

永磁偏置的磁力轴承的研究

王怀颖

(南京师范大学控制科学与工程系, 210042, 南京)

[摘要] 对永久磁铁产生的偏置磁场进行了分析, 并将永久磁铁产生的磁力与电磁铁产生的磁力进行对比; 分析了永磁偏置磁力轴承的结构, 为永磁偏置磁力轴承的工程实用做了理论基础工作.

[关键词] 永久磁铁, 计算公式, 偏置磁力轴承

[中图分类号] TM273; TH133.3, [文献标识码] A, [文章编号] 1672-1292-(2003)01-0038-04

0 引言

磁力轴承由于其转子和定子之间没有任何机械摩擦, 具有无磨损, 运行无噪音, 寿命长, 适应于工作温度高的工作环境等普通轴承无以比拟的优点, 目前, 在国际上已被应用到分子涡流泵, 反击式水轮机, 离心压缩机等高速旋转的机械设备中.

磁力轴承的静态偏置磁场一般可由两种方式产生: 其一是给定子(用软磁材料制成)线圈加偏置电流产生磁场(如图 1 所示); 其二是直接用永久磁铁(用永磁材料制成)提供偏置磁场(如图 2 所示). 由于过去的永磁材料与软磁材料相比, 耐高温性能较差, 这在一定程度上限制了永久磁铁在高温环境中的应用, 因而以往的磁力轴承的偏置磁场一般采用前一种方式.

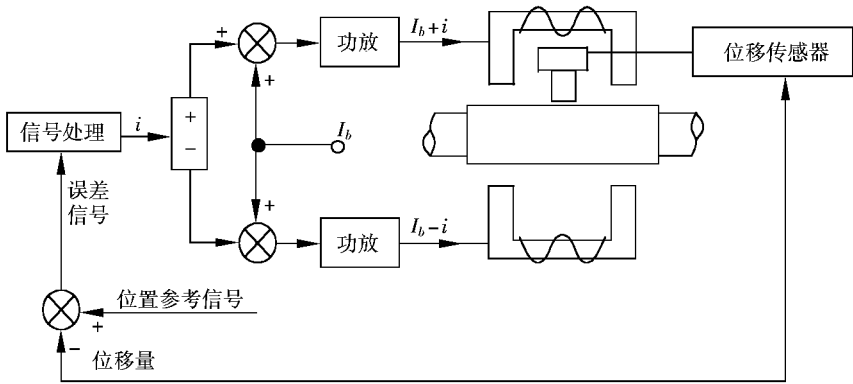


图1 电磁轴承控制原理图(一对磁极)

随着过去十几年内永磁材料技术的飞速发展, 使得永磁材料的耐高温性能得到很大提高, 尤其是 SM-CO、NdFeB 等永久磁铁材料在产量、产生能量方面, 适用的温度范围以及稳定性、可靠性方面都有较大的提高, 因此, 用永久磁铁代替定子线圈产生偏置磁场已成为磁力轴承研究的一个新的趋势.

与以往的电磁轴承相比, 用永久磁铁提供偏置力, 用电磁铁产生控制力的永磁偏置磁力轴承更能显著减小功率放大器的功率损耗, 减小电磁铁的安匝数, 使磁力轴承的承载能力提高、重量减轻, 尺寸减小, 尤其对航空航天业具有重要意义, 但是永磁偏置磁力轴承在磁路设计方面比电磁轴承更复杂, 因此有必要对这种混合磁力轴承进行详细研究.

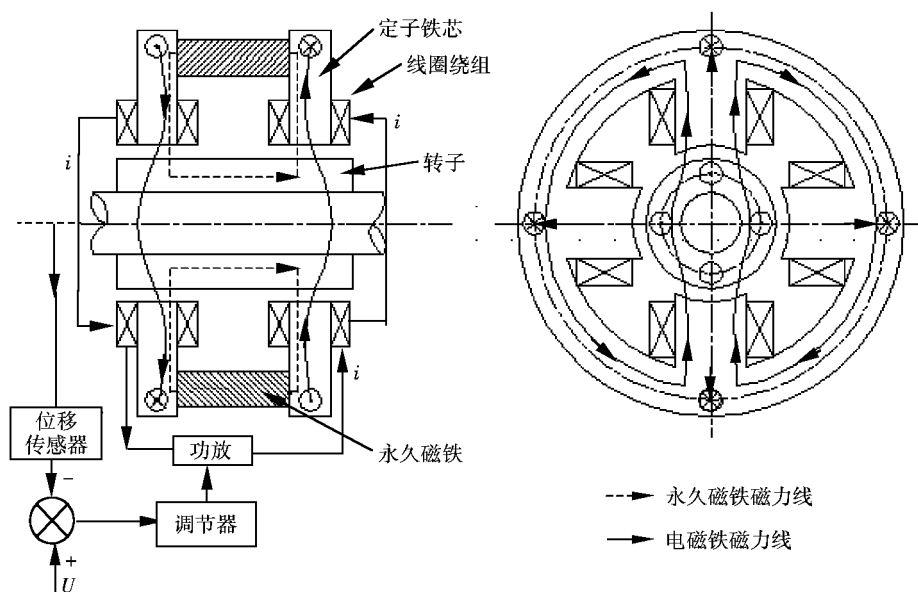


图2 混合磁力轴承的结构及磁路

1 电磁轴承的电磁力

图1所示为电磁轴承控制原理图,即由定子线圈加偏置电流产生偏置磁场,其电磁力经推导为:

$$F = \frac{\mu_0 A_a N^2}{4} \left[\left(\frac{I_b + i}{g_0 + y} \right)^2 - \left(\frac{I_b - i}{g_0 - y} \right)^2 \right] \quad (1)$$

式中: μ_0 为真空磁导率; A_a 为气隙磁场横截面积; N 为电磁线圈匝数; I_b 为偏置电流; i 为控制电流; g_0 为电磁轴承在平衡位置时的电磁气隙; y 为转子在电磁气隙中的偏移量。

将(1)式在 $y=0$ 平衡位置经 Taylor 级数展开,略去高阶小量,并线性化为:

$$F \approx F_0 \Big|_{\substack{y_0=0 \\ i_0=0}} + \frac{\partial F}{\partial y} \Big|_{\substack{y_0=0 \\ i_0=0}} y + \frac{\partial F}{\partial i} \Big|_{\substack{y_0=0 \\ i_0=0}} i \quad (2)$$

即:

$$F = k_y y + k_i i \quad (3)$$

其中:

$$\begin{cases} k_y = \frac{\partial F}{\partial y} \Big|_{y_0=0} = \frac{-\mu_0 N^2 I_b^2 A_a}{g_0^3} \\ k_i = \frac{\partial F}{\partial i} \Big|_{y_0=0} = \frac{\mu_0 N^2 I_b A_a}{g_0^2} \end{cases} \quad (4)$$

以上所述公式即是电磁轴承的磁力计算公式,是控制系统设计的理论依据。

2 永磁偏置的磁力轴承的结构分析

图2为永久磁铁提供偏置力、电磁铁提供控制力的混合磁力轴承的结构示意图,图中给出了磁力线路径。4个圆柱形永久磁铁夹在两个分别带有4个极柱的定子之间。永久磁铁产生的偏置磁力线从永久磁铁的一个磁极出发穿过层叠硅钢片组成的极柱、工作气隙、再沿轴向穿过转子,然后再穿过工作气隙到达另一个定子的极柱,回到永久磁铁的另一个磁极。

两个定子环上线圈绕组串联起来,只由一个功率放大器驱动,由电磁铁线圈产生的控制磁力线穿过定子极柱、空气气隙、转子内部,到达径向相对的极柱,返回的磁力线路径有两条分别沿定子环形成闭

合. 这种设计每个定子只需要4个极柱和4个线圈绕组, 并且只用一个功率放大器驱动, 而由电磁定子线圈产生偏置磁场的电磁轴承至少需要8个极柱, 采用一对对称的功放电路, 按差动模式驱动电磁铁.

通过将永磁材料的 $B-H$ 曲线与定子线圈通过电流的磁阻抗相对比, 来确定永久磁铁的尺寸. 永久磁铁与定子环之间的间隙间有硅钢片制成的垫片, 通过增加或减少垫片的数量, 改变偏置磁力线回路的阻抗, 改变或调整偏置磁场的强度. 该磁场强度可由电磁传感器测得.

3 永磁偏置的磁力轴承的磁力推导

假设气隙磁通均匀, 不考虑铁芯磁阻, 漏磁及涡流损耗的情况下, 当图2所示的永磁偏置磁力轴承系统的转子受到向下的扰动时, 磁力轴承上下气隙处的磁感应强度分别为 B_{PM} 与 B_{AC} 的矢量和, B_{PM} 、 B_{AC} 的计算公式为:

$$B_{PM} = \frac{\mu_0 L_{PM} A_{PM} H_{PM}}{2A_g g_0} \quad (5)$$

$$B_{AC} = \frac{\mu_0 Ni}{2g_0} \quad (6)$$

则磁力轴承上下气隙处的磁感应强度值为:

$$\left\{ \begin{array}{l} B_{1L} = \frac{\mu_0 N_L I_L}{2g_0} + \frac{\mu_0 L_{PM} A_{PM} H_{PM}}{2A_g (g_0 + y)} \\ B_{1R} = -\frac{\mu_0 N_R I_R}{2g_0} - \frac{\mu_0 L_{PM} A_{PM} H_{PM}}{2A_g (g_0 + y)} \\ B_{2L} = -\frac{\mu_0 N_L I_L}{2g_0} + \frac{\mu_0 L_{PM} A_{PM} H_{PM}}{2A_g (g_0 - y)} \\ B_{2R} = \frac{\mu_0 N_R I_R}{2g_0} + \frac{\mu_0 L_{PM} A_{PM} H_{PM}}{2A_g (g_0 - y)} \end{array} \right. \quad (7)$$

式中: B_{1L} , B_{1R} 为转子上方左、右两边的磁感应强度; B_{2L} , B_{2R} 为转子下方左、右两边的磁感应强度, 其中: $N_L = N_R = N$, $I_L = I_R = i$; B_{PM} 为空气气隙中永久磁铁产生的磁通密度; B_{AC} 为空气气隙中由控制线圈产生的偏磁密度; A_g 为异性极的磁极面积;

永磁偏置的磁力轴承的磁力为:

$$F = \frac{B_{1L}^2 A_g}{2\mu_0} + \frac{B_{1R}^2 A_g}{2\mu_0} + \frac{B_{2L}^2 A_g}{2\mu_0} + \frac{B_{2R}^2 A_g}{2\mu_0} \quad (8)$$

设: $y = A_{PM}/A_g$, 将(7)式代入(8)中, 经整理得永磁偏置的磁力轴承的承载能力为:

$$F = \frac{\mu_0 N^2 L_{PM}^2 H_{PM}^2 A_g y}{g_0^2 - y^2} i - \frac{\mu_0 L_{PM}^2 H_{PM}^2 y^2 A_g y}{(g_0^2 - y^2)^2} \quad (9)$$

当 $y = 0$, 转子处于中心位置时, 总磁力为:

$$F = \frac{\mu_0 N^2 L_{PM}^2 H_{PM}^2 A_g y}{g_0^2} i \quad (10)$$

此时磁力 F 与电流 i 成线性关系, 当 $F = 0$ 时 $i = 0$, 此时的能量损耗为零.

磁力 F 是转子位移 y 与线圈电流 i 的非线性函数, 为确定转子的稳定性与动态特性, 在平衡位置 $y_0 = 0$, $i_0 = 0$ 附近按 Taylor 级数展开得:

$$F \approx F_0 \Big|_{\substack{y_0=0 \\ i_0=0}} + \frac{\partial F}{\partial y} \Big|_{\substack{y_0=0 \\ i_0=0}} y + \frac{\partial F}{\partial i} \Big|_{\substack{y_0=0 \\ i_0=0}} i \quad (11)$$

$$F_0 = 0 \quad (12)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} k_y = \left. \frac{\partial F}{\partial y} \right|_{\substack{y_0=0 \\ i_0=0}} = \frac{-\mu_0 L_{\text{IM}}^2 H_{\text{PM}}^2 \gamma^2 A_g}{g_0^3} \\ k_i = \left. \frac{\partial F}{\partial i} \right|_{\substack{y_0=0 \\ i_0=0}} = \frac{\mu_0 N L_{\text{IM}} H_{\text{PM}} \gamma A_g}{g_0^2} \end{array} \right. \quad (13)$$

k_y 、 k_i 分别定义为位移刚度系数与电流刚度系数。

将(4)式与(13)式对比可以看出:电磁轴承中偏置电流 I_b 的作用在永磁偏置的磁力轴承中被永久磁铁取代,并且 NI_b 相当于 $L_{\text{PM}}H_{\text{PM}}\gamma$ 。

4 结论

永磁偏置的磁力轴承与一般的电磁轴承相比可以降低功率损耗,减小轴承的体积,增大承载能力等优点。本文对永久磁铁产生的偏置磁场进行了分析,将永久磁铁产生的磁力与电磁铁产生的磁力进行了对比,并分析了永磁偏置的磁力轴承的结构,得出电磁轴承的偏置磁场完全可以用永久磁铁来代替电磁铁产生,但是永磁偏置的磁力轴承要投入工程实用还必须解决控制系统设计、磁路的相互耦合等方面的难题。

[参考文献]

- [1] E H Maslen, P E Allaire, M D Noh, *et al.* Magnetic Bearing Design for Reduced Power Consumption[J]. Journal of Tribology, 1996, 118: 839~ 845.
- [2] Satoru FUKATA, Kazuyuki YUTANI. Characteristics of Magnetic Bearings Biased with Permanent Magnets in the Stator[J]. JSME International Journal, Series C 1998, 41(2):206~ 213.
- [3] Y Zhilichev. Analysis of a Magnetic Bearing Pair with a Permanent Magnet Excitation[J]. IEEE trans on Magnetics, 2000, 36(5): 3690~ 3692.
- [4] 曾励,汪通悦,徐龙祥,等. 永磁电磁轴承产生悬浮力的机理研究[J]. 航空学报, 2000, (3): 219~ 221.

Research on Mixed-magnetic Force Bearings with Permanent Magnets Producing Biased Force

Wang Huaiying

(Department of Control Science and Engineering, Nanjing Normal University, 210042, Nanjing, PRC)

Abstract: This paper analyzes the biased magnetic field produced by permanent magnets. The magnetic force produced by permanent magnets is compared with that produced by electromagnets. With the structure of bearings biased with permanent magnets analyzed, this thesis puts forward the theory as to the practical use of bearings biased with permanent magnets.

Key words: permanent magnets, calculation formula, bias magnetic force bearings

[责任编辑: 刘健]