

径向磁悬浮电主轴系统设计研究*

陈帝伊¹ 刘淑琴² 马孝义¹

(1. 西北农林科技大学水利与建筑工程学院电气系, 杨凌 712100)

(2. 山东大学电气工程学院, 山东省磁悬浮工程技术研究中心, 济南 250061)

摘要 本文主要从工业实际应用的角度出发, 提供了一种从径向磁悬浮电主轴的结构设计开始到控制系统的整个系统的完整新颖的设计方法, 其中在结构设计中提出了两个对结构起决定意义的参数——X(每极的圆周宽度/(每极的圆周宽度+每槽的圆周宽度))和Y(槽的径向厚度/每个槽的圆周宽度), 并对它们的科学取值进行了深入的探讨, 还给出了由机械特性——刚度和阻尼出发迅速设计出PID控制器的计算公式, 最后进行了功率损耗分析和发热量校验. 本文在上述理论分析的基础上, 设计了样机, 安装在机床厂磨床上进行实地磨削实验, 性能稳定、良好, 其精度达到 $1\mu\text{m}$.

关键词 径向磁悬浮电主轴, 电主轴, 结构设计, PID控制

引言

主动磁悬浮电主轴是一种具有与转子无接触和摩擦、无需润滑、高转速等特点的机电一体化产品. 在对其研究中, 一些文章提出了径向磁悬浮电主轴的结构优化设计的理论及方法. 其中有从静态承载力的要求出发, 以求得磁悬浮电主轴最小体积为目标的优化设计^[1], 有单独对磁悬浮电主轴柱槽比的优化设计^[2], 在要求外形尺寸情况下, 如何增大承载力^[3], 还有一些在考虑控制、温度等多方面因素后的优化设计^[4]. 这些文章都对径向磁悬浮电主轴的设计, 提供了许多有益的思路和方法, 但在实际工业应用中, 设计磁悬浮电主轴, 应该从整个系统的全局来把握, 不只考虑外形尺寸、最大承载力, 还要考虑实际工业要求的刚度和阻尼. 然后再从温升和涡流损耗等方面来校验. 因此本文从实际工业应用的角度出发, 以在磨床上应用的磁悬浮电主轴为例, 详尽的论述了整个径向磁悬浮电主轴系统的设计过程.

1 径向磁悬浮电主轴的系统设计

工业实际中一般给定要求的参数:

- L_s ——轴向长度
- N_p ——磁极数目

Bore——最大的轴内径

X—— $w_p/(w_p + s)$

Y—— T/S

B——饱和磁通密度

Gap——平衡位置处的单边气隙

D——导线直径

Ffill——槽满率

Load——静态负载

Omref——基准频率

Kbrg——基准频率下的刚度

Bbrg——基准频率下的阻尼

Ibias——偏置电流

完成整个径向磁悬浮系统设计过程, 得出的参数:

N_i ——最大安培匝数

I_t ——最大电流

R——每极的导线阻抗

L——每极的电感

Cload——电主轴的负载能力

Ψ_i ——压力负载当量

W_p ——每极的圆周宽度

S——每个槽的圆周宽度

T——槽的径向厚度

O_d ——定子外直径

I_d ——定子内直径
 I_d ——轴的外直径
 D_{ibias} ——对静态负载的额外偏置电流
 I_1 ——负载端的偏置电流
 I_3 ——负载对边侧的偏置电流
 C_p ——比例增益
 C_i ——积分增益
 C_d ——微分增益
 K_i ——电流刚度
 K_m ——磁性的刚度
 B_1 ——负载侧的磁通密度
 B_3 ——负载对边的磁通密度
 D_{yni} ——线圈的动态电流
 L_{didt} ——线圈的动态电压
 F_{const} ——磁力常数
 $Watt$ ——电主轴发热量

(本文中所有物理量均采用国际标准单位)

1) 径向磁悬浮电主轴的总体形式可分为:周向结构和轴向结构^[5]. 本文采用易于制造、精度较高的周向结构,同时在转子外圈套上压装在一起的圆形冲孔薄硅钢片,来减小磁滞损耗.

2) 根据径向磁悬浮电主轴定子所处位置的不同,可分为两种形式:一种是内转子外定子,另一种是外转子内定子形式. 磁悬浮硬盘多采用后者,本文在磨床上的应用采用内转子外定子的形式.

3) 磁极数的确定:为了降低磁极间的耦合效应,要求定子结构的上下、左右必须对称,因此磁极数一般选为8的倍数. 随着磁极数的增加,磁力线在转子和定子线圈中的分布会更加均匀,能更充分的利用转子和定子的铁磁材料,且磁势的波形较好,附加损耗小,同时,磁极数目增多,线圈与定子铁芯的接触面积增大,也利于线圈散热,减小温升,但磁极数增加时,制造工艺更复杂,并且相邻两磁极之间的间距减小,磁极之间的耦合性增强,不利于控制.

当然由于负载较大时,为了保证转子在圆周各个方向受力均匀或其他具体情况,可选择合理的磁极数^[6-7],本文以8极为例.

4) 定子槽形状的确定:定子的线圈槽型的形状主要有圆形槽、梯形槽和矩形槽三种,本文选用冲片光滑,磁通密度分布均匀、槽满率高的圆形槽(槽底弧面与定子内孔同圆心)为应用对象.

5) 相关参数的计算:

①首先根据给定的参数确定相应的结构参数:

$$Bot = NP / (3.1415 \times X) - 2$$

$$W_p = (Bore + 2 \times Gap) / Bot$$

$$S = W_p \times (1 - X) / X$$

$$I_d = Bore + 2 \times W_p + 2 \times Gap$$

$$T = Y \times S$$

$$JD = ID - 2 \times Gap$$

$$OD = ID + 2 \times T + 2 \times W_p$$

在上述计算中,参数 X 和 Y 的值非常重要,而两个值一般靠经验来确定. X 一般取 0.6, Y 一般取 1.0. X 太大使得放线圈的空间就小,不能提供足够的自感应强度,进而电磁力也不够大; X 太小使得定子的结构空间不能有效的利用. Y 太大使得整个径向磁悬浮电主轴尺寸过大; Y 过小使得放线圈的空间就小,不能提供足够的自感应强度,进而电磁力也不够大.

X 与 Y 的关系其实也是 W_p 、 T 和 S 三者之间的关系. 根据磁阻定义,对于单个磁极有:

$$R_m = \frac{Ni}{BA} = \mu_s \frac{A}{l_s} + \mu_r \frac{A}{l_r} + \mu_0 \frac{A}{gap} \quad (1)$$

其中, A 为磁极面积(此处忽略了极靴的大小), μ_s 为定子铁磁材料的磁导率, μ_r 为转子铁磁材料的磁导率, μ_0 为空气磁导率.

因为磁悬浮电主轴定子和转子均采用磁性材料,所以

$$\mu_s \gg \mu_0, \quad \mu_r \gg \mu_0$$

式(1)可以近似为

$$\frac{Ni}{BA} = \mu_0 \frac{A}{gap} \quad (2)$$

据几何知识,求得线圈槽的窗口面积为

$$\frac{S}{2\pi(Bore + gap)} [\pi(Bore + gap + T)^2 - \pi(Bore + gap)^2] \quad (3)$$

则线圈的匝数 N 为:

$$N = \frac{S \cdot Fill}{\pi D^2 (Bore + gap)} [T^2 + 2T(Bore + gap)^2] \quad (4)$$

铜导线载流密度: $4 - 6 A/mm^2$, 所以

每个导线中的电流为:

$$I = \pi D^2 \quad (5)$$

磁极面积 A 为:

$$A = W_p \cdot L_s \quad (6)$$

将式(4)、(5)、(6)代入式(2),得

$$\frac{gap \cdot S \cdot Fill}{\pi D^2 (Bore + gap)} [T^2 + 2T(Bore + gap)] \quad (7)$$

据 X 、 Y 的定义式(7)可化简为:

$$\frac{gap \cdot S \cdot Fill}{\pi D^2 (Bore + gap)} SY^2 + \frac{2gap \cdot Fill}{\pi D^2} Y = \mu_0 B L s^2 \left(\frac{x}{1-x} \right)^2 \quad (8)$$

上式是 S 、 X 、 Y 需要满足的关系,也帮助我们更好的确定它们的值,进而设计出更优的径向磁悬浮电主轴。

6) 电主轴的负载能力和压力负载当量:

$$SOUT = S \times (ID + 2 \times T) / ID$$

$$Savg = 0.5 \times (S + SOUT)$$

$$TURN = 0.5 \times Fill \times (Savg \times T) / (0.25 \times \pi \times D^2)$$

当磁极数 $NP = 8$ 时:

$$F_1 = 2 \times \cos(22.5 \times 3.14/180)$$

当磁极数 $NP = 16$ 时:

$$F_1 = 2 \times \cos(11.25 \times 3.14/180) + 2 \times \cos(33.75 \times 3.14/180)$$

当磁极数 $NP = 24$ 时:

$$F_1 = 2 \times \cos(7.5 \times 3.14/180) + 2 \times \cos(22.5 \times 3.14/180) + 2 \times \cos(37.5 \times 3.14/180)$$

$$F_2 = 3.19^2 \times TURN^2 \times A / 7.2 \times 10^7$$

$$cload = F_1 \times F_2 \times (It / Gap)^2 \quad (9)$$

$$PSI = cload / (Ls \times Jd) \quad (10)$$

7) 负载两侧的电流和磁感应强度

$$F_3 = F_1 \times F_2 / gap^2$$

如果没有给定偏置电流的值,我们取

$$I_{bias} = It / 2$$

$$Dibias = -I_{bias} + \sqrt{I_{bias}^2 + load / F_3}$$

$$I_1 = I_{bias} + Dibias \quad (11)$$

$$I_3 = I_{bias} \quad (12)$$

此处的磁感应强度为磁极表面的磁感应强度,并忽略了边缘效应等。

$$Reluc = gap / (3.19 \times Apole)$$

$$Flux_1 = Turn \times I_1 / Reluc \quad (13)$$

$$Flux_3 = Turn \times I_3 / Reluc \quad (14)$$

$$B_1 = Flux_1 / Apole \quad (15)$$

$$B_3 = Flux_3 / Apole \quad (16)$$

8) 由刚度、阻尼来确定 PID 的控制参数:

国内外关于刚度和阻尼已经作出了一些卓有成效的研究^[8-12],而本文从工业实际出发,满足实际应用中的径向磁悬浮电主轴的刚度和阻尼的要求,来设计我们的控制参数,并给出了不同极数的典型 PID 控制器的三个参数的快速计算式。

$$F_{10} = F_1 \times F_2 \times (I_1 / gap)^2$$

$$F_{30} = F_1 \times F_2 \times (I_3 / gap)^2$$

电流刚度 KI 为:

$$KI = 2 \times (F_{10} / I_1 + F_{30} / I_3) \quad (17)$$

当磁极数 $NP = 8$ 时:

$$FF = 4 \times \cos(22.5 \times 3.14/180)^2$$

当磁极数 $NP = 16$ 时:

$$FF = 4 \times \cos(11.25 \times 3.14/180)^2 + 4 \times \cos(33.75 \times 3.14/180)^2$$

$$FF = 4 \times \cos(7.5 \times 3.14/180)^2 + 4 \times \cos(22.5 \times 3.14/180)^2 + 4 \times \cos(37.5 \times 3.14/180)^2$$

磁性刚度 KM 为:

$$KM = FF \times F_2 \times [(I_1 / gap)^2 + (I_3 / gap)^2] / gap \quad (18)$$

则 PID 控制器的参数分别为:

$$cp = (Kbrg + KM) / KI \quad (19)$$

$$cd = Bbrg / IKI \quad (20)$$

$$ci = 5 \times cp \quad (21)$$

9) 线圈的动态电流和动态电压

求出线圈的动态电压和动态电流主要为设计合适的功率放大器提供性能指标上的要求。

$$Fconst = F_1 \times F_2$$

线圈的动态电流为复数:

$$DYNI = -CP \times Gap \times 0.1 - (CD \times OMREF \times Gap \times 0.1) i \quad (22)$$

线圈的动态电压也为复数形式:

$$Ldidt = (-L \times Omref) i \times DYNI \quad (23)$$

其中电感 L 为

$$L = Turn^2 \times 3.19 \times Apole / gap \times 10^{-8}$$

10) 功率损耗分析

磁悬浮电主轴的功耗主要由铁损和铜损组成,铁损又包含涡流损耗和磁滞损耗。国内外研究人员对对相关损耗做了一定的研究^[13-14]。

本文给出的铜损的计算公式为:

$$\Delta p_{cu} = (I_1^2 + I_3^2) \times \frac{R \times NP}{2} \quad (24)$$

铁损 p_{fe} 的计算比较简单的方法是计算转子表

面的调和函数,然后加和得到总功率,即先测量转子的应力张量,计算力矩,再由旋转速度计算得到功率.也可以参考 Rockwell 或 Ahrens 给出的用 FEM 计算的涡流损耗模型^[15-16],用 ANSYS 或 AN-SOFT 软件容易的计算出结果.

所以,整体的径向磁悬浮电主轴的功率损耗为:

$$Watt = \Delta p_{cu} + \Delta p_{fe} \quad (25)$$

2 实例

依照上述设计过程,设计了样机(其中推力轴承的设计过程因为篇幅原因在此不再赘述),并将样机安装在磨床上进行磨削实验,如图 1 所示,磨削过程中,电主轴性能稳定,其磨削出的工件如图 2 所示,其精度达到 $1\mu\text{m}$.

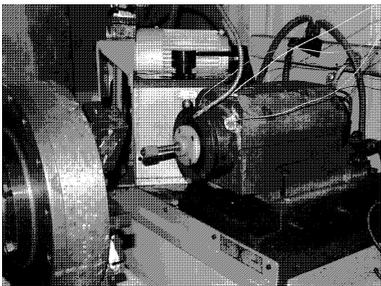


图1 样机安装在磨床上
Fig.1 Prototype in grinder



图2 磨削出的工件
Fig.2 The processed workpiece

3 结论

通过本文,可以得到如下结论:

1) 本文从工业实际应用的角度出发,提供了一种从径向磁悬浮电主轴的结构设计到控制系统的整个系统的完整新颖设计思路.

2) 在径向磁悬浮电主轴结构设计中,提出了有决定意义的两个参数 X 和 Y 的概念,并给出了它们的经验值和优化关系式.

3) 给出了由机械特性的性能要求——刚度和阻尼来迅速设计出 PID 控制器的计算公式.

4) 对功率放大器的设计也提出了性能参数的要求,最后进行了功率损耗分析和发热量的校验.

参 考 文 献

- 袁崇军,曹洁,杨涌. 电磁轴承的结构优化设计. 机械科学与技术,1995,(6): 29~35. (Yuan Zhongjun, Cao Jie, Yang Yong. The optimum design of electromagnetic bearing structures. *Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering*, 1995, (6): 29~35 (in Chinese))
- 孙首群,虞烈. 径向磁轴承柱槽比优化设计. 机床与液压,2002,(1): 13~14 (Sun Shouqun, Yu Lie. Optimization analysis of pole notch ratio for radial magnetic bearings. *Machine Tool and Hydraulics*, 2002, (1): 13~14 (in Chinese))
- 陈龙,杨怀玉,胡业发. 外形要求下径向磁力轴承的参数分析. 轻工机械,2005(6): 58~60 (Chen Long, Yang Huaiyu, Hu Yefa. The analysis of parameter on radial active magnetic bearing under the requirement of shape. *Light Industry Machinery*, 2005(6): 58~60 (in Chinese))
- Foam zone, Fan, Chung Chue. Optimum magnetic bearing design considering performance limitations. *JSME International Journal, Series C: Dynamics, Control, Robotics, Design and Manufacturing*, 1996, 39(3): 586~596
- 文湘隆,胡业发,陈龙. 径向磁力轴承定子结构参数的确定. 机械制造,2006(3): 25~27 (Wen Xianglong, Hu Yefa, Chen Long. Calculation of structural parameters of stator of radial magnetic bearing. *Machinery*, 2006(3): 25~27 (in Chinese))
- Shyh Leh Chen, Sung Hua Chen, Shi Teng Yan. Experimental validation of a current-controlled three-pole magnetic rotor-bearing system. *IEEE Trans, Magn*, 2005, 41(1): 99~112
- R Schob. Radial active magnetic bearing apparatus and a method for operating the same. U. S. Patent 6,365,996, 2002
- 汪希平. 电磁轴承系统的刚度阻尼特性分析. 应用力学学报,1997,14(3): 95~100 (Wang Xiping. Analysis on stiffness and dampin performances of an active magnetic bearing system. *Chinese Journal of Applied Mechanics*, 1997, 14(3): 95~100 (in Chinese))
- P K Budig, R Werner. Stiffness of magnetic bearings in: G. Schweitzer, Rsiegart, R. Herzog Proc of the 4th int

- Symp. On Magnetic Bearings Switzerland*, 1994;251 ~ 256
- 10 H Ming Chen. Magnetic bearing and flexible rotor dynamics. *Tribology Transactions*, 1989, 32(1): 9 ~ 15
- 11 施晓红, 卢晓慧, 余龙华. 奇异摄动磁悬浮系统的串级PID控制稳定性研究. *动力学与控制学报*, 2007, 5(3): 282 ~ 284 (Shi Xiaohong, Lu Xiaohui, She Longhua. Stability research on singularly perturbed maglev system with cascade PID control. *Journal of Dynamics And Control*, 2007, 5(3): 282 ~ 284 (in Chinese))
- 12 赵雷, 丛华, 赵鸿宾. 可控磁悬浮轴承刚度与阻尼特性研究. *清华大学学报(自然科学版)* 1999, 39(4): 96 ~ 99 (Zhao Lei, Cong Hua, Zhao Hongbin. Study on stiffness and damping characteristic of active magnetic bearing. *J Tsinghua Univ(Sci&Tech)*, 1999, 39(4): 96 ~ 99 (in Chinese))
- 13 F Matsumura, K Hatake. Relation between magnetic pole arrangement and magnetic loss in magnetic bearing. Proc of the 3rd International Symposium on Magnetic Bearings. Alexandria; VA. 1992; 274 ~ 283
- 14 孙岩桦, 虞烈. 实心转子电磁轴承涡流损耗分析. *中国电机工程学报*, 2002, 22(2): 116 ~ 120 (Sun Yanhua, Yu Lie. Eddy current loss analysis in radial magnetic bearings with solid rotor. *Proceedings of the CSEE*, 2002, 22(2): 116 ~ 120 (in Chinese))
- 15 Rockwell R D, Allaire P E, Heinrich J C, et. al. Magnetic field finite element modeling of magnetic bearings including rotor motion effects and eddy currents. Proc. Of fifth Int. Symp. On Magnetic Bearings, Kanazawa, Japan, 1996
- 16 Ahrens M, Kucera L. Analytical calculation of fields, forces and losses of a radial magnetic bearing with a rotating rotor considering eddy currents. Proc. Of Fifth Int. Symp. On Magnetic Bearings, Kanazawa, Japan, 1996

SYSTEMS ANALYSIS AND DESIGN OF RADIAL MAGNETIC BEARINGS*

Chen Diyi¹ Liu Shuqin² Ma Xiaoyi¹

(1. Electric Department of College of Water Resources and Architectural Engineering, NorthWest A&F University, Yangling 712100, China)

(2. School of Electrical Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China)

Abstract This paper provided a new whole design method about the overall system from the structural design of magnetic bearings to control system design, based on practical applications in industry. It proposed two parameters— x (circumference of each pole / (circumference of each pole + circumference of each groove)) and y (radial thickness of each groove / circumference of each groove), which play a decisive role in the structural design, and it made a thorough research about them. It also gave the formula of PID controller using the stiffness and damping, the final analysis of a power loss and heat checking. This prototype installed in a grinder ran well and its precision can reach $1\mu\text{m}$.

Key words radial magnetic bearings, magnetic bearings, structure design, PID control