文章编号:1008-1542(2026)01-0040-09

新型滑模自抗扰起重机电机控制系统研究

孙会琴,回宝峰,王宏辉,张世宇,海洪宽,杨晓锐

(河北科技大学电气工程学院,河北石家庄　050018)

摘　要:为了提高起重机永磁同步电机(permanent magnet synchronous motor, PMSM)的响应速度及系统的鲁棒性,提出一种改进指数趋近律。在基于磁场定向矢量控制(field-oriented control, FOC)的基础上使速度环采用新型滑模控制(new sliding mode control, NSMC),为趋近项引入新函数 $f(s)$,提升系统状态变量趋近于滑模面的响应速度;将符号函数 sign(s)替换为连续函数 $h(s)$,减小因符号函数的不连续性引起的抖振;设计新型扩张状态观测器(new extended state observer, NESO)观测扰动,进一步优化转速控制器,将传统观测器中的 fal(s)函数替换成一种非线性光滑函数 $K(s)$来消除抖振,提高观测器的观测精度。结果表明,采用优化算法后电机在启动时,转速在约 0.05 s 后稳定下来,出现约 10 r/min 的转速振荡,验证了控制器算法的正确性。所提算法能有效提升系统的响应速度,可为起重机 PMSM 控制提供参考。

关键词:电机学;永磁同步电机;新型滑模控制;新型扩张状态观测器;抖振;起重机

中图分类号:TM351　　**文献标识码**:A　　**DOI**:10.7535/hbkd.2026yx01005

Research on the control system of a novel sliding mode active disturbance rejection crane motor

SUN Huiqin, HUI Baofeng, WANG Honghui, ZHANG Shiyu, HAI Hongkuan, YANG Xiaorui

(School of Electrical Engineering, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang, Hebei 050018, China)

Abstract: In order to enhance the response speed of the permanent magnet synchronous motor(PMSM) in cranes and the robustness of the system, an improved index law was proposed. The new sliding mode control(NSMC) in the speed loop was adopted based on field-oriented control(FOC). A new function $f(s)$ was introduced to enhance the response speed at which the system state variables approached the sliding mode surface. The sign function sign(s) was replaced by a continuous function $h(s)$ to reduce the chattering caused by the discontinuity of the sign function. A new extended state observer(NESO) was designed to observe disturbances and further optimize the speed controller. The fal(s) function in traditional observer was replaced by a nonlinear smooth function $K(s)$ to eliminate chattering and improve the observation accuracy of the observer. The results show that the motor speed is stable at approximately 0.05 s after starting, with a speed oscillation of about

收稿日期:2025-06-07;修回日期:2025-10-10;责任编辑:冯民

基金项目:国家自然科学基金(52307010)

第一作者简介:孙会琴(1973—),女,河北蠡县人,教授,硕士,主要从事电机设计及控制方面的研究。

通信作者:杨晓锐,副教授。E-mail:sharyyang@hebust.edu.cn

孙会琴,回宝峰,王宏辉,等.新型滑模自抗扰起重机电机控制系统研究[J].河北科技大学学报,2026,47(1):40-48.

SUN Huiqin, HUI Baofeng, WANG Honghui, et al. Research on the control system of a novel sliding mode active disturbance rejection crane motor[J]. Journal of Hebei University of Science and Technology, 2026, 47(1): 40-48.

10 r/min. It verifies the correctness of the controller algorithm. The designed algorithm can effectively improve the response speed of the system and provide reference for the control of PMSM in cranes.

Keywords: electrical machinery; permanent magnet synchronous motor; new sliding mode control; new extended state observer; chattering; crane

起重机械是现代生产中重要的搬运设备，广泛应用于车间、码头、港口等地方。随着经济发展，起重机在生产中的作用愈加突出。永磁同步电机(permanent magnet synchronous motor，PMSM)因其高性能和高精度被用于起重机驱动，但在一些高要求的场景，如核电站和航空发动机吊装中，仍存在控制精度不足的问题，电机调速控制技术成为关键[1-3]。

PMSM 常用的调速方法包括恒压频比控制、直接转矩控制和基于磁场定向的矢量控制(field-oriented control，FOC)。其中，FOC 在系统启动、转矩脉动和调速范围等方面表现更好，适合用于 PMSM 调速。由于 PMSM 具有多变量和强耦合的特性，传统 PI 控制难以满足高精度和高动态性能要求，所以，需要采用更先进的控制策略，如自抗扰控制、预测控制、滑模控制(sliding mode control，SMC)等[4-6]。滑模控制因其强鲁棒性、简单设计和快速响应而广泛应用于电机控制，但在实际应用中存在超调和抖振问题，为此，研究者已提出多种改进方法，如滑模面设计优化、高级滑模控制等[7-8]。文献[9-10]提出了新型趋近律，通过在等速项加入函数以提高系统响应速度，但没有考虑负载转矩对系统的影响；文献[11]在趋近律中加入状态变量，使之与指数项相关联，以提升响应速度，并设计了观测器以提升性能，但没有考虑 fal(s)函数的振荡问题；文献[12]采用双曲正切开关函数替代符号函数 sign(s)，并在趋近律中引入系统状态变量幂次项和状态变量的双曲正弦值，能有效减少抖振，但未设计观测器对扰动进行观测；文献[13-14]设计了新型趋近律并结合了扰动观测器，在减少抖振方面有更好的表现，但所设计控制器和滑模观测器需要调整的参数较多，增加了使用难度。

针对以上问题，本文提出了一种新型趋近律，通过引入新函数 $f(s)$使状态变量加速达到滑模面，并用连续函数 $h(s)$替代符号函数 sign(s)以减少抖振，基于此设计了 PMSM 速度控制器。为提高系统抗干扰能力，采用扩张状态观测器(extended state observer，ESO)监测扰动，并用非线性光滑函数 $K(s)$替代传统观测器中的 fal(s)函数，以消除抖振并提升观测精度。

1　PMSM 系统

1.1　数学模型

采用表贴式 PMSM，以及 $i_d=0$ 的矢量控制策略，假设 PMSM 满足以下条件：1)忽略涡流和磁带损耗；2)忽略空间谐波；3)忽略电机饱和(包括铁芯和磁路的饱和)[15-17]。d-q 坐标系下 PMSM 的数学模型见式(1)。

$$\begin{cases} u_d = Ri_d + L_d \dfrac{\mathrm{d}u_d}{\mathrm{d}t} - \omega_e L_q i_q, \\ u_q = Ri_q + L_q \dfrac{\mathrm{d}i_q}{\mathrm{d}t} + \omega_e (L_d i_d + \Psi_f), \end{cases} \tag{1}$$

式中：R 为定子电阻；i_d、i_q 为 d、q 轴向电流；u_d、u_q 为 d、q 轴上的电压分量；Ψ_f 为永磁体磁链；L_d、L_q 为 d、q 轴电感；ω_e 为电机电角速度。

电磁转矩方程见式(2)。

$$T_e = \frac{3}{2} P_n \Psi_f i_q, \tag{2}$$

式中：T_e 为电机电磁转矩；P_n 为电机极对数。

其机械运动方程见式(3)。

$$J \frac{\mathrm{d}\omega}{\mathrm{d}t} = T_e - T_L - B\omega, \tag{3}$$

式中：J 为转动惯量；T_L 为负载转矩；B 为摩擦系数；ω 为电机机械角速度。

电机电角速度与机械角速度之间的关系见式(4)。

$$\omega_e = P_n\omega \ 。 \tag{4}$$

1.2 整体结构

系统整体结构如图 1 所示。在 FOC 的基础上，电机电流环采用 PI 控制器，新型滑模控制器替代传统的速度环控制，同时建立新型扩张状态观测器(new extended state observer，NESO)以对系统的扰动进行观测，此外，系统还包含坐标变换单元、SVPWM 单元、逆变器单元等。

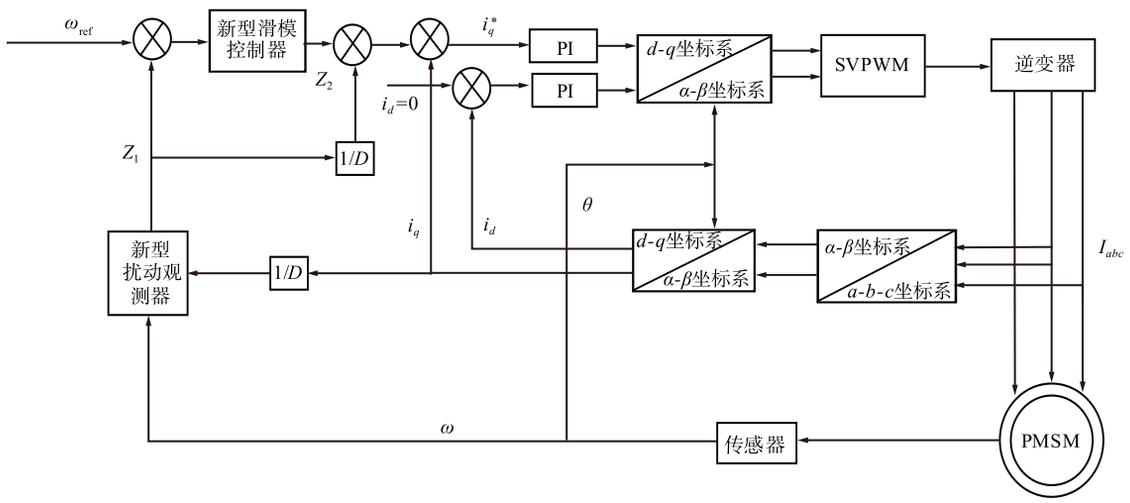


图 1 PMSM 系统控制框图

Fig. 1 Control block diagram of permanent magnet synchronous motor system

2 改进指数趋近律设计及应用

2.1 改进趋近律设计

传统指数趋近律见式(5)。

$$\dot{s} = -\varepsilon \mathrm{sign}(s) - qs, \tag{5}$$

式中：s 为滑模面；ε、q 为趋近参数；sign(s)为符号函数。其中，$\varepsilon>0$，$q>0$，$-\varepsilon\mathrm{sign}(s)$是等速项；$-qs$ 为指数项。

传统指数趋近律在系统状态远离滑模面时采用指数形式快速趋近，而在接近滑模面时则转为恒定速度趋近。参数 ε 的选择至关重要：较大的 ε 值虽然能够加快接近过程中的趋近速度，但却可能引起系统抖振加剧；而较小的 ε 值虽然有助于抑制抖振，却会使系统响应变得迟缓，调节过程延长，进而降低动态性能。此外，sign(s)函数固有的不连续性也是引发系统抖振的重要因素[18-19]。针对上述问题，本文提出的新型趋近律见式(6)。

$$\begin{cases} \dot{s} = -\varepsilon f(s)h(s) - qs, \\ f(s) = \dfrac{m|s|+1}{1+\mathrm{e}^{-s^2}}, \\ h(s) = \mathrm{sign}(s)q(s), \end{cases} \qquad \varepsilon>0, q>0, m>0。 \tag{6}$$

在等速项添加了一个新函数 $f(s)$，当系统状态远离滑模面(即$|s|$较大)时，$f(s)$值显著增大，导致$\varepsilon f(s)>\varepsilon$，因此，改进后的指数趋近律能够显著提高系统的动态响应速度；而当系统状态接近滑模面(即$|s|$接近 0)时，$f(s)$逐渐趋近于 0.5，使得$\varepsilon f(s)<\varepsilon$，此时趋近速度自动减慢，有效抑制了系统抖振。该改进设计既确保了系统状态远离滑模面时具有较快的趋近能力，又能在接近滑模面时平稳过渡，兼顾了动态性能与抖振抑制的双重需求。此外，传统指数趋近律采用的符号函数 sign(s)因其不连续性会导致系统产生较大的抖振，选用绝对值指数衰减函数 $q(s)$优化 sign(s)，可提升函数连续性。$q(s)$表达式见式(7)。

$$q(s) = 1 - \mathrm{e}^{-k|s|}, \tag{7}$$

式中：k 为常数且$k>0$，k 取值越大，函数 $h(s)$收敛速度越快；$|s|=0$ 时 $h(s)=0$。

2.2 新趋近律性能分析

为分析改进后的新趋近律的优越性，选用式(8)所示系统来进行验证。

$$\dot{\delta}(t)=-f(\delta,t)+bu\ ,\tag{8}$$

式中：$f(\delta,t)=25\dot{\delta}$；$b=133$。

选取滑模面函数 $S=ce+\dot{e}$，其中 $c=15$，误差可表示为式(9)。

$$e(t)=\delta_d-\delta\ 。\tag{9}$$

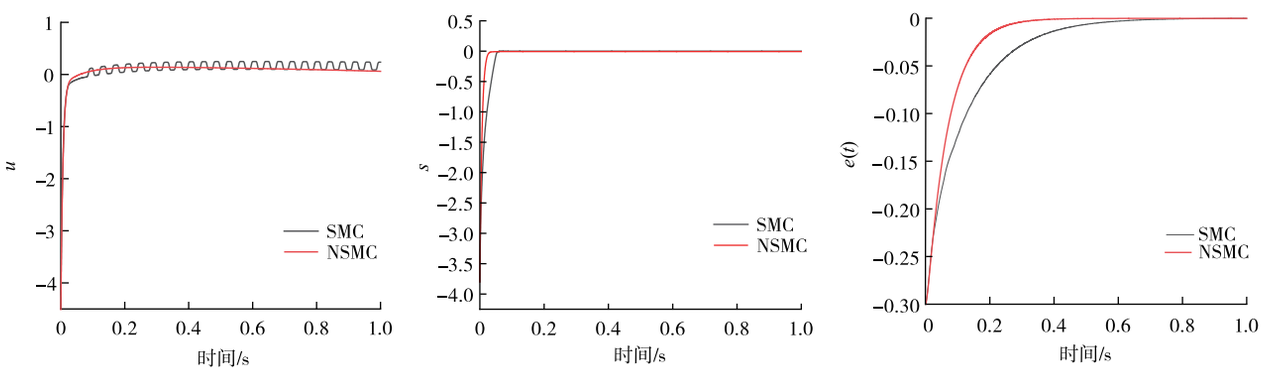
整理后可得式(10)。

$$\dot{s}=15(\dot{\delta}_d-\dot{\delta})+\ddot{\delta}_d-bu\ 。\tag{10}$$

将改进后的指数趋近律代入式(10)，可得式(11)。

$$u=\frac{1}{b}[\varepsilon f(s)h(s)+qs+15(\dot{\delta}_d-\dot{\delta})+\ddot{\delta}_d+f(\delta,t)]\ 。\tag{11}$$

设定输入信号 δ_d 为标准正弦信号，2 种趋近律选定参数相同，选取 ε 为 10，q 为 50，2 种趋近律在该系统下的仿真曲线如图 2 所示。



a）输出u对比图　　b）滑模面s变化图　　c）状态变量$e(t)$变化图

图 2　2 种趋近律仿真结果对比图

Fig. 2　Comparison chart of simulation results of two convergence laws

2.3　滑模速度控制器设计

在 $i_d=0$、$L_d=L_q$ 的条件下，PMSM 系统的状态变量定义为式(12)。

$$\begin{cases}x_1=\omega\ ,\\ x_2=\dfrac{1}{J}(T_L+B\omega)\ ,\end{cases}\tag{12}$$

式中：x_1 为电机机械角速度 ω；x_2 为系统综合扰动，包括系统内部摩擦造成的扰动以及负载转矩变化引起的扰动。

对此，建立转速误差方程，见式(13)。

$$\begin{cases}e=\omega_{\mathrm{ref}}-\omega\ ,\\ \dot{e}=-\dot{x}_1=\dot{\omega}_{\mathrm{ref}}-\dot{\omega}=x_2-Du\ 。\end{cases}\tag{13}$$

设计滑模面函数，见式(14)。

$$s=e+c\int_0^t e\,\mathrm{d}\tau\ 。\tag{14}$$

对 s 求导可得式(15)。

$$\dot{s}=ce+\dot{e}=ce+x_2-Du\ ,\tag{15}$$

式中：$D=\dfrac{3P_n\Psi_f}{2J}$；$u=i_q$。

联立式(6)、(13)、(15)可得式(16)。

$$i_q=\frac{1}{D}\int[ce+\varepsilon f(s)h(s)+qs+x_2]\mathrm{d}\tau\ 。\tag{16}$$

2.4　稳定性证明

李雅普诺夫定理作为分析动态系统稳定性的核心理论工具，被应用于验证改进指数趋近律的稳定性。该方法的核心步骤包括：构建一个合适的李雅普诺夫标量函数，以有效表征系统状态与平衡点之间的能量关

系;通过计算该函数沿系统轨迹的时间导数,判定系统的稳定性特性。具体而言,当李雅普诺夫函数的时间导数为负定时,表明系统状态将随时间演化逐渐收敛至平衡点,从而证明所提出的改进指数趋近律具有渐近稳定性。选取的李雅普诺夫函数如式(17)所示。

$$V(s)=\frac{1}{2}s^2。\tag{17}$$

由李雅普诺夫稳定性理论可知,系统达到稳定需要满足的条件为 $\lim\limits_{s\to 0}s\dot{s}\leqslant 0$,联立式(6)、(15)、(16)对其求导可得式(18)。

$$\dot{V}=s\dot{s}=s[ce-(ce+\varepsilon f(s)h(s)+qs+x_2)+x_2]=s(-\varepsilon f(s)h(s)-qs)。\tag{18}$$

由于 $\varepsilon>0$,$q>0$,$f(s)>0$,$sh(s)>0$,$\dot{V}\leqslant 0$,满足稳定性要求。

3 扰动观测器设计

PMSM 运行时会受到各种扰动的干扰,扰动观测器能够估计系统内部的不稳定因素,将估计值与实际值进行对比,并将误差反馈到滑模控制器中,从而实现系统更快速、准确地跟踪实际转速。ESO 作为自抗扰控制的核心组件,只需获取被控系统的输入和输出,即可估计其状态和整体扰动[19-20]。本文在 ESO 的基础上改进传统的 fal(s)函数,设计了 NESO 对系统的扰动进行观测,以提高系统的抗干扰能力。

3.1 ESO

非线性 ESO 一般形式见式(19)[20]。

$$\begin{cases}e=z_1-y\ ,\\ \dot{z}_1=z_2-\beta_1\mathrm{fal}(e,\alpha_1,\delta)+bu\ ,\\ \dot{z}_2=-\beta_2\mathrm{fal}(e,\alpha,\delta)\ ,\end{cases}\tag{19}$$

式中:u 代表系统的状态输入;y 代表系统的状态输出;z_1 代表系统状态输出的观测值;z_2 代表系统扰动 x_2 的观测值;β_1、β_2 代表系统的误差增益;fal(e,α,δ)函数为非线性函数,表达式见式(20)。

$$\mathrm{fal}(e,\alpha,\delta)=\begin{cases}\dfrac{e}{\delta^{1-\alpha}}, & |e|<\delta\ ,\\ |e|^{\alpha}\mathrm{sign}(e), & |e|\geqslant\delta\ ,\end{cases}\tag{20}$$

式中:α 为非线性因子;δ 为线性段时间长度。

3.2 NESO

传统的 fal(s)函数相对简单,参数调节复杂,且其非光滑性会导致系统产生抖振。为此,本文用光滑函数 $K(s)$来替代 fal(s)函数,以减小系统抖振[21-22]。$K(s)$表达式如式(21)所示。

$$K(s)=\frac{cs}{1+\left(\dfrac{|s|}{d}\right)^{p}}\ ,\tag{21}$$

式中 c、d、p 均为正数。选择合适的参数可以控制函数变化速率,进而对系统的扰动补偿进行控制。

定义系统的状态输出 y 为电机机械角速度 ω,即为 x_1,建立系统的状态方程,见式(22)。

$$\begin{cases}\dot{x}_1=x_2+Du\ ,\\ \dot{x}_2=\dfrac{1}{J}(T_L+B\omega)\ ,\\ y=x_1。\end{cases}\tag{22}$$

结合电机机械运动方程设计新型观测器,可得式(23)。

$$\begin{cases}e=z_1-y\ ,\\ \dot{z}_1=z_2-\beta_1[e+K(e,c_1,d_1,p_1)]+bi_q,\\ \dot{z}_2=-\beta_2[e+K(e,c_2,d_2,p_2)]。\end{cases}\tag{23}$$

观测扰动 z_2 反馈到速度环控制器中,可得式(24)。

$$i_q=\frac{1}{D}\int[ce+\varepsilon f(s)h(s)+qs+z_2]\mathrm{d}\tau。\tag{24}$$

3.3　观测器误差分析

为验证 NESO 的有效性，通过 PMSM 控制系统进行变转矩仿真实验，分别记录 ESO 与 NESO 2 种算法下 PMSM 实际电机机械角速度 ω 与其观测值 z_1 之差，仿真结果如图 3 所示。

由图 3 可知，NESO 启动时角速度误差约为 0.48 rad/s，转矩发生变化时约为 0.52 rad/s，相比于 ESO 误差更小，表明跟踪效果更好。

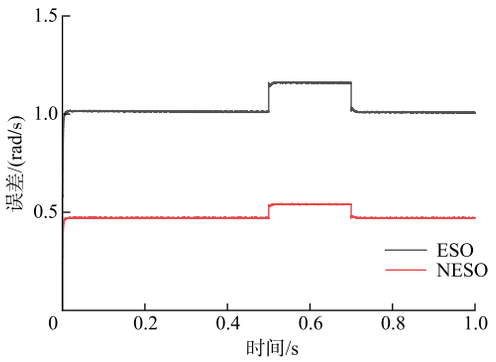


图 3　机械角速度误差仿真结果对比图

Fig. 3　Comparison chart of mechanical angular velocity error simulation results

4　系统仿真和实验分析

通过 Matlab/Simulink 分别搭建传统趋近律控制和改进趋近律控制的 PMSM 控制系统仿真模型。滑模控制器参数设置为 $c=350$，$q=450$，$\varepsilon=380$，$m=1.35$，$k=200$；NESO 中函数的参数设置为 $c=2.4$，$d=3.2$，$p=4.5$。设置系统仿真时间为 1 s，分别对 PMSM 系统进行变转速仿真实验和变转矩仿真实验来验证算法的真实性和有效性。仿真所采用的 PMSM 参数如表 1 所示。

表 1　PMSM 参数

Tab. 1　Parameters of the permanent magnet synchronous motor

参　数	数值	参　数	数值
额定输出功率 P/W	400	转子转动惯量 J/(kg·m^2)	0.000 03
极对数 P_n	2	定、转子电感 L_S/mH	0.5
额定转速 n_N/(r/min)	3 000	定子电阻 R/Ω	0.25
额定转矩 T_N/(N·m)	1.27	额定电流 I_N/A	12.5

4.1　变转速仿真实验

由图 4 可知，电机启动后转速升至 800 r/min，在 0.5 s 时转速升至 1 000 r/min，以 1 000 r/min 的转速运行至 1 s，选定负载为 1.2 N·m。由图 4 可得出 4 种控制方法的对比结果，如表 2 所示。

表 2　4 种控制方法在变转速仿真实验下的性能对比结果

Tab. 2　Performance comparison of 4 control methods in variable speed simulation experiment

控制方法	电机启动达到稳定所需时间/s	电机转速变化恢复时间/s
SMC	0.045	0.030
NSMC	0.035	0.020
NSMC+ESO	0.015	0.015
NSMC+NESO	0.012	0.010

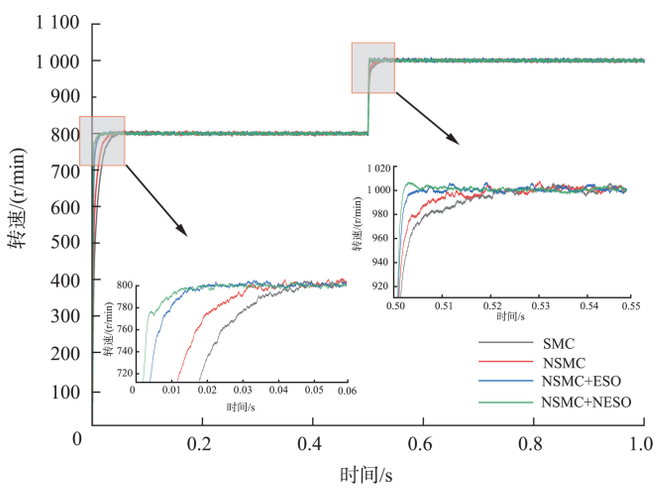


图 4　PMSM 转速仿真图

Fig. 4　Simulation diagram of the rotational speed of PMSM

由表 2 可知，采用新型趋近律的滑模控制器可以提高响应速度，相比于传统滑模控制能更快响应，且稳定所需时间也更少；结合了 NESO 后响应更快，且在超调量方面也更优于其他 3 种控制策略，进一步提高了系统的响应速度和控制精度。

4.2　变转矩仿真实验

由图 5 可知，电机以 800 r/min 的转速、1 N·m 的转矩运行 1 s，在 0.5 s 时对系统突加 0.2 N·m 的负载，在 0.7 s 时对系统突减 0.2 N·m 的负载。由图 5 可得出 4 种控制方法的对比结果，如表 3 所示。

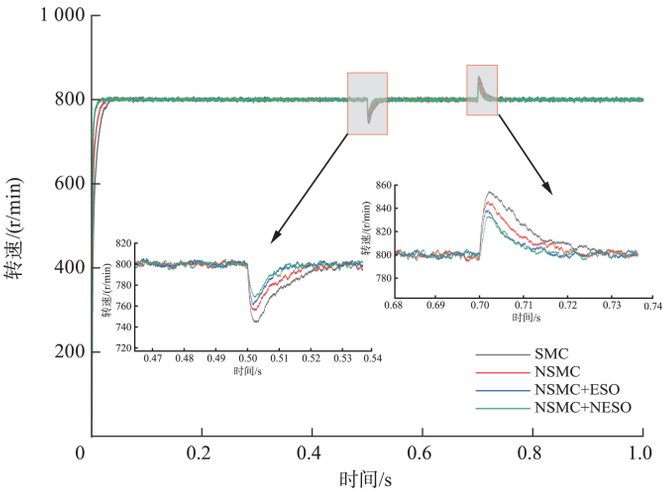


图 5 PMSM 转矩仿真图

Fig. 5 Torque simulation diagram of PMSM

表 3 4 种控制方法在变转矩仿真实验下的性能对比结果

Tab. 3 Performance comparison of 4 control methods in variable torque simulation experiment

控制方法	突加负载转速下降量/(r/min)	突降负载转速上升量/(r/min)
SMC	50	52
NSMC	40	41
NSMC+ESO	30	30
NSMC+NESO	20	19

由表 3 可知:电机采用了新型趋近律设计的滑模控制器在负载转矩变化时抖振小,恢复也更快;结合了 NESO 后能更快地恢复,相比于其他 3 种控制方法更优。

4.3 转速实验结果分析

本文采用 PMSM 驱动控制平台来验证系统采用新算法的有效性和真实性,控制器可通过 CAN 通信接口实现与程序软件平台和 PMSM 的连接,通过 CSPACE watch 软件实现程序的输入、PMSM 给定转速以及实验结果的记录等,实验平台如图 6 所示。实验初始启动转速升至 800 r/min,随后升至 1 000 r/min,实验结果如图 7 所示。由图 7 可得出 4 种控制方法的对比结果,如表 4 所示。

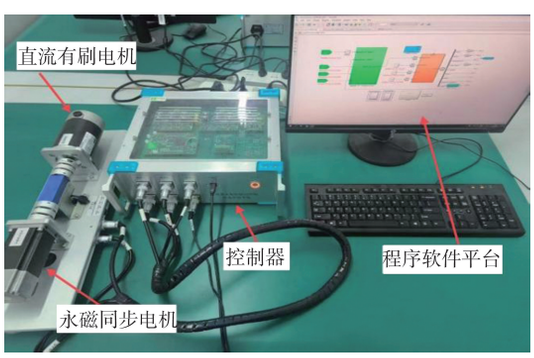


图 6 PMSM 驱动控制平台

Fig. 6 PMSM drive control platform

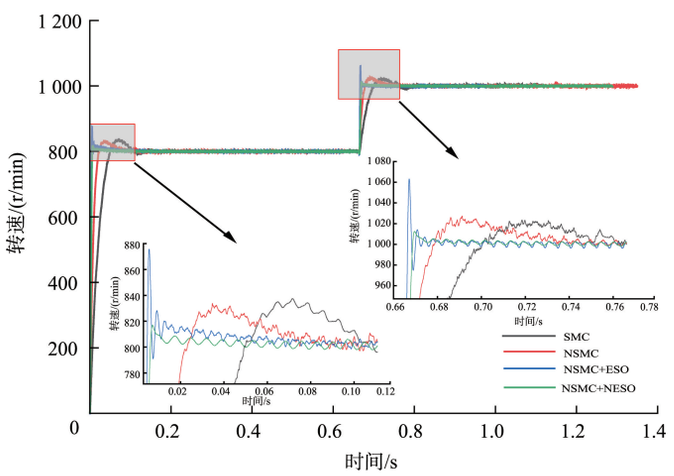


图 7 PMSM 转速实验结果图

Fig. 7 Experimental result diagram of PMSM speed

表 4 4 种控制方法在变转速实验下的性能结果对比

Tab. 4 Performance comparison of four control methods under variable speed experiment

控制方法	电机启动达到稳定所需时间/s	电机转速变化恢复时间/s	电机启动转速超调量/(r/min)	电机转速变化超调量/(r/min)
SMC	0.12	0.12	40	20
NSMC	0.10	0.10	30	20
NSMC+ESO	0.08	0.50	75	60
NSMC+NESO	0.05	0.50	10	10

由表 4 可知，在电机启动和转速发生变化时，采用新型趋近律控制能使电机更快地稳定下来，转速超调量也优于传统趋近律控制；结合了 NESO 后达到稳定所需时间更短，超调量更小。

5　结　语

针对起重机 PMSM 采用传统指数趋近律的滑模控制出现的超调量大、抖振等问题，在等速项添加新函数 $f(s)$，并用连续函数 $h(s)$ 替代符号函数 sign(s) 以及结合 NESO，此种新型滑模控制器能提升响应速度和控制精度，满足起重机电机短时间高转矩启动的需求，并在转速和转矩变化时也能更快地响应。本文实验结果与仿真结果存在差异，可能是电机的具体参数与仿真参数存在差异以及设备之间摩擦等原因造成的。

本文所设计的控制器以及 NESO 调节参数仍较多，且调节参数也存在复杂性及不稳定性，这是未来进一步研究的方向。

参考文献/References：

[1] 马世伦，吴永伊，李昌蔚，等. 电动汽车用内嵌式不等厚磁极永磁驱动电机的优化与分析[J]. 河北科技大学学报，2025，46(4)：375-385.
MA Shilun，WU Yongyi，LI Changwei，et al. Optimization and analysis of interior permanent magnet drive motor with unequal thickness magnetic poles for electric vehicle[J]. Journal of Hebei University of Science and Technology，2025，46(4)：375-385.

[2] 王宁，冯桂宏. 桥式起重机起升机构永磁电机驱动的研究[J]. 电工技术，2022(13)：183-187.
WANG Ning，FENG Guihong. Research on permanent magnet motor drive of hoisting mechanism of bridge crane[J]. Electric Engineering，2022(13)：183-187.

[3] 闵健. 起重机直驱永磁电机研究[D]. 沈阳：沈阳工业大学，2020.
MIN Jian. Research on Direct Drive Permanent Magnet Motor for Cranes Application[D]. Shenyang：Shenyang University of Technology，2020.

[4] JIANG Junjie，ZHANG Housheng，JIN Duo，et al. Disturbance observer based non-singular fast terminal sliding mode control of permanent magnet synchronous motors[J]. Journal of Power Electronics，2024，24(2)：249-257.

[5] 张宇祥，李白雅，杨城健，等. 基于非奇异快速终端超螺旋滑模的 PMSM 无传感器控制[J]. 湖南科技大学学报(自然科学版)，2024，39(2)：52-59.
ZHANG Yuxiang，LI Baiya，YANG Chengjian，et al. Sensorless control of PMSM based on non-singular fast terminal super-twisting sliding mode[J]. Journal of Hunan University of Science and Technology(Natural Science Edition)，2024，39(2)：52-59.

[6] 吕德刚，李子豪. 表贴式永磁同步电机改进滑模观测器控制[J]. 电机与控制学报，2021，25(10)：58-66.
LYU Degang，LI Zihao. Improved sliding mode observer control of surface mounted permanent magnet synchronous motor[J]. Electric Machines and Control，2021，25(10)：58-66.

[7] ZHOU Qixun，WANG Yihang，ZHANG Yingxing，et al. Sensorless control of permanent magnet synchronous motor based on improved sliding mode observer[J]. Transactions of the Institute of Measurement and Control，2025，47(1)：194-205.

[8] MU Poxuan，YAO Xiaodong. Research on sliding mode active disturbance rejection based on permanent magnet synchronous motor[J]. Journal of Physics：Conference Series，2024. DOI：10.1088/1742-6596/2896/1/012012.

[9] 王毅波，曹宽，李彪. 一种改进型指数趋近律的永磁同步电机滑模控制[J]. 微电机，2019，52(12)：81-84.
WANG Yibo，CAO Kuan，LI Biao. A PMSM sliding mode control system based on an improved exponential reaching law[J]. Micromotors，2019，52(12)：81-84.

[10] 闫宏亮，马菊菊，姬海斌. 永磁同步驱动电机的滑模控制研究[J]. 控制工程，2022，29(8)：1473-1479.
YAN Hongliang，MA Juju，JI Haibin. Research on sliding mode control of permanent magnet synchronous drive motor[J]. Control Engineering of China，2022，29(8)：1473-1479.

[11] 王淑旺，范诚，徐群龙. 永磁同步电机调速系统新型滑模变结构控制策略[J]. 汽车技术，2022(1)：1-7.
WANG Shuwang，FAN Cheng，XU Qunlong. Control strategy of new sliding mode variable structure on speed regulation system of permanent magnet synchronous motor[J]. Automobile Technology，2022(1)：1-7.

[12] 康尔良，朱金荣，韩康玮. 永磁同步电机新型趋近律滑模控制器设计[J]. 电机与控制学报，2024，28(7)：112-119.
KANG Erliang，ZHU Jinrong，HAN Kangwei. Design of new reaching law of sliding mode controller for permanent magnet synchronous motor[J]. Electric Machines and Control，2024，28(7)：112-119.

[13] 陈德海，赖正贵，李志远，等. 基于改进指数趋近律和扰动观测器的 PMSM 滑模控制[J]. 电工电气，2024(2)：8-14.

CHEN Dehai, LAI Zhenggui, LI Zhiyuan, et al. PMSM sliding mode control based on improved exponential reaching law and disturbance observer[J]. Electrotechnics Electric, 2024(2): 8-14.

[14] 黄存. 基于新型趋近律和扰动观测器的永磁同步电机非奇异终端滑模控制[J]. 电工技术, 2024(5): 42-46.
HUANG Cun. Non-singular terminal sliding mode control of PMSM based on a novel reaching law and disturbance observer[J]. Electric Engineering, 2024(5): 42-46.

[15] 袁雷, 胡冰新, 魏克银. 现代永磁同步电机控制原理及 MATLAB 仿真[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2016.

[16] XU Pengfei, JIA Fangxiu. Research on three phase permanent magnet synchronous motor control algorithm based on sliding mode variable structure[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2019. DOI: 10.1088/1757-899X/677/5/052120.

[17] 李智鹤, 刘曰涛, 贺磊, 等. 基于改进滑模控制器的 PMSM 调速系统[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2023(10): 81-84.
LI Zhihe, LIU Yuetao, HE Lei, et al. PMSM speed regulation system based on improved sliding mode controller[J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2023(10): 81-84.

[18] 唐腾宇, 邓永停, 刘京, 等. 基于改进指数趋近律和自适应龙伯格观测器的 PMSM 速度环滑模控制[J]. 光学精密工程, 2024, 32(19): 2921-2932.
TANG Tengyu, DENG Yongting, LIU Jing, et al. Sliding mode control strategy for PMSM speed ring based on improved exponential convergence law and adaptive Lunberger observer[J]. Optics and Precision Engineering, 2024, 32(19): 2921-2932.

[19] 吴影. 基于 ESO 的永磁直驱风力发电系统控制技术研究[D]. 青岛: 青岛科技大学, 2023.
WU Ying. Research on Control Technology of Permanent Magnet Direct Drive Wind Power Generation System Based on ESO[D]. Qingdao: Qingdao University of Science & Technology, 2023.

[20] 韩京清. 自抗扰控制技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2008.

[21] 曾喆昭, 吴亮东, 杨振源, 等. 非仿射系统的自学习滑模抗扰控制[J]. 控制理论与应用, 2016, 33(7): 980-987.
ZENG Zhezhao, WU Liangdong, YANG Zhenyuan, et al. Self-learning sliding-mode disturbance rejection control for non-affine systems [J]. Control Theory & Applications, 2016, 33(7): 980-987.

[22] 郭铖. 永磁同步电机改进型滑模变结构控制器研究与设计[D]. 重庆: 重庆理工大学, 2024.
GUO Cheng. Research and Design of Improved Sliding Mode Controller for Permanent Magnet Synchronous Motor[D]. Chongqing: Chongqing University of Technology, 2024.