

DOI:10.16356/j.1005-2615.2024.05.004

## 基于粒子群算法的传感器设计与磁悬浮应用

陆添凤, 曹鑫, 俞强, 郭涛, 邓智泉

(南京航空航天大学自动化学院, 南京 211106)

**摘要:** 基于磁悬浮控制系统亟需一种体积更小、成本更低的位移传感器, 研究了以电涡流传感器为原理的横向磁通传感器。基于该传感器的工作原理分析, 采用粒子群算法设计了传感器的激励线圈与感应线圈参数, 简化了横向磁通传感器的设计过程。所研制出的位移传感器灵敏度为 7.2 V/mm, 线性度为 1.7%, 可检测范围为  $\pm 0.5$  mm。将该传感器应用在一台磁悬浮永磁同步电机系统中, 在电机转速 20 000 r/min 时, 高速磁悬浮转子仍保持稳定运行, 且无论在稳态还是动态工况下, 本文研制的横向磁通传感器均能满足磁悬浮电机位移检测和悬浮控制的要求, 达到同类产品的控制效果。

**关键词:** 电涡流传感器; 横向磁通传感器; 粒子群算法; 磁悬浮系统; 永磁同步电机

中图分类号: TP212 文献标志码: A 文章编号: 1005-2615(2024)05-0815-08

## Sensor Design and Magnetic Suspension Application Based on Particle Swarm Optimization

LU Tianfeng, CAO Xin, YU Qiang, GUO Tao, DENG Zhiquan

(College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing 211106, China)

**Abstract:** A displacement sensor with smaller volume and lower cost is needed for magnetic suspension control system. A transverse flux displacement sensor based on eddy current sensors is studied. The sensor analysis is based on its working principle. The parameters of excitation coil and induction coil are designed by particle swarm optimization, and the design process of the transverse flux sensor is simplified. The developed displacement sensor has a sensitivity of 7.2 V/mm, a linearity of 1.7%, and a detection range of  $\pm 0.5$  mm. The sensor is applied in a magnetic levitation permanent magnet synchronous motor system. When the motor speed is 20 000 r/min, the high-speed magnetic levitation rotor still maintains stable operation. The transverse flux displacement sensors developed in this paper can meet the requirements of magnetic suspension motor displacement detection and suspension control, and achieve the control effect of similar products.

**Key words:** eddy current sensor; transverse flux sensor; particle swarm optimization; magnetic levitation system; permanent magnet synchronous motor

磁悬浮轴承因其无接触、寿命长和损耗小等优点被广泛应用于航空航天、飞轮储能等多个领域<sup>[1-2]</sup>。非接触式位移传感器作为磁悬浮轴承系统的反馈环节, 在很大程度上决定了控制系统的性

能<sup>[3]</sup>。现常用的非接触式传感器主要有电涡流式传感器、电感式传感器与电容式传感器。其中, 电涡流式传感器因其测量精度高、动态响应好以及适用于多种工况等优点得到了广泛应用<sup>[4]</sup>。采用传

**基金项目:** 国家自然科学基金面上项目(52377056)。

**收稿日期:** 2024-03-15; **修订日期:** 2024-04-09

**通信作者:** 曹鑫, 男, 教授, 博士生导师, E-mail: caoxin@nuaa.edu.cn。

**引用格式:** 陆添凤, 曹鑫, 俞强, 等. 基于粒子群算法的传感器设计与磁悬浮应用[J]. 南京航空航天大学学报, 2024, 56(5): 815-822. LU Tianfeng, CAO Xin, YU Qiang, et al. Sensor design and magnetic suspension application based on particle swarm optimization[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2024, 56(5): 815-822.

统的电涡流位移传感器检测转子位移时,磁悬浮转轴需要为传感器的安装位置预留足够的轴向空间,这不仅增加了磁悬浮系统的体积,过长的转轴还会导致转轴出现柔性模态等问题<sup>[5-6]</sup>。同时,为保证单个自由度具有良好的线性度,一般会在径向相对位置安装2个位移传感器,本文使用的某公司生产的电涡流位移传感器(简称货架产品,非横向磁通传感器)单支价格为2000元,整个高速磁悬浮电机系统的5个自由度需要10个位移传感器,从而导致成本大为增加。因此,为进一步推动高速磁悬浮电机系统在航空航天和工业制造等应用领域的竞争力,自研一种体积小、成本低和集成度高的电涡流式位移传感器成为亟需解决的问题。

Buehler<sup>[7]</sup>在2004年首次提出了一种新型的电涡流式位移传感器。该传感器将径向2个自由度检测所需的4个探头线圈印制在1块印刷电路板(Printed circuit board, PCB)板上,以此降低电涡流位移传感器的体积与成本。2004年, Larsonneur等<sup>[8]</sup>在磁轴承国际研讨会展示了该传感器的原型。2006年, Burdet<sup>[9]</sup>依据该新型传感器的原理,研制出了耐高温的位移传感器。2008年, Musing等<sup>[10]</sup>在一台转速500 000 r/min的永磁电机上应用了此传感器,并将该新型传感器命名为横向磁通传感器。清华大学薛莲晓<sup>[11]</sup>通过三维有限元仿真,总结了横向磁通传感器的设计规律,并将研制出的传感器应用在了高速磁悬浮压缩机中,当转速上升至12 000 r/min时系统仍能保持稳定。金超武等<sup>[12]</sup>进一步研究了线圈匝数和转子材料对横向磁通传感器灵敏度的影响,并搭建实验平台对所研制的横向磁通传感器进行了性能测试。本文通过粒子群算法搜寻最优线圈匝数,简化了线圈设计过程,缩短了设计周期,并将所研制的传感器应用于磁悬浮永磁同步电机系统中,对比了自研传感器与某产品的各项性能指标。

## 1 横向磁通传感器

### 1.1 横向磁通传感器数学模型

基于电涡流位移传感器的检测原理,横向磁通传感器的检测模型如图1所示,其主要包含PCB探头线圈与被测转轴。PCB探头线圈主要由激励线圈和感应线圈组成,4个感应线圈正交分布于激励线圈外侧;横向磁通传感器无接触地套在被测转轴上,测量转轴的径向位移。

### 1.2 横向磁通传感器工作原理

在激励线圈中通入高频交流电压以产生高频交流磁场,该磁场会在导电的金属转轴表面产生涡

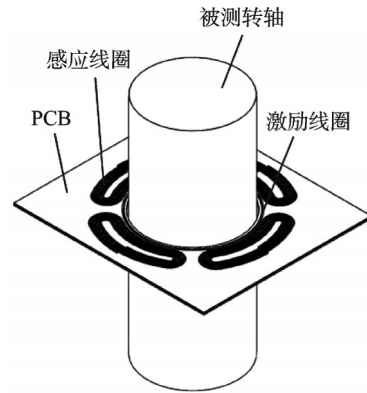


图1 横向磁通传感器示意图

Fig.1 Schematic diagram of transverse flux sensor

电流,进而产生涡流场。如图2(a)所示,当转轴居中时,两侧感应线圈中的感应电压相等;如图2(b)所示,当转轴发生向左的位移偏移时,左侧磁密减小,右侧磁密增大,两侧感应线圈中的感应电压不相等。通过后续仿真可知,两侧感应线圈中的感应电压差与转轴位移呈近似线性相关。

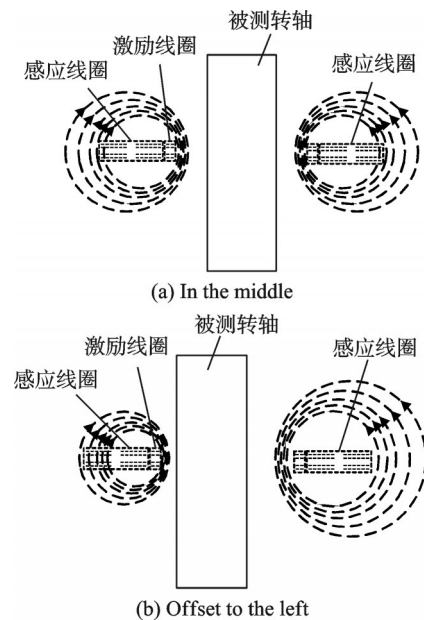


图2 横向磁通传感器检测原理

Fig.2 Position detection principle of transverse flux sensor

图3为横向磁通传感器的等效电路图。左侧是激励线圈等效电路,  $U_{exc}$  为激励线圈的激励电压,  $L_{exc}$ 、 $R_{exc}$  和  $C_{exc}$  分别为激励线圈的等效电感、等效电阻和谐振电容。右侧是相对1组感应线圈等效电路,  $U_{sens}$  为传感器的输出电压,  $L_{sens}$ 、 $R_{sens}$  和  $C_{sens}$  分别为1组感应线圈的等效电感、等效电阻和谐振电容,  $R_1$ 、 $R_2$  和  $L_1$ 、 $L_2$  分别为1组感应线圈中单个线圈的等效电阻和等效电感,  $M_1(x)$ 、 $M_2(x)$  为1组感应线圈中单个线圈与激励线圈之间的互感。

电路参数满足

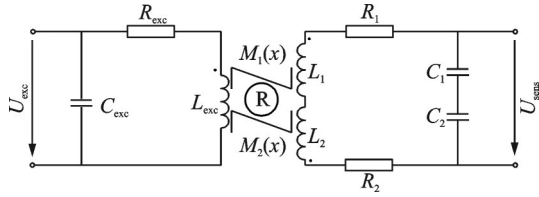


图3 横向磁通传感器等效电路

Fig.3 Diagram of transverse flux sensor equivalent circuit

$$\begin{cases} L_{\text{sens}} = L_1 + L_2 \\ R_{\text{sens}} = R_1 + R_2 \\ C_{\text{sens}} = C_1 + C_2 \\ M_{\text{eff}}(x) = M_1(x) - M_2(x) \end{cases} \quad (1)$$

式中  $M_{\text{eff}}(x)$  为感应线圈与激励线圈之间的互感差。根据基尔霍夫电压定律,列写电路方程可得

$$-j\omega M_{\text{eff}} I_{\text{exc}} + R_{\text{sens}} I_{\text{sens}} + j\omega L_{\text{sens}} I_{\text{sens}} + \frac{I_{\text{sens}}}{j\omega C_{\text{sens}}} = 0 \quad (2)$$

式中:  $\omega$  为激励信号频率,  $I_{\text{exc}}$ 、 $I_{\text{sens}}$  分别为激励线圈和感应线圈中的电流。整理式(2)可得

$$I_{\text{sens}} = \frac{-\omega^2 M_{\text{eff}} I_{\text{exc}} C_{\text{sens}}}{j\omega C_{\text{sens}} R_{\text{sens}} - \omega^2 C_{\text{sens}} L_{\text{sens}} + 1} \quad (3)$$

则传感器的输出电压  $U_{\text{sens}}$  为

$$U_{\text{sens}} = \frac{I_{\text{sens}}}{j\omega C_{\text{sens}}} = \frac{j\omega M_{\text{eff}} I_{\text{exc}}}{j\omega C_{\text{sens}} R_{\text{sens}} - \omega^2 C_{\text{sens}} L_{\text{sens}} + 1} \quad (4)$$

调节谐振电容值,使系统工作在谐振频率点下,因此存在谐振频率关系式

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{L_{\text{sens}} C_{\text{sens}}}} \quad (5)$$

将式(5)代入式(4)得

$$U_{\text{sens}} = \frac{M_{\text{eff}} I_{\text{exc}}}{R_{\text{sens}} C_{\text{sens}}} \quad (6)$$

采用交流恒压源驱动线圈,谐振时激励线圈中的电流满足

$$I_{\text{exc}} = \frac{U_{\text{exc}}}{\omega L_{\text{exc}}} \quad (7)$$

合并式(5~7),可得横向磁通传感器的输出电压

$$U_{\text{sens}} = \omega U_{\text{exc}} \cdot \frac{M_{\text{eff}} L_{\text{sens}}}{L_{\text{exc}} R_{\text{sens}}} \quad (8)$$

当输入激励信号一定时,传感器的输出电压随径向位移  $x$  变化的关系式(由后续仿真可知,当转轴发生径向位移变化时,  $L_{\text{sens}}$ 、 $R_{\text{sens}}$ 、 $L_{\text{exc}}$  基本保持不变)为

$$\frac{dU_{\text{sens}}}{dx} = \omega U_{\text{exc}} \cdot \frac{L_{\text{sens}}}{L_{\text{exc}} R_{\text{sens}}} \cdot \frac{dM_{\text{eff}}}{dx} \quad (9)$$

## 2 基于粒子群算法的线圈设计

由式(9)可知,当输入激励信号一定时,传感器

的灵敏度与激励线圈和感应线圈的阻抗参数有关,其中,互感差随径向位移的变化远大于互感差随线圈圈数的变化<sup>[13]</sup>,因此在线圈圈数进行设计时,为提高传感器的灵敏度,主要考虑式(10)取得最大值

$$f = \frac{L_{\text{sens}}}{L_{\text{exc}} R_{\text{sens}}} \quad (10)$$

线圈阻抗参数与线圈圈数、线圈长度和线圈包围截面积等均有关。现有的研究方法大多通过大量的有限元仿真来寻找合适的线圈圈数,这种方法需要大量的时间与精力,据此,本文采用粒子群算法寻优最合适的激励线圈与感应线圈圈数选取值,简化了横向磁通传感器的设计过程。

### 2.1 粒子群算法原理

粒子群算法是一种群体智能数值优化算法,来源于鸟类集体活动的规律性,其因鲁棒性强、参数少和收敛速度快等优点被广泛应用于PID控制的参数优化中<sup>[14-16]</sup>。该算法的基本思想是通过无质量的粒子模拟鸟群之间的协作与信息共享来获得目标函数的最优解<sup>[17-18]</sup>。每个粒子具有速度和位置两个属性,速度表征粒子运动快慢,位置表征粒子运动方向,根据式(11)和式(12)不断迭代搜寻自身最优位置与全局最优位置以得到最优解

$$v_i^{t+1} = \omega v_i^t + r_1 c_1 (p_{\text{best}}^t - x_i^t) + r_2 c_2 (g_{\text{best}}^t - x_i^t) \quad (11)$$

$$x_i^{t+1} = x_i^t + v_i^{t+1} \quad (12)$$

式中:  $\omega$  为惯性权重,  $c_1$ 、 $c_2$  为学习因子,  $r_1$ 、 $r_2$  为  $[0, 1]$  范围内的随机数,  $t$  为算法当前的迭代次数,  $p_{\text{best}}^t$  为第  $i$  个粒子在  $t$  时刻的个体最优位置,  $g_{\text{best}}^t$  为群体在  $t$  时刻的全局最优位置。

### 2.2 传感器线圈模型推导

线圈的阻抗参数与线圈长度、包围截面积等关系式为<sup>[19-20]</sup>

$$L = \frac{N^2 \mu A}{l} \quad (13)$$

$$R = \rho \frac{l}{S} \quad (14)$$

式中:  $N$  为线圈匝数,  $\mu$  为磁导率,  $A$  为线圈所包围的截面积,  $l$  为线圈长度,  $S$  为导线的截面积,  $\rho$  为铜线电阻率。本文基于一台钢制转轴直径  $D$  为 24 mm 的磁悬浮永磁同步电机设计横向磁通传感器,因此传感器线圈的初始模型也基于该直径。

激励线圈初始设置为 1 匝,激励线圈电感为

$$L_{\text{exc}} = \frac{N_1^2 \mu A_1}{l_1} \quad (15)$$

式中:  $l_1$  为激励线圈的长度,  $N_1$  为激励线圈圈数,  $A_1$  为激励线圈所包围的截面积。

由于激励线圈为螺旋圆形走线,因而对线圈长度和所包围截面积的计算均进行了简化处理:线圈

长度的计算简化为求圆形线圈的长度,如式(16)所示;线圈包围截面积也简化为圆形面积,如式(17)所示,但是需要注意的是,因为导线宽7 mil(1 mil=0.025 4 mm),导线间距为10 mil,所以当线圈圈数每增加1圈时,所包围截面积的半径会增加17 mil。记 $a=17$  mil,有

$$l_1 = \pi D N_1 \tag{16}$$

$$A_1 = \pi \left[ \frac{D}{2} + a(N_1 - 1) \right]^2 \tag{17}$$

同理,感应线圈初始设置是5圈螺旋走线,如图4所示。图4感应线圈阻抗参数为

$$\begin{cases} L_{\text{sens}} = \frac{N_2^2 \mu A_2}{l_2} \\ R_{\text{sens}} = \rho \frac{l_2}{S} \end{cases} \tag{18}$$

式中: $l_2$ 为感应线圈长度, $N_2$ 为感应线圈圈数, $A_2$ 为感应线圈所包围的截面积。

本文主要对线圈圈数进行设计,因而不考虑线圈张角变化带来的影响,固定线圈张角为 $60^\circ$ ,线圈长度简化为中间一圈线圈的两条弧长与小圆周长和再乘上线圈圈数,有

$$l_2 = \left\{ \frac{\pi}{3} [R_5 + a(N_2 - 5) + a(N_1 - 1)] + 2\pi [r_5 + a(N_2 - 5) + a(N_1 - 1)] \right\} \tag{19}$$

当激励线圈或感应线圈圈数每增加1圈时,弧长半径 $R_5$ 和圆周半径 $r_5$ 均会增加17 mil;包围截面积简化为矩形,即

$$A_2 = [b + a(N_2 - 5) + a(N_1 - 1)] \times [c + a(N_2 - 5) + a(N_1 - 1)] \tag{20}$$

同理,当线圈每增加1圈时,矩形长 $b$ 和宽 $c$ 各增加17 mil。

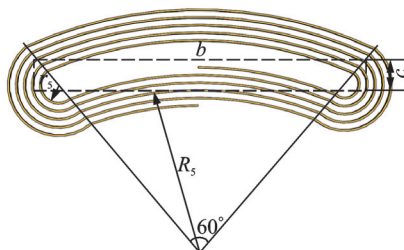


图4 感应线圈示意图

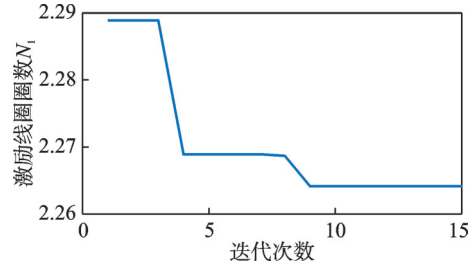
Fig.4 Induction coil diagram

将式(15、18)代入式(10)中,得到粒子群算法的目标优化函数为

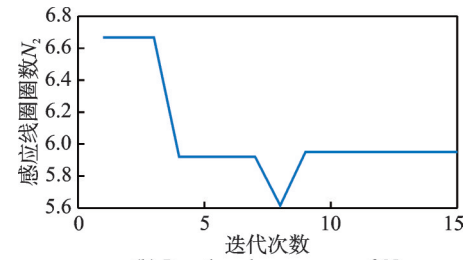
$$f = \frac{L_{\text{sens}}}{L_{\text{exc}} R_{\text{sens}}} = \frac{N_2^2 \cdot A_2 \cdot S \cdot l_1}{\rho \cdot l_2^2 \cdot N_1^2 \cdot A_1} \tag{21}$$

### 2.3 粒子群算法仿真分析

在MATLAB中寻优粒子群算法目标函数的最大值,激励线圈如果只取1圈会导致激励线圈中的电流过大,因而设定变量 $2 \leq N_1 \leq 10, 5 \leq N_2 \leq 15$ ,得到迭代后的仿真结果如图5、6所示。



(a) Iterative change curve of  $N_1$



(b) Iterative change curve of  $N_2$

图5  $N_1$ 和 $N_2$ 的最优个体适应值迭代变化曲线

Fig.5 Iterative change curves of optimal individual fitness values for  $N_1$  and  $N_2$

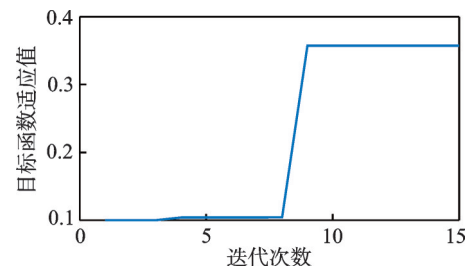


图6 目标函数适应值迭代变化曲线

Fig.6 Iterative change curve of fitness value of objective function

由仿真结果可知,粒子群算法在迭代9次后系统趋于稳定,目标函数寻优最大值为0.36。为进一步说明该方法的有效性,通过有限元仿真比较不同线圈下传感器的灵敏度,结果如表1所示。

表1 不同线圈下传感器的灵敏度

Table 1 Sensitivity of sensors under different coils

激励线圈圈数	感应线圈圈数	传感器灵敏度/( $V \cdot mm^{-1}$ )
	5	0.42
2	6	0.47
	7	0.45
3	6	0.41

据此,论证了基于粒子群算法的传感器线圈设计的有效性。本文通过粒子群算法得到线圈的选取结果,代替了原本需要通过大量有限元仿真不断试错设计线圈的方法,简化了设计过程。考虑线圈

圈数取整数值,最优的线圈取值为激励线圈 2 圈,感应线圈 6 圈。

### 3 横向磁通传感器仿真分析

图 7 为横向磁通传感器的仿真模型。首先需要确定输入激励信号的频率,由图 8 可知,当激励信号频率从 10 kHz 增加到 10 MHz 时,  $L_{sens}$ 、 $R_{sens}$  和  $L_{exc}$  随频率变化的波动很小。而随着频率的升高,被测转轴上的涡电流逐渐趋于表面,继续增加频率至 1 MHz 时,涡流场已经趋于饱和,此时  $dM_{eff}/dx$  也因趋于饱和而不再变化,在实际工程中,激励线圈的频率不会严格稳定在设定频率,因而需要选取激励频率为 1~10 MHz 之间,确保即使实际激励频率有所波动时,也不会对系统灵敏度和线性度造成太大影响。综合考虑后续的电路设计,选取激励频率为 3 MHz。

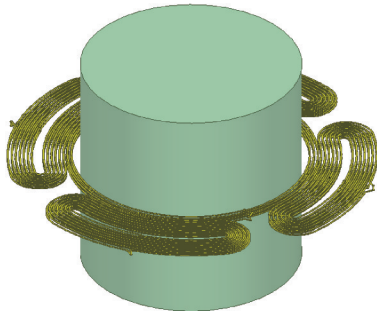


图 7 横向磁通传感器仿真模型

Fig.7 Simulation model of transverse flux sensor

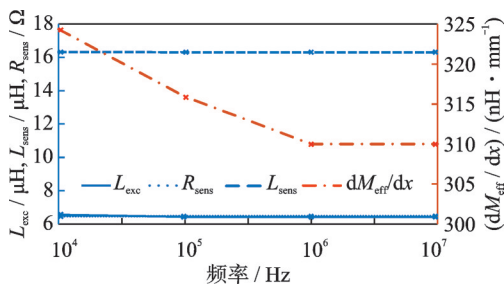
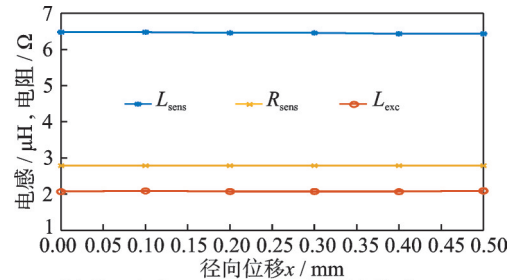


图 8  $L_{sens}$ ,  $R_{sens}$ ,  $L_{exc}$  和  $dM_{eff}/dx$  随激励线圈输入信号频率变化

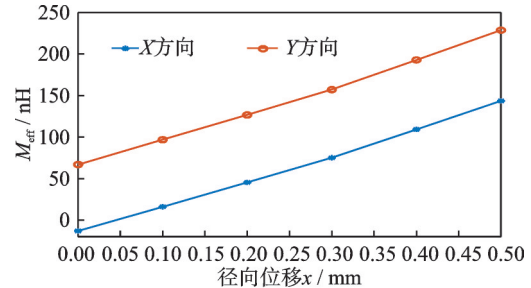
Fig.8  $L_{sens}$ ,  $R_{sens}$ ,  $L_{exc}$  and  $dM_{eff}/dx$  varying with frequency of excitation coil input signal

确定输入激励信号频率后,对线圈参数与转轴位移变化之间的关系进行探究,如图 9 所示。当转轴发生径向位移变化时,  $L_{sens}$ 、 $R_{sens}$  和  $L_{exc}$  基本保持不变,而相对一组感应线圈的互感差与径向位移变化呈线性相关,验证了式(8)中传感器的输出电压与径向位移的变化呈线性相关性。

对模型进行进一步仿真分析,得到感应线圈的输出电压与径向位移变化关系,如图 10 所示,仿真结果与实验实测结果相比,未加入放大电路,所以



(a) Correlation parameter and radial displacement



(b)  $M_{eff}$  and radial displacement

图 9 线圈参数与径向位移的相关性

Fig.9 Correlation between coil parameters and radial displacement

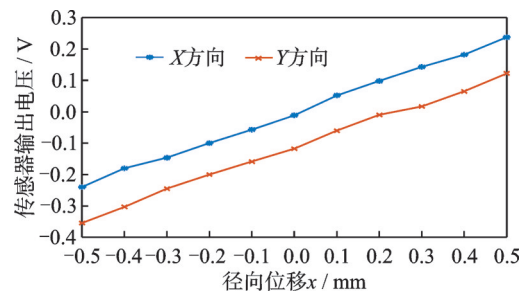


图 10 传感器输出电压与径向位移的相关性仿真结果

Fig.10 Simulation results of correlation between sensor output voltage and radial displacement

该曲线的纵坐标量程较小,且波动较为显著,但是由下文的实际结果可见,放大后的传感器灵敏度更高、线性度更好。仿真结果进一步验证了式(9):所设计的传感器不论在 X 方向上还是 Y 方向上,输出电压与转轴的位移均存在一定线性关系。

### 4 横向磁通传感器实验结果分析

#### 4.1 静态实验

图 11 为横向磁通传感器的静态实验平台,主要包含横向磁通传感器与两自由度转轴平台。横向

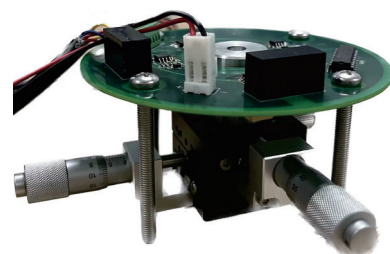


图 11 静态测试实验装置

Fig.11 Static test experimental device

磁通传感器包括激励线圈、感应线圈以及传感器电路见图12。将直径24 mm的钢制转轴固定在基于螺旋测微器的静态测量装置上,并将所设计的横向磁通传感器无接触地套在转轴上,保持Y方向上的位移不变,调节X方向上的螺旋测微器模拟转轴的位移变化,得到如图13所示的传感器输出电压随径向位移变化关系,若增加放大电路的比例系数,传感器的灵敏度可进一步放大。由仿真结果可知传感器的线性区间为±0.5 mm,进一步可知本文所设计传感器的灵敏度为7.2 V/mm,线性度为1.7%。

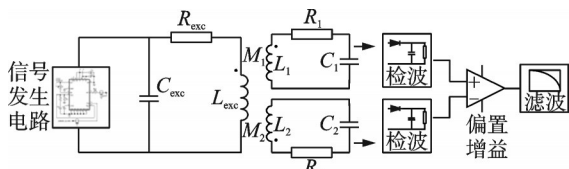


图12 传感器电路  
Fig.12 Sensor circuit

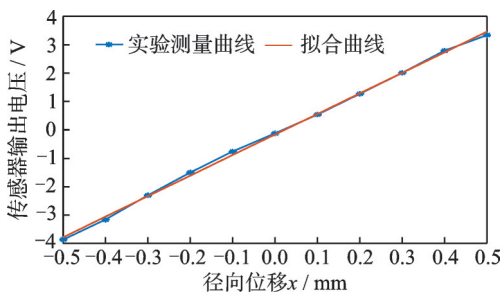


图13 传感器输出电压与径向位移的相关性

Fig.13 Correlation between output voltage and radial displacement

4.2 稳态实验

为全面检验自研传感器的各项性能指标,将该传感器应用于1台磁悬浮永磁同步电机系统中进行位移检测与悬浮控制,并与本文之前使用的货架产品的性能进行对比分析。如图14所示,将横向磁通传感器通过支架安装在磁悬浮永磁同步电机上,代替电机一端原有的货架产品进行整机实验。

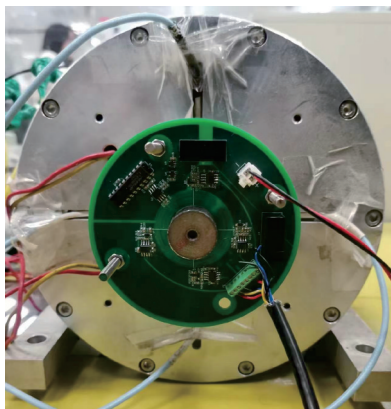
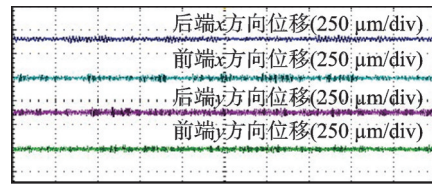


图14 整机实验示意图

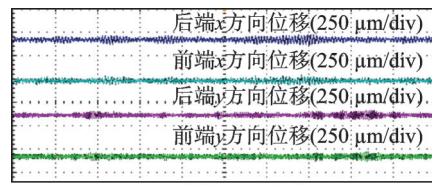
Fig.14 Diagram of complete machine test

原货架产品的安装位置在整机内部,更靠近磁轴承,自研传感器安装在整机外部的端部,距离磁轴承位置较远,二者相差50 mm。位移传感器轴向安装位置的不同会影响磁轴承的控制性能<sup>[21]</sup>。

转速上升至20 000 r/min后,系统仍保持稳定运行,货架产品与横向磁通传感器的控制效果对比如图15所示。其中,货架产品所控制的转轴径向四自由度的位移波动约为80 μm,横向磁通传感器所控制的转轴径向四自由度位移波动约为100 μm,验证了所研制的横向磁通传感器具有良好的稳态性能。



(a) Sensor products



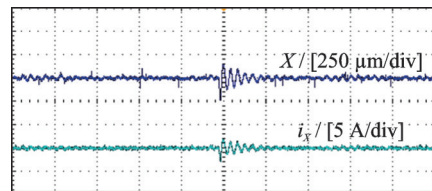
(b) Transverse flux displacement sensor

图15 20 000 r/min时径向四自由度位移波动

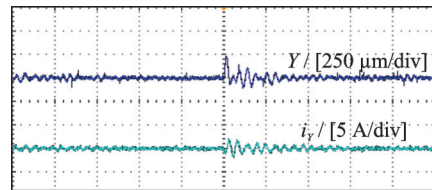
Fig.15 Radial four-degree-of-freedom displacement fluctuation at 20 000 r/min

4.3 动态实验

在磁悬浮转轴静态悬浮情况下对转轴X和Y方向分别进行敲击实验,对比货架产品与自研位移传感器的实验结果,观察前端X、Y方向上的位移波动与电流波动情况。由实验结果图16、17可知,



(a) Horizontal displacement and current



(b) Vertical displacement and current

图16 采用货架产品检测位移的磁悬浮电机敲击实验

Fig.16 Magnetic suspension motor tapping experiment detected by shelf products

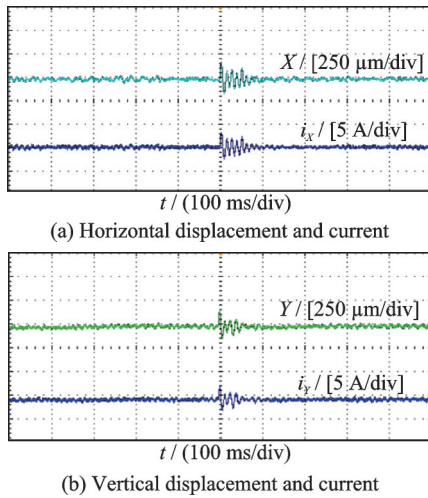


图 17 采用横向磁通传感器检测的磁悬浮电机敲击实验  
Fig.17 Magnetic suspension motor tapping experiment detected by transverse flux sensor

在受到外界扰动时,采用货架产品和横向磁通传感器进行位移检测的磁悬浮电机均可在 100 ms 内重新实现稳定悬浮。

在磁悬浮永磁同步电机升降速的过程中观察货架产品控制与横向磁通传感器控制下的转轴悬浮的稳定性,如图 18 所示。在转速从 10 000 r/min 上升至 14 000 r/min 再下降至 10 000 r/min 的过程中,采用横向磁通传感器的控制效果与货架产品相当,均可实现高速转子的稳定悬浮。

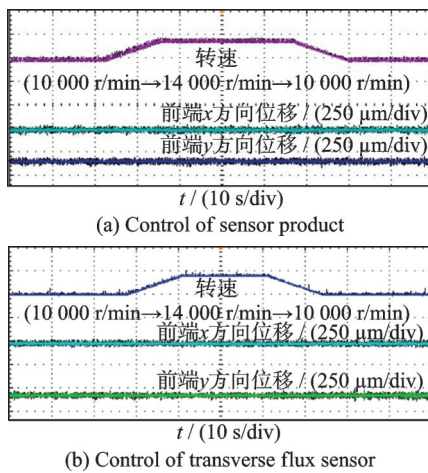


图 18 电机升降速时实验效果对比  
Fig.18 Comparison of experimental performance with motor speed up and down

综上所述,自研横向磁通传感器与货架产品的对比如表 2 所示。其中,横向磁通传感器的激励和检测电路均集成于 PCB 板上,因而其轴向安装长度略大于货架产品,但其无需占用磁轴承控制器空间,而货架产品的信号处理前置器则需占据额外的控制器空间,表 2 列出了具体的传感器整体体积数据。另外,在实验中,自研横向磁通传感器的安装位置相比于货架产品离磁轴承更远,这也是两种位

表 2 横向磁通传感器与货架产品对比

Table 2 Comparison of transverse flux sensor and shelf products

控制指标	横向磁通传感器	货架产品
控制性能		
20 000 r/min 下位移波动/ $\mu\text{m}$	100	80
径向敲击恢复稳定时间/ms	80	100
升降速位移波动/ $\mu\text{m}$	50	60
控制性能		
两自由度所需传感器成本/元	500	8 000 <sup>a</sup>
控制性能		
两自由度所需传感器轴向安装长度/mm	14	12
传感器整体体积/ $\text{cm}^3$	133	643 <sup>b</sup>

注:a:货架产品单支传感器价格 2 000 元,控制径向两自由度需要 4 支传感器。b:货架产品整体体积包括前置器和探头,前置器体积  $8\text{ cm} \times 4\text{ cm} \times 5\text{ cm} \times 4$  支,探头  $M6 \times 27\text{ mm} \times 4$  支;横向磁通传感器圆盘直径 11 cm、整体厚度 1.4 cm。

移检测方式下的转子悬浮位移有所差别的原因之一。

## 5 结 论

本文基于横向磁通传感器的原理分析,采用粒子群算法设计其线圈参数,研制了一套实验样机并进行静态参数测试,最终将其应用于一台磁悬浮永磁同步电机的位移检测和悬浮控制中:

(1) 通过粒子群算法代替多次有限元仿真,实现计算选取最优的激励线圈圈数与感应线圈圈数,简化了横向磁通传感器的设计过程,缩短了有限元仿真多次迭代的设计周期。

(2) 将横向磁通传感器应用在了磁悬浮永磁同步电机中,实现了电机 20 000 r/min 时的稳定悬浮。

(3) 通过实验测试,横向磁通传感器的灵敏度为  $7.2\text{ V/mm}$ ,线性度为 1.7%,线性范围为  $-0.5 \sim 0.5\text{ mm}$ 。

(4) 通过与货架产品的实验对比,所研制的横向磁通传感器无论在稳态还是动态运行过程中,均具有良好的控制效果,且所需成本更低、所占空间更小。

### 参考文献:

[1] 刘程子,邓智泉,梅磊,等. 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[J]. 南京航空航天大学学报,2012,44(6): 847-854.  
LIU Chengzi, DENG Zhiqian, MEI Lei, et al. Principle analysis and parameter design of hybrid axial magnetic[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2012,44(6): 847-854.

[2] 张越,周瑾,金超武,等. 机动飞行下载磁悬浮转子振动响应[J]. 航空发动机,2022,48(4): 6-12.  
ZHANG Yue, ZHOU Jin, JIN Chaowu, et al. Vibration response of airborne maglev rotor under maneuvering flight[J]. Aeroengine, 2022, 48(4): 6-12.

[3] 陶加杨. 磁悬浮轴承电容式位移传感器研究[D]. 南

- 京:南京航空航天大学,2023.
- TAO Jiayang. Research on capacitive displacement sensor of magnetic suspension bearing[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2023.
- [4] SUN M, ZHOU J, DONG B, et al. Driver circuit improvement of eddy current sensor in displacement measurement of high-speed rotor[J]. IEEE Sensors Journal, 2021, 21(6): 7776-7783.
- [5] 汤恩琼, 房建成, 郑世强. 磁悬浮电动机柔性转子振动控制与试验研究[J]. 机械工程学报, 2015, 51(1): 106-116.
- TANG Enqiong, FANG Jiancheng, ZHENG Shiqiang. Vibration control and experimental study of flexible rotor of magnetic suspension motor[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(1): 106-116.
- [6] 李翁衡, 祝长生. 主动电磁轴承-柔性转子系统的不同位效应[J]. 振动工程学报, 2023, 36(5): 1179-1190.
- LI Wengheng, ZHU Changsheng. Non-collocated effect on active magnetic bearing-flexible rotor systems [J]. Journal of Vibration Engineering, 2023, 36(5): 1179-1190.
- [7] BUEHLER P. Device for contact-less measurement of distances in multiple directions [EB/OL]. (2004-05-26) [2018-04-25]. <http://www.google.com/patents/WO2004048883A1>.
- [8] LARSONNEUR R, BUHLER P. New radial sensor for active magnetic bearings[C]//Proceedings of the 9th International Symposium on Magnetic Bearings. Lexington, Kentucky, USA: Linz Center of Mechatronics GmbH, 2004.
- [9] BURDET L. Active magnetic bearing design and characterization for high temperature applications[D]. Lausanne: EPFL, 2006.
- [10] MUSING A, ZINGERLI C, IMOBERDORF P, et al. PEEC-based numerical optimization of compact radial position sensors for active magnetic bearings[C]//Proceedings of the 5th International Conference on Integrated Power Electronics Systems. Nuremberg, Germany: VDE, 2008: 1-5.
- [11] 薛莲晓. 磁悬浮轴承测控系统研究[D]. 北京:清华大学, 2018.
- XUE Lianxiao. Research on measurement and control system of active magnetic bearings[D]. Beijing: Tsinghua University, 2018.
- [12] 金超武, 叶周铖, 周瑾, 等. 磁悬浮轴承横向磁通传感器设计与分析[J]. 仪器仪表学报, 2023, 44(9): 228-238.
- JIN Chaowu, YE Zhoucheng, ZHOU Jin, et al. Design and analysis of transverse magnetic flux sensor for magnetic suspension bearing[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2023, 44(9): 228-238.
- [13] 薛莲晓, 张凯, 徐旻, 等. 横向磁通径向位移传感器研究[J]. 仪器仪表学报, 2017, 38(5): 1249-1256.
- XUE Lianxiao, ZHANG Kai, XU Yang, et al. Research on transverse flux radial displacement sensor [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(5): 1249-1256.
- [14] SINGH K, NEMA S, PADHY P K. Modified PSO based PID sliding mode control for inverted pendulum system[C]//Proceedings of International Conference on Control, Instrumentation, Communication and Computational Technologies. [S.l.]: IEEE, 2014.
- [15] 吴建辉, 章兢, 刘朝华. 基于改进粒子群优化算法的离散混沌系统神经滑模控制[J]. 控制与决策, 2013(7): 1094-1098.
- WU Jianhui, ZHANG Jin, LIU Zhaohua. Neural network sliding mode control based on improved particle swarm optimization algorithm for discrete-time chaotic systems[J]. Control and Decision, 2013(7): 1094-1098.
- [16] 张凯, 宋锦春, 李松. 基于分类学习粒子群优化算法的液压矫直机控制[J]. 机械工程学报, 2017(18): 216-222.
- ZHANG Kai, SONG Jinchun, LI Song. Hydraulic straightener control optimizer based on particle swarm with classification learning [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017(18): 216-222.
- [17] 王玲, 李俐, 朱翔鸥, 等. 基于粒子群算法的强迫风冷散热器多目标优化[J]. 电气技术, 2022, 23(2): 20-25.
- WANG Ling, LI Li, ZHU Xiangou, et al. Multi-objective optimization of forced air-cooled heatsink based on particle swarm optimization algorithm[J]. Electrical Engineering, 2022, 23(2): 20-25.
- [18] 管先翠. 基于粒子群优化算法的无刷直流电机控制策略研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2017.
- GUAN Xiancui. Research on control strategies of brushless DC motor based on particle swarm optimization[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2017.
- [19] 熊永前, 马志云, 李朗如, 等. 主动补偿脉冲发电机负载绕组主电感系数的计算[J]. 华中理工大学学报, 1995(10): 40-44.
- XIONG Yongqian, MA Zhiyun, LI Langru, et al. Calculation of the inductance coefficient of load-winding in an actively compensated pulse alternator[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology, 1995(10): 40-44.
- [20] 南和礼. 相似绕组的电感比例关系[J]. 电工技术学报, 2000(3): 11-15.
- Nan Heli. The inductance rules of similar coils[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2000(3): 11-15.
- [21] 金超武, 徐龙祥. 磁悬浮轴承用位移传感器测量误差[J]. 南京航空航天大学学报, 2009, 41(5): 626-632.
- JIN Chaowu, XU Longxiang. Measurement error of displacement sensors for active magnetic bearings[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2009, 41(5): 626-632.