

基于扰动补偿滑模观测器的永磁同步电机控制策略

阮小丁, 胡郎君

(浙江联宜电机有限公司, 浙江 东阳 322118)

摘要:针对永磁同步电机(PMSM)控制系统在受到参数时变、负载突变和未建模动态等扰动时出现的精度及效率下降问题,文中提出了一种结合优化后的趋近律非奇异终端滑模控制器与超螺旋扰动观测器的复合控制策略。在该控制策略中,速度环控制设备采用优化后的趋近律非奇异终端滑模控制模块,提升了系统趋于稳定的速度并抑制了抖振。同时,利用超螺旋滑模扰动观测器对系统内外周期和非周期扰动进行实时控制,构成了前馈扰动抑制与反馈鲁棒调节相结合的复合控制系统。以嵌入式微控制器为核心搭建的实验平台测试结果表明,所提方法有效提高了系统的动态响应速度和抗干扰能力。相比传统滑模控制策略,其转速超调量降低了 3.1 个百分点,负载突变时的速降恢复时间缩短约 76.19%,验证了该控制策略的有效性。

关键词:永磁同步电机;滑模观测器;扰动补偿;超螺旋算法;非奇异终端滑模控制器

中图分类号:TM351;TP273

文章编号:1000-0682(2026)04-0100-05

文献标识码:A

DOI:10.19950/j.cnki.CN61-1121/TH.2026.04.017

Permanent magnet synchronous motor control strategy based on disturbance compensation sliding mode observer

RUAN Xiaoding, HU Langjun

(Zhejiang Linix Motor Co., Ltd., Zhejiang Dongyang 322118, China)

Abstract: Aiming at the problem that the precision and efficiency of the permanent magnet synchronous motor (PMSM) control system will decline when it is subjected to parameter time-varying, load sudden change, unmodeled dynamics and other disturbances, a composite control strategy combining the optimized reaching law nonsingular terminal sliding mode controller and the super spiral disturbance observer is proposed in this paper. In this control strategy, the speed loop control equipment adopts the optimized reaching law nonsingular terminal sliding control module, which speeds up the speed of system stabilization and suppresses chattering. At the same time, the super spiral sliding mode disturbance observer is used to control the internal and external periodic and aperiodic disturbances of the system in real time, forming a composite control system combining feedforward disturbance suppression and feedback robust regulation. The test results of the experimental platform built with embedded microcontroller as the core show that the proposed method effectively improves the dynamic response speed and anti-interference ability of the system. In comparison with the conventional sliding mode control strategy, reduces the speed overshoot by 3.1 percentage points and reduces the speed droop recovery time when the load suddenly changes by about 76.19%, which verifies the effectiveness and superiority of the control strategy.

Keywords: permanent magnet synchronous motor; sliding mode observer; disturbance compensation; hyper-spiral algorithm; nonsingular terminal sliding mode controller

收稿日期:2026-04-13

基金项目:浙江省科技计划项目(编号:2023C02052)

第一作者:阮小丁(1983—),男,汉,重庆人,本科,高级工程师,研究方向为机电设计与制造。

0 引言

永磁同步电机(Permanent Magnet Synchronous Motor, PMSM)利用永磁体与旋转磁场之间的相互作用

用力工作,因为具有控制精度高、结构简化、可靠性强以及功率密度大等优点,被广泛应用于高压断路器控制、新能源车辆驱动等高性能场景^[1-3]。然而,由于永磁同步电机控制系统具有多参数、高耦合性的特征,所以其控制系统经常会受到内外多种变化所带来的扰动影响。根据永磁同步电机控制系统的时变特征,可以将扰动来源分为规律性、时序性的周期性扰动和随机化、突变性的非周期性扰动。周期性扰动包括齿槽转矩脉动等因素造成的时间谐波扰动、电流采样误差等因素造成的空间谐波扰动等^[4];非周期性扰动则包含内外摄动扰动、转矩负载突变扰动等^[5]。

近年来,众多学者开展了有关永磁同步电机的扰动抑制和鲁棒性增强的控制算法研究。文献[6]采用基于经典线性反馈控制的比例积分算法来控制永磁同步电机,其主要内容是通过比例和积分线性组合的方式生成控制量,以偏差信号实现系统的动态响应。传统比例积分控制(Proportional Integral, PI)因其结构简单、易于工程实现而被广泛应用于PMSM调速系统。然而,线性PI控制对系统参数变化和外部扰动较为敏感,难以在宽运行范围内保持一致的优良性能。文献[7]提出了一种可以有效抑制周期性扰动的永磁同步电机扰动抑制的解耦容错控制策略。文献[8]则构建了一种针对多源性扰动的迭代学习控制算法,在稳态和负载力矩突变的情况下,转速波动明显低于传统算法。文献[9~10]设计了一种利用滑模控制器(Sliding Mode Controller, SMC)创建滑模面,将系统状态变量引入其中,并促使变量达到理想状态的非线性控制算法。算法广泛应用在机器人、无人机等高控制精度、高频率动态响应的领域。扰动观测器与滑模控制相结合的复合控制策略通过创建实时采集数据的扰动观测器而产出估算值,并将数值输入正负反馈调节器以降低永磁同步电机控制系统的扰动影响。

基于上述分析,文中提出了一种结合优化后的趋近律非奇异终端滑模控制器与超螺旋扰动观测器的“前馈+反馈”复合永磁同步电机控制策略。在该策略中改进了快速幂次趋近律的非奇异终端滑模控制器,并通过分段幂次项与双曲正切函数的有机结合,在保证状态有限时间收敛的同时有效抑制了固有抖振;此外,借助构建的超螺旋滑模扰动观测器,还精确估计了系统集中扰动(含参数摄动、负载突变及未建模动态)的有限时间;最后,将扰动观测值前馈补偿至速度控制器,形成“前馈扰动抑制+

反馈鲁棒调节”的复合控制结构,在较大程度上提升了系统的快速响应能力与抗扰动能力。

1 控制策略数学模型建立

为简化永磁同步电机电压分析的复杂度,对电机做出以下假设:

(1)不考虑电机损耗、铁心磁饱和、铁损、机械损耗等影响因素;

(2)电流为三相对称电流^[11];

(3)电动势、磁场为正弦分布。永磁同步电机在三相静态坐标系下的数学模型如下:

定子相电压公式:

$$\begin{bmatrix} u_x \\ u_y \\ u_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_x \\ i_y \\ i_z \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \varphi_x \\ \varphi_y \\ \varphi_z \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: u_x 、 u_y 、 u_z 与 i_x 、 i_y 、 i_z 分别为不同坐标轴下定子绕组的相电压、相电流; R_s 为定子电阻; φ_x 、 φ_y 、 φ_z 为不同坐标轴下的定子磁链。

磁链方程:

$$\begin{cases} \varphi_x = L_s i_x + L_m (i_y + i_z) + r_{pm} \cos(\theta_r) \\ \varphi_y = L_s i_y + L_m (i_x + i_z) + r_{pm} \cos\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \varphi_z = L_s i_z + L_m (i_y + i_x) + r_{pm} \cos\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) \end{cases} \quad (2)$$

式中: L_s 为定子电感; L_m 为定子互感; r_{pm} 为永磁体磁链; θ_r 为转角角度。

为了简化模型并提高系统的控制精度,永磁同步电机在同步旋转坐标系下的电压为:

$$\begin{cases} u_d = Ri_d - \omega_e L_q i_q + L_d \frac{di_d}{dt} \\ u_q = Ri_q + \omega_e L_d i_d + \omega_e \varphi_f + L_q \frac{di_q}{dt} \end{cases} \quad (3)$$

式中: u_d 、 u_q 与 i_d 、 i_q 分别为定子绕组的相电压和相电流; R 为定子电阻; φ_f 为永磁体磁链; ω_e 为转角角度; L_d 、 L_q 为电感值。

永磁同步电机参数受扰动影响后的机械运动公式为:

$$(J_0 + \Delta J) \frac{d\omega_m}{dt} = K_{\tau 0} - T_L - (B_0 + \Delta B) \omega_m + D \quad (4)$$

式中: ω_m 为机械角速度; J 为转动惯量; T_L 为负载转矩; B_0 为粘滞摩擦系数,下标0表示参数的名义值; ΔJ 、 ΔB 为参数摄动; D 为未建模动态和外部扰动; $K_{\tau 0}$ 为名义电磁转矩。

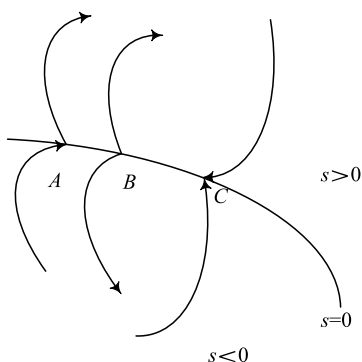


图1 滑模面趋近图

滑模趋近图,如图1所示。滑模控制系统能够加快收敛速度并提高稳定性,但滑模控制结构以非连续的滑模面控制为基础,因此文中采用了非奇异终端滑模控制器的滑模面^[12-13]。其原理如式(5)所示:

$$s = e + \frac{1}{\beta} |e|^\gamma \text{sign}(e) \quad (5)$$

式中: $e = \omega_m^* - \omega_m$ 为转速跟踪误差; ω_m^* 为给定转速; $\beta > 0, 1 < \gamma < 2$ 。

当系统状态到达滑模面 $s = 0$ 时,有:

$$e = -\frac{1}{\beta} |e|^\gamma \text{sign}(e) \quad (6)$$

求解可得收敛时间为:

$$t_s = \frac{\beta}{\gamma-1} |e(t_r)|^{1-\gamma} \quad (7)$$

式中: t_r 表示系统状态到达滑模面的初始时刻,

即误差 $e(t)$ 开始进入终端滑模收敛阶段的时刻。

该文还设计了一种改进型快速幂次趋近律^[14-15]:

$$s' = -\varepsilon |s|^\alpha \tanh\left(\frac{s}{\delta}\right) - k_1 s - k_2 |s|^\beta \tanh\left(\frac{s}{\delta}\right) \quad (8)$$

式中: $\varepsilon > 0, k_1 > 0, k_2 > 0; 0 < \alpha < 1, \beta > 1; \delta$ 为边界层厚度, $\delta > 0$ 。

然后,构造超螺旋滑模观测器:

$$\begin{cases} \hat{\omega}_m = a\omega_m + bu + cT_L + \hat{f} + \lambda_1 |e_\omega|^{\frac{1}{2}} \text{sign}(e_\omega) \\ \hat{f} = \lambda_2 \text{sign}(e_\omega) \end{cases} \quad (9)$$

式中: $\hat{\omega}_m$ 为转速估计值; $\hat{f}$ 为扰动估计值;转速误差 $e_\omega = \omega_m - \hat{\omega}_m$; λ_1, λ_2 为观测器增益; a, b, c 和 u 为调节参数。

2 复合控制策略架构与硬件实测平台设计

为验证结合优化趋近律的非奇异终端滑模控制器与超螺旋扰动观测器的复合永磁同步电机控制策略的可行性,文中搭建了复合控制策略架构,如图2所示。其中,滑模速度控制器使用优化后的趋近律非奇异终端滑模控制器,扰动观测器则采用超螺旋扰动观测器。同时,以嵌入式微控制器芯片为核心设计了一套实验系统,该系统包含硬件平台和软件程序。

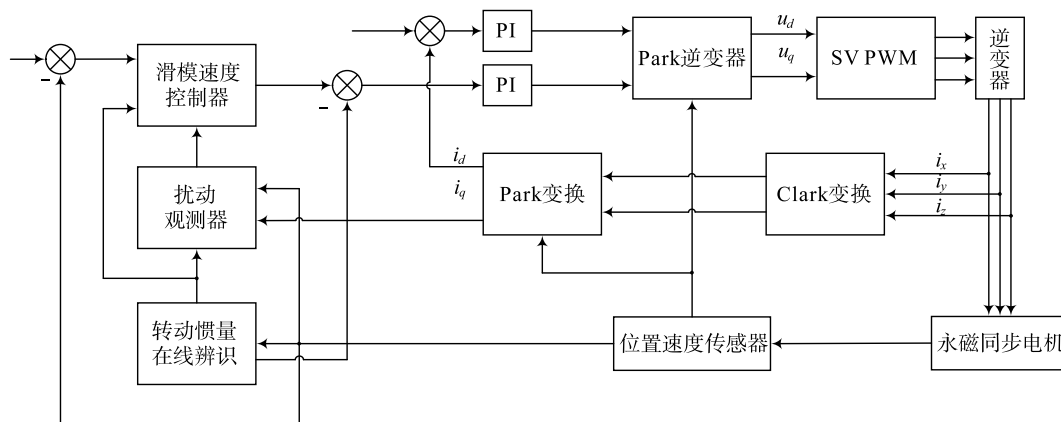


图2 复合控制策略架构图

如图3所示为包含扰动补偿滑模观测器的永磁同步电机控制实验系统的硬件平台结构,主要由电脑主机、嵌入式开发板和永磁同步电机调试系统3部分组成。该硬件平台通过闭环控制实现精准的永磁同步电机调速,其控制过程如下:首先利用电流、电压检测模块实时监测电机运行状态,并将采集到的数据传输至嵌入式开发板中。接着控制器内核根

据反馈的数据输出矢量控制和转矩控制信号,最后控制信号驱动逆变器调节电机转速。

硬件系统还可按照功能角色的不同划分为以下3个部分:

(1) 电源支持部分:包含微控制器电源在内的电源系统向嵌入式开发板、永磁同步电机、传感器和采样模块供电。

(2)控制电路部分:嵌入式开发板上的控制器内核从上位机获取到命令后,向永磁同步电机发送转速与位置控制信号,然后由电流采样模块和编码

模块将数据反馈至上位机。

(3)传感器采集部分:对电压、电流、转速、位置的传感器部分进行采集。

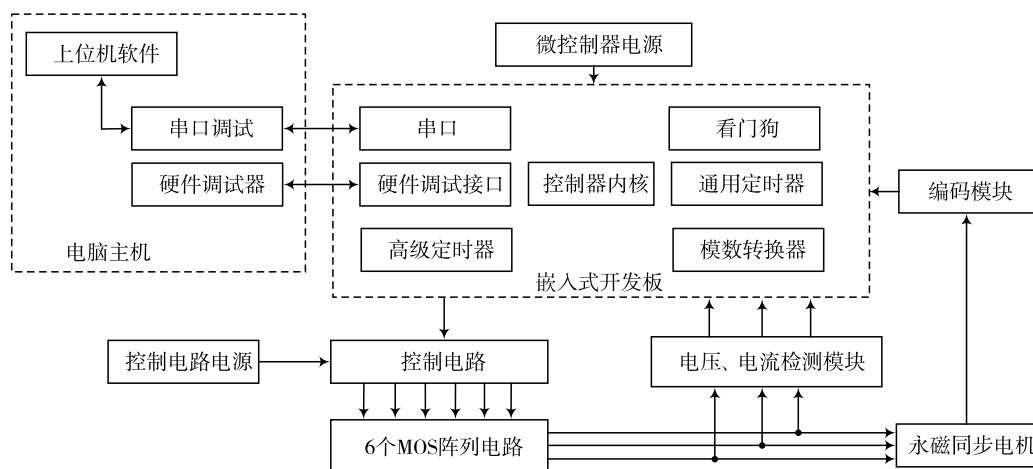


图3 硬件系统结构图

3 实验结果与分析

为评估所提控制策略的有效性,文中设计了评估实验进行测试分析。实测模型中永磁同步电机的主要参数,如表1所示。

表1 实验所用永磁同步电机的主要参数

参数	数值	单位
额定功率	1.5	kW
额定电压	220	V
额定电流	5.0	A
额定转速	1500	$\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$
极对数	4	-
定子电阻	0.958	Ω
d 、 q 轴电感	5.25	mH
永磁体磁链	0.182	Wb

在控制器的参数设置中,非奇异终端滑模控制器参数为0.5,趋近律参数为50。

为验证所提方法的优越性,文中还将其与传统PI(速度环PI参数经工程整定)、传统滑模(采用指数趋近律及线性滑模面)、模型预测控制(Model Predictive Control, MPC)和自适应滑模控制(Adaptive Sliding Mode Control, Adaptive SMC)共4种具有代表性的控制策略进行了对比。当给定转速为 $1000 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 时,空载启动的转速响应对比结果,如表2所示。

表2 多种控制策略的性能对比

策略	超调量/%	调节时间(启动)/s	突加负载转速/ $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$	恢复时间/s	稳态误差/ $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$
PI 控制	8.2	0.120	210	0.35	± 5.0
传统滑模	3.1	0.080	150	0.21	± 3.0
MPC	1.5	0.060	100	0.12	± 2.0
Adaptive SMC	0.8	0.036	70	0.08	± 1.5
该文方法	0.0	0.015	50	0.05	± 1.0

从仿真结果可以看出,传统PI控制存在8.2%的超调量,启动调节时间约为0.120 s,其转速最大跌落为 $210 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$,恢复时间约0.35 s。传统滑模控制最大速降为 $150 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$,恢复时间约0.21 s。然而,该文方法的最大速降仅为 $50 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$,恢复时间约0.05 s。相比传统滑模控制策略,其突加负载时转速跌落降低约66.67%,恢复时间减少了76.19%。而与当前应用广泛的MPC及Adaptive SMC相比,该文所提复合控制策略在无超调、快速收敛、强抗扰及高精度稳态等方面表现更突出,综合性能优势显著。上述数据结果表明,文中所提方法利用扰动观测器实现了对负载突变的快速估计与补偿,有效增强了系统的抗干扰能力。

4 结束语

该文提出了一种优化后的非奇异终端滑模控制器与超螺旋滑模扰动观测器结合的永磁同步电机控制策略,实现了对永磁同步电机控制系统所受集中扰动的主动抑制与系统鲁棒性的协同提升。在空载

启动、突加负载及参数摄动等多工况仿真环境下对所提策略进行验证,并与传统 PI 控制和传统滑模控制进行量化对比。实验结果表明:所提方法实现了转速无超调量启动,调节时间可缩短至 0.015 s,突加负载时转速跌落降低约 66.67%,恢复时间缩短约 76.19%。证明了在参数摄动条件下该方法能保持良好的稳态性能,同时控制量抖振也得到了有效抑制。

参考文献:

- [1] 宫琦,朱刚,周会川. 基于 SVPWM 的永磁同步电机控制系统仿真研究[J]. 工业仪表与自动化装置, 2025(6):118-123.
- [2] 李泽华. 矢量脉宽调制下永磁同步电机磁链滑模控制[J]. 电子设计工程, 2025, 33(14):71-74+79.
- [3] 张巧,王志晓,宿敬肖. 带式输送机外转子永磁同步电机转矩优化研究[J]. 机械设计与制造, 2025(12):22-28+34.
- [4] 杨羽萌,朱其新,刘红俐. 考虑直流偏置下的永磁同步电机扰动抑制研究[J]. 机床与液压, 2026, 54(2):120-124.
- [5] 张冬冬,董亲源,荣存浩,等. 超高速永磁同步电机齿槽转矩与定子辅助槽参数优化设计[J]. 河北大学学报(自然科学版), 2025, 45(6):570-581.
- [6] 杨帆,赵希梅,金鸿雁,等. 基于广义比例积分观测器的永磁同步电机鲁棒谐振预测电流控制[J]. 电工技术学报, 2024, 39(10):2995-3006.
- [7] 陈云龙. 永磁同步电机飞轮储能系统定子电流谐波抑制与母线电压控制策略研究[D]. 杭州:浙江大学, 2024:56-78.
- [8] 冯煜焜,姚文熙,李武华. 结合迭代学习与扰动观测器的永磁同步电机多源扰动抑制[J]. 振动与冲击, 2025, 44(3):230-237+250.
- [9] 尹书哲,花国祥,黄兴,等. 带电作业机器人机械臂自适应滑模控制方法[J]. 兵工自动化, 2026, 45(2):89-91+107.
- [10] 曹庆梅,项瑞雯,谭永红,等. 基于模糊逻辑改进的四旋翼无人机滑模控制方法及其在非匹配不确定性条件下的应用(英文)[J]. Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering, 2025, 26(10):1942-1956.
- [11] 彭承欣,王伟. 三相四桥臂永磁同步电机系统多谐波电流注入开路故障容错控制方法[J]. 电气工程学报, 2025, 20(4):120-131.
- [12] 梁庭福,李鑫帅,王鹏康,等. 基于层次非奇异终端和超螺旋滑模扰动观测器的永磁同步电机滑模控制[J]. 兵器装备工程学报, 2025, 46(2):196-203.
- [13] 张乃峰,郭凯凯,刘晨,等. 基于新型趋近律的三相永磁同步电机滑模控制研究[J]. 重庆工商大学学报(自然科学版), 2025, 42(6):26-32.
- [14] 赵凯辉,涂麟轩,何颖荣,等. 基于紧格式动态线性化的 PMSM 无模型自适应快速终端滑模控制[J]. 电力系统保护与控制, 2026, 54(2):70-81.
- [15] 李星. 基于扩张状态观测器的 PMSM 滑模控制[J]. 电气应用, 2025, 44(6):106-111.
- [16] distance optimization[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2024, 73(1):53-66.
- [17] TANG M, AN B, QIU J, et al. Multi-model predictive control of SCR flue gas denitrification system in coal-fired power plant based on kernel fuzzy c-means clustering and integrated model[J]. The Canadian Journal of Chemical Engineering, 2024, 102(2):748-764.
- [18] 权丽. 基于预测控制的聚合温控负荷需求侧资源调度控制方法[D]. 北京:华北电力大学, 2021.
- [19] 康殿煜. 基于 MPC 算法微振动平台驱动设计[D]. 桂林:桂林电子科技大学, 2025.
- [20] 寇艺耀,李俊杰,匡大志,等. 基于模型预测控制的低温温控策略设计及实验验证[J]. 低温与超导, 2023, 51(06):62-68.
- [21] Kim S, Lee J, Han K, et al. Vehicle path tracking control using pure pursuit with MPC-based look-ahead

(上接第 92 页)