

一种铁磁流体密封系统的理论研究*

赵丕智

(北京航空航天大学机电工程系,北京,100083)

摘 要: 利用磁路方法和简化的 Navier-Stokes 方程,导出了锥形空间内磁场强度分布和旋转时铁磁流体稳定界面的计算方程。分析了密封间隙、密封角和转速对密封能力的影响。

主题词: 铁磁材料,磁流体动力稳定性,旋转密封

分类号: TB42

RESEARCH ON A FERROFLUID SEALING SYSTEM

Zhao Pizhi

(Dept. of Mech. and Electr. Eng., Beijing Univ. of Aeronautics and Astronautics, Beijing, 100083)

Abstract: Equations to calculate the distribution of magnetic field intensity in a cone space and the steady interface of the ferrofluid at rotating state were given with magnetic circuit method and simplified Navier-Stokes equation. Meanwhile the effects of sealing clearance, sealing angle and rotating speed on the sealing were also analysed.

Subject terms: Ferromagnetic material, Magnetohydrodynamic stability, Rotary sealing

1 引言

铁磁流体密封原理是利用永磁体、磁极靴和转轴组成磁路,在强磁场作用下,铁磁流体以O形环的形式保持在所需密封的间隙中,靠磁场梯度所形成的压差来平衡,达到完全密封。

铁磁流体密封是一种非接触式的液体密封,因此它特别适用于高速旋转、零泄漏、低噪音以及表面加工要求不高的密封场合。本文针对锥形空间铁磁流体密封能力进行理论研究,指出其特点并给出一些实用简便的计算方法。

2 理论方程

2.1 密封区内磁场强度 H_r

为了研究铁磁流体的密封耐压能力,需要计算出密封区内的磁场强度分布。为简便,拟采用磁路方法进行计算。图1是密封区附近磁路方法的计算模型。根据磁路定理

$$\sum_{i=1}^n \Phi_i R_i = NI_0$$

式中 Φ 为磁通量, R 为磁阻, I_0 是磁路中线圈内的电流强度。由于采用永磁体磁路, $I_0 = 0$ 。方程变为:

* 本文1996年4月28日收到,修改稿1996年6月8日收到

$$\Phi_m R_m + \Phi_f R_f + \sum_{i=1}^{n-2} \Phi_i R_i = 0 \quad (1)$$

下标 m, f 分别表示在永磁体及铁磁流体中。根据磁通连续定理以及磁感应强度 B 的定义和与磁场强度 H 的关系, 可导出:

$$\Phi_m R_m = H_m L_m; \quad \Phi_f R_f = H_f L_f$$

代入(1)式得:

$$H_m L_m + H_f L_f + B_f dA_f \sum_{i=1}^{n-2} R_i = 0 \quad (2)$$

(2)式为计算密封区内磁场强度的基本关系式, 当已知永磁体的退磁曲线和铁磁流体的磁化曲线后, 取单位长度 dz 的微单元磁管(圆周方向 $d\theta$), 按几何关系代入不同区域内的磁管长度 L_i 和截面积 dA_i , 即可求出磁场强度。

图2和图3分别为永磁体钕铁硼(NdFeB)的退磁曲线和北京航空航天大学化学教研室研制的BH-1铁磁流体的磁化曲线。为了计算方便, 将其拟合为近似方程式。

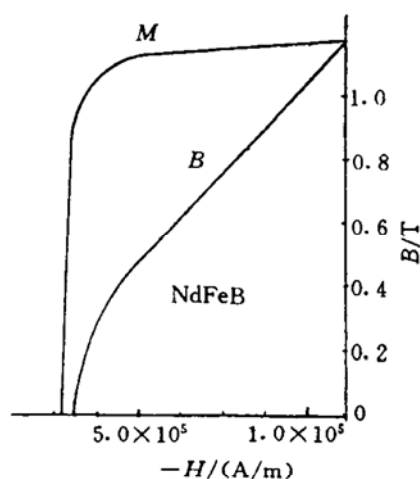


Fig. 2 Demagnetizing curve of permanent magnet (NdFeB)

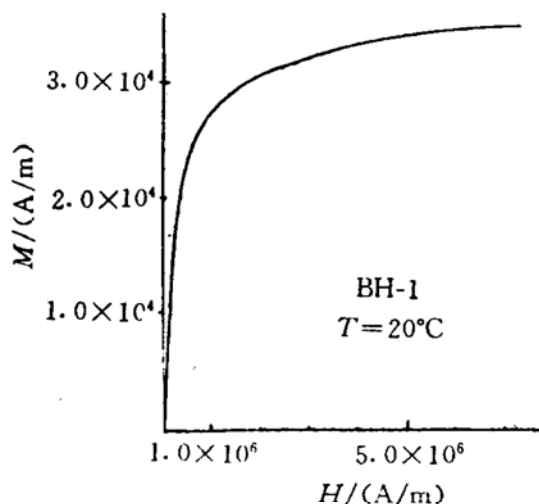


Fig. 3 Magnetization curve of ferrofluid (BH-1)

$$H_m = \begin{cases} (-8.5 + 7.329B_m)10^5 & 0.4 \leq B_m \leq 1.16 \\ (-6.685 + 6.627B_m^{1.945})10^5 & 0 \leq B_m \leq 0.4 \end{cases}$$

$$B_f = \mu_0(H_f + M_f) \quad M_f = 7676H_f^{0.112}$$

式中 M_f 为铁磁流体的磁化强度, 它与 H 的单位为 A/m (A 为安培), B 的单位为 T (特斯拉)。BH-1铁磁流体的饱和磁化强度 $M_s = 35500$ A/m。代入(2)式得出计算用方程:

$$\left[-8.5 + 7.329 \frac{dA_f}{dA_m} \mu_0 (H_f + 7676H_f^{0.112}) \right] 10^5 L_m + H_f L_f +$$

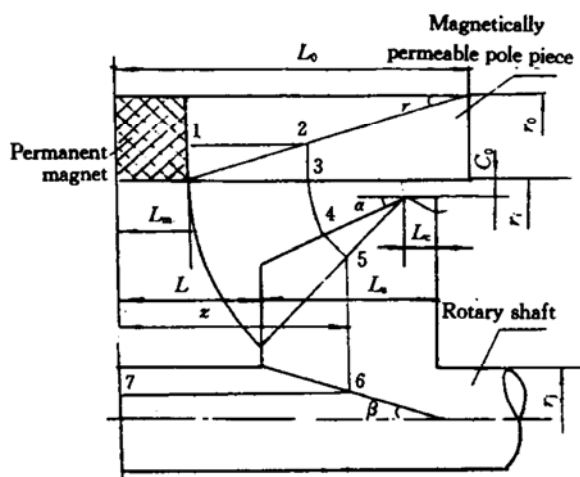


Fig. 1 Geometry for evaluating the magnetic field

$$dA_f(H_f + 7676H_f^{0.112}) \sum_{i=1}^{n-2} R_i = 0 \quad 0.4 \leq B_m \leq 1.16$$

$$\left\{ -6.685 + 6.627 \left[\frac{dA_f}{dA_m} \mu_0 (H_f + 7676H_f^{0.112}) \right]^{1.945} \right\} 10^5 L_m + H_f L_f +$$

$$dA_f(H_f + 7676H_f^{0.112}) \sum_{i=1}^{n-2} R_i = 0 \quad 0 \leq B_m \leq 0.4$$

2.2 磁压 p_t

在磁场的作用下,铁磁流体将产生一个磁场力,罗孙威格(Rosensweig)利用其特性,在Navier-Stokes方程中加上此体力,导出了磁压关系式:

$$p_t = \mu_0 \int_0^{H_f} M_f dH_f \quad (3)$$

需要研究的密封耐压能力 Δp 即为最小间隙 C_0 处(磁场最强)与铁磁流体外表面处(点 A)磁压之差:

$$\Delta p = (p_t)_{C_0} - (p_t)_A \quad (4)$$

2.3 铁磁流体体积 V_f

为了研究铁磁流体注入量 V_f 与密封耐压能力 Δp 的关系,可以利用回转体的求积公式 $dV_f = 2\pi r_m ds$, 导出其体积 V_f 的计算式(从略)。式中 r_m 为回转半径, ds 为回转微元面积。

2.4 旋转情况下的铁磁流体密封

当转轴旋转时,带动密封区内的铁磁流体转动,产生的离心力将使其静止时的自由表面变形,从而影响密封能力。在一定的转速下,铁磁流体的稳定表面即与外界大气的分界面是一个等压面,已知此面即可知道密封耐压能力 Δp 。

从图4中可以看出,密封区内一点半径为 r 处,当 $r=r_i$ 时, $u=0$,磁靴静止不转。但当 $r=r_w(z)$ 时,即在具有 α 角的转轴边界时, r 不仅随 z 变化,且线速度 u 也变,因此求其精确解十分困难。我们采用工程近似的方法。

在定常流和轴对称的条件下,不考虑偏心的影响。由于 $r_i - r_w \ll r_i$, 取平均速度 $\bar{U}$ 代替 u 。假定密封区内铁磁流体的切向流速完全是由粘性引起的剪切流,即 $u = a + br$, 这样在忽略重力条件下,简化的 N-S 方程经变换和处理得:

$$dp^* = \frac{\rho \bar{U}^2 (1 - \bar{\delta})^2}{r_w + \bar{\delta}} d\bar{\delta}$$

在分界面上 $p^* = p_a - p_t$ (p_a 为大气压),

$$\text{所以} \quad dP^* = -dp_t = \frac{\rho \bar{U}^2 (1 - \bar{\delta})^2}{r_w + \bar{\delta}} d\bar{\delta}$$

积分得

$$p_t = -\rho \bar{U}^2 \left[(1 + \bar{r}_w)^2 \ln(\bar{r}_w + \bar{\delta}) - 2(1 + \bar{r}_w)(\bar{r}_w + \bar{\delta}) + \frac{1}{2}(\bar{r}_w + \bar{\delta})^2 \right] + C$$

积分常数 C 的确定靠在磁靴表面取一点 A 作为起点,从而定出一个等压面。即

$$r_A = r_i \quad (\bar{\delta} = 1, u = 0) \text{ 时, } p_t = (p_t)_A$$

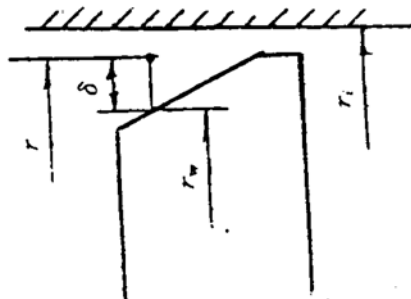


Fig. 4 Model for the calculation

代入得

$$p_i = (p_i)_A + \frac{1}{2} \rho U^2 \left[2(1 + \bar{r}_w)^2 \ln \frac{1 + \bar{r}_w}{\delta + \bar{r}_w} - (3 + 2\bar{r}_w - \delta)(1 - \delta) \right]$$

计算时先在磁靴内表面取一点 A , 已知 $(p_f)_A$, 利用上式可逐点定出一条等压线。有了等压线即可求出此线下的铁磁流体体积, 若不等于所注入的体积 V_f , 还需改变 A 点的位置, 重新计算, 直到体积相等为止。此时的密封耐压能力为:

$$\Delta p_{\max} = (p_i)_{C_0} - (p_i)_A - \frac{1}{2} \rho U^2 \left[2(1 + \bar{r}_w)^2 \ln \frac{1 + \bar{r}_w}{\delta + \bar{r}_w} - (3 + 2\bar{r}_w - \delta)(1 - \delta) \right] \quad (5)$$

显然, 当静止时, (5) 式退化为 (4) 式。

3 计算结果与分析

计算时采用下列参数:

$$L = 0.75 \text{ cm}, L_m = 0.5 \text{ cm}, L_s = 0.25 \text{ cm},$$

$$L_c = 0.03 \text{ cm}, L_0 = 1.05 \text{ cm}, r_0 = 3.75 \text{ cm},$$

$$r_i = 2.0 \text{ cm}, r_j = 1.6 \text{ cm}, C_0 = 0.01 \text{ cm},$$

真空磁导率 $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$, $\bar{\mu}_b = \mu_b / \mu_0 = 11250$ (下标 b 为磁靴中), $\bar{\mu}_t = \mu_t / \mu_0 = 1$,

$$\text{铁磁流体密度 } \rho = 1110 \text{ kg/m}^3$$

(1) 磁场强度 H_f : 图5表示了 $\alpha = 60^\circ$ 时密封区域内的磁场强度分布。可以看出在最小间隙 C_0 区内磁场强度最强, 逐渐向两侧减弱。当铁磁流体两侧压力相等即 $\Delta p = 0$ 时, 此时密封膜处于自由状态, 平衡在两侧磁场强度相等的界面上。当受压后, $\Delta p \neq 0$, 铁磁流体移动, 靠稳定后两界面上磁场强度差产生的磁压差来平衡 Δp 。

(2) 密封间隙 C_0 : 图6表示了一定体积 V_f 下, 改变 α 和 C_0 时密封耐压能力 Δp 的变化关系。 C_0 减小可以使磁力线更加聚集, 磁场强度加大, 从而使 Δp 提高。

(3) 体积 V_f : 图7为注入的铁磁流体体积量与 Δp 的关系。显然注入 V_f 越多, 受压时两侧平衡时的磁场强度差就大, Δp 也高。

(4) 密封角 α : α 角的改变会使密封区周围的磁场强度变化, 从而影响 Δp 。 α 角增加可以使内、外两侧的磁场强度梯度加大, Δp 提高。但 α 角的增加会使所包含的铁磁流体体积增加, 当体积一定时, 又会减小磁场梯度。所以 α 角的影响不十分明显。

(5) 速度 U : 图8是转轴旋转时计算出的密封区内铁磁流体的自由表面形状。它形成一个凹陷下去的漏斗形。转速越高漏斗越向最小间隙处移动, Δp 也就越小。当到达 C_0 处时, 密封破裂, 图9给出 Δp 与速度 U 的变化关系。

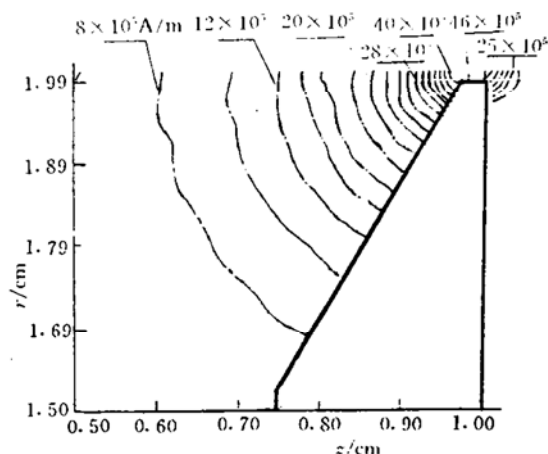


Fig. 5 Magnetic field distribution of seal region

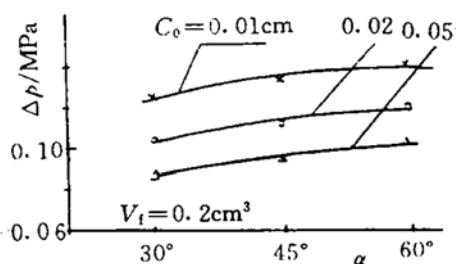


Fig. 6 Angle α versus seal capacity

4 结 论

为了提高锥形空间铁磁流体的密封能力,需要注意以下问题:

(1) 铁磁流体的饱和磁化强度 M_s 对提高密封耐压能力明显,应选用尽可能高的铁磁流体;

(2) C_0 取小一点好,但取太小一方面 Δp 增加并不明显,也受工艺装配限制,一般 C_0 选在 0.01~0.02cm 之间;

(3) 注入的体积 V_i 多,会使 Δp 上升。但注入量过多,超过锥形密封区后,对 Δp 的影响就不大了;

(4) α 角选取宜适中,过大过小均不好,一般在 $30^\circ \sim 60^\circ$ 之间为宜;

(5) 设计磁路时应尽量通过聚磁办法来减少通过非密封区的磁通(漏磁)。计算显示,漏磁影响较大,漏磁越多,密封耐压能力越差。

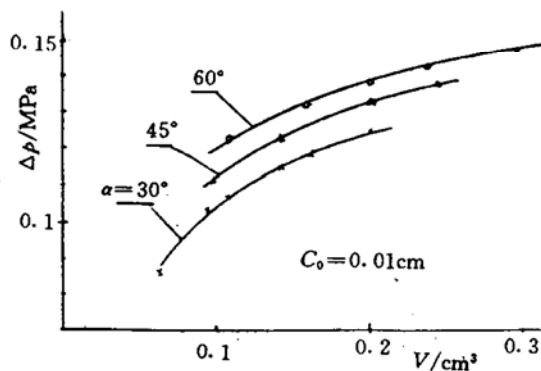


Fig. 7 Volume V versus seal capacity

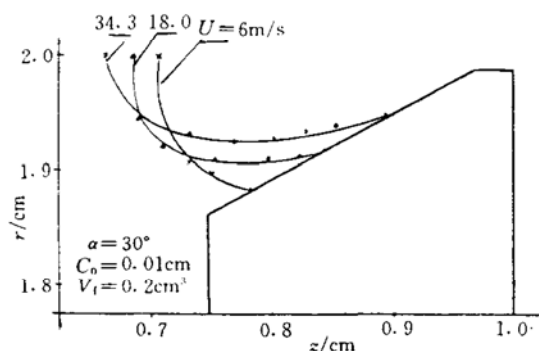


Fig. 8 Constant presser surface of ferrofluid for rotating

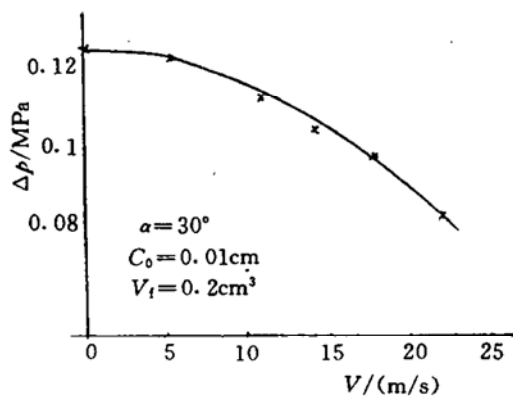


Fig. 9 Speed $\bar{U}$ versus seal capacity

参 考 文 献

- 1 Rosensweig R E. Ferrohydrodynamic. Cam bridge Univ. Press, 1985
- 2 神山新一著. 王之珊译. 磁性流体的原理与应用. 北京航空学院第六研究室, 1986
- 3 池长青, 王之珊, 赵丕智. 铁磁流体力学. 北京: 北京航空航天大学出版社, 1993
- 4 孙大成. 铁磁流体润滑轴颈轴承的磁密封能力研究. 北京航空学院科研报告 BH-B1343, 1984
- 5 潘 华. 铁磁流体密封的理论与实验研究: [硕士学位论文]. 北京航空航天大学研究生院, 1991