

自适应调控干扰下的快速超螺旋控制器设计

刘 祥, 兰康睿, 陆华才

安徽工程大学 电气工程学院, 安徽 芜湖 241000

摘要:目的 针对永磁同步电机高性能驱动和高控制精度的要求,以及复杂环境易受外部干扰等问题,设计了一种基于自适应条件干扰抑制调控器的快速超螺旋算法控制器,旨在不同工况下提高电机响应速度和控制精度。方法 基于对经典超螺旋算法的分析,其中符号函数的不连续性会导致抖振,使用双曲线正切函数代替,对于引入的线性项替换为自适应函数,得到改进后的快速超螺旋算法控制器。其次,加速度作为扩展状态设计状态观测器,结合改进后的算法,提高估计集总扰动的精度和速度,并将估计的集总扰动作为自适应条件干扰抑制调控器的输入部分。调控器的目的是对存在的扰动进行区分,对不利扰动进行抑制,对有利扰动进行利用,最终输出理想的 q 轴电流分量。结果 仿真实验结果显示,同一工况下,改进后的控制器在到达稳态的时间上,是传统比例积分控制和传统滑模控制的 $1/10$ 左右,且不存在超调。3 种控制策略在给定负载 $5\text{ N}\cdot\text{m}$ 时,改进后的控制器也只是下降 5 r/min 。对调控器进行对照实验,给定负载 $10\text{ N}\cdot\text{m}$,恢复稳态的时间相差 20 倍左右。结论 仿真实验数据证明:存在干扰时,拥有自适应条件干扰抑制调控器的系统受到的影响更小,并且在恢复稳态的时间上更加有优势。该方法有效改善了系统的响应速度和抗干扰能力,体现了快速超螺旋算法控制器与自适应条件干扰抑制调控器的优越性。

关键词:快速超螺旋算法;扰动表征指示器;双曲线正切函数;状态观测器

中图分类号:TP341 **文献标识码:**A **doi:**10.16055/j.issn.1672-058X.2026.0004.011

Design of a Fast Super-Twisting Controller with Adaptive Disturbance Regulation

LIU Xiang, LAN Kangrui, LU Huacai

School of Electrical Engineering, Anhui Polytechnic University, Wuhu 241000, Anhui, China

Abstract: Objective To meet the demands for high-performance drive and high control accuracy in permanent magnet synchronous motors (PMSMs) and to address their susceptibility to external disturbances in complex environments, a fast super-twisting algorithm controller incorporating an adaptive conditional disturbance negation (ACDN) is designed. This controller aims to enhance the response speed and control accuracy of the motor across various operating conditions.

Methods Based on the analysis of the classical super-twisting algorithm, in which the discontinuity of the sign function leads to chattering, the hyperbolic tangent function was used to replace the sign function, and the introduced linear term was replaced with an adaptive function. As a result, an improved fast super-twisting algorithm controller was obtained. Secondly, a state observer was designed with acceleration as the extended state. Integrated with the improved algorithm, this observer enhanced the accuracy and speed of lumped disturbance estimation. The estimated lumped disturbance was then used as the input part of the adaptive conditional disturbance suppression regulator. The purpose of the regulator was to distinguish the existing disturbances, suppress the unfavorable ones, utilize the favorable ones, and finally output the

收稿日期:2024-05-11 **修回日期:**2024-08-18 **文章编号:**1672-058X(2026)04-0082-07

基金项目:检测技术与节能装置安徽省重点实验室开放基金项目资助(JCKJ2022A04)。

作者简介:刘祥(1999—),女,安徽寿县人,硕士研究生,从事电机控制研究。Email:liuxiang10221022@163.com.

通信作者:陆华才(1975—),安徽天长人,博士,教授,硕士生导师,从事控制科学与控制工程研究。Email:luhuacai@163.com.

引用格式:刘祥,兰康睿,陆华才.自适应调控干扰下的快速超螺旋控制器设计[J].重庆工商大学学报(自然科学版),2026,43(4):82-88.

Liu Xiang, Lan Kangrui, Lu Huacai. Design of a fast super-twisting controller with adaptive disturbance regulation[J]. Journal of Chongqing Technology and Business University (Natural Science Edition), 2026, 43(4): 82-88.

ideal q -axis current component. **Results** Simulation experimental results showed that under the same working condition, the time for the improved controller to reach the steady state was about one-tenth of that of the traditional proportional-integral control and the traditional sliding mode control, and there was no overshoot. When a load of $5 \text{ N} \cdot \text{m}$ was suddenly applied, all three control strategies caused a speed drop. However, the improved controller achieved a speed decrease of only 5 r/min , which outperformed the other two strategies. In a comparative experiment with and without the ACDN module under a $10 \text{ N} \cdot \text{m}$ load, the recovery time with ACDN was approximately one-twentieth of that without ACDN. **Conclusion** Simulation experimental data prove that when there are disturbances, the system equipped with an adaptive conditional disturbance suppression regulator is less affected and has more advantages in terms of the time required to restore the steady state. This method effectively improves the response speed and anti-interference ability of the system, which reflects the superiority of the fast super-twisting algorithm controller and the adaptive conditional disturbance suppression regulator.

Keywords: fast super-twisting algorithm; disturbance characterization indicator; hyperbolic tangent function; state observer

永磁同步电机 (Permanent Magnet Synchronous Motors, PMSM) 因强过载能力、体积小、功率高等优势在智能机器人、轨道交通等领域得到广泛应用^[1-2]。传统的比例积分控制 (Proportional Integral, PI) 得益于简单易实现成为主流, 但 PMSM 是一个复杂的非线性控制对象, 变量多且强耦合^[3]。在高性能驱动控制要求下, 研究更多样的控制方式一直在路上。由于电机面临着参数不确定、负载转矩等干扰, 调速性能会变差^[4]。设计一种优秀的鲁棒控制方案是一个值得研究的问题。

调速控制器一直是研究电机驱动系统的关键, 许多先进的控制算法和控制手段被应用于转子转速的调节中。文献[5]将伪线性逆系统与滑模控制 (Sliding Mode Control, SMC) 相结合应用于电机, 实现了永磁同步电机的混沌控制。文献[6]提出了一种先进的模糊模型参考自适应系统算法, 通过消除实际定子电流与计算定子电流之间的误差, 最大限度地减少抖振现象, 提高转子调速质量。文献[7]将一种改进的降阶比例积分观测器引入自适应滑模控制。估计未知干扰提供前馈补偿, 改善了颤振, 并减少了到达滑模表面所需的时间。各种新型控制策略层出不穷, 如自适应控制^[8-10]、模糊控制^[11-12]、自抗扰控制^[13-14]等已广泛应用于永磁同步电机的调控系统中。由于滑模对参数变化和干扰不敏感, 无论是与模糊控制或自适应控制结合使用都能表现出不错的状态, 已经逐步取代了 PI 控制。

但滑模控制固有的抖振问题无法忽视, 一旦参数选择不当, 会产生较大的波动。高阶滑模技术则有效解决了这一问题, 超螺旋算法 (Super-twisting Algorithm, STA) 是一种有效的二阶控制方法。胡启国^[15]以变指数取代 STA 超螺旋算法中非线性项的常指数, 以及用分数阶微积分代替整数阶等改进, 使得控制律中的积分器能将不连续函数变得光滑, 但这依赖于扰动边界。

宋昱霖^[16]将全局快速滑模控制与超螺旋算法结合, 解决了收敛速度慢、参数选取依赖干扰边界信息等缺点。赵凯辉^[17]结合超螺旋算法和快速终端切换函数控制器, 设计扩展滑模扰动观测器精准估计超局部模型中的未知部分, 并前馈补偿给设计的控制器, 进一步提升系统的抗干扰能力和跟踪性能。尹生静^[18]使用复合控制方法, 将超螺旋电压外环控制器与超螺旋扰动观测器相结合。设计 STA 的电压外环控制器, 再开发了负载扰动观测器, 将估计值作为补偿项前馈到 STA 控制器中。高阶算法与观测器结合, 使得估计精度大幅提升, 但对估计扰动完全补偿和“一刀切”的处理手段, 都未充分研究其潜在优势。

在现有的两自由度控制方案中, 为取得更好的控制效果, 针对扰动补偿这一局限性, 孙金林^[19]设计了广义 STA 扩展状态观测器用于扰动, 构建一种自适应条件干扰抑制调控器 (Adaptive Conditional Disturbance Negation Controller, ACDN), 通过扰动表征指示器来判断估计的干扰是有利还是不利, 非光滑项积分控制器与 ACDN 调控器协同工作, 具有较好的动态性能和鲁棒性, 但响应速度有待提升。鉴于此, 设计响应性能更好的控制器与 ACDN 协同工作, 从收敛速度、控制精度和抗干扰能力等方面进行改进。

本文通过对 STA 控制方法的研究, 搭建了快速超螺旋算法 (FSTA) 的控制模型, 通过用双曲线正切函数代替存在的符号函数, 将自适应函数使用在线性项中, 大幅提升了系统的响应速度, 削弱了抖振。同时将改进后的 IFSTA 应用到扩展状态观测器 (Extended State Observer, ESO) 中, 提高了对集总扰动的估计速度和精度。对于 ACDN 调控器的设计, 依旧用自适应函数来抵消符号函数带来的抖振, 对于干扰因素, 不再是传统的完全补偿或完全抵消。而是用干扰特征值来对干扰进行处理, 这样的设计能将干扰的潜力发挥到最大。

1 模型建立与控制器设计

1.1 永磁同步电机系统的数学模型

在理想状态下,建立 d 、 q 旋转坐标轴的电机模型,当定子在 d 轴电压为 0 时,描述运动方程:

$$T_e - T_L = J \frac{d\omega}{dt} + B\omega \quad (1)$$

电机的转矩方程:

$$T_e = \frac{3}{2} n_p \psi_f i_q \quad (2)$$

式(1)、式(2)中, T_e 为电磁转矩; T_L 为负载转矩; J 为转动惯量; B 为摩擦系数; ω_m 为机械角速度; n_p 是极对数; i_q 为电流 q 轴的分量; ψ_f 是转子磁链,将式(1)和式(2)改写简化^[20]:

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{1.5n_p\psi_f}{J} i_q^* - \frac{B\omega}{J} - \frac{T_L}{J} = ai_q^* + d \quad (3)$$

式(3)中, d 为扰动。

1.2 控制器设计与分析

设计基于 ACDN 的 IFSTA 调速控制系统,分析相应的设计原理。所提出的控制方案整体结构,如图 1 所示,由 STA-ESO、ACDN 调控器、IFSTA 控制器组成。

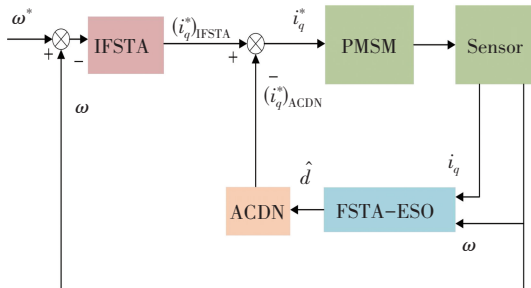


图 1 PMSM 控制系统结构图

Fig. 1 Block diagram of the PMSM control system

1.2.1 超螺旋滑模控制器设计

高阶滑模控制对于不确定非线性系统建模误差和外部干扰有强鲁棒性。采用二阶滑模控制算法可以有效抑制抖振和抵消参数摄动和外部干扰。二阶滑模控制算法可使控制目标沿滑模流形收敛至零。相较于准连续算法等其他二阶算法, FSTA 具有无需计算滑模变量导数和极值的优点。与传统滑模控制相比,快速超螺旋算法使用积分来获取实际控制量,不含高频切换量,有效削弱抖振现象,其算法为

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = -k_1 |x_1|^{\frac{1}{2}} \text{sign}(x_1) + x_2 - k_2 x_1 + \rho_1 \\ \dot{x}_2 = -k_3 \text{sign}(x_1) - k_4 x_1 + \rho_2 \end{cases} \quad (4)$$

式(4)中, ρ_1, ρ_2 为干扰项, k_1, k_2, k_3, k_4 为控制增益,其中 ρ_1, ρ_2 满足以下条件:

$$\begin{cases} |\rho_1| \leq \partial_1 |x_1|^{\frac{1}{2}} + \partial_3 |x_1| \\ |\rho_2| \leq \partial_2 + \partial_4 |x_1| \end{cases} \quad (5)$$

式(5)中, $\partial_1, \partial_2, \partial_3, \partial_4 > 0$, 当 k_1, k_2, k_3, k_4 满足式(6), 系统在有限时间内收敛。

$$\begin{cases} k_1 > 2\max(\partial_1, \sqrt{\partial_2}) \\ k_2 > \frac{3}{8}\partial_3 + \frac{1}{4}\sqrt{\frac{9}{4}\partial_3^2 + 8\partial_4} \\ k_3 > k_1 \frac{\partial_1 k_1 + \frac{1}{8}\partial_1^2 + \partial_2}{k_1 - \partial_1} \\ k_4 > \frac{\frac{1}{2}k_1^2 \left(k_1 + \frac{1}{2}k_1\right)^2 \left(2k_2^2 - \frac{3}{2}\partial_3 k_2 - \partial_4\right)}{2\left(p_1 - \frac{1}{2}k_1 \left(k_1 + \frac{1}{2}\partial_1\right)^2\right) \left(\frac{1}{2}k_1 - \partial_1\right)} + \frac{k_1 \rho_1 \left(\frac{5}{2}k_2^2 + \frac{3}{2}\partial_3 k_2 + \partial_4\right)}{2\left(p_1 - \frac{1}{2}k_1 \left(k_1 + \frac{1}{2}\partial_1\right)^2\right) \left(\frac{1}{2}k_1 - \partial_1\right)} \end{cases} \quad (6)$$

在传统 STA 的基础上加入一阶项,不仅保留了固有的鲁棒性,更在收敛速度上有大幅提升。符号函数的不连续性导致抖振现象,针对这一问题使用连续的双曲线正切函数代替。

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = -k_1 |x_1|^{\frac{1}{2}} \tanh(x_1) + x_2 - f(t)x_1 \\ \dot{x}_2 = -k_3 \tanh(x_1) - k_4 x_1 \end{cases} \quad (7)$$

对于加入的线性项 k_2 替换为自适应函数 $f(t)$:

$$f(t) = \frac{1}{\exp(-|x|) + 1/|x|} \quad (8)$$

函数值范围为 $(0, 1]$, 输入转速误差为 x , 当 x 增大时, $f(t)$ 趋近于 1, 当 x 趋于 0 时, 系统接近稳态, $f(t)$ 趋近 0 但不等于 0。能够提高系统的响应性能, 仿真实验证明了改进后到达稳态速度更快。

控制器的状态误差设计如下:

$$e = \omega^* - \omega \quad (9)$$

定义转速误差滑模面为

$$s = e = \omega^* - \omega \quad (10)$$

式(9)中, ω^* 是转速给定值; ω 是实际转速。将式(10)求导带入式(7), 可得速度控制器的输出为

$$\begin{aligned} i_{q1}^* = & -k_1 |x_1|^{\frac{1}{2}} \tanh(x_1) - f(t)x_1 + \\ & \int (-k_3 \tanh(x_1) - k_4 x_1) \end{aligned} \quad (11)$$

1.2.2 基于 FSTA-ESO 设计的 ACDN

FSTA-ESO 被设计用来估计集总扰动, 相较于 STA 算法, 能够分别在收敛速度和削弱抖振上体现一定的优势。选择加速度 ($\alpha = \dot{\omega}$) 作为扩展状态, 估计集总扰动, 加加速度假设是有界的。同时使用 $\tanh$ 函数进行替换, 能够有效解决问题。FSTA-ESO 设计为

$$\begin{cases} \dot{\hat{\omega}} = -k_1 |e|^{\frac{1}{2}} \tanh(e) + \hat{\alpha} - k_2 e \\ \dot{\hat{\alpha}} = -k_3 \tanh(e) - k_4 e \end{cases} \quad (12)$$

式(12)中: $\hat{\omega}$ 为估计角加速度,可以在有限时间内收敛^[21],估计集总扰动为

$$\hat{d} = \hat{\alpha} - a i_q \quad (13)$$

进一步将集总扰动转换为单位为安培的等效扰动:

$$\hat{d}_i = \hat{d}/a \quad (14)$$

由李雅普诺夫函数可知,所得的观测器是稳定的。以角加速度作为扩展状态,简化了速度估计回路,并使参数配置更加容易。

基于FSTA-ESO,设计一个ACDN调控器,主要用来对估计的集总扰动进行条件干涉。对于不利因素削弱影响,对于有利因素进行利用,让扰动成为提升系统性能的助力,同时保持节能。扰动表征指示器(DCI)对干扰进行区分,以能否减小速度误差为目标,将干扰区分为有利干扰和不利干扰。针对这一区分目标可以设计出理想状态下的IDCI(η_{DCI}):

$$\eta_{\text{DCI}} = \text{sign}(\text{sign}(e) \cdot \text{sign}(d)) = \text{sign}(e \cdot d) \quad (15)$$

其中, d 代表集总扰动, e 代表速度误差,如果(η_{DCI})=1则代表 d 是不利干扰,如果(η_{DCI})=-1则代表是有利干扰。如果 $e>0$,则速度超过给定转速,应该给它一个负加速度。 d 的物理意义就是一个加速度,此时如果 $d<0$,则刚好就是给了一个减速的动作,应该利用这个干扰^[19]。当 $e<0, d>0$ 是类似的情况,当 $d<0, e<0$ 正是描述的不利情况。此处用估计的集总扰动代替实际的集总扰动,将得到实际DCI(η_{DCI}):

$$\eta_{\text{DCI}} = \text{sign}(e \cdot \hat{d}) \quad (16)$$

η_{DCI} 如果等于1,是不利扰动,如果 η_{DCI} 等于-1,是有利扰动。依据DCI设计信号处理器,CDN调控器可被表达为

$$(i_q^*)_{\text{CDN}} = -\hat{d}_i \cdot \eta_{\text{DCI}} = -\hat{d}_i \cdot \text{sign}(e \cdot \hat{d}) \quad (17)$$

$(i_q^*)_{\text{CDN}}$ 为由CDN调节器贡献的参考 q 轴电流 i_q^* 的分量,并且 $\hat{d}$ 为等效估计扰动。符号函数会导致 q 轴电流的不连续性,使得在稳态时出现较为严重的波动^[22]。使用自适应增益构建系统,对于 d 的利用可以在不同运动状态下有效提高性能,ACDN调控系统为

$$(i_q^*)_{\text{ACDN}} = -f(t) \cdot (i_q^*)_{\text{CDN}} = -\frac{1}{\exp(-|x|) + 1/|x|} \cdot \hat{d}_i \cdot \text{sign}(e \cdot \hat{d}) \quad (18)$$

式(18)中, $f(t)$ 为增益自适应律,是关于 e 的函数,可以使得干扰被充分利用或抑制,同时抵消符号函数带来的波动。

集总扰动存在估计误差,会导致不准确的扰动表

征,但这只发生在极少数情况下。即使DCI给出了不准确的扰动特征,ACDN调控器不正确处理的影响也可以忽略不计。当识别有利扰动为不利扰动时,则ACDN调速器将其抑制,动态性能几乎没有变化。当不利干扰被认为是有利的,系统尝试利用,但输出非常小,可以忽略。总之,DCI很少给出错误结果,即使有,影响也可以忽略不计。

ACDN的加入使得在面对扰动时,能够先对扰动进行区分,再合理利用,从而提高系统的响应性能。完成ACDN调速器的构建后,将所设计的IFSTA控制器与之结合,表示为

$$\begin{aligned} i_q^* &= i_{q1}^* + (i_q^*)_{\text{ACDN}} = -k_1 |x_1|^{\frac{1}{2}} \tanh(x_1) - \\ &f(t)x_1 + \int (-k_3 \tanh(x_1) - k_4 x_1) - \\ &\frac{1}{\exp(-|x|) + 1/|x|} \cdot \hat{d}_i \cdot \text{sign}(x_1 \cdot \hat{d}) \quad (19) \end{aligned}$$

高阶滑模FSTA-ESO、ACDN调速器和IFSTA控制器的适当结合可实现整体性能的提升。ACDN调控器和FSTA-ESO的结合,使系统在面对外部扰动时,能利用有利干扰以获得更好的暂态性能,并通过抑制不利干扰来提升系统的鲁棒性。IFSTA控制器不仅在响应性能上有更好的表现,而且ACDN调控器的加入改善了系统的抖振问题。

2 仿真实验与结果分析

为验证ACDN-IFSTA系统的可行性和可靠性,利用MATLAB/Simulink平台创建了永磁同步电机模型。文中设计的系统采用改进后的快速超螺旋滑模应用于速度环的控制器中,由FSTA-ESO估计集总扰动,输入ACDN调控器对估计的集总扰动进行区分,分别对不利干扰和有利干扰进行处理,贡献为理想 q 轴电流的分量。

为了验证ACDN-IFSTA系统的优越性,将使用PI、SMC同时进行比较,并对ACDR存在的先进性进行论证,以及在FSTA改进的必要性上进行佐证。其中ACDN-IFSTA控制系统参数配置为 $k_1=2.25$, $k_3=500$, $k_4=0.1$ 。图1为ACDN-IFSTA控制系统的结构图。表1为搭建电机模型的参数。

表1 电机模型参数

Table 1 Motor model parameters

电机参数	数值
绕组相电阻 R_s/Ω	2.875
电机极对数 np	4
d 轴电感 L_d/mH	0.008 5
q 轴电感 L_q/mH	0.008 5
转子磁链 ψ_r/Wb	0.08
转动惯量 $J/(\text{kg}\cdot\text{m}^2)$	0.008
阻尼系数 $B/(\text{N}\cdot\text{m/s})$	0.020 24

2.1 转速响应性能

电机在负载状态下运行,给定负载为 $1\text{ N}\cdot\text{m}$,初始转速 $800\text{ (r}\cdot\text{min}^{-1})$,仿真时间为 0.4 s ,在 0.2 s 时将转速设定为 $1\,000\text{ (r}\cdot\text{min}^{-1})$,整理数据得出表 2,仿真实验如图 2 所示。由表 2 可以看出,所提出的 ACDN-IFSTA 控制策略,以没有超调的显著优势率先稳定在目标转速,调节时间仅仅只有 0.006 s ,约为 SMC 控制所需时间的 $1/11$ 左右。在负载时,ACDN-IFSTA 控制策略具有良好的快速性和阻尼特性。

表 2 电机负载数据表

Table 2 Motor load data

控制方法	峰值/($\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$)	超调量	调节时间/s
PI	967	15%	0.079
SMC	920	32%	0.067
ACDN-IFSTA	799	0	0.006

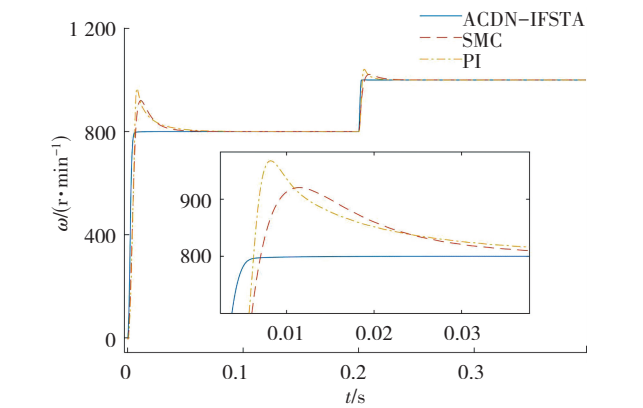


图 2 电机负载转速图

Fig. 2 Motor speed response under load

图 2 为 3 种不同控制策略下电机的响应速度曲线。相比较传统的两种控制策略,文中所提出的 ACDN-IFSTA 控制策略具有更好的动态性能。

同样运行情况下,观察其变速性能。在 0.2 s 时增大至 $1\,000\text{ (r}\cdot\text{min}^{-1})$,图 3 为 3 种控制策略的转速情况。

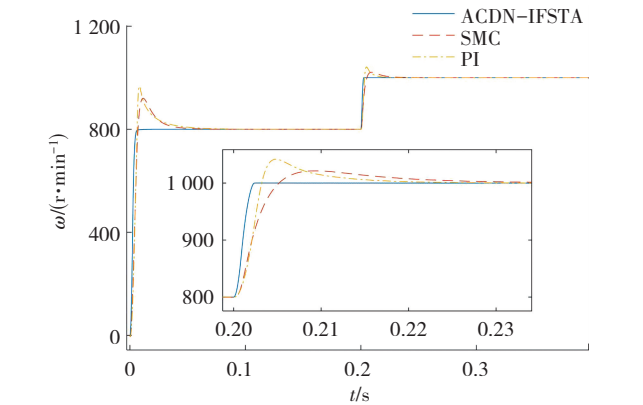


图 3 电机变速转速图

Fig. 3 Motor speed response under variable speed condition

由图 3 可以看出,在这 3 种控制策略中,本文所设计的控制器可以在改变转速时以无超调的绝对优势率先进入稳态,且所需时间也是最短的。由此可得出,所提出的 ACDN-IFSTA 控制方法在突变转速时,相较于 PI 控制和传统 SMC 控制两种方法也能保持绝对优势。

为体现所设计控制器的优越性,将 ACDN-IFSTA 与 ACDN-FSTA 进行对比。设定初始转速依旧为 $800\text{ (r}\cdot\text{min}^{-1})$,仿真时间为 0.4 s ,在 0.2 s 时将转速设定为 $1\,000\text{ (r}\cdot\text{min}^{-1})$,仿真结果如图 4 和表 3 所示。

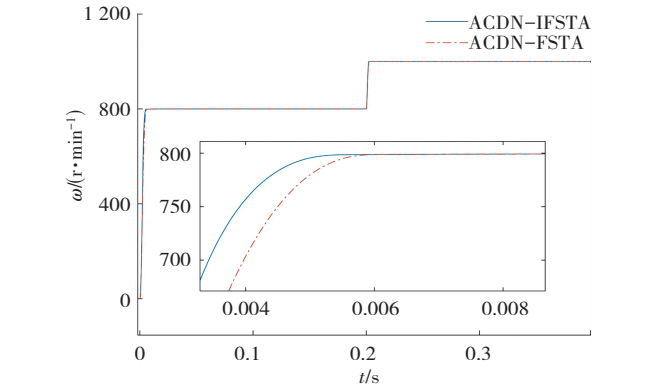


图 4 IFSTA 与 FSTA 转速对比图

Fig. 4 Comparison of IFSTA and FSTA speed responses

表 3 电机转速数据表

Table 3 Motor speed data

控制方法	达到调节时间/s
FSTA	0.005 81
IFSTA	0.005 15

在对比 ACDN-IFSTA 与 ACDN-FSTA 响应性能上,改进后的算法进入稳态的时间更短。

2.2 抗干扰能力

仿真时间设置为 0.4 s ,空载状态下将初始转速设置为 $800\text{ (r}\cdot\text{min}^{-1})$,在 0.2 s 时突加 $5\text{ N}\cdot\text{m}$ 负载,观察控制系统的抗干扰能力。图 5 为 3 种控制策略在突加负载情况下的仿真结果,进行数据处理可得出表 4。

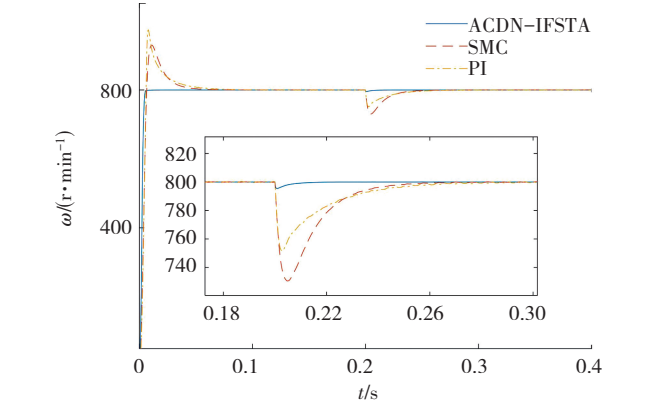


图 5 定速变载转速图

Fig. 5 Speed response under fixed-speed variable-load condition

表 4 电机定速变载数据

Table 4 Motor performance data under fixed-speed variable-load conditions

控制方法	下降转速/($\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$)	恢复时间/s
PI	70	0.060
SMC	49	0.051
ACDN-IFSTA	5	0.009

由图 5 和表 4 所知,使用文中所设计的调速系统,受到相同负载扰动影响更小,且恢复至稳态更加迅速。在 0.2 s 时突加 5 N·m 负载转矩时,PI 控制下降转速 70 ($\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$),SMC 下降转速 49 ($\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$),而文中所展示的控制器仅仅 5 ($\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$)。在恢复时间上,PI 所需时间为 ACDN-IFSTA 控制的 6 倍之多,SMC 为 NTSMC 所需时间的 5 倍之多。由此可见,系统抗干扰能力强,具有一定鲁棒性。

加入 ACDN 环节对于扰动性能的改善很明显,此处将 ACDN-IFSTA 与 IFSTA 进行仿真实验对比,设定仿真时间为 0.3 s,初始转速为 800 ($\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$),在 0.15 s 时突加 10 N·m 负载转矩,对比结果如图 6 和表 5 所示。

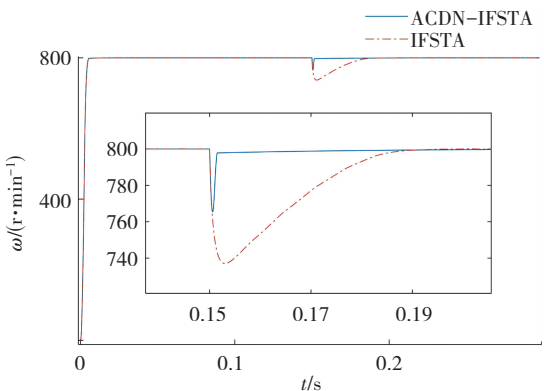


图 6 ACDN 抗干扰效果图

Fig. 6 Anti-disturbance performance comparison with and without ACDN

表 5 ACDN 抗扰效果数据表

Table 5 ACDN anti-disturbance performance data

控制方法	下降转速/($\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$)	恢复时间/s
ACDN-IFSTA	35	0.001 5
IFSTA	63	0.037 9

当在 0.15 s 时突加 10 N·m 负载转矩时,拥有 ACDN 环节的系统受到的干扰影响更小,并在回到稳态的时间上有绝对优势。由此可见,ACDN 环节的加入,使系统的抗干扰能力有了质的飞跃。

2.3 结果分析

图 2、图 3、图 5 展示了在 PI、SMC、ACDN-IFSTA 3 种控制策略下永磁同步电机各自的响应速度,所设计

的控制器在转速的控制精度上有着更高的水准。为验证复杂环境下受到外部干扰时系统是否具备强力的抗干扰能力,进行负载启动和突变负载两组仿真实验。图 4 和图 5 分别论证了 IFSTA 的优越性和 ACDN 的可靠性,解决了复杂环境下存在的外部干扰等问题。通过 MATLAB/Simulink 仿真实验平台证明了所设计的 ACDN-IFSTA 在不同转速和负载下具有良好的动态响应性能和抗干扰能力。

3 结束语

本文设计了一种基于自适应条件干扰抑制调控器的快速超螺旋算法控制器,使得永磁同步电机到达稳态的时间大大缩短,没有超调,同时在受到外部扰动时,系统将对干扰进行条件抑制。在设定相同负载转矩的情况下,由观察可知,该控制器仅仅以传统滑模控制器所需时间的 1/5 就能恢复稳定状态。该控制策略有效提高了系统的控制精度,使得系统在抗干扰能力,响应性能等方面都有大幅度提升。可调参数较多,增加了仿真实验的复杂性,经过调试,最终在仿真实验中证明了所设计的控制策略可行性和有效性。

参考文献(References):

[1] 赵凯辉,殷童欢,张昌凡,等. 永磁同步电机无模型滑模控制方法研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2018, 32(4): 172-180.

Zhao Kaihui, Yin Tonghuan, Zhang Changfan, et al. Research on model-free sliding mode control of permanent magnet synchronous motor[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2018, 32(4): 172-180.

[2] Nguyen A T, Rafiq M S, Choi H H, et al. A model reference adaptive control based speed controller for a surface-mounted permanent magnet synchronous motor drive[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018, 65(12): 9399-9409.

[3] 张懿,陆佳琪,吴金富,等. 扩展状态二阶非奇异终端转子磁链滑模观测器[J]. 电机与控制学报, 2020, 24(5): 99-106.

Zhang Yi, Lu Jiaqi, Wu Jinfu, et al. Extended state second-order nonsingular terminal rotor flux sliding mode observer[J]. Electric Machines and Control, 2020, 24(5): 99-106.

[4] 张硕,李雪荣,崔星,等. 永磁同步电机参数扰动抑制方法[J]. 北京理工大学学报, 2022, 42(2): 184-191.

Zhang Shuo, Li Xuerong, Cui Xing, et al. Parameter disturbance suppression method of PMSM[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2022, 42(2): 184-191.

[5] Zhang R, Gong C, Shi P, et al. Research on chaos control of permanent magnet synchronous motor based on the synthetical sliding mode control of inverse system decoupling[J]. Journal of

- Vibration and Control, 2021, 27(9-10): 1009-1019.
- [6] Khanhp Q, Anh H P H. Novel sensorless PMSM speed control using advanced fuzzy MRAS algorithm[J]. Arabian Journal for Science and Engineering, 2022, 47(11): 14531-14542.
- [7] Nguyen T H, Nguyen T T, Nguyen V Q, et al. An adaptive sliding-mode controller with a modified reduced-order proportional integral observer for speed regulation of a permanent magnet synchronous motor[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2022, 69(7): 7181-7191.
- [8] 张懿, 徐斌, 魏海峰, 等. 新型模型参考自适应的 PMSM 无差拍电流预测控制[J]. 电机与控制学报, 2023, 27(9): 157-167.
- Zhang Yi, Xu Bin, Wei Haifeng, et al. New model reference adaptive deadbeat predictive current control of PMSM[J]. Electric Machines and Control, 2023, 27(9): 157-167.
- [9] 赵鑫宇, 王丽梅. 永磁直线同步电机自适应分数阶终端滑模控制[J]. 电工技术学报, 2023, 38(20): 5434-5443.
- Zhao Xinyu, Wang Limei. Adaptive fractional-order terminal sliding mode control for permanent magnet linear synchronous motor[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(20): 5434-5443.
- [10] 姚绪梁, 黄乘齐, 王景芳, 等. 具有参数辨识功能的永磁同步电机双矢量模型预测电流控制[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(23): 9319-9330.
- Yao Xuliang, Huang Shengqi, Wang Jingfang, et al. A two-vector-based model predictive current control with online parameter identification for PMSM drives[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(23): 9319-9330.
- [11] Duy, Ji J, Zhao W, et al. Self-adapted model predictive current control for five-phase open-end winding PMSM with reduced switching loss[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2022, 37(9): 11007-11018.
- [12] 禹聪, 康尔良. 永磁同步电机模糊滑模速度控制器设计[J]. 电机与控制学报, 2022, 26(7): 98-104.
- Yu Cong, Kang Erliang. Design of fuzzy sliding mode speed controller for permanent magnet synchronous motor[J]. Electric Machines and Control, 2022, 26(7): 98-104.
- [13] 李争, 张梓豪, 王康涛, 等. 基于无模型的 PMLSM 改进自适应滑模自抗扰控制[J]. 电机与控制学报, 2024, 28(1): 142-151.
- Li Zheng, Zhang Zihao, Wang Kangtao, et al. Improved adaptive sliding mode active disturbance rejection control for PMLSM based on model-free theory[J]. Electric Machines and Control, 2024, 28(1): 142-151.
- [14] 孙斌, 王海霞, 苏涛, 等. 永磁同步电机调速系统非线性自抗扰控制器设计与参数整定[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(20): 6715-6726.
- Sun Bin, Wang Haixia, Su Tao, et al. Nonlinear active disturbance rejection controller design and tuning for permanent magnet synchronous motor speed control system[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(20): 6715-6726.
- [15] 胡启国, 王泽霖, 胡豁然. 基于 MATLAB/Simulink 仿真的永磁同步电机新型超螺旋二阶滑模转速控制[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(28): 12108-12114.
- Hu Qiguo, Wang Zelin, Hu Huoran. New super twisting second order sliding mode speed control for permanent magnet synchronous motor based on MATLAB/Simulink simulation[J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23(28): 12108-12114.
- [16] 宋昱霖, 李洪文, 邓永停. 永磁同步电机快速超螺旋滑模控制[J]. 控制工程, 2023, 30(1): 62-69.
- Song Yulin, Li Hongwen, Deng Yongting. Fast super twisting sliding mode control of permanent magnet synchronous motor[J]. Control Engineering of China, 2023, 30(1): 62-69.
- [17] 赵凯辉, 易金武, 刘文昌, 等. 一种永磁同步电机无模型超螺旋快速终端滑模控制方法[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(22): 88-98.
- Zhao Kaihui, Yi Jinwu, Liu Wenchang, et al. A model-free super-twisting fast terminal sliding mode control method for a permanent magnet synchronous motor[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(22): 88-98.
- [18] Yin S, Wang X. Super twisting control design for HSPMSG voltage stabilization based on disturbance observation compensation[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2023, 38(2): 1387-1395.
- [19] Sun J, Xu S, Ding S, et al. Adaptive conditional disturbance negation-based nonsmooth-integral control for PMSM drive system[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2024(99): 1-12.
- [20] Zuo Y, Mei J, Jiang C, et al. Linear active disturbance rejection controllers for PMSM speed regulation system considering the speed filter[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 36(12): 14579-14592.
- [21] Hou Q, Ding S. GPIO based super-twisting sliding mode control for PMSM[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs, 2021, 68(2): 747-751.
- [22] Wang F, He L, Rodríguez J. A robust predictive speed control for SPMSM systems using a sliding mode gradient descent disturbance observer[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2023, 38(1): 540-549.

责任编辑:陈 芳