

基于改进双幂次趋近律的 SPMSM 滑模控制

刘澎澎, 王仲根*, 王珊珊, 朱小兵

(安徽理工大学 电气与信息工程学院, 安徽 淮南 232001)

Sliding Mode Control of SPMSM Using an Improved Double-Power Reaching Law

LIU Pengpeng, WANG Zhonggen*, WANG Shanshan, ZHU Xiaobing

(School of Electrical and Information Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China)

Abstract: [Objective] To address the contradiction between reaching speed and chattering suppression in the traditional sliding mode controller for surface-mounted permanent magnet synchronous motors (SPMSM), this study proposes a sliding mode control method based on improved variable-speed double-power reaching law. [Methods] First, based on an improved variable-speed double-power reaching law, sliding mode variables and system variables were introduced in addition to the traditional double-power reaching law, making the reaching law exhibit variable-speed characteristics. The hyperbolic tangent function was employed in place of the sign function to suppress chattering, and the stability of the proposed speed controller was proven using the Lyapunov theorem. Next, to address the impact of load disturbances on system performance, a non-singular fast terminal sliding mode observer was designed. This observer integrated a non-singular fast terminal sliding mode surface with a high-order sliding mode control law, which could not only suppress system chattering but also provide real-time disturbance compensation. This improved the accuracy of disturbance estimation in the speed control system and reduced system chattering. Finally, simulations based on Matlab/Simulink were conducted, and a motor experimental platform was established to compare the proposed method with traditional sliding mode control and other variable-speed sliding mode control methods. [Results] Simulation and experimental results show that the SPMSM sliding mode speed control method based on the improved variable-speed double-power reaching law can suppress system overshoot, enhance system

response speed, and provide real-time compensation in the presence of disturbances. [Conclusion] The results demonstrate that the proposed control method enhances the dynamic performance and robustness of the system.

Key words: surface-mounted permanent magnet synchronous motor; sliding mode observer; sliding mode control; reaching law

摘 要: 【目的】针对表贴式永磁同步电机 (SPMSM) 在传统滑模控制器中存在趋近速度与抑制抖振之间相矛盾的问题, 提出了一种基于改进变速双幂次趋近律的滑模控制方法。【方法】首先, 基于改进变速双幂次趋近律通过传统双幂次趋近律的基础上引入滑模变量和系统变量, 使趋近律具有变速特征, 并采用双曲正切函数代替符号函数以抑制抖振, 利用 Lyapunov 定理证明了所提速度控制器的稳定性; 其次, 针对负载扰动影响系统性能的问题, 设计了非奇异快速终端滑模观测器, 该观测器将非奇异快速终端滑模面与高阶滑模控制律相结合, 能够抑制系统抖振, 同时对扰动进行实时补偿, 提高了调速系统扰动估计的精确性, 减少了系统抖振; 最后, 基于 Matlab/Simulink 进行仿真并搭建电机试验平台, 将所提方法和传统滑模控制以及其他变速滑模控制进行对比。【结果】仿真及电机试验结果表明, 基于改进变速双幂次趋近律的 SPMSM 滑模调速控制方法, 可以抑制系统超调, 同时提高系统的响应速度, 并能在出现扰动后实时补偿。【结论】通过结果可以得出所提控制方法提高了系统的动态性能和鲁棒性。

关键词: 表贴式永磁同步电机; 滑模观测器; 滑模控制; 趋近律

基金项目: 安徽省自然科学基金 (2108085MF200)

Natural Science Foundation of Anhui Province, China
(2108085MF200)

0 引言

永磁同步电机 (Permanent Magnet Synchronous

Motor, PMSM) 因具有高性能、体积小等特点^[1-3], 在风能发电、电动汽车和机器人等领域得到广泛应用^[4-5]。传统的比例积分 (Proportional Integral, PI) 控制器具有调节方便和适用性强的优点^[6]。但采用 PI 控制等线性控制方法容易受到内外部不确定因素的影响, 特别在高性能应用场合难以满足控制精度的要求^[7]。

为解决上述问题, 已有许多先进控制方法被提出, 如鲁棒控制^[8-9]、模糊控制^[10]、自抗扰控制^[11-13] 及滑模控制 (Sliding Mode Control, SMC)^[14-15] 等^[16]。其中, SMC 具有抗扰性强、动态响应快等特点^[17], 被广泛应用于 PMSM 的调速系统。但 SMC 的滑模面大多是线性的, 导致系统无法快速收敛到平衡点, 相比传统线性滑模面, 文献[18]设计了一种非奇异快速终端滑模面, 能够提高滑模动态响应, 但由于滑模控制器中存在转速的微分项, 容易受到外部扰动的影响。文献[19]采用积分滑模面设计的滑模控制器, 可以抑制系统的固有抖振, 且避免了转速微分对调速系统性能的影响。抖振是系统轨迹对滑模面的趋近效果不理想所产生的, 趋近效果主要受滑模趋近律的品质影响, 因此滑模趋近律的优化是抑制系统抖振的关键。文献[20]在变速趋近律中引入了滑模变量, 并用双曲正切函数来代替开关函数, 有效抑制了调速系统的抖振现象。文献[21]在双幂次趋近律的基础上引入系统状态变量和滑模变量, 提高了滑模响应速度, 但参数较多整定困难。趋近律的改进在一定程度上可以解决系统抖振和趋近速度问题, 但当系统受扰动时, 滑模控制增益必须与这类扰动的大小成比例地增加, 然而, 较大的增益会加剧系统的抖振, 降低系统的鲁棒性。为此, 文献[22]设计了一种滑模扰动观测器 (Sliding Mode Disturbance Observer, SMDO), 通过对速度控制器的扰动进行补偿, 在保证系统跟踪精度的前提下增强了控制系统的抗扰性能, 但该观测器的趋近速度较慢。

为了进一步提高表贴式永磁同步电机 (Surface-mounted Permanent Magnet Synchronous Motor, SPMSM) 调速系统的鲁棒性, 本文提出了一种基于改进趋近律的 SPMSM 滑模非奇异快速终端滑模观测器 (Non-singular Fast Terminal Sliding Mode Observer, NFTSMO) 控制。设计了一种改进

的变速双幂次趋近律, 同时该趋近律和积分滑模面结合设计了滑模控制器; 并提出了一种 NFTSMO 对滑模控制器的扰动进行前馈补偿, 有效提高了调速系统的抗扰性和鲁棒性。最后, 通过仿真和试验证明了基于改进变速双幂次趋近律的 SPMSM 滑模 NFTSMO 控制方法的可行性。

1 SPMSM 调速控制系统理论

1.1 SPMSM 的数学模型

对于 SPMSM 而言, 假设不考虑永磁体的磁滞、涡流损耗及铁心饱和, 则 SPMSM 的数学模型为

$$\begin{cases} U_d = R_s i_d + L_d \frac{di_d}{dt} - \omega_e L_q i_q \\ U_q = R_s i_q + L_q \frac{di_q}{dt} + \omega_e (L_d i_d + \psi_f) \\ T_e = \frac{3}{2} P_n i_q [(L_d - L_q) i_d + \psi_f] \\ J \frac{d\omega_m}{dt} = T_e - T_L - B\omega_m \end{cases} \quad (1)$$

式中: U_d 、 i_d 、 L_d 分别为直轴定子的电压、电流、电感; U_q 、 i_q 、 L_q 分别为交轴定子的电压、电流、电感; ω_m 为电机机械角速度; ω_e 为电机电角速度, $\omega_e = P_n \omega_m$; P_n 为电机极对数; T_L 为负载转矩; T_e 为电磁转矩; J 为转动惯量; B 为阻尼系数; R_s 为定子电阻; ψ_f 为永磁体磁链。

对于 SPMSM, 电机的直轴和交轴电感相等, 则有 $L_d = L_q = L_s$, 采用 $i_d = 0$ 的控制策略, 使得电磁转矩输出最大化。故 SPMSM 数学模型可变为

$$\begin{cases} \frac{di_q}{dt} = \frac{1}{L_s} (-R_s i_q - \omega_e \psi_f + U_q) \\ J \frac{d\omega_m}{dt} = \frac{3}{2} P_n \psi_f i_q - T_L - B\omega_m \end{cases} \quad (2)$$

1.2 改进型变速双幂次趋近律设计

为了解决传统趋近律存在的抖振大、抗扰性差等问题, 本文提出在趋近律中引入系统状态变量和滑模变量的改进变速双幂次趋近律 (Improved Variable-Speed Double-Power Reaching Law, IVSDPRL):

$$\begin{cases} \dot{s} = -k_1 |s|^n \tanh(\mu s) - k_2 |s|^{\frac{\theta + \text{sgn}(1-s)}{2}} s \\ \eta = \sigma - \frac{1}{\lambda + |x|} \\ \lim_{t \rightarrow \infty} |x| = 0 \end{cases} \quad (3)$$

© Editorial Office of Electric Machines & Control Application. This is an open access article under the CC BY-NC-ND 4.0 license.

的观测值; g 为观测器增益; u_{smo} 为滑模控制律。

将转速观测误差 e_ω 和系统总扰动观测误差 e_d 定义为

$$\begin{cases} e_\omega = \hat{\omega}_m - \omega_m \\ e_d = \hat{d}(t) - d(t) \end{cases} \quad (13)$$

由式(4)、式(11)和式(12)可得 NFTSMO 误差方程为

$$\begin{cases} \dot{e}_\omega = -\frac{B}{J}e_\omega - \frac{1}{J}e_d + u_{\text{smo}} \\ \dot{e}_d = gu_{\text{smo}} \end{cases} \quad (14)$$

为了提高调速系统的跟踪性能,设计了一种非奇异快速终端滑模面为

$$s = e_\omega + \lambda_1 |e_\omega|^{\frac{g_1}{t_1}} \text{sgn}(e_\omega) + \lambda_2 |\dot{e}_\omega|^{\frac{g_2}{t_2}} \text{sgn}(\dot{e}_\omega) \quad (15)$$

式中: λ_1, λ_2 均为常数; g_1, t_1, g_2 和 t_2 均为奇数,且满足 $1 < g_2/t_2 < 2, g_1/t_1 > g_2/t_2$ 。

为了减小 NFTSMO 稳态误差,设计了双幂次趋近律^[24]:

$$\dot{s} = -\tau_1 |s|^{h_1} \text{sgn}(s) - \tau_2 |s|^{h_2} \text{sgn}(s) \quad (16)$$

式中: τ_1, τ_2, h_1 和 h_2 均为常数,且满足 $0 < h_1 < 1, h_2 > 1$ 。

针对式(14)误差方程,将 $-e_d/J$ 项作为扰动项,结合式(15)和式(16)可设计 NFTSMO 的控制律为

$$u_{\text{smo}} = \int_0^t \left[1 + \frac{\lambda_1 g_1}{t_1} |e_\omega|^{\frac{g_1}{t_1}-1} \left[\frac{t_2}{\lambda_2 g_2} \dot{e}_\omega^{2-\frac{g_2}{t_2}} \right] \right] dt + \int_0^t \left[-\frac{B}{J} \dot{e}_\omega + K \right] dt \quad (17)$$

式中: $K = \tau_1 |s|^{h_1} \text{sgn}(s) + \tau_2 |s|^{h_2} \text{sgn}(s)$ 。

图2是 NFTSMO 的结构图,通过调整合适的设计参数, NFTSMO 能使系统控制精度提高,且具有良好的跟踪效果。

3.2 性能分析

为了验证 NFTSMO 的控制性能,在阶跃负载和正弦负载扰动下进行了仿真对比(TL 为参考值),结果如图3所示。其中,阶跃负载扰动是在 0.1 s 加 8 N,然后在 0.2 s~0.4 s 依次递减 2 N,正弦负载扰动是幅值为 8 N、周期为 0.02 s 的正弦扰动。从图3(a)中可以看出加减负载阶段 NFTSMO 无明显抖振和脉动现象,同时有较

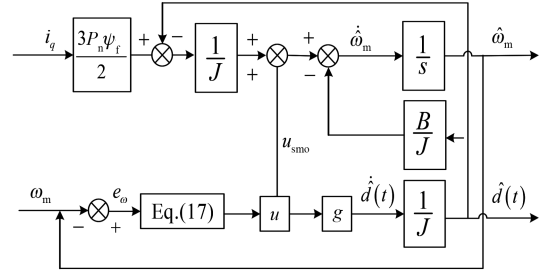
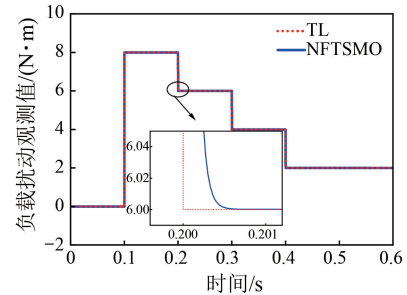


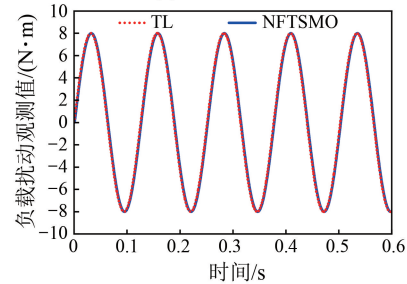
图2 NFTSMO 结构

Fig. 2 NFTSMO structure

快的响应速度。由图3(b)可知, NFTSMO 的正弦波形与估计值近乎重合,表明了 NFTSMO 具有较好的跟踪性能,且能更好的将估计值反馈到速度控制器,提高调速控制系统的抗扰性。



(a) 阶跃负载波形



(b) 正弦负载波形

图3 观测器性能分析

Fig. 3 Observer performance analysis

4 仿真与试验分析

4.1 仿真分析

为验证所提方法的可行性,对3种控制方法进行了仿真对比。其中,方法1为传统滑模控制^[25],方法2为参考滑模控制^[26],方法3基于 NFTSMO 的 IVSDPRL 控制。三种控制方法的具体参数如表1所示,电机运行参数如表2所示。

4.1.1 空载起动仿真分析

为了验证本文所提 IVSDPRL 的动态性能,将电机空载起动至 300 r/min,如图4所示。由图

表 1 三种控制方法参数	
Tab. 1 Parameters of three control methods	
控制方法	参数值
方法 1	$k_1 = 1\,000, k_2 = 300, \alpha = 0.3, c = 60$
方法 2	$k_1 = 1\,000, k_2 = 300, \sigma = 0.8, \lambda = 300, c = 60$
方法 3	IVSDPRL: $k_1 = 1\,000, k_2 = 300, \sigma = 0.8, \lambda = 300, \vartheta = 0.018, \mu = 1, c = 60$ NFTSMO: $\tau_1 = 0.56, \tau_2 = 0.89, h_1 = 0.32, h_2 = 1.2, \lambda_1 = 17\,000, \lambda_2 = 0.1, g_1 = 71, t_1 = 55, g_2 = 35, t_2 = 33, g = 33$

表 2 电机运行参数	
Tab. 2 Motor operation parameters	
参数名称	参数值
极对数 P_n	4
定子电阻 R_s/Ω	2.875
直轴电感 L_d/mH	8.5
交轴电感 L_q/mH	8.5
直流侧电压 U_{dc}/V	311
永磁体磁链 ψ_f/Wb	0.175
转动惯量 $J/(\text{kg}\cdot\text{m}^2)$	0.003
阻尼系数 $B/(\text{N}\cdot\text{m}\cdot\text{s})$	0.008

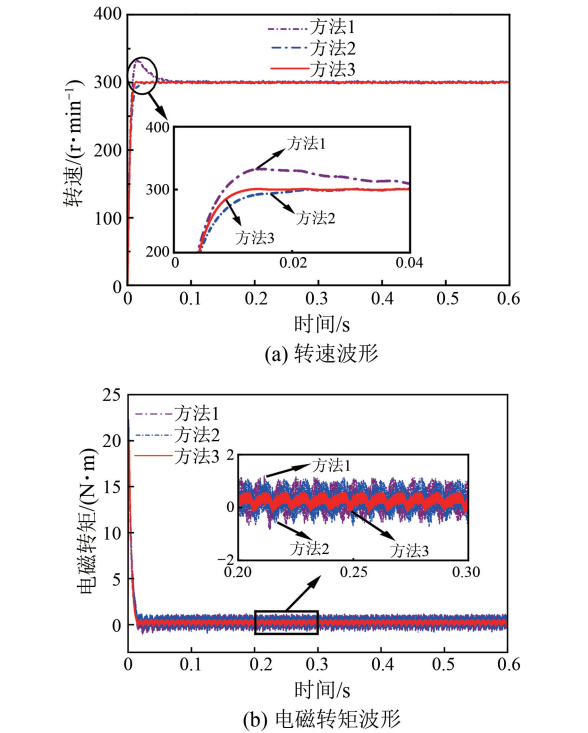


图 4 空载起动时的仿真曲线

Fig. 4 Simulation curves during no-load startup

4(a)可知,方法 3 的起动响应时间最快达到 0.015 s,而方法 1 的响应最慢为 0.12 s;同时方法

1有明显超调,而方法2、方法3无超调,但方法2的响应时间远小于方法 3。由图 4(b)可知,方法 3 的电磁转矩脉动范围远小于方法 1、方法 2。由此可见,基于 IVSDPRL 的速度控制器能够抑制超调,缩短响应时间。

4.1.2 加载负载仿真分析

为了验证本文所提控制方法的抗扰性能,将给定转速保持在 600 r/min,且在 0.2 s~0.4 s 之间加载负载 8 N·m,如图 5 所示。由图 5 可知,方法 1、方法 2、方法 3 在加载阶段速度掉落量分别为 77 r/min、54 r/min、14 r/min,速度恢复时间分别为 0.098 s、0.035 s、0.02 s,同时电磁转矩的响应时间和转矩脉动范围由小到大分别是方法 3、方法 2、方法 1。综上所述,本文所设计的方法能够在加载负载时有较好的抗扰性,并可以快速跟踪给定转速。

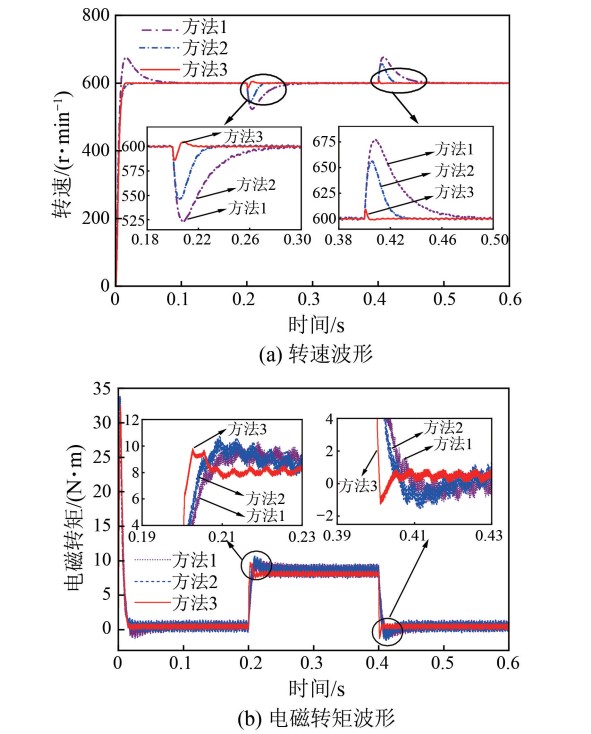


图 5 加载负载时的仿真曲线

Fig. 5 Simulation curves during load increase and decrease

4.1.3 变速仿真分析

为了验证本文所提控制方法的鲁棒性,将给定转速从 500 r/min 变速到 800 r/min,如图 6 所示。由图 6 可知,方法 1 和方法 2 与方法 3 相比有明显超调,方法 2 与方法 3 相比响应速度明显变慢,且

方法 3 的转矩脉动范围均比方法 1、方法 2 小。由此可知,本文所设计的方法在变速阶段具有较好的鲁棒性,能缩短转矩响应时间,减小转矩脉动。

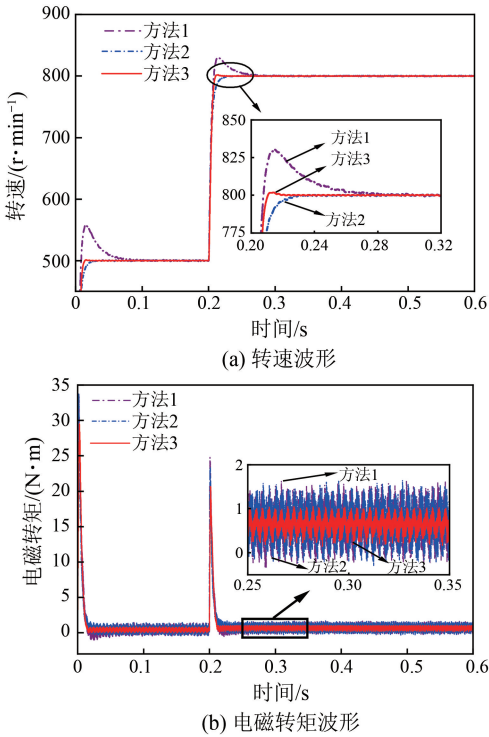


图 6 变速时的仿真曲线
Fig. 6 Simulation curves during speed variation

4.2 试验分析

为进一步验证所提方法的有效性,在如图 7 所示的电机试验平台上进行滑模控制试验。电机硬件系统由 PMSM、直流有刷电机和转速转矩测量仪组成,而电机驱动系统主要由电机驱动板和数字信号处理(Digital Signal Processing, DSP)控制器组成,其中 DSP 控制器采用 TMS320F28335。电机试验参数如表 3 所示。

表 3 电机试验参数

Tab. 3 Motor experimental parameters	
参数名称	参数值
极对数 P_n	4
额定电流/A	12.5
定子电阻 R_s/Ω	0.25
定子电感 L_s/mH	0.5
额定电压 U_N/V	48
额定功率 P_N/kW	0.4
额定转速/ $(\text{r}\cdot\text{min}^{-1})$	3 000

图 8 为空载起动时,转速从 0 到 300 r/min 的

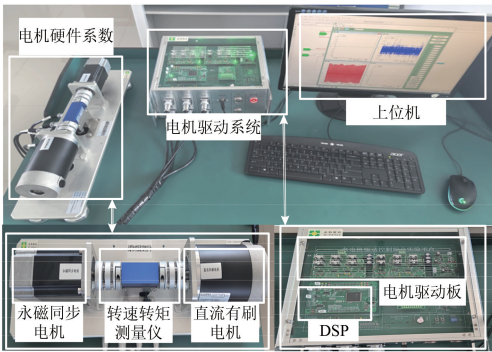


图 7 电机试验平台
Fig. 7 Motor experimental platform

试验波形对比。由图 8 可知,相比于方法 1、方法 2,所提基于 NFTSMO 的 IVSDPRL 控制方法 3 响应速度更快,稳态时的转矩脉动也更加平缓。其中,方法 3 的响应时间为 2.23 s,方法 2 为 2.72 s,方法 1 为 3.5 s。这表明所提控制方法能提高系统的响应速度。

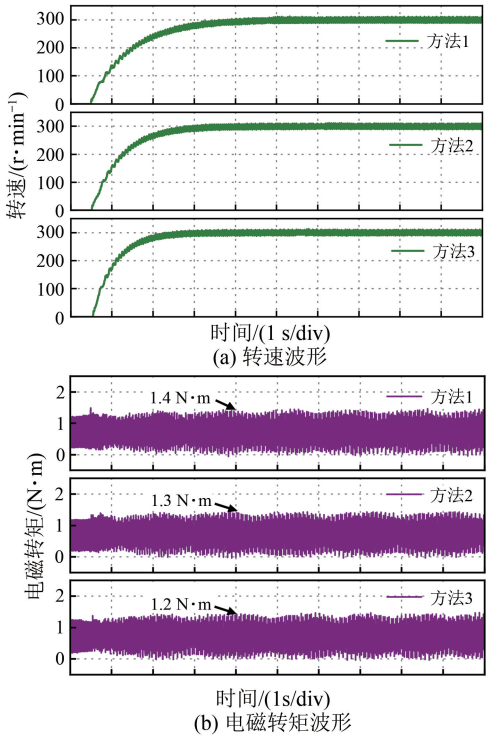


图 8 空载起动时转速和电磁转矩的试验波形对比
Fig. 8 Comparison of experimental waveforms for speed and electromagnetic torque during no-load startup

图 9 为转速在 600 r/min 加载负载时的试验波形对比。由图 9 可知,在加载时方法 1、方法 2、方法 3 的速度掉落分别为 94 r/min、65 r/min、43 r/min,在减载时方法 1、方法 2、方法 3 的速度

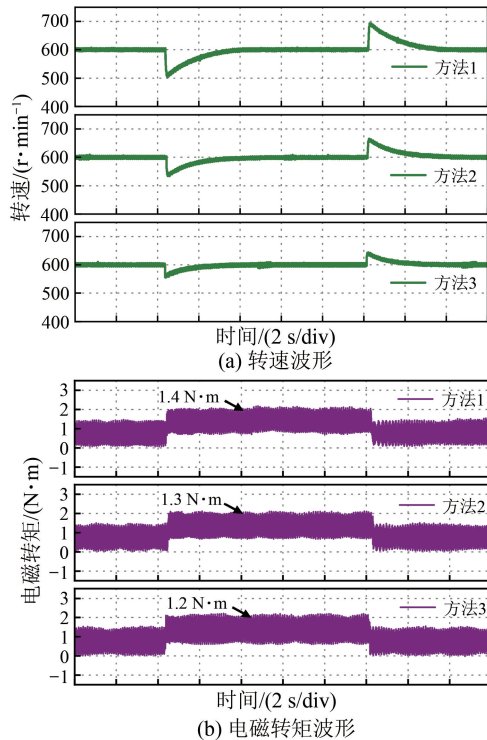


图 9 加减速时转速和电磁转矩的试验波形对比

Fig. 9 Comparison of experimental waveforms for speed and electromagnetic torque during load increase and decrease

恢复时间分别为 3.8 s、3.5 s、2.3 s。表明了方法 3 在加减速时转速掉落与上升量均低于方法 1 和方法 2, 验证了所提方法 3 具有较好的抗干扰性。

图 10 为转速从 500 r/min 增加到 800 r/min 的试验波形对比。由图 10 可知, 本文所提方法 3 在速度变换时的响应时间最快, 其时间为 1.8 s, 方法 2 为 2.1 s, 方法 1 为 2.6 s, 验证了所提方法的快速性和动态性, 且该方法的速度超调和转矩的稳定误差均小于其他方法。

5 结语

本文提出了一种基于 IVSDPRL 的 SPMSM 滑模 NFTSMO 调速控制方法。为了解决传统滑趋近律中响应速度慢和系统抖振大等问题, 设计了一种 IVSDPRL, 同时结合 NFTSMO 进行实时观测负载扰动, 将观测的扰动补偿到速度控制器中, 提高了系统的鲁棒性和抗扰性。通过仿真和试验分析, 将本文提出的控制方法和传统快速幂次趋近律及参考变速双幂次趋近律的滑模控制进行了对比。结果表明, 本文所提方

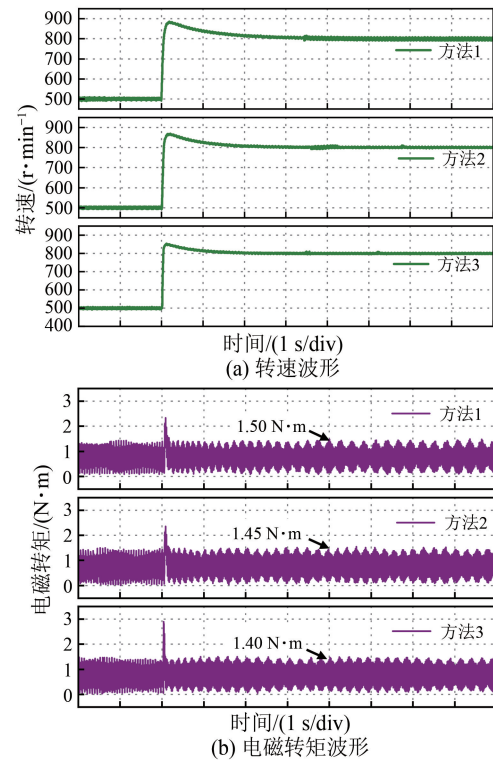


图 10 变速时转速和电磁转矩的试验波形对比

Fig. 10 Comparison of experimental waveforms for speed and electromagnetic torque during speed variation

法能够提高系统的动态性和抗干扰性, 电机负载时转速变化小、恢复时间短, 电机变速时转速超调小、响应时间快, 且电机稳定运行时能够抑制转速和转矩的脉动范围。

利益冲突声明

所有作者声明不存在利益冲突。

All authors declare no relevant conflict of interests.

作者贡献

刘澎澎进行了方案设计、内容总结与论文撰写, 王仲根、王珊珊、朱小兵参与了论文的审核与修改。所有作者均阅读并同意了最终稿件的提交。

The scheme design, content summary, and paper writing were carried out by Liu Pengpeng. The manuscript was revised by Wang Zhonggen, Wang Shanshan, and Zhu Xiaobing. All authors have read the final version of the paper and consented for submission.

参考文献

- [1] 李耀华, 邓益志, 张鑫泉, 等. 永磁同步电机模型预测转矩控制共模电压抑制研究[J]. 电机与控制应用, 2024, 51(7): 33-42.
LI Y H, DENG Y Z, ZHANG X Q, et al. Research on suppression common-mode voltage of MPTC for PMSM [J]. Electric Machines & Control Application, 2024, 51(7): 33-42.
- [2] 王琛琛, 苟立峰, 周明磊, 等. 基于改进的离散域二阶滑模观测器的内置式永磁同步电机无位置传感器控制[J]. 电工技术学报, 2023, 38(2): 387-397.
WANG C C, GOU L F, ZHOU M L, et al. Sensorless control of IPMSM based on improved discrete second-order sliding mode observer [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(2): 387-397.
- [3] SONG X D, HAN B C, ZHENG S Q, et al. A novel sensorless rotor position detection method for high-speed surface PM motors in a wide speed range [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 33(8): 7083-7093.
- [4] 彭诚, 王兵, 郭皓源, 等. 基于非奇异负载转矩观测器的永磁同步电机抗扰动控制[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2024, (4): 115-120.
PENG C, WANG B, GUO H Y, et al. Research on anti-disturbance control of PMSM based on non-singular torque observer [J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2024, (4): 115-120.
- [5] 叶宇豪, 彭飞, 黄允凯. 多电机同步运动控制技术综述[J]. 电工技术学报, 2021, 36(14): 2922-2935.
YE Y H, PENG F, HUANG Y K. Overview of multi-motor synchronous motion control technology [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(14): 2922-2935.
- [6] LV G, XU W, WANG P Y. Control strategy for electric spring based on fuzzy proportional-integral self-adaptive control in variable universe [J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(18): 172-178.
- [7] 付东学, 赵希梅. 永磁直线同步电机自适应反推全局快速终端滑模控制[J]. 电工技术学报, 2020, 35(8): 1634-1641.
FU D X, ZHAO X M. Adaptive backstepping global fast terminal sliding mode control for permanent magnet linear synchronous motor [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(8): 1634-1641.
- [8] 侯利民, 申鹤松, 李蕴倬, 等. 永磁同步电机调速系统的非线性鲁棒滑模控制[J]. 电机与控制学报, 2020, 24(6): 143-152.
HOU L M, SHEN H S, LI Y Z, et al. Nonlinear robust sliding mode control of permanent magnet synchronous motor speed regulation system [J]. Electric Machines and Control, 2020, 24(6): 143-152.
- [9] 洪俊杰, 赵明郎, 严柏平, 等. 带扰动补偿的永磁同步电机鲁棒 H_∞ 控制[J]. 电机与控制应用, 2024, 51(4): 70-81.
HONG J J, ZHAO M L, YAN B P, et al. Robust H_∞ control of permanent magnet synchronous motor with disturbance compensation [J]. Electric Machines & Control Application, 2024, 51(4): 70-81.
- [10] 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.
- [11] 张宁, 徐传芳, 李延帅. 基于自抗扰的单相 PWM 整流器直接功率控制[J]. 电机与控制应用, 2023, 50(12): 83-91.
ZHANG N, XU C F, LI Y S. Single-phase PWM rectifier power feedforward decoupling control based on active disturbance rejection [J]. Electric Machines & Control Application, 2023, 50(12): 83-91.
- [12] 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.
- [13] 刘书伟, 姜宏, 章翔峰, 等. 改进自抗扰的 PMSM 双环伺服系统控制研究[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2023, (5): 120-124.
LIU S W, JIANG H, ZHANG X F, et al. Improved

- active disturbance rejection PMSM dual-loop servo system control research [J]. *Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique*, 2023, (5): 120-124.
- [14] 李远清, 程善美. 基于滑模交叉耦合的双永磁电机转速同步控制[J]. *组合机床与自动化加工技术*, 2024, (3): 114-118.
- LI Y Q, CHENG S M. Dual-PMSM speed synchronization control based on sliding mode cross-coupling control [J]. *Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique*, 2024, (3): 114-118.
- [15] 吕帅帅, 林辉, 李兵强, 等. 一种改进的 PMSM 模型预测直接转矩控制方法[J]. *电机与控制学报*, 2020, 24(7): 102-111.
- LV S S, LIN H, LI B Q, et al. Improved model predictive direct torque control for permanent magnet synchronous motor [J]. *Electric Machines and Control*, 2020, 24(7): 102-111.
- [16] 赵凯辉, 周瑞睿, 冷傲杰, 等. 一种永磁同步电机的有限集无模型容错预测控制算法[J]. *电工技术学报*, 2021, 36(1): 27-38.
- ZHAO K H, ZHOU R R, LENG A J, et al. Finite control set model-free fault-tolerant predictive control for permanent magnet synchronous motor [J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2021, 36(1): 27-38.
- [17] XU W, JUNEJO A K, LIU Y, et al. An efficient antidisturbance sliding-mode speed control method for PMSM drive systems [J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2021, 36(6): 6879-6891.
- [18] ZHANG L, TAO R, ZHANG Z X, et al. PMSM non-singular fast terminal sliding mode control with disturbance compensation [J]. *Information Sciences*, 2023, 642: 119040.
- [19] GUO X, HUANG S D, PENG Y, et al. An improved integral sliding mode control for PMSM drives based on new variable rate reaching law with adaptive reduced order PI observer [J]. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 2023, 9(3): 4503-4516.
- [20] QU Y, ZHANG B, CHU H R, et al. Sliding-mode anti-disturbance speed control of permanent magnet synchronous motor based on an advanced reaching law [J]. *ISA Transactions*, 2023, 139: 436-447.
- [21] WANG Y Q, FENG Y T, ZHANG X G, et al. A new reaching law for antidisturbance sliding-mode control of PMSM speed regulation system [J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2020, 35(4): 4117-4126.
- [22] 朱小兵, 王仲根, 高晓嵩. 基于变速趋近律的 PMSM 复合速度控制[J]. *制造技术与机床*, 2024, (6): 95-101.
- ZHU X B, WANG Z G, GAO X S. Composite speed control for PMSM based on varying speed reaching law [J]. *Manufacturing Technology & Machine Tool*, 2024, (6): 95-101.
- [23] AGHABABA M P, AKBARI M E. A chattering-free robust adaptive sliding mode controller for synchronization of two different chaotic systems with unknown uncertainties and external disturbances [J]. *Applied Mathematics and Computation*, 2012, 218(9): 5757-5768.
- [24] 李艳, 孙蕊, 夏宇, 等. 采用改进快速变幂次趋近律的滑模控制方法[J]. *西安交通大学学报*, 2022, 56(12): 118-126.
- LI Y, SUN R, XIA Y, et al. A sliding mode control method with improved rapid power approximation law [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2022, 56(12): 118-126.
- [25] YU S, YU X, SHIRINZADEH B, et al. Continuous finite-time control for robotic manipulators with terminal sliding mode [J]. *Automatica*, 2005, 41(11): 1957-1964.
- [26] 谷爱昱, 庞城洁, 乐敏. 基于改进趋近律的 IPMSM 滑模 NDOB 调速控制[J/OL]. *控制工程*, 2025-1-13. <https://doi.org/10.14107/j.cnki.kzgc.20230382>.
- GU A Y, PANG C J, LE M. Sliding mode and nonlinear disturbance observer speed control of IPMSM based on improved reaching law [J/OL]. *Control Engineering of China*, 2025-1-13. <https://doi.org/10.14107/j.cnki.kzgc.20230382>.

收稿日期:2024-09-06

收到修改稿日期:2024-11-25

作者简介:

刘澎澎(2000-),男,硕士研究生,研究方向为电机控制, pengliu2024@163.com;

* 通信作者:王仲根(1981-),男,博士,教授,研究方向为电机控制与设计, zgwang@ahu.edu.cn。