

1-2-2019

Fuzzy Sliding Backstepping Mode Control for Flight Simulator Servo Based on Friction and Disturbance Compensation

Huibo Liu

School of Information Engineering, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014010, China;

Shanglei Liu

School of Information Engineering, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014010, 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.

Fuzzy Sliding Backstepping Mode Control for Flight Simulator Servo Based on Friction and Disturbance Compensation

Abstract

Abstract: Considering friction, modeling errors and other uncertainties of flight simulator servo system, a compensation strategy which combines model-based friction compensation with nonlinear disturbance observer compensation was proposed. First, the friction is modeled, whose parameters are identified by using genetic algorithm, and using the identified model to compensate. Second, using a nonlinear disturbance observer to estimate the modeling errors, friction less-compensation or over-compensation and other uncertainties, and using this observed value to compensate. The system adopted sliding backstepping controller to ensure the stabilization of the system. Finally, the fuzzy algorithm is adopted to adjust the switching gain of sliding mode to reduce the chattering of the system. The simulation results show the method can reduce the influence of friction and modeling errors and other uncertainties, weakened the chattering caused by sliding mode, improved the control precision and anti-interference of the system.

Keywords

flight simulator, friction compensation, nonlinear disturbance observer, genetic algorithm, fuzzy algorithm, sliding backstepping mode control

Recommended Citation

Liu Huibo, Liu Shanglei. Fuzzy Sliding Backstepping Mode Control for Flight Simulator Servo Based on Friction and Disturbance Compensation[J]. Journal of System Simulation, 2018, 30(3): 1195-1203.

基于摩擦和干扰补偿的转台模糊反演滑模控制

刘慧博, 刘尚磊

(内蒙古科技大学信息工程学院, 内蒙古 包头 014010)

摘要: 针对转台中的摩擦、建模误差等不确定性, 采用基于摩擦模型和非线性干扰观测器相结合的补偿策略。首先对摩擦进行建模并通过遗传算法辨识模型参数, 利用辨识的模型进行补偿; 其次使用非线性干扰观测器对建模误差、摩擦的欠、过补偿等扰动进行估计, 利用估计值做进一步补偿。采用反演滑模控制器, 保证了系统的稳定性; 利用模糊算法调整滑模控制的切换增益以降低“抖振”。仿真结果表明, 该方法降低了摩擦等不确定性对系统的影响, 减弱了滑模引起的“抖振”, 提高了系统的控制精度及抗干扰性。

关键词: 转台; 摩擦补偿; 非线性干扰观测器; 遗传算法; 模糊算法; 反演滑模控制

中图分类号: TP273

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X (2018) 03-1195-09

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.201803053

Fuzzy Sliding Backstepping Mode Control for Flight Simulator Servo Based on Friction and Disturbance Compensation

Liu Huibo, Liu Shanglei

(School of Information Engineering, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014010, China)

Abstract: Considering friction, modeling errors and other uncertainties of flight simulator servo system, a compensation strategy which combines model-based friction compensation with nonlinear disturbance observer compensation was proposed. First, the friction is modeled, whose parameters are identified by using genetic algorithm, and using the identified model to compensate. Second, using a nonlinear disturbance observer to estimate the modeling errors, friction less-compensation or over-compensation and other uncertainties, and using this observed value to compensate. The system adopted sliding backstepping controller to ensure the stabilization of the system. Finally, the fuzzy algorithm is adopted to adjust the switching gain of sliding mode to reduce the chattering of the system. The simulation results show the method can reduce the influence of friction and modeling errors and other uncertainties, weakened the chattering caused by sliding mode, improved the control precision and anti-interference of the system.

Keywords: flight simulator; friction compensation; nonlinear disturbance observer; genetic algorithm; fuzzy algorithm; sliding backstepping mode control

引言

随着飞行器和制导武器的研制发展, 惯性测试

理论和惯性测试设备都得以快速发展。仿真转台作为惯性测试设备的一种, 已经从早期的单轴台发展到三轴台再到五轴台, 其在飞行器和导弹研制过程中起着非常重要的作用^[1]。转台的性能直接影响到地面仿真的真实程度, 因此对转台的静态性能和动态性能有较高的要求。但飞行转台是一个非线性、具有不确定性的控制对象, 摩擦力矩、外



收稿日期: 2016-03-28 修回日期: 2016-05-09;
基金项目: 内蒙古自然科学基金(2014MS0611);
作者简介: 刘慧博(1972-), 女, 内蒙古包头, 博士, 副教授, 研究方向为智能控制与导航制导; 刘尚磊(1992-), 男, 山东菏泽, 硕士生, 研究方向为智能控制理论与应用。

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

• 1195 •

界干扰以及参数的不确定性都严重影响了系统性能的提高^[2-3]。国内外专家学者积极寻求能够实现转台高性能控制的控制策略。主要控制策略可分为以下三类：以PID控制为代表的传统控制策略；以自适应控制、滑模控制为代表的现代控制策略；以模糊控制、神经网络控制为代表的智能控制策略。如文献[4]中采用经典PID算法对转台进行控制，但由于摩擦力矩等干扰的存在导致控制效果不佳；文献[5]和文献[6]采用了自适应控制的算法实现对转台的控制，但这种方法一般成本较高；文献[7-9]采用了滑模与其他控制策略相结合的方法对转台进行控制，滑模控制有算法简单，鲁棒性强等优点，但滑模控制带来的系统“抖振”也是不可忽视的；文献[10-13]采用了模糊、神经网络等智能算法实现对转台的控制，但由于总结模糊控制的模糊规则非常困难以及神经网络的计算量较大等因素影响了智能算法的应用。同时以上方法大都未考虑摩擦非线性对系统的影响，致使系统控制性能不佳。现在迫切需要寻求一种更为有效的控制算法实现转台的高性能控制。

摩擦力矩是影响伺服系统性能的一个重要因素，会严重影响伺服系统的性能，尤其是低速性能，容易造成波形畸变现象和爬行现象^[14]。因此想要提高系统的控制精度和性能，对摩擦力矩进行补偿显得尤为重要。国内外诸多学者针对摩擦补偿提出了许多方法，总体分为基于模型的补偿和不依赖模型的补偿，但两种方法各有利弊^[15]。

基于模型的补偿方法有结构简单易于实现等优点。该方法补偿效果的优劣取决于辨识的补偿模型的精度，但是由于在实际系统中受到诸多因素的影响辨识的模型精度一般不高。不依赖模型的补偿方法主要是通过智能算法、干扰观测器以及自抗扰控制技术等方法实现，如文献[16-17]利用神经网络的逼近能力对摩擦力矩进行补偿，但这种方法一般计算量较大；文献[18]采用基于自抗扰技术设计的扩张状态观测器对摩擦以及外界

干扰进行估计并加以补偿；文献[19]采用基于非线性干扰观测器的摩擦补偿策略；后两种方法都是把摩擦力矩作为外界干扰进行处理，一般不考虑摩擦非线性对整个系统的动态性能和稳定性的影响。

由于飞行转台是一个具有非线性、不确定性的控制对象，常规的控制方法难以达到理想的控制效果，因此需要采用一种强鲁棒性的控制器以保证系统有较好的控制品质。滑模变结构控制是一种具有强鲁棒性的控制方法，对系统参数摄动和外界干扰具有不变性^[20]，这种特性非常适用于转台系统的控制。反演控制利用递归设计方法，设计李雅普诺夫函数和中间虚拟控制量，反推设计出最终的控制律，保证了系统的稳定性。将滑模与反演控制相结合，简化了反演控制设计过程的同时使系统对匹配和非匹配不确定性都具有鲁棒性^[19]。

本文提出的控制方法主要包括基于摩擦模型的前馈补偿、基于非线性干扰观测器的前馈补偿以及模糊反演滑模三部分。首先针对转台的摩擦力矩，提出基于遗传算法的参数辨识和摩擦补偿的策略，减弱了非线性摩擦力矩对系统的影响，改善了系统的位置跟踪的“平顶”和速度跟踪的“死区”现象，提高了系统的跟踪精度和控制性能；同时考虑到系统的外界干扰、建模误差以及摩擦的欠补偿或过补偿等扰动，又设计了非线性干扰观测器对上述干扰进行估计，并使用估计值做进一步补偿，相比于传统的只有基于摩擦模型的补偿或基于干扰观测器的补偿，本文将两种补偿策略有机结合有效提高了系统对摩擦、建模误差等扰动的补偿效果和补偿能力，进一步减弱扰动对系统的影响，提高系统的控制性能。补偿后的系统采用反演滑模控制器，保证了系统稳定性的同时使系统对匹配和非匹配不确定性都具有鲁棒性。最后采用模糊算法对滑模控制的切换增益进行在线调整，相比于传统的滑模控制，系统的“抖振”得到了有效的抑制。本文提出的控制策略有效降低了摩擦力矩、建模误差对系统的影响，使系统具有较强的抗干扰能力；削弱了系统“抖振”；提高了系统的跟踪精度和鲁棒性。

1 转台模型的建立

某高精度三轴飞行仿真转台任意框的结构如图 1 所示。

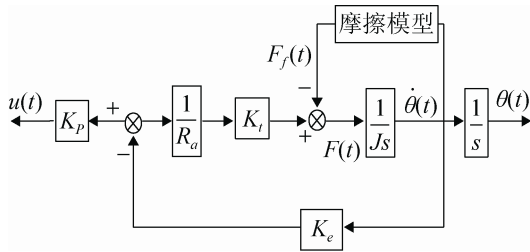


图 1 转台伺服系统任意框结构图
Fig.1 Arbitrary frame structure diagram of flight simulator servo system

图中 $F_f(t)$ 为摩擦力矩; K_p 为 PWM 功率放大器放大系数; R_a 为电枢电阻; K_t 为电动机力矩系数; K_e 为电枢反馈系数; J 为转动惯量; $\dot{\theta}(t)$ 为转速; $\theta(t)$ 为转角; $u(t)$ 为控制输入, $x_1 = \theta(t)$, $x_2 = \dot{\theta}(t)$ 。

由图 1 可得转台系统的动力学方程为:

$$\ddot{\theta} = -\frac{K_t K_e}{J R_a} \dot{\theta} + \frac{K_p K_t}{J R_a} u(t) - \frac{1}{J} F_f(t) \quad (1)$$

其状态方程可描述为如公式(2):

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1(t) \\ \dot{x}_2(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -\frac{K_t K_e}{J R_a} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{K_p K_t}{J R_a} \end{bmatrix} u(t) - \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{J} \end{bmatrix} F_f(t) \quad (2)$$

转台的摩擦力矩采用 Stribeck 摩擦模型来描述, 其表达式为公式(3):

$$F_f(t) = \begin{cases} \left[F_c^+ + (F_m^+ - F_c^+) e^{-\left(\frac{\dot{\theta}}{v_s^+}\right)^2} \right] \text{sgn}(\dot{\theta}) + k_v^+ \dot{\theta} & \dot{\theta} > 0 \\ \left[F_c^- + (F_m^- - F_c^-) e^{-\left(\frac{\dot{\theta}}{v_s^-}\right)^2} \right] \text{sgn}(\dot{\theta}) + k_v^- \dot{\theta} & \dot{\theta} < 0 \end{cases} \quad (3)$$

式中: F_m 为静摩擦力矩; F_c 为库伦摩擦力; k_v 为黏性摩擦力矩比例系数; v_s 为比例系数。

2 摩擦参数的辨识

遗传算法能够模仿自然界中生物进化的搜索机制, 在全局范围内并行搜索最优解, 应用该算法辨识的参数精度较高, 同时该算法不需要知道参数具体的初值, 只需知道参数的范围即可。通过该方法得到摩擦模型的参数, 进一步可以确立摩擦补偿模型并用来补偿摩擦力矩给系统带来的影响。

由公式(1)可知在转台系统中, 可采用一组恒定的转速 $\{\dot{\theta}_{i=1}^N\}$ 作为转速指令信号, 通过 PD 控制实速度的跟踪控制, 可得到不同速度下的一组控制量 $\{u_{i=1}^N\}$, 从而可以计算得到不同速度下的摩擦力矩, 并把这一组数据作为辨识摩擦参数的数据源。

把 Stribeck 摩擦模型中需要辨识的参数视为一个整体 x 如公式(4):

$$\hat{x}_m = [\hat{F}_c^+ \hat{F}_m^+ \hat{k}^+ \hat{v}_s^+ \hat{F}_c^- \hat{F}_m^- \hat{k}^- \hat{v}_s^-]^T$$

$$m = 1, 2, 3 \dots M, \quad M \text{ 为种群规模。}$$

定义辨识误差:

$$e_i = F_f(\dot{\theta}) - \hat{F}_f(\dot{\theta}) \quad i = 1, 2, 3 \dots N \quad (4)$$

式中: $F_f(\dot{\theta})$ 可由所确定的 Stribeck 曲线得到。

定义目标函数:

$$J_m = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N e_i^2 \quad m = 1, 2, 3 \dots M \quad (5)$$

选择个体适应度函数:

$$f_m = \frac{1}{J_m} \quad m = 1, 2, 3 \dots M \quad (6)$$

采用十进制浮点编码的格式, 选择操作采用保留最优个体的随机采样法, 交叉操作采用均匀的交叉算子, 交叉概率为 $P_c = 0.9$, 变异操作采用自适应变异概率, 变异概率与适应度有关, 变异概率为 $P_m = 0.1 - [1:1:Size] \times 0.01 / Size$, 即适应度越大变异概率越小。

恒速跟踪时取 $\{\dot{\theta}_{i=1}^N\} = [-1.0:0.05:+1.0]$ 作为速度指令信号。辨识过程中取种群规模 $M = 200$, 最大遗传代数 $G = 10\ 000$, 参数搜寻范围 $F_c \in [0,10]$ 、 $F_m \in [0,10]$ 、 $k_v \in [0,0.1]$ 、 $v_s \in [0,0.1]$, 得到辨识的摩擦参数如表 1 所示。

表1 参数辨识

Tab.1 Parameter identification

参数	F_c^+	F_m^+	α^+	v_s^+
真值	5	8	0.02	0.05
辨识值	5.0 008	8.0 255	0.0 196	0.0 498
参数	F_c^+	F_m^+	α^+	v_s^+
真值	4	9	0.03	0.05
辨识值	3.9 991	8.9 470	0.0 312	0.0 503

3 非线性干扰观测器的设计

本文采用的非线性干扰观测器的表达式:

$$\begin{cases} \dot{\hat{F}} = z + p(x_1, x_2) \\ \dot{z} = -L(x_1, x_2)z + L(x_1, x_2) \\ [-p(x_1, x_2) - f(x) - bu] \end{cases} \quad (7)$$

式中: $p(x_1, x_2)$ 为待设计的非线性数; $L(x_1, x_2)$ 为非线性观测器增益, 且满足:

$$L(x_1, x_2)\dot{x}_2 = \frac{dp(x_1, x_2)}{dt} \quad (8)$$

定义非线性干扰观测器的观测误差:

$$\tilde{F} = F - \hat{F} \quad (9)$$

一般情况下, F 的变化相对于非线性干扰观测器的动态特性变化是非常缓慢的, 即可认为 $\dot{F} = 0$ 。综合以上各式:

$$\begin{aligned} \dot{\tilde{F}} &= \dot{F} - \dot{\hat{F}} = -\dot{z} - \dot{p}(x_1, x_2) = \\ &L(x_1, x_2)[z + p(x_1, x_2)] - L(x_1, x_2)[\dot{x}_2 - f(x) - bu] = \\ &L(x_1, x_2)\hat{F} - L(x_1, x_2)F = -L(x_1, x_2)\tilde{F} \end{aligned} \quad (10)$$

由式(10)可知, 可以通过选择适当的 $L(x_1, x_2) > 0$, 可使观测误差按指数收敛。选择 $L(x_1, x_2) = a$, $a > 0$ 为常数。设计

$$p(x_1, x_2) = ax_2 \quad (11)$$

4 模糊反演滑模

模糊反演滑模控制器中包括模糊算法和反演滑模控制算法两部分。反演滑模控制器的设计思想是将复杂的非线性系统分解成不超过系统阶数的子系统, 为每个子系统设计李雅普诺夫函数和中间虚拟控制量, 同时在反演设计的最后一步结合滑模变结构控制的思想推导出最终的控制律。由于滑模引起的系统“抖振”的程度与滑模控制器的切换增

益直接相关。模糊控制算法主要是根据滑模到达条件对切换增益进行在线调整, 以达到消除系统干扰的同时降低系统“抖振”的目的。

4.1 反演滑模控制器的设计

定义带有建模误差的转台系统的模型表达式:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = (A + \Delta A)x_2 + (B + \Delta B)u + d(t) \end{cases} \quad (12)$$

式中: ΔA 和 ΔB 为系统建模误差, $d(t)$ 为外界干扰, 定义 $D = \Delta Ax_2 + \Delta Bu + d(t)$ 为总不确定性。则上式可写为:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = Ax_2 + Bu + D(t) \end{cases} \quad (13)$$

Step1

定义位置误差 $z_1 = x_1 - x_d$, 则 $\dot{z}_1 = \dot{x}_1 - \dot{x}_d = x_2 - \dot{x}_d$, x_d 为位置指令信号。

定义李雅普诺夫函数:

$$V_1 = \frac{1}{2}z_1^2 \quad (14)$$

定义 $x_2 = z_2 + \dot{x}_d - c_1 z_1$, 其中 c_1 为正常数, z_2 为虚拟控制量, $z_2 = x_2 - \dot{x}_d + c_1 z_1$, 则 $\dot{z}_1 = x_2 - \dot{x}_d = z_2 - c_1 z_1$ 且 $\dot{v}_1 = z_1 \dot{z}_1 = z_1 z_2 - c_1 z_1^2$ 。

设计切换函数:

$$\sigma = k_1 z_1 + z_2 \quad (15)$$

式中: k_1 为大于零的常数。

由于 $\dot{z}_1 = x_2 - \dot{x}_d = z_2 - c_1 z_1$ 则 $\sigma = k_1 z_1 + z_2 = k_1 z_1 + \dot{z}_1 + c_1 z_1 = (k_1 + c_1)z_1 + \dot{z}_1$ 。其中 $k_1 + c_1 > 0$, 当 $\sigma = 0$ 时 $z_1 = 0$, $z_2 = 0$ 且 $\dot{v}_1 \leq 0$, 所以需要进一步设计。

Step2

定义李雅普诺夫函数:

$$V_2 = V_1 + \frac{1}{2}\sigma^2 \quad (16)$$

$$\dot{v}_2 = \dot{v}_1 + \sigma \dot{\sigma} = z_1 z_2 - c_1 z_1^2 + \sigma \dot{\sigma} =$$

$$z_1 z_2 - c_1 z_1^2 + \sigma(k_1 \dot{z}_1 + \dot{z}_2) =$$

$$z_1 z_2 - c_1 z_1^2 + \sigma(k_1(z_2 - c_1 z_1) +$$

$$\dot{x}_2 - \ddot{x}_d + c_1 \dot{z}_1) =$$

$$z_1 z_2 - c_1 z_1^2 + \sigma(k_1(z_2 - c_1 z_1) +$$

$$A(z_2 + \dot{x}_d - c_1 z_1) + Bu + D - \ddot{x}_d + c_1 \dot{z}_1)$$

定义李雅普诺夫函数:

$$v_3 = v_2 + \frac{1}{2\gamma} \tilde{D}^2$$

式中: \hat{D} 为 D 的估计值; D 的估计误差为 $\tilde{D} = D - \hat{D}$; γ 为正常数。则

$$\begin{aligned} \dot{v}_3 = \dot{v}_2 - \frac{1}{\gamma} \tilde{D} \dot{\tilde{D}} = & z_1 z_2 - c_1 z_1^2 + \sigma(k_1(z_2 - c_1 z_1) + \\ & A(z_2 + x_d - c_1 z_1) + Bu + D - \ddot{x}_d + c_1 z_1) - \frac{1}{\gamma} \tilde{D} \dot{\tilde{D}} = \\ & z_1 z_2 - c_1 z_1^2 + \sigma(k_1(z_2 - c_1 z_1) + \\ & A(z_2 + x_d - c_1 z_1) + Bu + \hat{D} - \ddot{x}_d + c_1 z_1) - \\ & \frac{1}{\gamma} \tilde{D}(\dot{\tilde{D}} + \gamma\sigma) \end{aligned} \quad (17)$$

设计控制律为:

$$\begin{aligned} u = B^{-1}(-k_1(z_2 - c_1 z_1) - \\ A(z_2 + \dot{x}_d - c_1 z_1) - \hat{D} + \\ \ddot{x}_d - c_1 \dot{z}_1 - h(\sigma + \beta \operatorname{sgn}(\sigma))) \end{aligned} \quad (18)$$

为了消除系统不确定性的影响。设计自适应律:

$$\dot{\hat{D}} = -\gamma\sigma \quad (19)$$

将(18)和(19)带入式(17)得

$$\dot{v}_3 = z_1 z_2 - c_1 z_1^2 - h\sigma^2 - h\beta|\sigma| \quad (20)$$

$$\text{取 } Q = \begin{bmatrix} c_1 + hk_1^2 & hk_1 - \frac{1}{2} \\ hk_1 - \frac{1}{2} & h \end{bmatrix} \text{ 可将上式写为:}$$

$$\dot{v}_3 = -z^T Q z - h\beta|\sigma| \quad (21)$$

如果 Q 正定, 那么 $\dot{v}_3 \leq 0$ 。又 $|Q| = h(c_1 + k_1) - \frac{1}{4}$,

则通过对 h, c_1 和 k_1 恰当的取值可以保证 Q 为正定。

4.2 模糊算法设计

在滑模控制中, 切换增益的选取对系统抵抗干扰, 减小系统“抖振”起到至关重要的作用。在实际应用时, 由于干扰大小未知切换增益的选择较为保守。但切换增益值过大会引起系统产生剧烈“抖振”, 取值过小又不能抵消干扰的影响, 甚至造成系统不稳定。本节将设计模糊算法在线调整切换增益。

分析相平面可知, 滑模控制引起“抖振”的程度与相点到达滑模面的速度直接相关。要求在相点即将到达滑模面时速度较小即减小切换增益的值以最大程度的减弱“抖振”; 同时为了保证系统的快速性和抗干扰性又要求切换增益的值不能过小。由以上分析可得, 可选择 σ 、 $\dot{\sigma}$ 为模糊算法的输入, 输入论域为 $[-15, 15]$, 输出量 Δh 的论域为 $[-1.5, 1.5]$, 语言变量取[NB, NM, NS, ZE, PS, PM, PB]。

模糊推理采用 2 入 1 出的结构。在设计模糊规则时应遵守下述条件: $\sigma\dot{\sigma} > 0$, 则 $h(t)$ 取值越大; $\sigma\dot{\sigma} < 0$, 则 $h(t)$ 取值越小。去模糊化时采用重心法, 以隶属度为加权系数求出加权平均值, 并以此作为控制输出的精确值。

采用积分法对 \hat{h} 的上界进行估计

$$\hat{h}(t) = G \int_0^t \Delta h dt \quad (22)$$

式中: G 为比例系数。

则控制律可表示为:

$$\begin{aligned} u = B^{-1}(-k_1(z_2 - c_1 z_1) - A(z_2 + \dot{x}_d - c_1 z_1) - \hat{D} + \\ \ddot{x}_d - c_1 \dot{z}_1 - \hat{h}(\sigma + \beta \operatorname{sgn}(\sigma))) \end{aligned} \quad (23)$$

为获得更好的控制效果, 进一步削弱滑模控制引起的“抖振”, 结合幂次趋近律给出新的趋近律。

$\dot{\sigma} = -\sigma^2 |\sigma| \operatorname{sgn}(\sigma) - \eta\sigma$ $\eta > 0$, 其中 $\sigma^2 |\sigma|$ 起平滑作用, $\eta\sigma$ 保证了趋近速度。

最终的控制律可表示为:

$$\begin{aligned} u = B^{-1}(-k_1(z_2 - c_1 z_1) - A(z_2 + \dot{x}_d - c_1 z_1) - \hat{D} + \\ \ddot{x}_d - c_1 \dot{z}_1 - \hat{h}(\sigma^2 |\sigma| \operatorname{sgn}(\sigma) + \eta\sigma)) \end{aligned} \quad (24)$$

5 仿真结果

为了验证本文设计的方法的有效性, 针对带有摩擦力矩干扰及建模误差干扰的转台伺服系统在 MATLAB 环境下进行仿真实验, 仿真结构图如图 2 所示。取系统模型参数如下: $R_a = 7.77\Omega$, $K_t = 6 \text{ N} \cdot \text{m}/\text{A}$, $K_e = 1.2 \text{ V}/(\text{rad}/\text{s})$, $J = 0.6 \text{ Kg} \cdot \text{m}^2$, $K_p = 11$; 摩擦力矩参数如第二节所述; 建模误差 $\Delta A = 0.1 \sin(2\pi t)$, $\Delta B = \sin(2\pi t)$; 取位置给定信号为 $\sin(2\pi t)$ 。

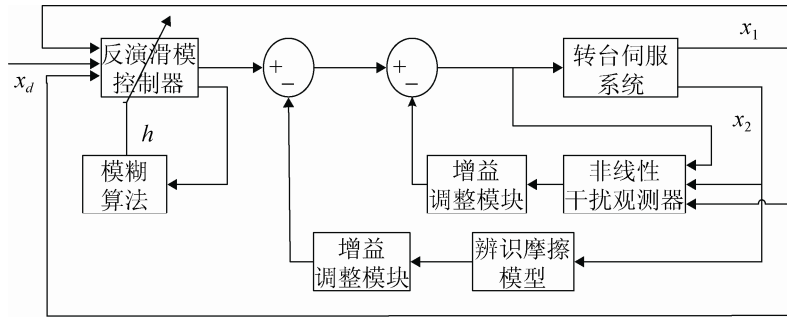


图2 系统仿真结构框图

Fig.2 Frame diagram of system simulation

实验一

针对上述模型,利用本文提出的基于摩擦模型的补偿、基于非线性干扰观测器的补偿以及模糊反演滑模控制的复合控制策略进行仿真实验。

由图3和图4可得该控制策略有效消除了摩擦力矩给系统带来的影响,削弱了位置跟踪的“平顶”以及速度跟踪的“死区”现象,实现了系统的高精度的位置跟踪以及速度跟踪。

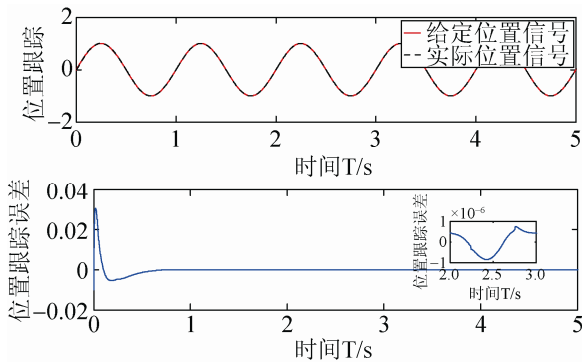


图3 位置跟踪曲线

Fig.3 Position tracking curve

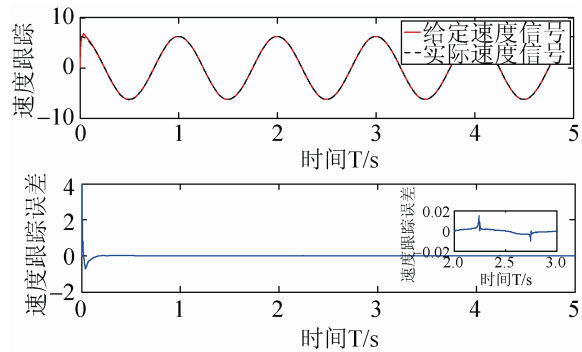


图4 速度跟踪曲线

Fig.4 Velocity tracking curve

由图5和图6可得,遗传算法能够以较高的精度辨识出摩擦模型的参数,有效补偿摩擦力矩给系统带来的影响。同时非线性干扰观测器也可以较为准确的估计出摩擦的欠补偿及过补偿、建模误差等干扰,可以做进一步补偿以提高控制质量。

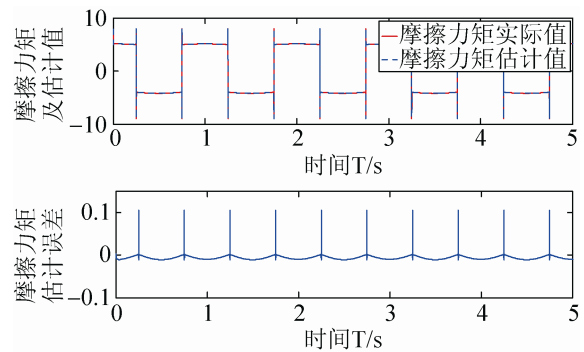


图5 摩擦力矩曲线

Fig.5 Friction torque curve

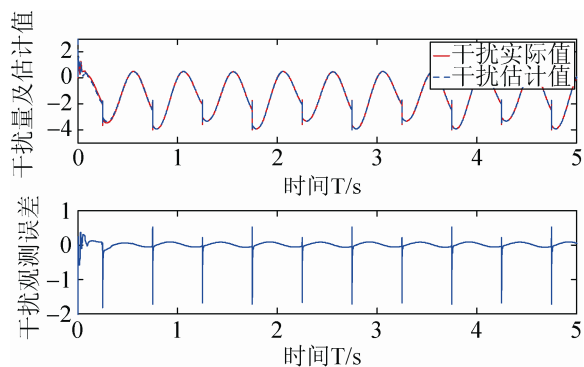


图6 干扰量曲线

Fig.6 Interference curve

实验二

为了进一步验证本文提出的控制策略的优越性,分别在(1) 无补偿; (2) 基于摩擦模型的补偿;

(3) 基于非线性干扰观测器的补偿; (4) 基于摩擦模型以及非线性干扰观测器的补偿的情况下都采用模糊反演滑模控制器进行实验仿真。

比较图 7 中的四条位置跟踪误差曲线可以看出无任何补偿措施的控制精度较低; 基于摩擦模型的补偿无法补偿除摩擦之外的扰动给系统带来的影响, 位置跟踪误差不超过 8×10^{-4} ; 基非线性干扰观测器的补偿控制精度相对较高, 位置跟踪误差不超过 3×10^{-6} , 主要是因为非线性干扰观测器可以对包括摩擦、建模误差在内的干扰进行估计, 并用估计值加以补偿, 减弱了干扰对系统的影响; 最后本文提出的基于摩擦模型与非线性干扰观测器的复合补偿策略可以较高精度的估计摩擦和建模误差等干扰的值并补偿, 最大限度的减弱了干扰对系统的影响, 相比于其他三种策略控制精度最高, 位置跟踪误差达到了 8×10^{-7} ; 同时由图 8 可以看出模糊算法在线调整切换增益可以有效的平滑滑模控制器的输出。

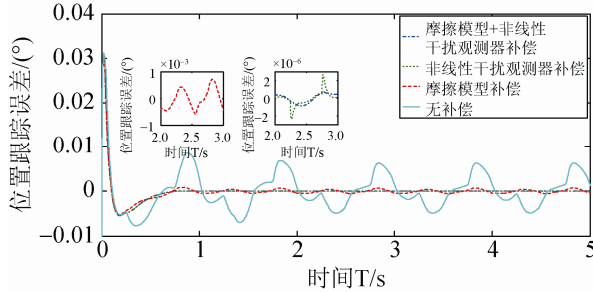


图 7 位置跟踪误差曲线

Fig.7 Position tracking error curve

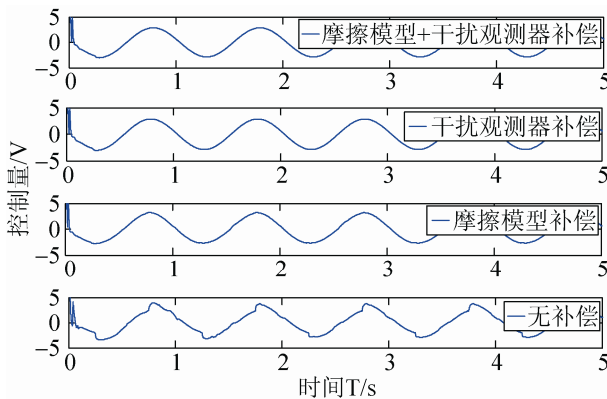


图 8 控制量曲线

Fig.8 Control curve

以上两个实验的仿真结果表明, 基于摩擦和非线性干扰观测补偿的模糊反演滑模控制可以有效的抑制摩擦、建模误差等干扰对转台伺服系统的影响; 减弱了滑模引起的系统“抖振”; 消除了系统的低速爬行、“平顶”以及“死区”现象; 提高了系统的控制精度和抗干扰性。

6 结论

本文针对摩擦力矩以及建模误差等干扰对转台系统产生的影响, 提出了一种基于摩擦模型和非线性干扰观测器复合补偿策略, 补偿后的系统采用模糊反演滑模控制保证了系统的稳定性。

该方法利用遗传算法离线辨识出 Stribeck 摩擦模型的参数, 利用辨识的摩擦模型进行补偿, 削弱摩擦力矩对系统的影响; 其次把摩擦力矩之外的干扰如: 建模误差、外界干扰以及摩擦的补偿中的欠补偿或者过补偿等扰动定义为外界扰动, 设计非线性干扰观测器对上述定义的外界扰动进行估计, 并用此估计值做进一步的前馈补偿以减弱对系统的影响。补偿后的系统采用具有强鲁棒性的滑模变结构控制, 同时反演控制设计思想的加入解决了非匹配不确定性的鲁棒控制问题; 最后为了减弱滑模控制引起的系统“抖振”, 引入模糊算法对切换增益进行在线调整以减弱“抖振”。仿真结果表明该控制方案不仅可以有效平滑控制输出, 同时也提高了系统的控制精度和质量。此外还消除了系统位置跟踪的“平顶”以及速度跟踪的“死区”现象, 提高了系统的抗干扰能力及鲁棒性。该方法可以实现转台伺服系统的高精度控制, 同时也适用于其它对控制精度要求较高的伺服系统。

参考文献:

- [1] 曲展龙, 糜小涛, 许宏光. 仿真转台用电液伺服系统低速性能研究及实现[J]. 液压与气动, 2013 (9): 51-53.
QU Zhan-long, MI Xiao-tao, XU Hong-guang. Research and Realization of Low-speed Performance of Electro-hydraulic Servo System for Simulator[J]. Chinese Hydraulics and Pneumatics, 2013 (9): 51-53.
- [2] 刘强, 冯姝婷, 尔联洁. 高精度机械伺服系统的一种

- 新型自适应滑模控制方法[J]. 控制理论与应用, 2004, 21(2): 239-241.
- LIU Qiang, FENG Shu-ting, ER Lian-jie. Novel adaptive sliding mode control scheme of high precision mechanical servo system[J]. Control Theory and Applications, 2004, 21(2): 239-241.
- [3] 刘柏延, 吴云洁, 黄延福. 基于模糊干扰观测器的自适应反演滑模控制[J]. 系统仿真学报, 2011, 23(8): 1677-1680.
- LIU Bo-yan, WU Yun-jie, HUANG Yan-fu. Research of Adaptive Backstepping Sliding Mode Controller Based on Fuzzy Disturbance Observer[J]. Journal of System Simulation, 2011, 23(8): 1677-1680.
- [4] 刘金琨. 先进PID控制MATLAB仿真[M]. 3版. 北京: 电子工业出版社, 2011: 359-362.
- LIU Jin-kun. Advanced PID control and MATLAB simulation [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2011: 359-362.
- [5] Yao Z, Wang W, Zheng L. A hybrid adaptive control for flight simulator turn table[C]//2010 International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA). USA: IEEE, 2010: 773-777.
- [6] 王卫红, 姚志超, 郑连强. 三轴飞行仿真转台自适应复合控制方法[J]. 电机与控制学报, 2011, 15(9): 74-79.
- WANG Wei-hong, YAO Zhi-chao, ZHENG Lian-qiang. Adaptive compound control method for the three-axis flight simulator[J]. Electric Machines and Control, 2011, 15(9): 74-79.
- [7] Sun W, Cai H, Zhao F, et al. Repetitive control design of simulation turntable based on integral sliding mode[C]//2012 Proceedings of International Conference on Modelling, Identification and Control (ICMIC). USA: IEEE, 2012: 849-854.
- [8] 韩松杉, 焦宗夏, 汪成文, 等. 电液飞行转台的分数阶积分滑模非线性控制[J]. 北京航空航天大学学报, 2014, 40(10): 1411-1416.
- Han Song-shan, Jiao Zong-xia, Wang Cheng-wen, et al. Fractional integral sliding mode nonlinear controller of electrical-hydraulic flight simulator[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2014, 40(10): 1411-1416.
- [9] Dong X, Wu Y, Xiao S, et al. Global sliding mode control based on disturbance observer for motor servo system and application to flight simulator[C]. 2014 IEEE Chinese Guidance, Navigation and Control Conference (CGNCC), USA: IEEE, 2014: 370-375.
- [10] 赵建卫, 亓迎川, 李光明. 基于模糊规则切换的转台伺服系统研究[J]. 空军雷达学院学报, 2011, 25(6): 444-447.
- ZHAO Jian-wei, QI Ying-chuan, LI Guang-ming. Research on Turntable Servo System Based on Fuzzy Switching[J]. Journal of Air Force Radar Academy, 2011, 25(6): 444-447.
- [11] Zhao Y, Jiao Z, Wu S. Wiener recurrent neural network adaptive inverse controller of hydraulic flight motion simulator[C]. 2015 International Conference on Fluid Power and Mechatronics (FPM), USA: IEEE, 2015: 523-528.
- [12] 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 Song-shan, Jiao Zong-xia, Wang Cheng-wen, 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.
- [13] 徐春梅, 尔联洁. 飞行仿真转台模糊神经网络补偿的复合控制[J]. 系统仿真学报, 2008, 20(1): 139-142.
- XU Chun-mei, ER Lian-jie. Complex Tracking Control Based on Fuzzy-neural Compensator for Flight Simulator [J]. Journal of system simulation, 2008, 20(1): 139-142.
- [14] 郭健, 季晶晶, 杨帆, 等. 基于LuGre摩擦模型的伺服系统自适应鲁棒控制器[J]. 南京理工大学学报, 2013(6): 799.
- Guo Jian, Ji Jing-jing, Yang Fan, et al. Adaptive robust controller for servo system based on LuGre model of friction[J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology, 2013(6): 799.
- [15] 王喜明, 刘红, 高伟. 基于LuGre模型的摩擦力补偿的研究[J]. 科学技术与工程, 2007, 5(7): 731-733.
- WANG Xi-ming, LIU Hong, GAO Wei. Study of Friction Compensation Based on LuGre Model[J]. Science Technology and Engineering, 2007, 5(7): 731-733.
- [16] 路瑶, 何秋生, 苑伟华. 考虑摩擦伺服系统的补偿算法研究[J]. 微特电机, 2015, 43(7): 71-74.
- LU Yao, HE Qiu-sheng, YUAN Wei-hua. Research on Compensation Algorithm for Servo System with Friction[J]. Small and Special Electrical Machines, 2015, 43(7): 71-74.
- [17] Xia D, Wang L, Chai T. Neural-Network-Friction Compensation-Based Energy Swing-Up Control of Pendubot [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics (S0278-0046), 2014, 61(3): 1411-1423.

(下转第1209页)