

基于改进变速度双幂次趋近律的 PMSM 滑模控制

朱玉冰,姚善化

安徽理工大学 电气与信息工程学院,安徽 淮南 232001

摘要:目的 针对永磁同步电机控制系统中趋近速度与系统抖振相互矛盾的问题,提出一种基于改进变速度双幂次趋近律滑模速度控制器和扰动观测器相结合的控制策略。方法 首先,引入 sigmoid 函数替换符号函数,替换后控制信号更加平滑并有效降低了抖振;其次,在幂次项中增加了系统状态变量实现动态关联,从而形成了改进变速度双幂次趋近律,滑模速度控制器展现出更快的趋近速度;最后,针对滑模控制需要较大切换增益来处理扰动的问题,设计了一种扰动观测器对系统扰动进行实时观测和补偿。结果 仿真结果显示:与传统方法相比,改进变速度双幂次趋近律控制下的系统超调量为 0,转速与转矩调整时间至少缩短 0.01 s,三相电流在突加负载后能够快速恢复稳定,波形平滑。结论 改进变速度双幂次趋近律在系统动态时能实现快速无超调响应,缩短突加负载时的调整时间;在系统静态时具备了较强的抗负载转矩扰动能力,有效削弱了抖振现象。

关键词:永磁同步电机;双幂次趋近律;扰动观测器;滑模控制器

中图分类号:TM341;TP273 **文献标识码:**A **doi:**10.16055/j.issn.1672-058X.2026.0004.012

Sliding Mode Control of PMSM Based on an Improved Variable-Speed Double-Power Reaching Law

ZHU Yubing, YAO Shanhua

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

Abstract: Objective To address the inherent conflict between reaching speed and system chattering in permanent magnet synchronous motor (PMSM) control systems, this paper proposes a composite control strategy. This strategy integrates a sliding mode speed controller based on an improved variable-speed double-power reaching law with a disturbance observer. **Methods** First, the sigmoid function was introduced to replace the sign function. This replacement smoothed the control signal and effectively reduced chattering. Second, system state variables were incorporated into the power terms to establish dynamic correlations, resulting in the development of an improved variable-speed double-power reaching law. This enhancement enabled the sliding mode speed controller to achieve a faster reaching speed. Finally, to address the issue that sliding mode control typically requires a high switching gain to handle disturbances, a disturbance observer was designed to observe and compensate for system disturbances in real time. **Results** Simulation results showed that, compared with traditional methods, the system under the proposed control achieved 0 overshoot. The settling time of speed and the settling time of torque were both reduced by at least 0.01 s, and the three-phase currents recovered rapidly with smooth waveforms after a sudden load change. **Conclusion** The improved variable-speed double-power reaching law

收稿日期:2024-05-10 修回日期:2024-09-22 文章编号:1672-058X(2026)04-0089-07

基金项目:国家自然科学基金项目资助(62105004);安徽省教育厅科研项目资助(KJ2020A0308)。

作者简介:朱玉冰(1996—),女,山西忻州人,硕士研究生,从事电机控制研究。

通信作者:姚善化(1966—),男,安徽淮南人,博士,教授,从事电磁场与电磁场理论与电机控制研究。Email:shhyao@aust.edu.cn。

引用格式:朱玉冰,姚善化.基于改进变速度双幂次趋近律的 PMSM 滑模控制[J].重庆工商大学学报(自然科学版),2026,43(4):89-95.

Zhu Yubing, Yao Shanhua. Sliding mode control of PMSM based on an improved variable-speed double-power reaching law[J]. Journal of Chongqing Technology and Business University (Natural Science Edition), 2026, 43(4): 89-95.

achieves a fast, overshoot-free response during transient states and shortens the settling time under sudden load changes. In the steady state, it exhibits strong resistance to load torque disturbances and effectively weakens chattering.

Keywords: permanent magnet synchronous motor; double-power reaching law; disturbance observer; sliding mode controller

永磁同步电机 (Permanent Magnet Synchronous Motor, PMSM) 具有功率密度大、电磁转矩脉动小等突出优势^[1], 因而在船舶^[2-3]、电动汽车^[4-5]、机器人^[6-7]、航空航天等领域得到了广泛的应用。比例积分 (Proportional Integration, PI) 控制器作为一种经典的线性控制策略, 被用来调节永磁同步电机调速控制系统。但对于控制精度有要求的系统, PMSM 的非线性、强耦合特性会降低 PI 控制器的控制效果^[8]。因此, 在永磁同步电机的控制系统中, 多采用各种非线性控制策略, 如鲁棒控制、人工智能控制^[9-10]、自适应控制^[11-12]、滑模控制^[13-14]等。

滑模控制因其快速响应、强鲁棒性以及实施上的简便性而被广泛采用^[15]。由于系统在趋近滑模面过程中, 趋近效果不理想, 导致滑模系统存在抖振现象。滑模趋近律的性能是影响趋近效果的主要因素, 因此国内外学者提出了多种新型趋近律, 在一定程度上改善了滑模控制效果。如文献[16]提出一种基于模糊滑模变结构控制的 PMSM 矢量控制系统, 在外界扰动干扰下, 该系统鲁棒性更强, 但降低抖振的效果略显逊色; 文献[17]为减少由符号函数不连续跳变引起的系统抖振, 设计了一种双曲正切函数, 还设计了指数趋近律等速切换项参数模糊自整定算法和指数切换项参数分段自整定规则, 有效降低了高频抖振并确保了滑动模态切换过程的稳定性, 但滑模控制调节时间未得到改善; 文献[18]提出一种基于分段函数与双曲正切函数的改进幂次趋近律, 并且通过引入扩展滑模扰动观测器对负载扰动进行估计, 一定程度上提升了系统对负载扰动的抗干扰能力, 但效果一般; 文献[19]提出的新型指数趋近律融合了趋近速度和滑模面函数绝对值, 同时将包含对数项的分数多项式纳入等速项之中, 提高了系统的稳定性和响应速度, 但所设计的新型趋近律略显复杂; 文献[20]针对现有解在快速收敛速度和抖振抑制之间的矛盾, 通过引入指数函数和幂项分段函数, 提出了结合新型复合趋近律和干扰观测器补偿技术的快速滑模速度控制器, 但计算过程复杂, 补偿精度易受参数影响; 文献[21]提出一种基于滑模控制的直驱式永磁同步风力发电系统, 通过选择滑模趋近律和在滑模控制律设计中引入滤波器, 尽最大能力克服了滑模控制的缺点; 文献[22]提出一种基于扩展状态观测器 (Extended State Observer, ESO) 的永磁同步电机串级变速滑模速度控制器, 改善了系统的动静态性能, 但在电流跟踪误差方面还可进一步优化。因此, 要想有效提

高系统稳定性, 同时减少超调与抖振, 研究者仍需提出改进方案来弥补不足之处。

根据已有的研究成果, 本文在传统幂次趋近律基础上提出一种改进的变速度双幂次趋近律。该趋近律采用积分滑模面, 通过 sigmoid 饱和函数替代传统的符号函数, 以提高系统趋近滑模面的速度, 降低切换时的抖振现象。针对扰动问题, 设计了一种扰动观测器, 进一步提升了系统的稳定性并有效改善了系统的动态响应性能。最后, 在 MATLAB/Simulink 中搭建仿真模型进行了分析。

1 PMSM 数学模型

本文以表贴式永磁同步电机为被控对象, 选择 $i_d = 0$ 的控制策略。忽略涡流、磁滞及环境温度的影响以及磁路饱和效应, 假设电机产生的电流为三相对称的正弦波形, 永磁体的磁动势保持恒定, 转子永磁材料的电导率为零且无阻尼绕组, 转子磁链旋转形成正弦反电势。

永磁同步电机在 $d-q$ 坐标系中的定子电压可以表示为

$$\begin{cases} u_d = Ri_d + L_s \frac{di_d}{dt} - p_n \omega_m L_s i_q \\ u_q = Ri_q + L_s \frac{di_q}{dt} + p_n \omega_m L_s i_d + p_n \omega_m \psi_f \end{cases} \quad (1)$$

其中, u_d 、 u_q 、 i_d 和 i_q 分别是定子电压和电流的 $d-q$ 轴分量, L_s 是定子电感, ψ_f 是永磁体磁链, R 是定子电阻, p_n 是极对数, ω_m 是转子机械角速度。

电机机械运动方程为

$$J \frac{d\omega_m}{dt} = T_e - T_L - B\omega_m \quad (2)$$

其中, B 为阻尼系数, J 是转动惯量, T_L 是负载转矩, T_e 是电磁转矩。

电磁转矩方程为

$$T_e = 1.5 p_n [i_d i_q (L_d - L_q) + \psi_f i_q] \quad (3)$$

其中, L_d 、 L_q 分别是定子电感的 $d-q$ 轴分量。针对表贴式永磁同步电机, 满足 $L_d = L_q = L_s$, 得出以下数学模型:

$$\begin{cases} \frac{di_q}{dt} = \frac{1}{L_s} (-Ri_q - p_n \omega_m \psi_f + u_q) \\ \frac{d\omega_m}{dt} = \frac{1}{J} \left(-T_L + \frac{3p_n \psi_f}{2} i_q \right) \end{cases} \quad (4)$$

永磁同步电机控制系统结构框图如图 1 所示。其主要包含坐标变换模块、SVPWM (Space Vector Pulse Width Modulation) 模块、电流与电压采样模块, 以及转

$$\begin{cases} x_1 = \omega_{\text{ref}} - \omega_m \\ x_2 = \dot{x}_1 = -\dot{\omega}_m \end{cases} \quad (11)$$

其中, ω_m 为实际转速, ω_{ref} 为电机参考转速。根据式(4)和式(11)可知:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = -\dot{\omega}_m = \frac{1}{J} \left(T_L - \frac{3p_n\psi_f}{2} i_q \right) \\ \dot{x}_2 = -\ddot{\omega}_m = -\frac{3p_n\psi_f}{2} \dot{i}_q \end{cases} \quad (12)$$

定义 $u = \dot{i}_q$, $A = \frac{3p_n\psi_f}{2J}$, 则式(12)可变为

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ -A \end{bmatrix} u \quad (13)$$

定义滑模面函数为(c 为待设计参数, $c > 0$):

$$s = cx_1 + x_2 \quad (14)$$

对式(14)求导, 可得:

$$\dot{s} = c\dot{x}_1 + \dot{x}_2 = cx_2 - Au \quad (15)$$

联立式(9), 可得控制器表达式为

$$u = \frac{1}{A} [cx_2 + (\varepsilon |s|^{f(x_1, s)} + k |s|^\sigma) \text{sigmoid}(s)] \quad (16)$$

从而可得 q 轴的参考电流为

$$i_q^* = \frac{1}{A} \int_0^t [cx_2 + (\varepsilon |s|^{f(x_1, s)} + k |s|^\sigma) \text{sigmoid}(s)] d\tau \quad (17)$$

3.2 稳定性分析

为了验证系统的稳定性, 定义李亚普诺夫函数为 $V = 0.5 s^2$, 只有 $\dot{V} < 0$ 才能保证系统稳定。由此可得:

$$\dot{V} = s\dot{s} = -(\varepsilon |s|^{f(x_1, s)} + k |s|^\sigma) \text{sigmoid}(s) \quad (18)$$

由图 2 得出 $\text{sigmoid}(s) > 0$, 在满足 $k, \varepsilon, \alpha, \beta$ 为正常数的条件下, 可得出 $\dot{V} \leq 0$, 即改进变速度双幂次趋近律满足 Lyapunov 稳定性要求, 能在有限的时间里收敛。

如图 3 所示, 本文比较了传统指数趋近律和改进变速度双幂次趋近律的收敛性能, 发现改进变速度双幂次趋近律在控制效果和控制时间方面均展现出了显著的优势。

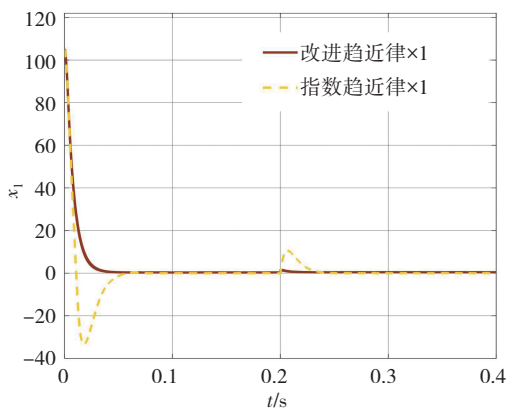


图 3 趋近律收敛性比较图

Fig. 3 Comparison of convergence performance of different reaching laws

4 扰动补偿器的设计

在实际应用场景中, 永磁同步电机通常面临着内部参数变化和运行条件引起的外部干扰。为了保持系统的良好鲁棒性, 本文设计了一个滑模扰动补偿器。该补偿器能够实时监测外部扰动对系统的影响, 并提供前馈扰动补偿。根据电机的机械运动方程, 将 $\hat{d}$ 设为负载与参数变化带来的总扰动, 表贴式 PMSM 在同步旋转坐标系中的动态运动方程可以表示为

$$\frac{d\omega_m}{dt} = \frac{1.5p_n\psi_f i_q}{J} - \frac{\hat{d}}{J} - \frac{B}{J}\omega_m \quad (19)$$

SMC (Sliding Mode Control) 的目标是抑制参数摄动和外部负载扰动, 重新定义 PMSM 控制系统的状态变量为

$$e = \omega_{\text{ref}} - \omega_m \quad (20)$$

对 e 求导得:

$$\dot{e} = \dot{\omega}_{\text{ref}} - \dot{\omega}_m = \dot{\omega}_{\text{ref}} - \frac{1.5p_n\psi_f i_q}{J} + \frac{\hat{d}}{J} + \frac{B}{J}\omega_m \quad (21)$$

重新定义滑模面, 滑模面 s 定义为

$$s = e + c \int_0^t e d\tau \quad (22)$$

c 的值与式(14)中的取值相同, 从而速度环输出电流变为

$$i_q^* = \frac{1}{A} \left[\dot{\omega}_{\text{ref}} + ce + \frac{B}{J}\omega_m - \dot{s} + \frac{\hat{d}}{J} \right] \quad (23)$$

扰动补偿器用于实时观察负载转矩的变化, 然后,

对 i_q 提供一个估计的 $\hat{d}$ 作为反馈补偿。取 d 和 ω_m 作为系统的状态变量, T_e 作为系统的输入, 构建系统的扩展状态空间方程为

$$\begin{bmatrix} \dot{\omega}_m \\ \dot{d} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{B}{J} & -\frac{1}{J} \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_m \\ d \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{J} \\ 0 \end{bmatrix} T_e \quad (24)$$

将 ω_m 和 d 作为观测对象, 令

$$e_\omega = \omega_m - \hat{\omega}_m \quad (25)$$

可得观测器方程为

$$\begin{bmatrix} \dot{\hat{\omega}}_m \\ \dot{\hat{d}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{B}{J} & -\frac{1}{J} \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{\omega}_m \\ \hat{d} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{J} \\ 0 \end{bmatrix} T_e + \begin{bmatrix} 1 \\ l \end{bmatrix} g(e_\omega) \quad (26)$$

其中, $\hat{\omega}_m$ 和 $\hat{d}$ 分别是 ω_m 和 d 的估计值; $g(e_\omega)$ 是 e_ω 的控制律; l 是补偿器增益, l 小于 0。选取滑模面 s 为

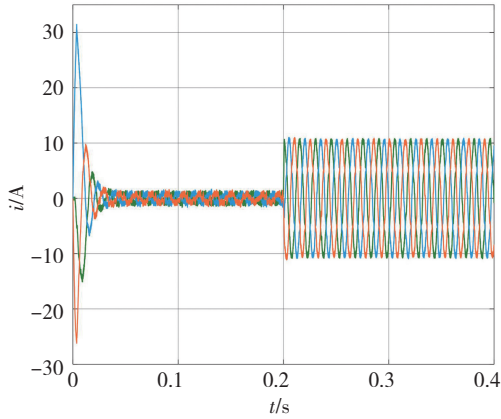
$$s_\omega = e_\omega + c \int_0^t e_\omega d\tau \quad (27)$$

其中, c 的值与式(14)中的取值相同。结合式(27), 得出扰动补偿器的控制律为

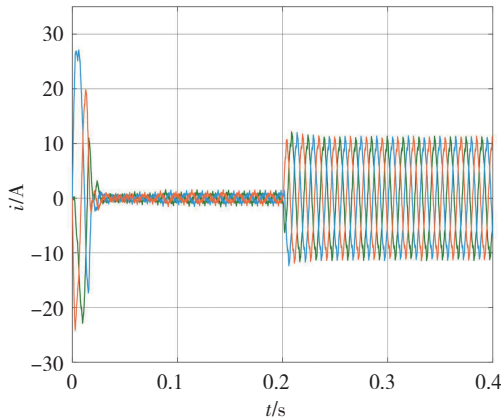
$$g(e_\omega) = \left(c - \frac{B}{J} \right) e_\omega + M_u \text{sigmoid}(s_\omega) \quad (28)$$

扰动补偿器仿真模型如图 4 所示。

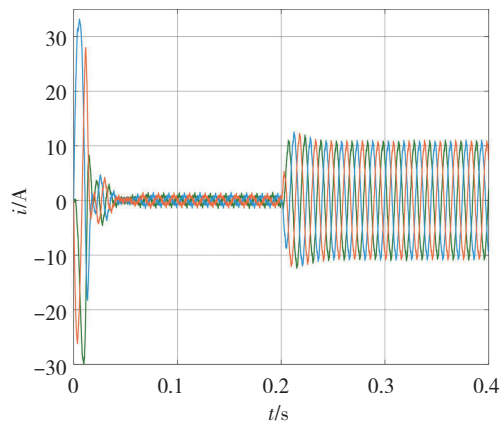
次趋近律控制系统能在极短时间内恢复稳定运行。由此可见,本文设计的基于改进变速度双幂次趋近律的滑模控制系统具备了较强的抗干扰能力和鲁棒性,仿真结果充分验证了本文方法的合理性和先进性。



(a) 改进趋近律控制三相电流



(b) PI 控制三相电流



(c) 传统指数控制律控制三相电流

图 7 3 种控制器电流响应对比波形图

Fig. 7 Current response waveforms under three different controllers

6 结 论

为了解决传统趋近律控制系统中趋近速度与系统抖振相互矛盾的问题,提出一种基于改进变速度双幂次趋近律的滑模控制系统。通过搭建永磁同步电机矢

量调速系统模型,对 PI 控制、传统指数趋近律和改进变速度双幂次趋近律进行性能分析与对比。仿真结果表明,与其他两种控制方法相比,本文所提出的改进变速度双幂次趋近律能显著提升系统的调速性能,从而证明了其在实际应用中的潜在价值,但优化的具体数据还需要进行大量的实验论证,因此下一步将着重于从实验方面验证该控制系统。

参考文献(References):

- [1] 郑诗程, 刘志鹏, 赵卫, 等. 积分型非奇异终端滑模 PMSM 无传感器控制系统[J]. 电机与控制学报, 2024, 28(3): 169-178.
Zheng Shicheng, Liu Zhipeng, Zhao Wei, et al. Integral non-singular terminal sliding mode PMSM sensorless control system[J]. Electric Machines and Control, 2024, 28(3): 169-178.
- [2] 陈少先, 丁树业, 申淑锋, 等. 船舶用表贴式永磁同步电机的电磁振动分析与抑制[J]. 电工技术学报, 2023, 38(5): 1275-1286, 1298.
Chen Shaoxian, Ding Shuye, Shen Shufeng, et al. Analysis and suppression of electromagnetic vibration of surface mounted permanent magnet synchronous motor for ships[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(5): 1275-1286, 1298.
- [3] 戴磊, 张永林, 赵进, 等. 船舶永磁同步电机在线惯量辨识研究[J]. 舰船科学技术, 2024, 46(5): 103-108.
Dai Lei, Zhang Yonglin, Zhao Jin, et al. Research on on-line inertia identification of marine permanent magnet synchronous motor[J]. Ship Science and Technology, 2024, 46(5): 103-108.
- [4] 王晓远, 刘铭鑫, 陈学永, 等. 电动汽车用 PMSM 带滤波补偿三阶滑模自抗扰控制[J]. 电机与控制学报, 2021, 25(11): 25-34.
Wang Xiaoyuan, Liu Mingxin, Chen Xueyong, et al. Third-order sliding mode active disturbance rejection control of PMSM with filter compensation for electric vehicle[J]. Electric Machines and Control, 2021, 25(11): 25-34.
- [5] 张超. 新能源汽车中的驱动电机控制技术分析[J]. 电子技术, 2024, 53(3): 330-331.
Zhang Chao. Analysis of drive motor control technology in new energy vehicles[J]. Electronic Technology, 2024, 53(3): 330-331.
- [6] 王伟, 杜晓彬, 胡弼, 等. 基于齿冠偏心内凹结构的工业机器人用 PMSM 转矩波动抑制[J]. 电气工程学报, 2018, 13(10): 22-28.
Wang Wei, Du Xiaobin, Hu Bi, et al. Reducing torque ripple of a permanent magnet motor used in industrial robots based on structure of eccentric and concave stator tooth[J]. Journal of Electrical Engineering, 2018, 13(10): 22-28.
- [7] 韩立影, 丁伟, 刘旭, 等. 巡检机器人伺服控制永磁同步电机初始位置辨识方法[J]. 电气开关, 2024, 62(1): 61-63, 68.

- Han Liying, Ding Wei, Liu Xu, et al. Initial position identification method of permanent magnet synchronous motor for inspection robot servo control[J]. Electric Switchgear, 2024, 62(1): 61–63, 68.
- [8] 诸德宏, 高齐. 基于改进指数趋近律的永磁同步电机滑模控制[J]. 农业装备与车辆工程, 2023, 61(9): 111–116.
- Zhu Dehong, Gao Qi. Sliding mode variable structure control of PMSM based on improved exponential reaching law[J]. Agricultural Equipment & Vehicle Engineering, 2023, 61(9): 111–116.
- [9] 易灵芝, 王艺皓, 李旺, 等. 基于改进猴群算法优化ADRC的PMSM矢量控制策略[J]. 传感器与微系统, 2022, 41(11): 52–56.
- Yi Lingzhi, Wang Yihao, Li Wang, et al. Improved monkey algorithm optimizes ADRC vector control strategy of PMSM[J]. Transducer and Microsystem Technology, 2022, 41(11): 52–56.
- [10] 阎馨, 李文磊, 屠乃威, 等. 基于改进金枪鱼群算法PMSM自抗扰控制[J]. 电力电子技术, 2024, 58(1): 27–31, 35.
- Yan Xin, Li Wenlei, Tu Naiwei, et al. Active disturbance rejection control of PMSM based on improved tuna swarm optimization algorithm[J]. Power Electronics, 2024, 58(1): 27–31, 35.
- [11] 黄刚, 万雨龙. 基于扰动观测器的PMSM系统自适应反步滑模控制[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2024(3): 136–140.
- Huang Gang, Wan Yulong. Adaptive backstepping sliding mode control for PMSM system based on nonlinear disturbance observer[J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2024(3): 136–140.
- [12] 冯琪茗, 董秀成, 刘元. 一种新型趋近律的PMSM模糊自适应终端滑模控制[J]. 电气工程学报, 2023, 18(4): 74–83.
- Feng Qiming, Dong Xiucheng, Liu Yuan. A novel reaching law of PMSM fuzzy adaptive terminal sliding mode control[J]. Journal of Electrical Engineering, 2023, 18(4): 74–83.
- [13] 禹聪, 康尔良. 永磁同步电机模糊滑模无位置传感器控制[J]. 电机与控制学报, 2024, 28(1): 87–94.
- Yu Cong, Kang Erliang. Fuzzy sliding mode position sensorless control of permanent magnet synchronous motor[J]. Electric Machines and Control, 2024, 28(1): 87–94.
- [14] 高俊岭, 张翔, 丁昇. 模糊超扭曲滑模观测器在PMSM中的研究与应用[J]. 重庆工商大学学报(自然科学版), 2023, 40(3): 27–33.
- Gao Junling, Zhang Xiang, Ding Sheng. Study and application of fuzzy super-twisting sliding mode observer in PMSM[J]. Journal of Chongqing Technology and Business University (Natural Science Edition), 2023, 40(3): 27–33.
- [15] 刘京, 李洪文, 邓永停. 基于新型趋近律和扰动观测器的永磁同步电机滑模控制[J]. 工程科学学报, 2017, 39(6): 933–944.
- Liu Jing, Li Hongwen, Deng Yongting. PMSM sliding-mode control based on novel reaching law and disturbance observer[J]. Chinese Journal of Engineering, 2017, 39(6): 933–944.
- [16] 陈浩, 凌有铸, 陈孟元, 等. 基于模糊滑模变结构的PMSM矢量控制的仿真研究[J]. 重庆工商大学学报(自然科学版), 2015, 32(2): 27–32.
- Chen Hao, Ling Youzhu, Chen Mengyuan, et al. Research on the simulation of PMSM vector control based on fuzzy sliding mode variable structure[J]. Journal of Chongqing Technology and Business University (Natural Science Edition), 2015, 32(2): 27–32.
- [17] 韩俊杰, 宋超, 任乐天, 等. 基于改进滑模的永磁同步电机控制[J]. 北华大学学报(自然科学版), 2023, 24(6): 828–834.
- Han Junjie, Song Chao, Ren Letian, et al. Control of permanent magnet synchronous motor based on improved sliding mode[J]. Journal of Beihua University (Natural Science), 2023, 24(6): 828–834.
- [18] 刘述喜, 谭欢, 程楠格, 等. 基于改进滑模的PMSM无位置传感器控制[J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2023, 37(9): 270–279.
- Liu Shuxi, Tan Huan, Cheng Nange, et al. Sensorless control of PMSM based on improved sliding mode[J]. Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science), 2023, 37(9): 270–279.
- [19] 陈德海, 曹永康, 邵恒, 等. 基于新型指数趋近律的PMSM滑模控制研究[J]. 传感器与微系统, 2023, 42(10): 32–35.
- Chen Dehai, Cao Yongkang, Shao Heng, et al. Study on PMSM sliding mode control based on novel exponential reaching law[J]. Transducer and Microsystem Technology, 2023, 42(10): 32–35.
- [20] Guo X, Huang S, Lu K, et al. A fast sliding mode speed controller for PMSM based on new compound reaching law with improved sliding mode observer[J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2023, 9(2): 2955–2968.
- [21] Osman A M, Alsokhry F. Sliding mode control for grid integration of wind power system based on direct drive PMSG[J]. IEEE Access, 2022, 10: 26567–26579.
- [22] Hou L, Ma J, Wang W. Sliding mode predictive current control of permanent magnet synchronous motor with cascaded variable rate sliding mode speed controller[J]. IEEE Access, 2022, 10: 33992–34002.
- [23] 袁雷. 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: 83–85.
- Yuan Lei. Control principle and MATLAB simulation of modern permanent magnet synchronous motor[M]. Beijing: Beijing University of Aeronautics & Astronautics Press, 2016: 83–85.

责任编辑:李翠薇