

电励磁磁通切换直线电动机磁悬浮系统 模糊自抗扰控制的研究

邱 迪*, 蓝益鹏

(沈阳工业大学 电气工程学院, 辽宁 沈阳 110870)

Research on Fuzzy Active Disturbance Rejection Control for Maglev Systems of Electrically Excited Flux-Switching Linear Motors

Qiu Di*, Lan Yipeng

(School of Electrical Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, China)

Abstract: [Objective] The electrically excited flux-switching linear motor (EEFSLM) maglev system is a complex nonlinear system characterized by strong coupling and uncertain disturbances. The linear active disturbance rejection control (LADRC) exhibits limitations in maglev applications due to its fixed parameters and insufficient adaptability, making it difficult to reconcile the inherent trade-off between rapid dynamic response and strong disturbance rejection. To address this, this paper proposes a fuzzy active disturbance rejection control (FADRC) strategy to enhance the controller's parameter self-adaptation capability. [Methods] Firstly, a mathematical model for the magnetic levitation direction was established based on the special structure and operating mechanism of the EEFSLM, and the magnetic levitation force equation and motion equation were derived. Secondly, the parameters of the linear state error feedback (LSEF) control law were tuned using the bandwidth method. To address the insufficient adaptability of fixed parameters, a FADRC controller was designed by introducing a fuzzy inference mechanism to adaptively adjust the LSEF bandwidth online. Finally, simulation analyses of FADRC, LADRC, and traditional proportional-integral (PI) control were conducted on the Matlab/Simulink platform. [Results] Simulation results showed that compared with LADRC and traditional PI control strategies, the FADRC strategy exhibited faster response speed and stronger disturbance rejection capability, demonstrating strong robustness and stability. [Conclusion] The proposed FADRC strategy in this paper significantly improves the control performance of the EEFSLM maglev system and can effectively meet the requirements for stable operation under high-performance conditions.

Key words: electrically excited flux-switching linear motor; maglev system; fuzzy active disturbance rejection control; linear state error feedback

摘 要: 【目的】电励磁磁通切换直线电动机(EEFSLM)磁悬浮系统是一个非线性、强耦合且存在不确定性扰动的复杂系统。线性自抗扰控制(LADRC)在磁悬浮系统中参数固定且自适应能力不足,难以兼顾快速动态响应与强抗扰能力的内在矛盾。为此,本文提出一种模糊自抗扰控制(FADRC)策略,以提升控制器的参数自适应能力。【方法】首先,根据 EEFSLM 的特殊结构和运行机理,建立其磁悬浮方向的数学模型,推导磁悬浮力方程与运动方程。其次,采用带宽法对线性状态误差反馈(LSEF)控制律的参数进行整定。为解决固定参数适应性不足的问题,进一步引入模糊推理机制对 LSEF 带宽进行在线自适应调整,设计了 FADRC 控制器。最后,基于 Matlab/Simulink 平台,对 FADRC、LADRC 及传统比例积分(PI)控制进行了仿真分析。【结果】仿真结果表明,与 LADRC 和传统 PI 控制策略相比,FADRC 策略响应速度更快、抗干扰能力更强,展现出较强的鲁棒性和稳定性。【结论】本文所提 FADRC 策略显著提升了 EEFSLM 磁悬浮系统的控制性能,能够有效满足系统在高性能工况下的稳定运行需求。

关键词: 电励磁磁通切换直线电动机;磁悬浮系统;模糊自抗扰控制;线性状态误差反馈

0 引言

磁悬浮列车因无机械摩擦、低噪音及高效舒适等显著优势,在现代轨道交通领域备受关注^[1]。传统磁悬浮列车多采用永磁直线电机驱动^[2],然而,长距离铺设永磁体或绕组存在成本高、维修困

难^[3]以及在复杂工况下易发生不可逆退磁等隐患^[4]。为解决这一问题,本文将电励磁磁通切换直线电动机(Electrically Excited Flux-Switching Linear Motor, EEFSLM)引入磁悬浮列车系统中。

与传统永磁直线电机不同,EEFSLM 的励磁绕组与电枢绕组均分布于动子侧,长定子仅由无源纯铁心构成,这种独特结构极大地降低了轨道建设与维修成本,特别适合长距离轨道交通^[5-6]。然而,由于 EEFSLM 磁悬浮系统省掉了中间传动环节,直线电机固有的端部效应及不确定性扰动产生的影响使得磁悬浮系统的高性能控制变得更加复杂^[7-8]。

目前,在磁悬浮系统的气隙高度控制中,传统比例-积分(Proportional-Integral, PI)^[9]控制策略因结构简单而被广泛应用。然而,在面对 EEFSLM 这种强非线性系统及未知扰动时,PI 控制的抗干扰能力严重受限,在极端负载突变下,甚至会导致系统产生剧烈振荡与砸轨风险^[10-11]。相比之下,线性自抗扰控制(Linear Active Disturbance Rejection Control, LADRC)作为一种不依赖精确数学模型的新型鲁棒控制技术,展现出了显著的优势^[12]。LADRC 通过观测器将系统的内外部不确定性扰动统一视为总扰动进行实时估计,并给予前馈补偿^[13]。

然而,在面对磁悬浮这种存在诸多不确定性因素的系统时,固定的 LADRC 参数难以兼顾快速动态响应与强抗扰能力的物理矛盾。为进一步提高控制性能,许多学者对 LADRC 进行改进。文献[14]针对传统跟踪微分器(Tracking Differentiator, TD)的结构局限,通过融合反平方根与终端吸引子函数构建了一种改进型 TD,显著增强了对参考信号的跟踪及噪声抑制能力。文献[15]设计了一种基于线性扩张状态观测器(Linear Extended State Observer, LESO)优化的改进 LADRC 方法,相比传统 LADRC 具有更优的抗扰性能。文献[16]提出了一种基于改进型 LESO 的抗扰策略,有效提升了被控对象在多变工况下的扰动抑制能力。文献[17-19]提出了一种将模糊推理与 LADRC 相结合的控制方法,通过模糊控制器自适应调节 LADRC 的参数,并在扰动抑制情况下表现出更强的鲁棒性。

综上,本文提出一种用于 EEFSLM 磁悬浮系

统的模糊自抗扰控制(Fuzzy Active Disturbance Rejection Control, FADRC)策略。首先,构建系统数学模型并设计 LESO 与线性状态误差反馈(Linear State Error Feedback, LSEF)控制律;其次,基于带宽法完成控制器参数整定,并引入模糊推理机制实现对 LSEF 带宽的在线自适应调节。最后,通过仿真将所提 FADRC 策略与传统 PI 控制及 LADRC 策略进行对比分析,验证了本文所提 FADRC 策略在磁悬浮控制系统中的可行性和优越性。

1 EEFSLM 的结构及运行机理

1.1 EEFSLM 结构

EEFSLM 结构包含动子铁心及定子铁心,如图 1 所示。励磁绕组和电枢绕组位于短动子,长定子为纯铁心。

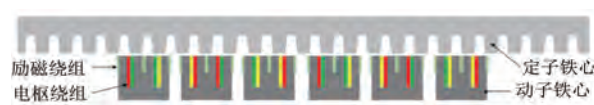


图 1 EEFSLM 结构图

Fig. 1 EEFSLM structural diagram

1.2 EEFSLM 悬浮力产生原理

当直流电流通入励磁绕组时,将在气隙中建立起励磁磁场。该磁场与定子铁心耦合,产生垂直方向的悬浮力。通过控制励磁电流使悬浮力与列车重力达到动态平衡,即可实现系统的稳定悬浮,且悬浮气隙高度可通过调节励磁电流大小精确控制^[20]。

2 建立 EEFSLM 磁悬浮系统数学模型

为便于构建 EEFSLM 磁悬浮系统的数学模型并简化分析,本文作如下假设^[21]。

- (1) 忽略电动机的磁槽效应与端部效应;
- (2) 不考虑磁路饱和,且忽略磁滞与涡流损耗;
- (3) 只考虑电动机基波磁场的影响,忽略谐波影响;
- (4) 电动机绕组的电阻与电感不受温度变化的影响。

基于上述假设,EEFSLM 磁悬浮系统在 $d-q$ 旋转坐标系下的数学模型为^[22]

电压方程:

$$\begin{cases} u_d = i_d R_s - \frac{\pi v}{\tau} \psi_q + \frac{d\psi_d}{dt} \\ u_q = i_q R_s + \frac{\pi v}{\tau} \psi_d + \frac{d\psi_q}{dt} \\ u_f = i_f R_f + \frac{d\psi_f}{dt} \end{cases} \quad (1)$$

式中: u_d 、 u_q 和 i_d 、 i_q 分别为 d 、 q 轴的电压和电流分量; u_f 、 i_f 和 R_f 分别为励磁绕组的电压分量、电流分量和阻值; R_s 为电枢绕组的电阻; ψ_d 、 ψ_q 分别为 d 、 q 轴的磁链分量; ψ_f 为励磁绕组的磁链分量; v 为电动机运行速度; τ 为电动机极距。

磁链方程:

$$\begin{cases} \psi_d = (L_{md} + L_{\sigma}) i_d + L_{md} i_f \\ \psi_q = (L_{mq} + L_{\sigma}) i_q \\ \psi_f = (L_{md} + L_{\sigma f}) i_f + L_{md} i_d \end{cases} \quad (2)$$

式中: L_{md} 、 L_{mq} 分别为 d 、 q 轴主电感; L_{σ} 为电枢绕组的漏电感; $L_{\sigma f}$ 为励磁绕组的漏电感。

采用 $i_d=0$ 的矢量控制, 可推导出磁悬浮力的方程为

$$F_y = \frac{3}{2} \left[i_f^2 \frac{\partial L_{md}}{\partial \delta} + i_q^2 \frac{\partial L_{mq}}{\partial \delta} \right] \quad (3)$$

式中: F_y 为磁悬浮力; δ 为磁悬浮气隙高度。

式(3)中 $i_q^2 \frac{\partial L_{mq}}{\partial \delta}$ 为电枢反应磁场对定子产生的吸引力, 将其视为扰动项^[23]。因此, 可得整理后的磁悬浮力方程为

$$F_{y1} = \frac{3}{2} i_f^2 \frac{\partial L_{md}}{\partial \delta} = K \left(\frac{i_f}{\delta} \right)^2 \quad (4)$$

式中: $K=4.25 \times 10^{-5}$ 为磁悬浮系数。

磁悬浮系统的运动方程为

$$m \frac{d^2 \delta}{dt^2} = F_{y1} - f_y - mg \quad (5)$$

式中: m 为 EEFSLM 动子与运动平台的总质量; f_y 为端部效应和垂直方向产生的扰动; g 为重力加速度。

垂直方向总扰动为

$$f = f_y - \frac{3}{2} i_q^2 \frac{\partial L_{mq}}{\partial \delta} \quad (6)$$

取状态变量 $x_1 = \delta$ 、 $x_2 = \frac{d\delta}{dt}$, 得到 EEFSLM 磁悬浮系统的状态空间方程为^[24]

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = \frac{Ki_f^2}{mx_1^2} - g - \frac{1}{m}f \end{cases} \quad (7)$$

3 控制器设计

3.1 LADRC 控制器设计

LADRC 主要由 TD、LESO 和 LSEF 三部分组成^[25]。其核心思想是不依赖于被控对象的精确数学模型, 将系统内部的未建模动态和外部未知扰动统一视为总扰动。LADRC 结构框图如图 2 所示。

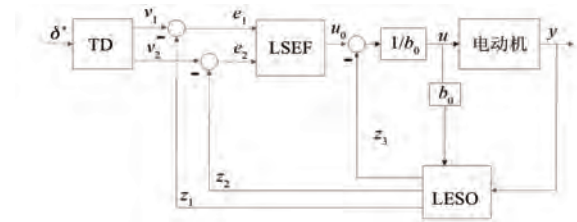


图 2 LADRC 结构框图

Fig. 2 Block diagram of LADRC structure

图 2 中, δ^* 为目标磁悬浮气隙高度; v_1 为跟踪信号; v_2 为微分信号; y 为实际悬浮气隙高度; z_1 、 z_2 分别为悬浮气隙及其变化率的估计值; z_3 为总扰动的估计值; e_1 、 e_2 分别为悬浮气隙误差及其变化率; u_0 为未补偿控制量; b_0 为扰动补偿系数; u 为经总扰动补偿后的最终控制量。

3.1.1 TD

为了避免初始误差过大引起系统超调, 通过安排 TD 环节对给定的目标磁悬浮高度信号进行平滑过渡处理, 其表达式为

$$\begin{cases} \dot{v}_1 = v_2 \\ \dot{v}_2 = fhan(v_1 - \delta^*, v_2, r_0, h_0) \end{cases} \quad (8)$$

$$\begin{cases} fhan(e, v_2, r_0, h_0) = - \begin{cases} r_0 \text{sign}(a), & |a| > d \\ r_0 \frac{a}{d}, & |a| < d \end{cases} \\ a = \begin{cases} v_2 + \frac{(a_0 - d)}{2} \text{sign}(y), & |y| > d_0 \\ v_2 + \frac{y}{h}, & |y| \leq d_0 \end{cases} \\ y = e + hv_2 \\ a_0 = \sqrt{d^2 + 8r_0|y|} \\ d_0 = h_0 d \\ d = r_0 h_0 \end{cases} \quad (9)$$

式中: h 为采样周期; h_0 为滤波因子; r_0 为决定速度的跟踪因子。

将最速控制综合函数 $fhan(e, v_2, r_0, h)$ 中的参数 h 替换为 h_0 , 只要选取 h_0 为略大于 h 的参数便可避免超调现象^[26]。

3.1.2 LESO

针对 EEFSLM 磁悬浮系统二阶模型, 构建三阶 LESO, 将式(6)中的总扰动扩张成新的状态变量 x_3 , 记作 $x_3 = f(x_1, x_2)$, 并记 $\dot{x}_3 = \omega(t)$, 得到扩张后系统的状态空间方程为

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = x_3 + b_0 u \\ \dot{x}_3 = \omega(t) \\ y = x_1 \end{cases} \quad (10)$$

则设计的 LESO 的方程为

$$\begin{cases} \dot{e} = z_1 - y \\ \dot{z}_1 = z_2 - \beta_1 e \\ \dot{z}_2 = z_3 - \beta_2 e + b_0 u \\ \dot{z}_3 = -\beta_3 e \end{cases} \quad (11)$$

式中: $\beta_1, \beta_2, \beta_3$ 为观测器增益。

根据带宽法^[27], 可确定观测器增益的值为

$$\begin{cases} \beta_1 = 3\omega_0 \\ \beta_2 = 3\omega_0^2 \\ \beta_3 = \omega_0^3 \end{cases} \quad (12)$$

式中: ω_0 为观测器带宽。

3.1.3 LSEF 控制律

根据 TD 输出的 v_1, v_2 与 LESO 观测到的 z_1, z_2 来计算初始控制量, 可得:

$$\begin{cases} e_1 = v_1 - z_1 \\ e_2 = v_2 - z_2 \\ u_0 = k_p e_1 + k_d e_2 \end{cases} \quad (13)$$

式中: k_p, k_d 为控制增益。

根据带宽法, 可确定控制增益的值为

$$\begin{cases} k_p = \omega_{c0}^2 \\ k_d = 2\omega_{c0} \end{cases} \quad (14)$$

通过对 LESO 估计的总扰动 z_3 进行实时补偿, 可得控制器的实际输出为

$$u = \frac{u_0 - z_3}{b_0} \quad (15)$$

3.2 FADRC 控制器的设计

在 LADRC 中, 控制器带宽 ω_{c0} 为固定常数, 带宽过低虽能够避免高频噪声放大、起步超调, 但会削弱系统抗扰能力; 带宽过高抗扰能力强, 但易引发系统高频振荡^[28-29]。本文提出一种 FADRC 策略, 基于模糊推理在线调整控制器的带宽^[30], 以增强系统对不确定性扰动的鲁棒性。EEFSLM FADRC 系统结构框图如图 3 所示。

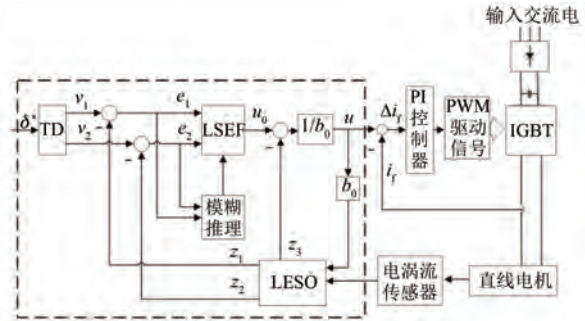


图 3 EEFSLM FADRC 系统结构框图

Fig. 3 Block diagram of FADRC system of EEFSLM

模糊推理的输入变量为经过量化因子 K_a, K_b 映射后的悬浮气隙误差 e_1 和误差变化率 e_2 ^[31], 输出变量为经过比例因子 K_c 转换后的带宽修正值 $\Delta\omega_c$ 。

隶属度函数选用三角形隶属函数, 如图 4、5 所示。输入和输出变量均为五个模糊子集: {负大(NB), 负小(NS), 零(ZO), 正小(PS), 正大(PB)}。输入模糊论域为 $[-6, 6]$, 输出模糊论域为 $[-1, 1]$ 。根据控制经验制定的模糊规则如表 1 所示。

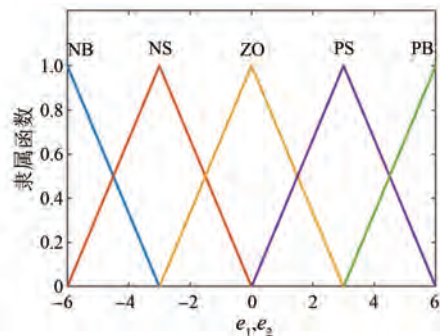


图 4 e_1 和 e_2 的隶属度函数

Fig. 4 Membership functions of e_1 and e_2

模糊推理机制采用 Mamdani 算法, 并通过重心法去模糊化^[32], 得到改进后的 LSEF 的带宽 ω_c 为

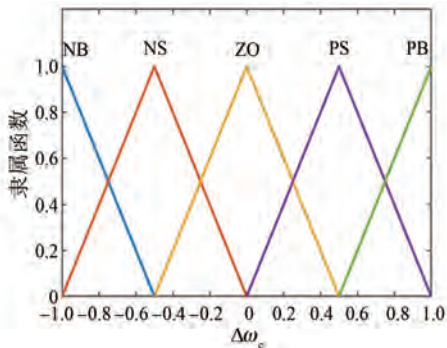


图 5 $\Delta\omega_c$ 的隶属度函数

Fig. 5 Membership function of $\Delta\omega_c$

$$\omega_c = \Delta\omega_c + \omega_{c0} \quad (16)$$

式中: ω_{c0} 为 LSEF 的初始带宽值; $\Delta\omega_c$ 为模糊推理输出的带宽修正值。

表 1 $\Delta\omega_c$ 的控制规则

Tab. 1 Control rules for $\Delta\omega_c$

$\Delta\omega_{\text{e}}$	e_2					
		NB	NS	ZO	PS	PB
e_1	NB	PB	PB	PS	ZO	NS
	NS	PB	PS	PS	ZO	NS
	ZO	PS	PS	ZO	PS	PS
	PS	NS	ZO	PS	PS	PB
	PB	NS	ZO	PS	PB	PB

最终的控制增益为

$$\begin{cases} k_p = \omega_c^2 \\ k_d = 2\omega_c \end{cases} \quad (17)$$

4 仿真分析

为了验证本文所提 FADRC 策略在 EEFSLM 磁悬浮系统中的有效性与优越性,基于 Matlab/Simulink 平台,搭建系统的仿真模型。在空载启动、负载扰动及正弦扰动三种工况下,对 FADRC 与传统 PI 控制及 LADRC 进行分析。仿真用电机参数如表 2 所示,FADRC 策略参数如表 3 所示。

首先,分析 EEFSLM 的空载启动性能,其磁悬浮气隙高度响应曲线如图 6 所示。由图 6 可知,本文所提 FADRC 策略调节时间最短,为 0.045 s,响应速度显著优于 LADRC 策略所需的 0.08 s 和传统 PI 控制策略所需的 0.18 s。

表 2 仿真用电机参数

Tab. 2 Simulation parameters for motor

参数名称	参数值
目标磁悬浮气隙高度 δ^*/m	0.002 5
初始磁悬浮气隙高度 δ/m	0.003
电枢电阻 R_s/Ω	1.55
直轴电感 L_d/H	0.101
交轴电感 L_q/H	0.103
动子及平台质量 m/kg	17

表 3 FADRC 策略参数

Tab. 3 Parameters of the FADRC strategy

参数名称	参数值
r_0	180
b_0	2.6
ω_0	1 500
ω_{c0}	140
K_a	1.5×10^5
K_b	35
K_c	150

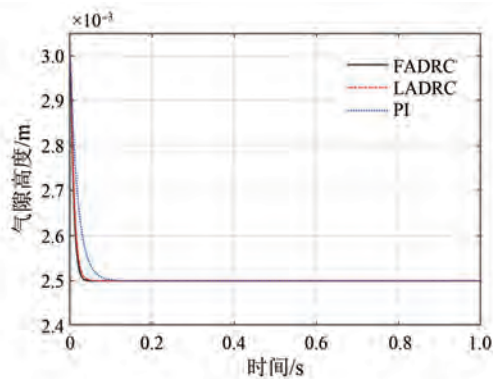


图 6 启动时磁悬浮气隙高度响应曲线

Fig. 6 Response curves of magnetic levitation air gap height during startup

其次,分析 EEFSLM 在负载扰动下的抗扰性能,系统在平稳运行至 0.3 s 时突加 10 N 的阶跃扰动,并在 0.6 s 时切除。三种控制策略下的磁悬浮气隙高度、励磁电流响应曲线分别如图 7、8 所示。

由图 7、8 可知,在突加和切除扰动的瞬间,三种控制策略均不可避免地产生了气隙波动。其中,本文所提 FADRC 策略表现出最优的动态性能:其动态高度降落最小,为 $2.0 \times 10^{-5} \text{ m}$;恢复时间最短,

为 0.072 s , 显著优于 LADRC 的 $2.9 \times 10^{-5}\text{ m}$ 、 0.089 s 和传统 PI 控制的 $3.5 \times 10^{-5}\text{ m}$ 、 0.25 s 。

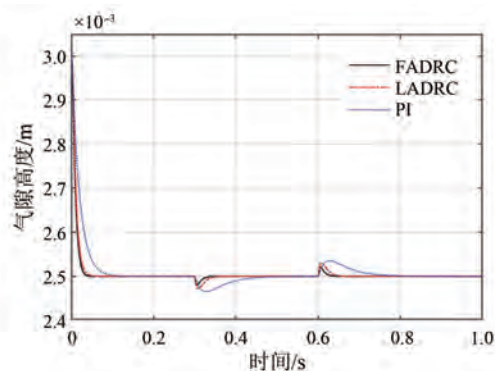


图 7 负载扰动下磁悬浮气隙高度响应曲线

Fig. 7 Response curves of magnetic levitation air gap height under load disturbance

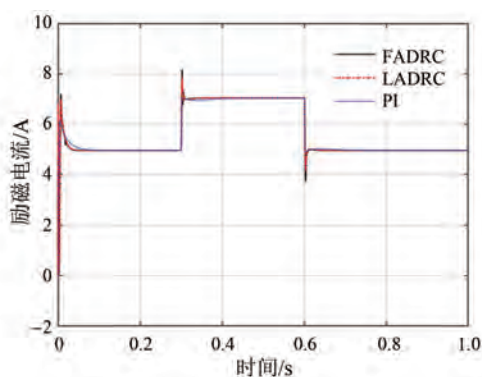


图 8 负载扰动下励磁电流响应曲线

Fig. 8 Response curves of excitation current under load disturbance

最后,为了评估 EEFSLM 在正弦扰动下的抗扰能力,进行了持续扰动测试,其磁悬浮气隙高度、励磁电流响应曲线分别如图 9、10 所示。

由图 9、10 可知,本文所提 FADRC 策略下的动态高度降落最小,为 $5.2 \times 10^{-6}\text{ m}$,显著优于 LADRC 策略的 $6.5 \times 10^{-6}\text{ m}$ 和传统 PI 控制的 $1.5 \times 10^{-5}\text{ m}$ 。此外,与其他两种控制策略相比,FADRC 策略抑制正弦扰动的性能最优。

5 结语

本文首先剖析了 EEFSLM 磁悬浮系统的运行机理并构建了其数学模型。为提升系统悬浮性能,本文提出了一种 FADRC 策略。该策略以 LADRC 为基础,通过 LESO 实现未知扰动的前馈补偿;同时,引入模糊推理机制,根据实时误差及

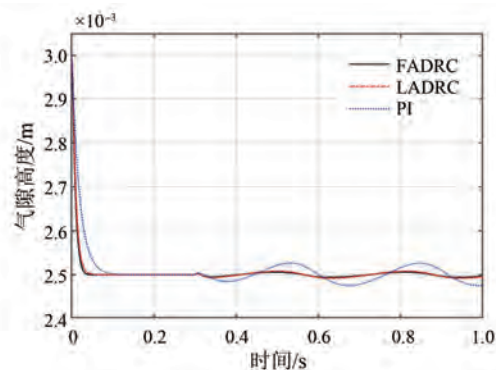


图 9 正弦扰动下磁悬浮气隙高度响应曲线

Fig. 9 Response curves of magnetic levitation air gap height under sinusoidal disturbance

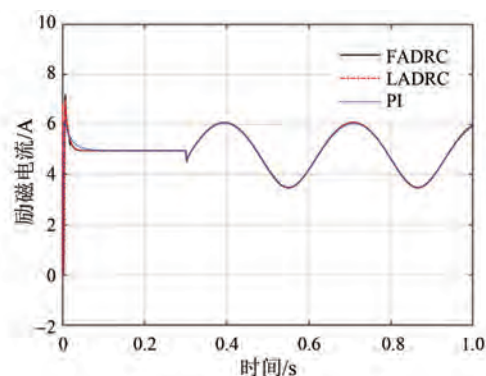


图 10 正弦扰动下励磁电流响应曲线

Fig. 10 Response curves of excitation current under sinusoidal disturbance

其变化率在线调节 LSEF 带宽参数,从而解决了固定带宽在快速性与抗扰性之间的物理约束。仿真结果表明,与传统 PI 控制和 LADRC 相比,所提 FADRC 策略展现出最优的综合控制性能,验证了其有效性。

利益冲突声明

所有作者声明不存在利益冲突。

All authors disclose no relevant conflict of interests.

作者贡献

邱迪进行了方案设计、内容总结与论文撰写,蓝益鹏负责研究方法论的指导,并参与了论文的审阅与修改工作。所有作者均阅读并同意了最终稿件的提交。

The scheme design, content summary, and

manuscript drafting were performed by Qiu Di. Methodology guidance, manuscript review, and revisions were provided by Lan Yipeng. All authors have read and approved the final version of the paper for submission.

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+530.
- Deng Z G, Liu Z X, Li H T, et al. Development status and prospect of maglev train [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2022, 57(3): 455-474+530.
- [2] 卢琴芬, 沈焱明, 叶云岳. 永磁直线电动机结构及研究发展综述[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(9): 2575-2588.
- Lu Q F, Shen Y M, Ye Y Y. Development of permanent magnet linear synchronous motors structure and research [J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(9): 2575-2588.
- [3] 刘鞠波, 蓝益鹏. 混合励磁通切换直线电机磁悬浮系统改进自抗扰控制的研究[J]. 电机与控制应用, 2024, 51(10): 98-106.
- Liu J B, Lan Y P. Research on improved active disturbance rejection control for maglev system of hybrid excitation flux switching linear motor [J]. Electric Machines & Control Application, 2024, 51(10): 98-106.
- [4] Gutfleisch O, Willard M A, Brück E, et al. Magnetic materials and devices for the 21st century: Stronger, lighter, and more energy efficient [J]. Advanced Materials, 2011, 23(7): 821-842.
- [5] 张明利. 电梯用磁通切换永磁直线电机的驱动控制系统研究[D]. 南京: 东南大学, 2018.
- Zhang M L. Research on control system of linear flux-switching permanent magnet motor for elevator [D]. Nanjing: Southeast University, 2018.
- [6] 刘成. 轨道交通用混合励磁直线电机的设计与研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2018.
- Liu C. Design and research of hybrid excitation linear motor for rail transit [D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2018.
- [7] 刘晓杰, 蓝益鹏. 磁通切换直线电机磁悬浮系统的模糊超螺旋滑模控制[J]. 电机与控制应用, 2025, 52(1): 106-114.
- Liu X J, Lan Y P. Fuzzy super-twisting sliding mode control of magnetic levitation system of flux switching linear motor [J]. Electric Machines & Control Application, 2025, 52(1): 106-114.
- [8] 梁锦涛, 卢亮, 王丁磊. 实现高速精密成形的电磁悬浮直线驱动新方式[J]. 锻压装备与制造技术, 2022, 57(6): 7-14.
- Liang J T, Lu L, Wang D L. The new linear driven mode of electromagnetic levitation for high-speed precision forming [J]. China Metalforming Equipment & Manufacturing Technology, 2022, 57(6): 7-14.
- [9] Li Y, Ang K H, Chong G C Y. PID control system analysis and design [J]. IEEE Control Systems, 2006, 26(1): 32-41.
- [10] 刘延栋, 张文志, 王泽, 等. 四极磁悬浮的动力学建模及参数辨识[J]. 控制工程, 2020, 27(5): 793-798.
- Liu Y D, Zhang W Z, Wang Z, et al. Dynamic modeling and parameter identification of quadrupole magnetic levitation [J]. Control Engineering of China, 2020, 27(5): 793-798.
- [11] Li G, Xu H, Ruan Z, et al. Design and performance evaluation of a novel fractional order PID control strategy for vehicle semi-active suspension [J]. Advances in Mechanical Engineering, 2024, 16(4): 1-11.
- [12] 高志强. 自抗扰控制思想探究[J]. 控制理论与应用, 2013, 30(12): 1498-1510.
- Gao Z Q. On the foundation of active disturbance rejection control [J]. Control Theory & Applications, 2013, 30(12): 1498-1510.
- [13] 王铁举. 基于自抗扰的PMLSM位置控制研究[D]. 天津: 河北工业大学, 2015.
- Wang T J. The research for PMLSM position control based on ADRC [D]. Tianjin: Hebei University of Technology, 2015.
- [14] 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.

- [15] 杨杰, 杨星, 高涛, 等. 电磁悬浮系统的改进线性自抗扰控制方法[J]. 电机与控制学报, 2024, 28(1): 131-141.
Yang J, Yang X, Gao T, et al. Improved linear active disturbance rejection control method for electromagnetic levitation system [J]. Electric Machines and Control, 2024, 28(1): 131-141.
- [16] 沈聪, 张国荣, 彭勃, 等. 具备干扰抑制能力的柔性多状态开关直流电压控制策略[J]. 高电压技术, 2020, 46(4): 1198-1205.
Shen C, Zhang G R, Peng B, et al. DC voltage control strategy of flexible multi-state switch with disturbance rejection [J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(4): 1198-1205.
- [17] Sun C H, Liu M Q, Liu C A, et al. An industrial quadrotor UAV control method based on fuzzy adaptive linear active disturbance rejection control [J]. Electronics, 2021, 10(4): 376.
- [18] 隋延飞. 直线运动平台模糊自抗扰控制研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2020.
Sui Y F. Research on fuzzy active disturbance rejection control of linear motion platform [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2020.
- [19] 徐浩, 王正齐. 基于模糊线性自抗扰的柔性多状态开关控制研究[J]. 计算技术与自动化, 2023, 42(1): 1-8.
Xu H, Wang Z Q. Research on flexible multi-state switch control based on fuzzy linear active disturbance rejection [J]. Computing Technology and Automation, 2023, 42(1): 1-8.
- [20] 张欣悦, 蓝益鹏. 电励磁通切换直线磁悬浮电动机的电磁力分析[J]. 电机与控制应用, 2024, 51(4): 110-118.
Zhang X Y, Lan Y P. Electromagnetic force analysis of electrically excited flux switching linear magnetic suspension motor [J]. Electric Machines & Control Application, 2024, 51(4): 110-118.
- [21] 陈中成. 可控励磁直线磁悬浮同步电动机的优化设计[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2018.
Chen Z C. Optimal design of controllable excitation linear magnetic levitation synchronous motor [D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2018.
- [22] 雷城, 蓝益鹏, 孙云鹏. 直线同步电动机磁悬浮系统的模糊分数阶滑模控制[J]. 电机与控制学报, 2022, 26(3): 94-100.
Lei C, Lan Y P, Sun Y P. Fuzzy fractional sliding mode control of magnetic levitation system of linear synchronous motors [J]. Electric Machines and Control, 2022, 26(3): 94-100.
- [23] 李枫, 蓝益鹏. 电励磁直线同步电机磁悬浮系统自抗扰控制[J]. 电机与控制应用, 2021, 48(9): 8-13.
Li F, Lan Y P. Active disturbance rejection control for maglev system of electrically excited linear synchronous motor [J]. Electric Machines & Control Application, 2021, 48(9): 8-13.
- [24] 刘志坚, 蓝益鹏, 徐泽来. 磁悬浮平台直线同步电动机悬浮系统的分数阶反步控制[J]. 电机与控制应用, 2023, 50(11): 52-58.
Liu Z J, Lan Y P, Xu Z L. Fractional order backstepping control of linear synchronous motor suspension system of magnetic levitation platform [J]. Electric Machines & Control Application, 2023, 50(11): 52-58.
- [25] 余建国, 木柏林. 基于 LADRC 的悬浮控制优化研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2022, 19(12): 3477-3483.
Yu J G, Mu B L. Research on optimization of suspension control based on LADRC [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2022, 19(12): 3477-3483.
- [26] 石晨曦. 自抗扰控制及控制器参数整定方法的研究[D]. 无锡: 江南大学, 2008.
Shi C X. Auto-disturbance rejection controllers and the parameter adjusting [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2008.
- [27] 熊保星, 甘文洋, 陈铭治, 等. 基于模糊线性自抗扰的水下机器人定深控制[J]. 控制工程, 2026, 33(1): 161-169.
Xiong B X, Gan W Y, Chen M Z, et al. Depth control of underwater vehicles based on fuzzy linear active disturbance rejection [J]. Control Engineering of China, 2026, 33(1): 161-169.
- [28] 万成麒, 冯洋, 赵春发, 等. 含时滞电磁悬浮系统 Smith 预估线性自抗扰控制研究[J]. 动力学与控制学报, 2024, 22(11): 47-57.
Wan C Q, Feng Y, Zhao C F, et al. Study on Smith predictive linear active disturbance rejection control of the electromagnetic levitation system with time delays [J]. Journal of Dynamics and Control, 2024, 22(11): 47-57.
- [29] Yi P, Fan K G, Wu G L. Adaptive variable gain

- linear active disturbance rejection control parameter optimization in magnetic levitation [J]. *Measurement and Control*, 2025, 58(9): 1115-1129.
- [30] 郭正刚, 赵彪, 于景奇, 等. 基于模糊自抗扰控制的液压悬架电机调速研究[J]. *机械与电子*, 2025, 43(8): 73-80.
- Guo Z G, Zhao B, Yu J Q, et al. Research on speed regulation of hydraulic suspension motor based on fuzzy active disturbance rejection control [J]. *Machinery & Electronics*, 2025, 43(8): 73-80.
- [31] 周兆钟, 尹明德, 王南越, 等. 基于模糊控制在线整定新趋近律的速度调节器研究[J]. *电机与控制应用*, 2024, 51(5): 21-29.
- Zhou Z Z, Yin M D, Wang N Y, et al. Research on speed regulator based on fuzzy control online tuning new reaching law [J]. *Electric Machines & Control Application*, 2024, 51(5): 21-29.
- [32] 赵南南, 杨旭, 邹琳, 等. 基于鲸鱼优化算法的风力发电机组变桨模糊控制策略[J]. *电机与控制应用*, 2024, 51(2): 80-89.
- Zhao N N, Yang X, Zou L, et al. Pitch fuzzy control strategy for wind turbine based on whale optimisation algorithm [J]. *Electric Machines & Control Application*, 2024, 51(2): 80-89.

收稿日期:2026-04-03

收到修改稿日期:2026-05-14

作者简介:

邱 迪(2002—),女,硕士研究生,研究方向为电机及其控制,15142875313@163.com;

*通信作者:邱 迪(2002—),女,硕士研究生,研究方向为电机及其控制,15142875313@163.com。