

DOI: 10.7652/xjtxb201709016

有刷直流电机自适应滑模控制器设计与实验

顾万里^{1,2}, 胡云峰^{1,2,3}, 张森², 陈虹^{1,2}

(1. 吉林大学汽车仿真与控制国家重点实验室, 130025, 长春; 2. 吉林大学通信工程学院, 130025, 长春;
3. 吉林大学工程仿生教育部重点实验室, 130022, 长春)

摘要: 为了提高有刷直流电机低速控制的精确性, 设计了基于扰动补偿的有刷直流电机转速自适应滑模控制器。首先, 针对转速模型中摩擦力在转速快速变化过程中体现的快变特性和在线估计困难的特点, 采用 Stribeck 稳态摩擦力模型, 通过离线辨识模型参数的方式计算摩擦力; 其次, 针对负载扭矩等扰动的慢变特性, 设计了扰动观测器对其进行在线估计, 并证明了估计误差的有限时间收敛性及有界性; 最后, 设计了自适应滑模控制器对扰动进行补偿和误差反馈校正, 进而实现精确的转速跟踪控制, 并在 Lyapunov 稳定性框架下证明了闭环系统的稳定性。该控制器的开关增益仅与扰动观测器估计误差的上界相关, 避免了一般滑模控制方法采用高增益来提高控制精度的问题, 从而能够大大减小系统输入抖振现象, 有利于工程实现。所提方法的稳态误差分别为 PI、传统滑模控制器稳态误差的 46%、63%, 响应时间在 0.15 s 以内, 远小于 PI、传统滑模控制器的响应时间, 通过正弦参考信号跟踪实验, 验证了所提方法在瞬态工况下具有很好的控制效果。实验结果表明, 所设计的控制器能有效抑制摩擦力及负载扰动对电机控制带来的影响, 能显著改善电机控制的稳态和瞬态性能, 并且该方法能大大减小控制输入的抖振问题。

关键词: 有刷直流电机; 扰动观测器; 自适应滑模控制器; Lyapunov 稳定性

中图分类号: TP273 文献标志码: A 文章编号: 0253-987X(2017)09-0112-06

Design and Experiments on the Adaptive Sliding Mode Controller of Brushed DC Motor: Assessment

GU Wanli^{1,2}, HU Yunfeng^{1,2,3}, ZHANG Sen², CHEN Hong^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Automotive Simulation and Control, Jilin University, Changchun 130025, China;
2. Department of Control Science and Engineering, Jilin University, Changchun 130025, China;
3. Key Laboratory of Bionic Engineering Ministry of Education, Jilin University, Changchun 130022, China)

Abstract: To improve the control accuracy of brushed DC motor at low speeds, a novel control system using disturbance observer and sliding mode control is developed. It aims at compensating the nonlinear friction and load disturbances. First, since the friction changes fast with the variation of motor speed, it is very difficult to estimate it online. Therefore, the Stribeck friction model is used for computing the friction, and the parameters of this model are identified offline. Then, a disturbance observer is designed for estimating the model errors and load disturbances. It is proved that the estimated errors can converge to a prescribed range after a finite time. Finally, the estimated errors are taken as the amplitude bounded disturbance inputs, and an adaptive slide mode controller is designed to guarantee the robustness of this system. The switching gain estimated by the adaptive technique is just related to the upper bounds of the estimated errors,

收稿日期: 2017-04-06。 作者简介: 顾万里(1988—), 男, 博士生; 胡云峰(通信作者), 男, 讲师, 博士。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61520106008, 61374046)。

网络出版时间: 2017-06-28

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20170628.1709.010.html>

therefore, the demand of high-gain feedback for high accuracy is avoided since the switching gain is reduced with this method. The designed controller is evaluated through experimental tests. Compared with the PI and traditional slide-mode control methods, the steady-state output error of this controller is reduced to 46% and 63% of the two methods' errors, respectively; its response time is 0.15 s, and the input chattering is also reduced. It shows that the designed controller could effectively suppress the effects of the friction and load disturbances on the control over the brushed DC motor.

Keywords: brushed DC motor; disturbance observer; adaptive slide mode controller; Lyapunov stability

有刷直流电机具有力矩系数大、过载能力强、可靠性高等优点,在移动机器人等领域得到了广泛的应用^[1]。但是,电机系统中固有的非线性摩擦以及负载扭矩等扰动,给有刷直流电机低速的精确控制带来很大的困难^[2]。因此,如何抑制电机系统的扰动给转速控制带来的影响,已经成为一个研究热点。

目前,关于电机扰动补偿控制,常用的方法主要分成3类^[3-4]。第1类是自适应控制方法,该方法可有效处理电机模型中的参数不确定性,但是对建模误差及负载扭矩等扰动,无法进行有效补偿,文献[5]离线辨识了摩擦力模型中参数的初值,文献[6]采用自适应算法在线辨识了摩擦力模型中的未知参数。第2类方法是基于扰动观测器的补偿控制方法,该方法将模型不确定项、建模误差及负载扭矩等考虑成集中干扰,对其进行估计及动态补偿,文献[7-8]设计了基于模型预测控制的转速控制器,通过扰动观测器估计系统扰动,并据此产生转矩电流补偿量对控制量进行前馈修正,从而实现扰动的抑制,但该方法由于扰动观测器带宽受限,对于摩擦转矩等快变的扰动估计精度较差。第3类方法是滑模控制方法,文献[9]中介绍了滑模控制器的概念和设计过程,且将该方法用于电机扰动补偿控制器设计,文献[10]运用滑模控制思想,采用平滑鲁棒控制器捕获系统动态性能,对摩擦力矩进行补偿,但该方法缺点是其控制精度依赖于系统的反馈增益大小,而高增益反馈控制会引起控制输入的抖振现象,难以进行工程化实现。

本文结合滑模控制方法和基于扰动观测器补偿方法各自的优点,提出了基于扰动补偿的有刷直流电机自适应滑模转速跟踪控制方法。针对摩擦力模型在电机转速变化时体现的快变特性,通过离线辨识模型参数方法,利用Stribeck稳态模型计算摩擦力,将建模误差及负载扭矩等慢变扰动考虑成集中扰动,设计扰动估计器对其进行在线估计。在此基

础上,结合离线辨识及在线估计结果,设计了自适应滑模转速跟踪控制器。

1 模型介绍及控制系统设计

针对J60LYX系列稀土永磁直流力矩电机展开研究,电机简化数学模型为

$$\dot{i} = -\frac{R}{L}i - \frac{K_e}{L}\omega + \frac{u}{L} \quad (1)$$

$$\dot{\omega} = \frac{K_m}{J}i - \frac{1}{J}T_f + \frac{1}{J}T_d \quad (2)$$

式中: i 为电枢电流; L 为电枢电感; R 为电枢电阻; K_e 为电动势常数; ω 为角速度; u 为电机电枢电压; K_m 为转矩常数; J 为转动惯量; T_f 为摩擦力矩; T_d 为负载力矩。

由于电磁时间常数 T_1 远小于机电时间 T_m 常数,因此实际工程中采用双闭环控制策略对直流电机进行转速跟踪控制^[11]。本文在经典双闭环控制框架的基础上,主要针对转速环中存在的非线性摩擦及负载扭矩等扰动补偿控制问题展开研究,整体控制框图如图1所示,转速环控制器包含摩擦力计算模块、负载扭矩等扰动估计模块及自适应滑模控制器模块,电流环控制器由稳态前馈和PI反馈控制构成。

2 转速环控制器设计

转速环控制器设计的目标是控制电机输入电流,使电机转速跟踪上期望的转速。本文采用Stribeck稳态模型离线计算摩擦力,采用扰动观测器估计负载扭矩等扰动,设计了自适应滑模控制器对上述扰动进行补偿和误差反馈校正。

2.1 摩擦力参数离线辨识

摩擦力矩 T_f 由Stribeck稳态模型表示^[12],即

$$T_f(\omega) = [T_c + (T_s - T_c)^{-\frac{1}{2}} + K_v |\omega|] \operatorname{sgn}(\omega)$$

式中: T_c 为库仑摩擦力; T_s 为最大静摩擦力; ω_s 为

Stribeck 速率; K_v 为黏滞摩擦系数。

Stribeck 模型中参数可离线测得:①根据其启动电流计算最大静摩擦力 T_s ;②由于在高转速运行过程中,摩擦力主要由库仑摩擦力和黏滞摩擦力组成,在高转速稳态运行条件下,辨识了 T_e, K_v ;③在低转速运行情况下,由多组低转速稳态实验,通过 matlab 工具箱辨识了参数 ω_s 。

本文针对型号为 J60LYX 的有刷直流电机进行了 Stribeck 模型参数辨识实验,辨识参数 T_e 为 0.022 504, T_s 为 0.062 5, K_v 为 0.019 4, ω_s 为 0.332 7。定义由辨识得到的摩擦力 \bar{T}_f ,且将转速环中建模误差及负载扭矩等扰动考虑成集中扰动量 $d = \frac{1}{J}\bar{T}_f - \frac{1}{J}T_f + \frac{1}{J}T_e$,则转速环方程可改写为

$$\dot{\omega} = \frac{K_m}{J}i - \frac{1}{J}\bar{T}_f + d \quad (3)$$

2.2 扰动观测器设计

对于转速环中的扰动,设计扰动观测器对其进行在线估计。为了证明估计误差的收敛性,需要进一步对 d 的导数 \dot{d} 进行估计,本文参考文献[13]记如下形式扰动估计器

$$\hat{d} = p_0 + l_0\omega \quad (4)$$

$$\dot{p}_0 = -l_0\left(\frac{K_m}{J}i - \frac{1}{J}\bar{T}_f + \hat{d}\right) + \hat{\dot{d}} \quad (5)$$

$$\hat{\dot{d}} = p_1 + l_1\omega \quad (6)$$

$$\dot{p}_1 = -l_1\left(\frac{K_m}{J}i - \frac{1}{J}\bar{T}_f + \hat{d}\right) \quad (7)$$

式中: $\hat{d}, \hat{\dot{d}}$ 分别为 d, \dot{d} 的估计值; p_0, p_1 为辅助变量; $l_0, l_1 > 0$ 为常数。

定义估计误差 $d_e = [\tilde{d} \ \tilde{\dot{d}}]$, $d = d - \hat{d}$, $\tilde{d} = \dot{d} - \hat{\dot{d}}$ 。根据式(3)~(5),同时减去 \dot{d} ,得

$$\dot{\tilde{d}} = -l_0\tilde{d} + \tilde{\dot{d}} \quad (8)$$

根据式(3)、(6)、(7)可得

$$\dot{\tilde{d}} = -l_1\tilde{d} + \tilde{\dot{d}} \quad (9)$$

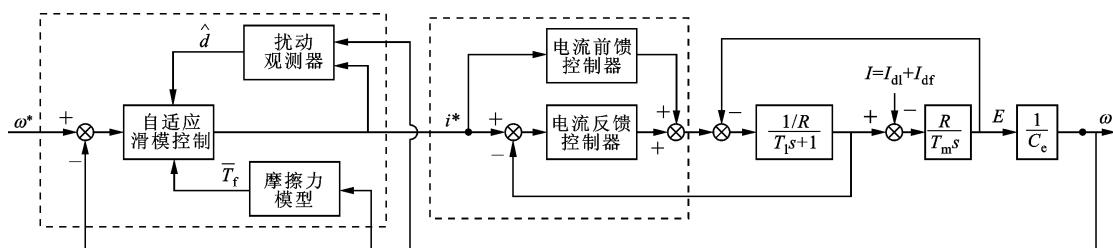


图 1 系统整体控制框图

对式(8)求导数并将式(9)代入,可得

$$\ddot{\tilde{d}} = -l_0\dot{\tilde{d}} - l_1\tilde{d} + \tilde{\ddot{d}}$$

扰动观测器的误差动力学可写为

$$\dot{\tilde{d}}_e = A\tilde{d} + B\ddot{\tilde{d}} \quad (10)$$

式中: $A = \begin{bmatrix} -l_0 & 1 \\ -l_1 & 0 \end{bmatrix}$ 为赫尔维兹矩阵; $B = (0 \ 1)$ 。

实际工程中干扰是连续的,且其导数变化率有界,定义导数上界为 μ 。

定理 1 对于式(10),在有限时间 T 后,估计误差能够收敛到有限界 σ 内,即

$$\|\tilde{d}_e\| \leq \sigma$$

证明 对于任意的正定矩阵 Q ,总存在正定矩阵 P ,使得 $A^T P + PA = -Q$,令 λ_m 为 Q 的最大特征根。定义李雅普诺夫函数

$$V_d(\tilde{d}_e) = \tilde{d}_e^T P \tilde{d}_e$$

求导可得

$$\begin{aligned} \dot{V}_d(\tilde{d}_e) &= \tilde{d}_e^T (A^T P + PA) \tilde{d}_e + 2\tilde{d}_e^T P B \ddot{\tilde{d}} \leq \\ &\quad \tilde{d}_e^T Q \tilde{d}_e + 2\|PB\| \|\tilde{d}_e\| \mu \leq \\ &\quad -\lambda_m \|\tilde{d}_e\|^2 + 2\|PB\| \|\tilde{d}_e\| \mu \leq \\ &\quad -\|\tilde{d}_e\| (\lambda_m \|\tilde{d}_e\| - 2\|PB\| \mu) \end{aligned}$$

因此,在有限长时间后估计误差将收敛到有限界内,即 $\|\tilde{d}_e\| \leq \sigma$,其中 $\sigma = \frac{2\|PB\|\mu}{\lambda_m}$ 。该定理保证了扰动估计器估计偏差的有界性。

2.3 自适应滑模转速控制器设计

针对以上扰动估计器的估计偏差,本文设计了自适应滑模控制器来保证闭环系统的稳定性。

定义滑模面函数

$$s = \omega_e + k_1 \int \omega_e dt$$

其中 $\omega_e = \omega^* - \omega$ 为转速跟踪误差。

定理 2 对于式(2),滑模控制器输入量

$$i = \frac{T_f - J\hat{d} + J\omega^* + k_1 J\omega_e + \hat{\Gamma} \text{sign}(s)}{K_m} \quad (11)$$

和更新率 $\hat{\Gamma} = \alpha |s|$,能够保证闭环系统的渐进稳定

性,其中 $\alpha > 0$ 用于调节更新的速率。

证明 假设存在常数 $\Gamma_d > J|\tilde{d}|$, 定义自适应偏差

$$\tilde{\Gamma} = \hat{\Gamma} - \Gamma_d$$

由于 Γ_d 为常数,则

$$\dot{\tilde{\Gamma}} = \dot{\hat{\Gamma}}$$

为了分析系统的稳定性,取李雅普诺夫函数

$$V = \frac{1}{2} Js^2 + \frac{1}{2} \frac{\tilde{\Gamma}^2}{\alpha}$$

对其求导,则有 $\dot{V} = Js\dot{s} + \frac{\tilde{\Gamma}\dot{\tilde{\Gamma}}}{\alpha} =$

$$s(J\dot{\omega}^* - J\dot{\omega} + Jk_1\omega_e) + \frac{(\hat{\Gamma} - \Gamma_d)\dot{\hat{\Gamma}}}{\alpha}$$

将式(2)、(11)代入可得

$$\dot{V} = -J\tilde{d}s - \Gamma_d |s| \leq (J|\tilde{d}| - \Gamma_d) |s| < 0$$

可知在有限时间内,系统误差能够收敛到 $s=0$,且 Γ 收敛到期望值,即系统是渐近稳定的。

自适应滑模转速控制器由前馈控制和反馈控制组成。前馈控制既包含摩擦力及负载扰动项,又包含转速参考变化项,该前馈控制器既能够提高系统的实时性,又能够实现小偏差调节。反馈控制采用自适应滑模控制来抑制扰动估计器的估计偏差。由于该滑模控制器的开关增益 Γ 仅和扰动估计器的估计偏差的上界 σ 有关,该方法能够大大减小输入抖动,有利于控制器的工程化实现。

3 电流环控制器设计

电流环控制器用于保证电机实际电流能够跟踪转速环给出的电流参考值。由于电磁时间常数远小于机电时间常数,在设计电流环控制器过程中忽略其动态响应时间。本文设计了基于稳态的前馈控制器和 PI 反馈控制器,总的控制律为

$$u = uf + ue = i^* R + k_e \omega - k_{i1} i_e - k_{i0} \int i_e$$

其中 $k_{i1}, k_{i0} > 0$ 。

本文将 PI 控制器采用模拟电路实现,通过减小控制周期来提高电流环控制性能。

4 对比实验与分析

为了验证有刷直流电机速度控制器的有效性,搭建了 MicroAutoBox 快速原型实验平台,并且与传统双闭环 PI 控制及滑模控制方法进行对比。本实验以北京勇光高特微电机有限公司的 J60LYX 系列稀土永磁直流力矩电机作为被控对象,高精度光电编码器作为转速反馈,LEM 闭环霍尔电流传感器

作为电流反馈。电流环 PI 控制器由 TI 高精度轨至轨运算放大器 THS4222D 搭建的模拟电路实现。所采用的电机参数电枢电阻为 1,转矩灵敏度为 0.125 N·m/A,反电动势系数为 0.016 V/(r·min)。

本文通过常值参考信号和阶跃参考信号跟踪控制实验对比了 PI 控制器、传统滑模控制器(SMC)和自适应滑模控制器(ASMC)的稳态、动态性能,并通过正弦参考信号跟踪控制实验验证了控制器的瞬态性能。对于 PI 控制器的参数整定问题,采用工程上常用的试凑法进行调节^[14],调节依据为转速控制响应时间、偏差标准差和超调量。假设积分系数 I 为 0,由小到大依次调节比例系数 P ,直至转速控制超调量、静差较小以及反应较快为止;再逐渐增大积分系数且适当调整比例系数,使系统在保持良好动态性能的情况下消除静差。本文进行了 30 组实验,从这 30 组实验数据中,综合响应时间、偏差标准差和超调量这几项指标,选取了一组最好的参数值,滑模控制器在调节过程中兼顾了稳态性能和控制输出电流波动大小。PI 控制器比例、积分增益分别为 0.75、0.62,传统自适应滑模控制器滑模增益为 0.08,自适应滑模控制器滑模增益为 0.01。下面通过不同实验,说明本文设计的自适应滑模控制器的有效性。

期望速度为 3 rad/s 的参考信号跟踪实验目的是验证闭环系统的稳态性能,图 2、3 分别为输入、输出对比图。3 种方法最大输出偏差分别为 0.41、0.30、0.19,自适应滑模控制方法的稳态误差分别为 PI 控制器和传统滑模控制器稳态误差的 46% 和 63%。由此可知,本文所提方法在稳态工况下能较好抑制扰动的影响,同时其控制输入电流抖动也大大减小。

期望速度为 5 rad/s 的阶跃参考信号跟踪实验目的是验证控制系统的动态性能,阶跃信号跟踪误差和阶跃信号控制输入对比曲线如图 4、5 所示,可知本文所提方法对于阶跃参考信号的响应时间在 0.15 s 以内,与另外两种方法相比,能大大提高系统的响应速度,同时系统的超调量并没有增大。

期望速度为 $(\sin(0.8t) + 4.5)$ rad/s 的正弦参考信号跟踪实验目的是验证闭环系统的瞬态性能。正弦信号跟踪效果、跟踪误差、控制输入对比曲线如图 6~8 所示,可知 3 种方法最大输出偏差分别为 0.43、0.33、0.19,自适应滑模控制方法的最大输出偏差分别为 PI 控制器和传统滑模控制器最大输出偏差的 45% 和 58%,本文所提方法在瞬态工况下具

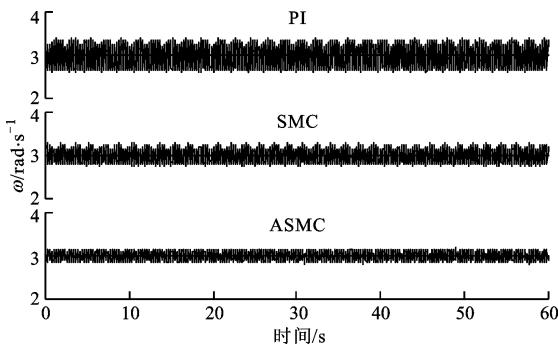


图 2 常值信号跟踪效果对比曲线

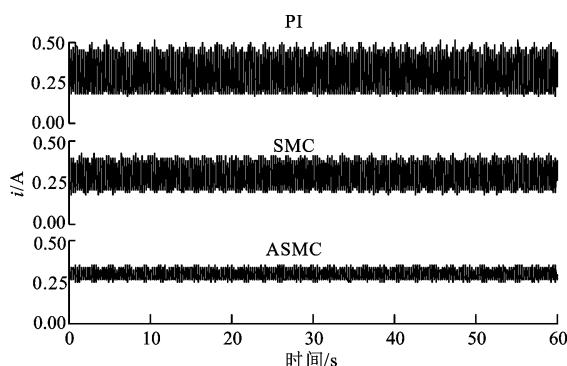


图 3 常值信号控制输入对比曲线

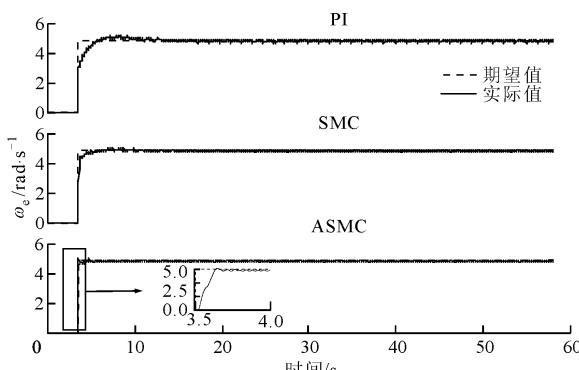


图 4 阶跃信号跟踪误差对比曲线

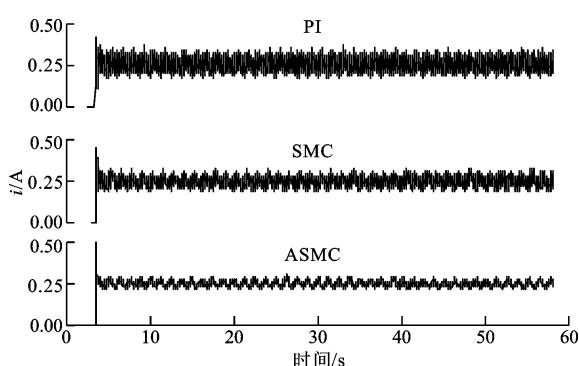


图 5 阶跃信号控制输入对比曲线

有较好的控制效果。

本文采用超限削弱积分法来消除积分饱和作用,即通过给积分量设置上限来消除饱和作用,所设

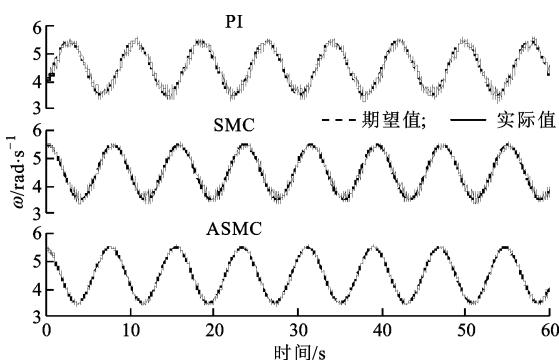


图 6 正弦信号跟踪效果对比曲线

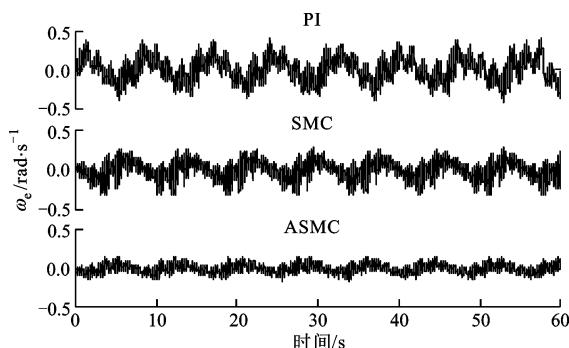


图 7 正弦信号跟踪误差对比曲线

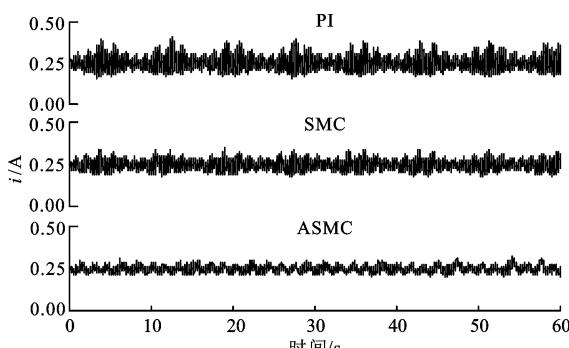


图 8 正弦信号控制输入对比曲线

计的控制器响应时间较快,在多组不同工况下的验证实验中均未发现积分饱和现象。因此,本文在实验起始时刻直接将误差积分初始值设置为饱和门限值,然后在跟踪阶跃信号过程中记录了误差积分和滑模面随时间变化的曲线,积分饱和现象退出曲线如图 9 所示,可知本文设计方法能较快退出饱和区。

5 结 论

本文在经典双闭环电机控制系统设计方案的基础上,针对转速环模型中存在的非线性摩擦力及负载扰动,提出了基于扰动观测器和自适应滑模控制的扰动补偿策略。该设计方法不需要知道扰动上界,且能够减小系统的输入抖振,从而大大提升了系

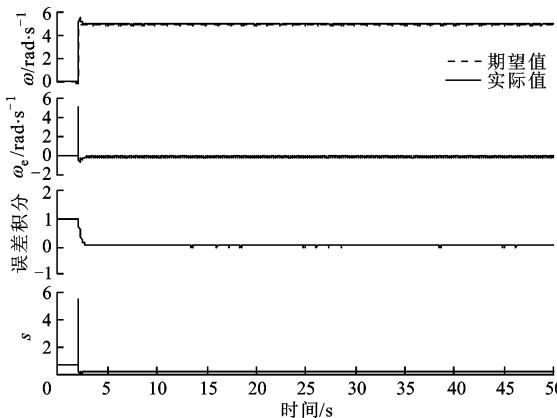


图9 积分饱和现象退出曲线

统的稳态和瞬态响应性能,该控制器具有设计过程清晰、工程意义明确、实现方便的优点。通过对比实验,验证了该控制系统的瞬态性能和稳态性能。在3 rad/s 稳态工况下,该方法的稳态误差分别为PI 和传统滑模控制器稳态误差的46% 和63%,响应时间在0.15 s 以内,远远小于PI 和传统滑模控制器的响应时间,控制输入电流抖动大大减小,且在瞬态工况下具有相似的性能。

参考文献:

- [1] 汪永阳,戴明,丁策,等.光电稳定平台中高阶扰动观测器的应用[J].光学精密工程,2015,23(2):459-466.
WANG Yongyang, DAI Ming, DING Ce, et al. Application of high order observer in EO stabilized platform [J]. Optics and Precision Engineering, 2015, 23(2): 459-466.
- [2] CHU H, GAO B, GU W, et al. Low speed control for permanent magnet dc torque motor using observer-based nonlinear triple-step controller [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 64(4): 3286-3296.
- [3] YANG Z J, HARA S, KANAE S, et al. An adaptive robust nonlinear motion controller combined with disturbance observer [J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2010, 18(2): 454-462.
- [4] YAO B, AL-MAJED M, TOMIZUKA M. High-performance robust motion control of machine tools: an adaptive robust control approach and comparative experiments [J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 1997, 2(2): 63-76.
- [5] DE WIT C C, LISCHINSKY P. Adaptive friction compensation with partially known dynamic friction model [J]. International Journal of Adaptive Control and Signal Processing, 1997, 11(1): 65-80.
- [6] 刘锐.基于反推自适应控制的永磁同步电机摩擦力矩补偿策略[D].天津:天津大学,2012:31-67.
- [7] 邓永停,李洪文,王建立,等.基于预测函数控制和扰动观测器的永磁同步电机速度控制[J].光学精密工程,2014,22(6):1598-1605.
DENG Yongting, LI Hongwen, WANG Jianli, et al. Speed control for PMSM based on predictive functional control and disturbance observer [J]. Editorial Office of Optics and Precision Engineering, 2014, 22 (6): 1598-1605.
- [8] 张小华,刘慧贤,丁世宏,等.基于扰动观测器和有限时间控制的永磁同步电机调速系统[J].控制与决策,2009,24(7):1028-1032.
ZHANG Xiaohua, LIU Huixian, DING Shihong, et al. PMSM speed-adjusting system based on disturbance observer and finite-time control [J]. Control and Decision, 2009, 24(7): 1028-1032.
- [9] UTKIN V I. Sliding mode control design principles and applications to electric drives [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 1993, 40(1): 23-36.
- [10] SONG G, WANG Y. A sliding-mode based smooth adaptive robust controller for friction compensation [C]// Proceedings of the American Control Conference. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 1995: 3531-3535.
- [11] 王帅,王建立,李洪文,等.光电跟踪系统力矩波动的自抗扰控制[J].光电工程,2012,39(4):7-13.
WANG Shuai, WANG Jianli, LI Hongwen, et al. Active disturbance rejection control of torque ripple on optoelectronic tracking system [J]. Opto-Electronic Engineering, 2012, 39(4): 7-13.
- [12] 翟园林,王建立,吴庆林,等.基于Stribeck模型的摩擦补偿控制设计[J].计算机测量与控制,2013,21(3):629-631.
Zhai Yuanlin, Wang Jianli, Wu Qinglin, et al. Friction compensation control system design based on stribbeck model [J]. Computer Measurement & Control, 2013, 21(3): 629-631.
- [13] GINOYA D, SHENDGE P D, PHADKE S B. Sliding mode control for mismatched uncertain systems using an extended disturbance observer [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2014, 61 (4): 1983-1992.
- [14] 乔敏娟.无人机飞行仿真转台控制系统研究[D].长春:长春理工大学,2014:30-36.

(编辑 赵炜)