

第17篇 电 工 技 术

主 编
责任编辑

王鸿明（清华大学）
曲彩云

1 电工技术基础

1.1 电和磁的基本量

1.1.1 电荷与电量守恒

电荷是物质固有属性之一。自然界不存在脱离物质而单独存在的电荷。电荷的数量称为电量，用符号 Q （或 q ）表示，单位是库伦（C）。电荷有两种：正电荷（“+”电荷）和负电荷（“-”电荷）。

电子是自然界存在的最小带电体，物体所带电量都是这个最小电量的整数倍，一个电子电量等于 $-1.602 \times 10^{-19} \text{C}$ 。因此负电荷总是和电子相联系，正电荷则是与失去电子的原子、原子团或分子相联系的。如果某物体带有正的或负的电荷，那就是该物体失去或得到了一些电子的结果。

电荷之间存在着相互作用，同性电荷相互排斥，异性电荷相互吸引。

电荷既不能被创造，也不能被消灭，只能被转移（分离或中和）。电荷在转移前后其总电量不变。这个规律称为电量守恒定律。

1.1.2 电场和电场强度

a. 电场 电荷或变化磁场的周围存在着一种特殊形态的物质，称为电场。电场具有能量。电量为 Q 的正电荷在电场内某一点所受到的作用力称为电场力 F 。

b. 电场强度 电场中某点的电场强度 E ，为单位正电荷在该点所受的力。即：

$$E = \frac{F}{Q} \quad \text{V/m (或 N/C)}$$

式中 F ——力 N

Q ——电量 C

电场强度是一个矢量，其方向就是正电荷在该点所受力的方向。

1.1.3 电位、电压和电动势

a. 电位 在电场中取任意点 P 作为参考点, 单位正电荷在电场力作用下从场中的 a 点移到参考点 P 时、电场力所作的功称为 a 点的电位 V_a , 即:

$$V_a = \int_a^P E dl \quad V$$

在理论研究中常取无穷远点作为电位的参考点, 在电力线路中常取大地作为电位参考点, 在电子线路中常取线路内的公共点作为电位的参考点。通常参考点的电位规定为零。

b. 电压 在电场中, 单位正电荷由 a 点移到 b 点时, 电场力所做的功称为 a 点到 b 点的电压 U_{ab} 。电压又称为电位差, a、b 间电压为:

$$U_{ab} = \int_a^b E dl = \int_a^P E dl + \int_P^b E dl = U_a - U_b$$

电压的方向规定为从高电位到低电位。

c. 电动势 非电场的外力把单位正电荷从 a 点移到 b 点所作的功, 称为 a、b 两点间的电动势 E 。电动势的方向规定为非电场的外力推动正电荷移动的方向, 即从低电位到高电位。

1.1.4 电流和电流密度

a. 电流 单位时间内通过某导体截面的电量称为电流强度, 简称电流, 用 i 表示。

$$i = \frac{dq}{dt} \quad A$$

对于恒定电流:

$$I = \frac{Q}{t} \quad A$$

式中 Q ——电量 C

t ——时间 s

习惯上把正电荷移动的方向规定为电流的方向。因此在金属中电流的方向与自由电子流动的方向相反; 电解液中电流的方向与正离子流动的方向一致。

b. 电流密度 在垂直于电流方向的单位面积中所通过的电流, 称为电流密度 J 。若与电流方向垂直的面积 S 中, 电流 I 是均匀分布的, 则:

$$J = \frac{I}{S} \quad \text{A/m}^2 (\text{或 A/mm}^2)$$

1.1.5 电功率与电能

a. 电功率 单位时间内电场力所作的功, 称为电功率 (简称功率) P 。功率的单位是瓦特, 简称瓦 (W)。

直流负载时:
$$P = \frac{W}{t} = UI = I^2 R = \frac{U^2}{R} \quad \text{W}$$

式中 W ——电能 J

t ——时间 s

U ——电压 V

I ——电流 A

R ——电阻 Ω

交流负载 (单相) 时: $P = UI \cos \varphi \quad \text{W}$

式中 U ——交流电压有效值 V

I ——交流电流有效值 A

$\cos \varphi$ ——功率因数, 它是电压 u 、电流 i 初相角差的余弦

三相交流负载:
$$P = \sqrt{3} U_l I_l \cos \varphi \quad \text{W}$$

式中 U_l ——三相负载的线电压 V

I_l ——三相负载的线电流 A

$\cos \varphi$ ——三相负载中一相负载的功率因数

b. 电能 $W = Pt \quad J$

1.1.6 磁场、磁感应强度、磁通量和磁链

a. 磁场 运动电荷、载流导体或变化电场的周围存在着一种特殊形态的物质, 称为磁场。

b. 磁感应强度 磁感应强度 B 是表征磁场中某给定点性质的一个物理量, 其数值表示该点磁场的强弱, 其方向就是该点的磁场方向。 B 也就是磁通密度。单位是特斯拉 (T), 韦伯/米² (Wb/m²) 或高斯 (G) (非法定计量单位)。

若磁场内各点的磁感应强度大小相同、方向一致,称为均匀磁场。

c. 磁通量 磁通量(简称磁通) Φ 是磁感应强度矢量的通量。在均匀磁场中,通过垂直于磁场方向,面积为 S 的磁通为:

$$\Phi = BS \quad \text{Wb}$$

式中 B ——磁感应强度 Wb/m^2

S ——面积 m^2

d. 磁链 与线圈相环链的磁通和线圈匝数的乘积,称为磁链 ψ , 当 N 匝线圈都环链相同的磁通 Φ 时,磁链为:

$$\psi = N\Phi \quad \text{Wb}$$

1.1.7 磁场强度和磁导率

a. 磁场强度 磁场强度 H 是描述磁场的另一个物理量,在各向同性的导磁物质中,磁场强度和磁感应强度的关系是:

$$H = \frac{B}{\mu} \quad \text{A/m}$$

式中 B ——磁感应强度 T

μ ——磁导率 H/m

b. 磁导率 磁导率 μ 是表征物质导磁性能的一个物理量,它的单位是亨利/米(H/m)。真空磁导率 $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{H/m}$ 。某一物质的磁导率 μ 与真空磁导率 μ_0 之比,称为该物质的相对磁导率 μ_r , 即:

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0}$$

μ_r 是一个无量纲的纯数。

非磁性材料(如空气、木材、玻璃、铜、银、铝等)的磁导率与真空磁导率近似,非磁性材料的 $\mu_r \approx 1$ 。磁性材料(铁、钴、镍及其合金)的磁导率 μ 不是常数,是与磁场强度 H 或磁感应强度 B 的数值有关的变量,并且远大于 μ_0 。

1.1.8 磁动势、磁压、磁阻和磁导

a. 磁动势 产生磁通的磁化力称为磁动势 F , 即:

$$F = NI \quad \text{A}$$

式中 N ——励磁线圈的匝数

I —— 流过该线圈的电流 A

b. 磁位差 磁路中任意两点 a、b 间的磁位差 U_m 为:

$$U_m = \int_a^b H dl \quad A$$

由于磁路往往分成若干 H 值不同的段, 若每一段内 H 值相同, 上式可写成为:

$$U_m = \Sigma Hl \quad A$$

式中 H —— 各段的磁场强度 A/m

l —— 沿磁场方向各段磁路的长度 m

c. 磁阻 磁路的磁阻 R_m 为:

$$R_m = \frac{l}{\mu S} \quad 1/H$$

式中 μ —— 物质的磁导率 H/m

S —— 磁路的截面积 m^2

l —— 磁路的长度 m

如果磁路含有铁磁物质时, 由于 μ 不是常量, 故这时磁阻也不是常量。

d. 磁导 磁路的磁导 A 为磁阻的倒数:

$$A = \frac{\mu S}{l} = \frac{1}{R_m} \quad H$$

1.2 电路参数

1.2.1 电阻和电导

a. 电阻 电荷在导体内移动时, 导体阻碍电荷移动的能力称为电阻。电流通过电阻时将电能转变为热能, 它是不可逆的耗能元件。

电动机、变压器等工作时的铁损耗一般都可以用电阻这个参数表示, 电阻是表征耗能能力的参数。

电阻又分为线性电阻和非线性电阻两类, 线性电阻满足欧姆定律, 其 $V-A$ 特性是一条通过坐标原点的直线, 如图 17-1。其电阻值

为:

$$R = \frac{U}{I} = \frac{1}{\operatorname{tg} \alpha} \quad \Omega$$

非线性电阻不能满足欧姆定律, 其 $V-A$ 特性是一条曲线, 如图 17-2。在不同电压作用下非线性电阻元件的阻值是不同的。

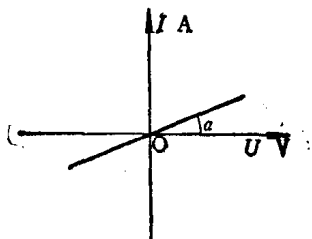


图 17-1 线性电阻的 $V-A$ 特性

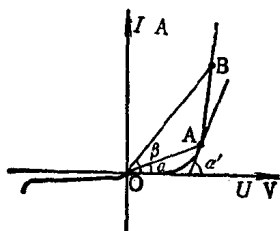


图 17-2 非线性电阻的 $V-A$ 特性

例如: $U = U_A$ 时 $R_A = \frac{U_A}{I_A} = \frac{1}{\operatorname{tg} \alpha} \quad \Omega$

$U = U_B$ 时 $R_B = \frac{U_B}{I_B} = \frac{1}{\operatorname{tg} \beta} \quad \Omega$

非线性电阻元件的电阻又分动态电阻 r 和静态电阻 R 。静态电阻 R 是工作点电压、电流的比值。如图 17-2 中工作点 A 处的静态电阻 $R_A = \frac{U_A}{I_A}$ 。

动态电阻 r 是工作点处增量电压 ΔU 与增量电流 ΔI 的比值。图 17-2 中 A 点处的动态电阻:

$$r_A = \frac{\Delta U_A}{\Delta I_A} = \frac{1}{\operatorname{tg} \alpha'} \quad \Omega$$

非线性电阻元件的动态电阻和静态电阻值均是静态(直流)电压、电流的函数。

具有均匀截面 S 、长度为 l 、电阻率为 ρ 的导体其电阻值为:

$$R = \rho \frac{l}{S} \quad \Omega$$

b. 电阻温度系数 电阻与温度有关。在一般工作温度范围内, 导体电阻与温度的关系可以认为是线性的。用下式表示:

$$R_2 = R_1 + R_1 \alpha (t_2 - t_1) \quad \Omega$$

式中 R_1 ——温度为 t_1 时导体的电阻 Ω

R_2 ——温度为 t_2 时导体的电阻 Ω

α ——以温度 t_1 为基准时导体的电阻温度系数 $1/^\circ\text{C}$

所有金属的电阻都随温度增加而增大，即 α 值是正的。电解液、碳和半导体的电阻却随温度的增加而减小，它们的 α 值是负的。表 17-1 列出了部分金属材料和石墨等的 ρ 与 α 数值。

表 17-1 金属材料和石墨的电阻系数和温度系数

材 料	银	铜	铝	铂	铁	锰 铜
20°C 时电阻系数 $\rho \quad \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$	0.0165	0.0172	0.0283	0.1	0.1	0.20~0.43
0~100°C 电阻温度系数 $\alpha \quad 1/^\circ\text{C}$	0.0038	0.00426	0.00439	0.0039	0.005	2.0×10^{-5}
材 料	康 铜	镍铬铁	铝铬铁	石 墨	碳	
20°C 时电阻系数 $\rho \quad \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$	0.4~0.51	1.0~1.2	1.3~1.4	8~13	35	
0~100°C 电阻温度系数 $\alpha \quad 1/^\circ\text{C}$	4.5×10^{-5}	15×10^{-5}	5×10^{-5}	-0.0005	-0.0005	

c. 电导与电导率

电导 衡量导体传导电流的能力的物理量称为电导 G ，它是电阻的倒数，电导的单位是西门子 (S)。

$$G = \frac{1}{R} \quad \text{S}$$

电导率 电导率 γ 是电阻率 ρ 的倒数，即：

$$\gamma = \frac{1}{\rho} \quad \text{s/m}$$

d. 导体、绝缘体、半导体 根据电阻率的大小，可以将物质分为三类。在常温下：

导体 电阻率 ρ 在 10^{-7} 以下 (金属及酸、碱、盐的水溶液都是导

体)。

绝缘体 电阻率 ρ 在 $10^7 \Omega \cdot \text{m}$ 以上。

半导体 电阻率 ρ 在 $10^{-7} \sim 10^8 \Omega \cdot \text{m}$ 之间。

1.2.2 电感

在电路中电感器将电能转变为磁场能,它是储能元件。电感是表征电感器储能能力的参数。电感包括自感和互感,有时自感也称为电感。电感和自感均用符号 L 表示,单位为亨(H)。

a. 自感 载流线圈的磁链 ψ_m 与所通过的电流 i 的比值,称为自感系数 L ,简称自感。

$$L = \frac{\psi_m}{i} \quad \text{H}$$

当线圈通有电流 I 时,其中的磁场储有能量:

$$W = \frac{1}{2} L I^2 \quad \text{J}$$

自感表明一个线圈产生磁链,即储存磁能的能力。它的大小与线圈匝数平方成正比,与线圈的几何尺寸、形状及物质的磁导率有关。

对于空心线圈, ψ_m 与 i 成正比, L 是常量,称为线性参数(线性电感)。而对于铁芯线圈, ψ_m 与 i 不成正比, L 是随 i 而变的一个变量,称为非线性电感。

b. 互感 互感是表征两电感元件间磁联系的一个参数,其定义为:

$$M_{21} = \frac{\psi_{21}}{i_1} \quad \text{H}$$

式中 ψ_{21} ——是电流 i_1 产生的与线圈 2 交链的磁链,如图 17-3 所示。

同理有:

$$M_{12} = \frac{\psi_{12}}{i_2} \quad \text{H}$$

而且 $M_{12} = M_{21} = M$

M 称为互感系数,简称互感。互感有正、负

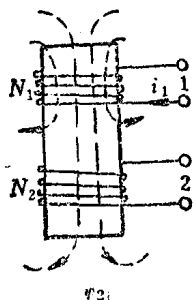


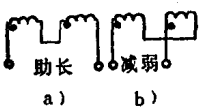
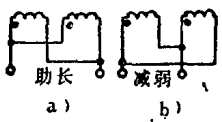
图 17-3 互感

值。当两个电流从同名端流入时为正，从非同名端流入时为负。同名端在接线圈中用“·”标记。两个线圈的电流分别由同名端流入（或流出）时，它们所产生的磁通是相互助长的；两个线圈电流从非同名端流入，则产生的磁通是相互减弱的。如表17-2图 a 中的接法 M 为正。表17-2图 b 中的接法 M 为负。

互感系数与线圈匝数 N_1 和 N_2 的乘积成正比，并与两个线圈的形状、大小、相互位置及周围介质的磁导率有关。

c. 线圈串联或并联时的电感 线圈串联或并联时，既有自感，又有互感，其接线圈及总电感计算公式见表17-2。

表17-2 线圈的串联与并联

联 接	接 线 图	总 电 感
串 联	 助长 a) 减弱 b)	$L = L_1 + L_2 + 2M$ a) $M > 0$ b) $M < 0$
并 联	 助长 a) 减弱 b)	$L = \frac{L_1 L_2 - M^2}{L_1 + L_2 - 2M}$ a) $M > 0$ b) $M < 0$

1.2.3 电容

a. 电容 电容器将电能转变为电场能，它是储能元件。电容是表征电容器储能能力的参数。如果在电容器的两极板上施加电压 U ，则电容被充电，在两极板上分别出现数量相等而符号相反的电荷。电荷 q 与电压 u 的比值，称为电容器的电容，即：

$$C = \frac{q}{u} \quad \text{F}$$

对于恒定电压：

$$C = \frac{Q}{U} \quad \text{F}$$

电容器充电后，其电场储能为：

$$W = \frac{1}{2}CU^2 \quad \text{J}$$

电容器的电容量的大小与导体的形状、大小、相互位置有关，还与两导体间绝缘材料的电容率 ϵ （又称介电常数）有关。

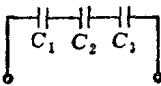
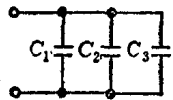
电容率 ϵ 是表示两导体间绝缘材料电性能的物理量。真空电容率为： $\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} \text{ F/m}$ 。某一绝缘材料的电容率 ϵ 与真空电容率 ϵ_0 之比称为该材料的相对电容率 ϵ_r 。表17-3列出几种绝缘材料的 ϵ_r 之值。

b. 电容的串联与并联 电容串联与并联后总电容由表17-4给出。

表17-3 几种绝缘材料的相对介电常数

材 料 名 称	$\epsilon_r = \epsilon / \epsilon_0$
空 气	1.0
电容器油	2.1~2.3
蓖 麻 油	4.2
白 云 油	5.4~8.7
聚丙烯薄膜	2.0~2.2

表17-4 电容的串联和并联

	电 容 串 联	电 容 并 联
电 路 图		
等 效 电 容	$C = \frac{1}{\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3}}$	$C = C_1 + C_2 + C_3$

1.3 电、磁的基本定律

1.3.1 右手螺旋定则

右手螺旋定则用来确定磁场方向与产生此磁场的电流方向之间的关系，这一定则又称为安培环路定律。

单根直导线通电后产生的磁场方向如图 17-4 a 所示。右手大拇指表示电流方向，四指弯曲表示磁场方向。螺线管的磁场方向如图 17-4 b 所示，四指弯曲为电流方向，大拇指表示磁场方向。



图 17-4 右手螺旋定则

1.3.2 安培定律——电磁力

载流导线在磁场中所受的力叫做电磁力或安培力。如果在导线长度为 l 的范围内磁场是均匀的，并且导线所在处的磁感应强度 B 与导线垂直，则电磁力的大小是：

$$F = BIl \quad \text{N}$$

式中 B ——导线所在处磁感应强度 T

l ——导线在磁场中的有效长度

m

I ——导线中的电流 A

电磁力的方向可以用左手定则决定，如图 17-5 所示。

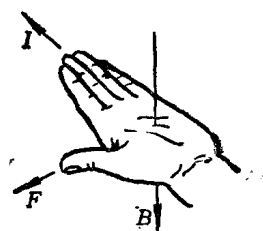


图 17-5 左手定则

1.3.3 电磁感应定律（法拉第一楞次定律）

当与回路环链的磁通发生变化时，回路内会产生感应电动势。如果规定感应电动势的正方向与磁通正方向之间符合右手螺旋定则，感

应电动势可以由下式表示:

$$e = - \frac{d\psi}{dt} \quad \text{V}$$

式中 $\frac{d\psi}{dt}$ ——是回路内磁链的变化率

感应电动势的方向也可通过楞次定律决定。如果与回路环链的磁通发生变化时, 该回路中产生的感应电动势总是企图使其感应电流所产生的磁通阻止原来磁通的变化。

当导线与磁场作相对运动且切割磁力线时, 如果导线、磁场及导线运动方向三者互相垂直, 并且磁场是均匀的, 导线中的感应电动势可写为:

$$e = Blv \quad \text{V}$$

式中 B ——导线所在处的磁感应强度 T

l ——导线的有效长度 m

v ——导线运动的速度 m/s

当导线与磁场作切割运动时, 导线中产生的感应电动势的方向可用右手定则决定, 如图17-6所示。

当线圈中的电流发生变化时, 由这电流产生的磁通也发生变化。因此线圈中也将产生感应电动势, 这种感应电动势称为自感电动势。如果该线圈的电压、电流正方向一致, 磁通与电流的正方向按右手螺旋定则决定。则自感电动势:

$$e_L = - \frac{d\psi_n}{dt} \quad \text{V}$$

若线圈内的 Φ 与 i 成正比, 即 L 为常数, 自感电动势又可写为:

$$e_L = - L \frac{di}{dt} \quad \text{V}$$

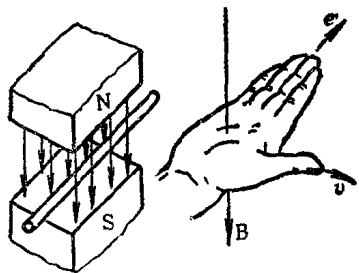


图17-6 右手定则

式中 L ——线圈的自感系数 H

$\frac{di}{dt}$ ——是线圈内电流随时间的变化率

1.3.4 全电流定律

磁场强度矢量沿任一闭合路径的线积分，等于这路径所包围电流的代数和，即：

$$\oint H \cdot dl = \Sigma I$$

式中电流的正负，要根据路径方向和电流的方向是否符合右手螺旋定则而定。

1.3.5 焦耳—楞茨定律

对于电阻来说，当有电流通过时，电阻吸收的电能将全部转换成热能，而以热量的形式表现出来。在时间 t 内，电阻 R 中产生的热量为：

$$Q = 4.1868 \times 0.24 I^2 R t \quad J$$

式中 I ——电阻中通入的电流 A

t ——电流通过电阻的时间 s

该式称为焦耳—楞茨定律的表示式。

1.3.6 欧姆定律

欧姆定律表明，流过电阻的电流 i 与电阻两端的电压 u 成正比。即：

$$i = \frac{u}{R} \quad A$$

式中 u ——电阻两端的电压 V

R ——导体的电阻 Ω

在直流电路中

$$I = \frac{U}{R} \quad A$$

1.3.7 基尔霍夫定律

基尔霍夫第一定律：又称电流定律。根据电流连续性原理，对任意节点（电路中会聚三条或更多条导线的点）而言，流入节点的电流

总和必等于流出节点的电流总和, 即:

$$\Sigma I_i = \Sigma I_o \quad \text{A}$$

式中 I_i ——流入节点的电流 A

I_o ——流出节点的电流 A

由节点推广到电路中任一闭合面, 也有上述关系。如图17-7所示电路, 该电路必存在如下关系:

$$I_1 + I_2 = I_3$$

基尔霍夫第二定律, 又称电压定律。根据电位单值性原理, 沿某一方向的任一闭合回路, 各电动势的代数和必等于各电压的代数和, 即:

$$\Sigma E = \Sigma U$$

式中 ΣE ——回路内各段电动势的代数和, 当 E 的方向与回路循行方向相同, 则为正; 反之为负

ΣU ——回路内各段电压的代数和。如 I 的方向与回路循行方向相同, 则 U 为正, 反之为负

例如如图17-8所示电路, 沿回路 ABCDA 电压方程式为:

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

沿回路 ABDA 电压方程式为:

$$E_1 = I_1 R_1 - I_3 R_3$$

基尔霍夫定律是分析计算电路列回路的电压方程式及节点电流方程式的依据。

1.4 几种电磁效应

1.4.1 光电效应

金属受到光的照射时, 金属中的自由电子吸收了光子而形成光电

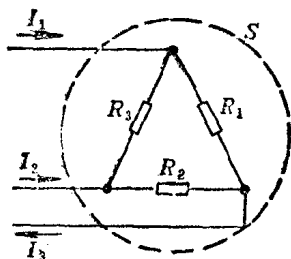


图17-7 广义节点

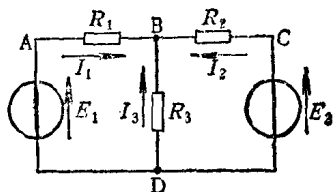


图17-8 电路