

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2025.01.004

基于级联惯性负载转矩观测器的 永磁伺服电机复合抗扰控制

彭 诚^{1,2}, 王 兵^{1,2}, 易志萱¹, 李赐图¹

(1. 湖南工业大学 电气与信息工程学院, 湖南 株洲 412007;
2. 湖南工业大学 电传动控制与智能装备湖南省重点实验室, 湖南 株洲 412007)

摘 要: 针对永磁伺服电机在运行时位置跟踪精度差和抗干扰性能弱等问题, 提出一种模型预测位置控制与非奇异快速终端滑模速度控制相结合的复合模型预测控制策略。该控制策略采用非奇异快速终端滑模设计速度控制器, 以有效提高响应速度及系统鲁棒性; 采用模型预测位置控制提高位置跟踪精度; 同时, 采用基于转动惯量观测和负载转矩观测器相结合的级联惯性负载转矩观测器观测负载转矩并进行前馈补偿, 进一步提高系统的抗干扰性能。通过仿真和实验结果可得, 所提复合模型预测控制可有效提高永磁伺服电机的动态响应速度和抗负载扰动能力。

关键词: 永磁伺服电机; 模型预测位置控制; 滑模控制; 负载转矩观测器; 转动惯量辨识

中图分类号: TM351

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2025)01-0026-09

引文格式: 彭 诚, 王 兵, 易志萱, 等. 基于级联惯性负载转矩观测器的永磁伺服电机复合抗扰控制[J]. 湖南工业大学学报, 2025, 39(1): 26-34.

PMSM Composite Disturbance Rejection Control Based on Cascaded Inertia Load Torque Observers

PENG Cheng^{1,2}, WANG Bing^{1,2}, YI Zhixuan¹, LI Citu¹

(1. College of Electrical and Information Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China;
2. Hunan Provincial Key Laboratory of Electric Drive Control and Intelligent Equipment,
Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China)

Abstract: In view of the flaws of poor position tracking accuracy and weak anti-interference performance of permanent magnet servo motors during operation, a composite model predictive control strategy has thus been proposed, with model predictive position control combined with non-singular fast terminal sliding mode speed control. The control strategy adopts a non-singular fast terminal sliding mode design speed controller for an effective improvement of the response speed and system robustness, with the model predictive position control adopted for an improvement of the position tracking accuracy. Meanwhile, a cascaded inertia load torque observer, which is based on the combination of rotational inertia observation and load torque observers, is adopted to observe the load torque and perform feed-forward compensation, thus further improving the anti-interference performance of the system. Based on simulation and experimental results, it can be concluded that the proposed composite model predictive control helps to effectively improve the dynamic response speed and load disturbance resistance of permanent magnet servo motors.

收稿日期: 2024-02-10

基金项目: 湖南省自然科学基金资助项目 (2023JJ50193)

作者简介: 彭 诚, 男, 湖南工业大学硕士生, 主要研究方向为电力传动技术及其控制, E-mail: P13574172680@163.com

通信作者: 王 兵, 男, 湖南株洲人, 湖南工业大学副教授, 主要研究方向为特种电机及其控制,

E-mail: 380379456@qq.com

Keywords: permanent magnet servo motor; model predictive position control; sliding mode control; load torque observer; rotational inertia identification

1 研究背景

永磁同步电机 (permanent magnet synchronous motor, PMSM) 伺服系统因其系统精度较高、调速范围较广、能耗较小和动态转矩较快等优势, 在数控机床、机器人、汽车工业乃至航天航空等领域被广泛应用^[1-2], 且提高系统控制精度和动态响应速度已成为该领域研究热点。伺服系统位置控制常采用位置-速度-电流三环级联比例-积分 (PI) 控制^[3-4], PI 控制因其结构简单, 控制方便而被广泛应用。为追求高精度和高动态响应, 较多研究者进行了深入研究, 并提出了高阶滑模控制^[5-7]、自适应控制^[8-9]、模型预测控制^[10-12]及数据驱动等高级控制策略。

模型预测控制 (model predictive control, MPC) 是产生于 20 世纪 70 年代后期的一种计算机控制方法。其概念直观、易于建模、无需精确模型和复杂控制参数设计, 对工业控制过程中的非线性及不确定性问题有非常好的效果, 且易于增加约束、动态响应快、鲁棒性强。Michel Fliess 提出的无模型控制 (model-free control, MFC) 方法, 降低了对具体数学模型的依赖, 避免了未知扰动对电机控制性能的影响^[13]。王兵等^[14]认为, 电机扰动主要来自负载转矩和转动惯量的变化, 并采用改进型扰动滑模观测器将负载转矩实时观测出来, 从而通过前馈补偿减少了对系统扰动的影响。李先弘等^[15]采用龙伯格状态观测器观测负载转矩的控制策略, 抑制负载扰动对电机伺服系统控制性能的影响。杨羽萌等^[16]采用滑模控制器控制电机, 并采用改进扩展状态观测器重构外部扰动, 提高系统的抗扰能力。对于二次系统, 文献 [17] 构造了一种新的高阶广义扩展状态观测估计多重干扰, 并提出了一种包含干扰补偿器的状态反馈控制律以消除多重干扰对系统模型预测控制器输出的不利影响。

为能增强控制系统的抗干扰性能、提高系统的控制精度, 本文将 MFC 和非奇异终端滑模观测器 (nonsingular terminal sliding mode observer for load torque, LT-NTSMO) 结合, 设计了一种无模型非奇异终端滑模负载转矩观测器, 同时采用模型参考自适应算法 (model reference adaptive control, MRAC) 辨识电机转动惯量, 将惯量输入负载转矩观测器, 实时精准观测出总扰动, 进行前馈补偿, 有效抑制总扰动对控制系统的影响。速度环采用非奇异快速终端

滑模控制器 (nonsingular fast terminal sliding mode, NFTSMC), 位置环采用 MPC 模型预测控制, 以提高伺服系统的控制精度。

2 PMSM 数学模型

PMSM 在 d 、 q 轴旋转坐标系下的数学模型如下:

$$\begin{cases} u_d = R_s i_d - \omega L_q i_q + L_d \frac{di_d}{dt}, \\ u_q = R_s i_q + \omega \psi_f + \omega L_d i_d + L_q \frac{di_q}{dt}, \\ \psi_d = L_d i_d + \psi_f, \\ \psi_q = L_q i_q, \\ T_e = \frac{3}{2} p [\psi_f i_q + (L_d - L_q) i_d i_q], \\ T_e - T_L - B \omega_m = \frac{J}{P} \frac{d\omega}{dt}, \\ \frac{d\theta}{dt} = \omega_m. \end{cases} \quad (1)$$

式中: u_d 、 u_q 分别为 d 、 q 轴电压; i_d 、 i_q 分别为 d 、 q 轴电流; L_d 、 L_q 分别为 d 、 q 轴电感; ψ_d 、 ψ_q 分别为 d 、 q 轴磁链; R_s 为定子电阻; ψ_f 为永磁体磁通; J 为转动惯量; p 为极对数; B 为黏滞系数; ω_m 为机械速度; ω 为电角速度; T_e 为电磁转矩; T_L 为机械负载转矩。

3 非奇异终端滑模负载转矩观测器

由于传统一阶滑模负载转矩观测器受反馈增益取值的影响较大, 故快速准确观测出各种内外扰动存在较大难度。为解决这一问题, 本研究设计了一种积分非奇异终端滑模负载转矩观测器, 以实时观测各种内外扰动, 并将扰动转化为负载观测值, 结合控制器对 i_q 进行补偿, 以减少负载变化及其他扰动给系统带来的不稳定性, 达到提高控制精度的目的。状态方程选择如下可用于内置式和表贴式永磁同步电机的运动方程:

$$\begin{cases} \dot{\omega}_m = \frac{3p[\psi_f + (L_d - L_q)i_d]}{2J} i_q - \frac{B_m}{J} \omega_m - \frac{1}{J} T_L, \\ \dot{T}_L = 0. \end{cases} \quad (2)$$

在式 (2) 的基础上, 以 T_L 与 ω_m 为观测对象, 建立如下负载转矩观测器:

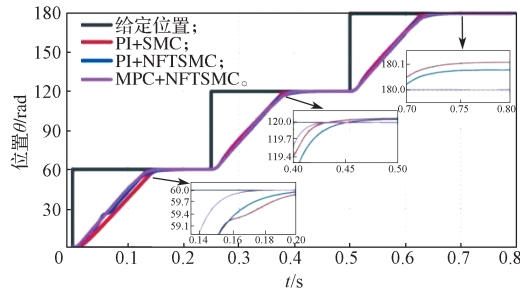
6 实验验证

本节拟通过仿真平台和电机平台实验来验证由 MPC 和非奇异快速终端滑模控制复合控制对于位置跟踪的有效性, 以及在速度控制工况下, 非奇异滑模负载观测器的有效性。并将负载转矩线性滑模观测器和非奇异终端负载转矩滑模观测器进行对比仿真, 对比系统采用相同的控制策略, 电流环使用 PI 控制。永磁同步电机的具体参数与取值见表 1。

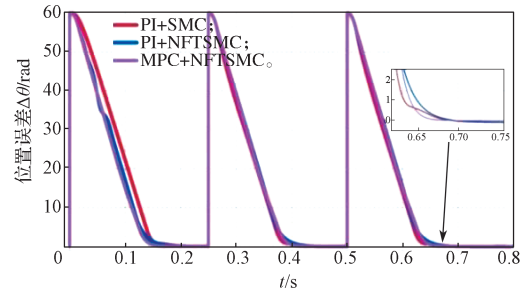
表 1 永磁同步电机参数值

Table 1 Parameter values of permanent magnet synchronous motors

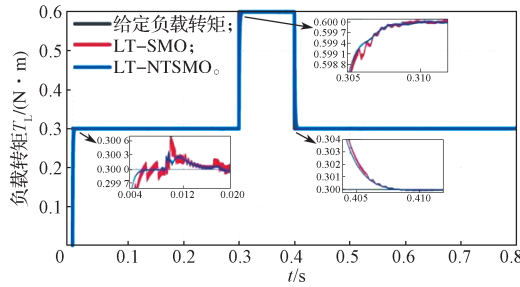
电机参数	取值	电机参数	取值
额定转速 $n/(\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$	1 500	交轴电感 L_q/mH	0.9
额定电压 U_N/V	24	永磁体磁链 $\Psi_{\text{ro}}/\text{Wb}$	0.009 6
额定电流 I_N/A	7.5	转动惯量 $J/(\text{kg} \cdot \text{m}^2)$	0.189×10^{-3}
定子电阻 R_{so}/Ω	0.33	额定负载 $T_n/(\text{N} \cdot \text{m})$	0.637
直轴电感 L_d/mH	0.9	极对数 P_n	4



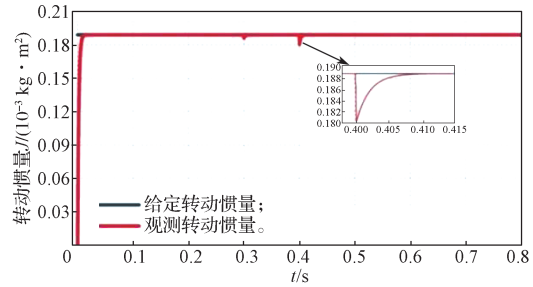
a) 位置跟踪对比图



b) 位置误差对比图



c) 转矩观测对比图



d) 转动惯量辨识结果

图 4 位置阶跃给定分析工况下的仿真结果

Fig. 4 Simulation results under the given position step analysis conditions

6.2 位置正弦给定分析

为了验证永磁同步电机系统在位置正弦给定工况下受到负载转矩扰动时的位置跟踪性能, 设定初始时刻的负载转矩 $T_L=0.3 \text{ N} \cdot \text{m}$, 在系统运行 0.3 s 和 0.4 s 时, 进行负载转矩突变, 分别给定 $0.6 \text{ N} \cdot \text{m}$ 和 $0.3 \text{ N} \cdot \text{m}$ 的负载转矩, 转动惯量给定为 $0.189 \times 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$, 位置给定一个幅值为 10、频率为 10 rad/s、初相为 0 的正弦信号, 观察比较 PI+SMC、PI+NFTSMC 和 MPC+NFTSMC 共 3 种不同控制策略下的位置跟踪效

6.1 位置阶跃给定分析

为了测试永磁同步电机系统在位置阶跃给定工况下受到负载转矩扰动时的位置跟踪性能, 设定初始时刻的负载转矩 $T_L=0.3 \text{ N} \cdot \text{m}$, 在系统运行 0.3 s 和 0.4 s 时进行负载转矩突变, 分别给定 $0.6 \text{ N} \cdot \text{m}$ 和 $0.3 \text{ N} \cdot \text{m}$ 的负载转矩, 模拟负载突变情况下的系统运行效果, 系统转动惯量为 $0.189 \times 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ 。在 3 个阶段给定跟踪位置, 分别为 60, 120, 180 rad, 观察并比较 PI+SMC、PI+NFTSMC 和 MPC+NFTSMC 3 种不同控制策略下的位置跟踪效果, 所得结果如图 4 所示。通过分析图 4a 和图 4b 可得, MPC+NFTSMC 位置环加速度环的复合控制与其他两种控制策略相比, 能更快地到达 3 个阶段。从给定的负载转矩仿真对比图 4c, 可以看到 LT-NTSMO 相比 LT-SMO, 其转矩响应速度更快, 观测波动较小, 能精准地对转矩值进行估计。从图 4d 可知, 观测器能够快速观测给定值, 在出现波动时, 也能恢复跟踪。

果, 所得结果如图 5 所示。

通过分析图 5a 和图 5b 可以得知, 位置环 MPC 和加速度环 NFTSMC 的复合控制, 与 PI+SMC 和 PI+NFTSMC 两种控制策略相比, 该复合控制策略能够更快地跟踪正弦给定。由图 5c 可以得知, LT-NTSMO 控制策略下观测转矩的响应速度更快、响应效果更为精准。由图 5d 可以得知, 观测器可以快速观测出转动惯量, 并且在出现扰动时, 也能很快恢复跟踪。

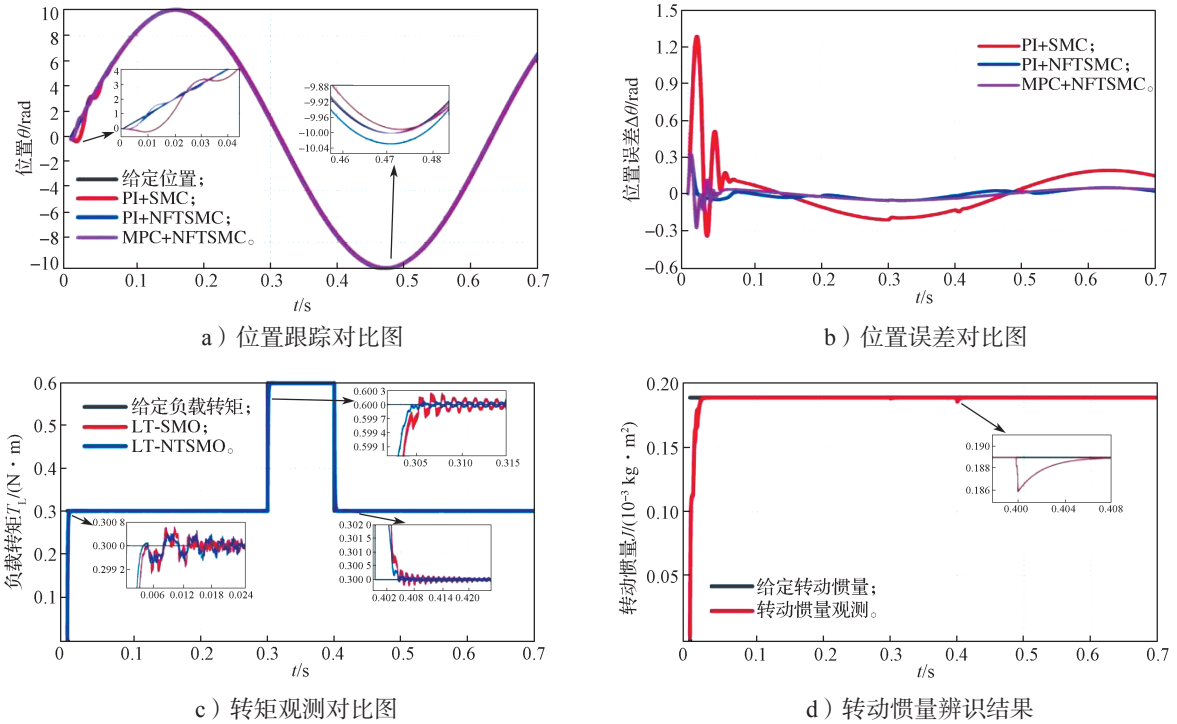


图 5 位置正弦给定分析工况下的仿真结果

Fig. 5 Simulation results under the given sinusoidal position analysis conditions

6.3 电机对拖实验平台验证

PMSM 硬件在环实验平台, 由电机对拖平台和多电机综合驱控实验平台组成, 实验平台采用 Matlab/Simulink 和 TMS320F28335DSP 为核心的软件

和硬件相结合, 仿真模型下载到嵌入式设备上, 实现电机控制。实验采用永磁同步电机和直流电机对拖, PMSM 控制系统的控制框图如图 6 所示,

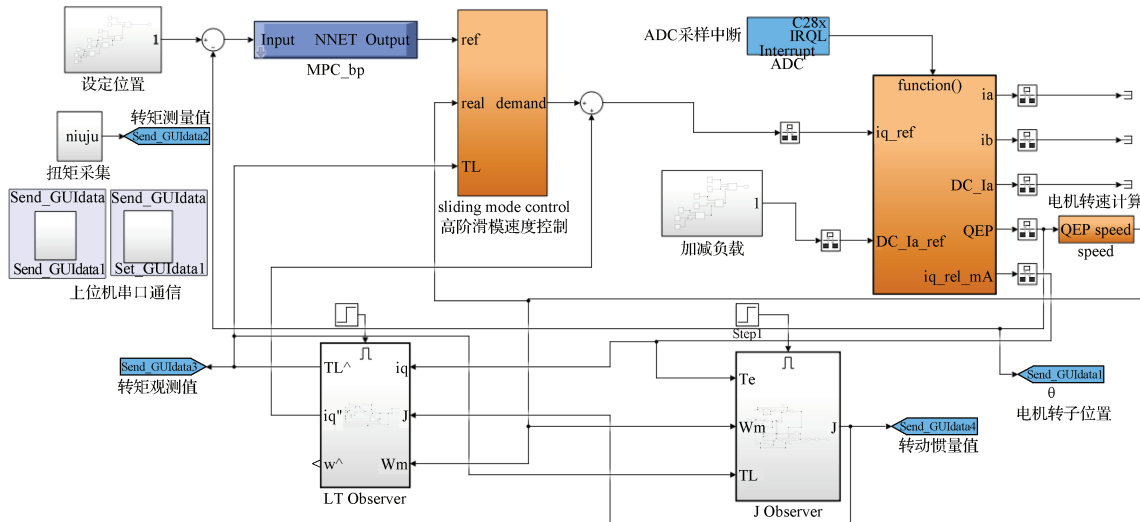


图 6 PMSM 控制系统的控制框图

Fig. 6 PMSM control system block diagram

采用永磁同步电机和直流电机对拖, 实物平台实物照片如图 7 所示。

为验证在位置阶跃跟踪工况下本文所提方法的控制效果。在实验平台上, 电机空载启动。实验运行时间为 8 s, 位置给定 3 个阶段值分别为 10 000, 20 000, 30 000 脉冲数, 在 8.5 s 时通过被拖电机模拟负载将

0.03 N·m 增加到 0.13 N·m, 在 10.5 s 时将负载转矩增加到 0.19 N·m。

在相同的实验条件下, 分别对 PI+SMC、PI+NFTSMC 和 MPC+NFTSMC 进行电机实验。3 种控制策略下的位置跟踪对比图如图 8 所示, 转矩观测对比图如图 9 所示。

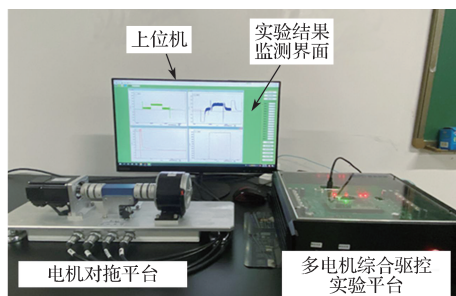


图7 实物平台实物照片

Fig. 7 Physical photos of the platform

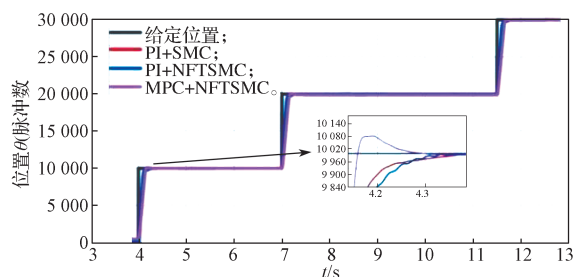


图8 对拖平台位置跟踪对比图

Fig. 8 Comparison chart of the position tracking of the towing platform

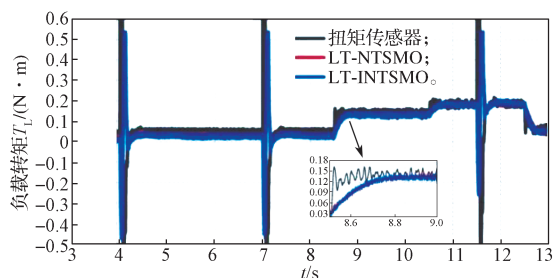


图9 对拖平台转矩对比图

Fig. 9 Comparison chart of load torques on the towing platform

从图8中可以看出,电机在受到来自被拖电机施加的转矩阻力后,仍能对位置进行精确跟踪。通过图9可知,LT-NTSMO响应速度相比于LT-INTSMO更快,数据更加接近实际转矩,也可以看出负载转矩受到转速变化的影响,会出现大幅度变化,但都能很快恢复到稳定状态。

7 结论

本文研究了基于级联惯性负载转矩观测器的永磁伺服电机复合抗扰控制,研究结论如下:

1) 采用MPC+NFTSMC复合控制对位置进行跟踪,可实现永磁伺服电机的位置精确跟踪。

2) 采用了级联观测器策略,通过模型参考自适应算法辨识电机的转动惯量,将惯量输出LT-NTSMO,可实时精准观测出扰动,并进行电流补偿,

达到抗扰动的效果。

3) 仿真和在环实验结果均表明,MPC+NFTSMC复合控制策略响应速度较快、控制精度较高,而LT-NTSMO对负载转矩的观测效果更接近实际值。

参考文献:

- [1] 王卓用, 姚晓东. 基于负载观测器的永磁同步电动机自抗扰控制研究[J]. 上海电机学院学报, 2022, 25(4): 201-206.
WANG Zhouyong, YAO Xiaodong. Research on Active Disturbance Rejection Control of Permanent Magnet Synchronous Motor Based on Load Observer[J]. Journal of Shanghai Dianji University, 2022, 25(4): 201-206.
- [2] 王朝阳, 潘松峰. 基于终端滑模控制器的高精度伺服系统设计[J]. 制造业自动化, 2021, 43(1): 113-117.
WANG Zhaoyang, PAN Songfeng. Design of High Precision Servo System Based on Terminal Sliding Mode Controller[J]. Manufacturing Automation, 2021, 43(1): 113-117.
- [3] 杨明, 刘铠源, 陈扬洋, 等. 基于PI-Lead控制的永磁同步电机双环位置伺服系统[J]. 电工技术学报, 2023, 38(8): 2060-2072.
YANG Ming, LIU Kaiyuan, CHEN Yangyang, et al. Permanent Magnet Synchronous Motor Dual-Loop Position Servo System Based on PI-Lead Control[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(8): 2060-2072.
- [4] 李永聪, 袁森, 冯治国, 等. 伺服电机控制系统调试平台设计与开发[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2020(6): 98-100, 105.
LI Yongcong, YUAN Sen, FENG Zhiguo, et al. Design and Development of Debugging Platform for Servo Motor Control System[J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2020(6): 98-100, 105.
- [5] YANG Qiyao, MA Xiangfeng, WANG Wei, et al. Adaptive Non-Singular Fast Terminal Sliding Mode Trajectory Tracking Control for Robot Manipulators[J]. Electronics, 2022, 11(22): 3672.
- [6] LI Xiangfei, LIU Junqin, YIN Yang, et al. Improved Super-Twisting Non-Singular Fast Terminal Sliding Mode Control of Interior Permanent Magnet Synchronous Motor Considering Time-Varying Disturbance of the System[J]. IEEE Access, 2023, 11: 17485-17496.
- [7] 华玉龙, 孙伟, 迟宝山, 等. 非奇异快速终端滑模控制[J]. 系统工程与电子技术, 2017, 39(5): 1119-1125.
HUA Yulong, SUN Wei, CHI Baoshan, et al. Study on Nonsingular Fast Terminal Sliding Mode Control[J].

- Systems Engineering and Electronics, 2017, 39(5): 1119–1125.
- [8] 王要强, 王秋旭, 聂福全, 等. 基于自适应滑模控制器的 PMSM 调速策略研究 [J]. 郑州大学学报 (理学版), 2024(2): 1–7.
WANG Yaoqiang, WANG Qiuxu, NIE Fuquan, et al. Research on PMSM Speed Control Strategy Based on Adaptive Sliding Mode Controller[J]. Journal of Zhengzhou University(Natural Science Edition), 2024(2): 1–7.
- [9] 赵希梅, 金洋洋, 王丽梅. PMLSM 伺服系统的自适应 RBFNN 反推控制 [J]. 电机与控制学报, 2020, 24(4): 149–157.
ZHAO Ximei, JIN Yangyang, WANG Limei. Adaptive RBFNN Backstepping Control for PMLSM Servo System[J]. Electric Machines and Control, 2020, 24(4): 149–157.
- [10] 徐艳平, 李园园, 周 钦. 永磁同步电机双模型预测转矩控制策略 [J]. 电力电子技术, 2018, 52(6): 37–39.
XU Yanping, LI Yuanyuan, ZHOU Qin. A Double Model Predictive Torque Control Strategy for PMSM[J]. Power Electronics, 2018, 52(6): 37–39.
- [11] 程启明, 程尹曼, 张 磊, 等. 基于 TLIMC-PMSM 的改进型调制模型预测控制方法 [J]. 南方电网技术, 2024(1): 1–12.
CHENG Qiming, CHENG Yinman, ZHANG Lei, et al. Predictive Control Method of Improved Modulation Model Based on TLIMC-PMSM[J]. Southern Power System Technology, 2024(1): 1–12.
- [12] 张保程, 徐艳平, 周 钦. 基于广义双矢量的 PMSM 模型预测电流控制 [J]. 电气传动, 2017, 47(3): 17–20.
ZHANG Baocheng, XU Yanping, ZHOU Qin. Generalized Two-Vector-Based Model Predictive Current Control of Permanent Magnet Synchronous Motor Drives[J]. Electric Drive, 2017, 47(3): 17–20.
- [13] FLIESS Michel, JOIN Cédric. Model-Free Control[J]. International Journal of Control, 2013, 86(12): 2228–2252.
- [14] 王 兵, 颜伟平, 刘 凯, 等. 基于改进型扰动观测器的 PMSM 抗扰动控制研究 [J]. 电工电气, 2021(2): 1–7.
WANG Bing, YAN Weiping, LIU Kai, et al. Research on PMSM Anti-Disturbance Control Based on Improved Disturbance Observer[J]. Electrotechnics Electric, 2021(2): 1–7.
- [15] 李先弘, 潘松峰, 刘镔震, 等. 基于负载观测器的永磁同步电机终端滑模控制系统设计 [J]. 电子设计工程, 2022, 30(1): 155–159.
LI Xianhong, PAN Songfeng, LIU Binzhen, et al. Design of Terminal Sliding Mode Control System of Permanent Magnet Synchronous Motor Based on Load Observer[J]. Electronic Design Engineering, 2022, 30(1): 155–159.
- [16] 杨羽萌, 朱其新. 改进扩张状态观测器下永磁同步电动机滑模控制 [J]. 西安工程大学学报, 2024, 38(1): 1–8, 137.
YANG Yumeng, ZHU Qixin. Sliding Mode Control of Permanent Magnet Synchronous Motor Based on Improved Extended State Observer[J]. Journal of Xi'an Polytechnic University, 2024, 38(1): 1–8, 137.
- [17] JIANG Fuxi, CHENG Shanmei. Additive-State-Decomposition-Based Model Predictive Tracking Control for PMSM Servo System with Multiple Disturbances[J]. Journal of the Franklin Institute, 2023, 360(13): 9378–9398.
- [18] ZHAO Kaihui, YIN Tonghuan, ZHANG Changfan, et al. Robust Model-Free Nonsingular Terminal Sliding Mode Control for PMSM Demagnetization Fault[J]. IEEE Access, 2019, 7: 15737–15748.
- [19] 张 曦, 王 涛, 陈致君, 等. 永磁伺服电机复合模型预测控制 [J]. 电机与控制应用, 2023, 50(4): 8–15.
ZHANG Xi, WANG Tao, CHEN Zhijun, et al. Composite Model Predictive Control for Permanent Magnet Servo Motor[J]. Electric Machines & Control Application, 2023, 50(4): 8–15.
- [20] 王 政, 温从剑, 朱辰雨, 等. 位置伺服永磁电机鲁棒性无差拍预测转速控制 [J]. 电工技术学报, 2023, 38(19): 5176–5184.
WANG Zheng, WEN Congjian, ZHU Chenyu, et al. Deadbeat Predictive Control for Position Servo Permanent Magnet Motor[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(19): 5176–5184.

(责任编辑: 廖友媛)