

永磁同步电动舵机系统滑模变结构控制器设计

苏伟杰,张 军,张 波,王厚浩,陶 键

(上海航天控制技术研究所,上海 201109)

摘 要:针对电动舵机系统,建立表贴式永磁同步电机(SPMSM)矢量控制模型。设计基于指数趋近律的滑模变结构控制器,并在此基础上进行抖振抑制。利用变指数趋近律滑模控制器与比例-积分-微分(PID)控制器相结合,设计组合控制器,既可最大程度地发挥滑模变结构控制的快速性与鲁棒性,又可利用PID控制的优势减小系统最后的抖振。最后,通过与基于指数趋近律的滑模控制器进行仿真对比,验证组合控制器对电动舵机系统抖振的抑制效果。仿真结果表明:设计的组合控制器将系统静差减小了85%,并基本消除了滑模末端的抖振。

关键词:永磁同步电机; 电动舵机; 滑模变结构; 抖振抑制; 变指数趋近率; 组合控制器; 静差

中图分类号:TM341

文献标志码:A

DOI:10.19328/j.cnki.1006-1630.2018.03.016

Sliding Mode Variable Structure Controller Design for Permanent Magnet Synchronous Electric Steering System

SU Weijie, ZHANG Jun, ZHANG Bo, WANG Houhao, TAO Jian

(Shanghai Aerospace Control Technology Institute, Shanghai 201109, China)

Abstract: Based on electric steering system, a vector control model of the surface permanent magnet synchronous motor (SPMSM) is established. A sliding mode variable structure controller based on index reaching law is designed, and chattering inhibition is carried out on this basis. A combined controller is designed by the combination of variable index reaching law sliding mode controller and PID controller. This controller can not only maximize the rapidity and robustness of sliding mode variable structure control, but also make use of the advantages of PID to reduce the chattering. Finally, the chattering inhibitory effect of this electric steering system is verified by comparing with the simulation of sliding mode controller based on index reaching law. The simulation results show that the combined controller can reduce the static error by 85% and basically eliminate the chattering at the end of the sliding mode.

Keywords: permanent magnet synchronous motor; electric steering; sliding mode variable structure; chattering inhibition; variable index reaching law; combined controller; static error

0 引言

电动舵机系统机械结构中存在齿轮、滚珠丝杆等传动机构,且系统中包含大量非线性因素^[1],因此传统的比例-积分-微分(PID)控制器在控制性能方面存在明显缺陷。将滑模变结构控制与矢量控制相结合可克服永磁同步电动舵机系统中存在的参数扰动、外部负载扰动和驱动饱和、电流耦合等影响^[2],从而提升永磁同步电动舵机系统的鲁棒性,提高控

制系统性能。与传统的无刷直流电动舵机伺服系统相比,永磁同步电动舵机系统在控制方式上具有突出优势。无刷直流电动舵机系统^[3]往往采用位置-电流双闭环控制^[6],同时利用舵机上的电位器采样获得位置信息进行微分,构成“伪速度环”,因此控制系统存在明显的速度环滞后现象。永磁同步电动舵机系统^[7]采用位置-速度-电流三闭环的矢量控制方式,在 $i_d = 0$ 的控制模式下,不仅模拟了无刷直流系

收稿日期:2016-06-27;修回日期:2016-07-25

作者简介:苏伟杰(1991—),男,硕士研究生,主要研究方向为航天器伺服控制技术。

统的控制性能,且因速度信息由旋转变压器直接获得,故速度环滞后现象得以克服。然而,受旋转变压器采样精度的限制(例如最小识别量为 30 r/min),实际系统在低速状态下获得的速度信息并不准确,容易出现随机抖动。特别是对传统的滑模变结构算法而言,滑模态趋近于原点时,抖振更加明显。虽然目前改进的变结构控制器在削弱抖振方面取得了较好效果,但抖振剧烈的问题并未得到彻底、有效的解决。在今后较长一段时间内,抖振问题仍将是电动舵机变结构控制研究的重点,以及制约变结构控制算法工程应用的主要因素。智能控制算法与变结构控制相结合的复合控制方法,利用先进的控制理论可有效削弱系统抖振,但该方法算法复杂,工程实现难度大。饱和函数方法在解决抖振问题时,存在较难向高阶系统扩展的问题。利用趋近律方法可设计简单且易于实现的变结构控制器,尽管该方法得到广泛应用并取得丰硕成果,但仍未解决抖振问题。因此,本文针对滑模态原点附近的抖振情况,改进了基于趋近律的滑模变结构算法。同时,将滑模控制末端与 PID 控制算法相结合设计了新的组合控制器。这种设计思路既可最大程度地发挥滑模变结构控制的快速性与鲁棒性,又可利用 PID 控制的优势减小系统最后的抖振,且算法设计简单,易于工程实现。在低速状态下,速度信息的获取仍采用无刷直流系统的方式,通过对位置信息进行微分获得,保证了低速状态下速度信息的准确性。

1 永磁同步电动舵机系统模型

在永磁同步电机矢量控制系统建模分析中, d - q 同步旋转坐标系数学模型最为常见。通常将 d 轴定义在转子的 N 极上,因此,在 d - q 同步旋转坐标系下,永磁同步电机数学模型可表示为

$$\begin{cases} \frac{di_d}{dt} = -\frac{R_s}{L_d}i_d + n_p\omega i_q + \frac{1}{L_d}u_d \\ \frac{di_q}{dt} = -\frac{R_s}{L_q}i_q - n_p\omega i_d - \frac{n_p\psi_f}{L_q}\omega + \frac{1}{L_q}u_q \\ \frac{d\omega}{dt} = \frac{3n_p\psi_f i_q}{2J} - \frac{F}{J} - \frac{T_L}{J} \end{cases} \quad (1)$$

式中: u_d, u_q 为定子 d, q 轴电压分量; i_d, i_q 为定子 d, q 轴电流分量; ω 为转子机械角速度; R_s 为定子绕组电阻; L_d, L_q 为定子绕组 d, q 轴电感分量; ψ_f 为转子永磁体磁链; n_p 为极对数; F 为转子摩擦系数; J 为转动惯量; T_L 为负载力矩。

永磁同步电动舵机系统采用位置-速度-电流三环的控制方式,控制原理如图 1 所示。其中, θ_r 为舵偏角指令, θ_f 为舵偏角反馈, ω_f 为转速反馈, U_{DC} 为逆变器直流侧母线电压。位置-速度反馈经滑模变结构控制器后作为 q 轴电流的电流给定 i_q^* ; 电流环采用 $i_d^* = 0$ 的控制方式, d, q 轴的电流偏差信号经 PI 调节后形成 d, q 轴的直流电压给定量,之后对直流电压给定量进行空间矢量运算,得到三相功率管的开关矢量,实现永磁同步电动舵机系统的矢量控制。

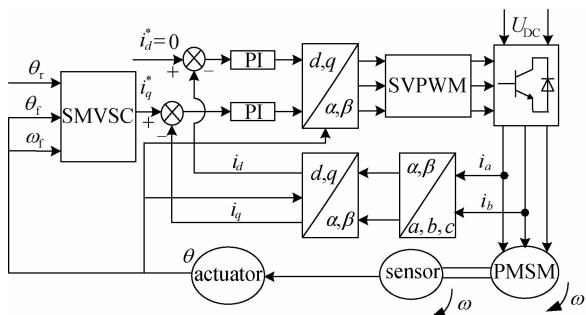


图 1 永磁同步电动舵机控制原理框图

Fig. 1 Principle diagram of permanent magnet synchronous motor servo

2 滑模变结构控制基本原理

滑模变结构控制与常规控制的根本区别在于控制的不连续性。该控制特性可迫使系统做“滑模”运动,即在一定特性下沿滑模面做小幅度、高频率的上下运动。这种滑模运动与系统参数及扰动无关,具有很强的鲁棒性^[10]。

如图 2 所示, e 为跟踪误差, $\dot{e}$ 为跟踪误差的导数。其中,滑模变结构控制的运动状态分为 2 个阶段:正常运动段和滑动模态段。正常运动段是系统从初始状态运动到 $s(x)=0$ 的过程;滑动模态段是状态轨线沿着切换流形 $s(x)=0$ 滑动至原点的特殊运动过程。滑模变结构控制器控制律可表示为

$$u = \begin{cases} u^+(x), & s(x) > 0 \\ u^-(x), & s(x) < 0 \end{cases} \quad (2)$$

式中: $s(x)$ 为切换函数; $u^+(x), u^-(x)$ 分别为滑模面两侧的控制量。

控制律 u 的任务是使相轨迹先运动到滑模上,再沿滑模面运动到原点。实际滑动模态的相轨迹如图 3 所示,这是出现了抖振的情况。因实际控制对象具有惯性和延时特性,相轨迹总会穿过切换面,之后又被迅速拉回来,故形成了沿着切换面的高频抖

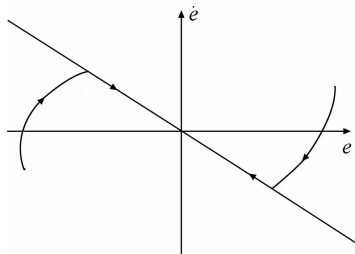


图 2 滑模变结构控制的两个阶段

Fig. 2 Two phases of sliding mode variable structure control

振^[10]。这种抖振反映在位置输出上为在平衡位置附近的高频抖振。在设计滑模变结构控制器时,要在保证系统控制品质的前提下,尽量削弱抖振。

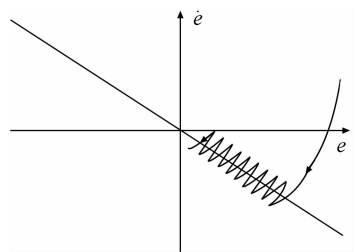


图 3 实际滑动模式

Fig. 3 Real sliding mode

3 滑模变结构控制器设计

根据永磁同步电机 $i_d=0$ 矢量控制方程(电磁转矩运动方程),可得永磁同步电机矢量控制系统简化框图,如图 4 所示。其中,力矩线性增益 $K_t = 1.5n_p\psi_f$, 电磁转矩 $T_e = K_t i_q$, ω_r 为转速指令。

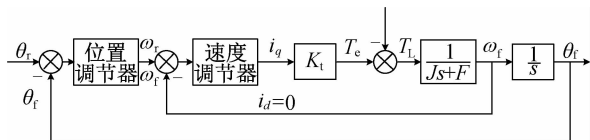


图 4 永磁同步电机矢量控制系统简化框图

Fig. 4 Simplified block diagram of permanent magnet synchronous motor vector control system

由图 4 可得永磁同步电机位置伺服系统简化方程为

$$\ddot{\theta}(t) = A\dot{\theta}(t) + BU(t) + DT_L \quad (3)$$

式中: $\dot{\theta}$ 为舵偏角一阶导数; $\ddot{\theta}$ 为舵偏角二阶导数; 系数 $A = -F/J$, $B = K_t/J$, $D = -1/J$; 系统控制量 $U(t) = i_q$ 。若考虑系统的参数变化及外部扰动对永磁同步电机控制系统产生的影响,则式(3)可转化为

$$\ddot{\theta}(t) = A\dot{\theta}(t) + BU(t) + M(t) \quad (4)$$

式中: $M(t) = \Delta A\dot{\theta}(t) + \Delta BU(t) + (D + \Delta D)T_L$; $\Delta A, \Delta B, \Delta D$ 分别为 A, B, D 的不确定量。令 $|M(t)| \leq \epsilon |e|$, 其中, ϵ 为正常数, e 为跟踪信号误差。

3.1 基于指数趋近律的滑模变结构控制器设计

令永磁同步电机的位置跟踪误差为

$$e = \theta_r(t) - \theta_f(t) \quad (5)$$

对式(5)求导可得速度跟踪误差表达式为

$$\dot{e} = \dot{\theta}_r(t) - \dot{\theta}_f(t) \quad (6)$$

选择滑模面

$$s = ce + \dot{e}, \quad c > 0 \quad (7)$$

基于指数趋近律 $\dot{s} = -\epsilon \text{sgn}(s) - ks$, 可选取控制律

$$U(t) = \frac{1}{B} [\ddot{\theta}_r(t) - A\dot{\theta}_f(t) + c\dot{e} + \epsilon \text{sgn}(s) + ks], \quad \epsilon > 0, k > 0 \quad (8)$$

式中: $\dot{e}, \dot{\theta}_r(t), \dot{\theta}_f(t)$ 分别为相应变量的一阶导数; c, ϵ, k 为可调增益参数; $\text{sgn}(s)$ 为滑模面 s 的符号函数。

在选定切换面和滑模控制律后,针对滑模控制器选用李亚普诺夫函数 $V = 0.5s^2$ 来证明滑模平面稳定存在滑动模态。对李亚普诺夫函数求导得

$$\begin{aligned} \dot{V} &= s\dot{s} = \\ &s[\ddot{\theta}_r(t) - A\dot{\theta}_f(t) - BU(t) - M(t) + c\dot{e}] = \\ &s[-\epsilon |e| \text{sgn}(s) - ks - M(t)] \leq \\ &|M(t)| |s| - \epsilon |e| |s| \leq 0 \end{aligned} \quad (9)$$

由此可见,上述设计的滑模变结构控制器能满足要求。

3.2 滑模变结构控制器改进与优化

滑模控制律 u 的作用是将系统跟踪状态维持在滑模面附近,但同时也在滑模面附近产生了高频抖振。由式(8)可知,切换控制增益 k 的取值确保控制律能够忽略不确定项的影响,但 k 取值越大,随之产生的抖振就越大。因此,控制器往往存在快速性能与抖振不能兼顾的问题。如何在保证快速性的同时,又能抑制系统抖振的产生,一直是滑模变结构控制研究的热点问题。

针对这一问题,学者们提出了各种改进方法,其

中较常采用的有两种^[11]:一种是通过优化算法,对滑模变结构算法本身进行改进,例如对符号函数的连续化改进、指数趋近律的分段趋近^[12]、利用参数估计和扰动补偿等方法提高控制量的精度^[13]等;另一种是将不同的控制策略结合起来,在充分发挥滑模变结构控制强鲁棒性,对扰动的系统响应和调整速度快等优点的基础上,利用其他控制方法来消除滑模变结构控制本身所固有的抖振^[13],减小静差,实现优势互补。目前,与滑模变结构相结合应用于PMSM控制系统的控制策略主要有模糊控制、神经网络控制、模型参考自适应控制、PID控制,遗传算法控制等。

结合以上两种方式,本文将变指数趋近律设计与位置-速度环PID算法相结合,对控制器进行改进与优化。两种方式取长补短,当滑模变结构控制器将系统状态稳定于滑模面附近时,进入PID控制器,使控制系统在保证鲁棒性的同时实现无超调、无静差的控制性能。

1) 利用变指数趋近律设计改善滑模变结构控制器的快速性

为弥补指数趋近律自身的缺陷,在减小滑模抖振的同时,提升滑模态初期趋近速度,设计了一种新的指数趋近律,即变指数趋近律,其形式为

$$\dot{s} = -\eta \operatorname{sgn}(s) - ks \quad (10)$$

式中: $\eta = \epsilon |e|$ 为同误差成正比的可变量。取相应的控制律为

$$U(t) = \frac{1}{B} [\ddot{\theta}_r(t) - A\dot{\theta}_l(t) + c\dot{e} + \eta \operatorname{sgn}(s) + ks], \quad \epsilon > 0, k > 0 \quad (11)$$

由式(10)分析可知:新设计的趋近律使系统的状态运动点在距离滑模面较远时,以较快的速率快速趋向滑模面,保证了系统的快速响应特性;而当其

接近滑模面时, $-\eta \operatorname{sgn}(s)$ 趋近于零,抖振减小。为进一步改善系统的快速性,对变指数趋近律的滑模增益 ϵ 进行重新设计,即

$$\epsilon = \begin{cases} m, & |e| \geq 1 \\ m|e|, & 0.01 < |e| < 1 \end{cases} \quad (12)$$

式中: m 为与实际系统相关的常量。

由式(12)可知,新的滑模增益可随位置误差信号的变化而调整。

2) 利用基于末端PID的合控制器抑制滑模抖振

为增强系统的控制精度,减少系统位置跟踪的超调与静差,考虑在控制过程的末端引入PID控制。当位置误差较小时 ($|e| \leq 0.01$),系统由变指数趋近律滑模控制器切换到PID控制器进行控制。新的组合控制器如图5所示,控制器输入为舵偏角指令与反馈的偏差,输出为电流环给定,滑模控制模块与PID控制模块由舵偏角偏差量进行控制切换。

4 仿真结果分析

为验证控制器的性能,本文利用SIMULINK工具箱搭建永磁同步电动舵机控制系统模型,利用S函数对滑模变结构控制器及组合控制器进行设计仿真。仿真中采用的永磁同步电动舵机系统参数为: $R_s = 2.875 \, \Omega$, $L_d = L_q = 8.5 \, \text{mH}$, $\psi_l = 0.175 \, \text{Wb}$, $J = 0.0008 \, \text{kg} \cdot \text{m}^2$, $F = 0.1 \, \text{mN} \cdot \text{m} \cdot \text{s}$, $n_p = 2$, 额定转速 $5000 \, \text{r/min}$, 传动比 $1:100$ 。控制器参数可根据具体仿真情况调整。

为验证组合控制器的效果,对指数趋近律滑模变结构控制器与组合控制器进行仿真,仿真波形如图6~8所示,其中在 $0.1 \, \text{s}$ 时刻给定 30° 的阶跃舵偏角指令。

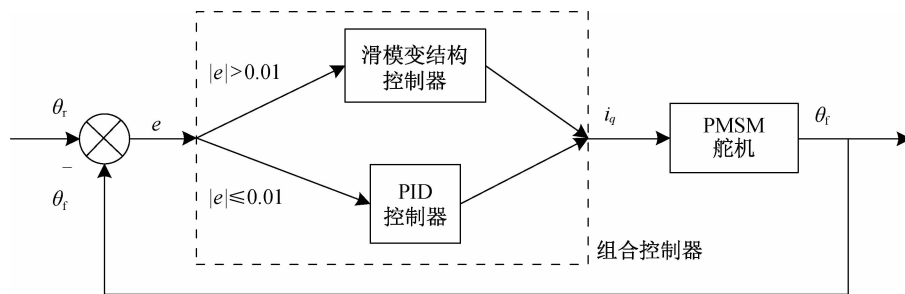


图5 组合控制器示意图

Fig. 5 Schematic diagram of combination controller

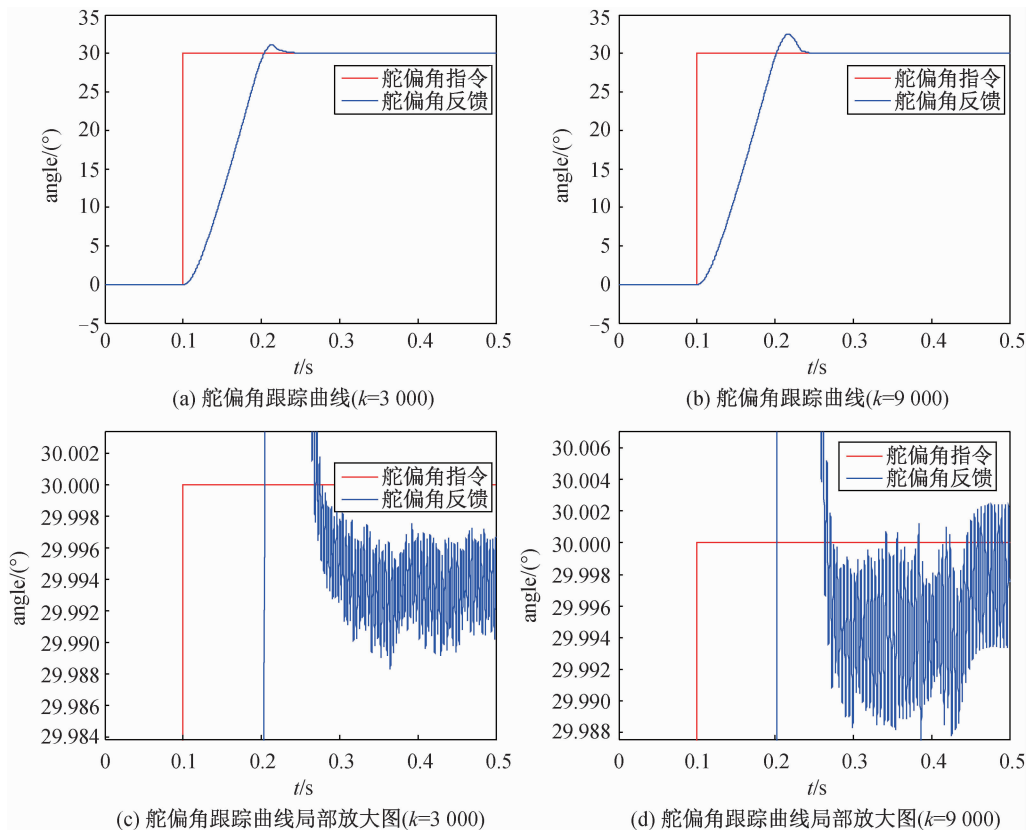
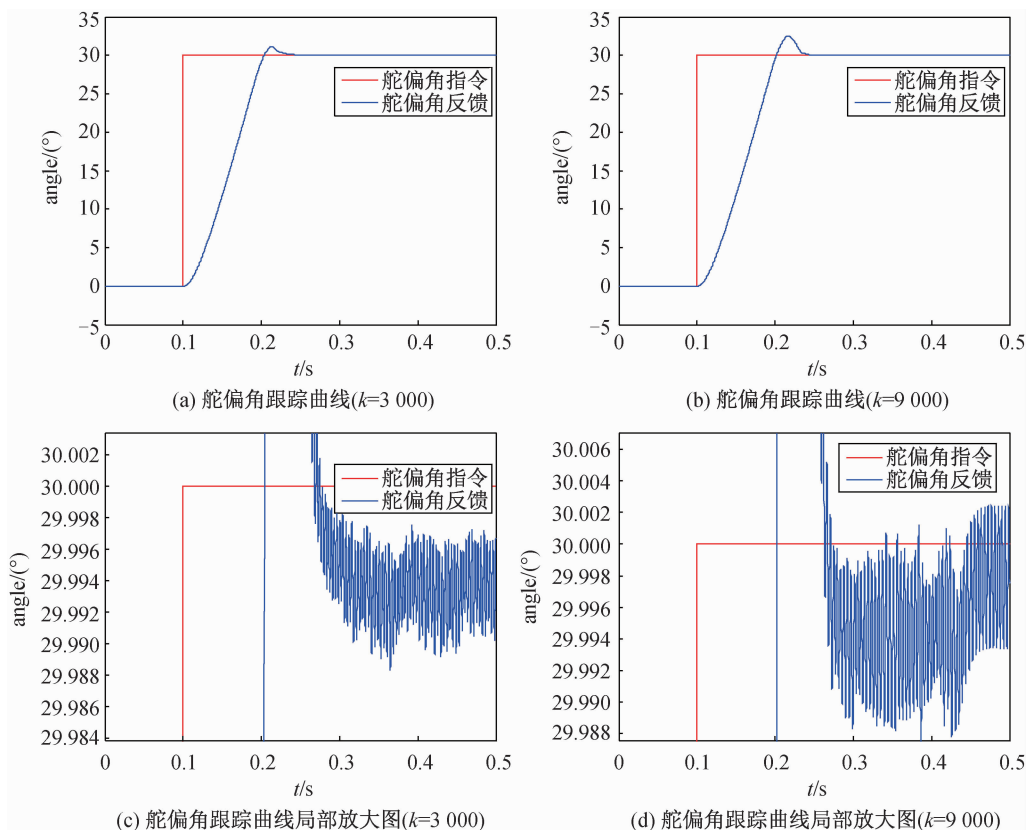


图 6 指数趋近律控制器仿真波形

Fig. 6 Simulation of exponential reaching law controller

图 7 指数趋近律控制器和组合控制器对比图($k=1\ 000$)Fig. 7 Contrast figure of exponential reaching law controller and combination controller($k=1\ 000$)

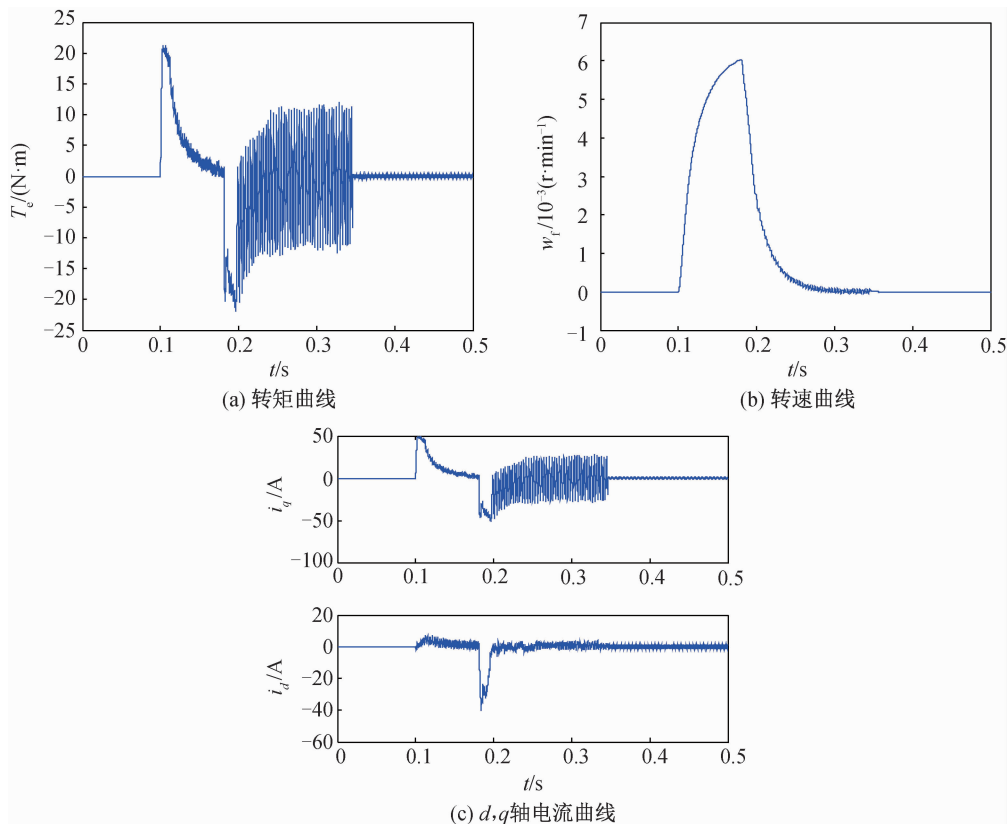
图8 组合控制器的转矩、转速和电流抖振($k=1\ 000$)Fig. 8 Torque, speed and current chattering of combination controller($k=1\ 000$)

图6为基于指数趋近律的滑模变结构控制器仿真波形。由图6可知,随着控制器切换控制增益 k 值增大,系统的超调和抖振都将增大,且跟踪快速性并未显著提高,因此一味地增大 k 值并不能提高系统性能。

图7为基于指数趋近律的滑模变结构控制器仿真波形与基于变指数趋近律的PID组合控制器仿真波形的对比图。由图7可知,与指数趋近律控制器相比,组合控制器静差小,位置跟踪稳态基本无抖振。

图8为基于指数趋近律的滑模变结构控制器与基于变指数趋近律的PID组合控制器输出的转矩、转速和电流曲线。由图8可知,组合控制器对系统稳态的抖振有很好的抑制效果,提高了舵系统的控制精度与稳态性能。

5 结束语

滑模变结构控制中的抖振抑制问题历来是滑模变结构控制的研究重点,国内外学者对相关算法做了许多改进并取得了不少研究成果。但这些算法或

多或少存在着算法实现复杂、控制条件苛刻等问题,不易于工程应用。本文针对永磁同步电动舵机系统,设计了基于变指数趋近律的滑模变结构控制与PID控制相结合的组合舵偏角控制器,抑制了指数趋近律滑模变结构控制器在滑模面附近的高频抖振。仿真结果表明:组合控制器将系统静差减小了85%并基本消除了滑模末端的抖振。与改进前的控制器相比,组合控制器具有较强的鲁棒性与快速性,设计简单,便于后期导弹舵机系统DSP、FPGA的算法实现,具有较强的工程实践性。因实际系统存在不确定性,故具体控制参数的调试仍依赖于舵机系统电机的选型与舵机结构、传动比的设计。

参考文献

- [1] 张明月. 含间隙滚珠丝杠式电动舵机动态特性分析[J]. 计算机仿真, 2016, 33(1): 63-67, 126.
- [2] 唐勇奇, 汪超, 赵葵银. 模糊滑模变结构控制在交流伺服系统中应用[J]. 微特电机, 2006, 34(2): 36-38.
- [3] 夏长亮, 方红伟. 永磁无刷直流电机及其控制[J]. 电工技术学报, 2012, 27(3): 25-34.

- [4] PANT M, THANGARAJ R, ABRAHAM A. Optimal tuning of PI speed controller using nature inspired heuristics [J]. *Intelligent Systems Design and Applications*, 2008(8): 420-425.
- [5] 王宏. 无刷直流电动机控制系统的设计与实现[D]. 南京: 南京理工大学, 2003.
- [6] 张跃, 韩雪峰. 双环控制电动舵机系统的设计验证[J]. *光学精密工程*, 2015, 23(11): 3138-3146.
- [7] 兰根龙, 齐蓉, 吴春. 永磁同步电动舵机控制系统设计与实现[J]. *微电机*, 2014, 47(3): 73-77.
- [8] 吴春, 齐蓉, 李兵强, 等. 永磁同步电机在电动舵机伺服系统中的应用[J]. *微特电机*, 2012, 40(5): 10-12.
- [9] 李永东, 张猛. 高性能交流永磁同步电机伺服系统现状[J]. *伺服控制*, 2008(1): 34-37.
- [10] LIN S C, CHEN Y Y. Design of self-learning fuzzy sliding mode controllers based on genetic algorithms [J]. *Fuzzy Sets and System*, 1997, 86(2): 139-153.
- [11] ALFARO-CID E, MCGOOKIN E W, MURRAY-SMITH D J, et al. Genetic algorithms optimization of decupled sliding mode controllers: Simulated and real results[J]. *Control Engineering Practice*, 2005, 13(6): 739-748.
- [12] 童克文, 张兴, 张昱, 等. 基于新型趋近律的永磁同步电动机滑模变结构控制[J]. *中国电机工程学报*, 2008, 28(21): 102-106.
- [13] 王艳敏, 冯勇, 陆启良. 永磁同步电动机的无抖振滑模控制系统设计[J]. *电机与控制学报*, 2008, 12(5): 514-519.

(本文编辑:李栋颀)