基于 ADRC 的 MSCMG 框架系统高精度控制

薛立娟 李海涛 李 红 徐向波

(北京航空航天大学 仪器科学与光电工程学院, 北京 100191)

摘 要: 针对非线性摩擦和外部随机扰动影响磁悬浮控制力矩陀螺(MSCMG, Magnetically Suspended Control Moment Gyroscope)框架系统角速率精度的问题,提出了一种基于自抗扰控制器(ADRC, Active Disturbance Rejection Controller)的高精度转速控制方法. 通过三阶扩张状态观测器将框架系统负载力矩、非线性摩擦力矩及外部随机扰动力矩作为"总扰动"进行估计,并对该扰动力矩进行补偿. 仿真及实验结果表明:基于自抗扰控制器的框架系统控制方法使框架转速精度和稳定度提高了 50% 以上,且具有抗干扰能力强和动态特性好的特点.

关 键 词: 磁悬浮控制力矩陀螺; 随机扰动; 自抗扰控制器; 干扰补偿

中图分类号: TP 273

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2012)11-1497-05

High precision control based on ADRC used in gimbal system of MSCMG

Xue Lijuan Li Haitao Li Hong Xu Xiangbo

(School of Instrument Science and Opto-electronics Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: Aiming at solving the problems that speed precision would be influenced by nonlinear friction and external random disturbance existing in magnetically suspended control moment gyroscope(MSCMG), a high-precision speed control method was proposed based on active disturbance rejection controller(ADRC). The load torque, nonlinear friction torque and the external disturbance torque of the gimbal system were compensated after they were estimated as the "total disturbance" by a third-order extended state observer. Simulation and experimental results show that the control method based on ADRC can improve the velocity precision and stability of the gimbal system by more than 50%, and has the characteristics of strong anti-interference ability and good dynamic behavior.

Key words: magnetically suspended control moment gyroscope(MSCMG); random disturbance; active disturbance rejection controller(ADRC); disturbance compensation

控制力矩陀螺(CMG, Control Moment Gyroscope)是空间站、空间实验室等大型航天器实现姿态控制的关键执行机构,而 MSCMG(Magnetically Suspended Control Moment Gyroscope)采用磁轴承支撑高速转子,具有无摩擦、长寿命、高精度的特点,是 CMG 发展的一个重要方向. 框架系统是 MSCMG 的重要组成部分,其转速精度直接影响陀螺输出力矩的精度[1-2]. 框架系统采用机械轴承支撑,存在着非线性摩擦力矩和外部干扰力矩. 非线性摩擦力矩与框架的转速和角位置有关,文献[3]建立了 MSCMG 框架系统的摩擦模型,但不同对象的模型参数需要重新辨识. 外部扰动力矩具有随机性,无精确模型,为它的实时在线补偿带来一定的难度. PID(Proportional Integral Derivative)具有算法简单的优点,但该控制方法难以使框架系统在整个调速范围内达到满意的精度. 许多学者针对上述问题提出了一些新的控制方法改善系统性能. 文献[4]采用滑模控制算法增强系

收稿日期: 2011-06-30; **网络出版时间**: 2012-11-09 17:21

网络出版地址: www.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20121109.1721.014.html

作者简介: 薛立娟(1986-),女,北京人,硕士生,xue-lijuan@163.com.

统鲁棒性和抗干扰能力,但滑模控制的抖振问题难以解决. 文献[5]采用了重复控制抑制转矩脉动,对周期性扰动有较好的抑制作用. 文献[6]采用干扰观测器抑制干扰,其中的滤波器会引起相位滞后,影响控制效果. 由于 MSCMG 框架系统摩擦干扰力矩的特殊性与外部干扰的随机性,上述控制方法难以应用到本系统中. 自抗扰控制技术具有算法简单,抗扰能力强,适应系统参数变化范围广的特点[7-9]. 文献[10]运用自抗扰控制技术成功实现了电机转矩脉动的抑制,提高了控制系统的适应性和鲁棒性. 文献[11-12]提出了基于自抗扰控制器的位置伺服控制方案.

本文提出基于 ADRC 的框架系统控制方法,针对实验平台建立了仿真模型,仿真及实验结果验证了本文所提出控制方法的有效性.

1 MSCMG 框架系统动态模型分析

1.1 磁悬浮控制力矩陀螺系统

MSCMG 包括磁悬浮转子系统和框架系统两部分[13]. 框架系统主要由框架力矩电机、机械轴承、滑环和旋转变压器组成,如图 1 所示.

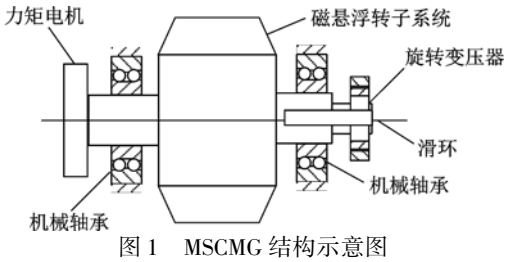


图 1 MSCMG 结构示意图

框架旋转强制改变磁悬浮高速转子的角动量方向而输出力矩,输出力矩公式为

$$M = H \times \omega \tag{1}$$

其中,H 为高速转子角动量;ω 为框架角速度. 从上式可以看出 ω 的精度直接影响 M 的精度,而机械轴承和滑环所带来的非线性摩擦是影响 MSCMG 框架系统转速精度的重要因素.

1.2 框架系统模型分析

框架力矩电机采用永磁同步电机(PMSM, Permanent Magnet Synchronous Motor)进行驱动,其模型在 d,q 轴坐标系下建立. PMSM 采用矢量控制的 $i_d=0$ 方式,其磁链方程为

$$\left.\begin{aligned}\psi_d &= L_d i_d + \psi_f\\ \psi_q &= L_q i_q\end{aligned}\right\} \tag{2}$$

其中,L_d,L_q 为 d,q 轴等效电感;ψ_f 为电机转子磁链;i_d,i_q 为电流.

电磁转矩方程为

$$T_e = 1.5 n_p(\psi_d i_q - \psi_q i_d) \tag{3}$$

将方程(2)代入到方程(3)中得

$$T_e = 1.5 n_p[\psi_f i_q + (L_d - L_q) i_d i_q] \tag{4}$$

PMSM 转子的机械运动方程为

$$J\frac{d\omega}{dt} = T_e - T_{ml} - b_m\omega \tag{5}$$

其中,J 为转动惯量;T_{ml} 为作用在负载上的总力矩;b_m 为粘滞摩擦系数;n_p 为极对数. 对于面装式 PMSM,$L_d=L_q$,则式(4)变为

$$T_e = 1.5 n_p \psi_f i_q \tag{6}$$

由上述方程可得 PMSM 以电流 i_q 为控制量,以角位置 θ 为输出的状态方程为

$$\left.\begin{aligned}\dot{\theta} &= \omega\\ \dot{\omega} &= -\frac{b_m}{J}\omega + \frac{1.5 n_p \psi_f}{J} i_q - \frac{1}{J} T_{ml}\end{aligned}\right\} \tag{7}$$

通过上述方程的推导可以得出 PMSM 简化模型,如图 2.

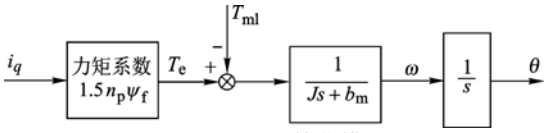


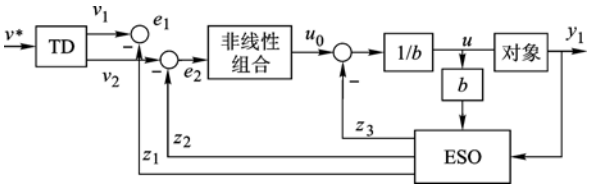
图 2 PMSM 简化模型

将作用在框架轴上的非线性摩擦力矩与外部随机干扰力矩作为负载扰动力矩,通过扩张状态观测器将它与负载力矩作为作用在负载上的总力矩 T_{ml} 进行估计并补偿.

2 框架控制系统的 ADRC 设计

ADRC 是一种不依赖系统模型的新型控制技术,能实时估计并补偿系统各种外扰及系统机理本身决定的内扰.

自抗扰控制器主要包括:跟踪微分器(TD, Tracking Differentiator),扩张状态观测器(ESO, Extended State Observer)和非线性反馈控制率(NLSEF, Nonlinear State Error Feedback control law)[14]. 图 3 为经典二阶自抗扰结构图.



v^*—TD 给定信号;v_1,v_2—跟踪参考信号 v^* 以及参考信号 v^* 的近似微分信号;z_1,z_2,z_3—ESO 的输出;$e_1=v_1-z_1$;$e_2=v_2-z_2$;u_0—误差的组合;u—产生的控制量;b—控制量系数;y_1—系统实际输出.

图 3 经典二阶自抗扰结构图

二阶对象的状态方程

$$\left.\begin{aligned}\dot{x}_1 &= x_2\\ \dot{x}_2 &= f(x(t),t) + w(t) + bu(t)\end{aligned}\right\} \tag{8}$$

其中,x_1,x_2 为系统状态;$f(x(t),t)$ 为与状态有关的函数;$w(t)$ 为外部扰动. 若 $f(x(t),t)$ 未知,将其作为内部扰动,与外部扰动 $w(t)$ 作为综合扰动进行估计与补偿.

对应 PMSM 的数学模型与二阶对象状态方程,将 i_q 作为控制量 u,将输出角位置 θ 作为状态量 x_1,角速度 ω 作为状态量 x_2,b 为 $1.5n_p\psi_f/J$,粘滞摩擦系数为 $b_m=0.001$,负载总力矩与转动惯量比 T_{ml}/J 为扰动项 $w(t)$,$-b_m\omega/J$ 作为已知模型部分 $f(x(t),t)$.

2.1　框架控制系统 TD 设计

自抗扰控制器可以利用 TD 来安排过渡过程并提取其微分信号,二阶 TD 的一般离散形式为

$$\left.\begin{aligned}v_1(k+1) &= v_1(k) + hv_2(k)\\ v_2(k+1) &= v_2(k) + hu_1\end{aligned}\right\} \tag{9}$$

其中,v_1,v_2 分别为跟踪参考信号 v^* 以及参考信号 v^* 的近似微分信号;h 为积分步长. u_1 采用离散最速控制综合函数 fhan(v_1-v^*,v_2,r,h_1),其算法公式如下:

$$\left.\begin{aligned}\text{fhan} &= -\begin{cases} r\,\text{sign}(a) & |a| > d\\ r\dfrac{a}{d} & |a| \leqslant d\end{cases}\\ d &= rh_1\\ d_0 &= h_1 d\\ y &= v_1 - v^* + h_1 v_2\\ a_0 &= \sqrt{d^2 + 8r|y|}\\ a &= \begin{cases} v_2 + \dfrac{a_0 - d}{2}\text{sign}(y) & |y| > d_0\\ v_2 + \dfrac{y}{h_1} & |y| \leqslant d_0\end{cases}\end{aligned}\right\} \tag{10}$$

其中,r 为速度因子;h_1 为滤波因子. r 越大过渡时间越短,根据系统的承受能力选择 r. h_1 越大滤波效果越好,但是 h_1 越大就会引起 v_1 跟踪原给定信号的滞后越大[15].

2.2　框架控制系统 ESO 设计

根据上述 PMSM 的二阶数学模型,框架系统采用三阶 ESO,其实现方程为

$$\left.\begin{aligned}e &= z_1 - y_1\\ z_1 &= z_1 + h(z_2 - \beta_0 e)\\ z_2 &= z_2 + h[f_0(z_1,z_2) + z_3 - \beta_1 e + bu]\\ z_3 &= z_3 + h(-\beta_2 e)\end{aligned}\right\} \tag{11}$$

式中,z_1 为对系统输出角位置信号 θ 的估计;z_2 为对 θ 微分信号 ω 的估计;z_3 为对扰动信号的实时估计;$f_0(x_1,x_2)$ 为作用系统的加速度中已建模型部分,ESO 中放入 $f_0(z_1,z_2)$,本系统已知部分的模型为 $-b_m\omega/J$,所以 $f_0(z_1,z_2)$ 只与估计 ω 的 z_2,b_m 和 J 有关,输出信号 θ 和 $f_0(z_1,z_2)$ 与 bu 之和作 ESO 的输入;β_0,β_1,β_2 为可调参数.

2.3　框架控制系统误差反馈控制律设计

自抗扰控制器可以将原系统补偿成线性积分器串联型系统,将系统化成线性积分器串联型系统后可以用误差反馈的方法使系统具有期望的闭环特性.

本文采用线性误差反馈,其形式为

$$u_0 = k_1 e_1 + k_2 e_2 \tag{12}$$

式中,k_1,k_2 为可调参数;$e_1=v_1-z_1$;$e_2=v_2-z_2$. TD 参考信号 v^* 为角位置给定信号 θ^*,v_1 为 TD 输出跟随角位置信号 θ_1,v_2 为 θ_1 的微分信号 ω_1. 当 r 足够大时,θ_1 充分逼近 θ^*,ω_1 当作 θ^* 的近似微分信号. z_1 和 z_2 为扩张状态观测器估计的角位置信号和角速度信号. 将非线性系统化为线性积分器串联型系统的控制量取为

$$u = \frac{u_0 - z_3 - f_0(z_1,z_2)}{b} \tag{13}$$

通过上述自抗扰控制器 3 部分分析与设计可以得出基于 ADRC 的 MSCMG 框架系统设计框图,如图 4 所示.

图 4 中,控制量 u 即为电流给定值 i_q^*. 本文采用线性 ESO 和误差反馈线性组合方式, d,q 轴电流采用比例控制.

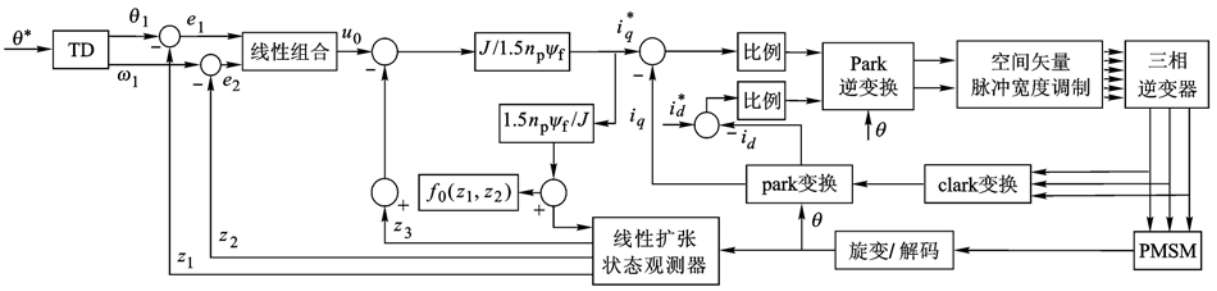


图 4　基于 ADRC 的框架系统

3 仿真与实验

3.1 基于 ADRC 的 MSCMG 框架系统仿真

本文采用 MATLAB 对基于 ADRC 的 MSCMG 框架控制系统进行仿真. 系统参数见表 1,自抗扰控制器的参数见表 2.

表 1 系统仿真参数

参数	数值
n_p	8
$J/(\mathrm{kg}\cdot\mathrm{m}^2)$	0.292 0
b_m	0.001 0
ψ_f/Wb	0.121 7
力矩电机力矩系数/$(\mathrm{Nm}\cdot\mathrm{A}^{-1})$	1.460 5

表 2 自抗扰控制器参数

参数	数值	参数	数值
h_1	0.001	β_2	312 500
r	3 000	k_1	1 600
β_0	1 000	k_2	288
β_1	33 333		

系统的干扰力矩主要有:①非线性摩擦干扰力矩;②外部随机干扰力矩.

根据文献[3]的摩擦模型,本文 1(°)/s 时给定摩擦干扰力矩为

$$T_l = 0.001(\sqrt{209.44\sin(0.0056\pi t) + 273.7} + \sqrt{-209.44\sin(0.0056\pi t) + 273.7}) \quad (\mathrm{N}\cdot\mathrm{m}) \tag{14}$$

在 1 s 时,突加 0.1 N·m 的外部随机干扰力矩.

图 5 和图 6 分别为采用 ADRC 的框架控制系统给定转速为 1(°)/s 的速度波形和给定与估计的干扰力矩波形.

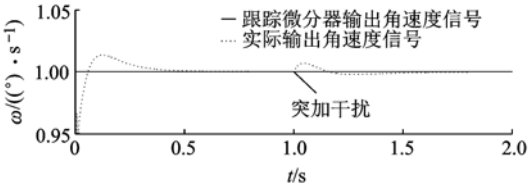


图 5 1(°)/s 时速度波形

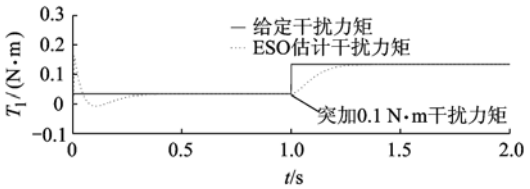


图 6 给定与 ESO 估计干扰力矩波形

当 ω 为 10(°)/s 时,仿真所加摩擦干扰力矩为

$$T_l = 0.001(\sqrt{2094.4\sin(0.056\pi t) + 5098.8} + \sqrt{-2094.4\sin(0.056\pi t) + 5098.8}) \quad (\mathrm{N}\cdot\mathrm{m}) \tag{15}$$

同样在 1 s 时,突加 0.1 N·m 的外部随机干扰力矩,ω 和 T_l 波形如图 7 和图 8.

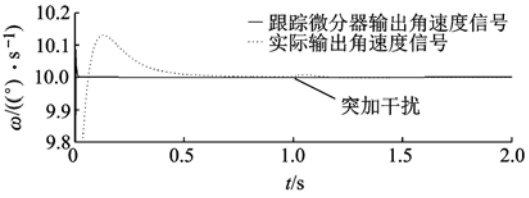


图 7 10(°)/s 时速度波形

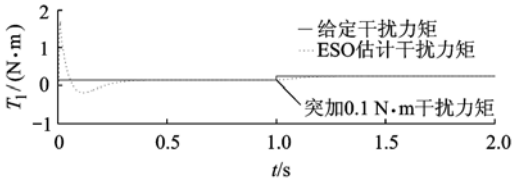


图 8 给定与 ESO 估计干扰力矩波形

由图 5 ~ 图 8 可以看到,1(°)/s 时和 10(°)/s 的角速度稳态输出与 TD 给定的角速度几乎重合,虽然 1(°)/s 和 10(°)/s 的摩擦干扰力矩变化频率与幅值均不相同,基于自抗扰控制器的框架系统得到了很好的控制,获得转速的高精度控制. 在 1 s 时突加 0.1 Nm 的干扰对系统影响很小.

3.2 实验验证

本实验系统基于北京航空航天大学惯性技术重点实验室的 MSCMG 控制平台(图 9).

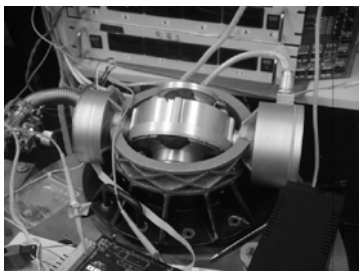


图 9 MSCMG 实验系统

实验中通过旋转变压器测量角位置信号,利用粗精组合的方式提高位置信号的测量精度. 采用基于 TMS320C31 和 EPF10K30 的数字控制系统. 本实验系统以基于 ADRC 的控制方案与之前采用 PID 控制方案做实验对比,图 10 和图 11 分别为采用 PID 控制器和 ADRC 方式时,给定 1(°)/s的转速波形.

图 12 和图 13 分别为采用 PID 控制器和 ADRC 方式时,给定 10(°)/s 的转速波形.

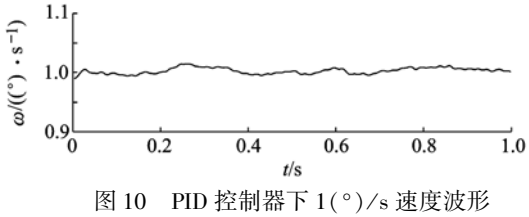


图 10 PID 控制器下 1(°)/s 速度波形

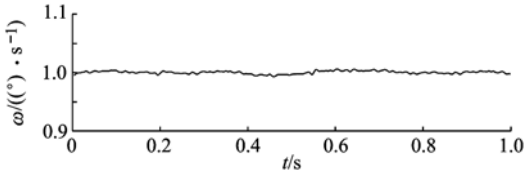


图 11　ADRC 方式下 1(°)/s 速度波形

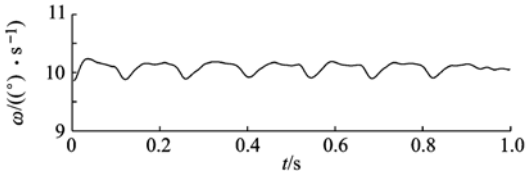


图 12　PID 控制器下 10(°)/s 速度波形

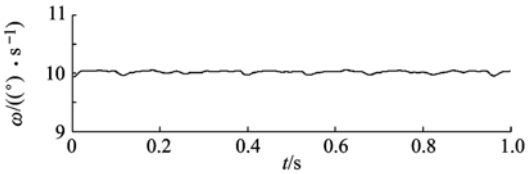


图 13　ADRC 方式下 10(°)/s 速度波形

由图 10 ~ 图 13 可以看出采用 ADRC 的框架系统角速度精度与稳定度比 PID 控制方式下高,精度与稳定度提高了 50% 以上.

4　结　论

本文针对 MSCMG 框架系统高精度转速的要求,设计了基于自抗扰控制器的框架系统控制方法,该方法不需知道干扰和系统的精确模型. 仿真及实验结果表明:基于自抗扰控制器的框架系统转速受干扰力矩影响小,转速精度和稳定度提高了 50% 以上,并且具有较好的动态特性,对大型航天器的姿态控制具有重要意义.

参考文献(References)

[1] Yu L H, Fang J C, Wu C. Magnetically suspended control moment gyro gimbal servo-system using adaptive inverse control during disturbances [J]. IEE Electronics Letters, 2005, 41(17):21-22

[2] 李海涛,房建成. 自适应角速度估计器在磁悬浮控制力矩陀螺框架伺服系统中的应用[J]. 光学精密工程,2008,1(16):97-102
Li Haitao, Fang Jiancheng. Application of adaptive angle-rate estimator to gimbal of MSCMG[J]. Optics and Precision Engineering,2008,1(16):97-102 (in Chinese)

[3] 王鹏,房建成. MSCMG 框架伺服系统非线性摩擦力矩建模与实验研究[J]. 宇航学报,2007,28(3):613-618
Wang Peng, Fang Jiancheng. Nonlinear dynamic modeling and experimental study of friction moment for gimbal servo system used in magnetically suspended control moment gyroscope[J]. Journal of Astronautics,2007,28(3):613-618 (in Chinese)

[4] Lai C K, Shyu K K. A novel motor drive design for incremental motion system via sliding-mode control method[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics,2005,52(2):499-507

[5] Mattavelli P, Tubiana L, Zigliotto M. Torque-ripple reduction in PM synchronous motor drives using repetitive current control [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2005, 20(6): 1423-1431

[6] 刘强,尔联洁. 飞行仿真转台基于干扰观测器的鲁棒跟踪控制[J]. 北京航空航天大学学报,2003,29(2):181-184
Liu Qiang, Er Lianjie. Disturbance observer based robust tracking control of high precision flight simulator[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2003, 29(2): 181-184(in Chinese)

[7] Han Jingqing. From PID technique to active disturbances rejection control technique[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics,2009,56(3):900-906

[8] Feng G, Liu Y F, Huang L P. A new robust algorithm to improve the dynamic performance on the speed control of induction motor drive[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2004, 19(6):1614-1627

[9] Wu D, Chen K. Design and analysis of precision active disturbance rejection control for noncircular turning process[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics,2009,56(7):2746-2753

[10] 夏长亮,俞卫,李志强. 永磁无刷直流电机转矩波动的自抗扰控制[J]. 中国电机工程学报,2006,26(24):137-142
Xia Changliang, Yu Wei, Li Zhiqiang. Torque ripple reduction of PM brushless DC motors based on auto-disturbances-rejection controller[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(24): 137-142 (in Chinese)

[11] 孙凯,许镇琳,盖廓,等. 基于自抗扰控制器的永磁同步电机位置伺服系统[J]. 中国电机工程学报,2007,27(15):43-46
Sun Kai, Xu Zhenlin, Gai Kuo, et al. A novel position controller of PMSM servo system based on active-disturbance rejection controller[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(15): 43-46 (in Chinese)

[12] Su Y X, Zheng C H, Duan B Y. Automatic disturbances rejection controller for precise motion control of permanent-magnet synchronous motors[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics,2005,52(3):814-823

[13] 徐向波,房建成. 基于角加速度的陀螺框架伺服系统干扰观测器[J]. 北京航空航天大学学报,2009,35(6):669-672
Xu Xiangbo, Fang Jiancheng. Disturbance observer based on angular acceleration for gyro gimbal servo system[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2009, 35(6):669-672(in Chinese)

[14] 黄一,张文革. 自抗扰控制器的发展[J]. 控制理论与应用,2002,19(4):485-492
Huang Yi, Zhang Wenge. Development of active disturbance rejection controller[J]. Control Theory and Applications, 2002, 19(4):485-492(in Chinese)

[15] 武利强,林浩,韩京清. 跟踪微分器滤波性能研究[J]. 系统仿真学报,2004,16(4):651-653
Wu Liqiang, Lin Hao, Han Jingqing. Study of tracking differentiator on filtering[J]. Journal of System Simulation, 2004, 16(4):651-653(in Chinese)

(编　辑:刘登敏)