着相反方向的流动。因此，金属导体中电流的方向与自由电子的运动方向相反。

在电路很复杂的情况下，往往事先很难知道电流的真实方向，而在交流电路中，电流的真实方向是不断变化的。为了分析和计算方便，我们用正、负值来表示电流的方向，即规定一个方向的电流为正值，那么与此方向相反的电流便是负值。正值电流的方向称为电流的正方向。在电路图上，正方向用箭头表示，如图 1—1—2 所示。如果元件上电流与所标箭头方向一致，则其电流是正值，如果元件上电流与所标箭头方向相反，那么它的电流就是负值。

除用箭头标明正方向之外，也有用电流符号 I 的脚注字母的顺序表示正方向的。例如 I_{ab} 表示电流的正方向是由 a 指向 b ，而 I_{ba} 则表示电流的正方向是由 b 指向 a 。

同一电流，若正方向选择不同，则其值相差一个符号，即

$$I_{ab} = -I_{ba}$$

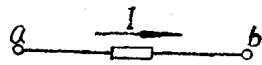


图1—1—2

上面虽然说到电流有大小有方向，但电流并不是矢量，而是标量。因为我们所说的“方向”并不是指空间取向，而是指电荷在导线内流动的总趋势。

二、电压与电位

力学告诉我们，若有甲、乙两物体，甲物体施一力 F 于乙物体。在 F 的作用下，乙物体沿 F 的方向移动一距离，则力 F 完成一定数量的功。或者说：甲物体对乙物体作了一定量的功。做功的过程就是能量转换过程。甲物体对乙物体作了功，则甲的能量减少，而乙的能量增加。

在电路里，载流子是在电场力的推动下产生有规则运动的。因此，当电路内有电流时，电场是要做功的。为了衡量电场的这一性质，引用电压这一物理量。 a 、 b 两点之间的电压，在数值上等于单位正电荷由 a 点移到 b 点时，电场力所作的功。若电场力移动电荷 Q 时所作的功为 A ，则电压 U 为

$$U = \frac{A}{Q} \quad (1-1-3)$$

因为电场力所作的功等于电场所放出的能量，因此电压的定义又可以表述为： a 、 b 两点间的电压，等于单位正电荷由 a 点移到 b 点时，电场所放出的能量。

在实用单位制中，电压的单位是伏特，简称伏，用符号 V 代表。1 库仑的电荷由 a 点移至 b 点，若电场力作的功为 1 焦耳，则 a 、 b 间的电压为 1 伏。即

$$1 \text{ [伏]} = \frac{1 \text{ [焦]}}{1 \text{ [库]}}$$

在电场或电路里，如选定一点为参考点，则某点与参考点间的电压，就称为该点的电位。例如 a 点的电位，就是 a 点到参考点的电压。参考点可以根据问题的性质来选定。在电子线路里，常以机壳为参考点。电位也用 U 代表，为了表明电位是那一点的，常加脚注字母，例如 U_a 表示 a 点的电位， U_b 表示 b 点电位。

如果电场力将单位正电荷由 a 点移到参考点所作的功，大于由 b 点移到参考点所作的功，我们就说 a 点电位高于 b 点电位。如果已知 a 、 b 两点的电位，则 a 、 b 两点间的电压可用下式求出，即

$$U_{ab} = U_a - U_b$$

这就是说， a 、 b 两点之间的电压等于 a 、 b 两点间的电位差。

在电场力作用下，正电荷总是由高电位端流向低电位端，而负电荷则与此相反。

电路元件两端的电压常用“+”“-”号标示电位的高低端，“+”号表示高电位端，“-”号表示低电位端，如图 1—1—3 所示。

电压是一个标量，但习惯上经常谈到电压的方向。所谓电压方向，是指在此电压作用下电流的方向，即由高电位指向低电位的方向。

在许多情况下，要直接确定电压的方向（或者“+”、“-”极性）是困难的。为了计算和分析方便，也用正负值来表示电压的方向。即规定一个方向的电压为正值，那么与此方向相反的电压就是负值。

正值电压的方向称为电压的正方向。在电路图上电压正方向用箭头表示，或用“+”“-”标出极性，如图 1—1—3 所示。若计算分析结果电压为正值，则该电压的方向与正方向一致；如果计算结果电压为负值，则该电压的方向与正方向相反。

除用箭头表示电压正方向外，也有用双脚标表示的。例如 U_{ab} 表示电压正方向由 a 指向 b ，而 U_{ba} 则表示电压正方向是由 b 指向 a 。显然

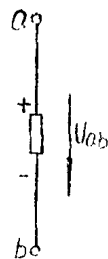


图 1—1—3

$$U_{ab} = -U_{ba}$$

三、产生稳定电流的条件·电动势

在图1—1—4中，设有两带电极板 A 和 B ，开始时， A 板带正电，电位为 U_a ， B 板带负电，电位为 U_b ，且 $U_a > U_b$ 。用导线将 A 、 B 相连，则导线内处处有电场，其方向由高电位的 A 板指向低电位的 B 板。在电场作用下，金属导体内的自由电子将由低电位端（ B 板）流向高电位端（ A 板），形成由 A 板流向 B 板的电流。这样 B 板上的负电荷逐渐减少，其电位

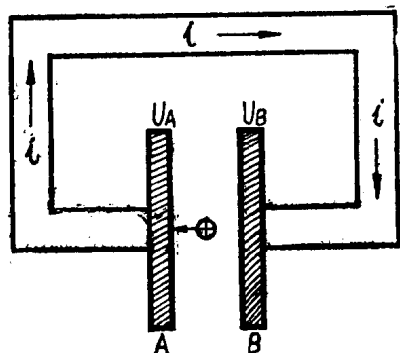


图1—1—4

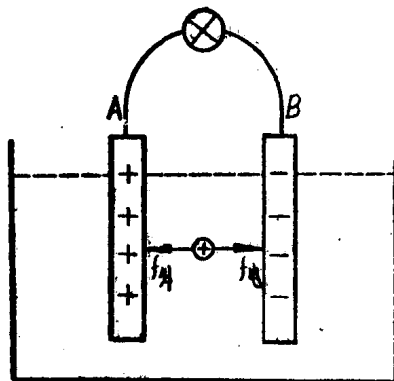


图1—1—5

逐渐升高；而 A 板上的正电荷与来自 B 板的负电荷中和，也逐渐减少，其电位逐渐降低。结果是 A 、 B 之间的电位差逐渐减小而趋向平衡，电流也就逐渐减小，最后为零。这就是说，利用静电的电位差是不可能维持恒定电流的。

如果利用外来因素，不断将 A 板上增加的负电荷取走（取走负电荷，相当于补充正电荷），并补充给 B 板，则 A 、 B 之间的电位差就能维持不变，在导线内就能维持直流电流。产生这种外来因素的装置就是电源，例如电池和发电机等。每一个电源都有两个极，高电位端为正极，低电位端为负极。

在电源内部也有电场存在，其方向由正极板指向负极板。从上面的分析可见，电源内电荷的移动方向与电荷所受电场力的方向是相反的。即：负电荷向负极移动，正电荷向正极移动。因此，电源内必定有某种与电场力方向相反的力存在。这种力显然不可能是静电作用产生的，故称为非静电力，或称为局外力，用 $f_{\text{外}}$ 表示。正是由于这种局外力，才能使电荷反抗电场力（ $f_{\text{电}}$ ）而移动（图1—1—5）。不同形式的电源，产生局外力的原因不同，例如电池中，局外力是靠化学作用产生的；发电机中，局外力是由电磁感应作用产生的。

外电路开路时，外电路不可能有电流，此时在电源内部，作用于载流子的电场力与局外力相等，合力为零，载流子不可能产生有规则的运动，所以也没有电流。

外电路接通后（如图1—1—5），电源正、负两极上的电荷，通过外电路而中和，两极间的电场稍有削弱，结果电源内作用于载流子上的局外力 $f_{\text{外}}$ 大于电场力 $f_{\text{电}}$ ，于是载流子在局外力作用下产生有规则运动，使两板上的正、负电荷源源不断得到补充。因而能得到持续的恒稳电流。

由以上分析可知，要得到稳定电流，必须接入电源。在电源外部，电荷是在电场力的推动下运动；在电源内部，电荷是在局外力推动下运动。而且内外电路电流大小相等，衔接成闭合回路。

从能量转换观点看, 电源是一种能量转换装置。在电源内部, 局外力克服电场力驱使电荷流动, 局外力做功, 把其他形式能量转换成电能。例如在电池中化学能转换成电能, 在发电机中机械能转换成电能。在电源外部, 电场力推动电荷移动, 电场力做功, 把电能转换成其他形式能量。

电源将其他形式能量转换成电能的能力, 用电动势这个物理量来表征。电源的电动势在数值上等于局外力移动单位正电荷所作的功。如果局外力所移动的电荷为 Q , 而其功为 $A_{\text{外}}$, 则电动势为

$$E = \frac{A_{\text{外}}}{Q} \quad (1-1-4)$$

上式中, 如 $A_{\text{外}}$ 以焦耳为单位, Q 以库仑为单位, 则 E 应以伏特为单位。

画电路时, 直流电源采用图1-1-6两种符号。图1-1-6(a)长划代表“+”极, 短划代表“-”极。图1-1-6(b)中只标箭头, 而不标“+”“-”极性, 箭头表示电动势方向, 所谓电动势方向是指在此电源作用下电流的方向, 即电位升高的方向。

如同电压需要选定正方向一样, 分析电路时, 往往预先选定一个方向作为电动势的正方向。当电动势的实际方向与正方向一致时, 其数值为正; 当电动势的实际方向与正方向相反时其数值为负。

因为外电路开路时, 电源内作用于同一载流子的局外力与电场力相等, 因此电动势的数值等于外电路断开时两极间的电压。测量电动势就是测量电源的开路电压。但 U 、 E 之符号与两者正方向的选择有关。在图1-1-7(a)中 E 与 U 的正方向选择相反, 则

$$E = U \quad (1-1-5)$$

因为在图1-1-7(a)中, 如果 a 点为高电位, b 点为低电位, 则 E 的箭头指向恰为电位升, E 为正值, 而 U 的箭头指向恰为电位降, U 也为正值, 即 E 与 U 同号, 故(1-1-5)式成立。

如果按图1-1-7(b)那样, 假设 E 与 U 的正方向一致, 则

$$E = -U \quad (1-1-6)$$

因为在图1-1-7(b)中, 如果 a 点为高电位, b 点为低电位, 则 E 仍为正值, 而 U 为负值, 即 E 与 U 符号相反, 因此式1-1-6成立。

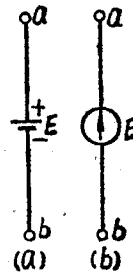


图1-1-6

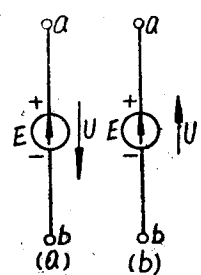


图1-1-7

第二节 电路的基本定律

一、欧姆定律

欧姆定律是表示电阻元件性能的基本定律。

(一) 电阻的概念·无源支路的欧姆定律

实验表明, 各种导体对电荷的流动都表现出一定的阻碍作用。在金属导体中, 这种阻碍作用是由于晶格上正离子的热振动而产生的。金属导体中, 正离子排列在结晶格子的结点

上, 在电场作用下不能发生移动, 但它们可在自己的平衡位置附近来回振动。温度越高, 振动越剧烈, 所以称为热振动。这种来回振动的正离子, 会与自由电子相碰撞, 因而阻碍了自由电子的有规则的运动。

由于导体对电荷的流动有阻碍作用, 所以只有导体内有电场存在时, 才能有电流; 或者反过来说, 若导体内有电流, 则导体内必有电场存在。一旦电场消失, 电荷的流动立即停止。导线内既有电场, 导线两端必有一定数值的电压。因此可以说: 只有导线两端有电压时, 导线内才能有电流。或者说, 若导线内有电流, 那么它的两端必有一定数值的电压。

因为沿着电流方向看, 电位是逐渐降低的, 所以有时把元件两端的电压称为电压降。如图1—2—1所示。

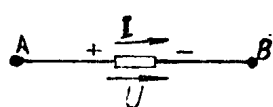


图1—2—1

流过元件的电流与它两端电压成什么关系, 完全由元件的特性决定。实验表明, 当温度保持一定时, 流过金属导线的电流, 与它两端的电压成正比, 即

$$I = \frac{U}{R} \quad (1-2-1, a)$$

或 $U = RI \quad (1-2-1, b)$

上式就是欧姆定律, 是从大量实验资料中总结出来的。式中比例系数 R 称为导线的电阻, 表示导线的特性, 它的单位是欧姆(Ω)。若导线两端的电压是1伏, 而流过它的电流是1 A, 则这段导线的电阻就是1欧姆。

元件的特性除了用电阻这个参数表示外, 还可用另外一个参数——电导来表示, 电导用符号 g 表示, 其定义为

$$g = \frac{1}{R} \quad (1-2-2)$$

而欧姆定律可写为

$$I = g U$$

或 $U = \frac{I}{g}$

加同样的电压于电导不同的导线两端, 那么, g 大的导线内电流大, 因此 g 大表示导线导电的能力大。

实用单位制中, 电导的单位是姆(S)

$$1[\text{姆}] = \frac{1}{1[\text{欧}]}$$

必须注意, 只有在 U 与 I 的正方向一致的前提下, 式(1—2—1)才成立; 如果电压与电流的正方向相反, 则

$$I = -\frac{U}{R}$$

由欧姆定律(1—2—1)式可知, 在电阻值 R 不随电压或电流而变化的条件下, 元件两端的电压与电流成正比, 符合这种条件的元件, 叫做线性元件。表示元件上电压与电流之间关系的图形叫伏安特性曲线。由于 R 是常数, 因此线性元件的伏安特性是一条经过座标原点的直线, 如图1—2—2所示。它的电阻值可由直线的斜率来确定, 是一个常数。有些元件的伏安特性与直线相差很大, 这种元件称为非线性元件, 半导体二极管就是例子。硅稳压管的伏安

特性曲线如图1—2--3所示。

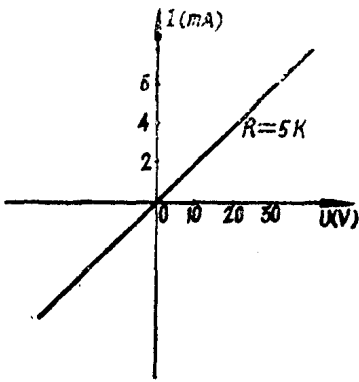


图1—2—2

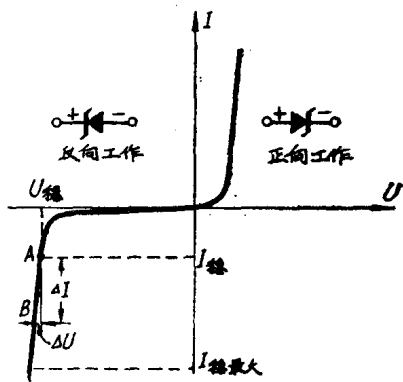


图1—2—3

在计算电路时，要注意各量的单位。我们已指出了一些物理量的实用制单位，如安、伏、秒等，在实际应用中有时感到这些单位太大或太小，使用不便，因此还用到一些辅助单位。用一些基本单位与10为底的正幂或负幂相乘，就得一些辅助单位，这些单位的符号就是基本单位的符号再加上表1—1所示的符号，例如

- 1 毫安 (mA) = 1×10^{-3} 安 (A)
- 5 微秒 (μS) = 5×10^{-6} 秒 (S)
- 2 兆欧 ($M\Omega$) = 2×10^6 欧 (Ω)

表1—1

中 文	国际符号	因 数
千 兆	T	10^9
兆	M	10^6
千	K	10^3
毫	m	10^{-3}
微	μ	10^{-6}
毫 微	n	10^{-9}
微 微	P	10^{-12}

【例题 1】 已知一段电路上所加电压 $U = 6$ 伏，通过电路中的电流 $I = 100$ 毫安，求该段电路的电阻 R 。

解： $R = \frac{U}{I} = \frac{6V}{100mA} = \frac{6V}{0.1A} = 60\Omega$

【例题 2】 将一个 2 千欧的电阻接到 28 伏电压的电源上，求电路中的电流。

解： $I = \frac{U}{R} = \frac{28V}{2K\Omega} = \frac{28V}{2000\Omega}$
 $= 14 \times 10^{-3} A = 14mA$

【例题 3】 已知一个 30 千欧的电阻上流过的电流为 500 微安，求该电阻两端的电压降。

解： $U = IR = 500\mu A \times 30K\Omega = 500 \times 10^{-6} A \times 30 \times 10^3 \Omega$
 $= 15V$

(二) 欧姆定律在含源支路中的应用

前面公式 (1—2—1) 所示的欧姆定律只能应用于不含电源的支路。图 1—2—4 所示的支路，是复杂电路中的某一支路，其中 U 是外加电压，即由电路的其余部分加给这个支路的电压。当 E 与外加电压 U 同时存在时，流过支路的电流 I 是 E 与 U 两者共同作用的结果。

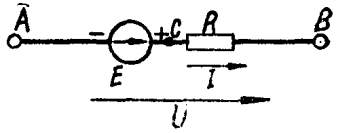


图1—2—4

由外加电压 U 产生的电流为 $\frac{U}{R}$ ，由本支路电势 E 产生的电流为 $\frac{E}{R}$ ，支路内的总电流为上述二者之代数和。即

$$I = \frac{E}{R} + \frac{U}{R} = \frac{E + U}{R} \quad (1-2-3)$$

当 E 、 U 、 I 三者的方向均如图 1-2-4 所示时， E 、 U 两者产生电流都与 I 的方向一致，上式中 E 、 U 均为正值。

如图 1-2-5，若 E 的方向与 I 的方向相反，而 U 的方向与 I 的方向相同，则 E 所产生的电流为负值， U 所产生的电流为正值，即

$$I = \frac{U}{R} + \left(-\frac{E}{R}\right) = \frac{U - E}{R}$$

如图 1-2-6，若 E 与 I 方向相同，而 U 与 I 方向相反，则 E 所产生的电流为正值， U

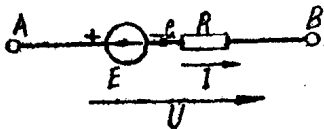


图 1-2-5

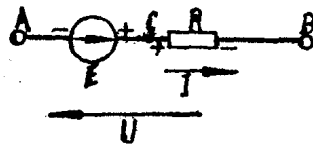


图 1-2-6

所产生的电流为负值，即

$$I = \left(-\frac{U}{R}\right) + \frac{E}{R} = \frac{-U + E}{R}$$

总之， U 、 E 的符号应以 I 的方向为标准，与 I 的方向相同的 U 、 E 为正，反之，与 I 方向相反的 U 、 E 为负。

上面式子中，都是把 I 看成是 U 、 E 的函数。也可以从上述诸式中解出 U ，即把 U 看成是 I 、 E 的函数。此时 U 应为电阻压降 IR 与电源两端电压的代数和。各项之符号应以 U 的方向为标准，沿 U 的方向看，电位降低者取正号，反之，电位升高者取负号。例如在图 1-2-4

中，沿 U 的方向看， AC 段电位升高， CB 段电位降低，故

$$U = -E + IR \quad (1-2-4, a)$$

在图 1-2-5 中，沿 U 的方向看， AC 及 CB 两段电位均降低，故

$$U = E + IR \quad (1-2-4, b)$$

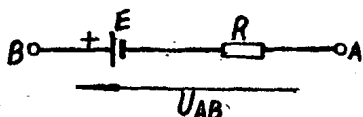
在图 1-2-6 中，沿 U 的方向看， BC 段电位升高， CA 段电位降低，故

$$U = E - IR \quad (1-2-4, c)$$

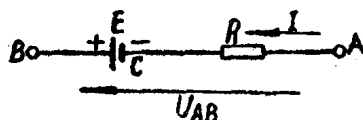
【例题】有一含源支路如图 1-2-7(a) 所示，已知 $E = 5V$ ， $U_{AB} = 10V$ ， $R = 5\Omega$ ，求此支路电流。

解：选定电流正方向如图 (b) 所示，因 E 、 U 、 I 正方向一致，所以

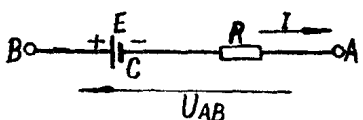
$$I = \frac{U_{AB} + E}{R}$$



(a)



(b)



(c)

图 1-2-7

$$= \frac{10+5}{5} = 3A$$

计算结果 I 为正值, 说明电流的实际方向与所设的正方向一致, 即 I 由 A 端流向 B 端。

若选定电流正方向如图(c)所示, 则

$$I = \frac{-U_{AB} - E}{R} = -\frac{10+5}{5} = -3A$$

计算结果 I 为负值, 说明电流的实际方向与所设的正方向相反, 即仍为由 A 端流向 B 端。可见任意选定正方向, 对结果的正确性毫无影响。

(三) 欧姆定律应用于全电路

图1—2—8(a)为电源向负载 R 供电的电路。在实际电源内也有电阻, 称为电源的内阻。将电源内阻 r_0 抽出来画在电源之外, 如图1—2—8(b)所示。电流流过内阻 r_0 将产生电压降, 其数值为 $I r_0$ 。我们来研究 U 、 E 、 $I r_0$ 具有什么关系。

不难看出, 图1—2—8(b)左边部分电路同图1—2—6的形式是类似的, 只不过将图1—2—6的 R 用 r_0 代替了, 因此由公式(1—2—4, c)得

$$U = E - I r_0$$

在图1—2—8(b)右边的部分电路中, $U = I R$, 而左、右两部分的端电压是同一电压, 因而得到

$$I R = E - I r_0$$

或

$$I = \frac{E}{r_0 + R} \quad (1-2-5)$$

这就是通常所说的全电路的欧姆定律。之所以这样称呼, 是因为公式(1—2—5)包含了闭合电路的全部电阻。

由于电源内阻的存在, 所以供电电源的端电压比它的电动势要低一些, 即

$$U = E - I r_0$$

由于内阻压降 $I r_0$ 是与输出电流成正比的, 所以电源端电压随输出电流的增大而降低。

内阻很小 ($r_0 \ll R$) 的电源, 其端电压变化很小

$$U \approx E$$

即负载改变时, 端电压基本上恒定不变, 故称为恒压源, 其伏安特性如图1—2—9中曲线1所示。

内阻很大 ($r_0 \gg R$) 的电源, 其输出电流

$$I = \frac{E}{r_0 + R} \approx \frac{E}{r_0}$$

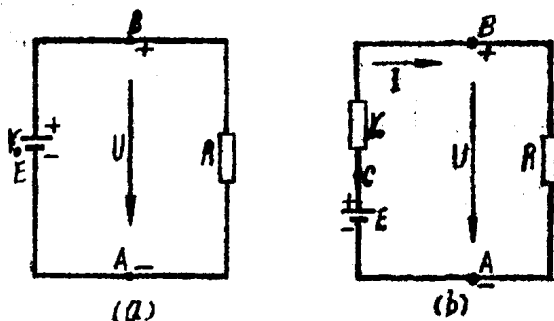


图1—2—8

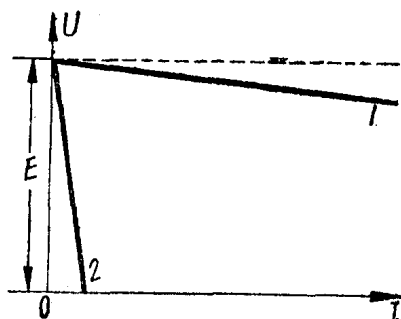


图1—2—9

示。

即负载改变时, 输出电流基本上恒定不变, 故称为恒流源, 其特性如图1—2—9曲线2所示。

【例题1】一直流电源的电势 $E = 30$ 伏, 内阻 $r_0 = 0.3$ 欧, 使用过程中, 其输出电流在1安到1.5安之间变动, 求其端电压变化范围。

解: 当输出电流 $I = 1$ A 时

$$U = E - Ir_0 = 30 - 1 \times 0.3 = 29.7 \text{ 伏}$$

当输出电流 $I = 1.5$ A 时

$$U = E - Ir_0 = 30 - 1.5 \times 0.3 = 29.55 \text{ 伏}$$

【例题2】某电源的开路电压为24V, 与外电阻 R 接通后, 用电压表测量 R 两端电压 $U = 22.5$ V, 流过 R 的电流 $I = 5$ A, 求电阻 R 及电源内阻 r_0 。

解: 画出电路如图1—2—10所示。设开路电压为 U_K , 则

$$E = U_K = 24 \text{ V}$$

而

$$U = RI = 22.5 \text{ V}$$

所以

$$R = \frac{U}{I} = \frac{22.5}{5} = 4.5 \Omega$$

因

$$U = E - Ir_0$$

所以

$$r_0 = \frac{E - U}{I} = \frac{24 - 22.5}{5} = 0.3 \Omega$$

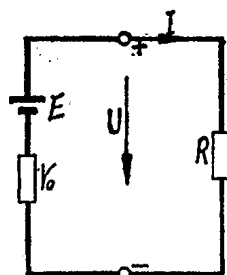


图1—2—10

二、电功率·焦耳定律

前面已经提到过, 当电路中有电流时, 电路各段都要进行能量转换。在电源内部, 局外力作功, 把其他形式能量转换成电能, 在电源外部, 电场力作功, 把电能转换成其他形式能量。

电功率是用来衡量电能转换速率的物理量, 其数值等于单位时间内所转换的电能。电功率用符号 P 表示, 电能用符号 W 表示。

如图1—2—11, 某段电路 a 、 b (不论其中有无电源, 也不管其中有无分支) 中, 有电流 I 通过, 而其两端电压为 U , 则这段电路电场力作的功, 即电场所放出的能量为

$$W = Uq = UI t$$

又根据电功率的定义

$$P = \frac{W}{t} = \frac{UI t}{t} = UI \quad (1-2-6)$$

式中, 若 U 、 I 以伏、安为单位, 则 P 的单位为瓦特 (用符号 W 代表)。在 (1—2—6) 式中 I 、 U 正方向的选取应一致。

当 I 、 U 实际方向一致时, 两者符号相同, P 为正值, 电场力作功。表示这部分电路从电路的其余部分吸取电能, 并将其转换为其他形式能量。以电能而论, 这部分电路消耗电能, 是用电部分。

当 I 的实际方向与 U 的实际方向相反时, 两者符号不同, P 为负值, 电场力作负功。既然 I 、 U 的实际方向相反, I 不可能是在 U 的推动下产生的, 因此, 这部分电路一定含有电源, 电流是在局外力推动下产生的, 局外力作正功, 把其他形式能量转换成电能。所以 P 为

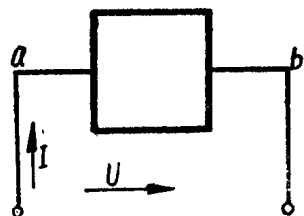


图1—2—11

负值，表示电场吸收其他形式的能量，再送到电路的其余部分。以电能而论，这部分电路是向外部提供电能的，是供电部分。

式(1—2—6)不论对含源支路和无源支路都是成立的。但在用于计算无源支路的功率时，可将无源支路的欧姆定律代入，从而可得

$$P = UI = I^2 R \quad (1-2-7)$$

或
$$P = UI = \frac{U^2}{R} \quad (1-2-8)$$

如果知道一段电路吸收的电功率，就可以知道这段电路在经过一段时间 t 后所吸收的电能，即

$$W = Pt = UIt \quad (1-2-9)$$

上式 U 、 I 的单位用伏特、安培， t 的单位用秒，则 W 的单位为焦耳。实用中，计算电能量时，用电设备的功率往往用“仟瓦”，时间用“小时”为单位，则电能量的单位为“仟瓦小时”。

1 “仟瓦小时”又叫1度。

电阻元件总是吸收电能的，并把吸收来的电能全部转换为热。实验证明：1焦耳的电能可以产生0.239卡热量。因此，如果以卡作为热量的单位，则电流通过一段电阻为 R 的电路，在时间 t 内，总共产生的热量为

$$Q = 0.239W = 0.239RI^2t \quad (1-2-10)$$

式中 Q 代表热量。这个关系叫焦耳定律。

由于电流流过导线会放出热能，因而使导线温度升高。电流过大，温度过高，就会使导线周围的绝缘物烧毁。因此任何电器，其电流都有一定限额，称为额定电流。另外，为使电器内绝缘物不致击穿，电压也有一定限额，称为额定电压。电器的额定电流与额定电压的乘积，称为额定功率。使用电器时，不允许超过其额定值。

电源是电能的供给者。下面研究电源功率和负载功率的关系。在图1—2—12中应有

$$E = Ir_0 + IR$$

两边同乘以 I

$$IE = I^2 r_0 + I^2 R$$

上式中 IE 为电源供给的功率，即局外力在单位时间内所作的功，也就是单位时间内由其他形式的能量转换而来的电能。 $I^2 r_0$ 和 $I^2 R$ 分别表示电源内阻和负载电阻所消耗的电功率。上式表明，局外力的功率等于全电路消耗的功率（包括内阻上消耗的功率）。

并不是电路中所有电源都是供给功率的，例如蓄电池充电时，从功率平衡概念来讲，蓄电池是吸收电能的，它把电源输出电能的一部分转化为蓄电池的化学能。例如图1—2—13所示的电路中， r_1 、 r_2 分别为直流电源和蓄电池的内阻， E_1 、 E_2 分别为电源和蓄电池的电动势。为了给蓄电池充电，电动势 E_1 、 E_2 在这个电路中方向相反。当 E_1 大于 E_2 时， E_1 就克服了 E_2 的反作用，产生电流 I ，其方向如图中所示。此电流逆着电动势 E_2 的方向流过蓄电池，电场力就要作

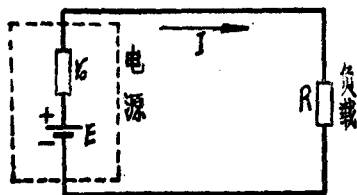


图1—1—12

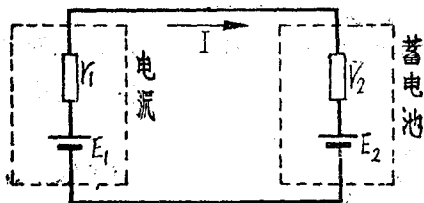


图1—2—13

功, 这时电能转化为蓄电池的化学能, 所以蓄电池在充电时是吸收电能的。此外还有蓄电池的内阻和电源的内阻也都是消耗电能的, 根据功率平衡概念, 电源 E_1 供给的功率除在内阻上消耗一部分外, 其余都转化为蓄电池的化学能, 因此有

$$E_1 I = E_2 I + (r_1 + r_2) I^2$$

因此在电路中, 如果通过某电源中电流的方向和该电源的电动势方向相反, 此电源就是吸收电功率的。只有当电源的电动势与通过电源的电流方向一致时, 此电源才是供给功率的。

【例题 1】一台直流发电机, 当接上电阻 $R = 11$ 欧的负载时, 电流为 $I = 10$ 安, 已知其内阻 $r_0 = 0.5$ 欧。试求该发电机的电动势、端电压、输出功率及发电机产生的功率。

解: 发电机的端电压 $U = IR = 10 \times 11 = 110$ 伏

发电机的电动势 $E = Ir_0 + IR = 10 \times 0.5 + 110 = 115$ 伏

发电机输出功率 $P = I^2 R = UI = 110 \times 10 = 1100$ 瓦

发电机产生的功率 $P_E = P + I^2 r_0 = 1100 + 10^2 \times 0.5 = 1150$ 瓦

或 $P_E = EI = 1150 \times 10 = 1150$ 瓦

【例题 2】如图 1—2—14, 已知 $E = 40$ V, $R = 5 \Omega$, $U = 90$ V, 求电流并讨论功率平衡情况。

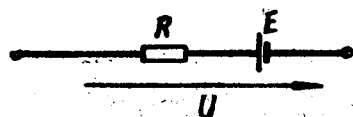


图 1—2—14

解: 选定 I 的正方向与 U 的正方向一致, 则

$$I = \frac{U - E}{R} = \frac{90 - 40}{5} = 10 \text{ A}$$

$$\begin{aligned} P &= IU = I(IR + E) = I^2 R + IE \\ &= 100 \times 5 + 10 \times 40 \\ &= 500 + 400 = 900 \text{ W} \end{aligned}$$

$P > 0$, 表明此支路是用电的。其中电阻 R 上的热功率 (电能转换为热能的速率) $I^2 R = 500 \text{ W}$ 。而电流的实际方向与电动势的方向相反, 表明电源处在充电状态, 电源所吸收的电功率为 $IE = 400 \text{ W}$ 。此两项均由外部供给。

【例题 3】在上例中, 若 $U = 10$ V 而 R 及 E 不变。求电流, 并讨论功率平衡情况。

解: 仍选定 I 的正方向与 U 的正方向一致, 则

$$I = \frac{U - E}{R} = \frac{10 - 40}{5} = -6 \text{ A}$$

$$\begin{aligned} P &= IU = I(IR + E) = I^2 R + IE = 36 \times 5 + (-6) \times 40 \\ &= 180 - 240 = -60 \text{ W} \end{aligned}$$

$P < 0$, 表明此支路是供电的。电流的实际方向与 E 相同, 而与 U 相反, 故电源处在供电状态。电源发出的电功率为 240 W , 除供给本支路的热功率 180 W 外, 尚余 60 W 送至电路的其余部分。

在任何一个复杂的电路中, 所有供电支路供给的电功率必等于所有用电支路消耗的电功率, 由于供电支路 $P < 0$, 用电支路 $P > 0$, 因此可得下述结论: 在任意一个复杂电路中, 所有支路电功率的代数和为零, 即

$$\sum P_k = 0 \quad (1-2-11)$$

这个式子是功率平衡关系的普遍表达式。