

磁通切换直线电机磁悬浮系统的模糊超螺旋滑模控制

刘晓杰*, 蓝益鹏

(沈阳工业大学 电气工程学院, 辽宁 沈阳 110870)

Fuzzy Super-Twisting Sliding Mode Control of Magnetic Levitation System of Flux Switching Linear Motor

LIU Xiaojie*, LAN Yipeng

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

Abstract: [Objective] The flux switching linear motor (FSLM) magnetic levitation system is a nonlinear, strongly coupled, parameter time-varying system. Due to the lack of an intermediate transmission device in the FSLM, combined with external disturbances and the inherent end effects of the linear motor, controlling the magnetic levitation system becomes more challenging. To improve the control performance of the magnetic levitation system, an interval type-2 fuzzy super-twisting sliding mode control (IT-2FSTSMC) strategy is proposed. [Methods] Firstly, the mathematical model of the magnetic levitation system was established according to the structural characteristics and operating principle of FSLM. A nonlinear coordinate transformation was applied to derive an affine nonlinear mathematical model of the FSLM magnetic levitation system. Secondly, a new integral sliding mode surface was designed, which could adaptively regulate the convergence rate of the state variables, thereby improving the system's response performance. The super-twisting algorithm was used to reduce chattering in conventional sliding mode control, resulting in faster convergence. Thirdly, in order to further suppress chattering and enhance the system's robustness against uncertainty disturbances, a super-twisting sliding mode switching gain was rectified by using an interval type-2 fuzzy system. Finally, simulations were conducted to compare the IT-2FSTSMC strategy with the super-twisting sliding mode control (STSMC) and interval type-1 fuzzy super-twisting sliding mode control (IT-1FSTSMC) strategies. [Results] Simulation results showed that the IT-2FSTSMC strategy significantly outperformed the STSMC and IT-1FSTSMC strategies. Specifically, the adjustment time during no-load startup was reduced by 63.5% and 55.7%, respectively.

When a sudden load was applied, the system's magnetic levitation height dynamic drop was reduced by 39.3% and 15%, with a shorter recovery time. When subjected to uncertainty disturbances, the IT-2FSTSMC showed stronger robustness, effectively weakening the chattering in sliding mode control and improving both the system's stability and dynamic performance. Additionally, the IT-2FSTSMC outperformed the other two control strategies in suppressing the end effect. [Conclusion] The IT-2FSTSMC strategy designed in this paper significantly improves the performance of the FSLM magnetic levitation system, meeting the control requirements effectively.

Key words: flux switching linear motor; magnetic levitation system; super-twisting sliding mode control; interval type-2 fuzzy system

摘要: [目的] 磁通切换直线电机(FSLM)磁悬浮系统是一个非线性、强耦合、参数时变系统。由于FSLM缺乏中间传动装置,外部扰动和直线电机固有的端部效应使磁悬浮系统的控制变得更加困难,为提升磁悬浮系统的控制性能,提出一种区间二型模糊超螺旋滑模控制(IT-2FSTSMC)策略。【方法】首先,根据FSLM的结构特点和运行原理,建立了磁悬浮系统的数学模型,选择非线性变换坐标建立了FSLM磁悬浮系统的仿射非线性数学模型。其次,设计了新型积分滑模面,该滑模面能够自适应地调节状态变量的收敛速度,从而有效提升系统的响应性能;并采用超螺旋算法以降低常规滑模的抖振,实现更快的收敛速度。然后,为了进一步降低抖振,增强系统对不确定性扰动的鲁棒性,采用区间二型模糊系统对超螺旋滑模切换增益进行整定。最后,通过仿真将本文设计的IT-2FSTSMC策略和超螺旋滑模控制(STSMC)策略以及区间一型模糊超螺旋滑模控制(IT-1FSTSMC)策略进行对比分

析。【结果】仿真结果表明,本文设计 IT-2FSTSMC 策略相较于 STSMC 策略和 IT-1FSTSMC 策略,空载启动时的调节时间分别降低了 63.5% 和 55.7%;突加负载时系统的磁悬浮高度动态降落分别降低了 39.3% 和 15%,且恢复时间更短;在面对不确定性扰动时,IT-2FSTSMC 表现出更强的鲁棒性,有效削弱了滑模控制中的抖振,提升了系统的稳定性和动态性能;在抑制端部效应方面,IT-2FSTSMC 优于其他两种控制策略。【结论】本文所设计的 IT-2FSTSMC 策略显著改善了 FSLM 磁悬浮系统的性能,且能够满足控制需求。

关键词: 磁通切换直线电机; 磁悬浮系统; 超螺旋滑模控制; 区间二型模糊系统

0 引言

在轨道交通领域,磁悬浮列车因其噪音小、高效便捷、环保性好以及舒适度高而备受关注^[1]。然而,传统电车与轨道运行的摩擦使系统的控制效果受到巨大影响。将磁通切换直线电机(Flux Switching Linear Motor, FSLM)应用于磁悬浮电车,有效解决了电车驱动系统中的摩擦阻力。并且 FSLM 的励磁绕组和电枢绕组都分布在动子上,降低了沿轨道铺设绕组的成本以及维修成本^[2],特别适合于长距离的轨道交通^[3]。但是,由于 FSLM 缺乏中间传动装置,外部扰动和直线电机固有的端部效应对其产生的影响使系统的控制变得更加困难。

磁悬浮系统是非线性系统,决定着整个系统的动态性能,滑模变结构控制是一种典型的非线性控制,其不需要精确的系统数学模型,对参数摄动和外部干扰具有强鲁棒性^[4-5]。但是,滑模控制会产生抖振,使系统性能受到影响^[6]。文献[7]通过构造非奇异终端滑模来稳定变换误差,保证在有限时间内达到稳定,但是滑模面收敛速度慢。文献[8]构造的非奇异快速终端滑模面虽然能够避免奇异和减小抖振,但是不能自适应地调节状态变量的收敛速度。文献[9]将超螺旋快速终端滑模控制与无模型控制相结合,增强了调速系统的鲁棒性和抗干扰能力。文献[10]提出了基于超螺旋控制律的非奇异终端滑模控制策略,虽然能够减弱抖振并解决奇异性问题,但收敛时间长。

文献[11]对区间一型模糊和区间二型模糊系统的性能进行对比,区间一型模糊不能处理与

输入和输出隶属函数相关的不确定性,而区间二型模糊克服了区间一型模糊集处理不确定性的局限性,并且具有较低的超调量和较快的上升时间,因此具有较好的性能。文献[12]采用自适应区间二型模糊系统逼近滑模切换增益,以提高系统对外界干扰的处理能力,增强系统鲁棒性,但是切换控制律仍是不连续的,仍然有抖振产生。

受文献[12-14]的启发,本文首先对非线性模型进行变换,得到磁悬浮系统的仿射非线性数学模型;然后设计了新型积分滑模面来取代传统的积分滑模面,通过与状态变量相关的指数项来自适应地调节状态变量的收敛速度;其次,采用超螺旋算法替代传统的符号函数,改进了切换控制律并减弱了系统的抖振;最后,将区间二型模糊系统引入到超螺旋滑模控制器中,系统可根据磁悬浮高度误差及其变化率在线调整超螺旋滑模切换增益参数。所提控制策略提升了系统对不确定性扰动的鲁棒性,并提高了系统的动态响应性能。仿真结果验证了本文设计的控制策略可行性及有效性。

1 FSLM 的结构及运行机理

FSLM 结构如图 1 所示。动子与电枢绕组产生的磁链在运动中切割,产生电磁推力使动子开始运动。将直流电流通入励磁绕组中,在气隙中产生励磁磁场。励磁磁场与定子铁心之间相互作用,产生磁悬浮力,使得磁悬浮列车能够保持平衡状态,实现稳定的悬浮效果^[15]。

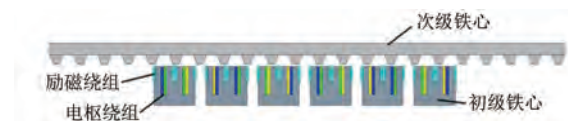


图 1 FSLM 结构图

Fig. 1 FSLM structural diagram

2 FSLM 磁悬浮系统数学模型

为了简化分析,做如下假设^[16]:

- (1) 不计电机的磁槽和端部效应;
- (2) 磁场无饱和情况,不计磁滞和涡流损耗;
- (3) 只考虑电机基波磁场的影响;
- (4) 不考虑温度对电机参数的影响。

基于所提假设,FSLM 磁悬浮系统的数学模型如式(1)~式(5)所示^[17]:

电压方程为

$$u_f = r_f i_f + \frac{d\psi_f}{dt} \quad (1)$$

式中: 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; ψ_f 为励磁绕组的磁链分量。

磁悬浮力方程为

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

式中: F_y 为磁悬浮力; L_{md} 、 L_{mq} 分别为直轴、交轴电感; δ 为磁悬浮气隙高度; i_q 为电枢绕组交轴电流。

磁悬浮系统的运动方程为

$$m\ddot{\delta} = F_y - mg - f_y = K \left(\frac{i_f}{\delta} \right)^2 - mg - f \quad (3)$$

式中: m 为电励磁 FSLM 定子与运动平台的总重量; K 为磁悬浮系数, 取 4.25×10^{-5} ; f_y 为电机垂直方向上的扰动; f 为垂直方向总扰动, 其表达式为

$$f = f_y - \frac{3}{2} i_q^2 \frac{\partial L_{mq}}{\partial \delta} \quad (4)$$

式中: $|f| \leq D$, $D > 0$ 为扰动上界。

令 $x_1 = \delta$, $x_2 = \dot{\delta}$, $x_3 = i_f$, 输出 $y = x_1$, 得到 FSLM 磁悬浮系统的状态方程为^[18]

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = \frac{Kx_3^2}{mx_1^2} - g - \frac{f}{m} \\ \dot{x}_3 = \frac{x_3x_2}{x_1} - \frac{3r_fx_3x_1}{2K} + \frac{3x_1}{2K}u_f \\ y = x_1 \end{cases} \quad (5)$$

3 控制器设计

3.1 FSLM 磁悬浮系统仿射非线性数学模型

为了得到磁悬浮系统的仿射非线性数学模型, 选择非线性变换坐标, 如式(6)所示^[14]:

$$\begin{cases} \boldsymbol{\eta} = [\eta_1, \eta_2, \eta_3]^T \in \boldsymbol{\Omega}_\eta, \boldsymbol{\Omega}_\eta \in R^3 \\ \eta_1 = x_1 \\ \eta_2 = x_2 \\ \eta_3 = \frac{Kx_3^2}{mx_1^2} - g \end{cases} \quad (6)$$

对式(6)求导可得:

$$\begin{cases} \dot{\eta}_1 = x_2 \\ \dot{\eta}_2 = x_3 \\ \dot{\eta}_3 = \frac{2Kx_3\dot{x}_3}{mx_1^2} - \frac{2Kx_3^2\dot{x}_1}{mx_1^3} \end{cases} \quad (7)$$

将式(5)代入式(7)可得:

$$\dot{\eta}_3 = \frac{3r_fx_3^2}{mx_1} + \frac{3x_3}{mx_1}u_f \quad (8)$$

因此, 基于新坐标系的仿射非线性数学模型如式(9)所示:

$$\begin{cases} \dot{\eta}_1 = x_2 \\ \dot{\eta}_2 = x_3 \\ \dot{\eta}_3 = f(\boldsymbol{\eta}) + g(\boldsymbol{\eta})u_f \\ \mathbf{y} = \boldsymbol{\eta} \end{cases} \quad (9)$$

$$\text{式中: } f(\boldsymbol{\eta}) = \frac{3r_fx_3^2}{mx_1}; g(\boldsymbol{\eta}) = \frac{3x_3}{mx_1}.$$

3.2 滑模控制器的设计

设 δ^* 为磁悬浮气隙高度的参考值, δ 为磁悬浮气隙高度的实际值, δ_0 为初始磁悬浮气隙高度。则磁悬浮气隙高度的误差定义为

$$e = \delta - \delta^* \quad (10)$$

在 FSLM 磁悬浮系统中, $\delta^* = 0.002 \text{ m}$, $\delta_0 = 0.003 \text{ m}$ 。

设计新型积分滑模面, 如式(11)所示:

$$s = c_1 e + c_2 \eta_2 + \eta_3 + \int [a | \dot{e} |^\alpha \text{sgn}(\dot{e}) + b | e |^\beta \text{sgn}(e) + c | e |^\gamma \text{sgn}(e)] d\tau \quad (11)$$

式中: $c_1 > 0$; $c_2 > 0$; $a > 0$; $b > 0$; $c > 0$; $\alpha > 1$; $0 < \beta < 1$; γ 的取值为

$$\gamma = \begin{cases} \max\{\alpha/2000, |e|\}, & |e| \geq 0.0005 \\ \beta, & |e| < 0.0005 \end{cases} \quad (12)$$

新型积分滑模面可实现跟踪误差快速收敛到 0。事实上, 如果位置初始值远离期望值, 即 $|e| \geq 0.0005$, 那么 $a |\dot{e}|^\alpha \text{sgn}(\dot{e})$ 和 $c |e|^\gamma \text{sgn}(e)$ 将占主导地位, 这将导致快速收敛。如果位置初始值接近期望值, 即 $|e| < 0.0005$, 那么 $b |e|^\beta \text{sgn}(e)$ 和 $c |e|^\gamma \text{sgn}(e)$ 必须确保能在有限时间内收敛。 γ 的取值使系统在满足 $|e| \geq 0.0005$ 或 $|e| < 0.0005$ 时, 指数能自适应地取到相对应的值, 从而提高收敛速度。

对滑模面求导:

$$\dot{s} = c_1 \eta_2 + c_2 \eta_3 + f(\boldsymbol{\eta}) + g(\boldsymbol{\eta}) u_t + a |\dot{e}|^\alpha + b |e|^\beta + c |e|^\gamma. \quad (13)$$

将 FSLM 磁悬浮系统的状态方程式(5)和仿射非线性模型式(9)代入式(13)得到等效控制律,如式(14)所示:

$$u_{eq} = -\frac{mx_1}{3x_3} [c_1 \eta_2 + c_2 \eta_3 + f(\boldsymbol{\eta}) + a |\dot{e}|^\alpha + b |e|^\beta + c |e|^\gamma] \quad (14)$$

由于传统滑模控制器中切换控制律的符号函数的不连续性,系统会产生抖振。超螺旋算法存在积分项,确保了切换控制律在时间上的连续性,从而能降低抖振^[19]。

根据式(14)推导出超螺旋切换控制律,如式(15)所示:

$$\begin{cases} u_{sw} = -\frac{mx_1}{3x_3} [k_1 |s|^{1/2} \text{sgn}(s) + u_1] \\ \dot{u}_1 = k_2 \text{sgn}(s) \end{cases} \quad (15)$$

式中: k_1, k_2 为滑模增益。

为保证超螺旋滑模控制 (Super-Twisting

$$\begin{aligned} \dot{V} = s\dot{s} &= s[c_1 \eta_2 + c_2 \eta_3 + f(\boldsymbol{\eta}) + g(\boldsymbol{\eta}) u_t + a |\dot{e}|^\alpha + b |e|^\beta + c |e|^\gamma] = s\{c_1 \eta_2 + c_2 \eta_3 + f(\boldsymbol{\eta}) + \\ &g(\boldsymbol{\eta}) \left[-\frac{mx_1}{3x_3} [c_1 \eta_2 + c_2 \eta_3 + f(\boldsymbol{\eta}) + a |\dot{e}|^\alpha + b |e|^\beta + c |e|^\gamma + k_1 |s|^{1/2} \text{sgn}(s) + k_2 \int \text{sgn}(s) d\tau] \right\} + \\ &a |\dot{e}|^\alpha + b |e|^\beta + c |e|^\gamma \} = s[c_1 \eta_2 + c_2 \eta_3 + f(\boldsymbol{\eta}) - c_1 \eta_2 - c_2 \eta_3 - f(\boldsymbol{\eta}) - a |\dot{e}|^\alpha - b |e|^\beta - \\ &c |e|^\gamma - k_1 |s|^{1/2} \text{sgn}(s) - k_2 \int \text{sgn}(s) d\tau] = s[-k_1 |s|^{1/2} \text{sgn}(s) - k_2 \int \text{sgn}(s) d\tau] = \\ &-k_1 |s|^{3/2} - k_2 |s| \end{aligned} \quad (18)$$

由式 16 可知, $k_2 > 0$, 因此只要保证 $k_1 > 0$, 就能使 $\dot{V} \leq 0$ 成立, 即系统稳定^[21-22]。

3.3 基于区间二型模糊系统的 STSMC

滑模控制的鲁棒性受到切换控制增益的影响, 并且滑模控制的抖振也由切换控制增益产生^[23]。如果切换控制增益设置过高, 系统容易出现较大的抖振; 反之, 切换控制增益设置过低, 系统可能对参数变化不敏感, 降低对扰动的鲁棒性。本文提出了一种基于区间二型模糊系统在线调整 STSMC 切换增益的方法^[24], 以增强系统对不确定性扰动的鲁棒性。区间二型模糊系统结构框图如图 2 所示^[25-26]。

区间二型模糊系统以磁悬浮气隙高度误差 e 及其变化率 ec 为输入, $dk_i (i=1, 2)$ 为输出, K_a, K_b 和 K_{ci} 为比例系数。

Sliding Mode Control, STSMC) 能够在有限时间内收敛, 需满足如式(16)所示的条件^[20]:

$$\begin{cases} k_2 > \frac{\varphi}{K_m} \\ k_1^2 \geq \frac{4\varphi}{K_m^2} \frac{K_m(k_2 + \varphi)}{K_m(k_2 - \varphi)} \end{cases} \quad (16)$$

式中: K_M, K_m 和 φ 均为大于零的常数。

针对系统设计的积分滑模面以及超螺旋切换律的超螺旋滑模控制器如式(17)所示:

$$u = u_{eq} + u_{sw} = -\frac{mx_1}{3x_3} \cdot \left[c_1 \eta_2 + c_2 \eta_3 + f(\boldsymbol{\eta}) + a |\dot{e}|^\alpha + b |e|^\beta + c |e|^\gamma + k_1 |s|^{1/2} \text{sgn}(s) + k_2 \int \text{sgn}(s) d\tau \right] \quad (17)$$

构造 Lyapunov 函数 $V = \frac{1}{2} s^2$, 并对其进行求

导, 如式(18)所示:

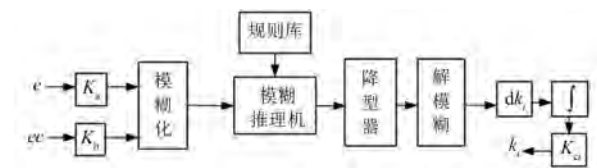


图 2 区间二型模糊系统结构框图

Fig. 2 Interval type-2 fuzzy structure system block diagram

隶属函数 $u_j(e, ec)$ 选择高斯函数, 如图 3 和图 4 所示。

输入和输出的模糊集均为 {正大(NB), 正小(NS), 零(ZE), 负小(PS), 负大(PB)}, 输入和输出的模糊论域均为 $[-6, 6]$ 。区间二型模糊的模糊规则如表 1 所示。

选择具有停止条件的改进迭代算法进行降型进程中开关的计算, 此算法不需要搜索转折点, 计

算效率高^[27-28]。

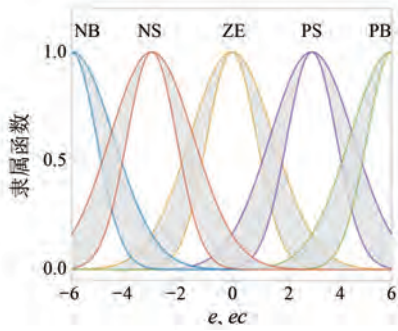


图3 e 和 ec 的隶属度函数

Fig. 3 Membership functions of e and ec

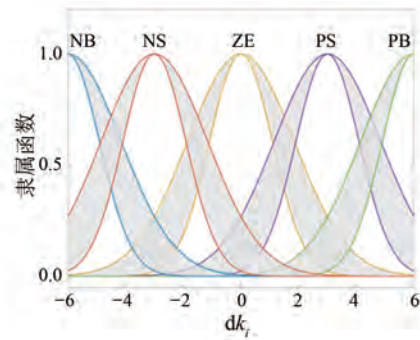


图4 dk_i 的隶属度函数

Fig. 4 Membership functions of dk_i

表1 dk_i 的控制规则

Tab. 1 Control rules for dk_i

ec	e				
	NB	NS	ZE	PS	PB
NB	NB	NB	NB	NS	ZE
NS	NB	NS	NS	ZE	PS
ZE	NB	NS	ZE	PS	PB
PS	NS	ZE	PS	PS	PB
PB	ZE	PS	PB	PB	PB

采用重心法去模糊化,其表达式为^[29]

$$dk_i = \frac{\sum_{j=1}^n k_j u_j(e, ec)}{\sum_{j=1}^n u_j(e, ec)} \quad (19)$$

式中: k_j 为第 j 个论域的中心值。

对 dk_i 进行积分,估计切换增益的上界:

$$k_i = K_{ci} \int_0^t dk_i \quad (20)$$

4 仿真分析

FSLM 区间二型模糊超螺旋滑模控制

(Interval Type-2 Fuzzy STSMC, IT-2FSTSMC) 系统结构框图如图 5 所示。

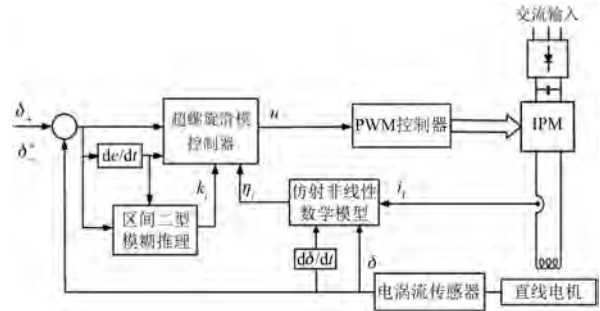


图5 FSLM IT-2FSTSMC 系统结构框图

Fig. 5 Block diagram of IT-2FSTSMC system of FSLM

仿真中, FSLM 参数设置为: 电枢绕组 $R_s = 1.55 \Omega$; 直、交轴电感 $L_d = 0.101 \text{ H}$, $L_q = 0.103 \text{ H}$; 电机定子以及平台质量 $m = 17 \text{ kg}$; 励磁电流 $i_f = 4 \text{ A}$ 。

区间二型模糊超螺旋滑模控制器的参数通过反复试凑, 结合稳态性能和动态性能来选取, 具体为: $c_1 = 7.5 \times 10^4$; $c_2 = 620$; $a = 152$; $b = 5$; $c = 6$; $\alpha = 1.01$; $\beta = 0.8$; $K_a = 2000$; $K_b = 35$; $K_{c1} = 1.3 \times 10^6$; $K_{c2} = 1.8 \times 10^8$ 。

基于 Simulink 对本文设计的控制策略进行仿真分析, 对 STSMC、区间一型模糊超螺旋滑模控制 (Interval Type-1 Fuzzy STSMC, IT-1FSTSMC) 以及 IT-2FSTSMC 三种控制策略进行对比分析。

首先分析 FSLM 的启动性能。启动时磁悬浮高度响应曲线如图 6 所示。

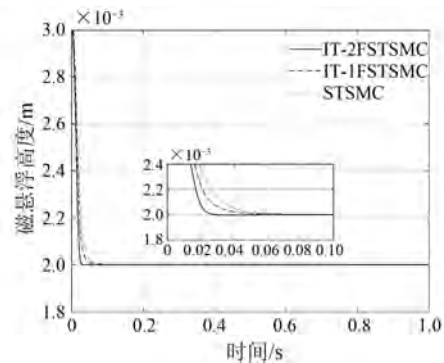


图6 启动时磁悬浮高度响应曲线

Fig. 6 Magnetic levitation height response curves during startup

由图 6 可知, STSMC 策略下电机到达给定磁悬浮高度的时间约为 0.085 s; IT-1FSTSMC 策略下电机到达给定磁悬浮高度的时间约为 0.07 s; IT-2FSTSMC 策略下电机到达给定磁悬浮高度的时

间约为 0.031 s, 响应最快。

其次, 分析 FSLM 在负载率为 20%~30% 的额定负载干扰下的抗扰动情况。0.3 s 时施加 50 N 的阶跃扰动, 0.6 s 时去除扰动。磁悬浮高度响应曲线和励磁电流响应曲线分别如图 7 和图 8 所示。

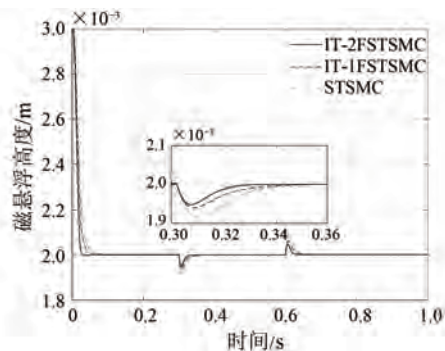


图 7 突加阶跃扰动时磁悬浮高度响应曲线

Fig. 7 Magnetic levitation height response curves under sudden step disturbance

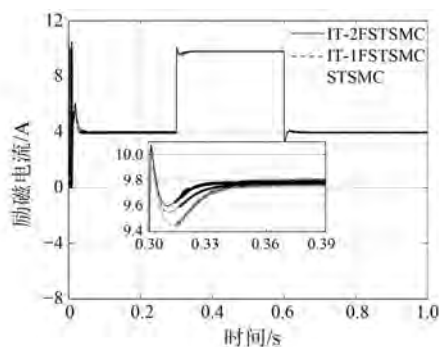


图 8 突加阶跃扰动时励磁电流响应曲线

Fig. 8 Excitation current response curves under sudden step disturbance

由图 7 可知, 在 STSMC、IT-1FSTSMC 和 IT-2FSTSMC 三种策略下, 系统的磁悬浮高度动态降落分别约为 8.4×10^{-5} m、 6×10^{-5} m 和 5.1×10^{-5} m, 恢复时间分别为 0.06 s、0.06 s 和 0.03 s。

由图 8 可知, 采用 STSMC 时系统抖振幅值约为 0.27 A, 恢复时间为 0.05 s; 采用 IT-1FSTSMC 时系统抖振幅值约为 0.23 A, 恢复时间为 0.045 s; 采用 IT-2FSTSMC 时系统抖振幅值最小, 约为 0.12 A, 恢复时间最短, 约为 0.03 s, 并且可以有效削弱抖振。在 0.315 s 时, 电流波形突然出现高频纹波, 这主要是因为超螺旋滑模的抖振现象和外界干扰作用, 使区间一型和区间二型模糊动态调整了控制器增益造成了高

频纹波的产生。

进一步对系统抑制直线电机端部效应的效果进行了分析。突加正弦扰动时磁悬浮高度响应曲线和励磁电流响应曲线分别如图 9 和图 10 所示。

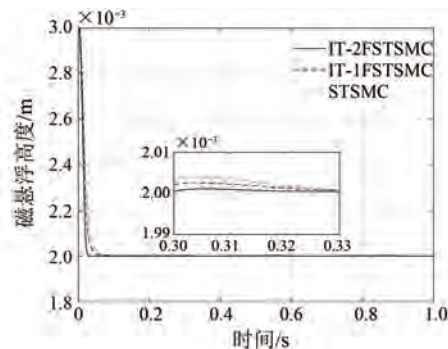


图 9 突加正弦扰动时磁悬浮高度响应曲线

Fig. 9 Magnetic levitation height response curves under sudden sinusoidal disturbance

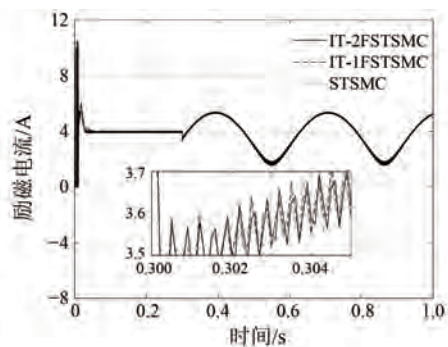


图 10 突加正弦扰动时励磁电流响应曲线

Fig. 10 Excitation current response curves under sudden sinusoidal disturbance

由图 9 可知, 在 STSMC、IT-1FSTSMC 和 IT-2FSTSMC 三种策略下, 系统的磁悬浮高度动态降落分别约为 3.82×10^{-6} m、 2.51×10^{-6} m 和 1.18×10^{-6} m。由图 10 可知, IT-2FSTSMC 在抑制端部效应方面优于其他两种控制策略。

5 结语

为提升 FSLM 磁悬浮控制系统的性能, 本文提出了一种 IT-2FSTSMC 策略, 主要结论如下。

(1) 分析了 FSLM 的结构和运行机理, 推导了磁悬浮系统的电压方程、磁悬浮力方程和磁悬浮系统的运动方程。

(2) 建立了 FSLM 磁悬浮系统的仿射非线性数学模型, 设计了新型超螺旋滑模控制器, 该控制器能够自适应地调节状态变量的收敛速度, 降低

了常规滑模的抖振,实现更快的收敛速度,且 Lyapunov 函数证明了所设计的超螺旋滑模控制器的稳定性。

(3) 设计了区间二型模糊系统对超螺旋滑模切换增益进行整定,增强了系统对不确定性扰动的鲁棒性,提高了系统性能。仿真结果表明,本文设计的 IT-2FSTSMC 策略相较于 STSMC 策略,空载启动的调节时间降低了 63.5%;突加负载时系统的磁悬浮高度动态降落降低了 39.3%,恢复时间降低了 50%,证明了本文所提控制策略的可行性和有效性。

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

刘晓杰进行了方案设计,内容总结与论文撰写,蓝益鹏进行了方法理论指导,论文审核与修改。所有作者均阅读并同意了最终稿件的提交。

Liu Xiaojie carried out the scheme design, content summary and paper writing. Lan Yipeng carried out method and theory guidance, paper review and revision. All authors have read the last version of paper and consented for submission.

参考文献

- [1] 黄婕. 永磁直线同步电机的自适应模糊滑模控制研究[D]. 长春: 吉林大学, 2023.
HUANG J. Research of adaptive fuzzy sliding mode control for permanent magnet synchronous linear motor [D]. Changchun: Jilin University, 2023.
- [2] 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.
- [3] 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.

- [4] 刘春芳, 张健. 数控机床用磁悬浮系统非线性时变滑模变结构控制[J]. 中国机械工程, 2013, 24(21): 2921-2927.
LIU C F, ZHANG J. Nonlinear time-varying sliding mode control for NC machine magnetic levitation systems [J]. China Mechanical Engineering, 2013, 24(21): 2921-2927.
- [5] 沈艳霞, 罗昌茜. 基于超螺旋滑模观测器的永磁同步直线电机无模型控制[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(18): 62-69.
SHEN Y X, LUO C X. Model-free control of a permanent linear synchronous motor based on a super-twisting sliding mode observer [J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(18): 62-69.
- [6] 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, (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, (3): 407-418.
- [7] 朱威霖, 王超, 邓文翔, 等. 基于非奇异终端滑模的电机伺服系统预设性能控制[J]. 机械工程学报, 2023, 59(24): 359-366.
ZHU W L, WANG C, DENG W X, et al. Nonsingular terminal sliding mode based prescribed performance control of motor servo systems [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2023, 59(24): 359-366.
- [8] ALNUFAIE L. Nonsingular fast terminal sliding mode controller for a robotic system: A fuzzy approach [J]. IEEE Access, 2023, 11: 75522-75527.
- [9] 赵凯辉, 易金武, 刘文昌, 等. 一种永磁同步电机无模型超螺旋快速终端滑模控制方法[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(22): 88-98.
ZHANG K H, YI J W, LIU W C, et al. A model-free super-twisting fast terminal sliding mode control method for a permanent magnet synchronous [J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(22): 88-98.
- [10] 主父冠峰, 王树波. 永磁同步电机自适应非奇异快速终端滑模控制[J/OL]. 控制理论与应用, 2024-02-22, <http://kns.cnki.net/kcms/detail/44.1240.TP.20240220.1604.002.html>.
ZHUFU G F, WANG S B. Adaptive non-singular fast terminal sliding mode control of permanent magnet

- synchronous motor [J/OL]. Control Theory & Applications, 2024-02-22, <http://kns.cnki.net/kcms/detail/44.1240.TP.20240220.1604.002.html>.
- [11] NAIK K A, GUPTA C P. Performance comparison of type-1 and type-2 fuzzy logic systems [C]//2017 4th International Conference on Signal Processing, Computing and Control, Solan, 2017.
- [12] 孙宜标, 王亚朋, 刘春芳. 永磁直线电机自适应区间二型模糊滑模控制[J]. 沈阳工业大学学报, 2017, 39(6): 601-606.
- SUN Y B, WANG Y P, LIU C F. Adaptive interval type-2 fuzzy sliding mode control for permanent magnet linear motor [J]. Journal of Shenyang University of Technology, 2017, 39(6): 601-606.
- [13] 张国山, 李现磊. 一种滑模控制新型幂次趋近律的设计与分析[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2020, 53(11): 1112-1119.
- ZHANG G S, LI X L. Design and analysis of a new power reaching law for sliding mode control [J]. Journal of Tianjin University: Science and Technology, 2020, 53(11): 1112-1119.
- [14] SUN Y G, XU J Q, QIANG H Y, et al. Adaptive neural-fuzzy robust position control scheme for maglev train systems with experimental verification [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 66(11): 8589-8599.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] 姜佳林. 基于超螺旋算法的直线电机扰动抑制研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019.
- JIANG J L. Disturbance suppression for linear motor based on super-twisting algorithm [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2019.
- [20] 黄祖繁, 周建萍, 茅大钧, 等. 不平衡电网电压下 MMC-UPQC 的无源超螺旋二阶滑模控制策略[J]. 控制与决策, 2024, 39(5): 1487-1497.
- HUANG Z F, ZHOU J P, MAO D J, et al. Passive super-twisting second-order sliding mode control strategy for MMC-UPQC under unbalanced grid voltage [J]. Control and Decision, 2024, 39(5): 1487-1497.
- [21] 王业琴, 杨艳, 李正豪, 等. Boost 型 PFC 变换器的自适应超螺旋全局滑模控制[J]. 电机与控制学报, 2024, 28(4): 111-119+130.
- WANG Y Q, YANG Y, LI Z H, et al. Adaptive super twisting total sliding mode control for Boost-type PFC converter [J]. Electric Machines and Control, 2024, 28(4): 111-119+130.
- [22] 刘金琨. 滑模变结构控制 MATLAB 仿真(第 3 版)基本理论与设计方法[M]. 北京: 清华大学出版社, 2015.
- LIU J K. Sliding Mode Control Design and MATLAB Simulation [Third Edition] The Basic Theory and Design Method [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2015.
- [23] 马雨新, 雷子奇, 顾萍萍, 等. 基于改进型超螺旋滑模线性自抗扰的永磁同步电机速度控制研究[J]. 电机与控制应用, 2024, 51(9): 103-112.
- MA Y X, LEI Z Q, GU P P, et al. Research on PMSM speed control based on improved super-twisting sliding mode linear active disturbance rejection [J]. Electric Machines & Control Application, 2024, 51(9): 103-112.
- [24] 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.

- ZHONG 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.
- [25] 马飞越, 韩吉霞, 牛勃, 等. 基于区间二型模糊终端滑模控制的飞行器姿态控制[J]. 空间控制技术与应用, 2019, 45(5): 22-28.
- MA F Y, HAN J X, NIU B, et al. Interval type-2 fuzzy terminal sliding mode control for four-rotor attitude [J]. Aerospace Control and Application, 2019, 45(5): 22-28.
- [26] 伍冬睿, 曾志刚, 莫红, 等. 区间二型模糊集和模糊系统: 综述与展望[J]. 自动化学报, 2020, 46(8): 1539-1556.
- WU D R, ZENG Z G, MO H, et al. Interval type-2 fuzzy sets and systems: Overview and outlook [J]. Acta Automatica Sinica, 2020, 46(8): 1539-1556.
- [27] WU D R, NIE M W. Comparison and practical implementation of type-reduction algorithms for type-2 fuzzy sets and systems [C]//IEEE International Conference on Fuzzy Systems, Taipei, 2011.
- [28] WU D R. Approaches for reducing the computational cost of interval type-2 fuzzy logic systems: Overview and comparisons [J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 2013, 21(1): 80-99.
- [29] 张碧陶, 皮佑国. 永磁同步电机伺服系统模糊分数阶滑模控制[J]. 控制与决策, 2012, 27(12): 1776-1780+1786.
- ZHANG B T, PI Y G. Fractional order fuzzy sliding mode control for permanent magnet synchronous motor servo drive [J]. Control and Decision, 2012, 27(12): 1776-1780+1786.

收稿日期:2024-10-10

收到修改稿日期:2024-11-07

作者简介:

刘晓杰(2000-),女,硕士研究生,研究方向为电机及其控制,18242463490@163.com;

* 通信作者:刘晓杰(2000-),女,硕士研究生,研究方向为电机及其控制,18242463490@163.com。