

## 伺服电机积分型 SMC 速度控制策略\*

涂群章, 黄皓, 蒋成明, 潘明, 李沛, 薛金红  
(陆军工程大学野战工程学院, 江苏南京 210007)

**摘要:**为解决伺服电机控制系统输出转速可控性差、波动大、动态响应慢等问题,提出积分型滑模变结构控制策略,设计负载转矩观测器解决控制过程中的负载扰动问题,基于 Simulink 搭建永磁同步电机速度控制系统仿真模型,搭建电机测试系统台架对控制系统的稳态性能和动态性能进行试验验证。研究结果表明,相比于传统比例积分微分控制和普通滑模变结构控制(Sliding Mode variable structure Control, SMC),所设计的控制策略能够使控制系统达到稳态时速度波动较小,鲁棒性较好,抑制了 SMC 的抖振现象。

**关键词:**永磁同步电机;积分型滑模变结构控制;抖振;负载转矩观测器

**中图分类号:**TM351 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-2486(2019)02-150-08

## Integral SMC speed control strategy for servo motor

TU Qunzhang, HUANG Hao, JIANG Chengming, PAN Ming, LI Pei, XUE Jinhong  
(Field Engineering College, Army Engineering University of PLA, Nanjing 210007, China)

**Abstract:** A speed control strategy based on integral sliding-mode was proposed to solve the problems such as poor control, large fluctuation and slow dynamic response of the output speed of servo motor system; the load torque observer was designed to resolve the load disturbance in the control process; the permanent magnet synchronous motor speed control model was established on the basis of the Simulink; the test system of motor was built to test and verify the steady-state performance and dynamic performance of the control system respectively. Experimental results show that, compared with the traditional proportion integration differentiation control and the ordinary SMC (sliding mode variable structure control), the designed control strategy can improve the robustness and rapidity of the system significantly and the chattering phenomenon of SMC control can be inhibited.

**Keywords:** permanent magnet synchronous motor; integral sliding mode structure control; chattering; load torque observer

永磁同步电机(Permanent Magnet Synchronous Motor, PMSM)以其功率密度大、控制方便简单、转矩输出平稳等特点被广泛运用于载人飞行器、高精度数控机床、机器人等领域<sup>[1-3]</sup>。由于 PMSM 为非线性、多变量、强耦合性的复杂对象<sup>[4]</sup>,传统的比例积分微分(Proportion Integration Differentiation, PID)控制存在起动响应慢、稳态性较差、抗干扰性差等缺点,难以满足高精密度、强抗扰性<sup>[5]</sup>的电机控制要求。为此,近年来国内外学者针对不同的研究对象提出了诸如神经网络控制、模糊控制、滑模变结构控制<sup>[6-9]</sup>(Sliding Mode variable structure Control, SMC)等多种控制策略。其中,SMC 控制策略由于具有响应迅速、易于物理实现、对内部参数及外部扰动响应不灵敏等优点,受到国内外学者广泛重视,并在 PMSM 的速度控制方面得以运用。文献[10]在滑模变结构控制策略中,加入了负载转矩观测器,通过反馈控制系统

的输出转矩,提升了系统抗干扰能力。文献[11]设计了一种新型非奇异终端滑模观测器,有效地减少了速度观测误差。文献[12]通过 SMC 控制器与模糊控制规则相结合,通过整定控制参数解决了控制精度不高的问题。文献[13]设计出了一种新型扰动观测器,能够实时观测扰动,有效地减少了稳态误差,提高了系统的抗干扰性。文献[14]将 SMC 控制运用到 PMSM 的矢量控制中,使 PMSM 矢量控制模型得到优化。

上述文献都采用传统 SMC 控制方法,通过设计普通滑模面进行变结构控制,普通滑模面会随着外部扰动产生稳态误差,从而使得 PMSM 的性能指标无法达到要求。本文针对以上问题设计了一种新型积分型滑模变结构控制(Integral Sliding Mode variable structure Control, ISMC)的速度控制器,利用积分型滑模面代替传统 SMC 控制策略中的普通滑模面,提高控制系统稳态性能;为了解决

\* 收稿日期:2018-01-22

基金项目:国家部委基金资助项目(2016YFC0802903);国家自然科学基金资助项目(61671470)

作者简介:涂群章(1969—),男,湖北黄梅人,教授,博士,博士生导师,E-mail:tqzlhj@126.com

变结构控制中存在的抖振现象,设计了负载转矩观测器提升速度的稳定性;对 ISMC 控制系统的动态和稳态性能进行了仿真和试验研究,取得良好的效果。

## 1 PMSM 的数学模型

为了便于模型建立,建立 PMSM 的数学模型时<sup>[15]</sup>,作如下假设:①假设转子永磁磁场在气隙空间中分布方式为正弦波,感应电动势在定子绕组中成正弦波分布;②铁心涡流和磁滞损耗忽略不计;③转子上无阻尼绕组。在以上假设上,建立  $d-q$  坐标系下的数学模型,电压方程为

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

式中: $u_d$ 、 $u_q$  分别为  $d$ 、 $q$  轴的电压; $i_d$ 、 $i_q$  分别为  $d$ 、 $q$  两轴的电流; $L_d$ 、 $L_q$  分别为  $d$ 、 $q$  轴的电感; $R$  为定子电阻; $\omega$  为电角速度; $\psi$  为定子和永磁体的交磁磁链。

文献[16-18]详细描述了传统 SMC 控制策略的优点,主要体现在控制过程中对内部参数变化的不敏感性,所以在 PMSM 驱动过程中,当电机中的电感  $L$  和电阻  $R$  随着电流  $i$  发生变化时,系统响应不会发生明显变化。本文设计的 ISMC 控制策略建立在传统 SMC 控制策略的基础上,继承了传统 SMC 控制策略对内部参数变化响应不敏感的特性,所以在控制过程中,可以假定  $R$ 、 $L_d$ 、 $L_q$  为常数。

PMSM 转矩方程为

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

式中: $T_e$  为 PMSM 的转矩; $p$  为电机极对数。

根据表贴式 PMSM 特点, $L_d = L_q = L$ ,化简 PMSM 转矩方程可得

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

PMSM 的运动方程为

$$T_e - T_L - B\omega = J \frac{d\omega}{dt} \quad (4)$$

式中, $T_L$  为负载转矩, $B$  为黏滞摩擦系数, $J$  为转动惯量。

## 2 PMSM 速度控制器的设计

### 2.1 积分型滑模面的设计

假设 PMSM 的状态变量为

$$\begin{cases} x_1 = \omega_e - \omega \\ x_2 = \int_{-\infty}^t x_1 dt = \int_{-\infty}^t (\omega_e - \omega) dt \end{cases} \quad (5)$$

式中, $\omega_e$  和  $\omega$  分别为给定转速和电角速度。结合式(3)和式(4),分别对  $x_1$ 、 $x_2$  求导可得

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = -\dot{\omega} = -\frac{3p\psi}{2J}i_q + \frac{B}{J}\omega + \frac{1}{J}T_L \\ \dot{x}_2 = x_1 = \omega_e - \omega \end{cases} \quad (6)$$

传统 SMC 控制策略的滑模面  $s_0$  为

$$s_0 = cx_1 + x_2 \quad (7)$$

式中, $c$  表示滑模控制常数。

当控制系统追踪任意轨迹时,若存在一定的外部扰动,如果采用传统滑模面,则可能产生较大的稳态误差,而本文的控制对象 PMSM 极易受到外界扰动的影响,采用传统滑模面无法实现高精密度的电机控制要求。为了解决上述问题,本文采用 Chern 等<sup>[19]</sup>提出的 ISMC 控制策略,设计了积分型滑模面,其中积分型滑模面  $s$  为

$$s = x_1 + cx_2 \quad (8)$$

参数  $c$  必须符合 Hurwitz 条件  $c > 0$ ,将式(8)滑模面函数  $s$  求偏导数可得

$$\dot{s} = \dot{x}_1 + cx_1 \quad (9)$$

结合式(6)可得

$$\dot{s} = -\frac{3p\psi}{2J}i_q + \frac{B}{J}\omega + \frac{1}{J}T_L + cx_1 \quad (10)$$

### 2.2 滑模趋近率

如图1所示,SMC 速度控制系统的运动由滑模面外的正常运动  $AB$  和沿着滑模面  $s(x, t) = 0$  运动的滑动模态  $BC$  组成。

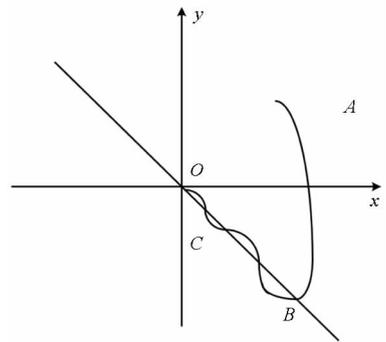


图1 SMC 控制系统运动状态

Fig. 1 Motion state of SMC control system

趋近运动阶段:当控制系统内部参数发生变化或者受到外部扰动时,将会产生系统误差,所以设计趋近率时需要减少趋近运动时间。

为了提高速度趋近运动阶段的动态品质,采用高为炳院士提出的指数趋近率<sup>[20]</sup>,表达式为

$$\dot{s} = -\varepsilon \operatorname{sgn}(s) - qs \quad (11)$$

式中,常数  $\varepsilon > 0, q > 0, \varepsilon$  为控制系统趋近滑模面  $s = 0$  的趋近速度,收敛速度直接由常数  $q$  决定。结合式(10)、式(11)可得

$$-\varepsilon \operatorname{sgn}(s) - qs = -\frac{3p\psi}{2J}i_q + \frac{B}{J}\omega + \frac{1}{J}T_L + cx_1 \quad (12)$$

化简式(12)可得

$$i_q = \frac{1}{D} \left[ cx_1 + \frac{B}{J}\omega + \frac{1}{J}T_L + \varepsilon \operatorname{sgn}(s) + qs \right] \quad (13)$$

式中:  $D = \frac{3p\psi}{2J}$ 。根据滑模到达条件  $ss' < 0$ , 容易验证在式(13)作用下,系统是渐近稳定的。

### 3 负载转矩观测器的设计

由式(13)可得,本文所设计的 ISMC 速度控制器中有负载转矩  $T_L$ ,在实际控制过程中, $T_L$  会由于外来载荷的影响而发生变化,而且  $T_L$  是动态参数且较难测量<sup>[21-22]</sup>。针对以上问题,本文设计了负载转矩观测器实时观测负载转矩,将观测值定义为  $\hat{T}_L$ ,并将  $\hat{T}_L$  替代系统中负载转矩  $T_L$ ,则式(13)变为

$$i_q = \frac{1}{D} \left[ cx_1 + \frac{B}{J}\omega + \frac{1}{J}\hat{T}_L + \varepsilon \operatorname{sgn}(s) + qs \right] \quad (14)$$

由式(3)和式(4)可得,PMSM 扩展状态方程为

$$\begin{cases} \dot{\omega} = \frac{3p\psi}{2J}i_q - \frac{B}{J}\omega - \frac{1}{J}T_L \\ \dot{\hat{T}}_L = 0 \end{cases} \quad (15)$$

在式(12)基础上,将  $\omega$  和  $T_L$  作为观测对象,建立扩展滑模观测器,得扩展滑模观测器方程为

$$\begin{cases} \dot{\hat{\omega}} = \frac{3p\psi}{2J}i_q - \frac{B}{J}\hat{\omega} - \frac{1}{J}\hat{T}_L + U \\ \dot{\hat{T}}_L = gU \end{cases} \quad (16)$$

式中: $U = k \operatorname{sgn}(\hat{\omega} - \omega)$ ,  $k$  为滑模增益, $\hat{\omega}$  为电角速度观测值, $g$  为反馈增益。

由式(13)与式(12)可得滑模观测误差方程为

$$\begin{cases} \dot{e}_1 = -\frac{p}{J}e_2 + U \\ \dot{e}_2 = gU \end{cases} \quad (17)$$

式中: $e_2 = \hat{T}_L - T_L$  为负载转矩估计误差; $e_1 = \hat{\omega} - \omega$  为速度估计误差,滑模面  $s = e_1 = \hat{\omega} - \omega = 0$ 。

当满足进入滑动模态条件时,有  $s = s' = 0$ ,此时电角速度的同步误差  $e_1 = \hat{\omega} - \omega = 0$ ,此时可将

式(14)简化为

$$\begin{cases} U = \frac{p}{J}e_2 \\ \dot{e}_2 = gU \end{cases} \quad (18)$$

化简式(15),可得负载转矩误差方程为

$$\dot{e}_2 - g \frac{p}{J}e_2 = 0 \quad (19)$$

式中:  $-gp/J < 0, p > 0, J > 0$ ,则反馈增益  $g < 0$ ,可简化转矩误差方程为

$$e_2 = \hat{T}_L - T_L = ce^{\frac{gp}{J}t} \quad (20)$$

式中, $c$  为常数。由式(17)可知,随着指数趋近法的控制,观测误差  $e_2$  逐渐趋近于 0,趋近速度直接取决于反馈增益  $g$ 。

综上,选取合适的滑模增益  $k$  和反馈增益  $g$ ,可以使负载转矩  $T_L$  被精准快速地观测,将观测值  $\hat{T}_L$  代入式(14),可得转子电流  $i_q$ 。当出现外部扰动时,负载观测器能根据负载变化及时响应,达到较好的抗干扰性和动态性能。

### 4 仿真实验和分析

为了验证本文设计的 ISMC 速度控制器的有效性,搭建了 MATLAB/Simulink 仿真模型,并基于芯片 TMS320F28335 搭建了实物系统,电机参数为:定子电阻  $R = 2.875 \Omega$ ;  $d, q$  电感  $L_d = L_q = 8.5 \text{ mH}$ ;磁链  $\psi = 0.175 \text{ Wb}$ ;转动惯量  $J = 0.003 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ ;黏滞摩擦系数  $B = 0.008 \text{ N} \cdot \text{m} \cdot \text{s}$ ;极对数  $p = 4$ ;逆变器开关频率  $f = 10 \text{ kHz}$ 。图 2 为调速系统的控制框图,图中 SVPWM (space vector pulse width modulation) 表示间矢量脉宽调制,为电机控制模块,该模块设计过程主要依据文献[23]。

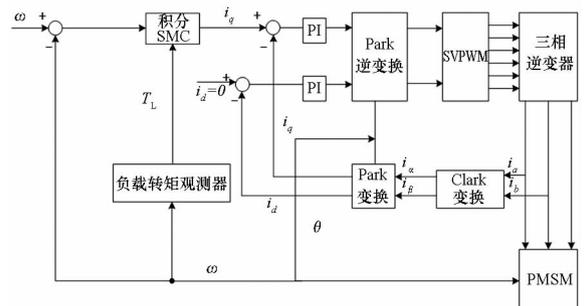


图 2 调速系统控制策略框图

Fig. 2 Control strategy block diagram of speed control system

图 3 是转速指令为 1000 r/min 时系统起动过程中 PI 控制、SMC 控制、ISMC 控制三种控制策略基于 Simulink/MATLAB 的转速  $n$  仿真曲线,其中 SMC 控制策略已经发展得十分成熟,本文主要依据文献[24-25]进行 SMC 控制器的设计。图 4

为起动后达到稳态后三种控制策略基于 Simulink/MATLAB 的稳态响应仿真曲线。

分析图 3 可得,ISMC 控制策略起动后达到稳态的响应时间约为 18 ms,SMC 控制策略和 PI 控制策略达到稳态的响应时间分别约为 31 ms 和 66 ms,由此可知,与其他两种控制策略相比,ISMC 控制策略能较快地响应系统起动指令并达

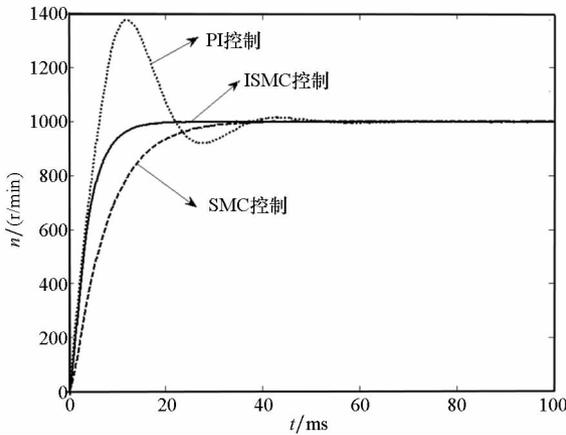
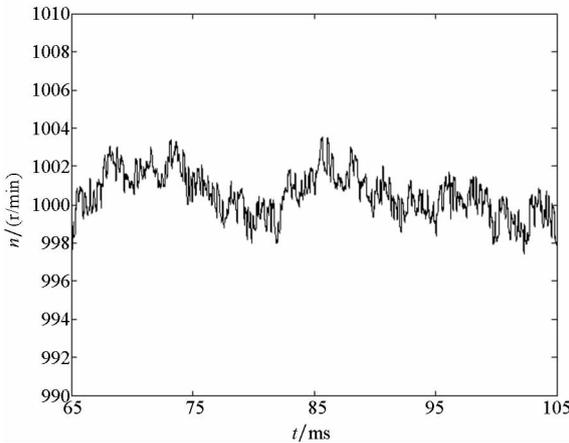


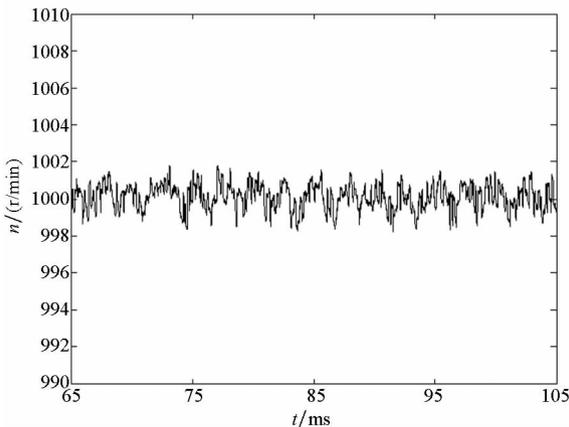
图 3 系统起动转速响应

Fig. 3 Response of system starting speed



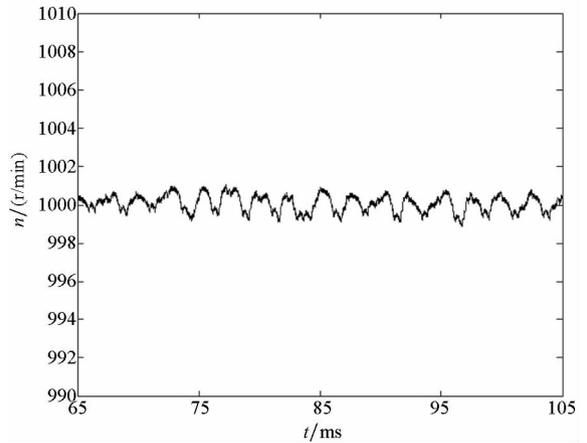
(a) PI 控制策略

(a) PI control strategy



(b) SMC 控制策略

(b) SMC control strategy



(c) ISMC 控制策略

(c) ISMC control strategy

图 4 系统稳态性能曲线

Fig. 4 Steady state performance of the system

到稳态。分析图 4 可得,PI 控制策略达到稳态时转速波动约为 4 r/min;SMC 控制策略达到稳态时转速波动约为 2 r/min;本文采用的 ISMC 控制策略达到稳态时转速波动低于 1 r/min,相较于前两种控制策略,具有更好的稳态性能。

图 5 为系统在 0.3 s、负载转矩从 0 增加至 20 N·m 时三种控制策略转速仿真曲线;图 6 为系统在 0.5 s、负载转矩从 20 N·m 降至 0 突卸负载的转速仿真曲线。

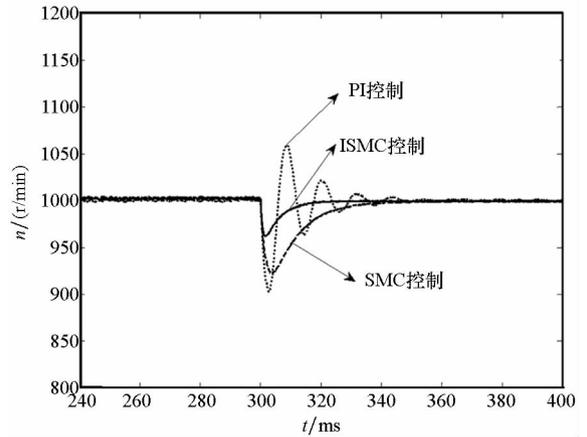


图 5 系统突增负载转速响应

Fig. 5 Response of the system to sudden increase of load speed

分析图 5、图 6 可得:PI 控制转速波动达 100 r/min,速度达到稳态时调节时间约为 65 ms;普通 SMC 控制较 PI 控制速度波动较小,但调节时间也较长;本文采用的 ISMC 控制策略,当在 0.3 s 时受到 20 N·m 的突增负载和 0.5 s 时将负载降至 0,速度波动在 25 r/min 之内,且调节时间较前两种控制策略明显缩短。

图 7 为整个控制过程中 PI 控制和 ISMC 控制

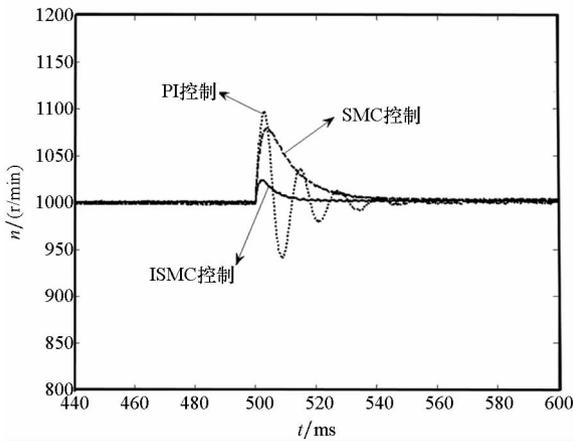
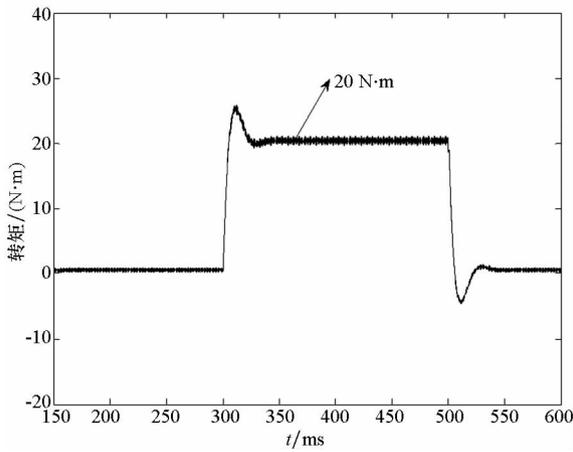


图 6 系统突卸负载转速响应

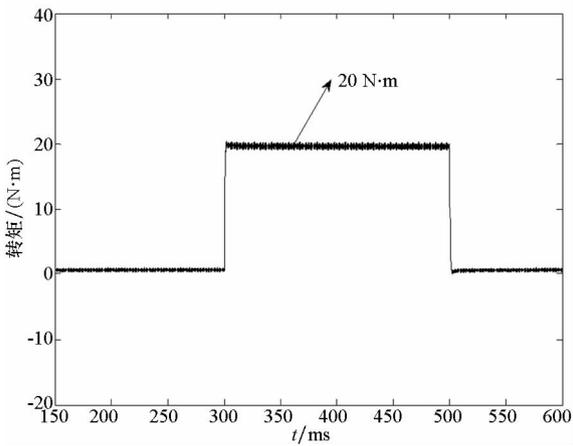
Fig. 6 Response of the system to sudden decrease of load speed

的负载转矩仿真曲线。

分析图 7 可得:当系统在 0.3 s 受到 20 N·m 的外界载荷时和 0.5 s 时将负载降至 0 时,PI 控



(a) PI 控制策略  
(a) PI control strategy



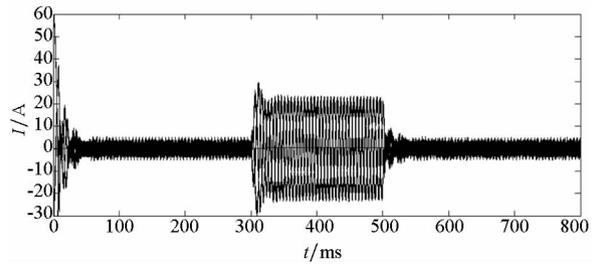
(b) ISMC 控制策略  
(b) ISMC control strategy

图 7 负载转矩仿真曲线

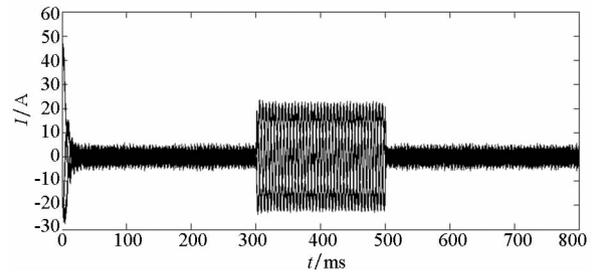
Fig. 7 Simulation curve of system torque response

制的转矩波动约为 5 N·m,转矩达到稳定的调节时间约为 35 ms;相较 PI 控制策略,ISMC 控制策略达到转矩稳态的过程中几乎无超调,且调节速度迅速,基本能实现实时调节,转矩达到稳定时较 PI 控制策略波动较小,具有较好的稳态性能。

图 8 为整个控制过程中 PI 控制策略和 ISMC 控制策略的三相电流  $I$  仿真响应曲线;图 9 为 PI 控制、ISMC 起动时的转速实验波形;图 10 和图 11 分别为突增负载和突卸负载时 PI 控制和 ISMC 控制的转速实验波形;图 12 和图 13 分别为突增负载和突卸负载时的负载转矩观测器观察转矩的实验波形。



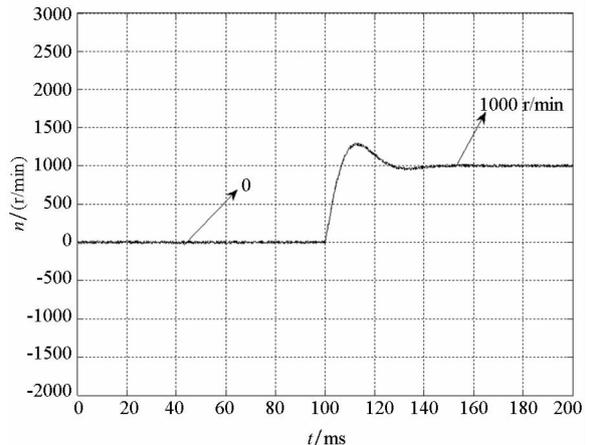
(a) PI 控制策略  
(a) PI control strategy



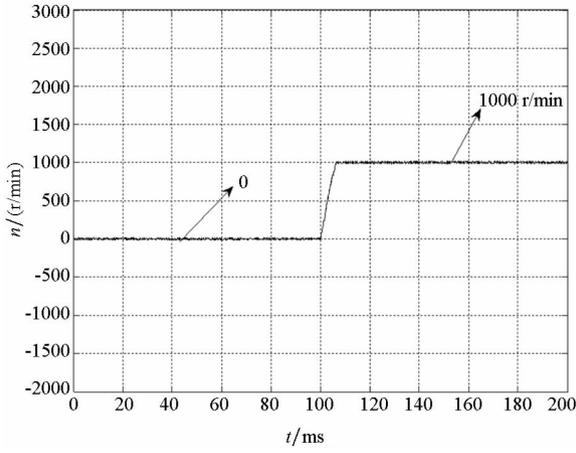
(b) ISMC 控制策略  
(b) ISMC control strategy

图 8 系统三相电流响应曲线

Fig. 8 Three phase current response of the system



(a) 起动转速响应 (PI 控制)  
(a) Start speed response (PI control)

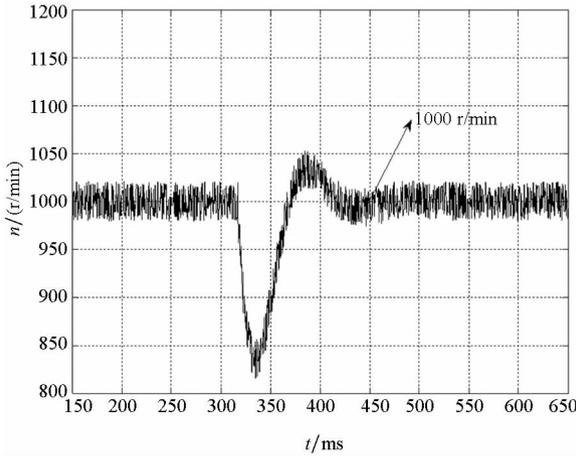


(b) 起动转速响应 (ISMC 控制)

(b) Start speed response (ISMC control)

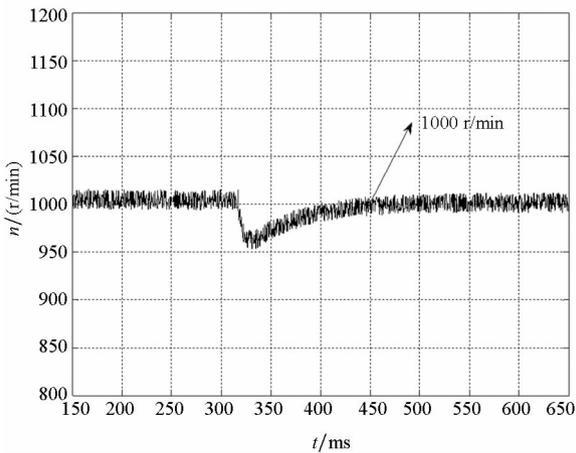
图9 系统起动转速响应实验结果

Fig.9 Experimental results of the response of the system starting speed



(a) 突增负载转速响应 (PI 控制)

(a) Sudden load speed response (PI control)

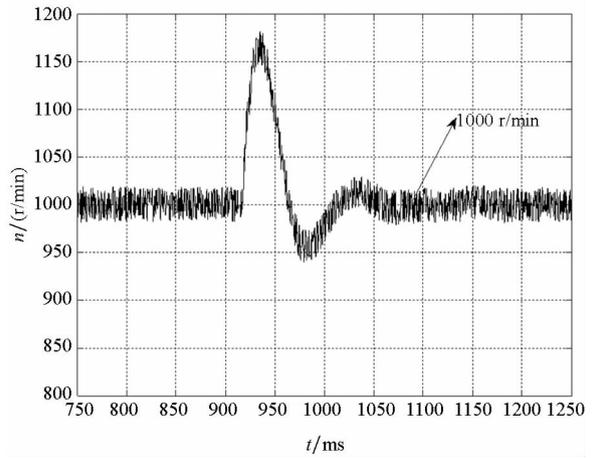


(b) 突增负载转速响应 (ISMC 控制)

(a) Sudden load speed response (ISMC control)

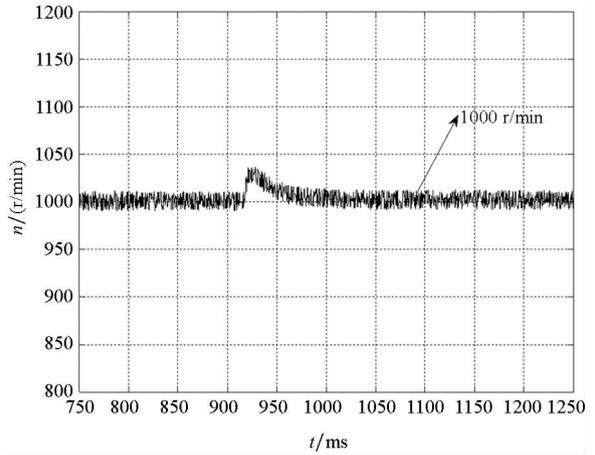
图10 系统突增负载转速响应实验结果

Fig.10 Experimental results of the response of the system with a sudden increase of load speed



(a) 突卸负载转速响应 (PI 控制)

(a) Speed response of sudden unloading load (PI control)



(b) 突卸负载转速响应 (ISMC 控制)

(b) Speed response of sudden unloading load (ISMC control)

图11 系统突卸负载转速响应实验结果

Fig.11 Experimental results of the response of the system with a sudden decrease of load speed

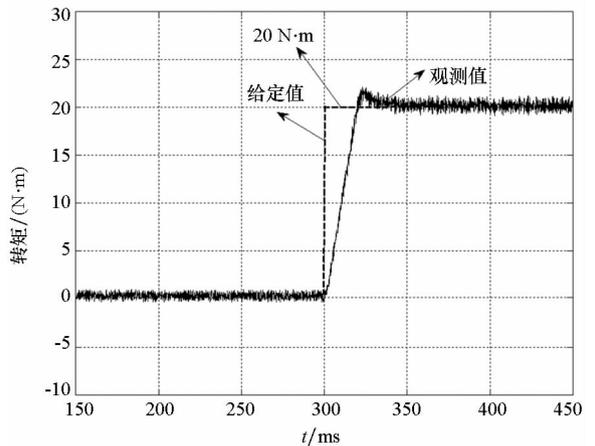


图12 突增负载转矩观测实验曲线

Fig.12 Experimental curve of sudden increase load torque observation

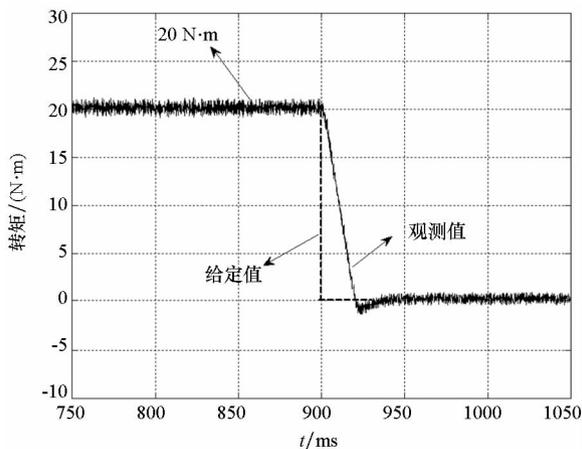


图 13 突卸负载转矩观测实验曲线

Fig. 13 Experimental curve of sudden decrease load torque observation

由上述仿真与实验结果可得:

1) 起动过程中,如图 3 和图 9 所示:PI 控制起动响应较慢,并且有显著的超调现象,达到稳态时转速存在较大的波动;普通 SMC 控制无超调现象,但是调节时间相较本文 ISMC 控制策略更长。当起动后达到稳态时,如图 5 所示:ISMC 控制策略达到稳态时与前两种控制策略相比,速度波动明显较小,具有更好的稳态性能。

2) 突增负载和突卸负载过程中,如图 5、图 6、图 10 和图 11 所示:PI 控制转速波动较大,速度达到稳定性需要较长的调节时间;普通 SMC 控制较 PI 控制速度波动较小,但也需要较长的调节时间;本文 ISMC 控制策略中,当在 0.3 s 时受到  $20 \text{ N} \cdot \text{m}$  的突增负载和 0.5 s 将负载降至  $1 \text{ N} \cdot \text{m}$  时,速度波动较小,达到稳态调节时间较短,动态性能良好。

3) 在整个控制过程中的电流响应,如图 8 所示;本文 ISMC 控制策略的三相电流响应较 PI 控制更加平稳,说明本文设计的 ISMC 控制器具有较好的抗干扰性和鲁棒性。

4) 在整个控制过程中的负载响应,如图 7 所示;本文 ISMC 控制策略的负载响应较 PI 控制响应速度约提升了 30 ms,且在整个控制过程中响应平稳,无超调现象。

5) 针对本文设计的负载转矩观测器,采用实验进行验证,如图 12、图 13 所示。实验结果表明,当控制系统收到突增和突卸负载时,本文设计的负载转矩观测器能较快地收敛到实际转矩的给定值,且达到稳态时速度波动较小,稳态性能良好。

综上分析,本文所设计的 ISMC 控制器较 PI

控制和普通 SMC 控制起动速度更加迅速,且无超调现象,达到稳态时速度波动较小,具有良好的稳态性能;通过设计的负载转矩观测器,能根据观测进行实时调节,具有良好的抗干扰性和鲁棒性,具有良好的动态性能。

## 5 结论

针对驱动伺服电机工作过程中速度不稳定的问题,针对现有的 PID 控制的不足,对滑模变结构控制策略进行改进,提出了 ISMC 控制策略,并根据仿真和实验结果,对本文控制策略进行验证。

仿真及试验结果表明,ISMC 控制策略具有良好的动态和稳态性能,能很好地提高 PMSM 的动态品质;通过设计负载转矩观测器,提高了系统的抗干扰能力,抑制了 SMC 控制中的抖振问题;为驱动伺服电机实现高精度、高效率的控制提供了一项十分有效的方法。

## 参考文献 (References)

- [1] Kang D H, Curiac P, Jeong Y H, et al. Field pulse magnetization of power PMSM rotors [J]. *Electrical Engineering*, 2005, 87(6): 295 - 304.
- [2] Choi C C. Adaptive control of a chaotic permanent magnet synchronous motor[J]. *Nonlinear Dynamics*, 2012, 69(3): 1311 - 1322.
- [3] Mccann R A, Islam M S, Husain I. Application of a sliding mode observer for position and speed estimation in switched reluctance motor drives [J]. *IEEE Transactions on Industry Application*, 2001, 37(1): 51 - 58.
- [4] 卢彬芳. 基于 DSP 的永磁同步电机控制系统研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2014.  
LU Binfang. Research of permanent magnet synchronous motors control system based on DSP [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014. (in Chinese)
- [5] 李永东, 朱昊. 永磁同步电机无速度传感器控制综述[J]. *电气传动*, 2009, 39(9): 3 - 10.  
LI Yongdong, ZHU Hao. Overview of sensorless control of permanent magnet synchronous motors [J]. *Electric Drive*, 2009, 39(9): 3 - 10. (in Chinese)
- [6] 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. (in Chinese)
- [7] 王腾达, 王正仕. 基于 DSP 的永磁同步电机模糊控制系统设计[J]. *微电机*, 2013, 46(6): 32 - 35.  
WANG Tengda, WANG Zhengshi. Design of fuzzy control system for PMSM based on DSP [J]. *Micromotors*, 2013, 46(6): 32 - 35. (in Chinese)
- [8] Lai C K, Shyu K K. A novel motor drive design for incremental motion system via sliding-mode control method[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*,

- 2005, 52(2): 499 - 507.
- [9] Utkin V I, Chang H C. Sliding mode control on electro-mechanical systems [J]. *Mathematical Problems in Engineering*, 2007, 8(4/5): 451 - 473.
- [10] 张晓光, 孙力, 赵克. 基于负载转矩滑模观测的永磁同步电机滑模控制[J]. *中国电机工程学报*, 2012, 32(3): 111 - 116.  
ZHANG Xiaoguang, SUN li, ZHAO Ke. Sliding mode control of PMSM based on a novel load torque sliding mode observer[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2012, 32(3): 111 - 116. (in Chinese)
- [11] 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[J]. *西安交通大学学报*, 2016, 50(1): 85 - 91.  
CHANG Xuejian, PENG Bo, LIU Ling, et al. A novel nonsingular terminal sliding mode observer for sensorless control of permanent magnet synchronous motors[J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2016, 50(1): 85 - 91. (in Chinese)
- [12] 邹权, 钱林方, 蒋清山. 永磁同步电机伺服系统的自适应模糊滑模控制[J]. *控制理论与应用*, 2015, 32(6): 817 - 822.  
ZOU Quan, QIAN Linfang, JIANG Qingshan. Adaptive fuzzy sliding-mode control for permanent magnet synchronous motor servo system [J]. *Control Theory & Applications*, 2015, 32(6): 817 - 822. (in Chinese)
- [13] 刘颖, 周波, 方斯琛. 基于新型扰动观测器的永磁同步电机滑模控制[J]. *中国电机工程学报*, 2010, 30(9): 80 - 85.  
LIU Ying, ZHOU Bo, FANG Sichen. Sliding mode control of PMSM based on a novel disturbance observer [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2010, 30(9): 80 - 85. (in Chinese)
- [14] 王庆龙. 交流电机矢量控制系统滑模变结构控制策略研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2007.  
WANG Qinglong. Research on control strategy of sliding-mode of AC motor vector control system [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2007. (in Chinese)
- [15] 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]. *Proceedings of the CSEE*, 2014, 34(3): 431 - 437. (in Chinese)
- [16] 吕明琪, 袁宇浩, 陈青峰. 基于滑模变结构的永磁同步电机矢量控制研究[J]. *计算机仿真*, 2016, 33(8): 311 - 316.  
LYU Mingqi, YUAN Yuhao, CHEN Qingfeng. Vector control system researching of PMSM based on sliding mode control[J]. *Computer Simulation*, 2016, 33(8): 311 - 316. (in Chinese)
- [17] 马惠铖. 永磁低速同步电机新型滑模速度控制器设计[J]. *控制工程*, 2016, 23(11): 1757 - 1762.  
MA Huicheng. Design of novel sliding-mode speed controller for permanent magnet low-speed synchronous motor [J]. *Control Engineering of China*, 2016, 23(11): 1757 - 1762. (in Chinese)
- [18] 陈思溢, 皮佑国. 基于滑模观测器与滑模控制器的永磁同步电机无位置传感器控制[J]. *电工技术学报*, 2016, 31(12): 108 - 117.  
CHEN Siyi, PI Youguo. Position sensorless control for permanent magnet synchronous motor based on sliding mode observer and sliding mode controller [J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2016, 31(12): 108 - 117. (in Chinese)
- [19] Chern T L, Wu Y C. Integral variable structure control approach for robot manipulators [J]. *IEEE Proceedings D—Control Theory and Applications*, 2008, 139(2): 161 - 166.
- [20] 高为炳. 变结构控制理论基础 [M]. 北京: 中国科学技术出版社, 1990.  
GAO Weibing. The theoretical basis of variable structure control [M]. Beijing: China Science and Technology Press, 1990. (in Chinese)
- [21] 马银银. 基于负载转矩观测器的永磁同步电机滑模速度控制 [D]. 天津: 天津大学, 2014.  
MA Yinyin. Novel sliding mode speed control for permanent magnet synchronous motor with a speed and load torque observer [D]. Tianjin: Tianjin University, 2014. (in Chinese)
- [22] 邹伟全, 姚锡凡. 滑模变结构控制的抖振问题研究[J]. *组合机床与自动化加工技术*, 2006(1): 53 - 55.  
ZOU Wei-quan, YAO Xi-fan. A new variable structure controller [J]. *Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique*, 2006(1): 53 - 55. (in Chinese)
- [23] 肖海峰, 刘海龙, 贺昱曜, 等. 线性-滑模变结构的IPMSM直接转矩控制研究[J]. *控制工程*, 2015(1): 144 - 149.  
XIAO Haifeng, LIU Hailong, HE Yuyao, et al. Linear sliding-mode variable structure research of direct torque control for IPMSM [J]. *Control Engineering of China*, 2015(1): 144 - 149. (in Chinese)
- [24] 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*, 2012, 28(3): 1358 - 1365.
- [25] 黄守道, 徐振宇, 肖磊, 等. 基于滑模变结构的PMSM的直接转矩控制[J]. *湖南大学学报(自然科学版)*, 2012, 39(1): 52 - 56.  
HUANG Shoudao, XU Zhenyu, XIAO Lei, et al. Direct torque control of PMSM based on sliding mode [J]. *Journal of Hunan University(Natural Sciences)*, 2012, 39(1): 52 - 56. (in Chinese)