

§2-5 电源及电动势

一、 电源及电动势的定义

1. 稳恒电流必须有非静电力

稳恒电流必须是闭合的。显然，闭合电流意味着电荷必须沿闭合回路运动。当沿闭合回路绕行一周之后，所经历过程的电势总改变量为零。这意味着，在闭合回路中，如果有电势下降的路段，就必有电势上升的路段。当正电荷沿电势下降的路段运动时，静电力做功，电荷的电势能减少，这部分电功将全部转化为热能或其它形式的能量。而当正电荷沿电势上升的路段运动，电荷的电势能增加，静电力将对电荷的运动起阻碍作用，此外，电荷的运动还受到导体内部的阻碍，因此正电荷沿电势上升路段的定向运动将逐步减速。所以，在闭合回路中，正电荷无法回到电势能较高的原来位置。回路中电荷出现堆积，电流随时间变化，电流的闭合性遭到破坏。一句话，稳恒电流无法维持。因此，在稳恒电路中，一定还有一种非静电本质的力作用于电荷。

2. 电源

(1) 电源

提供非静电力的装置。

通常电源有正负两极，电势高的叫正极，电势低的叫负极。

(2) 电源的作用

电源的作用包括两个方面：

- 它通过极板及外电路各处累积的电荷在外电路中产生静电场 E 使电流经外电路由正极指向负极；
- 在电源内部除了有静电力之外还存在非静电力，在二者的联合作用下，电流经电源内部由负极流向正极。

上述两部分电流一起形成了闭合的稳恒电流。

二、非静电力存在时的欧姆定律

为定量地描述电源提供的非静电力特性，要引进两个物理量： \mathbf{K} 和 \mathcal{E} ，它们分别对应于描述静电力的物理量 \mathbf{E} （电场强度）和 U （电压）。 \mathbf{K} 表示电源内部单位正电荷受到的非静电力。电荷除受非静电力作用之外，还会受到静电力作用。因此，电荷 q 受到的总力应当是静电力和非静电力之和，即 $q(\mathbf{E} + \mathbf{K})$ 。

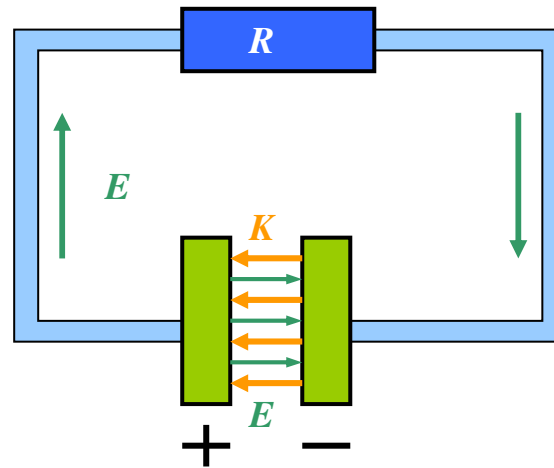


图 2-40 电源内部的非静电力

这时的欧姆定律应改写为

$$\vec{j} = \sigma(\vec{E} + \vec{K})$$

该式是欧姆定律向稳恒电路的推广，它表明电流是静电力和非静电力共同作用的结果。

对通常的电源，在连接它的外电路中只有静电力， $\mathbf{K}=0$ ，上式就回到通常的欧姆定律形式。

三、 电动势

从实际上，描述电源的性质即它所提供的非静电力的性质，更常用的不是物理量 \mathbf{K} ，而是电动势 \mathcal{E} ，它定义为将单位正电荷从负极经电源内部移到正极时非静电力所作的功，即

$$\mathcal{E} = \int_{\text{电源内部}}^+ \vec{K} \cdot d\vec{l}$$

显然，电动势和电压单位相同，即“伏特”、一个电源的电动势反映电源中非静电力做功的本领，它反映的是电源本身的特性，与外电路的性质以及是否接通无关。

有些电源无法区分电源内部和外部， \mathbf{K} 分布于四路各处，这时我们把电动势定义为从沿闭合回路的线积分，即

$$\mathcal{E} = \oint_L \vec{K} \cdot d\vec{l}$$

称它为整个闭合回路的电动势。对通常电源而言， \mathbf{K} 仅限于电源内部。

四、常见的几种稳恒电源

常见的电源有化学电源、温差电源等，此外，还有发电机、浓差电源等。

1. 化学电源

通过化学反应直接把化学能转变成电能的装置称为化学电源，各类电池和蓄电池都属于化学电池，如常见的锌锰干电池、铅酸电池等。最早的化学电池是伏打电池，它由浸在稀硫酸溶液中一块钢片和一块锌片组成。伏打电池的应用价值不高，后来发展成为丹聂耳电池。化学电源的电动势一般来源于第一类导体与第二类导体接触层中的化学反应。下面以丹聂耳电池为例来说明化学电池的原理。

丹聂耳电池由两个相邻的液池组成，一个池中盛有硫酸锌溶液，其中插有锌棒，另一个池中盛有硫酸铜溶液，其中插有铜棒，两池之间用多孔的陶瓷板隔开，但离子仍可自由通过陶瓷板，如图 2-41 所示。其中发生的过程大致是：锌棒上的锌离子通过化学作用而自动溶入溶液，使锌棒带负电，溶液带正电，在锌棒和溶液之间形成一个偶电层，偶电层的电场阻止锌棒上的锌离子继续向溶液溶解，最后，化学作用和电场作用达到平衡，这时溶液和锌棒之间保持约 0.7663V 的电势差。在铜棒附近，溶液中的铜离子团化学作用而被吸附到铜棒上，使铜棒带正电，溶液带负电，在铜棒与溶液间也形成偶电层，偶电层的静电场阻止铜离子继续移向铜棒，平衡时铜和溶液之间保持约 0.337 V 的电势差，而两池的溶液之间由于离子的交换而保持等电势，最后形成如图 2-42 所示的电势分布，铜棒为正极，锌棒为负极，两者之间的电势差约为 1.11V。

当电池通过外电路放电时，在导线中就有电流，电流使正极电势降低、负极电势升高。溶液中，负极一边的溶液电势升高，正极一边的溶液电势降低，正离子从负极流向正极，负离子从正极流向负极。电极与溶液间的电场减弱，化学作用（非静电作用）占优势，锌离子的溶解。铜离子的吸附过程继续进行，从而在回路中形成闭合的电流、这时的电势分布如图 2-43 所示。这种过程可以一直持续到锌棒全部溶于溶液成为硫酸锌或硫酸铜溶液降低到一定浓度为止。

干电池是常用的一种化学电池，其结构见图 2-44。外壳通常用锌皮做成，壳内是氯化铵（ NH_4Cl ）和氯化锌（ ZnCl_2 ）与淀粉组成的糊状物，作为电解液中间是一根碳棒，碳棒周围紧裹有二氧化锰（ MnO_2 ）、石墨粉及乙炔黑等的混合物。在锌皮与电解液接

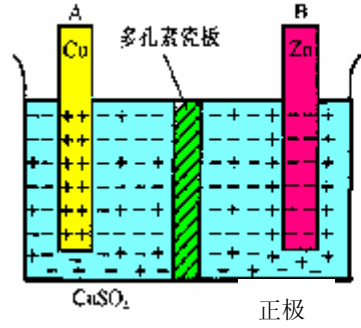


图 2-41 丹聂耳电池图

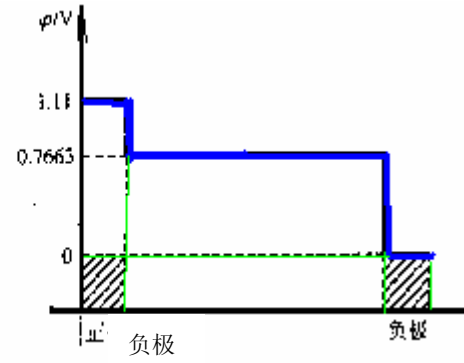


图 2-42 丹聂耳电池空载时的电势分布

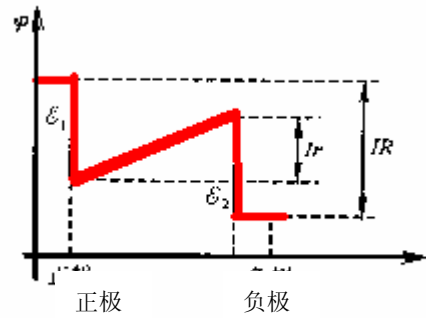


图 243 丹聂耳电池有负载时的电势分布

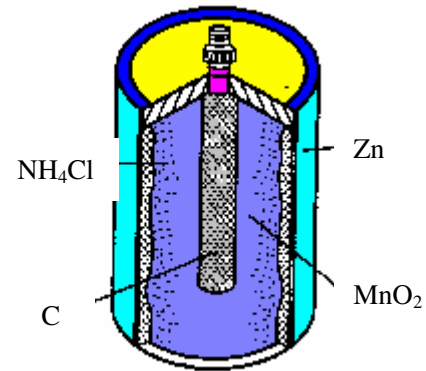


图 2-44 干电池的结构示意

触处，化学作用促使锌皮中的锌原子失去电子而成锌离子进入电解液，使锌皮带负电，而在碳棒与电解液接触处，电解液中的铵离子在与 MnO_2 的化学反应过程中，从碳棒取得电子，使碳棒带正电。这样，在碳棒（正极）和锌皮（负极）之间就可维持一定的电势差（约 1.5 V）。

化学电池按其工作性质及贮存方式可分为四类，如表 2-2 所示：

表 2-2 化学电池的分类

电池类型	特 性	主要种类	用 途
一次 电池	因为放电过程中进行的化学反应是不可逆，放电后不能再用充电方法使它复原后再次使用。	锌锰干电池；锌汞电池；镉汞电池；锌银电池；锂亚硫酸电池。	低功率到中功率放电，使用方便，相对价廉，外形以扁形、扣式和圆柱形为主。
二次 电池	因为放电过程中的化学反应是可逆的，故可放电、充电多次循环使用，放电后可用充电方法使活性物质复原后再放电。	铅酸电池；镉镍电池；锌银电池；锌氧（空）电池；氢镍电池	较大功率的放电，在人造卫星、宇宙飞船、空间站和潜艇方面、机动车辆方面。
贮备 电池	正负极活性物质和电解液在贮存期间不直接接触，在使用前临时让电解液与电极接触，故电池可长时间贮存。	镁银电池；锌银电池；铅高氨酸电池；钙热电池。	贮存寿命或工作寿命特别长，可用作心脏起搏器和计算器存贮系统的电源。
贮备 电池	这类电池可把活性物质连续注入电池，从而使电池能长期不断进行放电。	氢氧燃料电池；肼空燃料电池。	已用于“阿波罗”飞船等登月飞行器和载人航天器中，并正在进一步研究燃料电池电站，并入公用电网供电。

2. 温差电源 • 热电偶

利用温差电效应把热直接转化成电能的装置。实验发现，两种不同的金属紧密接触在一起时，两金属间会出现一定的电势差，这种现象称为接触电现象，两金属间的电势差称为接触电势差，这一现象由德国物理学家塞贝克于1821年发现，又称塞贝克效应。

在一定的温度范围内，温差电动势在数值上与两接点处的温度差有关，如图2-45所示，在温差不大时有：

$$\varepsilon = a(T_2 - T_1) + \frac{1}{2}b(T_2 - T_1)^2$$

其中 a 和 b 与金属的性质有关，金属的温差电效应较小，系数 a 约为 $0-80\mu\text{VK}^{-1}$ ，半导体的温差电效应较大，系数 a 约为 $50-10^3\mu\text{VK}^{-1}$ ，可制造温差电池。温差电堆通常由多个温差电池串联而成，可获得实用的电动势，如图2-46所示。

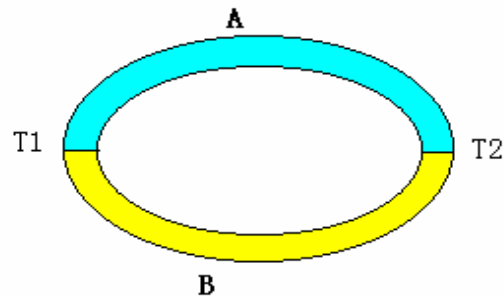


图 2-45 温差电效应

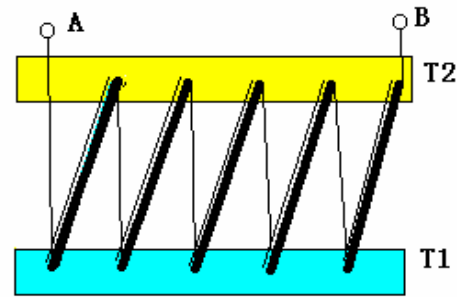


图 2-46 温差电堆示意图

当两种金属材料确定以后，常数 a 和 b 便确定。如果保持一个接触点于已知的固定温度，则通过测量回路中的电动势或开路两端的电势差，就可求得另一接触点的温度，从而成为一种温度计。这就是温差电偶温度计或热电偶。

当回路中接有第三种金属时，只要该金属两端的温度保持相同，电路中的电动势并不因存在第三种金属而改变。热电偶测温有灵敏度高、测温范围大、受热面积和热容量小等优点。灵敏度高的原因是热电偶是通过电动势的测量来测量温度的，而电动势的测量精度是非常高的。

3. 光电池

这类电池将光能转变为电能。最常见的如太阳能电池，它将太阳的光能转化为电能，常用于人造卫星、宇宙飞船、空间站。其简单原理是，当太阳光照到对光敏感的金属表面，通过光电效应，金属表面发射电子，这些电子被收集到另一邻近的金属表面，造成正、负电荷分离，产生电动势，若接通外电路，便会产电流。主要有硅、硫化镉、铟化镉以及砷化镓等太阳能电池。



图 2-47 太阳能电池阵列

4. 核能电池

它将核能直接转化为电能，其示意图如图 2-48。金属铅盒中有一放射性源，它放射 α 粒子，即带 $+2e$ 电量的氢核。 α 粒子飞行穿过金孔而达到另一收集板 B 上。这样盒上就带负电，收集板上带正电，产生电动势，形成电源。如对 ^{241}Am α 粒子，其能量为 4.7MeV ，则收集板 B 可不断收集 α 粒子直到它相对于铅盒的电势上升到 $2.5 \times 10^6\text{V}$ 。这时，因为 α 粒子的动能正好等于它从铅盒运动到收集板 B 过程中反抗静电场所作的功，于是 B 板不再收集正电荷，也就是核力与静电力的平衡点。核力即非静电力，其特点是电路中的电流与外电路的电阻无关。

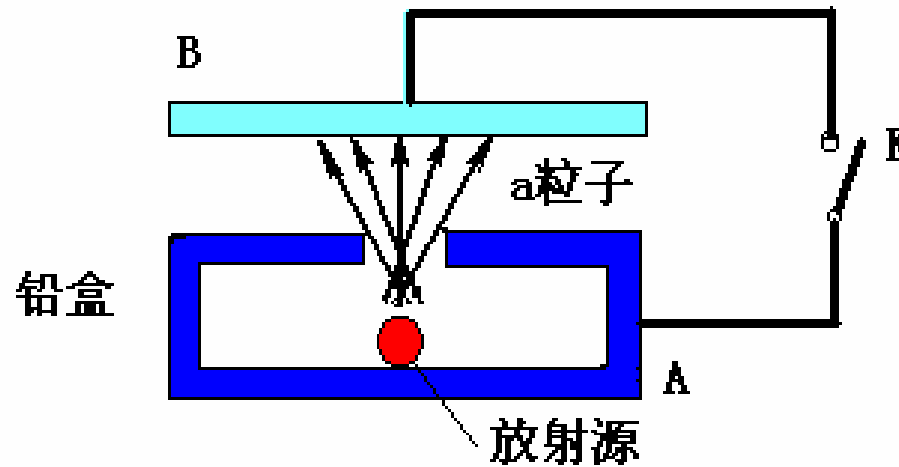


图 2-48 核能电池示意图

五、全电路欧姆定律

考虑到非静电力 \mathbf{K} 的作用，欧姆定律的微分形式为

$$\vec{j} = \sigma(\vec{E} + \vec{K})$$

因为当存在非静电力时，电流是由静电力和非静电力共同产生的。沿外电路和电源组成的闭合路径，静电力和非静电力对单位正电荷作的功为

$$\oint (\vec{E} + \vec{K}) \cdot d\vec{l} = \oint \frac{\vec{j}}{\sigma} \cdot d\vec{l} = \int_{\text{外}} \frac{\mathbf{J}}{\sigma} \cdot d\vec{l} + \int_{\text{内}} \frac{\mathbf{J}}{\sigma} \cdot d\vec{l}$$

因为稳恒电场是保守场，其环流为零，但非静电场的环流不为零，即

$$\varepsilon = \oint \vec{K} \cdot d\vec{l}$$

在外电路， $\mathbf{K}=0$ ，又 $I = jS$ ，

$$\int_{\text{外}} \frac{\vec{j}}{\sigma} \cdot d\vec{l} = I \int_{\text{外}} \frac{dl}{\sigma S} = IR$$

设电源内阻为 r ，则有

$$\int_{\text{内}} \frac{\vec{j}}{\sigma} \cdot d\vec{l} = I \int_{\text{内}} \frac{dl}{\sigma S} = Ir$$

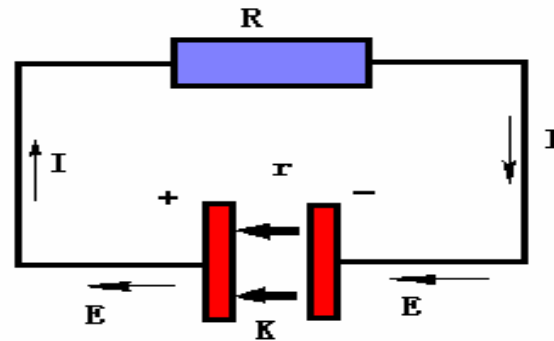


图 2-49 电源和电阻构成的回路

电源附近的内外电极周围的电场分布如图 2—49 所示。电源接通后，在电源内部正电荷在非静电场作用下，反抗静电场的作用由负极向正极移动；在电源外部，正电荷在静电场作用下由正极向负极移动，电路中获得持续的电流。但在接通电路的瞬间，电流并不稳定，因为在导线表面附近的电流密度并不沿着表面的切线方向，导线表面上的电荷要重新分布。电荷的重新分布将改变空间的电场分布，也改变导线内部的电场分布，最终使导线内部表面附近的电场沿着表面的切线方向，从而使稳恒电流的条件得到满足，电流达到稳定。

这样，我们就有

$$\mathcal{E} = I(R + r)$$

这就是全电路欧姆定律。

六、稳恒电路的特点

1. 稳恒电路的特点

由稳恒条件 $\nabla \cdot \vec{j} = 0$ 和欧姆定律 $\vec{j} = \sigma \vec{E}$ ，可以得到对均匀介质（ σ 为常数） $\nabla \cdot \vec{E} = 0$ ，亦即 $\rho = 0$ ，因此有：

- (1) 在稳恒电流情况下，均匀导体内部宏观电荷密度为零，净电荷只分布在导体表面或导体内不均匀的地方。
- (2) 外电路中，电流线和电力线方向一致，且平行于导体表面。
- (3) 在电源内部，电流线的方向由 \mathbf{E} 和 \mathbf{K} 共同决定。

2. 稳恒电路中静电场的作用

在稳恒电路中，静电场的作用是非常重要的，主要有以下两个方面：

(1) 调节电荷分布的作用

在电流达到稳恒的过程中，静电场担负着重要的调节作用，这种调节作用不仅表现在导线表面上的电荷分布的变化，还包括非均匀导体内部体电荷分布的变化，以及在两种不同导体交界面上电荷分布的变化。当电路中的电流已经达到稳定后，回路形状的变化又会破坏电流的稳定性，但导线上电荷分布的变化能调节电场分布，使电流重新达到稳定。当然调节作用仅发生在非常短的时间内，此时间实际上很难觉察出来。

(2) 静电场起着能量的中转作用

从能量的转换看，在整个闭合电路中静电场作的总功为零。但是，在电源外部以及电源内部不存在非静电场的地方，静电场在把正电荷从高电势处送到低电势处的过程中作正功，以消耗电场能为代价。存在非静电场的地方，非静电场把正电荷从低电势处送到高电势处的过程中，反抗静电场做功，消耗非静电能，使电场能增加，在绕闭合电路一周的过程中，静电场作的总功为零，静电能变化的总和等于零。电路上消耗的能量归根到底是非静电场提供的。静电场起着能量的中转作用，它把电源内部的非静电能转送到外电路上。