

磁悬浮转子真空计转子轴向悬浮建模与优化设计

李博文¹ 李得天^{1*} 习振华¹ 郭美如¹ 周明旭² 贾文杰¹ 任正宜¹ 李宇²

(1. 兰州空间技术物理研究所 真空技术与物理重点实验室 兰州 730000; 2. 东北大学 机械能与自动化学院 沈阳 110819)

Modeling and Optimization Design for Axial Displacement Detection of Rotor in Spinning Rotor Gauge

LI Bowen¹, LI Detian^{1*}, XI Zhenhua¹, GUO Meiru¹, ZHOU Mingxu², JIA Wenjie¹, REN Zhengyi¹, LI Yu²

(1. *Science and Technology on Vacuum Technology and Physics Laboratory, Lanzhou Institute of Physics, Lanzhou 730000, China;*

2. *School of Mechanical Engineering and Automation, Northeastern University, Shenyang 110819, China*)

Abstract In order to meet the requirements of axial displacement measurement and suspension of the spherical rotor of spinning rotor gauge in a vacuum, an AC-DC coupled frequency domain model based on AC bridge structure is established for its magnetic levitation system loaded with both levitating DC current and eddy current sensor AC excitation. The fourth-order Runge-Kutta method is used to calculate the displacement response of the levitation process. The results show that the loading of the AC excitation introduces nonlinear factors into the magnetic levitation system. According to the above consideration, the eddy current sensor with the air magnetic core is fabricated and the measurement circuit is designed. The influence of the eddy current generated by AC excitation on the magnetic levitation system of the spinning rotor gauge is analyzed experimentally. The influence of the AC action is controlled by optimizing the coil radius parameters. The influence on the AC action is realized by optimizing the coil radius parameters, which provides theoretical guidance for the optimal design of the magnetic levitation rotor vacuum gauge.

Keywords Vacuum metrology, Spinning rotor gauge, Displacement detection, Eddy current sensor

摘要 为满足磁悬浮转子真空计球形转子在真空中的轴向位移测量与悬浮控制需求,针对其同时加载悬浮直流电流和电涡流传感器交流激励的悬浮系统,建立了基于交流电桥结构的交直流耦合的频域模型。采用四阶龙格库塔法解算其悬浮过程的位移响应,结果显示交流激励的加载为磁悬浮系统引入了非线性因素。制作空气磁芯的电涡流传感器线圈,设计测量电路并制作PCB板,实验分析交流激励产生的电涡流对磁悬浮转子真空计转子悬浮控制的影响。通过对线圈半径参数进行优化实现了对交流作用所产生影响的控制,为磁悬浮转子真空计的优化设计提供了理论指导。

关键词 真空计量 磁悬浮转子真空计 位移检测 电涡流传感器

中图分类号: TB772

文献标识码: A

doi: 10.13922/j.cnki.cjvst.202207012

磁悬浮转子真空计是一种精密的黏滞型真空计,以其优良的计量特性成为国际公认的高真空范围溯源/传递标准及真空计量标准装置的主标准器,常用于真空量值的国际比对以及各国真空量值溯源及传递体系的构建^[1-6]。磁悬浮转子真空计采用永磁-电磁合力实现混合磁悬浮。转子稳定悬浮在真空中时,转子与不与传感器中的任何结构件产生接触,凭借测量气体分子对旋转转子的阻尼作用的

大小来测量真空度,磁悬浮转子真空计相比于有旋转轴线的阻尼测量装置,具有更低的测量下限。磁悬浮转子真空计结构如图1所示,真空计中心位置为转子R,水平方向上有两对相对布置的驱动线圈D,转子轴向上下有一对悬浮线圈A,转子水平面上四周有两对起横向稳定作用的线圈L,转子工作状态下的转速由一对感应转子磁场变化的拾取线圈P组成^[7]。

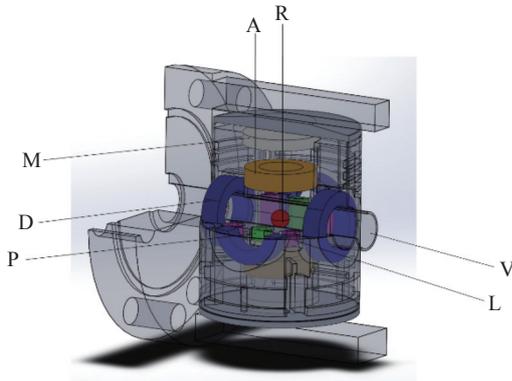


图1 SRG测量头: R-转子, V-套管, M-永磁体, A-悬浮线圈, L-横向稳定线圈, D-驱动线圈, P-拾取线圈

Fig. 1 SRG head: R-rotor, V-thimble tube, M-permanent magnet, A-suspension coil, L-lateral stability coil, D-drive coil, P-pickup coil

转子的悬浮稳定性决定着阻尼作用的测量准确度,因此在悬浮轴向上,需要精密的位移传感器对转子的悬浮位置进行精确的实时测量,以达到更稳定的悬浮控制效果。位移传感器的检测结果作为悬浮闭环控制的输入,影响着磁悬浮转子真空计转子轴向控制精度,从而影响真空度的测量^[8-10]。电涡流传感器的工作原理是基于互感效应,通过测量线圈上的高频激励,在被测物上产生涡流互感,影响激励线圈的阻抗,从而在实现距离的测量。在磁悬浮转子真空计的应用中,测量真空度的转子轴向位移检测对电涡流传感器有更特殊的要求。通常电涡流传感器采用几十千赫兹到数兆赫兹的激励频率,以提高其测量灵敏度,但是在磁悬浮转子真空计的设计中,为满足真空漏率要求,采用全金属设计,要求在其中工作的电涡流传感器的激励频率不可太高,过高的激励频率会由于屏蔽效应导致信号无法穿透内部金属构件,无法准确测量到转子的位移,而过低的激励频率则会降低位移测量的精度。另一方面,悬浮在真空中的转子无法通过对流和热传导散热,只能通过缓慢的热辐射降温,电涡流传感器的参数选择也应考虑涡流效应引起的转子发热。此外,受限于磁悬浮转子真空计测量头小体积、高度紧凑的结构设计,悬浮系统使用了位移传感器与悬浮执行器复用的解决方案,在同一对轴向线圈上加载交流激励信号使其作为电涡流位移传感器,同时在线圈上加载直流信号使其作为磁悬浮控制的电磁力执行器。在实际磁悬浮转子真空计轴向线圈设计中,应该综合考虑以上因素^[11-13]。

1 电涡流传感器工作原理

电涡流传感器的工作状态下的互感原理如图2所示。电涡流传感器的基本原理是电涡流效应,被测物体表面产生的涡流来自于探测线圈上加载的高频激励。电涡流位移传感器的主要构件是传感器线圈,对被测物体的要求是金属导体。传感器进行位移检测时,在传感器线圈上加载一定频率的交流激励 I_1 ,加载了交流激励的线圈会在周围空间产生一个交变磁场 H_1 。交变磁场会在线圈一端的金属导体表面产生小型电涡流 I_2 ,金属导体表面处的电涡流 I_2 会产生与传感器线圈的磁通 H_1 方向相反的磁通 H_2 ,抵消传感器线圈的部分磁场。根据传感器线圈与金属导体间的距离变化,导致传感器线圈的电感 L 、阻抗 Z 和品质因数 Q 发生对应改变,从而通过换算得到金属导体的位置信息。因此,线圈参数是导体参数的函数^[14-18]。

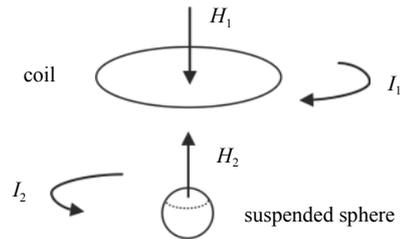


图2 电涡流传感器原理图

Fig. 2 Schematic diagram of eddy current sensor

将被测导体,即转子看作产生涡流的电感,此时图一中的原理图可以简化为如图3所示的等效电路,由一对有互感 M 的线圈组成。

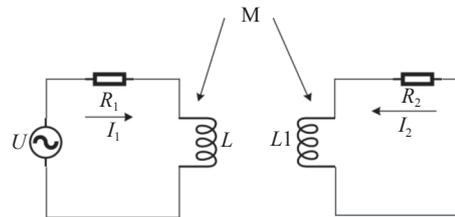


图3 电涡流传感器简化等效电路

Fig. 3 Eddy-current sensor simplified equivalent circuit

由基尔霍夫电压定律,可得平衡电压方程式

$$\begin{cases} I_1 R_1 + j\omega L I_1 - j\omega M I_2 = \dot{U} \\ I_2 R_2 + j\omega L_1 I_2 - j\omega M I_1 = 0 \end{cases} \quad (1)$$

求解方程组可以得到电流表达式

$$\begin{cases} \dot{I}_1 = \frac{\dot{U}}{R_1 + R_2 \frac{\omega^2 M^2}{R_2^2 + \omega^2 L_1^2} + j\omega L - j\omega L_1 \frac{\omega^2 M^2}{R_2^2 + \omega^2 L_1^2}} \\ \dot{I}_2 = \frac{M\omega^2 L_1 \dot{I}_1 + j\omega M R_2 \dot{I}_1}{R_2^2 + \omega^2 L_1^2} \end{cases} \quad (2)$$

式(2)中, I_1 为激励交流电流; I_2 为线圈变化的磁通在转子上感生出的电涡流; L 为线圈等效电感; R_1 为线圈电阻; L_1 为转子等效电感; R_2 为转子等效电阻; ω 为角频率; $j\omega L$ 为电感阻抗; M 为 L 与 L_1 之间的互感系数; U 为激励电压。

因此传感器线圈的等效阻抗 Z 为

$$Z = R + R_1 \frac{\omega^2 M^2}{R_1^2 + \omega^2 L_1^2} + j\omega L - j\omega L_1 \frac{\omega^2 M^2}{R_1^2 + \omega^2 L_1^2} \quad (3)$$

也可以写为式(4), 等效电感 L_{eq} 和等效电阻 R_{eq}

$$\begin{cases} R_{eq} = R_1 + R_2 \frac{\omega^2 M^2}{R_2^2 + \omega^2 L_1^2} \\ L_{eq} = L - L_1 \frac{\omega^2 M^2}{R_2^2 + \omega^2 L_1^2} \end{cases} \quad (4)$$

根据上述推导, 电涡流传感器线圈的等效阻抗可以简化为如下表达式

$$Z = f(\omega, \mu, x, \rho) \quad (5)$$

式中, ω 为线圈中激励电流频率; μ 为被测金属导体磁导率; ρ 为被测金属导体电阻率; x 为线圈与被测金属导体的距离。对于磁悬浮转子真空计中的应用, 需将转子的轴向位移变化转变为测量线圈等效阻抗 Z 的变化。通过改变转子与测量线圈之间的轴向距离与测量线圈的激励频率, 即得到等效阻抗与两者距离 x 之间的关系。其中阻抗变化范围越大, 电涡流传感器的位移检测灵敏度越高。

2 传感器信号处理

根据前一节的电涡流传感器工作原理的分析, 在线圈加载特定的交流激励时, 磁悬浮转子位移改变使位移测量传感器的等效阻抗发生改变, 但是阻抗值难以直观的显示或者测量, 因此需要转换电路将阻抗变化转换为对应的电压或者电流变化。

在磁悬浮转子真空计的实际应用中, 使用交流电桥法进行阻抗——电压的转换。电桥原理图如图4所示, 使用差动式测量线圈组成电桥的两臂, 当转子位移发生变化, 会引起两个差动布置的传感器同时发生等效阻抗的变化, 电桥的平衡被打破, 此时对输出信号 U_o 进行处理, 即可实现对位移的检测。

经过处理后的电压信号与转子位移对应。位于上下线圈中间位置时电压为 0, 上下极限位置处对应电压分别为 +2 V 与 -2 V。

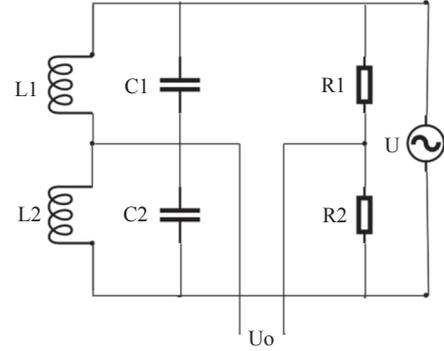


图4 交流电桥原理图

Fig. 4 Schematic diagram of an AC bridge

为提高输出信号的线性度, 在电涡流传感器的应用中, 采用并联 LC 回路, 并且使电涡流传感器工作在谐振频率, 即并联 LC 回路对外呈现纯电阻电路特性。LC 回路在 29 kHz 频率下处于谐振状态, 故选取该频率作为工作频率

3 考虑电涡流效应的磁悬浮模型

磁悬浮系统中使用的电磁铁原理如图5所示, 图中 u 为激励线圈的端电压; i 为电磁线圈的电流; r 为铁芯半径, 在磁悬浮转子真空计的实际应用中, 线圈上不仅要加载直流电压, 还有作为电涡流传感器而加载的交流激励, 此时若在线圈上加载正弦电流, 产生的电场强度为^[19]

$$\frac{\partial^2 H}{\partial y^2} = \sigma \mu \frac{\partial H}{\partial t} \quad (6)$$

式中 σ 与 μ 分别为铁芯的电导率与磁导率。经过 Laplace 变换变量, 式(6)可变为

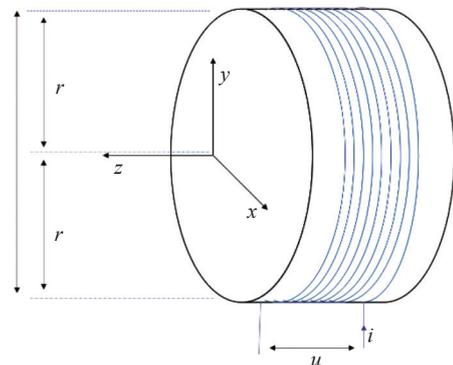


图5 磁悬浮电磁铁原理图

Fig. 5 Schematic diagram of magnetic levitation electromagnet

$$\frac{d^2 H}{dy^2} = s\sigma\mu H \quad (7)$$

已知磁感应强度 B 与磁场强度 H 之间的关系为

$$B = \mu H \quad (8)$$

磁通量与磁感应强度的关系为

$$\Phi = BA \quad (9)$$

由式(7)-式(9)可以得到磁通量的表达式

$$\Phi = \frac{\mu H_0 A}{\sqrt{s\sigma\mu r}} \tanh(\sqrt{s\sigma\mu r}) \quad (10)$$

式中 A 为线圈截面积, 根据安倍环路定理, 如磁路示意图图6所示。

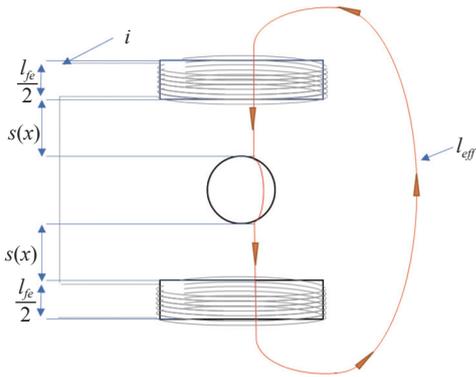


图6 磁路示意图

Fig. 6 Schematic of the magnetic circuit

表面磁场强度 H_0 可以表示为

$$H_0 = \frac{Ni}{l_{\text{eff}}(x)} = \frac{Ni}{2s(x) + \frac{l_{\text{fe}}}{\mu_r}} \quad (11)$$

式中, $l_{\text{eff}}(x)$ 是电磁线圈的有效长度, $s(x)$ 是气隙总长度, μ_r 为铁的磁导率, $\mu_r \gg 1$; l_{fe} 为铁芯气路长度, N 为线圈匝数。

简化式(11), 得到

$$H_0 = \frac{Ni}{2s(x)} \quad (12)$$

结合式(10), (12), 得到磁通量与线圈电流在频域上的关系式

$$\Phi(s) = \frac{\mu_0 AN}{2s(x)} \frac{\tanh(r\sqrt{s\sigma\mu})}{r\sqrt{s\sigma\mu}} i(s) \quad (13)$$

将式(13)线性化, 级数展开, 高次项产生的非线性对于一次项可以忽略不计, 保留一次项, 得到磁通量频域表达式

$$\Phi(s) = \frac{\mu_0 AN}{2s(x)} \left(1 - \frac{1}{3}\sigma\mu r^2 s\right) i(s) \quad (14)$$

式(14)可以写为时域表达式

$$\Phi = \frac{\mu_0 AN}{2s(x)} \left(i - \frac{1}{3}\sigma\mu r^2 \frac{di}{dt}\right) \quad (15)$$

此时可以看出, 在线圈中加入交流项后, 磁通量与电流的微分项相关。

对于磁悬浮转子真空计, 上下线圈采用串联结构, 由一对电磁线圈产生磁力 F_{up} 与 F_{down} 共同作用在转子上, 如图7所示, 因此考虑差动模式的线圈电磁力, 总电磁力可以写为转子位移与线圈电流的函数

$$F_{\text{up}}(x, i) = \frac{\phi_+^2(x, i)}{\mu_0 A} \quad (16)$$

$$F_{\text{down}}(x, i) = \frac{\phi_-^2(x, i)}{\mu_0 A} \quad (17)$$

$$F(x, i) = \frac{\phi_+^2(x, i)}{\mu_0 A} - \frac{\phi_-^2(x, i)}{\mu_0 A} \quad (18)$$

由式(15)可知, 线圈铁芯材质确定后, 铁芯电导率与磁导率同时确定, 视为常数项, 此时可取 $\alpha = \frac{1}{3}\sigma\mu r^2$, 将式(15)与式(18)联立得到方程组

$$\begin{cases} F(x, i) = \frac{\phi_+^2(x, i) - \phi_-^2(x, i)}{\mu_0 A} \\ \phi_+ = \frac{\mu AN}{2(s_0 - x)} \left(i_0 + i - \alpha \frac{di}{dt}\right) \\ \phi_- = \frac{\mu AN}{2(s_0 + x)} \left(i_0 - i + \alpha \frac{di}{dt}\right) \end{cases} \quad (19)$$

式中, ϕ_+ 与 ϕ_- 分别为上下线圈的磁通量, i_0 与 s_0 为偏置电流与悬浮设定位置, α 为交流影响因子。由(19)式可以看出, 涡流效应引起的电流微分项产生了非线性, 其非线性程度取决于交流影响因子 α 的大小。

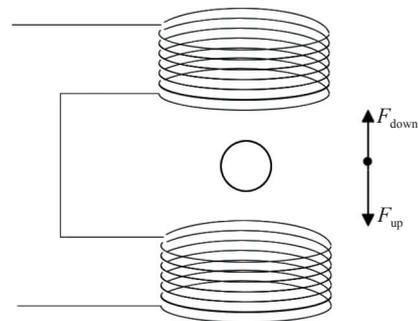


图7 转子受电磁力示意图

Fig. 7 Schematic diagram of the electromagnetic force on the rotor

转子的轴向磁悬浮动力学模型为

$$m\ddot{x} = F(x, i) - mg \quad (20)$$

采用比例-微分控制器进行控制, 电流模型为

$$i = k_p x + k_D \dot{x} \quad (21)$$

k_p 为比例系数; k_D 为微分系数。式(21)带入(20), 联立式(19), 可得微分方程组

$$\begin{cases} \ddot{x} = \frac{(\mu AN)^2 \left[2(s_0^2 - x^2) \left(i - \alpha \frac{di}{dt} \right) - 4s_0 i_0 x \right]}{4(s_0^2 - x^2)^2 m} - g \\ i = k_p x + k_D \dot{x} \end{cases} \quad (22)$$

模型参数如表 1 所示。

表 1 模型参数表

Tab. 1 Coil parameter table

| 参数 | 数值 |
|-----------------|-------|
| 转子质量 m/g | 0.375 |
| 额定悬浮位置 s_0/mm | 3 |
| 偏置电流 i_0/A | 1 |
| 线圈截面积 A/mm^2 | 20 |
| 线圈匝数 N | 400 |

由式(22)可以看出, 交流激励相比于直流激励, 多出了以 α 为系数的微分项, 由此可知交流电加载在线圈上对电磁力产生的影响是产生了一个电流的微分项, 而影响作用的大小取决于系数 α 的大小, 而 α 是与线圈参数电导率、磁导率和线圈截面大小有关的量, 代入实际线圈参数, 改变 α 的值, 即可得到交流项对悬浮响应的影响。

4 仿真与计算结果分析

在磁悬浮转子真空计中, 转子安装在法兰管中, 法兰管连接至真空系统, 因此转子的运动范围受限于法兰管的内径。实际工况中, 转子运动范围如图 8 所示。

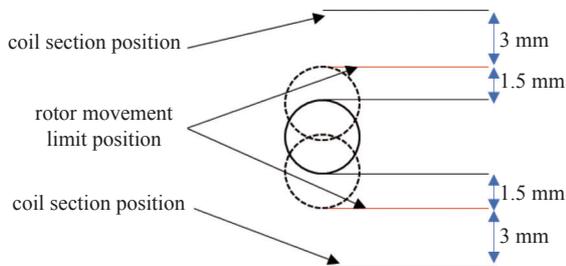


图 8 转子实际运动范围示意图

Fig. 8 Schematic diagram of the range of motion

使用四阶龙格-库塔法解微分方程组(22)。设置微分方程组初始值, 转子初始位置为 3 mm, 初始速度为 0 mm/s, 目标位置为 4.5 mm 处。设置控制

输入项电流系数为 $k_p=150, k_D=10$, 以达到较为稳定的控制效果, 便于测试影响因子 α 的变化对悬浮系统的影响。

线圈参数的变化对应着影响因子 α 的变化, 具体体现在线圈截面积的变化。代入绕制的不同半径的线圈对应的截面积, 得到交流影响因子 α 从 0.1-0.8 变化。解微分方程组得到时域响应结果如图 9、图 10 所示。

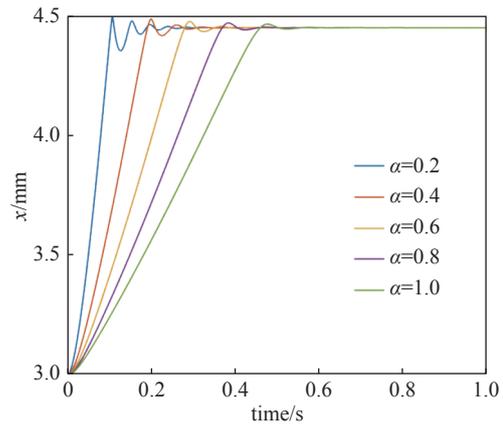


图 9 不同交流影响因素下转子悬浮过程中位移响应曲线

Fig. 9 Displacement response curve during rotor suspension under different AC influencing factors

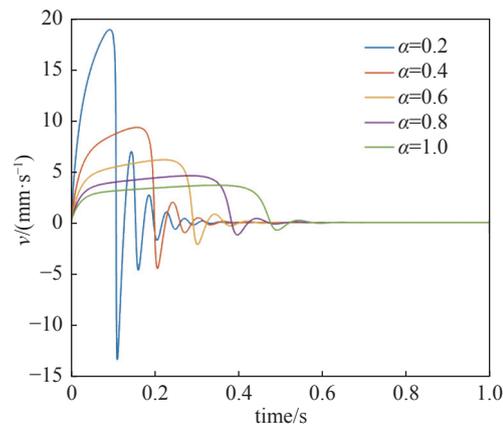


图 10 不同交流影响因素下转子悬浮过程中速度响应曲线

Fig. 10 Velocity response curve during rotor suspension under different AC influencing factors

从计算结果可以看出, 加入交流因素后, 在适当的比例微分参数下, 随着 α 值的增加, 悬浮响应过程超调量变小, 振荡次数减少, 系统呈现出更强的阻尼性; 从悬浮速度响应曲线来看, 随着 α 值的增加, 悬浮过程中的转子运动速度变慢, $\alpha=0.2$ 时转子悬浮过程中最大运动速度达到 18.73 mm/s, 以较快的速度达到悬浮位置, 且经历了多次振荡。 $\alpha=1$

时转子悬浮过程中最大运动速度仅为 3.57 mm/s, 以较低速度达到悬浮位置, 且悬浮过程经历较少振荡。

仿真结果显示, 磁悬浮线圈加载交流电流后悬浮过程受到影响, 随着交流影响因子的增大, 转子悬浮的响应超调减小, 稳定过程中轴向运动速度减小。对于位移检测来说, 转子的速度变化平缓且速度波动范围小有利于悬浮位移的检测。更缓慢的位移变化降低了对电涡流传感器位移检测的要求, 有利于线圈作为电涡流传感器的位移检测工作。

从仿真结果可以看出, 随着交流影响因子 α 的增加, 悬浮过程变得“缓慢”, $\alpha=0.2$ 时与 $\alpha=1$ 时的稳定时间相差约 0.2 s, 在实际使用中对此性能损失可以忽略不计。在计量仪器的使用中, 更关心工作状态的稳定性, 因此选取交流影响因子时, 选 $\alpha=1$ 的计算模型, 使系统具有更强的阻尼性。在仿真中使用了比例-微分控制器, 不可避免地产生了稳态误差, 因此在实际电路设计时应考虑加入积分控制。

5 实验分析

5.1 电磁铁-电涡流传感器复用装置设计

磁悬浮转子真空计的悬浮电路设计中, 电路的重要部分就是轴向悬浮电磁铁与电涡流传感器的复用设计, 轴向悬浮线圈上既加载使转子悬浮的直流信号, 也加载了使线圈作为电涡流传感器的交流激励信号。针对这一特定应用, 设计悬浮线圈上信号复用的电路如图 11 所示。

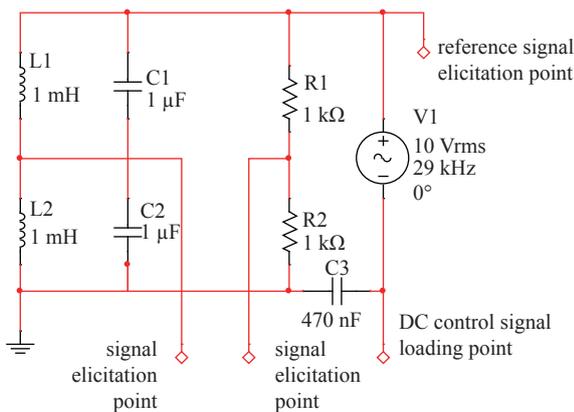


图 11 交直流耦合加载电路

Fig. 11 AC-DC coupling loading circuit

5.2 磁悬浮控制电路设计

在式(22)的推导中使用了比例-微分控制器, 在实际的此悬浮电路设计中, 考虑后续改进, 设计

模拟比例-积分-微分控制电路。控制器框图如图 12 所示。

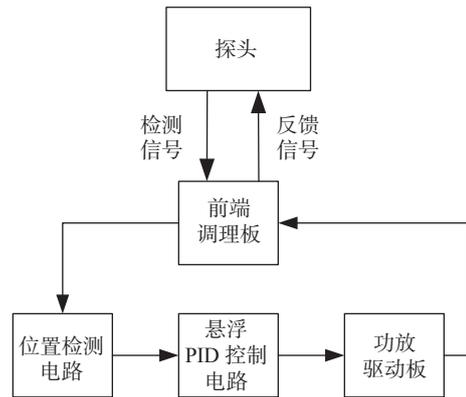


图 12 PID 系统控制框图

Fig. 12 PID system control block diagram

5.3 实验数据

由式(22)可知, 改变参数 α 即可测试交流作用的影响。线圈材料确定后电导率与磁导率即可固定, 在实际实验中, 通过改变线圈截面积达到改变 α 的目的。

绕制截面半径为 2.5, 3, 4, 5, 6, 7 mm 的线圈进行实验, 分别对应 α 值约为 0.1, 0.14, 0.2, 0.4, 0.5, 0.7。PID 参数不变, 仅更换线圈, 实际悬浮实验结果如图 11 所示。

从图 13 可以看出, 影响因子大小直接影响了磁悬浮稳定过程的超调量与振荡次数, 为更清晰的展示其作用, 取上图中 $\alpha=0.1$ 和 $\alpha=0.7$ 两条曲线进行对比, 如图 14 所示。

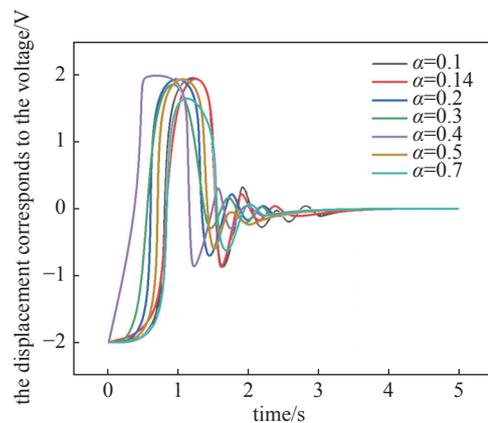


图 13 不同影响因子下的交流信号对磁悬浮响应过程的影响
Fig. 13 The influence of AC signals under different influencing factors on the response process of magnetic levitation

取 $\alpha=0.1$ 与 $\alpha=0.7$ 两种状态下的情况进行对比, 通过改变线圈参数, 悬浮响应过程的超调量与振荡

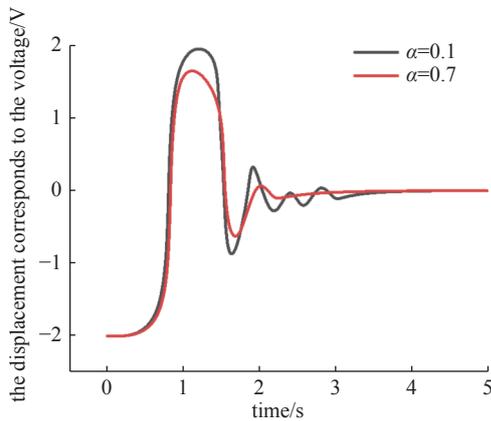


图14 两种较为极端状态下的交流影响对比

Fig. 14 Comparison of the effects of communication in two extreme states

次数都发生了变化。使用交流影响因子较大的线圈时,系统显示出较强的阻尼性,超调量更小且经更少的振荡到达稳定,这也印证了前方的推导。即加入交流信号后,交流信号产生的磁通量变化在磁悬浮的控制过程中,影响了悬浮过程。

在实验中可以通过线圈参数的优化来控制交流信号的影响。根据实验结果,最终选取交流影响因子 $\alpha=0.7$ 的线圈作为磁悬浮转子真空计的轴向线圈。悬浮效果如图15所示,悬浮位移示波器输出如图16所示。

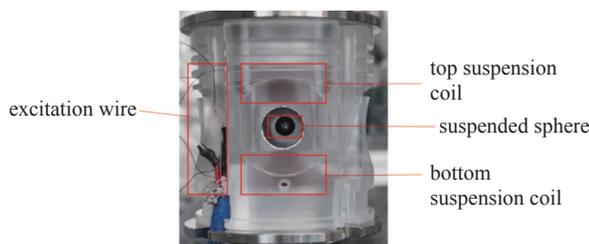


图15 悬浮效果展示

Fig. 15 Suspension effect display

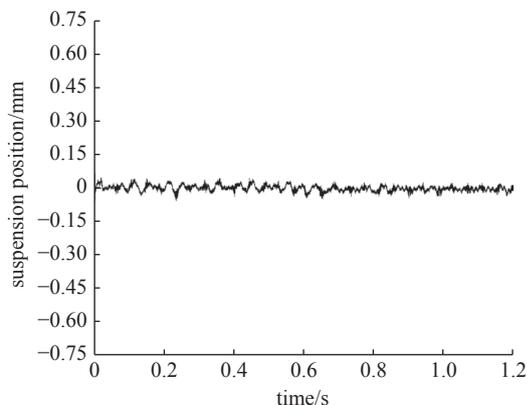


图16 悬浮位移信号示波器输出

Fig. 16 Suspended position signal

由图16可知悬浮位置在 ± 0.05 mm内微弱震动,实验结果证明此悬浮效果已达到计量级别的稳定性,满足了真空计的计量要求^[20]。

6 结论

在传统的传感器与执行器相互独立的磁悬浮动力学模型中,未涉及用于位移传感器的交流激励引入。在磁悬浮转子真空计的应用中,由于真空计结构设计的特殊性,轴向线圈必须既作为轴向位移检测的电涡流传感器,又作为提供使转子悬浮的电磁力的电磁线圈。因此交流激励的加载是必要的,只能通过对悬浮系统的设计与优化来控制其影响。

通过对线圈半径参数进行优化与选取,实现了对交流作用所产生影响的控制。减小了响应过程的超调,减少了振荡频次。为磁悬浮转子真空计的优化设计提供了理论指导。

参 考 文 献

- [1] Jousten K. Handbook of vacuum technology (2nd Edition)[J]. WILEY, 2016: 584-593,697-700
- [2] Li D T. A Review of the developing history and trend of Chinese vacuum metrology subject in the past 15 years (2004-2019)[J]. *Vacuum & Cryogenics*, 2020, 26(01): 1-16 (李得天. 中国真空计量2004-2019年发展概况及趋势分析[J]. *真空与低温*, 2020, 26(01): 1-16(in chinese))
- [3] Li D T, Wang Y J, Zhang H Z H, et al. Applications of vacuum measurement technology in china's space programs[J]. *Space: Science & Technology*, 2021
- [4] Li D T. New technology of vacuum metrology[M]. Beijing: China Machine Press, 2012 (李得天. 真空计量新技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2012(in chinese))
- [5] Jousten K. Comparison of the standards for high and ultrahigh vacuum at three national standards laboratories[J]. *Journal of Vacuum Science & Technology A Vacuum Surfaces and Films*, 1997, 15(4): 2395-2406
- [6] Li D T, Feng Y, Li Z H. Application of spinning rotor gauge in partial pressure measurement[J]. *Vacuum & Cryogenics*, 2000(04): 41-45 (李得天, 冯焱, 李正海. 磁悬浮转子规在分压力测量中的应用[J]. *真空与低温*, 2000(04): 41-45(in chinese))
- [7] Li Y, Guo M R, Ba D C, et al. The research history of spinning rotor gauge[J]. *Chinese Journal of Vacuum Science and Technology*, 2021, 41(11): 1009-1018 (李宇, 郭美如, 巴德纯, 等. 磁悬浮转子真空计的研究历程[J].

- 真空科学与技术学报, 2021, 41(11): 1009-1018(in chinese))
- [8] Li D T. Study on transfer coefficient of spinning rotor gauge[J]. *Vacuum & Cryogenics*, 2005(03): 139-143+186 (李得天. 磁悬浮转子规传递系数的变化研究[J]. *真空与低温*, 2005(03): 139-143+186(in chinese))
- [9] Li D T, Xi Z H, Wang Y J, et al. Vacuum metrology technology and its space application[J]. *Chinese Journal of Vacuum Science and Technology*, 2021, 41(09): 795-816 (李得天, 习振华, 王永军, 等. 真空测试计量技术及其航天应用[J]. *真空科学与技术学报*, 2021, 41(09): 795-816(in chinese))
- [10] Fedchak J A, Arai K, Jousten K, et al. Recommended practices for the use of spinning rotor gauges in inter-laboratory comparisons[J]. *Measurement*, 2015, 66: 176-183
- [11] Li M H, Wang J T, Wu Y, et al. Key Technologies for performance optimization of eddy-current sensors[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2019, 40(07): 233-243 (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(07): 233-243(in chinese))
- [12] Li W. Investigation on eddy current sensors with high precision and high stability[D]. University of Science and Technology of China, 2018 (李伟. 高精度高稳定性电涡流传感器的研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2018(in chinese))
- [13] Niu W. Design of rotational speed sensor based on the principle of eddy current[D]. Harbin Institute of Technology, 2014 (牛薇. 基于电涡流原理的转速传感器的设计[D]. 哈尔滨工业大学, 2014(in chinese))
- [14] Wu T. Study on active magnetic bearings and the control method[D]. Shenyang University of Technology, 2016 (吴桐. 主动磁悬浮轴承及其控制方法研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2016(in chinese))
- [15] Zhang P, Zhong J. Design of displacement measurement system for eddy current sensor and performance analysis[J]. *Instrumentation and Measurement*, 2019, 38(07): 115-118 (张萍, 仲军. 电涡流传感器小位移测量系统设计及性能分析[J]. *自动化技术与应用*, 2019, 38(07): 115-118(in chinese))
- [16] Li H W, Liu S Q, Yu W T, et al. Maglev rotor axial displacement detection method using eddy current sensor[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2011, 32(07): 1441-1448 (李红伟, 刘淑琴, 于文涛, 等. 电涡流传感器检测磁悬浮转子轴向位移的方法[J]. *仪器仪表学报*, 2011, 32(07): 1441-1448(in chinese))
- [17] Yang J, Zhang S M, Zeng L, et al. Simulation analysis of eddy current displacement sensor based on ANSYS[J]. *Construction Machinery and Equipment*, 2021, 52(03): 40-44+8 (杨坚, 张善猛, 曾励, 等. 基于ANSYS的电涡流位移传感器仿真分析[J]. *工程机械*, 2021, 52(03): 40-44+8(in chinese))
- [18] Liu Z, Li W, Jin J X. Characteristic analysis and calibration method of eddy current sensor[J]. *Machinery and Electronics*, 2013(02): 14-16+20 (刘柱, 李巍, 金建新. 电涡流传感器的特性分析与标定方法[J]. *机械与电子*, 2013(02): 14-16+20(in chinese))
- [19] Zmood R B, Anand D K, Kirk J A. The influence of eddy currents on magnetic actuator performance[J]. *Proceedings of the IEEE*, 1987, 75(2): 259-260
- [20] Xi Z H, Guo M R, Li B W, et al. Technology for Development of Metrological-grade Spinning Rotor Gauge[J]. *Vacuum & Cryogenics*, 2022, 28(04): 409-419 (习振华, 郭美如, 李博文, 等. 计量级磁悬浮转子真空计技术研究[J]. *真空与低温*, 2022, 28(04): 409-419(in chinese))

文章简介

磁悬浮转子真空计是一种精密的黏滞型真空计,以其优良的计量特性成为国际公认的高真空范围溯源/传递标准及真空计量标准装置的主标准器。通过对转子进行无接触、无磨损、无润滑的磁悬浮支撑,并进行其动力学行为的主动控制,旋转驱动后实现高真空量值的准确测量。因此转子悬浮的稳定性直接影响着残余阻尼的大小以及波动,进而影响测量结果的准确性。本文针对磁悬浮转子真空计同时加载悬浮直流电流和电涡流传感器交流激励的悬浮系统,建立了基于交流电桥结构的交直流耦合的频域模型,对交流激励的引入带来的影响进行量化讨论。最后通过对线圈半径参数进行优化实现了对交流作用所产生影响的控制,为磁悬浮转子真空计的优化设计提供了理论指导。