

# 超大型天线馈源舱柔索支撑结构动力学分析与跟踪控制

訾 斌, 段宝岩, 杜敬利

(西安电子科技大学 机电工程学院, 陕西 西安 710071)

**摘要:** 根据悬链线解析表达式推导出柔索两端固定时索端拉力与索长之间的关系, 用于求解特定长度的驱动柔索对处于某一位姿的馈源舱作用力, 在此基础上应用Newton-Euler法建立了超大型射电望远镜馈源舱柔索支撑系统的简化动力学模型. 采用具有二次收敛性的Newton-Raphson迭代法进行求解, 得到较快的求解速度以满足实时控制要求. 针对该系统的非线性、慢时变、多变量耦合等特点, 提出了一种自适应双模糊控制器来实现馈源舱轨迹跟踪. 该控制器采用模糊推理完成两组控制器的平稳过渡. 最后, 通过仿真计算结果验证了该控制策略的有效性.

**关键词:** 柔索支撑系统; 非线性动力学分析; 自适应模糊控制; 模糊切换

**中图分类号:** TP273      **文献标识码:** A

## Dynamic analysis and tracking control of the cable-suspended system for the five-hundred-meter aperture spherical telescope

ZI Bin, DUAN Bao-yan, DU Jing-li

(School of Electromechanical Engineering, Xidian University, Xi'an Shaanxi 710071, China)

**Abstract:** The relation between end forces and cable length is derived based on the analytical equation of catenary of a cable with two endpoints fixed. So the actuating forces on the cabin locating at a certain position and taking a certain posture can be solved with the given driving cable lengths. A simplified dynamic model of cabin-cable system for the five-hundred-meter aperture spherical telescope was established according to Newton-Euler formulation. The equations can be solved by Newton-Raphson method possessing the quadratic convergence property, which can guarantee a higher computation speed to meet the requirement of real time control algorithm. Considering the characteristics of nonlinearity, slow time-variant and multivariable coupled flexible structure, an adaptive bi-fuzzy control method with proportional-integral-tuning unit is then employed to realize the trajectory tracking of the feed cabin, which optimizes the control rules by adjusting factors. Smooth actions of the controller during switching are guaranteed by using fuzzy inference. At the end of this paper, the effectiveness of the proposed control strategy is verified by simulation results.

**Key words:** cable-suspended system; nonlinear dynamic analysis; adaptive fuzzy control; fuzzy switching

### 1 引言(Introduction)

近年来, 柔索结构以其结构简单、工作空间大和用钢量少等优点在工程领域获得广泛应用<sup>[1]</sup>. 500 m口径的超大型射电望远镜(FAST)的设计原型中也采用柔索结构以降低工程造价. FAST馈源指向跟踪系统主要由柔索-馈源舱粗调子系统和与馈源舱固连的精调Stewart平台子系统组成<sup>[2,3]</sup>. 粗调子系统保证馈源舱的运动定位精度达到厘米级; 安装在馈源舱内的Stewart平台使馈源的动态运动定位精度保持在毫米级. 为了尽可能提高粗调精度, 建立舱索系统较为准确的动力学模型是十分必要的. 柔索结构的力学分析通常是通过非线性有限元使用大

量的索杆单元进行, 计算量很大, 并且容易引起数值收敛问题. 为此, 本文使用悬链线方程分析柔索的力学特性<sup>[4]</sup>. 在此基础上应用Newton-Euler法建立了FAST柔索支撑结构简化动力学模型. 并采用具有二次收敛性的Newton-Raphson法迭代求解, 以其在索长解算时获得更快的求解速度.

由于该柔索支撑结构具有非线性、大惯性和弱刚度等特点, 且受到精调子系统及风荷等随机干扰, 使常规PID控制在完成复杂环境下的高精度控制显得不足. 相比之下, 常规模糊控制对受控对象的时滞、非线性具有一定的适应能力, 同时对噪声也具有较强的抑制能力且控制系统有较快的响应等<sup>[5]</sup>;

但常规模糊控制系统的稳定性难以保证, 稳态精度不够高<sup>[6,7]</sup>. 基于以上分析, 本文提出了自适应双模糊控制器来实现馈源舱轨迹跟踪控制. 另外, 为避免采用常规方法实现自适应双模糊控制的切换所引起的不希望的抖动, 特采用模糊推理来保证两组控制器的平稳过渡<sup>[8]</sup>.

### 2 柔索的力学分析(Mechanics analysis of a cable)

柔索受力后会伸长且呈现出高度非线性特性. 在长度上出现0.1%的误差将会导致柔索张力50%以上的偏差<sup>[9]</sup>, 为此可以采用悬链线解析表达式进行精确分析, 并且可以减少单元数目以减小计算工作量.

柔索在重力作用下平衡时的形状为一悬链线, 设其两个端点*I, J*之间的水平跨距为*l*, 竖直方向的高差为*h*. 柔索的弹性模量为*E*, 横截面积为*A*, 单位索长的重量为*q<sub>0</sub>*, 索的长度为*L*. 柔索两端的水平张力相同, 记为*H*, 两个端点分别受到竖直向上的拉力*F<sub>z</sub><sup>i</sup>*和*F<sub>z</sub><sup>j</sup>*的作用. 在这些边界条件下柔索的悬链线形状可描述为<sup>[10]</sup>

$$z = \frac{H}{q_0} [\cosh(\frac{q_0 x}{H} + \zeta) - \cosh \zeta]. \quad (1)$$

式中:

$$\zeta = \sinh^{-1}(\frac{q_0 h}{2H \sinh \eta}) - \eta, \quad (2)$$

$$\eta = \frac{q_0 l}{2H}. \quad (3)$$

对应的悬链线长度*L*<sup>2</sup>满足

$$L^2 = \frac{l^2}{\eta^2} \sinh^2 \eta + h^2. \quad (4)$$

柔索两端给定时*h, l*均为已知量, 可以得到柔索长度*L*关于*η*的非线性函数为

$$f(\eta) = \frac{l^2}{\eta^2} \sinh^2 \eta + h^2 - L^2 = 0. \quad (5)$$

将式(5)对*η*求导可得

$$\frac{\partial f}{\partial \eta} = \frac{2l^2}{\eta^2} \sinh \eta (\cosh \eta - \frac{\sinh \eta}{\eta}). \quad (6)$$

于是, 采用具有二次收敛性的Newton-Raphson迭代法求解式(6)可得到与给定索长*L*对应的*η*, 亦在索长解算时获得较快的求解速度. 限于篇幅有限, 此处不再列出.

得到*η*后可直接由式(3)求出柔索的水平张力*H*. 节点*I*和*J*对柔索竖直方向的作用力*F<sub>z</sub><sup>i</sup>*和*F<sub>z</sub><sup>j</sup>*可表示为

$$F_z^i = \frac{q_0}{2} [L - h \frac{\cosh \eta}{\sinh \eta}], \quad (7)$$

$$F_z^j = \frac{q_0}{2} [L + h \frac{\cosh \eta}{\sinh \eta}]. \quad (8)$$

### 3 舱体的动力学模型(Dynamic model of the cabin)

FAST馈源舱柔索支撑系统的结构如图1所示. 根据天文观测要求: 馈源跟踪射电源时, 馈源相位中心应时刻位于射电源和曲率中心*O'*所在直线, 即主光轴上.

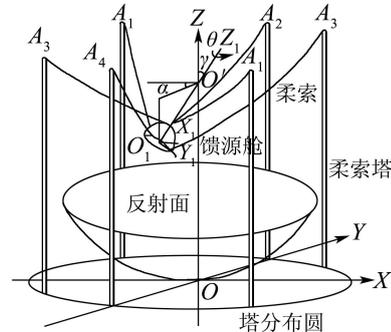


图1 FAST馈源舱柔索支撑结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of FAST

馈源舱柔索支撑系统中的6根柔索其一端绕塔顶滑轮, 另一端与舱体固接. 建立馈源舱的动力学方程需要如下几个坐标系: *OXYZ*是固结于塔分布圆上的全局坐标系; *O<sub>1</sub>X<sub>1</sub>Y<sub>1</sub>Z<sub>1</sub>*是固结于馈源舱底圆上的局部坐标系. 舱体在任意位置时, 按照天文观测要求, 期望*Z<sub>1</sub>*轴穿过*O'*点, *Y<sub>1</sub>*轴穿过*Z*轴, *X*轴水平. 馈源舱的位置用*O<sub>1</sub>*点的绝对位置矢量*r(x, y, z)*<sup>T</sup>表示, 姿态用欧拉角(*α, γ, θ*)<sup>T</sup>表示. 其中*α*是铅垂面*OXZ*与铅垂面*O<sub>1</sub>Y<sub>1</sub>Z<sub>1</sub>*的夹角, 表示舱体方位; *γ*是*Z*轴与*Z<sub>1</sub>*轴的夹角, 表示舱体俯仰; *θ*是舱体绕轴*Z<sub>1</sub>*的自转角. *Q*表示*O<sub>1</sub>X<sub>1</sub>Y<sub>1</sub>Z<sub>1</sub>*到*OXYZ*的坐标变换矩阵, *b<sub>c</sub>*表示在全局坐标系中6个固接点的位置. 作用在舱体上的力和力矩在全局坐标系中可以表示为

$$F_{eq} = \sum_{c=1}^6 F_c + m_0 g, \quad (9)$$

$$M_{eq} = \sum_{c=1}^6 b_c \times F_c + r \times m_0 g. \quad (10)$$

式中: *F<sub>c</sub>* = √(*F<sub>z</sub><sup>2</sup>* + *H*<sup>2</sup>)为柔索*c*对舱体的作用力, *m<sub>0</sub>*为舱体的实际质量. 舱体的Newton方程为

$$F_{eq} = M \ddot{r}. \quad (11)$$

式中: *M* = diag{*m<sub>0</sub>, m<sub>0</sub>, m<sub>0</sub>*}, *r̈*为舱体的平动速度. 舱体的Euler方程为

$$M_{eq} = J a + w \times (J \times w). \quad (12)$$

式中: *w, a*分别为舱体的角速度、角加速度, *J*为舱体关于全局坐标系的惯量矩.

于是, 联立式(11)和(12), 可得舱体的动力学方

程为

$$f = m\ddot{q}. \tag{13}$$

式中:  $\ddot{q} = \{\dot{r}^T, a^T\}$ 为舱体的加速度列阵,  $m = \begin{pmatrix} M & 0 \\ 0 & J \end{pmatrix}$ 为舱体的质量矩阵,  $f = \{F_{eq}^T, M_{eq}^T\}$ 为舱体的外力列阵.

#### 4 控制器设计(Controller design)

针对FAST馈源舱柔索支撑结构这样复杂的系统,采用常规PID控制往往难以实现有效控制,相比之下常规模糊控制器对阶跃响应具有上升速度快,过渡时间较短、对参数变化不敏感特点.为了保证轨迹跟踪精度,设计控制器时往往采用偏差较大时要快速跟踪,偏差较小时要精确定位,对常规模糊控制器而言,这两个要求是相互矛盾的,且发生在不同的时域.考虑到柔索支撑系统的特点,根据时域的不同规则生成模糊控制规则表来满足偏差较大时快速性,偏差较小时精确定位要求,这样就形成了自适应双模糊控制器结构如图2所示.图2中:  $r$ 为输入信号,  $u$ 为控制量,  $y$ 为系统输出量.

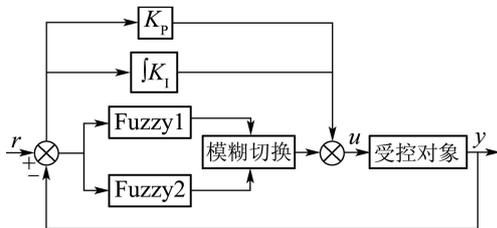


图2 自适应模糊控制器结构

Fig. 2 Structure of the adaptive fuzzy controller

在FAST馈源舱轨迹跟踪系统的初期阶段,系统误差较大,消除误差是主要目的,因此应加大误差在控制规则中的权重;在中期阶段,系统误差减小,系统的上升速度加快,为减小系统的超调,应突出对误差变化的控制作用;当系统响应接近期望值时,由于此时误差及其变化都较小,二者可取相同的权重.基于以上考虑,决定采用带自调整因子的模糊控制策略,以达到性能更高的控制效果.FAST柔索支撑系统是由6根柔索子系统构成,每根柔索的伺服系统都以交流伺服电机作为位置控制装置.选用的控制方式为IGBT PWM正弦波控制,反馈的光电码盘的分辨率为每转2500个脉冲而光电码盘输出的相位差为90°,两路脉冲信号构成4倍频和鉴相信号,则伺服电机每转一转可测脉冲数为2500×4=10000,根据传动机构的参数可以计算出相应柔索的伸长量.将误差量为10000个脉冲作为双模控制切换的分界线,形成了Fuzzy1粗调控制表和Fuzzy2精调控制表.采用轨迹规划所需期望索长与考虑到外界干扰等影响的情况下解算的实际索长差E及其误差变化率C为

输入,交流伺服电机的转速U为输出的两维模糊控制器.

1) Fuzzy 1 模糊控制表的生成:当位置误差大于10000脉冲时,把E和C以及U的量化论域和词集各取为

$$\{E\} = \{C\} = \{U\} = \{-2, -1, 0, 1, 2\};$$

$$\{NB, NS, ZO, PS, PB\}.$$

采用带调整因子的控制表达式为

$$U = \begin{cases} - < a_0 E + (1 - a_0) C >, & E = 0, \\ - < a_1 E + (1 - a_1) C >, & E = \pm 1, \\ - < a_2 E + (1 - a_2) C >, & E = \pm 2. \end{cases}$$

基于文献[11]及数值仿真结果,选择 $\theta = -1, a_0 = 0.45, a_1 = 0.55, a_2 = 0.82$ .

2) Fuzzy 2 模糊控制表的生成:当位置误差小于10000脉冲时,把E和C以及U的量化论域和词集各取为

$$\{E\} = \{C\} = \{U\} = \{-3, -2, -1, 0, 1, 2, 3\};$$

$$\{NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB\}.$$

采用带调整因子的控制表达式为

$$U = \begin{cases} - < a_0 E + (1 - a_0) C >, & E = 0, \\ - < a_1 E + (1 - a_1) C >, & E = \pm 1, \\ - < a_2 E + (1 - a_2) C >, & E = \pm 2, \\ - < a_3 E + (1 - a_3) C >, & E = \pm 3. \end{cases}$$

基于文献[11]及数值仿真结果,选择 $\theta = -1, a_0 = 0.45, a_1 = 0.51, a_2 = 0.61, a_3 = 0.82$ .

限于篇幅有限, Fuzzy1与Fuzzy2的模糊控制查询表此处不再列出.

对模糊控制系统来说,当误差较大时,对误差的控制作用给予较大的权重,以尽快消除误差提高响应速度;当误差较小时,为避免系统响应的超调,对误差变化的控制作用给予较大的权重,以尽快进入稳态.常规的两维模糊控制器是以误差和误差变化作为输入变量,因此,一般认为这种控制器具有Fuzzy比例-微分控制作用,而缺少Fuzzy积分控制作用.这样的模糊控制系统的动态性能较佳,而稳态性能不能令人满意.众所周知,在线性控制理论中,积分控制作用能消除稳态误差.因此,常规模糊控制系统,一般不能消除稳态偏差E和偏差变化率C,但可采取增大量化因子 $K_e$ 和 $K_c$ 的取值来减小E和C,可是 $K_e$ 和 $K_c$ 不可能任意增大,因为还要与比例因子 $K_u$ 协调匹配,因此必然存在稳态偏差.又由于模糊控制器的输入和输出特性等效于多值继电器特性,采用该类控制器的系统有可能获得良好的动态特性,但无法消除静态误差且易产生振荡.为改善模

糊控制器的稳态性能和消除振荡,通常在模糊控制器中引入积分器.引入方式有很多,这里采用的是将比例积分器与模糊控制器并联,比例积分器对未模糊化处理的偏差信号进行积分,再与模糊控制器的输出进行叠加,形成总的控制作用.

### 5 自适应模糊控制切换方式(Switching mode of adaptive fuzzy control)

Fuzzy1(F1)和Fuzzy2(F2)切换会引起控制系统的抖动,而抖动的发生将影响系统控制的精确性、增加系统的能量消耗、有时会激发系统未建模部分的强烈振动,成为振源从而对系统造成损害.因此,为避免采用常规方法实现自适应双模糊控制的切换所引起的不希望的抖动,本文采用模糊切换来保证两种控制的平稳过渡<sup>[8]</sup>.根据偏差和偏差变化率的大小和方向决定控制方式,用于完成自适应双模糊控制平稳切换的模糊切换规则如表1所示.

表1 自适应模糊控制切换规则

Table 1 Switching rules of adaptive fuzzy control

E	C						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	F1						
NM	F1	F1	F1	F1	F1	F2	F1
NS	F1	F2	F2	F2	F2	F2	F2
ZO	F2						
PS	F2	F2	F2	F2	F2	F2	F1
PM	F1	F2	F1	F1	F1	F1	F1
PB	F1						

### 6 FAST馈源舱柔索支撑控制结构及原理(Structure and working principle of cable-suspended control system)

FAST馈源舱柔索支撑结构轨迹跟踪控制系统是由各个互连的子系统组成,系统的关键是处理各个子系统的关联性,利用局部信息对各子系统间进行分散控制是有效的方法,同时考虑到工程实现的可行性和造价,因此采用分散控制策略.为了实现馈源舱轨迹的跟踪,把馈源舱运动轨迹依馈源舱轨迹跟踪速度和采样周期离散为一系列的点,这样即可通过伺服电机系统来改变各离散点之间的索长以实现馈源舱运动轨迹的跟踪.

馈源舱运动时要提高运动精度必须进行闭环控制,而闭环控制的前提就要求出与给定柔索长度对应的舱体位姿,与理论位姿相互比较进行反馈.在馈源舱轨迹跟踪过程中,Leica激光全站仪实时检测馈源舱在空中的实际位姿,与预期轨迹比较,由主控计算机根据偏差信号实现索长的实时规划,求得索长输入给相应柔索的分控制系统,分控制系统通过合

适的控制算法控制伺服电机的转速,从而控制馈源舱在空中的运动轨迹满足轨迹跟踪精度的要求.

### 7 仿真研究(Simulation study)

设舱体中心以2 cm/s的速率作平移运动,轨迹为一水平圆,半径为5 m,圆中心位于Z轴上,对应的高度为12.0 m.采用自适应模糊控制算法对建立的馈源舱柔索支撑系统的动力学模型进行轨迹跟踪控制.图3给出了馈源舱中心跟踪期望圆的仿真结果;图4给出了前500 s内的馈源舱中心位置跟踪总体误差( $\sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2}$ ).为能较为准确地反映馈源舱柔索结构可能遇到的实际问题,并验证力学模型的准确性及控制方案的可行性和有效性,利用MATLAB软件模拟生成精调Stewart平台及风荷等干扰对馈源舱施加近似风速为10 m/s的随机风荷.根据轨迹跟踪性能,通过大量数值仿真实验,自适应模糊控制器参数选取如下:  $T_s = 0.01$  s,  $K_e = 66$ ,  $K_c = 19$ ,  $K_u = 1.3$ ,  $K_p = 0.04$ ,  $K_I = 0.01$ . 6根柔索物理参数均相同:横截面积  $A = 5.539 \times 10^{-5}$  m<sup>2</sup>, 密度  $\rho = 9.521 \times 10^3$  kg/m<sup>3</sup>, 舱体质量  $m_0 = 720$  kg.

图4可见,位置跟踪总体误差在12 cm以内,满足馈源舱轨迹跟踪粗调精度要求.图3表明该自适应模糊控制对系统干扰具有较好的抑制作用且发挥了模糊控制鲁棒性强、动态响应快、超调量小等特点、因此能较好地跟踪期望信号.

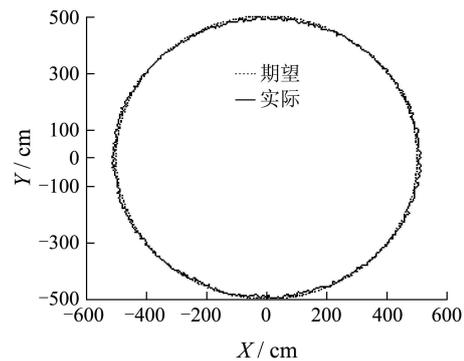


图3 馈源舱轨迹跟踪曲线

Fig. 3 Trajectory tracking of the cabin

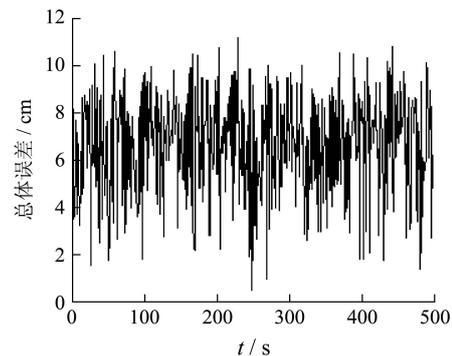


图4 轨迹跟踪位置总体误差

Fig. 4 Tracking total position error

## 8 结论(Conclusions)

本文在对柔索进行力学分析时使用了柔索的悬链线解析表达式来精确推导索端拉力与柔索长度之间的关系以提高求解精度, 并采用具有二次收敛性的Newton-Raphson迭代法进行了求解. 在此基础上应用Newton-Euler法建立了FAST馈源舱柔索支撑结构的简化动力学模型. 然后, 针对FAST馈源舱柔索支撑结构的非线性、慢时变和多变量耦合等特点, 设计了自适应双模糊控制器, 并采用模糊推理来保证两组控制器的平稳过渡. 数值结果验证了该控制策略的有效性. 下一步, 笔者将在新建的FAST50m缩比实验模型上进行实验. 以验证该方案的工程可行性.

## 参考文献(References):

- [1] 魏建东, 刘忠玉. 具有滑移式散索鞍的悬索桥主缆架设分析[J]. 计算力学学报, 2005, 22(6): 755 – 761.  
(WEI Jiandong, LIU Zhongyu. Calculation of cable erection in suspension bridge with sliding saddles[J]. *Chinese J of Computational Mechanics*, 2005, 22(6): 755 – 761.)
- [2] DUAN B Y. A new design project of the line feed structure for large spherical radio telescope and its nonlinear dynamic analysis[J]. *Mechatronics*, 1999, 9(1): 53 – 64.
- [3] SU Y X, DUAN B Y. The application of the Stewart platform in large spherical radio telescope[J]. *J of Robotic Systems*, 2000, 17(7): 375 – 383.
- [4] WANG Y C. Effect of cable stiffness on a cable-stayed bridge[J]. *Structural Engineering and Mechanics*, 1999, 8(1): 27 – 38.

- [5] LEE C C. Fuzzy logic in control systems: fuzzy logic controller[J]. *IEEE Trans on Systems, Man and Cybernetics*, 1990, 20(2): 404 – 418.
- [6] ZHAO Y N, COLLINS E G. Fuzzy PI control design for an industrial weigh belt feeder[J]. *IEEE Trans on Fuzzy Systems*, 2003, 11(3): 311 – 318.
- [7] SUN Y L, ER M J. Hybrid fuzzy control of robotics systems[J]. *IEEE Trans on Fuzzy Systems*, 2004, 12(6): 755 – 765.
- [8] 刘红波, 李少远, 柴天佑. 一种基于模糊切换的模糊复合控制器及其应用[J]. 控制与决策, 2003, 18(5): 615 – 618.  
(LIU Hongbo, LI shaoyuan, CHAI Tianyou. Fuzzy hybrid controller based on fuzzy switching and its application[J]. *Control and Decision*, 2003, 18(5): 615 – 618.)
- [9] LEONHARDT F, SCHLAICH J. Structural design of roofs over the sports arenas for the 1972 Olympic Games: some problems of prestressed cable net structures[J]. *The Structural Engineer*, 1972, 50(3): 113 – 119.
- [10] QIU Y Y, DUAN B Y, WEI Q. Optimal distribution of the cable tensions and structural vibration control of the cable-cabin flexible structure[J]. *Structural Engineering and Mechanics*, 2002, 14(1): 39 – 56.
- [11] 吴开源, 黄石生, 蒙永民. 脉冲MIG焊电弧双模模糊控制[J]. 控制理论与应用, 2006, 23(1): 74 – 78.  
(WU Kaiyuan, HUANG Shisheng, MENG Yongmin. Double-model fuzzy logic control strategy of arc in pulsed metal inertia gas welding[J]. *Control Theory & Applications*, 2006, 23(1): 74 – 78.)

## 作者简介:

**管斌** (1975—), 男, 博士研究生, 研究领域包括机电控制与自动化、智能控制, E-mail: binzi@mail.xidian.edu.cn;

**段宝岩** (1955—), 男, 教授, 博士生导师, 研究领域包括柔性结构控制、机电一体化、面向工程广义优化设计及CAD/CAE;

**杜敬利** (1977—), 男, 博士, 研究领域包括结构分析与优化.

(上接第937页)

## 6 结论(Conclusion)

本文针对一般不确定系统(连续的和离散的), 给出了不确定项观测器设计方法, 并且对估计误差进行了分析, 证明了所得估计在加权平均意义下是一个无偏估计, 而且适当选择观测器反馈增益可以得到满意的估计精度. 该估计方法克服了常规用界的估计设计控制器带来的保守性和动态性能差的弊端, 为不确定性或未知非线性的有效控制提供了一个新的途径.

## 参考文献(References):

- [1] KAWAMURA A, ITOH H, SAKAMOTO K. Chattering reduction of disturbance observer based sliding mode control[J]. *IEEE Trans on Industry Applications*, 1994, 30(2): 456 – 461.
- [2] EUN Y, KIM J, KIM K, et al. Discrete-time variable structure controller with a decoupled disturbance compensator and its application to a CNC servomechanism[J]. *IEEE Trans on Control Systems Tech-*

*nology*, 1999, 7(4): 414 – 423.

- [3] XIA Y, JIA Y. Robust sliding-mode control for uncertain time-delay systems: a LMI approach[J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 2003, 48(6): 1086 – 1091.
- [4] 于双和, 强文义, 傅佩琛. 无抖振荡离散准滑模控制. 控制与决策[J]. 2001, 16(3): 380 – 382.  
(YU Shuanghe, QIANG Wenyi, FU Peishen. Chattering-free discrete quasi-sliding mode controller[J]. *Control and Decision*, 2001, 16(3): 380 – 382.)
- [5] 刘金琨. 滑模变结构控制Matlab仿真[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.  
(LIU Jinkun. *Matlab Simulation for Sliding Mode Control*[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2005.)

## 作者简介:

**李文林** (1949—), 男, 河南师范大学教授, 东北大学副博士生导师, 主要研究方向为变结构控制、智能控制, E-mail: hsdwl1@tom.com;

**李钧涛** (1978—), 男, 河南师范大学教师, 北京航空航天大学硕士生, 研究方向为智能控制, E-mail: juntaol@mail@yahoo.com.cn.