

可控励磁直线同步电动机变增益 超螺旋滑模控制

赵思佳*, 蓝益鹏

(沈阳工业大学 电气工程学院, 辽宁 沈阳 110870)

Variable-Gain Super-Twisting Sliding Mode Control for a Controllable Excitation Linear Synchronous Motor

Zhao Sijia*, Lan Yipeng

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

Abstract: [Objective] To address the challenge that controllable excitation linear synchronous motor (CELSM) faces in simultaneously achieving high-precision trajectory tracking, strong disturbance rejection, and smooth control input under complex sudden load disturbances, an improved variable-gain super-twisting sliding mode control (IVG-STSMC) strategy is proposed. This strategy aims to enhance the system's dynamic response quality and suppress the high-frequency chattering inherent in conventional sliding mode control. [Methods] Firstly, a mathematical model of the CELSM in the d - q coordinate system was established. On this basis, a continuous Softsign function was employed to replace the traditional sign function, and a variable-gain adaptive adjustment mechanism based on state errors was introduced to construct the VG-STSMC controller. This step was taken to alleviate the conflict between chattering and convergence speed caused by the fixed gain and discontinuous switching of the sign function. Furthermore, a nonlinear disturbance observer (NDOB) without acceleration measurement was incorporated into the VG-STSMC to estimate the lumped disturbance online. Finally, a composite IVG-STSMC control framework was established through feedforward compensation.

[Results] Simulation results demonstrated that under the condition of sinusoidal reference trajectory tracking with an amplitude of 1 mm and a frequency of 0.5 Hz, IVG-STSMC outperformed both proportional integral control and conventional SMC overall in terms of tracking accuracy, speed smoothness, and current chattering suppression. Under the compound working condition where a 50 N step load was applied at $t = 1.0$ s and removed at $t = 2.5$ s, a 51.8% reduction in maximum tracking error was achieved by IVG-STSMC compared to VG-STSMC, and a 65.5% reduction in

peak error was recorded at the exact moment the disturbance was introduced. Furthermore, the smoothness of the speed and q -axis current responses during disturbance switching was further improved by IVG-STSMC. [Conclusion] The proposed strategy effectively coordinates trajectory tracking accuracy, disturbance rejection capability, and control input smoothness of the CELSM feed system under complex load disturbances, verifying the effectiveness of the synergistic mechanism between variable-gain higher-order sliding mode regulation and disturbance feedforward compensation.

Key words: controllable excitation linear synchronous motor; variable-gain super-twisting sliding mode control; nonlinear disturbance observer; feedforward compensation

摘 要: 【目的】针对可控励磁直线同步电动机(CELSM)在复杂突变负载扰动作用下难以同时兼顾高精度轨迹跟踪、强抗扰能力与控制输入平滑性的问题,提出一种改进型变增益超螺旋滑模控制(IVG-STSMC)策略,以提升系统动态响应品质并抑制滑模控制中的高频抖振。【方法】首先建立 CELSM 在 d - q 坐标系下的数学模型。在此基础上,采用连续 Softsign 函数替代传统符号函数,并引入基于状态误差的变增益自适应调节机制,构建变增益超螺旋滑模控制器(VG-STSMC),以缓解固定增益与符号函数不连续切换引起的抖振与收敛速度之间的矛盾。进一步地,在 VG-STSMC 基础上引入无需加速度测量的非线性干扰观测器(NDOB),对系统集总扰动进行在线估计,并通过前馈补偿构建 IVG-STSMC 复合控制框架。【结果】仿真结果表明,在幅值为 1 mm、频率为 0.5 Hz 的正弦参考轨迹跟踪条件下,IVG-STSMC 在跟踪精度、速度平滑性及电流抖振抑制方面整体优于比例积分控制和传统 SMC。在 $t=1.0$ s 施加 50 N 阶跃负载、 $t=2.5$ s 切除负载的复合工况下,相较 VG-STSMC,IVG-STSMC 的最大跟踪误

差降幅 51.8%; 在扰动切入瞬间, 误差峰值降幅为 65.5%。同时, IVG-STSMC 进一步改善了扰动切换时刻速度与 q 轴电流响应的平滑性。【结论】所提 IVG-STSMC 策略能够有效协调 CELSM 进给系统在复杂负载扰动条件下的轨迹跟踪精度、抗扰性能与控制输入平滑性, 验证了变增益高阶滑模调节与扰动前馈补偿协同机制的有效性。

关键词: 可控励磁直线同步电动机; 变增益超螺旋滑模控制; 非线性干扰观测器; 前馈补偿

0 引言

随着科技和工业技术的不断进步, 数控机床向高速、高效、高精度和高可靠性方向发展^[1-2], 对加工平台运行的稳定性和定位精度提出了更高要求。传统的数控机床进给平台是通过旋转电机和中间的传动装置来实现直线进给, 但是这种驱动方式会增加进给平台和静止导轨之间的摩擦, 从而影响进给平台的高速性和高精度^[3-4]。可控励磁直线同步电动机 (Controllable Excitation Linear Synchronous Motor, CELSM) 控制系统采用直接驱动原理, 水平方向产生电磁推力实现进给运动, 垂直方向产生磁悬浮力使进给平台稳定悬浮, 从根本上解决了传统机床进给平台的摩擦问题。由于其特殊的磁悬浮与推进结构, 在实际运行中面临更为复杂的非线性扰动^[5]。负载突变及未建模动态等因素交织在一起, 使系统在追求高精度轨迹跟踪时易产生控制输入抖振和跟踪误差振动, 严重制约进给平台在突变负载等极端工况下的动态刚度与鲁棒性能^[6-8]。

为了解决高精度轨迹跟踪与控制输入平滑性之间的矛盾, 国内外对此开展了大量研究。文献[9]基于经典超螺旋滑模控制 (Super-Twisting Sliding Mode Control, STSMC) 实现了控制输入连续化, 有效削弱了一阶滑模中高频切换引起的转矩脉动与电流谐波问题; 文献[10]通过构造改进双幂次趋近律, 提高了系统在平衡点附近的平滑过渡性能; 文献[11]引入自适应非奇异终端滑模策略, 实现了未知扰动条件下的高精度跟踪与抖振抑制; 文献[12-14]设计了基于误差驱动的自适应增益与非线性增益更新机制, 在一定程度上化解了动态响应速度与稳态平滑控制之间的权衡难题; 文献[15]采用模糊逻辑实现超螺旋增益的在线动态调节, 进一步增强了系统的抗扰能力。

然而, 上述方法中的反馈调节机制, 本质上属于事后校正, 在突发负载作用下难以及时实现对扰动的主动抑制。因此, 引入扰动观测与前馈补偿成为重要研究方向。文献[16-17]通过非线性干扰观测器 (Nonlinear Disturbance Observer, NDOB) 实现死区电压及负载转矩的在线精确估计与前馈补偿, 显著提升了系统的抗扰性能与运行平滑性; 文献[18-19]将状态观测与自适应估计架构融合, 提升扰动提取精度的同时解决了传统滤波器的相位延迟问题; 文献[20-21]构建了基于干扰观测的鲁棒补偿框架, 在极端突变扰动条件下增强了系统的稳定性与恢复能力; 文献[22]引入具有“双向软饱和”特性的 Softsign 激活函数, 有效避免了大误差情况下系统发散的问题。

基于上述分析可知, 现有控制策略一方面偏重反馈鲁棒性, 而对控制输入抖振抑制关注不足; 另一方面虽引入主动补偿机制, 但与高阶滑模控制之间缺乏统一的协同设计, 难以在突变负载下解耦高精度跟踪、强鲁棒性与控制平滑性之间的矛盾。

针对上述问题, 本文提出一种改进型变增益超螺旋滑模控制 (Improved Variable-Gain STSMC, IVG-STSMC) 策略。首先, 设计了一种基于连续 Softsign 函数与状态误差自适应律的 VG-STSMC, 以协调收敛速度与抖振抑制之间的矛盾。第二, 在此基础上引入了无需加速度测量的 NDOB, 对集总扰动进行在线估计, 并通过前馈方式引入控制律。从控制机理上, 构建了以 VG-STSMC 为反馈调节核心、NDOB 为前馈补偿通道的“反馈—前馈”协同控制结构。仿真结果表明, 所提出的控制策略在轨迹跟踪精度、抗扰动瞬态响应及抖振抑制方面, 均展现出更优的综合性能。

1 CELSM 结构及运行机理

CELSM 磁悬浮进给平台由固定平台和运动平台组成, 如图 1 所示。定子、光栅尺及辅助导轨集成于下方基座, 构成固定侧; 动子与涡流传感器则安装于运动平台。工作时, 动定子互不接触, 由磁悬浮系统提供垂直悬浮力, 推进系统驱动水平运动。CELSM 在运行过程中易受到外部负载突变及未建模动态等扰动影响, 进而引起位置跟踪误差增大和控制输入波动, 因此有必要引入扰动

观测与前馈补偿机制以提升系统抗扰性能。

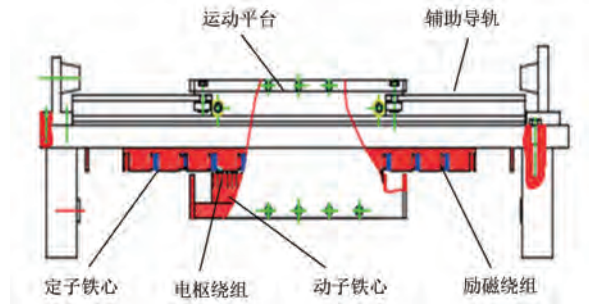


图1 CELSM 结构图

Fig. 1 CELSM structural diagram

2 CELSM 数学模型

相比一般的旋转电机,CELSM 的数学模型更为复杂。为了便于分析,简化模型,作如下假设^[23-24]:

- (1) 忽略电机铁心饱和,电机磁路为线性;
- (2) 忽略电机端部效应;
- (3) 不计电机铁心的涡流与磁滞损耗;
- (4) 电枢绕组中通入三相对称电流。

基于上述假设,推导出 CELSM 在 d - q 坐标系下的电压方程和磁链方程^[25]。

电压方程:

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

磁链方程:

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

式中: u_d 、 u_q 、 i_d 、 i_q 、 L_{md} 、 L_{mq} 和 ψ_d 、 ψ_q 分别为 d 、 q 轴的电压分量、电流分量、主电感和磁链分量; u_f 、 ψ_f 、 i_f 和 R_f 分别为励磁磁极的电压分量、磁链分量、电流分量和绕组电阻; L_σ 为电枢绕组的漏感; $L_{\sigma f}$ 为励磁绕组的漏感; R_s 为电枢绕组的电阻; τ 为电机极距; v 为直线同步电动机动子的线速度。

采用 $i_d = 0$ 转子磁场定向控制,可将水平方向的电磁推力^[26]简化为

$$F_x = \frac{3\pi}{2\tau} L_{md} i_f i_q = K_f i_q \quad (3)$$

水平方向的运动方程为

$$M \frac{d^2 x}{dt^2} = F_x - F_L \quad (4)$$

式中: M 为运动平台及负载的质量; x 为进给平台移动的距离; K_f 为电磁推力系数,取 46.633; F_L 为系统集总扰动项,可表示为

$$F_L = F_{ex} + \Delta m \quad (5)$$

式中: F_{ex} 为外部负载扰动力; Δm 为等效扰动项。

基于动力学关系,取状态变量 $[x_1 \ x_2]^T = [x \ v]^T$,控制输入为 $u = i_q$,则系统的状态方程为

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{K_f}{M} \end{bmatrix} i_q + \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{1}{M} \end{bmatrix} F_L \quad (6)$$

3 控制器设计

3.1 滑模面设计

设 x_d 为期望位置, x 为系统实际位置。定义位置跟踪误差与速度跟踪误差为

$$\begin{aligned} e_x &= x_d - x \\ e_v &= \dot{x}_d - \dot{x} \end{aligned} \quad (7)$$

为实现位置误差的快速收敛,构造线性滑模面^[27]函数为

$$s = ce_x + e_v \quad (8)$$

式中: $c > 0$ 为滑模系数。

当系统状态到达并保持在滑模面 $s = 0$ 时,误差动态方程为

$$\dot{e}_x + ce_x = 0 \quad (9)$$

从而保证位置误差 e_x 以指数形式渐近收敛至零。对滑模面函数求导,可得:

$$\dot{s} = c \cdot \dot{e}_x + \dot{e}_v = c \cdot (\dot{x}_d - \dot{x}) + \ddot{x}_d - \ddot{x} \quad (10)$$

式(6)结合式(7)、(8),可得滑模面动态表达式为

$$\dot{s} = c \cdot (\dot{x}_d - \dot{x}) + \ddot{x}_d - \frac{K_f}{M} i_q + \frac{1}{M} F_L \quad (11)$$

3.2 变增益自适应律设计

传统滑模控制通常采用固定增益^[28],在宽工况范围内难以兼顾系统的动态响应与稳态性能。为提升控制器在不同误差水平下的自适应能力,

本文设计一种基于系统跟踪误差的变增益自适应律, 如式 (12) 所示:

$$\begin{cases} k_1 = \mu_1(\lambda_1 |e_x| + \lambda_2 |e_v| + \delta) \\ k_2 = \mu_2(\lambda_1 |e_x| + \lambda_2 |e_v| + \delta) \\ k_3 = \mu_3(\lambda_1 |e_x| + \lambda_2 |e_v| + \delta)^2 \\ k_4 = \mu_4(\lambda_1 |e_x| + \lambda_2 |e_v| + \delta)^2 \end{cases} \quad (12)$$

式中: $\mu_1, \mu_2, \mu_3, \mu_4 > 0$ 为基础增益系数, 决定增益的基准水平; $\lambda_1, \lambda_2 > 0$ 为权重系数, 用于平衡速度误差和位置误差对增益调整的贡献度; δ 为正常数。

该增益律可使系统在误差较大时自动提高控制强度以加快收敛速度, 而在误差趋近零时降低增益, 从而有效抑制抖振现象。

3.3 基于快速超螺旋算法的控制律设计

为实现滑模面在有限时间收敛, 并降低控制输入的抖振, 采用快速 STSMC 结构作为鲁棒控制核心^[29]。在标准超螺旋算法基础上, 引入线性项与积分项, 并采用连续 Softsign 函数替代不连续符号函数^[30], 其趋近律设计为

$$\begin{aligned} \dot{s} = & -k_1 |s|^{1/2} \text{Softsign}(s) - k_2 s - \\ & \int_0^t \{k_3 \text{Softsign}[s(\tau)] + k_4 s(\tau)\} d\tau \end{aligned} \quad (13)$$

式中: $\text{Softsign}(s) = \frac{s}{\varepsilon + |s|}$; $\varepsilon > 0$ 为边界层厚度, 并满足 $\varepsilon \leq \|s\|$ 在边界层外渐近逼近符号函数。

在不考虑扰动前馈补偿的情况下, 结合式 (11)、(13), 可推导出基于 VG-STSMC 的基础控制律为

$$\begin{aligned} i_{q1}^* = & \frac{M}{K_f} \left\{ ce_v + \ddot{x}_d + k_1 |s|^{1/2} \text{Softsign}(s) + \right. \\ & \left. k_2 s + \int_0^t \{k_3 \text{Softsign}[s(\tau)] + k_4 s(\tau)\} d\tau \right\} \end{aligned} \quad (14)$$

该控制律在保证系统鲁棒稳定性的同时, 为后续引入扰动前馈补偿与复合控制结构奠定了基础。

3.4 NDOB 设计

为进一步提高系统在强扰动工况下的控制性能, 本文引入一种无需加速度测量的 NDOB, 对系统集总扰动进行在线估计并实现前馈补偿^[31]。

为便于扰动观测器设计, 根据式 (4) 所示动力学方程可得:

$$\dot{F}_L = K_f i_q - M \dot{v} \quad (15)$$

对于机械进给系统而言, 外部负载扰动及未建模动态相较电流环动态通常变化较慢, 因此可采用慢变扰动假设, 即 $\dot{F}_L \approx 0$ 。在此基础上, 引入辅助状态变量 ξ , 构造 NDOB 为

$$\begin{cases} \dot{\hat{F}}_L = \xi - L M v \\ \dot{\xi} = L (K_f i_q - \hat{F}_L) \end{cases} \quad (16)$$

式中: $L > 0$ 为观测器增益。

由此可得扰动估计误差动力学方程为

$$\dot{e}_d = -L e_d \quad (17)$$

式中: $e_d = F_L - \hat{F}_L$ 为观测器误差。

式 (17) 表明在选择合适的观测器增益条件下, 扰动估计误差能够指数收敛。该观测器仅依赖可测的速度信号和控制输入, 无需加速度测量, 具有良好的抗噪性能和工程可实现性。

将 NDOB 输出的扰动估计值 $\hat{F}_L$ 作为前馈补偿项引入 VG-STSMC 控制器, 总控制输入定义为

$$i_q^* = i_{q1}^* + i_{q2}^* \quad (18)$$

$$i_{q2}^* = \frac{1}{K_f} \hat{F}_L \quad (19)$$

结合 VG-STSMC 控制律, 得到最终的复合控制输入为

$$\begin{aligned} i_q^* = & \frac{M}{K_f} \left\{ ce_v + \ddot{x}_d + k_1 |s|^{1/2} \text{Softsign}(s) + k_2 s + \right. \\ & \left. \int_0^t \{k_3 \text{Softsign}[s(\tau)] + k_4 s(\tau)\} d\tau \right\} + \frac{1}{K_f} \hat{F}_L \end{aligned} \quad (20)$$

定义综合扰动为 $\bar{\Delta}(t) = \frac{F_L - \hat{F}_L}{M}$, 根据对 NDOB 的分析可知, 扰动估计误差有界, 即存在正常数 $\delta_{ed} > 0$ 使得 $|\bar{\Delta}(t)| \leq \delta_{ed}$ 。

为分析系统稳定性, 构造辅助状态变量:

$$z(t) = \int_0^t \{k_3 \text{Softsign}[s(\tau)] + k_4 s(\tau)\} d\tau \quad (21)$$

则 $\dot{z} = k_3 \text{Softsign}(s) + k_4 s$ 。将式 (20) 代入式 (11), 可得闭环误差动态系统:

$$\begin{cases} \dot{s} = -k_1 |s|^{1/2} \text{Softsign}(s) - k_2 s - z + \bar{\Delta}(t) \\ \dot{z} = k_3 \text{Softsign}(s) + k_4 s \end{cases} \quad (22)$$

选取含交叉项的 Lyapunov 候选函数:

依据 Lyapunov 稳定性约束(即: $\alpha_s>0,\alpha_z>0$),并结合系统响应速度、跟踪精度与控制平滑性需求,最终整定参数如表 2 所示。

表 2 控制系统参数

Tab. 2 Parameters of control system	
参数名称	参数值
PI 比例系数 k_p	34.3
PI 积分系数 k_i	2 145.9
SMC 切换增益 k_{smc}	34
滑模面参数 c	110
基础增益系数 $\mu_1\sim\mu_4$	102,187,96,63
误差权重系数 λ_1,λ_2	1.8,0.5
正常数 δ	1.8
Softsign 平滑系数 ε	0.000 1
NDOB 增益 L	120

(1)位置跟踪性能分析

由图 3 可知,四种控制策略均能够实现对参考正弦轨迹的跟踪,但在扰动切换时刻表现出明显差异。比例积分(Proportional-Integral,PI)控制在 $t=1\text{ s}$ 和 $t=2.5\text{ s}$ 附近出现了较大位置偏差和振荡;SMC 较 PI 控制有所改善,但仍存在一定动态偏离。相比之下,VG-STSMC 相较于 PI 控制和 SMC 明显减小了位置波动。在此基础上,IVG-STSMC 通过引入 NDOB 进行前馈补偿后,位置响应在扰动施加与切除阶段更加平滑,未出现明显超调与振荡。

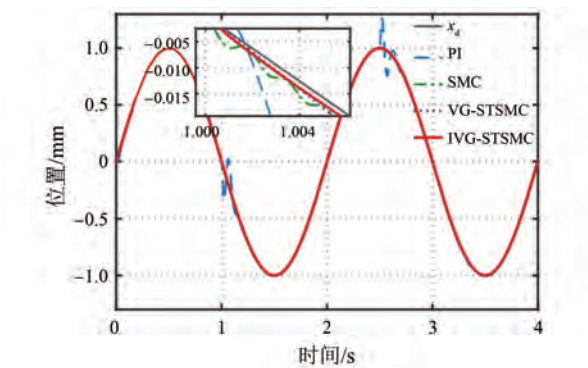


图 3 正弦跟踪下的位置响应曲线

Fig. 3 Position response curves under sinusoidal tracking

(2)位置跟踪误差分析

由图 4 可知,PI 控制在扰动作用时刻出现明显误差冲击,SMC 虽减小了误差幅值,但仍存在较明显高频波动;相比之下,VG-STSMC 与 IVG-

STSMC 展现出优异的误差抑制能力。其中,PI 控制、SMC、VG-STSMC 和 IVG-STSMC 的最大误差分别为 $266.8\text{ }\mu\text{m}$ 、 $3.982\text{ }\mu\text{m}$ 、 $2.641\text{ }\mu\text{m}$ 和 $1.274\text{ }\mu\text{m}$ 。在 $t=1\text{ s}$ 扰动施加瞬间,四种控制策略的误差峰值分别为 $266.8\text{ }\mu\text{m}$ 、 $3.74\text{ }\mu\text{m}$ 、 $2.58\text{ }\mu\text{m}$ 、 $0.89\text{ }\mu\text{m}$ 。这说明 NDOB 前馈补偿能够有效削弱突变负载对位置误差的瞬态冲击。

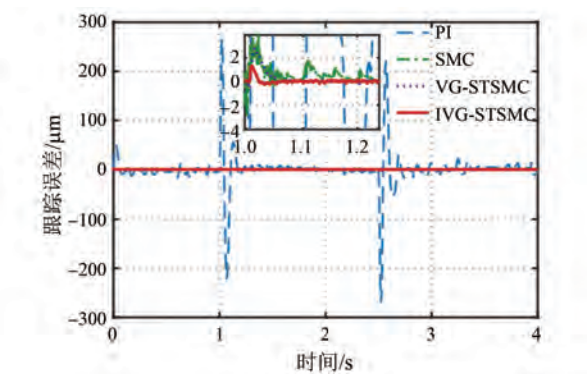


图 4 正弦跟踪下的位置跟踪误差曲线

Fig. 4 Position tracking error curves under sinusoidal tracking

(3)速度响应分析

由图 5 可知,PI 控制在突加与切除负载瞬间均出现明显速度冲击,动态品质较差;SMC 虽具有较强鲁棒性,但速度曲线中仍存在一定波动;VG-STSMC 相较于 PI 控制和 SMC,能够有效减弱速度波动,使响应更加平滑。

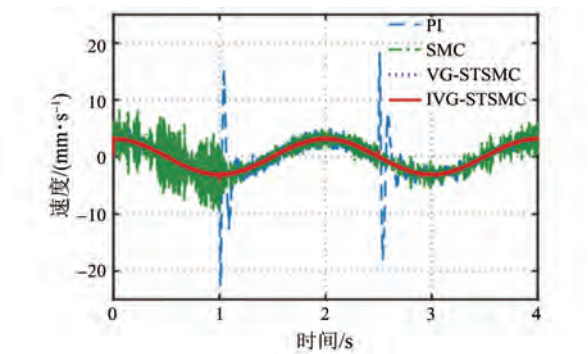


图 5 正弦跟踪下的速度响应曲线

Fig. 5 Speed response curves under sinusoidal tracking

四种控制策略的速度均方根(Root Mean Square,RMS)分别为 3.418 mm/s 、 2.563 mm/s 、 2.223 mm/s 和 2.224 mm/s 。其中,IVG-STSMC 与 VG-STSMC 的速度 RMS 基本接近,表明两者在整体速度平稳性方面差异较小;但在突加与切除负载瞬间,IVG-STSMC 的速度变化更加连续,尖峰

更小,过渡更加平滑。

(4) q 轴电流响应及抖振抑制分析

由图 6 可知,SMC 的电流抖振最为明显,波动范围最大;PI 控制虽不存在滑模切换引起的高频抖振,但在扰动阶段仍存在一定电流波动;VG-STSMC 相较于 PI 控制和 SMC,能够显著降低电流抖振,使控制输入更加连续平滑。

四种控制策略的电流 RMS 分别为 0.690 4 A、1.373 A、0.685 3 A 和 0.687 0 A。SMC 的电流幅值范围波动最大,为 $[-4.87, 5.08]$ A; IVG-STSMC 的电流幅值范围波动最小,为 $[-0.59, 1.89]$ A。IVG-STSMC 在扰动切换时刻的局部电流波形表现出更好的动态连续性。

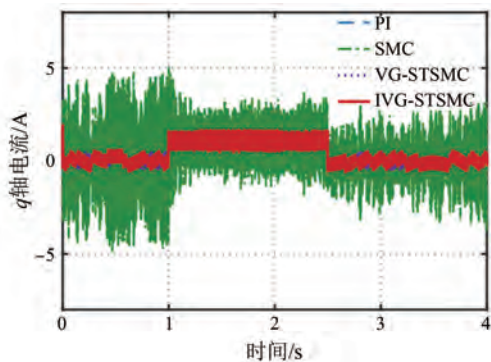


图 6 正弦跟踪下的 q 轴电流响应曲线

Fig. 6 q -axis current response curves under sinusoidal tracking

综上所述可知,PI 控制在突变负载下的最大跟踪误差达到 $266.8 \mu\text{m}$,抗扰性能较弱;传统 SMC 虽将误差大幅降至 $3.982 \mu\text{m}$,但其 q 轴电流 RMS 达到 1.373 A,控制输入波动较为明显。相比之下,本文设计的 VG-STSMC 将最大跟踪误差进一步降至 $2.641 \mu\text{m}$,并有效改善了电流平滑性。在此基础上,通过引入 NDOB 进行前馈补偿,IVG-STSMC 的最大跟踪误差进一步降低至 $1.274 \mu\text{m}$,较基础 VG-STSMC 降低 51.8%;特别是在扰动突加瞬间,位置误差峰值由 $2.58 \mu\text{m}$ 降低至 $0.89 \mu\text{m}$,降幅达到 65.5%。上述结果验证了本文所提复合策略在抑制扰动瞬态冲击、提升轨迹跟踪精度及改善控制输入动态连续性方面的有效性。

5 结语

为提升 CELSM 进给系统的轨迹跟踪精度、抗

扰性能及控制输入平滑性,本文设计了 VG-STSMC 反馈控制器,并融合 NDOB 前馈补偿构建 IVG-STSMC 复合控制策略,主要结论如下。

(1) 分析了 CELSM 的结构与运行机理,推导了电机在 d - q 坐标系下的电压方程、磁链方程及推力方程,为后续控制器设计与稳定性分析提供了理论基础。

(2) 针对传统滑模控制固定增益适应性不足和高频抖振问题,设计了 VG-STSMC 控制器。该控制器以连续 Softsign 函数替代符号函数,并结合基于状态误差的变增益自适应律,实现了控制增益随跟踪误差状态的动态调节,从而在提高误差收敛性能的同时有效改善控制输入平滑性。

(3) 在 VG-STSMC 反馈控制基础上,引入无需加速度测量的 NDOB,构建了 IVG-STSMC 复合控制框架。仿真结果表明,VG-STSMC 相较于 PI 控制和传统 SMC 能够有效改善跟踪精度与控制输入平滑性;进一步,IVG-STSMC 在扰动切换时刻获得更小的位置误差峰值和更平滑的速度、 q 轴电流响应,验证了所提复合控制策略在突变负载扰动下的抗扰性能和抖振抑制效果。

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

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

Zhao Sijia designed the research plan, summarized the content, and wrote the manuscript. Lan Yipeng provided theoretical guidance on the methods and reviewed & revised the paper. All authors have read and approved the final version of the paper for submission.

参考文献

- [1] 刘强. 数控机床发展历程及未来趋势[J]. 中国机械工程, 2021, 32(7): 757-770.
- Liu Q. Development history and future trends of

- numerical control machine tools [J]. China Mechanical Engineering, 2021, 32(7): 757-770.
- [2] 张根保, 罗天洪. “高档数控机床的高端制造模式”(九): 数控机床国内外水平比较研究[J]. 计算机集成制造系统, 2023, 29(12): 4227-4243.
- Zhang G B, Luo T H. Comparative study on level comparison of domestic and international CNC machine tools [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2023, 29(12): 4227-4243.
- [3] 蔡锐龙, 李晓栋, 钱思思. 国内外数控系统技术研究现状与发展趋势[J]. 机械科学与技术, 2016, 35(4): 493-500.
- Cai R L, Li X D, Qian S S. Numerical control system: State of art and trends [J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2016, 35(4): 493-500.
- [4] Fang C Z, Chen Y S, Deng X L, et al. A novel temperature rise prediction method of multi-component feed system for CNC machine tool based on multi-source fusion of heterogeneous correlation information [J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 2024, 25(8): 1571-1586.
- [5] 刘进海, 史黎明, 郭科宇, 等. 直线电机分段供电协同控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(7): 2861-2871.
- Liu J H, Shi L M, Guo K Y, et al. Cooperative control of segmented long stator linear motors [J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(7): 2861-2871.
- [6] 张予希, 颜建虎, 池松, 等. 考虑端部效应的动子无源型 Halbach 磁悬浮永磁直线电机电磁力分析[J]. 电机与控制学报, 2024, 28(6): 143-151.
- Zhang Y X, Yan J H, Chi S, et al. Electromagnetic force analysis of passive mover Halbach maglev permanent magnet linear synchronous motor considering end effects [J]. Electric Machines and Control, 2024, 28(6): 143-151.
- [7] 王立俊, 赵吉文, 盘真保, 等. 基于有限时间状态观测器的永磁同步直线电机递归终端滑模控制[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(2): 755-766.
- Wang L J, Zhao J W, Pan Z B, et al. Recursive terminal sliding mode control of permanent magnet synchronous linear motor based on finite-time state observer [J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(2): 755-766.
- [8] Choi A, Kim H, Hu M Y, et al. Super-twisting sliding mode control with SVR disturbance observer for PMSM speed regulation [J]. Applied Sciences, 2022, 12(21): 10749.
- [9] 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.
- [10] 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 an improved double-power reaching law [J]. Electric Machines & Control Application, 2025, 52(2): 201-209.
- [11] 张弛, 袁锦春, 奚学程, 等. 面向激光跟踪仪的自适应非奇异终端滑模跟踪控制方法[J]. 电机与控制应用, 2025, 52(5): 453-465.
- Zhang C, Yuan J C, Xi X C, et al. Adaptive nonsingular terminal sliding mode tracking control method for laser trackers [J]. Electric Machines & Control Application, 2025, 52(5): 453-465.
- [12] 雷子奇, 赵朝会, 顾萍萍, 等. 基于自适应增益的永磁同步电机转速环无模型滑模控制[J]. 电机与控制应用, 2024, 51(12): 81-92.
- Lei Z Q, Zhao Z H, Gu P P, et al. Model-free sliding mode control of permanent magnet synchronous speed loop based on adaptive gain [J]. Electric Machines & Control Application, 2024, 51(12): 81-92.
- [13] 康尔良, 于浩天, 韩康玮. 永磁同步电机非线性增益非奇异快速终端滑模控制[J]. 电机与控制学报, 2024, 28(5): 73-81.
- Kang E L, Yu H T, Han K W. Nonlinear gain nonsingular fast terminal sliding mode control for permanent magnet synchronous motors [J]. Electric Machines and Control, 2024, 28(5): 73-81.
- [14] 赖宣霖. 基于扰动补偿的永磁同步电机非奇异快速终端滑模控制研究[D]. 南宁: 广西大学, 2025.
- Lai X L. Research on non-singular fast terminal sliding mode control of permanent magnet

- synchronous motor based on disturbance compensation [D]. Nanning: Guangxi University, 2025.
- [15] 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.
- [16] 黄龙蛰, 洪俊杰, 赵明郎, 等. 基于非线性扰动观测器的永磁同步电机改进滑模控制[J]. 广东工业大学学报, 2025, 42(5): 58-67.
- Huang L Z, Hong J J, Zhao M L, et al. Improved sliding mode control of permanent magnet synchronous motor based on nonlinear disturbance observer [J]. Journal of Guangdong University of Technology, 2025, 42(5): 58-67.
- [17] 金宁治, 邢杰, 王令, 等. 基于非线性干扰观测器永磁同步电机逆变器扰动误差补偿的研究[J]. 电机与控制应用, 2025, 52(6): 608-622.
- Jin N Z, Xing J, Wang L, et al. Research of inverter disturbance error compensation based on nonlinear disturbance observer for permanent magnet synchronous motor [J]. Electric Machines & Control Application, 2025, 52(6): 608-622.
- [18] 高梓伦, 孙全增, 孔钰, 等. 基于超螺旋滑模观测器的双三相永磁同步电机鲁棒性模型预测控制算法[J]. 电机与控制应用, 2025, 52(5): 562-571.
- Gao Z L, Sun Q Z, Kong Y, et al. Robust model predictive control algorithms for dual three-phase permanent magnet synchronous motors based on super-twisting sliding mode observers [J]. Electric Machines & Control Application, 2025, 52(5): 562-571.
- [19] Yang Z, Yan X Y, Ouyang W, et al. STA-MRAC based sensorless PMSM control algorithm for rim-driven thruster [C]// 2025 8th International Conference on Transportation Information and Safety, Granada, Spain: 2025: 1259-1269.
- [20] 李霞林, 郭力, 冯一彬, 等. 基于非线性干扰观测器的直流微电网母线电压控制[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(2): 350-359.
- Li X L, Guo L, Feng Y B, et al. A nonlinear disturbance observer based DC bus voltage control for a DC microgrid [J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(2): 350-359.
- [21] Huang Z X, Zhou S, Song J, et al. Super-twisting sliding mode control for Markovian jump systems based on quantized output-feedback [J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2025, 71(6): 3995-4002.
- [22] 邓博, 宋普查, 杨申浩, 等. 基于 Softsign 变换的非线性主动噪声控制算法[J]. 噪声与振动控制, 2026, 46(1): 76-81.
- Deng B, Song P C, Yang S H, et al. Nonlinear active noise control algorithm based on Softsign transformation [J]. Noise and Vibration Control, 2026, 46(1): 76-81.
- [23] 徐磊, 陈楠, 朱孝勇, 等. 无铁心管状永磁直线电机多分辨率鲁棒性模型预测推力控制[J]. 电机与控制学报, 2025, 29(6): 101-112.
- Xu L, Chen N, Zhu X Y, et al. Multi-resolution robust model predictive thrust-force control for ironless tubular permanent magnet linear motor [J]. Electric Machines and Control, 2025, 29(6): 101-112.
- [24] Sergakis A, Gkiolekas N, Salinas M, et al. Alternative diagnostic approaches for various single-fault conditions in direct-drive low-speed coreless permanent magnet generators [J]. Energies, 2025, 18(22): 5973.
- [25] 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.
- [26] 蓝益鹏, 胡学成, 陈其林, 等. 可控励磁磁悬浮进给平台电磁特性的有限元分析[J]. 机械工程学报, 2017, 53(4): 184-189.
- Lan Y P, Hu X C, Chen Q L, et al. Finite element analysis of electromagnetic characteristics of controllable excitation magnetic suspension feed platform [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(4): 184-189.
- [27] 何龙飞. 基于滑模-微分跟踪器控制的直线电机位置伺服控制研究[J]. 机械工程与自动化, 2026, 55(1): 35-37+41.
- He L F. Research on position servo control of permanent magnet linear synchronous motor based on sliding mode-differential tracker control [J].

- Mechanical Engineering & Automation, 2026, 55 (1): 35-37+41.
- [28] 朱玉龙, 陆寿嵩, 桑宇, 等. 基于自适应模型误差的抓斗式卸船机滑模控制[J]. 河北工业大学学报, 2025, 54(4): 66-72.
- Zhu Y L, Lu S S, Sang Y, et al. Sliding mode control of grab discharging machines based on adaptive model error [J]. Journal of Hebei University of Technology, 2025, 54(4): 66-72.
- [29] 宋哲, 周威宏, 肖曦. 采用 $d-q$ 同步旋转坐标系的永磁同步电机无位置传感器控制[J]. 西安交通大学学报, 2026, 60(5): 174-184.
- Song Z, Zhou W H, Xiao X. Sensorless control of permanent magnet synchronous motor based on $d-q$ synchronous rotating coordinate system [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2026, 60(5): 174-184.
- [30] 胡鸿志, 耿妍婷, 苏弘杰, 等. 基于改进超螺旋滑模观测器的无刷直流电机无传感器控制[J]. 自动化应用, 2024, 65(18): 48-53.
- Hu H Z, Geng Y T, Su H J, et al. Sensorless control of brushless DC motor based on improved super-twisting sliding mode observer [J]. Automation Application, 2024, 65(18): 48-53.
- [31] 卢延荣, 李慧玲, 郑旺, 等. 不确定系统的抗干扰控制方法综述[J/OL]. 控制理论与应用, 2026-03-08. <https://link.cnki.net/urlid/44.1240.TP.20260123.1709.002>.
- Lu Y R, Li H L, Zheng W, et al. An overview of disturbance rejection control methods for uncertain systems [J/OL]. Control Theory & Applications, 2026-03-08. <https://link.cnki.net/urlid/44.1240.TP.20260123.1709.002>.
-
- 收稿日期:2026-03-20
收到修改稿日期:2026-05-06
作者简介:
赵思佳(2000—),女,硕士研究生,研究方向为电机及其控制,zsj001020@163.com;
* 通信作者:赵思佳(2000—),女,硕士研究生,研究方向为电机及其控制,zsj001020@163.com。