

阿拉果铜盘实验与感应电能表的转动机理比较分析

黄绍书 蔡 阳

(六盘水市第23中学, 贵州 六盘水 553001)

摘 要: 根据法拉第电磁感应定律及右手定则、左手定则对阿拉果铜盘实验与感应电能表的转动机理进行比较分析, 指出它们转动过程中形成的感应电流存在的差别。

关键词: 阿拉果铜盘实验; 感应电能表; 转动机理; 法拉第电磁感应定律

1 问题的提出

1824年, 法国科学家阿拉果做了这样一个实验. 将一铜圆盘装在一根垂直轴上, 使其可以水平转动, 在铜盘正上方悬吊一根磁针, 所用细线质地柔软, 即使磁针旋转许多圈, 悬线都不会产生明显的扭力来阻止磁针的旋转, 如图1所示. 当铜盘旋转时, 磁针即跟着一起转动, 但时间上稍滞后一些; 反之, 当磁针旋转时, 铜盘也跟着转动, 同样时间上稍有滞后. 这就是著名的阿拉果铜盘实验.

关于阿拉果铜盘实验的转动机理, 法拉第在1831年发现电磁感应之后就已经给出是铜盘中产生径向电流所致. 关于这一史实, 有文献^[1]作了较为全面而细致的披露和说明.

众所周知, 感应电能表的转动是铝盘中产生的涡电流引起的. 但是, 铝盘中的涡电流如何产生、如何分布及怎样作用等问题, 很少有资料给出详尽的说明, 故而让人费解.

目前, 一些文献^[2-4]透露出物理教学界对阿拉果铜盘实验的转动机理似乎持有两种不同的观点, 一种观点认同法拉第给出的径向电流作用的史实, 另一种观点则认为是铜盘中产生的涡电流导致旋转. 后一种观点还往往与感应电能表的转动机理作比较.

我们认为, 阿拉果铜盘实验与感应电能表的转动机理有相似之处, 但也存在着很大的差别. 因此, 很有必要澄清.

2 两种不同的转动机理

2.1 阿拉果铜盘实验

为了便于分析, 我们将阿拉果铜盘简化为如图2所示的模型, 即将铜盘看成是由若干根铜辐

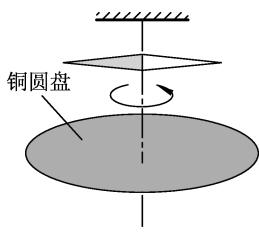


图1

条和若干个铜丝圆环构成的铜丝圆盘。

小磁针的磁场分布关于铜盘有对称关系, 如图3所示. 若某时刻, 铜丝圆盘相对于小磁针逆时针旋转时, 每一根辐条都切割磁感线, 即每一根辐条都相当于

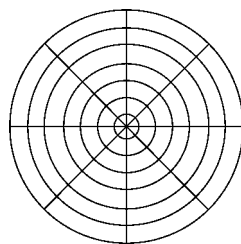


图2

多个首尾相连的电源, 而铜丝圆环相当于一个多电源复杂闭合电路的外电路. 根据法拉第电磁感应定律或右手定则, 可判断出铜丝圆盘中将产生如图4所示的电流. 又由左手定则容易分析, 圆环部分的电流产生的磁场对磁针能产生径向作用力但不能产生转动力矩, 而辐条中的电流产生的磁场能对磁针产生切向作用力从而产生转动力矩导致磁针转动.

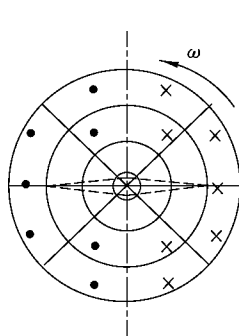


图3

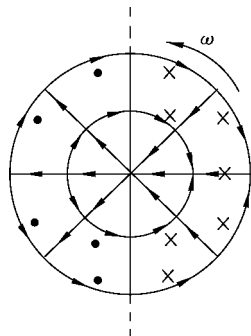


图4

对此, 也有文献^[5]将阿拉果铜盘实验作了巧妙的改进, 通过实验验证了这一论断的正确性.

2.2 感应电能表

感应电能表的驱动部分主要是由与负载串联的电流线圈和与负载并联的电压线圈组成. 其中, 电流线圈为匝数相等的两部分, 分别绕在“U”型铁芯的两柱上, 绕向相反, 以保证电流磁通在铁芯内方向相同. 电流线圈流过负载电流, 线径较大而匝

数少满足负载电流的要求,电路分析时可视为短路,建立的磁场随电流而变化。

电压线圈的线径很小而匝数多,因此可形成较大的阻抗,从而使得电压线圈的电流相位滞后于电压相位(一般在 $75^\circ \sim 80^\circ$)。电压线圈的电流很小,电路分析时可视为开路。另外,电压线圈的电流决定于所加电压,比较稳定,因而建立比较固定的磁场。

感应电能表包括单相电能表和三相电能表。根据电压线圈的结构和放置方式的不同又将感应电能表分为辐射式电能表和切线式电能表。其中,辐射式电能表的电压线圈磁通回路平面与铝盘径向平行,而切线式电能表的电压线圈磁通回路平面与铝盘径向垂直。这里仅以辐射式单相电能表为例,分析感应电能表的转动机理。

如图 5 所示是辐射式单相感应电能表的结构简图。工作过程中,设交变电源给电流线圈和电压线圈提供的电压为

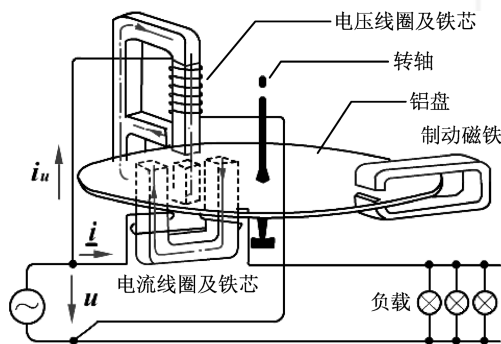


图 5

$$u = U_m \cdot \sin \omega t = U_m \cdot \sin \frac{2\pi}{T} t.$$

式中, ω 为交变电压的角频率, T 为交变电压的周期, U_m 为交变电压的峰值。

在 $0 \sim \frac{T}{4}$ 时间内,电流线圈和电压线圈在铝盘

中引起的磁通 Φ_i 、 Φ_u 分布如图 6 所示。那么,根据法拉第电磁感应定律可知,电流磁通和电压磁通将分别在铝盘中产生涡旋电流 I_i 和 I_u 。由左手定则, I_i 与电压磁通 Φ_u 相互铰链形成向左方向的电磁力 f_i , I_u 与电流磁通 Φ_i 相互铰链形成向右方向的电磁力 f_u 。 f_i 使铝盘产生逆时针力矩 m_i , 而 f_u 使铝盘产生顺时针力矩 m_u , m_i 和 m_u 共同作用即为铝盘转动的驱动力矩 M_Q 。同理可分析其他时间段的驱动力矩。理论证明,铝盘驱动力矩大小满足

$$M_Q = K \cdot \Phi_i \cdot \Phi_u \cdot \sin \psi.$$

其中, K 是决定于电能表结构的驱动力矩常数, ψ 为

电压磁通滞后电流磁通的相位角。这一表达式说明,要产生驱动力矩,至少要有两个频率相同的磁通,且它们之间的空间位置和相位必须存在差异。

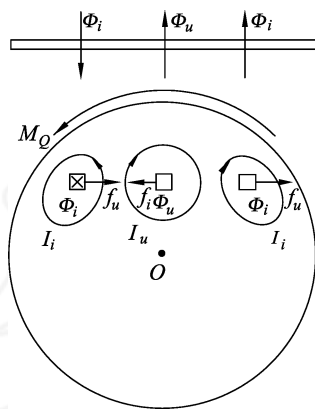


图 6

理论分析还表明,铝盘的转动方向由超前磁通指向滞后磁通。即铝盘的转动方向由涡旋电流 I_i 与电压磁通 Φ_u 相互铰链形成的电磁力 f_i 的力矩决定。由此可判断,图 6 中的铝盘是逆时针旋转的。

3 讨论

(1) 阿拉果铜盘实验与感应电能表的转动机理不相同,前者是由铜盘中产生的径向电流引起,而后者是铝盘中产生的涡旋电流引起。

(2) 一般地,由于导体与磁场之间的相对运动引起的回路磁通变化则产生径向电流,而由于磁场的强弱或方向改变引起的回路磁通变化则产生涡旋电流。

(3) 感应电能表的铝盘驱动力矩也可以从涡旋电流 I_i 与 I_u 的直接作用给出。这时,驱动力矩可表示为

$$M_Q = K' \cdot I_i \cdot I_u \cdot \sin \phi'.$$

其中, K' 仍是决定于电能表结构的驱动力矩常数, ϕ' 为 I_u 滞后 I_i 的相位角。

参考文献:

- 王洛印. 法拉第对阿拉果实验现象的研究和解释[J]. 哈尔滨工业大学学报(社会科学版), 2010, 12(4): 8-12.
- 朱文惠, 许冬保. 近 2 年全国课标 I 卷物理学史试题评析与教学策略[J]. 物理教学探讨, 2016(6): 46-49.
- 沈文炳, 张志勇. 基于 SOLO 理论的物理学史复习[J]. 物理通报, 2016(7): 119-122.
- 许冬保. 2015 年理综新课标卷 I 第 19 题的评析与启示[J]. 中学物理教学参考, 2016(1~2): 60-62.
- 黄绍书. 阿拉果铜盘实验的实验研究与分析[J]. 物理通报, 2016(7): 97-100.

(收稿日期: 2016-10-10)