

浮球式惯导平台的自适应模糊滑模稳定控制*

李安梁, 蔡洪, 白锡斌

(国防科技大学 航天科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘要:针对浮球式惯导平台的惯性空间稳定问题,提出了一种基于模糊逻辑的自适应滑模控制方案。该方法利用滑模控制器保证了系统的稳定性和快速性,解决了浮球式惯导平台参数不确定、未建模动态等未知干扰问题;基于滑模控制器的设计问题,利用模糊逻辑和自适应控制律,调节滑模控制器的参数,估计并补偿系统的外界干扰及不确定性等干扰,增强系统对随机不确定性的适应能力,提高控制系统的鲁棒性和控制精度;利用 Lyapunov 方法证明了控制系统的稳定性与收敛性。仿真结果表明,该方法可以有效减低滑模控制控制输入抖振问题,实现浮球式惯导平台的高精度惯性空间稳定,且稳定精度高于 0.1°。

关键词:浮球式惯导平台;稳定控制;自适应模糊滑模控制

中图分类号:V241.62⁺² 文献标志码:A 文章编号:1001-2486(2013)06-0041-05

Adaptive fuzzy sliding mode stabilization control for floated inertial platform

LI Anliang, CAI Hong, BAI Xibin

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

Abstract: A control algorithm of adaptive sliding mode control based on fuzzy logic is proposed for the inertial stabilization problem of the floated inertial platform (FLIP). The sliding mode control was used to solve the parameters uncertainty and unmodeled dynamics of the FLIP, which guarantees the stability and rapidity of the system. Then, by focusing on the design problem of the sliding mode control, the gain of a sliding mode control was adjusted by using the fuzzy logic with an adaptive tuning algorithm, which enhanced the adaptability for random uncertainty and improved the robust performance and the stabilization accuracy of the controller. Finally, the stability and convergence of the control system were proven by using the Lyapunov method. The simulation results demonstrate that the proposed method can eliminate the input chattering of the sliding mode control efficiently, and the inertial stabilization of the FLIP is realized with the accuracy higher than 0.1°.

Key words: floated inertial platform; stabilization control; adaptive fuzzy sliding mode control

随着战略武器在现代高科技战争中的作用日益凸显,对制导系统的精度和抗扰能力等要求越来越高。作为现役精度最高的战略惯导平台,浮球式惯导平台(或高级惯性参考球,简称浮球平台),因其精度高、抗干扰能力强和可靠性高等突出的优点,成为制导系统领域研究的热点,并装备了“和平卫士”和“侏儒”等战略导弹^[1]。目前,国内对于浮球平台的研究尚处于理论研究阶段,在理论上和工程应用方面还存在许多问题需要深入研究^[2-3]。

与传统的框架平台不同,浮球平台是一种无框架的液浮稳定平台,利用球体代替了多框架系统,惯性测量组合安装在球体内并悬浮在液体中,从而有效隔离了外界环境的干扰,消除了动态条件下轴承摩擦和台体变形等框架系统固有因素的影响,极大地改善了惯性测量组合的测量环境,提

高了平台的精度和抗干扰能力。球体是平台的稳定部件,其基本任务是保持球体惯性空间稳定,为平台提供惯性参考基准。然而球体悬浮在液体中,动态环境下流体的摩擦、球体的质量不平衡以及电刷的滑动摩擦等干扰,以及未建模动态、模型参数不确定等未知干扰的存在,使浮球的悬浮稳定控制问题变得非常复杂^[4-5]。

近年来,自适应模糊滑模控制(AFSMC)因其强鲁棒性受到许多研究者的高度重视^[6-8]。赵红超等^[9]将弹头的俯仰通道和偏航通道间的强耦合项看作是不确定项,利用自适应模糊滑模控制实现了变质心弹头的机动控制。董朝阳,王枫等^[10]针对导弹直接力/气动力复合控制问题,提出了一种基于自适应滑模控制与模糊逻辑的自动驾驶仪设计方法。文献[11]针对一类 SISO 连续

* 收稿日期:2013-05-07

基金项目:航天科技创新基金资助项目(201105)

作者简介:李安梁(1986—),男,湖南涟源人,博士研究生,E-mail:anliangli@126.com;
蔡洪(通信作者),男,教授,博士,博士生导师,E-mail:Hcai@nudt.edu.com

非线性系统的未建模动态和有界干扰问题,利用自适应模糊滑模控制研究了电动液压伺服机构的控制。文献[12]引入终端滑模控制,研究了移动机器人的 MIMO 的自适应模糊滑模控制方法。本文拟将自适应模糊滑模控制理论应用于浮球平台的精确稳定控制中,实现球体在复杂干扰条件下的惯性空间稳定。

1 问题的提出

浮球平台是一种高精度的惯导平台。如图 1 所示,浮球平台主要由球体、壳体、悬浮垫和力矩器等组成。球体悬浮在液体中,壳体与载体固连,八个悬浮垫对称安装在球体表面。惯性测量器件安装在球体内,其敏感轴构成惯性参考系,用来测量球体的角度信息。

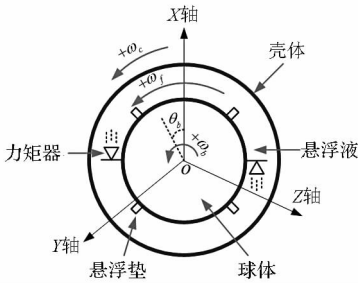


图 1 浮球平台结构示意图

Fig. 1 The schematic representation of the structure of floated inertial platform

在浮球平台中,球体利用悬浮垫的液压支撑力悬浮稳定在球形壳体内以隔离外界的运动,壳体运动是平台干扰的主要来源。壳体运动时,悬浮液的流场特性发生改变,球体受干扰力和干扰力矩的影响,产生位移和角运动。然而在悬浮垫的液压支撑力的作用下,球体的位移量可以忽略不计,量级为 $10^{-4} \text{m}^{[2]}$ 。因此,浮球平台的稳定控制问题主要考虑球体的绕质心运动控制。作用在球体的力矩主要有:

(1) 力矩器产生的流体反作用控制力矩 (T_v),在要求的频域内克服干扰,控制球体的角运动。 $T_v = K_v u, K_v$ 为力矩器系数, u 为系统的控制量;

(2) 流体与球体之间的摩擦力矩 (T_{fr}),大小与相对速度成正比,方向与相对速度相反。 $T_{fr} = C_1(\omega_f - \omega_b), C_1$ 为球体与悬浮液之间的流体摩擦阻尼系数, ω_b 和 ω_f 分别为球体、悬浮液的角速率。

(3) 电刷与壳体之间的滑动摩擦力矩 (T_{br}),平台通过电刷接触壳体传输电源和信号。其摩擦特性一般用 Stribeck 模型描述:

$$F_r = s(v) = F_c + (F_s - F_c) \exp\left(-\left|\frac{v}{V_s}\right|^\delta\right) \quad (1)$$

其中 F_c 为库伦摩擦力, F_s 为静摩擦力, V_s 为 Stribeck 速度, v 为电刷与球体的相对速度, δ 为品质参数,一般设为 1。则滑动摩擦力矩 $T_{br} = F_r R \text{sign}(\omega_c - \omega_b), R$ 为壳体的半径, $\text{sign}(\cdot)$ 为符号函数。

(4) 未建模的干扰力矩 (T_u) 和随机干扰力矩 (w_a)。

忽略浮球平台三轴之间的铰链,由角动量守恒定理得球体的绕质心运动方程,为

$$I_b \ddot{\theta} = T_v + C_1(\omega_f - \omega_b) + T_d \quad (2)$$

$$I_f \dot{\omega}_f = -T_v + C_2(\omega_c - \omega_f) - C_1(\omega_f - \omega_b) \quad (3)$$

其中 I_b 和 I_f 为球体、悬浮液的主惯量矩阵; θ 为球体的转动角; C_2 为壳体与悬浮液之间的流体摩擦阻尼系数; $T_d = T_{br} + T_u + w_a$ 为球体受到的其它干扰力矩。

则球体绕质心运动的状态方程为

$$\begin{bmatrix} I_b & 0 \\ 0 & I_f \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\omega}_b \\ \dot{\omega}_f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -C_1 & C_1 \\ C_1 & -C_2 - C_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_b \\ \omega_f \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} T_v + T_d \\ -T_v + C_2 \omega_c \end{bmatrix} \quad (4)$$

利用傅里叶变换,可得

$$\begin{bmatrix} I_b s + C_1 & -C_1 \\ -C_1 & I_f s + C_1 + C_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_b \\ \omega_f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_v + T_d \\ -T_v + C_2 \omega_c \end{bmatrix} \quad (5)$$

不失一般性,考虑平台的单轴系统。假设平台绕 X 轴旋转,球体的转动角速率的传递函数为
$$\omega_b = \frac{(I_f s + C_2) T_v + (I_f s + C_1 + C_2) T_d + C_1 C_2 \omega_c}{I_b I_f s^2 + [I_f C_1 + I_b (C_1 + C_2)] s + C_1 C_2} \quad (6)$$

浮球平台单轴系统干扰特性如图 2 所示。

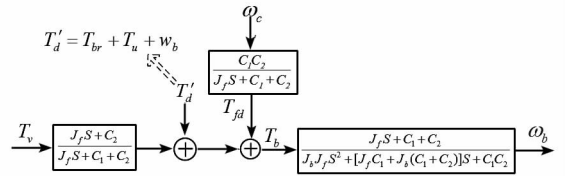


图 2 平台的干扰特性

Fig. 2 The disturbance characteristic of platform

然而在实际的应用过程中,模型参数不确定性严重且存在未建模动态等未知干扰,在复杂干扰条件下控制系统的鲁棒性能,是本文重点考虑的问题。

2 自适应模糊滑模控制器设计

自适应模糊滑模控制结合了滑模控制和自适应模糊逻辑控制的优点,利用滑模控制器保证了

系统的稳定性和快速性,并引入自适应模糊控制器实时调节滑模控制器的参数,实现对系统不确定项的估计和补偿,可以提高系统的鲁棒性。

考虑浮球平台的单轴系统,将球体的动力学方程(2)改写为

$$\ddot{\theta} = f(\theta, \dot{\theta}, t) + g(t)u(t) + d(t) \quad (7)$$

其中, $f = c_1\dot{\theta}$, $g = K_v$ 且 $g > 0$, $d(t) = c_1\omega_f + T_d$ 为平台的干扰。令 $\theta_d(t)$ 为角度指令,定义系统的跟踪误差为 $e(t) = \theta(t) - \theta_d(t)$,滑模控制的滑模面取为

$$s(t) = \dot{\theta}(t) - \int_0^t (\ddot{\theta}_d - k_1\dot{e}(t) - k_2e(t)) dt \quad (8)$$

其中, k_1 和 k_2 为非零正常数。

则当滑模控制处于理想状态,有 $s(t) = \dot{s}(t) = 0$,由式(7)可得系统的控制律为

$$u^*(t) = g^{-1}(-f - d + \ddot{\theta}_d - k_1\dot{e} - k_2e) \quad (9)$$

然而,在实际情况下,系统的结构和参数具有不确定性,且伴有未知干扰的影响,式(9)中 f 、 g 及 d 具有极大的时变性, $u^*(t)$ 难以直接获得。为此,利用模糊控制逼近 $u^*(t)$ 。

2.1 模糊滑模控制器设计

自适应模糊控制器的输出为 u_{fz} ,将滑模面 s 和 \dot{s} 作为模糊系统的输入量。系统的输入输出的模糊集分别定义为

$$s/\dot{s} = \{P \quad N \quad Z\} \quad (10)$$

$$u_{fz} = \{NB \quad NM \quad ZO \quad PM \quad PB\} \quad (11)$$

式中 P 为正, N 为负, Z 为零, u_{fz} 的模糊子集选取为: NB 为负大, NM 为负中, ZO 为零, PM 为正中, PB 为正大。模糊控制规则如表1所示。

表1 模糊控制规则表
Tab.1 Fuzzy logic rule table

s	u_{fz}		
	$\dot{s} = P$	Z	M
P	NB	P	NB
Z	NM	Z	NM
M	NM	M	NM

由表1可知,当系统状态位于滑模面外且背离滑模面运动时,采用较大的控制作用以使系统状态快速返回到滑模面上;但当系统状态位于滑模面内时,采用较小的控制作用以抑制抖振。

清晰化方法采用重心法,模糊控制器的输出量为

$$u_{fz} = \frac{\sum_{i=1}^n \alpha_i \omega_i}{\sum_{i=1}^n \omega_i} = \sum_{i=1}^n \alpha_i \frac{\omega_i}{\sum_{i=1}^n \omega_i} = \alpha^T \xi^T \quad (12)$$

式中 ω_i 为第 i 条模糊规则的隶属函数; n 为模糊规则的总数目, $n = 5$; α_i 为 u_{fz} 的隶属函数的中心, $\alpha = [\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n]^T$ 为可调参数向量, $\xi = [\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_m]^T$, $\xi_i = \omega_i / \sum_{i=1}^m \omega_i$ 为模糊基向量。

根据一致逼近原理,模糊控制器式(12)在某一紧集中能够以任意精度一致逼近任意的连续实函数。因此,存在一个最优模糊控制输出量 $u_{fz}(s, \alpha^*)$,它能够以任意精度逼近 $u^*(t)$,保证滑模控制的达到条件,即

$$u^*(t) = u_{fz}(s, \alpha^*) + \varepsilon = \alpha^{*T} \xi + \varepsilon \quad (13)$$

其中, ε 为逼近误差,满足 $|\varepsilon| < E$ 。

采用模糊系统 u_{fz} 逼近 $u^*(t)$,则

$$u_{fz}(s, \hat{\alpha}) = \hat{\alpha}^T \xi^T \quad (14)$$

其中, $\hat{\alpha}$ 为 α^* 的估计值。采用切换控制律 u_{vs} 来补偿逼近误差,则模糊滑模控制律变为

$$u(t) = u_{fz} + u_{vs} \quad (15)$$

2.2 自适应控制律设计

由式(13),得

$$\tilde{u}_{fz} = \hat{u}_{fz} - u^* = \hat{u}_{fz} - u_{fz}^* - \varepsilon \quad (16)$$

定义 $\tilde{\alpha} = \hat{\alpha} - \alpha^*$,则式(14)变为

$$\tilde{u}_{fz} = \tilde{\alpha}^T \xi - \varepsilon \quad (17)$$

由式(9)和式(15)得

$$\dot{s}(t) = g(t)(u_{fz} + u_{vs} - u^*(t)) \quad (18)$$

设计自适应控制律和切换控制为

$$\dot{\tilde{\alpha}} = \dot{\hat{\alpha}} = -\eta_1 s(t) \xi \quad (19)$$

$$u_{vs} = -E(t) \text{sgn}(s(t)) \quad (20)$$

其中, η_1 为正的实数。在实际的控制中,切换函数的切换增益 $E(t)$ 很难确定,如果 $E(t)$ 值选得过大,则会产生大的抖振;若 $E(t)$ 过小,则控制系统不稳定。由于外界干扰与结构参数的不确定性,切换增益 $E(t)$ 也应该是变化的。利用 $\hat{E}(t)$ 代替 $E(t)$,设计如下自适应控制律,以保证系统的鲁棒性。

$$u_{vs} = -\hat{E}(t) \text{sgn}(s(t)) \quad (21)$$

其中, $\hat{E}(t)$ 为估计的切换增益。

定理1 考虑由式(12),式(15)及自适应律:式(19),式(20)构成控制律的动力学系统(7),则所有状态有界,且跟踪误差收敛到零的任意小邻域,系统渐近稳定。

证明 令估计误差 $\bar{E}(t) = \hat{E}(t) - E$,定义 Lyapunov 函数为

$$V(t) = \frac{1}{2}s^2(t) + \frac{g(\theta)}{2\eta_1} \tilde{\alpha}^T \tilde{\alpha} + \frac{g(\theta)}{2\eta_2} \tilde{E}^T \tilde{E} \quad (22)$$

其中, η_2 为正的实数。则

$$\begin{aligned} \dot{V}(t) &= s(t)\dot{s}(t) + \frac{g(t)}{2\eta_1}\tilde{\alpha}^T \dot{\tilde{\alpha}} + \frac{g(t)}{2\eta_2}\tilde{E}^T \dot{\tilde{E}} \\ &= g(t)\tilde{\alpha}^T(s(t)\xi + \frac{1}{2\eta_1}\dot{\tilde{\alpha}}) \\ &\quad + s(t)g(t)(u_{vs} - \varepsilon) + \frac{g(t)}{2\eta_2}\tilde{E}^T \dot{\tilde{E}} \\ &= -\hat{E}(t)|s(t)|g(t) - \varepsilon s(t)g(\theta) \\ &\quad + (\hat{E}(t) - E)|s(t)|g(t) \\ &= -\varepsilon s(t)g(t) - E|s(t)|g(t) \\ &\leq |\varepsilon||s(t)|g(t) - E|s(t)|g(t) \\ &\leq -(E(t) - \varepsilon)|s(t)|g(t) \leq 0 \end{aligned}$$

因此可知,采用自适应控制律:式(19)和式(21),系统是渐近稳定的,系统状态的跟踪误差可以在有限时间内收敛到零。

3 仿真与分析

令 $\hat{\alpha}$ 和 \hat{E} 的初始值为 0, 控制器参数 $\eta_1 = 200$, $\eta_2 = 100$, 模糊控制器隶属函数为 $\mu = \exp[-((s + \pi/12 \cdot i)/(\pi/24))^2]$, $i = -2, -1, 0, 1, 2$ 。滑模面参数 $k_1 = 20, k_2 = 1, \phi = 0.0005$, 其余仿真参数如表 2 所示^[4]。

表 2 系统仿真参数

Tab. 2 Systemic simulation parameters

参数	数值	参数	数值
C_1	2	C_2	1
K_v	12.51	ξ_v	9000
ω_v	1360rad/s	F_c	0.28N
F_s	0.28N	R	0.13m
T_u	0.036kg·m ²	w_a	0.0036kg·m ²

进行仿真分析时,考虑力矩器的质量,阻尼性质和弹性抑制扭矩,力矩器产生的控制力矩与控制指令的传递函数取为

$$T_v = \frac{K_v}{\left(\frac{s^2}{\omega_v^2} + \frac{2\xi_v}{\omega_v}s + 1\right)}u \quad (23)$$

采用控制律:式(15)及自适应律:式(19)和式(21),考虑系统的流体摩擦力矩、电刷滑动摩擦力矩、未建模的干扰力矩和随机噪声,令初始状态 $\theta = 10^\circ$,系统的仿真结果如图 3 ~ 图 5 所示。

如图 3 和图 4 所示,球体在自适应模糊滑模控制系统的作用下,可以有效抵抗复杂干扰的影响,具有较强的抗扰能力,且稳定精度高于 0.1° ,稳定时间低于 0.6s。因此,本文所提出的自适应

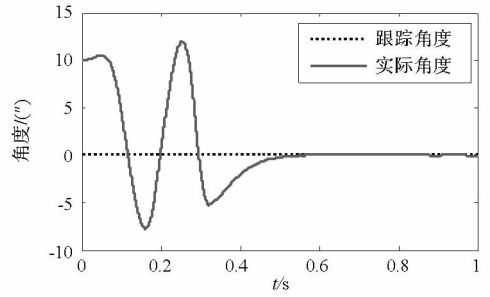


图 3 角度跟踪

Fig. 3 The angle tracking

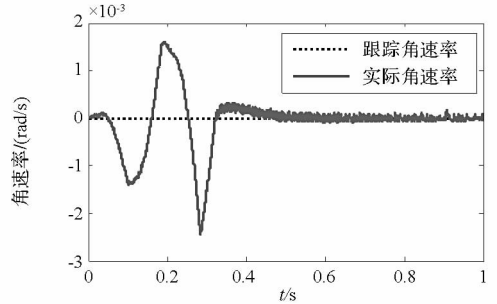


图 4 角速度跟踪

Fig. 4 The angular velocity tracking

模糊滑模控制可以有效快速控制球体的稳定。

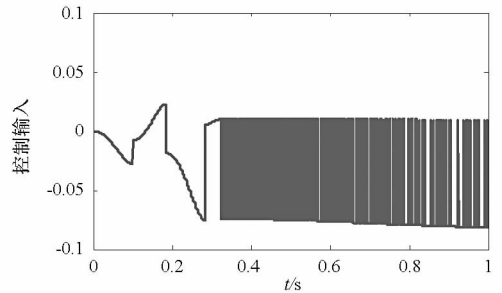


图 5 控制输入

Fig. 5 The control input

在自适应律:式(21)的作用下,切换控制虽可以有效补偿模糊逼近的误差,但控制系统控制输入仍然出现抖振现象。为了降低系统的抖振,采用饱和函数和边界层来平滑控制量,即

$$u_{vs} = -\hat{E}(t)\text{sat}(s(t)) \quad (24)$$

饱和函数 $\text{sat}(\cdot)$ 定义为

$$\text{sat}(s) = \begin{cases} s/\phi & |s| \leq \phi \\ \text{sign}(s) & |s| > \phi \end{cases} \quad (25)$$

其中, ϕ 为边界层厚度。仿真结果如图 6 ~ 图 8 所示。

从图中可以看出,在饱和函数的作用下,球体仍能保持高精度的稳定,稳定时间低于 0.4s,控制系统有效降低了滑模控制的抖振。考虑系统主惯量和摩擦阻尼系数不确定的条件下,仿真结果如图 9 所示。

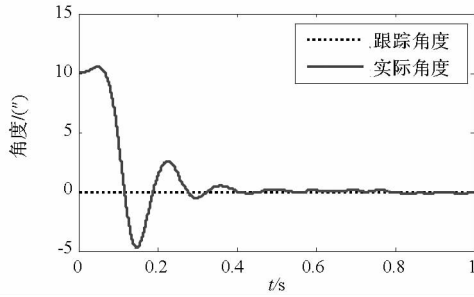


图6 角度跟踪

Fig. 6 The angle tracking

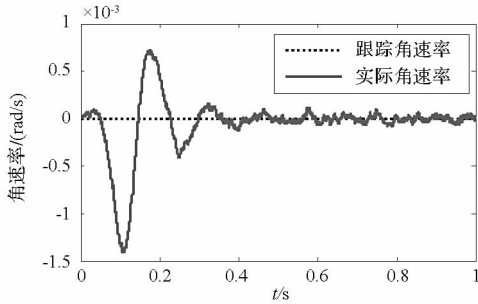


图7 角速度跟踪

Fig. 7 The angular velocity tracking

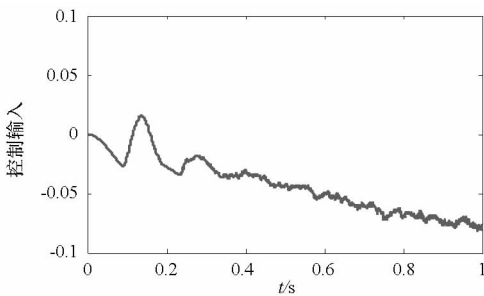


图8 控制输入

Fig. 8 The control input

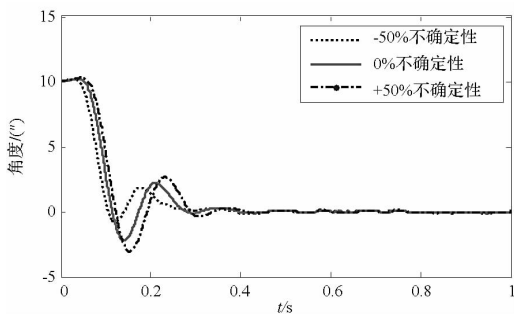


图9 在不确定条件下,系统的角度跟踪

Fig. 9 The angle tracking with parameters uncertainties

考虑系统参数的不确定,控制系统仍能有效控制球体的稳定,具有较好的性能鲁棒。

4 结论

本文分析了浮球平台的干扰特性,建立了平台的动力学模型。然后针对运动模型的参数不确定、

未建模动态和未知干扰问题,设计了一种基于模糊逻辑的自适应滑模控制系统,以提高系统的鲁棒性和稳定性。仿真结果表明,在控制系统的作用下,系统可以有效降低滑模控制的抖振问题;在复杂干扰的条件下,控制方法可以有效控制球体保持高精度的惯性空间稳定,且精度高于 $0.1''$ 。

参考文献 (References)

- [1] Hanching G W, Thomas C W. High-accuracy inertial stabilized platforms for hostile[J]. IEEE Control Systems, 2008, 2: 65 - 85.
- [2] 张光美. 浮球平台[J]. 导弹与航天运载技术, 1991, Z1: 22 - 43.
ZHANG Guangmei. Floated inertial platform[J]. Missiles and Space Vehicles, 1991, Z1: 22 - 43. (in Chinese)
- [3] Zhang G H, Tang G F. Numerical study of turbulent jets confined between two concentric spheres [J]. Journal of Hydroynamics, Ser. B, 1994, 1: 86 - 90.
- [4] Gully S W. AIRS disturbance characterization through single axis subsystem development tests [J]. Seventh Biennial Guidance Test Symposium, 1975, 128 - 135.
- [5] Sifter D J, Henderson V D. A new software of calibration and alignment for the advanced inertial reference sphere [J]. Eighth Biennial Guidance Test Symposium, 1990, 109 - 121.
- [6] Ho H F, Wong Y K, Rad A B. Adaptive fuzzy sliding mode control with chattering elimination for nonlinear SISO systems [J]. Simulation modeling Practice and Theory, 2009, 17: 1199 - 1210.
- [7] 王宗义, 李艳东, 刘涛, 等. 移动机器人的自适应滑模动力学控制[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2011, 16: 792 - 799.
WANG Zongyi, LI Yandong, LIU Tao, et al. Dynamic control of mobile robots based on an adaptive fuzzy sliding mode[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2011, 16: 792 - 799. (in Chinese)
- [8] Nechadi E, Harmas M N, Hamzaoui A. A new robust adaptive fuzzy sliding mode power system stabilizer[J]. Electrical Power and Energy Systems, 2012, 47: 1 - 7.
- [9] 赵红超, 徐君明, 王东. 变质心弹头的自适应模糊滑模控制[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2008, 48: 1733 - 1736.
ZHAO Hongchao, XU Junming, WANG Dong. Adaptive fuzzy sliding mode control of a moving mass actuated warhead[J]. J Tsinghua Univ (Sci & Tech), 2008, 48: 1733 - 1736. (in Chinese)
- [10] 董朝阳, 王枫, 高晓颖, 等. 基于自适应滑模与模糊控制的导弹直接力/气动力复合控制系统优化设计[J]. 航空学报, 2008, 29: 165 - 169.
DONG Zhaoyang, WANG Feng, GAO Xiaoying, et al. Missile reaction-jet/aerodynamic compound control system design based on adaptive sliding mode control and fuzzy logic [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2008, 29: 165 - 169. (in Chinese)
- [11] Cerman O, Husek P. Adaptive fuzzy sliding mode control for electro-hydraulic servo mechanism[J]. Expert Systems with Applications, 2012, 39: 10269 - 10277.
- [12] Hseng T, Li S, Huang Y C. MIMO adaptive fuzzy terminal sliding mode controller for robotic manipulators [J]. Information Sciences, 2010, 180: 4641 - 4660.