

液膜电动机研究

于雪晴, 车广顺, 周凯, 孙宇伽, 龚佳敏, 王春亮

(东北师范大学物理学院, 吉林省长春市, 邮编: 130024)

摘要: 液体薄膜在生物物理和医学检测上等诸多领域都有广泛的应用, 因而液体薄膜的动力学操控也成为一项重要的研究课题。液膜可在外加电场和电泳电压下发生转动, 并且液膜旋转的方向和速度可通过外加电场和电泳电压来控制。这种可控的电致流动现象可成为微型离心机、马达等新型器件的物理基础。这篇论文用非常简单的材料制作了液膜电动机的模型, 观察得到了良好的旋转现象, 并定性研究了液膜成分、面积及不同电泳电压、电场对液膜旋转的影响。

关键词: 液膜发动机; 电致旋转; 涡旋; 微流

中图分类号: (O441.6) 文献标识码: A

Investigation on liquid film motor

YU Xueqing, CHE Guangshun, ZHOU Kai, SUN Yujia, GONG Jiamin, WANG Chunliang
(School of Physics, Northeast Normal University, Changchun, Jilin, City Zip Code: 130024, China)

Abstract: Liquid thin film has extensive applications in fields such as biological physics and medical tests. As a result, the dynamical control of thin films has become an important topic. Rotating vortexes have been observed in liquid films driven by an external field and an electrolysis voltage. Moreover, the direction and velocity of rotations can be controlled by the field and voltage. Such electrically controlled rotations can lead to the development of novel devices such as micro centrifuge and motors. In this paper, a liquid thin film motor is made with simple materials. Obvious rotations are observed, and the relative effects of ingredient, size, external field, and electrolysis voltage have been qualitatively analyzed.

Keywords: liquid film motor; electrically induced rotation; vortex; micro fluid

将附着在边框上的液体薄膜放在平行于膜面的电场中, 并使液膜通过电流, 在一定条件下, 液膜会发生旋转, 并且旋转的方向和速度都受到外加电场和电流的影响。这种现象常被称作“液膜电动机”, 在物理、医学、工程等诸多领域都有潜在的应用价值, 因而引起了人们的关注。同时, 这种现象的观察并不需要十分专业的设备, 用一些初等的电学设备和器材即可实现, 很适合大学生和高中生等年轻人来研究。因此, 这个题目也被选为 2015 年第 28 届国际青年物理学家竞赛 (IYPT) 的题目。这篇论文采用普通物理实验室常见的电学设备和器材, 制作了液膜电动机, 并分析了电致旋转的物理机制, 研究了相关的影响因素。

1 实验装置及制作过程

实验装置如图 1 所示: 在框架的范围内有液体薄膜; 外电场和电泳电流由两个直流电源提供, 这两个电场的方向互相垂直, 但都平行于薄膜所在的平面。形成液膜所需的框架用厚度约 1mm 的硬质

塑料板制作。实验时, 将框架蘸入丙三醇水溶液, 洗洁精水溶液, 洗衣液水溶液等不同种类液体中, 小心取出后, 框架中即可形成薄膜。我们选用零电压开关 (Zero Voltage Switching, 简称 ZVS) 电源来产生液膜电动机所需的外电场。这种电源常被应用于驱动火花隙特斯拉线圈等装置, 可输出 10000V 至 20000V 的直流高电压。产生电泳电流的电源为一个输出电压在 0~40V 连续可调的直流稳压电源。

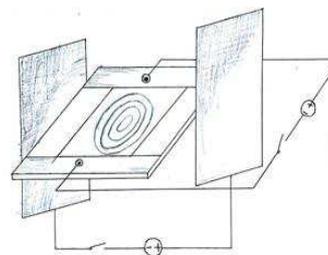
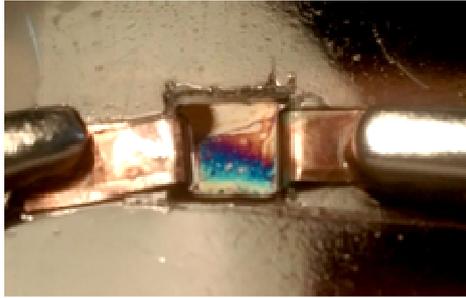


图 1 液膜电动机装置示意图

2 电致旋转现象观察

当加载到液膜上的外电场和电泳电流达到一定

强度时，液膜会在边框内形成旋转的同心圆环，且旋转的方向为 $E_{ext} \times J_{el}$ 。图 2 是一个典型的液膜电动机工作时的情形，具体参数如下：液膜的面积为 5mm*5mm，电泳电压为 40V，外电场电压为 20000V。通过干涉条纹的颜色可估算出液膜的厚度在数百纳米至一微米之间。实验中可明显看出液膜中的各同心圆环旋转的角速度不同，液膜靠近中心的质点角速度比周边质点大。同时，液膜的各同心圆环呈现出不同的颜色，由此可知它们的厚度并不相同。



(a)



(b)

图 2 单个正方形液膜旋转图样 (a) 未旋转的液膜；(b) 旋转的液膜

为了研究液膜电动机的动力学性质和影响因素，我们通过改变外电场电压和电泳电压条件，得到下列结果：

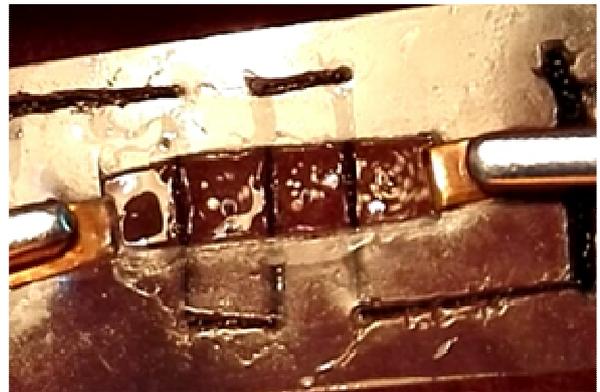
1. 固定外电场强度，往往在所加电泳电压很小，电流为约 10 微安时，液膜便开始旋转，且起初旋转十分缓慢，观测不到明显的未转与转的分界。
2. 固定外电场强度，随着电泳电压的增大，液膜旋转逐渐变快。反之固定电泳电压，液膜旋转也随外电场强度增大而变快。
3. 固定外电场强度及电泳电压，改变电场极板与电极夹角，夹角大的液膜转速更快，在夹角为九十度时达到极值。

这些结果表明，电致旋转现象在很小的电泳电场的作用下即可产生，且液膜的旋转对电泳电压的大小和方向都非常敏感。

当我们采用矩形边框，并逐渐增加液膜的长宽比时，可得到如下结果：当长宽比较小时，液膜旋

转方式同正方形类似，出现一个圆心，成多圈同心圆角矩形；当长宽比增加到一定程度(约为 6:1)时，会出现两个甚至多个旋转方向相同的漩涡区域，各漩涡区域距旋转中心距离相同处旋转速度也基本一致。

我们还用较细棉线对塑料边框进行分割，则分割形成的各部分会分别以其中心为圆心发生旋转，且各部分液膜旋转方向相同(如图 3(a)所示)。因边框在蘸取液膜时，上面会残留有少许液体，我们观察到被分割的某些部分液膜破裂时，其余部分仍能发生旋转，且方向速度均不发生改变(如图 3(b)所示)。



(a)



(b)

图 3 棉线分割的多个液膜旋转 (a) 各部分液膜同向旋转；(b) 部分液膜破损时，剩余部分不受影响

为了观察薄膜形状对旋转的影响，我们尝试了将液膜边框换作圆形，但并没有观察到液膜的旋转有明显不同。与正方形边框类似，仍然是多圈同心圆。只是方形液膜边缘附近同心圆趋近于圆角方形。

我们用不同材料、浓度的液膜，包括 10%、20%、30% 甘油水溶液以及洗洁精溶液、洗衣液溶液，均观察到了类似的现象。可见液膜电动机的旋转对常见材料的种类和浓度并不敏感。

3 结果讨论

液膜的电致转动现象可能源于下列 2 个因素:

1. 电致电荷移动

电荷移动的机理如图 4 所示:

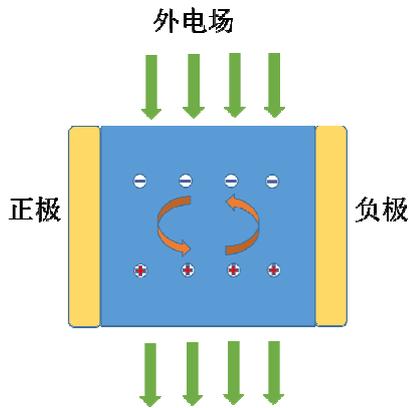


图 4 电致电荷移动原理示意图

我们所用的薄膜具有一定的导电性, 因此薄膜里应该存在可以移动的正负电荷。在自然状态下, 正负电荷均匀分布在薄膜内。当薄膜处于外电场作用下时, 正负电荷会沿外电场方向产生分离。当薄膜接入电泳电压后, 正电荷会产生正极→负极的移动, 而负电荷产生负极→正极的移动。当外电场和电泳电压共同作用于薄膜时, 正负电荷不断发生分离、移动的过程。这个两个过程作用的结果, 将使电荷产生方向为 $\vec{E}_{ext} \times \vec{J}_{el}$ 的旋转, 进而带动薄膜产生相应的旋转。

2. 极性分子取向变化

液膜电动机实验中常用的肥皂、甘油、水等均属于极性分子, 在外加电场的条件下可能会发生取向极化和电子位移极化, 进而产生如图 5 所示的物理过程:

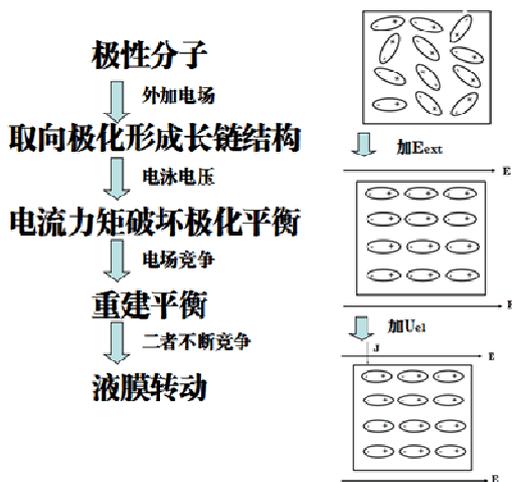


图 5 极性分子取向变化示意图

液膜中的极性分子由于极化将发生转动并形成长程有序的链状结构, 分子间的运动会发生相互影响牵制。当我们在其中通以电泳电流时, 电流会对极化分子产生力矩的作用从而破坏极化平衡, 而长程有序的链状结构分子间的互相牵制使得稳定不容易被破坏, 会保持链状结构发生运动, 在不断破坏平衡与重建平衡的竞争中, 液膜开始转动。

上述两种机制都可以令液膜产生旋转, 我们认为在液膜中这两种作用都可能存在, 但对于不同的液体, 每种机制的比重会不同。

3 结论

附着在边框上的液体薄膜在外加电场和电泳电压的共同作用下, 能以同心圆环形式发生旋转, 且旋转速度可通过电泳电压来有效控制。液膜电动机可有不同的变体, 例如用棉线分割液膜成多部分, 各部分仍会旋转且旋转方向相同。

液膜电动机具有一些独特的性质, 可在此基础上研发一些微型仪器。例如, 直流液膜电动机的旋转特性可被应用于离心技术。将待离心的液体物质制成液膜, 利用液膜各处角速度的不同, 可充分对其进行离心。此离心方法较适于成分复杂液体的离心, 如血液, 细胞器液的离心等。

用电学实验室常见的仪器和简单材料可以制成液膜电动机, 常见的洗衣液、洗洁精等多种溶液都可以用作液膜电动机的工作物质。因此, 液膜电动机可作为大学生、中学生探索性实验的内容, 激发他们进一步学习的兴趣, 锻炼他们进行科学探索的能力。

参考文献:

[1] A. Amjadi, R. Shirsavar, N. Hamedani Radja, and M. R. Ejtehadi. A liquid film motor [J]. *Microfluid and nanofluid*, 2009, 6(5): 711-715.

[2] E. V. Shiryaeva, V. A. Vladimirov, and M. Yu Zhukov. A liquid film motor [J]. *Phys. Rev. E*, 2009, 80(4): 041603.

[3] Zh.-Q. Liu, Y.-J. Li, G.-C. Zhang, and S.-R. Jiang. Dynamical mechanism of the liquid film motor [J]. *Phys. Rev. E*, 2011, 83(2): 026303.

[4] 刘中强. 复杂流体中电液体液膜电致流动动力学特征研究[D]. 中国矿业大学(北京), 2012.