

感生电场的方向总是与感应电流的方向一致吗？

——在一次教研活动中遇到的困惑

周 敏

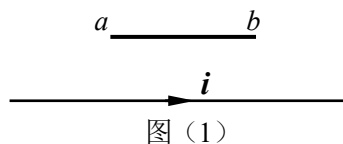
(南京市秦淮中学 江苏 南京 211100)

在日常的教学、教研活动中，常会因为遇到这样或那样的问题，而在经过思考分析后，对物理模型的认识就会因此更加准确、清晰，笔者就因为在一次教研活动中遇到一个问题，在此后的思考分析的过程中有了明确的认识。

1、在教研活动中遇到的问题。

【情境】在一次教研活动后，一位同仁（以下简称“A老师”）向大家提出了一个问题，请同行的老师们做出解释。问题是这样的：“

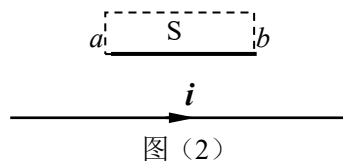
如图（1）所示，一根无限长的导线内通有向右的电流 i ，在导线正上方有一根直金属棒 ab （有限长度）。则在导线中的电流 i 减弱的过程中，金属棒 ab 两端是否有电势差？若有，则哪边电势高？若无，则说明理由。”



图（1）

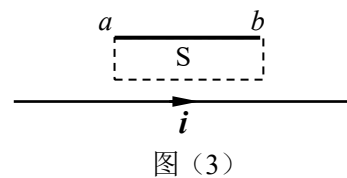
【困惑】A老师随后说出了自己的困惑：“

若做出如图（2）所示的“面积 S ”进行分析，则由于 S 内的“向外”的磁通量减少，根据楞次定律可推知面积 S 附近形成了逆时针方向的感生电场（假设沿面积边缘有一线框，则在直线电流减弱的过程中，线框中感应电流的方向也是逆时针的。），使 ab 两点的电势 $\varphi_a < \varphi_b$ 。



图（2）

若做出如图（3）所示的“面积 S ”分析，则同样由于 S 内的磁通量减少，根据楞次定律推知 S 附近产生逆时针的感生电场，使得 ab 两点的电势关系是 $\varphi_a > \varphi_b$ 。

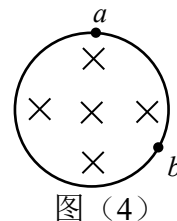


图（3）

以上两个结论完全相反！这是怎么回事？到底是哪种做法错了？ ab 间到底有无电势差？令人不解！”

2、同仁的解释。

经少许思量后，有一位同仁（以下简称“B老师”）提出了自己的看法，他是由对另一道题迁移后提出自己的看法的。他是这样举例的：“

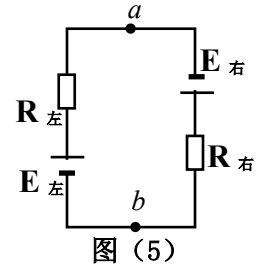


图（4）

如图(4)所示,在一个金属环的内部有一个匀强磁场,当磁感应强度随时间均匀减弱时,证明环上的任意两点 a 、 b 间的电势差为零”。

【证明】设环的半径为 R 、金属材料的电阻率为 ρ , 导线横截面积为 s , a 、 b 两点间左侧弧长为 x 长, 磁感应强度的变化率 $\Delta B/\Delta t=k$, 则由法拉第电磁感应定律可得环中的感生电动势 $E=k\pi R^2$, 又由于感生电场的方向与感应电流的方向一致, 即沿着圆环方向。这使得电动势与弧长成正比, 即

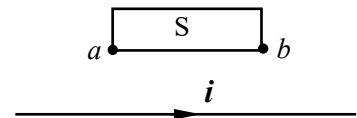
有左侧圆弧的电动势 $E_{左} = \frac{x}{2\pi R} E$, 右侧圆弧的电动势 $E_{右} = \frac{2\pi R - x}{2\pi R} E$ 左侧电阻为 $R_{左} = \rho \frac{x}{s}$, $R_{右} = \rho \frac{2\pi R - x}{s}$ 。电路



如图(5)所示, 则有 $U_{ab} = E_{左} - U_{R左}$ 。即:

$$U_{ab} = \frac{x}{2\pi R} E - \frac{E}{2\pi R} \cdot \rho \frac{x}{s} = 0, \text{ 得证金属棒中任意两点间的电势差为零。}$$

【迁移】由于 A 老师所提出的问题中, 可建立一个矩形金属框(如图6)所示, 可同样得出 $U_{ab}=0$, 故两点是等电势的。

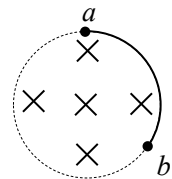


图(6)

3、笔者的疑惑。

在聆听了 B 老师的解释后, 笔者感觉似懂非懂, 总觉得 B 老师的解释很牵强, 但一时又没有找到反驳的论据。

回家以后, 再来思量这个问题, 突然发现 B 老师犯了一个偷换概念的错误: 把一个闭合金属框情形与一段金属情形等同起来。在图(7)所示的情形下, U_{ab} 显然不等于零。所以 B 老师的解释不能成立。



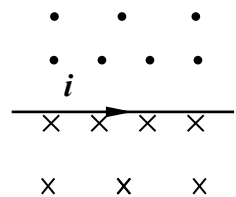
图(7)

那么 A 老师的困惑又源自哪里呢? 笔者经过数日的思量, 对该问题的认识才逐渐清晰、准确起来。

4、笔者的思维过程。

4.1 确定磁场的特点。

无限长的直线电流产生的磁场如图(8)所示, 由于电流在减弱的过程中, 各位置的磁感应强度也随之而由初始值减小至零。但由于各位置的初始磁感应强度大小不同(距离直线电流越远的地方磁感应强度越小), 可推知距离直线电流越远的位置的磁感应强度的变化率 $\Delta B/\Delta t$ 也



图(8)

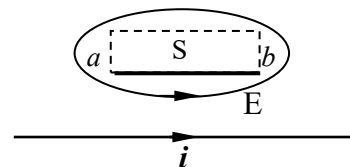
越小。

4.2 电流减弱的过程中，在直线电流附近的感生电场特点。

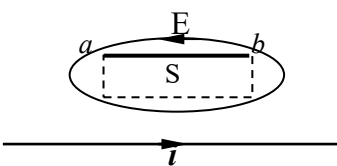
4.2.1 经过金属棒 ab 的感生电场的方向会因选取不同“面积”而不同吗？

要解决 A 老师提出的问题，首先要弄清 A 老师认识的感生电场分布形态是否正确。

如 A 老师的想法，当在 ab 棒上方取一面积时，画出的感生电场线的形态大致如图（9），因而可看出 $\varphi_a < \varphi_b$ ；当在 ab 棒的下方取一面积时，画出的感生电场线的形态大致如图（10）所示，因而可看出 $\varphi_a > \varphi_b$ 。看得出：矛盾源于同一块区域（ ab 棒所在线上）画出了不同的感生电场方向。

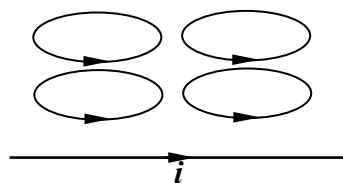


图（9）



图（10）

按照 A 老师方法来建立感生电场线的全局图会怎样的呢？极易想象成图（11）的形态，这就有显而易见的错误，在空间中任意点都可作出两个电场线并相交，而这与某点的电场强度的唯一性相矛盾。



图（11）

至此，笔者意识到两个容易产生的错误：①认为感应电流的方向与感生电场的方向是一致的。②以人的意识来想象感生电场线，有违物理规律的客观性。

那么，A 老师所提的问题中，感生电场究竟是何形态的呢？笔者在查阅了普通物理学中的《电磁学》后，对问题的认识才清晰起来、自信起来。

4.2.2 此过程中，产生的感生电场的特点。

【理论支持】 在《电磁学》部分，笔者再次学习了麦克斯韦方程组，它们是：

$$\begin{cases} \nabla \cdot \mathbf{D} = \rho_e & (1) \\ \nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} & (2) \\ \nabla \cdot \mathbf{B} = 0 & (3) \\ \nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} & (4) \end{cases}$$

其中， ∇ 为哈密算子， ρ_e 为电荷体密度。

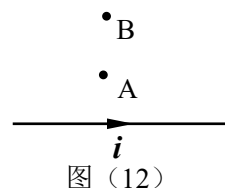
由方程组中的（2）式可知：空间的任意点的感生电场强度的旋度大小等于磁感应强度的变化率大小，该旋度的方向与磁感应强度的增量方向相反，电场强度的方向可

根据旋度方向和右旋法则确定。

【模型分析】

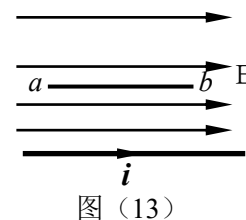
①关于感生电场。

在 A 老师所提的问题中，如图（12）所示，当直线电流减弱时，在其周围的磁感应强度也随之减弱，但由于 A 位置的磁感应强度的变化率比 B 位置的磁感应强度的变化率大，由上述方程组中的



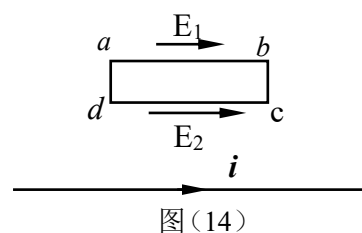
(2) 式可知，由此在 A 位置产生的感生电场强度比在 B 处产生的感生电场强度的旋度大，该处的电场强度与比 B 处的大。而电场强度的方向与磁感应强度的方向也可由右旋定则并结合空间特点得到，必定向右！（事实上，由于空间各位的磁感应强度变化情况相似，故各位置的旋度方向相同，电场方向也必相同，电场线应按右旋定则延伸至无限远处。）

结论是，若直线电流无限长，结合导线上侧空间任意一点的电场强度的旋度都向外的特点，可推理并绘出相应的电场线如图（13）所示（这一感生电场存在于电流 i 的减弱的过程中）。在这种感生电场的作用下，负电荷向左移至 a 端，使得 ab 间出现电势差，造成 $\varphi_a < \varphi_b$ 的结果。



②关于感应电流。

在图（14）中，在电流 i 减弱的过程中，线框中会出现逆时针方向的感应电流，因而流经 ab 的电流方向为自 b 向 a ，但是通过 ab 位置的感生电场却是由 a 至 b 的。这又如何理解呢？



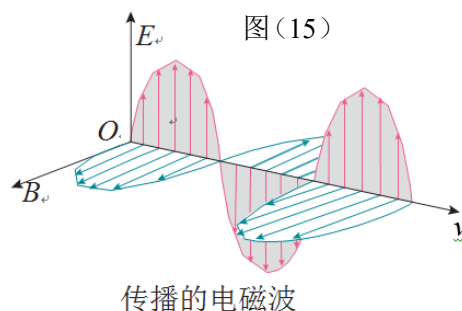
经过在前面对模型的分析后，不难发现线框中的 ab 边处的感生电动势 E_1 比 cd 边的感生电动势 E_2 小（从感生电场的强度比较可得出）。因而，最终在线框中形成逆时针的电流。现在可以看出，此情况下的棒 ab 中的电流方向与感生电场的方向相反！当然，当 ab 边与 cd 边互换位置时， ab 棒中的感应电流的方向与感生电场的方向是一致的。

4.3 关于空间某点的电场方向与磁感应强度方向的关联性联想

图（15）是高中教材《物理》“选择性必修 第二册”和大学教材《电磁学》中都使用的关于电场强度、磁强应强度和电磁波的传播速度三者之间的矢量图关系。

通过该图，我们可以看到上述三者某时刻在空间任意一点的强度和方向都是确定

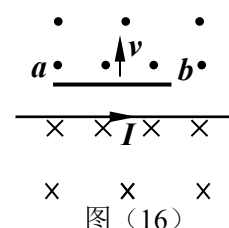
的！且某点的磁感应强度与电场强度的相位差为 90° ，这一点由图中二者的垂直关系得以体现。此图也表述了：空间某点的电场强度与该点的磁感应强度变化情况存在一一对应的关系，而不是由人为选取的“面积”所决定！也可以说，空间中没有磁场的位置就不会出现感生电场！



4.4 利用“动生”佐证“感生”结论

事实上，关于 a 、 b 两点的电势高低的问题，可以利用“动生”电动势的特点给予佐证。

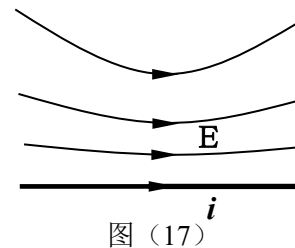
由于随着直线电流的减弱， ab 棒所在位置的磁感应强度逐渐减弱，这可以理解为 ab 棒在恒定电流 I 的磁场环境中通过“远离”直线电流来实现所处位置的磁场的减弱。（如图 16 所示）。这样，根据动生电动势的特点，不难得出同样的结论： $\varphi_a < \varphi_b$ 。



至此，A 老师的问题得以解决，笔者也在探究的过程中有所收获！

4.5 模型联想。

若直线电流不是“无限长”，在电流减弱的过程中产生的感生磁场又是怎样呢？笔者想，这种情形下，空间各处的磁感应强度不再随着到电流的距离而呈线性变化，其感生电场线一定会弯曲并使两端延伸至无限远，最终闭合感生电场线（如图 17 所示），但具体情形要复杂许多！



4.6 探究体会。

经过这一过程的探究，笔者得出几点体会：

- (1) 感生电场与静电场不同，在电场线上没有电势的变化。
- (2) 空间中的感生电场情况（方向、强度）与该处的磁感应强度的变化情况有关，不能以人为选取“面积”为根据。
- (3) 导体在感生电场的作用下出现的电势高低是由于其两端堆积的电荷所产生的“静电场”导致的。

【感想】在教学、教研实践中，有些问题的本质需要经过探究、学习、合理构建模型才能认识、理解规律的本来面目。