

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2519291

电磁悬浮系统的分数阶线性自抗扰控制*

张振利^{1,2} 胡志强^{1,2} 宋成林^{1,2} 李勇群^{1,2}

(1.江西理工大学电气工程与自动化学院 赣州 341000; 2.磁浮轨道交通装备江西省重点实验室 赣州 341000)

摘要: 针对电磁悬浮系统易受外部扰动影响及传统线性自抗扰控制的整数阶PD固有矛盾问题,本文提出分数阶线性自抗扰控制方法。通过线性扩张状态观测器实时估计系统总扰动,并在位置环控制律中引入分数阶微分算子,利用其阶次在(0, 2)区间连续可调的特性,灵活适配频域内相位与幅值需求。理论分析表明,分数阶线性自抗扰控制能同时增强低频段扰动抑制能力并抑制高频噪声放大效应。仿真与实验结果显示,相较于线性自抗扰控制,分数阶线性自抗扰控制使位置偏移减小48.72%、调节时间缩短80.28%,并能有效应对更强扰动并提升跟踪精度,显著提升了系统的抗干扰性与跟踪性能。

关键词: 电磁悬浮系统;分数阶自抗扰控制;频域分析;抗干扰能力;跟踪精度

中图分类号: TN98 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.8010

Fractional order linear active disturbance rejection control for electromagnetic levitation system

Zhang Zhenli^{1,2} Hu Zhiqiang^{1,2} Song Chenglin^{1,2} Li Yongqun^{1,2}

(1. School of Electrical Engineering and Automation, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou 341000, China;

2. Jiangxi Province Key Laboratory of Maglev Rail Transit Equipment, Ganzhou 341000, China)

Abstract: Aiming at the problems that the electromagnetic levitation system is easily affected by external disturbances and the inherent contradiction of the integer order PD in the traditional linear active disturbance rejection control, this paper proposes a fractional order linear active disturbance rejection control method. The linear extended state observer is used to estimate the total disturbance of the system in real time, and a fractional order differential operator is introduced into the position loop control law. By utilizing the characteristic that its order can be continuously adjusted within the interval (0, 2), the requirements of phase and amplitude in the frequency domain are flexibly adapted. Theoretical analysis shows that fractional-order linear active disturbance rejection controller can simultaneously enhance the disturbance suppression ability in the low-frequency band and suppress the high-frequency noise amplification effect. Simulation and experimental results show that, compared with linear active disturbance rejection control, fractional-order linear active disturbance rejection controller, reduces the position deviation by 48.72%, shortens the adjustment time by 80.28%, and can effectively deal with stronger disturbances and improve the tracking accuracy, significantly enhancing the anti-interference and tracking performance of the system.

Keywords: electromagnetic levitation system; fractional order active disturbance rejection control; frequency domain analysis; anti disturbance capability; tracking accuracy

0 引言

磁悬浮列车采用电磁悬浮技术实现无接触运行,具有能耗低、噪音小、零排放等优势,是未来高速交通的重要发展方向^[1-3]。电磁悬浮控制系统作为磁悬浮列车的核心技

术之一,是构建复杂磁悬浮系统的核心基础^[4-6]。然而,电磁悬浮控制系统本质上是典型的开环不稳定系统,导致系统在实际运行中面临着稳定性维持、抗干扰控制与精确跟踪等关键挑战。

针对电磁悬浮系统的控制难题,国内外学者开展了大

收稿日期:2025-07-05

* 基金项目:国家重点研发计划(2023YFB4302100)、江西省重大科技研发专项(20232ACE01011)、磁浮轨道交通装备江西省重点实验室(2020SSY050)项目资助

量研究。早期研究多采用串级控制、鲁棒控制等方法,通过构建内外环控制结构提升系统稳定性^[7-8]。例如,电流内环采用PI控制以加快电流响应,位置外环通过传统PID实现位置跟踪,但此类方法对系统参数变化和外部扰动的适应性有限^[9]。近年来,自抗扰控制(active disturbance rejection control, ADRC)因其不依赖精确数学模型、强抗扰性和鲁棒性等优势,在磁悬浮控制领域得到了广泛关注^[10]。传统ADRC通过扩张状态观测器实时估计系统总扰动并进行补偿,能有效提升系统的抗干扰能力,但当采用非线性函数时存在参数多且耦合严重的问题,导致参数整定复杂,限制了其在电磁悬浮系统中的应用。

线性自抗扰控制(linear active disturbance rejection control, LADRC)通过线性化处理简化了ADRC的结构,将参数减少至观测器带宽、控制器带宽等有限几个,显著降低了参数整定难度,在保持抗扰性能的同时提高了工程实用性^[11-12]。然而,LADRC的控制律采用整数阶PD形式,其频域特性调节能力受限,难以在宽频段范围内同时兼顾低频扰动抑制和高频噪声衰减的需求。根据文献^[13]实验测试表明,传统LADRC在5~20 Hz低频段对扰动的抑制衰减量仅为12~18 dB,而高频段传感器噪声的放大系数却达8~12 dB,传统整数阶PD控制的固定阶次特性迫使系统在二者间进行取舍,无法实现全局最优控制。

分数阶微积分理论的引入为解决上述问题提供了新思路^[14-16]。分数阶控制具有非整数阶微分算子,其阶次可在(0, 2)连续调节,能够更灵活地匹配被控对象的频域特性。将分数阶微分算子引入LADRC的控制律中后,形成分数阶线性自抗扰控制器(fractional-order linear active disturbance rejection controller, FOLADRC),通过新增的分数阶次参数,5~20 Hz低频段扰动抑制衰减量提升至25~30 dB,同时高频段噪声放大系数降至2~5 dB,可在频域上实现非整数阶的相位超前与幅值衰减特性,从而在低频段增强扰动抑制能力,在高频段降低噪声放大效应,突破传统整数阶控制的局限性^[17-19]。

本文以电磁悬浮系统为研究对象,提出一种基于分数阶线性自抗扰控制的方法,旨在通过两方面提升系统控制性能:一方面,利用线性扩张状态观测器(linear extended state observer, LESO)对系统内外扰动进行实时估计,简化控制参数整定过程;另一方面,借助分数阶PD控制律的灵活调节特性,实现对总扰动的精准补偿,提高系统对位置指令的跟踪精度和抗干扰能力。通过理论分析、仿真验证和实验测试,全面考察FOLADRC在电磁悬浮系统中的控制效果,为磁悬浮技术的工程应用提供较好的控制解决方案。

1 单点悬浮系统模型

1.1 单点悬浮系统控制结构

单点悬浮控制结构如图1所示。系统通过间隙传感器

检测电磁铁与悬浮物体的位移,当电磁力与重力动态平衡时,物体稳定悬浮。

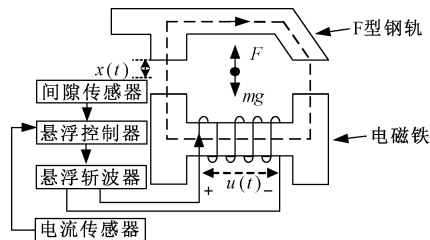


图1 系统结构框架

Fig.1 System structure framework

图1中 $x(t)$ 为电磁铁与悬浮物体之间的间隙, $u(t)$ 为悬浮控制器输出的信号, F 为电磁铁产生的电磁力, mg 为悬浮物体所受的重力。

1.2 单点悬浮系统的数学模型建立

对单点磁悬浮控制系统进行建模时,若在精确建模中涵盖所有不确定变量,将引发复杂的计算负担,为提升建模效率,进行如下假设^[20]:

- 1) 中的漏磁效应,假设气隙磁势均匀分布,避免因边缘磁通或非线性漏磁引起的多变量耦合问题。
- 2) 仅考虑电磁铁在单自由度方向的平动,忽略横向偏移、旋转振动等复合运动模式。
- 3) 铁芯截面积与气隙等效面积相等且为常数值,消除因截面积变化导致的磁阻动态波动。

为方便理解,设定原点为参考点,电磁力作用方向与位移变 $x(t)$ 正方向一致,简化力学方程公式,根据以上假设,得到单点悬浮系统的运动模型为:

$$\begin{cases} m \frac{d^2 x}{dt^2} = F(i, x) - mg + f_d \\ F(i, x) = \frac{\mu_0 N^2 A}{4} \left(\frac{i}{c_{\max} - x} \right)^2 \\ u = Ri + \frac{\mu_0 N^2 A}{2(c_{\max} - x)} \frac{di}{dt} + \frac{\mu_0 N^2 Ai}{2(c_{\max} - x)^2} \frac{dx}{dt} \end{cases} \quad (1)$$

式中: m 为悬浮对象质量, N 为电磁铁线圈匝数, R 为电阻, A 为磁极面积, μ_0 为真空磁导率, c_{\max} 为最大悬浮间隙, $F(i, x)$ 为悬浮对象所受电磁力, f_d 为外界干扰, i 为流经电磁铁的电流, u 为电磁铁两端的电压, g 为重力加速度, x 为电磁铁与悬浮物体之间的间隙。

将式(1)在平衡点处进行线性化处理,系统在平衡点 (i_0, x_0) 处满足电磁力与重力的静态平衡:

$$F(i_0, x_0) = mg \quad (2)$$

动态响应分解为稳态值与扰动值叠加,假设扰动值为 $\Delta i, \Delta x$:

$$\begin{cases} i(t) = i_0 + \Delta i(t) \\ x(t) = x_0 + \Delta x(t) \end{cases} \quad (3)$$

通过小信号假设($\Delta i \ll i_0, \Delta x \ll x_0$),将非线性问题局部线性化,接着在平衡点处对电磁力 $F(i, x)$ 进行泰勒

展开,保留线性项:

$$F(i, x) \approx mg + \Delta F = mg + \left. \frac{\partial F}{\partial i} \right|_{(i_0, x_0)} \Delta i + \left. \frac{\partial F}{\partial x} \right|_{(i_0, x_0)} \Delta x \quad (4)$$

又基于牛顿第二定律,扰动加速度与电磁力扰动项关联:

$$m \frac{\partial^2 \Delta x}{\partial t^2} = \Delta F = k_i \Delta i + k_x \Delta x \quad (5)$$

$$k_i = \frac{\mu_0 N^2 A i_0}{2(c_{\max} - x_0)^2} \quad (6)$$

$$k_x = \frac{\mu_0 N^2 A i_0^2}{2(c_{\max} - x_0)^3} \quad (7)$$

式中: k_i 为电流对电磁力的灵敏系数,反映电流控制的响应速度, k_x 为气隙对电磁力的刚度系数,体现系统的负刚度特性。

对式(5)进行拉式变换,得到传递函数为:

$$G(s) = \frac{\Delta x(s)}{\Delta i(s)} = \frac{k_i}{ms^2 - k_x} \quad (8)$$

式中:分母项 $ms^2 - k_x$ 表明系统具有二阶振荡特性,分子项 k_i 表征电流输入对位置输出的直接增益。

根据劳斯判据可知,系统存在位于右半平面的正根,导致系统开环状态下不稳定。根据能控能观性理论,通过设计反馈控制器,可将原开环不稳定系统转化为具有指定动态性能的闭环稳定系统。本次实验对象物理参数如表 1 所示。

表 1 控制对象参数表

Table 1 Parameters of the controlled object

参数	数值
悬浮体质量 m/kg	3.25
线圈匝数 $N/\text{匝}$	820
电磁铁磁极面积 S/m^2	4×10^{-4}
真空磁导率 $\mu_0/(\text{H} \cdot \text{m}^{-1})$	$4\pi \times 10^{-7}$
最大悬浮间隙 c_{\max}/mm	8
平衡位置 x_0/mm	4

2 单点悬浮系统控制器的设计与分析

由于悬浮系统的电磁铁存在大电感效应^[21],本文将悬浮系统分解为电流内环子系统和位置外环子系统分别进行控制器设计。

2.1 电流环控制器的设计

根据式(1),其电压—电流关系可建模为:

$$\frac{I(s)}{U(s)} = \frac{1}{L_0 s + R} \quad (9)$$

式中: L_0 为电磁线圈的等效电感, R 为绕组电阻。

设计 PI 控制律:

$$U_{PI}(s) = K_P + K_I \frac{1}{s} = \frac{K_P s + K_I}{s} \quad (10)$$

式中: K_P 为比例增益系数,主导瞬态响应速度, K_I 为积分增益系数,消除稳态电流偏差与低频扰动的影响。

通过将 PI 参数与电磁系统本征参数关联,令 $K_P = L_0 K, K_I = RK$ 可得:

$$U_{PI}(s) = \frac{L_0 s + R}{s} K \quad (11)$$

该设计通过分子项 $L_0 s + R$ 抵消被控对象式(9)的分母项,使闭环动态仅由单一增益 K 主导,从而简化系统复杂度。

将式(10)代入式(9),通过反馈控制系统推导电流闭环传递函数为:

$$G_I(s) = \frac{K}{s + K} \quad (12)$$

式中: K 为电流环等效增益,综合表征控制强度与动态响应能力,其中极点 $s = -K$ 位于左半平面,确保系统渐进稳定性。

当增益系数 K 满足 $K \gg 1$ 时,闭环传递函数趋近于理想的一阶系统 $G_I(s) \approx 1$,高增益 K 迫使闭环时间常数 $\tau = 1/K$ 趋近于零,从而将原三阶系统简化为二阶模型,降阶后系统仅需调节单一参数 K ,降低多变量耦合带来的调参难度。

2.2 基于改进型位置环的控制器设计

在完成上述电流环控制器的近似降阶处理后,位置环的控制架构通过线性 LADRC 策略实现扰动补偿与系统简化,将悬浮体位移 $x(t)$ 和速度 $\dot{x}_1(t)$ 分别定义为状态变量 x_1 与 x_2 ,并将系统内外部扰动的综合效应扩展为第三状态变量 x_3 ,其方程为:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = x_3 + bu \\ \dot{x}_3 = h \\ y = x_1 \end{cases} \quad (13)$$

式中:控制输入 $u = -i(t)$ 以电流负反馈形式作用于系统,控制增益 $b = K_I/m$ 反映电流转换系数与质量的耦合关系,而 h 表征扰动的动态变化率。

基于式(13),设计线性扩张状态观测器 LESO 实时估计系统状态及扰动,观测器以观测误差 $e_1 = z_1 - x_1$ 为驱动,通过增益参数 $\beta_1, \beta_2, \beta_3$ 调节估计收敛速度,动态方程为:

$$\begin{cases} \dot{z}_1 = z_2 - \beta_1 e_1 \\ \dot{z}_2 = z_3 - \beta_2 e_1 + b_0 u \\ \dot{z}_3 = -\beta_3 e_1 \end{cases} \quad (14)$$

式中: z_1, z_2, z_3 分别对应 x_1, x_2, x_3 的观测值, $\hat{z}_1, \hat{z}_2, \hat{z}_3$ 分别对应 x_1, x_2, x_3 的估计值, b_0 为控制输入增益的标称值。

控制率由线性状态误差反馈与扰动前馈补偿两部分构成。首先,中间变量 u_0 通过比例-微分反馈生成:

$$u_0 = k_p(r - z_1) - k_d z_2 \quad (15)$$

式中: r 为气隙设定值, k_p 和 k_d 分别为比例与微分增益, 用于配置闭环系统的同动态响应特性。随后, 控制输入 u 通过扰动估计 z_3 的前馈补偿实现总扰动抵消:

$$u = \frac{u_0 - z_3}{b_0} \quad (16)$$

此控制策略将原位置环转化为近似二阶积分串联形式为 $\dot{y} \approx u_0$, 从而简化控制器设计并增强对内外扰动的鲁棒性。

传统控制率的传递函数为 $G(s) = K_p + K_d s$, 仅包含比例 K_p 和微分增益 K_d 两个可调参数, 且微分阶次固定为 1, 这种设计本质上是一种线性时不变控制策略, 其参数调节空间受限于二维平面, 无法针对系统动态特性的多频段需求进行精细化适配。若在磁悬浮系统中, 为了抑制低频段的负载扰动需要较高的微分增益以增强阻尼效果, 而为了抑制高频段的传感器噪声则需要降低微分增益以避免信号放大, 传统 PD 的固定阶次特性迫使控制系统在其二者间进行取舍, 导致控制性能的全局优化难以实现。

为进一步增强系统的抗扰的性能, 在传统的控制率 PD 中引入分数阶微分算子 s^μ , 其传递函数扩展为:

$$G(s) = K_p + K_d s^\mu \quad (17)$$

新增的分数阶次 μ 作为独立的调节维度, 使得控制器能够在频域上实现非整数阶的相位超前与幅值衰减特性。FOLADRC 结构如图 2 所示。

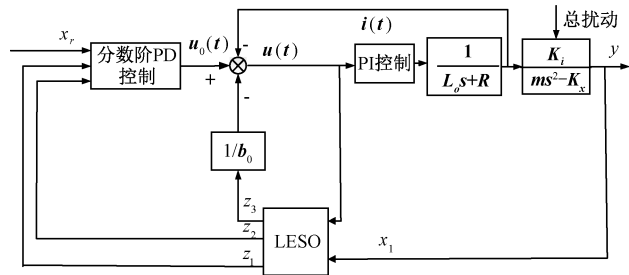


图 2 改进型 LADRC 的结构

Fig. 2 Structure of the improved LADRC

FOLADRC 在传统 PD 控制结构基础上引入了分数阶微分算子, 形成更具调节灵活性的控制率。其形式为:

$$u_0 = k_p(r - z_1) - k_d D^\mu z_2 \quad (18)$$

式中: r 为气隙设定值, k_p 和 k_d 分别为比例与微分增益, D^μ 为阶次为 μ 的微分算子。

根据文献[22]的结论, 配置观测器增益 $\beta_1 = 3\omega_0, \beta_2 = 3\omega_0^2, \beta_3 = \omega_0^3$, 线性状态误差反馈控制率参数 $k_p = \omega_c^2$ 和 $k_d = 2\omega_c$ 。其中, ω_0 为观测器带宽, ω_c 为控制器带宽。

3 FOLADRC 特性分析

3.1 稳定性分析

根据式 (8) 以及控制器的传递函数式 (17), 可得系统的传递函数为:

$$R(S) = \frac{k_i k_d s^\mu + k_i k_p}{m s^2 + k_i k_d s^\mu + k_i k_p - k_x} \quad (19)$$

该传递函数可以整理为如下形式:

$$R(s) = \frac{r}{s^\mu - \lambda} + \frac{r^*}{s^\mu - \lambda^*} \quad (20)$$

其中, r^*, λ^* 是 r, λ 的共轭转置, 并且有:

$$\begin{cases} \lambda = -\frac{k_i k_d}{2m} + j \frac{\sqrt{4m(k_i k_p - k_x) - (k_i k_d)^2}}{2m} \\ r = \frac{k_i (\lambda k_d + k_p)}{\lambda - \lambda^*} \end{cases} \quad (21)$$

将式 (19) 右侧第 1 项的 Laplace 逆变换为:

$$h_1(t) = r t^{\mu-1} E_{\mu, \beta}(\lambda t^\mu) \quad (22)$$

其中, $E_{\mu, \beta}$ 表示双参数 Mittag-Leffler 函数。

$$E_{\mu, \beta}(z) = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{z^k}{\Gamma(k\mu + \beta)} \quad (23)$$

传递函数 $R(S)$ 的脉冲响应为:

$$h(t) = 2Re\left(\frac{r}{\lambda}\right)(E_{\mu, \beta}(\lambda t^\mu) - 1) \quad (24)$$

阶跃响应终值可表示为:

$$y(\infty) = 2Re\left(-\frac{r}{\lambda}\right) \quad (25)$$

对双参数 Mittag-Leffler 函数式 (22), 当 β 是任意的复数时有:

$$\lim_{z \rightarrow \infty} E_{\mu, \beta}(z) = -\sum_{k=1}^{\infty} \frac{z^k}{\Gamma(\beta - k\mu)} + 0(|z|^{-1-\lambda}) \quad (26)$$

$\lambda \geq 1$ 是任意的整数, $0(\cdot)$ 为高阶项。因而 $y(t)$ 可以表示为:

$$y(t) \approx 2Re\left(-\frac{r t^{-\mu}}{\lambda^2 \Gamma(1-\mu)} - \frac{r}{\lambda}\right) \quad (27)$$

所以有:

$$y(\infty) = 2Re\left(-\frac{r}{\lambda}\right) = \frac{k_i k_p}{k_i k_p - k_x} \quad (28)$$

$$y(t) \approx 2Re\left(-\frac{r t^{-\mu}}{\lambda^2 \Gamma(1-\mu)} - \frac{r}{\lambda}\right) =$$

$$\frac{k_i k_p}{k_i k_p - k_x} + \left(\frac{2k_i k_p - k_i k_d^2/m}{\left(\frac{\sqrt{k_i k_p - k_x}}{m}\right)^3 \Gamma(1-\mu)}\right) t^{-\mu} \quad (29)$$

则稳态误差为:

$$E_{ess}(t) \approx y(t) - y(\infty) = \left\{ \frac{2k_i k_p - k_i k_d^2/m}{\left(\frac{\sqrt{k_i k_p - k_x}}{m}\right)^3 \Gamma(1-\mu)} \right\} t^{-\mu} \quad (30)$$

随着时间 t 的增加, 稳态误差 $E_{ess}(t)$ 逐渐趋于 0, 所以 FOLADRC 系统是稳定的。

3.2 频域分析

将本文控制对象参数代入式 (18) 中可得化简后的传递函数, 其中令 $k_p = 5000, k_d = 180$ 。

$$G(S) = \frac{S^2 + 1441.8S^\mu + 33903.54}{S^2 - 6146.46} \quad (31)$$

分数阶微分理论的引入使得阶次不再局限为整数 0、1 或 2,其取值为(0, 2)内的任意实数。分数阶控制器能够根据被控对象频域特性进行更加准确的幅值特性、相位特性调节,保证控制系统具备优异的响应性能。图 3 是根据式(30),令 μ 分别为 0.8、0.9、1.0、1.1、1.2 的频域对比图。

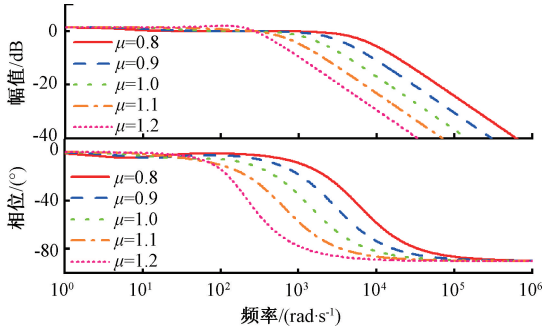


图 3 频域分析

Fig. 3 Frequency domain analysis

从图 3 中可以看出,随着 μ 增大,低频段幅值特性变化反映出系统对稳态误差的抑制能力差异,中高频段的幅值衰减速率与相位滞后程度逐渐减小,这表明分数阶微分算子的引入使控制器能更灵活地调节频域特性。 μ 越大,在高频段具有更高的幅值,说明系统的稳定性能更好,同时可增强对传感器噪声的抑制能力。 μ 越大,随着频率的增大,相位滞后越小,跟踪性能就越好。

当 $\mu = 1.2$ 时,系统在 5~20 Hz 扰动频段的幅值衰减量较 $\mu = 1$ 提升 8~12 dB,且 100~500 Hz 高频噪声放大系数降低 6~8 dB,实现低频抗扰与高频降噪的平衡。 μ 取值需控制在 1.0~1.2 范围内,若 $\mu < 1$,则低频段扰动抑制能力下降,位置偏移量增大 30%。若 $\mu > 1$,则高频段相位滞后增加 15°~20°,系统稳定性裕度降低,易出现悬浮间隙高频波动。

4 仿真与实验

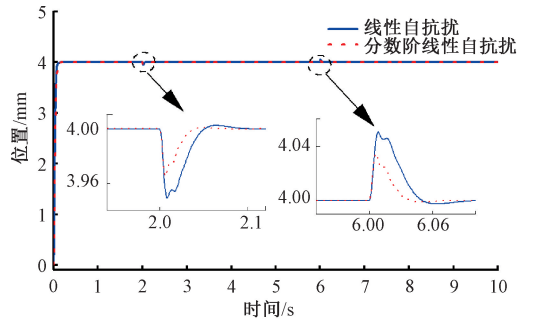
4.1 仿真实验

为了验证本文控制算法的可行性,将 FOLADRC 作为单点悬浮系统位置外环控制器,并与传统 LADRC 进行抗扰对比实验。两种算法均结合 PI 控制参数 ($k_p = 200$, $k_i = 4\ 000$) 的电流环构成双环控制器。

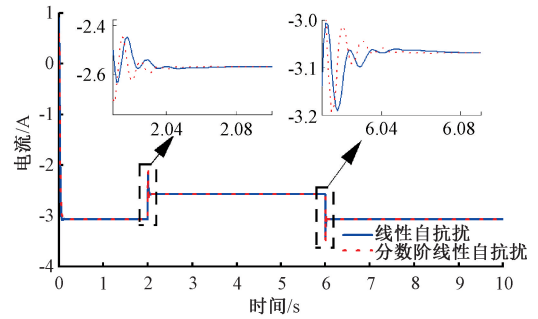
图 4 为阶跃负载抗干扰性能对比仿真曲线,图 4(a)和(b)分别为位置分别为位置响应和电流响应曲线。

电流环的参数为 $k_p = 1\ 300$, $k_i = 2$ 。位置环的参数如表 2 所示。

在 2 s 给系统突加 0.5 A 的阶跃负载扰动,持续 4 s 后,突减 0.5 A 的阶跃负载扰动。由图 4(a)可知,在传统 LADRC 控制下,调节时间为 92 ms,位置偏移量为 0.05 mm。而在 FOLADRC 的控制下,调节时间为 63 ms,位置偏移量为 0.03 mm。由图 4(b)可知,在 0.5 A 的阶跃



(a) 位置响应仿真
(a) Simulation curve of position response



(b) 电流响应仿真
(b) Simulation curve of current response

图 4 阶跃负载抗干扰性能对比仿真曲线

Fig. 4 Simulation curves of anti-disturbance performance comparison under step load

表 2 实验位置环参数

Table 2 Experimental parameters of the position loop

控制算法	控制参数	数值
LADRC	ω_0	6.0
	ω_c	1.4
	b_0	10.0
FOLADRC	ω_0	6.0
	ω_c	1.4
	b_0	10.0
	μ	1.2

干扰下传统 LADRC 调节时间为 82 ms,而 FOLADRC 调节时间仅需 54 ms。由此可见,系统在受到扰动时,FOLADRC 的抗扰性能要优于传统的 LADRC,并且改进型 LADRC 在受到扰动时能更快的消除扰动使系统更快的恢复平衡,而对于电流环,FOLADRC 的电流响应速度也要比传统 LADRC 也要更快。

图 5 为正弦干扰力下的抗干扰性能对比仿真实验。为了验证系统对周期性扰动力的抗扰能力,对系统施加正弦干扰力,通过位置偏移量对比改进前后 LADRC 算法对周期性干扰的抗干扰能力。

由图 5 可知,在传统 LADRC 控制下的位置偏移量为 0.12 mm,而在 FOLADRC 控制下的位置偏移量仅为 0.05 mm。仿真结果对比分析表明,针对周期性扰动的情

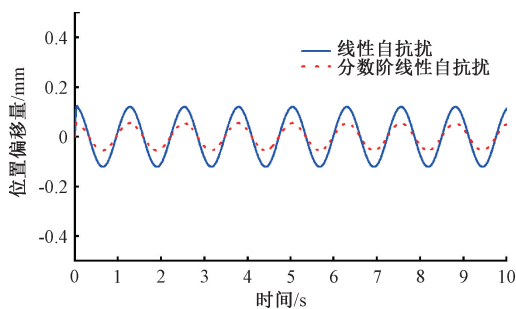


图5 正弦干扰力下抗干扰性能对比仿真

Fig. 5 Simulation curves of anti-disturbance performance comparison under sinusoidal disturbance force

况下,FOLADRC 具备更优异的鲁棒性。

4.2 实验验证

为深入验证 FOLADRC 控制性能,以 F 轨为控制对象,采用 TMS320F28335 数字信号处理器作为控制器进行实验。图 6 展示了 F 轨实验平台以及所用到的外围电路板。

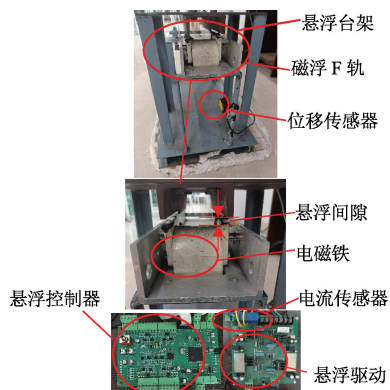


图6 F轨悬浮实验平台

Fig. 6 F-rail levitation experimental platform

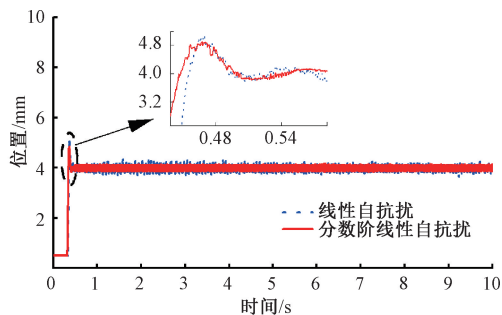
1) 静态悬浮实验

图 7 为悬浮电磁铁从初始位置 0 mm 到达设定值 4 mm 的位置-电流响应对比实验。由图 7 可知,传统 LADRC 的位置超调量为 1.1 mm,FOLADRC 的位置超调量为 0.8 mm,两者到达稳态后 FOLADRC 的波动也要更小。静态悬浮 ITAE 如表 3 所示。

2) 抗干扰实验

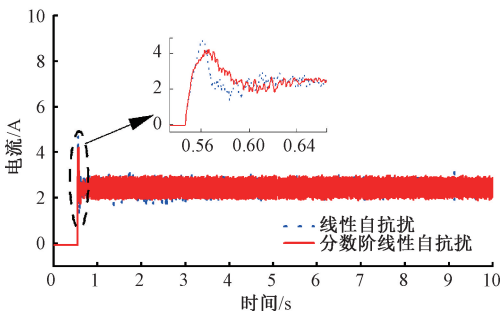
如图 8~11 所示,为测试系统的抗干扰性能,待系统稳定悬浮后,在 3 和 6 s 时刻分别向悬浮控制器输出的 PWM 波中突加和突减 30%、40%、50% 和 60% 占空比的扰动。抗干扰实验结果如表 4 所示。

根据图 8~11 以及表 4 统计结果可知,随着占空比干扰不断增大,LADRC 最终会砸轨,而 FOLADRC 并未出现砸轨现象,FOLADRC 具有良好的抗干扰性能。抗干扰 ITAE 如表 5 所示。



(a) 位置响应实验

(a) Experimental curve of position response



(b) 电流响应实验

(b) Experimental curve of current response

图7 静态悬浮位置-电流响应对比实验

Fig. 7 Experimental curves of static levitation position-current response comparison

表3 静态悬浮性能指标(ITAE)

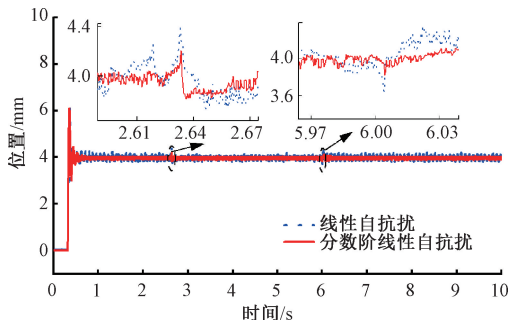
Table 3 Static levitation performance index (ITAE)

控制算法	数值
LADRC	41 300
FOLADRC	31 000

3) 跟踪性实验

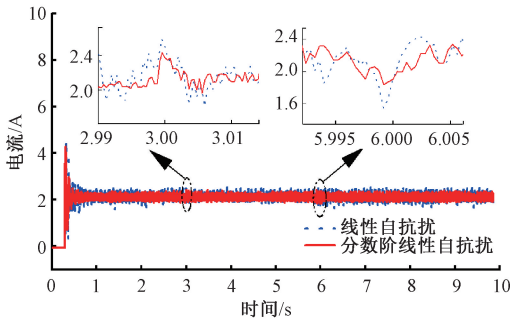
为进一步验证系统的跟踪性能,在系统稳定至 4 mm 后,将悬浮间隙突增为 4.2 mm,稳定一段时间后再将悬浮间隙调至为 4.4 mm,之后再将其悬浮间隙减至为 4.2 mm,以此来测试系统的适应性能。

图 12 为突变悬浮间隙位置响应对比实验。由图 12 可知,当将悬浮间隙突变为 4.2 mm 时,传统 LADRC 的超调量为 0.1 mm,而改进型 LADRC 的超调量仅为 0.04 mm



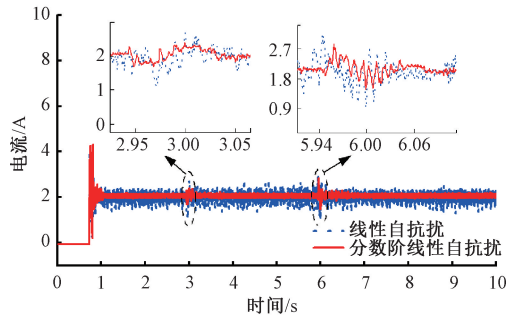
(a) 抗干扰位置响应实验

(a) Experimental curve of anti-disturbance position response



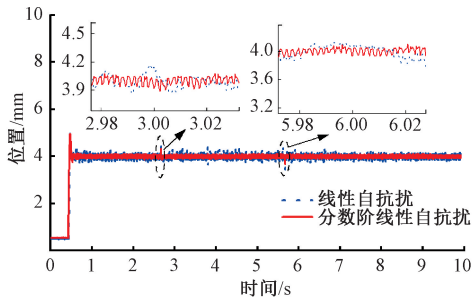
(b) 抗干扰电流响应实验
(b) Experimental curve of anti-disturbance current response

图 8 30% 占空比干扰下的悬浮位置-电流响应对比实验
Fig. 8 Experimental curves of levitation position-current response comparison under 30% duty cycle disturbance

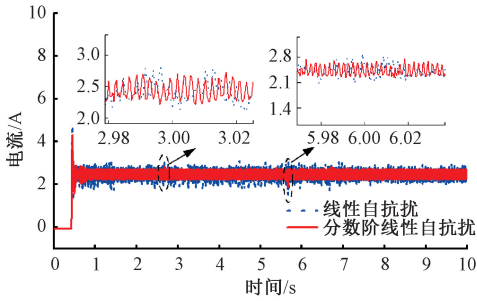


(b) 抗干扰电流响应实验
(b) Experimental curve of anti-disturbance current response

图 10 50% 占空比干扰下的悬浮位置-电流响应对比实验
Fig. 10 Experimental curves of levitation position-current response comparison under 50% duty cycle disturbance

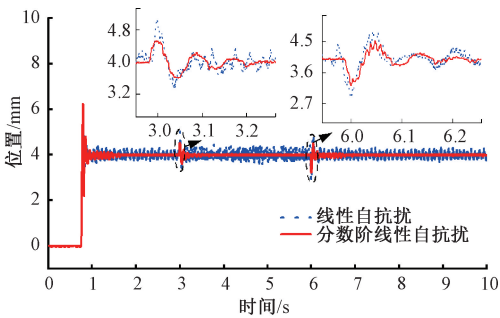


(a) 抗干扰位置响应实验
(a) Experimental curve of anti-disturbance position response



(b) 抗干扰电流响应实验
(b) Experimental curve of anti-disturbance current response

图 9 40% 占空比干扰下的悬浮位置-电流响应对比实验
Fig. 9 Experimental curves of levitation position-current response comparison under 40% duty cycle disturbance



(a) 抗干扰位置响应实验
(a) Experimental curve of anti-disturbance position response

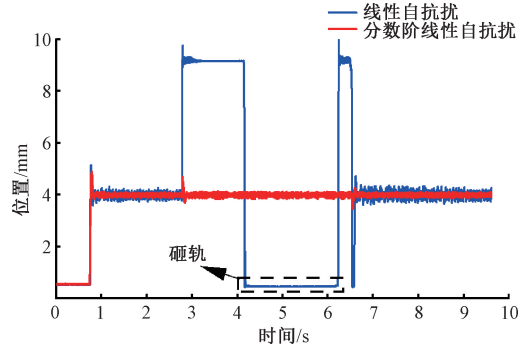


图 11 60% 占空比干扰下的悬浮位置响应实验

Fig. 11 Experimental curve of levitation position response under 60% duty cycle disturbance

表 4 抗干扰实验结果统计表

Table 4 Statistical table of anti-interference experiment results

控制算法	位置偏移量/mm	调节时间/ms
LADRC	0.39(30%pwm)	7.1(30%pwm)
	0.65(40%pwm)	9.2(40%pwm)
	1.04(50%pwm)	14.1(50%pwm)
	碰轨(60%pwm)	110.8(60%pwm)
FOLADRC	0.2(30%pwm)	1.4(30%pwm)
	0.34(40%pwm)	2.2(40%pwm)
	0.52(50%pwm)	2.5(50%pwm)
	0.85(60%pwm)	99.6(60%pwm)

表 5 抗干扰性能指标 (ITAE)

Table 5 Anti-disturbance performance index (ITAE)

控制算法	30%pwm	40%pwm	50%pwm	60%pwm
LADRC	8 770	10 800	15 300	138 000
FOLADRC	4 008	5 530	6 470	5 090

且恢复平衡后稳态误差也会更小。同时,当悬浮间隙由 4.4 mm 降为 4.2 mm 时,传统 LADRC 的超调量为

0.21 mm,而改进型LADRC的超调量也仅为0.12 mm且恢复稳定后稳态误差也要更小。

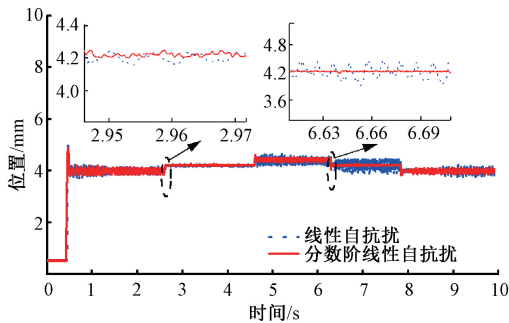


图12 突变悬浮间隙位置响应对比实验

Fig. 12 Experimental curves of levitation gap sudden change position response comparison

图13为突变悬浮间隙电流响应对比实验。由图13可知,当将悬浮间隙由4 mm突增至4.2 mm时,传统LADRC恢复到平衡的调节时间为30.4 ms,而FOLADRC恢复到平衡的调节时间仅为9.6 ms。同时,当将悬浮间隙由4.4 mm突减至4.2 mm时,传统LADRC虽与FOLADRC调节时间相差不多,但传统LADRC恢复到平衡后稳态误差稍大,电流波动达到0.5 A,而FOLADRC恢复平衡后波动范围仅为0.2 A。适应性ITAE如表6所示。

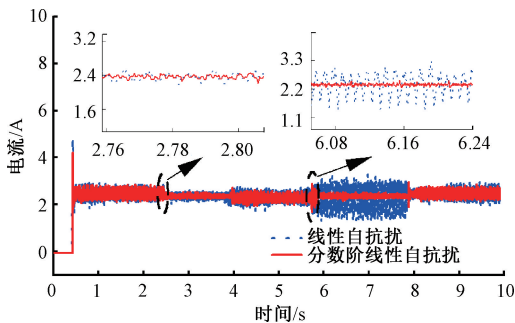


图13 突变悬浮间隙电流响应对比实验

Fig. 13 Experimental curves of current response comparison under sudden change of levitation gap

表6 适应性性能指标(ITAE)

Table 6 Adaptability performance index (ITAE)

控制算法	数值
LADRC	23 600
FOLADRC	22 900

4) 冲击性抗扰对比实验

如图14所示,采用质量为500 g的物体,分别从2 cm、4 cm的高度以自由落体形式施加在悬浮架上,来验证悬浮系统对不同强度的冲击性扰动的抗扰性能。

由图14可知,在3 s时,将物体在2 cm的高度自由落体冲击悬浮架,LADRC的位置偏移量为1.2 mm,而

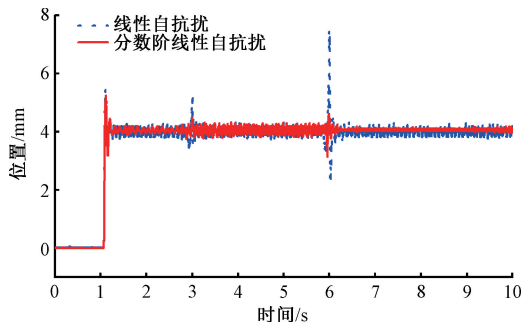


图14 高度为2、4 cm冲击抗扰响应对比实验

Fig. 14 Experimental curves of shock disturbance rejection response comparison at 2 and 4 cm heights

FOLADRC的偏移量仅为0.46 mm。同时,在6 s时,将物体在4 cm的高度自由落体冲击悬浮架,LADRC的位置偏移量为3.4 mm,而FOLADRC的偏移量仅为0.8 mm。

为进一步测试悬浮系统的抗外扰能力,将物体在6 cm的高度自由落体冲击悬浮架,如图15所示。

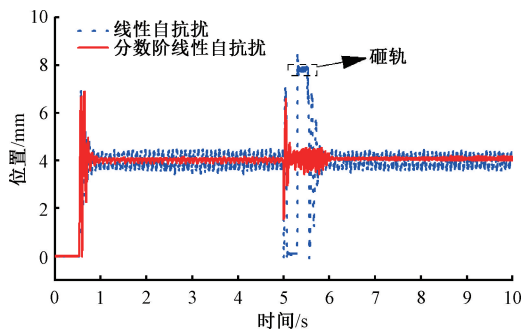


图15 高度为6 cm冲击抗扰响应对比实验

Fig. 15 Experimental curves of shock disturbance rejection response comparison at 6 cm height

在悬浮系统运行到5 s时加入外扰,此时LADRC算法的悬浮系统已砸轨,且需0.83 s才达到平衡状态,而FOLADRC算法的悬浮系统达到平衡状态仅需0.19 s。冲击性抗扰ITAE如表7所示。

表7 冲击性抗扰性能指标(ITAE)

Table 7 Shock disturbance rejection performance index (ITAE)

控制算法	2、4 cm 高度扰动	6 cm 高度扰动
LADRC	18 200	58 600
FOLADRC	15 300	14 100

综合上述实验结果可知,FOLADRC在磁悬浮控制中具有良好的静态性能和阶跃响应性能,在此基础上,FOLADRC还具有更强的抗干扰能力。此外,在具有更小稳态误差的同时,面对突变悬浮间隙的情况下,还具备更好的适应能力。

5 结 论

本研究针对电磁悬浮系统开环不稳定、参数摄动及外部扰动等控制难题,提出 FOLADRC 方法。该方法借助 LESO 实时估计系统内外扰动,并在位置环控制律中引入分数阶微分算子,利用其阶次在 $(0, 2)$ 连续调节特性,实现频域内相位与幅值的灵活适配。

理论分析表明,FOLADRC 可增强低频段扰动抑制能力,降低高频段噪声放大效应,有效解决传统 LADRC 中整数阶 PD 控制律难以兼顾宽频段扰动抑制与噪声衰减的问题。

仿真与实验结果显示,相较于传统 LADRC, FOLADRC 在阶跃负载、正弦干扰等场景下,位置偏移量减小 48.72%,调节时间缩短 80.28%,并能有效的应对更高强度的扰动。同时,在突变悬浮间隙跟踪实验中,超调量降低 42.86%,稳态误差也更小,验证了其在抗干扰性、跟踪精度及突变适应能力上的显著优势,为电磁悬浮系统控制提供了良好的解决方案。

参考文献

- [1] 邓自刚,刘宗鑫,李海涛,等. 磁悬浮列车发展现状与展望[J]. 西南交通大学学报,2022,57(3):455-474.
DENG Z G, LIU Z X, LI H T, et al. Current status and prospect of maglev trains[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2022, 57(3):455-474.
- [2] 熊嘉阳,沈志云,池茂儒,等. 高速磁悬浮列车技术综述[J]. 交通运输工程学报,2025,25(2):1-23.
XIONG J Y, SHEN ZH Y, CHI M R, et al. A review of high-speed maglev train technology[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2025,25(2): 1-23.
- [3] LI M, GAO D G, LI T, et al. Dynamic interaction of medium low-speed maglev train running on the turnout made of steel structures [J]. Vehicle System Dynamics, 2023, 61(4): 1129-1150.
- [4] 黄翠翠,李晓龙,杨洋,等. 基于自抗扰技术的机械-电磁悬浮复合隔振控制[J]. 西南交通大学学报,2022, 57(3):582-587.
HUANG C C, LI X L, YANG Y, et al. Compound vibration isolation control of mechanical-electromagnetic levitation based on active disturbance rejection technology[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2022,57(3):582-587.
- [5] 于锦涛,杨杰,胡海林,等. 基于改进跟踪微分器的电磁悬浮控制系统研究[J]. 国外电子测量技术,2024, 43(2):114-122.
YU J T, YANG J, HU H L, et al. Research on electromagnetic levitation control system based on

improved tracking differentiator[J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2024,43(2):114-122.

- [6] 李至勇,杨杰,周发助,等. 电磁悬浮系统的改进滑模控制方法[J]. 电子测量技术,2024,47(4):87-94.
LI ZH Y, YANG J, ZHOU F ZH, et al. Improved sliding mode control method for electromagnetic levitation system [J]. Electronic Measurement Technology, 2024,47(4):87-94.
- [7] 赵川,孙凤,裴文哲,等. 永磁悬浮平台的分散串级控制方法[J]. 西南交通大学学报,2022,57(3):618-626.
ZHAO CH, SUN F, PEI W ZH, et al. Decentralized cascade control method for permanent magnet levitation platform[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2022,57(3): 618-626.
- [8] 李卫东,王玮崧,王新屏. 磁悬浮列车简捷鲁棒控制与仿真研究[J]. 电子测量技术,2021,44(2):56-60.
LI W D, WANG W S, WANG X P. Research on simple robust control and simulation of maglev train [J]. Electronic Measurement Technology, 2021, 44 (2): 56-60.
- [9] TIAN X F, XIANG H Y, CHEN CH L, et al. Dynamic response analysis of high-speed maglev train-guideway system un-der crosswinds [J]. Journal of Central South University, 2023, 30(8): 2757-2771.
- [10] 王金锁,蒋启龙,罗雨,等. 磁悬浮系统自抗扰广义预测控制[J]. 哈尔滨工业大学学报,2022,54(9):141-150.
WANG J S, JIANG Q L, LUO Y, et al. Active disturbance rejection generalized predictive control for maglev system [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2022,54(9): 141-150.
- [11] 袁浩仁,周福强,孙江宏. 基于负载转矩观测器的永磁同步电机改进线性自抗扰控制方法[J]. 电子测量技术,2025,48(9):36-43.
YUAN H R, ZHOU F Q, SUN J H. Improved linear active disturbance rejection control method for permanent magnet synchronous motor based on load torque observer[J]. Electronic Measurement Technology, 2025,48(9):36-43.
- [12] SUN CH H, LIU CH AN, FENG X L, et al. Visual servoing of flying robot based on fuzzy adaptive linear active disturbance rejection control [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems II-Express Briefs, 2021,68(7): 2558-2562.
- [13] 钟永彬,高健,冯富原,等. 基于闭环辨识模型的永磁同步直线电机分数阶反馈控制方法[J]. 中国机械工程, 2023,34(23):2773-2780,2793.
ZHONG Y B, GAO J, FENG F Y, et al. Fractional-order feedback control method for permanent magnet

- synchronous linear motor based on closed-loop identification model[J]. *China Mechanical Engineering*, 2023, 34(23): 2773-2780, 2793.
- [14] 张文静,曹博文,李宽欣,等.中速磁悬浮列车的分数阶运行控制方法[J].*铁道学报*,2022,44(2):42-48.
ZHANG W J, CAO B W, LI K X, et al. Fractional-order operation control method for medium-speed maglev trains [J]. *Journal of the China Railway Society*, 2022, 44(2): 42-48.
- [15] 许贤泽,宋明星,龚勇兴,等.基于扰动补偿的磁悬浮转台分数阶滑模控制[J].*西南交通大学学报*,2024, 59(4):766-775.
XU X Z, SONG M X, GONG Y X, et al. Fractional-order sliding mode control of maglev turntable based on disturbance compensation[J]. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 2024, 59(4): 766-775.
- [16] AI-DHAIFALLAH M, SAIF A W A, ELFERIK S, et al. Combining sliding mode and fractional-order theory for maximum power point tracking enhancement of variable-speed wind energy conversion[J]. *Fractal and Fractional*, 2024, 8(8): 447.
- [17] 刘福才,郭根旺.气动变载荷加载系统的分数阶PID改进型自抗扰控制[J].*振动与冲击*,2022,41(15):116-121.
LIU F C, GUO G W. Fractional-order PID improved active disturbance rejection control for pneumatic variable load loading system[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2022, 41(15): 116-121.
- [18] 郭桐花,王加银.变论域自适应模糊分数阶自抗扰控制器设计[J].*北京师范大学学报(自然科学版)*,2022, 58(1):11-17.
GUO Y H, WANG J Y. Design of variable universe adaptive fuzzy fractional-order active disturbance rejection controller [J]. *Journal of Beijing Normal University(Natural Science Edition)*, 2022, 58(1): 11-17.
- [19] WANG SH H, GAN H, LUO Y, et al. Active disturbance rejection control with fractional-order model-aided extended state observer [J]. *ISA Transactions*, 2023, 142: 527-537.
- [20] 曹泽华,杨杰,胡海林.单点磁悬浮系统自抗扰自适应控制[J].*哈尔滨工业大学学报*,2024,56(8):86-93.
CAO Z H, YANG J, HU H L. Active disturbance rejection adaptive control for single-point maglev system[J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2024, 56(8): 86-93.
- [21] 蒋启龙,梁达,阎枫.数字单周期电流控制在电磁悬浮系统中的应用[J].*西南交通大学学报*,2019,54(1): 1-8.
JIANG Q L, LIANG D, YAN F. Application of digital single-cycle current control in electromagnetic levitation system[J]. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 2019, 54(1): 1-8.
- [22] 李健,谭文,张彬文.观测器带宽参数化的自抗扰控制[J].*控制工程*,2022,29(7):1181-1186.
LI J, TAN W, ZHANG B W. Active disturbance rejection control with observer bandwidth parameterization [J]. *Control Engineering of China*, 2022, 29(7): 1181-1186.

作者简介

张振利,副教授,主要研究方向为磁悬浮交通系统。

E-mail:47717770@qq.com

胡志强(通信作者),硕士研究生,主要研究方向为磁悬浮控制。

E-mail:2452779866@qq.com