

doi: 10.7690/bgzd.2019.05.019

基于神经网络的 PMSM 分数阶积分滑模控制

胡 达, 童仲志, 侯远龙, 王经纬, 王 明
(南京理工大学机械工程学院, 南京 210094)

摘要: 为了提高永磁同步电机调速控制性能, 在分数阶积分滑模控制策略的基础上, 设计一种基于神经网络的变阶次分数阶积分滑模控制策略。利用分数阶积分随时间缓慢衰减的特性来增强系统的鲁棒性, 通过指数趋近律削弱滑模面的抖振现象, 分析了分数阶次对系统动态性能的影响, 引入 RBF 神经网络对滑模面函数中的分数阶积分阶次进行动态调节, 提高了系统的综合性能。仿真结果表明: 与固定阶次的分数阶积分滑模控制相比, 该控制方法有利于取得更好的动态跟踪性能和稳定精度。

关键词: 永磁同步电机; 分数阶; RBF 神经网络; 速度控制
中图分类号: TP271.4 **文献标志码:** A

Fractional Order Integral Sliding Mode Control of PMSM Based on Neural Network

Hu Da, Tong Zhongzhi, Hou Yuanlong, Wang Jingwei, Wang Ming
(School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science & Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: In order to improve the speed control performance of the PMSM speed control system, a fractional order integral neural network sliding mode speed controller is designed based on fractional order integral sliding mode. The robustness of the system is enhanced by the slow decay of fractional integration over time, and the chattering phenomenon of the sliding surface is weakened by the exponential approach law, analyzed the influence of fractional order on the dynamic performance of the system, and the RBF neural network is introduced to dynamically adjust the fractional integral order in the sliding surface function. The system comprehensive performance is improved. The simulation proves that compared with the ordinary fractional order integrated sliding mode control, the designed variable-order fractional-order integral sliding mode controller based on RBF neural network can acquire better dynamic tracking performance and stable accuracy.

Keywords: permanent magnet synchronous motor (PMSM); fractional order; RBF neural network; speed control

0 引言

永磁同步电机(permanent magnet synchronous motor, PMSM)具有结构简单、运行可靠、体积小、效率高等优点, 在民用、航天和军事等领域得到广泛应用。PMSM 的模型是一个多变量、强耦合、非线性的系统, 其模型参数在工作时也会产生时变。目前, PMSM 控制器大多采用传统的 PI 控制, 该控制算法简单、可靠性较高, 在一定扰动范围内能满足现场控制要求, 但在外界扰动过大或电动机内部参数发生变化时难以满足控制系统的综合性能^[1]。

基于以上原因, 近年来, 越来越多的现代控制理论(如自适应控制、模糊控制、滑模控制等)被用来提高永磁同步电机的控制性能^[2]。其中滑模变结构控制(sliding-mode variable structure control, SMC)对于控制对象的模型精度要求不高, 对外界扰动有很强的鲁棒性。文献[3]介绍了一种结合线性二次调

节的积分变结构控制, 并设计了永磁同步电机的速度控制器。文献[4]利用分数阶微积分算子来设计滑模面, 并应用于永磁同步电机的速度环控制器的设计中。文献[5]提出了一种新型的与系统状态量相关联的指数趋近律, 克服了常规指数趋近律的缺点, 很大程度上抑制了滑模控制所产生的抖振现象。文献[6]提出了一种非线性复合积分滑模面, 设计了相应的永磁同步电机的复合积分滑模位置环控制器。由实验结果可知: 笔者所提的复合积分滑模面有利于控制器对负载扰动的抑制, 提高了电机位置相应的快速性。

笔者在分数阶积分滑模控制(fractional order sliding mode control, FSMC)的基础上, 引入神经网络, 提出了一种神经网络变阶次分数阶滑模控制策略。该策略采用 RBF 神经网络自适应调节滑模面函数的积分阶次, 并将其应用于永磁同步电机的调速

收稿日期: 2018-12-22; 修回日期: 2019-02-28

作者简介: 胡 达(1995—), 男, 湖南人, 硕士, 从事高精密伺服系统智能控制研究。

控制^[7]。仿真实验结果证明了该方法的有效性。

1 分数阶微积分

分数阶微积分 (fractional-order calculus, FOC) 是相对整数阶微积分提出的一个研究任意阶次微积分的数学概念。分数阶微积分是将整数阶微积分运算推广到阶次为任意复数的情况, 通常表示为:

$${}_a D_t^\lambda f(t) = \begin{cases} \frac{d^\lambda}{dt^\lambda} f(t), \text{Re}(\lambda) > 0 \\ f(t), \text{Re}(\lambda) = 0 \\ \int_a^t f(\tau) (d\tau)^{-\lambda}, \text{Re}(\lambda) < 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中: ${}_a D_t^\lambda$ 为微分或积分操作算子; a 和 t 为微积分上下限; λ 是分数阶微积分算子的阶次, 一般来说 $\lambda \in \mathbf{R}$; $\text{Re}(\lambda)$ 是 λ 的实部。

目前在控制领域应用广泛的 3 种定义包括: Grünwald-Letnikov (GL) 定义、Riemann-Liouville (RL) 定义以及 Caputo 定义^[8]。

函数 $f(\tau)$ 的 Grünwald-Letnikov (GL) 分数阶微积分定义为:

$${}_a D_t^\lambda f(t) = \lim_{h \rightarrow 0} h^{-\lambda} \sum_{j=0}^{\lfloor \frac{t-a}{h} \rfloor} (-1)^j \binom{\lambda}{j} f(\tau - jh) \quad (2)$$

式中: λ 为任意实数; $[\cdot]$ 为近似递推项数; h 为计算步长。

$$\binom{\lambda}{j} = \frac{\lambda(\lambda+1)\cdots(\lambda+j-1)}{j!} = \frac{\lambda!}{j!(\lambda-j)!}$$

为递推函数系数。

函数 $f(\tau)$ 的 Riemann-Liouville (RL) 分数阶微积分定义为

$${}_a D_t^\lambda f(t) = \frac{1}{\Gamma(n-\lambda)} \frac{d^n}{dt^n} \int_a^t \frac{f(\tau)}{(t-\tau)^{\lambda-n+1}} d\tau \quad (3)$$

式中: λ 为任意实数, 且 $n-1 \leq \lambda < n$; $\Gamma(\bullet)$ 为 Gamma 函数。

函数 $f(\tau)$ 的 Caputo 分数阶微积分定义为

$${}_a D_t^\lambda f(t) = \frac{1}{\Gamma(n-\lambda)} \int_a^t \frac{f^{(n)}(\tau)}{(t-\tau)^{\lambda-n+1}} d\tau \quad (4)$$

式中: λ 为任意实数, 且 $n-1 \leq \lambda < n$; $\Gamma(\bullet)$ 为 Gamma 函数。

2 永磁同步电机数学模型

PMSM 同步旋转坐标系下 $d-q$ 轴的定子电压方程为

$$\left. \begin{aligned} u_d &= Ri_d + L_d \frac{di_d}{dt} - \omega_e L_q i_q \\ u_q &= Ri_q + L_q \frac{di_q}{dt} + \omega_e (L_d i_d + \psi_f) \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

式中: u_d 、 u_q 分别为定子电压的 $d-q$ 轴分量; i_d 、 i_q 分别为定子电流的 $d-q$ 轴分量; R 是定子的电阻; ψ_d 、 ψ_q 为定子磁链的 $d-q$ 轴分量; ω_e 为电角速度; L_d 、 L_q 分别为 $d-q$ 轴电感分量; ψ_f 为永磁体磁链。

对于表面式 PMSM, 有

$$L_d = L_q = L_s \quad (6)$$

因此表面式 PMSM 的电磁转矩方程为

$$T_e = \frac{3}{2} p_n i_d [i_d (L_d - L_q) + \psi_f] = \frac{3}{2} p_n i_q \psi_f \quad (7)$$

式中 p_n 为电机的极对数。

机械运动方程为

$$J \frac{d\omega_m}{dt} + B\omega_m = T_e - T_L \quad (8)$$

式中: J 为转动惯量; ω_m 为电机的机械角速度, $n_p \omega_m = \omega_e$; B 为阻尼系数; T_L 为负载转矩。

3 速度控制器滑模面的设计

PMSM 矢量控制的电流控制方法主要有: $i_d = 0$ 控制、最大转矩控制、弱磁控制、 $\cos\phi = 1$ 控制、最大效率控制等^[9]。笔者采用 $i_d = 0$ 的矢量控制方法。此时, PMSM 数学模型可化简为

$$\left. \begin{aligned} \frac{di_q}{dt} &= \frac{1}{L_s} (-Ri_q - p_n \psi_f \omega_m + u_q) \\ \frac{d\omega_m}{dt} &= \frac{1}{J} \left(\frac{3}{2} p_n \psi_f i_q - T_L - B\omega_m \right) \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

考虑电机参数的不确定性, 有

$$\frac{d\omega_m}{dt} = -(a + \Delta a)\omega_m + (b + \Delta b)i_q - (c + \Delta c) = -a\omega_m + bi_q - c + \Delta D \quad (10)$$

其中: $a = \frac{B}{J}$; $b = \frac{3p_n \psi_f}{2J}$; $c = \frac{T_L}{J}$; Δa 、 Δb 、 Δc 为系统参数摄动; ΔD 为总的系统不确定扰动。

假设总不确定扰动满足

$$|\Delta D| \leq \Phi, \Phi \in \mathbf{R}^+ \quad (11)$$

取状态变量为

$$\left. \begin{aligned} x_1 &= \omega_{ref} - \omega_m \\ x_2 &= -\dot{\omega}_m \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

式中: ω_{ref} 为电机的参考转速; ω_m 为实际转速。

从式(9)、式(12)可得 PMSM 速度调节的状态方程为

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = -\dot{\omega}_m = a\omega_m - bi_q + c - \Delta D \\ \dot{x}_2 = -\ddot{\omega}_m \end{cases} \quad (13)$$

对于电机的速度控制，通常会使用到电机转速信号和转动加速度信号。加速度通常采用观测器或微分的方法来获取，易引入放大的噪声信号，使速度控制性能变差^[10]，所以在选取滑模切换面时选择不引入加速度状态 x_2 。在滑模面函数的设计中引入速度误差的分数阶积分。

设计分数阶积分滑模面为

$$S = x_1 + c_1 D^{-\lambda} x_1 \quad (14)$$

其中： $c_1 > 0$ ，为待设计的滑模面参数； x_1 为系统状态变量； λ 为分数阶积分的阶次， $0 < \lambda < 1$ 。

增加函数 $h(t)$ 使系统实现全局滑模， $h(t)$ 需要满足以下条件：

- 1) 系统初始状态位于滑模面上

$$h(0) = x_1(0) \quad (15)$$

- 2) 系统是全局稳定的，即

$$\lim_{t \rightarrow \infty} h(t) = 0 \quad (16)$$

- 3) 滑动模态存在，函数 $h(t)$ 是 1 阶可导的。因此，可以设计函数 $h(t)$ 为

$$h(t) = x_1(0)e^{-t} \quad (17)$$

所以可得全局滑模面函数为：

$$S = x_1 + c_1 D^{-\lambda} x_1 - h \quad (18)$$

4 速度控制器的输出设计

对滑模面进行求导得

$$\dot{S} = \dot{x}_1 + c_1 D^{1-\lambda} x_1 - \dot{h} \quad (19)$$

当系统在滑模面上滑动时

$$a\omega_m - bi_q + c - \Delta D + c_1 D^{1-\lambda} (\omega_{ref} - \omega_m) - \dot{h} = 0 \quad (20)$$

解得

$$i_q = \frac{1}{b} [a\omega_m + c - \Delta D + c_1 D^{1-\lambda} (\omega_{ref} - \omega_m) - \dot{h}] \quad (21)$$

为了加快系统运动到滑模面上的速度，削弱滑模速度控制产生的抖振，笔者采用指数趋近率来优化系统各状态的运动轨迹。根据指数趋近律，设计控制量为

$$i_q = \frac{1}{b} [a\omega_m + c + c_1 D^{1-\lambda} (\omega_{ref} - \omega_m) - \dot{h} + kS + \varepsilon \operatorname{sgn}(S)] \quad (22)$$

其中 k 和 ε 为正系数， sgn 为符号函数。

5 控制器稳定性分析

选取 Lyapunov 函数为

$$V = \frac{1}{2} S^2 \quad (23)$$

对其求导得

$$\dot{V} = S \times \dot{S} = S \times [a\omega_m - bi_q + c - \Delta D + c_1 D^{1-\lambda} (\omega_{ref} - \omega_m) - \dot{h}] \quad (24)$$

将式(20)代入式(22)，得

$$\dot{V} = S \times \dot{S} = S \times [-\Delta D - kS - \varepsilon \operatorname{sgn}(S)] \quad (25)$$

根据式(11)，只需满足

$$\varepsilon > \Phi \quad (26)$$

则恒有 $\dot{V} \leq 0$ 。根据 Lyapunov 稳定性理论，系统是渐进稳定的。

6 分数阶积分阶次选取

分数阶积分项可以很好地解决整数阶积分项存在的积分饱和和现象。在分数阶积分运算中，最新的记忆会得到较大的积分权重，而过去越久的记忆会得到越小的积分权重。

滑模面中的分数阶阶次的不同取值将影响 FSMC 的控制性能，现取不同的分数阶次的控制器在 Matlab 环境下进行仿真实验。

利用 Matlab/Simulink 建立如图 1 所示的 FMSC 系统。笔者所采用的电机参数为：定子电阻 $R = 2.875 \Omega$ ； d 、 q 轴电感 $L_d = L_q = 8.5 \text{ mH}$ ；永磁体磁链 $\varphi_a = 0.175 \text{ Wb}$ ；转动质量 $J = 0.003 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ ；阻尼系数 $B = 0.008$ ；极对数 $P_n = 4$ 。

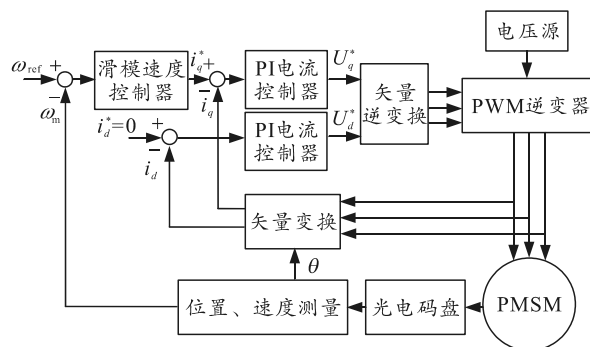


图 1 控制系统

仿真中，电机所带负载转矩为 $T_L = 1 \text{ N} \cdot \text{m}$ ，角速度 ω_{ref} 的初始参考值为 200 r/min ；在 0.2 s 时，负载转矩突变为 $T_L = 10 \text{ N} \cdot \text{m}$ 。图 2 为不同阶次 FSMC 在电机启动阶段的输出的转速响应曲线。图 3 为 0.2 s 时电机所带负载转矩突变时不同阶次 FSMC 的转

速响应曲线。

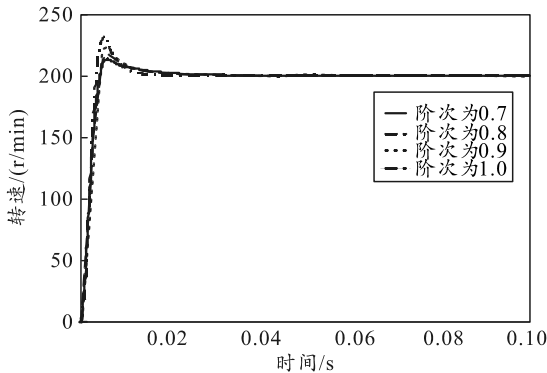


图 2 不同阶次 FSMC 的启动转速响应

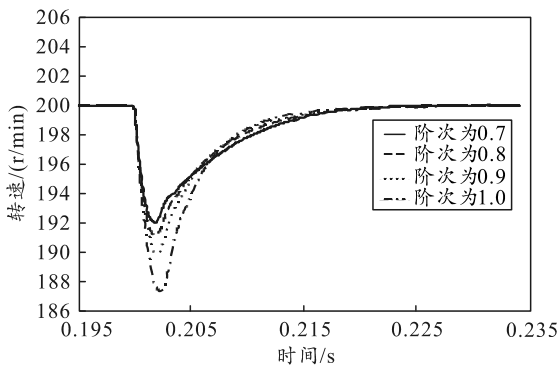


图 3 不同阶次 FSMC 的负载突变转速响应

表 1 为电机启动阶段的超调量、调节时间和 0~0.4 s 运行时间内的稳态误差。

表 1 不同阶次 FSMC 系统性能指标

分数阶阶次	超调量/(r/min)	调节时间/s	稳态误差/(r/min)
0.70	13	0.020	0.19
0.75	15	0.020	0.16
0.80	17	0.020	0.15
0.85	19	0.019	0.15
0.90	25	0.019	0.12
0.95	27	0.019	0.10
1.00	31	0.019	0.08

结果表明，滑模面的分数阶阶次将影响系统转速的超调量与稳态误差。滑模面积分阶次越大，系统响应的超调量越大、稳态误差越小；滑模面积分阶次越小，系统响应的超调量越小、稳态误差越大。

7 基于神经网络的变阶次设计

由于外部扰动及系统参数具有时变性，能够根据系统状态自适应调整的分数阶积分阶次将有利于获得最优的控制性能。

RBF 神经网络是一种 3 层前向神经网络，由输入到输出的映射是非线性的，而隐含层空间到输出控制键的映射是非线性的，从而加快了学习速度并避免局部极小值问题。笔者引入 RBF 神经网络对滑模面积分阶次进行在线调整，在保证滑模面不存在

积分饱和情况的条件下，获得尽可能小的超调量及更小的稳态误差。

RBF 神经网络结构如图 4 所示。

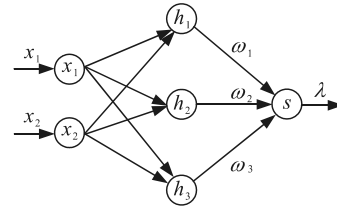


图 4 RBF 神经网络结构

神经网络输入 x_1, x_2 ，权值调整的最小化指标定义为

$$J = 0.5x_1^2 + 0.5s^2 \tag{27}$$

网络权值增量与学习算法为：

$$\Delta\omega_i = -\eta \frac{\partial J}{\partial \omega_i} = -\eta \left(\frac{\partial J}{\partial x_1} \frac{\partial x_1}{\partial \omega_i} + \frac{\partial J}{\partial s} \frac{\partial s}{\partial \omega_i} \right) = -\eta \left(x_1 \frac{\partial x_1}{\partial \omega_i} + s \frac{\partial s}{\partial \omega_i} \right) \tag{28}$$

$$\omega_i(t) = \omega_i(t-1) + \Delta\omega_i(t) + \varepsilon(\omega_i(t) - \omega_i(t-1)) \tag{29}$$

式中： ω_i 为 RBF 神经网络中第 $i(i=1,2,\dots,n)$ 个隐节点到输出节点的连接权值； $\eta \in (0,1)$ 为网络学习速率； $\varepsilon \in (0,1)$ 为惯量系数。

RBF 神经网络输出的分数阶阶次为

$$\lambda = \text{sigmoid} \left(\sum_{i=1}^n \omega_i \varphi_i(X) \right) \left. \begin{array}{l} \varphi(X) = \exp \left(-\frac{\|X - c_i\|^2}{2\sigma_i^2} \right) \\ X = [x_1, x_2] \end{array} \right\} \tag{30}$$

式中： n 为隐含层节点个数； $c_i = [c_{i1}, c_{i2}]^T$ 为第 i 个隐节点径向基函数的中心； $\|X - c_i\|$ 为输入 X 与中心 c_i 的欧几里得范数； σ_i 为第 i 个隐节点径向基函数的宽度。输出层使用 sigmoid 函数保证输出阶次 $\lambda \in (0,1)$ 。

8 仿真与实验结果

利用 Matlab/Simulink 仿真工具，分别采用文中控制方法、分数阶积分滑模控制 (FSMC) 和传统积分滑模控制 (ISMC) 进行仿真。所采用的电机参数为：定子电阻 $R = 2.875 \Omega$ ； d, q 轴电感 $L_d = L_q = 8.5 \text{ mH}$ ；永磁体磁链 $\varphi_a = 0.175 \text{ Wb}$ ；转动质量

$J=0.003\text{ kg}\cdot\text{m}^2$ ；阻尼系数 $B=0.008$ ；极对数 $P_n=4$ 。

图 5、6 中，电机所带负载转矩为 $T_L=1\text{ N}\cdot\text{m}$ ，角速度 ω_{ref} 的初始参考值为 200 r/min ；在 0.2 s 时负载转矩突变为 $T_L=10\text{ N}\cdot\text{m}$ 。图 5 为不同控制策略下电机启动阶段的转速响应。图 6 为启动阶段的阶次动态输出图。图 7 为不同控制策略下电机负载突变时的转速响应。可以看出：笔者提出的基于神经网络的分数阶积分滑模控制能够减少响应时间，使得系统响应更加平稳。

在不同控制策略下对图 8 所示正弦信号进行跟踪。图 9 为不同控制策略的正弦跟踪速度误差曲线。可以发现，RBF 神经网络自适应调节的分数阶阶次有利于减小 PMSM 调速系统的稳态误差。

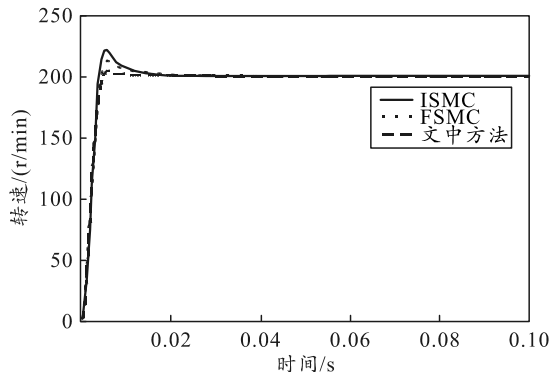


图 5 启动过程的转速响应

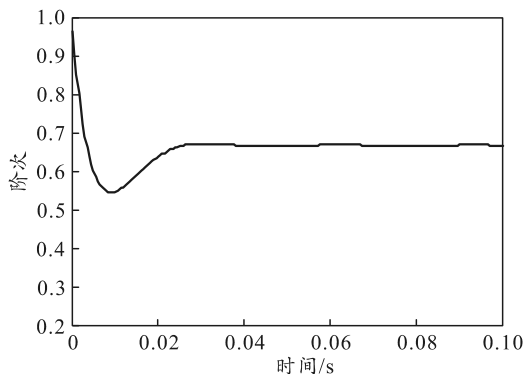


图 6 阶次的动态输出值

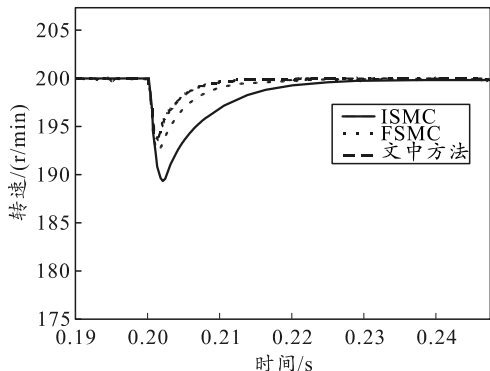


图 7 负载突变后转速响应

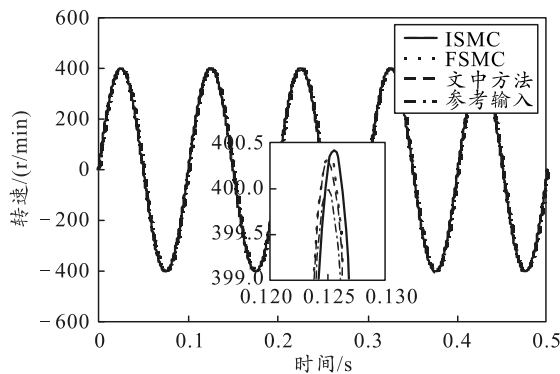


图 8 正弦信号跟踪

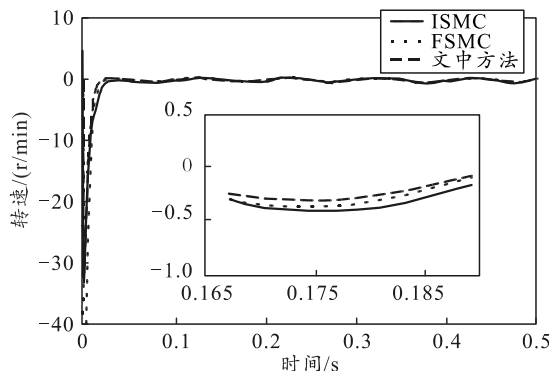


图 9 正弦信号跟踪速度误差

9 结论

笔者在分数阶积分滑模控制策略的基础上，设计了基于神经网络的变阶次分数阶积分滑模控制策略。仿真结果表明：相比于固定阶次的分数阶积分滑模控制，基于 RBF 神经网络自适应调节分数阶滑模面阶次的方法有利于取得更好的动态跟踪性能和稳定精度。

参考文献：

- [1] 马立新, 范洪成, 徐镇乾. 基于惯量辨识 PI 自整定永磁伺服电机控制[J]. 电力科学与工程, 2015, 31(9): 28-32.
- [2] 付培华, 陈振, 丛炳龙, 等. 基于反步自适应滑模控制的永磁同步电机位置伺服系统[J]. 电工技术学报, 2013, 28(9): 288-293.
- [3] ZAKY M. Adaptive switching plane of integral variable structure control for speed control of permanent magnet synchronous motor drives[J]. Electric Power Components and Systems, 2011, 39(13): 1353-1372.
- [4] 刘舒其. 分数阶滑模变结构控制方法研究[D]. 太原: 太原科技大学, 2014.
- [5] 张晓光, 赵克, 孙力, 等. 永磁同步电机滑模变结构调速系统动态品质控制[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(15): 47-52.

因在系统中的地位，了解解决哪些原因对于提高装备的可靠性有较大提升，对合理高效地解决该故障提供理论参考依据。

参考文献：

[1] 国防科工委军标出版发行部. 国家军用标准可靠性(I)[M]. 北京: 国防科工委军标出版发行部, 1992: 15-21.

[2] 罗航. 故障树分析的若干关键问题研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2010.

[3] XING L, AMARI S V. Fault Tree Analysis[M]. Handbook of Performability Engineering. Springer London, 2008.

[4] 陈宇毅. FTA故障树分析研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2005.

(上接第 69 页)

[6] 于银辉, 杨长保, 刘志辉. 基于多 Agent 的分布式专家系统及其应用[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2005, 35: 266-269.

[7] 吴云华, 曹喜滨, 曾占魁. 编队飞行卫星相对姿态变结构分布式协同控制[J]. 吉林大学学报(工学版), 2007, 37(6): 1465-1470.

[8] 刘波, 覃征, 邵利平, 等. 基于群集智能的协同多目标攻击空战决策[J]. 航空学报, 2009, 30: 1727-1739.

[9] 龙涛. 多UCAV协同任务控制中分布式任务分配与任务协调技术研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2010.

[10] 杨茂, 李成凤, 田彦涛. 动态环境下群体机器人同步的分布式控制[J]. 吉林大学学报(工学版), 2011, 41(2):

(上接第 85 页)

[6] 黄家才, 张玳橙, 施昕昕. 基于复合积分滑模的永磁同步电机硬件在环位置控制[J]. 电机与控制学报, 2014, 18(12): 108-114.

[7] 刘辉, 吴云洁, 刘旺开, 等. 基于模糊神经网络 PID 的串级温度控制系统研究[J]. 兵工自动化, 2018, 37(8): 37-40.

[5] 倪绍徐, 张裕芳. 基于故障树的智能故障诊断方法[J]. 上海交通大学学报, 2008, 42(8): 1372-1375.

[6] 胡隆基. 基于故障树分析法的某型高炮随动系统故障诊断[J]. 四川兵工学报, 2011, 32(4): 40-43.

[7] 何庆飞, 王汉功, 陈小虎. 故障树分析法在汽车起重机液压系统故障诊断中的应用[J]. 机床与液压, 2014(2): 196-198.

[8] 郑裕国, 张康达. 故障树定性和定量计算的算法[J]. 浙江工业大学学报, 1995(3): 42-47.

[9] 徐敬青, 齐杏林, 李宁. 基于故障树的某型末制导炮弹控制舱故障分析[J]. 四川兵工学报, 2008, 29(3): 25-27.

[10] 安然, 於孝春. 空分主冷凝蒸发器爆炸的故障树分析[J]. 安全与环境学报, 2011, 11(3): 164-165.

497-502.

[11] 赵敏. 分布式多类型无人机协同任务分配研究机仿真[D]. 南京: 南京理工大学, 2009.

[12] WHITTEN A K, CHOI H L, JOHNSON L. Decentralized Task Allocation with Coupled Constraints in Complex Missions[C]//American Control Conference (ACC). Berlin: Springer-Verlag, 2011: 1642-1649.

[13] 李俨, 董玉娜. 基于 SA-DPSO 混合优化算法的协同空战活力分配[J]. 航空学报, 2010, 31: 626-631.

[14] LUC B. Consensus-based Auctions for Decentralized Task Assignment[D]. Massachusetts: Massachusetts Institute of Technology, 2008.

[15] 顾俊俊, 赵建军, 颜骥. 基于 MODPSO-GSA 的协同空战武器目标分配[J]. 北京航空航天大学学报, 2014, 31: 626-631.

[8] 王春明, 李明秋, 姜淑华, 等. 分数阶控制系统设计[M]. 北京: 国防工业出版社, 2014: 5-6.

[9] 寇宝全, 程树康. 交流伺服电机及其控制[M]. 北京: 机械工业出版社, 2008: 55-56.

[10] 王志宇, 王长松, 范普成. 基于滑模变结构的永磁同步电机调速系统设计[J]. 微电机, 2011, 44(6): 52-56.