

永磁同步电机抗惯量扰动自适应速度控制

宋哲^{1,2}，杨军^{1,2,3}，梅雪松^{1,2}，陶涛^{1,2}，许睦旬^{1,2}

(1. 西安交通大学陕西省智能机器人重点实验室，710049，西安；2. 西安交通大学机械制造系统工程国家重点实验室，710049，西安；3. 华中科技大学数字制造装备与技术国家重点实验室，430074，武汉)

摘要：为提高永磁同步电机(PMSM)速度伺服系统的控制性能,增强系统的抗惯量扰动能力,提出一种自适应滑模变结构速度控制方法。在 PMSM 双闭环调速系统中采用了滑模控制(SMC)的速度控制方法,并在 SMC 中引入积分滑模面以避免控制量中对加速度信号的要求,减小系统的稳态误差;此外,采用连续函数 sigmoid(s)代替传统趋近律中的符号函数 sgn(s),进一步提高系统的动态品质。针对负载变化导致 PMSM 控制系统转动惯量不同的问题,依据离散模型参考自适应系统(MRAS)理论对转动惯量进行实时估计,并将惯量辨识值更新到 SMC 控制中,实现自适应 SMC 速度控制。实验结果表明,所提出的自适应 SMC 控制方法的速度响应较快,相比常规 SMC 控制,速度响应时间从 85 ms 减少到 54 ms,并且对惯量扰动具有较强的鲁棒性。该方法适用于一些特定的时变惯量的伺服控制场合,如印刷机械、纺织机械、电缆设备等。

关键词：永磁同步电机;惯量辨识;自适应;滑模控制

中图分类号：TM351 **文献标志码：**A

DOI：10.7652/xjtuxb202012002 **文章编号：**0253-987X(2020)12-0014-08



An Adaptive Speed Control Method with Anti-Inertia Disturbance Performance for Permanent Magnet Synchronous Motors

SONG Zhe^{1,2}，YANG Jun^{1,2,3}，MEI Xuesong^{1,2}，TAO Tao^{1,2}，XU Muxun^{1,2}

(1. Shaanxi Key Laboratory of Intelligent Robotics, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 2. State Key Laboratory for Manufacturing Systems Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 3. State Key Lab of Digital Manufacturing Equipment & Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: An adaptive speed control method with sliding mode variable structure is proposed to improve the control performance of permanent magnet synchronous motor (PMSM) speed servo system and to enhance its anti-inertia disturbance capability. A speed control method of sliding mode control (SMC) is adopted in the PMSM double closed-loop control system, and an integral sliding mode surface is introduced into SMC to avoid the requirement of acceleration signal in the control and to reduce the steady state error of the system. In addition, the sigmoid function is used to replace the traditional sign function in the reaching law to further improve the dynamic quality of the system. In order to solve the problem of rotational inertia variation caused by load change in PMSM control system, the rotational inertia is estimated in real time based on the theory of discrete model reference adaptive system (MRAS), and the inertia identification value is updated to the SMC to realize adaptive SMC speed control. Experimental results show that the proposed adaptive SMC control method has a faster speed response, and the speed response time

is reduced from 85 ms to 54 ms compared with the conventional SMC control. Moreover, it has stronger robustness to inertia disturbances. This method is suitable for servo control of some special time-varying inertia occasions, such as printing machinery, textile machinery, and cable equipment.

Keywords: permanent magnet synchronous motor; inertia identification; adaptive; sliding mode control

永磁同步电机(PMSM)以体积小、效率高、控制方便、调速性好等优点,被广泛应用于众多工业领域^[1-3]。高性能的伺服应用对 PMSM 的控制性能具有严格的要求,如快速响应、无超调、无静差等。在 PMSM 实际运行中,负载转矩和转动惯量会经常变化,这种变化会影响伺服系统的控制性能。为实现高性能的伺服控制,需要提高系统对参数变化的鲁棒性,增强系统的抗扰动性能。

为提高抗扰动性能,许多先进理论被用于 PMSM 系统的控制研究,如模糊控制^[4]、鲁棒控制^[5]、自适应控制^[6]、滑模控制^[7]、预测控制^[8]和智能控制^[9-10]等。文献[4]提出一种 PMSM 模糊自整定自适应积分反步控制方法,来解决参数摄动和负载扰动问题,同时提高了伺服系统的动态响应性能。文献[5]设计了增强型扰动观测器对低频和周期信号进行估计和补偿,提高了 PMSM 控制系统的鲁棒性,减小了永磁磁链和逆变器死区效应等扰动对系统的影响。为了减小伺服系统中参数变化和外部扰动对跟踪精度的影响,文献[6]提出一种自适应非奇异快速终端滑模控制方法用于永磁直线同步电机(PMLSM)位置控制,并通过实验验证了该方法的有效性。文献[7]提出一种基于新型趋近律的滑模速度控制器,可以动态适应 PMSM 控制系统的变化,并提出扩展扰动观测器对转矩扰动进行补偿,取得了较好的控制精度。文献[8]将改进的预测控制应用于 PMSM 电流环,有效降低了伺服系统对电机电感参数的敏感性,提高了系统的高动态性能。文献[9-10]将神经网络应用于具有参数变化和转矩扰动的 PMSM 控制系统,简化了控制结构和参数依赖性,在参数变化情况下取得了较高的伺服精度。

这些研究都取得了一定的成果,但仍留有提升的空间。主要问题是这些控制方法实现较为复杂,不利于工程应用。在工程中,最常用的方法仍然还是经典的 PI 控制。但是,PI 控制只能在一定范围内满足控制要求,当系统内部参数发生变化或受到负载转矩、转动惯量等外部扰动时,PI 控制难以满足高性能的控制要求^[11]。滑模控制(SMC)因鲁棒

性强、容易实现等优点,在 PMSM 伺服控制中得到广泛研究和应用。然而,现有文献大多侧重于转矩自适应控制,即只考虑负载转矩对 SMC 控制性能的影响^[12-14],或惯量对转矩的影响^[15-16],并未考虑惯量对 SMC 控制的直接影响。

对此,本文以 PMSM 速度伺服系统为对象,针对系统惯量时变的特性,进行抗惯量扰动的相关研究,提出一种惯量自适应滑模变结构速度控制方法。首先根据离散模型参考自适应系统(MRAS)理论,分析了转动惯量在线辨识的机理;考虑到负载变化导致系统惯量不同的问题,将惯量辨识值实时更新到 SMC 中,实现了 PMSM 的速度自适应控制。最后,通过实验对系统的响应性能和抗惯量扰动性能进行了研究和验证。

1 转动惯量在线辨识

1.1 PMSM 数学模型

在 dq 同步旋转坐标系下,建立 PMSM 的数学模型,其电压方程^[17]为

$$\left. \begin{aligned} u_d &= Ri_d - \omega_e L_q i_q + L_d \frac{di_d}{dt} \\ u_q &= Ri_q + \omega_e L_d i_d + \omega_e \psi + L_q \frac{di_q}{dt} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: u_d 、 u_q 分别为 d 、 q 轴电压; R 为定子电阻; i_d 、 i_q 分别为 d 、 q 轴电流; ω_e 为电角速度; L_d 、 L_q 分别为 d 、 q 轴电感; ψ 为永磁体与定子交链的磁链。

PMSM 转矩方程为

$$T_e = \frac{3}{2} p \psi i_q = K_t i_q \quad (2)$$

式中: p 为电机极对数; K_t 为转矩常数。

PMSM 运动方程为

$$T_e - T_L = J \frac{d\omega_m}{dt} + B\omega_m \quad (3)$$

式中: T_e 为电磁转矩; T_L 为负载转矩; J 为转动惯量; ω_m 为机械角速度; B 为黏滞摩擦系数。

1.2 MRAS 惯量辨识

MRAS 惯量辨识方法基于稳定性理论设计,由 MRAS 控制思想衍化而来。该方法利用参考模型

$$s = x_1 + c \int_0^t x_1 dt \tag{12}$$

式中: $c>0$,为积分常数。

指数趋近律的表达式为

$$\dot{s} = -\epsilon \operatorname{sgn}(s) - ks, \quad \epsilon > 0, k > 0 \tag{13}$$

式中: s 为滑模面; ϵ, k 为趋近律参数。

指数趋近律规定了 SMC 控制过程中系统在趋近运动阶段的状态轨迹,改善了其动态品质,但指数趋近律在滑模面的切换为带状,当状态轨迹向原点运动时,最终不能趋近于原点,而是在原点附近的一个抖振,这可能激发系统建模中未考虑的高频分量。为了克服常规指数趋近律的缺点,对其进行改进,采用 $\operatorname{sigmoid}(s)$ 函数代替符号函数 $\operatorname{sgn}(s)$ 代入式(13)中,可得

$$\dot{s} = -\epsilon \operatorname{sigmoid}(s) - ks, \quad \epsilon > 0, k > 0 \tag{14}$$

式中

$$\operatorname{sigmoid}(s) = \frac{2}{1 + e^{-as}} - 1 \tag{15}$$

其中, $a>0$,用于调节 $\operatorname{sigmoid}(s)$ 函数的斜率。

采用连续函数 $\operatorname{sigmoid}(s)$ 代替常规指数趋近律中的符号函数 $\operatorname{sgn}(s)$,以减小抖振并提高系统的动态品质, $\operatorname{sgn}(s)$ 和 $\operatorname{sigmoid}(s)$ 函数曲线如图 3 所示。

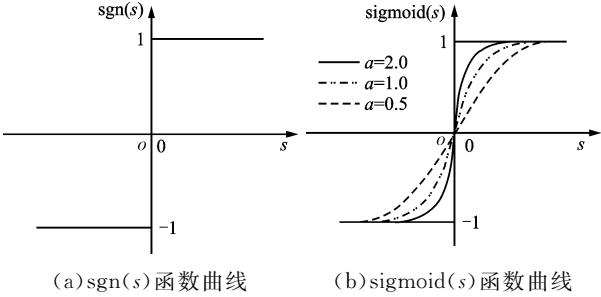


图 3 控制函数曲线

根据式(11)、式(12)和式(14),将 T_L 作为扰动项,可得 SMC 控制器的控制律为

$$i_q^* = \frac{J}{K_t} [cx_1 + \epsilon \operatorname{sigmoid}(s) + ks] \tag{16}$$

由式(16)可以看出,采用改进指数趋近律设计的 SMC 速度控制器,将系统的转动惯量 J 视为已知量,但在 PMSM 伺服系统中,转动惯量 J 的变化往往比较大,而且无法测量。这种变化会改变 PMSM 的数学模型,降低整个系统的伺服特性。在 SMC 速度控制中,引入转动惯量的在线辨识,并更新到速度控制器中,有利于提高系统的控制性能。将 MRAS 算法得到的转动惯量辨识值 $\hat{J}$ 带入到式(16),最终可得惯量自适应 SMC 控制的控制律为

$$i_q^* = \frac{\hat{J}}{K_t} [cx_1 + \epsilon \operatorname{sigmoid}(s) + ks] \tag{17}$$

2.3 稳定性分析

为验证指数趋近律的稳定性,选取 Lyapunov 函数

$$V = \frac{1}{2} s^2 \tag{18}$$

对式(18)求导可得

$$\dot{V} = s\dot{s} \tag{19}$$

将式(11)、式(12)代入式(19)可得

$$\dot{V} = s \left[-\frac{1}{J} K_t i_q + \frac{1}{J} T_L + cx_1 \right] \tag{20}$$

采用式(17)所示的惯量自适应 SMC 控制律代入式(20),可得

$$\begin{aligned} \dot{V} = s \left[-\frac{K_t}{J} \frac{\hat{J}}{K_t} [cx_1 + \epsilon \operatorname{sigmoid}(s) + ks] + \right. \\ \left. \frac{1}{J} T_L + cx_1 \right] = s \left[\frac{T_L - (\hat{J} - J)cx_1}{J} - \right. \\ \left. \frac{\hat{J}}{J} [\epsilon \operatorname{sigmoid}(s) + ks] \right] \leq s \left[\frac{T_L - (\hat{J} - J)cx_1}{J} \right] - \\ \frac{\hat{J}}{J} \epsilon |s| - \frac{\hat{J}}{J} ks^2 \end{aligned} \tag{21}$$

由式(21)可以看出,当积分滑模面的积分常数 c 选取足够大时,使得 c 满足 $c > \left| \frac{T_L}{(\hat{J} - J)x_1} \right|$ 的条件,则 $\dot{V} = s\dot{s} < 0$,由 Lyapunov 稳定性定理可知惯量自适应 SMC 控制器是渐进稳定的。

3 实验研究

3.1 实验平台

以 TI 公司的 TMS320F2812 为主控芯片搭建实验平台,如图 4 所示。实验平台主要包括 8 个部分:PMSM 伺服电机、联轴器、转速转矩传感器、磁粉离合器、惯量盘、信号发生器、功率放大器和示波器。使用的 PMSM 具体参数如表 1 所示,实验中直流母线电压 $U_{dc} = 310 \text{ V}$,开关频率 $f_c = 8 \text{ kHz}$ 。

表 1 电机参数

参数	数值
额定功率/W	1.3
额定转矩/(N·m)	5
额定转速/(r·min ⁻¹)	2 500
额定电流/A	50
极对数	4
电感 L_{dq} /mH	3.124
定子电阻/ Ω	0.867

电机和转速转矩传感器通过联轴器实现同轴旋转;信号发生器的信号经功率放大器转换后控制磁

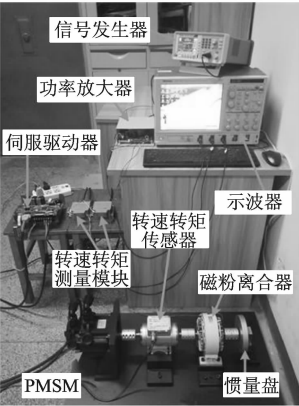


图 4 实验平台

粉离合器,改变系统转动惯量;示波器用于显示各个波形。实验数据以通信的方式由 DSP 控制芯片传送到计算机。开始时,信号发生器无信号输出,磁粉离合器处于脱离状态,电机通过联轴器拖动转速转矩传感器和离合器前级旋转。改变惯量时,信号发生器输出的电压信号经功率放大器转换成电流信号后控制磁粉离合器接合,此时离合器前级与后级实现同步旋转。

3.2 惯量辨识

(1)辨识周期 T 的整定。在转动惯量的自适应辨识规律式(8)中, $\hat{b}=T/\hat{J}$ (T 为 MRAS 算法的控制周期,其大小保持不变),因此辨识出 $\hat{b}$ 就可以求出惯量辨识值 $\hat{J}$ 。控制周期 T 的取值和整定需要权衡电流变化的增量与电磁转矩采样失真两方面。为了获得不同的转矩输入和转速输出,控制周期 T 应不小于电流的采样周期和转速的计算周期。如果 T 取值太小,电流变化的增量较小,则电磁转矩的差值较小,容易引起辨识结果抖动;如果 T 取值太大,则容易丢失电流采样数据,造成电磁转矩采样失真。根据控制芯片(DSP)的运算速度,辨识周期 T 的设定为 1,2,⋯,10 ms,进行了多次实验,最终根据辨识结果确定 T 为 6 ms 时的效果最好。

(2)自适应增益 β 的选取。PMSM 带标称惯量启动运行,速度给定信号为方波,幅值在 1 000 ~ 1 200 r/min 之间变化,周期为 2 s。系统未施加惯量时,电机轴上的转动惯量为标称值,包括转子惯量、联轴器惯量、转速转矩传感器转动轴惯量和离合器前级惯量,折算出来为 $2.79 \times 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ 。图 5 为不同增益值 β 作用时,采用 MRAS 算法得到的实际角速度、估计角速度和转动惯量辨识值的实验波形。实验数据如表 2 所示。

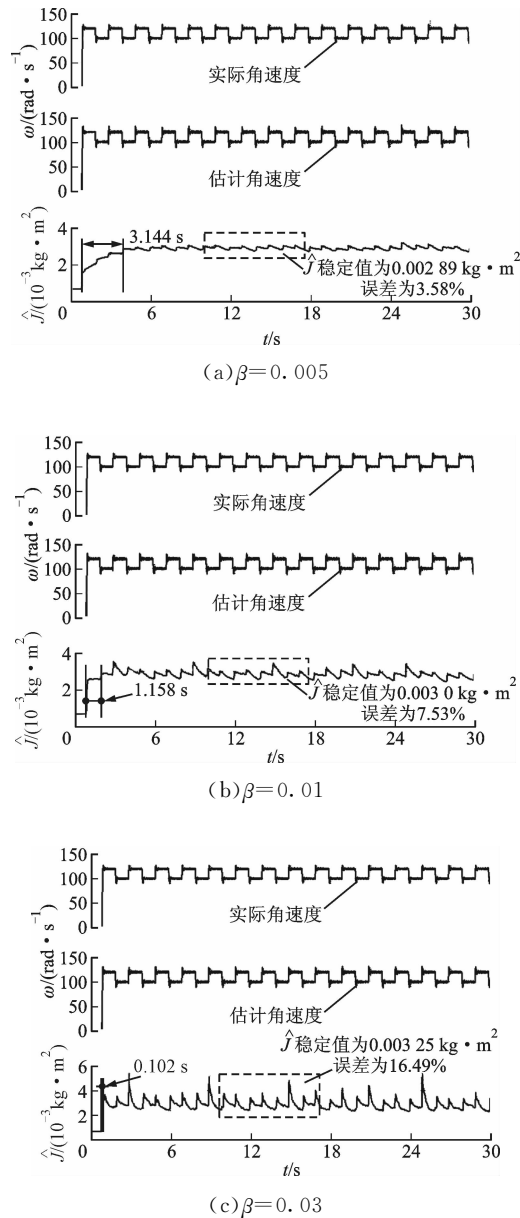


图 5 不同自适应增益 β 下实际角速度、估计角速度和转动惯量辨识值的实验结果

表 2 不同自适应增益 β 下收敛时间和辨识精度的实验结果

自适应增益 β	收敛时间/s	辨识精度/%
0.001	>30	
0.005	3.144	3.58
0.01	1.158	7.53
0.03	0.102	16.49
0.05		振荡

从图 5 和表 2 的实验结果和数据可以看出,当自适应增益 β 为 0.001 时,转动惯量辨识值的收敛时间较长,在 30 s 内并未收敛。当自适应增益 β 在

0.005~0.03 之间时,MRAS 惯量辨识值的收敛时间随着自适应增益 β 的增大而减小,辨识结果的抖振幅度和稳态误差随着自适应增益 β 的增大而变大。当增益 β 为 0.05 时,辨识值振荡严重。自适应增益 β 的大小可以在收敛时间和辨识精度之间折中选取。

(3)可变惯量实验。PMSM 依然带标称惯量运行,转速在 1 000~1 200 r/min 之间变化,周期为 2 s。控制信号发生器输出信号,实现系统惯量的突变。此时电机轴上的转动惯量包括转子惯量、联轴器惯量、转速转矩传感器转动轴惯量、离合器前级惯量、离合器后级惯量和惯量盘的惯量,惯量值折算出来为 $9.25 \times 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ 。实验中选取自适应增益 β 为 0.01,图 6 为可变惯量辨识的实验结果。电机带标称惯量运行中,辨识算法的收敛时间为 1.158 s,转动惯量辨识值为 $3.04 \times 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$,辨识误差为 8.96%;惯量突加时,辨识响应时间为 1.794 s,转动惯量辨识值为 $9.9 \times 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$,辨识误差为 7.03%。

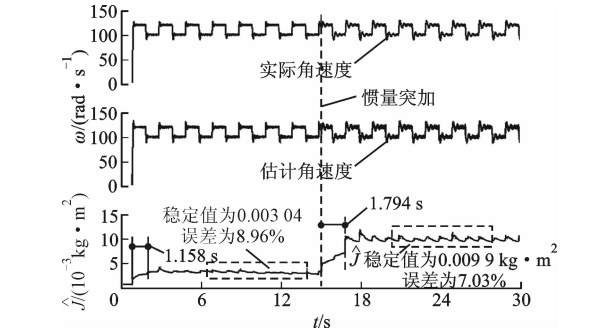


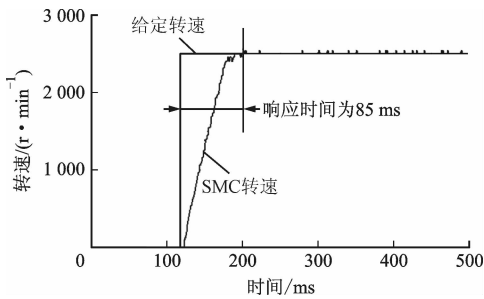
图 6 可变惯量实验结果

由以上实验结果可知,采用的 MRAS 惯量辨识方法,对恒定惯量和可变惯量系统都能进行实时准确的惯量辨识,可以在一定程度上为伺服控制提供参数更新。

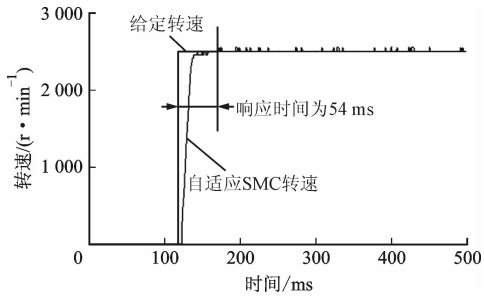
3.3 自适应性能测试

为了验证惯量辨识自适应滑模速度控制方法的有效性,将常规的滑模控制(SMC)和自适应滑模控制(自适应 SMC)这两种方法的控制性能进行对比研究。实验中,PMSM 伺服系统的电流环均采用 PI 控制器,且参数相同。

系统给定的参考转速为 2 500 r/min,带标称惯量起动,图 7 为不同控制方法的速度响应波形。可以看出:SMC 速度控制器的响应时间较慢,约为 85 ms,并且没有超调;自适应 SMC 控制器的调节时间较快,约为 54 ms,而且也没有超调。由图 7 可知,



(a)SMC 控制方法

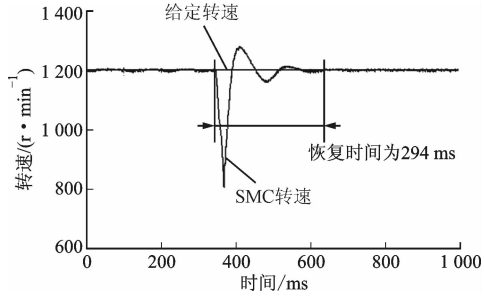


(b)自适应 SMC 控制方法

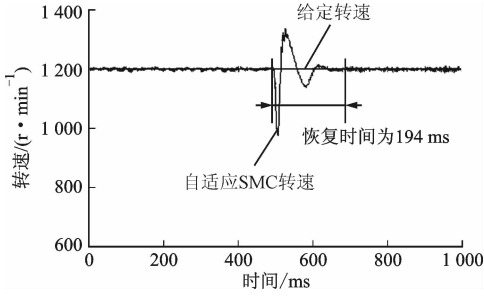
图 7 2 种控制方法的转速响应实验波形

本文提出的自适应 SMC 速度控制方法,对转动惯量进行在线辨识并实时更新到 SMC 控制器中,实现了惯量自适应速度控制,减小了速度调整时间,提高了系统的动态响应特性。

图 8 为 2 种控制方法下系统抗惯量扰动的转速实验波形。由于磁粉离合器的许用转速为 1 500 r/min,考虑到实验的安全性和实验数据的可靠性,本



(a)SMC 速度控制



(b)自适应 SMC 速度控制

图 8 2 种控制方法的抗惯量扰动实验波形

文在许用范围内进行了测试。系统稳定运行在 1 200 r/min 时突加负载惯量,由标称值 $2.79 \times 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ 突变为 $9.25 \times 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$,常规 SMC 控制存在较大的速度波动,最大速度波动值约为 400 r/min,并且经过大约 294 ms 才能恢复到给定值;自适应 SMC 控制的最大速度波动值较小,约为 200 r/min,并且能很快恢复到给定转速,调节时间约为 194 ms。可见,本文提出的自适应 SMC 速度控制方法能够提高 PMSM 伺服系统的抗惯量扰动能力,增强系统的鲁棒性。这是因为 MRAS 算法将惯量辨识值实时输出并更新到 SMC 控制中,实现了自适应 SMC 控制,提高了速度控制对抗惯量扰动的调节能力,缩短了恢复时间,更有利于实际转速跟随参考转速。

由以上仿真和实验结果可以看出,本文提出的自适应滑模变结构速度控制方法能够快速响应并精确跟随给定速度,在相同惯量扰动情况下获得了更优的抗扰动性能,增强了系统的鲁棒性,有效提高了 PMSM 速度伺服系统的控制性能。

4 结 论

为了提高永磁同步电机(PMSM)速度伺服系统的控制性能,增强系统的抗惯量扰动能力,提出一种自适应滑模变结构速度控制方法,得到以下结论。

(1)本文提出的自适应滑模变结构速度控制方法能够快速响应并精确跟随给定速度,对惯量扰动具有较强的鲁棒性,相比常规无自适应的控制方法,提高了 PMSM 速度伺服系统的控制性能。

(2)以 PMSM 运动方程为扩展状态,将电机的电磁转矩和机械角速度作为输入对象,设计了基于朗道算法的惯量辨识方法,对恒定惯量和可变惯量系统都能进行实时准确的惯量辨识,收敛时间最快为 0.102 s,对应精度为 16.49%;辨识精度最高为 3.58%的收敛时间为 3.144 s。

(3)本文方法对于提高速度系统的伺服性能具有较大的实际工程意义,目前适用于印刷机械、纺织机械、电缆设备等惯量变化较为缓慢的场合。

参考文献:

[1] GUO H, XU J, CHEN Y. 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.

[2] HONG D, HWANG W, LEE J, et al. Design, analysis, and experimental validation of a permanent magnet synchronous motor for articulated robot applications [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2018, 54(3): 1-4.

[3] 马世伦,张学义,耿慧慧,等. 电动汽车新型永磁同步电机的非均匀气隙建模及性能分析 [J]. 西安交通大学学报, 2019, 53(1): 70-76.

MA Shilun, ZHANG Xueyi, GENG Huihui, et al. Modeling and performance analysis for non-uniform air gap in new type of permanent magnet synchronous motor of electric vehicle [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2019, 53(1): 70-76.

[4] 王伟然,吴嘉欣,张懿,等. 永磁同步电机模糊自适应积分反步控制 [J]. 电工技术学报, 2020, 35(4): 724-733.

WANG Weiran, WU Jiaxin, ZHANG Yi, et al. Fuzzy self-tuning adaptive integral backstepping control for permanent magnet synchronous motor [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(4): 724-733.

[5] 熊聪,许海平,关涛,等. 基于增强型扰动观测器的五相永磁同步电机鲁棒电流控制策略 [J]. 电工技术学报, 2020, 35(6): 1219-1230.

XIONG Cong, XU Haiping, GUAN Tao, et al. A robust current control scheme for five-phase permanent magnet synchronous motor based on enhanced disturbance observer [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(6): 1219-1230.

[6] 付东学,赵希梅. 永磁直线同步电机自适应非奇异快速终端滑模控制 [J]. 电工技术学报, 2020, 35(4): 717-723.

FU Xuedong, ZHAO Ximei. Adaptive nonsingular fast terminal sliding mode control for permanent magnet synchronous motor [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(4): 717-723.

[7] ZHANG X, SUN L, 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.

[8] 王伟华,肖曦,丁有爽. 永磁同步电机改进电流预测控制 [J]. 电工技术学报, 2013, 28(3): 50-55.

WANG Weihua, XIAO Xi, DING Youshuang. An improved predictive current control method for permanent magnet synchronous motors [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(3): 50-55.

[9] CHAOUI H, KHAYAMY M, OKOYE O. Adaptive

- RBF network based direct voltage control for interior PMSM based vehicles [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2018, 67(7): 5740-5749.
- [10] YU J, SHI P, DONG W, et al. Neural network-based adaptive dynamic surface control for permanent magnet synchronous motors [J]. IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems, 2015, 26(3): 640-645.
- [11] 樊英, 周晓飞, 张向阳, 等. 基于新型趋近律和混合速度控制器的 IPMSM 调速系统滑模变结构控制 [J]. 电工技术学报, 2017, 32(5): 9-18.
FAN Ying, ZHOU Xiaofei, ZHANG Xiangyang, et al. Sliding mode control of IPMSM system based on a new reaching law and a hybrid speed controller [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(5): 9-18.
- [12] LEU V Q, CHOI H H, JUNG J. Fuzzy sliding mode speed controller for PM synchronous motors with a load torque observer [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2012, 27(3): 1530-1539.
- [13] WANG M, YANG R, ZHANG C, et al. Inner loop design for PMLSM drives with thrust ripple compensation and high-performance current control [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018, 65(12): 9905-9915.
- [14] 吴春, 傅子俊, 孙明轩, 等. 基于扩张状态观测器负载转矩补偿的永磁同步电机全速范围无位置传感器控制 [J]. 电工技术学报, 2020, 35(S1): 172-181.
WU Chun, FU Zhijun, SUN Mingxuan, et al. Sensorless control of PMSM in all speed range based on extended state observer for load torque compensation [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(S1): 172-181.
- [15] LIAN C, XIAO F, GAO S, et al. Load torque and moment of inertia identification for permanent magnet synchronous motor drives based on sliding mode observer [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34(6): 5675-5683.
- [16] LI S, LIU Z. Adaptive speed control for permanent-magnet synchronous motor system with variations of load inertia [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2009, 56(8): 3050-3059.
- [17] 郑美茹, 王圣, 王丰, 等. 基于分数阶次符号函数的永磁同步电机滑模控制技术 [J]. 电工技术学报, 2017, 32(9): 56-62.
ZHENG Meiru, WANG Sheng, WANG Feng, et al. The sliding-mode control based on fractional order sign function of permanent magnet synchronous motor [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(9): 56-62.
- [18] 鲁文其, 胡育文, 梁骄雁, 等. 永磁同步电机伺服系统抗扰动自适应控制 [J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(3): 75-81.
LU Wenqi, HU Yuwen, LIANG Jiaoyan, et al. Anti-disturbance adaptive control for permanent magnet synchronous motor servo system [J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(3): 75-81.
- [19] 李政, 胡广大, 崔家瑞, 等. 永磁同步电机调速系统的积分型滑模变结构控制 [J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(3): 431-437.
LI Zheng, HU Guangda, CUI Jiarui, et al. Sliding-mode variable structure control with integral action for permanent magnet synchronous motor [J]. Proceeding of CSEE, 2014, 34(3): 431-437.

[本刊相关文献链接]

- 邓旭斌, 姜歌东, 孙铮, 等. 永磁同步电机的高带宽鲁棒容错电流预测控制. 2020, 54(10): 84-93. [doi: 10. 7652/jxtuxb202010010]
- 赵峰, 罗雯, 高峰阳, 等. 考虑滑模抖振和扰动补偿的永磁同步电机改进滑模控制. 2020, 54(6): 28-35. [doi: 10. 7652/jxtuxb202006004]
- 张岩岩, 耿海鹏, 周健, 等. 永磁同步电机转子偏心磁场解析计算. 2019, 53(2): 96-103. [doi: 10. 7652/jxtuxb201902013]
- 马世伦, 张学义, 耿慧慧, 等. 电动汽车新型永磁同步电机的非均匀气隙建模及性能分析. 2019, 53(1): 70-76. [doi: 10. 7652/jxtuxb201901009]
- 左曙光, 张耀丹, 阎礁, 等. 考虑定子各向异性的永磁同步电机振动噪声优化. 2017, 51(5): 60-68. [doi: 10. 7652/jxtuxb201705010]
- 王悍泉, 刘凌, 吴华伟. 改进型滑模观测器的永磁同步电机无传感器控制策略. 2016, 50(6): 104-109. [doi: 10. 7652/jxtuxb201606016]
- 常雪剑, 彭博, 刘凌, 等. 新型非奇异终端滑模观测器的永磁同步电机无传感器控制. 2016, 50(1): 85-91. [doi: 10. 7652/jxtuxb201601014]
- 李彪, 李黎川. 新型磁链观测算法及其在永磁同步电机无位置传感器控制中的应用. 2015, 49(11): 102-109. [doi: 10. 7652/jxtuxb201511017]
- 陈起旭, 徐俊, 杨松, 等. 大功率盘式交流永磁同步电机电磁场分析. 2015, 49(9): 120-125. [doi: 10. 7652/jxtuxb201509020]
- 常雪剑, 刘凌, 崔荣鑫. 永磁同步电机非奇异快速终端可变边界层滑模控制. 2015, 49(6): 53-59. [doi: 10. 7652/jxtuxb201506009]

(编辑 刘杨)