# 61．恒定电场与静电场有什么关系？

恒定电流存在于闭合回路中，回路中导体内部自由电荷的定向移动形成电流，而导体两端存在电压、导体内部存在电场是形成电流的必要条件。这个电场称为恒定电场，是由导体表面以及内部不均匀处聚集的电荷形成的，这些电荷不是静止的电荷，但它的分布保持稳定，不随时间变化，它不是静电场，但与静电场有类似的性质。

恒定电流电路由直流电源提供能量，电流在闭合的导体回路中流动，每一段导体两端都有恒定的电压存在，而导体内部则有电场，称为恒定电场。

## 一、电路断开时导体处于静电场中

最简单的恒定电流电路由直流电源、导线、用电器和开关组成，如图 1 所示，是一个最简单的电路的电路图，其中开关 S 是一个双刀单掷开关，现处于断开状态，用电器 *R* 是一段电炉丝，导线是铜制电线。为了叙述的方便，把各处标上字母，其中 A、B 分别是电源的正、负极，外电路整个与电源断开。

图 1 与电源断开的直流电路

B

A

S

E

K

F

J

G

H

*R*

C

D

由于电源的作用，在没有电流的情况下，A、B 两点分别有等量的正负电荷积累，则 A、B 可以近似看作两个点电荷，如果右边没有导体存在，它的右半边电场就是我们熟悉的等量异种电荷的电场（其左边为电源内部，本文不讨论），如图 2 所示。空间各点场强方向各不相同，除等势画上的点外，不同的点的电势也不相等。

图 2 右边没有导体情况下的静电场

B

A

但 A、B 的右边有一个不闭合的导体回路，处于静电场中的导体要发生静电感应，即导体内的自由电荷会重新分布，从而在其表面某些部位出现电荷聚集，而后达到新的平衡，例如电路中的 C 点会聚集一些负电荷，D 点会聚集一些正电荷，导体回路的其他各处也会聚集数量不等的电荷，这些电荷都聚集在导体的表面，其内部不会有电荷聚集，是电中性的。这些聚集的电荷（称为感应电荷）产生的电场与原来 A、B 的电场叠加，结果使得电场在空间的分布发生改变，从而电场线的形状变得与图 2 所示的形状相去甚远：导体内部处处场强为零，即导体内部没有电场线，由于导体表面有感应电荷的存在，外面空间的电场线有些会终止于导体表面（或从导体表面聚集的电荷出发），这些电场线都与导体的表面垂直，整个导体成为一个等势体，即包括开关及导线在内的未与电源接通的电路都是一个等势体。

## 二、电路接通后导体内部存在恒定电场

下面讨论如图 1 所示的电路开关 S 闭合前后的变化。开关未闭合前，未形成闭合的回路中的所有导体电势处处相等，闭合开关 S，则电路中的 C、D 两点分别与 A、B 两点相连接，通过电源的作用把电子从 D 点向 C 点转移，回路中产生了电流，电流从零到达到稳定，会有一个过渡期，该过渡期极为短暂，很快电流便会达到稳定，称为恒定电流。

这个短暂的过渡期，导体各处的电流（即电流密度）各不相同，从而造成导体中电荷重新分布和聚集，此为恒定电场的建立时期。开关闭合前后，导体表面电荷分布的变化是显而易见的。例如，电路中的 C 点，开关闭合前，聚集的是负电荷，而开关闭合后，则有正电荷聚集，D 点则相反，开关闭合前，D 点聚集的是正电荷，开关闭合后，聚集的是负电荷。回路中导体的其他部分，聚集电荷的分布情况比起静电平衡时也都会有变化。变化的结果是：导体内部的电场不为零，其方向都沿着导线中电流的方向，即导体的内部有了电场线，这堂电场线的方向与电流的方向一致，即与导体表面平行，没有电场线从导体内部穿过导体表面，这就是恒定电场。正是由于恒定电场的存在，导体内的自由电荷才有了定向流动的动力，从而可以克服导体对电流的阻碍作用（电阻）而形成恒定电流。

恒定电流存在的过程中，恒定电场在空间的分布是稳定的，不随时间变化。恒定电场也是由电荷产生的，但产生恒定电场的电荷不是静止的电荷，因为聚集在导体不同部位处的电荷也随着电流的流动而流动，但这些聚集的电荷的分布情况是稳定的，可以形象地说，某一区域内聚集的电荷，每时每刻都有离开的，也有补充上来的，总量则保持稳定。

有人可能会有疑问，恒定电场的电场线为什么一定与导体表面平行，而不会有电场线从导体表面穿过呢？其实只要反向思考一下就可以解决：如果有电场线不与导体表面平行，而是从导体表面穿过，那么在导体表面就会有新的电荷聚集，从而破坏了电荷分布的稳定性，与电流已经达到稳定的前提不符。这种情况在刚刚闭合开关后的短暂的过渡期内，也就是恒定电场的建立过程中是存在的，电流达到稳定后，就不会这样了。

还可能有人会问：恒定电场的电场线都平行于导体表面，那么电场强度的大小是否相等呢？答案是：如果导线是粗细均匀的同种材料制成的直导线，其内部的电场是匀强电场，电场线平行且间距相等，即电场强度的大小处处相等，如图 3（a）所示。但导线如果不是均匀的直导线，例如：导线是弯曲的，如图 3（b）所示，其内部电场线也随导体的弯曲而弯曲，但各条电场线仍然平行且间距相等，整体看虽然不能称为匀强电场，但仅就很小的一段看，仍可视为匀强电场；导线粗细不同，如图 3（c）所示，左边导线较细而右边导线较粗，较细的部分电场线较密，说明电场强度较大，较粗的部分电场线较稀疏，说明电场强度较小。对此可以用欧姆定律的微分形式加似解释：定义电流 *I* 与导线横截面积 *S* 的比值为电流密度 *j*，即 *j* = ，结合电阻定律可得 *j* = ，其中 *E* 为恒定电场的场强，*ρ* 为导线的电阻率，此即为欧姆定律的微分形式。不难看出，在 *ρ* 一定的情况下，*j* ∝ *E*，图（c）中两段粗细不同但材料相同的导线串联，电流相等，则电流密度与横截面积成反比，从而越粗的导线中电场强度越小。

图 3 导线内恒定电场的电场线

（a）均匀直导线内的恒定电场

（b）弯曲导线内的恒定电场

（c）截面不同导线内的恒定电场

还可以举出两种不同材料的导线串联的情况，图 1 中的铜导线与电炉丝的串联，如果二者的粗细相同，只有电阻率 *ρ* 不同，导线内恒定电场的场强大小也不相同。当然，两段材料和粗细都不相同是更常见的情况。

以上几种都属于“不均匀”的情况，各部分内部的电场强度大小一般不相等，而造成这一问题的原因就是在这些“不均匀”的部分有电荷聚集。

## 三、恒定电场与静电场的关系

恒定电场和静电场，都是由电荷产生的，因此都是有源场，并且都是保守力场，有电势和电势差的概念存在。

但产生静电场的电荷是静止的，而产生恒定电场的电荷则是运动的，运动的电荷周围有电场，同时还有磁场产生，这与静止电荷的电场不同。由于产生恒定电场的电荷在空间的分布不随时间变化，不谈磁场，仅就电场而言，其电场的分布，即场强与电势在空间的分布也不随时间变化，这与静电场类似。

所有静止的电荷都产生静电场，但恒定电场只在闭合回路中有恒定电流流过的情况下才产生。

在静电场中处于静电平衡状态下的导体，不论其整体是否带电，其电荷都分布在外表面，内部没有净电荷，也没有电场，整个导体的电势都相等。闭合回路中有恒定电流流过时，导体内部有恒定电场存在，它是由导体表面及内部不均匀处聚集的电荷产生的，在均匀导体的内部没有净电荷的聚集。

恒定电场的电场线在导体内部与电流方向一致，即与导体侧面平行。在均匀直导线内部的恒定电场是匀强电场，而在不均匀处，由于有电荷的聚集，因此电场强度的大小、方向都可能变化。

最后，我们从参考系的角度讨论一下静电场与恒定电场的关系：产生恒定电场的电荷是随电流在导线中流动的，对于金属导线而言，定向流动的是自由电子，自由电子在导线中定向移动的速度 *v* 定向大约只有 10−5 m/s 的数量级。

若改换为相对地面速度等于 *v*定向 的参考系，则这些电子都是静止的，于是它们所产生的电场就是静电场。现在是以地面为参考系，因此需要进行电磁变换，由于 *v*定向 远远小于光速 *c*，变换的结果是除了电场外还有磁场，这正是我们在地面参考系中看到的结果，而电场可以认为与静电场相同（后面关于电磁变换的那一篇对此还有论述）。