

利用磁流体作电磁感应器的分析及实验

周凌霄 物院三班



- 摘要:
- 对一般简单磁流体模型给出在长直导线产生磁场下的分布分析, 给出磁流体分布建模;
- 对煤油基磁流体作对应的分布实验记录实验结果;
- 对实验结果和理论结果比较, 作出合理折中推论、并进行应用展望。



一、理论下简化的磁流体模型

1.1 认为可以将磁流体无限分割成一个一个可独立流动的“磁流体液滴”, 在每个液滴处认为磁化保持同向线性, 即 $M = \chi_m H$ 。

1.2 认为磁化率 χ_m 不会随着时间、空间、外界磁场强度发生明显变化, 在一定范围保持不变 (外界温度远低于居里温度)。

1.3 认为磁流体在无外界磁场下, 本身不具有磁性 ($H=0$ 时为一般流体)

并由此可以导出简化磁性液体的

Bernoulli 方程



简化磁性液体的Bernoulli方程:

认为磁流体是不可压缩的匀质流体, 外界温度远低于居里温度, 稳定后不存在旋转, 稳定后匀速流动, 则可以写出简化的力学方程 (能量角度):

$$\frac{1}{2} \rho \nabla(v^2) = f_p + f_m + f_g$$

f_p : 体积压强力 f_m : 体积磁力 f_g : 体积重力



在其中:

$$\frac{1}{2} \rho \nabla(v^2) = f_p + f_m + f_g$$

$$f_p = -\nabla P$$

$$f_g = -\nabla(\rho gh) \quad h \text{ 为到参考点距离}$$

$$f_m = \mu_0 \nabla M \cdot \nabla H = \nabla(\mu_0 \int_0^H M dH) - \mu_0 \int_0^H (\nabla M)_z dH$$

由于是匀质液体, M 只与 H 和温度 T 有关, 而在远低于居里温度时, M 也可以近似认为不随温度变化, 则:

$$\mu_0 \int_0^H (\nabla M)_z dH = 0$$

因此最后可以写出:

$$\frac{1}{2} \rho \nabla(v^2) = -\nabla P - \nabla(\rho gh) + \nabla(\mu_0 \int_0^H M dH)$$

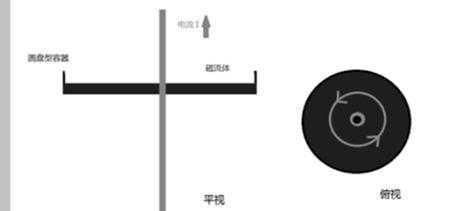
由于任意性, 对上式化简后就得到简化磁性液体的 Bernoulli 方程:

$$P + \rho gh + \frac{1}{2} \rho v^2 - \mu_0 \int_0^H M dH = C \quad (1)$$



二、个人所做的实验模型及分析

在一个重力加速度 g 不变的小范围空间中, 磁流体均匀分布在一个圆盘形的范围内, 有一个无限长直导线穿过圆心, 一并穿过磁流体, 当长直导线通电后, 具有电流 I 。



- 首先，当导线有电流时，电流周围会出现环形磁场，越靠近导线，磁场强度越高。直观上去看，顺磁性的物体在磁化后会向有磁性的地方聚集，在这个模型下，通入电流必定会使磁流体的分布发生变化，而我们的目的就是去看这种变化是什么



当通电后（电容器不稳定），由于外界长直导线产生的环形磁场，磁流体必因受力而发生流动，流动稳定后，磁流体分布发生变化。以圆心为0，在距圆心r处，外界磁场为：

$$H = \frac{I}{2\pi r} \quad (2)$$

- 由于是匀质液体，考虑液体分布情况实际上是考虑其在圆盘上每一点所堆积的液体的量，而又由于原盘及导线的对称性，所以只需要求解在一个过圆心且垂直于圆盘的面上的磁流体高度分布，就可以代表磁流体分布。
- 而流体每一处的最高点，又是流体与外界气体的分界面，我们就有

$$P + P_n = P_a + P_c$$


$$P + P_n = P_a + P_c$$

- P 为液体本身压强
- P_n 为由于法向外磁场产生的表面应力
- P_a 为外界大气压强
- P_c 为液体表面张力

首先 $P_n = 0$ ，这是因为由于选取模型的简易性，实际上每一处的外界磁场方向都与液面的法向正交



- 而由于液体表面压强在外界磁场相对较大时很大，液体表面张力与之相比很小，在此处为了进一步简化，忽略 P_c



- 分析过后我们就有 $P = P_a$ ，也就是，认为液体本身压强会与外界大气压强相同。

代入简化磁性液体的 Bernoulli 方程 (1)，得：

$$\rho gh + \frac{1}{2} \rho v^2 - \mu_0 \int_0^H M dh = C = C'$$

显然稳定后 $v=0$ ，进一步化简得：

$$\rho gh - \mu_0 \int_0^H M dh = \rho gh_0 - \mu_0 \int_0^H M dh \quad (6)$$

取 h_0 为远处（边缘处）的磁流体高度，也就是看作分布稳定后磁流体自然堆积所产生的高度，此时 $H_0 \rightarrow 0$ 代入得：

$$h_r - h_0 = \mu_0 \int_0^H M dh_r \quad (7)$$

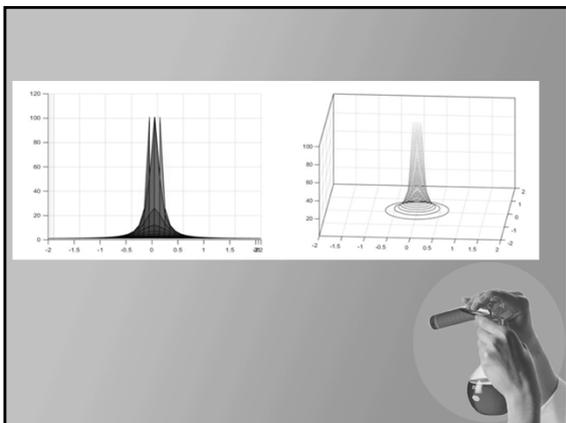
采用简化的线性磁化模型 $M = \chi_m H$ 代入积分得：

$$h_r - h_0 = \frac{1}{\rho g} \mu_0 \chi_m H^2 \quad (8)$$

将磁场分布 (2) 式代入得：

$$h_r = \frac{\mu_0 \chi_m I^2}{8\pi^2 \rho g r^2} + h_0 \quad (9)$$

这是在简化后磁流体的高度分布曲线，其中 h_0 只与磁流体总放入量有关。

三、实验及分析

- 1、估计： $h_r = \frac{\mu_0 \chi_m I^2}{8\pi^2 \rho g r^2} + h_0$ 这里将

设 $\frac{\mu_0 \chi_m I^2}{8\pi^2 \rho g r^2} = 0.005 \text{ m}$ 也就是上升高度能达到 0.5cm
 $r = 0.005 \text{ m}$ 就是考虑距导线半径于 0.5cm 内的磁流体。
 $\chi_m = 0.2$ 为磁场较小时的一般磁流体磁化率。
 $\rho = 800 \text{ kg/m}^3$ ，为煤油的密度。
 $g = 9.8 \text{ m/s}^2$

- 可以算出要 300 多安培的电流才能使现象明显



▪ 实验材料：煤油基磁流体、99.99%铜棒、2.7V 4F 电容器、铜导线、夹子



整体 未通电前 通电 放大图像



▪ 具体现象:

- 1、未接通前磁流体水平。
- 2、接通电容器的短时间内，磁流体鼓起来一小块，不明显，近距离观察才能发现。
- 3、鼓起来的部分不是对称的，是略微偏向的。
- 4、鼓起来的部分并不像理论图像中那么尖锐，从数学上说是一种“二阶导数小于0”的感觉。

分析：2、放电快，电流小

- 3、斜置？别的导线？
- 4、磁化率变化？表面张力？





▪ 总结：磁场强度不够大

四、应用展望

1、测量电流

(1)首先关于这种分布的推导，是建立在“磁流体本来是水平放置的，导线是垂直放置的”这样一个基础上，但在一般的实际生活中，如果只是限于于垂直放置的导线，可测量的范围就减少了很多。

(2)前面的计算可以释出，想要让这种装置在电流的作用下出现可观察的分布变化，需要很大的电流才能做到，至少要几百安培才能有明显变化。

这两点在很大程度上限制了类似装置在测量电流上的应用，但是也不能否定，电流很大，或者电压给定，用很小的电阻去接电路，以此获得足够的电流，在这些情况下，可以用此类装置去测量电流、电压的大致数值，当然如果装置能做的更精密，磁流体的性能能做的更好，或许测量的精度就能提高。

2、测量外界磁场

磁场相对于电流来说，肯定更易引起磁流体的变化，实际上，由于：

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r}$$

前面已经计算过，1在400A就能从肉眼看到明显现象，此时： $B = 0.02T$

这也就是说只要环形磁场强度达到10⁴量级，在磁流体磁化性能较好的情况下就能实现测量磁场。

如果我们把这个装置做成了一种 Gauss 计用以测量环形磁场，而环形磁场的主要应用就是热核聚变托克马克装置，一般的托克马克装置等离子体中心磁场强度是 3T 量级，或许我们可以利用这个装置去测量、监控其环形磁场的运行情况。当然由于托克马克装置的环形磁场分布与长直导线的磁场分布并不相同，由于我的水平有限也不能够导致在磁流体中磁流体的分布，但我相信，通过利用对称性，用磁流体去测量环形磁场是可行且简便的，这还需要我进一步学习。



感谢





蔡心宇给我的铜棒
和每日c100的瓶盖

徐泽生给我的电容器

高杨和我一起拧的导线

感谢课程老师叶邦角老师

