

基于 ESO 与线性化反馈的磁悬浮球系统 自适应全局积分滑模控制

高鹏飞, 盛晓超*, 张登辉

(西安工程大学 机电工程学院, 陕西 西安 710048)

Adaptive Global Integral Sliding Mode Control of Magnetic Suspension Ball System Based on ESO and Linearized Feedback

GAO Pengfei, SHENG Xiaochao*, ZHANG Denghui

(School of Mechanical and Electrical Engineering, Xi'an Polytechnic University, Xi'an 710048, China)

Abstract: [Objective] This paper combined linearized feedback control with adaptive global integral sliding mode control (AGISMC) to optimize the control performance and the control accuracy of the system based on the nonlinear characteristics, uncertainty and susceptibility to external perturbations of the magnetic suspension ball system.

[Methods] First, a mathematical model was established using linearized feedback, and adaptive control was employed to achieve real-time estimation of the system parameters to reduce the uncertainty. Second, a global function was introduced to improve the transient response of the system, and the sign function in the sliding mode function was replaced with a saturation function to reduce system chattering. Third, for uncertain disturbances, an extended state observer (ESO) was utilized to estimate unknown disturbance signals in real time. Finally, simulations were conducted in Matlab/Simulink, and an experimental platform was built for validation. [Results] Simulation and experimental results showed that neither the AGISMC-ESO controller nor the proportional integral derivative (PID) controller exhibited overshoot in step response, with the AGISMC-ESO controller achieving a shorter time to reach steady state. The AGISMC-ESO controller compensated more quickly when disturbances occur, allowing the system to reach a steady state rapidly. Under the application of a sinusoidal signal, the actual trajectory of the magnetic suspension system closely matched the displacement curve observed by the ESO.

[Conclusion] Compared to the PID controller, the AGISMC-ESO controller designed in this paper offers faster response

speed, higher control accuracy, better dynamic tracking performance, and superior disturbance rejection.

Key words: magnetic suspension ball system; linearized feedback control; adaptive global integral sliding mode control; extended state observer

摘 要: 【目的】本文针对磁悬浮球系统的非线性特性、不确定性以及其易受外部扰动影响的特性,将线性化反馈控制与自适应全局积分滑模控制(AGISMC)相结合,优化系统控制效果、提高控制精度。【方法】首先,通过线性化反馈建立数学模型,使用自适应控制实现对系统参数的实时估计,降低系统的不确定性;其次,引入全局函数以改善系统的瞬态响应,将滑模函数中的符号函数替换为饱和函数以减小系统抖振;再次,在不确定干扰方面,利用扩张状态观测器(ESO)对系统未知干扰信号做出实时估计;最后,基于 Matlab/Simulink 进行仿真分析,并搭建试验平台进行试验验证。【结果】仿真和试验结果表明:AGISMC-ESO 控制器与比例积分微分(PID)控制器在阶梯响应时均没有超调,且本文设计的 AGISMC-ESO 控制器到达稳态的时间更短;AGISMC-ESO 控制器能在扰动出现后更快进行补偿,使系统快速到达稳态;施加正弦信号下,磁悬浮系统的实际运动轨迹与 ESO 所观测的位移曲线基本吻合。【结论】与 PID 控制器相比,本文设计的 AGISMC-ESO 控制器具有更快的响应速度、更高的控制精度、更好的动态跟踪性能和更优的抗干扰性能。

关键词: 磁悬浮球系统; 线性化反馈控制; 自适应全局积分滑模控制; 扩张状态观测器

0 引言

磁悬浮技术是利用电磁铁产生电磁力来抵抗

基金项目: 国家自然科学基金(52105584)

National Natural Science Foundation of China (52105584)

物体重力使物体悬浮在空中的技术。随着电子技术与控制的不断发展,磁悬浮系统由于具有机械摩擦、无需润滑、长寿命、低噪声和低热损耗等优点,被广泛应用于在交通、国防、工业和医学等领域^[1-3]。在磁悬浮技术的研究中,控制技术、测量技术的发展对磁悬浮的精确运动有着重要意义,因此研究磁悬浮的控制方法对磁悬浮技术的发展有积极的影响^[4]。

在多自由度动子的精密运动系统中,磁悬浮技术也得到了越来越多的应用,而单自由度磁悬浮系统作为一种典型的相对简单的非线性系统,能够将控制器的控制效果更直观地体现出来。并且磁悬浮球系统作为一种开环不稳定系统,为了能够实现稳定的悬浮状态,在控制系统的设计中需加入反馈环节来实现闭环控制^[5]。磁悬浮控制算法现阶段已经有了多方面的研究,如鲁棒控制^[6]、自适应控制^[7]、比例积分微分(Proportional Integral Derivative, PID)控制^[8]、模糊控制^[9]、滑模控制^[10]和神经网络控制^[11]等,这些控制方法从多种方面改善了磁悬浮球系统的控制性能,丰富了磁悬浮球系统的控制理论^[12]。传统滑模控制对系统的鲁棒性和控制参数的要求较高,并且高速切换会引起系统的抖振从而破坏系统的稳定性,需要多方面的设计进行改进。文献[13]对磁悬浮球系统反馈线性化误差进行了分析,并设计了扰动观测器,获得了精确的线性化模型。文献[14]在磁悬浮球系统中将滑模控制与模糊控制相结合,使滑模控制中的抖振现象得到了明显改善。文献[15]将自适应控制律与基于反演法的滑模控制相结合设计了一种自适应反演滑模控制器,该控制器具有较好的动态跟踪性能。文献[16]将干扰观测器与全局快速终端滑模相结合,对内外扰动进行分析,增强了系统的鲁棒性与控制效果。文献[17]设计了一种基于分数阶的非线性积分滑模面,削弱了系统抖振。在控制方法设计中,通过线性化反馈与自适应控制能降低控制系统的参数不确定性,滑模控制能保证系统稳定的收敛速度与动态性能,相互结合后可以提升系统的控制性能。

通过以上分析,本文针对单自由度的磁悬浮球系统,利用扩张状态观测器(Extended State Observer, ESO)估计未知扰动,将线性化反馈控制

与自适应全局积分滑模控制(Adaptive Global Integral Sliding Mode Control, AGISMC)相结合设计控制器,并通过仿真和试验与PID控制器进行对比。结果表明,本文设计的AGISMC-ESO控制器在保证系统稳定的前提下,具有更快的收敛速度、更小的稳态误差和更优的动态跟踪性能。

1 磁悬浮球系统原理

单自由度磁悬浮系统原理如图1所示。控制器输出控制律对功率放大器的输出电流进行调节,通过控制电流大小来调整小球受到的电磁力,电磁力与重力相互作用来控制小球在预期位置悬浮,并通过传感器对小球位置信息的反馈完成闭环控制,最终使小球沿着预期的轨迹移动^[18]。

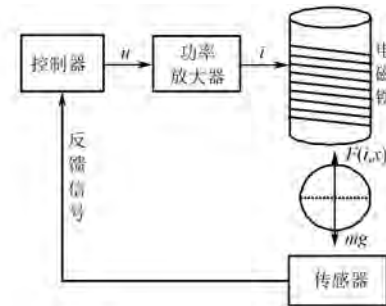


图1 单自由度磁悬浮系统原理图

Fig. 1 Schematic diagram of a single-degree-of-freedom magnetic suspension system

2 数学模型

研究如图1所示的磁悬浮球系统时,在忽略电磁铁磁阻、漏磁及涡流损耗的同时,只考虑小球与电磁铁间的气隙磁通分布均匀,且小球受力均匀的情况,其动力学方程可表示为

$$\begin{cases} m \frac{d^2x}{dt^2} = F(i, x) - mg \\ F(i, x) = K \left(\frac{i}{g_0 - x} \right)^2 \end{cases} \quad (1)$$

式中: m 为小球质量; g 为重力加速度; g_0 为电磁铁底端与小球顶部的初始距离; x 为小球的位移; i 为电磁线圈中的电流; F 为小球受到的电磁力; $K = \frac{\mu_0 AN^2}{4}$, μ_0 为真空磁导率, A 为磁感线通过的截面积, N 为电磁线圈匝数。

对式(1)中第2式在平衡位置 $F(i_0, x_0) = mg$

处进行泰勒展开:

$$F(i, x) = F(i_0, x_0) + \frac{2Ki_0}{(g_0 - x_0)^2}(i - i_0) + \frac{-2Ki_0^2}{(g_0 - x_0)^3}(x - x_0) \quad (2)$$

式中: i_0, x_0 分别为位于平衡位置时的电流、位移。

将式(2)代入式(1),并将电流 $i=u$ 作为系统输入信号,可得:

$$\ddot{x} = a_0 x + b_0 u \quad (3)$$

式中: $a_0 = -\frac{2Ki_0^2}{m(g_0 - x_0)^3}$ 为磁悬浮球的位移刚度;

$b_0 = \frac{2Ki_0}{m(g_0 - x_0)^2}$ 为磁悬浮球的电流刚度。

考虑到实际物理系统中存在不确定项和扰动 f ,当模型参数 a_0 和输入增益参数 b_0 不能完全确定时,使用 a, b 代替 a_0, b_0 ,式(3)可表示为

$$\ddot{x} = ax + bu + f \quad (4)$$

令 $x_1 = x, x_2 = \dot{x}, y = x_1$,磁悬浮球系统的模型可以改写为

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = ax + bu + f \\ y = x_1 \end{cases} \quad (5)$$

3 控制设计

3.1 扩张状态观测器

ESO 将系统未知的干扰信号扩充成新的状态变量,利用系统的输入、输出对系统原有的状态变量与扰动信号进行重构,然后以状态误差的形式进行反馈,从而设计符合要求的控制器^[19-20]。本文取 $x_3 = f$ 为新的状态变量,则扩张状态空间方程为

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = ax_1 + bu + x_3 \\ \dot{x}_3 = f \end{cases} \quad (6)$$

定义观测器矩阵 $L = [\beta_1, \beta_2, \beta_3]^T$,建立状态空间观测器:

$$\begin{cases} e_1 = z_1 - x_1 \\ \dot{z}_1 = z_2 - \beta_1 e_1 \\ \dot{z}_2 = z_3 + ax_1 + bu - \beta_2 e_1 \\ \dot{z}_3 = -\beta_3 e_1 \end{cases} \quad (7)$$

式中: z_1, z_2 和 z_3 分别为 x_1, x_2 和 x_3 的估计值。

定义 $e_1 = z_1 - x_1, e_2 = z_2 - x_2, e_3 = z_3 - x_3$,得到如式(8)所示的误差系统:

$$\begin{cases} \dot{e}_1 = e_2 - \beta_1 e_1 \\ \dot{e}_2 = e_3 - \beta_2 e_1 \\ \dot{e}_3 = -\dot{x}_3 - \beta_3 e_1 \end{cases} \quad (8)$$

式(8)可以表示为

$$\dot{e} = Ae - B\dot{x}_3 \quad (9)$$

$$\text{式中: } A = \begin{bmatrix} -\beta_1 & 1 & 0 \\ -\beta_2 & 0 & 1 \\ -\beta_3 & 0 & 0 \end{bmatrix}; e = \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ e_3 \end{bmatrix}; B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}。$$

为把观测器的极点 λ 集中在左半平面的同一位置 $-\omega_0$ 处,所以有:

$$\det(\lambda I - A) = \lambda^3 + \beta_1 \lambda^2 + \beta_2 \lambda + \beta_3 = (\lambda + \omega_0)^3 \quad (10)$$

式中: ω_0 为观测器带宽。

根据劳斯-赫尔维茨稳定性判据,式(10)中: $\beta_1 = 3\omega_0; \beta_2 = 3\omega_0^2; \beta_3 = \omega_0^3$ 。并且带宽选择时需考虑到噪声影响和采集信号的准确性^[21-22]。

3.2 基于线性化反馈的自适应全局积分滑模控制设计

设磁悬浮球系统的期望位移输出为 x_d ,误差为 $e = x_1 - x_d$,根据线性化反馈控制方法,可将控制器设计为^[23]

$$u = \frac{v - ax}{b} \quad (11)$$

式中: $v = \ddot{x}_d - c_1 \dot{e} - c_2 e - f$ 为线性化反馈控制的辅助函数, c_1, c_2 均为正常数。

引入扩张状态观测器后,系统的输出 x 能由观测值 z_1 表示,扰动项 f 可由观测值 z_3 表示,即 $v = \ddot{x}_d - c_1 \dot{e} - c_2 e - z_3$ 。

为保证控制系统的收敛速度及动态性能,引入滑模控制,并设计积分滑模面函数 s :

$$s = \dot{e} + c_1 e + c_2 \int e dt \quad (12)$$

通过设计与分析积分滑模面函数,线性化反馈控制的辅助函数 v 可以重新设计为 $v = \ddot{x}_d - c_1 \dot{e} - c_2 e - \eta \text{sign}(s) - z_3$,其中 $\eta > 0$ 。为保证系统初始状态就能满足滑模面条件,可在式(12)基础上加入全局函数并设计全局积分滑模面^[24]:

$$s = \dot{e} + c_1 e + c_2 \int e dt - g(t) \quad (13)$$

全局函数 $g(t)$ 需满足以下条件:

(1) $g(0) = \dot{e}_0 + c_1 e_0$, $\dot{e}_0$ 和 e_0 分别为 $t=0$ 时 $\dot{e}$ 和 e 的值;

(2) $t \rightarrow \infty, g(t) \rightarrow 0$;

(3) $g(t)$ 为一阶可导函数。

满足以上条件时, 系统在初始状态就能位于滑模面上并在动态运动过程中快速到达滑模面, 所以可将 $g(t)$ 设计为

$$g(t) = (\dot{e}_0 + c_1 e_0) e^{c_3 t} \quad (14)$$

式中: $c_3 > 0$ 。

取 Lyapunov 函数:

$$V_1 = \frac{1}{2} s^2 \quad (15)$$

对式(15)求导:

$$\begin{aligned} \dot{V}_1 &= s\dot{s} = s[\ddot{e} + c_1 \dot{e} + c_2 e - \dot{g}(t)] = \\ &= s[az_1 + bu + f - \ddot{x}_d + c_1 \dot{e} + c_2 e - \dot{g}(t)] \end{aligned} \quad (16)$$

将控制律式(8)代入式(16)得:

$$\begin{aligned} \dot{V}_1 &= s[v + f - \ddot{x}_d + c_1 \dot{e} + c_2 e - \dot{g}(t)] = \\ &= s[-\eta \text{sign}(s) - \dot{g}(t)] = -\eta |s| - \dot{g}(t)s \leq 0 \end{aligned} \quad (17)$$

由于 η 和 $\dot{g}(t)$ 均大于 0, 所以 $\dot{V}$ 负定, 系统是渐进稳定的。

滑模控制的等效控制项 u_{eq} 可表示为

$$u_{eq} = \frac{v - az_1}{b} \quad (18)$$

选择指数趋近律:

$$\dot{s} = -ks - D\text{sign}(s) \quad (19)$$

式中: k 和 D 为滑模趋近律参数, 均为正常数。

滑模控制的切换控制律 u_{sw} 可表示为

$$u_{sw} = \frac{1}{b} [-ks - D\text{sign}(s)] \quad (20)$$

综上, 滑模控制的总控制律 u 可表示为

$$u = u_{eq} + u_{sw} = \frac{1}{b} [v - az_1 - ks - D\text{sign}(s)] \quad (21)$$

在实际磁悬浮球系统中, 由于漏磁等存在, 小球在运动过程中磁感线通过的有效面积会发生变化, 会导致式(1)中的 K 值发生变化, 从而导致电磁力不够精确。因此可以考虑在控制系统中引入自适应控制律, 使系统参数能够在一定范围内自

动调整, 以此来增强系统的鲁棒性。

考虑到系统模型可表示为

$$\ddot{x} = az_1 + bu + f \quad (22)$$

由于式(22)中 a 、 b 的不确定性与参数 K 的不确定性有关且呈线性关系, 即:

$$\begin{cases} a = -\frac{2Ki_0^2}{m(g_0 - x_0)^3} = p_1 K \\ b = \frac{2Ki_0}{m(g_0 - x_0)^2} = p_2 K \end{cases} \quad (23)$$

实现参数 K 的自适应估计即可实现 a 、 b 的自适应估计。取 $\hat{K}$ 为 K 的估计值, 分别用 $\hat{a}$ 、 $\hat{b}$ 表示 a 、 b 的自适应估计值。定义 Lyapunov 函数:

$$V_2 = V_1 + \frac{1}{2\gamma} \tilde{K}^2 \quad (24)$$

式中: $\tilde{K} = \hat{K} - K$, $\gamma > 0$ 。

对式(24)求导:

$$\begin{aligned} \dot{V}_2 &= \dot{V}_1 + \frac{1}{\gamma} \tilde{K}(\dot{\hat{K}} - \dot{K}) = \dot{V}_1 + \frac{1}{\gamma} \tilde{K}\dot{\hat{K}} = \\ &= s[v + f - \ddot{x}_d + c_1 \dot{e} + c_2 e - \dot{g}(t)] + \frac{1}{\gamma} \tilde{K}\dot{\hat{K}} = \\ &= s[\hat{a}z_1 + \hat{b}u + f - az_1 - bu - f + c_1 \dot{e} + c_2 e - \\ &\quad \dot{g}(t)] + \frac{1}{\gamma} \tilde{K}\dot{\hat{K}} = s[\hat{K}(p_1 z_1 + p_2 u) - \\ &\quad K(p_1 z_1 + p_2 u) + c_1 \dot{e} + c_2 e - \dot{g}(t)] + \frac{1}{\gamma} \tilde{K}\dot{\hat{K}} = \\ &\quad s[c_1 \dot{e} + c_2 e - \dot{g}(t)] + \\ &\quad \tilde{K} \left[s(p_1 z_1 + p_2 u) + \frac{1}{\gamma} \dot{\hat{K}} \right] \end{aligned} \quad (25)$$

式中: $c_1 \dot{e} + c_2 e - \dot{g}(t) = c_1 \dot{e} + c_2 e - c_3 t(c_1 \dot{e}_0 + c_2 e_0) \cdot e^{c_3 t-1} \leq 0$ 。

取自适应律为

$$\dot{\hat{K}} = -\gamma s(p_1 z_1 + p_2 u) \quad (26)$$

γ 的取值与小球和电磁铁之间的气隙相关, 并且满足 $\gamma > 0$, 则:

$$\dot{V}_2 \leq 0 \quad (27)$$

只需要调整 γ 的取值即可实现 K 的自适应估计, 进而就可以根据式(23)实现 a 、 b 的自适应估计。则系统的控制律可以表示为

$$u = u_{eq} + u_{sw} = \frac{1}{b} [v - \hat{a}z_1 - z_3 - ks - D\text{sign}(s)] \quad (28)$$

由此可得,ESO 中的模型参数也可以实现自适应估计:

$$\begin{cases} e_1 = z_1 - x_1 \\ \dot{z}_1 = z_2 - \beta_1 e_1 \\ \dot{z}_2 = z_3 + \hat{a}x_1 + \hat{b}u - \beta_2 e_1 \\ \dot{z}_3 = -\beta_3 e_1 \end{cases} \quad (29)$$

考虑到滑模控制的非线性和控制信号的高频切换会导致控制系统出现抖振现象,为削弱系统抖振并提高控制系统的稳定性,采用饱和函数 $sat(s)$ 代替控制律中的符号函数 $sign(s)$,使其具有饱和特性,避免系统过载或失控,提高系统的稳定性。

饱和函数的表达式为

$$sat(s) = \begin{cases} 1, & s > \Delta \\ \frac{s}{\Delta}, & |s| \leq \Delta \\ -1, & s < -\Delta \end{cases} \quad (30)$$

式中: $\Delta > 0$ 。

将控制律中的符号函数改为的饱和函数后,AGISMC 的控制律变为

$$u = \frac{1}{b} [\ddot{x}_d - c_1 \dot{e} - c_2 e - \eta sat(s) - z_3 - \hat{a}z_1 - z_3 - ks - Dsat(s)] \quad (31)$$

4 仿真分析及试验验证

为验证提出的 AGISMC-ESO 的控制性能,基于 Matlab/Simulink 编写控制算法并搭建数学模型,将 AGISMC-ESO 与传统 PID 控制进行仿真对比分析。为了更好地验证本文设计的控制器的收敛速度和控制精度,搭建试验平台进行试验验证。

4.1 系统的机械结构

本文所使用的磁悬浮球系统的结构如图 2 所示。该系统由电磁线圈绕组、电涡流传感器、小球、小球定位台和基座等组成。电涡流传感器对小球位移进行测量,通过模数转换采集板将信号传递给上位机处理,经控制器处理后的电流信号通过功率放大器输出给电磁线圈产生电磁力。磁悬浮球系统相关参数详见表 1。

PID 的控制参数为:比例增益 $k_p = 2\ 526$;积分增益 $k_i = 50.3$;微分增益 $k_d = 100.5$ 。AGISMC-ESO 的控制参数为: $c_1 = 1\ 300$; $c_2 = 1$; $\eta = 2$; $k = 10$; $D =$

1。扩张状态观测器带宽 $\omega_o = 100\ \text{rad/s}$ 。

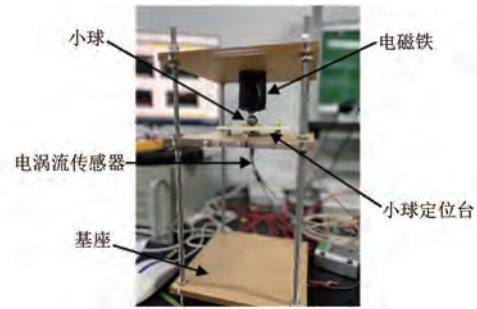


图 2 试验装置图

Fig. 2 Experimental setup diagram

表 1 磁悬浮球系统参数

Tab. 1 Parameters of the magnetic suspension ball system

参数名称	参数值
小球质量 m/kg	2.4×10^{-2}
初始气隙 g_0/m	5×10^{-3}
磁导截面积 A/m^2	7.7×10^{-2}
线圈匝数 N	964
真空磁导率 $\mu_0/(\text{H} \cdot \text{m}^{-1})$	$4\pi \times 10^{-7}$
重力加速度 $g/(\text{m} \cdot \text{s}^{-2})$	9.8

4.2 仿真分析

4.2.1 阶梯轨迹仿真

对控制系统施加每 2 s 上升 0.2 mm 的阶梯阶跃信号。图 3 为 PID 控制和 AGISMC-ESO 的位移跟踪曲线;图 4 为系统输出位移与 ESO 对位移的估计值。

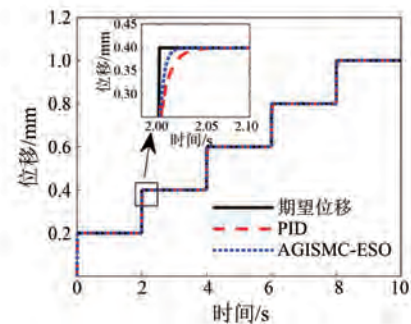


图 3 两种控制方法的阶梯响应曲线

Fig. 3 Step response curves of the two control methods

由图 3 可知,本文设计的 AGISMC-ESO 控制器与 PID 控制器在阶梯响应时均没有超调,AGISMC-ESO 控制器约 0.02 s 到达稳态,但 PID 控制器则需要 0.07 s 左右,可见 AGISMC-ESO 控制器具有更快的响应速度。由图 4 可知,系统输出位移与 ESO 估计位移曲线基本吻合,ESO 能对

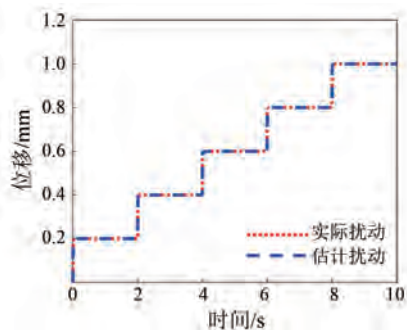


图 4 系统位移与 ESO 估计位移

Fig. 4 System displacement and ESO estimated displacement

系统动态进行准确估计。

4.2.2 扰动干扰仿真

为验证抗干扰性能,给定阶跃信号使系统阶跃 1 mm,到达稳态后在 5 s 时对系统施加定值扰动。图 5 为施加扰动后 PID 控制和 AGISM-ESO 的位移跟踪曲线;图 6 为实际施加的扰动值与 ESO 对扰动的估计值。

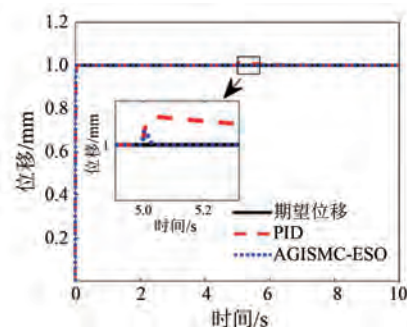


图 5 施加扰动后两种控制方法的系统响应

Fig. 5 System responses of two control methods after disturbance application

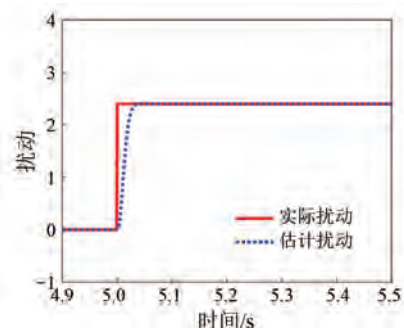


图 6 实际扰动与 ESO 估计扰动

Fig. 6 Actual disturbance vs. ESO estimated disturbance

由图 5 和图 6 可知,AGISM-ESO 控制器能在扰动出现后的 0.1 s 内及时进行补偿,使系统快

速到达稳态,而 PID 控制器则需要 1 s 左右才能到达稳态;并且 AGISM-ESO 控制器在扰动出现后的波动更小,抗干扰能力更强,ESO 对扰动的估计值也比较准确,观测误差不超过 0.01%。

4.3 试验验证

4.3.1 阶跃轨迹试验

在相同的初始条件下,给定阶跃时间 2 s、终值为 1 mm 的阶跃信号。图 7 为 PID 控制和 AGISM-ESO 的位移跟踪曲线;图 8 为到达稳态时两种控制方法的误差波动对比。

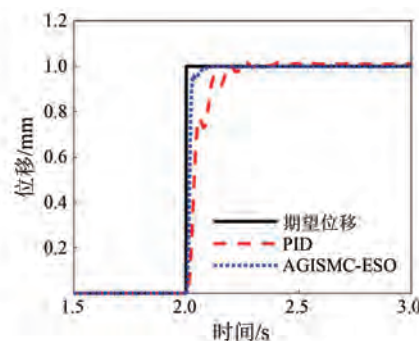


图 7 两种控制方法的阶跃响应曲线

Fig. 7 Step response curves for the two control methods

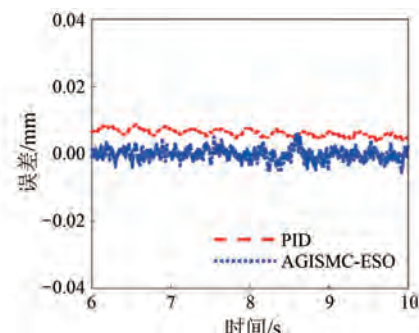


图 8 两种控制方法的稳态误差波动

Fig. 8 Steady-state error fluctuations for the two control methods

由图 7 可知,AGISM-ESO 只需要 0.12 s 就能到达期望位置,而 PID 控制需要 0.5 s 左右才能到达期望位置;并且在到达期望位置后,AGISM-ESO 的稳态误差波动在 0.005 mm 之内,而 PID 控制的稳态误差波动在 0.01 mm 之内。因此,相较于 PID 控制器,本文设计的 AGISM-ESO 控制器有更快的响应速度和更小的稳态误差。

4.3.2 正弦轨迹试验

在相同的初始条件下,给定正弦信号 $\sin(2t+\pi/2)+0.5$ 。图 9 为 PID 控制和 AGISM-

ESO 的正弦位移跟踪曲线;图 10 为正弦运动过程中两种控制方法的误差波动对比。

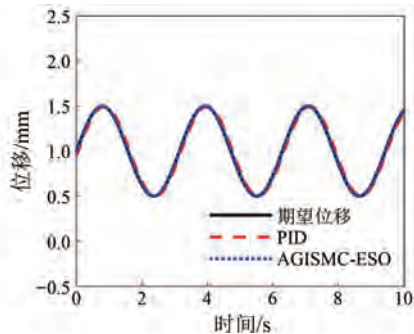


图 9 两种控制方法的正弦运动曲线

Fig. 9 Sinusoidal motion curves for the two control methods

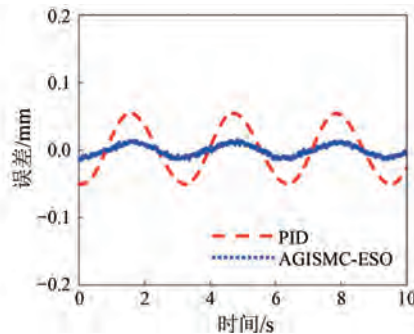


图 10 两种控制方法的正弦运动误差波动

Fig. 10 Sinusoidal motion error fluctuations for the two control methods

由图 9 和图 10 可知,在正弦运动过程中,相较于 PID 控制,AGISM-ESO 的动态滞后更小,有更好的跟踪效果;AGISM-ESO 的跟踪误差为 ± 0.015 mm 左右,最大误差为 0.0155 mm,而 PID 的跟踪误差在 ± 0.05 mm 左右,最大误差为 0.055 mm。因此,相较于 PID 控制器,本文设计的 AGISM-ESO 控制器有更好的动态跟踪效果、更高的控制精度。

4.3.3 观测效果

图 11 为施加正弦信号下,磁悬浮球系统的实际运动轨迹与 ESO 所观测的位移曲线。由图 11 可知,ESO 能对实际位移进行较为准确地估计,拥有较好的估计性能,即对于系统中未知扰动能够及时补偿,使控制器拥有较好的抗干扰能力。

5 结语

单自由度磁悬浮球系统是一种高度开环不稳

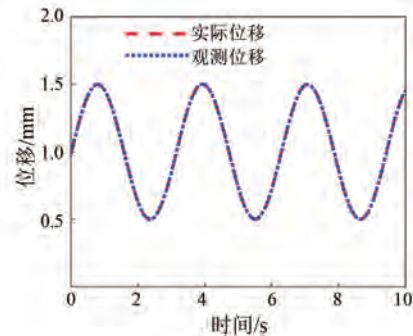


图 11 实际位移曲线与 ESO 观测位移曲线

Fig. 11 Actual displacement curve and ESO observed displacement curve

定系统,为提高其控制精度,本文设计了一种基于 ESO 与 AGISM 的控制器。通过线性化反馈建立数学模型,使用自适应控制来降低系统的参数不确定性,使用滑模控制来保证系统稳定的收敛速度与动态性能;并引入全局函数来改善动态性能,使用饱和函数代替符号函数来降低滑模的抖振影响。基于 Matlab/Simulink 编写控制算法,并搭建仿真模型与实物试验平台,将本文所设计的 AGISM-ESO 与 PID 控制进行对比分析。结果表明:本文设计的 AGISM-ESO 控制器相较于 PID 控制器有更快的响应速度、更高的控制精度、更好的动态跟踪性能和更好的抗干扰能力。

参考文献

- [1] 张耿. 基于超导的磁悬浮列车悬浮系统设计与分析[D]. 长沙: 国防科技大学, 2007.
ZHANG G. Design and analysis on levitation system of maglev based on superconductor [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2007.
- [2] 李云钢, 常文森. 磁浮列车悬浮系统的串级控制[J]. 自动化学报, 1999, 25(2): 247-251.
LI Y G, CHANG W S. Cascade control of an EMS maglev vehicle's levitation control system [J]. IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica, 1999, 25(2): 247-251.
- [3] 俞坚才. 人工心脏磁悬浮系统的研发[D]. 杭州: 浙江大学, 2013.
YU J C. Research of a magnetic levitation system for blood pump [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2013.
- [4] VENGHI L E, GONZALEZ G N, SERRA F M. Implementation and control of a magnetic levitation

- system [J]. IEEE Latin America Transactions, 2016, 14(6): 2651-2656.
- [5] WAI R J, LEE J D. Robust levitation control for linear maglev rail system using fuzzy neural network [J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2009, 17(1): 4-14.
- [6] 杨国诗, 何德峰, 薛美盛. 基于鲁棒控制 Lyapunov 函数的非线性预测控制[J]. 控制与决策, 2010, 25(11): 1752-1756.
- YANG G S, HE D F, XUE M S. Nonlinear predictive control based on robust control Lyapunov function [J]. Journal of Control and Design, 2010, 25(11): 1752-1756.
- [7] ASTROM K J, WITTENMARK B. Adaptive Control [M]. 2nd Ed. Boston: Addison-Wesley Publishing Company, 1995.
- [8] 汤洁, 李训铭. 单自由度磁悬浮系统的状态反馈控制[J]. 计算机测量与控制, 2005, 13(5): 472-473+490.
- TANG J, LI X M. States feedback control of single-degree-freedom magnetism levitation system [J]. Computer Measurement & Control, 2005, 13(5): 472-473+490.
- [9] 张萌, 蓝益鹏. 直线同步电动机磁悬浮系统区间二型模糊控制的研究[J]. 电机与控制应用, 2022, 49(5): 1-7.
- ZHANG M, LAN Y P. Research on interval type-2 fuzzy control for magnetic levitation system of linear synchronous motor [J]. Electric Machines & Control Application, 2022, 49(5): 1-7.
- [10] 刘金琨, 孙富春. 滑模变结构控制理论及其算法研究与进展[J]. 控制理论与应用, 2007, 24(3): 407-418.
- LIU J K, SUN F C. Research and development on theory and algorithms of sliding mode control [J]. Control Theory & Applications, 2007, 24(3): 407-418.
- [11] 邢艺馨, 蓝益鹏, 姜云凤, 等. 直线同步电动机磁悬浮系统非线性神经网络自适应反步控制[J]. 电机与控制应用, 2023, 50(3): 8-13.
- XING Y X, LAN Y P, JIANG Y F, et al. Nonlinear adaptive neural network backstepping control of linear synchronous motor magnetic levitation system [J]. Electric Machines & Control Application, 2023, 50(3): 8-13.
- [12] ELGAMMAL A T, ABOUELSOUDA A A, ASSAL S F M. Fuzzy logic-based gain scheduling of exact feedforward linearization controller for magnetic ball levitation system [C]//2014 UKACC International Conference on Control, Loughborough, 2014.
- [13] 姜文雪, 周凯. 基于干扰观测器的磁悬浮系统精确反馈线性化[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2015, 55(10): 1067-1071.
- JIANG W X, ZHOU K. Precise feedback linearization in ems system based on a disturbance observer [J]. Journal of Tsinghua University (Science & Technology), 2015, 55(10): 1067-1071.
- [14] 秦红玲, 李志雄, 袁松. 磁悬浮轴承系统的模糊滑模变结构控制研究[J]. 计算机仿真, 2011, 28(4): 185-188+192.
- QIN H L, LI Z X, YUAN S. Application research of fuzzy sliding model control for active magnetic bearings [J]. Computer Simulation, 2011, 28(4): 185-188+192.
- [15] 郑建英, 于占东. 磁悬浮球系统的自适应反演滑模控制[J]. 电子设计工程, 2016, 24(2): 76-78+81.
- ZHENG J Y, YU Z D. Adaptive back-stepping sliding mode control of magnetic levitation ball system [J]. Electronic Design Engineering, 2016, 24(2): 76-78+81.
- [16] 魏静波, 罗浩, 关子津. 基于干扰观测器的磁悬浮球系统全局快速终端滑模控制[J]. 西南交通大学学报, 2023, 58(4): 836-844.
- WEI J B, LUO H, GUAN Z J. Global fast terminal sliding mode control of magnetic levitation ball system based on disturbance observer [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2023, 58(4): 836-844.
- [17] 王飞, 周爱美, 王宇霄. 一种基于分数阶的非线性积分滑模控制算法[J]. 机电工程技术, 2023, 52(3): 173-176+198.
- WANG F, ZHOU A M, WANG Y X. A nonlinear integral sliding mode control algorithm based on fractional order [J]. Mechanical & Electrical Engineering Technology, 2023, 52(3): 173-176+198.
- [18] 张鋆豪, 张文安. 磁悬浮球系统的线性自抗扰控制与参数整定[J]. 系统科学与数学, 2017, 37(8): 1741-1756.
- ZHANG J H, ZHANG W A. Linear active disturbance rejection control to magnetic levitation

- ball system and parameters tuning [J]. *Journal of Systems Science and Mathematical Sciences*, 2017, 37(8): 1741-1756.
- [19] ZHENG Q, GAO Z Q. On practical applications of active disturbance rejection control [C]// *Proceedings of the 29th Chinese Control Conference*, Beijing, 2010.
- [20] HUA X X, HUANG D R, GUO S H. Extended state observer based on ADRC of linear system with incipient fault [J]. *International Journal of Control, Automation and Systems*, 2020, 18: 1425-1434.
- [21] TIAN G, GAO Z Q. Frequency response analysis of active disturbance rejection based control system [C]// *2007 IEEE International Conference on Control Applications*, Singapore, 2007.
- [22] MINH C H, KWAN K A. Extended state observer-based adaptive neural networks backstepping control for pneumatic active levitation with prescribed performance constraint [J]. *Applied Sciences*, 2023, 13(3): 1705.
- [23] 朱鹏, 陈施华, 张杰, 等. 一种基于干扰观测器的永磁同步电机线性化反馈控制[J]. *雷达与对抗*, 2021, 41(1): 50-53.
- ZHU P, CHEN S H, ZHANG J. Linearized feedback control of PMSM based on disturbance observer [J]. *Radar & ECM*, 2021, 41(1): 50-53.
- [24] 张登辉, 盛晓超, 石英男, 等. 音圈电机全局自适应非奇异快速终端滑模控制[J]. *轻工机械*, 2024, 42(2): 44-49.
- ZHANG D H, SHENG X C, SHI Y N, et al. Voice coil motor global adaptive non-singular fast terminal sliding mode control [J]. *Light Industry Machinery*, 2024, 42(2): 44-49.
-
- 收稿日期:2024-05-28
收到修改稿日期:2024-08-20
作者简介:
高鹏飞(1998-),男,硕士研究生,研究方向为机电系统精密运动控制,gpf@stu.xpu.edu.cn;
* 通信作者:盛晓超(1987-),男,博士,讲师,研究方向为机电系统精密运动控制等,xchsheng@xpu.edu.cn.

Adaptive Global Integral Sliding Mode Control of Magnetic Suspension Ball System Based on ESO and Linearized Feedback

GAO Pengfei, SHENG Xiaochao^{*}, ZHANG Denghui

(School of Mechanical and Electrical Engineering, Xi'an Polytechnic University, Xi'an 710048, China)

Key words: magnetic suspension ball system; linearized feedback control; adaptive global integral sliding mode control; extended state observer

Magnetic suspension technology is a method that uses electromagnetic force to counteract the gravitational force on an object, allowing it to suspend. Due to advantages such as frictionless, no lubrication requirement, long lifespan, low noise, and minimal heat loss, magnetic suspension systems are widely used in fields such as transportation, industry, and medicine. Researching magnetic suspension control is of great significance for the development of magnetic suspension technology.

The single-degree-of-freedom magnetic suspension ball system, as a typical nonlinear system, intuitively demonstrates the control effects of controllers, and its control accuracy primarily depends on the precision of the system model and the effectiveness of the control algorithm.

In this paper, linearized feedback control was combined with adaptive global integral sliding mode control (AGISMC) to address the nonlinear characteristics, uncertainties, and susceptibility to external disturbances in the magnetic suspension ball system, thereby enhancing control performance in the single-degree-of-freedom magnetic suspension ball system.

This paper established a mathematical model using feedback linearization while employing adaptive control to achieve real-time estimation of system parameters, reducing system uncertainty. A global

function was introduced to improve the transient response of the system, and the sign function in the sliding mode function was replaced with a saturation function to reduce system chattering. For uncertain external disturbances, an extended state observer (ESO) was used to estimate unknown disturbance signals in real time. Finally, simulations were conducted in Matlab/Simulink, and an experimental platform was set up for verification.

Simulation and experimental results showed that both the AGISMC-ESO controller and the proportional integral derivative (PID) controller exhibited no overshoot in step response, with the AGISMC-ESO controller designed in this paper reaching steady state in a shorter time. Further disturbance application revealed that the AGISMC-ESO controller could compensate more quickly after a disturbance, allowing the system to reach steady state rapidly. Under the application of a sinusoidal signal, the actual motion trajectory of the magnetic suspension system closely matched the displacement curve estimated by the observer in the AGISMC-ESO controller.

Compared to the PID controller, the AGISMC-ESO controller designed in this paper offers faster response speed, higher control accuracy, better dynamic tracking performance, and improved disturbance rejection capability.