

模拟电动机趣味小实验的原理分析*

张本新 锁紫琰 王芳芳 祁瑞娟

(宁夏大学物理电气信息学院 宁夏 银川 750021)

(收稿日期:2015-04-09)

摘要:看似简单的模拟电动机趣味小实验蕴含着深奥的物理学原理. 本文就两种不同的模拟电动机趣味小实验进行了原理分析及技术说明.

关键词:趣味小实验 电动机 安培力 转动力矩

1 引言

电磁现象是中学物理的重要内容,教学中已有很多有关电磁现象的趣味小实验. 就电动机而言,其模拟实验的种类多种多样,但教参中却未给出详细的原理分析. 本文以两种简单的电动机模型为例,通过分析推理磁铁产生的磁场、通电导线所受安培力、安培力产生的力矩等物理量之间的关系,解释了本实验的原理. 以此为参考可对其他类似的电磁实验现象进行原理分析.

2 实验器材

7号电池一节,圆柱形磁铁6块(10 mm × 10 mm),特殊形状的铜导线2个.

3 实验原理

3.1 线圈动

将磁铁吸附在电池一端,套上折成特殊形状的线圈,构成闭合回路,实验装置如图1所示.

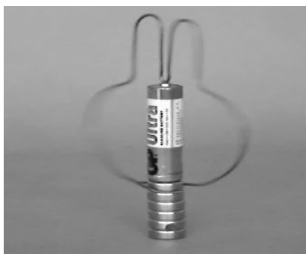


图1 线圈动实验实物图

对实验装置进行等效: 电池正极在上, 负极在下, 磁铁N极吸附在电池的负极. 线圈套在电池上, 上端连接电池的正极, 下端连接磁铁. 导线AB和CD分别与电池、磁铁构成闭合回路, 如图2所示.

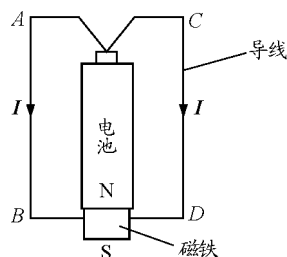


图2 实验装置等效图

竖直导线AB处于磁铁产生的磁场之中, 磁场方向如图3(a)所示, 且越靠近B点磁场强度越强, 通过导线的电流由A流向B; 竖直导线CD处于磁铁产生的磁场之中, 磁场方向如图3(b)所示, 且越靠近D点磁场强度越强, 通过导线的电流由C流向D.

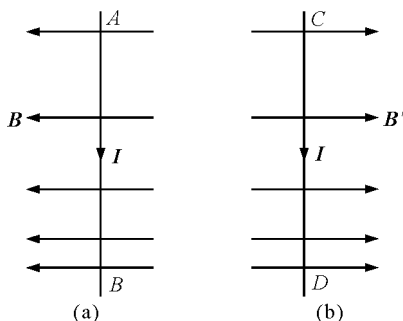


图3 导线处于磁场之中

* 2014年国家级大学生创新项目“中学物理实验视频资源库开发与建设”, 项目编号:201410749022

作者简介:张本新(1994-),男,在读本科生.

指导教师:张铁炳(1964-),女,硕士,教授,主要从事大学物理教学及研究.

导线 AB 段所处的磁场如图 4 所示(俯视图),通过的电流方向垂直纸面向里. 根据左手定则判断出它所受到的安培力竖直向上, 大小为

$$F = BIL \quad (1)$$

其中 $L = AB$, I 为电流, B 为导线所处的磁感应强度的平均值.

导线 CD 所处的磁场如图 4 所示,通过的电流方向垂直于纸面向里. 根据左手定则判断出它所受到的安培力竖直向下, 大小为

$$F' = B'IL' \quad (2)$$

其中 $L' = CD$, I 为电流, B' 为导线所处的磁感应强度的平均值.

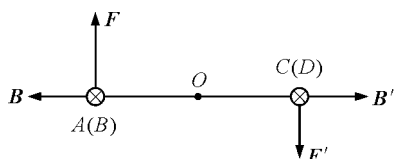


图 4 导线受力图

那么, 通电导线 AB 上所受的力 F 对 O 点的力矩由公式

$$\mathbf{M}_1 = \mathbf{r}_1 \times \mathbf{F} \quad (3)$$

得出, 其中 $r_1 = AO$, 为力 F 到转轴 O 的垂直距离. 根据右手定则, F 产生的力矩向里. 同理, 通电导线 CD 上所受的力 F' 对 O 点的力矩由公式

$$\mathbf{M}_2 = \mathbf{r}_2 \times \mathbf{F}' \quad (4)$$

得出, 其中 $r_2 = CO$, 为力 F' 到转轴 O 的垂直距离. 根据右手定则, F' 产生的力矩也向里. 由于 $AO = CO$, $F = F'$, 从而

$$\mathbf{M} = 2\mathbf{M}_1 = 2\mathbf{r}_1 \times \mathbf{F}_1 \quad (5)$$

大小为

$$M = 2r_1 F_1 = 2BILr_1 \quad (6)$$

由于 $r_1 \neq 0$, $F_1 \neq 0$, 从而合力矩不为零, 线圈便会转动, 转动方向为顺时针. 当电池与磁铁固定时, 导线的宽度与长度, 即 $2r_1$ 与 L 决定线圈转动的快慢.

同时, 在线圈转动的过程中, 导线持续受力, 从而在干电池电能充足时, 线圈会越转越快. 但线圈在接通电池形成闭合回路后, 会产生热量, 即

$$Q = I^2 Rt \quad (7)$$

随着电池电能的逐渐消耗, 线圈转动的速度会逐渐减小, 直至停止转动.

同理分析, 当干电池正极在上时, 线圈的转动方向为逆时针转动. 由于材料没变, 因此电能消耗的情况不变.

3.2 磁铁动

将磁铁吸附在电池两端, 将折成特殊形状的导线搭在磁铁上, 构成闭合回路, 实验装置如图 5 所示.



图 5 磁铁动实验实物图

对实验装置进行等效, 其中: 电池左边为正极, 右边为负极, 磁铁的 N 极吸在干电池的两端, 通电导线 AB 与圆柱形磁铁 M_1 的侧面相切, 且与底面平行, 通电导线 CD 与圆柱形磁铁 M_2 的侧面相切, 且与底面平行, 如图 6 所示.



图 6 实验装置等效图

分析 AB 与 CD 段通电导线所处的磁场, 如图 7 所示.

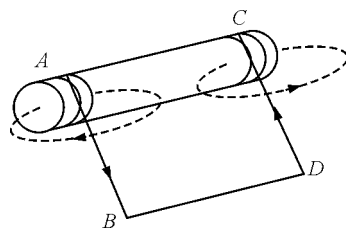


图 7 导线所处的磁场方向

对 AB 段通电导线, 磁场垂直纸面向外, 电流方向从 A 点指向 B 点. 根据左手定则, 导线将受到垂直磁场与导线所构成的平面的安培力. 由于通电导线与圆柱形磁铁的侧面相切, 且与底面平行, 从而在通电导线与磁铁的接触点, 安培力指向磁铁侧面的圆

心. 越靠近通电导线的 B 段, 就离磁铁越远, 磁感应强度也就越弱, 根据公式 $F = BIL$, 则该处所受的安培力也就越小, 如图 8 所示. 同理, CD 段通电导线所受的安培力的情况与之相同.

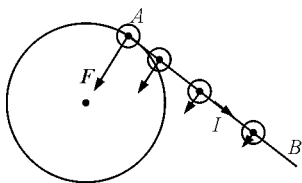


图 8 通电导线 AB 所受安培力

对磁铁 M_1 进行受力分析: 将过圆心的安培力 F 平移到圆心, 此时该力为通电导线上所受安培力的合力, 记为 F_3 , 且向水平方向与竖直方向进行力的分解; 磁铁所受的重力 mg 竖直向下; 支持力竖直向上; 摩擦力沿水平方向, 且与磁铁相切. 将磁铁的圆心(质心)记为 C , 磁铁滚过的距离记为 x_C , 如图 9 所示. 同理, 将磁铁 M_2 所受到的安培力的合力记为 F_4 , 其大小、方向与 F_3 完全相同.

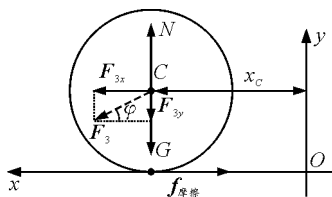


图 9 磁铁 M_1 受力分析

电池上虽然没有受到安培力, 但是电池吸附在磁铁上, 与磁铁一起运动, 从而应将磁铁与电池视为一个刚体. 刚体质量为磁铁与电池的质量和, 所受到的力为 F_3 与 F_4 的合力, 以及各自与地面接触所产生的摩擦力之和, 力矩为电池与磁的力矩之和.

在忽略了铜导线产生的摩擦力之后, 刚体的约束方程为

$$x_C = a\theta \quad (8)$$

其中 a 为磁铁的半径, θ 为磁铁滚过的角度.

质心 C 的平动方程

$$\begin{cases} m\ddot{x}_C = F_x - f \\ 0 = N - mg - F_y \end{cases} \quad (9)$$

其中

$$\begin{aligned} m &= 2m_{\text{磁铁}} + m_{\text{电池}} \\ f &= 2f_{\text{磁铁}} + f_{\text{电池}} \end{aligned}$$

$$F_x = 2F_{3x} = 2BIL \cos \varphi$$

绕质心 C 点的转动方程

$$M = J\alpha \quad (10)$$

其中, M 为刚体所受的合外力矩, J 为刚体的转动惯量, α 为刚体的角加速度. 在此我们认为, 刚体按一定规律分布的质量, 在转动中等效于集中在某一点上的一个质点的质量, 此点离轴线的距离为 k , 刚体对该轴线的转动惯量与该等效质点对此同一轴线的转动惯量相等^[1], 即 $J = mk^2$. 又由于 $M = fa$, $\alpha = \ddot{\theta}$, 从而得

$$fa = Mk^2\ddot{\theta} \quad (11)$$

联立方程(8)、(9)、(11) 可得

$$\begin{cases} N = mg + F_y \\ f = \frac{F_x k^2}{a^2 + k^2} \end{cases} \quad (12)$$

其中, $F_y = 2F_{3y}$ 从而得出: 当地面的摩擦因数 $\mu < \frac{f}{N}$, 磁铁滑动; 当地面的摩擦因数

$$\mu \geq \frac{f}{N} = \frac{F_x k^2}{(a^2 + k^2)(mg + F_y)} \quad (13)$$

时, 磁铁无滑滚动, 此时

$$M = \frac{2BILk^2 a}{(a^2 + k^2)} \cos \varphi \quad (14)$$

其中, φ 为安培力与地面的夹角. 正是由于摩擦力矩的作用才使刚体产生角加速度^[2].

若将磁铁与电池刚体视为一均匀圆柱体, 则 $J =$

$$\frac{1}{2} ma^2, \text{ 则式(14) 变为}$$

$$M = \frac{2}{3} BILa \cos \varphi \quad (15)$$

而 $L \cos \varphi$ 为导线与磁铁的接触点的高度. 从而通过式(15) 我们发现, 当电池与磁铁一定时, 刚体转动的快慢与刚体的半径 a 以及导线与磁铁的接触点的高度 $L \cos \varphi$ 有关.

4 结束语

相比于网络、教科书中的两块磁铁, 让整个线圈全部处于磁场中, 需要用电刷来转换线圈中电流的方向的电动机模型, 本电磁实验模型只用一块磁铁,

(下转第 91 页)

2) 将瓶盖中心挖一小孔,使牛奶吸管能够紧凑穿过;

3) 将一根细铜丝从牛奶吸管中穿入瓶中,露出吸管,并弯成一个小钩;

4) 将另一根铜丝的上端也弯折成一个小钩,并悬挂在吸管中露出来的小钩上,下端则略低于塑料瓶侧壁开口下端;

5) 将强磁体放入大饮料瓶内底部正下方,并将浓食盐水缓缓倒入饮料瓶中;

6) 将铝片弯折,挂在雪碧瓶开口处下沿,铝片下端浸入浓盐水中;

7) 铝片和瓶盖上方露出来的铜丝作为电动机的两个接线柱,接入电路即可。

(3) 使用方法.

1) 将磁铁放入雪碧瓶底的下中央,并将小的圆形磁体朝上;

2) 将已配置好的浓食盐水从侧面开口处沿雪碧瓶内壁缓缓倒入其中,把细漆包线从开口处伸入,并与上方的挂钩挂好.

3) 从雪碧瓶口调整瓶内下端细漆包线浸入食盐水中的深度,约为 2 cm,并大体位于瓶内的正中央.

4) 将 6 V 电池接入,一端接到铝皮,一端接入瓶口线头.接通电路,可见下端的细漆包线在食盐水中绕着圆形磁体转动.

(4) 此方案不但可以再现世界上最早的电动机,而且还可以探究通电导体在磁场中受力方向与

哪些因素有关.

通过自制教具,再现一段历史.从教具及其相应实验中去体会探索者的科学思想、科学方法、科学态度和科学精神,这不正是新课程标准提倡而现实教学过程中常常缺少的维度吗?

综上所述,以上所举 3 个案例,以食盐水为核心器材(资源),分别从概念规律建立、综合实践活动开发、物理学史再现等 3 个典型角度进行了自制教具系列化的呈现.其实,自制教具系列化,不但可以根据某一核心器材(资源)进行系列化,而且还可以从知识层面对某一章节、板块进行系列化,根据学生的个性特点进行系列化或者根据物理学史进行系列化等等.另外,不同视角的自制教具系列化彼此之间不是独立的,而是彼此交叉渗透的.自制教具系列化是为了更好地服务于“学”与“教”.总之,自制教具系列化具有丰富的内涵和外延,有待于我们去进一步研究讨论.

参 考 文 献

- 1 苏科版物理 8 年级(上册).南京:江苏科学技术出版社,2014.39 ~ 41
- 2 吴小兵,王秀玲,张耀生.巧用食盐水改进冰熔化实验.物理通报,2011(3):48
- 3 王秀玲,吴小兵.巧用食盐水自制手提冰箱.实验教学与仪器,2012(6):46
- 4 物理课程标准(2011 版).北京:北京师范大学出版社,2012
- 5 左卷健男.趣味物理实验(下册).北京:中国民族摄影艺术出版社,2005.163

(上接第 87 页)

磁铁产生的磁场的对称轴与转轴重合,且导线中的电流方向始终不会变化.从而使实验更简洁,同时在分析安培力、力矩等相关原理时也更为方便,利于操作及教学.

除了线圈动的实验之外,本实验还加了一个磁铁动的实验.从而打破了学生认为电动机只能是线圈动的固有思维,也使学生对电磁现象的相关原理有了更为深刻的理解.

对于线圈动的实验,要是能在电池的上下两端加以同等的磁铁,不但可以使线圈受力更大,实验效果更明显.而且可以使线圈处于匀强磁场中.这样便可以用仪器测量安培力,算出力矩,进而定量分析实

验结果.这时,也使线圈动与磁铁动这两个实验的实验仪器尽可能相同,便于这两类实验的对比.

在实验操作中发现,虽然 5 号电池可以提供更大的电流,且半径更大,但相对的质量,以及随之而来的摩擦力也更大,反而影响了实验效果.通电铜导线不宜过粗(直径以 2.5 mm 左右为宜)、过长,接触面应尽量光滑,以减少摩擦,建议使用玻璃作为接触面.磁体应选磁性较强的小磁铁.

参 考 文 献

- 1 周衍柏.理论力学(中册).北京:高等教育出版社,1999.130 ~ 131
- 2 漆安慎,杜蝉英.力学(中册).北京:高等教育出版社,2005.238 ~ 239