

双环无源磁悬浮轴承的径向刚度研究

敏 政, 杨逢瑜, 杨 瑞, 刘 峰, 杨洪娟

(兰州理工大学 磁性物理与磁技术研究所, 甘肃 兰州 730050)

摘 要: 由双磁环组成的永磁磁悬浮轴承的径向刚度很有限. 为了提高这种磁悬浮轴承的刚度可采用一种磁体的堆叠结构, 通常的磁堆叠结构是使 2 块磁体的磁化方向相反. 在此介绍了一种旋转磁化方向(Rotating Magnetization Direction, RMD)的堆叠. 这种方法与传统的堆叠相比, 通过两因素中的一种就可以改变磁悬浮轴承的刚度.

关键词: 永磁; 磁悬浮; 轴承

中图分类号: TG132.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1004-0366(2005)01-0081-03

Study Radial Stiffness of Permanent Magnetic Bearings

MIN Zheng, YANG Feng-yu, YANG Rui, LIU Feng, YANG Hong-juan

(Research Institute of Magnetism & Magnetic Technology, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

Abstract: The radial stiffness of magnetic bearings composed of only two permanent magnet rings is limited. Generally, stacked structures are used to increase the suspended stiffness by placing the magnets in opposite magnetizations. But there is another type of stacking in the rotating magnetization direction (RMD), which can also improve the stiffness of magnetic bearings.

Key words: permanent magnets; magnetic suspension; bearings

磁悬浮轴承分为两大类: 无源磁悬浮(又称为永磁磁悬浮、被动磁悬浮)和有源磁悬浮(主动磁悬浮). 无源磁悬浮和有源磁悬浮的磁路系统是类似的, 所不同的主要是后者有电磁力和自动控制系统.

关于永磁磁悬浮, 1842 年 Earnshaw 证明了磁悬浮的 Eatnshow 定理. Earnshaw 定理证明: 由于磁场力与磁隙的平方成反比关系, 仅靠永磁体无法在 6 个自由度上都保持稳定的悬浮状态. 即只有永磁体的磁悬浮系统一定是不稳定的.

当系统中没有电流, 则静磁场的拉普拉斯方程为

$$\nabla^2 W = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial W}{\partial x^2} + \frac{\partial W}{\partial y^2} + \frac{\partial W}{\partial z^2} = 0, \quad (2)$$

式中: W 为系统的静磁能. 为使系统处于稳定平衡, 静磁能的二阶微商必须大于零, 即

$$\frac{\partial W}{\partial x^2} > 0, \frac{\partial W}{\partial y^2} > 0, \frac{\partial W}{\partial z^2} > 0 \quad (3)$$

显然式(2)和式(3)这 2 个关系式不可能同时满足. 这就是说在一个仅有永磁体构成的外磁场中, 永磁体不可能在全部自由度上都得到稳定平衡. 在最好的情况下, 稳定只能在 2 个自由度上得到, 在另一个自由度上必须引入电磁力, 才能使系统达到稳定平衡. 也可以引入其他可控制的力, 例如液压力、摩擦力等, 来使系统达到平衡.

永磁被动磁悬浮轴承常用作轴向定中心的磁悬浮轴承(径向磁化轴承)和轴向定位的磁悬浮轴承(轴向磁化轴承)^[1](图 1A, B).

最简单的永磁磁轴承是由 2 块永磁体组成. 图 1 是永磁径向磁轴承, 轴向磁化和径向磁化的 2 块永磁体是互相排斥的. 而这 2 种磁化的作用是相同的.

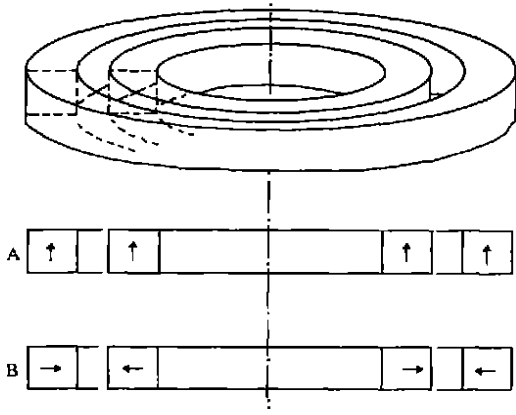


图1 2种类型的径向永磁磁悬浮轴承
A. 轴向磁化式; B. 径向磁化式

当系统出现偏心时, 永磁径向磁轴承将会产生一个恢复力. 这一特性由磁悬浮轴承的径向刚度来 K_r 和轴向刚度 K_z 描述:

$$K_r = -\frac{dF_r}{dr}, \quad (4)$$

$$K_z = -\frac{dF_z}{dz}, \quad (5)$$

并有

$$2K_r + K_z = 0, \quad (6)$$

式中: F_r 为永磁轴承径向力, F_z 为用磁轴承轴向力.

磁悬浮轴承的径向刚度值取决于轴承的几何形状和磁化强度值的平方. 当径向刚度不足时, 其他形式的轴承可以加上去以起辅助作用. 自上而下的堆叠形式已被应用, 以下介绍一种用径向和轴向磁化的环构成的堆叠结构.

1 永磁磁悬浮轴承的刚度

有 2 磁环组成的磁轴承(图 2)的刚度可以通过解析求得^[2].

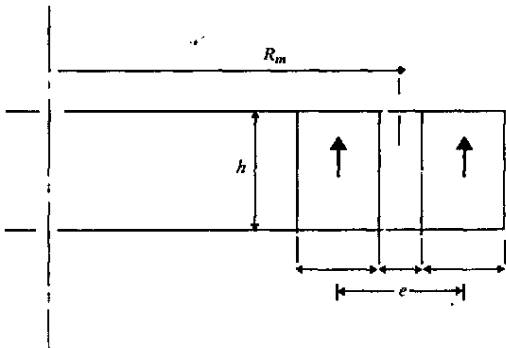


图2 永磁磁悬浮轴承

图2中断面的环的径向刚度表达式为:

$$K_r = \frac{-M^2}{2\mu} R_m \ln \frac{(2l+e)^2 e^2 [(l+e)^2 + h^2]^2}{(l+e)^4 [(2l+e)^2 + h^2] (e^2 + h^2)}, \quad (7)$$

式中: R_m 为平均半径(m), M 为磁化强度(T), l, e, h 为所采用的单位应一致.

这种类型的磁轴承的尺寸修正后, 它的刚度变化不大.

图3显示了方形断面磁环($h=l$) 径向刚度变化的例子. 这一例子的尺寸如: 磁隙: $e=1$ mm, 磁极化强度: $J=1$ T, 平均半径: $R_m=25.5$ mm (内磁环的直径是 50 mm). 当 $l=h=3$ mm 时, K_r 径向刚度为 16 N/mm. 当 $l=h=6$ mm 时, $K_r=27$ mm. 当磁体的体积增长为 l^2 时, 径向刚度将变为 $\ln l$. 当需要较大的径向刚度时, 可采用其他辅助轴承.

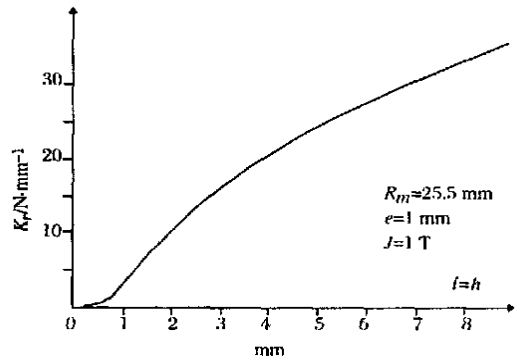


图3 磁悬浮轴承的刚度与几何尺寸关系

2 相斥磁轴承的堆叠

可以采用上下堆叠的方法来提高磁悬浮轴承的径向刚度($l=h, n=4$) 见图 4.

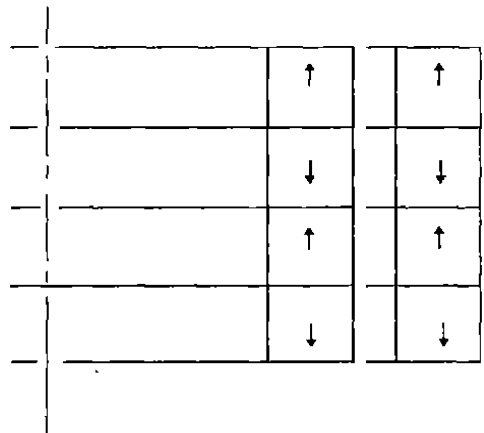


图4 方形断面磁轴承的堆叠

这种方法已被工业应用^[3]. 其总刚度可用下式近似表示:

$$K_m = (2n-1) K_r. \quad (8)$$

再分析前面的的例子, 当 $h=l=5$ mm 时, 它的

总刚度为 $K_m = 24.2 \text{ N/mm}$.

表 1 证实了 n 个轴承被堆叠起的总刚度值近似等于 $(2n-1)$ 倍的单对磁悬浮轴承的刚度值 .

表 1 堆叠和 n 个单对刚度值的对照

n	$K_m/\text{N} \cdot \text{mm}^{-1}$	$(2n-1)K_r$
1	24.2	24.2
2	73.8	72.6
3	117.3	121.0
4	162.2	169.4

一般来说, 当 4 对轴承被堆叠起来后, 它的磁体体积增到 4 倍, 而径向刚度增到 7 倍 . 这个结论很有意思, 它还有可能被改变 .

3 旋转磁化轴承的堆叠

有一些磁场是旋转磁场, 它的磁化方向是有规律的变化^[4] . 这种结构已经被用在许多磁力机械, 如磁力偶和器、磁分离机等 . 这种结构用再次轴承上可以提高磁悬浮轴承的径向刚度 . 图 5 表示了这种系统 . 它的理想磁体断面为:

$$h \approx \frac{1}{2} . \quad (9)$$

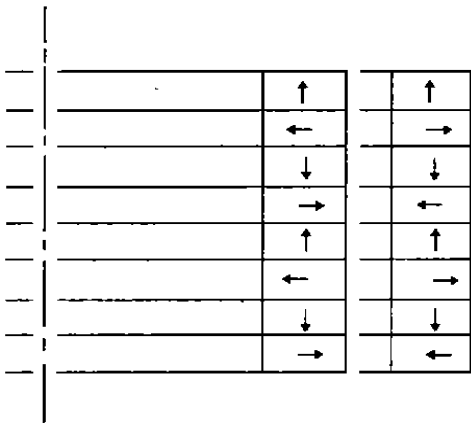


图 5 旋转磁化系统

作者简介:

敏 政, (1965-) 男, 青海省人, 硕士, 兰州理工大学流体动力与控制学院副研究员, 主要从事流体机械和磁技术的研究 .

图 4 和图 5 的结构所用的磁体体积相同, 即是单对磁体的 4 倍 . 旋转磁化刚度是上下堆叠结构刚度的 2 倍, 这是一个很大的改进 . 图 5 中径向磁化环 ($H = 1/2$), 其磁体体积与图 4 相同, 但径向刚度比试图 4 系统高出 1.8 倍 . 总的增益是轴承高度的函数, 这个值与基本堆叠轴承相同 . 基本在 1.8 和 2 之间.

4 旋转磁化轴承堆叠的实施

RMD 磁悬浮轴承系统与以往的系统相比在径向刚度和刚度磁体体积比方面有了很大的改进, 但是它的实施有一定的难度.

通常的堆叠中所有的磁环都是轴向磁化, 而在 RMD 中, 轴向磁化和径向磁化各占一半 .

5 结论

当磁体叠放时, 可以达到较大的刚度 . 单对磁轴承体积增加时, 刚度的增加不明显 . 但是数对轴承堆叠, 它的刚度明显提高而旋转磁化方向的堆叠磁悬浮轴承的径向刚度是普通磁轴承的 1.8 倍, 是普通通轴磁悬浮轴承的 2 倍, 磁体体积增加到 4 倍 .

参考文献:

- [1] Yonnet J P. Permanent Magnet Bearings and Couplings[J]. IEEE Trans Magn MAG-17, 1981. 1169-1173.
- [2] Yonnet J P. Analytical Calculation of Magnetic Bearings[J]. Proc V Int Workshop on RE-Co PM, Roanoke, VA, June 1981, edited by K. J. Strnat, 199-216.
- [3] Harrison A J. An Optimized 50 N-m Momentum Wheel Utilizing Magnetic Repulsion Bearings[J]. Proc AOCs Conf, 1977. 389-393.
- [4] Halbach K. Design of Focusing and Guide Structures[J]. Proc V Int Workshop on RE-Co PM, Roanoke, VA, June 1981, edited by K. J. Strnat, 73-80.