

[自控·检测]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2020.06.010

永磁同步电机的干扰观测器补偿与模糊切换控制

董乐, 宋芳

(上海工程技术大学 工程实训中心, 上海 201620)

摘要:针对永磁同步电机(PMSM)调速系统的启动响应速度慢和抗干扰能力弱的问题,课题组提出了一种干扰观测器补偿与模糊积分滑模控制(DOB + FISMC)相结合的PMSM调速控制算法。建立了带有不确定干扰的PMSM速度控制模型,提出了模糊切换的等效积分滑模控制,为减小抗干扰所需的切换增益并提高控制精度,设计了干扰观测器来对总的干扰进行补偿,基于搭建的PMSM调速系统仿真模型,对控制算法的有效性进行了验证。结果表明:与传统比例积分控制(PI)和滑模控制(SMC)相比,该算法对给定的正弦信号的跟踪误差更小,响应速度更快,抵抗干扰能力更强。课题组提出的算法能提高永磁同步电机的启动响应速度和鲁棒性。

关键词:永磁同步电机;干扰观测器;积分滑模控制;模糊切换控制

中图分类号:TM351 文献标志码:A 文章编号:1005-2895(2020)06-0054-06

Disturbance Observer Compensation and Fuzzy Switching Control of Permanent Magnet Synchronous Motor

DONG Le, SONG Fang

(Engineering Practice and Training Center, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China)

Abstract: A PMSM speed control algorithm combining disturbance observer compensation and fuzzy integral sliding mode control (DOB + FISMC) was proposed to solve the problems of slow starting response speed and weak anti-interference ability of PMSM speed regulation system. The PMSM speed control model with uncertain interference was established, and the equivalent integral sliding mode control of fuzzy switching was proposed. To reduce the switching gain of FISMC and improve the control accuracy, a disturbance observer was designed to compensate the total interference. The effectiveness of the control algorithm was verified based on the PMSM speed regulation system simulation model. The results show that, compared with the traditional proportional integral control (PI) and sliding mode control (SMC), the proposed algorithm has less tracking error, faster response and stronger resistance to interference for a given sinusoidal signal. This algorithm can improve the starting response speed and robustness of permanent magnet synchronous motors.

Keywords: PMSM (permanent magnet synchronous motor); disturbance observer; integral sliding mode control; fuzzy switching control

PMSM 由于其效率高、响应速度快、控制精度高等优点在工业运动控制中得到了广泛的运用^[1-2]。经典的比例积分(PI)控制由于实现简单,目前依然是永磁同步电机控制中主流控制方式^[3]。但是,由于未建模的动力学中参数、摩擦力和负载等变化因素,使得PMSM控制系统中存在着大量的干扰和不确定性,而PI控制的启动响应速度慢,抗干扰能力差,很难迅速地限制这些干扰,维持电机的稳定运转^[4-6]。近年来,

国内外许多学者运用自适应控制、模糊控制、神经网络控制和滑模控制(sliding mode control, SMC)等非线性控制方法来减小各种不确定干扰的影响,提高控制效果^[7-10]。在这些非线性控制方法中,SMC 由于对控制对象内部参数变化和外部扰动的不敏感、快速响应及物理实现简单等优点在PMSM控制系统中取得了较好的控制效果。戴卫力等^[11]在PMSM传统的三环控制基础上引入了带前馈的滑模复合控制,缩短了迟

收稿日期:2020-04-26;修回日期:2020-07-10

第一作者简介:董乐(1996),男,湖北天门人,硕士研究生,主要研究方向为机器人运动控制。E-mail:546215882@qq.com

滞时间,提高了 PMSM 控制系统的响应速度。Wang Yaoqiang 等^[12]在指数趋近率的基础上,提出了一种包含系统状态变量的新型趋近率来提高趋近速度并减小稳态误差。WAI^[13]提出了一种全局滑模控制方法,消除了到达滑模面的趋近过程,提高了系统的抗干扰能力和鲁棒性,并设计了自适应算法估计干扰边界以减小滑模控制的切换增益,有效地减小了系统抖振。张晓光等^[14]设计了一种对电机参数在线自适应辨识方法,对电机参数进行实时更新以减小滑模控制中的不确定性,提高 PMSM 控制系统的速度跟踪性能。涂群章等^[15]采用积分滑模控制来减小 PMSM 速度控制系统稳态误差,并设计负载转矩观测器来提高速度跟踪稳定性,减小了滑模控制中的抖振。LIN 等^[16]在忽略扰动的情况下设计了理想控制器,然后通过模糊控制器来逼近理想控制器并用滑模控制器补偿逼近误差,削弱了各种不确定性对控制系统的影响,提高了系统鲁棒性。

考虑到 PMSM 速度控制系统的非线性特性以及各种不确定干扰对控制系统带来的不利影响,课题组提出了一种结合干扰观测器和模糊切换滑模控制的控制方法,通过干扰观测器观测值对干扰进行补偿,积分滑模控制进一步消除不确定因素影响,在此基础上使用模糊切换控制减小切换增益,削弱滑模控制的抖振现象。

1 PMSM 模型建立

PMSM 的运动方程和电磁转矩方程表示为^[17]:

$$J \frac{dw_m}{dt} = T_e - T_L - Bw_m; \quad (1)$$

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

式中: w_m 为电机的机械角速度; J 为转动惯量; B 为黏滞摩擦因数; T_L 为负载转矩; ψ_f 为磁链; L_d, L_q 分别为 d, q 轴定子电感; i_d, i_q 分别为 d, q 轴电流; p_n 为极对数。

对于表贴式 PMSM 而言,有 $L_d = L_q$,采用 $i_d = 0$ 的控制方法可以获得较好的控制效果,令 $A_n = -B/J$, $B_n = 3p_n \psi_f / 2J$, $D_n = -1/J$, $U = i_q$,将式(2)代入式(1),得到如下数学模型:

$$\frac{dw_m}{dt} = A_n w_m + B_n U + D_n T_L. \quad (3)$$

由于 PMSM 控制系统是一个非线性、强耦合的系统,在运动过程中由于电机发热或者外部环境变化等产生不确定的干扰,此时永磁同步电机控制系统的动

力学方程为

$$\frac{dw_m}{dt} = (A_n + \Delta A)w_m + (B_n + \Delta B)U + (D_n + \Delta D)T_L = A_n w_m + B_n U + \delta. \quad (4)$$

$\Delta A, \Delta B, \Delta D$ 表示运动过程中参数的不确定性, δ 表示总的确定性,且有

$$\delta = \Delta A w_m + \Delta B U + (D_n + \Delta D) T_L. \quad (5)$$

PMSM 调速系统控制框图如图 1 所示。图 1 中 w_d 表示期望机械角速度, w_m 为电机实际机械角速度, I_{abc} 为三相电流,为了便于控制器的设计,将电流环简化为一个速度环中的比例环节,用 K_i 表示,则 PMSM 调速控制系统框图可简化如图 2 所示。

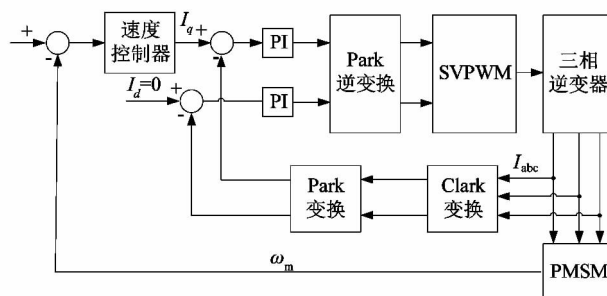


图 1 PMSM 调速系统控制框图

Figure 1 Control block diagram of PMSM speed regulating system

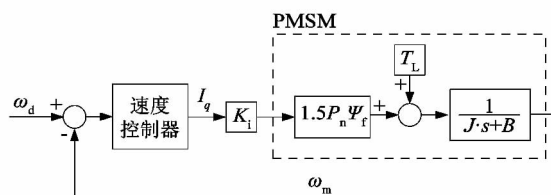


图 2 PMSM 调速系统简化控制框图

Figure 2 Simplified control block diagram of PMSM speed regulating system

2 PMSM 速度控制器设计

相比其他的非线性控制算法,SMC 在拥有较强鲁棒性的同时物理实现简单,能够比较好的运用到 PMSM 调速控制系统中。然而,SMC 为克服参数变化以及外部扰动对控制系统的影响需要选择较大的切换增益,这会使控制系统产生抖振,增加了物理实现难度甚至破坏系统稳定性。为减小切换增益,课题组采用模糊控制的方法对切换增益进行有效的估计,来减小系统抖振。

2.1 等效积分滑模控制

假设永磁同步电机的状态变量为:

$$\left. \begin{aligned} x_1 &= w_d - w_m; \\ x_2 &= \int_0^t x_1 dt = \int_0^t (w_d - w_m) dt. \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

式中: w_d 为期望角速度; w_m 为电机的机械角速度。

结合方程(4)分别对 x_1, x_2 求导得:

$$\left. \begin{aligned} \dot{x}_1 &= \dot{w}_d - A_n w_m - B_n U - \delta; \\ \dot{x}_2 &= x_1. \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

控制器由等效控制 U_{eq} 和切换控制 U_{sw} 组成, 等效控制使系统状态保持在滑模面上并指定系统的性能, 切换控制消除运动过程中的各种不确定干扰, 迫使系统在滑模面上滑动, 保证系统的鲁棒性, 则控制器可以表示为:

$$U = U_{eq} + U_{sw}; \quad (8)$$

$$U_{eq} = \frac{1}{B_n}(w_d - A_n w_m + cx_1); \quad (9)$$

$$U_{sw} = \frac{1}{B_n}[qs + \eta \text{sgn}(s)]. \quad (10)$$

式中: $q > 0; \eta > \max |\delta|$ 为切换项系数; s 为滑模面函数。

由于 PMSM 控制系统中各种不确定干扰的存在会影响控制系统的稳态误差, 结合 PID 控制的思想, 可以通过引入积分项来减小及消除稳态误差, 采用文献 [15] 中的积分滑模控制 (integral sliding mode control, ISMC) 的方法, 设计积分滑模面为

$$s = x_1 + c \int x_1. \quad (11)$$

参数 c 满足符合 Hurwitz 条件 $c > 0$, 对滑模面函数 s 求偏导数可得:

$$\dot{s} = \dot{x}_1 + cx_1 = \dot{w}_d - A_n w_m - B_n U - \delta + cx_1. \quad (12)$$

将式(8)~(10)代入式(12)并化简得:

$$\dot{s} = -\delta - qs - \eta \text{sgn}(s). \quad (13)$$

取闭环系统 Lyapunov 函数为

$$V_1 = \frac{1}{2}s^2. \quad (14)$$

则

$$\dot{V}_1 = \dot{s}s = s[-\delta - qs - \eta \text{sgn}(s)] \leq |s||\delta| - qs^2 - \eta|s| < 0. \quad (15)$$

$V_1 > 0, \dot{V}_1 < 0$, 由 Lyapunov 第二方法可知系统是渐近稳定的。

2.2 模糊切换控制

在滑模控制中, 系统的抖振是由于高频的切换造成的, 为了减小乃至消除抖振, 应该使切换控制项的增

益在保证系统鲁棒性的同时尽可能小。因此, 可利用模糊控制算法, 对切换项的增益进行模糊化。当干扰较大时, 增大切换增益; 当干扰较小时, 减小切换增益。通过模糊切换控制, 减小克服干扰所需的切换增益, 降低系统抖振。此时, 控制律式(8)可变为:

$$U = U_{eq} + \mu \cdot U_{sw}. \quad (16)$$

式中 μ 为切换系数, 且 $0 \leq \mu \leq 1$ 。

根据干扰大小对切换系数 μ 进行估计: 当 $\mu = 0$ 时, 表示没有干扰, 此时控制律只由等效控制项组成; 当 $\mu \neq 0$ 时, 表示存在干扰, 通过模糊输出 μ 使切换项模糊化, 减小克服干扰所需的切换增益, 从而有效地降低抖振。模糊控制系统的输入变量为 s , 输出变量为 μ , 定义输入变量的论域为 $\{-25 \ 25\}$, 输出变量的论域为 $\{-1 \ 1\}$, 输入量和输出量的模糊集合分别为 $s = \{NB(\text{负大}), NM(\text{负中}), ZO(\text{零}), PM(\text{正中}), PB(\text{正大})\}, \mu = \{NB(\text{负大}), NM(\text{负中}), ZO(\text{零}), PM(\text{正中}), PB(\text{正大})\}$ 。设计模糊规则如下:

If s is NB then μ is PB ;

If s is NM then μ is PM ;

If s is ZO then μ is ZO ;

If s is PM then μ is NM ;

If s is PB then μ is NB 。

模糊控制器输入有 5 个模糊子集, 输出有 5 个模糊子集采用 Mamdani 模糊算法和重心反模糊化进行判决, 则输入输出的隶属函数如图 3 和图 4 所示。

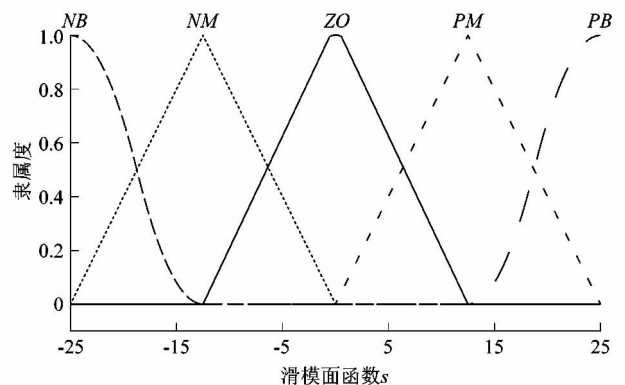


图 3 输入 s 隶属度函数

Figure 3 Membership function of s

3 干扰观测器设计

为进一步减小 PMSM 调速控制系统中不确定因素对控制系统的影响, 设计干扰观测器对包括参数扰动以及外部负载变化在内的总的不确定性进行估计, 并将估计结果作为速度控制器的前馈补偿部分, 由式

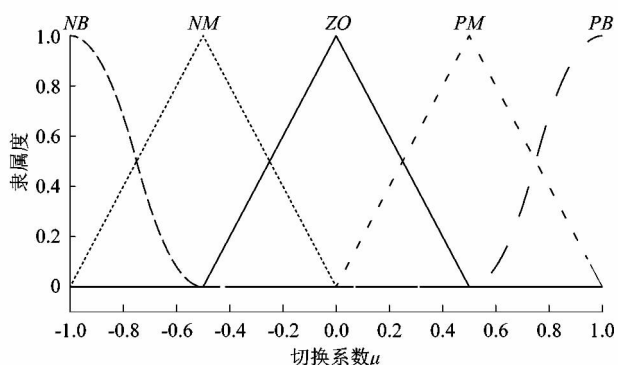


图 4 输出 μ 隶属度函数

Figure 4 Membership function of μ

(4) 可得干扰的表达式为:

$$\delta = \dot{w}_m - A_n w_m - B_n U. \quad (17)$$

根据估计干扰的输出值与实际干扰的差值对估计值进行修正,则干扰观测器可表示为

$$\dot{\hat{\delta}} = L(\delta - \hat{\delta}). \quad (18)$$

其中 $L > 0$, 由于在实际工程中测量噪声,很难对速度信号求微分得到加速度信号,为此定义辅助参数向量^[18]

$$z = \hat{\delta} - Lw_m. \quad (19)$$

对式 z 进行微分并结合式 (18) 和式 (19) 可得到新的干扰观测器表达式为:

$$\left. \begin{aligned} \dot{z} &= -L(A_n w_m + B_n U) - L\dot{\hat{\delta}}; \\ \hat{\delta} &= z + Lw_m. \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

令观察误差为 $\tilde{\delta} = \delta - \hat{\delta}$, 相对于干扰器的动态特性,干扰的变化是缓慢的,可假设 $\dot{\delta} = 0$, 则

$$\dot{\tilde{\delta}} = \dot{\delta} - \dot{\hat{\delta}} = -\dot{\hat{\delta}}. \quad (21)$$

结合式 (17), (20), (21) 得:

$$\dot{\tilde{\delta}} = L(A_n w_m + B_n U) + L\dot{\hat{\delta}} - L\dot{w}_m = -L(\dot{w}_m - A_n w_m - B_n U) + L\dot{\hat{\delta}} = -L(\delta - \hat{\delta}) = -L\tilde{\delta}. \quad (22)$$

$$\text{令 } V = V_1 + \frac{1}{2}\tilde{\delta}^2 > 0. \quad (23)$$

对 V 求导,并结合式 (15), (22) 得:

$$\dot{V} = \dot{V}_1 + \tilde{\delta}\dot{\tilde{\delta}} = \dot{V}_1 - L\tilde{\delta}^2 < 0. \quad (24)$$

由 Lyapunov 定理可知,加入观测器后系统是渐近稳定的。取 $L > 0$ 为一常量,对式 (22) 求解可得 $\tilde{\delta}(t) = \tilde{\delta}(t_0)e^{-Lt}$, 其中 $\tilde{\delta}(t_0)$ 为观测器的初始误差,可以看出观测误差呈指数收敛, L 的取值越大,观测器收敛速度越快,但 L 的取值过大会造成振荡,可以根据调整时间和可接受误差范围选择合适的 L 值。

4 仿真实验及分析

为验证本文所设计的基于干扰观测器补偿的模糊切换算法的有效性,搭建了 Simulink 仿真模型,仿真中所用的参数设置为:极对数 $p_n = 4$,磁链 $\psi_f = 0.175$ Wb,额定转动惯量 $\bar{J} = 0.003$ kg · m²,额定黏滞摩擦因数为 $\bar{B} = 0.008$ N · m · s, $K_i = 1$, $C = 40$, $q = 300$, $\eta = 200$, $L = 50$,为了验证算法的有效性,分别在以下 2 种情形下进行仿真。

情形 1: $J = \bar{J}, B = \bar{B}, T_L = 0$ N · m。

情形 2: $J = 2 \times \bar{J}, B = 2 \times \bar{B}, T_L = 5$ N · m。

在情形 1 的条件下,即电机运行过程中参数不发生变化,也没有额外的负载,采用 PI 控制的仿真结果如图 5 所示,采用 SMC 控制的仿真结果如图 6,采用 DOB + FISMC 控制的仿真结果如图 7 所示。从图中可以看出,没有干扰时,采用 PI 控制和 SMC 控制方法的跟踪性能比较相近,采用课题组提出的 DOB + FISMC 控制方法时,跟踪响应的的时间更短,并且误差更小,提高了跟踪精度。

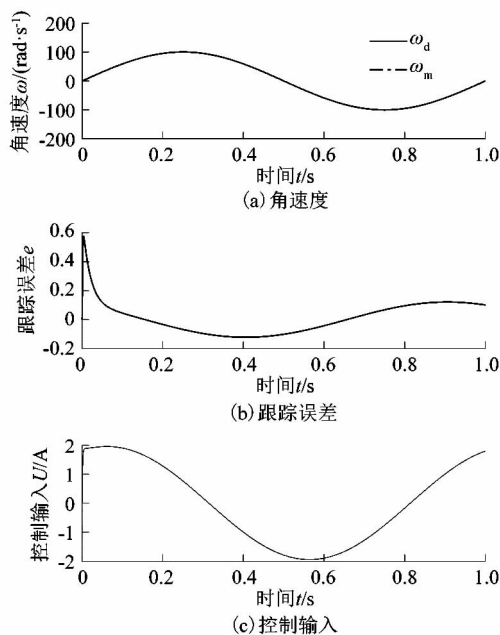
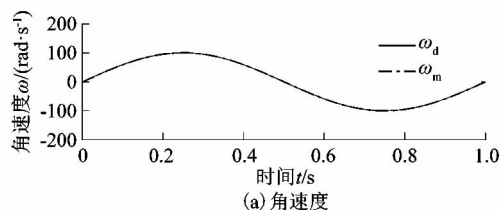


图 5 情形 1 下 PI 控制仿真结果

Figure 5 Simulation results of PI control in case 1



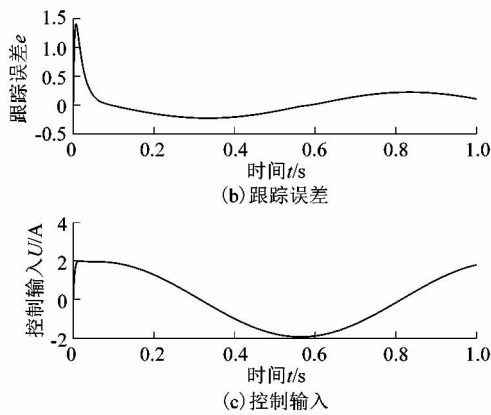


图6 情形1下SMC控制仿真结果
Figure 6 Simulation results of SMC control in case 1

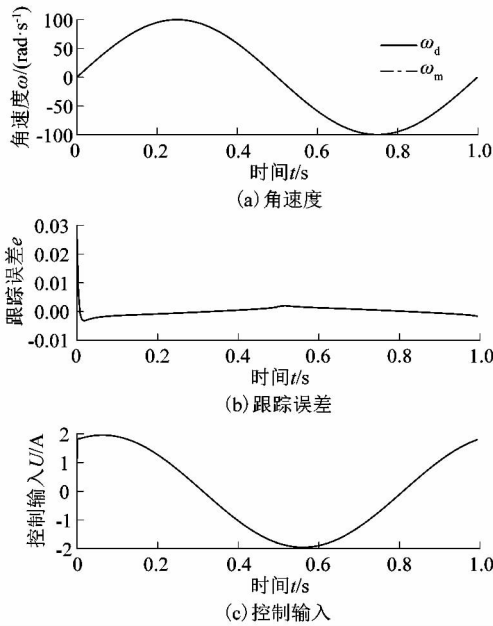


图7 情形1下DOB + FISMC控制仿真结果
Figure 7 Simulation results of DOB + FISMC control in case 1

当电机参数不等于额定参数,并且存在负载时,在情形2的条件下进行仿真试验,采用PI控制的仿真结果如图8所示,采用SMC控制的仿真结果如图9所示,采用DOB + FISMC控制的仿真结果如图10所示,干扰观测结果如图11所示。从图中可以看出,当电机参数发生变化并且存在负载时,干扰观测器可以实时对干扰进行观测补偿,然后在FISMC的作用下使系统收敛,与PI控制和SMC相比,有效地提高了PMSM速度控制系统的响应速度、轨迹跟踪性能以及抗干扰能力。

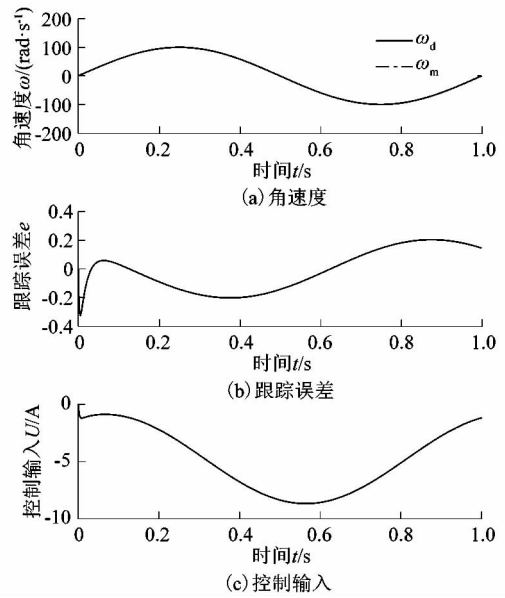


图8 情形2下PI控制仿真结果
Figure 8 Simulation results of PI control in case 2

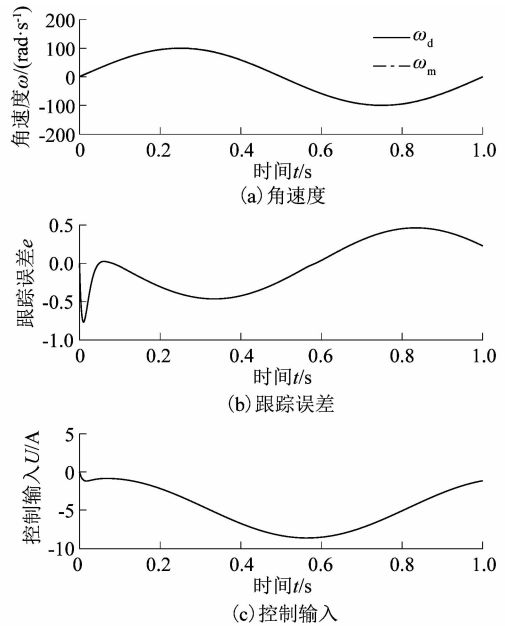
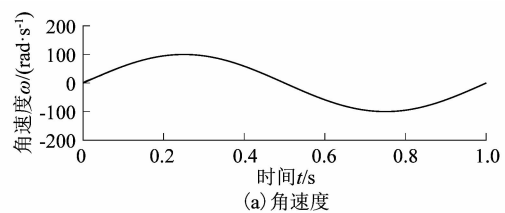


图9 情形2下SMC控制仿真结果
Figure 9 Simulation results of SMC control in case 2



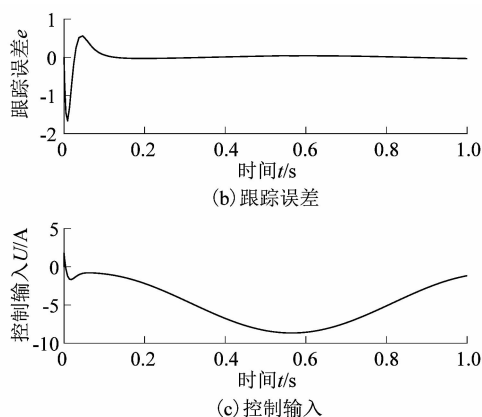


图 10 情形 2 下 DOB + FISMC 控制仿真结果

Figure 10 Simulation results of DOB + FISMC control in case 2

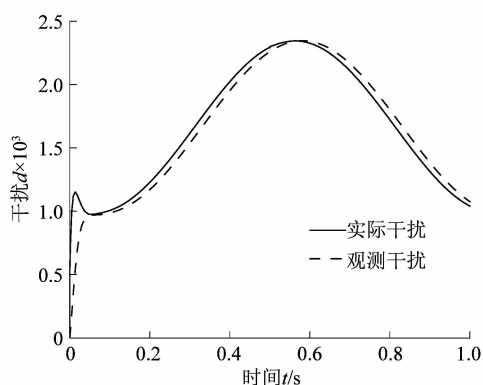


图 11 干扰观测结果

Figure 11 Interference observation results

4 结语

针对永磁同步电机调速系统中 PI 控制的不足,课题组对传统的滑模控制进行改进,提出了模糊切换的积分滑模控制,并设计干扰观测器对不确定性干扰进行补偿,并根据仿真实验结果对算法有效性进行了验证。仿真结果表明:课题组所提出的控制方法具有良好的动态响应和稳态性能,通过干扰观测器的补偿以及模糊算法的应用,能够有效地减小 PMSM 运行过程中为克服不确定性干扰所需的切换增益,提高了 PMSM 速度控制系统的控制精度以及鲁棒性。本研究为永磁同步电机高精度、高效率的控制提供了一种有效方法。

参考文献:

[1] VAFAIE M H, DEHKORDI B M, MOALLEM P, et al. A new predictive direct torque control method for improving both steady-state and transient-state operations of the PMSM [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31(5): 3738 - 3753.

[2] LI Shihua, ZHOU Mingming, YU Xinghuo. Design and

implementation of terminal sliding mode control method for PMSM speed regulation system [J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2013, 9(4): 1879 - 1891.

- [3] LI Ping, ZHU Guoli. MC-based PID control of servo motors with extended state observer [J]. Mechatronics, 2019, 62: 100 - 113.
- [4] ZHANG Xiaoguang, SUN Lizhi, ZHAO Ke, 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.
- [5] LI Shihua, LIU Zhigang. 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.
- [6] 邹晓敏,肖曦,何琪,等.基于在线附加 Q 学习的伺服电机速度最优跟踪控制方法[J]. 电工技术学报, 2019, 34(5): 31 - 37.
- [7] UNDERWOOD S J, HUSAIN I. Online parameter estimation and adaptive control of permanent-magnet synchronous machines [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2010, 57(7): 2435 - 2443.
- [8] 张懿,韦汉培,魏海峰,等.永磁同步电机自适应模糊滑模鲁棒无源控制[J]. 电机与控制学报, 2019, 23(9): 101 - 107.
- [9] ZHANG Bitao, PI Youguo, LUO Ying. Fractional order sliding-mode control based on parameters auto-tuning for velocity control of permanent magnet synchronous motor [J]. ISA Transactions, 2012, 51(5): 649 - 656.
- [10] ZHAO Haibo, WANG Chengguang. A novel adjustable parameters PID control of dual-motor driving servo system [J]. IETE Journal of Research, 2019, 7(25): 1 - 12.
- [11] 戴卫力,张晓峰.永磁同步伺服电机的变结构与前馈复合控制[J]. 科学技术与工程, 2019, 19(4): 131 - 137.
- [12] WANG Yaoqiang, FENG Yutao, ZHANG Xiaoguang, et al. A new reaching law for anti-disturbance sliding-mode control of PMSM speed regulation system [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(4): 4117 - 4126.
- [13] WAI R J. Adaptive sliding-mode control for induction servomotor drive [J]. IEE Proceedings Electric Power Applications, 2000, 147(6): 553 - 562.
- [14] 张晓光,姜云峰,赵克,等.高速永磁同步电机滑模变结构一体化解耦控制[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(6): 58 - 63.
- [15] 涂群章,黄皓,蒋成明,等.伺服电机积分型 SMC 速度控制策略[J]. 国防科技大学学报, 2019, 41(2): 153 - 160.
- [16] LIN C M, HSU C F. Adaptive fuzzy sliding-mode control for induction servomotor systems [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2004, 19(2): 362 - 368.
- [17] 袁雷,胡冰新,魏克银,等.现代永磁同步电机控制原理及 MATLAB 仿真[M]. 北京:北京航空航天大学出版社, 2016: 70 - 75.
- [18] CHEN Wenhua, BALLANCE D J, GAWTHROP P J, et al. A nonlinear disturbance observer for robotic manipulators [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2000, 47(4): 932 - 938.