

电 工 学



中国人民解放军空军第一航空学院

一九九三年一月

编写：朱运瑞 陈文华 孙立云

审查：陈文华

校对：朱运瑞 陈文华

印刷：空军一航院印刷厂

前 言

本书根据空军制定的航空机务修理专业士官班《电工学》大纲编写，适用于电镀、热处理、附件、机体修理等修理专业中专班学员，在内容上作适当删减，也可作为机械专业中专班的教材。本书在内容上突出了该类专业所需的电工学中的基本概念、基本理论、基本分析方法和一些必备的实用电工知识。

本书由朱运瑞同志主编，陈文华同志审查定稿。书中第一、二章由孙立云同志编写，第三、四、五章由朱运瑞同志编写，第六、七章由陈文华同志编写。在编写过程中，兰琮同志提出许多宝贵的意见，在此表示衷心的感谢。

编 者

一九九二年五月

wt1/105/25

目 录

第一章 电路的基本概念和基本定律	1
§ 1—1 电路的基本概念.....	1
§ 1—2 电功率与电能.....	4
§ 1—3 电阻和欧姆定律.....	6
§ 1—4 电压源和电流源.....	9
§ 1—5 电源的输出功率和效率.....	13
§ 1—6 电气设备的额定工作状态、断路和短路.....	15
§ 1—7 基尔霍夫定律.....	19
习题一.....	23
第二章 直流电路的分析方法	26
§ 2—1 电阻的串联和并联电路.....	26
§ 2—2 电阻的混联电路.....	29
§ 2—3 电路中的电位.....	34
§ 2—4 网孔电流法.....	38
§ 2—5 叠加原理.....	40
§ 2—6 戴维南定理.....	43
§ 2—7 直流电桥.....	45
习题二.....	46
第三章 正弦交流电路	54
§ 3—1 正弦交流电的基本概念.....	54
§ 3—2 正弦量的相量图示法、同频率正弦量的合成.....	64
§ 3—3 纯电阻电路.....	71
§ 3—4 纯电感电路.....	74
§ 3—5 纯电容电路.....	80
§ 3—6 串联正弦交流电路.....	87
§ 3—7 并联正弦交流电路.....	101

§ 3—8 正弦交流电路的功率·····	108
习题三 ·····	115
第四章 三相交流电路 ·····	118
§ 4—1 三相对称电动势的产生·····	118
§ 4—2 三相电源的联接·····	120
§ 4—3 三相负载的联接·····	123
习题四 ·····	134
第五章 变压器 ·····	136
§ 5—1 变压器的基本结构和工作原理·····	136
§ 5—2 变压器的使用知识和常用变压器·····	142
习题五 ·····	149
第六章 电机 ·····	151
§ 6—1 直流发电机·····	151
§ 6—2 直流电动机·····	154
§ 6—3 直流电动机的起动、反转和调速·····	156
§ 6—4 三相异步电动机·····	160
§ 6—5 三相异步电动机的控制电路·····	168
习题六 ·····	176
第七章 电工测量仪表 ·····	178
§ 7—1 磁电仪表·····	178
§ 7—2 电流表·····	180
§ 7—3 电压表·····	183
§ 7—4 欧姆表·····	185
§ 7—5 三用表·····	188
§ 7—6 高阻表·····	190
习题七 ·····	192

第一章 电路的基本概念和基本定律

§ 1—1 电路的基本概念

电路就是电流通过的路径。所有的电路都是由三个部分组成，它们是：电源、负载和中间环节。现将一最基本的电路表示于图1—1。

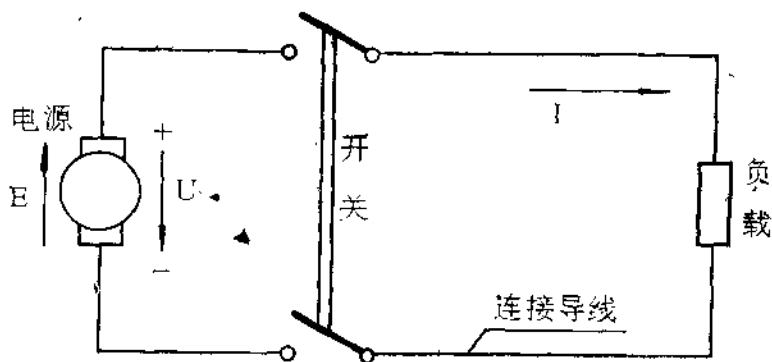


图1—1 最简单的电路

电源是供应电能的装置，其作用是将其其它形式的能量转换为电能。例如发电机把机械能转换为电能，电池把化学能转换为电能。

负载是取用电能的装置，它将电能转换为其它形式的能量。例如电动机把电能转换为机械能，电灯把电能转换为光能和热能。

中间环节主要是指连接导线和开关，它们将电源及负载连接起来，构成电流通路。此外，中间环节还包括保护电器（如熔断器等）。

电路的基本作用是进行电能与其它形式能量之间的转换。主要有如下两方面的具体功能。第一、电能的传送、分配与转换。第二，进行信息的传递和处理。本书着重研究电路的前一功能。

不论电能的传输和转换，或者信号的传递和处理，都要通过电流、电压、电动势和功率、电能来实现，所以在分析与计算电路之前首先讨论一下电路的这几个基本物理量。

一、电流

电荷的有规则的定向运动称为电流。电流的大小用电流强度（简称电流）来表示。电流强度是指单位时间内通过导体横截面的电荷量。即

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

如果电流的大小和方向都不随时间变化，则称为恒定电流，简称直流，这时的电流强度用大写字母*I*表示，则

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

电流的单位是安培，简称安（A）。如果在1秒钟内通过导体横截面的电量是1库，则此导体中的电流为1安。对于较小的电流可以用毫安（mA）或微安（μA）作单位，它们的关系是：

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

电流不仅有大小，而且有方向。习惯上规定用正电荷移动的方向作为电流的方向，这就是电流的真实方向或实际方向。

在简单电路中，电流的实际方向容易按电源的极性来判定。但比较复杂的电路中电流的方向，往往难于直接判断。为了分析计算电路的需要，我们引入参考方向的概念。

电流在导体中流动的实际方向有两种可能，任意选取其中一个方向作为参考标准，我们称之为参考方向，又称正方向，见图1—2。电路中某一未知电流的正方向一经选定，如果求得此电流为正值，就说明电流的实际方向与选定的正方向相同；若求得此电流为负值，就说明电流的实际方向与选定的正方向相反。在图1—2中，若*i* = +10A，它表示电流的大小是



图1—2 电流的正方向

10A，且实际方向与正方向一致，电流从a端流向b端；若*i* = -10A，则电流的大小仍为10A，而实际方向与正方向相反，是由b端流向a端。

电流的正方向是预先任意标定的，正方向一经标定，电流值的正负也随之确定；若不标定电流的正方向，讨论电流值的正负便没有意义。

二、电压

电荷在电场力作用下定向运动形成电流，在这个过程中，电场力推动电荷运动做功。为了表示电场力对电荷做功的本领，我们引入了“电压”这个物理量。

电场力把正电荷从a端移到b端所做的功*A_{ab}*与被移动的电量*Q*的比值称为a、b两端间的

电压，用 U_{ab} 表示，即

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

在国际单位制中，电压的单位是伏特（V）。作为辅助单位有千伏（KV）及毫伏（mV）、微伏（ μv ）。

$$1kv = 10^3v \quad 1mv = 10^{-3}v$$

$$1\mu v = 10^{-6}v$$

在电工学中规定一段电路中，电压的实际方向是由高电位点指向低电位点。为了完整的表示出电压的大小和极性，我们可以采用与电流一样的方法：在一段电路上任意标定一个方向，见图1—3。同时电压数值之前冠以正、负号，如 $U_{ab} = +5V$ ，它表示a、b两点间

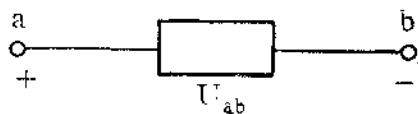


图1—3 电压的正方向

电位差的大小是5伏，且电压的真实方向与正方向一致，即a端是高电位、b端是低电位。若电压 $U_{ab} = -5V$ ，它表示a、b两点间电位差大小仍为5伏，但电压的真实方向与正方向恰好相反，a端是实际上的低电位而b端是高电位。

前面介绍了电压、电流的正方向，在同一段电路中，正方向可以任意选取，二者之间并无必然联系。但是为了分析、研究的方便，一般情况下，总是采用彼此关联的正方向。如图1—4所表示的，在同一段电路中，电流的正方向与电压的正方向一致，即电流的正方向是从电压的正方向表示的高电位点流向低电位点。

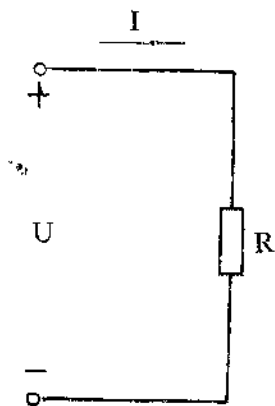


图1—4 关联正方向

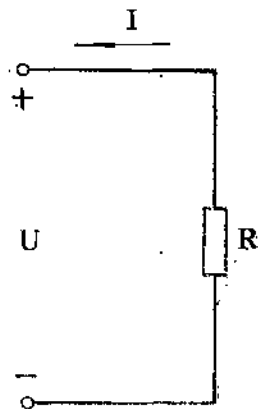


图1—5 非关联正方向

三、电动势

电动势是表示电源性能的物理量。

我们知道，在电源以外的部分电路，正电荷总是从正极流出，最后流回到电源负极。这

个过程中,是电场力推动正电荷做功的结果。而在电源内部,存在着某种非电场力,它能够把正电荷自电源负极移到正极,从而保持了电路里的持续电流。为了表征电源内部非电场力对正电荷做功的能力,我们引入了电动势的概念。电动势在数值上等于非电场力把单位正电荷从负极经电源内部移动到正极时所做的功。根据这个定义,电动势的单位自然也是伏特。

电动势在数值上等于非电场力把正电荷从电源负极移到电源正极所做的功 A 与被移动的电量 Q 的比值,即

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

通常规定电动势的真实方向是由低电位端指向高电位端,即从电源负极指向正极,刚好与电压的真实方向相反。

练 习 题

1—1—1 进入某元件的总电荷为 $q(t) = 2e^{-2t} \text{ C}$,问当 $t = 0$ 时,元件中的电流 i 是多少?

1—1—2 已知某元件吸收能量 100 J ,两端电压 $U_{ab} = 50 \text{ V}$,问有多少库仑的电荷由 $a \rightarrow b$ 通过元件?电荷为正还是为负?

§ 1—2 电功率与电能

使用电路的目的就是为了进行电能与其它形式能量之间的转换,所以在电路的分析与计算中还经常用到电功率和电能两个物理量。

一、电功率

我们知道,电场力移动电荷所作的功等于该电荷的电量 Q 与两点之间的电压 U 的乘积,即 $A = Q \cdot U$ 。而 $Q = I \cdot t$,所以也可以写作 $A = U \cdot I \cdot t$ 。

定义:单位时间内电场力所做的功就是电功率,用 P 表示,则

$$P = \frac{A}{t} = U \cdot I \quad (1-5)$$

在国际单位制中,电压的单位是伏特,电流的单位是安培,则功率的单位是瓦特,简称瓦(W)。1瓦功率等于每秒消耗(或产生)1焦耳的功。除了瓦之外,也可用千瓦(kW)或毫瓦(mW)作单位,它们的关系是

$$1 \text{ kW} = 10^3 \text{ W} \quad 1 \text{ mW} = 10^{-3} \text{ W}$$

图1—6所表示的一段电路是普遍适用的情况,该段电路中可能包含负载,也可能包含电

源，现用矩形方框表示。电压、电流取关联正方向。在这种条件下，如果计算出的功率 P 为正值（负值）。则表明这段电路是消耗（产生）电功率〔图1—6(a)〕。这是因为 P 为正，必是 U 、 I 同为正或同为负，其物理意义是电流（正电荷）是在电场力作用下从高电位点流向低电位点，是电场力做功，消耗电功率，将电能转换成为其它形式的能量。

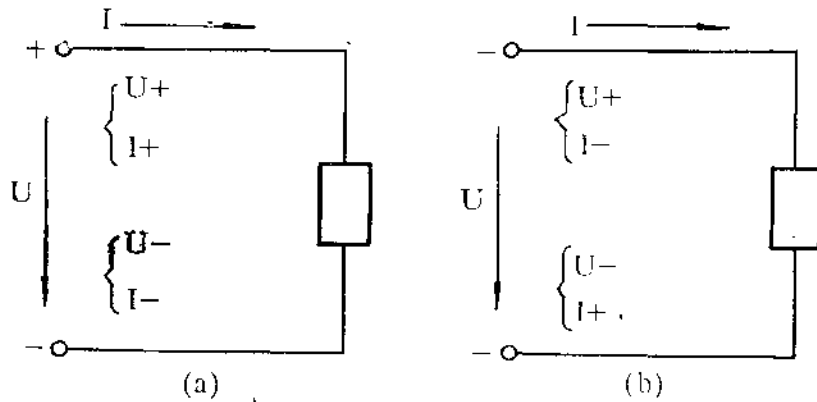


图1—6 功率的正、负

例如图1—7所示电路， $U = 10\text{V}$ ， $I_1 = I_2 = 5\text{A}$ 。对于负载， U 、 I_2 是关联正方向，运用式(1—5)算得 $P_{\text{负载}} = UI_2 = 50\text{W}$ ；对于电源， U 、 I_1 是非关联正方向，运用式(1—5)计算时，有 $P_{\text{电源}} = UI_1 = 10 \times (-5) = -50\text{W}$ 。计算结果表明，负载是耗能的（即吸收电能），这个电能正是由电源提供的。由上面的

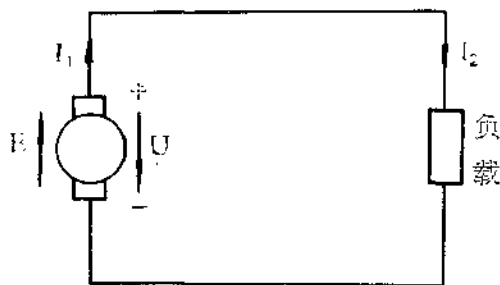


图1—7 功率判断用图

计算还可以看出，电源提供的功率等于负载消耗的功率，式 $P_{\text{负载}} + P_{\text{电源}} = 0$ 。该式称为电路的功率平衡方程式。此结论可推广到一般电路中：在一电路系统中，必然满足功率守恒定律，即电源所提供的功率等于负载所消耗的功率，或者说，电路各部分所产生的（或消耗的）功率的代数和等于零。

二、电能

除了功率之外，有时还要计算一段时间内电路所消耗（或产生）的电能，电能等于功率与时间的乘积，即

$$A = P \cdot t$$

(1—6)

电能的单位是焦耳，简称焦（J）。较大的电能单位有千瓦小时，1千瓦小时就是我们日

常生活中所说的1度电，即：

$$1\text{度电} = 1\text{千瓦小时} = 3600000\text{瓦特秒}$$

在图1—7中，考虑了电源内电阻的损耗后，功率平衡方程式可写成：

$$P_{\text{电源}} + P_{\text{负载}} + P_{\text{损耗}} = 0$$

又

$$P_{\text{电源}} = -EI$$

$$P_{\text{负载}} = UI$$

$$P_{\text{损耗}} = U_0 I$$

所以

$$EI = UI + U_0 I$$

等式两边除以 I ，则得

$$E = U + U_0 \quad (1-7)$$

上式称为电路的电压平衡方程式。其意义是：电源电动势等于电源端电压与电源内部电压降之和。

练 习 题

1—2—1 某元件的电压电流参考方向如图1—8所示：

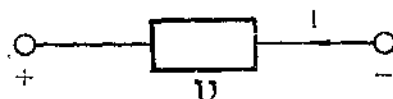


图1—8 题1—2—1图

(a) 若元件产生 10mW 功率， $I = 1\text{mA}$ ，求 U ；

(b) 若元件消耗 10mW 功率， $I = -1\text{mA}$ ，求 U 。

问1分钟时间内，该元件消耗的电能是多少？

§ 1—3 电阻和欧姆定律

电路的基本规律，包含两方面的内容，一方面是电路作为一个整体来看，应服从什么规律，另一方面是组成电路的各个元件有何特性。电路整体的基本规律将在本章§1—7中去说明，本节主要介绍电阻元件的特性。

一、电阻与电导

我们知道，载流子在导体中运动时，必然要和导体中的原子、分子或离子发生碰撞，载流子的运动就要受到阻碍。我们把导体的这种阻碍作用称为电阻。

为了衡量电阻的大小，人们把加在导体两端的电压 U 与导体中通过的电流 I 的比值叫做导体的电阻，用 R 表示。即

$$R = \frac{U}{I} \quad (1-8)$$

电阻的单位是欧姆，符号 Ω 。如果导体两端的电压为 $1V$ ，其中通过的电流为 $1A$ 时，这导体的电阻为 1Ω 。电阻的辅助单位还有千欧（ $K\Omega$ ）、兆欧（ $M\Omega$ ）。它们的换算关系是：

$$1K\Omega = 10^3\Omega$$

$$1M\Omega = 10^6\Omega$$

实验证明，一段截面均匀的导体电阻的大小与导体的长度 l 成正比，与导体的横截面积 S 成反比，并与导体的材料有关，可用公式表示如下：

$$R = \rho \frac{l}{S} \quad (1-9)$$

式中， ρ 为导体的电阻系数。

利用导体对电流呈现阻力的性质做成的元件叫电阻元件。电阻元件又简称为电阻。

电阻的倒数 $1/R$ 叫电导，用 G 表示。它的单位是西门子，符号 S 。电阻为 1 欧姆的导体，其电导为 1 西门子。

一个导体的导电性能，既可以用电阻表示，亦可用电导表示。

二、一段电阻电路的欧姆定律

图1—9是闭合电路中的一段，在这一段电路中含电动势，仅有电阻，因此，称为一段电阻电路。实验指出，流过电阻的电流 I 与电阻两端的电压 U 成正比，而与电阻 R 成反比。这个关系称为欧姆定律。用公式表示如下：

$$I = \frac{U}{R} \quad (1-10)$$

$$\text{或 } U = RI$$

需要指出，上面两式是在电流电压取关联正方向下得到的，若取非关联正方向，则有

$$I = -\frac{U}{R} \quad (1-11)$$

$$\text{或 } U = -RI$$

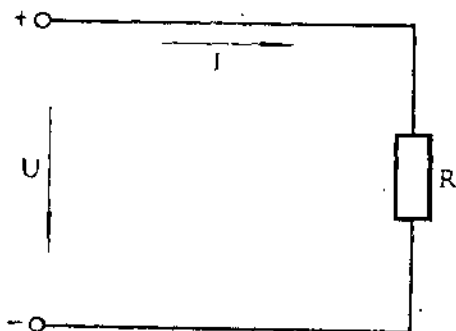


图1—9 一段电阻电路

用电导来表示欧姆定律时，有

$$I = GU \quad \text{或} \quad U = \frac{I}{G} \quad (1-12)$$

三、全电路的欧姆定律

图1—10是最简单的闭合电路， R 是负载电阻， r 是电源内电阻。根据电压平衡方程式可得：

$$E = U + U_0$$

若略去连接导线的电阻不计，则加在负载电阻两端的电压就等于电源的端电压，其值为

$$U = IR$$

电源内电阻上的电压降为

$$U_0 = Ir$$

故 $E = IR + Ir$

或 $I = \frac{E}{R + r} \quad (1-13)$

公式(1—13)就是全电路的欧姆定律，其意义是：电路中流过的电流，其大小与电动

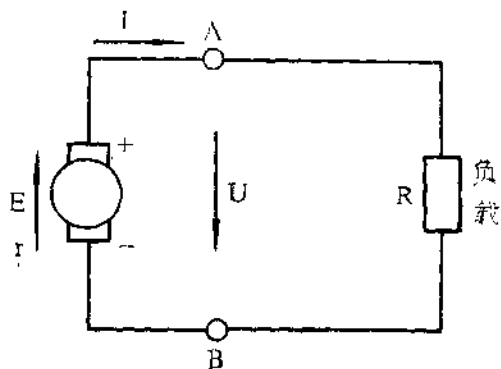


图1—10 最简单的闭合电路

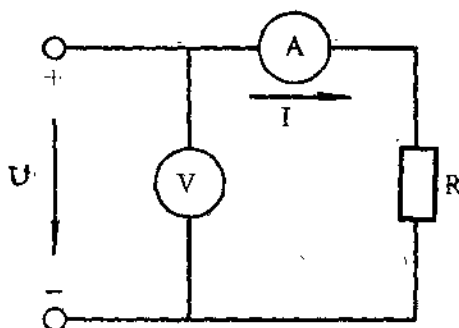


图1—11 例1—1电路

势成正比，而与电路的全部电阻值成反比。

例1—1 为了测量某直流电机励磁线圈的电阻 R ，采用图1—11所示的“伏安法”。伏特计读数为220伏，安培计读数为0.7安，试求线圈的电阻。如果在实验时有人误将安培计当作伏特计，并联在电源上，其后果如何？安培计的量程为1安，内阻 r 为0.4欧。

解： $R = \frac{U}{I} = \frac{220}{0.7} = 315 \text{ 欧}$

当误将安培计并联在电源上，则此时流过安培计的电流为

$$I = \frac{U}{r} = \frac{220}{0.4} = 550 \text{ 安}$$

比电流表量程大550倍，安培计当即烧毁。

练 习 题

1—3—1 计算图1—12中的电流I。

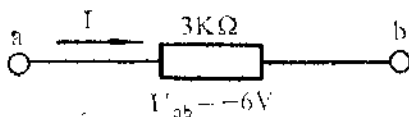


图 1—12 题 1—3—1 图

1—3—2 试计算图1—13所示电路在开关K闭合与断开两种情况下的电压 U_{ab} 与 U_{cd} 。

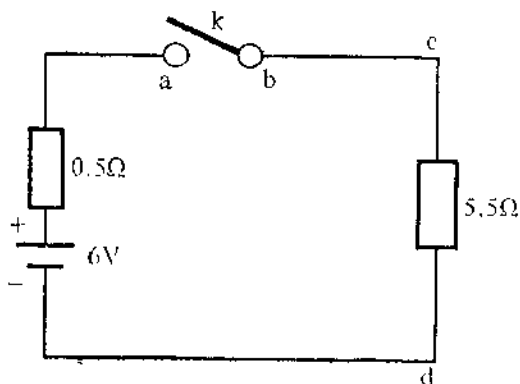


图 1—13 题 1—3—2 图

§ 1—4 电压源和电流源

电源是电路中电能的来源。实际使用的电源种类繁多，但是分析、归纳所有这些电源的共性，按照它们的特点可以将电源分为两大类：电压源和电流源。在每一类电源中，又分为理想电源和实际电源两种情况，下面分别介绍。

一、电压源

1. 理想电压源——恒压源

电压源的定义是：如果电源的输出电压总能保持一个恒定值，而与通过它的电流大小无关，则这种电源就称为理想电压源（或恒压源）。

恒压源有如下两个重要性质：

- （1）它的端电压是一定的，与流经它的电流无关；
- （2）通过恒压源的电流是由恒压源及与它相连的外电路共同决定的。

理想电压源的电路符号及伏安关系如图1—14所示。所谓伏安特性曲线就是某一元件的端电压与通过元件的电流之间的关系曲线，它是表示该元件电气性能的重要方法。

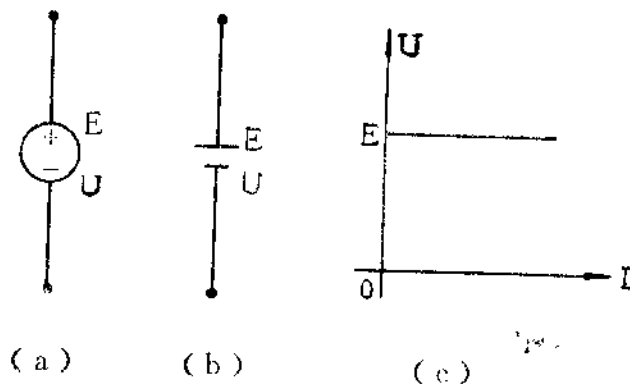


图1—14 理想电压源符号及伏安特性

2. 实际电压源

在实际电路中，某些电源可以用理想电压源来表示，例如高精度的稳压电源等。但是，完全理想的电压源是不存在的，电源与外电路接通后，其输出电压或多或少地都要有所改变。出现这种现象的原因是，任何电源内部或多或少都有能量损耗，通常我们将这种损耗用电源内阻 r 来等效。这样，一个实际的电压源，就可以用一个理想的电压源 E 和一内阻 r 串联来代表，其电路模型如图1—15所示。

由于内阻的存在，实际电压源的输出电压必将随着输出电流的增加而减少，其伏安关系见图1—16。这种关系可由全电路欧姆定律推证出来。

全电路欧姆定律为

$$I = \frac{E}{R + r}$$

变换得

$$I \cdot R = E - I \cdot r$$

即

$$U = E - I \cdot r$$

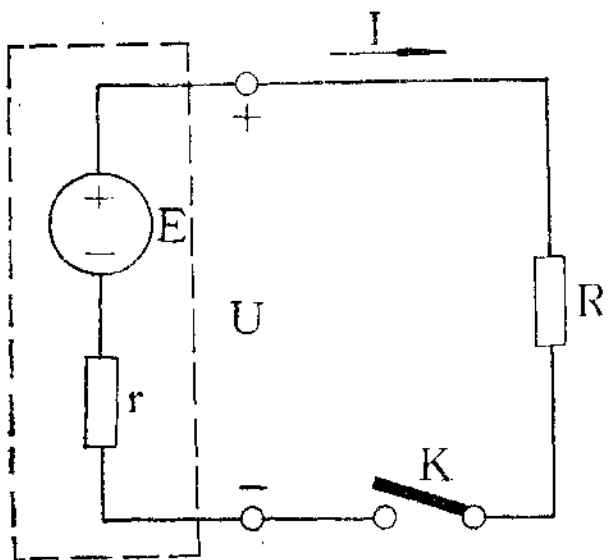


图1—15 实际电压源电路模型

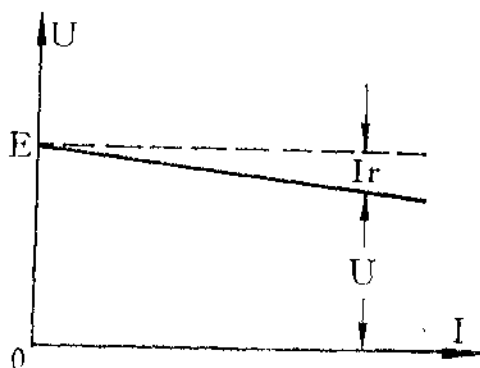


图1—16 实际电压源的伏安特性

式中 E 和 r 是常数，显而易见， I 增加， U 必减小。

二、电流源

除了电压源这种类型的电源之外，还存在着另外一种类型的电源——电流源

1. 理想电流源——恒流源

硅光电池可以认为是这种理想电流源的典型例子。光电池在光线照射下被激发产生电流，而且只要光线的照度一定，光电池就能够向外电路提供确定数值的电流。这种电源就是理想电流源，又叫恒流源。

恒流源有如下两个重要性质：

- (1) 它的输出电流是恒定不变的，与其输出电压无关；
- (2) 恒流源两端的电压取决于恒流源及与它相连的外电路共同决定。

理想电流源的电路符号和 $U-I$ 特性曲线见图1—17所示。

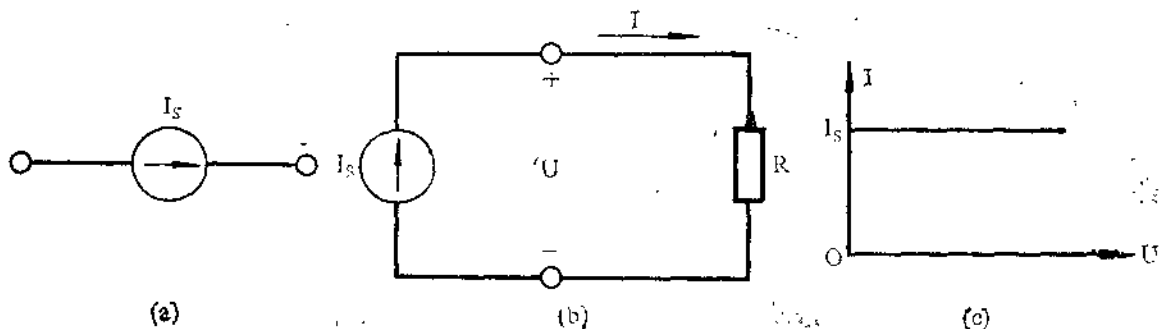


图1—17 理想电流源的符号及 $U-I$ 特性

从图1—17可以看出, 恒流源的伏安特性所示是一条平行于电压(U)轴的直线, 表明它的输出电流 $I = I_s$, 与端电压无关, 与负载电阻 R 无关。同时, 也可以看出, 当电源二端被短路时 $R = 0$, 端电压 $U = 0$, 输出电流 $I = I_s$; 随着 R 的加大, 其端电压是不断加大 的, 具体大小取决于 $I_s \cdot R$ 的乘积, 即取决于负载电阻的大小。例如恒流源 $I_s = 1A$, 当 $R = 5\Omega$ 时, $U = 1 \times 5 = 5(V)$, 而当 $R = 10\Omega$ 时, $U = 1 \times 10 = 10(V)$ 。

2. 实际电流源

恒流源是一种理想情况, 实际电流源在向外电路提供电流的同时, 也存在一定的内部损耗。这种情况可以用一个恒流源 I_s 与确定大小的内阻 r 并联来等效。如图1—18(a)所示。

下面研究实际电流源的伏安关系。设电流源外接一负载 R , 且各电流电压的正方向如图1—18(b)所示。显然有

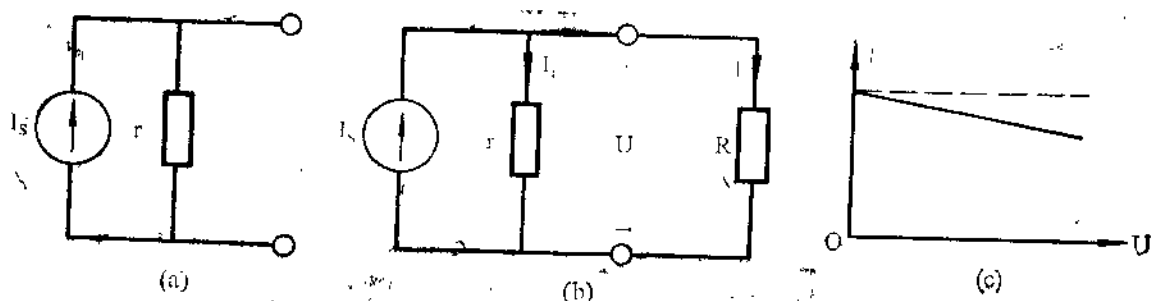


图1—18 实际电流源及其伏安特性

$$I = I_s - I_r$$

而

$$I_r = \frac{U}{r}$$

所以

$$I = I_s - \frac{U}{r} \quad (1-14)$$

从上式可以看出, 随着端电压的增加, 实际电流源的内分流(I_r)也增加, 因而输出电流将减小。实际电流源的伏安关系如图1—18(c)所示。

一般来说, 我们对电压源比较熟悉、也易于掌握, 对电流源则比较生疏。但是电流源确实是一种客观存在, 特别是在电子电路中有着广泛的应用。

练 习 题

1—4—1 在图1—19所示的两个电路中, (1) R_2 中的电流 I_2 及其两端的电压 U_2 各等于多少? (2) 改变 R_1 的阻值, 对 I_2 和 U_2 有无影响?