

文章编号:1000-8055(2013)03-0603-10

# 基于漏磁与磁阻系数迭代的三自由度 混合型磁悬浮轴承的设计

刘程子<sup>1</sup>, 邓智泉<sup>1</sup>, 梅磊<sup>2</sup>, 华春<sup>1</sup>(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:** 提出一种基于漏磁与磁阻系数迭代计算的参数设计方法, 将软磁材料内部磁场的磁通密度非饱和作为约束条件, 以满足最大悬浮力条件下的体积最小化为优化设计目标, 通过循环迭代的方式计算各部分漏磁系数与磁阻系数, 最后得到该三自由度混合型磁悬浮轴承各部分的结构参数。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。给出了静态起浮、悬浮、冲击、转速为 30 000 r/min 时转轴位移与控制电流的波形。实验结果表明: 基于该方法设计出的三自由度混合型磁悬浮轴承具有良好的悬浮特性。

**关 键 词:** 混合型磁悬浮轴承; 三自由度磁悬浮轴承; 参数设计; 漏磁系数迭代; 有限元仿真 (FEA)

**中图分类号:** V299<sup>+</sup>.2; TH133.3

**文献标志码:** A

## Design of 3-DOF hybrid magnetic bearing based on leakage coefficient and magnetoresistance coefficient iterative method

LIU Cheng-zi<sup>1</sup>, DENG Zhi-quan<sup>1</sup>, MEI Lei<sup>2</sup>, HUA Chun<sup>1</sup>(1. College of Automation Engineering,  
Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;  
2. College of Automation and Electric Engineering,  
Nanjing University of Technology, Nanjing 210009, China)

**Abstract:** An iterative parameter design method based on leakage coefficient and magnetoresistance coefficient were presented. For each component of the hybrid magnetic bearing, structural parameters were ultimately obtained based on its leakage and magnetoresistance coefficients calculated using an iterative loop algorithm. The calculations were constrained to the degree of magnetic flux density unsaturation for the design goal of achieving a minimum volume while maintaining the maximum required levitation force. Finite element analysis (FEA) software was used to execute simulation analysis and modeling of the three-dimensional magnetic, demonstrating the rationality and validity of the parameterization method and its result. The displacements of rotor and control current curves of the magnetic bearing under floating, static suspension, static shock and at 30 000 r/min were presented. The experimental results testify that the hybrid magnetic bearing designed by the method has a good levitation performance.

**收稿日期:** 2012-03-22

**网络出版地址:** [http://www.cnki.net/kcms/detail/11.2297.V.20130326.1743.201303.603\\_019.html](http://www.cnki.net/kcms/detail/11.2297.V.20130326.1743.201303.603_019.html)

**基金项目:** 江苏省普通高校研究生科研创新计划 (CX12\_0153)

**作者简介:** 刘程子 (1984—), 女, 福建福州人, 博士生, 主要从事混合型磁悬浮轴承研究。

**Key words:** hybrid magnetic bearing; 3-degree of freedom (DOF) hybrid magnetic bearing; parameter design; leakage coefficient iterative; finite element analysis (FEA)

混合型磁悬浮轴承通过利用永磁材料取代主动磁轴承中的电磁绕组建立偏置磁场,具有功耗低、体积小、质量轻的特点.因此在高速电机、飞轮储能、多电全电发动机等场合具有不可替代的优势<sup>[1-6]</sup>.为了充分利用永磁材料提供的磁能,将轴向磁轴承与径向磁轴承集成,McMullen等人<sup>[7]</sup>提出一种能够同时实现轴向、径向悬浮的集成化的三自由度混合型磁悬浮轴承.该磁悬浮轴承具有减小磁轴承系统体积、功耗和质量的优点,并且在航空发动机动力传输系统、飞轮储能及超高速电机等领域有了应用<sup>[8-14]</sup>.

三自由度的混合型磁悬浮轴承结构及内部磁场分布复杂,其偏置磁路与控制磁路同时存在.磁通路径长,漏磁较多,磁场分布不规则,偏置磁场和控制磁场存在耦合的特点使得磁悬浮轴承的设计具有一定难度.国内外学者为此展开了深入的研究,探索精确的设计方法,力求发挥该磁悬浮轴承的最佳性能<sup>[15-22]</sup>.这些方法中,在参数设计时,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,设计精度不高.

本文提出一种基于漏磁与磁阻系数迭代计算的参数设计方法,根据磁悬浮轴承的磁场分布选择关键截面,通过关键截面的磁场漏磁系数计算出截面磁场磁通量,建立关键截面面积与磁通密度的函数关系.将软磁材料内部磁场的磁通密度非饱和作为约束条件,以满足最大悬浮力条件下的体积最小化为优化设计目标,结合有限元法与解析法,通过循环迭代的方式获得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 三自由度混合型磁悬浮轴承结构与工作原理

### 1.1 三自由度混合型磁悬浮轴承基本结构

三自由度混合型磁悬浮轴承基本结构如图1所示,该结构由定子套筒、转子铁心、径向磁极、定子磁轭、轴向磁极、定子圆盘、永磁材料及径向、轴向控制绕组组成.轴向磁极与转子铁心之间形成2个轴向气隙,径向磁极与转子铁心之间形成4个径向气隙.

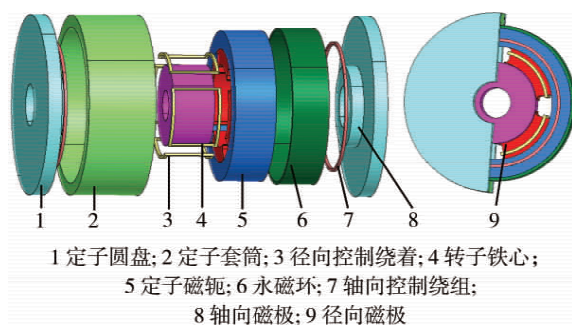


图1 三自由度混合型磁悬浮轴承结构图

Fig.1 Configuration of 3-DOF hybrid magnetic bearing

### 1.2 三自由度混合型磁悬浮轴承的磁场分布

三自由度混合型磁悬浮轴承的偏置磁路与控制磁路如图2所示,偏置磁通由径向充磁的永磁体产生,通过定子套筒、轴向磁极、转子铁心、径向定子及定子磁轭构成闭合磁路,建立偏置磁场.轴向控制磁通则由轴向控制绕组产生,通过定子套筒、定子圆盘、轴向磁极及转子铁心形成闭合磁路,建立轴向控制磁场.径向控制磁通由径向控制绕组产生,通过径向磁极、定子磁轭及转子铁心形成闭合磁路,建立径向控制磁场.

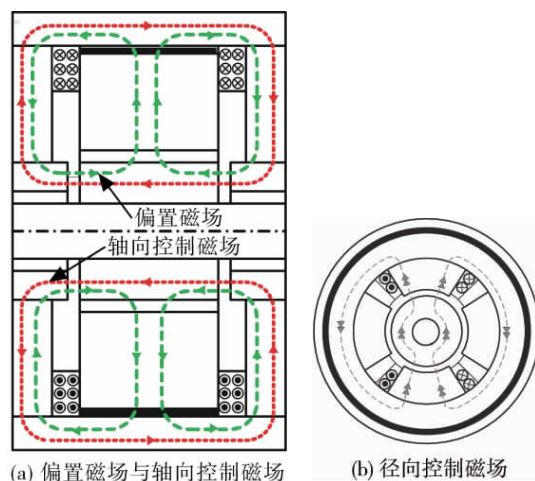


图2 三自由度混合型磁悬浮轴承磁场分布图

Fig.2 Magnetic field in 3-DOF hybrid magnetic bearing

## 2 三自由度混合型磁悬浮轴承参数设计公式

本文基于漏磁与磁阻系数迭代计算的参数设

计方法,充分考虑了软磁材料的磁阻、磁场在气隙处和软磁材料部件处的漏磁,通过循环迭代的方式获得磁场的磁阻系数与漏磁系数,精确全面地计算出控制绕组、永磁体、转子铁心等各部件的基本参数。

### 2.1 气隙面积与磁场磁通量计算

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  $B_{\text{brg}}$  与控制磁场磁通密度  $B_{\text{crg}}$  为

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

由径向承载力  $F_r$  的计算公式可得单个径向气隙投影面积  $S_{\text{rgp}}$ , 其中  $\mu_0$  为真空磁导率。

$$S_{\text{rgp}} = \frac{\mu_0 \cdot F_r}{2 \cdot B_{\text{brg}} \cdot B_{\text{crg}}} \quad (2)$$

根据几何关系又可得单个径向气隙投影面积为

$$S_{\text{rgp}} = D_{\text{rto}} \cdot T_{\text{rp}} \cdot \sin(\alpha_{\text{rp}}/2) \quad (3)$$

则每个径向气隙的面积为

$$S_{\text{rg}} = 0.5 \cdot D_{\text{rto}} \cdot \alpha_{\text{rp}} \cdot T_{\text{rp}} \quad (4)$$

式中  $\alpha_{\text{rp}}$  为径向磁极极弧度,  $D_{\text{rto}}$  为转子铁心外径,  $T_{\text{rp}}$  为径向磁极厚度。

可得每个径向气隙的面积为

$$S_{\text{rg}} = \frac{\alpha_{\text{rp}}}{2 \cdot \sin(\alpha_{\text{rp}}/2)} \cdot S_{\text{rgp}} \quad (5)$$

永磁材料产生的偏置磁场的总磁通量为

$$\Phi_{\text{b}} = 4 \cdot \sigma_{\text{brg}} \cdot B_{\text{brg}} \cdot S_{\text{rg}} \quad (6)$$

式中  $\sigma_{\text{brg}}$  为径向气隙处的偏置磁场漏磁系数。

在径向气隙中的径向控制磁场磁通量为

$$\Phi_{\text{cr}} = \sigma_{\text{crg}} \cdot B_{\text{crg}} \cdot S_{\text{rg}} \quad (7)$$

式中  $\sigma_{\text{crg}}$  为在径向气隙处的径向控制磁场漏磁系数。

偏置磁场在各个轴向气隙里的磁通量为

$$\Phi_{\text{bag}} = \frac{\Phi_{\text{b}}}{2 \cdot \sigma_{\text{bag}}} \quad (8)$$

式中  $\sigma_{\text{bag}}$  为轴向气隙处的偏置磁场漏磁系数。

单个轴向气隙面积为

$$S_{\text{ag}} = \frac{\Phi_{\text{bag}}}{B_{\text{bag}}} \quad (9)$$

则轴向悬浮力为

$$F_a = \frac{2 \cdot B_{\text{bag}} \cdot B_{\text{cag}} \cdot S_{\text{ag}}}{\mu_0} \quad (10)$$

式中  $B_{\text{bag}}$  为偏置磁场在轴向气隙中的磁通密度,  $B_{\text{cag}}$  为轴向控制磁场在轴向气隙中的磁通密度。

则轴向控制磁场的总磁通量为

$$\Phi_{\text{ca}} = \sigma_{\text{cag}} \cdot B_{\text{cag}} \cdot S_{\text{ag}} \quad (11)$$

式中  $\sigma_{\text{cag}}$  为轴向气隙处轴向控制磁场漏磁系数。

### 2.2 软磁材料参数设计

以磁场分布较复杂的转子铁心为例分析,由几何关系可得转子铁心轴向长度

$$L_{\text{rt}} = \frac{2S_{\text{rp}}}{D_{\text{rto}} \alpha_{\text{rp}}} \quad (12)$$

由图2可知,转子铁心中存在偏置磁场、轴向控制磁场及径向控制磁场。转子铁心中偏置磁场的磁通量为

$$\Phi_{\text{brt}} = \frac{\Phi_{\text{b}}}{\sigma_{\text{brt}}} \quad (13)$$

式中  $\sigma_{\text{brt}}$  为转子铁心的偏置磁场漏磁系数。

选取转子铁心同心圆柱截面作为关键截面,则转子铁心中偏置磁场磁通密度为

$$B_{\text{brt}} = \frac{\Phi_{\text{brt}}}{S_{\text{rtt}}} \quad (14)$$

式中  $S_{\text{rtt}}$  为转子铁心同心圆柱截面平均面积。

转子铁心中轴向控制磁场的磁通量为

$$\Phi_{\text{art}} = \frac{\Phi_{\text{ca}}}{\sigma_{\text{art}}} \quad (15)$$

式中  $\sigma_{\text{art}}$  为转子铁心的轴向控制磁场漏磁系数。

选取转子铁心中垂直于轴的截面为关键截面,则转子铁心中轴向控制磁场的磁通密度为

$$B_{\text{art}} = \frac{\Phi_{\text{art}}}{S_{\text{rta}}} \quad (16)$$

式中  $S_{\text{rta}}$  为转子铁心垂直于轴的截面面积。

转子铁心中径向控制磁场的磁通量为

$$\Phi_{\text{rrt}} = \frac{\Phi_{\text{cr}}}{\sigma_{\text{rrt}}} \quad (17)$$

式中  $\sigma_{\text{rrt}}$  为转子铁心的径向控制磁场漏磁系数。

选取转子铁心轴截面为关键截面,则转子铁心中径向控制磁场的磁通密度为

$$B_{\text{rrt}} = 0.5 \frac{\Phi_{\text{rrt}}}{S_{\text{rth}}} \quad (18)$$

式中  $S_{\text{rth}}$  为转子铁心轴截面面积。

转子铁心中合成磁场的磁通密度为

$$B_{\text{rt}} = \sqrt{B_{\text{brt}}^2 + B_{\text{art}}^2 + B_{\text{rrt}}^2} \leq B_{\max} \quad (19)$$

根据式(12)、式(19)可得到满足条件的转子铁心各结构参数。

### 2.3 永磁材料参数设计

在工程实践中,由于工艺水平,材料价格等客观条件限制永磁体沿充磁方向的厚度。在永磁环的径向厚度在设计时定为确定值,其数值的选择应尽量使算出的永磁体工作点位于其最大磁积能点附近。

永磁体工作点的磁场强度为

$$H_{mg} = f_b \frac{B_{brg} g_r + B_{bag} g_a}{\mu_0 T_{mg}} \quad (20)$$

其中  $T_{mg}$  为永磁材料沿充磁方向的厚度。

工作点磁通密度为

$$B_{mg} = B_r - \frac{B_r}{H_c} H_{mg} \quad (21)$$

式中  $f_b$  为偏置磁场磁阻系数,  $H_c$  为永磁材料矫顽力,  $B_r$  为永磁材料剩余磁通密度。

永磁环的中性面积为

$$S_{mg} = \frac{\Phi_b}{B_{mg}} \quad (22)$$

根据几何关系可得永磁材料长度为

$$L_{mg} = \frac{S_{mg}}{\pi \cdot (D_{mgo} + D_{mgi})} \quad (23)$$

式中  $D_{mgo}$  为永磁材料外径,  $D_{mgi}$  为永磁材料内径。

#### 2.4 以体积最小化为目标的参数优化公式

本文采用逐个描点再进行曲线拟合的方式获得三自由度混合型磁悬浮轴承体积与转子铁心外径之间的函数关系式,可由式(19)得到转子铁心外径的初始值,其值为满足了转子铁心中磁场不饱条件下的最小值。三自由度混合型磁悬浮轴承体积与转子铁心外径之间的关系式为

$$V_{mix} = 0.3 \cdot D_{rto}^3 + 54 \cdot D_{rto}^2 - 2944.7 \cdot D_{rto} + 4.8 \times 10^5 \quad (24)$$

计算上式的极值即可获得三自由度混合型磁悬浮轴承体积最小的转子铁心外径值。

### 3 基于漏磁系数与磁阻系数迭代的参数优化过程

三自由度磁悬浮轴承的一般设计流程如图3(a)所示,需通过不断地调整设计参数进行有限元仿真,方法繁琐效率低。本文通过对每次仿真结果进行分析,计算其漏磁与磁阻系数,通过漏磁与磁阻系数进行校验,指导磁轴承设计,提高设计精度和设计效率。本文的设计流程图如图3(b)所示,在初步设计时忽略漏磁与磁阻,取所有磁阻系数与漏磁系数为1,根据磁悬浮轴承的已知参数与设计目标,利用上述设计公式得到初步设计的三自由度混合型磁悬浮轴承的相关参数,然后在有限元分析软件中建立模型来对其磁场进行仿真与分析。根据仿真结果,如遇到仿真前后数值不同,则再次进行参数设计并计算出一组新的磁轴承参数,然后修改结构参数建立新的模型进行仿真和分析。

在迭代的过程中,只有磁阻系数和漏磁系数

作为优化参数参与迭代,同时磁阻系数和漏磁系数是通过结构参数相互耦合,即结构参数变化时,两者也随之改变。

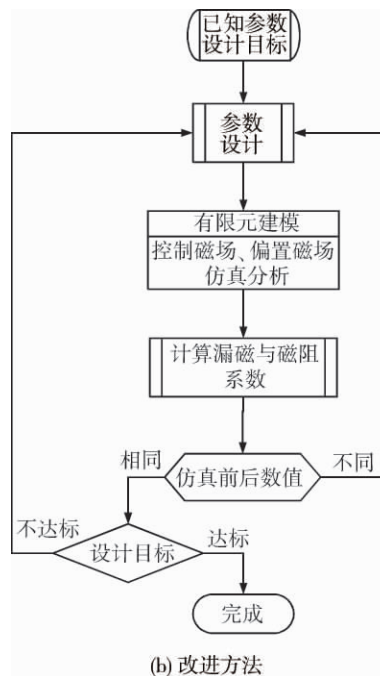
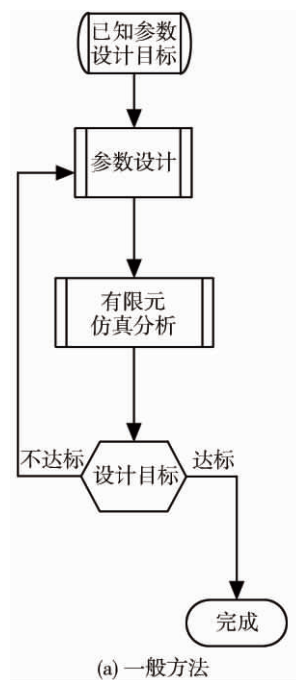


图3 有限元仿真与分析流程图

Fig. 3 Flow chart of finite element(FE) simulation and analysis

通常而言,如果漏磁场占总磁场的1%以下,可忽略其对悬浮力的影响,而且由于漏磁场具有非饱和性,其对应的磁拉力也是线性变化的,所以对于控制系统而言,漏磁场产生的悬浮力可被视

为外界扰动力的一种,完全可以通过控制系统对其补偿控制.因此循环此过程,直到计算所得的漏磁系数与磁阻系数迭代前后差值不小于 0.01 为止,并且各项指标满足设计要求.

已知参数与设计目标如表 1 与表 2 所示.经过多次迭代循环计算得到各个磁阻系数与漏磁系数的最终收敛值如下表 3.

表 1 已知参数  
Table 1 Known parameters

| 已知参数                               | 数值  |
|------------------------------------|-----|
| 径向(轴向)气隙长度 $g_r(g_a)/\text{mm}$    | 0.5 |
| 转子铁心内径 $D_{\text{rti}}/\text{mm}$  | 22  |
| 径向定子槽满率 $S_f$                      | 0.7 |
| 永磁材料剩余磁通密度 $B_r/\text{T}$          | 1.2 |
| 永磁材料矫顽力 $H_c/(\text{kA}/\text{m})$ | 900 |
| 软磁材料饱和磁通密度 $B_s/\text{T}$          | 1.3 |

表 2 设计目标  
Table 2 Design target

| 设计参数                                        | 数值                |
|---------------------------------------------|-------------------|
| 径向最大悬浮力 $F_r/\text{N}$                      | 500               |
| 磁悬浮轴承磁场<br>最大磁通密度 $B_{\text{max}}/\text{T}$ | 1.3               |
| 永磁材料工作点 $(B_{\text{mg}}, H_{\text{mg}})$    | (0.6 T, 450 kA/m) |

表 3 漏磁系数与磁阻系数终值  
Table 3 Final values of leakage coefficient and magnetoresistance coefficient

| 偏置磁场磁阻<br>与漏磁系数       | 数值   | 轴向控制磁场<br>磁阻与漏磁系数     | 数值   |
|-----------------------|------|-----------------------|------|
| $f_b$                 | 1.07 | $f_{\text{ca}}$       | 1.1  |
| $\sigma_{\text{brg}}$ | 2.64 | $\sigma_{\text{cng}}$ | 1.48 |
| $\sigma_{\text{bag}}$ | 2.29 | $\sigma_{\text{art}}$ | 1.48 |
| $\sigma_{\text{brt}}$ | 2.29 | $\sigma_{\text{asp}}$ | 1.3  |
| $\sigma_{\text{bsp}}$ | 1.85 | 径向控制磁场<br>磁阻与漏磁系数     | 数值   |
| $\sigma_{\text{bsy}}$ | 1.53 | $f_{\text{cr}}$       | 1.12 |
| $\sigma_{\text{bss}}$ | 1.04 | $\sigma_{\text{crg}}$ | 1.06 |

4 有限元仿真验证

为验证该方法的正确性,对设计所得三自由

度磁悬浮轴承参数终值进行三维有限元仿真,图 4(a)为三自由度磁悬浮轴承有限元网格剖分图,图 4(b)为径向气隙的有限元网格剖分图.

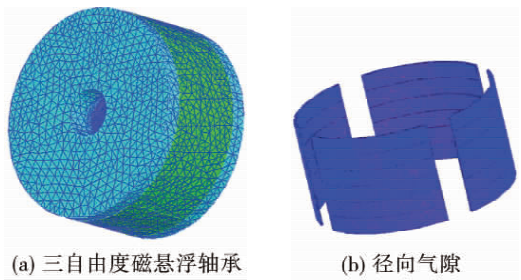


图 4 有限元网格剖分图  
Fig. 4 FE mesh

图 5 为轴向径向控制绕组不加电流时的径向定子与转子上偏置磁场磁通密度标量分布图,轴向气隙与径向气隙上的偏置磁通密度为 0.8 T,与设计一致.

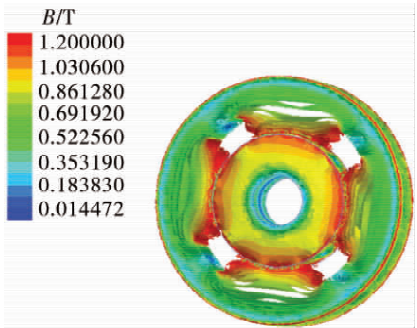


图 5 径向定子及转子上偏置磁场磁通密度标量图  
Fig. 5 Bias magnetic field flux density scalar  
of radial stator and rotor

图 6 为径向气隙中间截面上中心沿径向一周曲线的气隙磁通密度分布图,其中黑色曲线为只有偏置磁场时气隙磁通密度分布情况,磁通密度均为 0.8 T,与设计一致.红色曲线为对  $x$  方向控制绕组通以 1 A 电流后的气隙磁通密度, $x$  方向上左气隙磁通密度增大到 1.0 T 左右,右边减小到 0.6 T 左右, $y$  方向上气隙磁通密度基本重合,可以看出其具有良好的解耦性能.

图 7 为轴向气隙中间截面上沿直径的气隙磁通密度分布,黑色曲线为只有偏置磁场时的气隙磁通密度,大约为 0.8 T.蓝色曲线与红色曲线为对  $z$  方向控制绕组通以 1 A 电流后的两轴向气隙中的磁通密度,一边增大到 1.02 T,一边减小到 0.58 T,与设计一致.

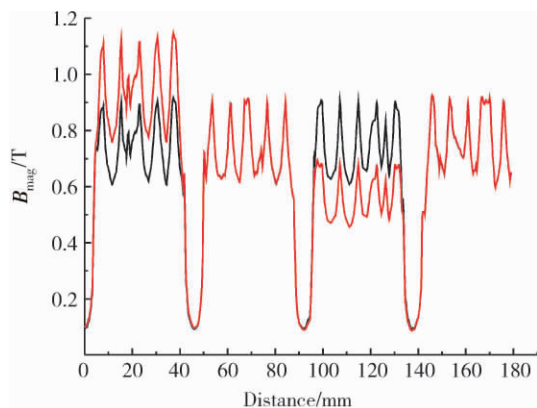


图 6 径向气隙中磁通密度仿真结果

Fig. 6 Simulation result of flux density in the radial gap

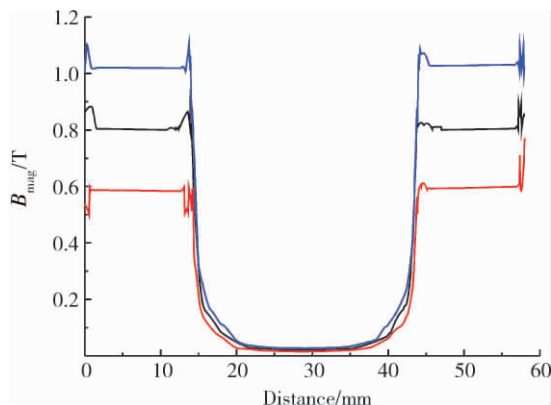


图 7 轴向气隙中磁通密度仿真结果

Fig. 7 Simulation result of flux density in the axial gap

## 5 实验样机及实验结果

### 5.1 实验样机

为了验证本文对三自由度混合型磁悬浮轴承的参数设计方法的合理性,制作了以开关磁阻电机为驱动、利用 2 个三自由度混合型磁悬浮轴承构建的五自由度磁轴承系统。五自由度磁轴承系统实验样机如图 8。三自由度混合型磁悬浮轴承样机径向定子实物图如图 9,轴向定子实物图如图 9(a),考虑到安装的问题,内轴向定子设计成哈弗结构,磁悬浮轴承转子如图 9(b)。

磁轴承拥有独立的控制系统控制与驱动,采用分散 PID (proportion-integral-differential) 控制,通过位移传感器检测转子位移完成 PID 运算后,在开关功放中产生电流使转子悬浮在平衡位置。功率控制系统实物如图 10。

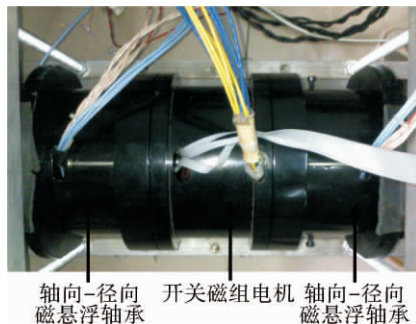


图 8 五自由度磁轴承系统实验样机

Fig. 8 Prototype of 5-DOF magnetic bearing system

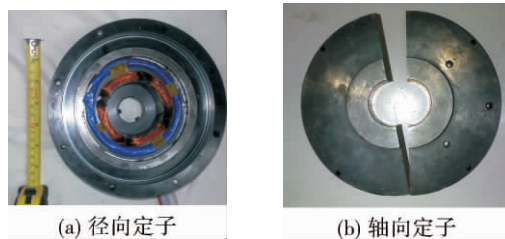


图 9 三自由度混合型磁悬浮轴承样机

Fig. 9 Prototype of 3-DOF hybrid magnetic bearing

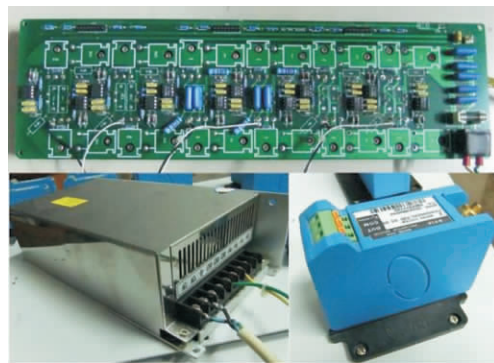


图 10 功率控制系统

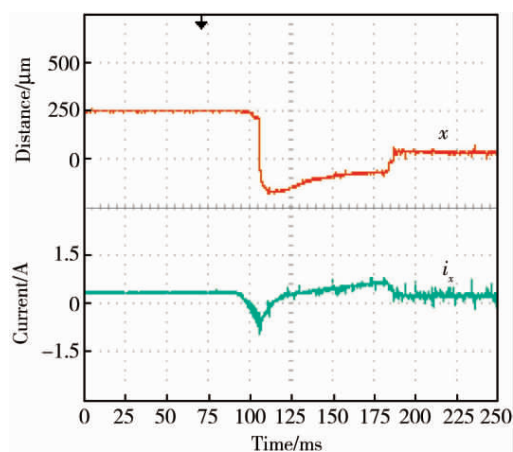
Fig. 10 Power control system

### 5.2 实验结果

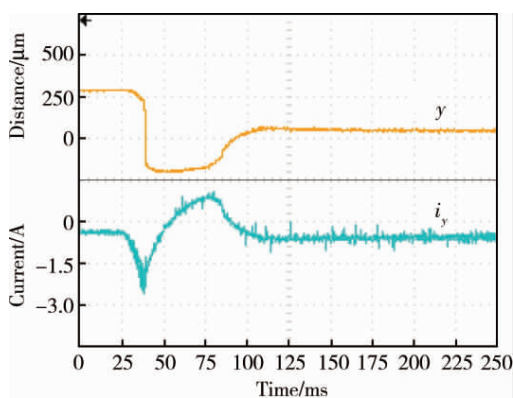
#### 5.2.1 静态悬浮实验

利用五自由度混合型磁悬浮轴承系统对三自由度混合型磁轴承进行空载静态起浮实验。由于系统两端的磁悬浮轴承完全相同,图 11 给出了起浮时一端转子位移的变化、控制电流的变化及起浮时间的实验波形。起浮时间均在 50~75 ms 之间,起浮电流约在 1.5~3 A 左右。

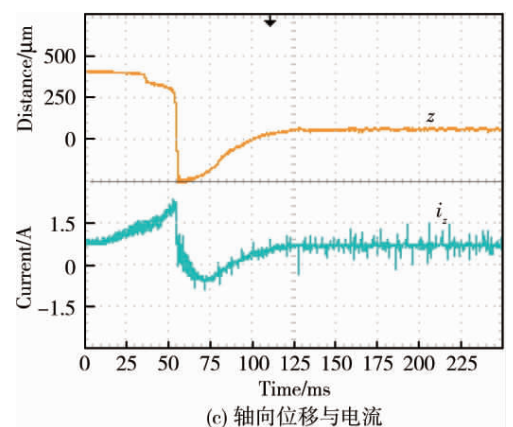
图 12 给出了三自由度磁悬浮轴承稳定悬浮后的位移和电流波形,各自由的扰动不超过 50



(a) 水平方向位移与电流



(b) 垂直方向位移与电流



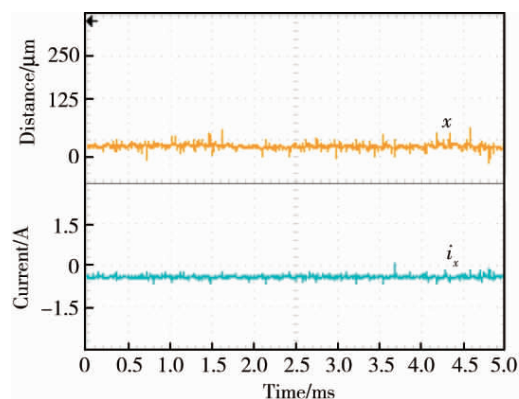
(c) 轴向位移与电流

图 11 静态起浮位移与电流波形

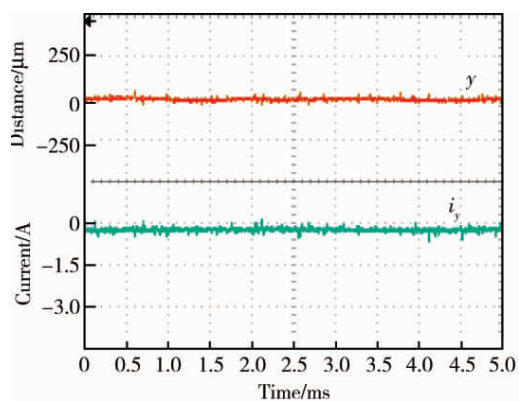
Fig. 11 Static float displacement and current waveform

$\mu\text{m}$ , 悬浮电流接近于 0 A. 图 13 给出了三自由度磁悬浮轴承的冲击试验波形, 通过木榔头敲击转轴, 三个自由度在 20 ms 时间内重新实现稳定悬浮.

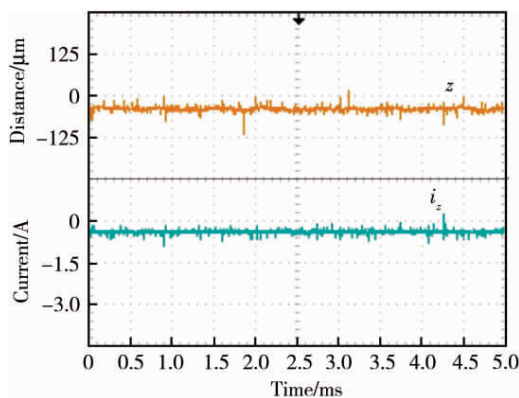
在静态悬浮的基础上, 测试了磁轴承的力-电流关系和力-位移关系, 测量结果如图 14 所示, 径向承载力达到了设计目标, 电流刚度、位移刚度与



(a) 水平方向位移与电流



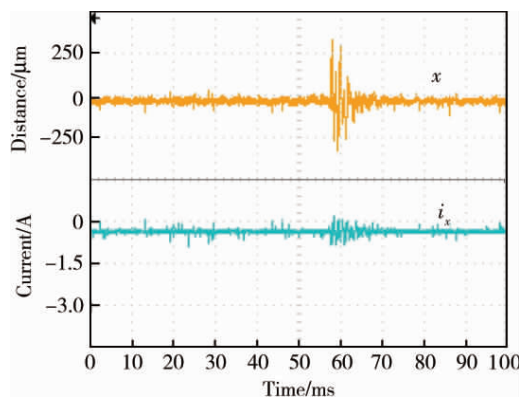
(b) 垂直方向位移与电流



(c) 轴向位移与电流

图 12 静态悬浮位移与电流波形

Fig. 12 Static suspension displacement and current waveform



(a) 水平方向位移与电流

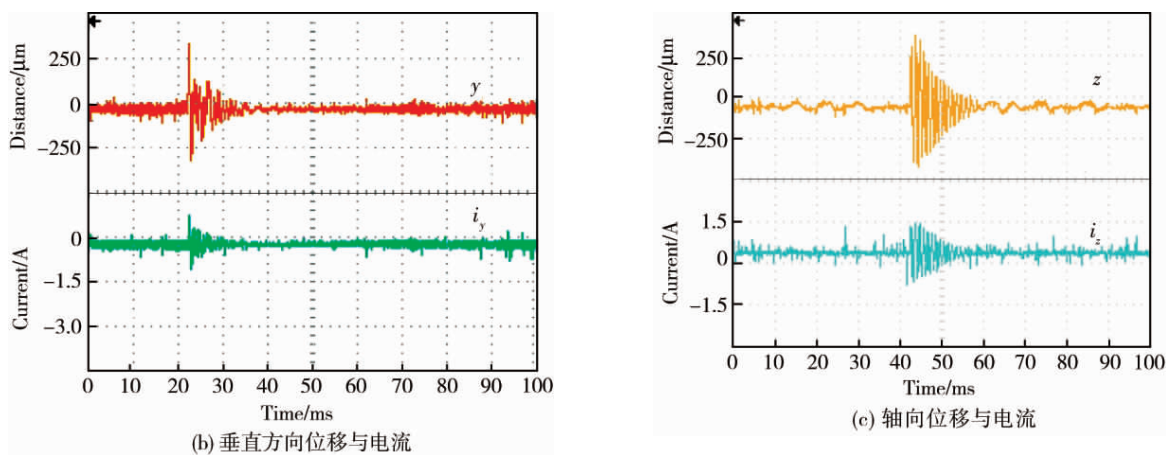


图 13 静态冲击实验位移与电流波形

Fig. 13 Static shock experiment displacement and current waveform

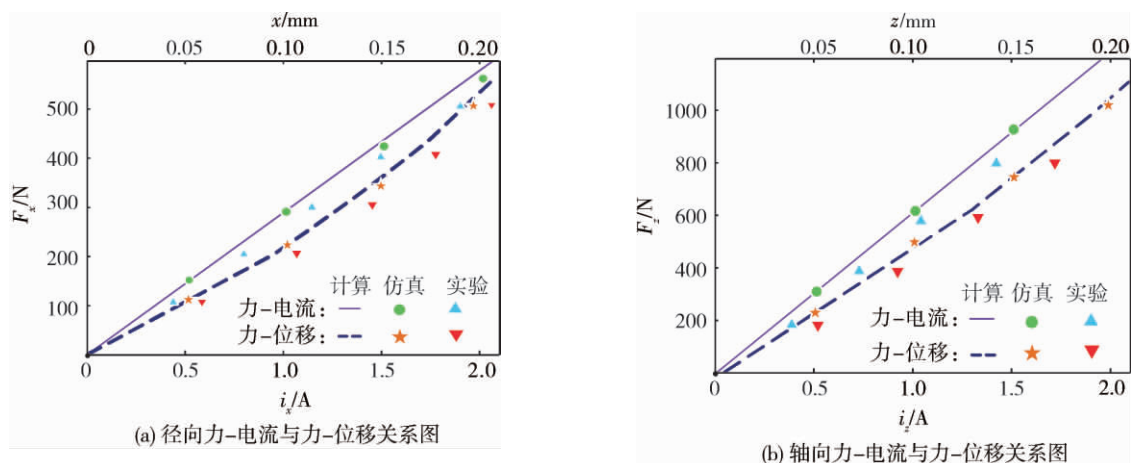


图 14 力-电流与力-位移关系

Fig. 14 Force-current and force-displacement

仿真误差都在 6% 左右,在工程接受范围内,证明磁轴承的设计正确合理。

### 5.2.2 动态悬浮实验

转速为 30 000 r/min 时,三自由度混合型磁

浮轴承径向自由度的位移及控制电流波形如图 15。轴向位移及控制电流波动很小,径向位移控制在  $50\mu\text{m}$  内,电流峰峰值为 3 A。

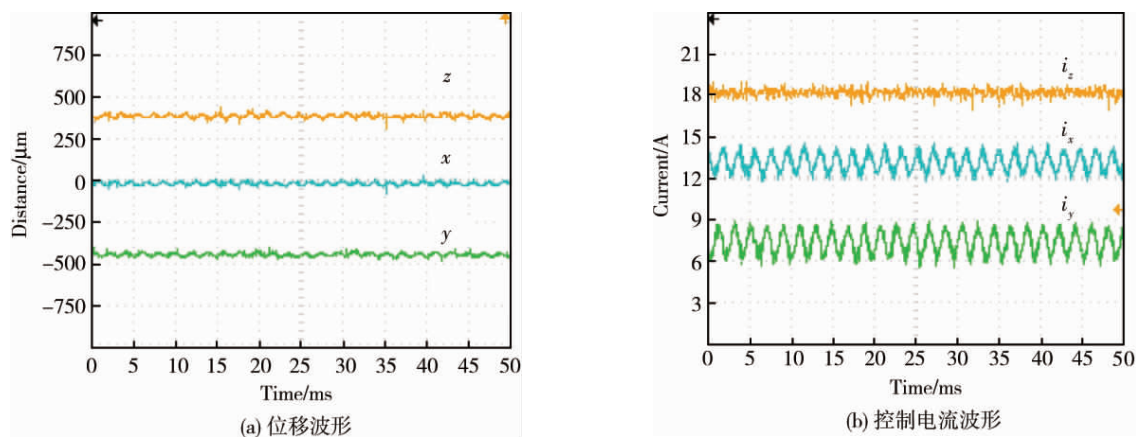


图 15 30000 r/min 位移与电流波形

Fig. 15 30000 r/min displacement and current waveform

## 6 结 论

本文提出了一种基于漏磁与磁阻系数迭代计算的三自由度混合型磁悬浮轴承的参数设计方法,根据电磁场有限元的仿真结果,结合解析法进行循环迭代,进而得到磁场磁阻与漏磁系数,参数设计的精确度得到提高.有限元仿真结果表明:磁轴承气隙磁通密度均达到设计目标.实验表明基于此方法设计出的三自由度混合型磁悬浮轴承具有良好的悬浮性能,证明此方法指导三自由度混合型磁悬浮轴承的设计是有效可行的.

## 参考文献:

- [1] Schweitzer G, Bleuler H, Traxler A. Active magnetic bearings-basics, properties and applications of active magnetic bearing[M]. Switzerland: Hochschulverlag AG, 1994.
- [2] Heshmat H, Chen H M, Walton J F. On the performance of hybrid foil-magnetic bearings[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2000, 122(1): 73-81.
- [3] Kenny A, Palazzolo A B. Single plane radial, magnetic bearings biased with poles containing permanent magnets [J]. Journal of Mechanical Design, 2003, 125(1): 178-185.
- [4] Hamler A, Gorican V, Stumberger B, et al. Passive magnetic bearing[J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2004, 272/276(3): 2379-2380.
- [5] Ohji T, Ichiyama S, Amei K, et al. A new conveyor system based on a passive magnetic levitation unit having repulsive-type magnetic bearings[J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2004, 272/276(Sup.): 1731-1733.
- [6] XU Yanliang, DUN Yueqin, WANG Xiuhe, et al. Analysis of hybrid magnetic bearing with a permanent magnet in the rotor by FEM[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2006, 42(4): 1363-1366.
- [7] McMullen P T, Huynh C S. Magnetic bearing providing radial and axial load support for a shaft; USA, 005514924A [P]. 1996-05-07.
- [8] McMullen P T, Huynh C S, Hayes R J. Combination radial-axial magnetic bearing[C]//Proceedings of the 7th International Symposium on Magnetic Bearings. Switzerland: ETH Zurich, 2000: 473-478.
- [9] Pichot M A, Kajs J P, Murphy B R, et al. Active magnetic bearings for energy storage systems for combat vehicles [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2001, 37(1): 318-323.
- [10] Philipp I, Thomas N, Johann W K. Analysis of a combined radial-axial magnetic bearing for a high-speed drive system [C]//Proceedings of International Conference on Power Electronics, Machines and Drives 2010. Brighton, UK: IET, 2010: 1-6.
- [11] Imoberdorf P, Zwysig C, Round S D, et al. Combined radial-axial magnetic bearing for a 1 kW, 500 000 r/min permanent magnet machine [C]//Proceedings of the 22nd Applied Power Electronics Conference, USA: IEEE, 2007: 1434-1440.
- [12] 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 Zhiqian, 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. (in Chinese)
- [13] 徐龙祥, 周波. 磁浮多电航空发动机的研究现状及关键技术[J]. 航空动力学报, 2003, 18(1): 51-59.  
XU Longxiang, ZHOU Bo. The current situation and development trend for more-electric gas turbine engines[J]. Journal of Aerospace Power, 2003, 18(1): 51-59. (in Chinese)
- [14] 谢振宇, 徐龙祥, 李迎, 等. 磁悬浮轴承转子系统动态特性的实验研究[J]. 航空动力学报, 2004, 19(1): 30-37.  
XIE Zhenyu, XU Longxiang, LI Ying, et al. Analysis of radial dynamic characteristics of magnetic bearing system by excitation test[J]. Journal of Aerospace Power, 2004, 19(1): 30-37. (in Chinese)
- [15] LEI Huang, ZHAO Guangzhou, NIAN Heng, et al. Modeling and design of permanent magnet biased radial-axial magnetic bearing by extended circuit theory[C]//Proceeding of International Conference on Electrical Machines and Systems. Seoul, Korea: IEEE, 2007: 1502-1507.
- [16] 杨磊, 房建成, 韩邦成, 等. 磁悬浮飞轮用永磁偏置磁轴承漏磁分析[J]. 轴承, 2008, 2(2): 24-28.  
YANG Lei, FANG Jiancheng, HAN Bangcheng, et al. Analysis and study on flux leakage for permanent magnet biased magnetic bearing in magnetically suspended flywheel application[J]. Bearing, 2008, 2(2): 24-28. (in Chinese)
- [17] 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 Zhiqian, YAN Yangguang. Innovative motor with five-degree magnetic suspension [J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2004, 36(2): 210-214. (in Chinese)
- [18] 杨静, 虞烈, 谢敬. 永磁偏置磁轴承动特性研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(5): 122-125.  
YANG Jing, YU Lie, XIE Jing. Study on dynamic of permanent magnet biased magnetic bearing[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(5): 122-125. (in Chinese)
- [19] 赵旭升, 邓智泉, 汪波. 一种磁悬浮开关磁阻电机用轴向径向磁轴承[J]. 北京航空航天大学学报, 2011, 37(8): 973-978.  
ZHAO Xusheng, DENG Zhiqian, WANG Bo. Axial radial magnetic bearing in magnetic suspending switched reluctance motor application[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2011, 37(8): 973-978. (in Chinese)
- [20] 汪波, 邓智泉, 赵旭升, 等. 基于精确磁路的永磁偏置轴向径向磁轴承设计[J]. 中国机械工程, 2012, 23(17):

- 2036-2040.
- WANG Bo, DENG Zhiqun, ZHAO Xusheng. Design of permanent magnet biased axial-radial magnetic bearing based on accurate magnetic circuit[J]. China Mechanical Engineering, 2012, 23(17): 2036-2040. (in Chinese)
- [21] 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. (in Chinese)
- [22] 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. (in Chinese)