

参赛队员姓名： 陈梓墨 费云和 何倍宁

中学： 南京外国语学校

省份： 江苏

国籍/地区： 中国/南京市

指导教师姓名： 熊波 潘志民

指导教师单位： 浙江大学

南京外国语学校

论文题目： 电磁炉沙画的证伪研究

电磁炉沙画的证伪研究

陈梓墨 费云和 何倍宁

(南京外国语学校, 江苏, 南京, 210008)

摘 要

学习电磁理论时,我们在网上看到一段非常有趣的视频:在家用电磁炉上铺一层细沙,打开电磁炉,金属小球会在细沙上发生一定的运动,运动轨迹俨然一幅图画,称为电磁炉沙画。我们对其背后的物理原理非常好奇。我们找来实验材料,却惊讶地发现:无论在什么样的条件下,金属球均不能实现有规律的运动!

为了搞清楚问题所在,我们利用磁强计和铝箔纸等实验器件,搭建了多组相关实验:首先验证了电磁炉在开启时,确实是有变化的磁场产生,使得铝箔纸等宏观物体产生明显的运动,证明电磁炉是能正常工作的。为探究金属球为什么不能规律运动,我们展开定量实验探究,控制包括铝箔纸的长度和宽度在内的相关变量。我们惊奇地发现:在电磁炉驱动下,存在一个明显的阈值条件(见下图左),这是已有文献中都没有提及的现象。

我们进一步建立了基于电磁感应现象的环形电流模型。通过理论分析,我们终于搞清楚,由于铝箔纸结构中存在的等效电阻和等效电感,使得产生的感生电流与外界电磁场之间存在一个 $0 \sim \frac{\pi}{2}$ 之间的超前相位,故而铝箔纸存在一个向上的安培力。但只有当铝箔纸的半径大于一定阈值的时候,该安培力才能超过铝箔纸本身的重力,从而使物体出现悬浮的现象(见下图右)。我们设计了一系列实验验证该

环形电流理论的正确性；同时，进一步设计控制变量实验，定量讨论了铝箔纸内径变化、外径变化、等效重力、以及外界磁场大小变化对于该现象的影响，并与理论模型一一验证。最终得出的结论是：在家用的微波炉中，因安培力无法超过金属球的重力，从而金属球无法在沙画上出现悬浮的状态，故不能在电磁的驱动下形成沙画。



(左) 实验测量发现存在面积的临界阈值 (右) 理论预测半径临界阈值的存在

本文的创新点主要集中于以下三点：

1、通过详细的实验和理论分析，我们确认了网上流传的视频并非真实场景的再现。于是我们进一步优化了实验条件，并最终再现了真正的现象；

2、我们发现这种电磁感应现象中存在很有意思的阈值条件，这在文献中未见报道。我们探究了具体的阈值边界，并结合电磁感应理论解释了该阈值条件的存在；

3、根据理论指导，我们利用铝箔纸的剪裁方案，能够同时控制其在平面内的定向运动和转动，从而实现电磁驱动的 3D 运动，有望解决电磁驱动搅拌转子效率不高、液体分层不均匀等问题，可以考虑应用在制药、化工等方面。

关键词：电磁感应，安培力，涡流，相位

目录

摘要

1 引言和背景	4
2 预实验	4
2.1 搭建实验平台	4
2.2 反常的实验结果	6
3 问题分析	7
3.1 磁场的直接测量	7
3.2 电磁感应的验证	7
3.3 球形铝箔纸的悬浮	8
4 定量实验探究：发现阈值条件	9
4.1 铝箔纸的面积	9
4.2 铝箔纸的形状	10
4.3 铝箔纸的运动过程	12
5 理论模型与实验验证	15
5.1 感生电流模型	15
5.2 环形电流的实验验证	20
5.3 方形铝箔纸的环形电流控制	21
5.4 面电流对于运动速度的影响	23
6 影响参数讨论	25
6.1 改变外径大小	25
6.2 改变内径大小	27
6.3 改变等效重力	26
6.4 改变激发电磁场强度	30
7 扩展实验	28
7.1 球形铝箔纸的漂浮	29
7.2 控制铝箔纸的转动	33
7.3 控制多重环形电流的产生	34
7.4 不同的烹饪模式	35
8 结论与创新点	35
参考文献	37
致 谢	38

1 引言和背景

电磁学的萌芽出现于公元前 28 世纪，在公元 18 世纪得到充分发展。作为经典物理体系中一个较“新”部分，其原理与应用一直是科学家和社会各界关注的热点问题。生活中也常常有其踪迹，如日常使用的微波炉、电磁炉等即是以电磁学为原理，给我们的生活带来不少便利。

在某知名视频网站上，我们偶然看到了一个播放量相当高的电磁学实验科普视频（B 站视频编码 BV1Fg411Q7MD）——将圆盘、细沙和金属小球放置于工作中的电磁炉上，小球即可以自行运动，画出一幅沙画（图 1.1）。我们对这个实验产生了浓厚的兴趣，因其装置简单，且原理似乎不复杂：即电磁炉在打开过程中，圆盘上方空间中出现了变化的磁场，该磁场在金属小球中激发了感生的电流 [1,2]，从而驱动小球运动。

虽然实验和原理貌似简单，但能出现美丽的沙画，这个效果非常神奇。我们尝试复现该实验，但并不能重现原视频，即无法让电磁炉驱动小球，做出美丽的沙画。为探究原因，我们进行了系统的研究。



图 1.1 视频中电磁炉驱动下，金属小球自由运动，最终形成沙画的过程

2 预实验

为了观察电磁炉上小球的运动情况，我们首先在家里尝试进行了初步的预实验。详细的过程和对应的实验现象将在下面描述。

2.1 搭建实验平台

为了更好地复现视频中的实验效果，我们采购了一台家用电磁炉（图 2.1.1），不同尺寸的钢珠（如图 2.1.2 所示，包括实心钢珠、空心钢珠和带孔钢珠，会形成不同大小和分布的感生电流），不同材质的圆盘（如图 2.1.3 所示，包括玻璃、小麦秸秆、不锈钢和密胺材质的，因为不同材料的磁性不同，从而影响磁场的强度），以及不同目数的石英砂（如图 2.1.4 所示，石英砂的主要成分是二氧化硅，无磁性，但是颗粒大小的不同会对小球运动的阻力产生影响）。



图 2.1.1 普通的家用苏泊尔电磁炉



图 2.1.2 不同尺寸和不同类型的钢珠，会形成不同大小的感生电流



图 2.1.3 不同材质的圆盘，其具有不同的磁性，会影响交变磁场的强度



图 2.1.4 不同目数的石英砂，无磁性，但是颗粒大小不同会影响小球运动阻力

2.2 反常的实验结果

利用上述购买的材料，我们按照视频所示的方法，进行了初步的预实验。令我们感到惊讶的是，在第一次实验中，当我们将小球放置于盛有石英砂的圆盘中，且打开电磁炉时，**小球没有任何运动趋势，这与视频内容不符。**

我们认为可能是石英砂颗粒太粗，导致小球在石英砂中移动的阻力过大。于是撤去石英砂进行再次实验，同时换用了不同材质的圆盘和不同尺寸的钢珠和磁

珠。其中，密胺圆盘和秸秆圆盘会触发电磁炉保护模式，而玻璃圆盘和不锈钢圆盘可以使电磁炉正常工作。但不锈钢圆盘经过加热极易发热、发红、变形，所以我们最终使用玻璃圆盘进行重复实验。

实验结果显示：无论我们如何改变尺寸和类型，金属小球仍在电磁炉工作时保持静止状态，如图 2.2.1 所示。这一现象出乎我们的意料，因为小球由于处在平滑的玻璃表面，运动阻力非常微弱，甚至用手指轻轻碰一下就可以让小球迅速开始滚动。这一结果说明运动阻力过大并不是影响小球运动的关键因素。

为了探究我们为什么无法复现电磁炉沙画，我们准备设计更多的实验来分析原因。

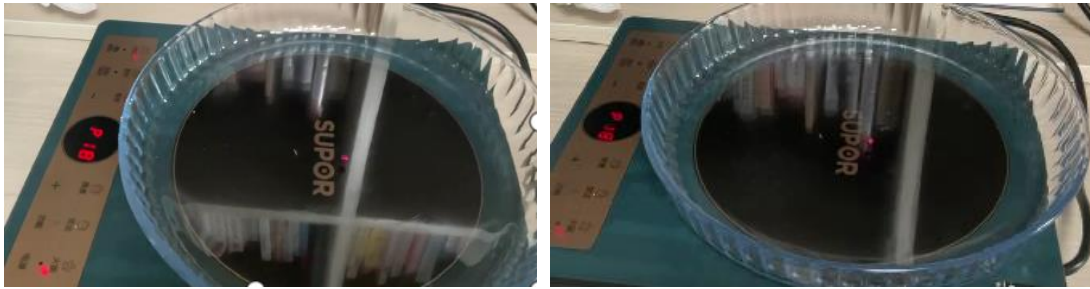


图 2.2.1 玻璃圆盘中钢珠状态，实验时间为 3s 时（左）和为 30s 时（右），小球丝毫不动

3 问题分析

3.1 磁场的直接测量

电磁炉产生的磁场是形成沙画的重要条件。为验证实验用电磁炉是否能正常工作产生磁场，我们使用测量传感器对电磁炉工作时正上方的磁场信息进行采集。我们购买了如图 3.1.1 所示的磁场传感器，其以 200Hz 的频率对探头所处空间的磁场进行测量，并用蓝牙技术传输到电脑上进行实时数据记录。



图 3.1.1 实验所用磁强计（左）以及最终测量的状态（右）

具体测量的方案如图 3.1.1 右所示：去掉所有的托盘和钢珠，然后将磁强计放在电磁炉的中心，设置好设备的蓝牙连接，并用电脑进行磁场数据记录，其结果如图 3.1.2 所示：当电磁炉没有打开的时候（红色框左边），磁场强度对应于地球的磁场，其三个分量都保持稳定，这意味着设备的正常工作状态。而当点开电

磁炉开关的时候（红色框内部），三个方向的磁场均发生了突变，这意味着此时电磁波确实激发了变化的磁场。当关闭电磁炉时（红色框右边），磁场数据重新恢复到一开始地球磁场的初值。经过多次重复实验，如图 3.1.2 右所示，我们都得到了类似的图像和数据，确定电磁炉周围存在着变化的磁场，说明我们采用的家用电磁炉是能正常工作，产生交变磁场的。

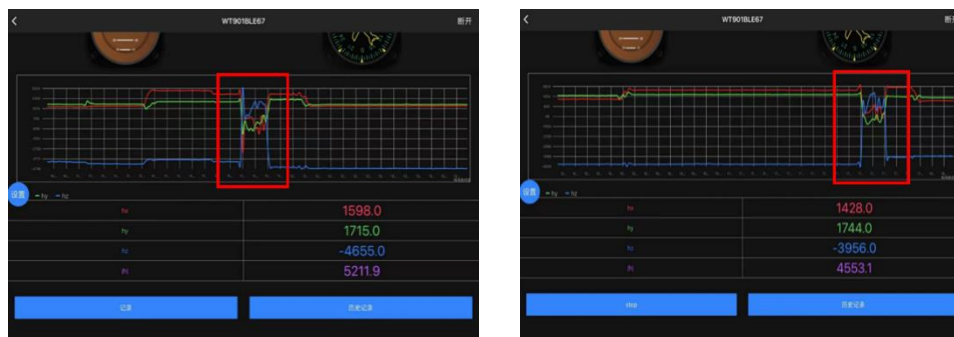


图 3.1.2 重复实验中磁场传感器所收集到的磁场信息，可以明显看到变化的磁场。

3.2 电磁感应的验证

排除电磁炉无法正常产生交变磁场这一可能因素后，我们再度陷入了迷茫。经过对理论原理的重复分析推演，我们决定先通过更为简单的实验来验证电磁感应现象，希望能从中获得灵感。

我们摒弃了原先所使用的金属小球，利用厨房中常用的铝箔纸，来检测电磁感应现象的存在。为了让实验结果稳定，我们裁剪了一块中间有纸杯口大小圆洞的铝箔纸，然后套在普通无磁性纸杯上，将整体系统放置于电磁炉中央。当启动电磁炉后，可以明显地观察到铝箔纸从一开始的静止瞬间升起，然后漂浮在空中，如图 3.2.1 所示。这就意味着，交变的磁场确实在铝箔纸中产生了感生电流，在安培力的作用下实现了悬浮。

这组实验证明了利用普通的家用电磁炉，是可以产生宏观可观测的电磁感应现象的。但为什么我们观察不到电磁炉沙画现象呢？我们接着设计了下面的实验。



图 3.2.1 铝箔纸漂浮情况，实验时间为 0s 时（左）和为 3s 时（右）

3.3 球形铝箔纸的悬浮

为了尝试复现视频中小球的运动，将实验 3.2 中可以漂浮的铝箔纸搓成了球状。为了防止实心的球状物质量过大难以运动，我们将其做成了空心球。当电磁炉打开后，空心球保持静止，没有运动，如图 3.3.1 所示。

我们继续将空心球展开并完全压扁，当电磁炉正常工作后，被压扁的铝箔纸球重新如预料浮起（图 3.3.2）。进一步地，当铝箔纸球的形态处于完全压扁和原

始展开状态之间时，它也能漂浮起来（图 3.3.3）。

这一系列实验所展示的现象，颠覆了起初我们对于小球在电磁炉上自行运动的猜想，时而运动时而静止的类球形背后显然有更深层的含义和奥秘。

于是，我们对这一物理现象进行更多的探索和深入的研究，重点进行阈值条件的探索。

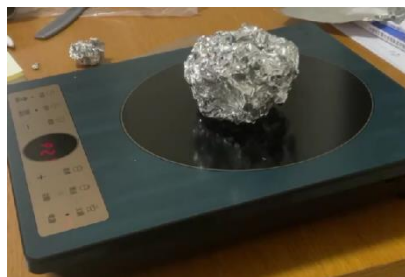


图 3.3.1 铝箔纸球在电磁炉开启之后仍保持静止



图 3.3.2 被压扁的铝箔纸球运动，实验时间为 0s 时（左）和 2s 时（右）



图 3.3.3 铝箔纸球处于完全压扁和原状态之间时的两种运动状态，静止（左）和运动（右）

4 定量实验探究：发现阈值条件

4.1 铝箔纸的面积

为发现阈值条件，我们进行定量实验研究。首先将铝箔纸裁剪成为不同尺寸的正方形，观察不同的尺寸对于实验现象的影响，其具体规格如图 4.1.1 所示，其边长包括 1cm、3cm、5cm、6cm 和 8cm。利用这五组实验对象，我们重复第 3 章中的实验操作，观察其能否体现电磁感应运动，并最终实现电磁炉驱动下的机械运动。

实验观测到的数据最终整理得到的结果如表 4.1.1 所示。从中我们可以观察到非常明显的阈值条件：即只有铝箔纸的面积大于一定数值的时候，似乎才能

激发感生电流，从而出现机械运动，同时该临界面积在 36cm^2 到 64cm^2 之间。

这个结果非常奇怪。从理论上讲，电磁炉激发的磁场对于任何尺寸的铝箔纸都应该会产生环形的感生电流，这个临界的阈值效应不太符合正常的认知。

但是实验说不了谎话，这一结果从另一个角度给出了之前为何金属小球无法运动的可能原因：小球的半径太小，就像小尺寸的铝箔纸，无法产生明显的电磁感应现象，自然也就无法运动。为了更清楚地研究这一临界阈值的现象，我们继续进行研究。



图 4.1.1 实验中裁剪得到的不同尺寸的正方形铝箔纸，从而定量验证尺寸对应实验结果的影响

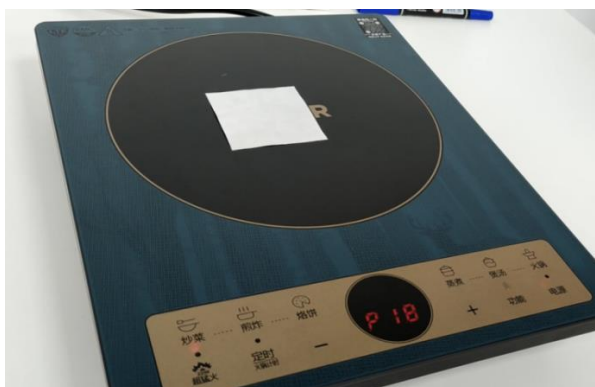


图 4.1.2 边长为 6cm 的正方形铝箔纸在电磁炉开启后，没有明显的电磁感应现象，无法在电磁炉上悬浮



图 4.1.3 边长为 8cm 的正方形铝箔纸可以在电磁炉上悬浮

表 4.1.1 不同边长和面积的铝箔纸能否悬浮的现象观察

铝箔纸边长	1cm	3cm	5cm	6cm	8cm
铝箔纸面积	1cm ²	9cm ²	25cm ²	36cm ²	64cm ²
能否悬浮	不能	不能	不能	不能	能

表 4.1.1 显示：只有高于一定的临界面积，铝箔纸才有明显的电磁感应现象。

4.2 铝箔纸的形状

在这一节中，我们将针对铝箔纸的形状进行讨论和分析。如图 4.2.1 所示，我们裁剪出 7 种面积接近、而长宽比不同的铝箔纸，利用这 7 组实验对象，我们重复第 3 章中的实验操作，观察其能否悬浮，并将实验结果整理进表 4.2.1 中。



图 4.2.1 实验使用的长方形铝箔纸规格，其面积接近，但共有 7 种不同的长宽比

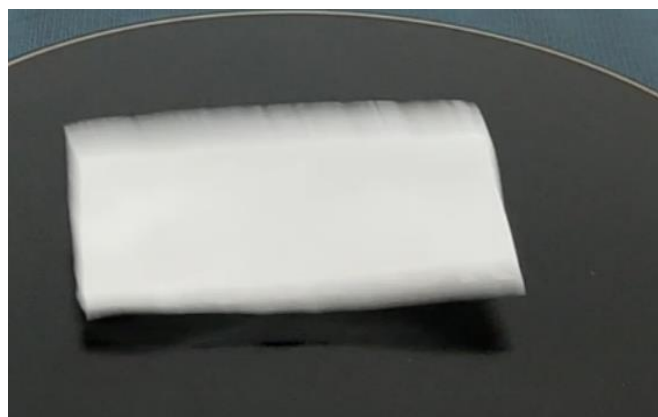


图 4.2.2 规格为 4.8cm*8.4cm 的铝箔纸可以明显的在电磁炉上悬浮

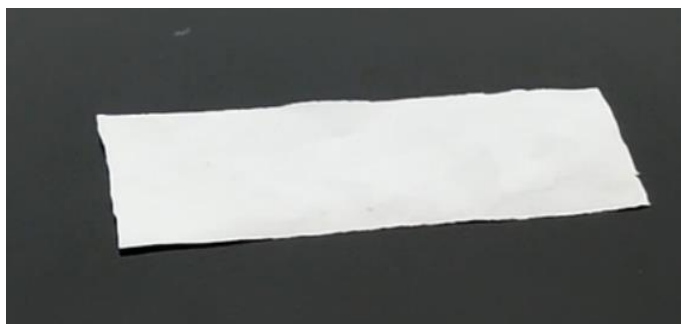


图 4.2.3 规格为 4.0cm*10cm 的铝箔纸无法在电磁炉上悬浮

表 4.2.1 不同形状的铝箔纸对悬浮状态的影响

铝箔纸规格 (cm)	6.1*6.2	5.5*7.1	5.0*8.0	4.8*8.4	4.5*8.8	4.0*10	3.0*13
铝箔纸面积 (cm ²)	37.82	39.05	40.00	40.32	39.60	40.00	39.00
能否悬浮	能	能	能	能	临界 状态	不能	不能

表 4.2.1 显示：在面积大致相同的情况下，接近方形的铝箔纸更容易悬浮。这与我们猜想的电磁感应模型相一致：靠近中心的位置磁场强度大，方形铝箔纸相较于长方形铝箔纸磁通量更大，故更容易悬浮。

结合前面两小节的实验结果，我们可以大致整理出如图 4.2.4 所示的相图：只有长度和宽度都超过一定的阈值范围，才能激发明显的电磁感应现象，从而使铝箔纸受到明显的宏观电磁力的作用，从静止状态变成悬浮状态。

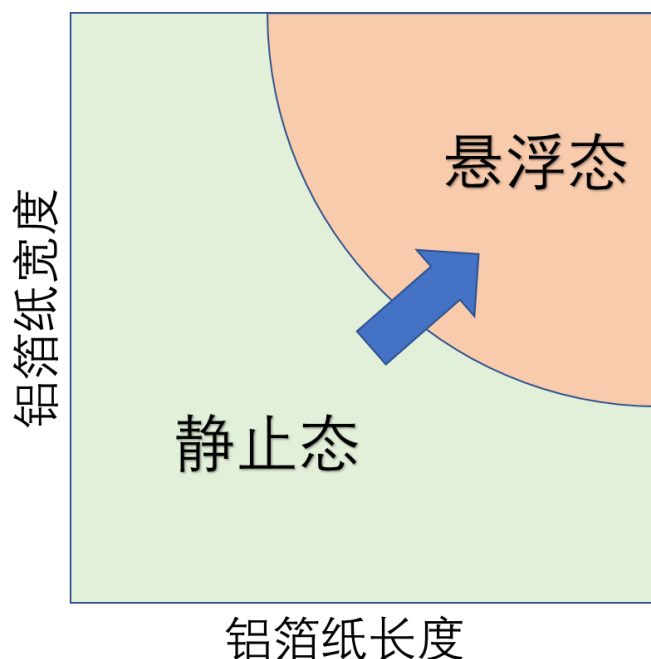


图 4.2.4 铝箔纸的几何尺寸对于电磁感应现象的影响：出现明显的跳变过程，即从静止态变换为明显的悬浮态

4.3 铝箔纸的运动过程

为了更细致地观察铝箔纸的受力状态，我们通过慢速摄像的方式拍摄了铝箔纸从静止到悬浮过程中的运动状态。在本次实验中，我们只使用了边长为 12cm，内圆半径为 1cm 的带孔铝箔纸（规格如图 4.3.1 左图），并使用文件侧边夹将其在水平方向上固定。

最终的实验结果如组图 4.3.2 所示，可以看到铝箔纸经历了如下的过程：在电磁炉启动后，铝箔纸因产生的交变电磁场受到向上的升力，但是由于其厚薄不均匀且不对称，每单位铝箔纸受到的升力也不相同，进而导致铝箔纸倾斜甚至旋转。在到达最大上升高度后，铝箔纸渐渐调整至水平状态并稳定悬浮在 5.5cm 左右的高度。在工作完一段时间后，电磁炉结束运行，电磁场瞬间消失，铝箔纸自由落体至初始状态。

从这个结果中，我们可以总结铝箔纸的受力模型，并组建完整的理论模型来解释我们观察到的实验现象，其内容见下一节。

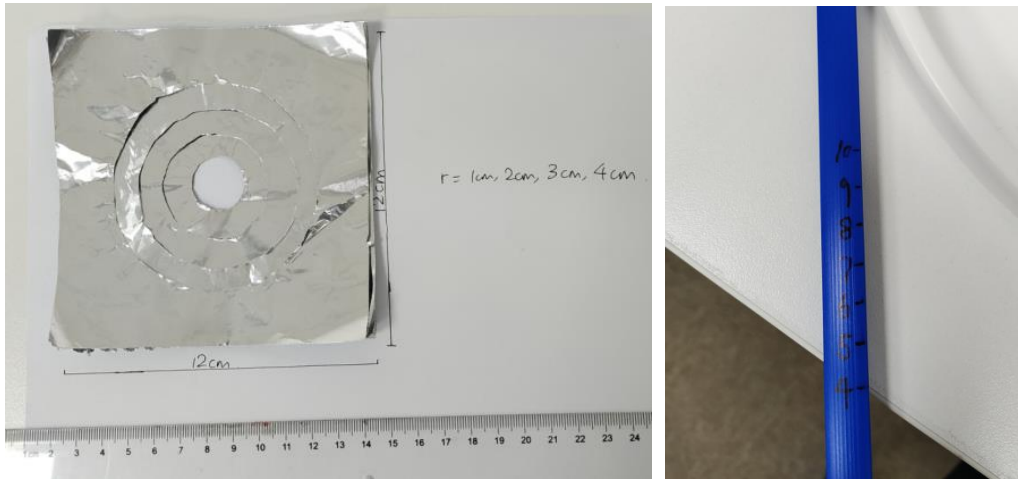


图 4.3.1 实验材料：左图：带孔铝箔纸的规格（该实验使用的为最下方孔径最小的铝箔纸）；右图：用于在水平方向上固定铝箔纸的文件侧边夹，为了方便记录我们在上面画好了刻度



图 4.3.2 铝箔纸静止（左 1）、上升（左 2）、稳定悬浮（右 2）、下降（右 1）

5 理论分析

5.1 感生电流模型

前面的分析部分中，我们已经猜想铝箔纸的运动是由于电磁感应现象，接下来，我们将实验中所使用的电磁炉简化为如图 5.1.1 和 5.1.2 所示的涡流模型[3-5]：铝箔纸看作是导体平板（蓝色块），而电磁炉激发的电磁场在空间的三个方向都有一定的分量。

为此，我们在空间中进行分解电场，其一部分垂直于铝箔，另一部分平行于铝箔，且方向由圆心指向外侧。

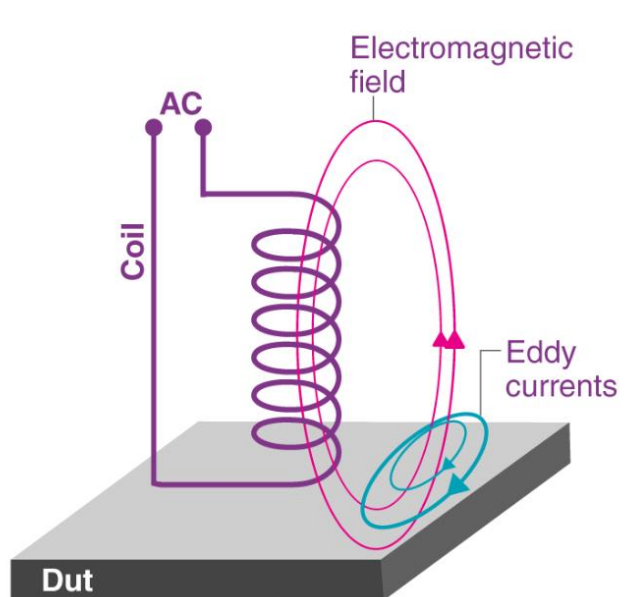


图 5.1.1 电磁炉激发交变电磁场，从而在导体平板中激发电涡流现象的原理

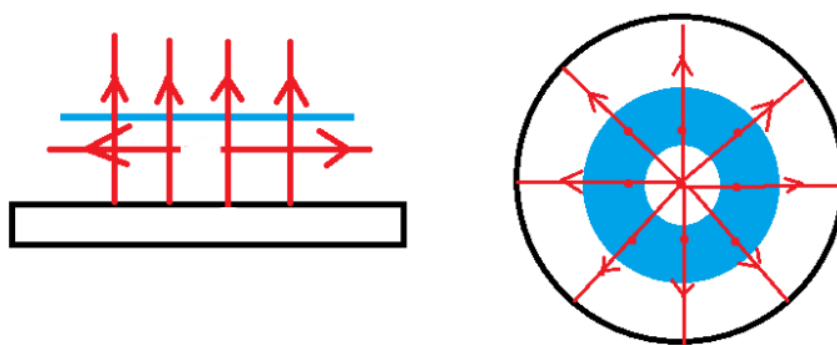


图 5.1.2 电磁炉正交电场的主视图（左）和俯视图（右）

现假设竖直方向磁感强度（仅此部分磁场贡献磁通量）随时间变化方程如下[6]：

$$B_1 = A_1 \sin(\omega t) f(r) \quad (1)$$

其中， A_1 代表磁场的幅度， ω 代表变化的频率，而 $f(r)$ 代表磁场的分布并不均匀，是沿着径向有一定的衰减的函数（这在后面的实验中得到证实）。

我们基于微元法，将铝箔纸分为一个个的圆环如下图 5.1.3 所示，针对我们所要研究的微元（蓝色部分），其包含的磁通量为：

$$\Phi = \int_0^r 2\pi r A_1 \sin(\omega t) f(r) dr \quad (2)$$

而此时磁通量变化量为：

$$\frac{d\Phi}{dt} = \int_0^r 2\pi r A_1 \omega \cos(\omega t) f(r) dr \quad (3)$$

我们可以作出 B_1 和 $\frac{d\Phi}{dt}$ 的大致图像如图 5.1.4 所示（仅一个周期，忽略系数）。由于电磁感应现象，故而天然存在一个 0.5π 的延迟。

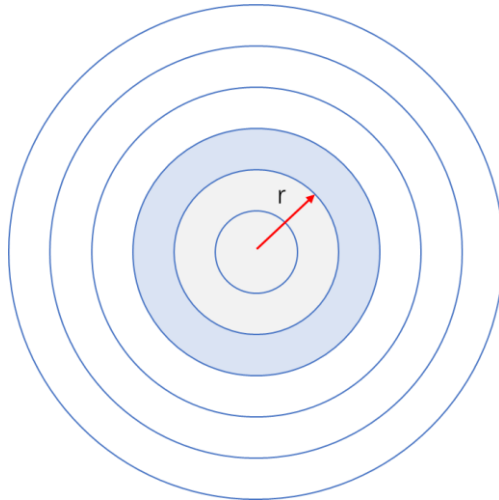


图 5.1.3 微元法划分铝箔纸

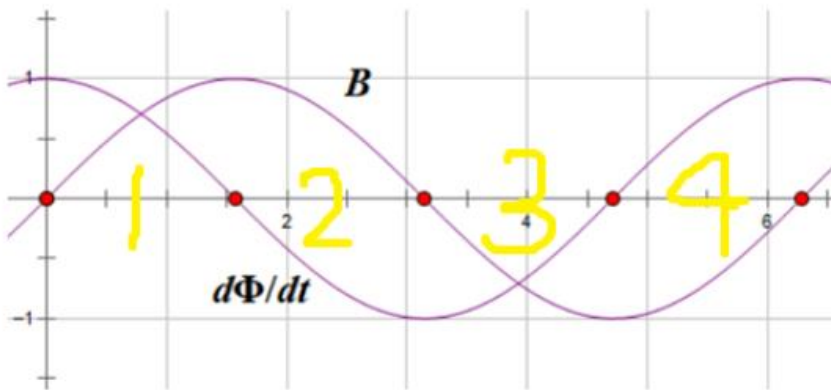


图 5.1.4 B_1 和 $\frac{d\Phi}{dt}$ 的大致像

依据电磁感应定律，感生电动势的表达式如下

$$\varepsilon = -\frac{d\Phi}{dt} = -\int_0^r 2\pi r A_1 \omega \cos(\omega t) f(r) dr \quad (4)$$

由于铝箔纸是一个均匀的导体平板，假设其面电阻率为 ρ ，则对应在该微元内的电阻为：

$$R = \rho \times \frac{2 \times \pi \times r}{dr} \quad (5)$$

同时，由于环形电流属于闭合回路，因此存在自感效应，即交变电流的值发生改变的时候，会存在感生电动势来抑制电流标量的变化。考虑到铝箔纸的形状，针对该环形结构，我们可以假设其自感系数同螺线管的自感公式如下：

$$L = \mu_0 \times \frac{S}{l} = k_0 \pi \times r^2 \quad (6)$$

其中， S 为环形内的面积， l 是铝箔纸的厚度。为了简化，我们将其统一到一个常数到 k_0 中，然后所有的变量就只剩下 r^2 。

综上所述，该环形结构的电感阻抗可表示为[7]：

$$K = R + iwL \quad (7)$$

其中， w 是激发电磁场的震荡频率。而该系统内部的感生电流即为：

$$\begin{aligned} i = \frac{\varepsilon}{K} &= -\frac{1}{R + iwL} \int_0^r 2\pi r A_1 \omega \cos(\omega t) f(r) dr \\ &= -\int_0^r 2\pi r A_1 \omega \cos(\omega t + \varphi(w, r)) f(r) dr \end{aligned} \quad (8)$$

从该公式可以看到，该电流值相对于入射的电磁场，出现了一个变化的超前相位 $\varphi(w, r)$ ，其本质是电感和阻抗的共同作用使得感生电流值的响应比入射电磁场要提前一些，与系统的振荡频率、铝箔纸的几何参数相关。在这种机制下，恒定存在的 0.5π 相位延迟得以变化，这一点对于理解实验现象至关重要，后面会讨论到。

同时，我们能看到电流值存在一个明显的径向分布。例如，假如电磁炉产生的是一个均匀的磁场，则 $f(r)$ 是一个常数 k ，则电流值随着径向逐渐增强：

同时，假设水平方向磁场强度随时间变化方程如下，在这里，由于水平方向磁场和竖直方向磁场投影方向不同，因此，带有同样的震荡频率和初始相位。

$$B_2 = A_2 \sin(\omega t) \quad (9)$$

为了简化考虑，我们这里仅考虑一个水平方向的磁场，因为针对 z 方向的悬浮运动，水平的 x 和 y 方向是等价的。考虑安培力的表达式：

$$F = B_2 \times I \times L \quad (10)$$

我们带入上面的表达式，得到最终的受力方程为：

$$F(t) = -A_2 \sin(\omega t) \times 2\pi r \times \int_0^r 2\pi r A_1 \omega \cos(\omega t + \varphi(w, r)) f(r) dr \quad (11)$$

依据左手定理，当安培力为负值时，电磁场提供的力方向向上，帮助铝箔纸悬浮；反之，当安培力为正值时，电磁场提供的力方向向下，抑制铝箔纸悬浮。

但是，由于安培力是一个随时间变化的力，所以我们还需要考虑时间平均效应，即针对上式进行时间积分得到冲量表达式：

$$P = \int_0^T F(t) dt \quad (12)$$

考虑到 $F(t)$ 表达式各项与时间的相关性，我们可以将受力进一步简化为如下形式：

$$F(t) = k_2 \times \sin(\omega t) \cos(\omega t + \varphi(w, r)) \quad (13)$$

其中， k_2 是一个合并之后的常数项， $\varphi(w, r)$ 依旧是前面得到的超前相位。我们画出来在不同的超前相位情况下，安培力随时间变化曲线如图 5.1.5 所示。

从中可以看到，假如超前相位的数值为零（图 5.1.5 第一行中的红色线条），则曲线与 x 轴围出的面积和为零，这意味着安培力在时间平均作用下的冲量为零，也就是说，电磁场会对铝箔纸产生吸引力和排斥力，但是合力为零，故而不会产生

生悬浮的作用。

当超前相位的数值增加到 $\pi/4$ 的时候（图 5.1.5 第一行中的蓝色线条），则曲线与 x 轴围出的面积和大于零，此时意味着铝箔纸会受到向上的排斥力，从而具备悬浮的可能。

当超前相位进一步增加到 $\pi/2$ 的时候（图 5.1.5 第一行中的绿色线条），曲线与 x 轴围出的面积之和达到极大值，此时铝箔纸受到最大的排斥力。

但是，当进一步增加该超前相位的时候，此时面积之和又将开始下降，尤其是当增加到 $3\pi/2$ 的时候，曲线与 x 轴围出的面积之和达到极小值，此时铝箔纸受到最大的吸引力，会被电磁力“压在”电磁炉的平板上，从而无法悬浮。

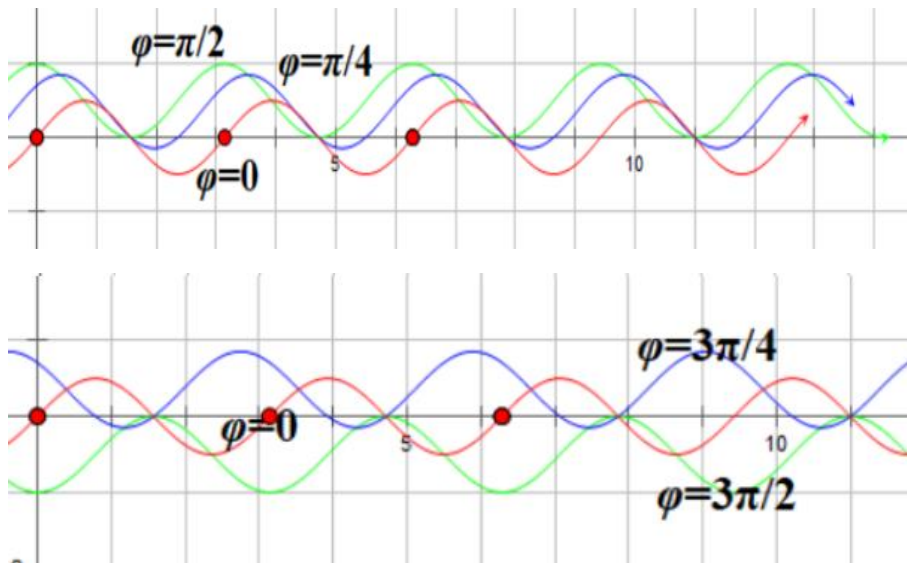


图 5.1.5 不同超前相位数值对应安培力随时间变化的曲线

在不考虑重力的情况下，可以大致画出不同超前相位数值对应的时间平均下安培力效果，如下图 5.1.6 所示，其中纵轴代表的是归一化之后的作用力，值为正的时候作用力向上，而值为负的时候作用力向下。

根据此图我们可以发现：**该超前相位的数值决定了铝箔纸的宏观受力表现。**当进一步考虑到重力的时候，悬浮效应只有在一段非常小的超前相位范围内才会实现。

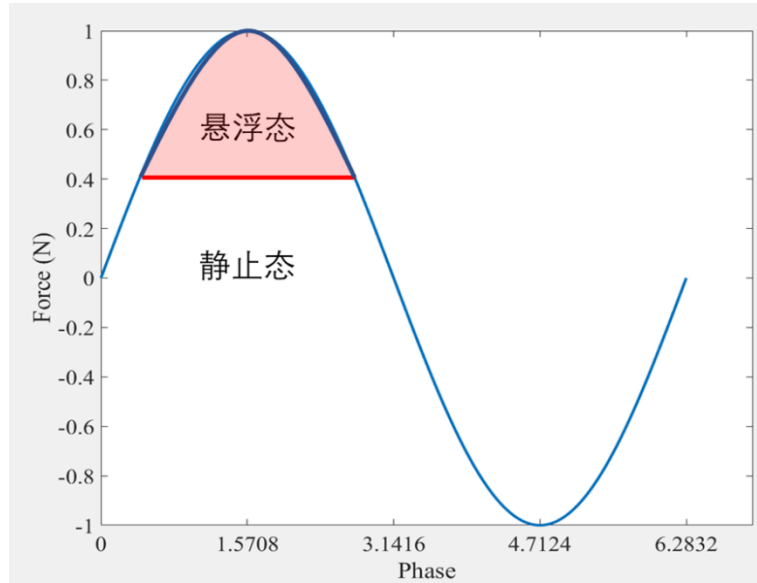


图 5.1.6 不同超前相位数值对应的时间平均下安培力变化曲线

根据前面的讨论，超前相位的数值主要是由铝箔纸的等效阻抗的比值来决定：

$$K = R + iwL \quad (14)$$

假如电感 L 为零而电阻 R 不为零，则超前相位数值为 0 ；反之，假如电阻 R 为零而电感 L 不为零，则超前相位数值为 $\pi/2$ 。而在实际的物理结构中，这两者必然都是存在的。结合前面实验中观测到的面积阈值效应，我们下面来分析相位角随着铝箔纸半径变化的规律：

$$Phase = \arctan\left(\frac{wL}{R}\right) = \arctan\left(\frac{wk_0 \pi \times r^2}{\rho \times \frac{2 \times \pi \times r}{dr}}\right) = \arctan(k_3 \times r) \quad (15)$$

将电阻和电感的表达式带入相位角的方程中，最终结果如上式所示，其中 k_3 是合并之后的常数项，而 r 则是铝箔纸的半径。假设 $k=0.5$ ，我们画出如图 5.1.7 所示的结果，可以看到，随着半径的增加，超前相位的数值单调增加，越来越接近于 $\pi/2$ ，这意味着铝箔纸受到的安培力越来越大，驱使其尽可能地悬浮。

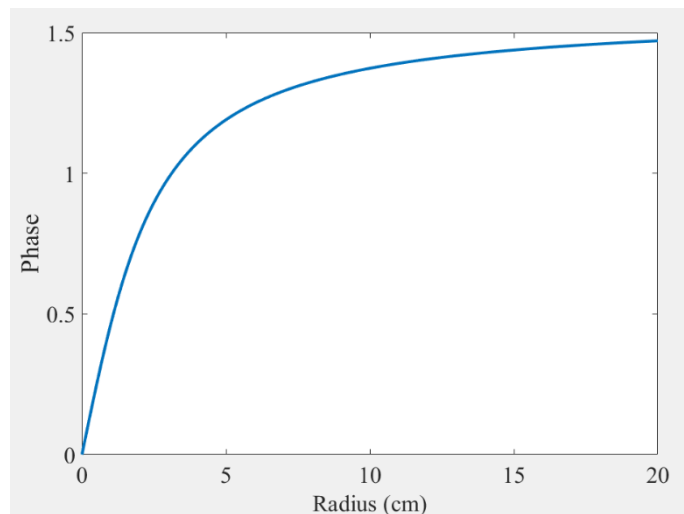


图 5.1.7 不同半径的铝箔纸所对应的超前相位数值

但需要注意的是，随着半径的增加，铝箔纸的面积也变大，此时重力也随之增加，于是，我们还需要进一步考虑安培力和重力的比值变化。如下式所示，为铝箔纸重力随半径的变化关系式，其中， k_4 为合并之后的常数项。

$$mg = k_4 \times r^2 \quad (16)$$

而结合前面的讨论，安培力随半径变化的关系式为：

$$F = k_5 \times r^3 \sin(k_2 \times \arctan(k_3 \times r)) \quad (17)$$

其中， r^3 源自于面电流的面积分表达式。随后，选择合适的常数项，我们将二者画在一张图中，如图 5.1.8 所示，可以看到：当半径较小时，重力较大，安培力较小；而半径超过一定阈值的时候，安培力超过了重力，且增长速度超过重力，此时实验中我们即观察到铝箔纸开始受力悬浮。当然实际实验过程中还会有更多复杂的变量，但是物理本质不会改变。

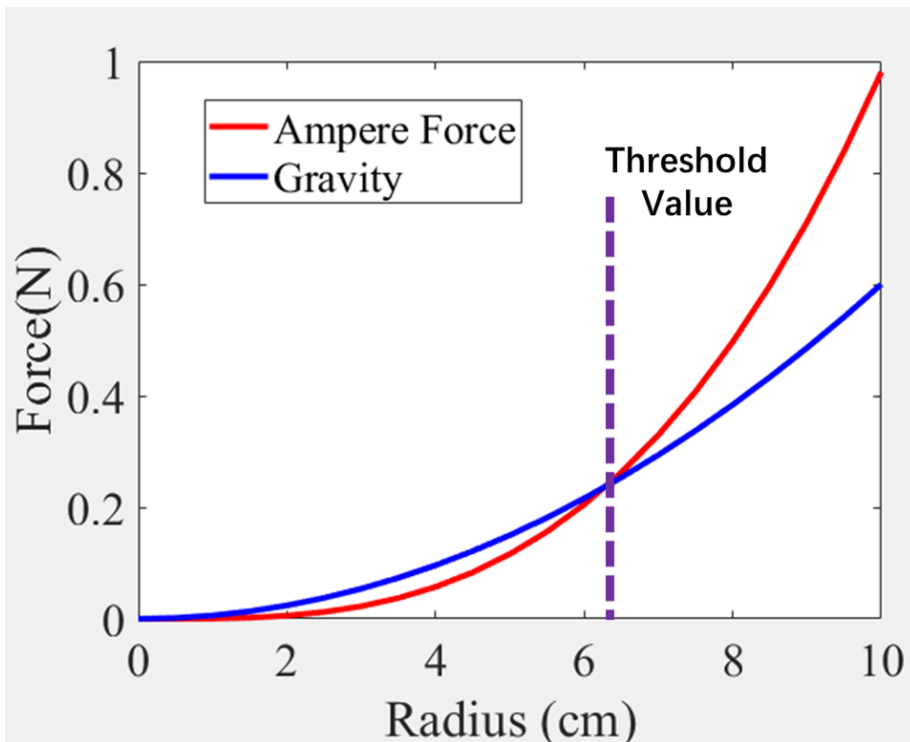


图 5.1.8 不同半径下，铝箔纸受到向上的安培力和向下的重力变化

5.2 环形电流的实验验证

上一节中，我们建立了完备的面电流理论模型，并定量解释了面积阈值存在的意义。

接下来，我们将通过一系列实验来进一步验证该面电流的存在。在本小节中，我们尝试破坏完整的铝箔环（规格如图 5.2.1）来观察能否产生电流。

其具体操作是沿着 5.2.1 中红色框，对铝箔纸做切口，通过控制切口的深度，来控制铝箔环的运动。



图 5.2.1 实验使用的完整铝箔环规格及其移动过程

表 5.2.1 铝箔纸状态对产生电流的影响

铝箔纸状态	完整	内向外剪一半	外向内剪一半	剪断
能否移动 (产生电流)	能	能	能	不能

最终的实验结果如表 5.2.1 所示，从中可以看到，在完全剪断铝箔纸后，铝箔纸中激发的环形电流无法闭合，故无法产生安培力，此时铝箔纸不运动。而无论是完整的环，还是只剪了一半的环，都可以形成足够的感应环形电流，使铝箔纸发生移动。

5.3 方形铝箔纸的环形电流控制

上文验证了铝箔纸内环形电流的存在。在本实验和下一个实验中，我们将完整的正方形铝箔纸中间割出切口，观察两侧能否各自形成环形电流并悬浮。具体使用的铝箔规格如图 5.3.1 所示，其切口深度从 0cm 逐渐增加到 5.1cm，而方形铝箔纸的边长为 7cm。

实验结果如表 5.3.1 所示，在本次实验中，我们观察到当切口深度超过 3.5cm 的时候，铝箔纸不再发生运动，此时环形电流产生的面积已经较低（半径小于 3.5cm），甚至低于面积临界阈值，因此无法产生足够的安培力来抵消重力。

同时，我们还发现，对于完整的正方形铝箔纸，由于一些结构的弯折和不平整，面电流不会像理论模型中是一个完全对称的环型，而会存在一定的面内畸变，这导致铝箔纸除了 z 方向的悬浮运动之外，还会存在一定的横向运动。由于这种结构畸变较为随机，所以实验上，我们观测到完整的铝箔纸会出现非定向的横向移动。

但是，当我们给与铝箔纸一定的切口后（低于阈值），此时铝箔纸的运动开始变得定向，如表 5.3.1 中结果所示，其开始沿着切口方向定向移动（图 5.3.2 中的红色箭头）。根据我们的环形电流理论，这是因为此时的环形电流会向单侧畸变，这导致红色箭头端的面电流密度增加，从而受到定向的安培力。

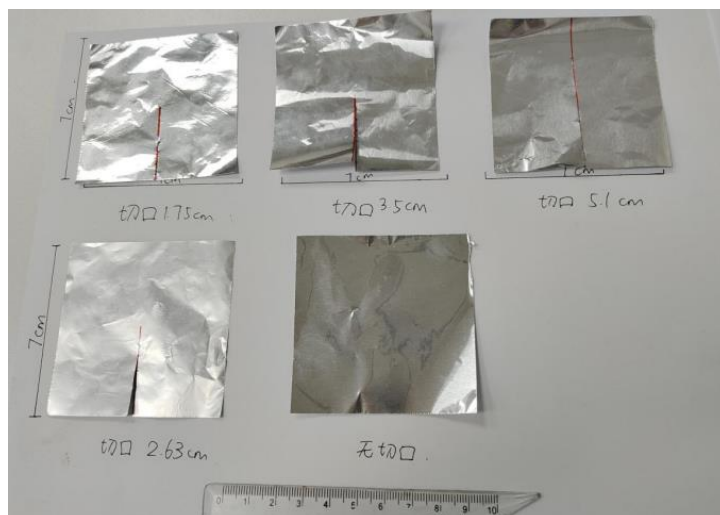


图 5.3.1 本实验使用的铝箔纸规格



图 5.3.2 沿切口方向定向移动的铝箔纸（切口为 2.63cm）

表 5.3.1 铝箔纸状态对是否定向移动的影响

切口长度(cm)	0	1.75	2.63	3.5	5.1
是否定向移动	移动, 非定向	移动, 定向	移动, 定向	不移动	不移动

为了进一步验证这种定向运动的可靠性，我们又进一步设计如图 5.3.3 所示的实验，我们利用切口为 4cm 的铝箔纸，调整其切口分别朝向四个不同的方向。最后的实验结果都符合我们的预期：即铝箔纸的运动都会沿着切口方向定向移动。这样的实验结果即很好的验证了面电流的假设。

同时，我们还有了新发现：铝箔纸切口末端的红色笔迹相较于其他区域更浅甚至消失（图 5.3.4 中红色圆环区域）。我们猜测是电流在切口末端密度更大，灼烧了铝箔纸和颜料。

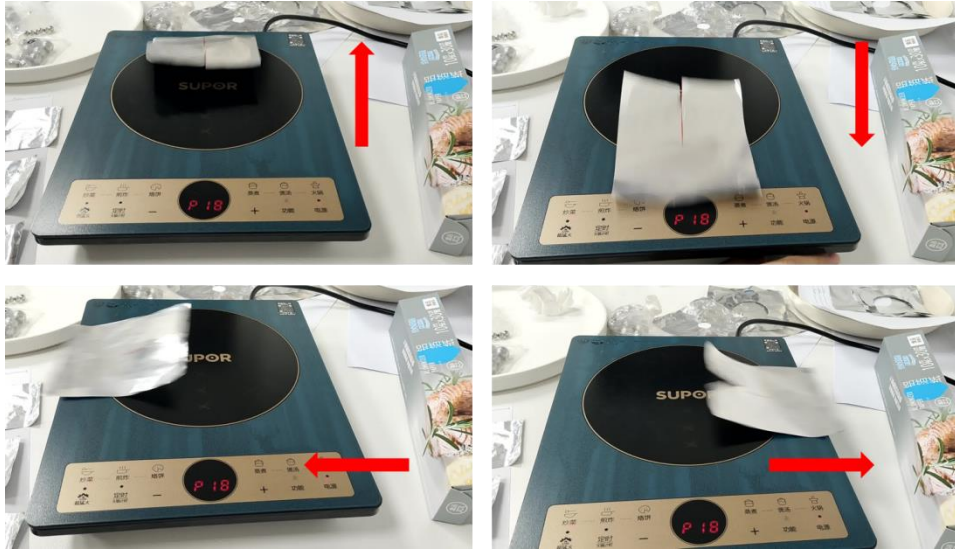


图 5.3.3 不同朝向的铝箔纸都会沿切口方向定向移动

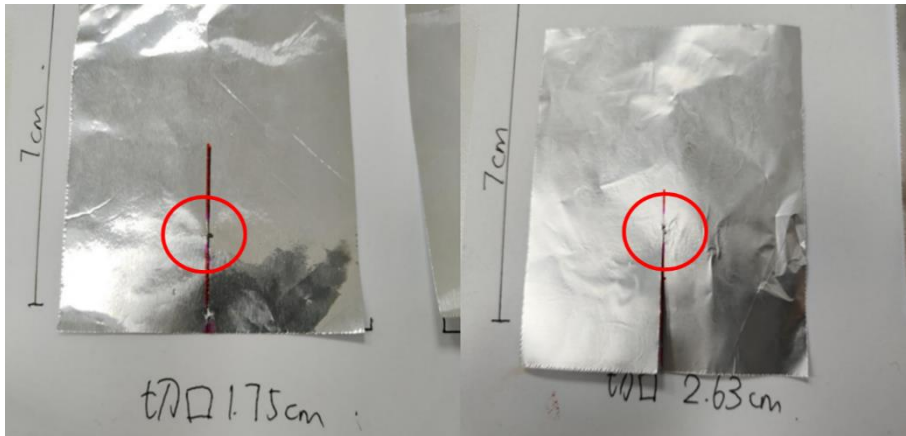


图 5.3.4 切口附近的颜料变浅

5.4 面电流对于运动速度的影响

在本实验中，我们使用了与实验 5.3 中规格不同的带切口铝箔纸（规格如图 5.4.1），其边长为 12cm，切口深度由 2cm 增加到 8cm，主要探究切口大小和移动速度的关系。

具体实验过程如图 5.4.2 所示，我们固定好手机，开启视频拍摄模式，然后开始开启电磁炉让其开始运动，即可记录铝箔纸在安培力驱动下运动的完整过程。

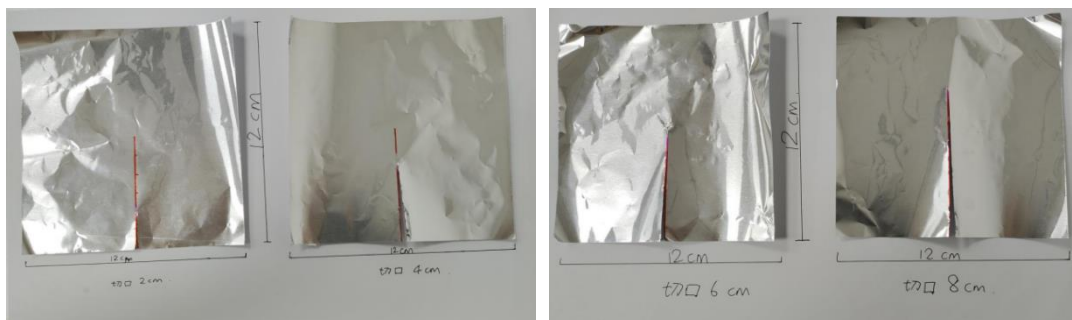


图 5.4.1 本实验使用的铝箔纸规格



图 5.4.2 不同时刻下铝箔纸的运动轨迹

随后，我们通过视频逐帧分析的方式（每秒 20 帧），在确定好合适的坐标尺后，对铝箔纸的平均运动速度进行估计，其结果如图 5.4.1 所示。从中可以看到，当铝箔纸切口越深的时候，铝箔纸横向运动的速度越小。

这是因为，随着切口的深度增加，产生的环形电流圈的面积越小，此时根据图 5.1.8 中的理论计算结果，我们会发现其所受的安培力迅速减小，从而导致其加速度也越来越小，故而运动速度越来越慢。

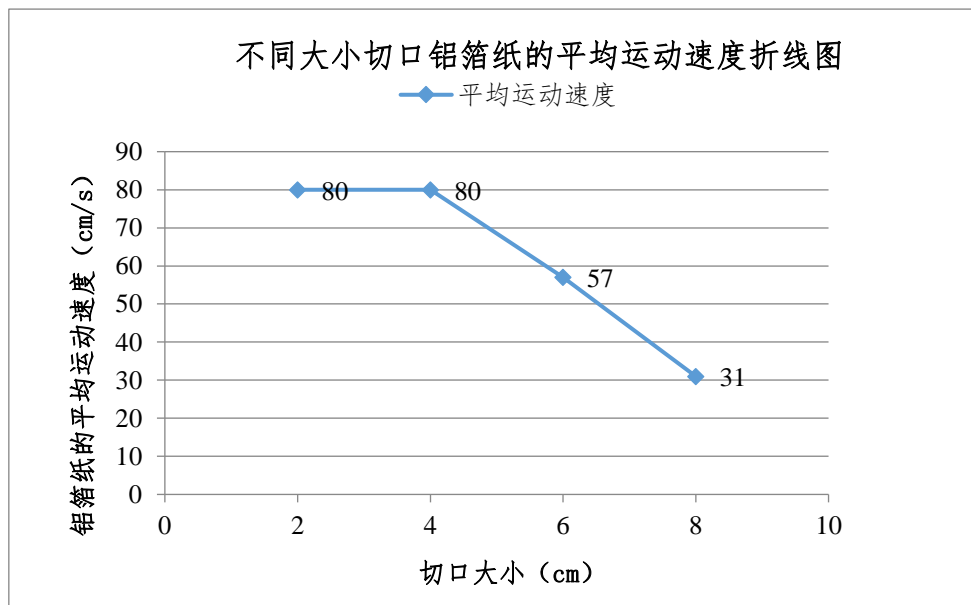


图 5.4.1 不同大小切口铝箔纸的平均运动速度，随着切口深度的增加，运动速度变小

6 影响参数讨论

6.1 改变外径大小

接下来，我们控制内圆半径一定，对带孔铝箔纸进行了测试，研究外径大小变化对于该现象的影响。我们使固定内圆半径的正方形带孔铝箔纸边长增加（规格如图 6.1.1 左），同时利用矿泉水瓶（图 6.1.1 右）限制铝箔纸在水平方向的移动，观察铝箔纸的悬浮高度。

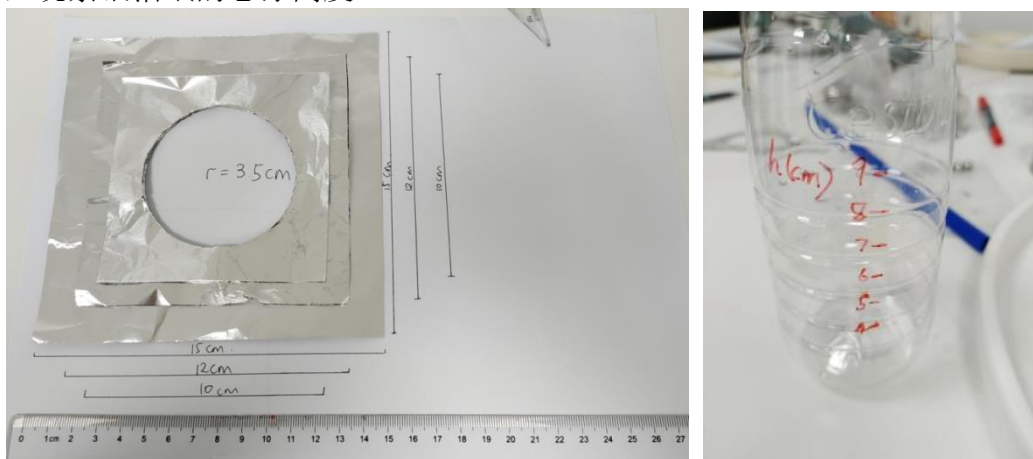


图 6.1.1 固定内圆半径的正方形带孔铝箔纸的规格（左）；
水平方向上固定铝箔纸的矿泉水瓶（右）

实验最终测量得到的现象如图 6.1.2 所示，可以看到，铝箔纸可以稳定地悬浮在矿泉水瓶的固定位置处；同时，我们可以通过瓶身上画好的刻度线，读取其具体的悬浮高度。



图 6.1.2 边长为 12cm 的铝箔纸在电磁炉上悬浮情况

通过慢放实验视频，我们测出铝箔纸的稳定悬浮高度如图 6.1.3 所示，从中可以看到，随着铝箔纸边长的增加，铝箔纸的悬浮高度越来越高。

基于图 5.1.8 中的理论计算，我们知道，当固定内径不变，增加外径大小的时候，其等效面积会增加，这会导致更多的磁场穿过铝箔纸，并提供更大的磁通

量变化以及更大的安培升力。虽然于此同时重力也在增加，但是安培力的增加速度会超过重力的增加速度，所以总体来说，铝箔纸面积与稳定的悬浮高度成正相关。

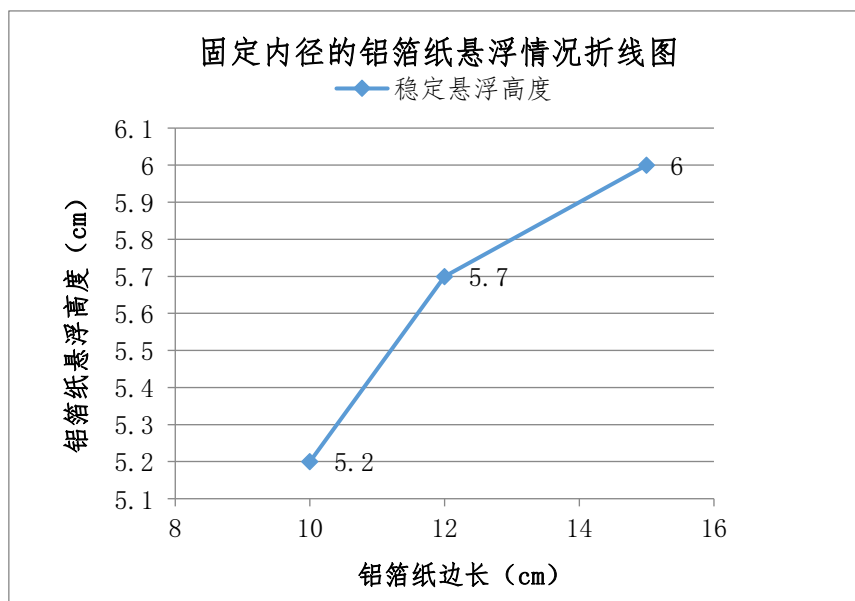


图 6.1.3 不同边长的正方形带孔铝箔纸的稳定悬浮高度，随着边长的增加，悬浮高度增加

6.2 改变内径大小

接下来，我们控制铝箔纸的边长一定，逐渐增加铝箔纸的内径，其具体使用的规格如图 6.2.1 所示。当控制正方形的变成为 12cm 时，铝箔纸的内径由 1cm 增加到 4cm。

实验中，我们通过文件侧边夹将铝箔纸在水平方向上控制在电磁炉中心，并观察铝箔纸稳定悬浮高度如何随内径变化而改变。其具体的实验结果如图 6.2.2 所示，同理，我们也依据文件侧边夹上的刻度尺，读取铝箔纸的具体悬浮高度。



图 6.2.1 不同内径下的方形铝箔纸

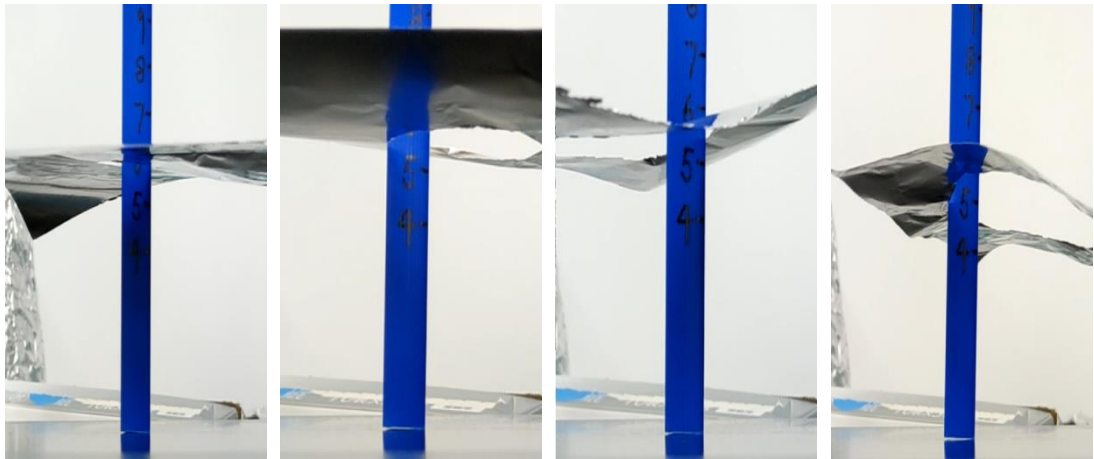


图 6.2.2 不同内径下，铝箔纸稳定悬浮高度的变化

通过实验视频，我们得出铝箔纸的稳定悬浮高度数据如图 6.2.3 所示，从中可以看到，随着内径的增加，其悬浮的高度出现了明显的下降趋势。这可以用以下的理论方程解释：

$$F(t) = -A_2 \sin(\omega t) \times 2\pi r \times \int_0^r 2\pi r A_1 \omega \cos(\omega t + \varphi(w, r)) f(r) dr \quad (18)$$

在之前的理论模型中，我们假设铝箔纸中心是完整的，因此积分区间是从 0 到 r ；但是当我们把铝箔纸的中心掏空的时候，对应的数学操作即是改变此一维积分的积分区间，从 r_0 到 r_1 。当半径逐渐增加，即积分区间越来越短，整体安培力必然下降，从而使得悬浮的高度出现降低的趋势。

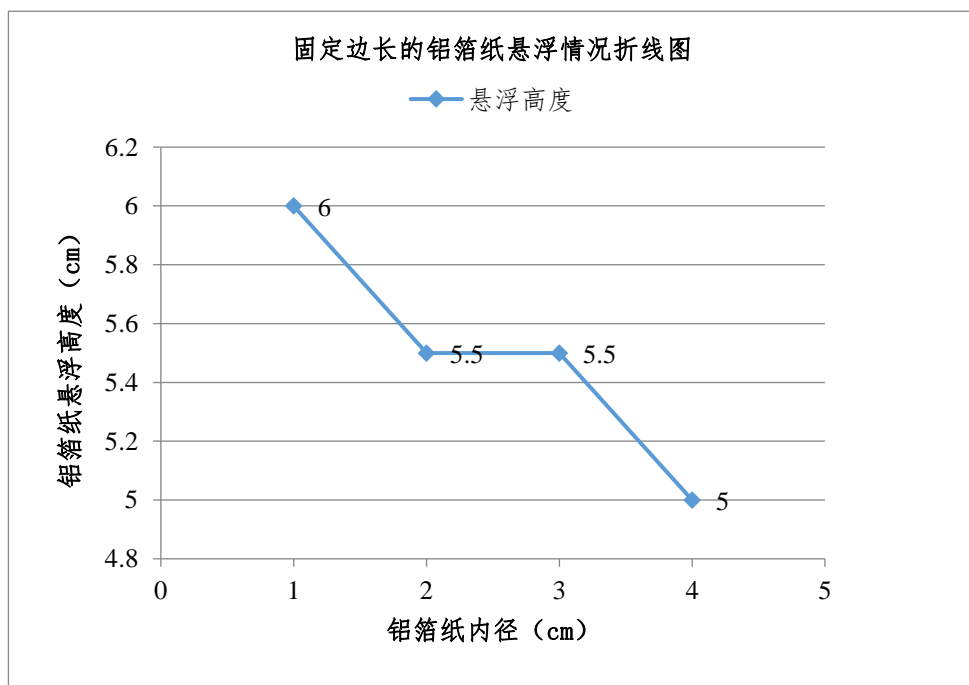


图 6.2.3 不同内径的正方形带孔铝箔纸的稳定悬浮高度

6.3 改变等效重力

接下来，我们利用同一张铝箔纸，在上面叠加相同形状的 A4 纸（无磁性），这样可以不改变其他变量，仅改变其等效质量，然后即可以测量得到重力所造成的影响。

我们选择的正方形铝箔纸和 A4 纸边长为 12cm，中心剪出的圆半径为 1cm（如图 6.3.1 所示），同样通过文件侧边夹在水平方向上固定铝箔纸中心于电磁炉中心。通过慢放并观测实验视频（具体的实验过程如图 6.3.2 所示），我们可以得出的实验结果如表 6.3.1 和图 6.3.2 所示。

从中可以看到，随着等效重力的增加，其悬浮的高度从 6cm 下降到 3cm 左右，这是因为随着质量的增大，铝箔纸需要更强的安培力来平衡重力；而高度越低的区域，电磁场的强度越大，所以铝箔纸悬浮的高度降低。

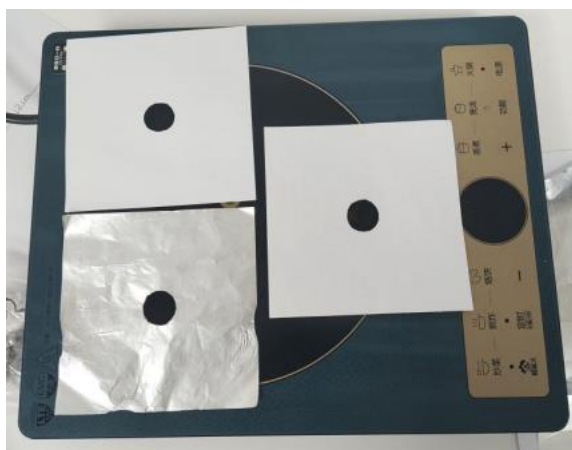


图 6.3.1 实验使用的铝箔纸以及与其大小相同的 A4 纸

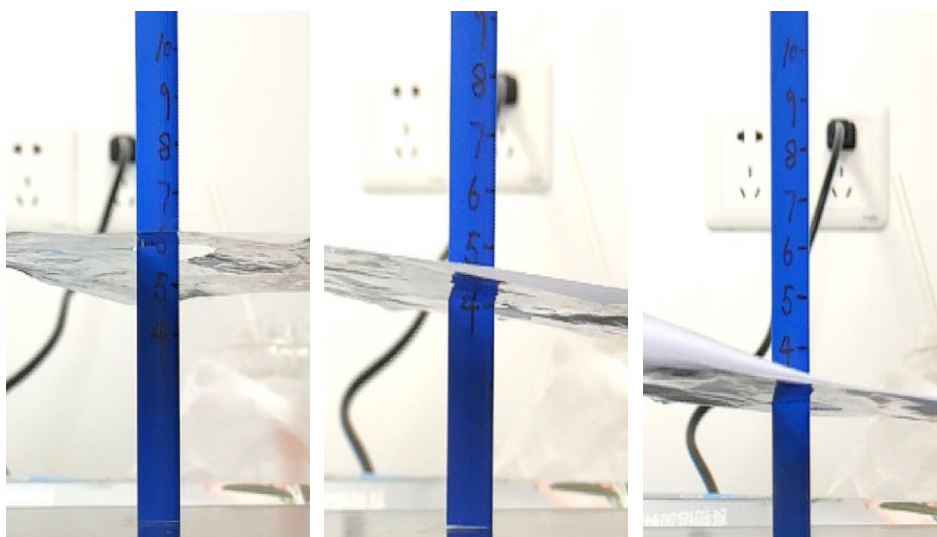


图 6.3.2 铝箔纸与叠放的 A4 纸的稳定悬浮高度

表 6.3.1 铝箔纸承载 A4 纸数量与其悬浮高度

铝箔纸承载 A4 纸数量（张）	0	1	2
铝箔纸悬浮高度（cm）	6	4	3

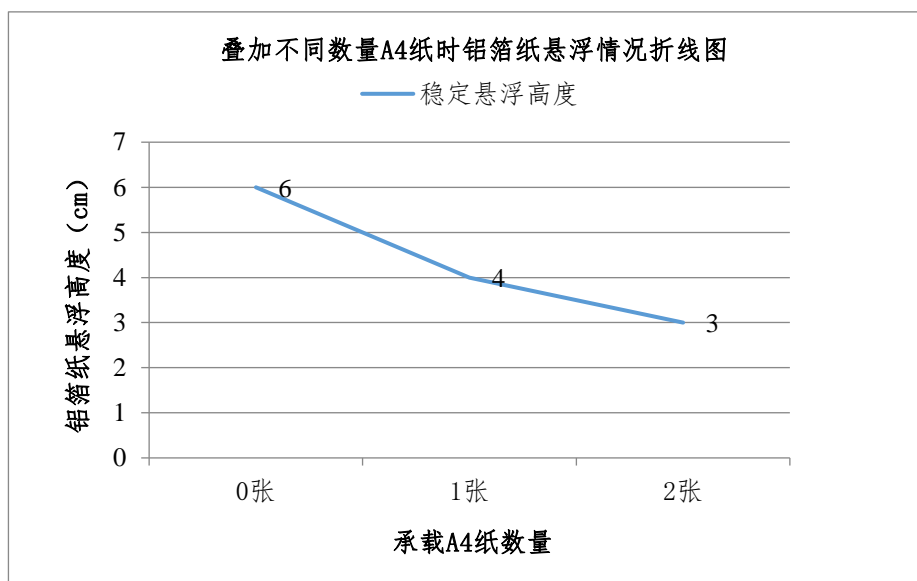


图 6.3.2 叠加不同数量 A4 纸时铝箔纸的稳定悬浮高度

6.4 改变激发电磁场强度

在上一节的实验中，我们提到电磁炉的磁场存在不均匀的分布。接下，我们会通过具体的实验来证明这一点。在本实验中，我们使用的是边长为 12cm，孔径半径为 1cm 的铝箔纸，通过文件侧边夹将铝箔纸的中心水平固定在电磁炉的不同区域（见图 6.4.1 中打 x 状符号的位置），并观察其对应的运动情况。



图 6.4.1 文件侧边夹在电磁炉上的位置

具体的实验结果如图 6.4.2 及图 6.4.3 所示，可以明显看到，对于同一张实验铝箔纸，当其水平方向距离电磁炉的中心越远的时候，其悬浮的高度逐渐从 6cm 下降到 0cm，这一结果和我们先前推测的相同：即水平方向距离电磁炉越远，电磁炉的强度越小。当与电磁炉中心距离 5cm 的时候，铝箔纸靠外的一侧就无法受到升力了，出现明显的单侧倾斜式悬浮，而当中心距离超过 7.5cm 的时候，磁场已经弱到完全无法悬浮了。

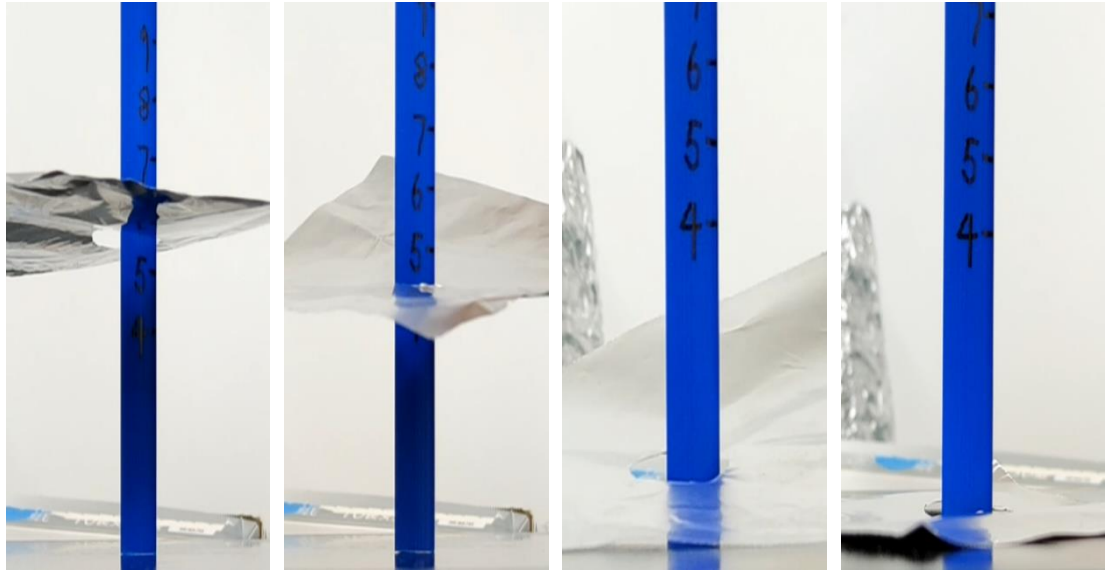


图 6.4.2 不同水平位置下铝箔纸的稳定悬浮高度

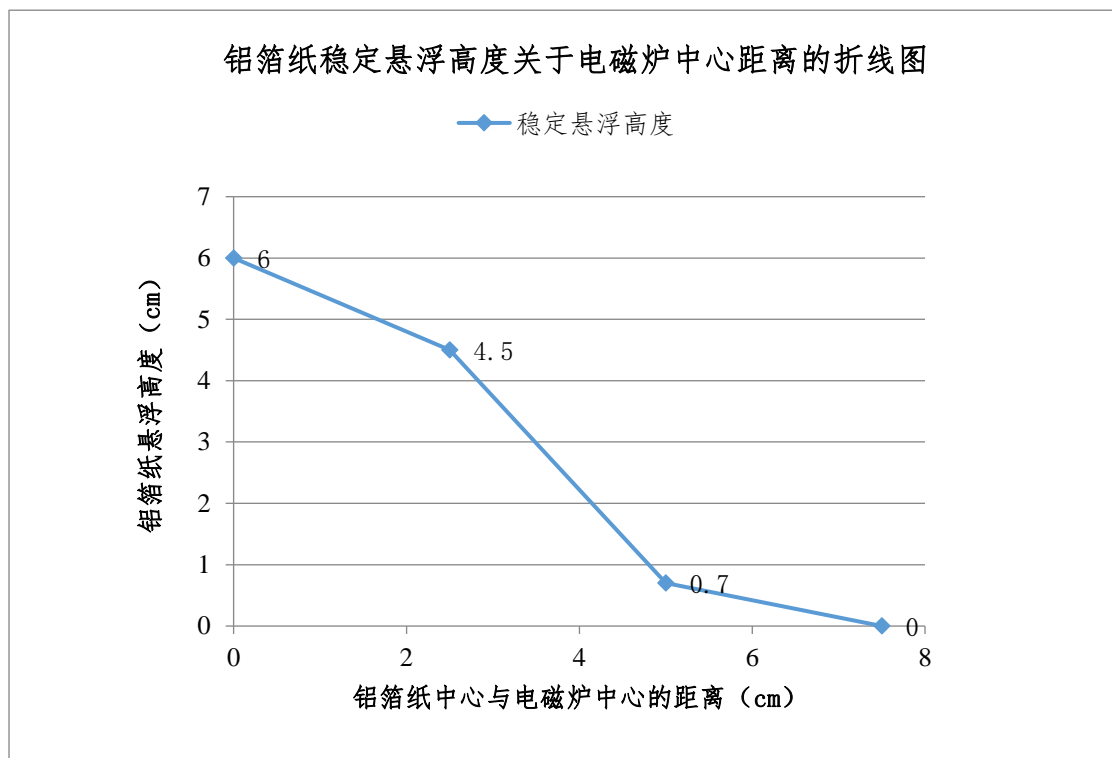


图 6.4.3 不同水平位置下铝箔纸的稳定悬浮高度

7 扩展实验

完成了以上的实验探究和理论分析之后,本小组接着进行了若干组扩展实验,进一步探究了对于铝箔纸漂浮的多种条件和情况。

7.1 球形铝箔纸的漂浮

首先，我们仍对 3.3 节中球形铝箔纸毫无动静结果充满了疑问。但是经过理论讨论与分析，我们判断有可能是因为当时搓出来的球形铝箔纸半径不够，导致安培力太小了。

为了进一步验证这一猜想，我们又经过了十分漫长的手工活动，终于搓出来一颗直径在 14 cm 的球形铝箔，虽然其表面依旧凹凸不平，但是应该不会对实验结果造成太大的影响。而当我们将其放在电磁炉中心，开启开关的时候，终于观察到了非常明显的滚动效果，其结果如图 7.1.1 右所示，这说明我们的实验终于成功了！也进一步验证了我们理论的正确性。

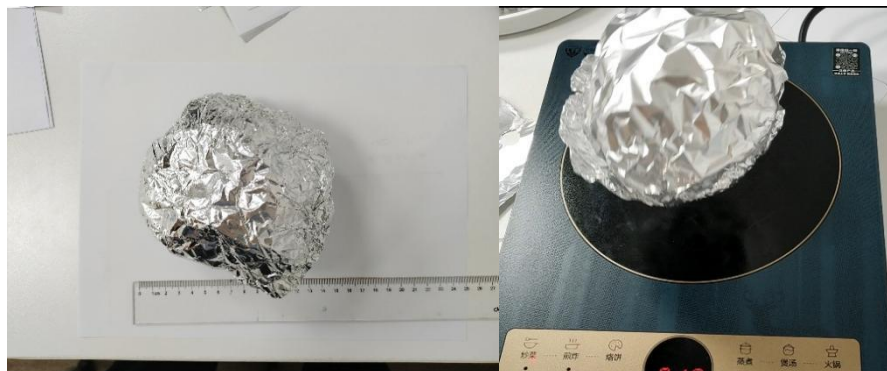


图 7.1.1 铝箔纸球体大小（左）和其漂浮情况（右）

现在，针对网络上流传出来的视频，我们有充分的理由怀疑，那是一个**造假**的视频！因此视频中所用的小球半径实在是太小了，甚至不足 1cm，这样无论如何都难以产生明显的运动，更何况是在铺满了沙子的平面上来回滚动。

随后，本小组又设计了一组实验进行进一步的验证：我们将铝箔纸片中心裁了一个洞，同时将如视频中大小一致的铁球放置在铝箔纸的洞中（如图 7.1.2 所示），然后观察二者的运动模式。



图 7.1.2 磁场中金属球与铝箔纸的运动情况

实验结果表明：当开启电磁炉开关的时候，铝箔纸瞬间实现了漂浮，而金属小球保持静止不动。这说明电磁炉内在具有磁场的情况下，小球并未产生任何运动，从而说明了网络上视频实验的虚假性。

同时，该现象也很好地说明了预实验中小球未运动的根本原因就是：铁球的体积不够，所产生的安培力太弱，不足以产生明显的驱动效应。

7.2 控制铝箔纸转动

在之前的实验研究中，我们基本上只考虑了如何能够使得铝箔纸能够悬浮，这对应于物体在 z 方向上的平动。接下来，本小组进行进一步研究，探索如何通过控制面电流的分布，来实现铝箔纸在悬浮状态下的转动。

首先，我们探究了特殊形状铝箔纸的漂浮情况。如图 7.2.1 所示，裁剪了螺旋圆环结构的铝箔纸，我们期望这种的结构能够实现螺旋形状的环形电流，进而实现铝箔纸的悬浮和旋转。

但实验发现螺旋状铝箔纸虽然可以进行比较微弱的悬浮，基本上没有任何旋转的趋势。这个原因主要是由于我们裁剪的螺旋是对称的，所以最终实现的面电流也是具有高度对称性的，因此并不存在使物体旋转的力矩。



图 7.2.1 螺旋状铝箔纸的测量（左）和运动情况（右）

基于上述的经验，我们又设计了带有多个小孔的铝箔纸，其具体结构如图 7.2.2 所示，我们在铝箔纸的中心和外围分别裁剪了大小不同的孔，使得铝箔纸片成为了偏心物体。

在这种情况下，其分别产生的环形电流就会存在明显的各向异性，从而使得铝箔纸可以同时实现悬浮和绕轴转动这两种动作。而实际的实验结果如图 7.2.2 所示，其完美符合我们的理论预期！

这说明这种实验方案的可行性，我们利用安培力，从 2 个维度分别控制了铝箔纸的运动，并最终实现了一种电磁悬浮的风车。

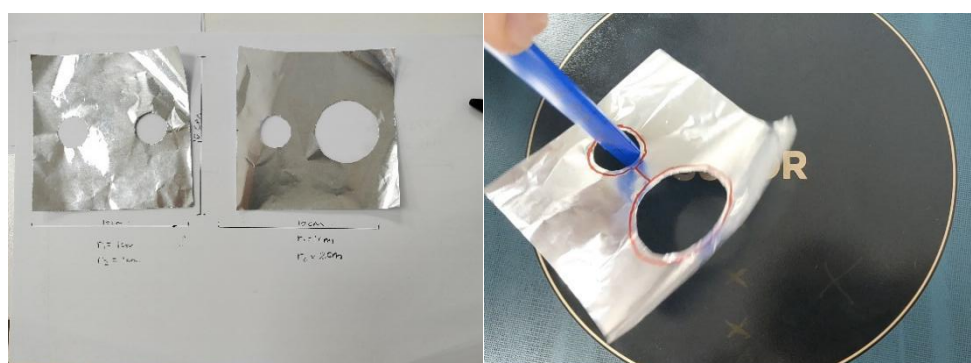


图 7.2.2 多孔铝箔纸的测量（左）和运动情况（右）

7.3 控制多重环形电流的产生

基于上一条实验的启发，我们进一步思考多孔纸片内部环形电流的轨迹。基

于之前的理论基础，我们猜想可以通过控制孔洞大小和相对位置，来进一步控制环形电流的位置，从而控制环形电流互相之间的影响。

我们以两孔之间的间隔大小，以及空洞的半径大小为控制变量，分别进行了多组对照实验，均可以观察到铝箔纸实现了明显的悬浮效应。同时，我们观察到带有多个孔洞的纸片在绕轴旋转时，其角速度比其它条件相同而只有一个孔洞的纸片更大。

我们还发现，在实验中，裁剪后的纸片宽度最窄的地方多次出现了熔断现象。通过这一点，我们猜测在该处流过的电流最大，导致其发热量最大（焦耳定律），从而将铝箔纸熔断了。

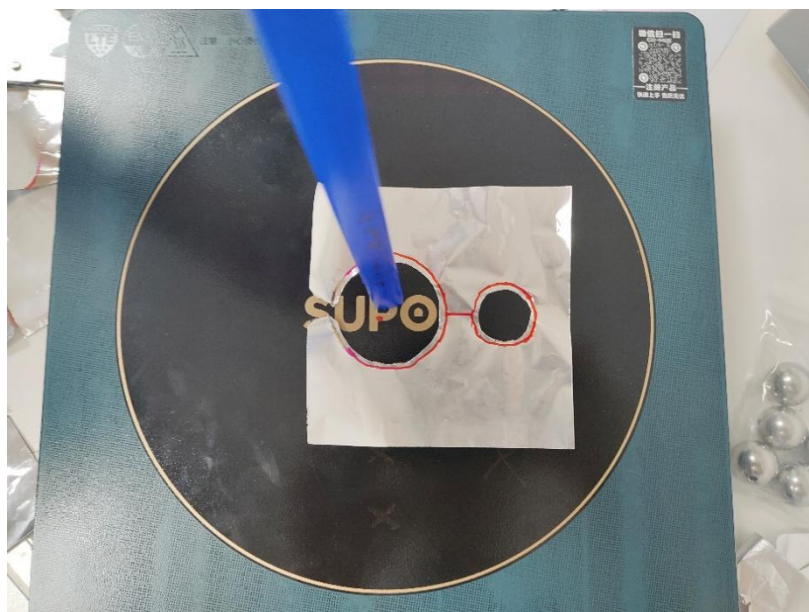


图 7.3.1 清晰的熔断痕迹

7.4 不同的“烹饪模式”

本小组还根据电磁炉功能，分别以不同的“烹饪模式”和电磁炉功率对于相同的铝箔纸片进行了悬浮实验。实验中，我们用文件夹将铝箔纸在水平方向上固定在电磁炉的中心（类似于实验 6.4.1），然后开启电磁炉，观察铝箔纸的运动状态。

具体的实验装置如图 7.4.1 所示，实验结果如表 7.4.1 所示，由此我们可以得出，电磁炉烹饪模式的变化对于铝箔纸的悬浮影响较小；而电磁炉功率的变化会影响电磁炉的周期，定性研究得出功率的增加会增加每个周期内工作和待机时长的比值，即单位时间内电磁炉有效工作时间更长。



图 7.4.1 本实验使用的铝箔纸规格（最下方内径最小的一枚）

表 7.4.1 不同功率或模式电磁炉的周期变化

	功率 1	功率 18	功率 21	火锅（功率 18）	烙饼（功率 18）
每周期工作时长	2.60s	2.65s	2.65s	2.60s	2.55s
每周期待机时长	3.25s	0.95s	0.95s	1.00s	0.95s
稳定悬浮高度	5cm	5cm	5cm	4.5cm	5cm

8 结论与创新点

本次课题的研究，从网络上流传的一种实验现象出发（电磁炉沙画），希望验证其真实性并深入分析背后的物理原理，但是在预实验的过程中，我们却惊讶地发现：无论在什么样的条件下，金属球均不能实现有规律的运动。

为探究电磁炉沙画不能重现的原因，我们进行了多组相关实验，验证电磁炉磁场使物体产生运动的不同条件，找到了面积临界阈值条件和相关的参数。同时，通过对实验结果进行定量分析。我们又回归理论层面，利用电磁感应现象中的等效电阻和电感来对整体受力模型进行了分析，并对于铝箔纸的漂浮现象以及金属球的漂浮阈值条件均进行了系统化的理论解释。

本文的创新点主要集中于以下三点：

1、通过详细的实验和理论分析，我们确认了网上流传的视频并非真实场景的再现。于是我们进一步优化了实验条件，并最终再现了真正的现象；

2、我们发现这种电磁感应现象中存在一定的阈值条件，这在文献中未见报道。我们探究了具体的阈值边界，并结合电磁感应理论解释

了该阈值条件的存在；

3、根据理论指导，我们利用铝箔纸的剪裁方案，能够同时控制其在平面内的定向运动和转动，从而实现电磁驱动的 3D 运动，有望解决电磁驱动搅拌转子效率不高、液体分层不均匀等问题，或许未来可以应用在制药、化工等方面。

在本次研究过程中，我们也获得了许多宝贵的经验和启发，具体如下：

1. 对于数据的合理统计

本次实验中，我们在用矿泉水瓶做中心杆控制铝箔纸片的运动时，意外发现不同的铝箔纸片会在矿泉水瓶不同的凹凸处停下来。通过这一观察，我们更换了一根有刻度的细杆作为中心杆，并对于不同大小，形状的铝箔片做了漂浮高度的测量。我们采用多张并行的 Excel 表格，完整并有条理地整理了每一次实验的数据以及相关信息。

2. 对于微小细节的注意

本次实验中，我们不断地根据观察到的微小细节，进行更深入的探究。

(1) 在观察铝箔纸的漂浮状况时，我们发现铝箔纸漂浮起来之后并未停止运动，而是做简谐运动类型的上下摆动。于是我们采用 Tracker 物理软件，以铝箔纸的一个角落作为分析对象，完整地描绘出了铝箔纸在漂浮后的运动情况。

(2) 在做多孔铝箔纸的实验的时候，我们最先将需要裁剪的部分用红色记号笔勾画出来。在进行实验的时候，我们注意到铝箔纸片的窄边红色痕迹变浅，此现象引发了我们的思考：红色痕迹变浅表明此处受热，那么流过此处的电流就比其他地方更大（其他地方并未观察到此现象）。这个推论促使我们对于铝箔纸片不同地方流过的电流大小进行了思考。

3. 实验步骤的开展以及拓展实验的思考

在开展实验前，我们对于每一种可能影响铝箔纸和金属球漂浮的情况进行了罗列，并且依次开展了实验探究。在完成分组实验的过程中，我们不断地根据实验现象做出总结，运用实验器材进行更加完整的研究。这几组拓展实验不仅让我们有了新的发现，也促使我们完成了更加完整的实验报告，锻炼了组员们的研究能力以及思维创新能力。

参考文献

- [1] 吴好. 强磁体在铜管(或铝管)中下落时的涡流分析[J]. 中学物理, 2011, 29(5): 20-22.
- [2] 姜辉. 浅析磁铁在无限长竖直钢管中的运动状态[J]. 中国校外教育, 2010(12): 146.
- [3] 朱欣. 线圈在磁铁磁场中产生的感应电流方向判断[J]. 物理教学探讨, 2005, 23(1): 30-31.
- [4] 张禹涛, 刘琼, 柴一峰等. 铜管中磁铁运动特性分析[J]. 科技风, 2021(8): 96-97.
- [5] 赵妍妮. 强磁铁在金属管中下落的演示实验分析[J]. 物理之友, 2015, 31(7): 44-47.
- [6] Sen D. Electromagnetism according to geometric algebra: An appropriate and comprehensive formulation[J]. Pramana, 2022, 96(4): 165.
- [7] Shafiqh A A E. The maximum magnetic field strength, a thought experiment at introductory electromagnetism[J]. Physics Education, 2021, 56 (6): 065004

致 谢

论文完成之际，首先非常感谢导师熊波老师给予我们从论文定题、实验完成到论文写作孜孜不倦的指导。导师对学术研究执着求真的态度和辩证的思维方式在无形中影响着我们，促使我们逐渐养成发现并解决问题的习惯，掌握了一定的学术研究方法，并得以在论文写作中应用。再次对导师表示崇高的敬意和感谢。

同时，论文的完成离不开本组每个成员的努力。感谢陈梓墨同学认真进行预实验并整理所有资料文件，感谢费云和同学完成对数据的记录、采集和分析，感谢何倍宁同学在理论分析部分做出的重要贡献。除此之外，研究进行的全过程以及论文撰写都是本组同学合理分工合作完成的结果，我们每个人都在本次研究中获得了很多学习收获。

感谢潘志民老师对我们的指导和关心，从他所讲授的课程中我们学到了专业知识和技能，使我们能够顺利完成课题的研究和论文的写作。

最后感谢家长们提供的后勤保障。

参赛队员信息

姓名：陈梓墨 性别：女

学校：南京外国语学校 年级：高二

简介：各学科齐头并进，成绩优秀，热衷观察实际问题并实践探索，擅长系统分析，具有优秀的团队协作能力和英语口语表达能力。

2023 年 美国高中物理竞赛 Physics Bowl 金奖

姓名：费云和 性别：男

学校：南京外国语学校 年级：高二

简介：各科成绩优秀，在学校名列前茅，担任南京外国语学校理科实验班班长。对物理有浓厚的兴趣，热爱科研，多次参与各种科研项目，英语口语能力突出。

2021 年 希望之星英语风采大赛江苏省特等奖（第二名）

2022 年 中招南外科技特长生第四名

2022 年 丘成桐中学生科学奖（物理组）南部赛区二等奖

2023 年 青少年科技创新大赛江苏省一等奖

姓名：何倍宁 性别：男

学校：南京外国语学校 年级：高二

简介：各学科均衡发展，流利的英文听说读写能力，从初中起培养了对物理学科的浓厚兴趣，积极参加各类物理学科竞赛，希望以此加深对物理知识的理解。

2022 年 英国物理竞赛 BPhO 金奖

2023 年 美国高中物理竞赛 Physics Bowl 全球前 100

2023 年 加拿大物理竞赛 SIN 银奖