

第一章 电工基础知识

第一节 直流电路

一、物体的带电和电场

1. 物质的结构

自然界的物质由分子组成，分子由原子组成，原子是由原子核和电子组成。原子核带有正电荷，电子带有负电荷并围绕原子核不停地高速运动着。由于正、负电荷之间存在吸引力，因此运动中的电子受到原子核的束缚力，而不会从原子中飞逸出去。

不同物质的原子具有不同的结构，主要表现为原子核内的正电荷及核外电子的数目不相同。图 1-1 所示为氢原子和铝原子的电结构。各种物质只有正电荷和负电荷两种电荷，同性电荷相互排斥，异性电荷相互吸引，这是电荷的基本特性。

2. 物体的带电

在通常情况下，原子核所带正电荷的总数，总是等于核外电子所带负电荷的总数，所以整个物体不呈现电的特性，物体处于中性状态。当由于某种原因使物体电子增多或减少时，物体内正负电荷的总数就不相等，这时物体就显示出电的特性，称为物体带电。

正负电荷都是自然界物质的组成部分，它们不会凭空产生或消失，只能从一个物体转移到另一个物体上。这种规律称为电荷守恒定律。

物体所带电荷的多少叫电荷量，用 Q 表示，单位是 C。一个电子带有最少量的负电荷，其电荷量等于 $1.60 \times 10^{-19} \text{C}$ ，1C 为 6.25×10^{18} 个电子所具有的电荷量。

3. 电场

两个带电体之间存在互相排斥或互相吸引的作用，这表明两个带电体之间有作用力。带电体周围存在着一种叫做电场的特殊物质，带电体之间的作用就是通过电场进行的。电场对处于电场中的电荷产生作用力，称为电场力，用 F 表示，单位是 N，它的大小可表示为

$$F = EQ \quad \text{或} \quad E = \frac{F}{Q} \quad (1-1)$$

式中 E ——电场强度，N/C 或 V/m；

Q ——电荷量，C。

电场强度 E 的方向跟正电荷在该点所受电场力的方向相同，跟负电荷在该点所受电场力的方向相反。

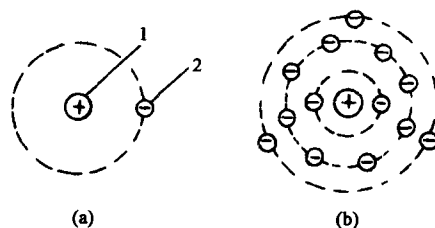


图 1-1 原子的电结构图

(a) 氢原子 (b) 铝原子

1- 原子核；2- 电子

二、电流、电位、电压与电动势

1. 电流

在金属导体中，金属原子的内层电子被原子核紧紧束缚着，不能脱离其运动轨道而自由运动；而原子的外层电子受原子核的束缚力较弱，在一定条件下可以脱离原子核的束缚而自由运动，这种电子又称为自由电子。金属中的自由电子是很多的。如果给导体两端加一个电压，导体内的自由电子就会在电场力的作用下产生定向的运动，这种现象称为电流。

电流具有一定的方向。习惯上规定正电荷运动的方向为电流的实际方向（在电解液中电流的方向与正离子运动的方向相同）。这与电子反方向运动的效果是相同的。在电路计算时，可任意选择一个方向作为电流的假定方向，简称正方向或参考方向。计算结果电流为“+”，说明实际方向与假定方向一致；反之，实际方向为假定方向的反方向。

单位时间流过导体横截面的电荷量称为电流强度，简称电流，用 I 表示，其表达式为

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

式中 Q ——通过导体截面的电荷量，C；

t ——通过电荷量 Q 所用的时间，s。

电流的单位为安培，简称安，用 A 表示。电流的实用单位除安外，还有 kA，mA 和 μ A 其换算关系为

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

电流的大小可用串联在电路中的电流表来测量。

2. 电位与电压

在电场中，把正电荷 Q 逆着电场力方向从无限远处沿任一路径移动到电场中 a 点处时，外力克服电场力所做的功称为 Q 电荷在 a 点的电位能 W_a 。在电场中 a 点处单位正电荷所具有的电位能称为 a 点的电位，用 V_a 表示，即

$$V_a = \frac{W_a}{Q} \quad (1-3)$$

式中 Q ——电荷的电荷量，C；

W_a ——在 a 点电荷 Q 所具有的电位能，J。

电位的单位是伏特，简称伏，用 V 表示。

为了确定电路中各点电位的高低，可在电路中任选一个参考点，令其电位为零（工程中常选大地为参考点），这时电路中其他各点电位的高低，都以这一点为标准进行比较，高于参考点的电位为正电位，低于参考点的电位为负电位。两点间的电位差称为两点间的电压，用 U 表示。

电压的方向是由高电位指向低电位的。如果电路中两点的电位相等，则电位差等于零，叫做等电位点。无源支路等电位点间没有电流流过。这是高压带电作业的理论依据。

跟电流计算一样，在无法确定电压方向时，可先假定一个参考方向进行电压计算，最后根据结果的正负来确定其实际方向。

电压的单位也是 V，其实用单位还有 kV，mV 和 μ V。其换算关系为

$$1\text{kV} = 10^3\text{V}; 1\text{V} = 10^3\text{mV} = 10^6\mu\text{V}$$

电压的大小可用并联在电路中的电压表来测量。

3. 电源和电动势

所谓电源，就是能将其他形式的能量转化为电能的设备，如发电机、蓄电池，分别可将机械能、化学能转化为电能。

各种电源都具有正负两个极性，而且都能在电源内不断将正电荷从低电位端（“-”极性）移动到高电位端（“+”极性），于是两极间就形成电场，保持着一定的电位差。电源内部这种移动电荷的作用力称为电源力。

电源力既然能使正电荷移动，就说明它能做功。电源力将单位正电荷从电源低电位端移动到高电位端所做的功 W ，称为电源的电动势，用 E 表示，即

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

和电压一样，电动势的单位也是 V。

电动势的方向是指在电源内部电源力移动正电荷的方向，是从低电位端指向高电位端，即电位升的方向。而电压方向指的是从高电位端指向低电位端，即电压降的方向。这两个物理量的含义不同（电位升与电位降），但实际上说明同一客观事实，即“+”极性端电位比“-”极性端电位高。

方向不随时间而改变的电流、电压、电动势都称为直流电。方向和大小都不随时间而改变的电流、电压、电动势称为稳恒直流，通常简称直流。本节所讲的直流都是指这种稳恒直流。

三、电阻、导体和绝缘体

1. 导体和导体的电阻

容易通过电流的物体叫导体。导体中的自由电子在电场力的作用下做定向运动时，由于不断地与导体内的许多原子发生碰撞，并受到邻近原子中正、负电荷的吸力和斥力，因此会受到一定的阻力。导电物体对电流的这种阻力称为电阻，用 R 表示，导体电阻的大小由下式决定

$$R = \rho \frac{L}{S} \quad (1-5)$$

式中 ρ ——电阻率，其大小与导体材料性质有关， $\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$ ；

L ——导体长度，m；

S ——导体横截面积 mm^2 。

导体的电阻还与导体的温度有关。一般金属材料的电阻随温度的升高而增加，电解液导体的电阻随温度的升高而降低。考虑温度影响时金属导体的电阻，应为

$$R_2 = R_1 [1 + \alpha (t_2 - t_1)] \quad (1-6)$$

式中 α ——导体材料的电阻温度系数， $1/^\circ\text{C}$ ；

R_1 ——温度为 t_1 时的电阻值， Ω ；

R_2 ——温度为 t_2 时的电阻值， Ω 。

常用金属材料的电阻率和电阻温度系数，见表 1-1。

电阻的常用单位是欧姆，简称欧，用 Ω 表示，实用单位还有 $\text{k}\Omega$ 和 $\text{M}\Omega$ 。其换算关系为

$$1\text{M}\Omega = 10^3\text{k}\Omega = 10^6\Omega$$

导体的电阻可用欧姆表和电桥来测量。

各种导体都有一定的导电能力。这种能力称为电导，以 G 表示，它与电阻都是说明导体的导电能力大小。电导与电阻的关系为

$$G = \frac{1}{R} \quad (1-7)$$

电导的单位是西门子，简称西，用 S 表示。

表 1-1 常用金属材料的电阻率和电阻温度系数

金属材料名称	电 阻 率 20℃, $\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$	电阻温度系数 $10^{-3}1/^\circ\text{C}$
银	0.0162	3.80
铜	0.0172	3.93
铝	0.0282	3.90
铁	0.100	5.00
镍铬合金	1.09	0.07

2. 绝缘体、绝缘材料的等级及耐热度

绝缘体的电阻很大，电流几乎不能通过，其电阻率一般为 $10^{12} \sim 10^{22} \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$ 。测量绝缘体的绝缘电阻可用兆欧表，俗称绝缘摇表。

绝缘体在电力工业中也得到了广泛应用。但绝缘材料在长期的设备运行中会因热的、电的、环境的和机械的各种应力的作用而逐渐失去原有的绝缘性能，这种变化称为绝缘的老化。温度对绝缘老化的影响最甚，温度愈高，绝缘老化速度愈快，绝缘材料的绝缘性能也就愈差，很容易被高电压击穿，造成故障。严重过热会使绝缘变脆而破裂，导致导体失去绝缘层而发生短路或接地故障。因此，电气设备在正常运行中，不允许超过绝缘材料所容许的温度。

不同种类的绝缘材料，所允许的最高工作温度也不同，例如制造电机和变压器所用的绝缘材料，按耐热能力的不同可分成 Y, A, E, B, F, H, C 等七级，如表 1-2 所示。

表 1-2 绝缘材料的等级及耐热温度

绝缘等级	Y	A	E	B	F	H	C
耐热温度, $^\circ\text{C}$	90	105	120	130	155	180	180 以上
材料举例	未处理过的有机材料	浸渍处理过的有机材料如纸、棉纱、木材等	聚乙烯类绝缘	云母带、云母纸、甘油树脂、虫胶	聚脂绝缘漆	硅有机绝缘	天然云母、玻璃、瓷料

导电能力介于导体和绝缘体之间的物质称为半导体。这一类材料有硅、锗、硒等。

导体、绝缘体和半导体的本质差别在于这些物体原子结构中最外层的电子与原子核结合的松紧程度不同，单位体积内所具有的自由电子数目不同，从而影响到它们的导电能力不同。

四、电路基本定律

1. 电路图（电路模型）

电路就是电流所流过的路径，它分实际电路和电路模型两种。实际电路由实际器件组成。图 1-2 (a) 是用两节干电池经刀开关向灯泡供电的实际电路。组成实际电路的实际器

件通常可分为四类：

(1) 电源，即供给电能的设备。它的作用是将其他形式的能量（如化学能、机械能等）转换成电能。

(2) 负荷，即用电设备。它的作用是耗用电能，将电能转换成非电能。

(3) 控制电器。在电路中起控制和保护作用的开关电器。

(4) 导线。其作用是将电源、负荷和控制电器连接起来。

将电路中的实际器件用理想元件表示后，就得到与实际电路相对应的电路模型，称为电气回路图，简称电路图，如图 1-2 (b) 所示。

在电路图中的灯泡应视为理想电阻元件，干电池视为理想电压源。它们都是电路元件，在表达方式上与实际器件是有区别的，但确实是等效的。在电路分析时，通常都是采用这种电路图（电路模型）来进行的。

2. 欧姆定律

欧姆定律是表示电压（或电动势）、电流和电阻三者关系的基本定律。

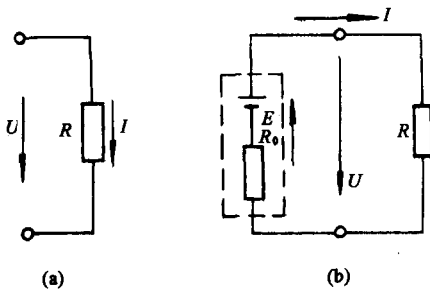


图 1-3 欧姆定律的图例
(a) 部分电路；(b) 全电路

图 1-3 (a) 所示为部分电路。实验证明，流过电阻的电流，与电阻两端的电压成正比，与电阻值成反比，称为部分电路欧姆定律，用公式表示为

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

欧姆定律也适用于如图 1-3 (b) 所示的全电路。在这样的闭合电路中，电路中的电流与电源的电动势成正比，与电路中负载电阻及电源内阻之和成反比，称为全电路欧姆定律，即

$$I = \frac{E}{R + R_0} \quad (1-9)$$

式中 E ——电源电动势，V；

R, R_0 ——分别为负载电阻和电源内阻， Ω ；

I ——电路中流过的电流，A。

式 (1-9) 又可变换成

$$\begin{aligned} E &= I(R + R_0) = IR + IR_0 = IR_0 + U \\ U &= E - IR_0 \end{aligned} \quad (1-10)$$

式中， U 为外电路电阻 R 两端的电压，即电源端电压。

【例 1-1】 在图 1-3 (b) 中，若 $E = 12\text{V}$ ， $R_0 = 0.1\Omega$ ， $R = 3.9\Omega$ ，求电路中的电流 I ，电源内阻 R_0 上的电压降 U_0 及电源端电压 U 。

解：

$$I = \frac{E}{R + R_0} = \frac{12}{3.9 + 0.1} = 3 \text{ (A)}$$

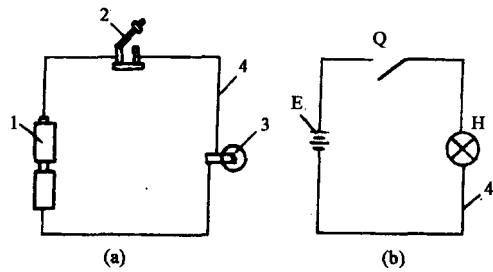


图 1-2 简单电路
(a) 实际电路图；(b) 电气回路图（电路模型）
1—电池 (E)；2—刀开关 (Q)；
3—灯泡 (H)；4—导线

$$U_0 = IR_0 = 3 \times 0.1 = 0.3 \text{ (V)}$$

$$U = E - U_0 = 12 - 0.3 = 11.7 \text{ (V)}$$

在应用欧姆定律时，应注意电压与电流的方向应一致。

当电阻中有电流通过时，两端必有电压。导线都是有电阻的，当用导线输电时，线路电阻将产生电压降，因此输电线路末端的电压总是比始端的电压低（只计电阻的影响时），其降低的数值称为电压损失。在线路较长、线路电流较大时，线路的电压损失也较大。特别在电源电压等级较低时，供电电压会明显下降，必须采取措施予以改进。

3. 基尔霍夫定律

欧姆定律只反映电阻元件的电压与电流的关系。对复杂电路（如多电源电路）的分析，必须采用电路的另一个基本定律——基尔霍夫定律。基尔霍夫定律包括两个方面的内容：节点上各支路电流之间的关系和回路中各电压之间的关系。

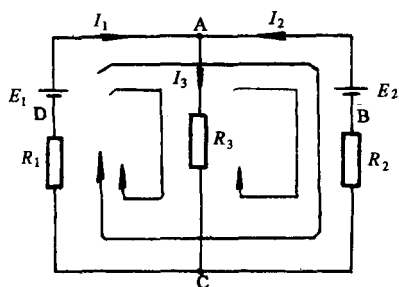


图 1-4 基尔霍夫定律例图

(1) 基尔霍夫第一定律（KCL 节点电流定律）。

电路中三个或三个以上的支路相汇集的点称为节点，如图 1-4 中的 A、C 两点。基尔霍夫第一定律指出：对于电路中的任一节点，流入节点的电流之和必等于流出该节点的电流之和，即

$$\sum I_i = \sum I_o \quad (1-11)$$

若设流入节点的电流为正，则流出节点的电流应为负。式 (1-11) 可写成

$$\sum I = 0 \quad (1-12)$$

式 (1-12) 表明流入节点电流的代数和为零。在

图 1-4 中，对于节点 A 来说，有

$$I_1 + I_2 = I_3$$

或者

$$I_1 + I_2 - I_3 = 0$$

基尔霍夫节点电流定律的依据是电流的连续性原理，体现了在电路中电荷守恒的规律。

应用该定律分析计算电路时，应先在电路图中标出电流的正方向（通常称为参考方向）。如果计算结果出现负值，则说明假定的方向与实际方向相反。

(2) 基尔霍夫第二定律（KVL 回路电压定律）。基尔霍夫第二定律指出：对于任一回路，沿任一方向绕行一周，各电源电动势的代数和等于各电阻电压降的代数和，即

$$\sum E = \sum IR \quad (1-13)$$

在图 1-4 中，对于回路 ABCDA 若按图示选定顺时针方向绕行一周 可列写出回路电压方程式为

$$E_1 - E_2 = I_1 R_1 - I_2 R_2$$

这一定律体现了能量守恒的基本规律，即单位正电荷在电场作用下沿着回路流动一周时，各电动势的电源力对电荷做功使其获得的能量的代数和（即电位升的代数和），与电场力对电荷做功使其失去的能量的代数和（即电位降的代数和）相等。应用上式时应注意：

- 1) 绕行方向可任意选定（顺时针或逆时针）。
- 2) 绕行方向选定后，顺绕行方向从“-”极到“+”极的电源电动势取正号，反之

负；当电阻元件中电流正方向与绕行方向一致，电阻上的电压取正号，反之取负号。

【例 1-2】 在图 1-4 所示电路中，已知 $R_1 = 1\Omega$ ， $E_1 = 130V$ ， $E_2 = 117V$ ， $R_2 = 0.6\Omega$ ， $R_3 = 24\Omega$ ，求 I_1 ， I_2 和 I_3 。

解：先标出各电流的正方向和回路的绕行方向，如图 1-4 所示。

本题的节点数 n 有两个，可列出独立节点电流方程式 $n - 1 = 2 - 1 = 1$ (个)；回路数 m 为 3，可列出独立回路电压方程式为 $[m - (n - 1)] = 3 - (2 - 1) = 2$ (个)故可得方程组

$$\left. \begin{aligned} I_3 &= I_1 + I_2 \\ E_1 - E_2 &= I_1 R_1 - I_2 R_2 \\ E_1 &= I_1 R_1 + I_3 R_3 \end{aligned} \right\}$$

将已知数据代入上述方程组，解得： $I_1 = 10A$ ， $I_2 = -5A$ (说明 I_2 的实际方向与所标正方向相反)， $I_3 = 5A$ 。

在电路计算中，除上述两个基本定律外，电流源、电压源的概念及其等效变换、叠加原理、戴维南定理等在解决实际问题中也很很有用处，读者可以参阅有关书籍。

五、电路连接

1. 电阻串联

几个电阻头尾依次相接，没有分支地连成一串，称为电阻的串联，如图 1-5 (a) 所示。

串联电路有以下特点：

- (1) 电路各电阻上流过的是同一个电流。
- (2) 根据 KVL，各个电阻上电压降之和等于总

电压，即 $U = IR_1 + IR_2 + IR_3 = U_1 + U_2 + U_3$ 。由此可以看出，串联电阻可以起分压作用，各电阻分压的大小与其电阻值成正比。

- (3) 串联电路的总电阻等于各电阻之和，即总电阻为

$$R_{\text{总}} = R_1 + R_2 + R_3 + \dots \quad (1-14)$$

串联电路的总电阻通常也叫等效电阻。图 1-5 (b) 是图 1-5 (a) 是等效电路图。

【例 1-3】 在图 1-5 中，若 $U = 140V$ ， $I = 4A$ ， $R_1 = 10\Omega$ ， $R_2 = 15\Omega$ ，求 R_3 和 U_3 。

$$\text{解： } R_{\text{总}} = \frac{U}{I} = \frac{140}{4} = 35(\Omega)$$

$$R_3 = R_{\text{总}} - R_1 - R_2 = 35 - 10 - 15 = 10(\Omega)$$

$$U_3 = IR_3 = 4 \times 10 = 40(V)$$

或 $U_3 = U - U_1 - U_2 = 140 - 4 \times 10 - 4 \times 15 = 40 (V)$

2. 电阻并联

将几个电阻的头与头接在一起，尾与尾接在一起的方式称为电阻的并联，如图 1-6 (a) 所示。

并联电路有以下特点：

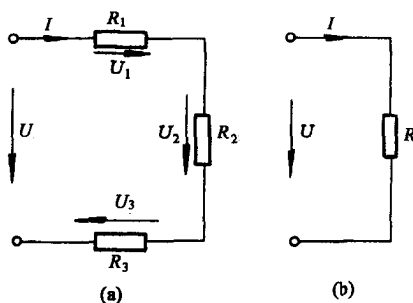


图 1-5 电阻的串联
(a) 原电路；(b) 等效电路

- (1) 各并联电阻两端间的电压相等。
 (2) 根据 KCL，并联电路中的总电流等于各电阻支路电流之和，即

$$I_{\text{总}} = I_1 + I_2 + I_3$$

从上式可看出，电压一定时，并联电阻可以使总电流增大；在总电流一定时，并联电阻可以起分流作用，分流的数值按各支路电阻值的大小成反比分配。

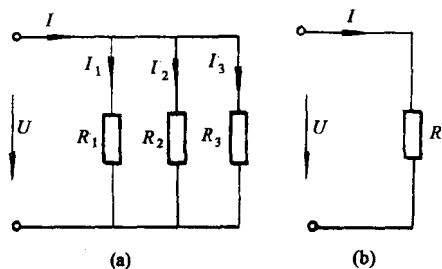


图 1-6 电阻的并联
 (a) 原电路；(b) 等效电路

(3) 并联电路等效电阻的倒数等于各支路电阻的倒数之和，即

$$\frac{1}{R_{\text{总}}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \dots \quad (1-15)$$

也可用电导表示为

$$G_{\text{总}} = G_1 + G_2 + G_3 + \dots \quad (1-16)$$

并联适用于恒定电压的供电方式，供电系统都是采用恒定电压供电的。负荷并联时，其中一个支路负荷接通或切断一般不会影响其他支路负荷的正常工作，因而负荷的并联形式得到了普遍的应用。

【例 1-4】 在图 1-6 中，若 $R_1 = 20\Omega$ ， $R_2 = 30\Omega$ ， $R_3 = 60\Omega$ ，求电路的总电阻 $R_{\text{总}}$ 。若 $U = 110$ ，求 I_1 、 I_2 、 I_3 及 I 。

解： $\frac{1}{R_{\text{总}}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} = \frac{1}{20} + \frac{1}{30} + \frac{1}{60} = \frac{1}{10}$

$$R_{\text{总}} = 10 (\Omega)$$

$$I = \frac{U}{R_{\text{总}}} = \frac{110}{10} = 11 (\text{A})$$

$$I_1 = \frac{U}{R_1} = \frac{110}{20} = 5.5 (\text{A})$$

$$I_2 = \frac{U}{R_2} = \frac{110}{30} = 3.67 (\text{A})$$

$$I_3 = \frac{U}{R_3} = \frac{110}{60} = 1.83 (\text{A})$$

3. 电阻混联

既有电阻串联，又有电阻并联的电路称为电阻的混联电路，如图 1-7 (a) 所示。

分析计算混联电路的方法如下：

- (1) 应用电阻的串联、并联逐步简化电路，求出电路的等效电阻。
- (2) 由电路的等效电阻和总电压，根据欧姆定律求电路的总电流。
- (3) 根据基尔霍夫定律、欧姆定律，以及分压、分流规律由总电流求各支路的电流和电压。

在分析和计算混联电路时，首先应将电路中的串、并联关系搞清楚。当电路图中这些关系不易辨认时，可以将电路图改画，使其直观、清楚。图 1-7 (b) 就是图 1-7 (a) 的改画图。

【例 1-5】 在图 1-8 中，若 $E = 120\text{V}$ ， $R_0 = 1\Omega$ ， $R_1 = 19\Omega$ ， $R_2 = 30\Omega$ ， $R_3 = 60\Omega$ ，求内阻 R_0 上的电压降 U_{R_0} 和流过 R_2 的电流 I_{R_2} 。

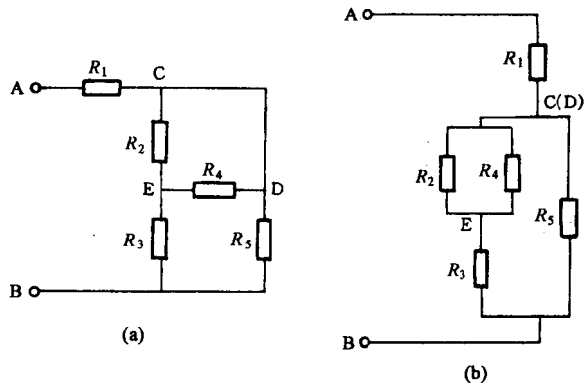


图 1-7 电阻的混联电路
(a) 混联电路; (b) 改画图

$$\text{解: } R_{2,3} = \frac{1}{\frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}} = \frac{1}{\frac{1}{30} + \frac{1}{60}} = 20(\Omega)$$

$$R_{\text{总}} = R_0 + R_1 + R_{2,3} = 1 + 19 + 20 = 40(\Omega)$$

$$I = \frac{E}{R_{\text{总}}} = \frac{120}{40} = 3(\text{A})$$

$$U_{R_0} = IR_0 = 3 \times 1 = 3(\text{V})$$

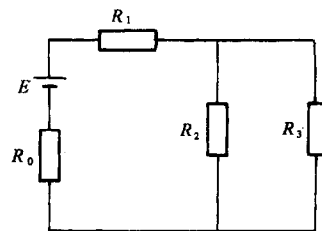


图 1-8 [例 1-5] 电路图

$$I_{R_2} = \frac{R_3}{R_2 + R_3} \cdot I = \frac{60}{30 + 60} \times 3 = 2(\text{A})$$

与电阻的串、并联相似，电源也可以经串联、并联后使用。电源串联时，等效电动势为各电源电动势的代数和，其等效内阻为各电源内阻之和，而在各电源上流过的电流相同。电源串联的效果是提高电路的总电动势，使用时应注意：

- (1) 电源正负极必须是首尾相连，防止接反而使电动势互相抵消。
- (2) 各电源内阻应尽量接近，以免工作时内阻高的电源上压降过大而引起过热。

电动势和内阻值相同的电源并联时，其等效总电动势仍为单个电动势值，等效总内阻按各电源内阻并联关系算得，而总电流为流过各电源的电流之和。显然，电源并联的效果是提高电路的总电流，使用时应注意：

- (1) 应将电源的所有正极和所有负极分别联在一起，不能接反。
- (2) 各电源电动势和内阻应尽量相等，以免造成各电动势之间的环流及电流分配不均。

六、电功、电功率及电流热效应

1. 电功

电源力或电场力在电路中移动正电荷所做的功称为电功，又称为电能，用 W 表示。其表达式为

$$W = IUt = I^2 Rt = \frac{U^2}{R} t \quad (1-17)$$

式中 I ——电路中的电流, A;

U ——电路两端的电压, V;

R ——电路的电阻, Ω ;

t ——通电时间, s。

电功及电能的单位是焦耳, 简称焦, 用 J 表示。它的实用单位是千瓦·时, 用 $kW \cdot h$ 表示。 $1kW \cdot h$ 俗称一度电。

$$1kW \cdot h = 3.6 \times 10^6 J = 3.6MJ \quad (1-18)$$

2. 电功率

电功率简称功率, 即单位时间内电源力 (或电场力) 所做的功, 是衡量电源力 (或电场力) 做功的能力, 以 P 表示, 其表达式为

$$P = \frac{W}{t} = IU = I^2 R = \frac{U^2}{R} \quad (1-19)$$

式中 I ——电路中的电流, A;

U ——电阻端电压, V;

R ——电阻, Ω

电功率的单位是瓦特, 简称瓦, 用 W 表示, 常用单位还有 kW , MW , mW 其换算关系为

$$1kW = 10^{-3}MW = 10^3W = 10^6mW$$

某单位或地区所有已安装电器的铭牌功率之和称为装机容量, 而某时刻实际在使用电器的功率之和称为负荷。

3. 电流热效应

电流通过电阻时, 由于自由电子的碰撞, 电能不断地转换成热能, 因而使电阻发热。这种电流通过电阻会产生热的现象, 称为电流的热效应。

电流热效应产生的热量, 用 Q 表示, 其表达式为

$$Q = I^2 R t = I U t = \frac{U^2}{R} t \quad (1-20)$$

式中, I , U , R , t 的意义及单位如前所述; 热量 Q 的单位为焦耳, 简称焦, 用 J 表示。

4. 电器设备额定值和工作状态

电流的热效应是有实用价值的, 电炉、电烙铁等电热设备、工具就是利用电流的热效应为生产、生活服务的。但在非电热设备中, 电流产生的热量会引起设备温度升高, 而过高的温度又会加速绝缘材料的老化以至损坏, 这是不利的效果。

为保证电器设备的安全工作、一定的使用寿命及良好的经济指标, 根据使用的绝缘材料 (等级) 不同, 规定了设备的最高工作温度。而工作温度除取决于环境温度、连续工作时间外, 还取决于电流、电压或功率。使设备安全工作的最大允许电流、电压或功率, 分别称为额定电流、额定电压或额定功率, 用 I_N , U_N 或 P_N 表示。它们都标在设备的铭牌上, 也可从产品目录中查得。

用电设备实际所消耗的功率与加在用电设备上的电压的平方成正比, 见公式 (1-19)。如额定值为 220V, 100W 的白炽灯, 当接于 220V 电压时, 消耗的实际功率为 100W; 而接于 190V 或 240V 电压时, 消耗的实际功率分别约为 75W 或 120W。

用电设备在额定功率下的工作状态称为额定工作状态（满负荷）。低于额定功率的工作状态称为轻负荷（欠负荷），用电设备在此状态下工作时，一般运行效率会降低。高于额定功率的工作状态叫做过负荷（超负荷），此时用电设备将因温度过高而导致寿命缩短，甚至损坏。用电设备应尽量工作在满负荷或接近满负荷状态，对过负荷运行，应采取必要的限制措施。

七、电路中各点电位的计算

电路的工作状态，通过电路中各点的电位可以反映出来。因此在电工和电子技术中，经常要用到电位的计算。

电路中往往有很多元件或电源相互连接在一起。一个电气元件的工作状态往往是由某两点间的电压所决定的。但分析电路中的电压比较繁琐，改用电位进行分析就比较清楚。

计算电位的基本步骤是：

(1) 选定零电位点。零电位点就是前述的参考点，即参考点的电位为零。电路中每一点的电位高低，都是与零电位相比较而言的。电路图中有时已指定了零电位，以符号“⊥”表示。未指定时，可任意指定，但应以计算方便为好。

(2) 选择路径。要计算某点的电位，可从这点出发，通过一定的路径绕到零电位点。该点的电位就等于此路径上全部电压和电动势代数和。

(3) 确定正负。绕行路径上电压和电动势的正负可根据下列原则确定：电阻上的电压正负根据电阻上电流方向来确定。因为电流是从高电位流向低电位的。故电流进入电阻的一端是正极，而流出电阻的一端是负极。电源电动势的正负一般是给出的，即正极电位高于负极电位。

例图 1-1 所示电路，参考点设在 b 点，求 a 点电位。

先设定电流 I 方向，电路中三个电动势大小均不知，但可看出

E_1, E_2, E_3 是串联，假设对电流起主导作用，则电流方向如图示。

求 a 点电位，从 a 点出发到零电位 b 点共有两条路径。

路径之一为： $a \rightarrow R_2 \rightarrow E_3 \rightarrow b$

a 点电位 $\varphi_a = IR_2 - E_3$

路径之二为： $a \rightarrow E_2 \rightarrow R_1 \rightarrow E_1 \rightarrow b$

a 点电位 $\varphi_a' = -E_2 - IR_1 + E_1$

设 $E_1 = 18V$ ； $R_1 = 2k\Omega$ ； $E_2 = 6V$ ， $R_2 = 4k\Omega$ ； $E_3 = 18V$ 。计算 a 点电位，验算 φ_a, φ_a' 是否相等。

$$\text{解： } I = \frac{E_1 - E_2 + E_3}{R_1 + R_2} = \frac{18 - 6 + 12}{2000 + 4000} = 0.004(A)$$

$$\varphi_a = IR_2 - E_3 = 0.004 \times 4000 - 12 = 4(V)$$

$$\varphi_a' = -E_2 - IR_1 + E_1 = -6 - 0.004 \times 2000 + 18 = 4(V)$$

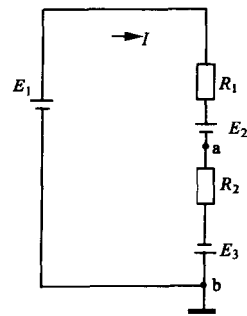
即

$$\varphi_a = \varphi_a' = 4(V)$$

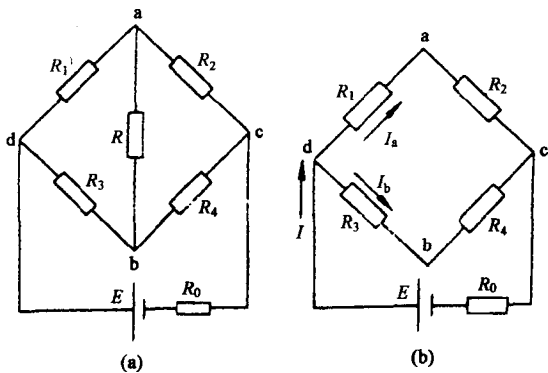
八、电桥的平衡条件

1. 电桥电路

在实践中，经常会遇到例图 1-2 (a) 所示的电桥电路。其中 R_1, R_2, R_3, R_4 是电桥的四个桥臂。电桥的一条对角线 ab 间接电阻 R ；电桥的另一条对角线接电源。整个电路就



例图 1-1 电路电位计算



例图 1-2 直流电桥电路

是由四个桥臂和两条对角线组成的。若所接电源为直流电源，则这种电桥电路称为直流电桥电路。

2. 平衡条件

电桥电路的主要特点就是当四个桥臂电阻的值满足一定关系时，会使接在对角线 ab 间的电阻 R 中没有电流通过。这种情况称为电桥的平衡状态。显然，要使 R 中无电流，就必须满足 ab 两点电位相同的条件。在电桥平衡状态下，把 R 从电路中取走，也不会影响电路的其他部分，即成为例图 1-2

(b) 所示的电路。设这时总电流是 I ，流过 R_1 及 R_2 的电流为 I_a ；流过 R_3 、 R_4 的电流为 I_b ，并指定 d 点为零电位，那么有

$$\varphi_a = -R_1 I_a = R_2 I_a + R_0 I - E$$

$$\varphi_b = -R_3 I_b = R_4 I_b + R_0 I - E$$

$$R_1 I_a = R_3 I_b$$

$$R_2 I_a = R_4 I_b$$

将以上两个式子相除后可得

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4}$$

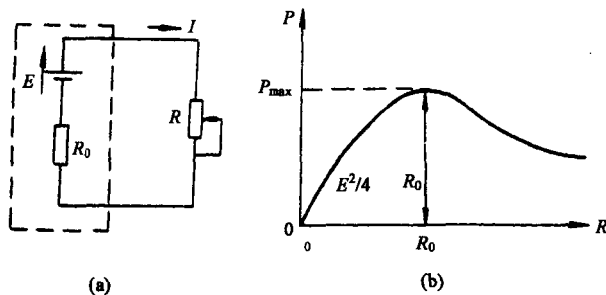
即

$$R_1 \cdot R_4 = R_2 \cdot R_3$$

不难看出， R_1 与 R_4 在电路图上是两上相对的桥臂， R_2 与 R_3 则是另外两个相对的桥臂。因此，电桥电路的平衡条件就是：对臂电阻的乘积相等。

在电工作业中，用来测量电气设备导体电阻的“直流电桥”以及测量电容、电感的“交流电桥”，有些测量接地电阻的仪器，都是根据以上电桥平衡原理设计制造的。

九、负载获得最大功率的条件



例图 1-3 负载获得最大功率的条件

任何电路都无例外地进行着由电源到负载的功率传输。由于电源总有内阻。因而电源提供的总功率是由内阻上的功率和负载上获得的功率这两部分组成。若内阻上的功率增大，则

负载功率就减小。例图 1-3 (a) 是一个接有负载 R 的闭合电路。图中的 R 可以是串联、并联、混联电路及其他电路的等效电阻。电源的内阻 R_0 一般是固定的，因而负载获得的功率和负载电阻 R 的大小有密切关系。在图示电路中，若改变 R 的大小，就会使 R 上获得的功率有所不同。在电子电路中总是希望负载能获得最大功率。下面分析负载获得最大功率的条件。

负载获得的功率应为

$$\begin{aligned} P &= I^2 \cdot R = \left(\frac{E}{R + R_0} \right)^2 \cdot R = \frac{E^2 R}{(R + R_0)^2} \\ &= \frac{E^2 \cdot R}{R^2 + 2RR_0 + R_0^2} = \frac{E^2 R}{R^2 - 2RR_0 + 2RR_0 + 2RR_0 + R_0^2} \\ &= \frac{E^2 R}{(R - R_0)^2 + 4RR_0} = \frac{E^2}{(R - R_0)^2 / R + 4R_0} \end{aligned}$$

显然，由于式中 E 和 R_0 都可近似看成常量，则只有在分母为最小值时，负载获得的功率 P 才能是最大值，也就是只有 $R = R_0$ 时， P 才能达到最大值。所以，负载获得最大功率的条件是：负载电阻等于电源内阻。由于负载获得的最大功率就是电源输出的最大功率，因而这一条件也是电源输出最大功率的条件。负载功率（或输出功率）随电阻 R 变化的曲线如例图 1-3 (b) 所示。

根据上述公式推导，在 $R = R_0$ 时负载获得的最大功率为

$$P_{\max} = \frac{E^2}{4R_0}$$

当负载获得最大功率时，由于 $R = R_0$ ，因而内阻上消耗的功率和负载消耗的功率相等，这时效率只有 50%，显然是不高的。在电子技术中，主要矛盾在于使负载获得最大功率，效率已属次之，因而电路尽可能工作在 $R = R_0$ 附近，这种工作状态一般称为“匹配”。在电力系统中相反，主要矛盾是输电效率，希望尽可能减小电源内部损耗以节省电力，故必须使 $I^2 R_0 \ll I^2 \cdot R$ ，即 $R_0 \ll R$ 。

第二节 电磁和电磁感应

一、磁铁和磁场

1. 磁体基本性质

能够吸引铁屑或铁块的物体称为磁体，俗称磁铁。

磁体可分为天然磁体和人造磁体两种，而人造磁体又可分为永久磁铁和电磁铁两种。任何磁体的磁现象都起源于电流。永久磁铁的磁性是分了电流产生的，在正常情况下能长期保留磁性。电磁铁是在磁铁上套有电流线圈，通电流时产生磁性，断电流时磁性消失。

磁体有如下性质：

- (1) 吸铁性。磁体能吸引钢、铁、镍、钴、铬等物质，但不能吸引铜、铝、铅等物质。
- (2) 具有南北两个磁极，即 N 极（北极）和 S 极（南极）。磁铁端部磁性最强，越近中部磁性越弱。
- (3) 不可分割性。N、S 极必定同时存在，将一根条形磁铁分割成任意小段，则每段都

会自成一具有南北两极的小磁铁。没有单独存在的单个磁极。

(4) 磁极间的相互作用。磁极间有相互作用力，其规律是同性磁极相斥，异性磁极相吸。

(5) 磁化。使原来没有磁性的物体得到磁性称为磁化。铁磁性材料放在磁体近旁能被磁化。被磁化的物体移离磁体以后，还能保留一些磁性，称为剩磁。

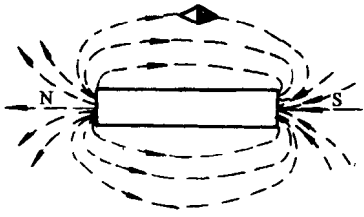


图 1-9 条形磁铁的磁场

2 磁场和磁力线

磁体之间以及磁体与铁磁材料之间的相互作用，都是力的作用，这种力称为磁力。磁体周围有磁力作用的空间存在磁场。磁场也是能量存在的一种形式，是看不见的一种物质，有强弱（大小）和方向，可以用磁力线形象地来描绘。图 1-9 为用磁力线描绘的条形磁铁的磁场。绘制磁力线的原则为：

(1) 磁力线是由磁铁的 N 极出发，经外部空间进入磁铁的 S 极；在磁铁内部由 S 极回到 N 极。磁力线是连续的闭合曲线（图 1-9 中磁铁内部的磁力线未绘出）

(2) 磁力线上任一点的切线方向都与放在该点的磁针所指的方向一致。磁力线不能相交。

(3) 磁力线的疏密程度表示该点磁场的强弱。强弱相同、方向一致的磁场称为均匀磁场。

在进行磁场的分析和计算时，会经常用到磁通和磁感应强度这两个物理量。

1) 磁通，是表示穿过某一截面 S 的磁力线数量的物理量，用 Φ 表示，单位是韦伯，简称韦，用 Wb 表示。

2) 磁感应强度，也称为磁通密度，简称磁密，是指穿过垂直于磁力线方向单位面积上磁力线的数量，用 B 表示，单位是特斯拉，简称特，用 T 表示。

在均匀磁场中磁感应强度和磁通之间的关系可用下式表示

$$B = \frac{\Phi}{S} \quad (1-21)$$

式中 Φ ——磁通， Wb ；

S ——垂直于磁力线方向的面积， m^2

3. 载流导体产生磁场

实验表明，载流导线周围存在着磁场，而且电流越大，磁场越强。电流能产生磁场，说明电流有磁效应。

通电流的导线周围磁场方向可以用右手螺旋定则（也叫安培定则）判定。如图 1-10 (a) 所示，对于单根通电导线，右手螺旋定则可以叙述为：用右手握导线，大姆指伸直，指向电流的方向，其余四指的方向就是磁力线的方向。图 1-10 (b) 是用导线断面图表示的磁场 其中 \otimes 号表示电流方向进入纸面， \odot 号表示电流方向流出纸面。对于通电的螺旋管线圈，右手螺旋定则可叙述为：右手握螺旋管线圈，让四指和线圈中电流方向一致，伸直的大姆指所指的方向就是螺旋管内部磁力线的方向，如图 1-11 所示。显然，如果事先知道磁力线的方向，也可用右手螺旋定则判定出线圈电流的方向。

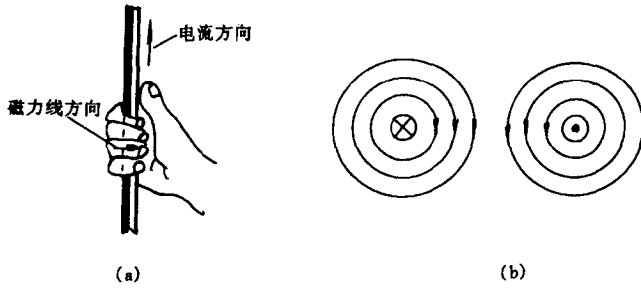


图 1-10 单根通电导线周围的磁场
(a) 右手螺旋定则示意图；(b) 导线断面图

载流螺旋管的磁场强度除与电流的大小有关外，还与线圈的匝数有关。线圈电流与线圈匝数的乘积 NI 称为磁动势，简称磁势，单位是 A 习惯上也称为 AN。

磁力线通过的闭合路径叫磁路。作用于磁路单位长度的安匝数称为磁场强度（也称为磁化力），以 H 表示，单位是 A/m，习惯上也用 AN/m 表示。

磁感应强度 B 和磁场强度 H 之比，称为材料的导磁系数，用 μ 表示，单位为 H/m。空气的导磁系数最低，硅钢片和坡莫合金的导磁系数分别为空气的 8000 ~ 10000 倍及 20000 ~ 200000 倍。因而硅钢片和坡莫合金在制造变压器、继电器等电气设备时得到广泛应用。

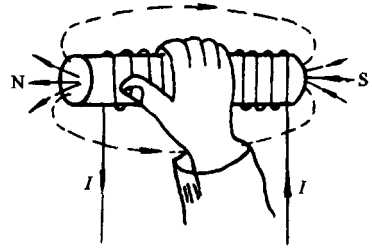


图 1-11 通电螺旋管线圈磁场的判别

4. 铁磁物质磁化

在通电线圈中插入铁芯后，磁场显著增强，这是因为铁磁物质被磁化了的缘故。磁化的过程可以用磁化曲线表示。由于磁性物质的导磁系数不是常数，因而磁化曲线也不是直线。如图 1-12 (a) 所示，在有铁芯的线圈中通入电流后，随着电流的加大、磁场强度的增强，磁感应强度经过近似线性区（ab 段）、轻饱和区（bc 段），直至饱和区（cd 段）以后若再增

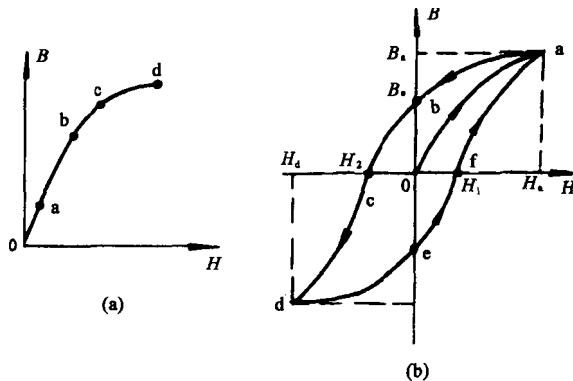


图 1-12 铁磁物质的磁化曲线
(a) 起始磁化曲线；(b) 磁滞回线

强磁场强度，磁感应强度增加已很困难。

当铁芯达到磁饱和以后，减少磁化电流直至加上反向电流，磁化曲线将沿着如图 1-12 (b) 所示的 $abcd$ 曲线下降，直到 d 所在的反向饱和点。若重复增加正向电流，磁感应强度又沿着 $defa$ 曲线上升。当铁芯线圈中通上大小和方向不断变化的交变电流，经过多次反复磁化以后，就会得到如图 1-12 (b) 所示稳定的、对称于原点的闭合曲线。在图 1-12 (b) 中 $abcdefa$ 曲线上，当磁场强度 H 减少至零时的磁感应强度 B ，称为剩磁。这种磁感应强度 B 的变化落后于磁场强度 H 变化的现象，称为磁滞现象；同样，去磁至 $B=0$ 时所需的反向磁场强度 H_2 称为矫顽磁力。这条闭合曲线称为磁滞回线。

当线圈中通入大小、方向都变化的交变电流时，由于磁滞的原因，铁芯在反复磁化中要消耗电能。这种功率损耗称为磁滞损耗。

二、电磁力

1. 磁场对载流导体的作用力

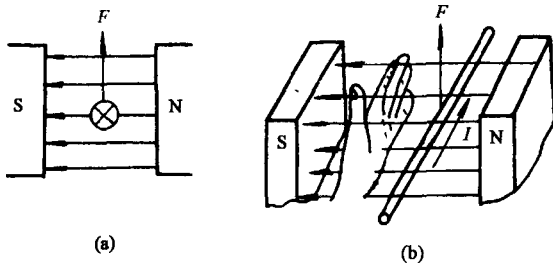


图 1-13 左手定则

(a) 通电导体受的电磁力；(b) 左手定则示意图

磁场对载流导线会产生作用力，这是由于磁场作用于运动着的自由电荷的力传递给导体的缘故。这个作用力称为电磁力（安培力），用 F 表示，其表达式为

$$F = BIL\sin\alpha \quad (\text{N}) \quad (1-22)$$

式中 B ——磁感应强度，T

I ——载流导体中的电流，A；

L ——导线的有效长度，m；

α ——电流方向与磁场方向间的夹角，($^\circ$) 或 rad。

当 α 为 90° ，即电流方向与磁场方向垂直时，电磁力为 $F = BIL$ ，其条件是磁场、电磁力和电流三者之间方向遵循左手定则。该定则可以叙述为：平伸左手，让大拇指和其余四指垂直，磁力线垂直穿入掌心，四指指向电流方向，则大拇指的指向就是电磁力的方向，如图 1-13 所示。

磁场对通电导体产生作用力，是各种电动机和磁电系测量仪表工作原理的依据，因此左手定则又称为电动机定则。在另一些场合，人们则要考虑短路电流所产生的巨大电磁力对电气设备中载流导体可能造成的破坏作用，以便设法避免。

2. 平行载流导线间的相互作用力

两根相邻的载流导线，由于彼此都处于对方所产生的磁场中，根据上述原理，必然相互之间有电磁力。该力的方向如图 1-14 所示，即当通以同方向电流时，它们相互吸引；通以反方向电流时，则相互排斥。不论导体中所通过的电流是直流还是交流，两载流导体都会发生相吸或相斥现象。

三、电磁感应

1. 电磁感应现象

导体中通过电流可以产生磁场；在一定的条件下，磁场中的导体也会产生感应电动势从而产生电流。

实验证明，当导体切割磁力线运动或者穿过线圈的磁力线发生变化时，连接于导体或线圈的检流计就会发生偏转，说明在检流计中有电流流过。这个电流是由导体或线圈两端产生的感应电动势作用产生的，这种现象称为电磁感应现象，所产生的电流称为感应电流。

2. 直线导体中感应电动势的大小和方向

当一根直线导体在均匀磁场中运动时，如图 1-15 (a) 所示，在导体中产生的感应电动势 e 可用公式表示为

$$e = BLv \sin \alpha \quad (\text{V}) \quad (1-23)$$

式中 B ——均匀磁场的磁感应强度，T；
 L ——导体在磁场中的有效长度，m；
 v ——导体和磁场相对运动速度，m/s
 α ——导体运动方向与磁力线的夹角，($^\circ$) 或 rad。

感应电动势的方向可用右手定则判断。该定则叙述为：右手平伸，大拇指和其他四指垂直，让磁力线垂直穿过掌心，且大拇指的指向和导线运动方向一致，则其余四指所指的方向就是感应电动势的方向，如图 1-15 (b) 所示。

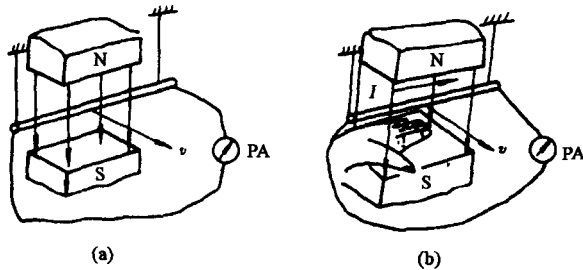


图 1-15 直导体中的感应电动势
 (a) 感应电动势；(b) 右手定则

导体在磁场中切割磁力线运动时，在导体中将产生感应电动势，这是发电机工作原理的依据，因此，右手定则又称为发电机定则。

3. 线圈中感应电动势的大小和方向。

证验证明，与线圈相链的磁通发生变化时，将在线圈中产生感应电动势。感应电动势的大小与线圈的匝数 N 及与穿过线圈磁通的变化率成正比。这个定律称为法拉第电磁感应定律，可用式表示为

$$|e| = \left| N \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} \right|$$

式是： $\Delta \Phi$ 为在时间间隔 Δt 内磁通 Φ 的变化量； N 为线圈匝数。

线圈中感应电动势的方向可用楞次定律来判断。该定律可叙述为：感应电动势的方向总是企图产生感应电流，其磁场可对抗磁通的变化。下面以图 1-16 (a) 为例说明判断感应

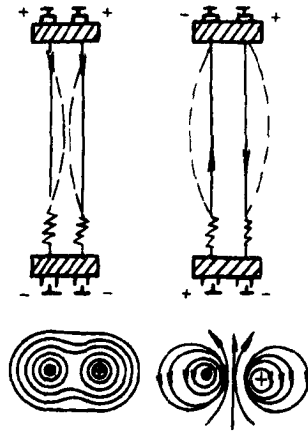


图 1-14 平行载流导线间的相互作用