

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2416966

扰动信息未知的永磁同步电机自适应滑模控制*

王俊凯¹ 张晓宇¹ 柳向斌² 郭 蓉¹

(1.北京建筑大学电气与信息工程学院 北京 100044; 2.北京交通大学电子信息工程学院 北京 100044)

摘要: 扰动信息未知时,永磁同步电机(PMSM)终端滑模控制中的抖振加剧。为了减弱未知不确定和扰动对控制性能的影响,本文提出了一种改进的基于干扰观测器的自适应快速终端滑模控制方法。首先,建立包含参数化不确定性及负载扰动的PMSM数学模型,采用非奇异快速终端滑模面设计滑模控制器,以提高系统的响应速度。接着,利用干扰观测器估计系统的不确定性和未知扰动,并在滑模控制器中引入新的自适应增益以补偿估计误差,实现了无需扰动上界条件的自适应鲁棒控制。改进的自适应控制策略能够实现动态补偿,增强了系统对未知扰动的适应性。仿真和实验结果表明,扰动信息未知时,所提出的方法有效抑制了滑模控制引起的抖振现象,增强了PMSM系统的鲁棒性,显著提升了控制精度和动态性能。

关键词: 永磁同步电机;自适应控制;快速终端滑模控制;鲁棒控制

中图分类号: TP273;TN70 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.8010

Adaptive sliding mode control of permanent magnet synchronous motor with unknown disturbance information

Wang Junkai¹ Zhang Xiaoyu¹ Liu Xiangbin² Guo Rong¹(1. School of Electrical and Information Engineering, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China;
2. School of Electronic and Information Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: In the absence of disturbance information, the chattering effect in terminal sliding mode control of a permanent magnet synchronous motor (PMSM) becomes more pronounced. To reduce the impact of unknown uncertainties and disturbances on control performance, this paper presents an improved adaptive fast terminal sliding mode control method based on a disturbance observer. First, a mathematical model of the PMSM is developed, accounting for parameter uncertainties and load disturbances, and a nonsingular fast terminal sliding surface is designed to enhance the system's response speed. A disturbance observer is then utilized to estimate system uncertainties and unknown disturbances, with an adaptive gain introduced in the sliding mode controller to compensate for estimation errors, achieving adaptive robust control without requiring a known upper bound for disturbances. This improved adaptive control strategy dynamically compensates for disturbances, strengthening the system's adaptability to unknown disturbances. Simulation and experimental results demonstrate that, in the absence of disturbance information, the proposed method effectively suppresses chattering caused by sliding mode control, improves the robustness of the PMSM system, and significantly enhances control accuracy and dynamic performance.

Keywords: PMSM; adaptive control; fast terminal slide mode control; Robust control

0 引言

永磁同步电机(permanent magnet synchronous motor, PMSM)凭借其优异的性能表现、高功率密度和良好的转矩惯性比等特点,已经在工业机器人、电动汽车、数控机床、医疗器械、航空航天等多个领域得到广泛应用^[1-3]。然而,

PMSM控制系统是一个是强耦合、多变量的非线性系统,并且包含扰动和不确定性,例如负载扰动、参数小范围波动和未建模动态^[4-5]。

在PMSM控制系统中,若采用线性控制策略如比例积分(PI)控制器,其控制精度通常会受到限制。PI控制器高度依赖于PMSM系统的参数,对系统的变化和外部扰动十

收稿日期:2024-09-23

* 基金项目:国家自然科学基金(62371032)、北京建筑大学科技计划培育项目(X23049)、北京建筑大学研究生创新项目(PG2024096)资助

分敏感,从而影响控制的稳定性和效率^[6]。为了解决这些问题,伺服系统领域逐渐引入非线性控制算法。如预测控制^[7]、直接转矩控制^[8]、自适应控制^[9]、自抗扰控制^[10]、滑模控制^[11]等。其中,滑模控制(sliding mode control, SMC)因对PMSM模型精度要求不高,并且对外部和内部扰动具有很强的鲁棒性得到广泛应用。

为了进一步提高SMC的动态性能,直接引入非线性滑模面。作为非线性滑模面,终端滑模(terminal sliding mode, TSM)因其能够保证有限时间内收敛到指定轨迹^[12-14]而广泛应用。为了解决二阶系统中存在的终端滑模的奇异问题,文献[15]提出了一种非奇异终端滑模控制(nonsingular terminal sliding mode controller, NTSMC),并在机械臂中得以应用。为了解决非奇异终端滑模的收敛时间问题,文献[16]提出了一种非奇异快速终端滑模控制(nonsingular fast terminal sliding mode control, NFTSMC)方案。

在PMSM控制中,文献[17]提出一种新的趋近律以解决传统NFTSMC的收敛速度和较强抖振问题,采用滑模观测器来估计负载扰动。文献[18]设计一种基于干扰观测器的终端滑模控制方法,通过终端滑模干扰观测器对干扰进行估计,并将估计值引入滑模控制中进行补偿,提高系统的抗干扰能力。文献[19]提出了一种非奇异快速终端滑模控制器与扩张状态观测器相结合的复合控制方法,引入扩张状态观测器对扰动进行估计和补偿。同时,对系统未知部分进行精确观测,进一步提高了电机的控制精度。尽管现有文献中已采用干扰观测器对干扰进行跟踪,但控制参数仍偏大,且未考虑观测器估计误差对控制器的影响,这在实际工程应用中存在不足。实际上,干扰的上界信息通常难以准确获取,且呈现显著的时变特性。例如,在新能源汽车的永磁同步电机系统中,由不确定性引发的干扰问题尤为典型。这类干扰源于多种外部因素,如道路条件、环境变化、轮胎磨损程度和驾驶员操作差异等,直接影响电机的运行状态,使干扰的强度和频率具有随机性和动态性,难以准确获取其上界信息^[20]。

本文首先给出PMSM数学模型,将非奇异快速终端滑模应用在PMSM速度环控制器中,然后用干扰观测器来估计闭环系统的总扰动并增强其抗扰能力。提出新的自适应方法对未知干扰估计误差进行调节,在扰动上界未知的情况下,通过在符号函数前引入自适应增益,减小因不连续控制引起的抖振现象。最后,通过仿真和实验来验证所提出算法性能。

1 永磁同步电机数学模型

对表贴式永磁同步电机进行简化建模分析时,基于以下假设:1)定子三相绕组对称;2)气隙磁场的磁势呈正弦变化;3)磁路无饱和现象,无磁滞和涡流影响;4)高次谐波被忽略;5)不考虑转子上的阻尼绕组。

在 $d-q$ 旋转坐标系下的电压方程为:

$$\begin{bmatrix} u_d \\ u_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 \\ 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \psi_d \\ \psi_q \end{bmatrix} + \omega_e \begin{bmatrix} -\psi_q \\ \psi_d \end{bmatrix} \quad (1)$$

定子磁链方程为:

$$\begin{bmatrix} \psi_d \\ \psi_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_d & 0 \\ 0 & L_q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \psi_f \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

PMSM的转矩方程为:

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

机械运动方程为:

$$J \frac{d\omega}{dt} = \left(\frac{3}{2} P_n \psi_f i_q - B\omega - T_L \right) \quad (4)$$

其中,定子电压用 u_q 、 u_d 表示,分别对应 d 轴、 q 轴分量; d 轴、 q 轴定子电流表示为 i_q 、 i_d ; L_q 、 L_d 为 $d-q$ 轴的定子电感; ψ_d 、 ψ_q 为定子磁链在 d 轴、 q 轴的分量;定子电阻用 R 表示; ω 为永磁同步电机的机械角速度; p_n 为极对数; B 为黏滞摩擦系数; J 为电机和负载的机械惯量; ψ_f 为永磁体的磁链; T_L 为负载转矩。

对于表贴式PMSM,采用 $i_d^* = 0$ 的转子磁场定向矢量控制方法可以取得较好的控制效果,模型可简化为:

$$\begin{cases} \frac{di_q}{dt} = -\frac{1}{L_q} R i_q - \frac{p_n \psi_f}{L} \omega + \frac{1}{L_q} u_q \\ \frac{di_d}{dt} = p_n \omega i_q + \frac{u_d}{L_d} \\ \frac{d\omega}{dt} = \frac{3p_n \psi_f}{2J} i_q - \frac{B}{J} \omega - \frac{T_L}{J} \end{cases} \quad (5)$$

2 PMSM 控制器设计

2.1 滑模面设计

速度控制器的设计应使得在负载扰动和其他不确定的情况下,速度给定值与实际速度保持一致。

为实现控制目标,定义PMSM系统的状态变量:

$$\begin{cases} x_1 = \omega_{ref} - \omega_m \\ x_2 = \dot{x}_1 = -\dot{\omega}_m \end{cases} \quad (6)$$

其中, ω_{ref} 为电机参考转速, ω_m 为电机实际转速。

由式(5)和式(6)可得:

$$\dot{x}_2 = -\ddot{\omega}_m = -\frac{3P_n \psi_f}{2J} i_q - \frac{B}{J} x_2 + \frac{1}{J} \dot{T}_L \quad (7)$$

考虑在实际工程中,转子磁链、电机转矩惯量、粘滞摩擦系数会随着电机运行而在一定范围内变化。式(7)可写为:

$$\dot{x}_2 = -\ddot{\omega}_m = -\left(\frac{3P_n \psi_f}{2J} + \Delta_a \right) i_q - \left(\frac{B}{J} + \Delta_b \right) x_2 + \left(\frac{1}{J} + \Delta_c \right) \dot{T}_L \quad (8)$$

其中, Δ_c 、 Δ_a 、 Δ_b 分别为相应参数变化。

将模型参数化不确定性描述为:

$$g = \Delta_c \dot{T}_L - \Delta_a \dot{i}_q - \Delta_b x_2 \quad (9)$$

设 $d(t)$ 为总的不确定量, 即:

$$d(t) = g + \frac{B}{J}x_2 + \frac{3P_n\psi_f}{2J}(i_q^* - i_q) - \frac{1}{J}\dot{T}_L \quad (10)$$

将式(10)代入式(8)可得:

$$\dot{x}_2 = -\dot{\omega}_m = -\frac{3P_n\psi_f}{2J}i_q^* + d(t) \quad (11)$$

结合式(6)和式(11)可得:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = -\frac{3P_n\psi_f}{2J}i_q^* + d(t) \end{cases} \quad (12)$$

对于 PMSM, 为获得有限时间的快速收敛性能, 给出如下形式的非奇异快速终端滑模面:

$$s = x_1 + \alpha x_1^\lambda + \frac{1}{\beta}x_2^{\frac{p}{q}} \quad (13)$$

其中, $\alpha > 0, \beta > 0, \lambda > 1, p, q$ 为正奇数, 且满足 $p > q$ 及 $1 < \frac{p}{q} < 2$ 。

当 $s = 0$ 时, 可得转速误差变化率为:

$$x_2 = (-\beta x_1 - \beta \alpha x_1^\lambda)^{\frac{q}{p}} \quad (14)$$

在式(14)中, 当系统状态变量远离平衡点时, 此时转速误差较大, 误差的收敛速度主要由式(14)中的 $-\beta \alpha e^\lambda$ 决定; 而当系统状态接近平衡点时, 误差较小, 此时误差的收敛速度主要由 $-\beta x_1$ 决定。因此, NFTSM 收敛速度更快, 并且避免了控制律求取过程中可能出现的奇异现象。

设状态变量到达 $s = 0$ 时间为 t_0 , 转速误差 x_1 收敛到 0 时间为 t_1 , 由式(14)可得 t_1 为:

$$t_1 = -\beta^{-q/p} \int_{x_1(t_0)}^0 (x_1 + \alpha x_1^\lambda)^{-q/p} dx \quad (15)$$

2.2 控制器设计

对系统动态式(12), 采用如下扰动观测器^[21]:

$$\begin{cases} \dot{\hat{z}} = \hat{d} + i_q^* \\ \dot{\hat{d}} = -R_1^2(a_1 \tanh(b_1(\hat{z} - s)) + a_2 \tanh(b_2 \hat{d}/R_1)) \end{cases} \quad (16)$$

其中, \hat{d} 是 d 的估计值, z 是中间变量。 R_1, a_1, a_2, b_1, b_2 为正实数。

当 $T > 0$ 时:

$$\lim_{R \rightarrow \infty} \int_0^T |\hat{z} - z| dt = 0 \quad (17)$$

因此, $\hat{z} \rightarrow z$, 由式(16)可知, $\hat{d} \rightarrow d$ 。

结合滑模面式(13)和干扰观测器式(16)所设计控制器如下:

$$i_q^* = \frac{2J}{3P_n\psi_f} [\epsilon \text{sign}(s) + ks + \frac{\beta q}{P} e^{2-\frac{p}{q}} + \alpha \lambda \frac{\beta q}{P} e^{2-\frac{p}{q}} e^{\lambda-1} + \hat{d}] \quad (18)$$

但是, 在复杂动态环境中, 干扰观测器难以精确跟踪所

有外部干扰和内部扰动, 导致系统中实际干扰与观测干扰之间产生一定的干扰估计误差。

为补偿该误差, 本文引入了自适应控制理论, 通过实时调节控制参数, 自动适应扰动的不确定性, 从而减小估计误差对系统性能的影响。

考虑到扰动观测器的估计误差, 即 $e_d = \hat{d} - d$, 假设 e_d 有上界但上界未知, 即 $|\hat{d} - d| \leq \eta$, η 为未知常数。即便干扰观测器未能完全精确捕捉干扰, 自适应控制能够在保证系统稳定性的前提下修正估计误差, 并减小符号函数引起的不连续性效应, 确保系统在不同工况下保持稳定性和控制精度, 从而提高了控制系统的响应速度和精度, 增强了系统对参数变化和外界扰动的鲁棒性, 进一步优化了终端滑模控制的整体性能。

基于以上, 本文所设计一种新的自适应非奇异快速终端滑模控制器 (adaptive non-singular fast terminal sliding mode control, AFTSM) 如下:

$$\begin{aligned} i_q^* = \frac{2J}{3P_n\psi_f} [& (\hat{\eta} + \epsilon) \text{sign}(s) + ks + \frac{\beta q}{P} e^{2-\frac{p}{q}} + \alpha \lambda \frac{\beta q}{P} \\ & e^{2-\frac{p}{q}} e^{\lambda-1} + \hat{d}] \end{aligned} \quad (19)$$

其中, $\epsilon > 0$ 为任意正标量, $\hat{\eta}$ 为扰动观测器估计误差上界 η 的自适应估计, 采用如下自适应律:

$$\dot{\hat{\eta}} = \frac{p}{\beta q} |s| x_2^{\frac{p}{q}-1} \quad (20)$$

3 稳定性分析

定理 1: 系统式(12)的非奇异快速终端滑模面式(13)在自适应终端滑模控制器式(19), 自适应律式(20)作用下有限时间到达滑模面 $s = 0$ 。

证明: 选取 Lyapunov 函数为:

$$V = \frac{1}{2}s^2 + \frac{1}{2}\tilde{\eta}^2 \quad (21)$$

其中, $\tilde{\eta} = \hat{\eta} - \eta$, 其导数为: $\dot{\tilde{\eta}} = \dot{\hat{\eta}}$ 。对式(20)求导可得:

$$\begin{aligned} \dot{V} = & s\dot{s} + \dot{\tilde{\eta}}(\hat{\eta} - \eta) = \\ & s(\frac{p}{\beta q}x_2^{\frac{p}{q}-1}(-(\hat{\eta} + \epsilon)\text{sign}(s) - ks - \hat{d} + d)) + \dot{\tilde{\eta}}(\hat{\eta} - \eta) = \\ & -(\hat{\eta} + \epsilon)\frac{p}{\beta q}x_2^{\frac{p}{q}-1}|s| - \frac{p}{\beta q}x_2^{\frac{p}{q}-1}ks^2 - \frac{p}{\beta q}x_2^{\frac{p}{q}-1}s(d - \hat{d}) + \\ & \hat{\eta}\frac{p}{\beta q}x_2^{\frac{p}{q}-1}|s| - \eta\frac{p}{\beta q}x_2^{\frac{p}{q}-1}|s| \leq -\epsilon\frac{p}{\beta q}x_2^{\frac{p}{q}-1}|s| - \\ & \frac{p}{\beta q}x_2^{\frac{p}{q}-1}ks^2 + \frac{p}{\beta q}x_2^{\frac{p}{q}-1}|s|\eta - \eta\frac{p}{\beta q}x_2^{\frac{p}{q}-1}|s| \leq \\ & -\frac{p}{\beta q}x_2^{\frac{p}{q}-1}(ks^2 + \epsilon|s|) \end{aligned} \quad (22)$$

由式(22)可知, 当参数选择满足 $k > 0$ 时, $\dot{V} \leq 0$ 成立。由李雅普诺夫稳定性定理可知, 滑模面 s 能够有限时间渐近收敛。证毕。

由于滑模到达以后,滑动模态是一个非奇异终端滑模,系统状态在滑模面上也将会有有限时间快速收敛至原点。从

而所设计的抗干扰鲁棒速度控制器是有限时间稳定的。

PMSM控制系统结构图如图1所示。

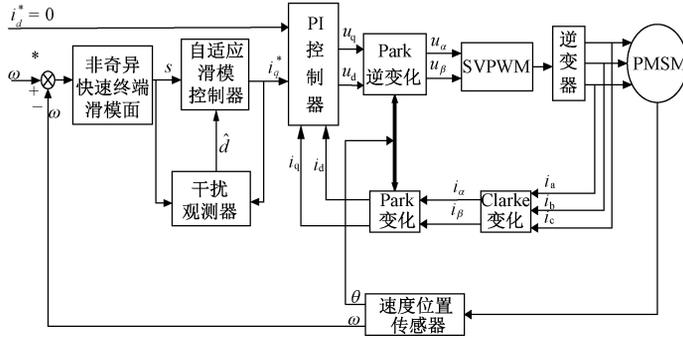


图1 本文控制系统结构图

Fig.1 Control system structure diagram

4 仿真与实验

4.1 仿真验证

在 MATLAB/Simulink 平台进行仿真,按照图1所示的 PMSM 系统搭建模型,验证本文所提出的控制算法性能。将所提控制策略与 TSM、NFTSM、以及文献[22]控制策略进行对比。

文献[22]控制器设计如式(23)所示,为增强对比性采用了与本文相同的干扰观测器。

$$i_q = \frac{2J}{3P_n\psi_f}(\lambda_1 |\dot{e}|^{\alpha_1} \text{sign}(\dot{e}) + \lambda_2 |e|^{\alpha_2} \text{sign}(e) + \int_0^t [g_1 s - \dot{\gamma} \text{sign}(s)] dt - \hat{D}(t)) \quad (23)$$

其自适应律为:

$$\dot{\gamma} = -g_2 \frac{1 + \lambda_3 - e^{-\gamma|s|}}{\lambda_3} \quad (24)$$

PMSM 仿真的主要参数如表1所示。

表1 永磁同步电机参数

Table 1 Permanent magnet synchronous motor parameters

参数	数值
定子电阻/Ω	2.875
q 轴电感/H	0.008 5
d 轴电感/H	0.008 5
永磁体磁链/Wb	0.175
转动惯量/(kg·m ²)	0.003
摩擦系数/(N·m·s)	0.008
极对数	4

电流环均采用 PI 控制器,电流环中 $K_p = 17, K_i = 5750$ 。仿真时间设为:0.5 s,电机参考转速为 $\omega_{ref} = 1000$ r/min。仿真分析分别在突加定常干扰、突加时变干扰、以及在转速突变时,对比3种不同算法的性能表现。

仿真一:突加定常干扰。空载启动,在电机 1000 r/min

转速稳定运行后,于 0.5 s 给定干扰为 0.3 N·m 并持续至仿真结束。仿真结果如图2。由表2、表3对比可以看出所提算法在快速性以及抗干扰能力相较于其他3种算法有所提高。

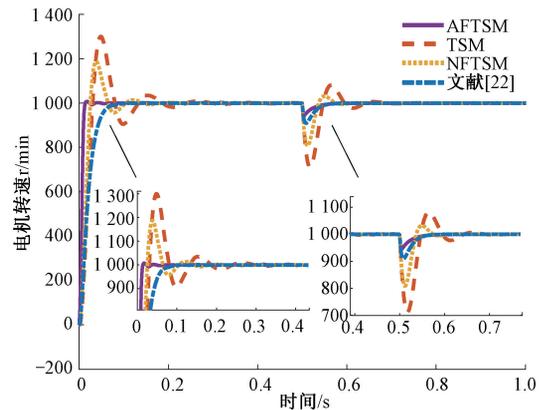


图2 PMSM 突加定常干扰对比

Fig.2 Comparison of sudden interference in PMSM

表2 4种算法启动对比

Table 2 Start comparison of four algorithms.

控制方法	调节时间/s	稳态误差
TSM	0.38	1.62
NFTSM	0.22	1.21
AFTSM	0.07	0.74
文献[20]	0.11	0.931

仿真二:突加时变干扰。在电机 1000 r/min 稳定运行时,在 0.4 s 时,将电机负载转矩从 0 增大到 $0.1\sin(6\pi t) + 0.5$ N·m 并持续至仿真结束。仿真结果如图3所示,电机于 1000 r/min 稳态时突加时变干扰,本文所提算法电机转速波动明显减少,转速波动相较 TSM、NFTSM 和文献[22]3种算法分别提高 88%、70%、50%可以看出所提算法有着较强的抗干扰能力。

表 3 突加负载对比

Table 3 Comparison of sudden loads

负载/ Nm	控制方法	调节时间/ s	最大转速下降/ ($r \cdot \text{min}^{-1}$)
0.3	TSM	0.21	289
	NFTSM	0.14	192
	AFTSM	0.05	54
	文献[20]	0.08	89

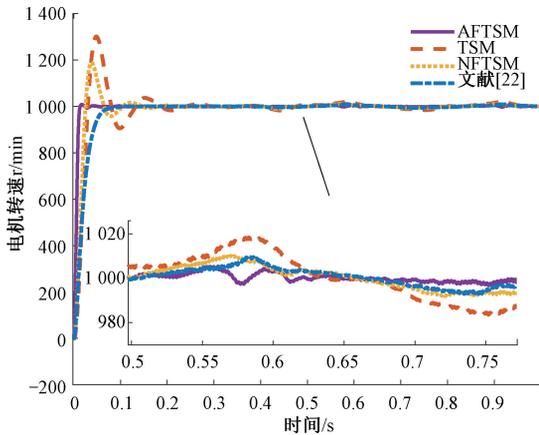


图 3 PMSM 突加时变干扰对比

Fig. 3 Abrupt change of PMSM speed

仿真三: 转速突变。设置启动转速为 1 000 r/min, 0.5 s 时转速突变为 500 r/min。图 4 表明, 在电机转速突变时, 所提算法在 0.08 s 内达到了稳态, 最大转速下降相较 TSM、NFTSM 和文献[19]分别减少了 10.1%、6.4% 和 2.1%。本文所提算法性能表现优于其他 3 种算法。

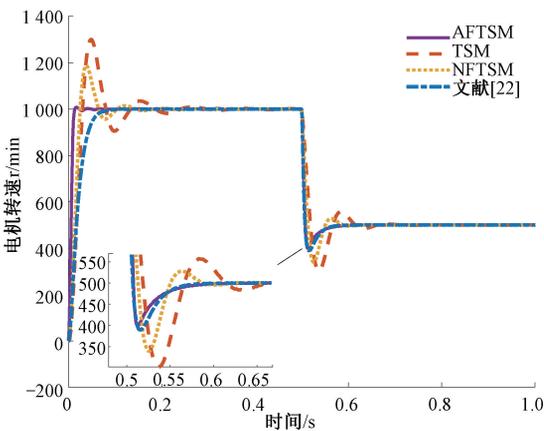


图 4 PMSM 转速突变对比

Fig. 4 Abrupt change of PMSM speed

综上所述, 从仿真结果来看, 所提出的非奇异自适应终端滑模控制算法和其他两种控制算法相比, 快速性、抗干扰性以及稳态时电机转速波动都要优于其他两种算法。

图 5 给出了 3 种仿真实验中, 本文所提算法增益 γ 的

在线自适应变化情况。

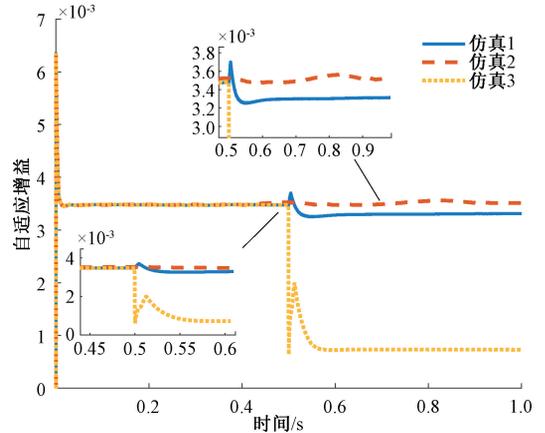


图 5 3 组仿真下自适应增益变化

Fig. 5 Abrupt change of PMSM speed

4.2 实验验证

为验证所提自适应快速终端滑模算法在现实工程中的有效性, 在 Links-RT 半实物仿真平台进行实验验证, 实验硬件平台如图 6 所示。对所提算法和 TSM、NFTSM 算法进行充分对比实验。采用的永磁同步电机参数如表 4 所示。电流内环 PI 算法参数: $K_p = 0.03, K_i = 1$ 。

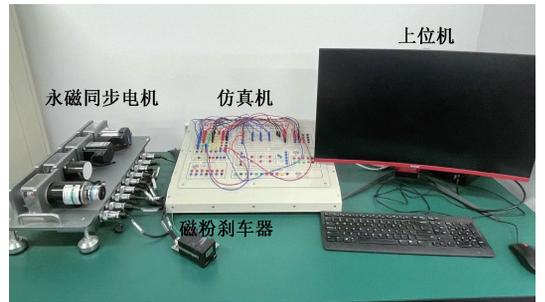


图 6 实验硬件平台

Fig. 6 Experimental hardware platform

表 4 实验永磁同步电机参数

Table 4 Parameters of permanent magnet synchronous motor

参数	数值
额定功率/kW	0.1
额定转速/($r \cdot \text{min}^{-1}$)	3 000
额定电压/V	24
额定电流/A	5.5
线电阻/ Ω	0.3
线电感/mH	0.43
额定转矩/($N \cdot \text{m}$)	0.32
极对数	4

实验一: 电机转速突变实验。电机空载状态下启动。初始转速设定为: 1 000 r/min。在转速稳定运行情况下, 于 8 s 时将电机转速调整为: 500 r/min 并持续至实验结束。

实验结果如图7~10所示。由图7可以看出,所提算法在快速性相较于其他算法有所提高。在稳态时,所提算法由于在自适应增益和干扰观测器双重作用下,电机转速波动有所减小。3种控制算法启动时对比如表5所示。图8为电机稳定运行时将期望转速下降为500 r/min。转速突降时,本文所提算法相较于 NFTSM 和 TSM 最大转速下降提升68%和74.4%。图9为在实验一过程中自适应增益变化曲线。

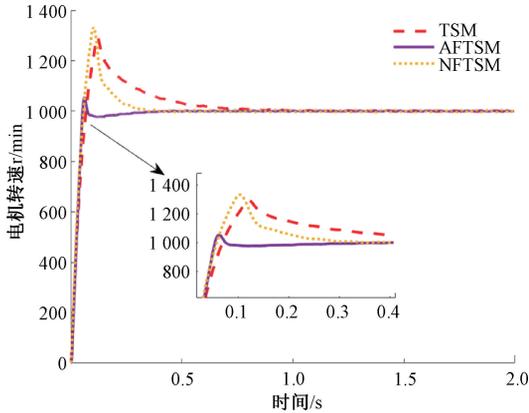


图7 转速突变实验

Fig. 7 Speed mutation experiment

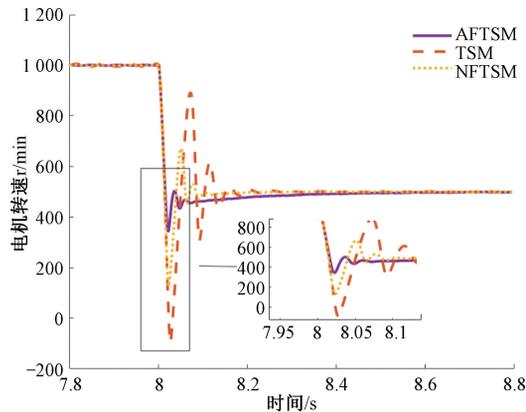


图8 1000~500 r/min 转速突变实验

Fig. 8 1000~500 r/min speed mutation experiment

表5 实验一控制算法对比

Table 5 Comparison of control algorithms

控制方法	超调量/%	调节时间/s	稳态误差
TSM	27.8	0.974	4.06
NFTSM	32.0	0.453	2.53
AFTSM	3.6	0.335	2.04

图10为1000 r/min电机稳定运行时,3种算法控制下电机转速波动曲线。由图10可以看出,在稳态时,所提算法由于在自适应增益和干扰观测器双重作用下,电机转速波动有所减小。

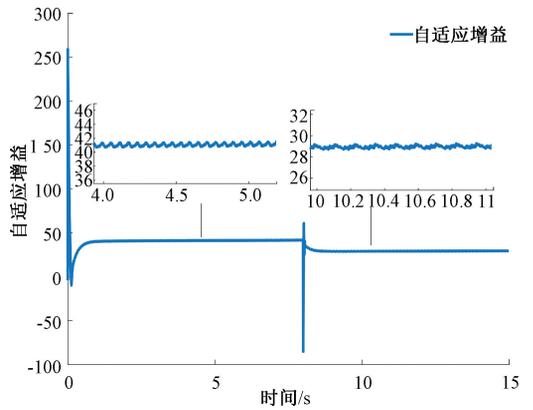


图9 自适应增益波形

Fig. 9 Adaptive gain waveform

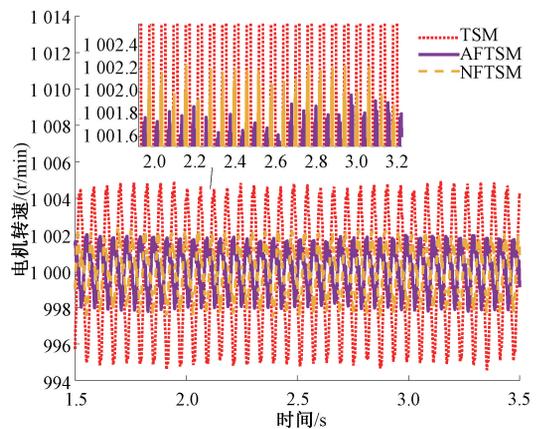


图10 稳态转速波动对比

Fig. 10 Comparison of steady-state speed

实验二:突加定常干扰实验。电机空载状态下启动。在1000 r/min稳定运行时,于9s时,利用磁粉刹车器模拟电机负载。从0增大到额定负载的30%并持续至仿真结束。在增加负载后,本文所提算法相较于TSM和NFTSM在面对突加干扰的抗干扰能力有了较大提升,转速波动对比其他两种算法分别下降87%和67.5%。实验结果如图11~12所示。图12为所提算法中干扰观测器在实验二时的干扰观测估计值。

实验三:突加时变干扰实验。设置启动转速为1000 r/min,从6.5s开始在电机稳定运行状态下,通过磁粉刹车器对电机施加连续时变干扰,由额定负载的0%增加到50%然后在额定负载20%~50%区间内,对负载进行不间断的改变,意在模拟实际工程中未知负载扰动的时变性与不确定性。实验结果如图13~15所示。

图13是3种算法在时变负载下的转速曲线,从中可以看出在9s时,面对较强负载,TSM和NFTSM的抗干扰能力不强,电机转速出现明显波动,而所提算法则表现稳定。整个负载变化工程中,所提算法转速波动维持在±3 r/min内,而TSM与NFTSM最大转速波动均超过

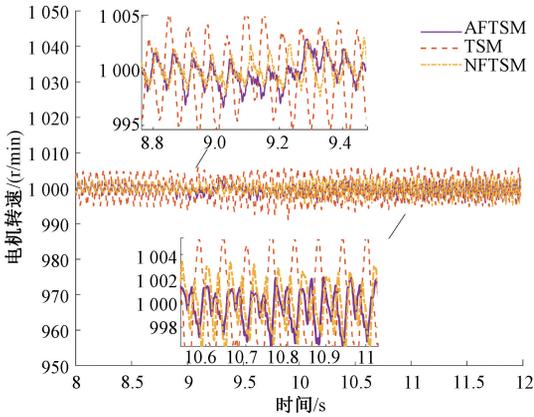


图 11 突加定常干扰实验

Fig. 11 Sudden addition of steady interference experiment

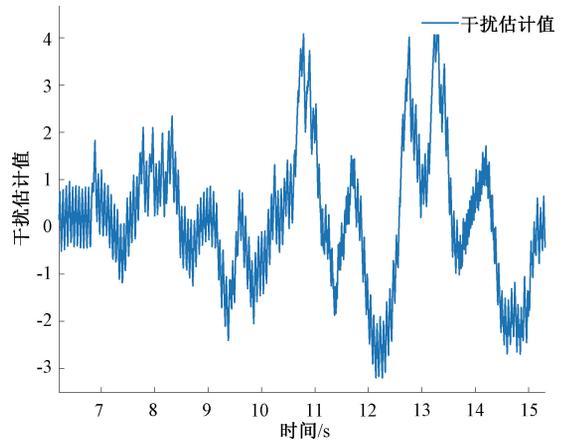


图 14 干扰观测器估计值

Fig. 14 Interference observer estimates

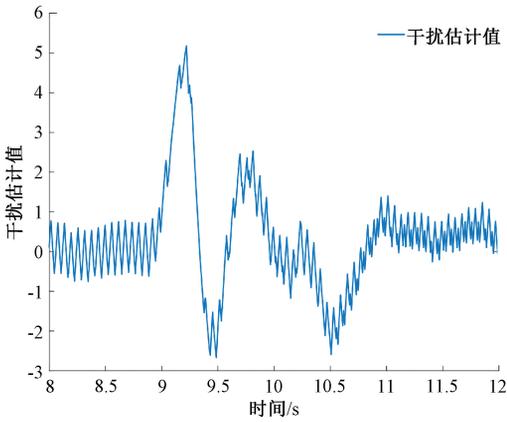


图 12 实验二干扰观测器估计值

Fig. 12 Experiment 2 interference observer estimates

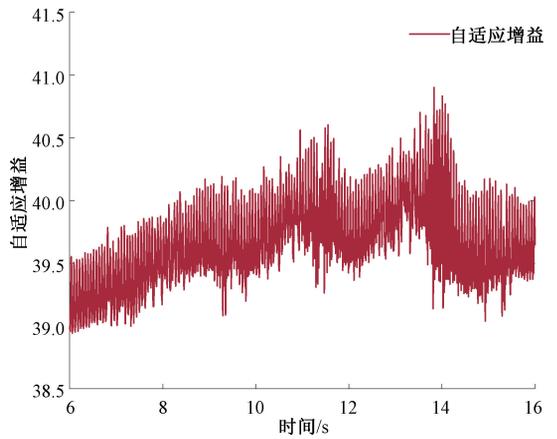


图 15 自适应增益变化曲线

Fig. 15 Adaptive gain change curve

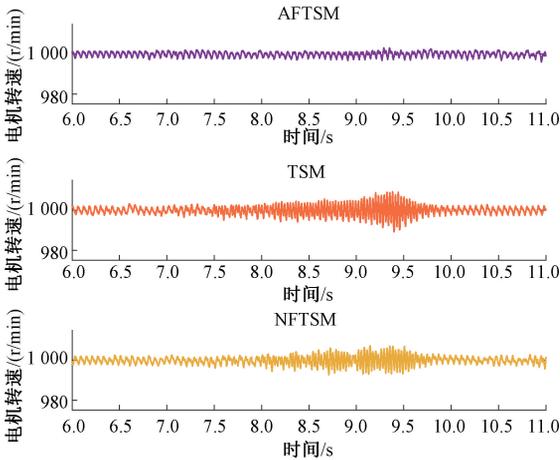


图 13 时变干扰下转速曲线

Fig. 13 Speed curve under time-varying interference

± 5 r/min。图 14 所示为干扰观测器在施加时变干扰时的估计值曲线。

图 15 所示为对应的自适应增益曲线。

5 结 论

本文提出了一种基于干扰观测器的 PMSM 自适应终端滑模控制方法。考虑电机参数化不确定性和未知扰动,设计了干扰观测器对干扰进行估计。加入了符号函数项的动态自适应增益,使得系统抗干扰能力加强并且抖振进一步减小。综合仿真和实验结果表明,与现有方法相比,所提出的自适应终端滑模控制方法可以使得 PMSM 有较快的动态性能、更小的电机转速波动以及更强的抗扰能力。

参 考 文 献

[1] SUN X D, SHI ZH, LEI G, et al. Analysis and design optimization of a permanent magnet synchronous motor for a campus patrol electric vehicle[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2019, 68(11): 10535-10544.

[2] WANG Y Y, GU L Y, XU Y H, et al. Practical tracking control of robot manipulators with continuous fractional order nonsingular terminal sliding mode[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 63(10): 6194-6204.

- [3] GUO H, XU J Q, CHEN Y H. Robust control of fault-tolerant permanent magnet synchronous motor for aerospace application With guaranteed fault switch process [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62(12): 7309-7321.
- [4] JUNEJO A K, XU W, MU CH, et al. Adaptive speed control of pmsm drive system based a new sliding-mode reaching law[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(11): 12110-12121.
- [5] 尹诗荀, 郑志安, 朱俊杰. 基于延迟补偿的永磁同步电机并行自抗扰控制[J]. 仪器仪表学报, 2024, 45(3): 275-285.
- YIN SH X, ZHENG ZH AN, ZHU J J. Time delay compensation-based parallel active disturbance rejection control for permanent magnet synchronous motors[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2024, 45(3): 275-285.
- [6] ZHU CH L, TU Q ZH, JIANG CH M, et al. Global fast terminal sliding mode control strategy for permanent magnet synchronous motor based on load torque Luenberger observer [J]. IEICE Electronics Express, 2021, 18(19): 20210348.
- [7] BAI C, YIN ZH G, ZHANG Y Q, et al. Robust predictive control for linear permanent magnet synchronous motor drives based on an augmented internal model disturbance observer [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2022, 69(10): 9771-9782.
- [8] REHMAN A U, CHOI H H, JUNG J W. An optimal direct torque control strategy for surface-mounted permanent magnet synchronous motor drives[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2021, 17(11): 7390-7400.
- [9] NGUYEN A T, RAFAQ 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.
- [10] 卢志远, 柏受军, 江明, 等. 改进的线性自抗扰永磁同步电机转速控制器设计[J]. 电子测量与仪器学报, 2022, 36(4): 73-81.
- LU ZH Y, BAI SH J, JIANG M, et al. Improved design of linear self-turbulent permanent magnet synchronous motor speedcontroller [J]. Journal of Computer Applications, 2022, 36(4): 73-81.
- [11] ZHU P K, CHEN Y, LI M. Terminal sliding mode control of permanent magnet synchronous motor based on the reaching law [J]. Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering, 2020, 234(7): 849-859.
- [12] WANG J X, ZHAO L, YU L. Adaptive terminal sliding mode control for magnetic levitation systems with enhanced disturbance compensation [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2021, 68(1): 756-766.
- [13] TRUONG T N, VO A T, KANG H J. A Backstepping global fast terminal sliding mode control for trajectory tracking control of industrial robotic manipulators [J]. IEEE Access, 2021, 9: 31921-31931.
- [14] GAO J SH, DENG L W, SONG SH M. Fractional order nonsingular terminal sliding mode control for flexible spacecraft attitude tracking[J]. Instrumentation, 2016, 3(1): 21-29.
- [15] FENG Y, YU X H, MAN ZH H. Non-singular terminal sliding mode control of rigid manipulators [J]. Automatica, 2002, 38(12): 2159-2167.
- [16] NGUYEN V C, VO A T, KANG H J. A non-Singular fast terminal sliding mode control based on third-order sliding mode observer for a class of second-order uncertain nonlinear systems and its application to robot manipulators [J]. IEEE Access, 2020, 8: 78109-78120.
- [17] XU B, ZHANG L, JI W. Improved non-singular fast terminal sliding mode control with disturbance observer for pmsm drives[J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2021, 7(4): 2753-2762.
- [18] 岳陆游, 汤少东, 张兵. 永磁同步电机位置伺服系统终端滑模控制[J]. 机床与液压, 2022, 50(17): 66-70.
- YUE L Y, TANG SH D, ZHANG B. Terminal sliding mode control of position servo system of permanent magnet synchronous motor [J]. Machine Tool & Hydraulics, 2022, 50(17): 66-70.
- [19] 张智鑫, 刘旭东. 基于ESO的永磁同步电机伺服系统快速终端滑模控制[J]. 控制理论与应用, 2023, 40(7): 1233-1242.
- ZHANG ZH X, LIU X D. Fast terminal sliding mode control of permanent magnet synchronous motor servo system with ESO [J]. Control Theory & Applications, 2023, 40(7): 1233-1242.
- [20] HUANG Q, HUANG Q H, GUO H CH, et al. Design and research of permanent magnet synchronous motor controller for electric vehicle [J]. Energy Science & Engineering, 2023, 11(1): 112-126.
- [21] 毛海杰, 李炜, 冯小林. 基于双曲正切的非线性跟踪微分器设计[J]. 计算机应用, 2016, 36(S1): 305-309.
- MAO H J, LI W, FENG X L. Design of nonlinear tracking differentiator based on hyperbolic tangent function[J]. Journal of Computer Applications, 2016, 36(S1): 305-309.
- [22] CHEN L, ZHANG H M, WANG H, et al. Continuous adaptive fast terminal sliding mode-based speed regulation control of pmsm drive via improved super-twisting observer [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2024, 71(5): 5105-5115.

作者简介

王_俊凯, 硕士研究生, 主要研究方向为非线性控制、电机控制。

E-mail: 2108550022040@stu.bucea.edu.cn

张_晓宇(通信作者), 博士, 教授, 主要研究方向为控制理论与控制工程等方面的科研与教学。

E-mail: zhangxiaoyu@bucea.edu.cn

柳_向斌, 博士, 博士生导师, 副教授, 主要研究方向为控制科学与工程方面的科研与教学工作。

E-mail: xbliu@bjtu.edu.cn

郭_蓉, 博士, 讲师, 主要研究方向为永磁电机设计优化等方面的科研与教学工作。

E-mail: guorong@bucea.edu.cn