



把复杂分析简单化
把粗糙实验精细化



磁悬浮原理

理论&comsol模拟



分析

竖直平衡、水平平衡、转动平衡



实验过程

铋→热解石墨
装置、测量、实验现象



应用

能量采集器

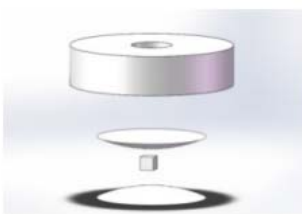


一、磁悬浮原理

- 大磁铁、热解石墨片（上）、小磁铁（悬浮体）和热解石墨片（下）的**结构**
- 大磁铁吸引力、重力、热解石墨排斥力**多力平衡**

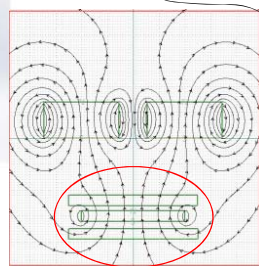
图中的**流线、颜色深浅、体箭头**用来表示磁通密度模（磁场强度）的大小和方向。体箭头的长短表示大小，箭头方向即为磁场强度方向。

原理

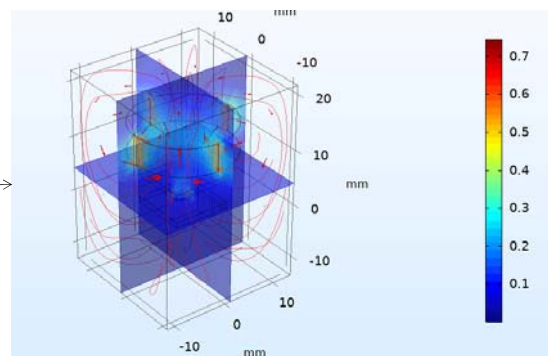


类似“不动点”束腰位置的取向势能取到局部最小，达到稳定

问题：
不精确
正确性没有保证



comsol模拟（具体数据）



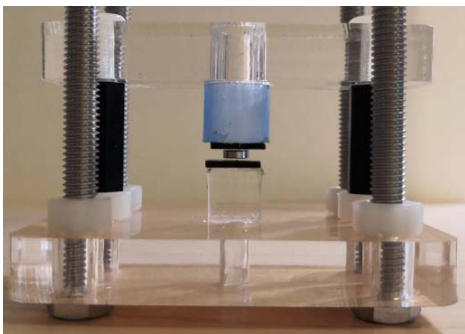
二、分析

小磁铁往任一抗磁性板运动时，抗磁力都会变强，把它推回稳定位置

重力与抗磁力
平衡

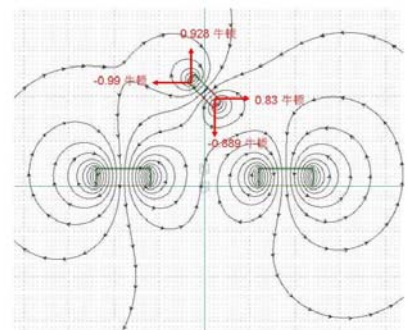
$$F = \frac{1}{2\mu_r\mu_0} B^2 S_g$$

竖直稳定



小磁铁被视作磁偶极子，势能为 $W = -\mathbf{m} \cdot \mathbf{B} + mgz$ ，即当方向与磁场方向平行时最小，对于中心位置附近，小磁铁中轴线与大磁铁中轴线重合即为稳定情况。

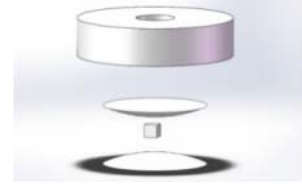
转动稳定



水平方向平衡

1) 考虑抗磁性物质的影响

2) 忽略抗磁性物质的影响



3) 等效磁偶极子

根据参考文献，悬浮小磁铁的势能U展开式为：

$$U = -M \left[B_0 + \left(B' - \frac{mg}{M} \right) z + \frac{1}{2} \right]$$

式中 $C_z \cdot z^2$ 与 $C_r \cdot r^2$ 为抗磁性材料级数展开式中的第一项； B' 为大磁铁曲率。当悬浮小磁铁处于悬浮位置相等。

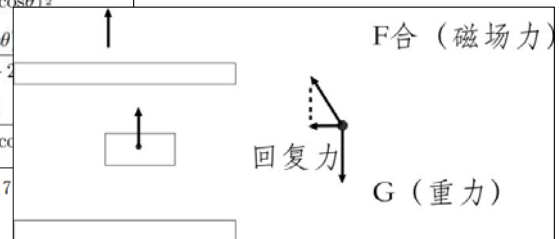
用等效电流法，把小磁铁等效在大磁铁磁场 B 的径向分量 B_r $F = 2\pi RIB$ 。

小磁铁在垂直方向和水

$$C_z - \frac{1}{2} M \cdot B'' > 0 \quad (\text{垂直方向}) \quad (7)$$

$$C_r + \frac{1}{4} M \cdot \left(B'' - \frac{B^2}{2B_0} \right) = C_r + \frac{1}{4} M \cdot \left(B'' - \frac{m^2 g^2}{2M^2 B_0} \right) > 0 \quad (\text{水平方向}) \quad (8)$$

考虑 $B'' > 0$ 且足够大，可使小磁铁满足 (8)，在水平方向上保持稳定；在悬浮小磁铁重力被两个永磁体之间的磁吸引力抵消处，加入抗磁性材料的影响系数 C_z ，使式 (7) 成立，悬浮小磁铁是可能稳定悬浮的。



三、实验过程

设计装置与选择材料

9



设计装置与选择材料

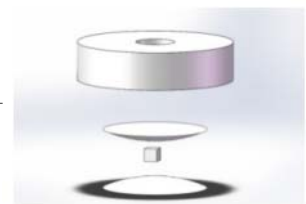
10

装置

- 可调节高度的管状装置（由诸多小的水管零件拼接）
- 铋锭选用电解电容外壳作为模子
熔化铋粉浇制而成

铋粉→热解石墨

- 铋的两个问题：
- ① 精确切割电解电容的工具（线锯）不具备；
- ② 烧制铋锭需要的271℃条件不具备；



设计装置与选择材料

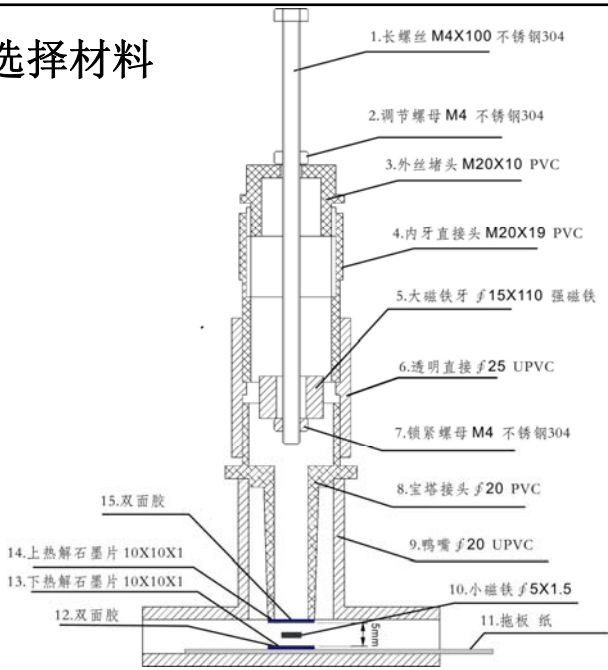
铋粉—>热解石墨

- 如表1，热解石墨的磁化系数是诸多常见反磁物质中最强的。
- 热解石墨的尺寸（10*10*1）能满足实验条件，即反磁物质面积大于小磁铁。

表 1 常见反磁物质的磁化系数

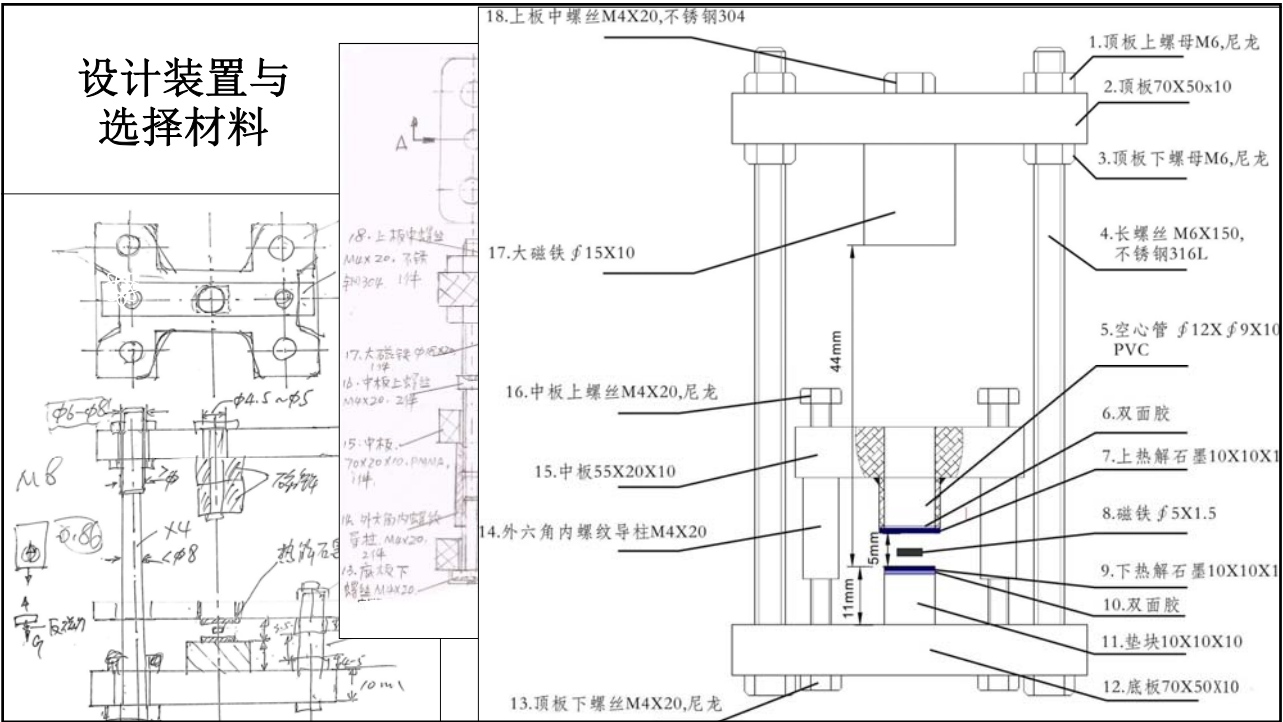
材料	磁化系数 (10^{-5})
铜	-0.9
锌	-1.4
金	-3.6
铋	-16.7
石墨	-16
热解石墨	-47

装置螺纹间隙较大，调节精度不够，且难以测量高度数据，对于后续半定量讨论造成了阻碍。

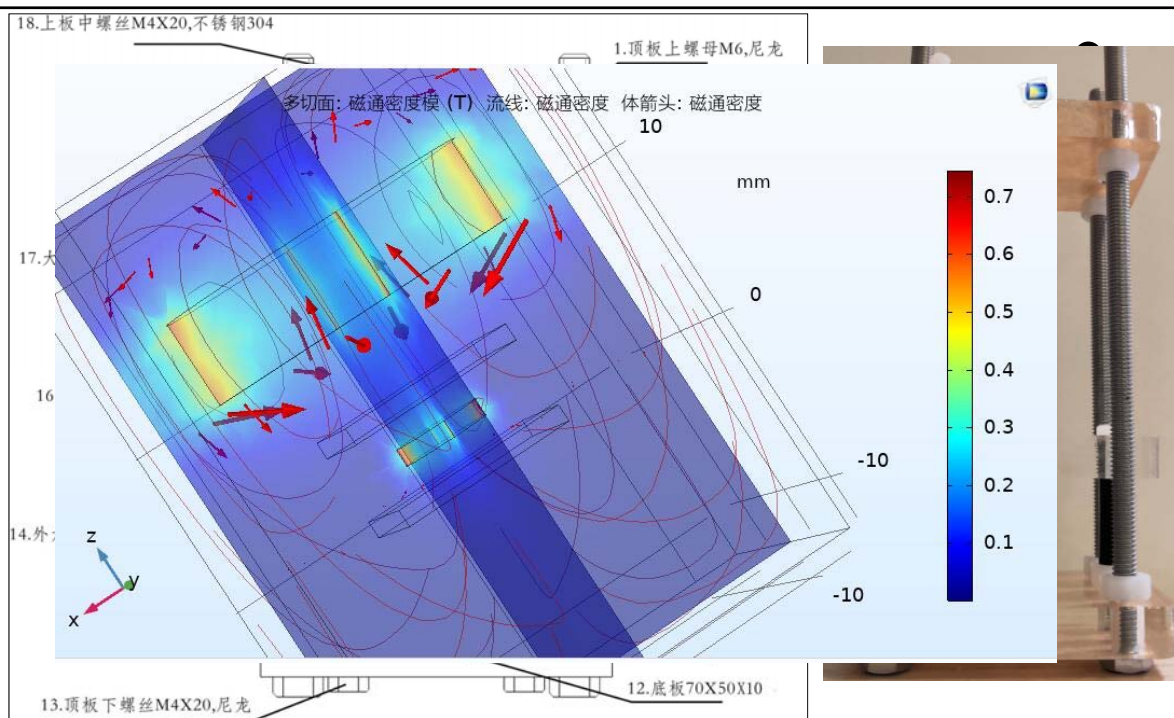


第一次设计图CAD版本

设计装置与选择材料



设计装置与选择材料

实验
视频

四、应用

能量采集器

在抗磁能量采集器工作过程中，悬浮磁体上下运动导致上、下感应线圈切割磁力线，产生感应电动势，通过蓄电电路对感应电动势加以存储。此结构是一种可以自给自足的能量采集器设备，对解决未来MEMS的供电问题而言，具有很大的潜在价值。

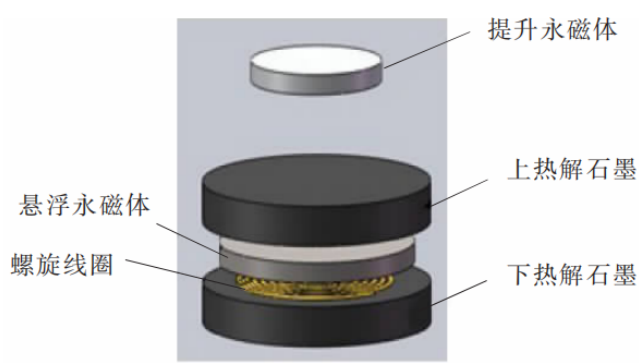


图1 微型抗磁悬浮振动能量采集器的结构模型

把复杂分析简单化 把粗糙实验精细化



磁悬浮原理

理论&comsol模拟



分析

竖直平衡、水平平衡、转动平衡



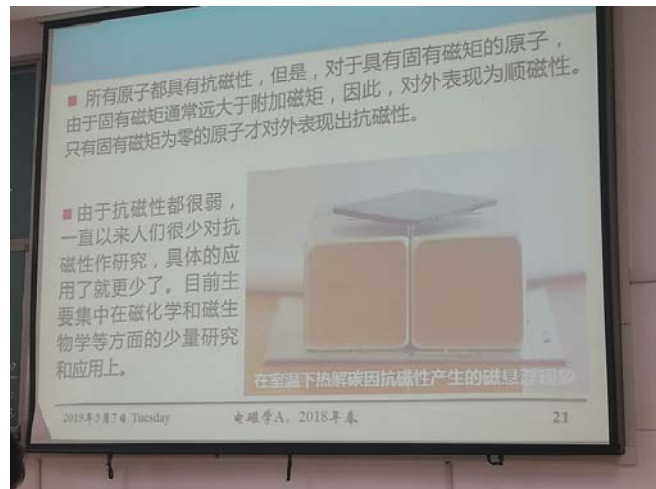
实验过程

铋→热解石墨
装置、测量、实验现象



应用

能量采集器



Thanks
for
Listening