

浮球式惯性平台的自适应模糊滑模转动控制

宋辰¹, 张士峰², 白锡斌²

(国防科技大学 航天科学与工程学院, 长沙 410073)

摘要: **目的** 选择一种稳定的控制方法使力矩器能够完成高精度的转动控制。**方法** 选择自适应模糊滑模控制解决球体的转动控制问题。该方法是在滑模控制的基础上, 利用自适应模糊系统逼近滑模控制中的切换控制项, 使得该方法不但拥有滑模控制所具有的稳定性和鲁棒性的优点, 而且有效地抑制了滑模控制的抖振问题, 得到振幅较小且变化平缓的控制输出。**结果** 自适应模糊滑模控制的跟踪误差在 0.01° 以内, 且跟踪状态下控制输出信号的斜率不超过 $40\ 000\ \text{step/s}$ 。**结论** 该方法能够在力矩器的能力范围内保证球体转动的精度, 满足自标定自对准转动精度低于 0.01° 的要求。

关键词: 浮球式惯性平台; 自适应模糊滑模控制; 转动控制

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2018.01.002

中图分类号: TJ01; V241.62⁺²

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2018)01-0006-06

Rotational Control of Adaptive Fuzzy Sliding Mode for Floated Inertial Platform

SONG Chen¹, ZHANG Shi-feng², BAI Xi-bin²

(College of Aerospace Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

ABSTRACT: Objective To choose a stable control strategy to achieve high-accuracy rotational control. **Methods** Adaptive fuzzy sliding mode control was chosen to control the rotation. This kind of control was applied with adaptive fuzzy system based on sliding mode control to approach and replace variable controller. Thus, it not only possessed stability and robustness, but also dramatically suppressed problematic chattering and smoothed the output of control. **Results** The tracking error of the method was under 0.01° , and the gradient of control output was under $40\ 000\ \text{step/s}$. **Conclusion** Under the capability of torquers, this method can drive sphere rotating accurately, less than 0.01° , as self-calibration and self-alignment needed.

KEY WORDS: floated inertial platform; adaptive fuzzy sliding mode control; rotational control

浮球式惯性平台是一种新型惯性导航平台, 于 20 世纪 60 年代由德雷珀实验室开始研制。浮球平台主要结构包括球体和球壳。球体和球壳之间由悬浮液填充。球体在悬浮液中处于悬浮状态, 与球壳完全分离。球体与球壳的分离, 使浮球平台有效地隔离外界环境对稳定球体的干扰, 从而克服了框架式惯性平台的一些缺点, 如框架锁定, 大的轴承摩擦, 框架变形等。因此浮球式惯性平台较框架式惯性平台拥有更强

的抗干扰能力^[1-3]。

1 球体

球体是由质量轻、强度高的合金加工而成。球体内装有力矩器、悬浮垫、泵、姿态带、惯性器件和微型计算机等。浮球平台的姿态带用于测量球体的姿态。球体如图 1 所示。

收稿日期: 2017-10-21; 修订日期: 2017-11-18

作者简介: 宋辰(1994—), 男, 江苏盐城人, 硕士, 主要研究方向为浮球式惯性平台控制技术研究。

通讯作者: 张士峰(1971—), 男, 河南辉县人, 教授, 主要研究方向为飞行器总体设计。

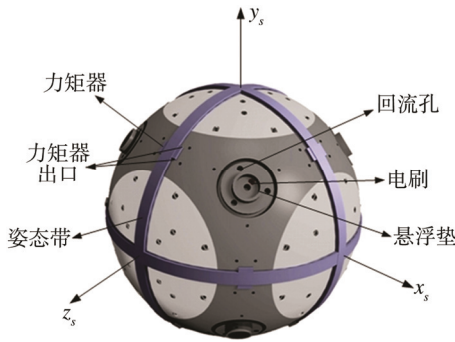


图 1 球体

球体中 8 个悬浮垫分别位于体坐标 8 个卦限的几何中心。涡轮泵将悬浮液从球体中心的储液箱中泵出，使其通过悬浮垫和力矩器流入球体与球壳的间隙。悬浮液再通过回流孔回流至中心储液箱，形成液体循环。悬浮垫上安装有电刷，电刷与球壳接触，供电电源通过球壳与电刷向球体内各电子器件供电。泵给悬浮垫供液使其产生液体静压支撑力，该支撑力使球体与球壳之间形成液体润滑层，达到球体与球壳分离的效果。另外，泵也给力矩器供液使其产生对球体的控制力矩，力矩器内部结构如图 2 所示。

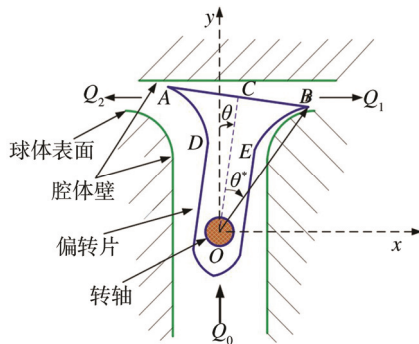


图 2 力矩器剖面

力矩器一共有 6 个，成对安装在球体系坐标轴平面上。每一对力矩器控制球体系一个轴方向上的转动。液体通过力矩器中心的偏转片分流，产生大小不同方向相反的射流，以此产生控制力矩。力矩的最大值受到泵功率的限制，即通过力矩器的液体流量 Q_0 不变。当偏转片偏转到极限，只有一个方向有射流时，力矩器的输出力矩达到最大。由于球体的体积限制，内部安装的涡轮泵功率较小，所以控制力矩的幅值较小。偏转片的转动由高精度步进电机控制，步进电机的转动速度恒定，所以力矩器的输出力矩变化的速度受到步进电机转动速度限制，因而力矩器具有力矩小、变化慢的缺点。

该缺点导致球体上力矩器的姿态控制作用有限，再加上球体各部分器件生产和装配产生的误差无法精确衡量，球体与球壳间隙中悬浮液的流动无法精确建模，产生一定非参数的干扰。在复杂干扰与控制作

用有限的条件下，就对球体转动控制策略的鲁棒性与精度提出了挑战。

自适应模糊滑模控制因其兼具自适应模糊系统的逼近能力和滑模控制的强鲁棒性，近年来引起了广泛的关注。王翠红等^[4]对自适应模糊滑模控制的分析与设计进行了详尽的阐释。要瑞璞^[5]等对模糊逻辑系统实现函数逼近的效果进行了仿真，得出了模糊逻辑系统可以以任意精度逼近真实系统的结论。薛月菊^[6]等在 SISO 系统的自适应模糊滑模控制的基础上，提出了基于最终吸引子的 MIMO 非线性自适应模糊滑模控制方法。沈启坤^[7]等提出了一种较好解决具有执行机构非线性特性的不确定非线性系统的自适应模糊控制问题的方法。鉴于自适应模糊滑模控制在响应速度、控制精度、鲁棒性和控制输出平滑上具有优势，文中将自适应模糊滑模理论应用于浮球平台球体高精度转动控制。

2 问题的提出

2.1 坐标系定义

对于解决自标定自对准问题，需要的坐标系如图 3 和图 4 所示。

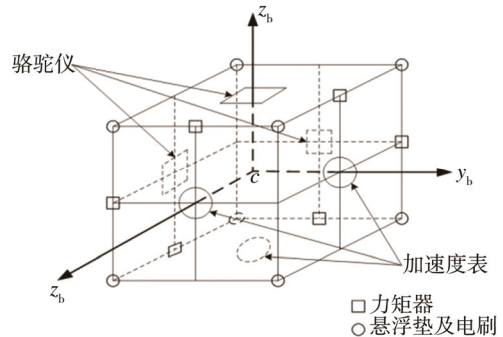


图 3 球体系及仪器安装结构

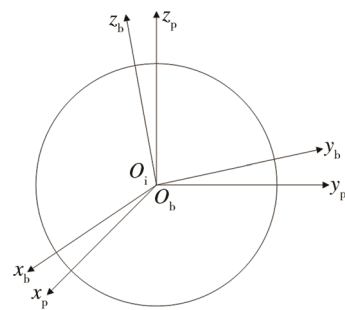


图 4 坐标系

图 3 为球体的内接正方形。球体系三轴过正方形三个表面的中心并构成右手系。可以看出，三个加速度表和三个陀螺仪分别正交安装在球体内，三个陀螺仪的敏感轴构成球体系。

球体系 (b 系) 与平台系 (p 系) 的关系如图 4 所示。平台系即原点为球体球心的北天东地理坐标系。

2.2 受力分析

控制球体转动的问题主要考虑作用在球体上的力矩。

1) 力矩器喷出射流所产生的控制力矩 M_u 。 M_u 的大小只与偏转片偏转的角度有关。控制输出控制高精度步进电机转动的步数从而决定偏转片转动的角度。设控制力矩与控制输出成线性关系, 即 $M_u = k_u u$ 。其中 k_u 为常数, 单位为 $N \cdot m / step$ 。

2) 由于制造工艺误差及安装误差导致球体质心偏离形心, 因而在球体重力和过载的作用下, 产生偏心力矩 M_a 。可以在装配前用配重的方法很大程度上减小偏心距, 使得 M_a 的影响可以忽略。

3) 球体的上的电刷会与球壳产生接触, 因而当球体发生转动时会产生滑动摩擦力矩 M_f 。其摩擦特性采用 Stribeck 模型描述:

$$F_f = \begin{cases} F_f(v), & v \neq 0 \\ F_m, & v = 0, \dot{v} = 0, |F_m| < F_s \\ F_s \operatorname{sgn}(F_m), & v = 0, \dot{v} \neq 0, |F_m| > F_s \end{cases} \quad (1)$$

$$F_f(v) = \left[F_c + (F_s - F_c) \exp(-|v/v_s|^2) \right] \cdot \operatorname{sgn}(v) + bv$$

式中: F_s , F_c 分别为最大静摩擦力和滑动摩擦力; F_m 为驱动力; F_f 为电刷摩擦力; v , \dot{v} , v_s 分别代表速度、加速度和 Stribeck 速度; b 代表粘滞摩擦系数^[8]。

球体上有 8 个电刷, 分别分布在 8 个悬浮垫的中心。则摩擦力矩 M_f 为:

$$M_f = \sum_{i=1}^8 F_{fi} \times \rho_i \quad (2)$$

$$v_i = \omega \times \rho_i$$

式中: ρ_i 每个电刷与球壳接触点的矢径; ω 为球体角速度; v_i 每个电刷与球壳接触点的速度。

4) 间隙内液体流动等原因产生未建模的干扰力矩 M_d 。设干扰力矩的为高斯型噪声。

2.3 动力学方程

根据动量矩守恒定理, 球体转动的动力学方程可写为:

$$L = I\omega \quad (3)$$

$$I^b \dot{\omega}^b + \omega^b \times (I^b \omega^b) = M_f^b + M_d^b + M_u^b \quad (4)$$

式中: L 为球体的动量矩; I 为球体的转动惯量, 由于球体的质量分布是中心对称的, 球体系的三轴即为球体的惯量主轴, 所以惯量积为 0。式(4)为式(3)求一阶导数后在球体系中的描述。将式(4)的向量沿球体系三轴展开得:

$$\begin{bmatrix} \dot{\omega}_x \\ \dot{\omega}_y \\ \dot{\omega}_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_x^{-1}(I_y \omega_y \omega_z - I_z \omega_y \omega_z + M_{fx} + M_{dx} + M_{ux}) \\ I_y^{-1}(I_z \omega_x \omega_z - I_x \omega_x \omega_z + M_{fy} + M_{dy} + M_{uy}) \\ I_z^{-1}(I_x \omega_y \omega_x - I_y \omega_y \omega_x + M_{fz} + M_{dz} + M_{uz}) \end{bmatrix} \quad (5)$$

3 自适应模糊滑模控制器设计

3.1 自适应滑模控制器设计

根据自标定自对准的任务需求, 即绕单轴旋转一定角度, 所以考虑球体在球体系下仅绕 x 轴旋转, 动力学方程可以简化为:

$$\theta_x = \dot{\theta}_x \quad (6)$$

$$\ddot{\theta}_x = I_x^{-1}(M_{fx}(\dot{\theta}_x) + M_{ux}(t) + M_{dx}(t))$$

设未建模干扰力矩 $|M_{dx}| \leq D$, 跟踪信号为 θ_{dx} , 系统跟踪误差为 $e = \theta_x(t) - \theta_{dx}(t)$ 。

定义切换函数为:

$$s = ce + \dot{e} \quad (7)$$

式中: c 为常数, 是一个可调节参数, 可调节跟踪信号的收敛速度。为了快速响应并减少静差, 取指数趋近率, 即:

$$\dot{s} = -\varepsilon \operatorname{sgn}(s) - ks \quad (8)$$

式中: $\varepsilon > D$; k 为常数, 是一个可调节参数, 可加快响应速度, 减小静差。

$$\dot{s} = c\dot{e} + \ddot{e}$$

$$-\varepsilon \operatorname{sgn}(s) - ks = c\dot{e} + \ddot{e} = \ddot{\theta}_x(t) - \ddot{\theta}_{dx}(t) \quad (9)$$

则滑模控制律可设计为:

$$M_{ux}(t) = I_x(\ddot{\theta}_{dx} - c\dot{e} - ks - \varepsilon \operatorname{sgn}(s)) - M_{fx}(\dot{\theta}_x) - M_{dx}(t) \quad (10)$$

由于 $M_{dx}(t)$ $M_{fx}(t)$ 未知, 为了增加鲁棒性, 并削减抖振平滑控制器输出, 采用自适应模糊系统 $\hat{h}(s)$ 逼近切换控制项 $\varepsilon \operatorname{sgn}(s)$ 。则控制律变为:

$$M_{ux}(t) = I_x(\ddot{\theta}_{dx} - c\dot{e} - ks - \hat{h}(s)) - M_{fx}(\dot{\theta}_x) - M_{dx}(t) \quad (11)$$

模糊逻辑系统的规则由 IF-THEN 语句描述:

$$R^j: \text{if } s \text{ is } A^j \text{ then } h(s) \text{ is } B^j$$

式中: R^j 表示第 j 个模糊规则, $j=1, 2, \dots, m$, 是模糊规则数; $s \in U \in R$ 是模糊逻辑系统的输入; $h(s) \in W \in R$ 是模糊系统的输出。 A^j 是在论域 U 和 W 上定义的模糊语言值。

采用单值模糊化, 乘机推理机和中心平均解模糊器设计模糊系统。则模糊逻辑系统(FLS)可表示为:

$$\hat{h}(s) = \frac{\sum_{j=1}^m h^j \mu_{A^j}(s)}{\sum_{j=1}^m \mu_{A^j}(s)} \quad (12)$$

式中: $\mu_{A^j}(s)$ 为 s 的隶属函数。

引入向量 $\phi(s) = [\phi^1(s) \dots \phi^m(s)]^T$ 与 $\hat{c}_h = [h^1 \dots h^m]^T$ 则式(12)可表示为:

$$\hat{h}(s) = \hat{c}_h^T \phi(s) \quad (13)$$

$$\phi(s) = \frac{\mu_{A^j}(s)}{\sum_{j=1}^m \mu_{A^j}(s)}$$

式中： $\hat{h}(s|\hat{\xi}_h)$ 为模糊系统输出； $\phi(s)$ 为模糊向量；向量 $\hat{\xi}_h^T$ 根据自适应率而变化。

对于给定一个正数 λ ，模糊逻辑系统总存在最优的权向量 ξ_h^* 满足^[9]：

$$\sup_{s \in \Omega} |\hat{h}(s|\xi_h^*) - \varepsilon \operatorname{sgn}(s)| \leq \lambda \quad (14)$$

式中： $\varepsilon > D$ ； Ω_s 为 s 的可行域。

其自适应率为：

$$\dot{\hat{\xi}}_h = \gamma s \phi(s) \quad (15)$$

式中： $\gamma > 0$ ， γ 为自适应率系数。

3.2 稳定性证明

定义最优参数为：

$$\xi_h^* = \arg \min_{\theta \in \Omega_\theta, s \in \Omega_s} [\sup |\hat{h}(s|\xi_h) - \varepsilon \operatorname{sgn}(s)|] \quad (16)$$

式中： Ω_θ 和 Ω_s 分别为 θ 和 s 的可行域。则：

$$\begin{aligned} \dot{s} &= c\dot{e} + I_x^{-1}(\mathbf{M}_{\text{fx}}(\dot{\theta}_x) + \mathbf{M}_{\text{ux}}(t) + \mathbf{M}_{\text{dx}}(t)) - \ddot{\theta}_{\text{dx}} \\ -\varepsilon \operatorname{sgn}(s) &= ks + c\dot{e} + I_x^{-1}(\mathbf{M}_{\text{fx}}(\dot{\theta}_x) + \mathbf{M}_{\text{ux}}(t) + \mathbf{M}_{\text{dx}}(t)) - \ddot{\theta}_{\text{dx}} \\ &= -\hat{h}(s|\hat{\xi}_h) + I_x^{-1} \mathbf{M}_{\text{dx}}(t) \\ &= -\hat{h}(s|\hat{\xi}_h) + I_x^{-1} \mathbf{M}_{\text{dx}}(t) + \hat{h}(s|\xi_h^*) - \hat{h}(s|\xi_h^*) \\ &= \tilde{\xi}_h^T \phi(s) + I_x^{-1} \mathbf{M}_{\text{dx}}(t) - \hat{h}(s|\xi_h^*) \end{aligned} \quad (17)$$

式中： $\tilde{\xi}_h = \xi_h^* - \hat{\xi}_h$ 。

Lyapunov 函数为：

$$V = \frac{1}{2}(s^2 + \frac{1}{\gamma} \tilde{\xi}_h^T \tilde{\xi}_h) \quad (18)$$

则：

$$\begin{aligned} \dot{V} &= s\dot{s} + \frac{1}{\gamma} \tilde{\xi}_h^T \dot{\tilde{\xi}}_h \\ &= s(\tilde{\xi}_h^T \phi(s) + I_x^{-1} \mathbf{M}_{\text{dx}}(t) - \hat{h}(s|\xi_h^*)) + \frac{1}{\gamma} \tilde{\xi}_h^T \dot{\tilde{\xi}}_h \quad (19) \\ &= s\tilde{\xi}_h^T \phi(s) + \frac{1}{\gamma} \tilde{\xi}_h^T \dot{\tilde{\xi}}_h + s(I_x^{-1} \mathbf{M}_{\text{dx}}(t) - \hat{h}(s|\xi_h^*)) \end{aligned}$$

由于

$$\hat{h}(s|\xi_h^*) = \varepsilon \operatorname{sgn}(s) \quad (20)$$

则有

$$\dot{V} = \frac{1}{\gamma} \tilde{\xi}_h^T (\gamma s \phi(s) - \dot{\tilde{\xi}}_h) + s I_x^{-1} \mathbf{M}_{\text{dx}}(t) - \varepsilon |s| \quad (21)$$

其中 $\dot{\tilde{\xi}}_h = -\dot{\hat{\xi}}_h$ 。

由式(15)代入可得

$$\dot{V} = s I_x^{-1} \mathbf{M}_{\text{dx}}(t) - \varepsilon |s| \leq 0 \quad (22)$$

可见当 $\dot{V} = 0$ 时， $s \equiv 0$ ，则根据 LaSalle 不变集原理， $t \rightarrow \infty$ 时， $s \rightarrow 0$ 。系统是渐进稳定的，系统状态的跟踪误差可以在有限时间内收敛到 0。

4 系统仿真分析

定义切换函数 s 的隶属函数为：

$$\begin{aligned} \mu_N(s) &= 1/[1 + \exp(5(s+3))] \\ \mu_Z(s) &= \exp(-s^2) \\ \mu_P(s) &= 1/[1 + \exp(-5(s-3))] \end{aligned} \quad (23)$$

设置 $\hat{\xi}_h^T$ 为 3×1 向量，初始值为 0.1。不失一般性，在 x 轴方向上进行仿真。设置 x 轴方向上的角度初始值设为 0.1 rad，角加速度初始值设置为 0.01 rad/s，干扰力矩 \mathbf{M}_d 为高斯型噪声，设其均值为 0，幅值为 0.1 N·m 仿真参数见表 1。

表 1 仿真参数

参数	数值	参数	数值
ρ_{shell}	200 mm	I_x	0.533 kg/m ²
F_s	0.35	I_y	0.533 kg/m ²
F_c	0.2	I_z	0.533 kg/m ²
v_s	0.02 m/s	c	50
k	100	γ	150
k_u	0.02 N·m/step	ε	10

在 Simulink 下建立仿真程序，根据自适应模糊滑模控制器规则编写 S 函数，并在不同的输入条件下进行仿真。射流力矩器工作范围在 ± 10 N·m 以内。控制输出与力矩器的转换系数为 0.02 N·m/step，即控制输出的范围在 ± 500 步以内。取输入信号为正弦信号，幅值为 180°，频率为 2 (°)/s，用来测试自适应模糊滑模控制的控制能力。结果如图 5—8 所示。

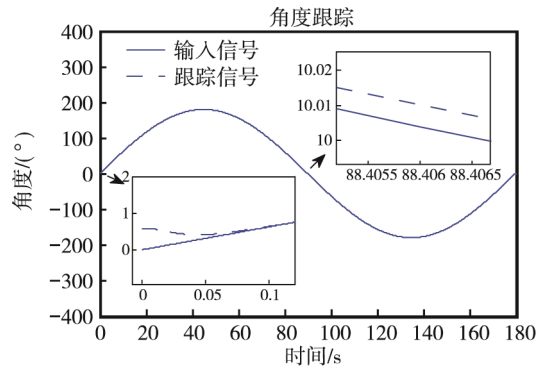


图 5 正弦信号自适应模糊滑模控制角度跟踪

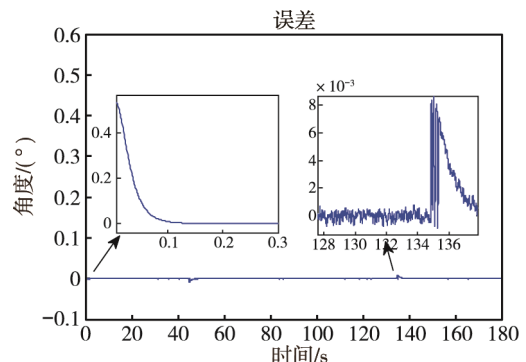


图 6 正弦信号自适应模糊滑模控制误差曲线

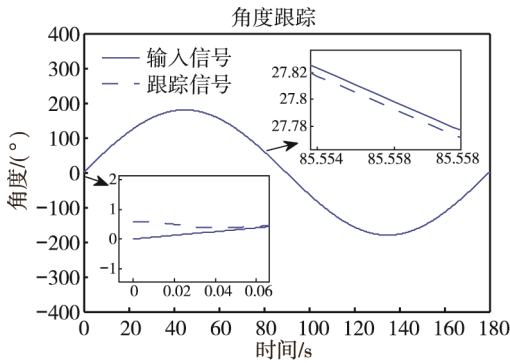


图7 正弦信号滑模控制角度跟踪

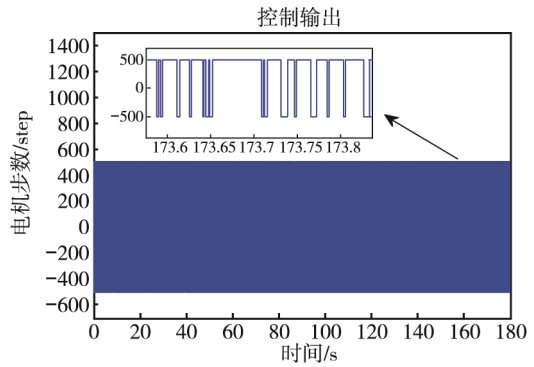


图10 正弦信号滑模控制输出

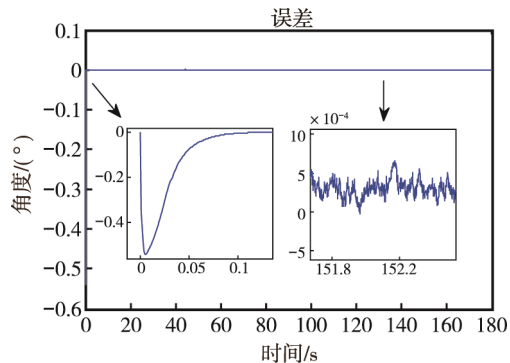


图8 正弦信号滑模控制误差曲线

自适应模糊滑模控制器的球体角度跟踪曲线如图5所示,相应的误差曲线如图6所示。由图5图6可知,该控制器能快速跟踪上球体的输入信号,约0.06 s后误差小于0.01°。可以看到未建模的干扰力矩 M_d 对控制效果造成了一定的影响,然而控制器仍能很好的跟踪输入信号,体现了该控制器的强鲁棒性和快速性。如局部放大图所示,输入信号斜率过零点时,误差曲线相对其他时刻抖振的更厉害,但其取值也保持在0.01°的范围内。

作为对比,用滑模控制方法对球体施控,跟踪同样的正弦输入信号。可以看出滑模控制对输入信号跟踪的略好于自适应模糊滑模控制,其跟踪误差在 10^{-4} 的范围内。这两种方法的主要区别在于控制输出上,如图9和图10所示。

对比图9与图10,对于同一个输入信号,两种控制方法的控制输出截然不同,自适应模糊滑模控制器在一开始初始误差较大的情况下,控制输出产生了

一次幅值为500步的抖振,使球体的转动快速跟踪上输入信号。在误差缩小后,其控制输出的变化趋于平缓,基本维持在10步以内,只有在输入信号斜率接近0的时候产生振幅约为40步的抖振。以UIROBOT的UIM242系列高精度步进电机为例,其可达到的最大转速为65000 step/s。因此除了初始时刻外,步进电机能满足其控制输出的变化。初始时刻达到步进电机幅值的时刻持续了0.015 s,而步进电机从0步转到-500步需要0.0077 s。在实际应用中,可能会对跟踪的快速性产生一点影响,但由于控制器的强鲁棒性,该影响会很快消除。相反滑模控制器的控制输出全程都抖振强烈,控制输出的振幅为高精度步进电机的最大输出,即500步。显然作为物理执行机构的步进电机无法跟踪上仿真中控制输出突变的情况,所以在仿真条件下的角度跟踪,可能与真实实验之间存在较大偏差。自适应模糊滑模控制本质上是在滑模控制的基础上抑制滑模控制的抖振特性,所以会在牺牲小部分精度的情况下,很大程度上平滑了控制输出。其主要表现在对滑模控制的控制切换项进行自适应模糊逼近。两种方法的控制切换项变化图11与图12所示。

从图11和图12中可以看出,自适应模糊逼近的控制切换项变化较为平滑,控制切换项的变化与输出信号的斜率相关。高斯型干扰力矩对自适应模糊逼近的控制切换项影响较小。滑模控制的控制切换项抗干扰能力低,在干扰力矩的作用下,模控制的控制切换项中的 $\text{sng}(s)$ 反复切换正负号,使得控制输出出现强烈的抖振现象。

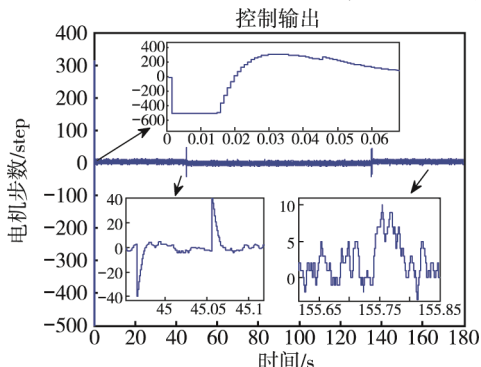


图9 正弦信号自适应模糊滑模控制输出

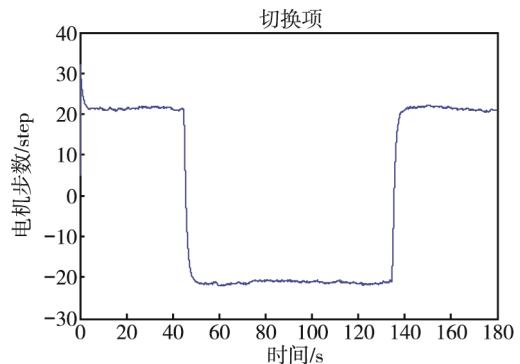


图11 自适应模糊逼近的控制切换项

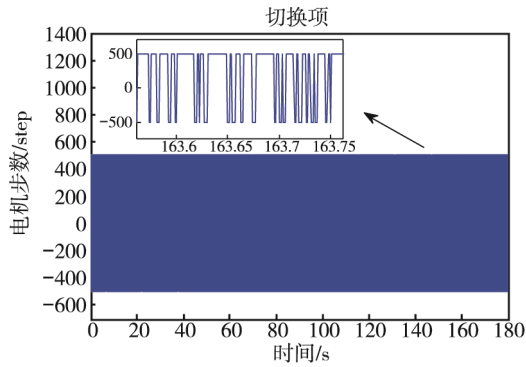


图 12 滑模控制的控制切换项

根据自标定自对准的需求，改用斜坡信号作为输入信号，以 $1 (^{\circ})/s$ 的角速度旋转 90° ，以测试自适应模糊滑模系统的跟踪精度。跟踪误差需要低于 0.01° 才能满足要求。其仿真结果如图 13 和图 14 所示。

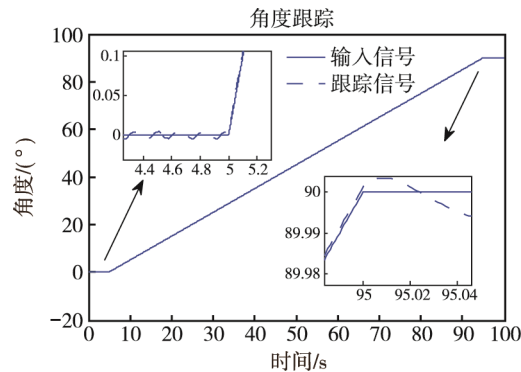


图 13 斜坡信号自适应模糊滑模控制跟踪

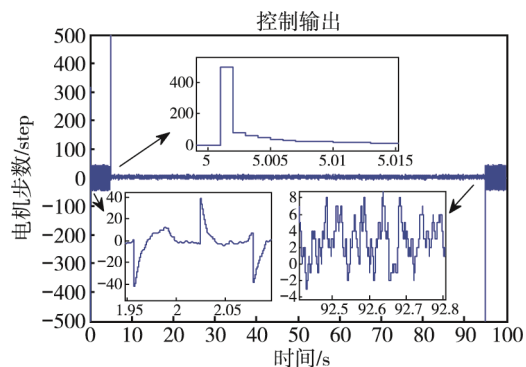


图 14 斜坡信号自适应模糊滑模控制输出

从图 13 与图 14 可以看出，当输入信号为斜坡信号时，自适应模糊滑模控制器跟踪性能优秀，能够快速跟踪上斜坡信号。控制输出在输入信号斜率为零时变化较大，振幅在 ± 40 步以内，在输入信号斜率大于零时振幅较小，在 $-2 \sim +8$ 范围内，其均值略大于 0。在输入信号斜率突变时，控制输入也产生一次较大的变化，以快速跟踪输入信号。除了在输入信号斜率突变时以外，仿真得到的控制输出较为平滑，是步进电机可以执行的控制输出。而在输入信号斜率突变时，由于控制输出的突变到 500 步只持续了 0.001 s 就回落至 100 步。由于突变的持续时间极短，对信号跟踪的影响不大，且该影响会由于鲁棒性而快速消除。

从图 15 中可以看出，自适应模糊滑模控制的跟踪精度较高，在输入斜坡信号的平台段跟踪误差保持在 0.01° 以内，在输入斜坡信号的上升段，跟踪误差更小，保持在 0.001° 以内。可以看出，该控制能够满足自标定自对准对跟踪误差小于 0.01° 的要求。

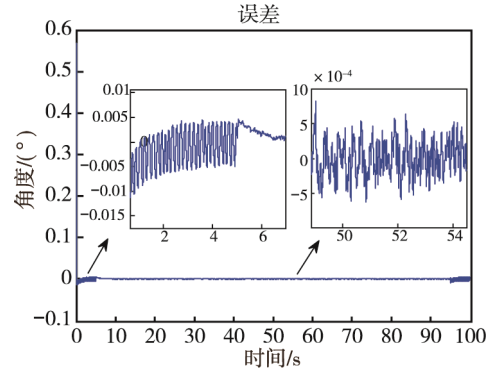


图 15 斜坡信号自适应模糊滑模误差曲线

5 结论

文中分析了浮球平台的受力情况，建立了球体转动的动力学模型。针对未建模的干扰力矩，设计了一种结合了自适应模糊系统与滑模控制的控制方法。仿真结果表明，相比于滑模控制，自适应模糊滑模控制的抗干扰能力更强，其控制输出较滑模控制的控制输出更为平滑，且系统的控制精度能保持在 0.01° 以内，从而保证了球体的转动精度。另外，跟传统滑模控制作对比，证明了该控制方法可以有效降低滑模控制的抖振问题，控制输出在执行机构的能力范围内。因此自适应模糊滑模控制方法能满足球体高精度转动的需求并且满足力矩器对控制输出的要求。

参考文献：

- [1] 张宗美. 浮球平台[J]. 国外导弹与航天运载器, 1991(Z1): 62-83.
- [2] FITZGERALD W J, SHAPANKA M J. An Azimuth Verification Technique for an Advanced Inertial Reference Sphere[C]// Guidance and Control Conference. 1979.
- [3] LI A L, CAI H, ZHANG S F, et al. Robust Stabilization Control for the Floated Sensor Inertial Platform[J]. Sensor Lett, 2013, 11(1-4): 2094-2097.
- [4] 王翠红. 自适应模糊滑模控制的设计与分析[D]. 成都: 西南交通大学, 2002.
- [5] 要瑞璞. 利用模糊逻辑系统实现函数逼近的仿真研究[J]. 计算机仿真, 2005, 22(7): 91-93.
- [6] 薛月菊, 杨士元, 冯汝鹏. MIMO 非线性自适应模糊滑模控制[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2003, 35(1): 97-100.
- [7] 沈启坤. 具有执行机构非线性的稳定自适应模糊控制研究[D]. 扬州: 扬州大学, 2007.
- [8] 杨松. 高精度机械轴承转台摩擦补偿研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2009.
- [9] WANG L X. Stable Adaptive Fuzzy Control of Nonlinear Systems[S]. IEEE Trans Fuzzy Systems. 1993, 1(2): 146-155.