

磁悬浮控制力矩陀螺高速转子的高精度位置控制

汤继强, 崔旭, 袁新竹, 隗同坤

引用本文:

汤继强, 崔旭, 袁新竹, 等. 磁悬浮控制力矩陀螺高速转子的高精度位置控制[J]. *光学精密工程*, 2020, 28(3): 659–670.

TANG Ji-qiang, CUI Xu, YUAN Xin-zhu, et al. High-precision position control for MSCMG's high-speed rotor[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2020, 28(3): 659–670.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.3788/OPE.20202803.0659>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

双框架磁悬浮控制力矩陀螺磁轴承负载力矩复合补偿的控制

Composite compensation for load torque of active magnetic bearing in DGMSCMG

光学精密工程. 2015, 23(8): 2211–2219 <https://doi.org/10.3788/OPE.20152308.2211>

主被动磁悬浮转子的不平衡振动自适应控制

Adaptive control for unbalance vibration of active-passive hybrid magnetically suspended rotor

光学精密工程. 2015, 23(1): 122–131 <https://doi.org/10.3788/OPE.20152301.0122>

基于复数相移陷波的磁悬浮转子系统自平衡控制

Autobalancing control of magnetically suspended motor systems based on plural phase-shift notch filter

光学精密工程. 2016, 24(4): 764–770 <https://doi.org/10.3788/OPE.20162404.0764>

双框架磁悬浮控制力矩陀螺框架系统的扰动抑制

Disturbance rejection for the DGMSCMG's gimbal system

光学精密工程. 2019, 27(4): 868–878 <https://doi.org/10.3788/OPE.20192704.0868>

重复控制与积分正反馈组合的磁轴承低功耗控制

Low power control of magnetic bearing combined by repetitive control and positive integral feedback

光学精密工程. 2017, 25(8): 2149–2154 <https://doi.org/10.3788/OPE.20172508.2149>

文章编号 1004-924X(2020)03-0659-12

磁悬浮控制力矩陀螺高速转子的高精度位置控制

汤继强^{1,2*}, 崔旭^{1,2}, 袁新竹^{1,2}, 隗同坤^{1,2}

(1. 北京航空航天大学 仪器科学与光电工程学院, 北京 100191;

2. 北京航空航天大学 新型惯性仪表与导航系统技术国防重点学科实验室, 北京 100191)

摘要:在受到陀螺效应、动框架效应等影响后产生的磁力非线性问题是磁悬浮控制力矩陀螺(MSCMG)高速转子位置精度下降的主要因素。为解决以上问题,提高转子位置精度,本文分析了转子所受磁力的特性,建立了转子系统非线性动力学模型,提出了神经网络滑模控制方法。设计滑模控制律,采用径向基函数神经网络逼近控制律中的非线性模型,自适应算法根据误差在线调整神经网络的权值,同时可以保证整个系统的稳定性。仿真和实验结果表明,所提出方法的转子位置精度达到 99%,稳态误差为 0.000 2 mm。神经网络滑模控制可以实现 MSCMG 转子系统的高精度位置控制。

关键词:磁悬浮控制力矩陀螺;磁悬浮转子;高精度位置控制;滑模控制;神经网络

中图分类号:TH691 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20202803.0659

High-precision position control for MSCMG's high-speed rotor

TANG Ji-qiang^{1,2*}, CUI Xu^{1,2}, YUAN Xin-zhu^{1,2}, WEI Tong-kun^{1,2}

(1. *School of Instrumentation Science and Opto-electronics Engineering,*
Beihang University, Beijing 100191, China;

2. *Fundamental Science on Novel Inertial Instrument and Navigation System Technology Laboratory,*
Beihang University, Beijing 100191, China)

* *Corresponding author, E-mail: tjq_72@163.com*

Abstract: Nonlinear problems of magnetic force under the influence of the gyro effect and moving-gimbal effect were the main factors that decrease the position precision for the high-speed rotor of magnetically suspended control moment gyros. Therefore, the characteristics of the magnetic force of the rotor are analyzed, and a nonlinear dynamic model of the rotor system was established. A sliding mode control method based on neural network was proposed to address the problem and to improve the position precision of the rotor. A sliding mode control law was designed. The radial basis function neural network was adopted to approximate the nonlinear model, while the adaptive algorithm adopt the weights of the network according to the error as well as guarantees the stability of the system. The simulation and experimental results indicate that the proposed method improves the position precision of the rotor to 99%, and the static error is 0.000 2 mm. The sliding mode control based on neural network can achieve the high-precision position control of the rotor system.

收稿日期:2019-07-09; **修订日期:**2019-08-12.

基金项目:国家重点研发计划资助项目(No. 2018YFB0905500, No. 2018YFB0905503);装备预先研究领域重点基金资助项目(No. 61407210206)

Key words: Magnetically Suspended Control Moment Gyroscope (MSCMG); magnetically suspended rotor; high-precision position control; sliding mode control; neural network

1 引 言

控制力矩陀螺(Control Moment Gyroscope, CMG)是一种通过改变角动量方向来调整航天器姿态和抑制干扰的姿控执行机构^[1],主要由高速转子系统和框架伺服系统组成^[2]。根据所采用轴承的支承类型,可以分为机械控制力矩陀螺和磁悬浮控制力矩陀螺(Magnetically Suspended CMG, MSCMG)。由于 MSCMG 的定转子间存在气隙,因此具有无需润滑、高转速、长寿命、高精度和持续输出大力矩的特点^[3-5]。根据框架的个数,CMG 可以被分为单框架 CMG 和双框架 CMG^[6]。由于框架转动会对转子系统产生耦合力矩和干扰,而相对于双框架而言,单框架对转子系统的耦合力矩与干扰更少,有利于降低控制难度^[7]。因此,单框架 MSCMG 更多地被应用于调整航天器姿态和抑制干扰。

具有大角动量的扁平转子在高速旋转时会产生较强的陀螺效应^[8],使其在平衡位置附近发生较小角度的偏转,转子系统还存在不确定干扰和不平衡振动,这些问题会降低转子悬浮稳定性,增加控制难度。与此同时,框架转动所产生的耦合力矩会使转子跳动量增加(动框架效应),甚至碰撞保护轴承,严重的会造成转子损伤^[9-10]。动框架效应会使转子大角度偏离平衡位置,即磁间隙发生较大变化,造成磁力的刚度系数发生非线性改变,降低磁力控制精度,进而降低转子悬浮稳定性和陀螺的输出力矩精度^[11-12]。

高速转子在平衡位置附近发生小角度偏转时磁间隙变化较小,因此磁力的刚度系数所发生的非线性变化对磁力的影响不大,可以对磁力模型进行线性化,因此现有控制方法可以使转子系统稳定悬浮,但不能保证转子悬浮的位置精度。文献[13]采用传统 PID(Proportional Integral Derivative)控制方法结合角速率前馈来提高转子系统的稳定性。文献[14]基于 PID 控制设计了位移和速度交叉反馈器来提高系统的稳定裕度。这两种方法都只考虑了转子的稳定悬浮,并没有对转子大角度偏转时的位置精度进行研究。文献

[15]利用含有扩展卡尔曼滤波器和状态反馈调节器的线性二次高斯控制,提高转子位置精度,但是该方法参数多,计算量大,不方便工程应用。文献[16]采用变工作点线性化的方法,根据转子位置采用与之对应的磁力模型,但该方法的控制效果取决于模型精度和不平衡大小等因素。文献[17]提出基于电流刚度估计的自适应控制器,但没有考虑位移刚度的非线性变化。随着航天技术的发展,我国未来发射的航天器在数量和种类上不断增加,传统的控制方法已不能满足新形势下对 CMG 输出高精度控制力矩的要求。

随着控制理论的发展,智能控制方法和非线性控制方法在解决系统的非线性问题上有很好的表现。文献[18]采用模糊控制器对磁轴承系统进行控制,提高稳定性和鲁棒性,但应用对象为磁悬浮涡轮发动机,不符合 CMG 输出高精度控制力矩的要求。文献[19]设计了神经网络自适应估计器对磁轴承系统的非线性变化进行估计,提高磁力非线性的稳态精度,但该方法只适用于控制磁轴承轴向平动,而 MSCMG 转子系统的控制难点在磁轴承径向方向。文献[20]利用 BP(Back Propagation)神经网络在线调整 PID 控制器参数,用于五自由度磁轴承系统悬浮控制。文献[21]利用前馈神经网络逼近磁轴承参数非线性变化。文献[22]利用神经网络来建立磁轴承系统的内模模型。文献[23]设计了自适应模糊神经网络控制器用于磁悬浮传输系统的悬浮控制。文献[24]利用双积分滑模控制系统,调节和稳定高度非线性的磁悬浮转子系统,提高系统的鲁棒性,但是积分运算复杂,计算量大。以上方法侧重于实现磁悬浮转子的稳定悬浮,对提高转子位置精度效果并不理想。由于神经网络具有对非线性函数的逼近能力,被广泛用来逼近非线性函数。而滑模变结构控制是一种特殊的非线性控制器,对参数变化具有鲁棒性,因此应用也比较广泛。将滑模控制结合神经网络用于非线性系统的控制,完成对非线性函数的逼近与补偿,可以取得很好的效果。

本文针对高速转子受陀螺效应和动框架效应影响而偏转时刚度系数非线性变化影响位置精度的问题,建立磁悬浮转子非线性动力学模型并对

磁力进行分析,提出神经网络滑模控制算法,用于实现转子的稳定悬浮及提高位置精度。仿真结果表明本文方法在提高位置精度方面比现有方法具有更好的控制性能。

2 转子动力学建模和磁力分析

如图 1 所示,本文所研究的单框架磁悬浮控制力矩陀螺磁悬浮转子系统主要由磁轴承系统和高速电机系统组成。磁悬浮转子系统包括 2 个二自由度径向磁轴承和 2 个一自由度轴向磁轴承,用于实现 5 个自由度的主动控制;高速电机用于驱动转子高速旋转。轴向位移和径向位移由位移传感器直接测得。基座是连接磁悬浮 CMG 和航天器的机械结构,CMG 的输出力矩通过基座作用到航天器上,实现调整姿态和抑制干扰。

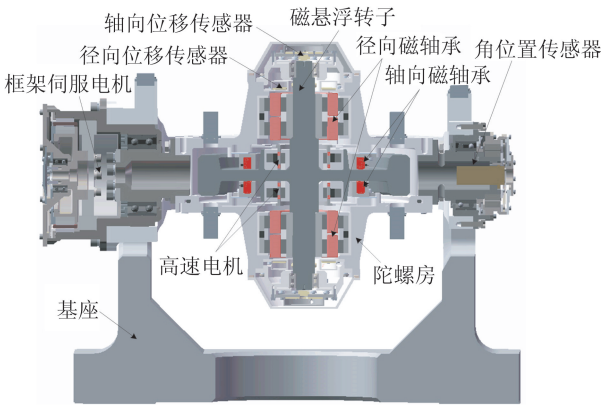


图 1 单框架磁悬浮控制力矩陀螺结构图
Fig. 1 Sectional view of the SGMSCMG

在转子系统上建立空间直角坐标系,如图 2 所示。磁轴承控制的 5 个自由度分别是质心在 x, y, z 3 个方向上的平动和绕径向 x, y 方向上的转动运动。磁轴承力是磁悬浮转子与定子之间的相互作用力,其中,对应 A_x, A_y, B_x 和 B_y 4 个通道的磁力分别为 f_{Ax}, f_{Ay}, f_{Bx} 和 f_{By} ,可以合成为 X 和 Y 两个方向的径向平动力 f_x 和 f_y 及径向力矩 p_x 和 p_y ; f_z 是轴向(z 方向)上转子所受磁轴承力的合力; l_m 表示从磁悬浮转子中心到径向磁轴承中心的距离; α, β 分别为转子绕 x, y 轴正方向的偏转角度; Ω 为转子转速。将磁轴承转子质心的平动和转动分别单独考虑,建立转子的平动运动方程和转动运动方程,即可得到磁悬浮转子的动力学模型。

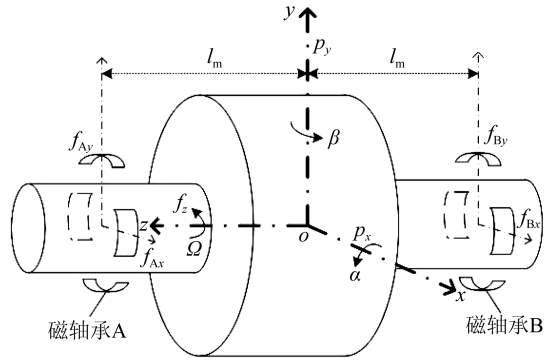


图 2 磁悬浮 CMG 转子系统坐标系示意图
Fig. 2 Rectangular space coordinate system established on the MSCMG

径向四通道在框架角速率为零($\theta_g = 0$ (°)/s)且不考虑磁悬浮转子重力的条件下,磁悬浮转子的动力学模型可以描述为:

$$\begin{cases} m\ddot{x} = f_x = f_{Ax} + f_{Bx} \\ m\ddot{y} = f_y = f_{Ay} + f_{By} \\ m\ddot{z} = f_z \\ J_r\ddot{\alpha} + J_z\Omega\dot{\beta} = p_x = 2l_m(f_{By} - f_{Ay}) \\ J_r\dot{\beta} - J_z\Omega\dot{\alpha} = p_y = 2l_m(f_{Ax} - f_{Bx}) \end{cases}, \quad (1)$$

其中: m 是转子的质量; α, β 分别为转子绕 x, y 轴正方向的偏转角度; Ω 为转子转速; 转子的赤道转动惯量为 J_r , 转子的极转动惯量为 J_z 。

根据磁路安培环路定律进行一系列数学推导可以得到磁力轴承承载力的计算模型:

$$F = \frac{1}{4}\mu_0 N^2 A \frac{I^2}{h^2}, \quad (2)$$

其中: μ_0 为空气磁导率, N 是磁轴承线圈绕组匝数, A 为定子与转子铁芯间气隙的横截面积, I 是线圈电流, h 是定子与转子铁芯间气隙的长度, I 和 h 为变量。由于磁力轴承采用差动励磁方式,上下各一个电磁铁,有两个磁力作用于转子,所以转子受到的电磁力为上下磁铁的吸力之差,即:

$$F = \frac{1}{4}\mu_0 N^2 A \left[\frac{(I_0 + i)^2}{(h_{m_0} - x)^2} - \frac{(I_0 - i)^2}{(h_{m_0} + x)^2} \right], \quad (3)$$

其中: F 为总电磁力, h_{m_0} 是径向磁轴承的气隙大小, I_0 是等效偏置电流, x 为转子位移(F 与 x 的方向一致), i 为控制电流。

框架转动会使陀螺效应下的高速转子发生偏转,从而导致定转子间气隙大小发生变化,这会使磁轴承力发生非线性改变。如果仍然采用线性模型,当气隙变化量超过气隙总长度的 10%, 控制

系统的控制难度会增加,系统的稳定性会下降。本文所用的控制力矩陀螺径向磁轴承气隙设计值为 0.3 mm,而转子的最大位移能够达到 60 μm ,这已经远远超过了总长度的 10%。因此,考虑磁力的非线性问题是必要的。

表 1 列出了磁悬浮 CMG 磁轴承的结构尺寸和相关参数。根据表 1 的数据和公式(3),利用 MATLAB 对转子在 Ax 通道不同位置处不同控制电流下的磁轴承力作力-位移-电流变化曲线图,如图 3 所示。可以清楚地看到,当磁悬浮转子被偏离平衡位置时,磁力在不同电流下的非线性变化。当转子偏离平衡位置越远,磁力的非线性程度越高。

表 1 磁悬浮 CMG 磁轴承结构尺寸及相关参数

Tab.1 Parameters of the MSCMG

含义	值
转子质量 m/kg	2
极转动惯量 $J_z/(\text{kg} \cdot \text{m}^2)$	0.082 86
赤道转动惯量 $J_r/(\text{kg} \cdot \text{m}^2)$	0.130 2
转子转速 $\Omega/(\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$	15 000
空气磁导率 $\mu_0/(\text{H} \cdot \text{m}^{-1})$	$4\pi \times 10^{-7}$
磁极表面积 A/mm^2	1 494
径向磁轴承各线圈绕组匝数 N	150
偏置电流 I_0/A	1.3
径向磁轴承气隙 h_{m_0}/mm	0.3

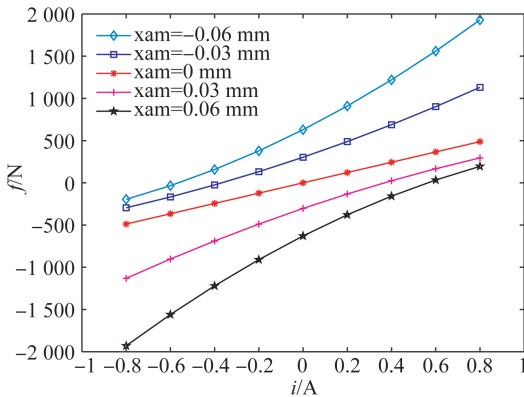


图 3 磁轴承力-位移-电流变化曲线图

Fig. 3 Force-displacement-current curve of MB

利用泰勒展开式分析磁力模型,由于 5 阶以上影响较小,因此只保留到 3 阶,可以得到:

$$F = \mu_0 N^2 A \frac{I_0}{h_{m_0}^2} i - \mu_0 N^2 A \frac{I_0^2}{h_{m_0}^3} x + 3\mu_0 N^2 A \frac{I_0}{h_{m_0}^4} i x^2 - 2\mu_0 N^2 A \frac{I_0^2}{h_{m_0}^5} x^3 - \mu_0 N^2 A \frac{1}{h_{m_0}^3} i^2 x + o^n, \quad (4)$$

$$\text{令 } k_i = \mu_0 N^2 A \frac{I_0}{h_{m_0}^2}, k_h = -\mu_0 N^2 A \frac{I_0^2}{h_{m_0}^3}, k_{i^2} = 3\mu_0 N^2 A \frac{I_0}{h_{m_0}^4}, k_{h^3} = -2\mu_0 N^2 A \frac{I_0^2}{h_{m_0}^5}, k_{i^2 h} = -\mu_0 N^2 A \frac{1}{h_{m_0}^3}, \text{则公式(4)可以写为:}$$

$$F = k_i i + k_h x + k_{i^2} i x^2 + k_{h^3} x^3 + k_{i^2 h} i^2 x + o^n. \quad (5)$$

可以看出,磁轴承力模型除了一阶线性项以外,还包含高阶非线性项。为方便说明,将公式(5)的非线性模型取为:

$$F = k'_i i + k'_h x = (k_i + \Delta k_i) i + (k_h + \Delta k_h) x, \quad (6)$$

其中:电流刚度非线性项 $\Delta k_i = k_{i^2} x^2$,位移刚度非线性项 $\Delta k_h = k_{h^3} x^2 + k_{i^2 h} i^2$ 。电流刚度 $k'_i = k_i + k_{i^2} x^2 = k_i + \Delta k_i$,位移刚度 $k'_h = k_h + k_{h^3} x^2 + k_{i^2 h} i^2 = k_h + \Delta k_h$ 。所得的电流刚度-位移变化曲线如图 4,位移刚度-位移-控制电流变化关系如图 5。根据图 4 和图 5 中的数据,转子小角度偏转(气隙变化 $x \leq 30 \mu\text{m}$)和大角度偏转(气隙变化 $30 \mu\text{m} \leq x \leq 60 \mu\text{m}$)两种情况下电流刚度和位移刚度非线性变化值在表 2 中列出。表中数据表明,当转子小角度偏转时,刚度系数变化较小,可以对其进行线性化处理;当转子大角度偏转时,刚度系数变化较大,需要建立非线性模型对其进行补偿。

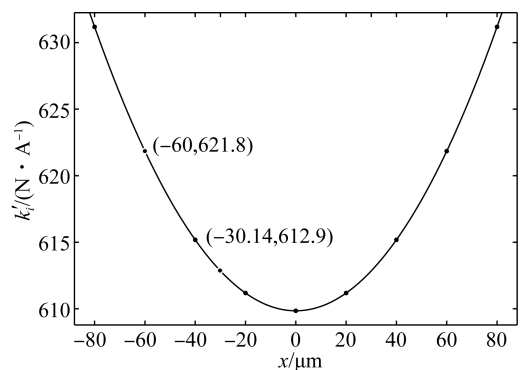


图 4 电流刚度 k'_i 随气隙大小变化曲线图

Fig. 4 Current stiffness-air gap curve

表 2 转子小角度偏转和大角度偏转情况下刚度系数变化情况对比表

Tab. 2 Comparison of change of stiffness when the rotor is tilted by small and large angle

参数	转子小角度偏转	转子大角度偏转
转子最大位移 $x_{max}/\mu\text{m}$	30	60
电流刚度变化范围 $k'_i/(\text{N}\cdot\text{A}^{-1})$	[609.85, 612.85]	[609.85, 621.85]
电流刚度变化量 $\Delta k'_i/(\text{N}\cdot\text{A}^{-1})$	[0, 3]	[0, 12]
位移刚度变化范围 $k'_h/(\text{N}\cdot\mu\text{m}^{-1})$	[-2.654, -14.461]	[-2.654, -41.09]
位移刚度变化量 $\Delta k'_h/(\text{N}\cdot\mu\text{m}^{-1})$	[0, 11.807]	[0, 38.436]

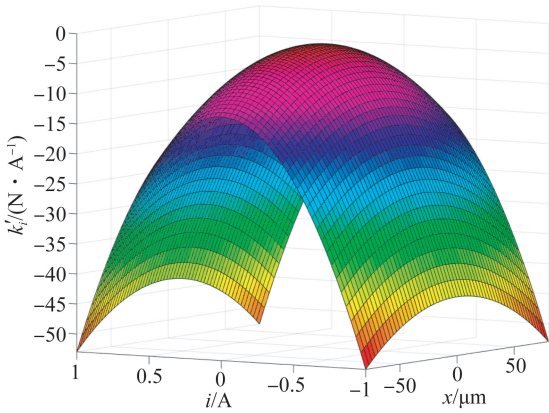


图 5 位移刚度 k'_h -磁间隙-控制电流关系三维曲面图

Fig. 5 Displacement stiffness-air gap-current surface map

磁悬浮 CMG 转子在径向不进行主动偏转,偏转角度 α, β 为转子被动偏转角度,因此径向平动方向的动力学模型为控制核心。将公式(6)代入公式(1)中的径向平动方程,同时考虑到高速转子的奇倍频振动和未建模动态等干扰具有不确定性,因此加入干扰项 f_d ,可以得到:

$$\begin{cases} m\ddot{x} = f_x = (k_{ix} + \Delta k_{ix})i_x + (k_{hx} + \Delta k_{hx})x + f_{dx} \\ m\ddot{y} = f_y = (k_{iy} + \Delta k_{iy})i_y + (k_{hy} + \Delta k_{hy})y + f_{dy} \end{cases} \quad (7)$$

其中: f_{dx}, f_{dy} 为 f_d 在 x, y 方向上的分量, i_x, i_y 为 x, y 方向控制电流。

以 x 通道为例,磁悬浮转子的动力学方程可以表示为:

$$m\ddot{x} = k'_{ix}i_x + k'_{hx}x + f_{dx} = (k_{ix} + \Delta k_{ix})i_x + (k_{hx} + \Delta k_{hx})x + f_{dx} \quad (8)$$

令 $x_1 = x, x_2 = \dot{x}, u = i_x$, 则公式(7)可以被表示为二阶非线性不确定系统:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = f(x) + g(x)u + d(t) \\ y = x_1 \end{cases} \quad (9)$$

其中: $f(x) = \frac{k'_{hx}x}{m} = \frac{(k_{hx} + \Delta k_{hx})x}{m}, g(x) = \frac{k'_{ix}}{m} =$

$\frac{k_{ix} + \Delta k_{ix}}{m}, d(t) = \frac{f_{dx}}{m}$ 且 $|d(t)| \leq D, D$ 为干扰上界。

当转子大角度偏离平衡位置时刚度系数非线性变化明显,导致转子位置精度下降,使 CMG 的输出力矩精度降低。因此,需要设计非线性控制方法,提高转子的位置精度从而提高 CMG 的输出力矩精度。

3 神经网络滑模控制算法设计

由磁轴承力的原始公式和文中对刚度系数的分析可知,磁轴承力是一个具有多变量的非线性模型,很难通过线性控制方法对转子进行高精度位置控制。滑模控制为含有不确定性的非线性系统提供了有效的控制设计方法;神经网络算法对非线性函数具有很强的逼近能力,很多研究用其估计非线性系统。针对本文提出的磁力模型 $F = k'_i i + k'_h h_m$, 设计了神经网络滑模控制器,滑模控制器输出控制电流,神经网络用于逼近控制律中的非线性函数,自适应算法用来调节神经网络的权值,最终实现转子的高精度位置控制。控制系统的结构如图 6, 其中 x 为转子的实际位置, x_r 为转子的期望位置, d 为干扰, e 是位置误差, i 是控制电流。

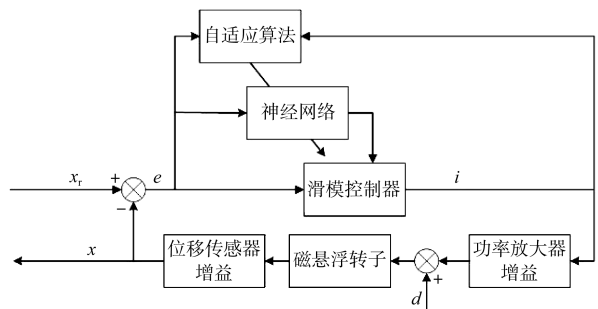


图 6 控制系统结构图

Fig. 6 Structure of control system

3.1 控制器设计

定义转子的位置误差 e 为:

$$e = x_r - x. \quad (10)$$

设计滑模面:

$$s = \dot{e} + ce, \quad (11)$$

其中切换参数 $c > 0$ 。

对滑模面函数求导,并将公式(10)代入,可得:

$$\begin{aligned} \dot{s} &= \dot{e} + c\dot{e} = \ddot{x}_r - \ddot{x} + c\dot{e} = \\ &\ddot{x}_r - f - gu - d(t) + c\dot{e}. \end{aligned} \quad (12)$$

通过 RBF(Radical Basis Function)神经网络对 f 和 g 的值进行逼近。RBF 神经网络的算法为:

$$h_j = \exp\left(-\frac{\|x_t - c_j\|^2}{2b_j^2}\right), \quad (13)$$

$$\begin{aligned} f &= \mathbf{W}^T \mathbf{h}_f(\mathbf{x}) + \epsilon_f, \\ g &= \mathbf{V}^T \mathbf{h}_g(\mathbf{x}) + \epsilon_g, \end{aligned} \quad (14)$$

其中:网络输入为位置误差及其导数 $\mathbf{x}_t = \begin{bmatrix} e \\ \dot{e} \end{bmatrix}$; j

是隐含层的第 j 个节点,取节点数为 5; $\mathbf{h} = [\mathbf{h}_j]^T$ 是径向基函数的输出;理想网络权值: $\mathbf{W} = [\mathbf{w}_1 \ \mathbf{w}_2 \ \mathbf{w}_3 \ \mathbf{w}_4 \ \mathbf{w}_5]^T$, $\mathbf{V} = [\mathbf{v}_1 \ \mathbf{v}_2 \ \mathbf{v}_3 \ \mathbf{v}_4 \ \mathbf{v}_5]^T$; ϵ_f 和 ϵ_g 是逼近误差且 $|\epsilon_f| \leq \epsilon_{Mf}$, $|\epsilon_g| \leq \epsilon_{Mg}$; f 和 g 是 RBF 网络的理想输出。

$$\hat{f} = \hat{\mathbf{W}}^T \mathbf{h}_f(\mathbf{x}) = \hat{\mathbf{W}}^T \cdot \left[\exp\left(-\frac{\|x_t - c_j\|^2}{2b_j^2}\right) \right], \quad (15)$$

$$\hat{g} = \hat{\mathbf{V}}^T \mathbf{h}_g(\mathbf{x}) = \hat{\mathbf{V}}^T \cdot \left[\exp\left(-\frac{\|x_t - c_j\|^2}{2b_j^2}\right) \right]. \quad (16)$$

由公式(12)可以导出控制律:

$$u = \frac{1}{g} (\ddot{x}_r + c\dot{e} - \hat{f} + \eta \text{sgn}(s)), \quad (17)$$

其中趋近速率 $\eta \geq D$ 。

3.2 稳定性分析

保持控制系统稳定是实现转子位置高精度控制的基础,而神经网络滑模控制算法的稳定性和控制律中非线性函数的权值调整过程密切相关。利用 Lyapunov 函数对系统进行稳定性分析,进而可以得到基于自适应算法的网络权值更新规则。

将公式(12)代入公式(11),可以得到:

$$\begin{aligned} \dot{s} &= \dot{e} + c\dot{e} = \ddot{x}_r - \ddot{x} + c\dot{e} = \\ &\ddot{x}_r - f - gu - d(t) + c\dot{e} = \\ &\ddot{x}_r - f - \hat{g}u + (\hat{g} - g)u - d(t) + c\dot{e} = \\ &\ddot{x}_r - f - \hat{g} \frac{1}{g} (\ddot{x}_r + c\dot{e} - \hat{f} + \eta \text{sgn}(s)) + \\ &(\hat{g} - g)u - d(t) + c\dot{e} = \\ &(\hat{f} - f) + (\hat{g} - g)u - d(t) - \eta \text{sgn}(s) = \\ &\tilde{f} + \tilde{g}u - d(t) - \eta \text{sgn}(s) = \\ &\tilde{\mathbf{W}}^T \mathbf{h}_f(\mathbf{x}) - \epsilon_f + (\tilde{\mathbf{V}}^T \mathbf{h}_g(\mathbf{x}) - \epsilon_g)u - \\ &d(t) - \eta \text{sgn}(s), \end{aligned} \quad (18)$$

其中:

$$\begin{aligned} \tilde{\mathbf{W}} &= \hat{\mathbf{W}} - \mathbf{W}, \tilde{\mathbf{V}} = \hat{\mathbf{V}} - \mathbf{V}, \\ \tilde{f}_n &= \hat{f}_n - f_n = \hat{\mathbf{W}}^T \mathbf{h}_f(\mathbf{x}) - \mathbf{W}^T \mathbf{h}_f(\mathbf{x}) - \epsilon_f = \\ &\tilde{\mathbf{W}}^T \mathbf{h}_f(\mathbf{x}) - \epsilon_f, \\ \tilde{g}_d &= \hat{g}_d - g_d = \hat{\mathbf{V}}^T \mathbf{h}_g(\mathbf{x}) - \mathbf{V}^T \mathbf{h}_g(\mathbf{x}) - \epsilon_g = \\ &\tilde{\mathbf{V}}^T \mathbf{h}_g(\mathbf{x}) - \epsilon_g. \end{aligned}$$

定义闭环系统的 Lyapunov 函数为:

$$L = \frac{1}{2} s^2 + \frac{1}{2\gamma_1} \tilde{\mathbf{W}}^T \tilde{\mathbf{W}} + \frac{1}{2\gamma_2} \tilde{\mathbf{V}}^T \tilde{\mathbf{V}}, \quad (19)$$

其中:自适应学习率 $\gamma_1 > 0, \gamma_2 > 0$ 。

对 L 求导并将公式(18)代入,可得:

$$\begin{aligned} \dot{L} &= s\dot{s} + \frac{1}{\gamma_1} \tilde{\mathbf{W}}^T \dot{\tilde{\mathbf{W}}} + \frac{1}{\gamma_2} \tilde{\mathbf{V}}^T \dot{\tilde{\mathbf{V}}} = \\ &s[\tilde{\mathbf{W}}^T \mathbf{h}_f(\mathbf{x}) - \epsilon_f + (\tilde{\mathbf{V}}^T \mathbf{h}_g(\mathbf{x}) - \epsilon_g)u - d(t) - \eta \text{sgn}(s)] - \\ &\frac{1}{\gamma_1} \tilde{\mathbf{W}}^T \dot{\tilde{\mathbf{W}}} - \frac{1}{\gamma_2} \tilde{\mathbf{V}}^T \dot{\tilde{\mathbf{V}}} = \\ &\tilde{\mathbf{W}}^T \left(\mathbf{s} \mathbf{h}_f(\mathbf{x}) - \frac{1}{\gamma_1} \dot{\tilde{\mathbf{W}}} \right) + \tilde{\mathbf{V}}^T \left(\mathbf{s} \mathbf{h}_g(\mathbf{x}) u - \frac{1}{\gamma_2} \dot{\tilde{\mathbf{V}}} \right) + \\ &s(-\epsilon_f - \eta \text{sgn}(s) - \epsilon_g u - d(t)). \end{aligned} \quad (20)$$

设计自适应算法:

$$\begin{cases} \dot{\tilde{\mathbf{W}}} = -\gamma_1 \mathbf{s} \mathbf{h}_f(\mathbf{x}) \\ \dot{\tilde{\mathbf{V}}} = -\gamma_2 \mathbf{s} \mathbf{h}_g(\mathbf{x}) u \end{cases}, \quad (21)$$

将公式(21)代入公式(20),可得:

$$\begin{aligned} \dot{L} &= s(-\epsilon_f - \eta \text{sgn}(s) - \epsilon_g u - d(t)) = \\ &(-\epsilon_f - \epsilon_g u - d(t))s - \eta |s|. \end{aligned} \quad (22)$$

由于逼近误差 ϵ_f 和 ϵ_g 能够限制得足够小,如果令 $\eta \geq |\epsilon_f + \epsilon_g u + d(t)|$, 可得 $\dot{L} \leq 0$ 。存在 $\eta_0 > 0$ 且 $\eta \geq \eta_0 + |\epsilon_{Mf}| + |\epsilon_{Mg} u| + D$, 使得

$$\dot{L} \leq -\eta_0 |s| \leq 0.$$

又因为 $L \geq 0$, 所以 $s, \tilde{\mathbf{W}}$ 和 $\tilde{\mathbf{V}}$ 有界。在实际的转子系统中,转子位移及其导数是连续有界的。

根据 LaSalle 不变性原理,转子位置误差及其导数也是有界的,并且当时间趋于无穷的时候收敛为 0,即当 $t \rightarrow \infty$ 时, $s \rightarrow 0$,从而 $e \rightarrow 0, \dot{e} \rightarrow 0$ 。此外,滑模控制律 u 、神经网络输出 \hat{f} 和 \hat{g} 、自适应律 $\dot{\hat{W}}$ 和 $\dot{\hat{V}}$ 也都是有界的。转子系统中的控制量均为有界的,因此转子控制系统为渐进稳定的。

图 7 是磁轴承径向单通道 RBF 神经网络滑模控制框图。其中 K_a 是功放增益, K_s 是传感器增益, d 为扰动。

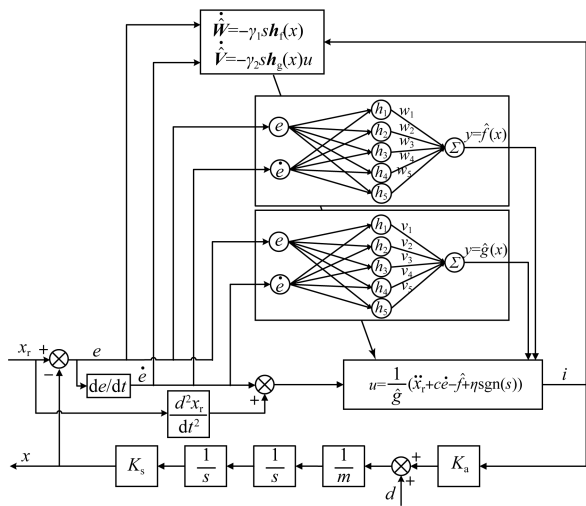


图 7 单通道 RBF 神经网络滑模控制框图

Fig. 7 Control block diagram of single channel

4 仿真和实验结果

为了验证磁悬浮转子系统在刚度系数非线性变化和干扰力的影响下,神经网络滑模控制对转子位置精确控制的有效性,本文基于 Matlab/Simulink 软件分别搭建了神经网络滑模控制系统和传统 PID 控制系统,用于比较两种方法的控制效果。首先对转子沿径向 X 轴方向平动控制进行研究,分别对比两种方法输入信号为正弦和阶跃时的位置精度。其次,在框架转动时高速转子受径向 Y 通道耦合作用和干扰影响而偏离平衡位置的情况下,对比两种方法对转子期望位置的控制精度,验证本文方法对转子高精度位置控制的有效性。利用实验平台,分别采用传统 PID 控制和神经网络滑模控制,进行径向单通道的平动控制实验和动框架效应下偏转转子位置控制实验。

为了增强对照仿真的有效性,本文利用 MATLAB 非线性最小平方函数 $lsqnonlin()$,按照最小平方指标 $J = \int e^2 dt$ 进行 PID 参数寻优,得到优化的 k_p, k_i 和 k_d ,实现 PID 整定。上下界分别为 $LB=[0 \ 0 \ 0], UN=[100 \ 100 \ 100]$,初始化参数和优化结果在表 3 给出。神经网络滑模控制方法的控制参数在表 4 给出,其中 W_0 和 V_0 是初始权值。

表 3 传统 PID 方法初始参数及优化结果

Tab. 3 Initial parameters and optimization results of general PID method

	初始参数值	优化结果
k_p	20	24.381 4
k_i	15	19.998 6
k_d	8	5.178 7

表 4 神经网络滑模控制参数

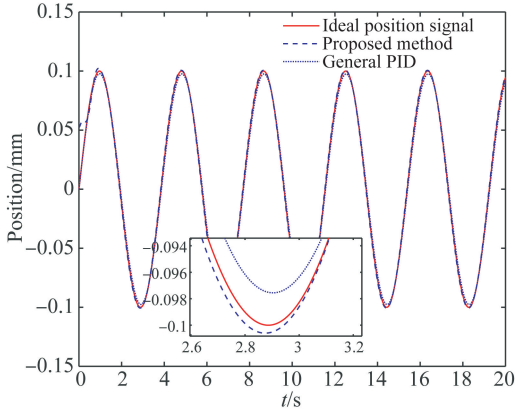
Tab. 4 Control parameters of proposed method

参数	值
c	10
η	3
γ_1	10
γ_2	1.0
c_i	$[-1.0 \ -0.5 \ 0 \ 0.5 \ 1.0]$
b_i	5.0
W_0	$[0.1 \ 0.1 \ 0.1 \ 0.1 \ 0.1]^T$
V_0	$[0.1 \ 0.1 \ 0.1 \ 0.1 \ 0.1]^T$

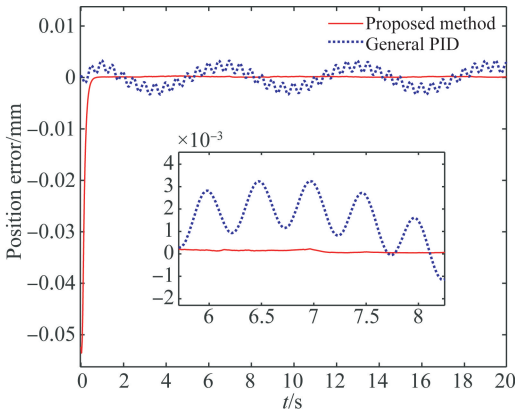
4.1 径向 X 通道平动控制仿真

本文研究的磁悬浮 CMG 框架伺服系统最大设计转速为 ± 15 ($^\circ$)/ s^2 ,即最大角速率为 1.632 8 rad/s,设置正弦输入为 $0.1 \sin 1.632 \ 8t$ mm。其仿真结果如图 8 所示(彩图见期刊电子版)。图 8(a)为两种控制方法对输入信号的控制效果,其中红色实线为理想位置,蓝色虚线为神经网络滑模控制方法,蓝色点线为传统 PID 控制方法;可以看出本文方法稳态误差更小,仅为 0.000 1 mm。图 8(b)为

两种方法的误差对比图,红色实线为本文方法的误差,蓝色点线为传统 PID 方法的误差;从中可以看出本文方法的位置误差不到传统 PID 方法的 5%。



(a)两种方法的位置对比
(a) Position comparison

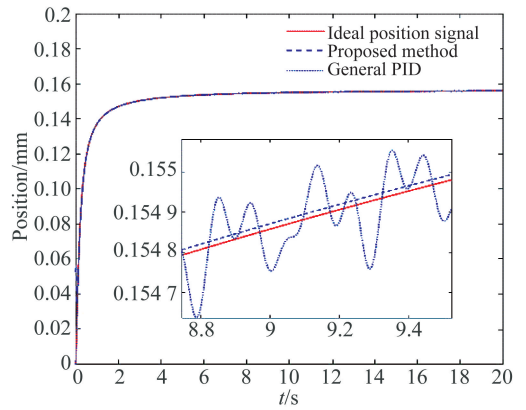


(b)位置误差对比
(b) Comparison of position error

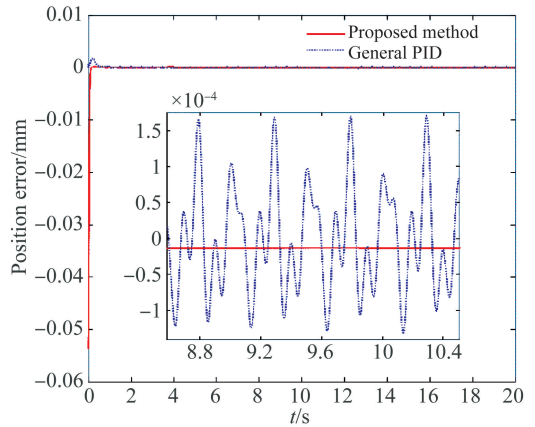
图 8 转子平动方向正弦输入控制效果

Fig. 8 Control effect of sinusoidal input in translational direction

将转子平动方向阶跃输入设置为 $0.1 \arctan 20t$, 其控制位置的仿真结果如图 9 所示(彩图见期刊电子版)。图9(a)表示两种方法对输入信号的控制效果,其中红色实线为理想位置,蓝色虚线为神经网络滑模控制方法,蓝色点线为传统 PID 控制方法;本文方法的稳态误差仅为 0.0001 mm 。图 9(b)为两种方法的误差对比图,从中可以看出传统 PID 方法控制过程转子位置存在较大幅度的波动,而本文方法波动极小。



(a)两种方法位置控制效果
(a) Position comparison



(b)位置误差对比
(b) Comparison of position error

图 9 转子平动方向阶跃输入控制效果

Fig. 9 Control effect of step input in translational direction

4.2 偏转转子位置控制仿真

为验证本方法在转子受到由框架转动及其他不确定干扰时,仍能精确控制转子,保证其稳定悬浮并输出高精度力矩,通过对比转子偏离平衡位置的位移来比较本文方法与传统方法的控制效果。

根据 CMG 的设计参数和实际运行情况,在仿真中加入偏转力模拟动框架效应,加入干扰力模拟实际运行过程中存在的奇数倍频和不确定扰动。干扰设定为:

$$d(t) = 0.2 \sin 1.632 8t + 0.1 \sin 1 570t + 0.05 \sin 4 710t + \text{random}(\sigma^2 = 0.1)(N).$$

如图 10 所示。其中 $0.2 \sin 1.632 8t$ 是使转子在径向产生偏转的干扰力, $0.1 \sin 1 570t$ 和 $0.05 \sin 4 710t$ 分别是转子在额定转速 $15 000 \text{ r/min}$ 下的同频和三倍频不平衡振动干扰, $\text{random}(\sigma^2 = 0.1)$ 是模拟实际运行过程中的随机干扰。

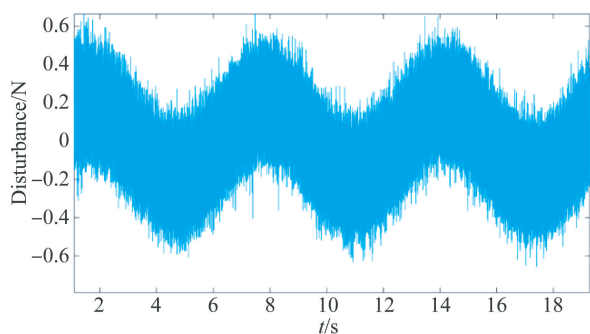
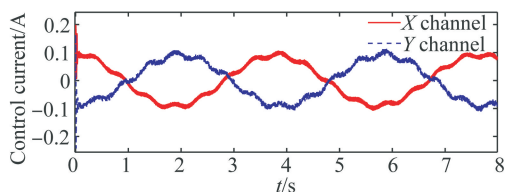
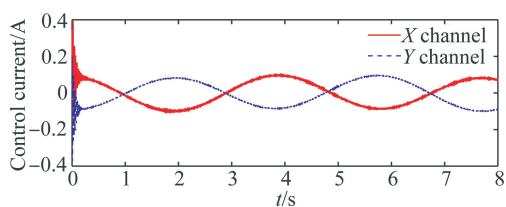


图 10 转子所受干扰力
Fig. 10 Disturbance force

当输入为正弦信号时,采用本文方法和传统 PID 控制方法的位置控制效果如图 11(a)所示(彩图见期刊电子版),其中红色实线表示理想位置,蓝色虚线表示本文方法的控制位置,蓝色点线为传统 PID 的位置。图 11(b)为两种方法误差对比,可以看出本文方法的位置误差仅为 0.000 2 mm,是传统 PID 方法的 0.5%,这说明本文方法在转子大角度偏转时仍能够保证位置的高精度控制。图 11(c)中,红色实线和蓝色虚线分别表示 X 和 Y 两通道的控制电流随时间变化情况,可以看出本文方法控制电流波动明显小于传统方法。



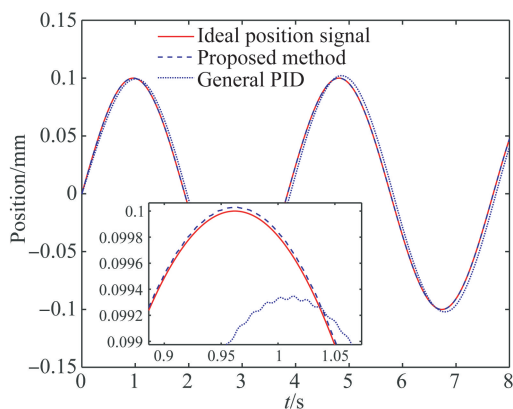
(c)本文方法和传统方法双通道控制电流

(c)Control current of proposed method and general PID method

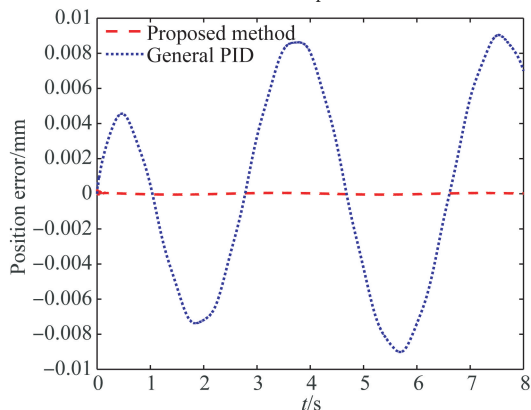
图 11 双通道偏转转子正弦输入控制效果

Fig. 11 Control effect of sinusoidal input for tilted rotor

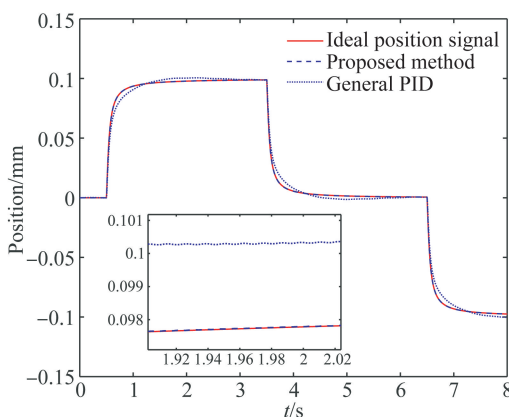
当输入为阶跃信号时,采用本文方法和传统 PID 控制方法的位置控制效果如图 12(a)所示(彩图见期刊电子版),其中红色实线表示理想位置,蓝色虚线表示本文方法的控制位置,蓝色点线为传统 PID 的位置。从图 12(b)中可以看出,本文方法的位置误差仅为传统 PID 的 0.125%,这说明当转子突然收到干扰时,本文方法仍能对转子进行高精度地位置控制。图 12(c)中,红色和蓝色实线分别表示 X 和 Y 两通道的控制电流随时间变化情况,可以看出本文为保证转子位置精度,控制电流在输入信号阶跃的时刻调整频率更高。



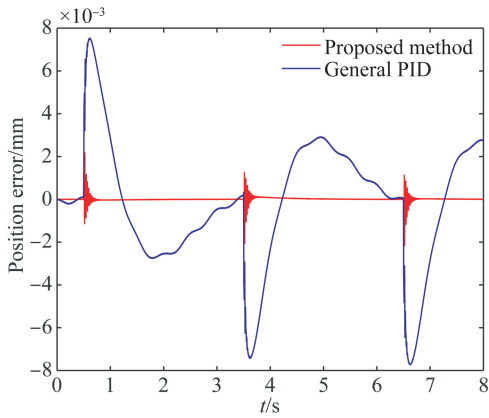
(a)两种方法的位置对比
(a)Position comparison



(b)位置误差对比
(b)Comparison of position error

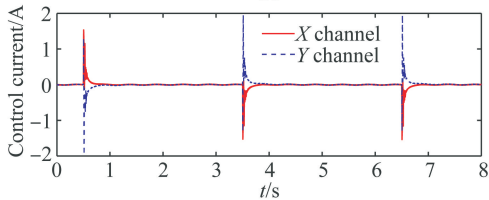
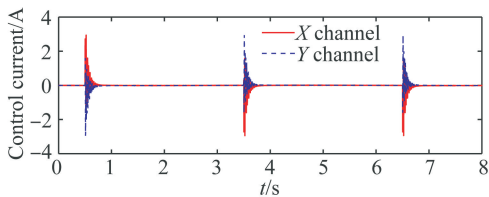


(a)两种方法的位置对比
(a)Position comparison



(b)位置误差对比

(b)Comparison of position error



(c)本文方法和传统 PID 方法双通道控制电流

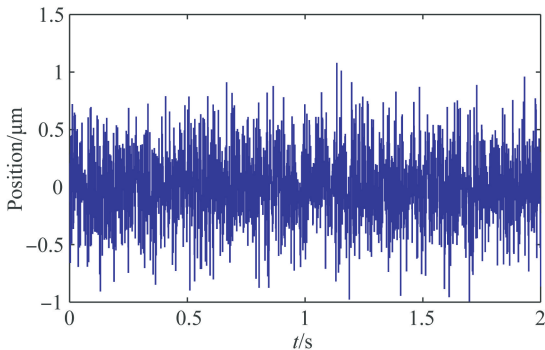
(c)Control current of the proposed method and general PID method

图 12 双通道偏转转子阶跃输入控制效果

Fig. 12 Control effect of step input for tilted rotor

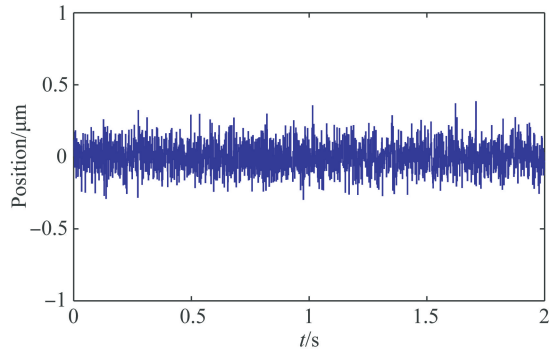
4.2 实验验证

为了验证所提出的控制方法对提高转子位置精度的有效性,类似于仿真验证的条件,分别采用传统 PID 控制和神经网络滑模控制,进行径向单通道的平动控制实验。令框架转速为 $0 (^{\circ})/s$,将转子升速至 $15\ 000\ r/min$ 。实验结果如图 13 所示。



(a)传统 PID 控制

(a)General PID method



(b)所提出方法

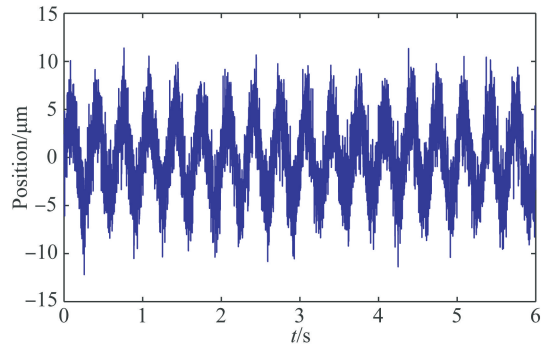
(b)Proposed method

图 13 径向单通道平动控制转子位移曲线

Fig. 13 Position curve of the rotor in translational direction

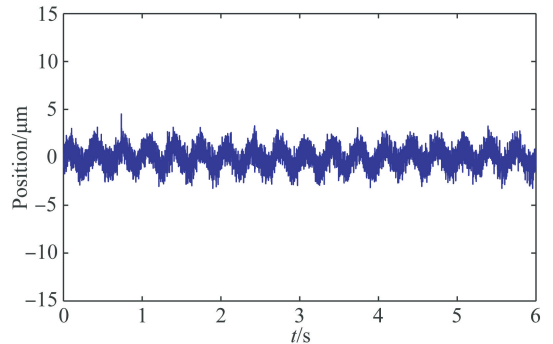
从图 13 中可以看出,传统 PID 控制方法下,转子平动位移最大可达 $1\ \mu m$,而本文所提出方法转子最大位移仅为 $0.3\ \mu m$,位置精度比传统方法提高了 70% 。

为了验证框架转动情况下,转子受动框架效应而发生偏转时的位置精度,给框架系统的频率为 $3\ Hz$,幅值为 $10 (^{\circ})/s$ 的正弦参考信号,两种控制方法下的转子位置精度如图 14 所示。从图中可以看出,动框架效应下,传统 PID 控制方法转子最大位移为 $10\ \mu m$,而本文所提方法转子最大位移为 $4\ \mu m$,转子位置精度提高了 60% 。



(a)传统 PID 控制

(a)General PID method



(b)所提出方法

(b)Proposed method

图 14 动框架时偏转转子位移曲线

Fig. 14 Position of the tilted rotor under moving-gimbal effect

上述实验结果与仿真结果相符甚佳。然而,与仿真结果相比,在转子位移曲线中存在更加明显地高频振荡,并且实验中的位置误差更大。原因是在实际系统中还存在更多的不确定干扰和传感器噪声等因素。仿真和实验结果均验证了神经网络滑模控制方法可以有效提高 MSCMG 的转子位置精度。

5 结 论

磁悬浮控制力矩陀螺通过改变角动量方向输出控制力矩,具有高精度、输出力矩大等特点,能够对航天器进行高精度姿态控制。实现磁悬浮转子的高精度位置控制可以大大提高转子系统的稳定性和悬浮精度,这是磁悬浮 CMG 能够输出高精度控制力矩的前提之一。高速转子存在陀螺效应和不平衡振动,在干扰下更容易出现位移偏差,增加控制难度。当框架转动时,转子会较大程度偏离平衡位置,导致磁轴承间隙发生变化,这会引起位移刚度和电流刚度的非线性变化,从而使磁力发生非

线性改变,降低转子位置精度,影响转子稳定悬浮,进一步影响磁悬浮 CMG 的输出力矩精度。

为解决上述问题,本课题针对非线性磁力模型,分析了位移刚度和电流刚度的非线性变化对磁力的影响;建立了磁悬浮转子二阶非线性不确定系统模型;设计了适用于转子径向平动控制和偏转情况下位置控制的神经网络滑模控制算法,并进行了仿真研究。在转子单通道平动控制中,与传统 PID 方法仿真结果对比,本文方法的稳态误差为 0.000 1 mm,不到传统 PID 方法的 5%,表明该方法有效提高了转子稳定悬浮的位置精度和抑制干扰能力;在考虑径向各通道耦合的偏转转子位置控制仿真中,与传统交叉反馈方法结果对比,本文方法稳态误差 0.000 2 mm,仅为交叉反馈方法的 0.125%,表明该方法能够更加有效地抑制陀螺效应,并提高转子的位置精度。实验结果表明,与传统 PID 方法相比,所提出方法的转子位置精度提高了 60% 以上。综合以上结果,证明了神经网络滑模控制能够更好地解决磁轴承系统的非线性问题。

参考文献:

- [1] 房建成,任元. 磁悬浮控制力矩陀螺技术 [M]. 北京:国防工业出版社,2014:18-24.
FANG J CH, REN Y. *Magnetically Suspended Control Moment Gyroscope Technology* [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2014:18-24. (in Chinese)
- [2] FANG J, REN Y. High-precision control for a single-gimbal magnetically suspended control moment gyro based on inverse system method [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2011, 58 (9): 4331-4342.
- [3] 韩邦成,贺赞,翟鲁鑫,等. 单框架磁悬浮控制力矩陀螺的损耗计算及热-结构耦合分析 [J]. 光学精密工程, 2018, 26 (10): 2463-2474.
HAN B CH, HE Z, ZHAI L X, et al.. Loss calculation and thermal structural coupling analysis of a single gimbal magnetically suspended control moment gyroscope [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2018, 26(10): 2463-2474. (in Chinese)
- [4] 谢进进,刘刚,文通. 双框架磁悬浮控制力矩陀螺磁轴承负载力矩复合补偿的控制 [J]. 光学精密工程, 2015, 23 (8): 2211-2219.
XIE J J, LIU G, WEN T. Composite compensation for load torque of active magnetic bearing in DGM-
- [5] 汤继强,赵韶璞,王闯. 磁悬浮控制力矩陀螺锁紧机构可靠性设计及优化 [J]. 光学精密工程, 2018, 26 (3): 597-605.
TANG J Q, ZHAO SH P, WANG K. Reliability design and structural optimization of locking device for magnetic suspension control moment gyro [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2018, 26 (3): 597-605. (in Chinese)
- [6] 李海涛,侯林,韩邦成. 双框架磁悬浮控制力矩陀螺框架系统的扰动抑制 [J]. 光学精密工程, 2019, 27 (4): 868-878.
LI H T, HOU L, HAN B CH. Disturbance rejection for the DGMSCMG's gimbal system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2019, 27 (4): 868-878. (in Chinese)
- [7] CHEN X C, CAI Y W, REN Y. Spacecraft attitude control and vibration suppression integration based on single gimbal magnetically suspended control moment gyroscope pyramid configuration [J]. *Proc IMechE Part C: J Mechanical Engineering Science*, 2019, 233(8): 2673-2684.
- [8] ZHENG S Q, YANG J Y, SONG X D, et al.. Tracking compensation control for nutation mode of high-speed rotors with strong gyroscopic effects [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2018, 65(5): 4156-4165.

- [9] CUI P L, ZHANG H J, YAN N, *et al.*. Performance testing of a magnetically suspended double gimbal control moment Gyro based on the single axis air bearing table [J]. *Sensors*, 2012, 12(7): 9129-9145.
- [10] ZHANG Y, ZHANG J R. Disturbance characteristics analysis of CMG due to imbalances and installation errors [J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2014, 50(2): 1017-1026.
- [11] SUN J J, JU Z Y, REN H L. Finite element simulation of a passive magnetic robotic system [J]. *International Journal Of Robotics & Automation*, 2017, 32(1): 87-92.
- [12] SUN J, ZHOU H, MA X, *et al.*. Study on PID tuning strategy based on dynamic stiffness for radial active magnetic bearing [J]. *ISA Transactions*, 2018, 80: 458-474.
- [13] 魏彤, 房建成. 磁悬浮控制力矩陀螺的动框架效应及其角速率前馈控制方法研究 [J]. *宇航学报*, 2005, 26(1): 19-23.
WEI T, FANG J CH. Moving-gimbal effects and angular rate feedforward control in magnetically suspended rotor system of CMG [J]. *Journal of Astronautics*, 2005, 26(1): 19-23. (in Chinese)
- [14] CHEN J F, LIU K, CHEN X F. Modeling and low power control of active magnetic bearings system [C]. *International Conference on Modelling, Identification and Control. IEEE*, 2011: 319-324.
- [15] SCHUHMANN T, HOFMANN W, WERNER R. Improving operational performance of active magnetic bearings using Kalman filter and state feedback control [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2012, 59(2): 821-829.
- [16] 魏彤, 房建成. 磁悬浮控制力矩陀螺磁轴承的变工作点线性化自适应控制方法 [J]. *机械工程学报*, 2007, 43(6): 110-115.
WEI T, FANG J CH. Adaptive control based on variant operating-point linearization in magnetic bearings of MSCMG [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2007, 43(6): 110-115. (in Chinese)
- [17] GHAZAVI M R, SUN Q. Bifurcation onset delay in magnetic bearing systems by time varying stiffness [J]. *Mechanical Systems & Signal Processing*, 2017, 90: 97-109.
- [18] DEFOY B, ALBAN T, MAHFOUD J. Experimental assessment of a new fuzzy controller applied to a flexible rotor supported by Active Magnetic Bearings [J]. *Journal of Vibration and Acoustics*, 2012, 136(5): 1-10.
- [19] CHU C T, CHIANG H K. Adaptive sliding mode recurrent gauss basis function neural network estimation in magnetic bearing system [J]. *Information Technology Journal*, 2014, 13(6): 1161-1167.
- [20] CHEN SY, LIN F J. Decentralized PID neural network control for five degree-of-freedom active magnetic bearing [J]. *Eng Appl Artif Intel*, 2013, 26(3): 962-973.
- [21] YANG Z X, ZHAO G S, RONG H J, *et al.*. Adaptive backstepping control for magnetic bearing system via feedforward networks with random hidden nodes [J]. *Neurocomputing*, 2016, 174: 109-120.
- [22] SUN X D, SU B K, CHEN L, *et al.*. Precise control of a four degree-of-freedom permanent magnet biased active magnetic bearing system in a magnetically suspended direct-driven spindle using neural network inverse scheme [J]. *Mech Syst Signal Pr*, 2017, 88: 36-48.
- [23] WAI R J, CHEN M W, YAO J X. Observer-based adaptive fuzzy-neural-network control for hybrid maglev transportation system [J]. *Neurocomputing*, 2016, 175: 10-24.
- [24] LIN F J, CHEN S Y, HUANG MS. Intelligent double integral sliding-mode control for five-degree-of-freedom active magnetic bearing system [J]. *IET control theory & applications*, 2011, 5(11): 1287-1303.

作者简介:



崔旭(1992—),男,河北廊坊人,硕士研究生,2016年于燕山大学获得学士学位,主要从事磁悬浮控制力矩陀螺磁轴承控制方面的研究。E-mail: cuixu@buaa.edu.cn

导师简介:



汤继强(1972—),男,重庆人,博士后,副教授,硕士生导师,2005年于哈尔滨工程大学获得博士学位,主要从事磁悬浮飞轮及磁悬浮控制力矩陀螺技术的研究。E-mail: tjq_72@163.com