

六相混合励磁磁通切换直线电动机磁悬浮 系统变指数滑模控制

潘 琪*, 蓝益鹏

(沈阳工业大学 电气工程学院, 辽宁 沈阳 110870)

Variable Exponential Sliding Mode Control for Six-phase Hybrid Excitation Flux Switching Linear Motor Maglev System

Pan Qi*, Lan Yipeng

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

Abstract: [Objective] The maglev system of the six-phase hybrid excitation flux switching linear motor (SHEFSLM) is nonlinear, strongly coupled and parameter-varying. Although the modular structure adopted by the SHEFSLM can effectively mitigate the magnetic circuit imbalance, external disturbances together with the inherent end effects of linear motors still bring severe challenges to the control of maglev system. To tackle these control performance problems, a variable exponential sliding mode control (VESMC) strategy is proposed for SHEFSLM maglev system. [Methods] Firstly, the electromagnetic thrust equation, levitation force equation and system state equation were derived based on the flux linkage equation, voltage equation and mechanical motion equation of the SHEFSLM maglev system. Secondly, a sliding mode surface was constructed, and a novel variable exponential reaching law was proposed. This reaching law was capable of adaptively adjusting the convergence rate, which enabled rapid convergence when the operating point was far away from the sliding surface and smooth convergence in the vicinity of the sliding surface. Hence, superior system stability was guaranteed and chattering was effectively suppressed. Subsequently, the stability of the closed-loop system was verified via the Lyapunov function, and the convergence time was determined by the controller parameters. Finally, simulation comparisons among the proposed VESMC, sliding mode control (SMC) and proportional-integral (PI) control were carried out. [Results] Simulation results indicated that compared with SMC and PI control, the VESMC proposed in this paper reduced the settling time of no-load startup by 68% and 73.3%, respectively. Under sudden step disturbances, the recovery time was shortened by 68% and 85.5%,

respectively. In suppressing end effects, VESMC exhibited better performance than the other two control strategies.

[Conclusion] In the presence of disturbances, VESMC exhibits stronger robustness, effectively attenuates the chattering inherent in sliding mode control, and improves the stability and dynamic performance of the system. It offers the advantages of small steady-state error, short settling time, and short recovery time, thereby effectively enhancing the control performance of the maglev system and meeting the control requirements.

Key words: hybrid excitation; flux switching; maglev system; variable exponential sliding mode control

摘 要: 【目的】六相混合励磁磁通切换直线电动机 (SHEFSLM) 悬浮系统具有非线性、强耦合与参数时变特性。虽然 SHEFSLM 应用模块化结构, 能够有效改善磁路不平衡问题, 但外部扰动与直线电机固有的端部效应, 仍给悬浮系统控制带来严峻挑战。为此, 本文针对 SHEFSLM 悬浮系统提出一种变指数滑模控制 (VESMC) 策略。【方法】首先, 基于 SHEFSLM 悬浮系统的磁链方程、电压方程与运动方程, 推导得到电磁推力方程、悬浮力方程与系统状态方程。其次, 构造滑模面并设计一种新型变指数趋近律。该趋近律能够自适应调节收敛速度, 使系统状态远离滑模面时快速收敛、靠近滑模面时平稳趋近, 提升系统稳定性并有效抑制抖振。随后, 采用李雅普诺夫函数证明闭环系统稳定性, 系统收敛时间由控制器参数决定。最后, 通过仿真对所提 VESMC、滑模控制 (SMC) 和比例积分 (PI) 控制进行对比分析。【结果】仿真结果表明, 相较于 SMC 与 PI 控制, 本文所提 VESMC 的空载启动调节时间分别缩短 68% 和 73.3%; 突加阶跃扰动时, 系统恢复时间分别缩短 68% 和 85.5%; 在抑制端部效应方面, VESMC 的控制性能优于另外两种控制策略。【结

论】在面对扰动时, VESMC 表现出更强的鲁棒性, 有效削弱了 SMC 固有的抖振现象, 提升了系统稳定性和动态性能, 具有稳态误差小, 调节时间和恢复时间短的优点, 可有效提高磁悬浮系统的控制性能, 并满足系统控制需求。

关键词: 混合励磁; 磁通切换; 磁悬浮系统; 变指数滑模控制

0 引言

轨道交通领域常用旋转电机、直线电机作为牵引系统核心部件。E. Hoang 团队提出新型混合励磁磁通切换电机^[1], 在定子轭部槽位布设直流励磁绕组以调节气隙磁场, 而定子轭部开槽会引发永磁磁通短路问题。

相比旋转电机, 直线电机不仅简化了驱动系统的结构组成, 还能将电能直接转换为机械能, 具有高效率、快速响应、高精度、低维护成本和高功率密度等优点, 是磁悬浮驱动车辆的核心装备^[2]。并且直线电机扁平的结构, 能够降低车辆地板高度, 减少截面面积, 降低工程造价^[3]。

永磁直线磁通切换电机由磁通切换永磁电机沿径向剖分延展演变得到。该结构容易造成电机运行效率下降, 还会加剧振动与噪声。文献[4]将模块化结构应用于六相混合励磁磁通切换直线电动机(Six-phase Hybrid Excitation Flux Switching Linear Motor, SHEFSLM)应用, 模块之间用隔磁材料连接, 改善了磁路不平衡的现象, 但端部效应和其他不确定扰动对系统性能造成一定影响, 使得系统控制变得更加复杂。

滑模控制(Sliding Mode Control, SMC)具有结构简单、抗干扰能力强且对参数变化不敏感^[5]的优点, 但存在不可避免的系统抖振和超调问题^[6]。研究者们通过对传统趋近律进行优化, 构建新型趋近律滑模控制器, 提高系统响应速度, 抑制超调和抖振^[7]。

文献[8]提出一种基于系统状态变量的指数趋近律, 并通过模糊规则动态调节趋近参数。文献[9]提出一种新型趋近律, 通过引入比例项、单重积分项和二重积分项构成三阶滑动动态, 避免了符号函数的使用, 从而在机理上消除抖振现象。文献[10]设计一种以双曲正切函数替换符号函数的新型趋近律, 并结合模糊规则对趋近律参数

进行在线整定, 以实现控制系统在降低抖振、减小超调与提高响应速度方面的性能优化。文献[11]提出一种结合积分快速终端滑模面与系统状态变量的新型趋近律, 并采用连续切换函数替代传统符号函数。文献[12]提出一种在传统指数趋近律中引入系统状态变量的一阶范数平方项的新型趋近律, 通过动态调节趋近速度, 降低了超调量并缩短了系统达到稳态的时间。

文献[13]提出一种改进型 SMC 策略, 其核心在于引入变指数趋近律, 该策略在保留 SMC 固有的快速响应特性的同时, 通过动态调整趋近参数, 有效缓解了传统 SMC 中的抖振现象。文献[14]提出一种通过在传统指数项中引入系统状态变量的一阶范数的改进指数趋近律, 旨在缩短系统趋近时间并有效减弱稳态时刻的抖振。文献[15]通过在传统指数趋近律的等速趋近项和指数趋近项中分别引入系统状态变量与滑模面, 设计了一种快速收敛且有效抑制抖振的新型滑模趋近律, 并结合模糊控制实现了该趋近律参数的在线整定。

文献[16]提出一种改进的变速双幂次趋近律, 有效解决了表贴式永磁同步电机 SMC 中趋近速度与抑制抖振相矛盾的问题。文献[17]提出一种双幂次趋近律滑模变结构控制策略, 在趋近滑模面的不同阶段动态调整增益。文献[18]提出一种新型自适应趋近律, 使滑模面以最小的速率逼近原点, 从而有效降低抖振。

尽管现有文献针对系统超调与抖振问题提出了诸多优化策略, 但部分文献的控制方案在电机运行过程缺乏足够的自适应能力。受文献[10, 13-14]的启发, 本文使用连续光滑的双曲正切函数替代传统符号函数, 使得系统在滑模面附近的控制作用由硬切换变为了软过渡, 从而在根源上抑制高频抖振。与上述文献不同的是, 本文所提的变指数滑模控制(Variable Exponential SMC, VESMC), 在趋近律中引入随滑模面实时变化的变指数项, 使得控制器能够自适应调整收敛速度, 当系统状态距离平衡点较远时, 变指数项促使系统以极快的速度收敛; 当逼近平衡点时, 指数项的动态变化又能确保收敛过程更加平稳, 避免越过平衡点产生超调, 有效解决了传统指数趋近律在远离滑模面时趋近速度受限的问题。所提控制策略在强化系统抗扰鲁棒性的同时, 有效缩短了动

态响应时间。

1 SHEFSLM 的结构及运行机理

SHEFSLM 的结构如图 1 所示。图中, F_y 为初级受到次级竖直向上的吸引力; G_m 为初级受到自身以及负重的重力。初级铁心采用模块化设计, 每一相由 4 个 U 型铁心耦合而成。每两个 U 型铁心与永磁体构成一个模块, 每个模块上缠绕着一个电枢绕组线圈、两个励磁绕组线圈。SHEFSLM 将所有绕组和永磁体集中在短动子上^[19], 长定子仅由纯铁心构成, 大幅降低制造成本。混合励磁结构实

现了气隙磁场和悬浮力的高效调节, 配合六相模块化设计, 保证了列车运行的平稳低噪。

电机采用长定子上置固定、动子下置的结构, 以永磁体与直流励磁绕组作为串联式双励磁源。由于直流励磁磁场可动态调节, 结合恒定的永磁磁场, 使得电机气隙合成磁场具备可调特性。电机通过位置传感器实时检测动、定子齿间的气隙高度, 并将反馈信号传输至控制器。控制器通过计算输出指令, 功率放大器调节直流励磁绕组中的电流幅值, 实现对合成磁场的实时补偿, 从而维持动子及负载在平衡位置的稳定悬浮。

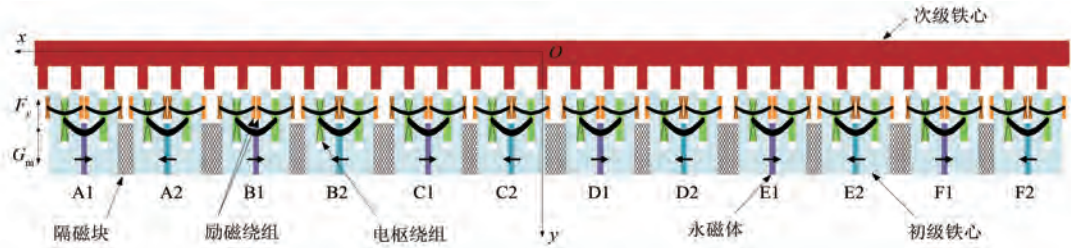


图 1 SHEFSLM 结构图

Fig. 1 SHEFSLM structure diagram

2 SHEFSLM 磁悬浮系统数学模型

在构建数学模型时, 对 SHEFSLM 作如下假设: (1) 忽略电机铁心的磁滞损耗、涡流损耗以及饱和效应^[20]; (2) 忽略气隙磁场的高次谐波分量, 仅考虑基波磁场对系统特性的影响; (3) 电机的频率对电感参数无影响。

在 dq 坐标系下, SHEFSLM 磁链方程为^[21]

$$\begin{cases} \psi_d = L_d i_d + M_F i_F + \psi_{PM} \\ \psi_q = L_q i_q \\ \psi_F = L_F i_F + M_F i_d + \psi_{PM} \end{cases} \quad (1)$$

式中: ψ_F 、 ψ_{PM} 分别为励磁磁链、永磁磁链的幅值; L_d 、 L_q 和 i_d 、 i_q 分别为电枢绕组 d 、 q 轴自感和电流; L_F 、 i_F 分别为励磁绕组的自感、电流; M_F 为单相电枢绕组与励磁绕组之间的互感。

在 dq 坐标系下, SHEFSLM 电压方程为^[22]

$$\begin{cases} u_d = \frac{d\psi_d}{dt} + R i_d - \frac{\pi v}{\tau} \psi_q \\ u_q = \frac{d\psi_q}{dt} + R i_q + \frac{\pi v}{\tau} \psi_d \\ u_F = \frac{d\psi_F}{dt} + R_F i_F \end{cases} \quad (2)$$

式中: u_d 、 u_q 分别为电枢绕组 d 、 q 轴电压; u_F 为励磁电压; R 、 R_F 分别为电枢绕组、励磁绕组的电阻; v 为电机运行速度; τ 为动子极距。

忽略电枢绕组与励磁绕组的铜耗, 联立磁链方程与电压方程, 得到 SHEFSLM 电磁推力表达式为

$$F_x = \frac{3\pi}{\tau} (\psi_d i_q - \psi_q i_d) = \frac{3\pi}{\tau} [i_q \psi_{PM} + i_d i_q (L_d - L_q) + i_q M_F i_F] = F_{PM} + F_R + F_F \quad (3)$$

式中: F_{PM} 、 F_R 和 F_F 分别为永磁励磁推力、磁阻推力和电枢绕组励磁推力。

SHEFSLM 磁悬浮力表达式为^[23-25]

$$F_y = 3 \left[\left(i_d + i_F + \frac{\psi_{PM}}{M_F} \right) \frac{\partial \psi_d}{\partial \delta} + i_q \frac{\partial \psi_q}{\partial \delta} \right] \quad (4)$$

式中: δ 为气隙长度; $\frac{\partial \psi_d}{\partial \delta}$ 、 $\frac{\partial \psi_q}{\partial \delta}$ 分别为 d 、 q 轴磁链随 δ 的变化率。

针对 SHEFSLM 的控制需求, 本文采用 $i_d = 0$ 矢量控制。此时, 电机只有 q 轴电枢反应, 避免了 d 轴去磁效应对系统性能的影响。该策略在保证控制系统鲁棒性的同时降低了算法复杂度。因此

式(4)变形为

$$F_y = 3 \left[\left(i_F + \frac{\psi_{PM}}{M_F} \right) \frac{\partial \psi_d}{\partial \delta} + i_q \frac{\partial \psi_q}{\partial \delta} \right] \quad (5)$$

结合磁链方程式(1),式(5)变形为

$$F_y = 3 \left[\left(i_F + \frac{\psi_{PM}}{M_F} \right) \left(i_F \frac{\partial M_F}{\partial \delta} + \frac{\partial \psi_{PM}}{\partial \delta} \right) + i_q^2 \frac{\partial L_q}{\partial \delta} \right] \quad (6)$$

理想情况下, M_F 、 ψ_{PM} 和 L_q 均与 δ 成反比,因此式(6)可简化为^[23]

$$F_y = 3 \left[\frac{(M_F i_F + \psi_{PM})^2}{M_F \delta} + i_q^2 \frac{L_q}{\delta} \right] \quad (7)$$

式中: $i_q^2 \frac{L_q}{\delta}$ 为电枢电流的吸引力,将其作为扰动项处理^[26],该项为水平对垂直方向的内部耦合扰动。

悬浮方向运动方程为^[27]

$$m \frac{d^2 \delta}{dt^2} = F_y - mg - f_y \quad (8)$$

式中: f_y 为端部效应、负载引起的在垂直方向上的扰动分量和其他不确定性扰动; m 为运动平台质量; g 为重力加速度。

当电枢电流一定时,励磁电流主要影响 SHEFSLM 的悬浮力。式(7)可改写为

$$F_y = \frac{3(M_F i_F + \psi_{PM})^2}{M_F \delta} \quad (9)$$

垂直方向总扰动为

$$f = f_y - 3i_q^2 \frac{L_q}{\delta} \quad (10)$$

令 $x_1 = e$ 、 $x_2 = \dot{e}$, 得到 SHEFSLM 磁悬浮系统的状态方程为

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = \frac{1}{m} F_y - g - \frac{1}{m} f \end{cases} \quad (11)$$

3 变指数滑模控制器设计

3.1 滑模面设计

设 δ^* 为磁悬浮气隙高度参考值,则磁悬浮气隙高度的误差定义为

$$e = \delta - \delta^* \quad (12)$$

在 SHEFSLM 磁悬浮系统中,初始磁悬浮气隙高度 $\delta_0 = 0.005$ m, $\delta^* = 0.003$ m。

设计滑模控制器的切换函数为

$$s = ce + \dot{e} \quad (13)$$

式中: c 为正常数。

3.2 趋近律设计

设计的趋近律为

$$\dot{s} = -K_1 |s|^{\alpha(s)} \tanh(\beta s) - K_2 s - K_3 \int_0^t s dt \quad (14)$$

式中: $\alpha(s) = \alpha_{\max} - (\alpha_{\max} - \alpha_{\min}) \tanh(c_1 |s|)$; K_1 、 K_2 和 K_3 为正常数; $\beta > 0$ 。

$\alpha(s)$ 随 $|s|$ 实时变化。当 $|s|$ 很大时,双曲正切函数趋近于 1; 当 $|s|$ 很小时,双曲正切函数趋近于 0^[28],趋近更平滑。本文采用双曲正切函数替代符号函数^[29],使得在滑模面附近的控制变得连续,明显抑制高频抖振^[30]。

3.3 滑模控制器设计

对式(13)求导,可得滑模面的一阶导数表达式为

$$\dot{s} = c\dot{e} + \ddot{e} \quad (15)$$

将 $\dot{e} = \frac{1}{m}(F_y - mg - f)$ 代入式(15)得:

$$\dot{s} = c\dot{e} + \frac{1}{m}(F_y - mg - f) \quad (16)$$

令式(16)等于趋近律:

$$c\dot{e} + \frac{1}{m}(F_y - mg - f) = -K_1 |s|^{\alpha(s)} \tanh(\beta s) - K_2 s - K_3 \int_0^t s dt \quad (17)$$

根据式(8)、(9)、(13)以及式(14)推导出变指数滑模控制律 i_F^* 的表达式为

$$i_F^* = \frac{1}{M_F} \left\{ \left\{ \frac{1}{3} M_F \delta \left\{ m \left[g - c\dot{e} - K_1 |s|^{\alpha(s)} \tanh(\beta s) - K_2 s - K_3 \int_0^t s dt \right] \right\}^{\frac{1}{2}} - \psi_{PM} \right\} \right\} \quad (18)$$

基于李雅普诺夫稳定性理论,分析系统稳定性,构建正定标量函数 $V = \frac{1}{2} s^2 + \frac{1}{2} K_3 \left(\int_0^t s dt \right)^2$, 对其求导得:

$$\begin{aligned} \dot{V} &= s\dot{s} + K_3 s \int_0^t s dt = \\ &= sK_1 |s|^{\alpha(s)} \tanh(\beta s) - K_2 s^2 - \\ &= K_3 s \int_0^t s dt + K_3 s \int_0^t s dt = \end{aligned}$$

$$-K_1|s|^{\alpha(s)}\tanh(\beta s)-K_2s^2 \tag{19}$$

因此只要保证 $K_1 > 0$ 且 $K_2 > 0$, 就能满足 $\dot{V} \leq 0$ 。当系统状态未到达滑模面, 即 $s \neq 0$ 时, $\dot{V} < 0$ 严格成立。当且仅当系统状态位于滑模面上, 即 $s = 0$ 时, $\dot{V} = 0$ 。综上所述, 该变指数滑模控制器满足李雅普诺夫稳定性判据, 能够确保闭环系统的稳定性。

4 仿真分析

SHEFSLM VESMC 系统的结构框图如图 2 所示。系统采用双闭环控制, 外环的变指数滑模控制器根据目标气隙高度与实际气隙高度的误差, 计算出参考励磁电流; 内环的 PI 控制器将参考励磁电流与实际励磁电流的误差转换为电压指令, 经过脉宽调制 (Pulse Width Modulation, PWM) 后生成驱动信号送给智能功率模块 (Intelligent Power Module, IPM), 由 IPM 调节励磁绕组两端的平均电压, 从而改变励磁电流的大小, 进而调节磁悬浮力以驱动动子运动, 使实际气隙高度不断逼近目标值。

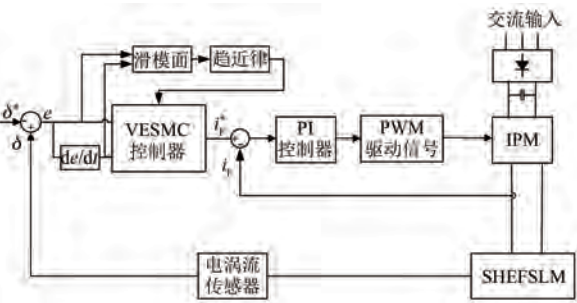


图 2 SHEFSLM VESMC 系统结构框图

Fig. 2 Structural block diagram of VESMC system for SHEFSLM

变指数滑模控制器参数设置如下: $c = 120$, $\alpha_{\max} = 3$, $\alpha_{\min} = 1$, $c_1 = 8$, $K_1 = 50$, $K_2 = 500$, $K_3 = 50\,000$, $\beta = 100$ 。

滑模面系数 c 需要在快速响应与平稳性之间进行整定, $\alpha_{\max}$ 和 $\alpha_{\min}$ 实现自适应收敛, 其过渡速率由系数 c_1 调节, 趋近律中的 K_1 主导大误差时的趋近速度, K_2 提供滑模面附近的阻尼以抑制抖振, 积分增益 K_3 用于消除扰动引起的稳态误差。按照先稳定后快速再精细补偿的控制参数整定原则, 确保控制器在快速响应、抖振抑制与抗扰动鲁棒性之间的良好协调。SHEFSLM 参数如表 1 所示。

表 1 SHEFSLM 参数

Tab. 1 Parameters of SHEFSLM

参数名称	参数值
相数	6
δ_0/mm	5
δ^*/mm	3
每相直流励磁绕组匝数 N_{dc}	480
每相电枢绕组匝数 N_{coil}	256
永磁体尺寸/ $\text{mm} \times \text{mm} \times \text{mm}$	$40 \times 8 \times 120$
R_{F}/Ω	2.5
R/Ω	1
L_{d}/H	0.012
L_{q}/H	0.013 5
M_{F}/H	0.012
$\psi_{\text{PM}}/\text{Wb}$	0.22

基于 Simulink 仿真平台, 将所提 VESMC 策略与 PI 控制及 SMC 策略进行对比分析。

4.1 起动力性能分析

空载启动时磁悬浮气隙高度响应曲线如图 3 所示。

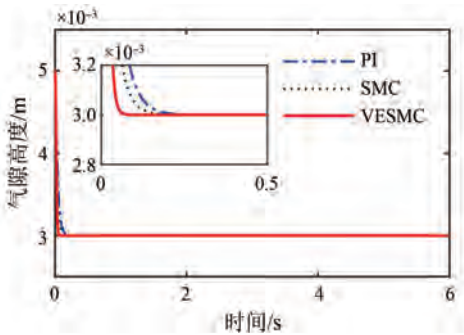


图 3 空载启动时磁悬浮气隙高度响应曲线

Fig. 3 Response curves of maglev air-gap height during no-load start up

由图 3 可知, 三种控制策略下, 系统均无超调。系统采用 PI 控制, 约 0.3 s 达到给定的悬浮高度; 采用 SMC, 约 0.25 s 达到给定的悬浮高度; 采用 VESMC 的系统响应最快, 约 0.08 s 达到给定的悬浮高度, 调节时间较 SMC 和 PI 控制分别缩短了 68% 和 73.3%。

4.2 抗干扰性能分析

在 2 s 时对系统施加 10 N 的阶跃扰动, 并在 3 s 取消该扰动。相应的磁悬浮气隙高度响应曲线和励磁电流响应曲线分别如图 4 和图 5 所示。

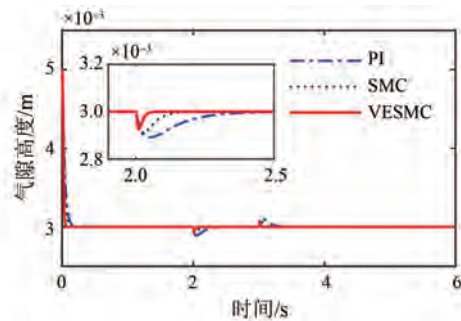


图 4 突加阶跃扰动时磁悬浮气隙高度响应曲线

Fig. 4 Response curves of maglev air-gap height under sudden step disturbance

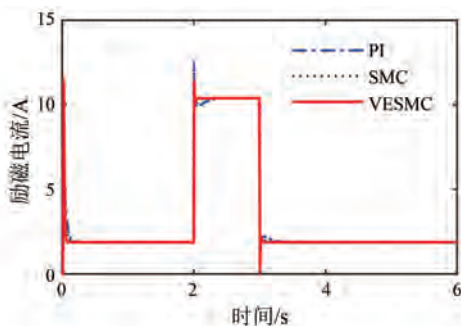


图 5 突加阶跃扰动时励磁电流响应曲线

Fig. 5 Excitation current response curves under sudden step disturbance

由图 4 和图 5 可知,PI 控制下,气隙高度出现了明显的动态降落,相对误差达 3.6%,系统恢复稳态所需时间较长,为 0.55 s;相比于 PI 控制,SMC 在抑制扰动方面有所改善,动态降落相对误差为 3.1%,恢复时间为 0.25 s;本文所提 VESMC 策略表现最优,气隙高度的动态降落显著减小,相对误差为 2.4%,且系统在 0.08 s 内即可恢复至稳态值,恢复速度较 SMC 和 PI 控制分别提升了 68% 和 85.5%,动态降落分别降低了 20.9% 和 32.1%。

4.3 对端部效应的抑制性能分析

在 1 s 时对系统施加正弦扰动,相应的磁悬浮气隙高度响应曲线和励磁电流响应曲线分别如图 6 和图 7 所示。

由图 6 可知,在 PI 控制、SMC 和 VESMC 策略下,系统的动态降落分别为 8×10^{-6} m、 2.5×10^{-6} m 和 6.7×10^{-7} m。可见,本文所提 VESMC 策略的表现优于 PI 控制、SMC。

5 结语

本文设计了一种 VESMC 策略,通过构造切

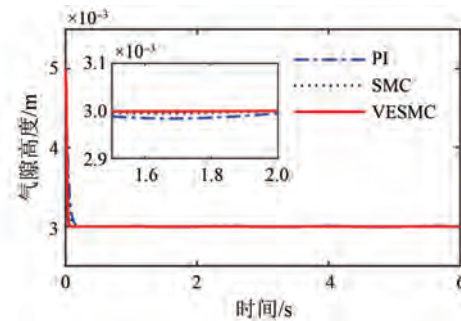


图 6 突加正弦扰动时磁悬浮气隙高度响应曲线

Fig. 6 Response curves of maglev air-gap height under sudden sinusoidal disturbance

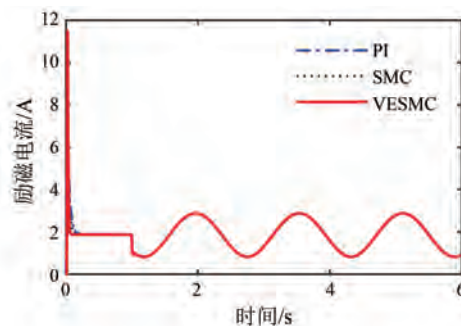


图 7 突加正弦扰动时励磁电流响应曲线

Fig. 7 Excitation current response curves under sudden sinusoidal disturbance

换函数和趋近律,设计了一种变指数滑模控制器,以实现磁悬浮系统悬浮气隙高度的精确控制。相较于 SMC,所提 VESMC 能够在远场时快速收敛,近场时收敛更加平稳,显著提高了系统的抗干扰特性与稳态控制效果。基于李雅普诺夫稳定性理论,对所设计的变指数滑模控制器进行了稳定性证明。

通过仿真将所提 VESMC 与 PI 控制及 SMC 进行对比。结果表明:在空载起动工况下,VESMC 的调节时间较 SMC 和 PI 控制分别缩短了 68% 和 73.3%。在突加阶跃负载扰动时,VESMC 的动态降落较 SMC 和 PI 控制分别降低了 20.9% 和 32.1%,恢复时间分别缩短了 68% 和 85.5%。在抑制端部效应方面,VESMC 的表现也更优。相较于 PI 控制和 SMC,VESMC 在维持高精度稳定悬浮的同时,有效抑制了控制增益切换带来的高频抖振。

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

潘琪进行了方案设计、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。

Pan Qi conducted the scheme design, content summarization, and manuscript writing. Lan Yipeng provided methodological and theoretical guidance, as well as manuscript review and revision. All authors have read and approved the final version of the paper for submission.

参考文献

- [1] Hoang E, Lecrivain M, Gabsi M. A new structure of a switching flux synchronous polyphased machine with hybrid excitation [C] // 2007 European Conference on Power Electronics and Applications, Aalborg Denmark, 2007: 1-8.
- [2] 孙建国, 武帅, 赵阳. 永磁同步直线电机驱动控制技术研究[J]. 南方农机, 2022, 53(11): 127-130.
Sun J G, Wu S, Zhao Y. Research on drive and control technology of permanent magnet synchronous linear motor [J]. NANFANG NONGJI, 2022, 53(11): 127-130.
- [3] 何云凤, 卢琴芬, 翁萍. 直线电机在国内轨道交通中的应用研究[J]. 电力机车与城轨车辆, 2025, 48(2): 1-6+12.
He Y F, Lu Q F, Weng P. Application research of linear motors in China's rail transit [J]. Electric Locomotives & Mass Transit Vehicles, 2025, 48(2): 1-6+12.
- [4] 孙博韬. 轨道交通用磁通切换直线磁悬浮电动机的研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2022.
Sun B T. Research on magnetic flux switching linear magnetic levitation motor for rail transit [D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2022.
- [5] 李耀华, 王自臣, 何雨颢, 等. 基于超螺旋滑模控制的永磁同步电机磁场定向控制研究[J]. 电机与控制应用, 2025, 52(5): 527-539.
Li Y H, Wang Z C, He Y X, et al. Field-oriented control of permanent magnet synchronous motor based on super-twisting sliding mode control [J]. Electric Machines & Control Application, 2025, 52(5): 527-539.
- [6] 陈德海, 曹永康, 阳攀. 基于变指数趋近律的永磁同步电机滑模控制[J]. 电机与控制应用, 2022, 49(2): 8-13.
Chen D H, Cao Y K, Yang P. Sliding mode control of permanent magnet synchronous motor based on variable exponential reaching law [J]. Electric Machines & Control Application, 2022, 49(2): 8-13.
- [7] 王鹏康, 李鑫帅, 梁庭福, 等. 基于新型趋近律和超螺旋算法的PMSM滑模控制[J]. 兵器装备工程学报, 2025, 46(2): 204-210.
Wang P K, Li X S, Liang T F, et al. PMSM synovial membrane control based on new reaching law and superhelical algorithm [J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2025, 46(2): 204-210.
- [8] 陶军, 万威, 王峰. PMSM调速系统模糊滑模变结构控制[J]. 机械设计与制造, 2026, 3: 156-161.
Tao J, Wan W, Wang F. Fuzzy sliding mode variable structure control of PMSM speed control system [J]. Machinery Design & Manufacture, 2026, 3: 156-161.
- [9] Nguyen D Q, Trinh T X, Giap N V. A novel chattering free reaching law of sliding mode control and disturbance observer for an axial gap bearingless motor [J/OL]. International Journal of Automotive Technology, 2026-05-25. <https://doi.org/10.1007/s12239-026-00487-x>.
- [10] 洪丹丹, 祝勇俊, 吴宏杰, 等. 基于模糊滑模控制的无刷直流电机矢量控制[J]. 现代电子技术, 2026, 49(6): 49-55.
Hong D D, Zhu Y J, Wu H J, et al. Brushless DC motor vector control based on fuzzy sliding mode control [J]. Modern Electronics Technique, 2026, 49(6): 49-55.
- [11] 雍哲, 蒋科军, 陈章磊, 等. 永磁同步电机趋近律滑模控制研究[J]. 微电机, 2025, 58(3): 51-56.
Yong Z, Jiang K J, Chen Z L, et al. Research on approach law sliding mode control of PMSM [J]. Micromotors, 2025, 58(3): 51-56.
- [12] 侯帅, 李昕涛. 三相PMSM改进趋近律滑模控制器设计[J]. 电子测试, 2022, 36(20): 54-56.
Hou S, Li X T. Design of three-phase PMSM improved reaching law sliding mode controller [J]. Electronic Test, 2022, 36(20): 54-56.

- [13] 张延庆, 尹忠刚, 白聪. 基于变指数趋近律滑模控制的 IM 模型预测控制[J]. 电力电子技术, 2022, 56(8): 50-52+56.
Zhang Y Q, Yin Z G, Bai C. Model predictive control of IM based on sliding mode control using variable exponential reaching law [J]. Power Electronics, 2022, 56(8): 50-52+56.
- [14] 王湘明, 王正. 永磁同步电机的改进指数趋近律控制策略[J]. 电机与控制应用, 2021, 48(6): 44-48.
Wang X M, Wang Z. Improved exponential reaching law control strategy of permanent magnet synchronous motor [J]. Electric Machines & Control Application, 2021, 48(6): 44-48.
- [15] 周兆钟, 尹明德, 王南越, 等. 基于模糊控制在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.
- [16] 刘澎澎, 王仲根, 王珊珊, 等. 基于改进双幂次趋近律的 SPMSM 滑模控制[J]. 电机与控制应用, 2025, 52(2): 201-209.
Liu P P, Wang Z G, Wang S S, et al. Sliding mode control of SPMSM using improved double-power reaching law [J]. Electric Machines & Control Application, 2025, 52(2): 201-209.
- [17] 朱跃莉, 刘夜雨, 朱跃玲, 等. 三相 PMSM 群智能优化滑模稳速控制研究[J]. 电机与控制应用, 2025, 52(10): 1115-1124.
Zhu Y L, Liu Y Y, Zhu Y L, et al. Swarm intelligence-optimized sliding mode speed control for three-phase PMSM [J]. Electric Machines & Control Application, 2025, 52(10): 1115-1124.
- [18] Yan J, Geng H, Miao J, et al. A finite-time fault-tolerant control strategy for quadrotor using a novel reaching law [J]. Journal of Vibration and Control, 2026, 32(9-10): 2252-2266.
- [19] 马斌, 徐琼璟, 张若微, 等. 轨道交通用次级分段式磁通切换永磁直线电机控制研究[J]. 电机与控制应用, 2025, 52(8): 835-843.
Ma B, Xu Q J, Zhang R W, et al. Control study of secondary segmented flux-switching permanent magnet linear motors for railways [J]. Electric Machines & Control Application, 2025, 52(8): 835-843.
- [20] 苏芷玄, 杨杰, 彭月, 等. 单点混合磁悬浮系统的自抗扰控制仿真研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2022, 19(4): 864-873.
Su Z X, Yang J, Peng Y, et al. Simulating active disturbance-resistant control of single-point hybrid magnetic suspension system [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2022, 19(4): 864-873.
- [21] 刘鞠波, 蓝益鹏. 混合励磁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.
- [22] Lei C, Lan Y P, Xu Z L, et al. Fixed-time dual sliding mode control for linear synchronous motor maglev systems [J]. International Journal of Robust and Nonlinear Control, 2024, 34(6): 3781-3797.
- [23] 杨红兵. 混合励磁磁悬浮进给平台的设计与研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2014.
Yang H B. Design and research on hybrid excitation magnetic levitation feeding platform [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2014.
- [24] 翟莉莉. 六相独立永磁同步直线电机推力控制方法研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2021.
Zhai L L. Research on thrust control method of six phase permanent magnet linear synchronous motor with independent structure of each phase [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2021.
- [25] 刘君宇. 双边磁通切换永磁直线电机的优化设计[D]. 石家庄: 石家庄铁道大学, 2021.
Liu J Y. Optimal design of double linear flux switching permanent magnet motor [D]. Shijiazhuang: Shijiazhuang Tiedao University, 2021.
- [26] 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.
- [27] Lei C, Lan Y P, Xu Z L, et al. Dual sliding mode control of linear maglev synchronous motor based on

- novel extended state observer [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering, 2024, 238(7): 1171-1180.
- [28] 宋卓越, 马慧颖. 基于新型双曲正切趋近律的固定/有限时间姿态控制[J]. 北京理工大学学报, 2023, 43(4): 383-393.
- Song Z Y, Ma H Y. Fixed/finite-time attitude control based on a novel hyperbolic tangent reaching law [J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2023, 43(4): 383-393.
- [29] 徐善智, 张晓荣. Boost 变换器混合滑模控制策略研究[J]. 山西能源学院学报, 2024, 37(1): 96-98.
- Xu S Z, Zhang X R. Research on hybrid sliding mode control strategy for Boost converter [J]. Journal of Shanxi Institute of Energy, 2024, 37(1): 96-98.
- [30] Yao W H, Li W. Model-free sliding mode control for PMSM based on adaptive super-twisting reaching law [J]. Scientific Reports, 2026, 16: 19214.
-
- 收稿日期:2026-05-15
收到修改稿日期:2026-06-30
作者简介:
潘 琪(2002—),女,硕士研究生,研究方向为电机及其控制,panqi20240@163.com;
* 通信作者:潘 琪(2002—),女,硕士研究生,研究方向为电机及其控制,panqi20240@163.com。