

三轨电磁悬浮系统的模糊滑模控制研究

刘 怡, 刘国清*, 酒芳恒, 谌 昊

(西南交通大学 电气工程学院, 四川 成都 611756)

Research on Fuzzy Sliding Mode Control for Three-Track Electromagnetic Levitation System

LIU Yi, LIU Guoqing*, JIU Fangheng, SHEN Hao

(School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, China)

Abstract: To address the challenges posed by multiple coupling points and high difficulty in controlling levitation in a three-track electromagnetic levitation system arranged in a triangular prism configuration, a fuzzy sliding mode control method was proposed to achieve independent control of each coupling point. Based on the specific structure of the three-track electromagnetic levitation system, a decoupling analysis of the rotational motion of the system model was conducted to obtain control variables that could independently control the rotational offset angle and the levitation air gap height. Fuzzy input, output, and rules were established, and the fuzzy control variables were integrated with system errors for sliding mode control, enabling the system's levitation error to converge rapidly to zero. To verify the effectiveness of the fuzzy sliding mode controller in controlling the system's levitation, both simulation and experimental models were developed. The results showed that compared to traditional control methods, the fuzzy sliding mode control had a faster response, stronger anti-interference ability, and was beneficial for vibration control during the levitation process.

Key words: magnetic levitation system; fuzzy sliding mode control; levitation control; response speed; anti-interference ability

摘 要: 针对由三棱柱布置形成的三轨电磁悬浮系统耦合点多, 悬浮控制难度大的问题, 提出一种模糊滑模控制方法以实现对各耦合点的单独控制。根据三轨电磁悬浮系统的特定结构对该系统模型的旋转运动进行解耦分

析, 解出可以独立控制旋转偏移角与悬浮气隙高度的控制量, 建立模糊化输入、输出和模糊规则, 将模糊化后的控制量与系统误差进行滑模控制, 使系统悬浮误差快速收敛到零。为了验证模糊滑模控制器对系统悬浮的控制效果, 搭建模糊滑模控制仿真及试验模型。结果表明, 相较于原有的控制方法, 模糊滑模控制响应速度快, 抗干扰能力强, 有利于悬浮过程中的振动控制。

关键词: 磁悬浮系统; 模糊滑模控制; 悬浮控制; 响应速度; 抗干扰能力

0 引言

磁悬浮系统具有噪声低、无机械接触磨损和运行速度高的特点^[1-5]。当磁悬浮系统应用在列车上时, 电磁铁施加的力会通过轨道最终作用在箱梁上, 对于传统的双轨电磁悬浮系统, 每根轨道的受力比三轨布置方式下的轨道受力更大, 布置方式要求箱梁与轨道的连接更为严密。为确保安全运行, 三轨布置方式比双轨更可靠, 并且三轨电磁悬浮系统在此基础上增加到三个悬浮面, 在空间上形成三棱柱形, 有效悬浮面增加, 为系统提供更大的悬浮力。但由于悬浮面从二变三, 耦合点增加, 原有的控制方法不再适用。

悬浮控制技术是磁悬浮系统的关键和核心技术之一, 其性能直接决定了列车的舒适性及安全性。实现悬浮控制的算法包括自适应控制^[6-8]、模糊控制^[9-11]、滑模控制^[12-14]和神经网络控制^[15-17]等, 这些控制算法能够实现基本的悬浮, 不同算法稳定悬浮时功耗相差不大。自适应控制能够根据系统状态实时调整控制参数, 适应不同质量的悬浮架, 但需要系统的准确模型或较多的实时数据, 对系统模型的要求较高。模糊控制能够处理模

基金项目: 国家自然科学基金 (52277166, 51837009, 51922090); 四川省科技总项目 (2019JDJQ0019)

National Natural Science Foundation of China (52277166, 51837009, 51922090); Sichuan Science and Technology General Project (2019JDJQ0019)

糊、不确定和非线性系统,具有较强的适应性,但计算复杂度高。滑模控制能够实现快速的系统响应和跟踪,且设计和实现相对简单,不依赖于系统的精确建模,但在实际应用中可能会产生抖振现象,影响系统的稳定性。神经网络控制能够实现高精度的控制,但在训练过程复杂、过拟合问题和不确定性处理方面存在一定的挑战和限制。模糊滑模(Fuzzy Sliding Mode, FSM)^[18-21]控制结合了模糊控制和滑模控制的优点,在一定程度上弥补了二者各自的缺点,FSM控制能够有效应对系统参数变化和外部扰动,适用于各种复杂的非线性系统和控制任务,并且有效抑制了系统抖振现象,提高了系统的稳定性和平滑性。

近年来,一些国内外学者将FSM应用在各个领域,主要集中在悬浮控制、导引控制和运行控制等方面。文献[22]以高精度数控机床为研究背景,为提高可控励磁线性同步电机的磁悬浮平台抵抗外部干扰的能力,提出了一种基于模糊切换增益调整的滑模控制方法;文献[23]将FSM应用在垂直轴磁悬浮风电悬浮系统上,有效增加了系统悬浮偏移量调节的自适应力,提高了系统的性能;文献[24]使用FSM控制来控制四分之一车辆悬架系统;文献[25]采用FSM控制方案实现开环不稳定且高度非线性的磁悬浮平台悬浮气隙的精确控制。综合来看,FSM控制能够有效提高系统的抗干扰能力、自适应性和性能表现,为系统的稳定运行和高效控制提供了有力支持。在实际应用中,结合不同的控制方法和策略,可以进一步优化系统的控制性能,推动磁悬浮技术在各个领域的发展和应用。

本文以三轨电磁悬浮系统为研究对象,由于该悬浮架的随机运动是由任意基点的平移运动和旋转运动合成,通过建立电磁铁在悬浮架上的动力学方程,实现对三个悬浮面的旋转偏移角与悬浮高度之间的解耦计算。通过提出的FSM控制策略,搭建电磁悬浮系统的仿真及试验模型,验证了控制策略的正确性,在实际的磁悬浮应用中具有重要的实用价值。

1 空间分布与解耦

三轨电磁悬浮系统主要由固定轨道、悬浮架和悬浮控制器组成,其中悬浮架包括悬浮电磁铁、

气隙传感器和支撑轮等;悬浮控制器包括悬浮斩波电路、悬浮控制电路和悬浮电源电路等。利用悬浮电磁铁与悬浮轨道之间的电磁吸力平衡车体重力、抵抗外力干扰,将悬浮轨道与电磁铁按照空间立体对称分布的结构进行布置,气隙传感器安装在电磁铁同一平面上。三轨电磁悬浮系统的空间分布图和悬浮架结构如图1(a)、图1(b)所示。

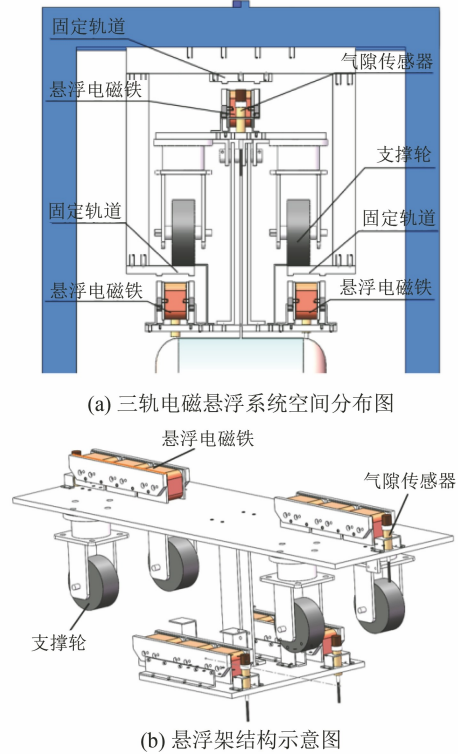


图1 三轨电磁悬浮系统结构图示

Fig. 1 Diagram of three-track electromagnetic levitation system

在单自由度悬浮中,磁悬浮力方程^[26-27]为

$$f_d = \frac{\mu_0 N^2 i^2 S}{4z^2} \quad (1)$$

式中: f_d ($d=1\sim 4$) 为每个电磁铁力的大小,为标量; μ_0 为悬浮物所受到的电磁力与空气磁导率; N 为线圈匝数; i 为电流; S 为铁心与导轨的正对面积; z 为悬浮气隙。

设电磁力作用在每个电磁铁的几何中心的质点,电磁铁对称分布。如图2所示, L_x 、 L_y 为每个电磁铁中心距离悬浮架质心 O 的距离; Φ_1 、 Φ_2 、 Φ_3 分别为悬浮系统绕 X 轴、 Y 轴、 Z 轴旋转的偏移角;电磁力 $f_1 \sim f_4$ 方向始终向上,与重力方向相反。定义固定轨道坐标系 $OXYZ$ 上的单位向量分

别为 $\mathbf{i}, \mathbf{j}, \mathbf{k}$, 车体悬浮坐标系 $O_1X_1Y_1Z_1$ 的单位向量为别为 $\mathbf{i}_1, \mathbf{j}_1, \mathbf{k}_1$ 。

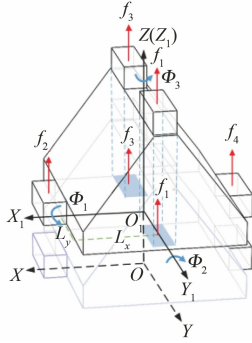


图 2 电磁力分布示意图

Fig. 2 Schematic diagram of electromagnetic force distribution

设电磁力在绝对坐标系中为

$$\mathbf{F}_d = 0 \cdot \mathbf{i} + 0 \cdot \mathbf{j} + f_d \cdot \mathbf{k} \quad (2)$$

故 $\mathbf{F}_d$ 可以在坐标系 $O_1X_1Y_1Z_1$ 中表示为

$$\mathbf{F}_{d_{0_1}} = \langle \mathbf{F}_d \cdot \mathbf{i}_1 \rangle \cdot \mathbf{i}_1 + \langle \mathbf{F}_d \cdot \mathbf{j}_1 \rangle \cdot \mathbf{j}_1 + \langle \mathbf{F}_d \cdot \mathbf{k}_1 \rangle \cdot \mathbf{k}_1 \quad (3)$$

设 $\mathbf{r}_d (d=1 \sim 4)$ 为坐标系 $O_1X_1Y_1Z_1$ 中以点 O_1 为起点, 电磁铁几何中心为终点的力臂向量。 $\mathbf{r}_d$ 可以表示为

$$\begin{bmatrix} \mathbf{r}_1 \\ \mathbf{r}_2 \\ \mathbf{r}_3 \\ \mathbf{r}_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -L_Y & 0 & 0 \\ 0 & -L_X & 0 \\ L_Y & 0 & 0 \\ 0 & L_X & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{i}_1 \\ \mathbf{j}_1 \\ \mathbf{k}_1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

电磁力作用在悬浮架上的总转矩为

$$\mathbf{M} = \sum_{d=1}^4 \mathbf{r}_d \times \mathbf{F}_{d_{0_1}} \quad (5)$$

则悬浮架的动力学方程为

$$\begin{cases} J_{x1} \ddot{\Phi}_1 = (f_1 - f_3) L_X \cos \Phi_1 \\ J_{y1} \ddot{\Phi}_2 = (-f_2 + f_4) L_Y \cos \Phi_2 \\ m \ddot{z} = (f_1 + f_2 + f_3 + f_4) - mg \end{cases} \quad (6)$$

式中: J_{x1}, J_{y1} 为悬浮架绕 X, Y 轴的转动惯量; m 为悬浮架质量。

该系统为一个四输入三输出的系统。定义控制量:

$$\begin{bmatrix} c_1 \\ c_2 \\ c_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \\ f_4 \end{bmatrix} \quad (7)$$

考虑到此系统是经过简化的系统, 不能完整地代表精确的物理模型, 且传感器的测量值由于信号噪声也不能完全准确的表示实际的气隙, 所以可以在系统模型中加入不确定扰动量 $\Delta_1 \sim \Delta_3$, 则式(6)可以表示为

$$\begin{cases} J_{x1} \ddot{\Phi}_1 = c_1 \cdot L_X \cos \Phi_1 + \Delta_1 \\ J_{y1} \ddot{\Phi}_2 = c_2 \cdot L_Y \cos \Phi_2 + \Delta_2 \\ m \ddot{z} = c_3 - mg + \Delta_3 \end{cases} \quad (8)$$

由式(8)可知, 可以通过对控制量 c_1, c_2, c_3 的独立控制实现对输出量 Φ_1, Φ_2, z 的控制。

2 模糊滑模控制器设计

由于悬浮架的偏移角 Φ_1, Φ_2 与悬浮高度 z 的值都与气隙传感器的测量有关, 将气隙传感器的测量值经过计算后可以得到三者的测量值。经过电磁力分配后, 将每个电磁铁所需的电流 I_1, I_2, I_3, I_4 作为目标值输入到比例积分 (Proportional Integral, PI) 控制器中, PI 控制器根据电流传感器检测到的实时电流对输出电流进行控制。电磁悬浮系统的控制器如图 3 所示。

将计算出的 Φ_1, Φ_2 和 z 与目标值 Φ_1^*, Φ_2^*, z^* 进行比较, $e_{\Phi_1}, e_{\Phi_2}, e_z$ 为计算结果与目标值的误差。偏移角及悬浮高度的误差定义为

$$\begin{cases} e_{\Phi_1} = \Phi_1^* - \Phi_1 \\ e_{\Phi_2} = \Phi_2^* - \Phi_2 \\ e_z = z^* - z \end{cases} \quad (9)$$

滑模切换函数计算单元经过误差值计算滑模面 $s_{\Phi_1}, s_{\Phi_2}, s_z$ 与滑模面的导数 $\dot{s}_{\Phi_1}, \dot{s}_{\Phi_2}, \dot{s}_z$ 。滑模面定义为

$$\begin{cases} s_{\Phi_1} = \dot{e}_{\Phi_1} + m_1 \cdot e_{\Phi_1} - F_{\Phi_1}(t) \\ s_{\Phi_2} = \dot{e}_{\Phi_2} + m_2 \cdot e_{\Phi_2} - F_{\Phi_2}(t) \\ s_z = \dot{e}_z + m_3 \cdot e_z - F_z(t) \end{cases} \quad (10)$$

式中: $t > 0$; m_1, m_2, m_3 为大于零的系数; $F_{\Phi_1}(t), F_{\Phi_2}(t), F_z(t)$ 的定义为

$$\begin{cases} F_{\Phi_1}(t) = s_{\Phi_1}(0) \exp(-m_1 t) \\ F_{\Phi_2}(t) = s_{\Phi_2}(0) \exp(-m_2 t) \\ F_z(t) = s_z(0) \exp(-m_3 t) \end{cases} \quad (11)$$

$$\begin{cases} s_{\Phi_1}(0) = \dot{e}_{\Phi_1,0} + m_1 \cdot e_{\Phi_1,0} \\ s_{\Phi_2}(0) = \dot{e}_{\Phi_2,0} + m_2 \cdot e_{\Phi_2,0} \\ s_z(0) = \dot{e}_{z,0} + m_3 \cdot e_{z,0} \end{cases} \quad (12)$$

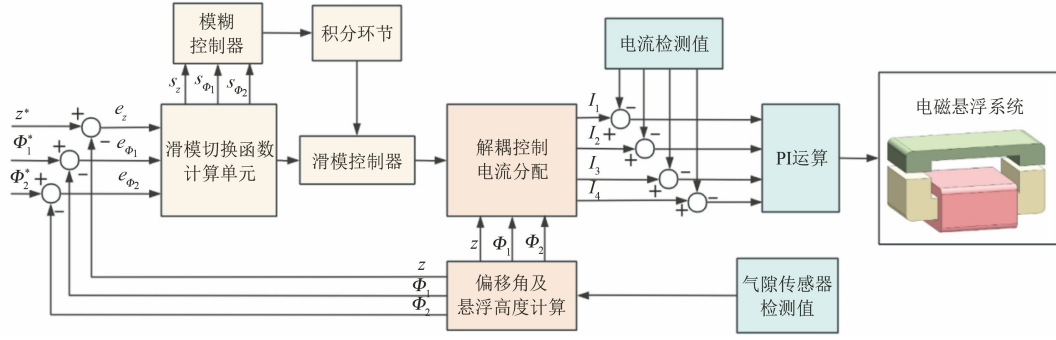


图3 模糊滑模悬浮控制系统框图

Fig. 3 Block diagram of fuzzy sliding mode levitation control system

式中: $e_{\phi_{1,0}}, e_{\phi_{2,0}}, e_{z,0}, \dot{e}_{\phi_{1,0}}, \dot{e}_{\phi_{2,0}}, \dot{e}_{z,0}$ 分别为 $e_{\phi_1}, e_{\phi_2}, e_z, \dot{e}_{\phi_1}, \dot{e}_{\phi_2}, \dot{e}_z$ 的初值。

定义偏移角及悬浮高度的 Lyapunov 函数为

$$\begin{cases} V_{\phi_1} = \frac{1}{2}s_{\phi_1}^2 \\ V_{\phi_2} = \frac{1}{2}s_{\phi_2}^2 \\ V_z = \frac{1}{2}s_z^2 \end{cases} \quad (13)$$

对悬浮高度 z 的 Lyapunov 函数 $\dot{V}_z$ 展开:

$$\dot{V}_z = s_z \cdot \dot{s}_z = s_z \left[m_3 \cdot \dot{e}_z - \dot{F}_z(t) - \frac{1}{m}c_3 + E_1(t) \right] \quad (14)$$

$$\text{式中: } E_1(t) = -\frac{\Delta_3}{m} - g。$$

假设:

$$K_z(t) = \max(|E_1(t)|) + \eta, \eta > 0 \quad (15)$$

则式(15)为滑模控制中不确定度的边界。

设计控制量 c_1, c_2, c_3 的控制律为

$$\begin{aligned} c_1 &= \frac{J_{x1}}{L_X \cos \Phi_1} [\ddot{\Phi}_1 + m_1 \dot{e}_{\phi_1} - \dot{F}_{\phi_1}(t) + K_{\phi_1}(t) \text{sat}(s_{\phi_1})] \\ c_2 &= \frac{J_{y2}}{L_Y \cos \Phi_2} [\ddot{\Phi}_2 + m_2 \dot{e}_{\phi_2} - \dot{F}_{\phi_2}(t) + K_{\phi_2}(t) \text{sat}(s_{\phi_2})] \\ c_3 &= m [m_3 \dot{e}_z - \dot{F}_z(t) + K_z \text{sat}(s_z)] \end{aligned} \quad (16)$$

式中: sat 为饱和函数,以减小系统抖振。

针对式(16)中控制律 c_1, c_2, c_3 对应的不确定性上边界 $K_{\phi_1}, K_{\phi_2}, K_z$, 通过模糊控制器对不确定干扰进行估计。根据滑模的存在条件 $\dot{s}s < 0$, 可以将模糊控制的输入定义为

$$\begin{cases} f_{i1} = s_z \cdot \dot{s}_z \\ f_{i2} = s_{\phi_1} \cdot \dot{s}_{\phi_1} \\ f_{i3} = s_{\phi_2} \cdot \dot{s}_{\phi_2} \end{cases} \quad (17)$$

以 f_{i1} 为例,对于模糊控制器的输入 f_{i1} , 可以定义模糊规则:

(1) 如果 $f_{i1} < 0$, 则 K_z 应该减小;

(2) 如果 $f_{i1} > 0$, 则 K_z 应该增大。

模糊控制的输入模糊集 f_{i1} 可以定义为

$$f_{i1} = \{\text{PB PS Z NS NB}\} \quad (18)$$

模糊控制的输出模糊集 ΔK_z 可以定义为

$$\Delta K_z = \{\text{PB PS Z NS NB}\} \quad (19)$$

式中: PB 为正向大; PS 为正向小; Z 为 ZERO; NS 为反向小; NB 为反向大。

模糊控制的输入隶属度函数如图4所示。模糊控制的输出隶属度函数如图5所示。

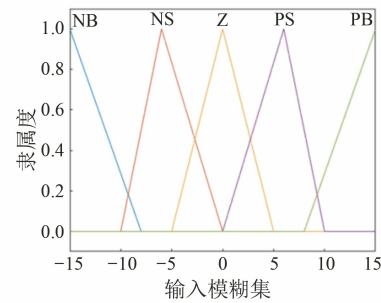


图4 模糊控制输入隶属度函数

Fig. 4 Membership function of fuzzy control input

定义模糊规则为

Rule1: if f_{i1} is PB Then ΔK_{ϕ_1} is PB

Rule2: if f_{i1} is PS Then ΔK_{ϕ_1} is PS

Rule3: if f_{i1} is Z Then ΔK_{ϕ_1} is Z

Rule4: if f_{i1} is NS Then ΔK_{ϕ_1} is NS

Rule5: if f_{i1} is NB Then ΔK_{ϕ_1} is NB

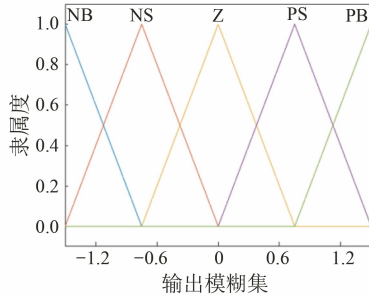


图 5 模糊控制输出隶属度函数

Fig. 5 Membership function of fuzzy control output

得到控制量 c_1, c_2, c_3 后, 可以通过式(7)对每个电磁力进行求解。但式(7)由于缺少约束条件而不存在解, 所以在求解之前, 需要将其中的一个电磁力转化为与其他三个电磁力相关的函数, 以此来增加约束求解。设

$$f_4 = f(f_1, f_2, f_3) = \frac{f_1 + f_2 + f_3}{3} \quad (20)$$

式中 f_4 的值为其他三个电磁力的平均值。

这样可以保证在悬浮过程中 f_4 与其他电磁力的差距不大, 使悬浮稳定。与式(7)联立, 解得:

$$\begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \\ f_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.5 & 0.5 & 1 \\ 0 & -1 & 0.25 \\ -0.5 & 0.5 & 1 \\ 0 & 0 & 0.25 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c_1 \\ c_2 \\ c_3 \end{bmatrix} \quad (21)$$

在求解电磁力的过程中, 可能会出现某个电磁力小于 0 的情况, 这意味着电磁力的方向需要与重力同向, 但吸力悬浮的电磁铁只能提供电磁吸力, 不会提供电磁斥力。这里需要对计算后的电磁力进行重新分配, 当电磁力小于 0 时, 让其值为 0。重新分配的电磁力为

$$\begin{cases} f_1 = (0.5c_1 + 0.5c_2 + c_3) \cdot \frac{\text{sgn}(0.5c_1 + 0.5c_2 + c_3) + 1}{2} \\ f_2 = (-c_2 + 0.25c_3) \cdot \frac{\text{sgn}(-c_2 + 0.25c_3) + 1}{2} \\ f_3 = (-0.5c_1 + 0.5c_2 + c_3) \cdot \frac{\text{sgn}(-0.5c_1 + 0.5c_2 + c_3) + 1}{2} \\ f_4 = 0.25c_3 \cdot \frac{\text{sgn}(0.25c_3) + 1}{2} \end{cases} \quad (22)$$

根据式(1)可以求解当前的期望电流值为

$$i_d^* = 2z \cdot \sqrt{\frac{f_d}{k}} \quad (23)$$

式中 $k = \mu_0 N^2 S$ 。

气隙值可以通过气隙传感器获得。根据式(23)即可计算出每个电磁铁线圈中需要通入的电流值, 将电流传感器的检测电流作为电流环 PI 控制器的输入, 与此时的目标电流进行比较, 从而达到控制电流输出的目标。

3 仿真及试验验证

3.1 仿真分析

在 Simulink 中搭建 FSM 控制仿真模型, 将仿真结果与比例积分微分 (Proportional Integral Derivative, PID) 控制结果进行比较, 验证本文所研究的控制策略。仿真模型如图 6 所示, 设置 FSM 控制器的目标悬浮高度 $z^* = 8 \text{ mm}$ 、偏移角 $\Phi_1^* = \Phi_2^* = 0 \text{ rad}$, 设置 PID 控制器的目标悬浮高度 $z = 8 \text{ mm}$, 经过优化后的 PID 参数为 $k_p = 3$ 、 $k_i = 10$ 、 $k_d = 70$ 。

1) 考察 FSM 控制的启动性能。

在两种控制方法下, 从启动到悬浮稳定过程的线圈电流响应曲线如图 7 所示。采用 PID 控制的系统约 0.245 s 无超调达到稳定状态, 采用 FSM 控制的系统约 0.16 s 无超调达到稳定状态。

图 8 所示为系统从启动到悬浮稳定过程的悬浮高度响应曲线。在 PID 控制下, 系统约 0.523 s 无超调达到稳定悬浮高度 7.83 mm, 上升时间为 0.324 s, 调节时间为 0.199 s, 稳态误差为 0.17 mm。在 FSM 控制下, 系统约 0.2 s 无超调达到稳定悬浮高度 8 mm, 上升时间为 0.145 s, 调节时间为 0.055 s, 系统稳态误差为零。

图 9 所示为系统从启动到悬浮稳定过程的偏移角响应曲线。在 PID 控制下, 系统达到负峰值 -1.47 rad, 系统响应超调约 28.3%, 随后在 0.17 s 达到稳定状态, 稳态误差为 -0.010 6 rad。在 FSM 控制下, 系统仅初始时稍有波动, 达到负峰值 -0.025 rad, 很快在 0.246 s 无超调达到稳定状态, 系统稳态误差为零。

通过比较两种控制方法可以看出, 在其启动响应过程中, FSM 控制的线圈电流响应稳定时间、悬浮气隙高度上升时间、调节时间和偏移角稳定

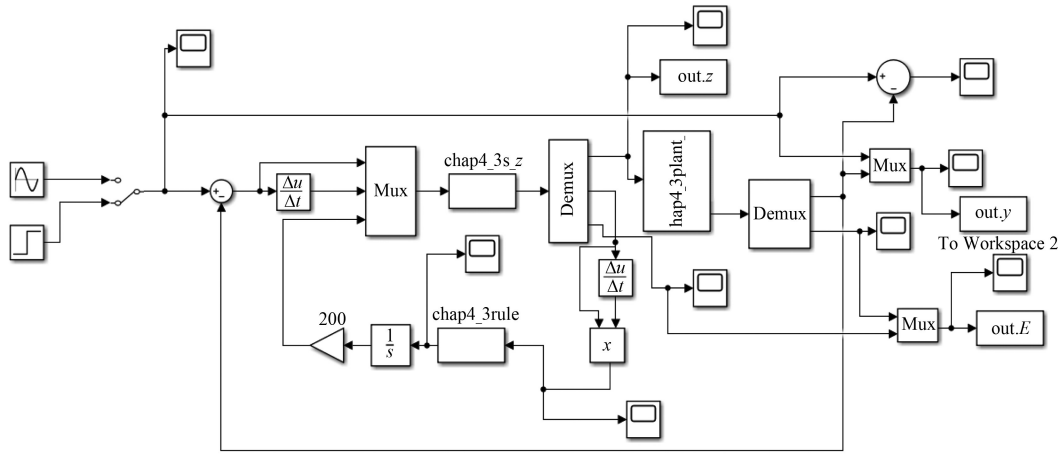


图 6 模糊滑模仿真模型

Fig. 6 Fuzzy sliding mode simulation model

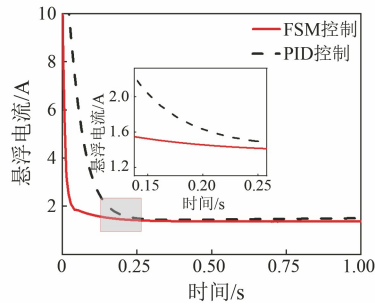


图 7 线圈电流响应曲线

Fig. 7 Response curves of coil current

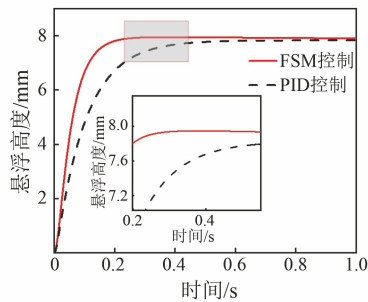


图 8 悬浮高度响应曲线

Fig. 8 Response curves of levitation height

时间均明显小于 PID 控制算法的时间,FSM 控制的悬浮气隙高度和偏移角的稳态误差也明显小于 PID 控制,系统响应快,具有良好的动态性能。

2) 考察 FSM 控制对扰动的抑制能力。

系统稳定运行后,在 0.1 s 时加入 $f=30$ N 的瞬时负载扰动,图 10 是加入扰动后悬浮气隙响应曲线。采用 PID 控制系统在加入扰动后悬浮高度下降到 7.1 mm,在 0.4 s 时恢复稳定悬浮高度 7.96 mm,稳态误差为 0.04 mm。采用 FSM 控制系

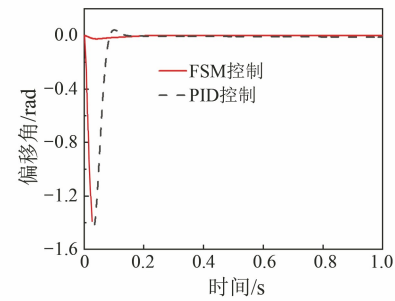


图 9 偏移角响应曲线

Fig. 9 Response curves of offset angle

统的悬浮高度下降到 7.7 mm,在 0.3 s 时恢复稳定悬浮高度 8 mm,稳态误差为零。采用 FSM 控制的悬浮高度变化量和恢复稳态时间均小于 PID 控制,说明 FSM 控制的系统抗干扰能力强,加入扰动后稳态误差为零,反应了系统良好的扰动抑制能力。

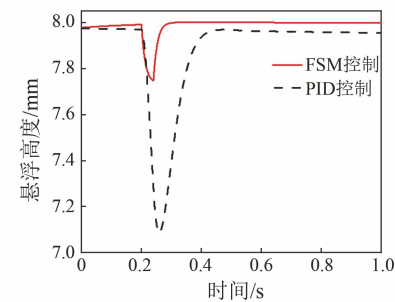


图 10 加入负载扰动的磁悬浮气隙高度响应曲线

Fig. 10 Magnetic levitation gap height response curves with added load disturbance

3.2 试验验证

为了验证模糊滑模控制器的平稳输出特性,搭建一个三轨电磁悬浮系统的试验模型,如图 11

所示。悬浮架模型参数如表 1 所示。

表 1 悬浮架模型参数

Tab. 1 Levitation chassis model parameters

参数名称	参数值
电磁铁长/mm	280
电磁铁宽/mm	66
极宽/mm	28
磁轭厚度/mm	29.8
额定气隙/mm	8
X 轴电磁铁与质心距离 L_x /mm	200
Y 轴电磁铁与质心距离 L_y /mm	300
导线截面积/mm ²	2.5
线圈偏执电流/A	5
线圈最大电流/A	10
匝数	900
力-位移系数/(N·m ⁻¹)	0.05
力-电流系数/(N·A ⁻¹)	31.25
车架重量/kg	22
总重/kg	50

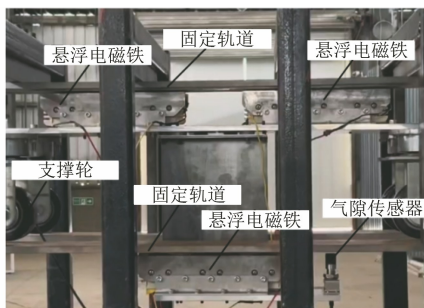


图 11 三轨电磁悬浮系统的试验模型

Fig. 11 Experimental model of three-track electromagnetic levitation system

设置悬浮架的目标悬浮高度、偏移角分别为 $z^* = 8 \text{ mm}$ 、 $\Phi_1^* = \Phi_2^* = 0 \text{ rad}$ 。图 12 给出了悬浮架在起浮过程中三个气隙传感器所检测到的气隙值, z 为 PID 控制下悬浮架在起浮过程中气隙传感器所检测到的气隙值, z_1 、 z_2 、 z_3 分别为 FSM 控制下悬浮架在起浮过程中三个气隙传感器所检测到的气隙值。根据波形可以看出, 在 PID 控制下, 悬浮架在 0.4 s 达到稳定悬浮高度, 达到稳定后气隙波动范围为 $\pm 0.7 \text{ mm}$; 在 FSM 控制下, 悬浮架在 0.2 s 达到稳定悬浮高度, 达到稳定后气隙波动范围为 $\pm 0.1 \text{ mm}$ 。

图 13 所示为起浮过程偏移角 1、2 变化情况。图中: Φ 为 PID 控制下悬浮架的偏移角; Φ_1 、 Φ_2 为 FSM 控制下悬浮架的偏移角 1、偏移角 2。悬浮架在起浮过程中三个气隙值的不同步会在偏移

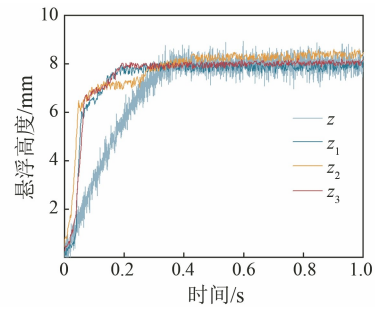


图 12 起浮过程中电磁铁悬浮高度

Fig. 12 Levitation heights of each electromagnet during floating process

角的变化上体现出来, 从波形可以看出, PID 控制下悬浮架在初始时刻最大偏移角为 -1.34 rad , 0.2 s 达到稳定状态, 稳定后的偏移角波动范围为 $\pm 0.3 \text{ rad}$; FSM 控制下悬浮架的偏移角在初始时刻略有波动, 最大偏移角为 $\pm 0.05 \text{ rad}$, 0.1 s 起浮完成后无超调达到稳定状态, 且稳定后的偏移角波动范围为 $\pm 0.01 \text{ rad}$ 。

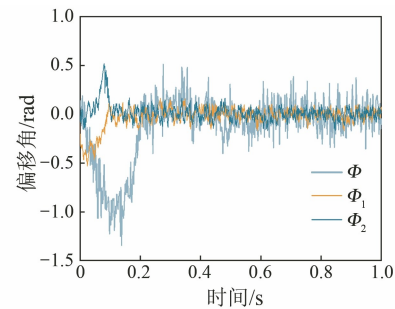


图 13 起浮过程偏移角 1、2 变化情况

Fig. 13 Changes in offset angle 1 and angle 2 during levitation

为了验证该悬浮系统的抗干扰能力, 当悬浮架悬浮高度达到目标高度时, 在悬浮架上施加瞬时干扰。测得瞬时干扰对悬浮架悬浮高度与偏移角的影响如图 14 所示。当悬浮架受到扰动时, 在 PID 控制下, 悬浮气隙波动 1.3 mm, 系统响应超调 6.25%, 在 0.35 s 恢复到稳定状态; 在 FSM 控制下, 悬浮气隙波动 0.5 mm, 在 0.3 s 无超调恢复到稳定状态。

4 结语

三轨电磁悬浮系统存在耦合点多、控制难度大的问题, 因此提出一种 FSM 控制方法。首先对三轨电磁悬浮系统的结构和运动机理进行分析, 建立了系统模型的磁悬浮力方程和动力学

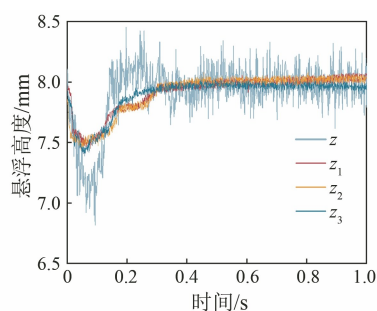


图 14 悬浮高度受到扰动的变化情况

Fig. 14 Changes in attitude angle and levitation height during takeoff and landing

方程。由于系统模型经过简化处理,故加入不确定性扰动量,得到关于悬浮气隙和偏移角的控制量。然后定义滑模面和控制律,根据滑模存在条件设置模糊控制的规则库和隶属度函数,以实现系统的悬浮控制,并有效抑制系统的抖动现象。

通过 Simulink 搭建仿真模型,从仿真结果可以看出,FSM 控制较 PID 控制相比:(1)电流响应速度提高 34.7%,气隙响应速度提高 61.76%,且起浮过程无超调;(2)受到 30 N 的瞬时扰动后,FSM 控制下的气隙波动与 PID 控制相比降低 66.7%,恢复稳态响应速度提高 33.3%。最后通过搭建三轨电磁悬浮系统的试验模型验证仿真的正确性。

相较于 PID 控制,FSM 控制不仅能对系统的不确定性进行实时地估计与补偿,使其具有更好的鲁棒性,还能对各轴上的偏移角与位移量在互不影响的情况下单独控制,有效抑制系统抖动影响。

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] CHRIS P. Engineered to go fast, maglev trains inch forward [J]. Engineering, 2021, 7(7): 891-893
- [3] JEONG J H, HA C W, LIM J, et al. Analysis and control of electromagnetic coupling effect of levitation

- and guidance systems for semi-high-speed maglev train considering current direction [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2017, 53(6): 1-4.
- [4] 熊嘉阳,邓自刚. 高速磁悬浮轨道交通研究进展[J]. 交通运输工程学报, 2021, 21(1): 177-198.
- XIONG J Y, DENG Z G. Research progress of high-speed maglev rail transit [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2021, 21(1): 177-198.
- [5] QIN Y, PENG H, ZHOU F, et al. Nonlinear modeling and control approach to magnetic levitation ball system using functional weight RBF network-based state-dependent ARX model [J]. Journal of the Franklin Institute, 2015, 352(10): 4309-4338.
- [6] 欧阳清华,樊宽刚,雷爽. 磁悬浮球的自适应径向基函数控制方法研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2023, 20(4): 1171-1179.
- OUYANG Q H, FAN K G, LEI S. Research on adaptive radial basis function control method of magnetic levitation ball [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2023, 20(4): 1171-1179.
- [7] 钟志贤,蔡忠侯,祁雁英. 单自由度磁悬浮系统无模型自适应控制的研究[J]. 西南交通大学学报, 2022, 57(3): 549-557+581.
- ZHONG Z X, CAI Z H, QI Y Y. Model-free adaptive control for single-degree-of-freedom magnetically levitated system [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2022, 57(3): 549-557+581.
- [8] 姜云凤,蓝益鹏,孙伟栋. 基于 ESO 的磁悬浮直线同步电机变增益自适应迭代学习控制[J]. 电机与控制应用, 2023, 50(4): 1-7+15.
- JIANG Y F, LAN Y P, SUN W D. Variable gain adaptive iterative learning control of magnetic levitation linear synchronous motor based on ESO [J]. Electric Machines & Control Application, 2023, 50(4): 1-7+15.
- [9] 刘丽丽,左继红. 磁悬浮球系统模糊 PID 参数自调整控制方法[J]. 控制工程, 2021, 28(2): 354-359.
- LIU L L, ZUO J H. Parameter self-adjusting control method of fuzzy PID for magnetic levitation ball system [J]. Control Engineering of China, 2021, 28(2): 354-359.
- [10] 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.
- [11] 明正峰, 王浩, 王璐璐, 等. 阵列式磁悬浮用电磁铁的定点悬浮模糊控制技术[J]. *电工技术学报*, 2011, 26(12): 7-13.
MING Z F, WANG H, WANG L L, et al. Fuzzy control technology for fix-point suspension with electromagnet array [J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2011, 26(12): 7-13.
- [12] 胡坤, 蒋庆楠, 季晨光, 等. 基于改进 ESO 的磁悬浮系统模型参考滑模控制[J]. *工程设计学报*, 2022, 29(1): 82-91.
HU K, JIANG Q N, JI C G, et al. Model reference sliding mode control of magnetic levitation system based on improved ESO [J]. *Chinese Journal of Engineering Design*, 2022, 29(1): 82-91.
- [13] ZHANG X Y. Application of direct adaptive fuzzy sliding mode control into a class of non-affine discrete nonlinear systems [J]. *Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering*, 2016, 17(12): 1331-1343.
- [14] LEE S H, JOO Y, BACK J, et al. Sliding mode controller for torque and pitch control of PMSG wind power systems [J]. *Journal of Power Electronics*, 2011, 11(3): 342-349.
- [15] 赵石铁, 高宪文, 车昌杰. 基于 RBF 神经网络的非线性磁悬浮系统控制[J]. *东北大学学报(自然科学版)*, 2014, 35(12): 1673-1676+1696.
ZHAO S T, GAO X W, CHE C J. Control of a nonlinear magnetic levitation system based RBF neural network [J]. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*, 2014, 35(12): 1673-1676+1696.
- [16] 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.
- [17] 朱坚民, 沈正强, 李孝茹, 等. 基于神经网络反馈补偿控制的磁悬浮球位置控制[J]. *仪器仪表学报*, 2014, 35(5): 976-986.
ZHU J M, SHEN Z Q, LI X R, et al. Magnetic levitation ball position control based on neural network feedback compensation control [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2014, 35(5): 976-986.
- [18] 禹聪, 康尔良. 永磁同步电机模糊滑模无位置传感器控制[J]. *电机与控制学报*, 2024, 28(1): 87-94.
YU C, KANG E L. Fuzzy sliding mode position sensorless control of permanent magnet synchronous motor [J]. *Electric Machines and Control*, 2024, 28(1): 87-94.
- [19] 李耀文, 李群明, 段小刚. 五自由度机械臂的动力学建模与模糊滑模控制[J]. *现代制造工程*, 2016, 6: 34-39.
LI Y W, LI Q M, DUAN X G. Dynamic modeling and fuzzy sliding mode control of 5-DOF mechanical arm [J]. *Modern Manufacturing Engineering*, 2016, 6: 34-39.
- [20] ZOU X H, DING H C, LI J H. Sensorless control strategy of permanent magnet synchronous motor based on fuzzy sliding mode controller and fuzzy sliding mode observer [J]. *Journal of Electrical Engineering & Technology*, 2023, 18(3): 2355-2369.
- [21] ABBASI M A, MOHAMMADI M M, DEGHAN N V. Fuzzy sliding mode control of a wearable rehabilitation robot for wrist and finger [J]. *Industrial Robot*, 2019, 46(6): 839-850.
- [22] 史晓娟, 杨紫艳. 基于模糊滑模控制的数控机床位置伺服系统[J]. *制造技术与机床*, 2017, (3): 64-68.
SHI X J, YANG Z Y. CNC machine tool position servo system based on fuzzy sliding mode control [J]. *Manufacturing Technology & Machine Tool*, 2017, (3): 64-68.
- [23] 李惠光, 张广路, 周巧玲, 等. 垂直轴磁悬浮风电悬浮系统的模糊滑模控制[J]. *武汉理工大学学报*, 2010, 32(10): 136-140.
LI H G, ZHANG G L, ZHOU Q L, et al. Fuzzy sliding mode control for vertical axis wind power generation suspension system [J]. *Journal of Wuhan University of Technology*, 2010, 32(10): 136-140.
- [24] TARAN B, RAMEZANI A. A novel fuzzy sliding mode observer for suspension systems [J]. *International Journal of Dynamics and Control*, 2022, 10(6): 1889-1902.

- [25] 刘春芳, 胡雨薇. 磁悬浮平台电磁悬浮系统的模糊滑模控制[J]. 沈阳工业大学学报, 2015, 37(6): 607-612.
- LIU C F, HU Y W. Fuzzy sliding-mode control of electromagnetic system for magnetic levitation platform [J]. Journal of Shenyang University of Technology, 2015, 37(6): 607-612.
- [26] 汪斌, 王伟旭, 孙体佳, 等. 磁悬浮列车磁浮力的计算与分析[J]. 铁道学报, 2023, 45(11): 61-69.
- WANG B, WANG W X, SUN T J, et al. Calculation and analysis of magnetic suspension force of maglev trains [J]. Journal of the China Railway Society, 2023, 45(11): 61-69.
- [27] 张晓宇, 刘国清, 董金文, 等. 采用观测气隙的电

磁吸力悬浮系统研究[J]. 电机与控制应用, 2022, 49(3): 33-39.

ZHANG X Y, LIU G Q, DONG J W, et al. Study on electromagnetic suction levitation system with observation air gap [J]. Electric Machines & Control Application, 2022, 49(3): 33-39.

收稿日期:2024-05-20

收到修改稿日期:2024-07-02

作者简介:

刘怡(1997-),女,硕士研究生,研究方向为电机与电器、磁浮与磁控技术,904977072@qq.com;

* 通信作者:刘国清(1977-),男,硕士,副研究员,研究方向为电力电子与电力传动,034115@163.com。

Research on Fuzzy Sliding Mode Control for Three-Track Electromagnetic Levitation System

LIU Yi, LIU Guoqing^{*}, JIU Fangheng, SHEN Hao

(School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, China)

Key words: magnetic levitation system; fuzzy sliding mode control; levitation control; response speed; anti-interference ability

The three-track electromagnetic levitation system based on fuzzy sliding mode control can achieve independent control of each coupling point, providing superior response speed, anti-interference ability, and greater levitation force. This study conducts an in-depth analysis of the rotational motion of the system model based on the specific structure of the three-track electromagnetic levitation system. By decoupling, the two key control variables, namely the rotational offset angle and the levitation air gap height, are separated, thereby enabling independent control.

Specifically, the structure and movement mechanism of the three-track electromagnetic levitation system were comprehensively analyzed, and a system model including both the electromagnetic and dynamic equations was established. Considering the potential uncertainties introduced by the simplifications in the system model, the control variables related to the levitation air gap and offset angle were further determined. The fuzzy control variables were compared with the system

errors, and the sliding mode surface and control rate were defined. Based on the sliding mode control's existence condition, the rule base and membership functions for fuzzy control were set. The principle of sliding mode control was utilized to ensure that the levitation error rapidly converged to zero. These measures successfully achieved levitation control and effectively suppressed potential chattering phenomenon. The research findings not only provided new ideas and methods for the control of three-track electromagnetic levitation system but also offered valuable references for solving control problems in other similar complex systems.

To verify the effectiveness of the fuzzy sliding mode controller in practical applications, both simulation and experimental models were constructed. The experimental results showed that, compared to traditional methods, the fuzzy sliding mode control exhibited faster response and stronger anti-interference ability. Particularly in terms of vibration control during the levitation process, the method demonstrated significant advantages.