

基于自适应增益的永磁同步电机转速环无模型滑模控制

雷子奇¹, 赵朝会^{2*}, 顾萍萍¹, 张 为¹, 马雨新¹

(1. 上海电机学院 电气学院, 上海 201306;

2. 无锡太湖学院 智能装备工程学院, 江苏 无锡 214064)

Model-Free Sliding Mode Control of Permanent Magnet Synchronous Motor Speed Loop Based on Adaptive Gain

LEI Ziqi¹, ZHAO Chaohui^{2*}, GU Pingping¹, ZHANG Wei¹, MA Yuxin¹

(1. School of Electrical Engineering, Shanghai Dianji University, Shanghai 201306, China;

2. School of Intelligent Equipment Engineering, Wuxi Taihu University, Wuxi 214064, China)

Abstract: [Objective] To solve the problems of reduced control accuracy in permanent magnet synchronous motor (PMSM) speed control systems due to variations in motor parameters and external disturbances, a model-free sliding mode control method for the PMSM speed loop based on adaptive gain is investigated. [Methods] The mathematical model of PMSM under internal parameter changes and load disturbance was constructed. The adaptive gain power reaching law was selected and combined with the model-free control concept to design a model-free sliding mode controller containing a disturbance term. The total motor disturbance was observed using a novel adaptive gain super-twisting sliding mode observer. [Results] With the help of Matlab/Simulink software and dSPACE platform for simulation and experimental comparison, the results demonstrated that the proposed method reduced the dynamic response time of the PMSM system, decreased the rotational speed fluctuation and the system chattering, and improved disturbance rejection ability and stability. [Conclusion] The proposed method can effectively improve the control accuracy of the PMSM speed loop, enhance the dynamic response of the system, inhibit chattering, and improve robustness.

Key words: permanent magnet synchronous motor; model-free sliding mode control; adaptive gain; super-twisting sliding mode observer

摘 要: 【目的】为解决永磁同步电机(PMSM)调速系统中因电机参数变化以及外部扰动造成控制精度降低等问题,本文研究了一种基于自适应增益的 PMSM 转速环无模型滑模控制策略。【方法】构建 PMSM 在内部参数变化

以及受到负载扰动后的数学模型;选用自适应增益幂次趋近律,并结合无模型控制思想设计含有扰动项的无模型滑模控制器;使用新型的自适应增益超螺旋滑模观测器观测电机总扰动。【结果】借助 Matlab/Simulink 软件以及 dSPACE 平台进行仿真与试验对比,结果表明:在本文研究方法下,PMSM 系统动态响应时间降低,转速波动与系统抖振降低,系统抗扰性、稳定性均有提升。【结论】本文所提方法能够有效提高 PMSM 转速环的控制精度、增强系统动态响应能力、抑制抖振并增强鲁棒性。

关键词: 永磁同步电机; 无模型滑模控制; 自适应增益; 超螺旋滑模观测器

0 引言

永磁同步电机(Permanent Magnet Synchronous Motor, PMSM)因高效率、高功率密度及高可靠性等优点被广泛应用^[1-5]。PMSM 转速是体现 PMSM 工作性能的重要指标,其转速控制自然也就成为国内外学者的研究热点,针对 PMSM 转速环的控制策略从传统的比例积分(Proportional Integral, PI)控制^[6-9]一步步发展到目前的滑模控制^[10-11]、无模型控制^[12-13]等。

传统 PI 控制具有结构简单、参数易整定等优点,能够消除稳态误差^[14]。但 PMSM 是一个非线性、强耦合的多变量复杂系统,当电机在复杂工况和特定环境运行时,传统 PI 已经不能实现精确的控制^[15]。滑模控制(Sliding Mode Control, SMC)是变结构控制系统的一种控制策略,通过引入一

个特定的滑模面来控制系统状态的运动,因其动态响应效果好、鲁棒性强等优点被广泛应用在永磁同步电机调速系统中^[16-18]。文献[19]通过设计新型非奇异快速终端滑模面,使得滑模趋近阶段主要依赖指数项、滑动阶段主要依赖线性项,二者相互结合有效地提升了误差的收敛速度,但由于趋近律中使用切换函数,存在着一定的抖振现象。文献[20]改进双幂次趋近律,分别在远离滑模面和接近滑模面时使不同幂次趋近律起主导作用,有效地解决抖振问题,并设计全局快速终端滑模观测器提升系统动态性能。文献[21]在滑模趋近律中加入系统状态变量设计基于自适应幂次趋近律的滑模控制器(Adaptive Sliding Mode Control, ASMC),不仅有效地抑制了系统抖振,同时提升了系统响应速度,但当调速系统受到未知扰动时,速度控制精度会降低。

上述文献所述滑模控制策略虽然能够提升调速系统控制效果,但是在一定程度上,也削弱了滑模控制的特点,使其鲁棒性和抗扰性有所下降。而且,在电机实际运行时不可避免地存在参数变化以及受到未知干扰,此时就无法建立更完整、精确的数学模型,进而影响控制器鲁棒性。针对这一问题,法国学者 Michel Fliess 提出了无模型控制(Model-Free Control, MFC)策略^[22],该方法通过系统输入和输出数据建立数据模型代替数学模型,有效地解决了参数变化、不确定扰动带来的控制精度下降问题。文献[23]将无模型思想与滑模控制结合起来设计无模型滑模控制器,既保留了滑模控制具有良好动态响应的优点,又进一步增强了系统鲁棒性。文献[24]为了缩短滑模趋近模态所用时间,选用改进型快速趋近律,然后结合 MFC 控制提高系统鲁棒性。同时,设计扩展滑模观测器观测超局部模型中的扰动以准确跟踪转速,但没有解决滑模控制存在的固有抖振问题。文献[25]在无模型滑模控制中使用了一种新型的非线性趋近律,有效降低抖振并加快系统状态响应速度,又在所设计的扩展滑模观测器中采用了双曲正切函数代替符号函数,再次削弱了滑模的固有抖振,实现了对转速环的高精度控制。

基于此,本文研究了一种自适应增益的无模型滑模控制方法,并将其应用在 PMSM 转速环上。首先,根据 PMSM 转速环建立电机内部参数

(电感)变化和受到外部扰动(负载突变)下的新型超局部模型。然后,为了加强系统动态响应效果以及削弱抖振选取自适应增益幂次趋近律,并将无模型控制与自适应滑模控制结合设计自适应增益的无模型滑模控制器,以提高系统鲁棒性;设计能够根据扰动变化自动调节滑模增益的自适应增益超螺旋滑模观测器观测调速系统总扰动,并补偿到控制器中作为控制律的扰动项,进一步提升了转速控制精度。最后,在 Simulink 上进行仿真试验并与无模型滑模控制(Model-Free Sliding Mode Control, MFSMC)、改进型无模型滑模控制(Improved Model-Free Sliding Mode Control, IMFSMC)^[25]作对比,在 dSPACE 平台上与 MFSMC 方法进行试验对比,验证了基于增益自适应的 PMSM 转速环无模型滑模控制能够针对电机参数变化以及外部扰动提高控制精度,且具有较快的响应速度和较好的暂、动态控制效果。

1 PMSM 数学模型

本文选用内置式 PMSM 作为研究对象。假定电机工作在理想条件下,不计永磁体磁滞损耗和电机内部参数摄动,且转子的磁场按照正弦分布,不考虑铁心涡流等,则 PMSM 在 $d-q$ 坐标系下的定子电压方程为

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

式中: u_d 、 u_q 分别为 d 、 q 轴电压; R 为定子电阻标称值; i_d 、 i_q 分别为 d 、 q 轴电流; L_d 、 L_q 分别为 d 、 q 轴电感分量标称值; ω_e 为转子电角速度; ψ_f 为永磁体转子磁链。

但是电机在实际运行时,电机内部参数如电阻、电感、转动惯量和永磁体磁链等会因电机温升、磁路饱和等因素发生改变。因此,当 PMSM 在内部参数摄动时,建立 $d-q$ 坐标系下的定子电压方程:

$$\begin{cases} u_d = Ri_d + L_d \frac{di_d}{dt} - \omega_e L_q i_q + \Delta u_d \\ u_q = Ri_q + L_q \frac{di_q}{dt} + \omega_e L_d i_d + \Delta u_q + \omega_e \psi_f \end{cases} \quad (2)$$

式中: Δu_d 、 Δu_q 分别为 PMSM 发生参数摄动时引

起的 d 、 q 轴定子电压变化量。

本文仅对 PMSM 运行时内部电感发生变化作研究分析, 此时 Δu_d 、 Δu_q 可表示为

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

式中: ΔL_d 、 ΔL_q 分别为 d 、 q 轴定子电感摄动量。

在电感摄动下 PMSM 的电磁转矩方程为

$$T_e = \frac{3}{2} p [\psi_f + (L_d - L_q) i_d] i_q + \Delta T_e \quad (4)$$

式中: ΔT_e 为 PMSM 电感摄动时的转矩变化量, 其表达式为

$$\Delta T_e = \frac{3}{2} p (\Delta L_d - \Delta L_q) i_d i_q \quad (5)$$

同时, 考虑负载变化, 可得 PMSM 的机械运动方程为

$$J \frac{d\omega_m}{dt} = T_e - (T_L + \Delta T_L) - B\omega_m \quad (6)$$

式中: T_L 为电机的负载转矩; ΔT_L 为负载转矩变化量; J 为电机的转动惯量; ω_m 为转子机械角速度; B 为阻尼系数。

由式(4)~式(6)可得 PMSM 在电感变化以及受到负载扰动后的转速环状态方程:

$$\begin{aligned} \frac{d\omega_m}{dt} = & \frac{3}{2J} p \psi_f i_q + \frac{3}{2J} p (L_d + \Delta L_d - L_q - \Delta L_q) i_d i_q - \\ & \frac{1}{J} (T_L + \Delta T_L) - \frac{B}{J} \omega_m \end{aligned} \quad (7)$$

2 基于自适应增益的转速环无模型滑模控制设计

考虑电感及负载变化对 PMSM 控制系统的影响, 为提升电机系统控制精度, 本文结合无模型滑模控制动态响应速度快、鲁棒性好的优点和自适应增益方法能够使控制增益随系统状态变化自动调节的优点, 提出了基于自适应增益的 MFSMC 方法以设计 PMSM 控制系统转速环控制。

本文针对 PMSM 转速环的 MFSMC 设计框图如图 1 所示, 该设计思路是先构建 PMSM 转速环新型超局部模型, 然后依据新型超局部模型设计基于自适应增益的无模型滑模控制 (Adaptive Gain-based Improved Model-Free Sliding

Mode Control, IMFASMC) 得到被控量 x 与控制量 i_q^* 并设计自适应增益超螺旋滑模观测器 (Adaptive Gain Super-Twisting Sliding Mode Observer, ASTSMO) 观测控制器中的未知扰动 f 完成转速环控制设计。

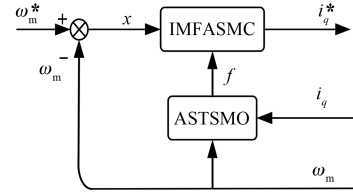


图 1 转速环 MFSMC 框图

Fig. 1 Block diagram of MFSMC for speed loop

2.1 PMSM 转速环超局部模型

超局部模型理论是利用局部建模, 由输入、输出的信息对动态系统进行估计。对于单输入、输出的非线性系统, 其超局部模型可表示为

$$\begin{cases} y^{(n)} = au + g(x) \\ y = x \end{cases} \quad (8)$$

式中: y 为系统输入; u 为系统输出; x 为选定的系统状态量; n 为系统阶数; a 为控制增益; $g(x)$ 为超局部模型中的动态部分。

文献[26]对超局部模型理论进行拓展, 将超局部模型中的动态部分拆解为一个线性的系统状态量和一个系统扰动量, 则新型超局部模型可表示为

$$\begin{cases} y^{(n)} = au + bx + f \\ y = x \end{cases} \quad (9)$$

式中: b 为系统状态增益; f 为系统总扰动并满足 Lipschitz 有界性原理。

基于上述新型超局部模型理论, 结合式(7)和式(9), 可得 PMSM 转速环超局部模型为

$$\frac{d\omega_m}{dt} = ai_q + b\omega_m + f \quad (10)$$

2.2 基于自适应增益的无模型滑模控制器设计

在滑模控制的基础上结合无模型控制理论, 设计无模型滑模控制器。由式(10)可得基于自适应增益的无模型滑模转速环控制器表达式:

$$i_q^* = \frac{x_{smc} + \dot{\omega}_m^* - b\omega_m - f}{a} \quad (11)$$

式中: $\dot{\omega}_m^*$ 为电机给定机械角速度; x_{smc} 为待设计的滑模控制输入项。

根据式(10)和式(11)可得:

$$x_{\text{snc}} = \dot{\omega}_m - \dot{\omega}_m^* \quad (12)$$

定义转速环控制器的状态变量为

$$\begin{cases} x_1 = \omega_m^* - \omega_m \\ x_2 = \dot{x}_1 = x_{\text{snc}} = \dot{\omega}_m^* - \dot{\omega}_m \end{cases} \quad (13)$$

对式(12)进行求导可得:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 = x_{\text{snc}} \\ \dot{x}_2 = \dot{x}_{\text{snc}} = \ddot{\omega}_m^* - \ddot{\omega}_m \end{cases} \quad (14)$$

设计滑模面为

$$s = cx_1 + x_2 \quad (15)$$

式中: c 为大于0的常数。

对式(15)进行求导可得:

$$\dot{s} = cx_2 + \dot{x}_2 \quad (16)$$

设计自适应增益幂次趋近律作为滑模趋近律:

$$\begin{cases} \dot{s} = -h(s) \operatorname{sgn}(s) |s|^{f(s)} \\ h(s) = \frac{\eta}{\delta + (1-\delta)e^{-\mu_1|s|}} \\ f(s) = e^{-\mu_2|s|} \end{cases} \quad (17)$$

式中: $h(s)$ 为自适应增益函数,值域为 $(\eta, \delta^{-1}\eta)$; $f(s)$ 为幂次项自适应增益指数函数,值域为 $(0,1)$; $\mu_1, \mu_2, \eta, \delta$ 为大于0的常数,且 $0 < \delta < 1$ 。

自适应增益幂次趋近律是在传统幂次趋近律的基础上拓展所得,该趋近律将传统的滑模增益项与幂次项指数用自适应增益函数代替,将系统状态引入待设计参数中,实现参数的动态调节。从系统的趋近模态和滑动模态对自适应趋近律进行分析:

(1) 当系统模态处于趋近模态时,即 $|s|$ 从较大值逐渐减小。在这个过程中, $f(s)$ 从0逐渐趋近于1,系统趋近速度不断加快的同时,有着更平滑的加速度;而系统状态在即将进入滑动模态时, $f(s)$ 的值接近于1,此时,系统状态速度的增加削减得更快,能以更小的速度到达滑动模态以降低或消除速度过大引起的超调。同时, $h(s)$ 的值逐渐减小,能够使得系统状态在远离滑模面时有较快的速度,接近滑模面时速度的增加放缓。

(2) 当系统模态处于滑动模态时,即 $|s|$ 为较小值。此时, $f(s)$ 的值接近于1,新型趋近律可看作没有等速项的指数趋近律,具有良好的动态响应能力,而且系统抖振带宽 $2\varepsilon T_s \sigma$ 因幂次函数的存在导致的放大会被抑制。同时, $h(s)$ 为最小值,能够减小系统状态在滑动模态

时的抖振。

由式(13)~式(17)可得 x_{snc} 表达式为

$$x_{\text{snc}} = c(\omega_m^* - \omega_m) + \int_0^t \left[\frac{\eta}{\delta + (1-\delta)e^{-\mu_2|s|}} \operatorname{sgn}(s) |s| e^{-\mu_1|s|} \right] d\tau \quad (18)$$

将式(18)代入式(11)可得 PMSM 矢量控制系统转速环无模型滑模控制器表达式:

$$i_q^* = \int_0^t \left[\frac{\eta}{\delta + (1-\delta)e^{-\mu_2|s|}} \operatorname{sgn}(s) |s| e^{-\mu_1|s|} \right] d\tau + \frac{c(\omega_m^* - \omega_m) + \omega_m^* - b\omega_m - f}{a} \quad (19)$$

2.3 自适应幂次趋近律稳定性证明

利用 Lyapunov 函数证明本文所设计自适应幂次趋近律的稳定性。定义 Lyapunov 函数为

$$V = \frac{1}{2}s^2 \quad (20)$$

对式(20)求导可得:

$$\begin{cases} \dot{V} = s\dot{s} = s[-h(s) \operatorname{sgn}(s) |s|^{f(s)}] \\ \dot{V} = -\frac{\eta |s| e^{-\mu_2|s|+1}}{\delta + (1-\delta)e^{-\mu_1|s|}} \end{cases} \quad (21)$$

观察式(21)可知:因为 $\eta > 0, 0 < \delta < 1$,故分式的分子分母恒大于0,则可得 $\dot{V} < 0$ 。根据李雅普诺夫稳定性理论可知,当 $\dot{V} < 0$ 时,系统状态能够从趋近模态过渡到滑动模态,即基于自适应幂次趋近律设计的滑模速度控制器是稳定的。

2.4 自适应增益超螺旋滑模观测器设计

由于 PMSM 转速环超局部模型中含有未知扰动 f ,本节设计自适应增益超螺旋滑模观测器对其进行观测,并将观测值代入式(19)作为实际扰动值。

考虑未知扰动 f 变化,建立 PMSM 转速环超局部模型为

$$\begin{cases} \frac{d\omega_m}{dt} = ai_q + b\omega_m + f \\ \frac{df}{dt} = \varphi(t) \end{cases} \quad (22)$$

式中: $\varphi(t)$ 为扰动 f 的变化率。

对式(22)设计自适应增益超螺旋滑模观测器,其表达式为

$$\begin{cases} \frac{d\hat{\omega}_m}{dt} = a\hat{i}_q + b\hat{\omega}_m + \hat{f} + x_{smo} \\ \frac{d\hat{f}}{dt} = L \cdot x_{smo} \end{cases} \quad (23)$$

式中: $\hat{\omega}_m$ 为机械角速度观测值; $\hat{f}$ 为扰动观测值; x_{smo} 为待设计的超螺旋滑模控制输入项; L 为滑模观测器待设计的自适应增益。

观测器误差可由式 (22) 和式 (23) 作差得到, 其表达式为

$$\begin{cases} \dot{e}_1 = be_1 + e_2 + x_{smo} \\ \dot{e}_2 = L \cdot x_{smo} - \varphi(t) \end{cases} \quad (24)$$

式中: $\dot{e}_1$ 为速度观测误差; $\dot{e}_2$ 为扰动观测误差。

设计观测器滑模面为

$$s_1 = e_1 \quad (25)$$

选择超螺旋滑模算法作为观测器滑模趋近律:

$$\begin{cases} \dot{s}_1 = -\lambda |s_1|^{\frac{1}{2}} \cdot \text{sgn}(s_1) + v \\ \dot{v} = -\alpha \cdot \text{sgn}(s_1) \end{cases} \quad (26)$$

式中: λ 、 α 为滑模切换增益。

超螺旋滑模算法是二阶滑模算法中最常见的控制算法, 其将产生滑模控制固有抖振的切换函数放置在含有滑模变量的二阶导数中, 最终控制律中会存在对切换函数的积分项, 以此削弱系统抖振。

结合式 (24) ~ 式 (26) 并考虑观测器收敛时扰动观测误差近似为零, 可得到超螺旋滑模控制输入项为

$$x_{smo} = -be_1 - \lambda |s_1|^{\frac{1}{2}} \cdot \text{sgn}(s_1) - \int \alpha \cdot \text{sgn}(s_1) d\tau \quad (27)$$

由文献 [27] 可知, 超螺旋算法的有限时间收敛条件为 $\alpha > 0$ 、 $\lambda > 0$ 。同时, 为保证式 (23) 能够渐进收敛, 需选择合适的 L 值且 $L > 0$ 。

当观测器误差收敛至零时, 即 $e_1 = \dot{e}_1 = 0$ 。此时, 式 (24) 可以化简为

$$\dot{e}_2 + L \cdot e_2 + \varphi(t) = 0 \quad (28)$$

解式 (28), 可得扰动误差为

$$e_2 = \hat{f} - f = e^{-L \cdot t} [C + \int \varphi(t) \cdot e^{L \cdot t} dt] \quad (29)$$

式中: C 为常数。

观察式 (29) 可以发现, 扰动误差随着时间的增大逐渐收敛到 0, 并且 L 越大误差收敛速度越快, 但 L 越大观测到的误差波动也随之增大。由此可知, L 的取值影响观测器的收敛速度以及观测波动大小, 故本节针对 L 设计自适应算法, 以提升观测器观测效果。

自适应算法设计思路为当扰动量变化较大时, 选择较大的 L 值以提升观测速度; 当扰动量较小时, 选择较小 L 的值以降低观测波动。算法开始工作时, 首先选择较大的 L 值, 以确保快速读取扰动, 然后设置扰动比较值 β 与一周期内扰动变化量作比较。当扰动变化量大于 β 时, 认为系统受扰动较大, 选择较大的 L 值; 反之则认为系统稳定, 选择较小的 L 值。

自适应算法实现流程框图如图 2 所示。

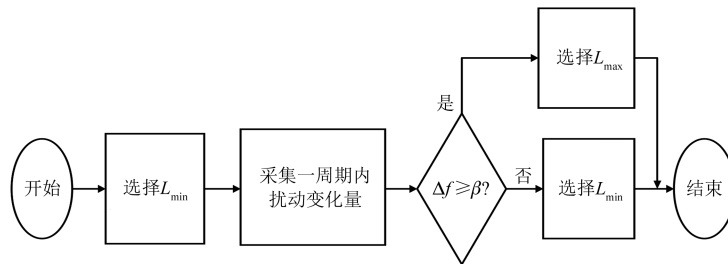


图 2 自适应算法流程图

Fig. 2 Flowchart of adaptive algorithm

由式 (23) 和式 (27) 可得扰动观测值:

$$\begin{aligned} \hat{f} &= - \int L \cdot \\ &\left[be_1 + \lambda |s_1|^{\frac{1}{2}} \cdot \text{sgn}(s_1) + \int \alpha \cdot \text{sgn}(s_1) d\tau \right] dt \end{aligned} \quad (30)$$

3 系统仿真与结果分析

使用 Matlab/Simulink 平台搭建基于自适应增益的永磁同步电机转速环无模型滑模控制模型, 该模型为传统的基于 $i_d = 0$ 的双闭环 PMSM 失

量控制系统。该模型外环为转速环,控制方法使用本文所研究方法;内环为电流环,使用传统 PI 控制。该模型结构框图如图 3 所示。

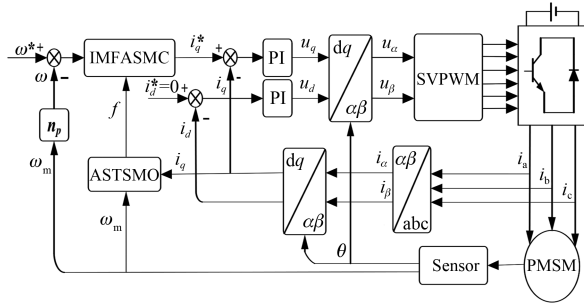


图 3 模型结构框图

Fig. 3 Block diagram of model structure

表 1 为 PMSM 仿真使用的标称参数。设置采样周期为 $10 \mu\text{s}$, 直流侧电压为 546 V 。表 2 为电流环 PI 控制器以及转速环 ASTSMO、IMFASMC 的参数。

表 1 PMSM 参数表

Tab. 1 PMSM parameters

参数名称	参数值
额定转速/($\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$)	1 500
电机极对数 p	4
定子电阻 R/Ω	0.48
定子 q 轴电感 L_q/mH	17.8
定子 d 轴电感 L_d/mH	7.45
电机转动惯量 $J/(\text{kg} \cdot \text{m}^2)$	0.018
阻尼系数 $B/(\text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{s})$	0
转子永磁体磁链 ψ_f/Wb	0.201

表 2 控制器参数表

Tab. 2 Controller parameters

PI	ASTSMO	IMFASMC
$P=186(q \text{ 轴})$	$\lambda=800$	$c=700$
$I=12\,000(q \text{ 轴})$	$\alpha=1\,000$	$a=67$
$P=600(d \text{ 轴})$	$L_{\min}=500$	$b=0$
$I=8\,000(d \text{ 轴})$	$L_{\max}=1\,800$	$\eta=0.1$
—	$\beta=0.3$	$\mu_1=0.000\,5$
—	—	$\mu_2=0.000\,5$
—	—	$\delta=0.25$

3.1 PMSM 在内部参数变化及负载突变下的仿真分析

为验证本文研究方法 IMFASMC 的有效性,在图 3 所示的模型框架下选择传统 MFSMC 与文献[17]所提方法 IMFSMC 作仿真对比(仅改变转

速环控制方法)。仿真步骤:电机空载启动,设置给定转速为额定转速 $1\,500 \text{ r/min}$;在 0.5 s 时,电机加 $15 \text{ N} \cdot \text{m}$ 负载;在 1 s 时,电机 q 轴电感由 17.8 mH 突增 1.5 倍至 26.7 mH ;在 1.5 s 时,电机 d 轴电感由 7.45 mH 突增 1.5 倍至 11.175 mH 。

图 4、图 5 是 PMSM 在空载启动后受到负载扰动以及 d 、 q 轴电感突变时,IMFASMC 与 MFSMC、IMFSMC 的转速响应对比图。

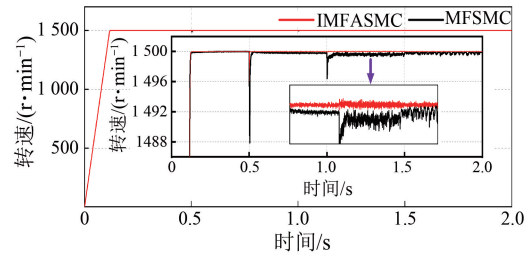


图 4 PMSM 在 IMFASMC 和 MFSMC 下的转速仿真对比图

Fig. 4 Comparison of PMSM speed simulations under IMFASMC and MFSMC

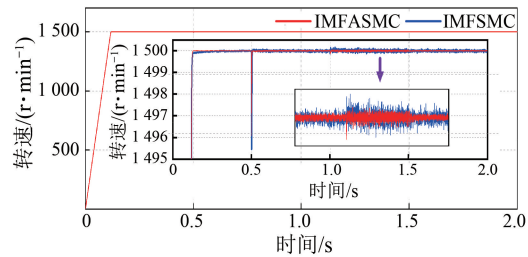


图 5 PMSM 在 IMFASMC 和 IMFSMC 下的转速仿真对比图

Fig. 5 Comparison of PMSM speed simulations under IMFASMC and IMFSMC

由图 4 可知,PMSM 在使用 MFSMC 方法突加载时,转速掉落较多,掉落 12 r/min ,而使用 IMFASMC 方法的转速仅掉落 4 r/min ;当 PMSM 电感发生变化时,在 MFSMC 方法下,转速掉落 3.6 r/min 并发生明显波动,转速抖振加剧,而使用 IMFASMC 方法的转速未发生明显变化。而且,使用 MFSMC 方法时,系统存在一定稳态误差。

由图 5 可知,PMSM 在 IMFASMC 和 IMFSMC 方法下均实现对转速的良好控制。为进一步体现 IMFASMC 方法的优越性,分别对图 5 中 PMSM 转速到达额定转速时、负载突变时、 dq 轴电感突变时的转速曲线进行放大处理,如图 6 所示。

由图 6 可知,PMSM 在使用 IMFASMC 方法

时,空载启动,转速能迅速到达给定转速,转速波动仅有 ± 0.01 r/min,而使用 IMFSMC 方法的转速需要缓慢接近额定转速,并且波动较大为 ± 0.03 r/min;当 PMSM 突加负载时,使用 IMFASMC 方法的转速降落比使用 IMFSMC 方法的小 0.6 r/min 且恢复稳态速度更快;带 $15\text{ N}\cdot\text{m}$ 负载时,使用 IMFASMC 方法的转速波动为 ± 0.03 r/min,而使用 IMFSMC 方法为 ± 0.06 r/min;当 PMSM 的 q 轴电感突增 1.5 倍时,使用 IMFASMC 方法的转速波动变化较小,转速波动为 ± 0.05 r/min,而使用 IMFSMC 方法的转速波动变化较大,转速波动为 ± 0.09 r/min;当 PMSM 的 d 轴电感突增 1.5 倍时,使用 IMFASMC 方法的转速波动变化较小,转速波动为 ± 0.02 r/min,而使用 IMFSMC 方法的转速波动变化较大,转速波动为 ± 0.05 r/min。由此可知,使用 IMFASMC 方法相较于使用 IMFSMC 方法对转速的控制更加精准,抖振更小且抗扰性更强。

图 7 为 PMSM 在 IMFASMC、IMFSMC、MFSMC 方法下输出的电磁转矩仿真对比图。从图 7 中可以看出,在 IMFASMC 方法下,空载运行时,转矩脉动为 $\pm 0.4\text{ N}\cdot\text{m}$;带 $15\text{ N}\cdot\text{m}$ 负载时,转矩脉动为 $\pm 0.7\text{ N}\cdot\text{m}$; q 轴电感突增 1.5 倍时,转矩脉动为 $\pm 1.0\text{ N}\cdot\text{m}$; d 轴电感突增 1.5 倍时,转矩脉动为 $\pm 0.5\text{ N}\cdot\text{m}$ 。在 IMFSMC 方法下,空载运行时,转矩脉动为 $\pm 0.7\text{ N}\cdot\text{m}$;带 $15\text{ N}\cdot\text{m}$ 负载时,转矩脉动为 $\pm 1.1\text{ N}\cdot\text{m}$; q 轴电感突增 1.5 倍时,转矩脉动为 $\pm 1.5\text{ N}\cdot\text{m}$; d 轴电感突增 1.5 倍时,转矩脉动为 $\pm 1.0\text{ N}\cdot\text{m}$ 。在 MFSMC 方法下,空载运行时,转矩脉动为 $\pm 0.8\text{ N}\cdot\text{m}$;带 $15\text{ N}\cdot\text{m}$ 负载时,转矩脉动为 $\pm 1.2\text{ N}\cdot\text{m}$; q 轴电感突增 1.5 倍时,转矩脉动为 $\pm 1.7\text{ N}\cdot\text{m}$; d 轴电感突增 1.5 倍时,转矩脉动为 $\pm 1.1\text{ N}\cdot\text{m}$ 。由此可知,使用 IMFASMC 方法相较于使用 IMFSMC、MFSMC 方法,PMSM 输出的电磁转矩脉动更小,系统鲁棒性更强。

3.2 设计自适应增益超螺旋滑模观测器与传统超螺旋滑模观测器对比

为探究 ASTSMO 有效性,在本文 IMFASMC 方法中选择传统超螺旋滑模观测器 (Super-Twisting Sliding Mode Observer, STSMO) 作仿真对比(仅改变 IMFASMC 方法中的观测器)。仿真步骤:电机空载启动,设置给定转速为额定转速

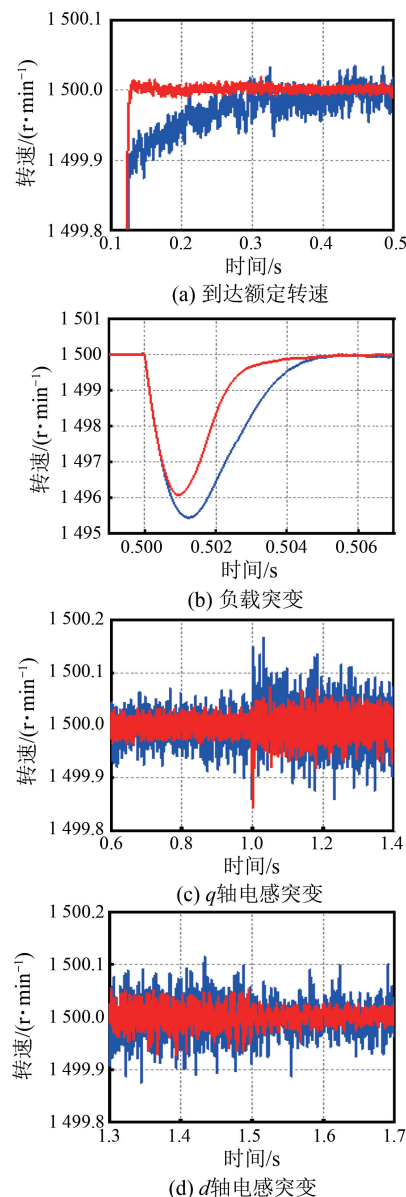


图 6 转速仿真局部放大图

Fig. 6 Zoomed-in views of rotational speed simulation
1 500 r/min;在 0.5 s 时,电机加 $15\text{ N}\cdot\text{m}$ 负载。

图 8 为不同观测器的转速仿真对比图。由图 8 可知,在使用 ASTSMO 时,电机突加 $15\text{ N}\cdot\text{m}$ 负载后,转速掉落 4 r/min 且在 0.05 s 后恢复稳态;而使用 STSMO 时,转速掉落 5 r/min 并在 0.07 s 后恢复稳态。由此可知,ASTSMO 相较于 STSMO 能够有效提高系统抗扰性以及加快受扰后的动态响应能力。

由图 9 可知,使用 ASTSMO 时,PMSM 受扰动后 0.03 s 时能够观测到扰动,而 STSMO 则需要 0.05 s ;PMSM 稳态时,ASTSMO 观测扰动波动更

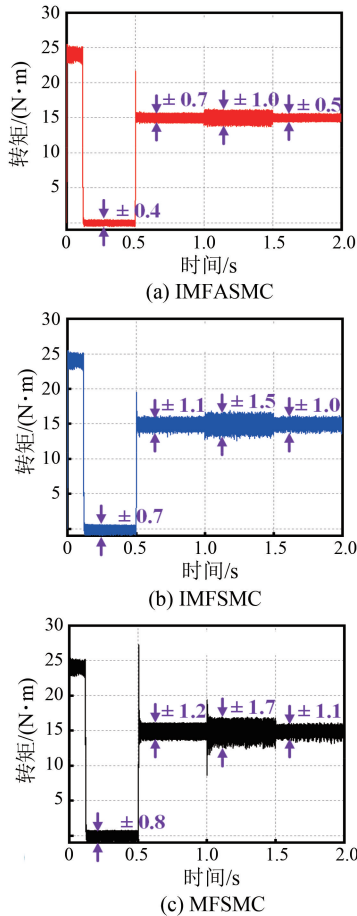


图7 电磁转矩仿真对比图

Fig. 7 Electromagnetic torque simulation comparison

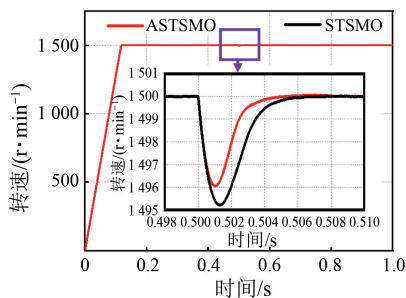


图8 在 IMFASMC 方法中 ASTSMO 和 STSMO 的转速仿真对比图

Fig. 8 Comparison of rotational speed simulations between ASTSMO and STSMO in IMFASMC approach

小,波动值为 ± 1 ,而 STSMO 观测扰动波动值为 ± 2 。由此可知,ASTSMO 相较于 STSMO 能够有效提升观测速度同时降低观测波动。

综上所述,通过仿真结果与分析,IMFASMC 方法能够实现 PMSM 的高精度转速控制,具有良

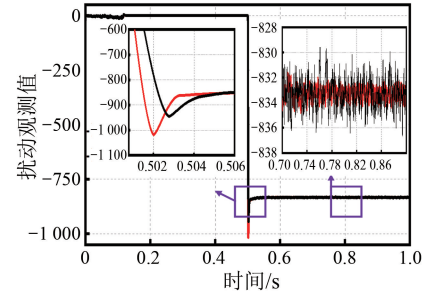


图9 在 IMFASMC 方法中 ASTSMO 和 STSMO 的扰动观测值仿真对比图

Fig. 9 Comparison of disturbance observation simulations between ASTSMO and STSMO in IMFASMC approach

好的抗扰性、动态响应能力以及较强的鲁棒性,验证了 IMFASMC 方法的有效性。

4 试验验证

为验证本文研究的基于自适应增益的永磁同步电机转速环无模型滑模控制方法的有效性,本文利用 dSPACE 半实物平台进行验证,并与传统 MFSMC 作对比。图 10 为 dSPACE 试验平台,整个试验平台主要包括一台 5.5 kW 的原动机、一台负责加载试验的负载机、一台 0~430 V 的自耦变压器、一台控制箱以及负载试验操作的上位机。控制箱主要由 dSPACE DS1202、变频器及驱动电路构成。

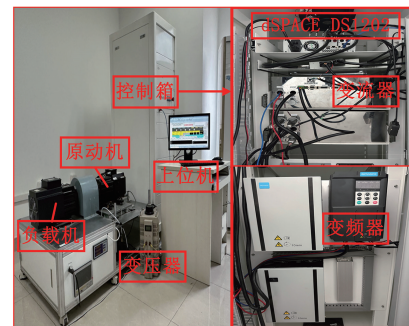


图10 dSPACE 试验平台

Fig. 10 dSPACE experiment platform

试验所用永磁同步电机与仿真所设条件一致(试验电机存在一定的阻尼系数)。设置电机空载启动,先给定转速 1 000 r/min,等待稳定后再给定转速 1 500 r/min 且稳定后加 15 N·m 负载。图 11 为电机转速曲线图,图 12 为图 11 中局部①放大图。

由图 11、图 12 可知,在给定转速 1 000 r/min 时,IMFASMC 方法几乎无超调,而 MFASMC 方法存在 3.7 r/min 的超调,到达稳态时间,IMFASMC 方法比 MFASMC 方法快 1.5 s;在给定 1 500 r/min 时,两种方法均无超调,但加 15 N·m 负载时,IMFASMC 方法比 MFASMC 方法转速掉落少 8.5 r/min,且带载时转速抖振低 2 r/min 左右。由此可知,IMFASMC 相较于 MFASMC,无论是在加快电机响应速度,还是抗干扰能力以及降低转速波动都有较大提升。

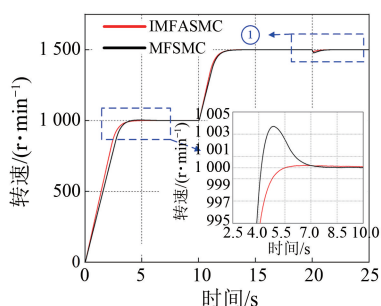


图 11 转速试验对比图

Fig. 11 Comparison of speed experiment results

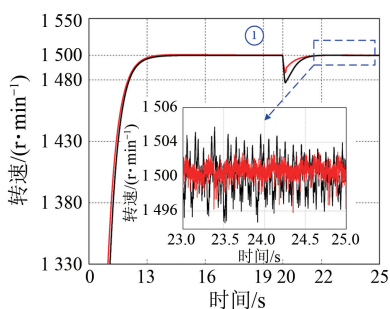


图 12 带载时转速抖振放大图

Fig. 12 Zoomed-in view of speed chattering under load

5 结语

针对 PMSM 调速系统中因电机参数变化以及外部扰动带来的控制精度较差等问题,本文首先构建 PMSM 在内部参数变化以及受到负载扰动后的数学模型,并依据该模型结合自适应增益滑模控制设计了一种新型的无模型滑模控制器,以加强系统动态响应效果以及削弱抖振。同时,为了进一步提升系统控制精度、增强系统鲁棒性,设计了能够根据扰动变化自动调节滑模增益的自适应增益超螺旋滑模观测器观测调速系统总扰动并补偿到控制器中。在 Matlab/Simulink 软件中

搭建 PMSM 矢量控制系统,使用本文设计方法 IMFASMC 与传统 MFASMC 以及文献[17]所提方法 IMFSMC 作仿真对比,并在 dSPACE 半实物平台进行试验验证,结果表明:

(1) 本文设计方法能够大大提升系统动态响应能力、抑制抖振并增强系统鲁棒性,有效地解决了 PMSM 调速系统中因电机参数变化以及外部扰动带来的控制精度较差等问题。

(2) IMFASMC 方法相较于 MFASMC 方法无稳态误差,动态响应时间大幅度降低,系统抗扰性、稳定性均大幅度提升。IMFASMC 方法相较于 IMFSMC 方法,空载时转速抖振降低 66.6%;带 15 N·m 负载时转速降落减少 15.2%,加载后恢复稳态时间减少了 16.7%,带载时抖振降低 50%; q 轴电感突增 1.5 倍时,转速波动减少 44.4%; d 轴电感突增 1.5 时,转速波动减少 60%。

(3) 基于自适应增益的 PMSM 转速环无模型滑模控制方法能够有效地提升系统动态响应能力,增强抗扰性,削弱系统抖振。

参考文献

- [1] 陈瑶, 张钊源, 冯鑫鹏, 等. 基于复合控制的永磁同步电机电流谐波抑制策略[J]. 电机与控制应用, 2022, 49(7): 30-37.
CHEN Y, ZHANG Z Y, FENG X P, et al. Suppression strategy of current harmonic in permanent magnet synchronous motor based on compound control [J]. Electric Machines & Control Application, 2022, 49(7): 30-37.
- [2] 米彦青, 袁兵, 邹成智. 电动飞机电推进用永磁同步电机无传感器控制技术综述[J]. 电机与控制应用, 2024, 51(1): 60-76.
MI Y Q, YUAN B, ZHOU C Z. Review on sensorless control technology of permanent magnet synchronous motor for electric aircraft propulsion system [J]. Electric Machines & Control Application, 2024, 51(1): 60-76.
- [3] 张超硕, 储剑波. 基于增量模型的 PMSM 鲁棒性模型预测控制算法研究[J]. 电机与控制应用, 2024, 51(7): 21-32.
ZHANG C S, CHU J B. Research on PMSM robust model predictive control algorithm based on incremental model [J]. Electric Machines & Control Application, 2024, 51(7): 21-32.

- [4] 张国强, 杜锦华. 永磁同步电机无位置传感器控制技术综述[J]. 电机与控制应用, 2024, 51(1): 1-13.
ZHANG G Q, DU J H. Review of position sensorless control technology for permanent magnet synchronous motors [J]. Electric Machines & Control Application, 2024, 51(1): 1-13.
- [56] JIN L H, MAO Y, WANG X Q, et al. Optimization-based maximum-torque fault-tolerant control of dual three-phase PMSM drives under open-phase fault [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2023, 38(3): 3653-3663.
- [6] 陈欣, 胡涛, 蒋全. 基于改进蜜獾算法的永磁同步电机 PI 控制参数优化仿真[J]. 电机与控制应用, 2022, 49(8): 28-33+92.
CHEN X, HU T, JIANG Q. PI control parameter optimization simulation of permanent magnet synchronous motor based on improved Honey Badger algorithm [J]. Electric Machines & Control Application, 2022, 49(8): 28-33+92.
- [7] FAN Y, CHEN J L, ZHANG Q S, et al. An improved inertia disturbance suppression method for PMSM based on disturbance observer and two-degree-of-freedom PI controller [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2023, 38(3): 3590-3599.
- [8] 关欣, 李叶松. 基于实时负载转矩反馈补偿的永磁同步电机变增益 PI 控制[J]. 电工技术学报, 2016, 31(23): 38-45.
GUAN X, LI Y S. Variable gain PI control method for permanent magnet synchronous motor based on load torque feedback real-time compensation [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(23): 38-45.
- [9] 李垣江, 董鑫, 魏海峰, 等. 表贴式永磁同步电机转速环复合 PI 无位置传感器控制[J]. 电工技术学报, 2020, 35(10): 2119-2129.
LI Y J, DONG X, WEI H F, et al. Sensorless compound PI control for surface permanent magnet synchronous motor speed regulation system [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(10): 2119-2129.
- [10] LI K, DING J, SUN X D, et al. Overview of sliding mode control technology for permanent magnet synchronous motor system [J]. IEEE Access, 2024, 12: 685-1704.
- [11] WANG Y Q, FENG Y T, ZHANG X G, et al. A new reaching law for antidisturbance sliding-mode control of PMSM speed regulation system [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(4): 4117-4126.
- [12] ZHAO K H, LIU W C, ZHOU R R, et al. Model-free fast integral terminal sliding-mode control method based on improved fast terminal sliding-mode observer for PMSM with unknown disturbances [J]. ISA Transactions, 2023, 143: 572-581.
- [13] GUO X, HUANG S D, PENG Y, et al. An improved integral sliding mode control for PMSM drives based on new variable rate reaching law with adaptive reduced-order PI observer [J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2023, 9(3): 4503-4516.
- [14] 李瑞棋, 杨波, 贺建湘, 等. 基于变论域模糊 PI 的永磁同步电机无传感控制[J]. 电机与控制应用, 2021, 48(10): 9-34.
LI R Q, YANG B, HE J X. Sensorless control of PMSM based on variable universe fuzzy PI [J]. Electric Machines & Control Application, 2021, 48(10): 9-34.
- [15] WANG S, WANG H Y, TANG C, et al. Sensorless control strategy for permanent magnet synchronous motor based on adaptive non-singular fast terminal sliding mode observer [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2024, 34(8): 1-5.
- [16] ZHANG X G, SUN L Z, ZHAO K, et al. Nonlinear speed control for PMSM system using sliding-mode control and disturbance compensation techniques [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, 28(3): 1358-1365.
- [17] YIN Z G, GONG L, DU C, et al. Integrated position and speed loops under sliding-mode control optimized by differential evolution algorithm for PMSM drives [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34(9): 8994-9005.
- [18] RIAZ S, YIN C W, QI R, et al. Design of predefined time convergent sliding mode control for a nonlinear PMLM position system [J]. Electronics, 2023, 12(4): 813-813.
- [19] 康尔良, 贺建智, 王一琛. 永磁同步电机非奇异终端滑模控制器的设计[J]. 电机与控制学报, 2021, 25(12): 58-64.
KANG E L, HE J Z, WANG Y C. Design of non-singular fast terminal sliding mode controller for

- permanent magnet synchronous motors [J]. *Electric Machines and Control*, 2021, 25(12): 58-64.
- [20] 郭昕, 黄守道, 彭昱, 等. 基于改进型双幂次趋近律与全局快速终端滑模观测器的 IPMSM 调速系统滑模控制[J]. *电工技术学报*, 2023, 38(1): 190-203.
- GUO X, HUANG S D, PENG Y, et al. Sliding mode control of IPMSM speed regulation system based on an improved double power reaching law and global fast terminal sliding mode observer [J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2023, 38(1): 190-203.
- [21] LEI Z Q, FENG X P, XIE S R, et al. Sliding-mode control of PMSM speed loop based on adaptive power reaching law [C] // 2023 6th International Conference on Electrical Engineering and Green Energy, Grimstad, 2023.
- [22] FLIESS M, JOIN C. Model-free control [J]. *International Journal of Control*, 2013, 86(12): 2228-2252.
- [23] 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 K H, YIN T H, ZHANG C F, 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.
- [24] 黄宜山, 唐润忠, 旷明秋, 等. 基于快速趋近律的永磁同步电机驱动系统改进无模型滑模控制[J]. *机车电传动*, 2022, (3): 148-155.
- HUANG Y S, TANG R Z, KUANG M Q, et al. Improved model-free sliding mode control of permanent magnet synchronous motor drive system based on quick reaching law [J]. *Electric Drive for Locomotives*, 2022, (3): 148-155.
- [25] 赵凯辉, 戴旺珂, 周瑞睿, 等. 基于扩展滑模扰动观测器的永磁同步电机新型无模型滑模控制[J]. *中国电机工程学报*, 2022, 42(6): 2375-2386.
- ZHAO K H, DAI W K, ZHOU R R, et al. Novel model-free sliding mode control of permanent magnet synchronous motor based on extended sliding mode disturbance observer [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2022, 42(6): 2375-2386.
- [26] SAFAEI A, MAHYUDDIN M N. Adaptive model-free control based on an ultra-local Model with model-free parameter estimations for a generic SISO system [J]. *IEEE Access*, 2018, 6: 4266-4275.
- [27] 李鹏. 传统和高阶滑模控制研究及其应用[D]. 长沙: 国防科技大学, 2012.
- LI P. Research and application of traditional and higher-order sliding mode control [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2012.

收稿日期: 2024-07-16

收到修改稿日期: 2024-10-11

作者简介:

雷子奇(1999-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力电子与电力传动, 19117215354@163.com;

* 通信作者: 赵朝会(1963-), 男, 博士, 教授, 研究方向为电机设计、电力电子技术, zhaoch@sdju.edu.cn。

Model-Free Sliding Mode Control of Permanent Magnet Synchronous Motor Speed Loop Based on Adaptive Gain

LEI Ziqi¹, ZHAO Chaohui^{2*}, GU Pingping¹, ZHANG Wei¹, MA Yuxin¹

(1. School of Electrical Engineering, Shanghai Dianji University, Shanghai 201306, China;

2. School of Intelligent Equipment Engineering, Wuxi Taihu University, Wuxi 214064, China)

Key words: permanent magnet synchronous motor; model-free sliding mode control; adaptive gain; super-twisting sliding mode observer

Permanent magnet synchronous motors (PMSMs) have been widely adopted due to the advantages of high efficiency, high power density, high reliability, etc. However, PMSMs have a wide range of practical applications and complex application environments, and in some specific operating environments, factors such as temperature and wear can cause disturbances in the original parameters of the motor, such as changes in the inductance and resistance, which can lead to a decrease in the precision of motor speed control and deterioration of the control effect. In order to improve the dynamic characteristics and control accuracy of PMSM, a model-free sliding mode control method based on adaptive gain is investigated.

Firstly, a new ultra-local model was established based on the PMSM speed loop under the variation of the internal parameters of the motor (inductance) and external disturbance (sudden change of load). Based on this, adaptive gain-based model-free sliding mode control (IMFASMC) was designed to obtain the controlled quantity x and the control quantity i_q^* and the adaptive gain super-twisting sliding mode observer (ASTSMO) was designed to observe the unknown disturbance in the controller f to complete the speed loop control design. The flow block diagram is shown in Fig.1.

Then, to strengthen the dynamic response of the system and reduce chattering, an adaptive gain power reaching law was designed, which replaced

the traditional sliding mode gain term and power term exponent with an adaptive gain function. The system state was introduced into the designed parameters to enable dynamic adjustment of the parameters. The model-free control was combined with the adaptive sliding mode control to design the model-free sliding mode controller with adaptive gain to improve the system's robustness.

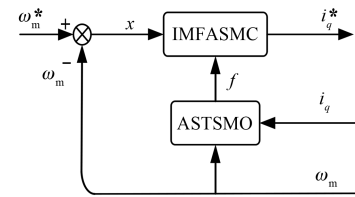


Fig. 1 Block diagram of model-free sliding mode control of speed loop

Next, the total disturbance of the ASTSMO observation speed control system, which can automatically adjust the sliding mode gain according to the disturbance change, was designed and compensated into the controller as the disturbance term of the control law, which further improved the speed control accuracy.

Finally, simulation experiments were carried out on Simulink and validated on dSPACE. The results showed that the gain-adaptive model-free sliding mode control of the speed loop of PMSM improved the control accuracy in response to the changes of motor parameters and external disturbances, offering faster response and better transient and dynamic control.