

攀爬磁铁研究报告

一. 初步构思

搜索资料发现多种解释：

(1) 磁感电流说

磁感电流说认为：当铁杆绕其对称轴旋转时，磁铁会开始向上攀爬。这是因为铁杆的旋转会在铁杆中产生感应电流，这些电流会产生一个新的磁场，与磁铁的磁场相互作用，从而产生向上的力。

经初步分析，在实验条件下，感应电流远远不能产生足以驱动磁铁向上攀爬的力，该理论应当是错误。

(2) 旋转甩出说

旋转甩出说认为：当铁杆旋转时，铁杆并未保持竖直，而是顶部以圆形轨迹运动，下部仅旋转。这样铁杆在旋转的同时，还有一定范围的位移变化，那么就产生了较大的离心力，离心力有一个向上的分量，使得磁铁向上攀爬。

经初步分析，结合资料和视频数据，发现铁杆在竖直情况下旋转，磁铁仍可向上攀爬，故该理论不适用于本实验。

(3) 滑跳说

滑跳说认为：当铁杆旋转时，由于限制了磁铁只能在竖直方向，那么磁铁和铁杆的接触位置在发生变化。当偏离磁铁中心较多时，比如到了过点1的竖线处。点1位于磁铁圆周上高于最低点。磁铁在磁吸力和重力作用下，以下图点1为圆心，发生滑跳，使得磁铁中心重新吸附于铁杆上，而点1则变成此时的最低点。如此往复，形成成磁铁攀爬现象。经初步分析，认为该理论具有一定合理性。

二. 物理模型构建

1. 参数定义：

假设磁杆和铁磁性杆均为圆柱体，铁磁性杆半径为 R ，磁杆质量为 m ，磁杆和铁磁性杆的摩擦系数为 μ

2. 分析临界条件：

为了使磁杆保持附着不脱落或者滑移，摩擦力，磁力和离心力三者的关系如下

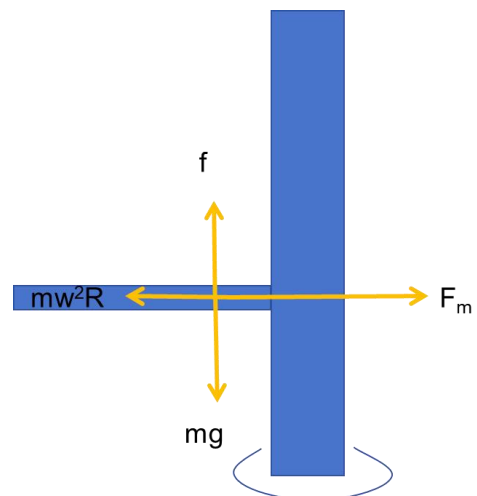
当铁磁性杆未旋转时，磁杆未脱落的条件为：

$$\mu F_m \geq mg$$

当铁磁性杆旋转时，磁杆未脱落和滑移的条件为：

$$\begin{cases} F_m \geq M\omega^2 R \\ \mu(F_m - m\omega^2 R) \geq mg \end{cases}$$

3. 受力分析



在滑移之后，磁杆继续受到重力、离心力、摩擦力和磁吸引力的作用。此时，摩擦力将不再是静摩擦力，而是滑动摩擦力。

重力：垂直向下作用。

离心力：垂直于杆轴的径向作用，大小与滑移前相同。

滑动摩擦力：阻止磁杆相对于杆滑动的力，方向与滑移方向相反。滑动摩擦系数通常小于静摩擦系数。

磁吸引力：与杆的吸附力，假设仍为常量，方向指向杆的表面。

轴向方向（沿杆轴）的受力平衡

在轴向方向上，磁铁受到摩擦力和重力的影响，设 z 为磁铁在杆轴方向的坐标，那么：

$$m\ddot{z} = \mu_k F_m - mg$$

$$\Rightarrow \ddot{z} = \frac{\mu_k F_m}{m} - g$$

轴向加速度 \ddot{z} 是常数，解为：

$$z(t) = z_0 + \frac{1}{2} \left[\frac{\mu_k F_m}{m} - g \right] t^2$$

如果 $\mu_k F_m > mg$ ，则磁铁会沿杆轴向上爬升；如果 $\mu_k F_m < mg$ ，则磁铁会向下滑动。

理论解析：

（1）重力的作用

重力向下作用，使磁铁一端（通常是质心偏下的一端）倾斜，试图脱离铁磁性杆，但磁铁被强烈吸附，另一端会更紧密地贴附在杆上

（2）磁吸附与旋转的作用

磁吸附力确保磁铁紧贴铁磁性杆，但旋转时离心力导致磁铁倾斜，产生上升趋势。

（3）接触点的变化

旋转过程中，接触点不断变化，磁铁上端更靠近铁磁性杆，下端受离心力与重力作用，导致上端的接触点逐渐上升。

4. 建立数学模型

（1）磁力公式：

对于永磁体或电磁铁产生的磁场，可以用比奥-萨伐尔定律（Biot-Savart Law）来计算磁场：

$$B = \frac{\mu_0}{4\pi} \int \frac{Id\mathbf{l} \times \hat{r}}{r^2}$$

对于磁铁的磁力作用，可以使用**安培定则**，即磁场与电流的相互作用产生的力：

$$F = IL \times B$$

其中：

B 是磁场强度， μ_0 是磁常数， I 是电流强度， $d\mathbf{l}$ 是电流元素， \hat{r} 是指向观察点的单位向量，

r 是电流元素到观察点的距离， F 是电流元产生的力， L 是导线长度。

（2）物体运动的运动学分析：

假设物体在磁场中的受力情况，利用牛顿第二定律进行分析：

$$F_{mag} = m \cdot a$$

其中：

F_{mag} 是磁力， m 是物体的质量， a 是加速度

如果存在摩擦力，则总受力为：

$$F_{total} = F_{mag} - F_{friction}$$

摩擦力可以通过以下公式计算：

$$F_{friction} = \mu \cdot N$$

其中：

μ 是摩擦系数

N 是物体的法向力（在垂直方向上）

在已知加速度的情况下，可以通过运动学公式分析物体的运动轨迹和速度：

$$v = u + at$$

$$s = ut + \frac{1}{2}at^2$$

对运动方程进一步优化

磁铁的轴向运动则由以下方程描述：

$$\ddot{z} = \frac{\mu_k F_m}{m} - g + R\omega^2 \sin(\theta)$$

其中， θ 是磁杆与铁磁性杆之间的倾斜角度，这一方程考虑了旋转引起的离心力对磁铁向上运动的促进作用。

轴向加速度 \ddot{z} 表示磁铁沿杆轴的爬升加速度。为了得到爬升速度，我们需要对该加速度进行积分，则爬升速度 $\dot{z}(t)$ 为：

$$\dot{z}(t) = \int \ddot{z} dt = \left[\frac{\mu_k F_m}{m} - g + R\omega^2 \sin(\theta) \right] t$$

磁铁在时可能会围绕一个点 产生旋转运动。影响旋转的力矩来源主要包括：

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{重力力矩: } T_g = mg(l \cos \theta + \frac{L}{2} \sin \theta) \\ \text{离心力力矩: } T_c = mR\omega^2 l \cos \theta \\ \text{摩擦力力矩: } T_{fric} = \mu_k F_n r \sin \theta \end{array} \right.$$

$$\Rightarrow T_g + T_{fric} = T_c$$

将各个力矩表达式代入，得到：

$$mg \cdot \left(l \cos(\theta) + \frac{L}{2} \sin(\theta) \right) + \mu_k F_n \cdot r \cdot \sin(\theta) = mR\omega^2 \cdot l \cos(\theta)$$

则力矩平衡方程可以用于确定 l 的值:

$$l = \frac{mg \cdot \frac{L}{2} \sin(\theta) + \mu_k F_n \cdot r \cdot \sin(\theta)}{mR\omega^2 \cos(\theta) - mg \cos(\theta)}$$

这里, l 是旋转中心与质心之间的距离, 描述了磁铁围绕某个点的旋转程度。

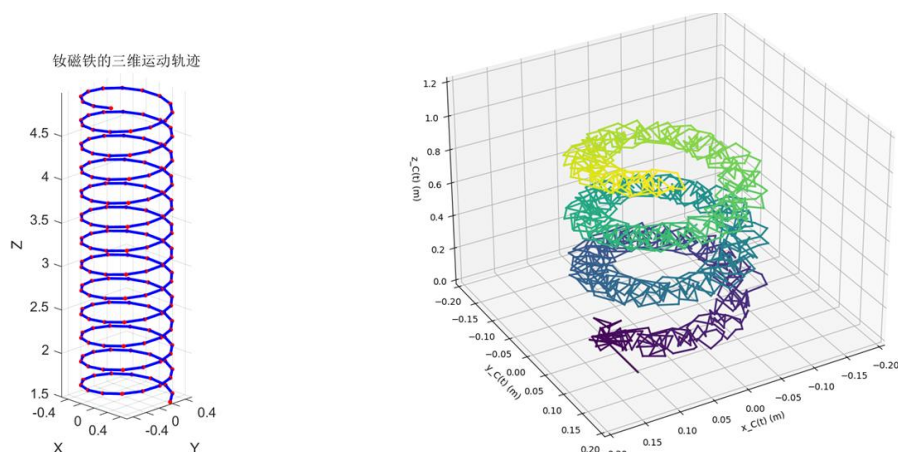
则修正后的磁杆向上攀爬运动方程为:

$$\ddot{z} = \frac{1}{m} \left(\frac{\mu_k F_m}{m} - g + R\omega^2 \sin(\theta) + \frac{mg \cdot l \cos(\theta)}{l} \right)$$

根据理论模型, 我们可以得出:

磁杆的攀爬速度与磁吸引力, 与铁磁性杆的旋转角速度成正比, μ_k 大于 1 更有利于磁杆的攀爬

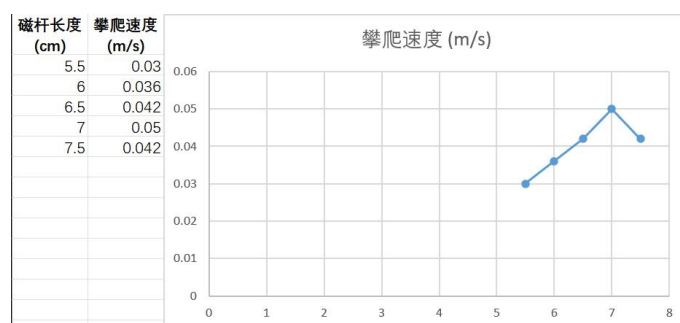
三. 仿真模型



采用控制变量的方法探究不同参数对钕磁铁的攀爬速度的影响:

(1) 探究不同长度的磁杆的攀爬速度

保持磁杆半径为 0.2cm, 铁杆半径为 0.2cm, 铁杆角速度不变, 半径为 8cm

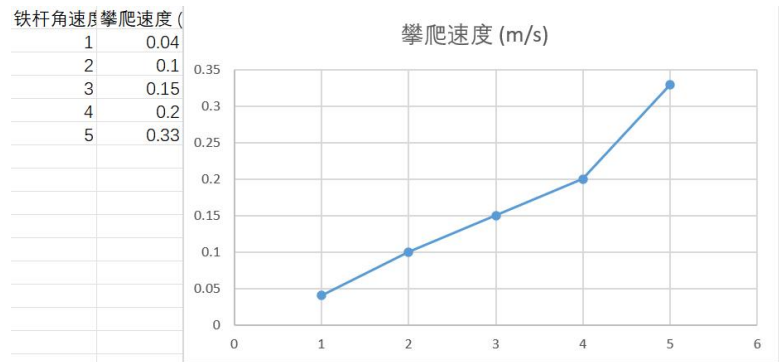


由图像可以看出随着磁杆的长度的增长, 磁杆的攀爬速度先增大后减小, 由理论推导模型可以得到, 磁杆的攀爬速度与磁杆的质量呈现负相关, 但是最开始是磁力和摩擦力占主导作用, 并且随着长度的增长, 质心向外偏移, 磁杆受到离心力增强, 自身转动增强, 所以增

大磁杆的攀爬速度，但是随着质量的增大，磁杆重力逐渐占主导地位，所以磁杆的攀爬速度开始减小，以至于最后无法攀爬。

(2)探究磁性铁杆的不同角速度的磁杆的攀爬速度

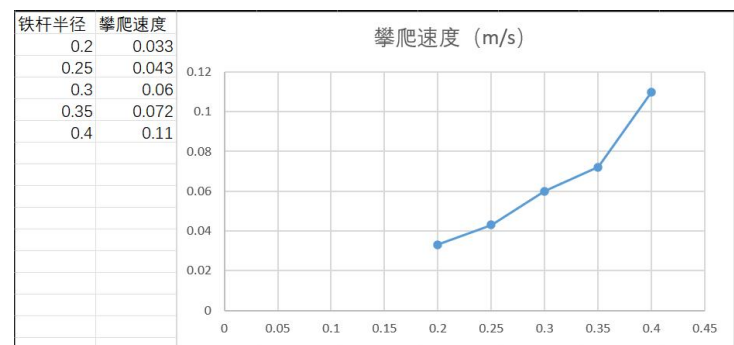
保持磁杆长度为 7cm，质量为 10g，半径为 0.2cm，铁杆半径为 0.2cm，长度为 8cm



根据上图可以看到，随着铁磁性杆的角速度增大，磁杆的攀爬速度逐渐增大，验证了理论模型的磁杆的攀爬速度与角速度呈现正相关

(3)探究磁性铁杆的不同半径的磁杆的攀爬速度

保持磁杆长度为 7cm，质量为 10g，半径为 0.2cm，铁杆角速度不变，长度为 8cm



根据实验图像可知，磁杆的攀爬速度随着铁磁性杆的半径增大而增大，由理论模型可以指导，随着铁磁性杆的半径增大，角速度不变的情况下，磁杆受到的离心力越来越大，在磁杆未脱离的前提下，磁杆的攀爬速度越来越大

(4)探究磁性铁杆的不同摩擦的磁杆的攀爬速度

保持磁杆长度为 7cm，质量为 10g，半径为 0.2cm，角速度不变，长度为 8cm

在磁杆表面涂上润滑油时攀爬速率为 0.015m/s, 而不涂时为 0.033m/s。

可知：随着铁磁性杆的摩擦系数在增大，磁杆的攀爬速度在增大，验证了理论模型的攀爬速度与铁磁性杆的摩擦系数呈现正相关。

四. 实验设计

1. 实验内容

本研究旨在通过设计系统的实验内容，优化和完善实验装置，验证理论模型，并深入研究影响攀爬磁铁项目的各种因素。通过对攀爬速度的测量，以及不同磁铁数量、磁铁半径和旋转速度等变量的控制，揭示了磁铁杆在旋转铁杆上攀爬的内在机制。实验结果表明，磁铁半径、厚度、磁场强度、片数、摩擦力、重力及铁磁杆的半径和转速对攀爬性能有显著影响。

2. 实验装置

(1) 磁铁

磁铁要求是圆片状高磁性磁铁。且需要选择多种直径，以便在实验时可以作为参数对比。购买了直径为 2.5、3、5、10mm 等多种直径的磁贴片，数量分别为 20-100 枚，根据京东出售的整体打包采购。如图。



图为实验用磁铁

(2) 铁杆

前期不清楚铁杆直径对实验影响，采购了多种直径的铁杆，后续发现需要和电机匹配，实验中采用 0.2 和 0.3mm 直径的铁杆。因此类铁杆和电机需要匹配，选用图中车轴作为铁杆使用。



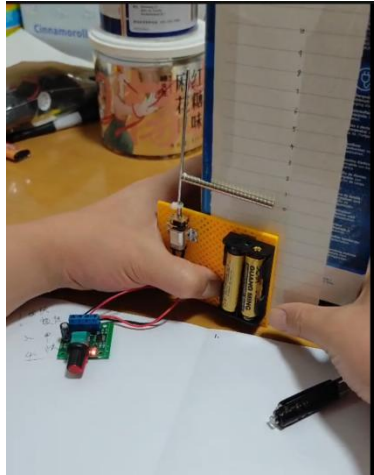
(3) 调速器马达套装变速低速大扭力减速齿轮箱小电机

可调速马达带动铁杆旋转，且速度不能太快，否则容易使磁铁和铁杆之间发生较大不可预期的滑动，严重影响试验结果。结合京东能采购的产品，选取了调速器马达套装变速低速大扭力减速齿轮箱小电机，它支持 0-60 转每分钟（实测值）无极调速功能。



(4) 组装完成的实验装置

将以上试验装置组装，接入电池。为了更好地记录攀爬距离，采用恰好 1cm 间距的条纹纸粘贴在硬纸盒上，并通过手机录像记录时间和实验情况。试验情况如下图，通电后，磁铁沿刻度纸向上攀爬，通过无级变速调节器调整转速；可更换不同直径的磁铁和铁杆；可变换磁铁总数等。



图为组装完成的实验装置

3. 实验过程

根据实验设计，分别调整磁铁半径、厚度、磁场强度、片数、铁磁杆的半径和转速，通过数据记录和分析，研究对攀爬速度的影响。实验通过无级变速调节器调节转速，通过更换磁铁来调整磁铁半径（本实验磁铁厚度一致），通过更换铁杆来调整铁杆直径。由于实验条件限制，本次实验暂时未考虑调节摩擦系数、温度、湿度等条件。实验进行了多轮次。

4. 实验数据分析

磁铁攀爬实验中，实验结果受各种因素制约。本次实验由于铁杆与电动机的链接采用移轴固定的方式，具有一定的偏心，也会产生一定的倾角。具体数据存在一定误差，但对实验机理分析影响不大，以下是一些与本次磁铁攀爬实验相关的数据示例：

（1）不同铁杆转速影响

磁铁半径：2.5mm（2.5、3、5、10mm）

磁铁厚度：3mm

磁铁重量：0.46 克

单个磁铁吸力：约 20 倍重力

铁杆直径：2mm

铁杆旋转速度：铁杆的旋转速度是影响磁杆攀爬速度的重要因素之一。在实验中，铁杆的旋转速度设定了 0-60 转/分。

铁杆长度：10cm。铁杆的长度不影响攀爬速度。

磁铁片数：叠加后不同长度的磁铁片在相同条件下可能会表现出不同的攀爬速度，部分情况会直接滑落或者无法保持垂直于铁杆而滑落。

摩擦系数：磁杆与铁杆之间的摩擦系数也会影响其攀爬速度。在本次实验中，因条件限制无法通过改变摩擦系数来观察磁杆攀爬速度的变化。

攀爬速度：在实验中，磁铁的攀爬速度是一个关键指标。根据实验条件的不同，磁铁的攀爬速度可能会有所不同。在实验中，当铁杆以一定的角速度旋转时，磁杆的攀爬速度可能会达到一个特定的值，即转速太快有可能会空转，磁铁不往上爬。

注：由于转速自由可调，实验转速是根据调节旋钮刻度确定，并结合视频数据计数与时间比值读取。由于调节器精度、不同载荷下转速的变化以及电池电量变化对转速的微小影响本次实验暂不计入。

表 1 改变转速

转速	磁铁攀爬 5 厘米用时，理论分析计算结果 (s)
4	1109.9
10	443.9
15	295.9
20	221.9
25	177.5
30	147.9
35	126.8
40	110.9
45	98.6
50	88.7
55	80.7
60	73.9

表 2 改变转速实测结果（第一组，无纸）

转速	磁铁攀爬 5 厘米用时，实验测试数据结果 (s)
29	109
40	67
48	75
49	77

表 3 改变转速实测结果（第二组，有纸）

转速	磁铁攀爬 5 厘米用时，实验测试数据结果 (s)
14.4	268
27.6	150
41.6	86
48	80
60	74

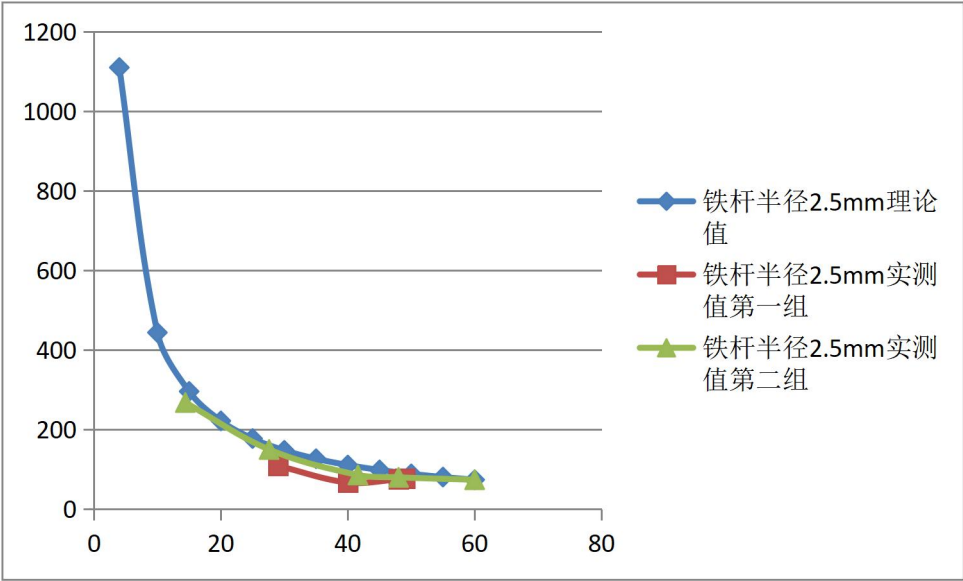


图 14 实验数据与计算数据对比

(2) 不同铁杆半径影响

磁铁半径：2.5mm（2.5、3、5、10mm）
磁铁厚度：3mm
磁铁重量：0.46 克
单个磁铁吸力：约 20 倍重力
铁杆直径：3mm
铁杆旋转速度：在实验中，铁杆的旋转速度设定了 0-60 转/分。
铁杆长度：10cm。

表 4 改变转速

转速	磁铁攀爬 5 厘米用时，理论分析计算结果（s）
4	739.9
10	295.9
15	197.3
20	147.9
25	118.4
30	98.6
35	84.5
40	73.9
45	65.7
50	59.1
55	53.8
60	49.3

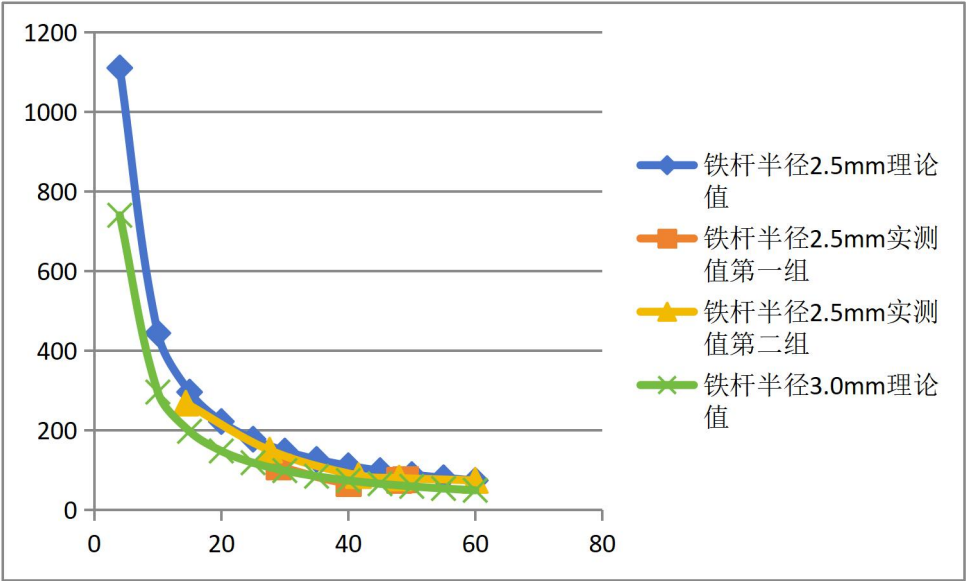


图 15 实验数据与计算数据对比

(3) 不同磁铁直径影响

磁铁半径：3mm（2.5、3、5、10mm）

磁铁厚度：3mm

磁铁重量：0.46 克

单个磁铁吸力：约 20 倍重力

铁杆直径：3mm

铁杆旋转速度：在实验中，铁杆的旋转速度设定了 0-60 转/分。

铁杆长度：10cm。

表 5 改变转速

转速	磁铁攀爬 5 厘米用时，理论分析计算结果（s）
4	739.9
10	295.9
15	197.3
20	147.9
25	118.4
30	98.6
35	84.5
40	73.9
45	65.7
50	59.1
55	53.8
60	49.3

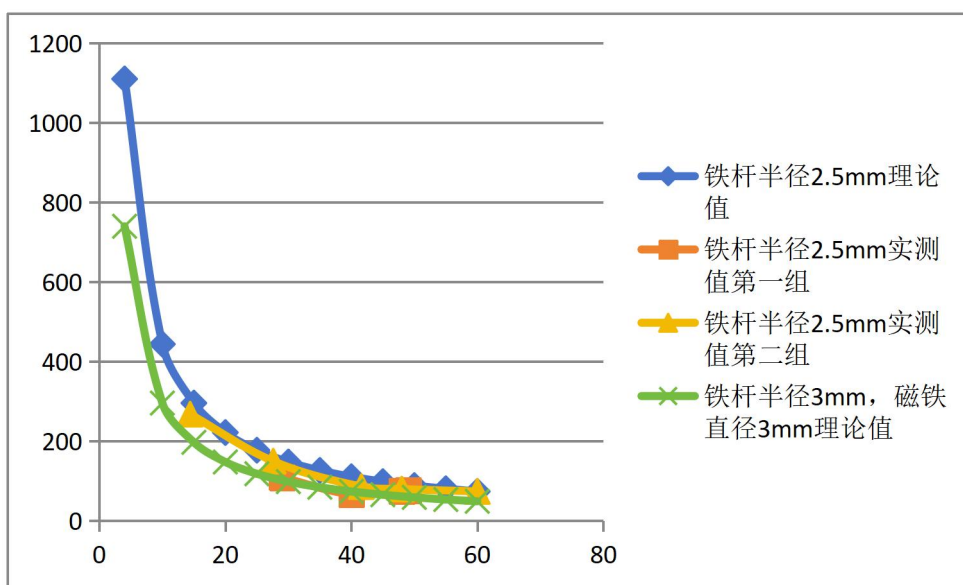


图 15 实验数据与计算数据对比

计算结果表明，在一定范围内，磁铁直径大小对攀爬速度影响不大。当铁杆旋转时，磁杆会开始向上攀爬。攀爬速率受到铁杆旋转速度的影响，旋转速度越快，攀爬速率越大。铁杆的半径也会影响攀爬速度，铁杆半径越大，在同样条件下，攀爬速度越快。磁杆的质量和磁性也会影响攀爬速率。磁铁太多时，磁铁会掉落。摩擦力也是影响攀爬速率的重要因素，因条件限制本次实验不涉及。

五. 研究结论

1. 磁铁攀爬核心驱动力是铁杆的旋转以及磁铁滑跳

实验结果表明，磁铁攀爬现象的核心驱动力源自于铁杆旋转以及由此带来的磁铁的滑跳。而不是所谓的动态磁场变化。磁感电流理论认为的所谓的，铁杆的旋转导致其周围磁场周期性地增强与减弱，这种变化直接作用于磁杆，产生向上或向下的磁力梯度，这一理论是错误的。本次实验通过观察磁铁的转动以及攀爬相关参数，已验证这一点。

2. 铁杆速度与攀爬速度的定量关系

通过对不同旋转速度下的磁铁攀爬速度进行精确测量，本研究成功建立了铁杆旋转速度与磁铁攀爬升速度之间的定量模型。分析显示，磁铁的上升速度与铁杆旋转速度呈正相关，且该关系可通过数学表达式近似描述。此模型不仅加深了我们对磁铁攀爬作用机制的理解，也为设计更高效的磁性驱动装置提供了理论依据。

3. 铁杆尺寸的影响

进一步研究发现，铁杆的直径尺寸也是影响其攀爬行为的关键因素。采用大直径尺寸铁杆，能显著增强攀爬速度。实验表明，适当调整铁杆的直径，可以优化攀爬效率。

4. 磁铁尺寸的影响

实验表明，在本次实验选择的磁铁直径变化范围内，攀爬速度与磁铁直径无关。

5. 限制磁铁仅在竖直方向运动必要性

实验中，尝试了不限制磁铁运动。即不限制磁铁仅在竖直方向运动。实验发现，磁铁仍会向上攀爬。由于实验装置的限制，无法定量测量。

6. 摩擦系数的影响

实验中因条件限制，无法考察铁杆与铁杆表面间摩擦系数对攀爬效率的影响。后续可继续研究。

