



# Magnetic Levitation

学院：求是学部

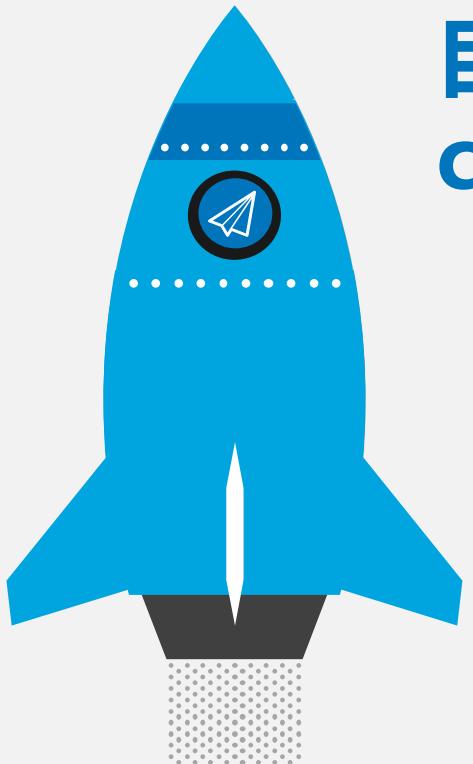
组长：樊东来

指导教师：王景





天津大学



# 目录 contents

**第一部分 | 实验背景**

**第二部分 | 实验原理**

**第三部分 | 实验介绍**

**第四部分 | 实验结论**





天津大学



01

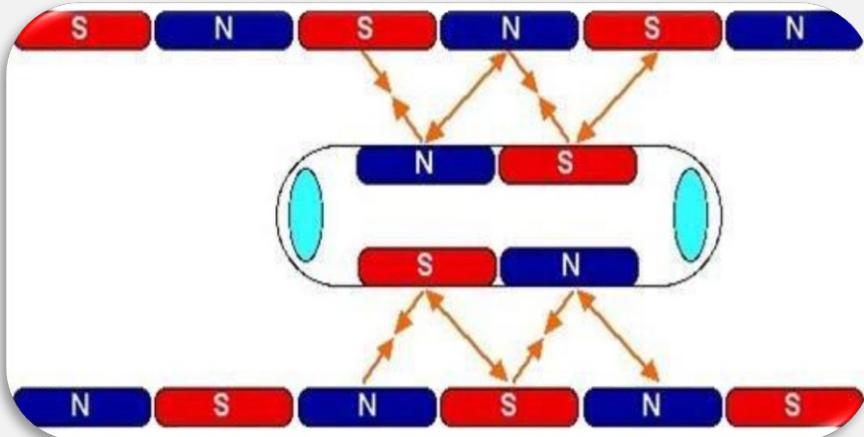
# 实验背景



Magnetic  
Levitation



## 实验背景



磁悬浮是一种施加磁场，使物体克服重力并处于稳定的平衡状态下的技术。

应用：交通运输等

特点：无摩擦、时速上限高等

寻找相对廉价且简单的稳定悬浮方法，探究影响被动悬浮动态稳定的起源及依赖参数。





天津大学



02

## 实验原理



Magnetic  
Levitation



## 实验原理

静止时，“搅拌子”和永久磁铁反向平行对齐，异名磁极相互吸引，相位角 $\varphi=\pi$ 。



永久磁铁由电动机拖动以角速度 $w_d$ 旋转。

“搅拌子”围绕着垂直于最长轴的轴旋转，旋转速度为 $w_s \leq w_d$ ，相位角减小（ $\varphi < \pi$ ）。



驱动角速度 $w_d$ 增加到临界阈值角速度。

粘性转矩将相角降低到 $\pi/2$ 以内，从而垂直方向的排斥磁力越来越大。

由于粘性扭矩对其运动的影响，通过调整流体的驱动速度( $w_d$ )和粘度( $\eta$ )来改变粘性扭矩( $M$ )，并通过驱动磁铁上方的容器底部高度( $z_b$ )来改变初始极间耦合。缓慢增加 $w_d$ ，以限制搅拌子抵制角加速度的惯性作用。

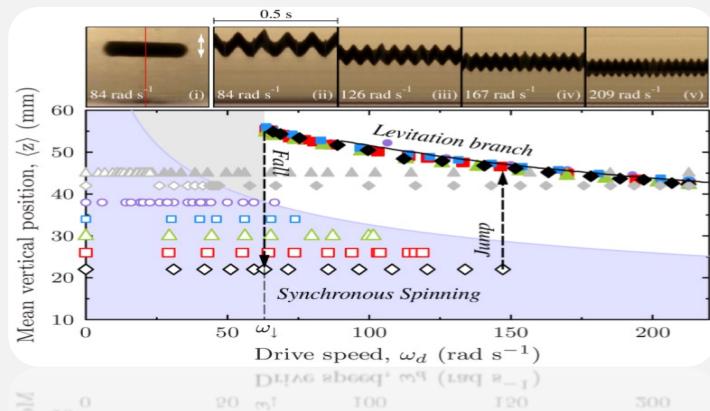
## 实验原理

“搅拌子” 平均高度  $z$  随着  $w_d$  的增加而减小。

冲击上升角速度  $w \uparrow$ : 逐渐增大  $w_d$  到 146 rad/s,  
“搅拌子”的高度会突然上升至高度近似为 45 mm。

冲击下降角速度  $w \downarrow$ : 逐渐增大  $w_d$  到 63 rad/s,  
“搅拌子”的高度会突然下降。

呈现出明显的滞后现象，在  $z_b$  等其它条件满足理想条件下， $w \uparrow$  的值要大于  $w \downarrow$ 。





天津大学



# 03 实验介绍



Magnetic  
Levitation



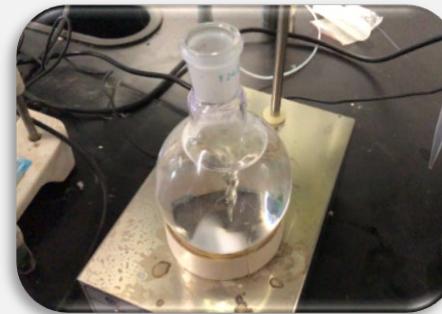
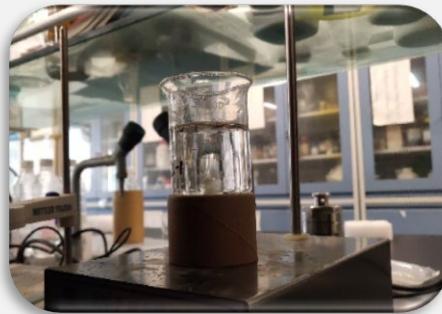
# 实验装置

磁力搅拌器 “搅拌子” 烧杯（或烧瓶）

不同粘度的液体  
(水、二氯甲烷、甲苯)

自制测量角速度的仪器

（使用视频录制“搅拌子”旋转过程，放缓视频，数出在一段时间内“搅拌子”旋转的转数。）

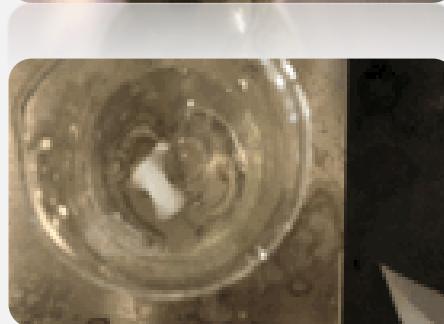
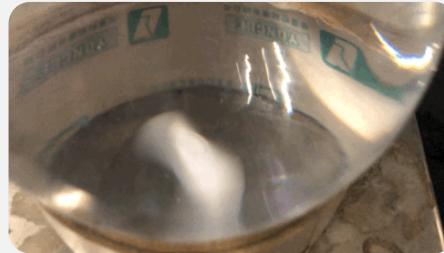


## 实验现象

在低粘度液体中（比如水），当磁力搅拌器达到特定转速时，“搅拌子”出现无规律跳动，且易产生漩涡，影响对“磁搅拌子”运动的观察。

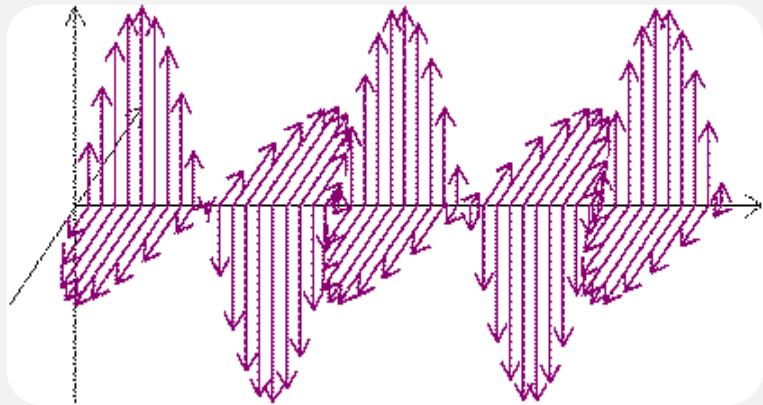
对于粘性较高的流体（ $\eta > \approx 0.4 \text{ Pa.s}$ ）（如：二氯甲烷、甲苯等）和 $z_b$ 大于阈值（ $z_b > \approx 4 \text{ cm}$ ），当磁力搅拌器达到特定转速时，“搅拌子”出现跳动最终动态稳定于距离烧杯底部几厘米处。

对于 $\eta \approx 0.4 \text{ Pa.s}$ ，对于 $z_b < \approx 4 \text{ cm}$ ，磁斥力克服了重力，搅拌子跳了起来，直到在容器底部上方几厘米处稳定悬浮。



## 实验分析

磁悬浮在流体中的动态平衡分析可分为水平旋转与垂直轴向跳动两方面，即对  $\theta$  与  $z$  的分析。在通过查阅相关资料和基于实验数据推测后，我们发现了一些影响  $\theta$  与  $z$  的参数如驱动角速度  $w_d$ 、流体粘度  $\eta$ 、烧杯距底部的高度  $z_b$  以及烧杯径向位置等。



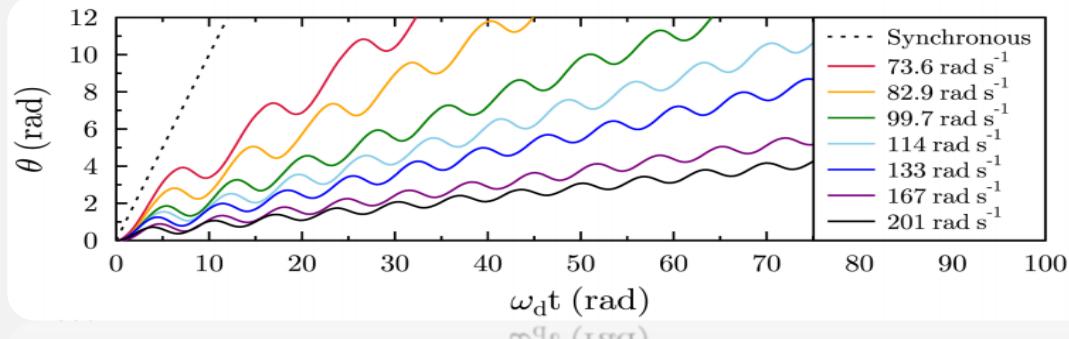
## $w_d$ 影响 $\theta$

搅拌子的角运动 $\theta(t)$ 是旋转和摇摆的组合，其中摇摆速度（ $w_w$ ）随  $w_d$  增大，而旋转速度（ $w_s$ ）随  $w_d$  减小。

$$\theta = \omega_s t + A \sin(\omega_w t)$$

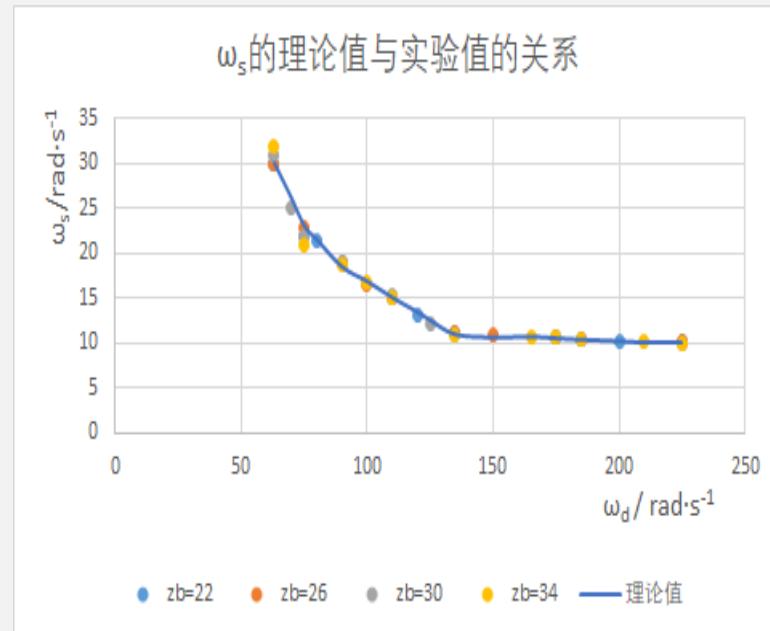
A是摆动的幅度

拟合方程中的  $w_s$ 、 $w_w$  和 A 值均是  $w_d$  和  $z_b$  的函数。



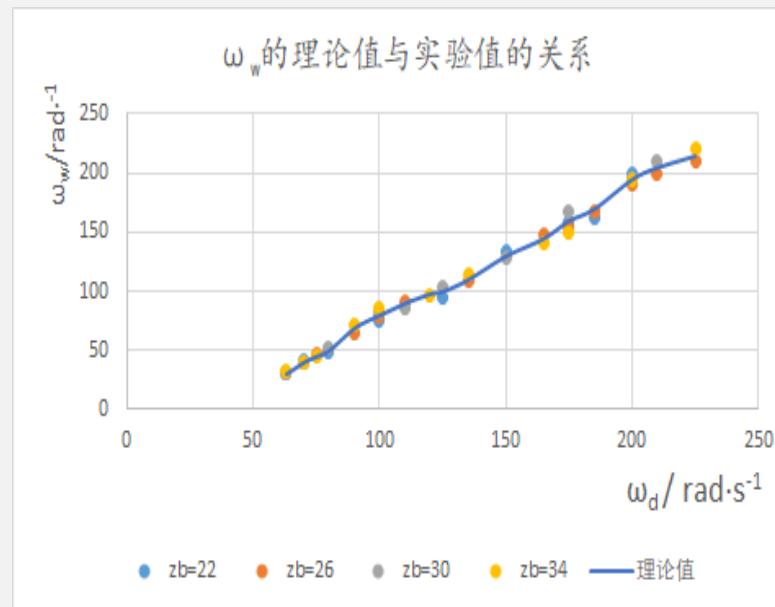
# $w_d$ 影响 $w_s$

$\omega_d$ (rad·s <sup>-1</sup> )	$\omega_s$ (rad·s <sup>-1</sup> )				
	$z_b=22$	$z_b=26$	$z_b=30$	$z_b=34$	理论值
63.000	30.000	30.000	31.000	32.000	30.000
70.000	25.500	25.600	25.000	24.950	26.000
75.000	22.000	23.000	22.000	21.000	23.000
80.000	21.500	21.450	21.870	21.448	21.500
90.000	18.890	18.886	18.979	18.700	18.500
100.000	16.550	16.500	16.710	16.800	16.900
110.000	15.000	15.100	15.200	15.100	15.100
120.000	13.100	13.190	13.231	13.350	13.500
125.000	12.290	12.340	12.100	12.590	12.600
135.000	11.022	11.025	10.999	10.965	11.034
150.000	10.839	10.845	10.987	10.679	10.700
165.000	10.658	10.632	10.588	10.753	10.762
175.000	10.546	10.545	10.599	10.598	10.598
185.000	10.440	10.455	10.446	10.479	10.444
200.000	10.265	10.255	10.278	10.263	10.269
210.000	10.116	10.110	10.123	10.126	10.137
225.000	10.103	10.105	9.994	9.998	10.110



# $w_d$ 影响 $w_w$

$\omega_d$ (rad·s <sup>-1</sup> )	$w_w$ (rad·s <sup>-1</sup> )				
	$z_b=22$	$z_b=26$	$z_b=30$	$z_b=34$	理论值
63.000	30.000	30.000	31.000	32.000	30.000
70.000	40.965	40.120	40.000	40.330	40.000
75.000	45.890	45.910	44.880	44.300	45.010
80.000	48.700	51.870	52.900	52.790	50.000
90.000	67.880	65.000	67.120	72.000	69.000
100.000	76.000	78.200	82.000	85.000	80.000
110.000	91.234	92.000	85.000	87.650	90.000
120.000	95.449	94.780	92.188	96.000	98.000
125.000	95.000	100.100	103.00	102.800	100.000
135.000	106.890	108.000	111.140	115.000	110.000
150.000	134.000	133.300	128.890	127.600	130.000
165.000	147.090	148.000	144.110	140.000	145.000
175.000	158.000	155.000	168.000	150.000	160.000
185.000	162.000	167.000	165.010	166.700	170.000
200.000	200.000	190.000	196.000	194.000	195.000
210.000	209.890	200.000	210.000	211.800	205.000
225.000	211.000	210.000	209.890	220.000	215.000



结论：

悬浮后，搅拌子的角运动与初始垂直位置无关，逐渐减小  $w_d$ ，搅拌子变得不稳定，并在  $w_d = w \downarrow \approx 63$  弧度，此时  $w_s = w_w$ 。

$w_d$ 、 $\eta$ 影响  $w_s$ 、 $w_w$ 、 $A$

$$I\ddot{\theta} + D\dot{\theta} - M(z) \sin(\theta - w_d t) = 0$$

$$D = 8\pi\gamma k\eta l^3$$

$$M(z) = \mu_0 m_d m_f / 4\pi z^3$$

$\eta$ 的值会影响阻尼系数，当液体确定下来后， $\eta$ 的值也随之确定。

I是搅拌子的转动惯量，  
D是阻尼系数， $K \approx 0.212$   $I=12\text{mm}$ 。  
 $\gamma$ 为靠近容器底部造成的阻力增加。 $m_d$  和  $m_f$  是驱动磁体和搅拌子各自的磁矩。  
常数  $m_d$ 、 $m_f$ 、 $I$  和  $\gamma$  都由实验测出。

当“搅拌子”的平均高度  $z$  为常数时：

$$\theta = \omega_d t$$

$$\begin{aligned}\sin(\phi) &= \omega_d / \omega \uparrow \\ \phi &= \theta(t) - \omega_d t\end{aligned}$$

其中：  $\omega \uparrow = (1.14 \pm 0.04)^{M(z_b)} / D$

$w_d$ 、 $\eta$ 影响  $w_s$ 、 $w_w$ 、 $A$

跳起来后异步运动——恒定扭矩驱动的阻尼摆

$$\begin{cases} w_d = \omega \downarrow \\ w_s = \omega_w \end{cases}$$



$$\begin{cases} \omega_w^2 = w_d^2 - \frac{3}{4}\omega \downarrow^2 \\ \omega_s + A\omega_w = \frac{\sqrt{3}}{2}\omega \downarrow \end{cases}$$

$$\Delta t = 2\pi / \omega_w,$$

“搅拌子”走过的角度:  $\Delta\theta_f = 2\pi \omega_s / \omega_w$

驱动磁体走过的角度:  $\Delta\theta_d = 2\pi \omega_d / \omega_w$



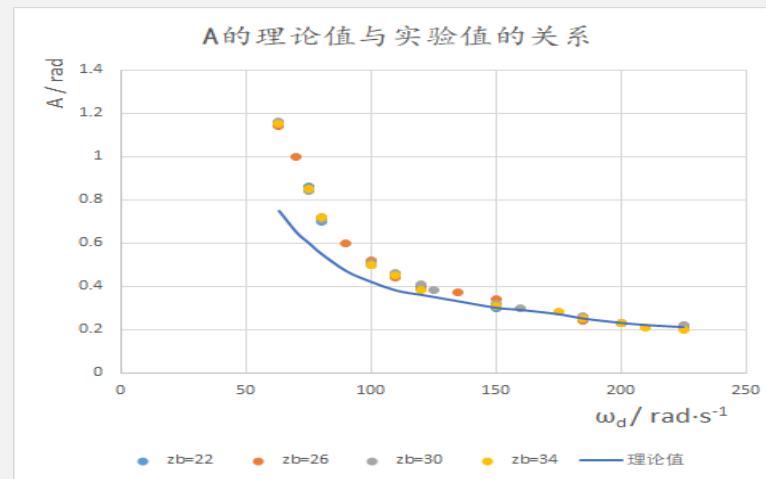
$$\Delta\theta_d = \Delta\theta_f + 2\pi$$

# $w_d$ 影响A

$\omega_d$ (rad·s <sup>-1</sup> )	A(rad)				
	$z_b=22$	$z_b=26$	$z_b=30$	$z_b=34$	理论值
63.000	1.150	1.140	1.160	1.150	0.750
70.000	1.030	1.000	1.045	1.100	0.650
75.000	0.860	0.850	0.840	0.850	0.600
80.000	0.700	0.720	0.710	0.720	0.550
90.000	0.623	0.600	0.632	0.592	0.470
100.000	0.500	0.520	0.510	0.500	0.420
110.000	0.450	0.440	0.460	0.450	0.380
120.000	0.400	0.390	0.410	0.380	0.360
125.000	0.365	0.345	0.380	0.392	0.350
135.000	0.369	0.370	0.334	0.375	0.330
150.000	0.300	0.340	0.320	0.310	0.300
160.000	0.295	0.296	0.300	0.302	0.290
175.000	0.282	0.276	0.285	0.280	0.270
185.000	0.250	0.240	0.260	0.250	0.250
185.000	0.250	0.240	0.260	0.250	0.250
200.000	0.230	0.230	0.230	0.230	0.230
210.000	0.211	0.208	0.213	0.210	0.220
225.000	0.220	0.210	0.220	0.200	0.210

结论：

除了在  $w_d$  较小处，振幅都与实验数据拟合得很好。



## $w_d$ 影响高度 (z)

$$\frac{z''}{g_1} + \frac{z'}{v_t} - \left(\frac{z_0}{z}\right)^4 \cos(\theta - \omega_d t) + 1 = 0$$

$g_1$ 为重力和浮力校正后的重力加速度。

$v_t$ 是“搅拌子”的平移终速度，即运动过程中“搅拌子”受力（重力、浮力、黏性力）平衡时一瞬间，“搅拌子”的瞬时速度。

$z_0$ 是两个磁体对齐 ( $\varphi=0$ ) 和静止 ( $w_d=0$ ) 时的理论平衡垂直间距离。

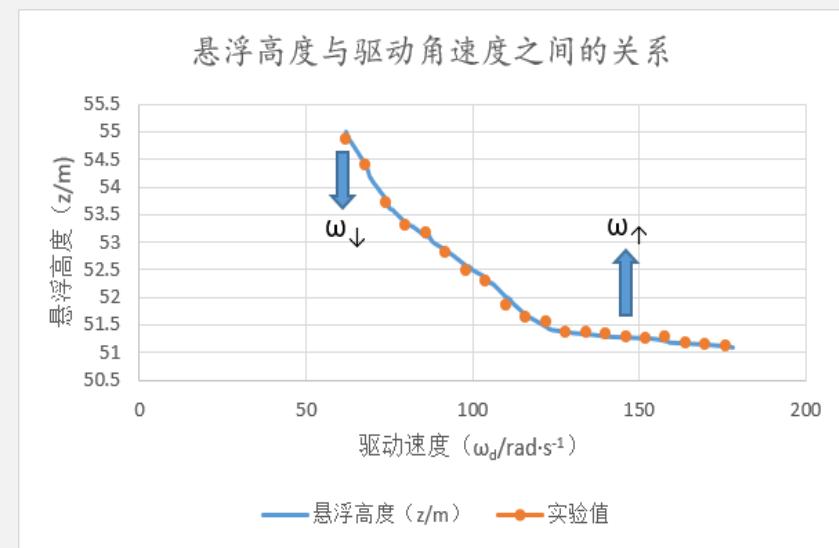
其中  $v_t$  和  $z_0$  是通过实验测得的，并且在同一次实验中，即液体的粘度等因素不变时， $v_t$  和  $z_0$  是固定的。本实验中测得  $v_t = 4\text{m/s}$ ,  $z_0 = 46\text{mm}$ 。

# $\omega_d$ 影响θ

驱动转速 ( $\omega_d/\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$ )	悬浮高度 (z/m)	理论值
62	54.850	55.000
68	54.500	54.380
74	53.620	53.770
80	53.450	53.340
86	53.250	53.100
92	52.680	52.850
98	52.470	52.570
104	52.460	52.350
110	51.850	52.000
116	51.580	51.670
122	51.620	51.460
128	51.310	51.368
134	51.400	51.326
140	51.380	51.284
146	51.200	51.265
152	51.310	51.250
158	51.140	51.200
164	51.130	51.157
170	51.142	51.136
176	51.109	51.104

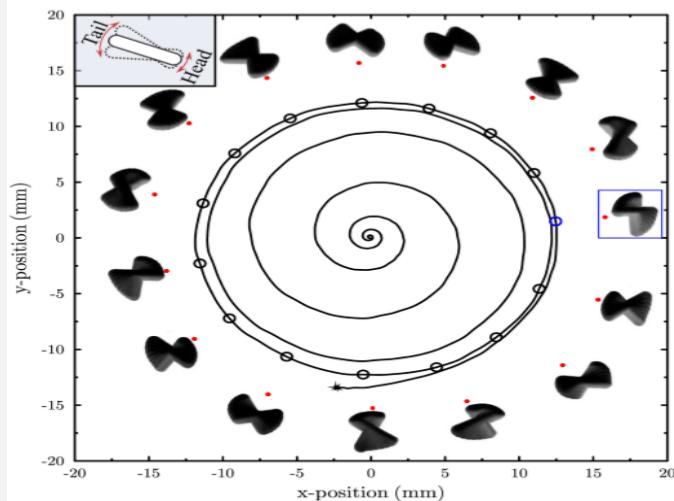
结论：

数值结果与实验数据之间的平均悬浮高度吻合。但是，当驱动速度太慢的时候，( $\omega_d < w \downarrow$ 时)，失去了垂直稳定性，即“搅拌子”无法悬浮。



## 径向位置影响“搅拌子”的运动

将放置“搅拌子”的烧杯快速水平移动了15mm，并观察到“搅拌子”沿螺旋路径返回到驱动磁铁的轴线，但是在返回的过程中，“搅拌子”是偏心的，即一端（头部）的摆动的角度会比另一端（尾部）摆动的角度更大，扫过的面积更多。





天津大学



04

# 实验结论

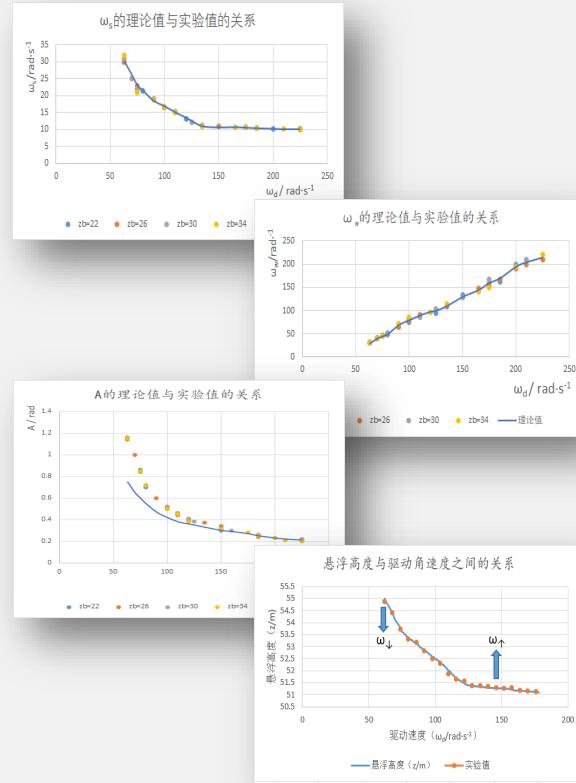


Magnetic  
Levitation



# 实验结论

根据我们的实验过程及相关资料，我们发现，磁悬浮在流体中的动态平衡起源的分析可分为水平旋转与垂直轴向跳动两方面，即对因变量 $\theta$ 与 $z$ 的分析。在通过查阅相关资料和基于实验数据推测后，我们发现了驱动角速度 $w_d$ 、流体粘度 $\eta$ 、烧杯距底部的高度 $z_b$ 以及烧杯径向位置等参数均会影响 $\theta$ 与 $z$ ，且我们对 $w_d$ 、 $z_b$ 的影响做了定量计算，将测出的实验值与理论值进行了对比；对 $\eta$ 、烧杯径向位置的影响进行了定性分析。





天津大学  
Tianjin University

# Magnetic Levitation

*Thank you*

