

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2311589

磁悬浮轴承横向磁通传感器设计与分析*

金超武, 叶周铨, 周瑾, 徐园平

(南京航空航天大学机电学院 南京 210016)

摘要: 横向磁通传感器因结构紧凑和高检测精度在磁悬浮轴承系统中具有广阔的应用前景。随磁悬浮轴承技术的发展,对横向磁通传感器的检测性能提出了更高要求。为进一步提升横向磁通传感器的性能,满足磁悬浮转子高精度位移监测需求,本文针对灵敏度指标对传感器进行设计与分析。通过建立传感器的数学模型和电磁场有限元分析,研究了激励频率和线圈参数之间的关系。对传感器线圈匝数与灵敏度的相关性进行了数值研究,从检测转子的角度分析了趋肤效应对传感器灵敏度的影响。设计了传感器信号处理电路实现由位移信号到电压信号的转换,并搭建实验平台对传感器的输出特性进行测量。实验结果表明,当灵敏度为 $20 \text{ mV}/\mu\text{m}$ 、检测范围为 $\pm 500 \mu\text{m}$ 时,传感器的线性度为 0.69% ,且具有良好的动态特性,适用于磁悬浮轴承系统的转子高精度径向位置检测。

关键词: 横向磁通传感器;磁悬浮轴承系统;灵敏度;激励频率

中图分类号: TP212 TH822 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.4020

Design and analysis of the transverse flux sensor of active magnetic bearing

Jin Chaowu, Ye Zhouqian, Zhou Jin, Xu Yuanping

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: The transverse flux sensor is widely used in the magnetic bearing system due to its compact structure and high detection accuracy. With the development of magnetic bearing technology, higher requirements are put forward for the detection performance of the transverse flux sensor. To further improve the performance of the transverse flux sensor and meet the high-precision displacement monitoring requirements of the magnetic suspension rotor, this article designs and analyzes the sensor for the sensitivity index. By formulating the mathematical model of the sensor and the finite element analysis of the electromagnetic field, the relationship between the excitation frequency and the coil parameters is studied. The correlation between the number of turns of the sensor coil and the sensitivity is numerically studied. The influence of the skin effect on the sensitivity of the sensor is analyzed from the perspective of detecting the rotor. The sensor signal processing circuit is designed to realize the conversion from displacement signal to voltage signal, and an experimental platform is established to measure the output characteristics of the sensor. The experimental results show that when the sensitivity of the sensor is $20 \text{ mV}/\mu\text{m}$, the detection range is $\pm 500 \mu\text{m}$, and the linearity is 0.69% . It has good dynamic characteristics, which is suitable for high-precision radial position detection of the rotor of the magnetic bearing system.

Keywords: transverse flux sensor; active magnetic bearing system; sensitivity; excitation frequency

0 引言

主动磁悬浮轴承 (active magnetic bearing, AMB) 相较于机械轴承无接触摩擦,具有长寿命、高旋转速度、低功耗和主动控制等优点,其在高速旋转机械领域得到广

泛的应用^[1]。

位移传感器作为磁悬浮轴承的关键部件之一,用以检测转子在径向和轴向的位移,将转子位置反馈至控制器中与参考信号进行比较。控制器根据检测信号对功率放大器输出的电流信号进行调节,从而改变对转子的吸力,使转子在期望位置附近达到稳定悬浮^[2-3]。为提高转

收稿日期:2023-06-24 Received Date: 2023-06-24

* 基金项目:航空发动机及燃气轮机基础科学中心项目(P2022-B-III-004-001)、国家自然科学基金面上项目(51875275,52275059)资助

子的旋转速度,提高控制的精度与准确性,需要更精准的位移检测技术^[4]。

在磁悬浮轴承系统中,典型的位移传感器包括电涡流式、电感式以及电容式传感器。其中,电涡流传感器凭借其分辨率高、可靠性强的特点得到广泛应用^[5-7]。但在许多主动磁悬浮轴承的应用中,往往需要以较短的转子长度来处理高转速下的灵活转子特性,传统的磁悬浮轴承位移传感器难以满足更高的空间需求。而横向磁通传感器的出现,能够大大降低传感器的占用空间,降低位移传感器的装配难度。横向磁通传感器能够减小磁悬浮轴承系统中检测单元和执行单元的距离,同时缩短主动磁悬浮转子的轴向长度,从而提高对转子的控制能力,所以横向磁通传感器在小型磁悬浮轴承系统中的应用更具优势。横向磁通传感器高检测精度、低耦合度等优点,使其在磁悬浮轴承转子位移检测领域具有广阔的研究前景。

随着电涡流传感器技术的发展,Bühler^[8]首次提出基于印制电路板(printed circuit board, PCB)的新型电涡流式位移传感器。通过将 4 个传感器探头线圈印制在同一块电路板上,大大降低了传感器的占用空间,能够实现转子位置的精准测量,并且保持良好的检测带宽和分辨率。为解决高温环境的影响,Burdet 等^[9-10]采用厚膜技术制作出高温横向磁通传感器。研究表明,横向磁通传感器具有非常理想的热稳定性,更容易进行温度补偿。为深入研究传感器探头结构与传感器输出性能的内在关系,Müsing 等^[11]采用等效电路法对横向磁通传感器进行建模,并验证了模型的准确性,提出激励频率对横向磁通传感器的重要性。研究内容是对探头线圈不同布局方法之间的比较,却缺少了规律性的分析。为降低引线长度对传感器的影响,Zingerli 等^[12]开始将信号处理电路集成到探头 PCB 上,并将此类传感器命名为横向磁通传感器。

为进一步提升横向磁通传感器的输出性能,Niemann^[13]、Cao 等^[14]对传感器的电路进行了系统性的研究。通过对激励驱动电路、信号调节电路以及数字处理电路进行改进以提高传感器的性能。电路的改进固然重要,但传感器性能的提升更依赖于传感器检测探头的优化。为此,Grobler 等^[15]使用二维有限元仿真模型对传感器检测转子材料和横向磁通传感器线圈层数进行了研究,结果表明采用两层线圈即可使传感器具有良好的灵敏度和线性度。为进一步研究传感器灵敏度的影响因素,薛莲晓等人采用三维有限元仿真模型对磁通传感器进行设计,对传感器探头参数的影响规律进行分析^[16-17]。然而其对线圈匝数变化的分析不够全面,转子材料对传感器灵敏度的影响有待进一步研究。

综上所述,国内外学者对横向磁通传感器的研究已具备一定的研究基础,但对横向磁通传感器探头结构设

计的研究并不全面,并且转子材料及结构对横向磁通传感器性能的影响规律并不明确。因此,本文基于横向磁通传感器灵敏度指标对横向磁通传感器的设计展开了研究,从理论建模、仿真验证以及实验测试对传感器进行分析。首先,介绍了横向磁通传感器工作原理并建立了传感器灵敏度数学模型,从理论上分析传感器灵敏度的影响因素。其次,基于 ANSYS Electronics 构建横向磁通传感器三维模型,分析了激励频率和线圈参数之间的相关性。对不同匝数线圈导致的灵敏度变化进行研究,并进一步分析了检测转子材料及其结构尺寸对传感器灵敏度的影响。最后,搭建了横向磁通传感器电路,通过实验测试对传感器静态、动态性能进行分析。

1 横向磁通传感器工作原理

横向磁通传感器是一种基于电涡流效应的位移传感器。结构如图 1 所示,主要由 PCB 探头和检测转子组成。PCB 探头包括激励线圈和感应线圈,4 个感应线圈均匀分布在激励线圈外部。在高频的激励电流驱动下,励磁线圈产生同心的磁场,磁场穿过感应线圈使其产生感应电动势。检测转子材料为导电金属。当检测转子处在由通有高频电流的线圈所产生的交变磁场中时,金属导体内部将产生涡电流,产生一个与交变磁场方向相反的涡流磁场来阻碍原磁通的变化,从而降低感应线圈的输出电压。

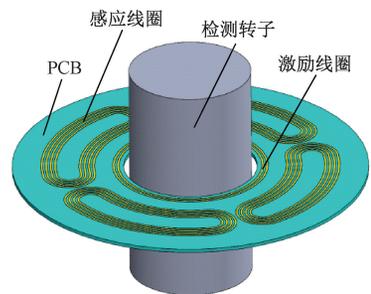


图 1 横向磁通传感器示意图

Fig. 1 Diagram of the transverse flux sensor

横向磁通传感器的位置检测原理如图 2 所示。当金属转子位于检测探头中心位置时,如图 2(a)所示,转子表面的涡电流产生的磁场相对探头中心位置对称,因此两个感应线圈中产生的感应电压相等。如图 2(b)所示,当金属转子发生移动时,转子表面涡流产生的磁场发生移动,相对的感应线圈中磁场分布不对称,从而使两感应线圈中输出的电压发生改变。因此,通过检测相对的两个感应线圈中的输出电压变化,能够反映转子的位移变化,通过信号处理后的电压信号能够准确得到转子的位置信息。

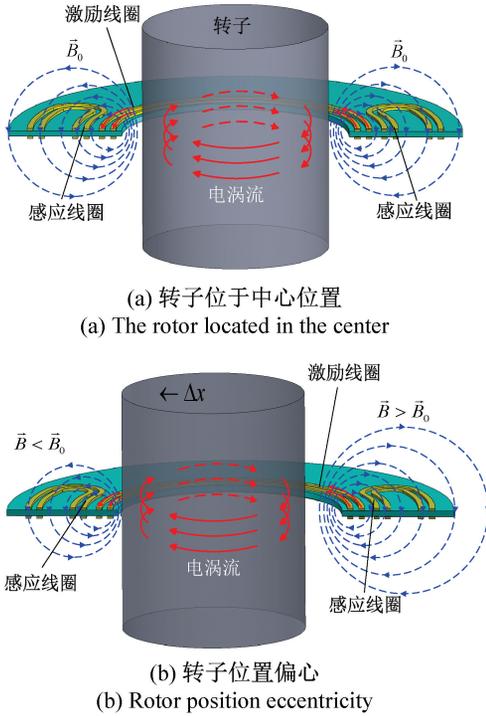


图2 横向磁通传感器位置检测原理

Fig. 2 Position detection principle of the transverse flux sensor

横向磁通传感器的等效电路如图3所示^[12]。图中 U_{exc} 、 L_{exc} 、 R_{exc} 、 C_{exc} 分别为激励线圈的激励电压、等效电感、等效电阻、谐振电容。 L_1 、 R_1 、 C_1 、 M_1 分别为感应线圈的等效电感、等效电阻、谐振电容、与激励线圈间的互感， L_2 、 R_2 、 C_2 、 M_2 分别为另一个感应线圈的等效电感、等效电阻、谐振电容、与激励线圈间的互感， U_{sens} 为传感器的输出电压。

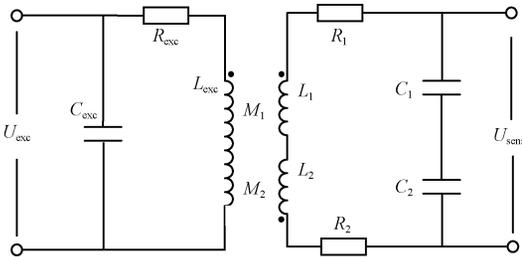


图3 横向磁通传感器等效电路

Fig. 3 Diagram of transverse flux sensor equivalent circuit

定义感应部分的等效电感、等效电阻、谐振电容以及相对感应线圈之间的互感差分别为 L_{sens} 、 R_{sens} 、 C_{sens} 和 M_{eff} 。则有：

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

根据基尔霍夫电压定律,由图3所示的电路模型可得:

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

式中: I_{exc} 为激励线圈中通过的激励电流, ω 为激励线圈中通过电流的角频率, I_{sens} 为感应线圈中通过的感应电流。通过式(2)可以计算出感应线圈的电流:

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

则感应线圈电路的输出电压可以通过感应电流求出,即谐振电容两端的电压 U_{sens} 为:

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

电路的谐振状态极大地影响着传感器的输出性能,当传感器实际的工作频率不在感应线圈谐振点时,会减小感应线圈产生的感应电压,导致横向磁通传感器的灵敏度降低。因此,实际工作时需调整谐振电容 C_{sens} 使感应线圈电路的谐振频率与激励信号的频率 f 一致,感应线圈此时处于串联谐振状态,横向磁通传感器工作在最佳状态。存在电路谐振频率公式:

$$f = \frac{1}{2\pi \sqrt{LC}} \quad (5)$$

其中, L 为线圈电感, C 为谐振电容。当电路发生谐振时,角频率与电路参数的关系可表示为:

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{L_{sens} C_{sens}}} \quad (6)$$

将式(6)代入式(4)有:

$$U_{sens} = \frac{M_{eff} I_{exc}}{R_{sens} C_{sens}} = \omega^2 \frac{M_{eff} I_{exc} L_{sens}}{R_{sens}} \quad (7)$$

式(7)即为恒流源驱动时横向磁通传感器的输出电压公式。在恒流源驱动下,线圈电阻值的变化不会造成传感器灵敏度的变化^[10]。考虑到常温下线圈电阻值几乎不变,本文采用更易搭建的恒压源电路对传感器进行驱动,故需推导恒压源驱动下的传感器输出电压公式。

调整谐振电容 C_{exc} 使激励线圈达到谐振状态,此时有

$$Z_{exc} = \frac{4\pi^2 f^2 L_{exc}^2}{R_{exc}} \quad (8)$$

$$Q_{exc} = \frac{2\pi f L_{exc}}{R_{exc}} \quad (9)$$

其中, Z_{exc} 为激励电路谐振时的等效阻抗, Q_{exc} 为其品质因数。此时,可求得激励线圈中的激励电流为:

$$I_{exc} = \frac{U_{exc}}{Z_{exc}} \cdot Q_{exc} = \frac{U_{exc}}{\omega L_{exc}} \quad (10)$$

将式(10)代入式(7),有:

$$U_{sens} = \omega U_{exc} \frac{M_{eff} L_{sens}}{L_{exc} R_{sens}} \quad (11)$$

定义磁通传感器的灵敏度 S 为输出电压随金属转子的位移变化,则有:

$$S = \frac{dU_{sens}}{dx} \quad (12)$$

忽略传感器等效电阻、电感的影响,则:

$$S = \omega U_{exc} \cdot \frac{L_{sens}}{L_{exc} R_{sens}} \cdot \frac{dM_{eff}}{dx} \quad (13)$$

由式(13)可知影响横向磁通传感器灵敏度的因素,其中激励信号的频率 ω 、电压 U_{exc} 与外部所施加的激励源有关, L_{sens} 、 R_{sens} 、 L_{exc} 、 dM_{eff}/dx 与传感器探头的结构有关。本文通过研究以上因素与横向磁通传感器灵敏度的内在关系,对传感器探头进行设计分析。

2 横向磁通传感器仿真分析

2.1 线圈参数影响规律分析

由磁通传感器的灵敏度式(13)可知,横向磁通传感器的激励频率不仅直接影响传感器的灵敏度,而且,线圈的等效电感、等效电阻等传感器探头的结构参数也受激励频率的影响而发生变化。故而在横向磁通传感器的结构设计前需对传感器的激励频率进行分析,获得最适合的激励频率范围。

横向磁通传感器仿真模型如图 4 所示,转子位于激励线圈中心,感应线圈四周对称分布,仿真结构参数如表 1 所示。在激励线圈中设定不同频率的激励信号,仿真得到探头线圈等效电阻、电感、互感差变化率随激励频率的变化规律。

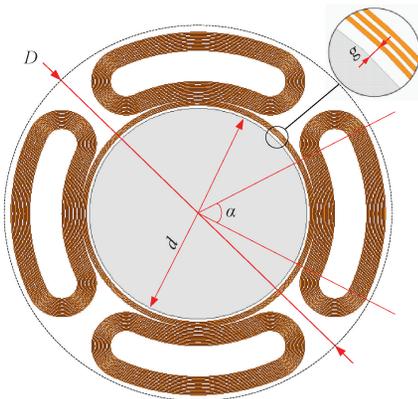


图 4 横向磁通传感器仿真模型

Fig. 4 Transverse flux sensor simulation model

线圈参数与激励频率的相关性如图 5 所示。随着通入激励线圈信号频率的升高, R_{sens} 一开始基本保持不变,

表 1 横向磁通传感器仿真结构参数

Table 1 Simulation structure parameters of the transverse flux sensor

参数	数值
传感器外径 D/mm	119
转子外径 d/mm	56.4
感应线圈夹角 $\alpha/(\text{°})$	50
传感器检测间隙 g/mm	1

在激励频率达到 MHz 级别之后, R_{sens} 随着激励频率的升高而增大,如图 5(a)所示。线圈通过交流电流时,由于趋肤效应的存在,导致线圈导体内电流密度由外向内从最大连续变化到最小。电流密度在其横截面上的不均匀分布使导体的等效截面积减小,导体的有效电阻增加,且频率越高,趋肤效应越显著^[18]。 R_{sens} 的增大会导致传感器灵敏度降低,因此激励频率不能无限增大。

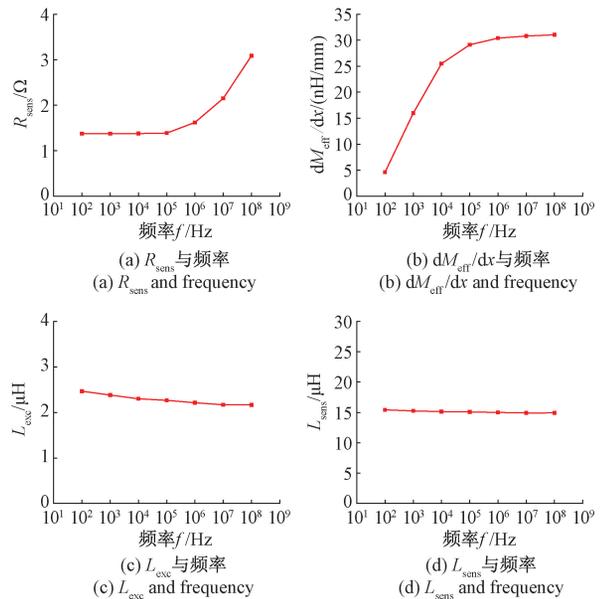


图 5 线圈参数与激励频率的相关性

Fig. 5 Correlation between coil parameters and excitation frequency

如图 5(b)所示,随着激励频率的升高,横向磁通传感器的互感差随中心转子位移的变化率 dM_{eff}/dx 先增大而后逐渐趋于饱和。位于磁通传感器中间的金属转子内部产生的涡电流随着激励频率的升高导致产生更大的涡流场来阻碍原来激励线圈在感应线圈内部产生的磁通变化,转子位置对传感器的影响加剧,使横向磁通传感器线圈之间的互感差变化率 dM_{eff}/dx 变大。但金属转子产生的涡流场在激励频率达到一定程度之后逐渐趋于饱和,其对感应线圈的影响也逐渐稳定,所以最终 dM_{eff}/dx 达到饱和。

如图5(c)、(d)所示,传感器线圈的电感 L_{exc} 和 L_{sens} 随激励频率的升高而略有降低。但电感值随频率改变的变化量较小,对传感器灵敏度的影响权重低,所以忽略其随频率的变化。

将探头部分的灵敏度与整体灵敏度和激励频率的内关系进行分析,定义横向磁通传感器探头部分的灵敏度为 s ,则:

$$s = \frac{L_{sens}}{L_{exc} R_{sens}} \cdot \frac{dM_{eff}}{dx} \quad (14)$$

激励频率与传感器灵敏度的相关性如图6所示。对于传感器探头部分而言,当激励频率为100 kHz时,探头部分的灵敏度 s 最好,频率太高或太低都会使传感器探头结构参数部分对灵敏度的影响降低,如图6(a)所示。但从式(13)可知,激励频率不仅影响着探头线圈的参数,同时也直接造成传感器的灵敏度发生变化。激励频率越高,传感器灵敏度越高。如图6(b)所示,传感器总灵敏度 S 在低频时几乎为0,而后随着频率的持续升高而增大,最后逐渐趋于饱和。综合考虑激励频率对探头灵敏度 s 和总灵敏度 S 的影响,取激励频率的范围为1~10 MHz。

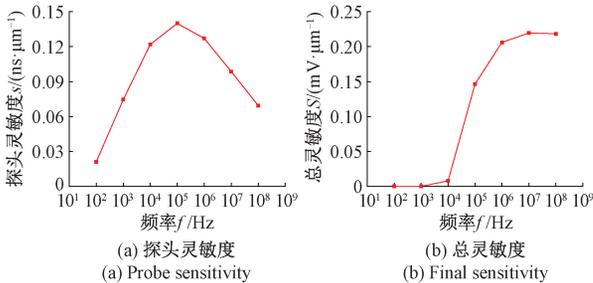


图6 激励频率与传感器灵敏度的相关性

Fig. 6 Correlation between excitation frequency and sensor sensitivity

转子位移 x 在0~500 μm 的范围内变化时,线圈参数与转子位移的相关性如图7所示。影响传感器灵敏度的参数中, L_{sens} 、 L_{exc} 、 R_{sens} 几乎不随转子位置的变化而发生变化。相对的两个感应线圈的互感差 M_{eff} 与金属转子位移 x 之间呈现良好的线性关系,是传感器在其检测区间内具有良好线性度的基本保证。进一步验证了传感器灵敏度公式的有效性,同时也保证了横向磁通传感器能够具备较好的静态性能。

2.2 探头线圈匝数的优化

当线圈层数为1层,感应线圈匝数为1匝时,分析不同激励线圈匝数对传感器灵敏度产生的影响。

传感器的激励线圈匝数增加1倍,理论上其自感和互感值将分别变为原来的4倍。但在横向磁通传感器的实际应用中,由于线圈之间存在一定的距离,新增加的激

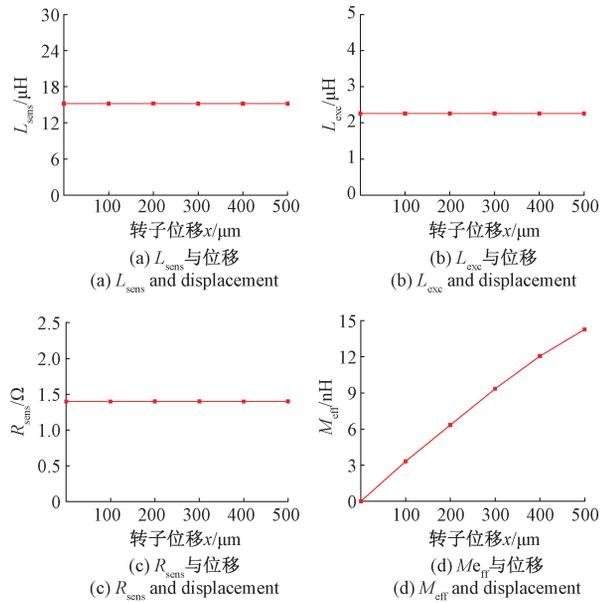


图7 线圈参数与转子位移的相关性

Fig. 7 Correlation between coil parameters and rotor displacement

励线圈与感应线圈间的互感值并不相同,所以互感值达不到理论上的倍数。此外,随着激励线圈匝数的增加,感应线圈不断向PCB板的外围移动,感应线圈与金属转子的距离变远,转子内部产生的涡流效应对感应线圈中磁通影响减弱,从而使传感器的灵敏度下降。

如图8所示,激励线圈匝数与传感器灵敏度的关系呈现出负相关的关系,随着匝数的增多,传感器的灵敏度下降。当激励线圈的匝数为1时,传感器的灵敏度最高。但此时的电流会导致探头线圈发热较严重,降低传感器的稳定性。根据线圈横截面积和通过电流的关系可知,当线圈宽度为254 μm ,高度为105 μm 时,通过的电流不大于0.5 A。并且为方便后期电路的设计,激励线圈谐振时一般要求激励线圈在谐振时的等效阻抗大于500 Ω ,所以最终选取的激励线圈匝数为3匝。

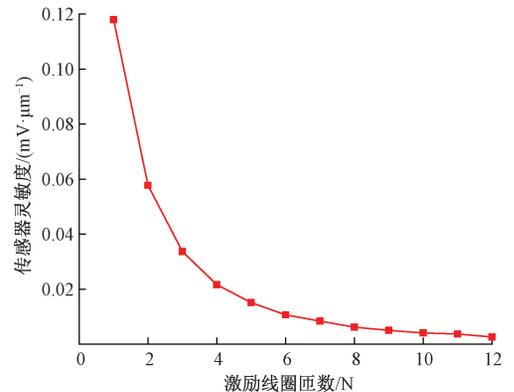


图8 激励线圈匝数与灵敏度的关系

Fig. 8 Relationship between turns of excitation coil and sensitivity

将激励线圈固定为 3 匝,通过改变感应线圈的匝数,分析不同感应线圈匝数对传感器灵敏度产生的影响。理论上,感应线圈的等效电感 L_{sens} 随线圈匝数的增多而增大,而且激励线圈与感应线圈的互感 M_{eff} 也随之增大。但线圈匝数增多的同时,感应线圈的等效电阻不可避免地增大。从传感器灵敏度公式(式(13))可知,参数 L_{sens} 和 M_{eff} 的增大能够提升传感器的灵敏度,而感应线圈的等效电阻增大使灵敏度降低,所以需要借助有限元仿真来分析感应线圈匝数与传感器灵敏度的影响规律。

灵敏度与感应线圈匝数的关系如图 9 所示,随着感应线圈匝数的增多,灵敏度会随之提高。但随着感应线圈匝数的越多,增加的感应线圈离激励线圈越远,所以其对传感器灵敏度的贡献越低,导致灵敏度随感应线圈匝数的增多而逐渐趋于一个恒定值。

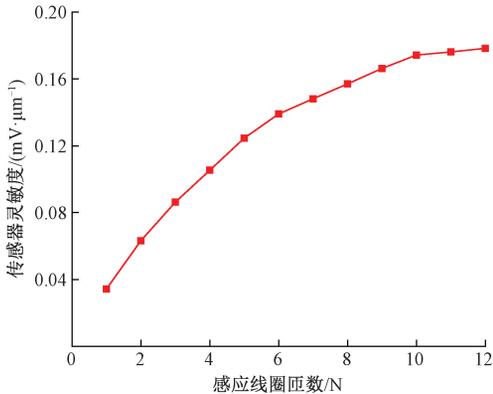


图 9 感应线圈匝数与灵敏度的关系

Fig. 9 Relationship between turns of induction coil and sensitivity

2.3 转子材料对传感器性能的影响

被测转子内部产生涡流场的强度影响传感器的输出性能,材料的电导率越高,转子内部产生的涡流场更强,传感器输出的灵敏度也就越高。而对于材料的磁导率来说,当被测导体为导磁材料时,由于磁效应的存在,反作用于转子内的涡流效应,从而对传感器产生影响。

如图 10 所示,为不导磁转子材料对传感器的影响。由结果可知,对于铜、铝、不锈钢这些不导磁材料来说,材料电导率越高,其涡流效应越明显,转子材料位置的变化对传感器影响更大,导致传感器感应线圈上的输出更小,传感器的灵敏度更高。

磁导率对灵敏度的影响如图 11 所示,当转子材料电导率确定时,必然存在一个临界相对磁导率(其数值必定大于 1)。当转子相对磁导率小于这个临界值时,转子内部的涡流效应大于磁效应,转子的存在会导致穿过感应线圈的磁通减少,故而使感应线圈感生出的电压减小。

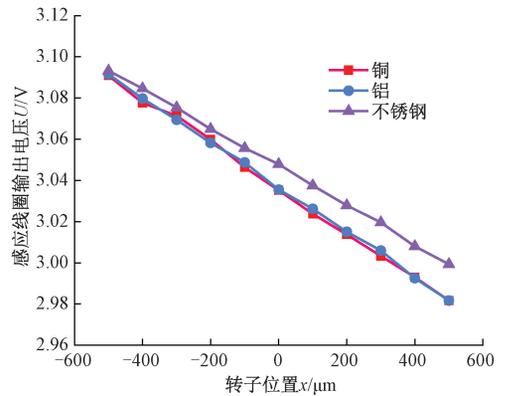


图 10 不导磁转子材料对传感器的影响

Fig. 10 Influence of non-magnetic rotor material on the sensor

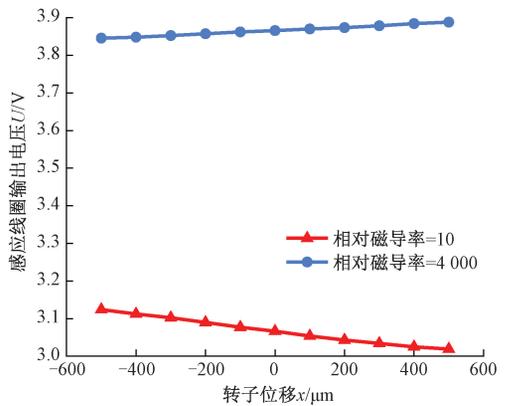


图 11 磁导率对灵敏度的影响

Fig. 11 Influence of permeability on sensitivity

当转子相对磁导率大于这个临界值时,由于转子磁性能,使靠近转子一端的感应线圈内穿过的磁通增大,导致感应电压升高。

因此,为提高转子涡流效应对传感器的影响,传感器的检测宜采用高电导率、低磁导率的材料。

2.4 检测面尺寸对传感器性能的影响

磁悬浮轴承转子组件如图 12 所示,转子结构通常由执行单元与传感器检测单元组成,传感器检测圆环与转子芯轴之间过盈装配。横向磁通传感器能够减小传感器检测单元与执行单元之间的距离,减小转子悬浮控制时由于位移传感器与执行器不在同一平面时产生的误差。同时缩短转子的轴向长度,从而提高转子模态频率,使转子一阶弯曲模态频率进一步远离转子额定工作频率,提高磁悬浮轴承转子的可控性。

通过研究横向磁通传感器工作时转子内部涡流场的分布,分析转子结构对传感器灵敏度的影响规律,才能对磁悬浮轴承转子组件进行更合理的设计,以达到缩短磁悬浮轴承转子轴向长度的目标。

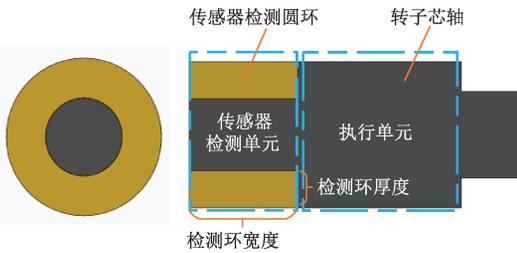


图 12 磁悬浮轴承转子组件示意图

Fig. 12 Diagram of magnetic bearing rotor assembly

由图 13、14 的涡流场分布云图可知,转子上的涡电流主要分布在传感器板两侧 2.5 mm 的位置,且集中在转子表面。所以传感器检测环的宽度与厚度大于以上范围时,传感器的输出灵敏度能保持良好的性能。转子检测环宽度对灵敏度的影响如图 15 所示,当检测环宽度大于 6 mm 时,传感器的灵敏度性能几乎不再提升。考虑到横向磁通传感器在安装过程产生的误差,传感器与检测环不位于同一平面,因此在设计磁悬浮轴承转子结构时,传感器检测环的轴向长度应大于 6 mm 以减小安装误差带来的影响。

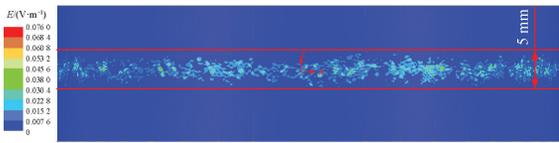


图 13 转子圆柱面上电场强度分布

Fig. 13 Electric field intensity distribution on the cylindrical surface of the rotor

涡电流集中在转子表面



图 14 转子横截面处电场强度分布

Fig. 14 Electric field intensity distribution at rotor cross section

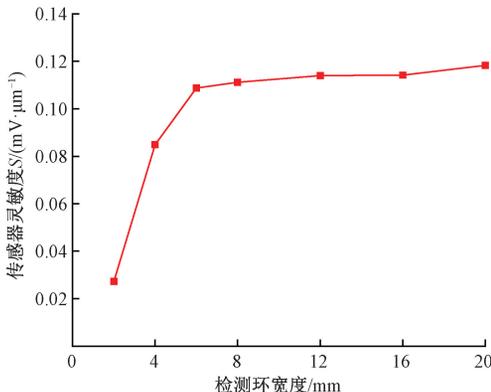


图 15 转子检测环宽度对灵敏度的影响

Fig. 15 Influence of rotor detection ring width on sensitivity

探头线圈中的交变电流会在被测材料中感生出同频交变电涡流。被测材料中的电涡流幅值与相位在径向和轴向上都为连续变化。电涡流密度从测量材料表面向内部逐渐衰减,有效分布深度可以近似为 5 倍集肤深度^[19]。涡流半径越大,涡流与线圈所耦合的磁通量就越多,对传感器性能影响越大。转子的趋肤深度 δ 的定义为:

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{\pi f \sigma \mu}} \quad (15)$$

其中 f 为激励频率, σ 为磁导率, μ 是电导率。当激励频率为 4 MHz 时,铝转子的趋肤深度 $\delta = 42.5 \times 10^{-6}$ m。

当被测物厚度大于 5 倍趋肤深度,即 212 μm 时,厚度变化对传感器输出的灵敏度影响很小。转子检测环厚度对灵敏度的影响如图 16 所示,转子检测环的厚度在 0~500 μm 之间时,传感器的灵敏度变化比较大,随着转子检测环的厚度继续增大,传感器的灵敏度几乎不再发生变化。

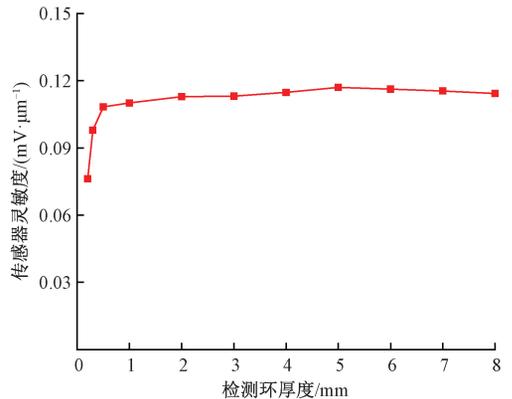


图 16 转子检测环厚度对灵敏度的影响

Fig. 16 The influence of rotor detection ring thickness on sensitivity

3 实验性能分析

为测试横向磁通传感器的性能,对传感器信号调节电路进行搭建,电路示意图如图 17 所示。在激励线圈上施加正弦激励,感应线圈能够产生感应电压信号。通过检测激励信号作用下线圈的电感值,对线圈谐振电容进行调整,使电路达到谐振状态。将感应电压信号输送至信号调节电路,经过检波、差分、滤波处理后缩放至合适的信号范围,最终将满足要求的位移信号输出到磁悬浮轴承控制器中。

3.1 传感器静态性能

横向磁通传感器静态测试平台如图 18 所示,主要结构包括横向磁通传感器、两自由度静态标定平台、开关电源、传感器信号调节电路板、示波器。

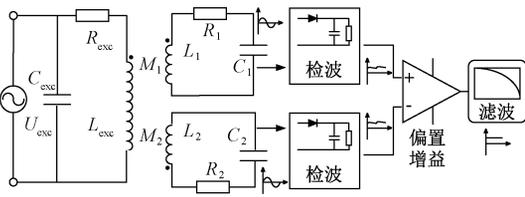


图 17 信号调节电路示意图

Fig. 17 Diagram of signal adjustment circuit

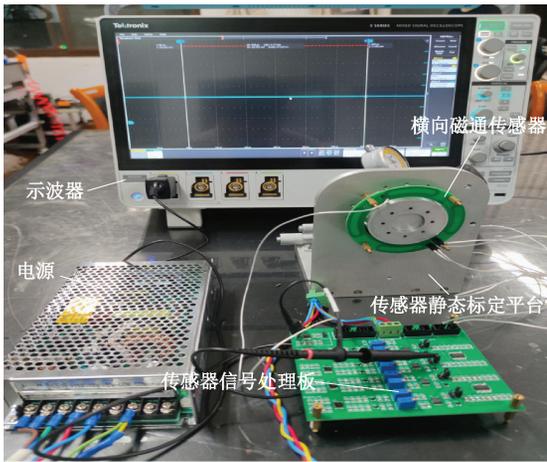


图 18 静态性能测试平台

Fig. 18 Static performance test platform

根据线圈匝数与传感器灵敏度的仿真规律,对传感器探头线圈的匝数进行优化设计,并与研究初期制作的传感器探头进行性能对比,优化结果如表 2 所示。

表 2 横向磁通传感器优化结果

Table 2 Optimization results of the transverse flux sensor

参数	优化前	优化后
单层激励线圈匝数 N_1	2	3
单层感应线圈匝数 N_2	5	10
线圈层数	2	2
转子检测环厚度/mm	10	10

分析单侧感应线圈输出电压值随转子位移的变化幅度是比较横向磁通传感器输出性能最直观的方式,所以对优化前后感应线圈输出电压的结果进行对比,结果如图 19 所示。在相同激励作用下,优化后的感应线圈输出电压大于优化前的输出值。在传感器检测范围内,优化后感应线圈的输出电压随转子位移的变化更大,其输出灵敏度具有明显的提升。

通过传感器信号调节电路改变增益大小使其灵敏度达到 $20 \text{ mV}/\mu\text{m}$,对传感器输出信号与位移的相关性进行分析。如图 20 所示为传感器沿 x 方向移动时传感器的

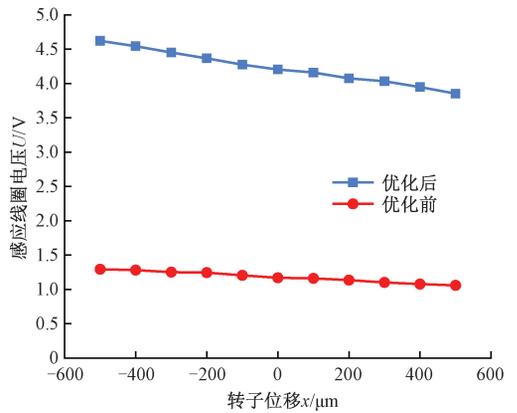


图 19 优化前后感应线圈输出电压对比

Fig. 19 Comparison of output voltage of induction coil before and after optimization

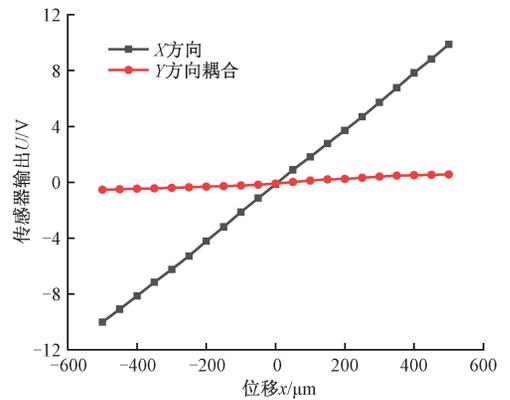


图 20 传感器沿 x 方向移动时传感器输出

Fig. 20 The output the sensor moving in the x direction

输出,在检测范围为 $\pm 500 \mu\text{m}$ 内,横向磁通传感器具有良好的线性度,且不同自由度之间的耦合较小。

经过多次实验测试,传感器的静态性能如表 3 所示。相对比同类型的传感器而言,线性度、重复性、迟滞性都处于较好的水平。但正交方向上的耦合稍低于平均水平,这是因为传感器板制作时线圈分布不完全对称导致。

表 3 横向磁通传感器静态性能

Table 3 Static performance of the transverse flux sensor

静态性能	数值
检测范围/ μm	± 500
灵敏度/ $(\text{mV} \cdot \mu\text{m}^{-1})$	20
线性度/%	0.69
重复性/%	± 0.76
迟滞性/%	± 1.23
正交耦合度/%	4.2

3.2 转子材料对传感器性能的影响

如图 21 所示为不同材料的转子作为检测目标时,传感器感应线圈上的感应电压输出随转子位移的变化。与仿真结果相似,当转子处于同一个位置时,材料的电导率越高,其感应电压输出值越小,传感器对转子位置的变化更加敏感。碳钢这类导磁材料由于磁效应的影响,使转子内部的涡流效应减弱,导致最终传感器的灵敏度下降。但在碳钢转子表面镀镍时,转子产生的涡电流集中在镍层使涡电流受碳钢磁性的影响降低,从而提高传感器的灵敏度。如图 22 所示,为传感器信号经过信号调理之后的结果,同样呈现出相同的规律,并具有良好的线性度。

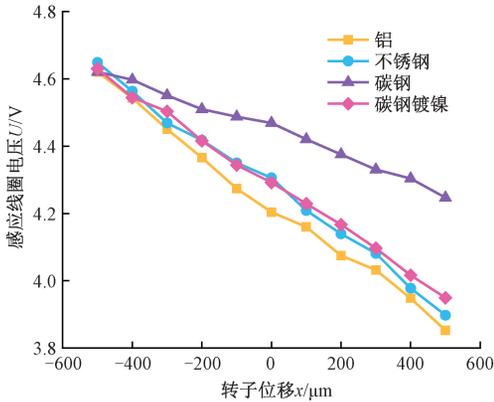


图 21 不同材料对感应线圈输出电压的影响

Fig. 21 Influence of different materials on the output voltage of induction coil

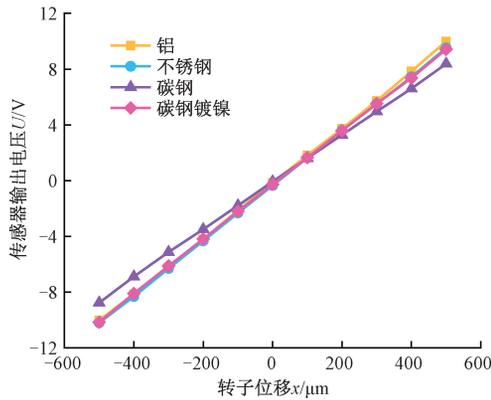


图 22 不同材料对传感器输出的影响

Fig. 22 Influence of different materials on sensor output

3.3 传感器动态性能

横向磁通传感器动态测试平台如图 23 所示,主要结构包括横向磁通传感器、传感器动态标定平台、电源、信号发生器、传感器信号处理板、示波器。

在动态标定试验研究中,电机带动动态标定转子(如图 24 所示)旋转,传感器能够获得一个 5 倍电机转速的

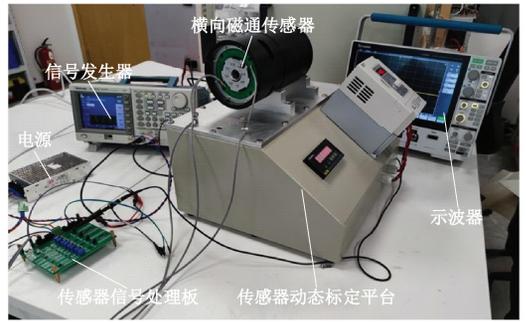


图 23 动态性能测试平台

Fig. 23 Dynamic performance test platform

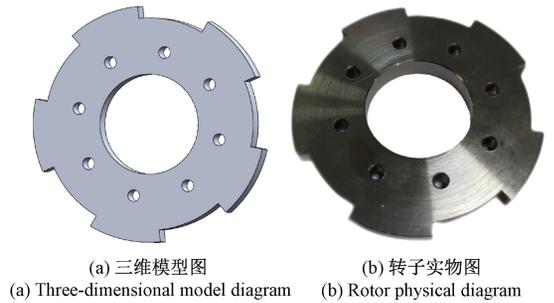


图 24 动态标定的转子结构

Fig. 24 Dynamically calibrated rotor structure

位移信号。检测传感器输出峰峰值随频率的变化,从而获得传感器的检测带宽。

传感器幅频特性曲线如图 25 所示,被测转子旋转频率在 0~2 000 Hz 时,传感器的输出电压幅值并未下降 3 dB,即传感器的截止频率高于 2 000 Hz。主动磁悬浮轴承转子转速一般只需达到 60 000 r/min,因此本文设计的磁通位移传感器在动态性能上完全能够满足实际需求,具有较好的动态性能。

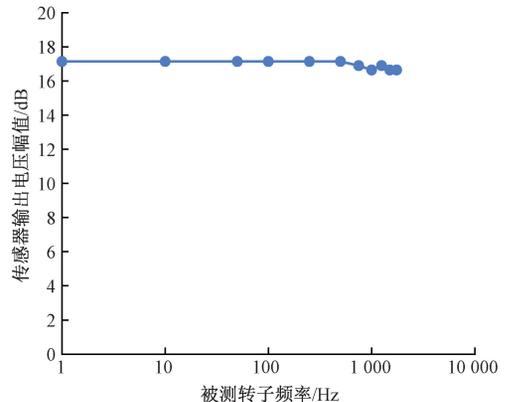


图 25 传感器幅频特性曲线

Fig. 25 Amplitude-frequency characteristic curve of sensor

4 结 论

本文对一种基于电涡流效应的横向磁通位移传感器进行了研究分析,实现一种轴向尺寸小的磁悬浮轴承位移传感器设计。通过将检测线圈印刷在PCB板上,在转子长度有限的主动磁悬浮轴承系统中能够对转子的位移变化进行检测。通过构建磁通传感器等效电路模型,理论推导出传感器灵敏度公式。进一步探究了影响探头灵敏度的因素,并且使用ANSYS Electronics仿真软件对传感器结构进行仿真分析,搭建实验平台对横向磁通传感器进行性能测试。仿真及实验研究表明:

1) 激励频率是影响传感器灵敏度的重要因素之一。激励频率的增大,导致互感差的变化率增大,与此同时线圈的等效电阻也变大,影响着探头部分检测的灵敏度。但加大激励频率会增大总的输出灵敏度,对传感器的性能提升是有利的。

2) 为提高横向磁通传感器的灵敏度,可适当减小激励线圈匝数,增加感应线圈匝数。对线圈匝数与灵敏度关系的分析,有助于设计不同尺寸的传感器时选取最优的线圈匝数比。

3) 转子材料的电导率越大,传感器输出灵敏度越大。材料的磁导率会降低转子内部涡流效应的作用,降低传感器灵敏度。结果表明铝、铜这类电导率高且磁导率低的材料更适合用来制作横向磁通传感器检测转子。

4) 在高频信号激励下传感器检测转子内部的电涡流趋于转子表面。检测转子的厚度及宽度均具有一个最小值,涡电流的分布不超过该最小值。当转子尺寸超过其范围时,传感器能够保持较高的灵敏度,以此为参考依据设计磁悬浮轴承转子组件结构。

5) 经多次性能测试,传感器的灵敏度为 $20\text{ mV}/\mu\text{m}$,线性度为 0.69% ,重复性为 $\pm 0.76\%$,迟滞性为 $\pm 1.23\%$,正交方向的耦合度为 4.2% ,传感器的检测带宽高于 $2\ 000\text{ Hz}$,适用于主动磁悬浮轴承系统。

参考文献

[1] MASLEN E H, SCHWEITZER G, BLEULER H, et al. Magnetic bearings—Theory, design and application to rotating machinery[M]. Berlin: Springer, 2009.

[2] 周扬,周瑾,张越,等. 基于RBF近似模型的磁悬浮轴承结构优化设计[J]. 西南交通大学学报, 2022, 57(3): 682-692.

ZHOU Y, ZHOU J, ZHANG Y, et al. Optimum structural design of active magnetic bearing based on RBF approximation model[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2022, 57(3): 682-692.

[3] 胡载东. 主动磁悬浮轴承控制系统研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2020.

HU Z D. Research on control system of active magnetic bearing[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2020.

[4] 崔得位,刘冲,翟敬宇,等. 高温电涡流传感器感应探头的优化设计[J]. 仪表技术与传感器, 2022, 59(1): 24-29.

CUI D W, LIU C H, ZHAI J Y, et al. Optimal design of induction probe of high temperature eddy current sensor[J]. Instrument Technology and Sensors, 2022, 59(1): 24-29.

[5] 刘壮. 磁轴承用电涡流传感器的设计与实现[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2022.

LIU Z H. Design and implementation of eddy current sensor for magnetic bearing[D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2022.

[6] 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, 2021.

TAO J Y. Research on capacitive displacement sensor of magnetic bearing[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2021.

[7] 李满宏,王经天,吴玉,等. 电涡流传感器性能优化关键技术[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(7): 233-243.

LI M H, WANG J T, WU Y, et al. Key technologies for eddy current sensor performance optimization[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40(7): 233-243.

[8] BÜHLER P. Device for contact-less measurement of distances in multiple directions: EP1422492A1[P]. 2004-05-26.

[9] BURDET L, MAEDER T, SIEGWART R, et al. Thick-film radial position sensor for high temperature active magnetic bearings[C]. Proceedings, 10th International Symposium on Magnetic Bearings (ISMB 10), 2006: 1-5.

[10] BURDET L. Active magnetic bearing design and characterization for high temperature applications[D]. Lausanne: EPFL, 2006.

[11] MÜSING A, ZINGERLI C, IMBERDORF 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, 2008: 1-5.
- [12] ZINGERLI C M, IMOBERDORF P, KOLAR J W. Rotor position measurement for a magnetically levitated 500 000 rpm permanent magnet machine[C]. Proceedings of the 2011 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, IEEE, 2011: 1778-1784.
- [13] NIEMANN H E. A high precision driver for an eddy current displacement sensor[D]. Potchefstroom, South Africa: North-West University, 2009.
- [14] CAO Z, HUANG Y K, PENG F, et al. Driver circuit design for a new eddy current sensor in displacement measurement of active magnetic bearing systems[J]. IEEE Sensors Journal, 2022, 22(17): 16945-16951.
- [15] GROBLER A J, VAN SCHOOR G, RANFT E O. Design and optimisation of a PCB eddy current displacement sensor[J]. Saiee Africa Research Journal, 2017, 108(1): 4-11.
- [16] 薛莲晓, 张剡, 徐昉, 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 L X, ZHANG K, XU Y, et al. Research on transverse flux radial displacement sensor[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(5): 1249-1256.
- [17] 薛莲晓. 磁悬浮轴承测控系统研究[D]. 北京: 清华大学, 2018.
- XUE L X. Research on measurement and control system of active magnetic bearings[D]. Beijing: Tsinghua University, 2018.
- [18] 夏越婷, 郑志曜, 尹忠东. 基于电流趋肤效应的变压器绕组材质辨识方法[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(1): 184-191.
- XIA Y T, ZHENG ZH Y, YIN ZH D. Material identification method of transformer winding based on current skin effect[J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(1): 184-191.
- [19] 吕云腾. 高温电涡流位移传感器分析与设计[D]. 杭州: 浙江大学, 2014.
- LYU Y T. Analysis and design of high-temperature eddy current displacement sensor[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014.

作者简介



金超武(通信作者), 分别于2002年、2006年和2011年于南京航空航天大学获得学士、硕士和博士学位, 现为南京航空航天大学副教授, 主要研究方向为传感器技术、磁悬浮技术、振动控制等。

E-mail: jinchaowu@nuaa.edu.cn

Jin Chaowu (Corresponding author) received his B.Sc., M.Sc and Ph.D. degrees all from Nanjing University of Aeronautics and Astronautics in 2002, 2006 and 2011, respectively. He is currently an associate professor at Nanjing University of Aeronautics and Astronautics. His main research interests include sensor technology, magnetic suspension technology, vibration control, et al.