

1-2-2019

Modified Fractional Order Sliding Model Control for DC Speed Regulating System

Zhicheng Zhao

1.School of Electronic Information Engineering, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan 030024, China;;

Zhitao Zhao

1.School of Electronic Information Engineering, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan 030024, China;;

Jinggang Zhang

1.School of Electronic Information Engineering, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan 030024, China;;

Xianjiao Zhao

2.State Grid Laixi Power Supply Company, Qingdao 266600, China;

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the [Artificial Intelligence and Robotics Commons](#), [Computer Engineering Commons](#), [Numerical Analysis and Scientific Computing Commons](#), [Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons](#), and the [Systems Science Commons](#)

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Modified Fractional Order Sliding Model Control for DC Speed Regulating System

Abstract

Abstract: An improved fractional order sliding model control (FOSMC) is proposed for DC speed regulating system to eliminate static error easily caused by disturbance in sliding model control. *Second order mathematical model is established through taking the derivative of first-order mathematical model of DC speed regulating system. The theory of fractional calculus is introduced to the switching function of sliding mode, and fractional sliding model is designed combining exponential reaching law and second order mathematical model. The control signal of voltage can be obtained through taking output of the controller and integrator in series. Stability analysis of the system is based on Lyapunov theorem and fractional calculus.* The simulation and experimental results show that the proposed method not only eliminates static error when inference happens, but also reduces the chattering effectively.

Keywords

DC speed regulating system, sliding model control, fractional order calculus, exponential reaching law, static error, chattering

Recommended Citation

Zhao Zhicheng, Zhao Zhitao, Zhang Jinggang, Zhao Xianjiao. Modified Fractional Order Sliding Model Control for DC Speed Regulating System[J]. Journal of System Simulation, 2018, 30(3): 1096-1136.

直流调速系统的改进型分数阶滑模控制

赵志诚¹, 赵志涛¹, 张井岗¹, 赵显姣²

(1. 太原科技大学电子信息工程学院, 山西 太原 030024; 2. 国网山东莱西市供电公司, 山东 青岛 266600)

摘要: 针对直流调速系统中滑模控制容易引起稳态误差的问题, 设计了一种改进型分数阶滑模控制 (Fractional order sliding mode control, FOSMC)。通过对直流调速系统的一阶数学模型求导, 建立了系统的二阶数学模型, 将分数阶微积分理论引入到滑模切换函数中, 结合指数趋近律和系统二阶数学模型, 设计了分数阶滑模控制器, 并在控制器的输出端串联积分环节, 得到系统的控制信号, 最后利用李雅普诺夫稳定性理论和分数阶微积分理论进行了稳定性分析。仿真和实验表明, 本文方法不仅能够有效消除系统受干扰时产生的稳态误差, 而且可以削弱系统抖振现象。

关键词: 直流调速系统; 滑模控制; 分数阶微积分; 指数趋近律; 稳态误差; 抖振

中图分类号: TP273

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X(2018)03-1096-41

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.201803041

Modified Fractional Order Sliding Model Control for DC Speed Regulating System

Zhao Zhicheng¹, Zhao Zhitao¹, Zhang Jinggang¹, Zhao Xianjiao²

(1. School of Electronic Information Engineering, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan 030024, China;

2. State Grid Laixi Power Supply Company, Qingdao 266600, China)

Abstract: An improved fractional order sliding model control (FOSMC) is proposed for DC speed regulating system to eliminate static error easily caused by disturbance in sliding model control. *Second order mathematical model is established through taking the derivative of first-order mathematical model of DC speed regulating system. The theory of fractional calculus is introduced to the switching function of sliding mode, and fractional sliding model is designed combining exponential reaching law and second order mathematical model. The control signal of voltage can be obtained through taking output of the controller and integrator in series. Stability analysis of the system is based on Lyapunov theorem and fractional calculus.* The simulation and experimental results show that the proposed method not only eliminates static error when inference happens, but also reduces the chattering effectively.

Keywords: DC speed regulating system; sliding model control; fractional order calculus; exponential reaching law; static error; chattering

引言

电机广泛地应用于国民经济生产中, 具有极其

重要的地位。目前, 电机的调速系统中普遍采用传统 PID 控制, 虽然 PID 控制器设计简单, 实现方便, 并且具有一定的鲁棒性, 能够满足大部分工业控制系统的要求, 但当系统机械参数时变、存在外部扰动或者工作条件具有不确定性时, PID 控制往往难以满足精确控制的要求。如何保证调速系统具有良好的动静态性能以及对参数变化和外界干扰



收稿日期: 2016-03-22 修回日期: 2016-05-16;
基金项目: 山西省自然科学基金(2012011027-4, 2014011020-1, 2014011020-2), 太原科技大学博士科研启动项目(20142004);
作者简介: 赵志诚(1970-), 男, 山西临猗, 博士生, 教授, 研究方向为先进控制、计算机测控系统与装置。

<http://www.china-simulation.com>

• 1096 •

的不敏感性, 一直是控制界研究的热点。近年来, 除常规 PID 控制外, 改进型 PID 控制^[1-2], 内模控制^[3-5]、智能自适应控制^[6-9]、滑模控制(Sliding mode control, SMC)^[10-16]等许多先进的控制策略逐渐应用于电机调速系统的控制中。其中, SMC 的控制律设计简单, 对系统参数变化以及外部扰动具有良好的鲁棒性和完全的自适应性, 因而受到越来越多的关注。文献[13]将伺服系统中梯形速度波形设计成指数形式, 并利用两段滑模代替四段滑模, 同时采用全局滑模和变指数趋近律来提高系统的鲁棒性和消除抖振, 但是当发生负载扰动时, 仍然容易产生稳态误差。文献[14]采用一种积分型滑模面设计了二阶积分型滑模控制器, 利用双曲线函数代替传统的符号函数以减小滑模的抖振, 并将该控制器应用于直流调速系统中, 虽然可以通过调节滑模面中积分作用系数抑制扰动产生的稳态误差, 但却容易引起动态响应的超调。考虑到分数阶(Fractional order, FO)微积分的优良特性, 文献[15]针对调速系统, 将分数阶微积分引入到切换函数中, 再结合模糊控制理论设计了参数自适应的分数阶滑模控制(FOSMC), 利用李雅普诺夫稳定性理论分析了系统的稳定性以及减小抖振的方式, 但控制器的设计较为复杂, 且系统在干扰情况下存在稳态误差; 文献[16]结合分数阶控制理论、模糊逻辑推理和滑模控制技术的优点, 采用全控制域滑模面设计模糊分数阶滑模控制策略, 但仍然存在控制器设计复杂, 负载扰动时容易引起转速稳态误差的问题。

本文针对直流调速系统滑模控制容易引起稳态静差的问题, 基于系统的二阶状态空间表达式, 将分数阶微积分引入到滑模切换函数中, 结合指数趋近律, 设计了一种分数阶滑模控制器, 并将其与积分环节串联, 获得调速系统的电枢电压控制信号。仿真和实验结果表明了所提方法可有效改善系统的动态性能, 且能消除系统的稳态误差。

1 直流电机的数学模型

忽略伺服系统中存在的电机参数、外部负载的

时变性, 非线性摩擦以及模型中不可预测的不确定项, 得直流伺服电机数学模型为:

$$T_e = C_m i \quad (1)$$

$$T_e - T_L = J \frac{d\omega}{dt} + B\omega \quad (2)$$

$$i = \frac{u - C_e \omega}{R} \quad (3)$$

式中: u 为电枢电压; C_e 为电势系数; R 为电枢电阻; i 为电枢电流; C_m 为转矩常数; T_e 为电磁转矩; T_L 为负载转矩; J 为转动惯量; ω 为转子机械角速度; B 系统粘滞摩擦系数。

将式(1)、式(3)代入式(2)得

$$\dot{\omega} = -a\omega + bu - cT_L \quad (4)$$

式中, $a = (C_m C_e + BR)/(JR)$, $b = C_m/(JR)$, $c = 1/J$ 。

考虑电机参数变化时, 式(4)可以表示为

$$\dot{\omega} = -(a + \Delta a)\omega + (b + \Delta b)u - (c + \Delta c)T_L \quad (5)$$

式中: Δa 、 Δb 和 Δc 表示电机参数摄动量。

控制器设计的目的就是令系统的输出 ω 能够快速跟随设定值 ω_r 。定义速度偏差为 $e(t) = \omega_r - \omega$, 根据式(5)可得

$$\begin{cases} \dot{e}(t) = -ae(t) - bu(t) + \phi(t) + \delta(t) \\ \delta(t) = \Delta a\omega - \Delta b u(t) + \Delta c T_L \\ \phi(t) = a\omega_r + cT_L + \dot{\omega}_r \end{cases} \quad (6)$$

由式(6)进一步可得

$$\ddot{e}(t) = -a\dot{e}(t) - b\dot{u}(t) + \dot{\phi}(t) + \dot{\delta}(t) \quad (7)$$

假设满足

$$|\dot{\delta}(t)| \leq \psi \quad (8)$$

式中, $\psi \in \mathbb{R}^+$ 。取系统的状态变量

$$\begin{cases} x_1 = e(t) \\ x_2 = \dot{x}_1 = \dot{e}(t) \end{cases} \quad (9)$$

则得系统的状态空间表达式表示为

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ -b \end{bmatrix} \dot{u} + \begin{bmatrix} 0 \\ \dot{\phi}(t) + \dot{\delta}(t) \end{bmatrix} \quad (10)$$

2 分数阶滑模控制器设计

滑模控制器的设计过程分为两步: 切换函数的选取和趋近律的设计。在不考虑参数摄动和负载变化的情况下, 选择切换函数为

$$S = k_1 x_2 + k_2 \times {}_0 D_t^\alpha x_1 + x_1 \quad (11)$$

式中： $k_1, k_2 \in \mathbb{R}^+$ 为切换函数增益； ${}_0D_t^\gamma$ 为分数阶微积分算子，当 $0 < \gamma < 1$ 时，表示 γ 阶微分，当 $-1 < \gamma < 0$ 时，表示 γ 阶积分。

取指数趋近律为：

$$\dot{S} = -\varepsilon \operatorname{sgn}(S) - KS \quad (12)$$

式中： ε, K 均为正数； $-KS$ 为指数趋近项，它可以保证运动点逼近滑模面为一个渐进过程，但却不能保证在有限时间内到达，因此增加等速趋近项 $-\varepsilon \operatorname{sgn}(S)$ ， $\operatorname{sgn}(S)$ 为符号函数，即

$$\operatorname{sgn}(S) = \begin{cases} 1, & S > 0 \\ 0, & S = 0 \\ -1, & S < 0 \end{cases} \quad (13)$$

由式(11)和式(12)可得等式

$$\dot{S} = k_1 \dot{x}_2 + k_2 \times {}_0D_t^{\gamma+1} x_1 + \dot{x}_1 - \varepsilon \operatorname{sgn}(S) - KS \quad (14)$$

结合式(10)，得分数阶滑模控制器输出为

$$\dot{u} = \frac{1}{bk_1} (-ak_1 x_2 + ak_1 \dot{\omega}_r + k_1 \ddot{\omega}_r + k_2 \times {}_0D_t^\gamma x_2 + x_2 + \varepsilon \operatorname{sgn}(S) + KS) \quad (15)$$

为了获得系统的控制作用，可在分数阶滑模控制器的输出端串联积分环节，对 \dot{u} 进行积分。改进型分数阶滑模控制系统的结构如图1所示，其中C为改进型分数阶滑模控制器。

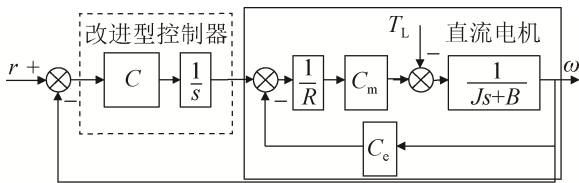


图1 改进型分数阶滑模控制系统的结构图
Fig. 1 Block diagram of modified FOSMC system

3 控制系统性能分析

滑模变结构控制系统的运动由到达段和滑模段两部分构成，因此系统性能的分析包括两方面：一是滑模逼近条件，二是滑模存在条件。

3.1 滑模逼近条件

选择李雅普诺夫函数为

$$V = \frac{1}{2} S^2 \quad (16)$$

对其求导得

$$\dot{V} = S\dot{S} = S(k_1 \dot{x}_2 + k_2 \times {}_0D_t^\gamma x_2 + x_2) = S[k_1(-ax_2 - b\dot{u} + \dot{\phi}(t) + \delta(t)) + k_2 \times {}_0D_t^\gamma x_2 + x_2] \quad (17)$$

将式(15)代入式(17)得

$$\dot{V} = S[-\varepsilon \operatorname{sgn}(S) - KS + k_1 \dot{\delta}(t)] = -\varepsilon |S| - KS^2 + k_1 S \dot{\delta}(t) \quad (18)$$

由李雅普诺夫稳定定理知，滑模逼近条件为

$$\dot{V} \leq 0 \quad (19)$$

结合式(18)和(19)得，满足

$$\varepsilon > k_1 \psi \quad (20)$$

则恒有 $\dot{V} \leq 0$ 。

3.2 滑模存在条件

Mittag-Leffler 函数的定义为

$$E_{\alpha, \beta}(z) = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{z^k}{\Gamma(\alpha k + \beta)} \quad (21)$$

式中： $\Gamma(\cdot)$ 为 Gamma 函数，当 $\alpha = \beta = 1$ 时

$$E_{1,1}(z) = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{z^k}{\Gamma(k+1)} = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{z^k}{k!} = e^z \quad (22)$$

可知 Mittag-Leffler 函数是指数函数 e^z 的一般形式。

Mittag-Leffler 函数的 n 阶导数为

$$E_{\alpha, \beta}^{(n)}(z) = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(k+n)! z^k}{k! \Gamma(\alpha k + \alpha n + \beta)}, (n=1, 2, \dots) \quad (23)$$

当控制系统进入滑模段时，满足 $S=0$ ，即

$$k_1 \dot{e} + k_2 \times {}_0D_t^\gamma e + e = 0 \quad (24)$$

由文献[17]可知，式(24)方程的解可以用 Mittag-Leffler 函数及其导数构成，因此式(24)可改写为

$$k_1 ({}_0D_t^{\eta_1} e)^{(\zeta_1)} + k_2 ({}_0D_t^{\eta_2} e)^{(\zeta_2)} + e = 0 \quad (25)$$

式中： $0 < \eta \leq 1$ ， $\zeta_1 > \zeta_2$ 为正整数。式(25)的特征多项式为

$$k_1 (\lambda^\eta)^{\zeta_1} + k_2 (\lambda^\eta)^{\zeta_2} + 1 = 0 \quad (26)$$

则其可以分解为

$$[(\lambda_1 \lambda)^\eta + 1]^{n_1} [(\lambda_2 \lambda)^\eta + 1]^{n_2} \dots [(\lambda_m \lambda)^\eta + 1]^{n_m} = 0 \quad (27)$$

式中， $n_1 + n_2 + \dots + n_m = \zeta_1$ 。根据式(27)可得特征方程的

根, 由于式(24)的解为 $E_{\eta_i,1}(-t^\eta/\lambda_i^\eta)$ 及其 (n_i-1) 次导数的组合, 其中 $i=1,2,\dots,m$ 。由此可知当 $\lambda_1^\eta, \lambda_2^\eta, \dots, \lambda_m^\eta$ 均大于零时, 偏差 e 将趋近零。

4 仿真和实验分析

为验证本文方法的有效性, 利用 MATLAB 和 QStudioRP 实验平台, 分别进行了仿真和实验分析。

Quanser 公司的 MicroMo Coreless 无芯电机的主要参数为: 电枢电阻 $R=2.6 \Omega$, 电动势系数 $C_e=0.00767 \text{ V}\cdot\text{s}/\text{rad}$, 转矩常数 $C_m=0.00767 \text{ N}\cdot\text{m}/\text{A}$, 转动惯量 $J=3.87\times 10^{-7} \text{ kg}\cdot\text{m}^2$, 粘滞摩擦系数 $B=1.5\times 10^{-3} \text{ N}\cdot\text{m}\cdot\text{s}/\text{rad}$, 负载等效转动惯量 $J_{\text{eq}}=9.31\times 10^{-5} \text{ kg}\cdot\text{m}^2$, 电机效率 $\eta_m=0.69$, 可得状态空间表达式为

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -45.69 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ -275.48 \end{bmatrix} \dot{u} + \begin{bmatrix} 0 \\ 45.69\dot{\omega}_r + 1.07\times 10^4 T_L + \ddot{\omega}_r \end{bmatrix} \quad (28)$$

由式(15)得

$$\dot{u} = \frac{1}{275.48k_1} (-45.69k_1x_2 + 45.69k_1\dot{\omega}_r + k_1\dot{\omega}_r + k_2 \times {}_0D_t^\gamma x_2 + x_2 + \varepsilon \text{sgn}(S) + KS) \quad (29)$$

将其经过积分环节可得改进型分数阶滑模控制器输出 u 。控制器参数根据系统的响应性能反复调试整定为 $k_1=0.04, k_2=0.5, K=100, \varepsilon=0.15, \gamma=0.2$ 。

根据文献[15]设计具有负载观测器的分数阶滑模控制器为

$$u = \frac{1}{275.48k_p} (-45.69k_p x_1 + 45.69k_p \dot{\omega}_r + k_p \dot{\omega}_r + 1.07\times 10^4 k_p T_L + {}_0D_t^{\gamma+1} x_1 + wS + k_s \text{sgn}(S)) \quad (30)$$

其中滑模面和指数趋近律分别为

$$S = k_p x_1 + {}_0D_t^\gamma x_1 \quad (31)$$

$$\dot{S} = -wS - k_s \text{sgn}(S) \quad (32)$$

式中, k_p, w 和 k_s 均为正数。

由式(30)可以看出, 该方法需要对负载转矩 T_L

进行实时测量, 才能保证系统的控制性能。若 SMC 不具有负载观测器, 则令式(30)中 $T_L=0$ 。同样经过多次调试, 整定控制器参数为 $k_p=4, \gamma=0.1, w=20, k_s=0.5$ 。

设控制系统的给定值 $r=30(t)$, 负载扰动 $T_L=0.05(t-5) \text{ N}\cdot\text{m}$, 选用时间乘以误差绝对值的积分(ITAE)和超调量($\sigma\%$)作为系统性能指标, 两指标值越小系统性能越好。3种方法的转速响应曲线以及系统性能指标分别如图2和表1所示, 可见在具有负载观测器的情况下, 文献[15]的分数阶滑模控制器可使系统具有良好的控制性能, 转速几乎不受负载干扰的影响, 但其对硬件和观测器算法精度的要求较高, 本文方法具有较好的动态响应和扰动抑制性能, 而当不具有负载观测器时, 分数阶 SMC 无法克服由于负载扰动导致的稳态误差。

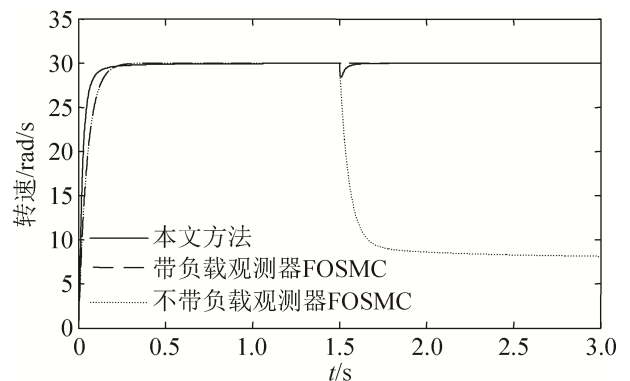


图2 调速系统阶跃响应

Fig. 2 Step response of speed regulating system

表1 控制系统性能指标

Tab. 1 Performance parameters of the control system

方法	$\sigma\%$	ITAE
本文方法	0	0.306 8
带负载观测器 FOSMC	0	0.077 3
不带负载观测器 FOSMC	0	71.06

另外, 本文方法、分数阶 SMC 的切换函数曲线如图3所示, 可见本文方法不仅能够较快的进入滑模段, 而且可以有效的抑制滑模的抖振现象。

由以上分析可知, 分数阶 SMC 虽然在具有负载观测器的情况下, 可以实现优异的控制效果, 但

是抖振现象较明显,且该方法对系统的硬件要求较高。而本文方法在负载转矩 T_L 发生阶跃变化后, $\dot{T}_L = 0$, 因此控制作用 \dot{u} 不包含负载转矩的测量值,并且由于积分环节的作用,可减缓控制器输出的切换频率和变化强度,有效削弱系统的抖振。

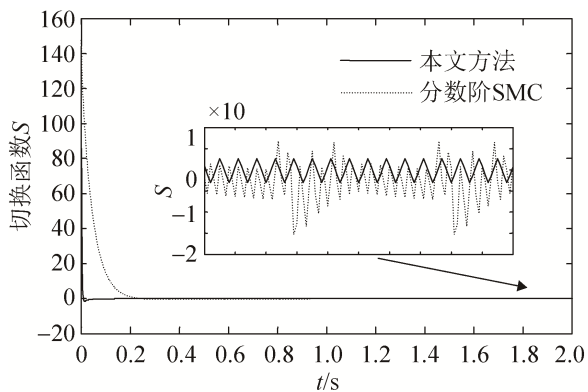


图3 两种滑模控制系统的切换函数曲线
Fig. 3 Switching function curves of two SMC systems

将本文方法应用于基于 QstudioRP 实验平台的直流调速系统,系统硬件结构如图 4 所示,给定 $r=20 \text{ rad/s}$, $t=5 \text{ s}$ 时,加入旋转机械负载。在控制系统不具有负载观测器时,本文方法和分数阶 SMC 方法的转速的响应曲线分别如图 5 和 6 所示,本文方法和文献[15]方法的调节时间分别为 0.4 s 和 0.5 s ,均具有良好的设定值跟随性能,发生干扰后转速响应的最大动态偏差分别为 15.8% 和 28.5% ,且本文方法在发生干扰后约 0.1 s 恢复到给定值,文献[15]无法恢复到给定值,存在约 5 rad/s 的稳态误差,因此本文方法具有较好的动静态性能。



图4 直流调速系统硬件连接
Fig. 4 Hardware connection of DC speed regulating system

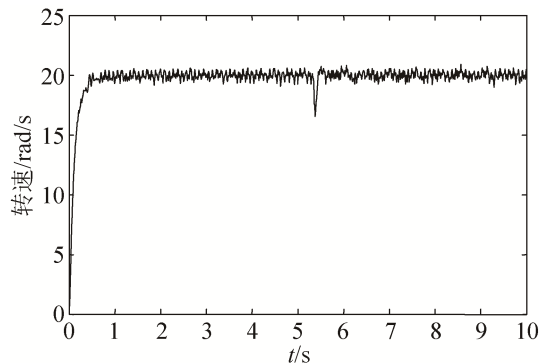


图5 改进型分数阶滑模控制系统转速响应
Fig. 5 Speed response of modified FOSMC system

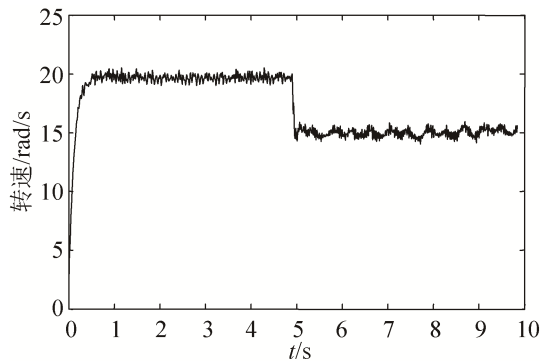


图6 分数阶滑模控制系统转速响应
Fig. 6 Speed response of FOSMC system

5 结论

针对调速系统中滑模控制容易引起稳态静差的问题,首先建立了系统的二阶状态空间表达式模型,将分数阶微积分引入到滑模切换函数中,设计了改进型的分数阶滑模控制器。仿真和实验表明,在无负载观测器的情况下,本文方法可以有效克服由于负载扰动导致的稳态静差,且使系统具有较小的抖振。

参考文献:

- [1] Alexandridis A T, Konstantopoulos G C. Modified PI speed controllers for series-excited dc motors fed by dc/dc boostconverters[J]. Control Engineering Practice (S0967-0661), 2014, 23(2): 14-21.
- [2] Rajasekhar A, Jatoth R K, Abraham A. Design of intelligent PID/PI^λD^μ speed controller for chopper fed DC motor drive using opposition based artificial bee colony algorithm[J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence(S0952-1976), 2014, 29(3): 13-32.

- [3] 赵金亮, 贾彦斌. 抗干扰内模控制在直流调速系统中的应用[J]. 火力与指挥控制, 2013, 38(9): 71-73.
Zhao Jinliang, Jia Yanbin. Application of an anti-disturbance IMC control in a class of DC speed regulation systems[J]. Fire Control and Command Control, 2013, 38(9): 71-73.
- [4] 尹忠刚, 牛剑博, 钟彦儒. 采用免疫算法的感应电机内模控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(24): 97-105.
Yin Zhonggang, Niu Jianbo, Zhong Yanru. Research on an internal model control strategy for induction motors using the immune algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(24): 97-105.
- [5] 赵志诚, 桑海, 张井岗. 永磁同步电机速度伺服系统的分数阶内模控制[J]. 系统仿真学报, 2015, 27(2): 384-388.
Zhao Zhicheng, Sang Hai, Zhang Jinggang. Fractional Order Internal Model Control of PMSM Speed Servo System[J]. Journal of System Simulation, 2015, 27(2): 384-388.
- [6] Premkumar K, Manikandan B V. Adaptive neuro-fuzzy inference system based speed controller for brushless DC motor [J]. Neurocomputing(S0925-2312), 2014, 138(22): 260-270.
- [7] Premkumar K, Manikandan B V. Fuzzy PID supervised online ANFIS based speed controller for brushless DC motor [J]. Neurocomputing(S0925-2312), 2015, 157(1): 76-90.
- [8] Peng J, Dubay R. Identification and adaptive neural network control of a DC motor system with dead-zone characteristics [J]. ISA Transactions(S0019-0578), 2011, 50(4): 588-598.
- [9] Zhang D, Li H. A stochastic-based FPGA controller for an induction motor drive with integrated neural network algorithms [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics(S0278-0046), 2008, 55(2): 551-561.
- [10] Wang Y, Zhang X, Yuan X, et al. Position-sensorless hybrid sliding-mode control of electric vehicles with brushless DC motor[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology(S0018-9545), 2011, 60(2): 421-432.
- [11] 刘晓东, 吴云洁. 一种变结构控制系统设计方法[J]. 电机与控制学报, 2013, 17(6): 75-81.
Liu Xiaodong, Wu Yunjie. Design method of variable structure control system[J]. Electric Machines and Control, 2013, 17(6): 75-81.
- [12] 张碧陶, 皮佑国. 基于模糊分数阶滑模控制的永磁同步电机控制[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2012, 40(3): 126-130.
Zhang Bitao, Pi Youguo. Control of permanent magnet synchronous motor based on fuzzy fractional-order sliding mode control[J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2012, 40(3): 126-130.
- [13] 胡强晖, 胡勤丰. 全局滑模控制在永磁同步电机位置伺服中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(18): 61-66.
Hu Qianghui, Hu Qinfeng. Global sliding mode control for permanent magnet synchronous motor servo system[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(18): 61-66.
- [14] Furat M, Eker İ. Second-order integral sliding-mode control with experimental application [J]. ISA Transactions(S0019-0578), 2014, 53(5): 1661-1669.
- [15] Zhang B T, Pi Y G, Luo Y. Fractional order sliding-mode control based on parameters auto-tuning for velocity control of permanent magnet synchronous motor[J]. ISA Transactions(S0019-0578), 2012, 51(5): 649-656.
- [16] 张碧陶, 皮佑国. 永磁同步电机伺服系统模糊分数阶滑模控制[J]. 控制与决策, 2012, 27(12): 1776-1780.
Zhang Bitao, Pi Youguo. Fractional order fuzzy sliding mode control for permanent magnet synchronous motor servo drive[J]. Control and Decision, 2012, 27(12): 1776-1780.
- [17] 代群, 李辉来. 几类线性分数阶微分方程解的结构[J]. 吉林大学学报(理学版), 2011, 49(4): 580-586.
Dai Qun, Li Huilai. Structures of solutions of several kinds of linear fractional differential equations[J]. Journal of Jilin University (Science Edition), 2011, 49(4): 580-586.