

文章编号: 1673-3193(2024)03-0340-08

基于迭代策略的自适应ADRC磁轴承控制仿真

孙咏叶^{1,2}, 张艳兵^{1,2}, 刘鹏^{1,2}

(1. 中北大学 电气与控制工程学院, 太原 030051;

2. 中北大学 仪器科学与动态测试教育部重点实验室, 山西 太原 030051)

摘要: 针对磁悬浮轴承位置控制过程中存在非线性耦合、内外部扰动不确定性的问题, 提出了一种基于自抗扰控制的四自由度磁轴承迭代学习控制策略。首先依据四自由度磁悬浮轴承系统模型搭建自抗扰控制器, 其次将估计的总扰动通过间接迭代控制在线调整扩张状态观测器的带宽, 实现不同增益下观测器参数的自适应整定。Simulink仿真实验数据表明: 系统约在0.14 s处达到稳定, 加入干扰后约0.05 s恢复稳定; 基于迭代控制的自适应ADRC四自由度磁悬浮轴承控制性能好, 同时调节速度快, 具有较强的抗干扰能力。经比例-微分型间接迭代学习控制律在线更新带宽后, 超调量小且跟踪目标误差积分性能指标小。

关键词: 四自由度磁悬浮轴承; 自抗扰控制; 间接迭代学习控制; 扩张状态观测器; 带宽

中图分类号: TP242.6

文献标识码: A

doi: 10.3969/j.issn.1673-3193.2024.03.012

引用格式: 孙咏叶, 张艳兵, 刘鹏. 基于迭代策略的自适应ADRC磁轴承控制仿真[J]. 中北大学学报(自然科学版), 2024, 45(3): 340-347.

SUN Yongye, ZHANG Yanbing, LIU Peng. Simulation of adaptive adrc magnetic bearing control based on iterative strategy[J]. Journal of North University of China(Natural Science Edition), 2024, 45(3): 340-347.

Simulation of Adaptive ADRC Magnetic Bearing Control Based on Iterative Strategy

SUN Yongye^{1,2}, ZHANG Yanbing^{1,2}, LIU Peng^{1,2}

(1. School of Electrical and control engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China;

2. Key Laboratory of Instrumentation Science & Dynamic Measurement(North University of China), Ministry of Education, Taiyuan 030051, China)

Abstract: Aiming to address the issues of nonlinear coupling and internal/external disturbance uncertainties in the position control process of magnetic levitation bearings, a four-degree-of-freedom magnetic bearing iterative learning control strategy based on ADRC was proposed. The self-disturbance controller was constructed based on the four-degree-of-freedom magnetic levitation bearing system model. The estimated total disturbance was adjusted online through indirect iterative control to achieve adaptive tuning of observer parameters under different gains by adjusting the bandwidth of the state observer. The Simulink simulation experimental data shows that the system reaches stability at about 0.14 s, and returns to stability after adding interference for about 0.05 s; The adaptive ADRC four degree of freedom magnetic levitation bearing based on iterative control has good control performance, fast adjustment speed, and strong anti-interference ability. After updating the bandwidth online using the PD-type indirect iterative learning

收稿日期: 2023-07-26

作者简介: 孙咏叶(1999-), 男, 硕士生, 主要从事磁悬浮轴承控制策略的研究。

通信作者: 张艳兵(1973-), 男, 副教授, 博士, 主要从事控制理论与控制工程方面的研究。E-mail: zhybg_1126@nuc.edu.cn。

control law, the overshoot is small, and the tracking target error integral performance index is small.

Key words: 4-DOF magnetic levitation bearing; active disturbance rejection control; indirect iterative learning control; extended state observer; bandwidth

0 引言

磁悬浮轴承(以下简称磁轴承)相比机械轴承具有无直接接触、无需润滑且噪音小等特性,在真空、高速环境中能发挥重要的作用^[1]。以主动轴承为主的磁轴承现已在飞轮储能、透平机械、风力发电等领域获得了广泛应用^[2-5]。磁轴承运行过程中需对轴向及径向轴承进行控制,从而使得转子能够高速稳定旋转^[6]。磁轴承位置控制有单、多自由度两类,单自由度位置控制相对简单^[7],而多自由度磁轴承位置控制是当前研究的热点^[8]。

PID 控制^[9]作为工业应用中的一种经典算法广泛应用于磁轴承位置控制,而各类控制理论如滑模控制、神经网络控制^[10-12]等算法的应用也进一步提升了磁轴承控制系统的性能。但是,依据上述算法设计磁轴承控制器时,因高阶磁轴承的模型的非线性耦合、系统外部扰动过大和系统内部存在不确定性因素等问题,难以搭建准确的系统模型,实验对象的控制效果及稳定性较差。针对上述问题,韩京清^[13]提出了一种自抗扰控制(Active Disturbance Rejection Control, ADRC)算法,ADRC 框架由跟踪微分器(Tracking Differentiator, TD)、非线性状态误差反馈控制律(Nonlinear State Error Feedback, NLSEF)、扩张状态观测器(Extended State Observer, ESO)三部分组成。ADRC 将系统外部扰动和内部模型不确定性视为总扰动,对系统模型准确度要求低,通过 ESO 抵消总扰动来实现预期动态性能;ESO 带宽常取固定值,面对小扰动时瞬态响应速度慢^[14]。结合间接迭代学习控制(Iterative Learning Control, ILC)^[15]在线更新 ADRC 控制器带宽,构建自适应 ADRC 磁轴承控制器,使得带宽与系统内外外部扰动引入的误差成正比^[16],并且通过 ESO 带宽的更新可使跟踪误差在整个时间域上足够小^[17]。

综上所述,为提高搭建系统模型的准确性,减少扰动误差对系统控制效果的不利影响,本文提出一种基于 ADRC 的四自由度磁轴承迭代学习控制器,该控制器通过预估并抵消总扰动的方式实现系统控制,对所需系统模型和误差模型准确

度要求低,有效提升系统的控制性能。

1 四自由度磁悬浮轴承系统数学模型

一般磁轴承用电磁力悬浮转子,整体由转子、定子、控制器和监测设备等组成。传感器监测转子运转过程中的位置信息并传输信号至控制器,通过改变定子中的电流大小来控制电磁力,使转子平稳运转并保持在中心位置。转子系统如图 1 所示。视转子在径向、轴向自由度上对称,以转子中心 O 为原点,建立模型坐标系。

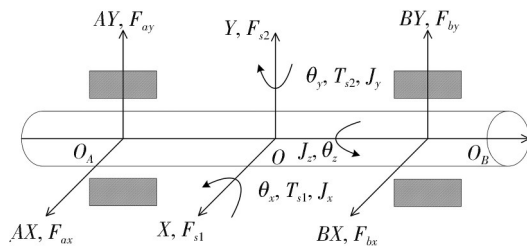


图 1 磁轴承转子系统简化图

Fig. 1 Simplified diagram of magnetic bearing rotor system

图 1 中: $F_{ax}, F_{bx}, F_{ay}, F_{by}$ 为沿轴承各方向上的磁轴承力; J_x, J_y, J_z 分别为转子在 x, y 和 z 轴上的转动惯量; θ_x, θ_y 为转子绕 x 轴和 y 轴的角位移; F_{s1} 和 F_{s2} 为模型误差; l_a, l_b 为 O 距离两个径向自由度中心的长度; T_{s1}, T_{s2} 为外部干扰力矩。

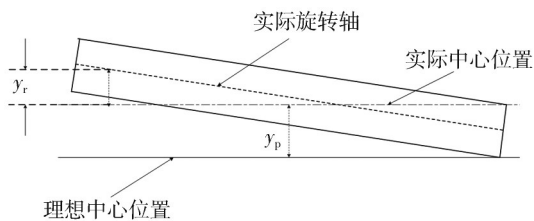


图 2 磁轴承转子系统动态简图

Fig. 2 Dynamic diagram of magnetic bearing rotor system

图 2 为磁轴承转子系统动态简化图。转子系统一般由轴向、径向两部分组成。现不考虑轴向、径向自由度之间的耦合效应以及外部未知阻力的影响,将径向力集中于转子中心上,并将 OA 和 OB 上的径向位移转换为对中心的平移和倾斜位移, y_p 为转子中心 O 在 y 轴上的平移位置, y_r 为转子中心 O 在 y 轴上的转动位移。四自由度磁轴承转子系统模型为

$$\begin{cases} m\ddot{x}_p = F_{xp} + 2k_x x_p + F_{s1}, \\ m\ddot{y}_p = F_{yp} + 2k_y y_p + F_{s2}, \\ \ddot{x}_r = \frac{RJ_z}{J_x} \dot{y}_r + \frac{2k_x l^2}{J_x} x_r + \frac{l^2}{J_x} F_{xr} + \frac{T_{s1}}{J_x}, \\ \ddot{y}_r = \frac{RJ_z}{J_y} \dot{x}_r + \frac{2k_y l^2}{J_y} y_r + \frac{l^2}{J_y} F_{yr} + \frac{T_{s2}}{J_y}, \end{cases} \quad (1)$$

式中: m 为转子质量; F_{xp} , F_{yp} 分别为 x 轴和 y 轴平移方向上的合力; F_{xr} , F_{yr} 分别为 x 轴和 y 轴转动方向上的合力; k_x 为位移系数; x_p , y_p 为转子中心 O 在 x 轴、 y 轴上的平移位移; x_r , y_r 为转子中心 O 在 x 轴、 y 轴上的转动位移; R 为定子上的绕组电阻。

2 基于迭代学习的自抗扰控制器设计

2.1 ADRC 控制器设计

传统 PID 控制通过考察误差比例、积分、微分来调节系统, 由于非线性系统模型不精确, 其瞬态响应性能较差。ADRC 思想是改进 PID 对不确定性补偿时需要辨识非线性函数模型这一复杂环节, 系统的内部不确定性和外部扰动不再视作可计算的具体模型, 而是视为“微分信号”。设计 TD 将这部分未知的总扰动视作系统输出, 根据微分信号的实时值并利用 ESO 在线估计实现补偿。

将转子系统模型中的各状态变量表达为

$$\ddot{x} = bu + d, \quad (2)$$

式中: u 为控制量; b 为可调参数; d 为系统估计的总扰动。

参考上述状态变量表达式搭建 ADRC 控制器, 设计 TD 识别、跟踪微分信号, 设计 ESO 用于连续估计系统的总扰动并补偿, 设计 NLSEF 替代传统 PID 控制器来抵消误差。

1) 跟踪微分器 TD

TD 一般作为一种过渡过程, 主要用作微分信号的识别和跟踪, 其滤波性能可提高控制稳定性, 降低系统误差。TD 表达式为

$$\begin{cases} x_1(k+1) = x_1(k) + h \cdot x_2(k), \\ x_2(k+1) = x_2(k) + h \cdot fh, \\ fh = fhan(x_1(k) - y_1(k), x_2(k), r_0, h_0). \end{cases} \quad (3)$$

$fhan$ 函数为

$$\begin{cases} d = r_0 h_0^2, \\ a_0 = h_0 x_2(k), \\ y = (x_1(k) - y_1(k)) + a_0, \\ a_1 = \sqrt{d(d + 8|y|)}, \\ a_2 = a_0 + \text{sign}(y)(a_1 - d)/2, \\ s_y = [\text{sign}(y + d) - \text{sign}(y - d)]/2, \\ a = (a_0 + y - a_2)s_y + a_2, \\ s_a = [\text{sign}(a + d) - \text{sign}(a - d)]/2, \\ fhan = -r_0[a/d - \text{sign}(a)]s_a - r_0 \text{sign}(a), \end{cases} \quad (4)$$

式中: y_1 为期望输入; x_1 是对 y_1 的估计; x_2 是对 y_1 的微分; 参数 r_0 , h_0 是函数的可调控制参量; r_0 为快速因子, 取值与 TD 跟踪速度相关, 需要注意的是噪声随着跟踪速度的提升有明显增大; h_0 为滤波因子, 合理取值能获取良好的滤波性能。

2) 扩张状态观测器 ESO

ESO 用于连续估计系统总扰动, 反馈系统变量, 解决系统模型的不准确问题、减少系统模型与真实模型的误差, 减少不确定性因素。依据式(2), 设计 ESO 为

$$\begin{cases} e(k) = z_1(k) - y_1(k), \\ z_1(k+1) = z_1(k) - h[z_2(k) - \beta_{01}e(k)], \\ z_2(k+1) = z_2(k) + h(z_3(k) - \beta_{02}fal(e, \delta, \delta) + bu), \\ z_3(k+1) = z_3(k) - h\beta_{03}fal(e, \delta, \delta), \\ \beta_{01} = 3\omega_0, \beta_{02} = 3\omega_0^2, \beta_{03} = \omega_0^3. \end{cases} \quad (5)$$

$$fal(e, \delta, \delta) = \begin{cases} \frac{e}{\delta^{(1-\delta)}} & |e| \leq \delta, \\ \text{sign}(x)|x|^\delta & |e| > \delta, \end{cases} \quad (6)$$

式中: 将被控对象输出 u 和转子在 x 轴上的位移 x 视为 ECO 模块的输入; 输出为 z_1 , z_2 和 z_3 ; z_1 , z_2 为对 x_1, x_2 的估计; z_3 为对总扰动的估计; ω_0 为 ESO 带宽; β_{01} , β_{02} 和 β_{03} 为 ESO 反馈增益, 一般选取固定带宽; δ 为 fal 函数在线性区间的宽度值。

3) 非线性状态误差反馈控制律 NLSEF

NLSEF 将误差信号转换成非线性函数来进行消除, 是一种可替代传统 PID 控制器的非线性

组合, 数学表达式为

$$\begin{cases} e_1 = x_1(k+1) - z_1(k+1), \\ e_2 = x_2(k+1) - z_2(k+1), \\ u(k) = \frac{-fhan(e_1, ce_2, r_1, h_1) - z_3(k+1)}{b_0}, \end{cases} \quad (7)$$

式中: c 为阻尼因子; h_1 为精度因子; 可提高跟踪性能; b_0 为系统可调增益参数。

系统建模为四自由度转子模型, 设计单自由度控制器作为分路控制, 磁轴承的 ADRC 位置控制器如图 3 所示。

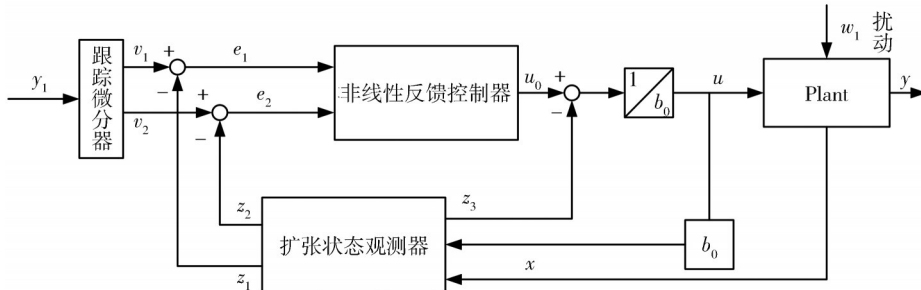


图 3 四自由度磁轴承 ADRC 分路控制器

Fig. 3 Four degree of freedom magnetic bearing ADRC shunt controller

2.2 PD 型间接迭代控制器设计

因 ADRC 中 ESO 带宽常取固定值 ω_e , 故系统瞬态性能不足, 由式(8)^[17]可知, 调节 ESO 参数 ω_e 可增强整个控制过程中信号跟踪能力。

$$\|y(t) - y_1(t)\| \leq \gamma \frac{\max\{\ln \omega_e\}}{\omega_e}, \quad \forall t \geq t_0. \quad (8)$$

不等式左侧为跟踪误差, 右侧为误差线性函数模型。

针对四自由度磁轴承 ADRC 控制器带宽相同的问题, 采用间接迭代学习控制来在线更新 ADRC 带宽, 实现不同初始误差和不同扰动下的自适应 ADRC 位置控制。

ILC 适合单一重复运行的系统, 因其对系统模型精度要求低、能实现被控对象在一定时间内对给定期望轨迹的精确跟踪, 可用于磁轴承控制。该算法如图 4 所示。

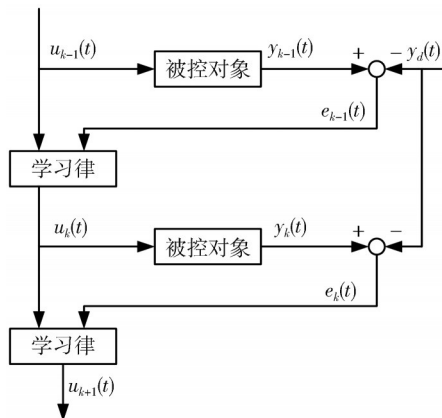


图 4 迭代学习算法

Fig. 4 Iterative learning algorithm

视磁轴承系统为连续系统, 状态向量为 n 维向量 $x(t)$, 输出为 $y(t)$, 在时间 $[0, T]$ 上运行, 次数为 k , 其中 $k=0, 1, 2, \dots$, 系统可表示为

$$\begin{cases} \dot{x}_k(t) = f(x_k(t), u_k(t), t), \\ y_k(t) = g(x_k(t), t). \end{cases} \quad (9)$$

常见的迭代控制律为

$$u_{k+1}(t) = u_k(t) + K\dot{e}_k(t). \quad (10)$$

定义迭代误差为

$$e_k(t) = y_d(t) - y_k(t). \quad (11)$$

迭代控制学习律由当前控制 $u_k(t)$ 和迭代误差 $e_k(t)$ 构建并生成下次进程的输入 $u_{k+1}(t)$, 目前常用的迭代学习控制主要是直接设计控制信号作用于被控系统, 控制过程中并不能更新观测器参数, 为直接型迭代控制。为了在线更新观测器带宽, 采用间接迭代学习控制, 不直接调控系统, 而是用于更新系统反馈控制器增益, 实现观测器带宽随迭代进程的自适应调节。

为降低初始误差对系统瞬态性能的影响, 使用反馈控制器稳定系统, PD 型迭代学习律为

$$u_{k+1}(t) = u_k(t) + \Phi e_k(t) + \Gamma \dot{e}_k(t), \quad (12)$$

式中: Φ, Γ 通常为固定增益矩阵。

通过间接迭代学习控制来在线更新 ADRC 中 ESO 的带宽 ω_0 , 构建自适应 ADRC 磁轴承控制器, 基于间接迭代学习控制的 ADRC 磁轴承控制器如图 5 所示。图中, 输入 y_1 为转子中心距 x , y 轴的期望位移, 输出为位移传感器的观测信号, 系统将实际位移值反馈给 ADRC 和间接迭代学习控制器。依据式(11), 输出下一次控制量 u_{k+1} , 即

本次迭代进程中的ESO带宽 ω_0 。ADRC控制器结合迭代更新后的带宽,给定控制量 u 。

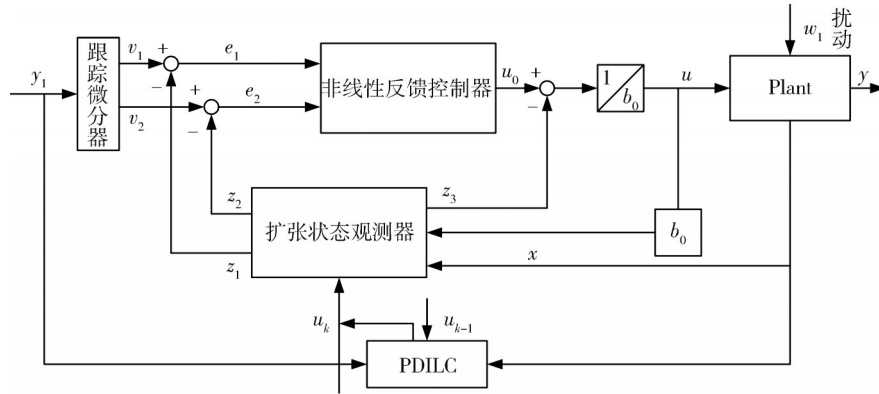


图5 基于间接迭代控制的ADRC磁轴承控制器

Fig. 5 ADRC magnetic bearing controller based on indirect iterative learning control

适用于系统(9)的ESO可设计成

$$\begin{cases} e = \hat{z}_1 - y_1, \\ \dot{\hat{z}}_1 = \hat{z}_1 - \beta_{01}e, \\ \dot{\hat{z}}_2 = \hat{z}_2 - \beta_{02}fal(e, \delta, \delta) + b_0u_2, \\ \dot{\hat{z}}_3 = -\beta_{03}fal(e, \delta, \delta), \end{cases} \quad (13)$$

$$\begin{cases} \dot{Z} = AZ + Bu - De, \\ e = CZ - Y, \end{cases} \quad (14)$$

式中: A 为单位矩阵, 矩阵 $B = \begin{bmatrix} -1 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$, 矩阵

$$L = \begin{bmatrix} \beta_{01} & 0 & 0 \\ 0 & \beta_{02} & 0 \\ 0 & 0 & \beta_{03} \end{bmatrix}, C = 1.$$

应用迭代控制需保证系统自身的跟踪性能, 下面证明PD型迭代跟踪误差的收敛性。

引理^[18] 迭代初态固定输入 $u_k(t)$, 与期望轨迹 $x_d(0)$ 不一致时, 系统需满足条件:

- 1) $\|(1 - C)BF\| \leq \rho < 1$;
- 2) $x_k(0) = x_0, y_k(0) = y_d(0)$ 。

当迭代次数 k 趋于无穷时, 有 $y_k(t) \rightarrow y_d(t)$, 其中, $y_d(t)$ 为期望输出。

收敛性证明如下:

依据式(10)、式(11)可得第 $k+1$ 次迭代误差为

$$e_{k+1}(t) - e_k(t) = u_d(t) - u_{k+1}(t) = u_d(t) - (u_k(t) + \Phi e_k(t) + \Gamma \dot{e}_k(t)). \quad (15)$$

等式左边为跟踪误差, 右边为系统期望输出信号。由式(11)、式(14)得输出误差为

$$e_k(t) = y_d(t) - y_k(t) = C(z_d(t) - z_k(t)). \quad (16)$$

求得微分方程 $\dot{X}_k(t) = Ax_k(t) + Bu_k(t)$ 的

解为

$$X_k(t) = Ce^{At} + \int_0^t e^{A(t-\tau)} B(\tau) u_k(\tau) d(\tau). \quad (17)$$

将式(17)代入式(16)得

$$e_k(t) = \int_0^t Ce^{A(t-\tau)} Bu_k(\tau) d(\tau). \quad (18)$$

两边同时求导并取范数得

$$e^{-\lambda t} \|\Delta u_{k+1}(t)\| \leq \|I - \Gamma CB\| e^{-\lambda t} \|\Delta u_k(t)\| + B_{\text{sup}} \int_0^t e^{-\lambda(t-\tau)} e^{-\lambda \tau} \|\Delta u_k(\tau)\| d\tau. \quad (19)$$

令 $\rho = \|I - \Gamma CB\| + B_{\text{sup}} \frac{1 - e^{-\lambda t}}{\lambda}$, 根据范数运算简化式(19)得

$$\|\Delta u_{k+1}(t)\|_{\lambda} \leq \rho \|\Delta u_k(t)\|_{\lambda} \leq \|\Delta u_k(t)\|. \quad (20)$$

由引理知, 当存在 $\rho < 1$, 使得 $k \rightarrow \infty$, 故所设计的迭代跟踪误差收敛。证毕。

3 仿真研究

本文使用PD型间接迭代学习控制律对ESO的带宽进行在线更新, 搭建自适应ADRC磁轴承控制器, 为验证所提控制器的性能, 采用Simulink进行仿真研究, 自适应ADRC算法仿真框图如图6所示。研究内容包括PID算法、ADRC算法、本文所设计自适应ADRC算法的阶跃响应, 以及自适应ADRC算法的扰动仿真。仿真初始数据如表1、表2所示。具体地, 磁轴承仿真参数的初始值如表1所示, ADRC仿真参数的初始值如表2所示。PID的初始参数值 $k_p = 45, k_i = 5, k_d = 110$; 自适应ADRC算法的迭代次数 $k = 5$ 。

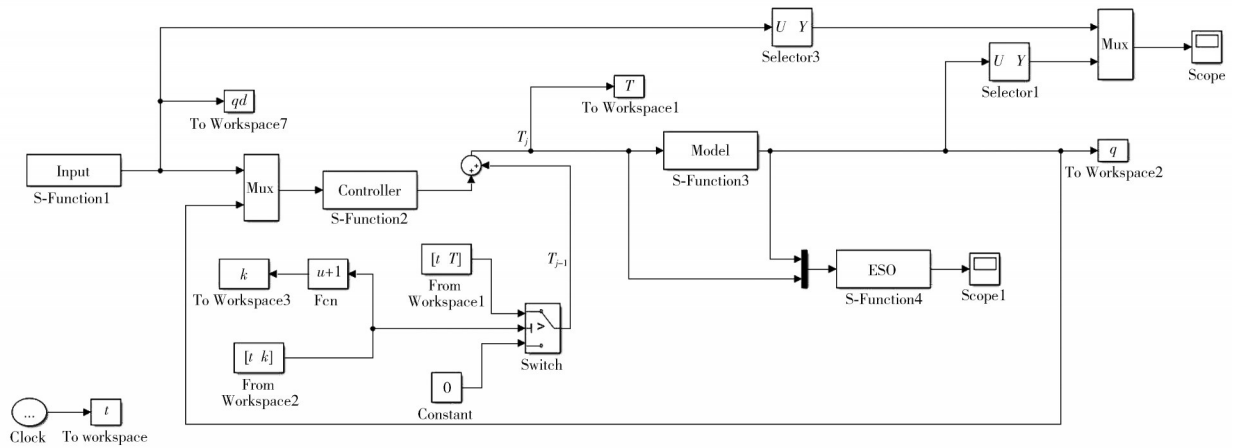


图 6 自适应 ADRC 算法的仿真框图

Fig. 6 Simulation block diagram of adaptive ADRC

表 1 磁轴承参数

Tab 1 Magnetic bearing parameters

参数	数值
转子质量 m/kg	12.5
位移系数 $k_z/(\text{N}\cdot\text{m}^{-1})$	7.4×10^5
绕 X 轴转动惯量 $J_x/(\text{kg}\cdot\text{m}^2)$	0.08
绕 Y 轴转动惯量 $J_y/(\text{kg}\cdot\text{m}^2)$	0.08
绕 Z 轴转动惯量 $J_z/(\text{kg}\cdot\text{m}^2)$	0.02
绕组电阻 R/Ω	12

表 2 控制器参数

Tab 2 Controller parameters

参数	δ	b_0	r_0	h_0	c
数值	0.05	1	2	0.02	1
参数	r_1	h_1	Φ	Γ	
数值	100	0.2	2	54	

阶跃响应仿真如图 7 所示。

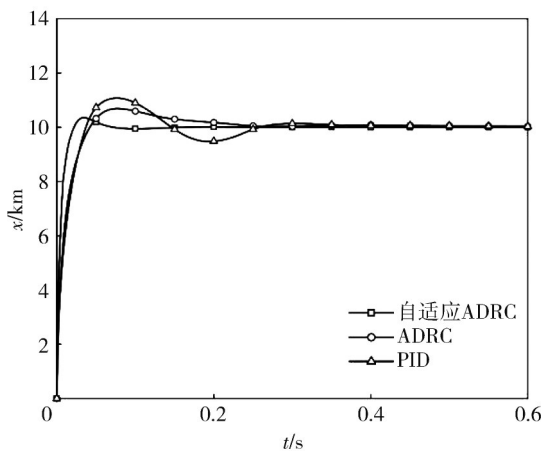


图 7 阶跃响应曲线

Fig. 7 Step response curve

图 7 中的 3 条曲线分别代表 PID 算法、ADRC 算法和自适应 ADRC 算法。参考转子中心 O 在 x 轴方向上的转动位移, 由图 7 可知: PID 算法响应曲线约在 0.28 s 处稳定, 超调量约 13%; ADRC 算法响应曲线在 0.22 s 处稳定, 超调量约 7%; 自适应 ADRC 算法响应曲线在 0.14 s 处稳定, 超调量约 3%。因此, 所提算法响应速度更快, 稳定性好, 满足系统响应性能要求, 具有更好的控制效果。

系统在 0.36 s 处加入扰动负载, 通过仿真图 8 可知: 系统经过约 0.05 s 恢复稳定, 本文所提自适应 ADRC 算法对磁轴承位置控制具有较强的抗扰能力。

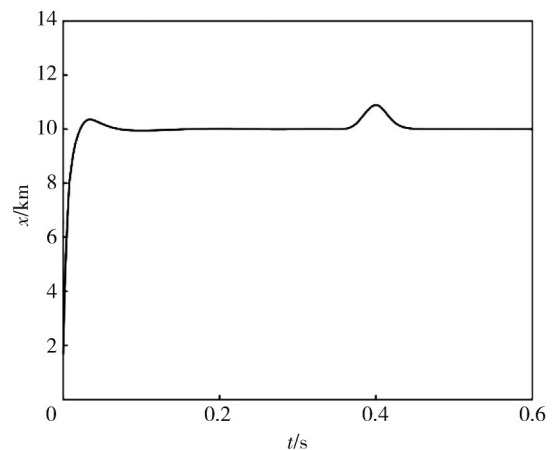


图 8 系统在 0.36 s 处加入扰动的仿真图

Fig. 8 Simulation diagram adding disturbance to the system at 0.36 s

图 9 为误差值总和曲线, 由图可知, 经闭环 PD 型间接迭代学习算法多次迭代后, 误差积分性能指标小, 系统调节时间较短。

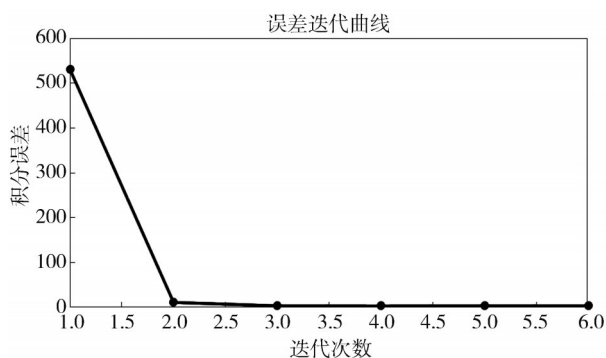


图9 跟踪误差值总和曲线

Fig. 9 Sum curve of tracking error value

4 结 论

为研究四自由度磁轴承的位置控制,简化并搭建了磁轴承四自由度模型,文中提出了一种基于ADRC四自由度磁轴承迭代控制器来处理高阶非线性耦合、多变量、模型不精确等问题。自抗扰控制器可估计并抵消系统内外部扰动和不确定性,通过PD型间接迭代控制律在线更新ESO带宽,实现了磁轴承自适应ADRC控制。仿真结果表明,所提控制器在多次迭代后具有更好的瞬态响应能力,系统稳定性好。

参考文献:

- [1] 张维煜,朱焜秋,袁野. 磁悬浮轴承应用发展及关键技术综述[J]. 电工技术学报, 2015, 30(12): 12-20.
ZHANG Weiyu, ZHU Huangqiu, YUAN Ye. Study on key technologies and applications of magnetic bearings[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(12): 12-20. (in Chinese)
- [2] 李万杰,张国民,王新文,等. 飞轮储能系统用超导电磁混合磁悬浮轴承设计[J]. 电工技术学报, 2020, 35(S1): 10-18.
LI Wanjie, ZHANG Guomin, WANG Xinwen, et al. Integration design of high-temperature superconducting bearing and electromagnetic thrust bearing for flywheel energy storage system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(S1): 10-18. (in Chinese)
- [3] 吕东元,吕奇超,李延宝,等. 磁悬浮飞轮储能用永磁偏置磁轴承设计[J]. 飞控与探测, 2021, 4(3): 76-82.
LYU Dongyuan, LYU Qichao, LI Yanbao, et al. Design of permanent magnet biased magnetic bearing for magnetic suspension flywheel energy storage system[J]. Flight Control & Detection, 2021, 4(3): 76-82.

(in Chinese)

- [4] 刘强,赵明师,韩邦成,等. 磁悬浮框架飞轮磁轴承技术研究与发展现状[J]. 宇航学报, 2019, 40(11): 1251-1261.
LIU Qiang, ZHAO Mingshi, HAN Bangcheng, et al. Research and development status of magnetic bearing technology on magnetically suspended gimballing flywheel[J]. Journal of Astronautics, 2019, 40(11): 1251-1261. (in Chinese)
- [5] 邹银才,魏操兵,潘薇,等. 高速透平机械超导磁悬浮轴承转子结构设计[J]. 低温与超导, 2018, 46(5): 13-18.
ZOU Yincai, WEI Caobing, PAN Wei, et al. Design of rotor structure for superconducting magnetic levitation bearing application in high speed turbine mechanics[J]. Cryogenics, 2018, 46(5): 13-18. (in Chinese)
- [6] SUN X D, CHEN L, YANG Z B. Overview of bearingless permanent-magnet synchronous motors [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60(12): 5528-5538.
- [7] SUN X D, JIN Z J, CHEN L, et al. Disturbance rejection based on iterative learning control with extended state observer for a four-degree-of-freedom hybrid magnetic bearing system [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2021, 153(5): 107465-107480.
- [8] 施佳余,吴国庆,茅靖峰,等. 磁悬浮轴承系统控制方法研究[J]. 机械设计与制造, 2015(12): 265-268.
SHI Jiayu, WU Guoqing, MAO Jingfeng, et al. Research of magnetic bearing system control method[J]. Machinery Design & Manufacture, 2015(12): 265-268. (in Chinese)
- [9] 邱振兴. 主动磁悬浮轴承的PID控制研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2010.
- [10] 楼晓春,吴国庆. 主动磁轴承系统的自适应滑模控制[J]. 电工技术学报, 2012, 27(1): 142-147.
LOU Xiaochun, WU Guoqing. Adaptive sliding mode control for an active magnetic bearing system [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(1): 142-147. (in Chinese)
- [11] SUN G H, WU L G, KUANG Z A, et al. Practical tracking control of linear motor via fractional-order sliding mode[J]. Automatica, 2018, 94(8): 221-235.
- [12] 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]. Mechanical Systems and Signal

- Processing, 2017, 88(6): 36-48.
- [13] 韩京清. 自抗扰控制技术[J]. 前沿科学, 2007(1): 24-31.
HAN Jingqing. Auto disturbances rejection control technique[J]. Frontier Science, 2007(1): 24-31. (in Chinese)
- [14] 李杰, 齐晓慧, 万慧, 等. 自抗扰控制: 研究成果总结与展望[J]. 控制理论与应用, 2017, 34(3): 281-295.
LI Jie, QI Xiaohui, WAN Hui, et al. Active disturbance rejection control theoretical results summary and future researches[J]. Control Theory & Applications, 2017, 34(3): 281-295. (in Chinese)
- [15] 王术波, 韩宇, 陈建, 等. 基于 ADRC 迭代学习控制的四旋翼无人机姿态控制[J]. 航空学报, 2020, 41(12): 319-331.
WANG Shubo, HAN Yu, CHEN Jian, et al. Attitude active disturbance rejection control of UAV attitude based on iterative learning control[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2020, 41(12): 319-331. (in Chinese)
- [16] 刘娇龙, 李瑾, 王龙, 等. 高相对阶连续时间系统的间接迭代学习控制[J]. 控制理论与应用, 2020, 37(5): 1127-1134.
LIU Jiaolong, LI Jin, WANG Long, et al. Indirect-type iterative learning control for high relative degree continuous-time systems[J]. Control Theory & Applications, 2020, 37(5): 1127-1134. (in Chinese)
- [17] XUE W C, HUANG Y. Performance analysis of 2-DOF tracking control for a class of nonlinear uncertain systems with discontinuous disturbances [J]. International Journal of Robust and Nonlinear Control, 2018, 28(4): 1456-1473.
- [18] 孙明轩, 毕宏博, 周国良, 等. 反馈辅助 PD 型迭代学习控制: 初值问题及修正策略[J]. 自动化学报, 2015, 41(1): 157-164.
SUN Mingxuan, BI Hongbo, ZHOU Guoliang, et al. Feedback-aided PD-type iterative learning control: initial condition problem and rectifying strategies [J]. Acta Automatica Sinica, 2015, 41(1): 157-164. (in Chinese)