电液飞行转台的分数阶积分滑模非线性控制

韩松杉 焦宗夏* 汪成文 尚耀星 石 岩

(北京航空航天大学 飞行器控制一体化技术重点实验室, 北京 100191)

摘 要: 电液飞行转台是飞控系统半实物仿真测试的关键设备,它是在实验室条件下复现飞行器运动姿态的高精尖试验设备,具有重大经济价值和国防战略意义.为提高该设备的动态跟踪精度,提出一种基于分数阶积分滑模的非线性鲁棒控制策略.在积分滑模控制器中引入分数阶算子,能更有效地提升系统瞬态响应,并能提供更多的控制自由度.同时基于Lyapunov分析方法证明了该控制器在存在参数不确定、强外干扰力矩和未知非线性摩擦特性等情况下仍能保证系统的全局渐近稳定性.以某型电液飞行转台外框阀控马达为例,针对多种运动工况进行仿真分析,结果表明该方法能有效提高系统的瞬态性能和鲁棒能力.

关 键 词: 液压伺服机构; 飞行转台; 分数阶; 滑模控制; 非线性控制系统

中图分类号: TP 273

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2014)10-1411-06

Fractional integral sliding mode nonlinear controller of electrical-hydraulic flight simulator

Han Songshan Jiao Zongxia* Wang Chengwen Shang Yaoxing Shi Yan

(Science and Technology on Aircraft Control Laboratory, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: Electrical-hydraulic flight motion simulator is the key equipment in hardware-in-the-loop testing of flight control systems. It can accurately reproduce, in real-time, the flight motion of aerial vehicles under laboratory conditions, which has great economic value and plays a very important role in the national defense. Based on fractional integral sliding mode surface, a nonlinear robust controller was proposed to improve its dynamic tracking accuracy. This nonlinear robust control approach introduces fractional order calculus in integral sliding mode controller, which can further improve transient performance and offer more degrees of freedom. In presence of strong disturbance torque, parametric uncertainty and nonlinear friction, the globally asymptotic stability of developed nonlinear robust controller was proved via Lyapunov analysis method. Under various working conditions, comparative simulation results of outer-axis's motor in a type of flight simulator demonstrate the effectiveness of the proposed nonlinear robust algorithm, which can guarantee transient performance and effectively improve the robustness.

Key words: hydraulic servomechanisms; flight simulators; fractional order; sliding mode control; nonlinear control systems

电液飞行仿真转台是检测和评价导航和制导系统性能的高精尖试验设备,在飞行器和导弹研制过程中具有重大经济价值和国防战略意义[1].以阀控马达为核心部件的电液飞行仿真转台具有功率密度高、电磁干扰小、散热润滑简单、负载安装方便等优点,是地面半实物仿真的理想平台[2].但该伺服系统作为典型的非线性系统,存在参数不确定性、时变性和外界干扰,同时还受到如油液黏度、温

收稿日期: 2013-11-28; **网络出版时间**: 2014-05-20 15:44; **DOI**: 10.13700/j.bh.1001-5965.2013.0689

网络出版地址: www.cnki.net/kcms/doi/10.13700/j.bh.1001-5965.2013.0689.html

基金项目: 国家973计划资助项目(2014CB046406)

作者简介: 韩松杉(1985-),男,河南温县人,博士生,hansongshan@gmail.com; * **通讯作者**: zxjiao@buaa.edu.cn.

度、现场工况等多种/软参量因素的影响[3]. 故传统的 PID 控制方法对上述的非线性及参数扰动并没有很好的抑制作用. 因此,设计具有良好的控制效果及鲁棒性强的控制器受到学者的普遍关注.

滑模控制器本质上是一类特殊的非线性控制方法,其主要优点在于滑动模态可以进行设计且与对象参数及扰动无关,这就使得滑模控制具有快速响应、对参数变化及扰动不灵敏、无需系统在线辨识、物理实现简单等优点[4],故滑模控制器在具有较强的非线性特性的电液伺服控制中得到学者的关注[5-6]. 而滑模控制在本质上的不连续开关特性将会引起系统的高频抖振. 最常用的处理办法是采用饱和函数 sat(·)代替切换函数 sgn(·). 该方法能有效地避免或消除抖振,但不能保证系统的稳态跟踪误差收敛到零. 同时普通的滑模控制在跟踪任意轨迹时,若存在一定的外部干扰,则可能会带来稳态误差,不能达到要求的性能指标[4]. 为解决这一问题,文献[7]提出了一种积分滑模控制方案,并在伺服电机、机械臂等系统上得到应用. 但该积分控制器在消除稳态误差的同时降低了系统瞬态性能[8].

上述文献中电液伺服系统的滑模控制器设计均是基于整数阶运算(integer calculus)的,即:微分运算和积分运算都是整数阶次的. 分数阶微积分运算(fractional calculus)是整数阶微积分运算的拓展[9-10]. 分数阶理论已经应用到很多科学与工程领域,例如物理[11]、分子生物学[12]、信号与图像处理[13]等. 而在自动化控制领域,分数阶控制器的设计思想最早是由 Oustaloup 在 1996 年提出的[14]. Podlubny 提出了 $PI^{\lambda}D^{\mu}$ 分数阶控制器,其除了有传统 PID 控制器的 K_p,K_i 和 K_d 3 个参数,还有积分阶次 λ 和微分阶次 μ 两个可调参数,多了 2 个自由度,能更灵活精确地控制受控对象[9]. 最近分数阶运算在滑模控制理论中的应用得到部分学者的关注[15-20]. 故在上述文献的基础上,本文提出利用分数阶运算提高积分滑模控制器系统的瞬态响应.

另一方面,滑模控制器要求不确定性满足匹配条件,而液压伺服系统的不确定性往往是非匹配的,且阶数较高,基于反演设计(backstepping)的控制方法其各虚拟控制量之间的相互耦合,会造成其控制算法过于复杂,难以在实际系统中实现[21-24].

故本文以电液飞行转台的位控伺服系统为例,基于阀控马达流量连续性方程,提出了一种非线性分数阶积分滑模控制器,将分数阶理论与积分滑模变结构方法有机结合,并利用 Lyapunov 分析方法,证明了系统的渐近稳定性. 结果表明,相对于积分滑模控制器,该方法能有效地提高系统的跟踪性能.

1 电液转台阀控马达建模

电液转台的阀控马达系统如图 1 所示,图中液压马达的输出角度通过电液伺服阀控制,而伺服阀节流口的开度取决于阀的输入电流值. 控制的最终目标是使得马达的输出角度尽可能精确地跟随指定角度的变化.

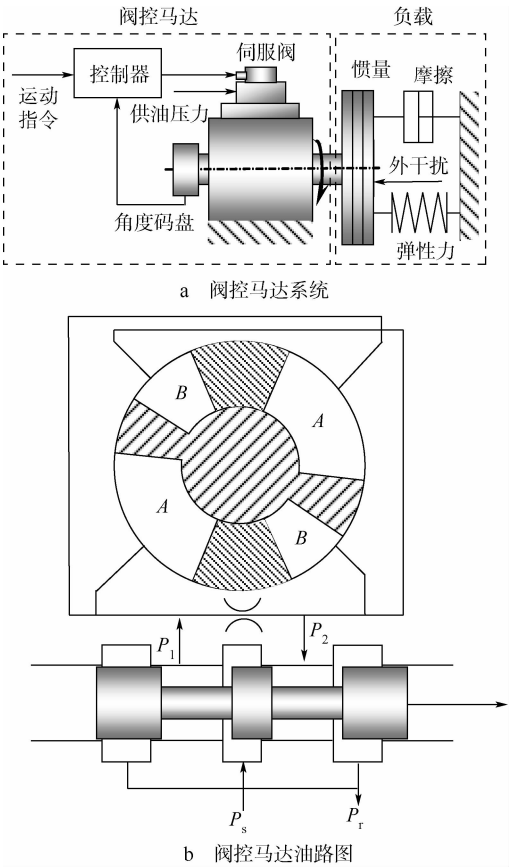


图 1 阀控马达系统简图

Fig. 1 Schematic diagram of valve-controlled motor system

阀控马达流量连续性方程[25]为

$$Q_L = D_L\dot{x}_1 + \frac{V_t}{4\beta_e}\dot{P}_L + C_tP_L + \Delta \tag{1}$$

式中,Q_L 为伺服阀输出流量,m^3/s;D_L 为液压马达的排量,m^3/rad;P_L 为马达两腔压差,N/m^2;$\dot{x}_1$ 为马达输出角速度,rad/s;V_t 为控制容腔,m^3;β_e 为有效弹性模量,N/m^2;C_t 为马达内泄漏,$m^5/(N\cdot s)$;Δ 表示模型不确定部分. 式(1)可写为

$$\dot{x}_1 = \alpha Q_L - \theta_1\dot{P}_L - \theta_2P_L - \alpha\Delta \tag{2}$$

式中,$\alpha = 1/D_L$;$\theta_1 = V_t/(4\beta_eD_L)$;$\theta_2 = C_t/D_L$.

假设伺服阀为理想的零开口阀,阀前压力稳定,回油压力为零,则基于阀芯位移的伺服阀流量:

$$Q_L = C_d \omega x_v \sqrt{P_s - \mathrm{sgn}(x_v) P_L/\rho} \tag{3}$$

式中,C_d 为伺服阀流量系数;ω 为伺服阀的梯度,m;x_v 为阀芯位移,m;ρ 为液压油密度,kg/m^3;P_s 为油源供油压力,N/m^2;sgn 为非线性符号函数:

$$\mathrm{sgn}(\cdot) = \begin{cases} 1 & \cdot > 0 \\ 0 & \cdot = 0 \\ -1 & \cdot < 0 \end{cases} \tag{4}$$

忽略伺服阀的动态特性,认为伺服阀阀芯输出位移与输入电压信号成比例关系,即

$$x_v = k_{x_v} u \tag{5}$$

式中,k_{x_v} 为阀芯放大增益,m/V;u 为控制电压,V.

将式(5)代入式(3),可得

$$Q_L = C_d \omega k_{x_v} u \sqrt{P_s - \mathrm{sgn}(u) P_L/\rho} = Ru \tag{6}$$

式中

$$R = K_q \sqrt{P_s - \mathrm{sgn}(u) P_L}$$

$$K_q = C_d \omega k_{x_v} \sqrt{1/\rho}$$

给定角度指令 $\dot{x}_{1d}$,控制目标是得到一个控制输出 u 在非线性系统存在外干扰力矩、参数不确定等不确定情况时使得输出角度 x 尽可能地跟随 x_d.

定义

$$\left.\begin{aligned} \theta_1 &= \hat{\theta}_1 + \tilde{\theta}_1 \\ \theta_2 &= \hat{\theta}_2 + \tilde{\theta}_2 \end{aligned}\right\} \tag{7}$$

式中,$\hat{\theta}_1$ 和 $\hat{\theta}_2$ 分别是 θ_1 和 θ_2 参数估计值;$\tilde{\theta}_1$ 和 $\tilde{\theta}_2$ 代表参数变化值.

在控制器设计之前,给出以下假设.

假设 1　参数不确定性有界,并满足:

$$\boldsymbol{\theta} \in \Omega_\theta \triangleq \{\boldsymbol{\theta}: \boldsymbol{\theta}_{\min} \leqslant \boldsymbol{\theta}, \hat{\boldsymbol{\theta}}, \tilde{\boldsymbol{\theta}} \leqslant \boldsymbol{\theta}_{\max}\} \tag{8}$$

式中,$\boldsymbol{\theta} = [\theta_1, \theta_2]^T$;$\hat{\boldsymbol{\theta}} = [\hat{\theta}_1, \hat{\theta}_2]^T$;$\tilde{\boldsymbol{\theta}} = [\tilde{\theta}_1, \tilde{\theta}_2]^T$;$\boldsymbol{\theta}_{\min} = [\theta_{1\min}, \theta_{2\min}]^T$ 与 $\boldsymbol{\theta}_{\max} = [\theta_{1\max}, \theta_{2\max}]^T$ 为 $\boldsymbol{\theta}$ 的下界与上界,并定义 $\boldsymbol{\theta}_B$ 为参数的边界,$\boldsymbol{\theta}_B = \boldsymbol{\theta}_{\max} - \boldsymbol{\theta}_{\min}$.

假设 2　不确定项 Δ 有界,即

$$|\alpha\Delta| \leqslant D \tag{9}$$

2　分数阶积分滑模非线性控制器

2.1　分数阶微积分

分数阶微积分是经典整数阶微积分的自然扩展,是允许微积分阶次是任意阶的.统一的微积分算子包括分数阶和整数阶,即

$${}_aD_t^\alpha \cong D^\alpha = \begin{cases} \dfrac{\mathrm{d}^\alpha}{\mathrm{d}t^\alpha} & \mathrm{Re}(\alpha) > 0 \\ 1 & \mathrm{Re}(\alpha) = 0 \\ \displaystyle\int_a^t (\mathrm{d}\tau)^{-\alpha} & \mathrm{Re}(\alpha) < 0 \end{cases} \tag{10}$$

式中,t 和 a 是微分或积分的上下界;参数 α 是分数阶算子的阶数.常用的 Riemann-Liouville 分数阶微积分的定义为[9-10]

$$D^\alpha f(t) = \frac{\mathrm{d}^\alpha}{\mathrm{d}t^\alpha} f(t) = \frac{1}{\Gamma(m-\alpha)} \frac{\mathrm{d}^m}{\mathrm{d}t^m} \int_{t_0}^t \frac{f(\tau)}{(t-\tau)^{\alpha-m+a}} \mathrm{d}\tau \tag{11}$$

其中,$m-1 < \alpha < m$;$\Gamma(\cdot)$ 为 Gamma 函数.

从定义可见,连续函数在某点上的分数阶微分与整数阶微分不同,它不是在该点处求极限,而是与初始时刻到该点以前的所有时刻的函数值有关,因此它具有记忆性.

2.2　控制器设计

定义角度跟踪误差为

$$e_1 = x_1 - x_{1d} \tag{12}$$

式(12)的微分为

$$\dot{e}_1 = \dot{x}_1 - \dot{x}_{1d} \tag{13}$$

将式(2)代入式(13),可得

$$\dot{e}_1 = \alpha R u - \theta_1 \dot{P}_L - \theta_2 P_L - \dot{x}_{1d} - \alpha\Delta \tag{14}$$

定义分数阶积分滑模面为

$$s = k_1 D^{-\alpha} e_1 + e_1 \tag{15}$$

式中 α 为分数阶算子的阶次,$0 \leqslant \alpha \leqslant 1$.

定义 Lyapunov 函数:

$$V_1 = \frac{1}{2} s^2 \tag{16}$$

对式(16)求导,并代入式(11)可得

$$\begin{aligned} \dot{V}_1 &= s[k_1 D^{1-\alpha} e_1 + \alpha R u - \theta_1 \dot{P}_L - \theta_2 P_L - \dot{x}_{1d} - \alpha\Delta] = \\ &\quad s[k_1 D^{1-\alpha} e_1 + \alpha R u - \hat{\theta}_1 \dot{P}_L - \hat{\theta}_2 P_L + \tilde{\theta}_1 \dot{P}_L + \tilde{\theta}_2 P_L - \dot{x}_{1d} - \alpha\Delta] = \\ &\quad s[k_1 D^{1-\alpha} e_1 + \alpha R u - \hat{\theta}_1 \dot{P}_L - \hat{\theta}_2 P_L + \tilde{\boldsymbol{\theta}}^T \boldsymbol{\varphi} - \dot{x}_{1d} - \alpha\Delta] \end{aligned} \tag{17}$$

式中

$$\boldsymbol{\varphi} = [\dot{P}_L, P_L]^T \tag{18}$$

从式(17)可得控制目标为:得到一个期望的控制电压去确保 V_1 为负定,从而保证角度跟踪误差渐进收敛于零.

故期望的控制电压可设计为如下 2 部分:

$$u = u_a + u_r \tag{19}$$

将式(19)代入式(17)可得

$$\dot{V}_1 = s[\alpha R u_a - \hat{\theta}_1 \dot{P}_L - \hat{\theta}_2 P_L - \dot{x}_{1d} + k_1 D^{1-\alpha} e_1 + (\alpha R u_r - \tilde{\boldsymbol{\theta}}^T \boldsymbol{\varphi} - \alpha\Delta)] \tag{20}$$

为了确保 V_1 为负定的,控制器可被设计为

$$\left.\begin{aligned} u_a &= \frac{1}{\alpha R}(\hat{\theta}_1 \dot{P}_L + \hat{\theta}_2 P_L + \dot{x}_{1d} - k_1 D^{1-\alpha} e_1) \\ u_r &= -\frac{1}{\alpha R} k_s \mathrm{sgn}(s) \end{aligned}\right\} \tag{21}$$

式中 $k_s > \|\boldsymbol{\theta}_B^T\|\|\boldsymbol{\varphi}\| + D$.

1) u_a为用于达到角度跟踪的结构补偿项. 如式(17)所示,u_a主要由 3 部分组成:第 1 项为补偿油液压缩流量的控制电压,第 2 部分为补偿马达内泄漏流量的控制电压,第 3 部分用于补偿速度指令信号的控制电压,类似于速度指令前馈. u_r为鲁棒控制项,用于消除不确定项及稳定闭环系统.

2) 当分数阶算子的阶次 α 设置为 1 时,分数阶滑模面(15)及控制器(21)将转变为传统的积分滑模面及控制器,即

$$s = k_1 D^{-1} e_1 + e_1 = k_1 \int_0^t e_1 \mathrm{d}\tau + e_1 \tag{22}$$

$$\left.\begin{aligned} u_a &= \frac{1}{\alpha R}\left(\hat{\theta}_1 \dot{P}_L + \hat{\theta}_2 P_L + \dot{\theta}_d - k_1 \int_0^t e_1 \mathrm{d}\tau\right) \\ u_r &= -\frac{1}{\alpha R} k_s \mathrm{sgn}(s) \end{aligned}\right\} \tag{23}$$

2.3 稳定性分析

定理 1 基于假设 1 和假设 2、滑模面(15)和控制器(21)的非线性分数阶积分滑模算法得到控制输出能保证该位控系统是渐进稳定的,角度跟踪误差能收敛至零.

证明 把式(21)代入式(20)得

$$\dot{V}_1 = s[-k_s \mathrm{sgn}(s) - \tilde{\boldsymbol{\theta}}^T \boldsymbol{\varphi} - \alpha\Delta] \leqslant -k_s |s| + \|\boldsymbol{\theta}_B^T\|\|\boldsymbol{\varphi}\||s| + D|s| < 0 \tag{24}$$

故定理 1 得证. **证毕**

3 仿真验证

3.1 电液阀控马达系统建模

为验证所提出的控制策略,本文以某液压转台外框马达为例,建立其基于 Matlab-Simulink 软件的仿真模型. 采样时间设置为 0.2 ms. 仿真所需模型参数如表 1 所示.

表 1 仿真参数

Table 1 Simulation parameters

参数	数值
马达排量 D_m/(m³/rad)	1.15×10^{-4}
角度行程/(°)	±45
库伦摩擦力/(N·m)	10
黏性摩擦力/(N·m·(rad/s)$^{-1}$)	30
控制容腔 V_t/m³	1.81×10^{-4}
惯量 J/(kg·m²)	0.12
阀流量系数 K_q/(m³/V)	2.4×10^{-8}
内泄漏 C_t/(m³/(s·Pa))	0.007
供油压力 P_s/MPa	10
弹性模量 β_e/MPa	200

为避免 sgn 切换函数带来的颤振问题,本文采用饱和函数来代替 sgn 切换函数,即

$$\mathrm{sat}(s) = \begin{cases} 1 & s > \delta \\ 1/\delta & -\delta \leqslant s \leqslant \delta \\ -1 & s < -\delta \end{cases} \tag{25}$$

式中 δ 为边界层.

3.2 仿真结果

本文中,以下两种算法用来对比验证所提出算法的有效性.

C1: 本文提出分数阶非线性积分滑模控制算法. 该算法基于式(15)和式(21)设计分数阶滑模面和控制器. 其控制参数为 $\alpha = 0.6$, $k_1 = 2$, $k_s = 0.005$, $\delta = 0.001$, $\hat{\theta}_1 = \theta_1/2$, $\hat{\theta}_2 = \theta_2/2$.

C2: 整数阶非线性积分滑模控制算法. 该算法基于式(22)和式(23)设计的滑模面和控制器,其拥有 C1 相同的控制参数,区别在于 $\alpha = 1$.

3.2.1 低速工况

给定转台内框马达 5.73° ~ 0.2 Hz 的正弦角度指令,其角度指令及跟踪误差分别如图 2、图 3 所示. 本文提出的分数阶控制器的最大跟踪误差为 0.008°,而整数阶控制器的最大跟踪误差为 0.021°. 故低速跟踪情况下,本文所提出的分数阶控制器要优于传统的整数阶积分滑模控制器.

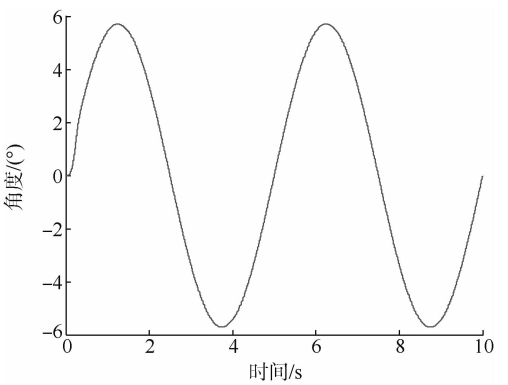


图 2 低速工况角度指令信号

Fig. 2 Angle command under low-velocity condition

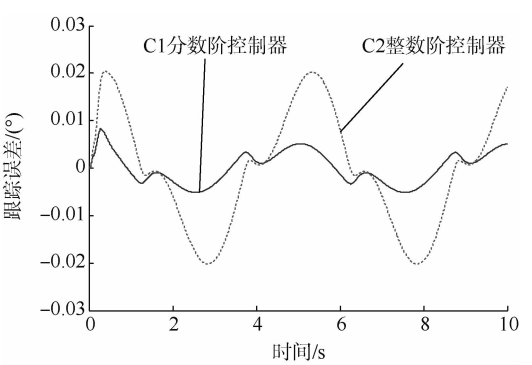


图 3 低速工况跟踪误差对比图

Fig. 3 Tracking errors under low-velocity condition

3.2.2　中速工况

给定转台内框马达 5.73° ~2 Hz 的正弦角度指令,其角度指令及跟踪误差分别如图 4、图 5 所示. 本文提出的分数阶控制器的最大跟踪误差为 0.086°,而整数阶控制器的最大跟踪误差为 0.139°. 故中速跟踪情况下,本文所提出的分数阶控制器要优于传统的整数阶积分滑模控制器.

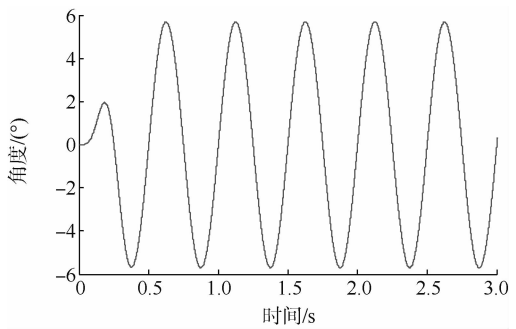


图 4　中速工况角度指令信号

Fig. 4　Angle command under medium-velocity condition

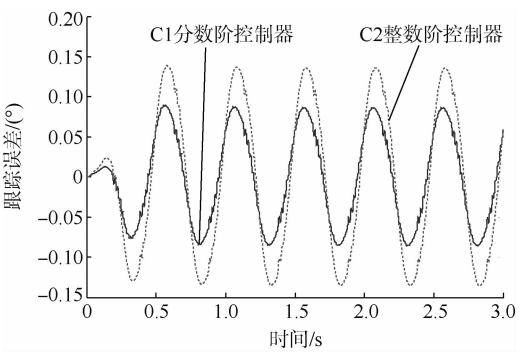


图 5　中速工况跟踪误差对比图

Fig. 5　Tracking errors under medium-velocity condition

3.2.3　高速工况

给定转台内框马达 5.73° ~6 Hz 的正弦角度指令,其角度指令及跟踪误差分别如图 6、图 7 所示. 本文提出的分数阶控制器的最大跟踪误差为 0.252°,而整数阶控制器的最大跟踪误差为 0.336°. 故高速跟踪情况下,本文所提出的分数阶控制器要优于传统的整数阶积分滑模控制器.

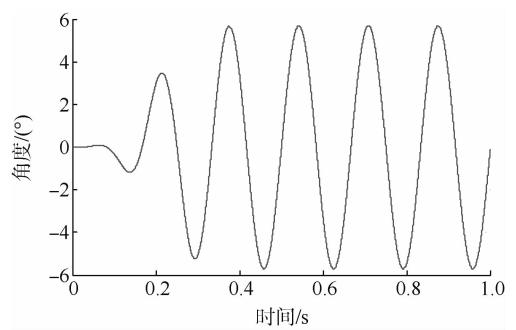


图 6　高速工况角度指令信号

Fig. 6　Angle command under high-velocity condition

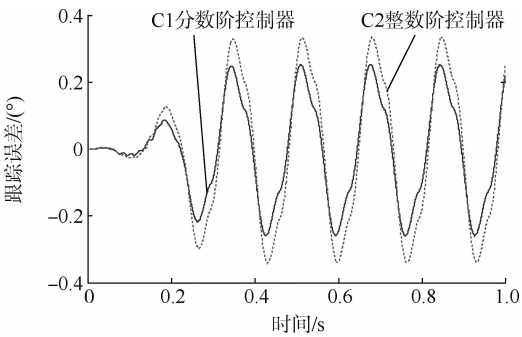


图 7　高速工况跟踪误差对比图

Fig. 7　Tracking errors under high-velocity condition

3.2.4　鲁棒性能测试工况

为测试外干扰力矩抑制能力,给定转台内框马达 0° 的常值位置指令,在 0.1 s 时刻加入 100 N · m方波的干扰力矩,外干扰力矩如图 8 所示. 跟踪误差对比曲线如图 9 所示. 本文提出的分数阶控制器的最大跟踪误差为 0.061°,而整数阶控制器的最大跟踪误差为0.075°. 故强外干扰力矩的影响下,本文所提出的分数阶控制器要比传统的整数阶积分滑模控制器具有更强的鲁棒性.

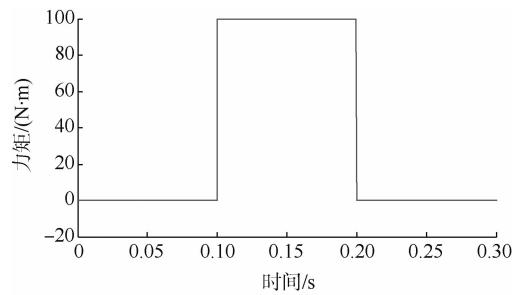


图 8　外干扰力矩曲线

Fig. 8　External torque disturbances

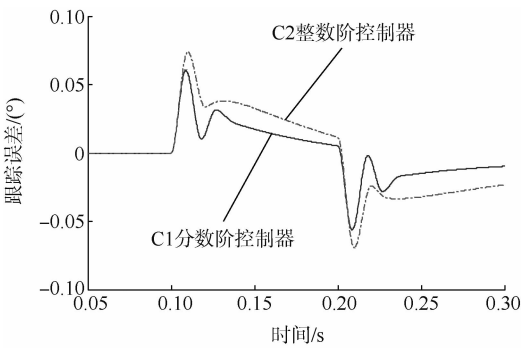


图 9　力矩干扰下跟踪误差对比

Fig. 9　Tracking errors with torque disturbances

4　结　论

针对电液仿真转台的阀控马达位控伺服系统,本文提出了分数阶积分滑模非线性鲁棒控制器. 该算法兼顾了积分滑模控制器的优点,并能有效提高系统的动态跟踪能力及抗干扰能力. 仿真

结果表明,在低中高速角度跟踪以及强外干扰力的工况下,该新型的非线性分数阶控制器在电液伺服控制中能取得良好的控制效果.

参考文献(References)

[1] 韩松杉,焦宗夏,汪成文,等. 基于神经网络的电液转台非线性积分滑模控制[J]. 北京航空航天大学学报,2014,40(3):321 – 326
Han Songshan, Jiao Zongxia, Wang Chengwen, et al. Integral sliding mode nonlinear controller of electrical-hydraulic flight simulator based on neural network[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics,2014,40(3):321 – 326(in Chinese)

[2] 王锴,王占林,付永领,等. 电液仿真转台控制系统设计与仿真研究[J]. 宇航学报,2007,28(1):178 – 182
Wang Kai, Wang Zhanlin, Fu Yongling, et al. Design and resrarch of electronic-hydraulic rotary-table[J]. Journal of Astronautics,2007,28(1):178 – 182(in Chinese)

[3] 邵俊鹏,王仲文,李建英,等. 电液位置伺服系统模型辨识与非线性控制[J]. 机械科学与技术,2010,29(4):488 – 492
Shao Junpeng, Wang Zhongwen, Li Jianying, et al. Model identification and nonlinear control of an electro-hydraulic position servo system[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering,2010,29(4):488 – 492(in Chinese)

[4] 刘金琨. 滑模变结构控制 MATLAB 仿真[M]. 2 版. 北京:清华大学出版社,2012:1 – 3
Liu Jinkun. Sliding mode control design and Matlab simulation[M]. 2nd ed. Beijing: Tsinghua University Press,2012:1 – 3(in Chinese)

[5] Liu Y, Handroos H. Technical note sliding mode control for a class of hydraulic position servo[J]. Mechatronics,1999,9(1):111 – 123

[6] Bonchis A, Corke P I, Rye D C, et al. Variable structure methods in hydraulic servo systems control[J]. Automatica, 2001, 37(4):589 – 595

[7] Chern T L, Wong J S. DSP based integral variable structure control for DC motor servo drivers[J]. IEE Proceedings: Control Theory and Applications,1995,142(5):444 – 450

[8] Seshagiri S, Khalil H K. Robust output feedback regulation of minimum-phase nonlinear systems using conditional integrator[J]. Automatica,2005,41(1):43 – 54

[9] Podlubny I. Fractional differential equations: an introduction to fractional derivatives, fractional differential equations, to methods of their solution and some of their applications[M]. New York: Academic Press,1998

[10] Machado J T, Kiryakova V, Mainardi F. Recent history of fractional calculus[J]. Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation,2011,16(3):1140 – 1153

[11] Nagoya H. Realizations of affine Weyl group symmetries on the quantum Painlevé equations by fractional calculus[J]. Letters in Mathematical Physics,2012,102(3):297 – 321

[12] Yan Y, Kou C. Stability analysis for a fractional differential model of HIV infection of CD4$^+$ T-cells with time delay[J]. Mathematics and Computers in Simulation, 2012, 82(9): 1572 – 1585

[13] Jian B, Feng X C. Fractional-order anisotropic diffusion for image denoising[J]. Image Processing, IEEE Transactions on, 2007,16(10):2492 – 2502

[14] Oustaloup A, Moreau X, Nouillant M. CRONE suspension[J]. Control Engineering Practice,1996,4(8):1101 – 1108

[15] Efe M O. Integral sliding mode control of a quadrotor with fractional order reaching dynamics[J]. Transactions of the Institute of Measurement and Control,2011,33(8):985 – 1003

[16] Efe M O. Fractional fuzzy adaptive sliding-mode control of a 2-DOF direct-drive robot arm[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics. Part B: Cybernetics, 2008, 38(6): 1561 – 1570

[17] Delavari H, Ghaderi R, Ranjbar A, et al. Fuzzy fractional order sliding mode controller for nonlinear systems[J]. Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation, 2010, 15(4):963 – 978

[18] Efe M O. Fractional order sliding mode control with reaching law[J]. Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences,2010,18(5):731 – 747

[19] Zhang B T, Pi Y G. Design of fractional order sliding mode controller based on parameters tuning[J]. Przeglad Elektrotechniczny,2012,88(10):172 – 175

[20] Dadras S, Momeni H R. Fractional terminal sliding mode control design for a class of dynamical systems with uncertainty[J]. Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation,2012,17(1):367 – 377

[21] Liu R, Alleyne A. Nonlinear force/pressure tracking of an electro-hydraulic actuator[J]. Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control,2000,122(3):232 – 237

[22] Yao B, Bu F P, Reedy J, et al. Adaptive robust motion control of single-rod hydraulic actuators: theory and experiments[J]. IEEE-ASME Transactions on Mechatronics,2000,5(1):79 – 91

[23] Duraiswamy S, Chiu G T C. Nonlinear adaptive nonsmooth dynamic surface control of electro-hydraulic systems[C]//American Control Conference. [S. l.]: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc,2003,4:3287 – 3292

[24] 管成,朱善安. 一类非线性系统的微分与积分滑模自适应控制及其在电液伺服系统中的应用[J]. 中国电机工程学报,2005,25(4):103 – 108
Guan Cheng, Zhu Shanan. Derivation and integral sliding mode adaptive control for a class of nonlinear system and its application to an electro-hydraulic servo system[J]. Proceedings of the CSEE,2005,25(4):103 – 108(in Chinese)

[25] 王春行. 液压控制系统[M]. 北京:机械工业出版社,1998:41 – 43
Wang Chunxing. Hydraulic control system[M]. Beijing: China Machine Press,1998:41 – 43(in Chinese)