

永磁体位于转子上的混合型轴向磁轴承 原理分析与参数设计

刘程子¹ 邓智泉¹ 梅磊² 华春¹

(1. 南京航空航天大学自动化学院, 南京, 210016; 2. 南京工业大学自动化与电气工程学院, 南京, 210009)

摘要: 针对混合型磁悬浮轴承功耗低、结构紧凑的特点, 提出了一种永磁体位于转子上的混合型轴向磁悬浮轴承。首先给出了该磁悬浮轴承的三维结构及其工作原理。在此基础上, 提出了一种基于气隙磁通计算的参数设计方法。其中根据最大承载力所需的总磁通量, 得到磁路中各关键截面处的磁通密度, 以软磁材料内部磁场磁通密度不饱和为约束条件, 以体积最小为优化目标, 通过循环迭代的方式计算各部分漏磁系数与磁阻系数, 最后得到该混合型轴向磁悬浮轴承各部分的结构参数。文中还利用有限元电磁场分析软件对其进行三维电磁场建模与仿真分析, 仿真结果验证了该参数设计方法及其结果的合理性与正确性。

关键词: 混合型磁悬浮轴承; 轴向磁悬浮轴承; 参数设计; 有限元分析

中图分类号: TH133.3

文献标识码: A

文章编号: 1005-2615(2012)06-0847-08

Principle Analysis and Parameter Design of Hybrid Axial Magnetic Bearing with Permanent Magnet in Rotor

Liu Chengzi¹, Deng Zhiquan¹, Mei Lei², Hua Chun¹

(1. College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing, 210016, China;

2. College of Automation and Electric Engineering, Nanjing University of Technology, Nanjing, 210009, China)

Abstract: A hybrid axial magnetic bearing with permanent magnet in the rotor is raised on account of the low power consumption and compact structure of the hybrid magnetic bearings. Firstly, 3-D structure and operational principle of the magnetic bearing are given. On the basis of this, a type of parameter-designing method based on air-gap flux calculation is given. Magnetic flux density of each key section is obtained from the total magnetic flux required for the maximal bearing capacity, and configuration parameters of each part of this hybrid axial magnetic bearing are obtained through calculating the leakage coefficient and the magneto resistance coefficient by using the iterative loop method, taking the unsaturated magnetic flux density inside soft magnetic materials as the restrained condition and bulk minimization as the optimization objective. Finite element analysis (FEA) software is used to execute the simulation analysis and modeling of the 3-D magnetic field. Simulation results validate this parameter-designing method.

Key words: hybrid magnetic bearing; axial magnetic bearing; parameter design; finite element analysis (FEA)

混合型磁悬浮轴承的偏置磁场由永磁材料产生, 电磁线圈只产生控制磁场, 具有功耗低、体积

小、重量轻的特点。以上特点使其在对体积和功耗有着严格要求的磁悬浮电机、高速飞轮系统等领域

基金项目: 江苏省普通高校研究生科研创新计划 (CXLX12-0153) 资助项目。

收稿日期: 2011-11-24; 修订日期: 2011-12-16

通讯作者: 邓智泉, 男, 教授, 博士生导师, 1969 年出生, E-mail: dzq@nuaa.edu.cn。

具有不可替代的优势,因此混合型磁悬浮轴承已成为磁悬浮轴承研究和发展的一个重要方向^[1-4]。

根据功能的不同,磁悬浮轴承可分为轴向单自由度磁悬浮轴承,径向两自由度磁悬浮轴承,轴向径向三自由度磁悬浮轴承。其中轴向径向三自由度磁悬浮轴承尽管集成度较高,但是存在轴向力与径向力的耦合,会增加结构和控制系统的设计难度^[5-7]。混合型轴向磁悬浮轴承虽然只能实现单自由度的悬浮,但当其用于五自由度磁悬浮系统中时,例如,与无轴承电机组成大功率密度的五自由度磁悬浮系统^[8];与被动型径向磁悬浮轴承组成的功耗小的五自由度磁悬浮系统^[9]相比,轴向磁悬浮轴承具有简化系统结构,降低系统损耗,提高系统可靠性的作用。文献^[10]中所述混合型轴向磁悬浮轴承在结构上与磁路上不存在耦合关系,但其永磁环嵌于轴向磁极与导磁环间,装配较为复杂,其位于副气隙处的轴向磁极没有主动控制,在转子铁芯发生偏移时,会产生一定的偏心磁拉力。文献^[11]提出的轴向磁悬浮轴承,控制绕组位于转子铁芯上,安装难度大,不利于高速运行;文献^[12]提出的轴向磁悬浮轴承,轴向控制绕组位于径向定子两侧,增加了磁轴承的轴向长度,降低了悬浮转子的临界转速;文献^[13,14]分别给出两种结构的轴向磁悬浮轴承,利用第二气隙通以控制磁通,永磁体产生的位移刚度小,但永磁体的漏磁增大,控制磁路的磁阻增大,磁悬浮轴承的功耗增大。文献^[15]中所述的轴向磁悬浮轴承利用位于转子铁芯两侧的环形永磁体提供偏置磁通,功耗低,控制性能良好,径向定子只作为偏置磁路,与轴向控制磁路彼此解耦。但其结果使得径向长度增加,同时环形永磁体嵌入定子,结构复杂,装配困难。

另一方面,目前较常用的混合型磁悬浮轴承参数设计方法一般都以等效磁路法为基础^[16-17],漏磁与磁阻在设计时通常被忽略,或者只通过磁导法与

经验值确定,影响了设计精度。同时软磁材料参数的设计没有考虑磁场在软磁材料处的漏磁,影响了优化效果。

本文提出了一种结构简单紧凑、功耗低的新型混合型轴向磁悬浮轴承,并运用一种基于磁通量计算的参数设计方法,根据磁悬浮轴承中各部件的磁场分布,选择一个或者多个截面作为关键截面,结合偏置磁场与控制磁场在关键截面处的漏磁系数,计算出经过该截面的偏置磁场与控制磁场的磁通量,建立关键截面面积与其磁通密度之间的函数关系。同时,以最大悬浮力为设计目标,以软磁材料内部磁场磁通密度为约束条件,以体积最小化为优化目标,并采用有限元法与解析法相结合,通过迭代循环获取磁场的磁阻系数与漏磁系数,最终全面准确地得出磁悬浮轴承的各个参数。

1 混合型轴向磁悬浮轴承结构与磁场分布

1.1 混合型轴向磁悬浮轴承结构

混合型轴向磁悬浮轴承的结构如图1所示。该结构包括一对由外轴向磁极、定子圆盘、内轴向磁极依次套装而成的定子,外转子铁芯、径向充磁的环形永磁体、内转子铁芯和一对轴向控制绕组。其中定子为电工纯铁制成,轴向控制绕组套装在定子上。内外转子铁芯为硅钢片,环形永磁体为钕铁硼制成,贴装在内外转子铁芯之间。外轴向磁极与外转子铁芯之间形成外轴向气隙,内轴向磁极与内转子铁芯之间形成内轴向气隙。

1.2 混合型轴向磁悬浮轴承磁场分布

图1中单箭头虚线为磁悬浮轴承的偏置磁路,双箭头虚线为磁悬浮轴承的控制磁路。偏置磁通由径向充磁的环形永磁体产生,分别依次经过外转子铁芯、外轴向气隙、定子、内轴向气隙及内转子铁芯构成左右对称的回路,在磁悬浮轴承中建立偏置磁

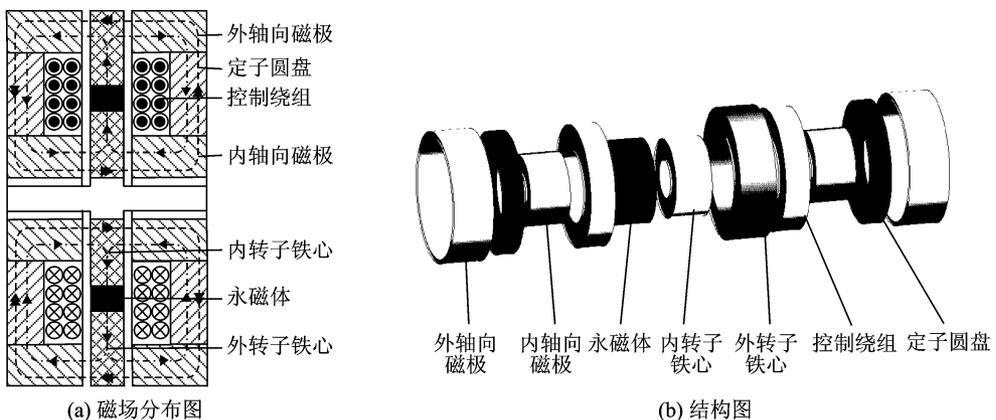


图1 混合型轴向磁悬浮轴承结构及磁场分布

场。控制绕组产生的控制磁通在定子、内外转子铁芯及内外轴向气隙之间构成闭合回路,在磁悬浮轴承中建立控制磁场。从图1可知,永磁体位于内外转子铁芯之间,偏置磁路和永磁磁路共用磁路通路,减小磁轴承轴向径向长度,缩小磁轴承体积,提高功率密度。

2 混合型轴向磁悬浮轴承参数设计

本文以总磁通量计算为基础的参数设计方法,考虑磁场在各软磁材料部件处的漏磁,对漏磁系数与磁阻系数进行循环迭代,精确全面地计算出控制绕组、永磁体及转子铁芯等各部件的基本参数,然后再利用有限元分析软件对设计结果进行了电磁场仿真。

混合型轴向磁悬浮轴承参数设计与优化流程图如图2所示。

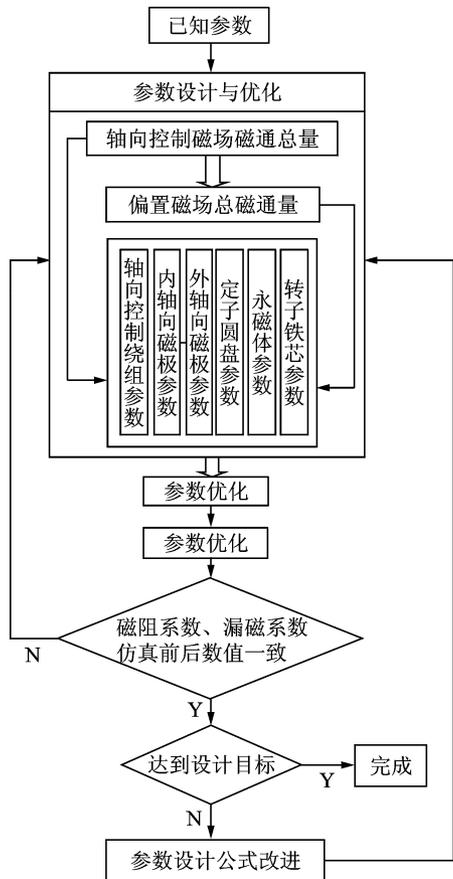


图2 混合型轴向磁悬浮轴承参数设计与优化流程图

2.1 气隙中磁场的磁通密度

选软磁材料的磁化曲线线性范围为 $B_{\min} \sim B_{\max}$, 在轴向气隙中偏置磁场磁通密度取为 B_{bag} , 控制磁场磁通密度取为 B_{cag}

$$\begin{aligned} B_{\text{bag}} &= 0.5(B_{\max} + B_{\min}) \\ B_{\text{cag}} &= 0.5(B_{\max} - B_{\min}) \end{aligned} \quad (1)$$

2.2 偏置磁场与控制磁场大小

由磁悬浮轴承承载力计算公式可得单侧轴向气隙面积为

$$S_{\text{ag}} = \frac{\mu_0 \cdot F}{2 \cdot B_{\text{bag}} \cdot B_{\text{cag}}} \quad (2)$$

式中: μ_0 为真空磁导率, F 为轴向最大悬浮力。

内、外轴向气隙中轴向控制磁场的磁通密度 $B_{\text{cagi}}, B_{\text{cago}}$ 分别为

$$B_{\text{cagi}} = \frac{\Phi_{\text{ca}}}{\sigma_{\text{cagi}} \cdot S_{\text{agi}}}, \quad B_{\text{cago}} = \frac{\Phi_{\text{ca}}}{\sigma_{\text{cago}} \cdot S_{\text{ago}}} \quad (3)$$

式中: Φ_{ca} 为轴向控制磁场总磁通量; S_{agi} 为内轴向气隙面积; S_{ago} 为外轴向气隙面积; $\sigma_{\text{cagi}}, \sigma_{\text{cago}}$ 为控制磁场内、外轴向气隙漏磁系数, 其数值一般在 $1 \sim 2$ 之间。

由于内、外轴向气隙中轴向控制磁场的磁通密度相等, 则内、外轴向气隙面积分别为

$$S_{\text{agi}} = \frac{\sigma_{\text{cago}}}{\sigma_{\text{cagi}} + \sigma_{\text{cago}}} \cdot S_{\text{ag}}, \quad S_{\text{ago}} = \frac{\sigma_{\text{cagi}}}{\sigma_{\text{cagi}} + \sigma_{\text{cago}}} \cdot S_{\text{ag}} \quad (4)$$

则轴向控制绕组通入最大电流后产生的轴向控制磁场总磁通量为

$$\Phi_{\text{ca}} = \sigma_{\text{cagi}} \cdot B_{\text{cag}} \cdot S_{\text{agi}} = \sigma_{\text{cago}} \cdot B_{\text{cag}} \cdot S_{\text{ago}} \quad (5)$$

内、外轴向气隙中偏置磁场的磁通密度 $B_{\text{bagi}}, B_{\text{bago}}$ 分别为

$$B_{\text{bagi}} = \frac{0.5 \cdot \Phi_{\text{b}}}{\sigma_{\text{bagi}} \cdot S_{\text{agi}}}, \quad B_{\text{bago}} = \frac{0.5 \cdot \Phi_{\text{b}}}{\sigma_{\text{bago}} \cdot S_{\text{ago}}} \quad (6)$$

式中: Φ_{b} 为偏置磁场总磁通量; $\sigma_{\text{bagi}}, \sigma_{\text{bago}}$ 分别为偏置磁场内、外轴向气隙漏磁系数, 其数值一般在 $1 \sim 2$ 之间。

要使得内、外轴向气隙中偏置磁场的磁通密度相等, 则应调整永磁材料在转子铁芯上的位置, 使偏置磁场的内、外轴向气隙漏磁系数满足

$$\frac{\sigma_{\text{bagi}}}{\sigma_{\text{bago}}} = \frac{S_{\text{ago}}}{S_{\text{agi}}} = \frac{\sigma_{\text{cagi}}}{\sigma_{\text{cago}}} \quad (7)$$

则永磁材料产生的偏置磁场总磁通量为

$$\Phi_{\text{b}} = 2 \cdot \sigma_{\text{bagi}} \cdot B_{\text{bag}} \cdot S_{\text{agi}} = 2 \cdot \sigma_{\text{bago}} \cdot B_{\text{bag}} \cdot S_{\text{ago}} \quad (8)$$

2.3 轴向控制绕组参数设计

根据气隙长度及气隙中控制磁场的磁通密度并考虑到软磁材料的磁阻, 可得控制绕组的匝数为

$$N = \frac{NI}{I_{\max}} = \frac{f_c \sum_{i=1}^n (B_{ci} \cdot g_i)}{I_{\max}} \quad (9)$$

式中: f_c 为控制磁场的磁阻系数; n 为控制磁场磁路中呈串联关系的气隙的个数; B_{ci} 为第 i 条气隙中控制磁场的磁通密度; I_{\max} 为功率放大器能够提供的最大电流; NI 为绕组的安匝数。

每匝控制绕组的裸线截面积为

$$S_t = \frac{I_{\max}}{J_s} \quad (10)$$

式中: J_s 为绕组中控制电流的密度, 它的数值一般约取为 5 A/mm^2 。

每匝控制绕组并绕根数为

$$N_t = \frac{4 \cdot S_t}{\pi \cdot d_b^2} \quad (11)$$

式中 d_b 为漆包线裸线径。

轴向控制绕组的轴向厚度为

$$T_{ac} = \frac{2 \cdot (d_b + 2 \cdot q_m)^2 \cdot N_t \cdot N}{D_{aco} - D_{aci}} \quad (12)$$

式中: q_m 为漆包线漆膜厚度; D_{aci} 为轴向绕组内径; D_{aco} 为轴向绕组外径。

2.4 软磁材料参数设计

以内轴向磁极与定子圆盘为例, 由几何关系可得内轴向磁极的轴向长度为

$$L_{api} = T_{sp} + T_{ac} \quad (13)$$

式中 T_{sp} 为定子圆盘的轴向厚度。

内轴向磁极外径为

$$D_{apio} = \sqrt{\frac{4 \cdot S_{agi}}{\pi} + D_{api}^2} \quad (14)$$

式中 D_{api} 为内轴向磁极内径, 取内轴向磁极内径等于转子铁芯内径。

由于定子圆盘中既存在偏置磁场, 又存在轴向控制磁场, 取其内径截面为关键截面, 则关键截面处偏置磁场的磁通密度为

$$B_{bsp} = \frac{\Phi_b}{2 \cdot \pi \cdot \sigma_{bsp} \cdot D_{spi} \cdot T_{sp}} \quad (15)$$

式中: σ_{bsp} 为偏置磁场的定子圆盘漏磁系数; D_{spi} 为定子圆盘内径; D_{sp} 为定子圆盘外径; T_{sp} 为定子圆盘轴向厚度。根据几何关系, 定子圆盘内径等于内轴向磁极外径, 定子圆盘外径等于轴向控制绕组外径。

关键截面处轴向控制磁场的磁通密度为

$$B_{asp} = \frac{\Phi_{ca}}{\pi \cdot \sigma_{asp} \cdot D_{spi} \cdot T_{sp}} \quad (16)$$

式中 σ_{asp} 为轴向控制磁场的定子圆盘漏磁系数。

2.5 永磁材料参数设计

永磁环由径向充磁的钕铁硼组成, 钕铁硼稀土永磁材料的退磁曲线接近直线, 将永磁体的工作点选择在其最大磁能积点处, 则有

$$B_{mg} = 0.5 \cdot B_r \quad H_{mg} = 0.5 \cdot H_c \quad (17)$$

式中: B_r 为永磁材料的剩余磁通密度; H_c 为永磁材料的矫顽力。

则可得永磁材料的中性面面积为

$$S_{mg} = \frac{\Phi_b}{B_{mg}} \quad (18)$$

式中 Φ_b 为偏置磁场的总磁通量。

根据等效磁路法, 可得永磁材料沿充磁方向的厚度为

$$T_{mg} = 2 \cdot \frac{f_b}{\mu_0 \cdot H_{mg}} \cdot (B_{bagi} g_{ai} + B_{bago} g_{ao}) \quad (19)$$

式中: f_b 为偏置磁场的磁阻系数, 其数值一般在 $1 \sim 1.5$ 之间; g_{ai} 为内轴向气隙长度; g_{ao} 为外轴向气隙长度。

取永磁材料的内径等于内轴向磁极的外径, 根据几何关系可得永磁材料的外径为

$$D_{mgo} = D_{mgi} + 2 \cdot T_{mg} \quad (20)$$

根据中性面面积可得永磁材料的轴向长度为

$$L_{mg} = \frac{2 \cdot S_{mg}}{\pi \cdot (D_{mgo} + D_{mgi})} \quad (21)$$

2.6 以体积最小为目标的参数优化

混合型轴向磁悬浮轴承体积与相关参数之间的函数关系为

$$V_M = 0.25 \cdot \pi \cdot \left(\frac{4 \cdot S_{ago}}{\pi} + D_{aco}^2 \right) \cdot \left(\frac{4 \cdot S_{ac}}{D_{aco} - D_{aci}} + 2 \cdot T_{sp} + 2 \cdot g_a + L_{mg} \right) \quad (22)$$

式中的参数相互之间都是独立的, 且除轴向控制绕组外径 D_{aco} 外, 其他参数都为确定值, 因此 V_M 的极值仅与 D_{aco} 有关。对于式(22)两侧求关于 D_{aco} 的二阶导数可得

$$V_M''(D_{aco}) = \frac{2 \cdot \pi \cdot S_{ac} \cdot \left(D_{aci}^2 + \frac{4 \cdot S_{ago}}{\pi} \right)}{(D_{aco} - D_{aci})^3} + \pi \cdot (T_{sp} + g_a + 0.5 \cdot L_{mg}) > 0 \quad (23)$$

因此 V_M 有极小值。

对式(22)两侧求关于 D_{aco} 的一阶导数可得

$$V_M'(D_{aco}) = \frac{\pi \cdot S_{ac} \cdot \left(D_{aco}^2 - 2 \cdot D_{aci} \cdot D_{aco} - \frac{4 \cdot S_{ago}}{\pi} \right)}{(D_{aco} - D_{aci})^2} + \pi \cdot (T_{sp} + g_a + 0.5 \cdot L_{mg}) \cdot D_{aco} = 0 \quad (24)$$

根据式(24)可得使混合型轴向磁悬浮轴承体积最小的轴向控制绕组外径值。

3 电磁场仿真

基于以上分析的混合型磁轴承设计方案, 本文将在有限元分析软件中建立三维模型来对其磁场进行仿真与分析, 并将根据仿真分析获得的漏磁系数与磁阻系数代入参数设计与优化公式中重新进行参数设计, 然后再次将新设计参数的磁场进行仿

真与分析,从而获得优化后的漏磁系数与磁阻系数。如此循环迭代,直至漏磁系数与磁阻系数收敛为固定值,同时磁轴承的各项指标均达到设计要求为止。该方法通过对漏磁系数与磁阻系数的循环迭代,可以提高设计磁轴承的设计精度。

为便于与文献[10,15]的设计结果作比较,本文将最大轴向悬浮承载力大小设定为800 N。其他相关材料及其基本参数如表1所示。

表1 混合型轴向磁悬浮轴承基本参数

参数	数值	参数	数值
轴向气隙长度/mm	0.5	最大控制电流/A	3
转子铁芯内径/mm	20	电流密度/A/mm ²	4
漆包线裸线线径/mm	0.7	永磁材料剩余磁通密度/T	1.2
漆包线漆膜厚度/mm	0.03	永磁材料矫顽力/(kA·m ⁻¹)	900
软磁材料饱和磁通密度/T	1.3	磁化曲线线性范围/T	0.3~1.3
偏置磁密/T	0.8	控制磁密/T	0.5

经过多次迭代循环,并根据仿真结果调整永磁材料在转子铁芯上的位置,使偏置磁场内外轴向气隙漏磁系数满足式(7)的条件,根据参数设计与优化公式得到的混合型轴向磁悬浮轴承的参数终值。各个磁阻系数与漏磁系数的收敛值如表2所示。

表2 混合型轴向磁悬浮轴承磁阻系数与漏磁系数参数表

系数	数值
轴向控制磁场磁阻系数	1.1
偏置磁场内轴向气隙漏磁系数	1.25
偏置磁场定子圆盘漏磁系数	1.17
偏置磁场外轴向气隙漏磁系数	2.11
偏置磁场磁阻系数	1.06

利用有限元分析软件对设计结果进行电磁场仿真,偏置磁场磁密分布如图3所示,气隙中的偏置磁场磁通密度变化曲线如图4所示, B_{bagia} 为左侧内轴向气隙中偏置磁场磁通密度, B_{bagib} 为右侧内轴向气隙中偏置磁场磁通密度,两者都接近0.79 T; B_{bagoa} 为左侧外轴向气隙中偏置磁场磁通密度, B_{bagob} 为右侧外轴承气隙中偏置磁场磁通密度,两者都接近0.84 T。

控制磁场磁密分布如图5所示,气隙中的控制磁场磁通密度变化曲线如图6所示, B_{cagia} 为左侧内轴向气隙中控制磁场磁通密度, B_{cagib} 为右侧内轴向气隙中控制磁场磁通密度,两者都接近0.47 T; B_{cagoa} 为左侧外轴向气隙中控制磁场磁通密度, B_{cagob} 为右侧外轴向气隙中控制磁场磁通密度,两

者都接近0.54 T。

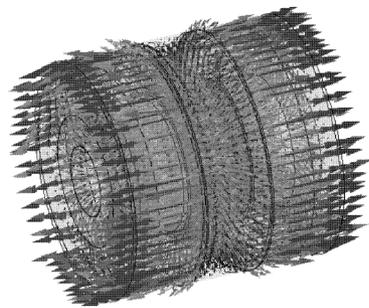
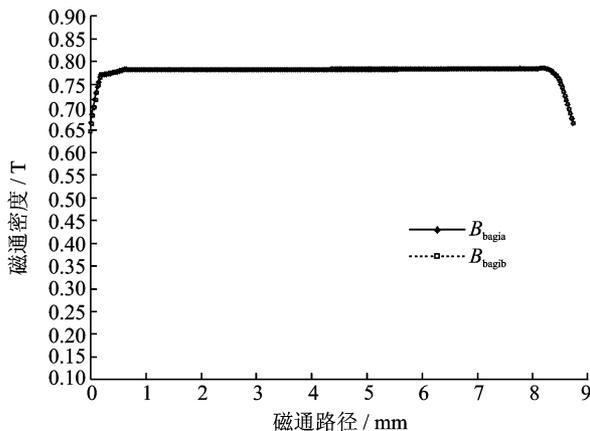
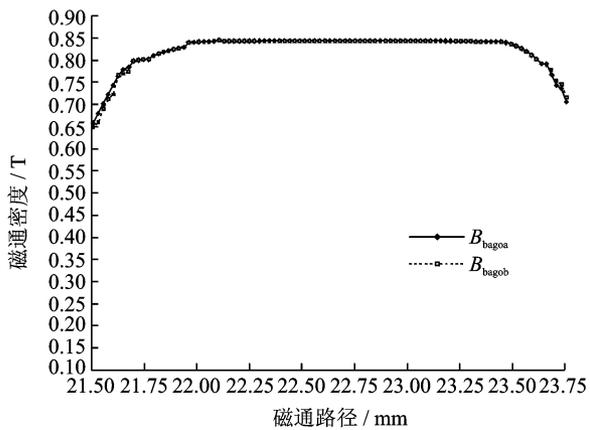


图3 偏置磁场磁密B矢量图



(a) 内轴向气隙中偏置磁场的磁通密度



(b) 外轴向气隙中偏置磁场的磁通密度

图4 气隙中偏置磁场磁通密度曲线图

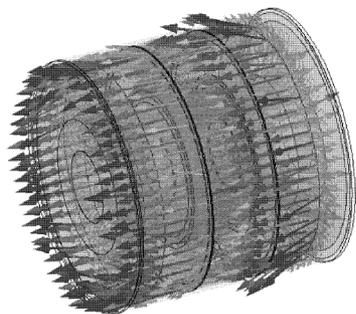
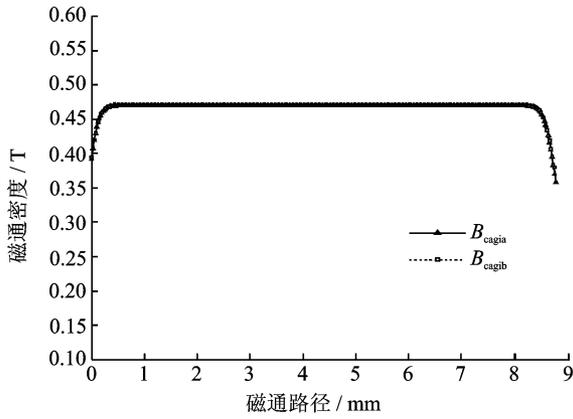
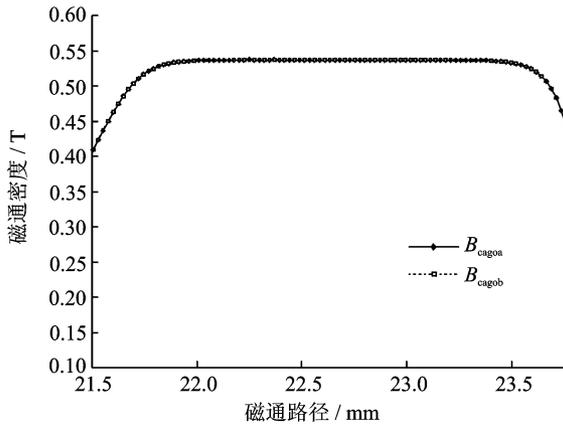


图5 控制磁场磁密B矢量图

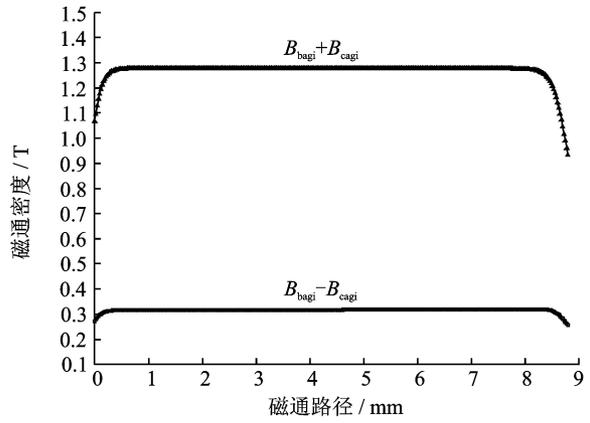


(a) 内轴向气隙中控制磁场的磁通密度

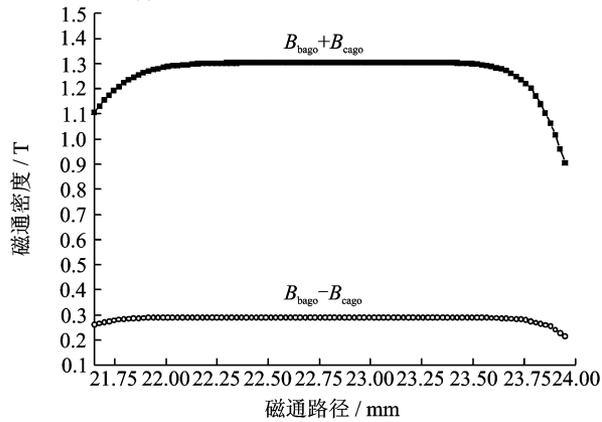


(b) 外轴向气隙中控制磁场的磁通密度

图6 气隙中控制磁场磁通密度曲线图



(a) 内轴向气隙中叠加磁场的磁通密度



(b) 外轴向气隙中叠加磁场的磁通密度

图8 气隙中控制磁场磁通密度曲线图

偏置磁场和控制磁场共同作用时磁密分布如图7所示,气隙中磁场磁通密度变化曲线如图8所示, $B_{bagi} + B_{cagi}$ 为左侧内轴向气隙中叠加磁场磁通密度,约为1.27 T; $B_{bagi} - B_{cagi}$ 为右侧内轴向气隙中叠加磁场磁通密度,约为0.31 T; $B_{bago} + B_{cago}$ 为左侧外轴向气隙中叠加磁场磁通密度,约为1.31 T; $B_{bago} - B_{cago}$ 为右侧外轴向气隙中叠加磁场磁通密度,约为0.28 T。

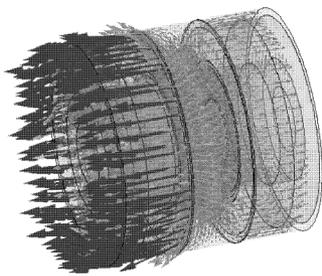
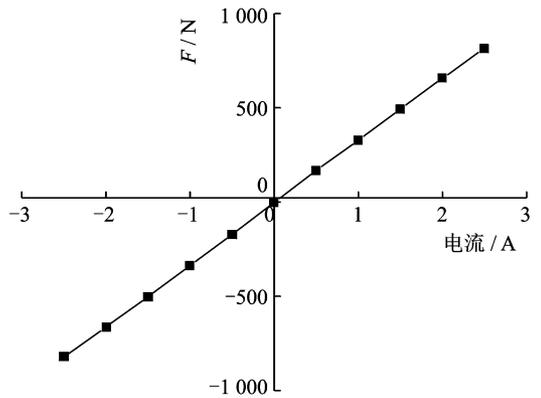
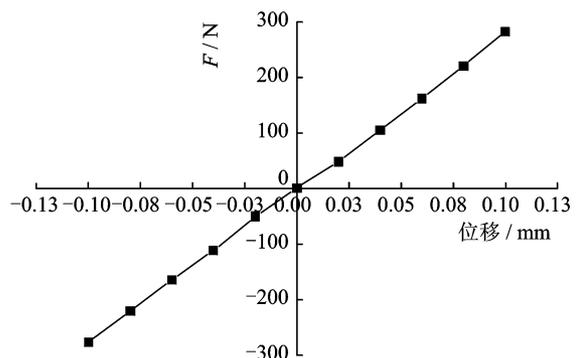


图7 叠加磁场磁密B矢量图



(a) 电流-力关系曲线



(b) 位移-力关系曲线

图9 电流-力关系和位移-力关系

图9(a)给出了混合型轴向磁轴承在平衡位置时,有限元3-D模型计算的电流-力关系曲线,图9(b)给出了混合型轴向磁轴承控制电流为0 A时,

有限元 3-D 模型计算的转子偏离平衡位置 ± 1 mm 位移-力关系曲线。图 10 给出了有限元 3-D 模型计算的电流、位移、力的关系图。可以看出,电流-力曲线与位移-力曲线具有良好的线性关系,易于轴承控制。

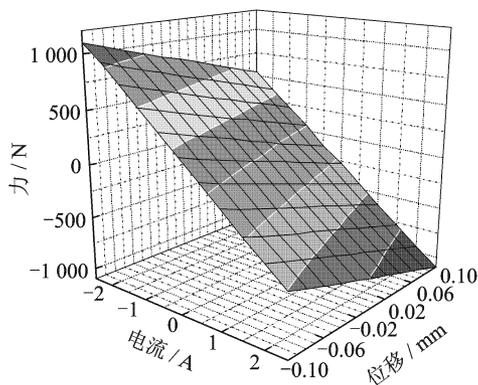


图 10 电流、位移与力关系

在有限元分析软件中,当绕组电流为 2.5 A,转子位于平衡位置时,计算得到转子铁芯受到的轴向悬浮力为 820.3 N,方向水平向左。相比于文献[10]中磁轴承结构,在相同设计承载力的情况下,产生的悬浮力增大了 17.6%。相比于文献[15]中磁轴承结构,在相同设计承载力的情况下,产生的悬浮力增大了 5.6%。

4 结束语

本文提出了一种新结构的混合型轴向磁悬浮轴承,永磁体位于转子上,偏置磁通与控制磁通磁路共用,从而具有结构简单、空间体积小和功耗低等特点。文中所提出的参数设计方法不但考虑了软磁材料的磁阻以及磁场在气隙处的漏磁,还分析了软磁材料部件的漏磁,并结合电磁场有限元分析结果,通过与解析法相互迭代循环的方式来获得磁场的磁阻系数与漏磁系数,提高了参数设计的精确度。最后根据优化设计后的参数,建立了三维仿真模型,仿真结果表明设计结果不仅高于指标要求,而且悬浮力位移刚度系数和电流刚度系数均具有良好的线性关系。

参考文献:

[1] Schweitzer G, Bleuler H, Traxler A. Active magnetic bearings-basics, properties and applications of active magnetic bearing [M]. ETH, Switzerland:

Hochschulverlag AG, 1994.

- [2] Babuska V, Beatty S M, deBlonk B J, et al. A review of technology developments in flywheel attitude control and energy transmission systems[C]//2004 IEEE Aerospace Conference. Chantilly, VA, USA: IEEE Press, 2004, 4:2784-2800.
- [3] Asami K, Chiba A, Rahman M A, et al. Stiffness analysis of a magnetically suspended bearingless motor with permanent magnet passive positioning[J]. IEEE Trans Magn, 2005,41(10):3820-3822.
- [4] Sotelo G G, R de Andrade, Ferreira A C. Magnetic bearingsets for a flywheel system[J]. IEEE Trans Appl Supercond,2007,17(2):2150-2153.
- [5] 赵旭升,邓智泉,王晓琳,等. 永磁偏置磁轴承的研究现状及其发展[J]. 电工技术学报, 2009,29(9):9-20. Zhao Xusheng, Deng Zhiquan, Wang Xiaolin, et al. Research status and development of permanent magnet biased magnetic bearings [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009,29(9): 9-20.
- [6] 孙玉坤,朱焯秋,蔡兰. 三自由度混合磁悬浮轴承耦合特性[J]. 江苏大学学报:自然科学版,2006,127(4):342-346. Sun Yukun, Zhu Huangqiu, Cai Lan. Coupling characteristics of hybrid magnetic bearings with three-degree of freedoms[J]. Journal of Jiangsu University:Natural Science Edition, 2006, 127(4): 342-346.
- [7] 宗鸣. 永磁偏置混合式磁轴承及其控制方法的研究[D]. 沈阳:沈阳工业大学,2007.
- [8] 王晓琳,邓智泉,严仰光. 一种新型的五自由度磁悬浮电机[J]. 南京航空航天大学学报,2004,36(2):210-214. Wang Xiaolin, Deng Zhiquan, Yan Yangguang. Innovative motor with five-degree magnetic suspension [J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2004,36(2):210-214.
- [9] Mukhopadhyay S C. Fabrication of a repulsive-type magnetic bearing using a novel arrangement of permanent magnets for vertical-rotor suspension [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2003, 39(5): 3220-3222.
- [10] 梅磊,邓智泉,赵旭升,等. 新结构混合型轴向磁悬浮轴承原理分析与参数设计[J]. 机械科学与技术, 2009,28(10):1371-1378. Mei Lei, Deng Zhiquan, Zhao Xusheng, et al. Principle analysis and parameter design of an original hybrid axial magnetic bearing[J]. Mechanical Science

- and Technology for Aerospace Engineering, 2009, 28(10):1371-1378.
- [11] 曾励, 朱焜秋, 曾学明, 等. 单自由度混合磁悬浮轴承控制系统模型的研究[J]. 南京航空航天大学学报, 1998, 30(6):685-690.
Zeng Li, Zhu Huangqiu, Zeng Xueming, et al. Study on system model of single freedom HM B[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 1998, 30(6):685-690.
- [12] 贾红云, 朱焜秋. 轴向混合磁轴承工作原理和参数设计[J]. 应用科学学报, 2006(1):94-98.
Jia Hongyun, Zhu Huangqiu. Principle and parameter design of hybrid magnetic axial bearings [J]. Journal of Applied Sciences, 2006(1):94-98.
- [13] Fang Jiancheng, Sun Jinji, Xu Yanliang, et al. A new structure for permanent magnet biased axial hybrid magnetic bearings [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2000, 36(5):3690-3692.
- [14] 刘虎, 房建成. 新型永磁偏置轴向磁轴承的磁力特性[J]. 机械工程学报, 2010, 46(8):167-174.
Liu Hu, Fang Jiancheng. Magnetic force characteristics of a novel permanent magnet biased axial magnetic bearing [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(8):167-174.
- [15] 赵旭升, 邓智泉, 王晓琳, 等. 飞轮储能装置用轴向磁轴承及其低功耗策略[J]. 电机与控制学报, 2011, 15(8):7-12.
Zhao Xusheng, Deng Zhiquan, Wang Xiaolin, et al. Power loss reduction strategy of axial magnetic bearing in flywheel storage equipment application [J]. Electric Machines and Control, 2011, 15(8):7-12.
- [16] 袁崇军, 曹洁, 杨涌, 等. 电磁轴承的结果优化设计[J]. 机械科学与技术, 1995, 14(6):29-36.
Yuan Chongjun, Cao Jie, Yang Yong. The optimum design of electromagnetic bearing structures [J]. Mechanical Science and Technology, 1995, 14(6):29-36.
- [17] 吴刚, 张育林, 刘昆, 等. 电磁轴承结构参数设计研究[J]. 机械科学与技术, 2005, 24(6):713-718.
Wu Gang, Zhang Yulin, Liu Kun, et al. Research on structure parameter design of electromagnetic bearings [J]. Mechanical Science and Technology, 2005, 24(6):713-718.