

文章编号: 1001-0920(2007)06-0647-05

大射电望远镜舱索伺服系统的自适应滑模控制

黄 进, 邵明贤, 段宝岩

(西安电子科技大学 机电工程学院, 西安 710071)

摘 要: 针对大射电望远镜馈源舱跟踪定位问题, 提出一种自适应滑模控制方法. 从线性化模型出发, 将模型偏差、风载荷视为系统外部扰动, 通过引入参数自适应机制, 在线估计外部扰动并加以补偿. 采用 Lyapunov 稳定性理论, 推导了舱索系统的多输入多输出自适应滑模控制律. 在此基础上, 针对大射电望远镜 50 m 缩尺模型, 采用离散悬索模型和自适应滑模控制方法对舱索控制系统进行了仿真, 并与传统的 PID 控制方法进行对比. 结果表明, 采用自适应滑模控制使跟踪误差减小到约 32%, 并提高了抗风扰能力.

关键词: 平方公里天线阵; 舱索伺服系统; 滑模控制; 参数自适应

中图分类号: TP273 **文献标识码:** A

Adaptive sliding mode control for cabin-cable servo system of large spherical radio telescope

HUANG Jin, SHAO Ming-xian, DUAN Bao-yan

(School of Electro-mechanical Engineering, Xidian University, Xi'an 710071, China. Correspondent: HUANG Jin, E-mail: jhuang@mail.xidian.edu.cn)

Abstract: To improve the tracking accuracy and robustness against wind disturbances for a large spherical radio telescope, an adaptive sliding mode controller is proposed. Based on Lyapunov stability theorem, the multiple-input and multiple-output sliding mode control law is derived with the linear model of the system, in which the modeling error and wind force are considered as the external disturbance that is estimated and compensated on line. A series simulation is finished with the parameters of a 50-meter scaled large spherical radio telescope model, and the results show that the tracking error is reduced to around 32% and the robustness of system is improved with the sliding mode control comparing with traditional PID control.

Key words: Square kilometer array; Cabin-cable servo system; Sliding mode control; Parameter adaptation

1 引 言

为了能够有效地观测银河系的形成和演化过程、进行深空通信及探索地外理性生命, 国际射电天文学界正在积极推进国际合作研究项目“一平方公里天线阵(SKA)”。为了增大天线接收面积、减小馈源支撑和定位机构的重量并降低造价, 美、中、加、俄等国科学家分别提出了各自的方案作为 SKA 的原型, 并展开了工程研究^[1]。由于柔性悬索在大跨度空间结构中表现出优异的技术性能和突出的经济性, 相应的馈源支撑和定位机构在 SKA 工程中得到了格外的重视. 例如加拿大科学家提出了基于悬停气球和 3 根悬索的大自适应反射器 LAR 方案^[2]; 我国科学家提出了基于 6 根悬索的 500 m 射电望远镜

FAST 创新设计方案^[3]。

文献[4]研究了模糊预测控制方法在馈源舱定位系统中的应用, 采用简单的纯滞后环节来模拟悬索特性. 基于悬索的强非线性特性, 上述简化模型不可避免地带来分析、计算误差. 文献[5]研究了馈源舱定位系统的自抗扰控制方法, 但忽略了多根悬索之间的耦合作用, 将每根索简化为单输入单输出的二阶系统, 从而引入了分析误差. 文献[6]采用较为精确的离散悬索模型研究传统的 PID 控制方法在 LAR 馈源舱伺服定位系统中的应用, 其仿真结果表明, 在 10 m/s 的风扰作用下, PID 控制只能使 LAR 馈源舱达到 100 mm 的跟踪精度.

为了提高馈源舱的跟踪精度, 本文采用滑模控

收稿日期: 2006-04-21; 修回日期: 2006-07-14.

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(10433020).

作者简介: 黄进(1968—), 男, 安徽枞阳人, 副教授, 博士, 从事机电一体化研究; 段宝岩(1955—), 男, 河北翼县人, 教授, 博士生导师, 从事电子机械的现代设计理论与方法、机电一体化等研究.

制并引入参数自适应机制补偿模型偏差、随机风扰和 Stewart 平台调整所导致的不利影响。

2 系统模型

图1为500 m口径球面射电望远镜的柔性悬索结构。它省去了近1 000 t重的背架结构,只留下由6根钢索悬吊的20 t左右的馈源结构。其中悬挂于馈源舱顶部的3根悬索(实线)用于控制位置,而悬挂于馈源舱底部的另3根悬索(虚线)用于控制姿态,这样馈源舱就可以按预先设定的轨迹运动,以跟踪某个星体。由于最高工作频率达8.8 GHz,要求馈源舱在空间能达到4 mm的定位精度。为此,提出采用基于外环粗调(舱索结构系统)和内环精调(Stewart 稳定平台系统)的两级控制策略^[3]。但由于 Stewart 稳定平台系统的调节范围有限,仍要求外环粗调系统能够达到厘米级的位置跟踪精度。然而,柔性悬索具有无穷多自由度和易受风载荷等外扰的影响,使此结构的控制面临着巨大的挑战^[2,3]。

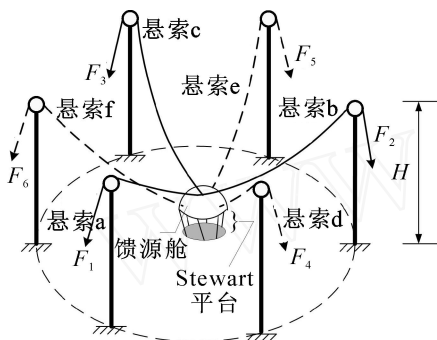


图1 500 m口径球面射电望远镜的柔性悬索结构

在图1所示的大射电望远镜馈源舱悬挂/定位机构中,3根高为 H 的索塔均布于半径为 R 的圆周上,质量为 M 的馈源舱被3根钢索悬吊在空中。要求在存在随机风扰的情况下,通过施加适当的控制力 F_1 、 F_2 和 F_3 ,使它到达空间内的指定位置,或沿指定轨迹运行。

2.1 柔索的物理模型

悬索具有无穷多自由度,而由它构成的结构具有强非线性和大滞后的特性,因此,难以建立一个精确的、连续的动力学模型^[3-7]。为了能全面地反映舱索系统的特性、获得准确的仿真计算结果,建立了离散索杆模型^[7]。在此模型中,假设柔索由 n 个弹性索杆单元构成,它们之间由存在摩擦的铰链相连,每个索杆单元的质量均匀分布到两个端节点上。这样,一个索杆单元可由一个弹簧、阻尼系统来近似。每个索杆单元受到内力和外力的作用,内力包括张力、阻尼力和铰链处的摩擦力;外力包括作用于节点处的重力和风力,其数学模型详见文献[7]。

2.2 舱索系统的控制模型

虽然上述柔索物理模型能够较真实地反映其动力学特性^[6,7],然而当离散的索杆单元较多时,如果以此模型出发设计控制器,将导致控制器过于复杂从而无法实现。为此,本文将从图2所示的舱索系统控制模型出发设计滑模控制器,并使用柔索的物理模型来进行仿真计算以验证控制器的性能。

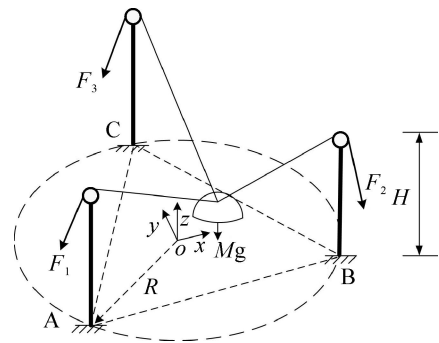


图2 舱索系统控制模型

在舱索系统控制模型中,忽略各滑轮处的摩擦力和柔索重量,并假定柔索不受风载荷的作用,这样馈源舱和滑轮间柔索的形状就是一条理想直线。为了克服由此引入的误差,设忽略上述因素和模型线性化所带来的偏差、外部风载荷作用、馈源舱姿态调整、Stewart 平台调整所引入的总扰动力 F_d ,这样通过在线参数估计即可给予补偿。在图2所示的坐标系下,分别选取馈源舱位置和速度 $x, \dot{x}, y, \dot{y}, z, \dot{z}$ 作为状态变量 $x_i (i = 1, \dots, 6)$,可建立系统的状态空间表达式,将它在原点平衡位置处线性化,可得到馈源舱定位系统的线性化模型如下:

$$\dot{X} = AX + Bu + F_d, Y = CX, \quad (1)$$

$$A =$$

$$\begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -\frac{(R^2 + 2H^2)g}{2H(R^2 + H^2)} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{(R^2 + 2H^2)g}{2H(R^2 + H^2)} \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & \frac{-R^2 g}{H(R^2 + H^2)} & 0 \end{bmatrix},$$

$$B =$$

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ \frac{-\sqrt{3}R/2}{M\sqrt{R^2+H^2}} & \frac{\sqrt{3}R/2}{M\sqrt{R^2+H^2}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ \frac{-R/2}{M\sqrt{R^2+H^2}} & \frac{-R/2}{M\sqrt{R^2+H^2}} & \frac{R}{M\sqrt{R^2+H^2}} \\ 0 & 0 & 0 \\ \frac{H}{M\sqrt{R^2+H^2}} & \frac{H}{M\sqrt{R^2+H^2}} & \frac{H}{M\sqrt{R^2+H^2}} \end{bmatrix},$$

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix},$$

$$F_d = [0 \quad F_{dx} \quad 0 \quad F_{dy} \quad 0 \quad F_{dz}]^T,$$

$$u = [F_1 \quad F_2 \quad F_3]^T,$$

其中 F_{dx} , F_{dy} 和 F_{dz} 分别为 F_d 在 x , y 和 z 方向上的分量.

3 悬索结构的自适应滑模控制

对于系统模型(1),选取滑模面

$$S = C_1 E = [S_1 \quad S_2 \quad S_3]^T. \quad (2)$$

其中: C_1 为滑模系数矩阵,且

$$C_1 = \begin{bmatrix} 1 & a_1 & 2 & a_2 & 3 & a_3 \\ 4 & a_4 & 5 & a_5 & 6 & a_6 \\ 7 & a_7 & 8 & a_8 & 9 & a_9 \end{bmatrix};$$

$i(i = 1, 2, \dots, 9)$ 和 $a_i(i = 1, 2, \dots, 9)$ 反映了系统在滑模面上的特性. 设 $C_1 B$ 是正定对称矩阵, $E = X_{ref} - X$ 为误差矩阵,且

$$X_{ref} = [x_{1ref} \quad x_{2ref} \quad x_{3ref} \quad x_{4ref} \quad x_{5ref} \quad x_{6ref}]^T$$

为系统的参考状态向量. 由式(1)和(2)可得

$$\dot{S} = C_1 (\dot{X}_{ref} - AX - F_d) - C_1 Bu. \quad (3)$$

设

$$(C_1 B)^{-1} C_1 (\dot{X}_{ref} - AX - F_d) = Z(\dot{X}_{ref}, X) P. \quad (4)$$

其中: $Z(\dot{X}_{ref}, X)$ 为 $3 \times r$ 的矩阵; $P = [p_1, p_2, \dots, p_r]^T$, p_1, p_2, \dots, p_r 为 r 个参数(本文状态变量数量为 6, 扰动数量为 3, 故需要估计的参数共有 9 个, 即 $r = 9$); 设每个参数都存在已知的上、下边界 $[p_k^-, p_k^+]$, $k = 1, 2, \dots, r$. 引入下述参数自适应律:

$$\dot{\hat{P}} = -^{-1} K Z^T S. \quad (5)$$

其中: $\hat{P} = [\hat{p}_1, \dots, \hat{p}_r]^T$ 为对 P 的估计, $^{-1} = \text{diag}[^{-1}, \dots, ^{-1}]$, $K = \text{diag}[k_1, \dots, k_r]$. 对于参数 p_k , $k_1 = 0$ 是参数自适应增益, $^{-1}$ 为由式(6)定义的自适应边界因子,有

$$^{-1} = \begin{cases} 0, & \hat{p}_k < p_k^- \text{ 或 } \hat{p}_k > p_k^+; \\ 1, & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (6)$$

其中 $^{-1} = [^{-1} \quad \dots \quad ^{-1}]^T = Z^T S$.

定理 1 对于由 r 个参数组成的向量 P , 下式成立:

$$(P - \hat{P})^T \cdot (Z^T S - \dot{\hat{P}}) = \sum_{k=1}^r [(p_k - \hat{p}_k) \cdot k(1 - ^{-1}_k)] \leq 0. \quad (7)$$

证明

$$\begin{aligned} (P - \hat{P})^T \cdot (Z^T S - \dot{\hat{P}}) &= \\ [p_1 - \hat{p}_1 \quad p_2 - \hat{p}_2 \quad \dots \quad p_r - \hat{p}_r] (I - K) Z^T S &= \\ [p_1 - \hat{p}_1 \quad p_2 - \hat{p}_2 \quad \dots \quad p_r - \hat{p}_r] (I - K) &= \\ \sum_{k=1}^r [(p_k - \hat{p}_k) \cdot k(1 - ^{-1}_k)]. \end{aligned}$$

由式(6)可知

$$(p_k - \hat{p}_k) \cdot k(1 - ^{-1}_k) \leq 0, \quad k = 1, 2, \dots, r,$$

故定理 1 成立.

定理 2 对于选定的常数 $K_s > 0$, 当控制作用为

$$u = K_s S + Z(\dot{X}_{ref}, X) P \quad (8)$$

时,选定的滑模面 S 可达且参数估值收敛.

证明 选择正定 Lyapunov 函数

$$V = \frac{1}{2} [S^T (C_1 B)^{-1} S + (P - \hat{P})^T (P - \hat{P})]. \quad (9)$$

对于恒定的参数 P , 可得

$$\begin{aligned} \dot{V} &= S^T (C_1 B)^{-1} \dot{S} - (P - \hat{P})^T \dot{\hat{P}} = \\ (P - \hat{P})^T (Z^T S - \dot{\hat{P}}) - S^T u + S^T Z \dot{P}. \end{aligned} \quad (10)$$

由式(7)可知 $(P - \hat{P})^T \cdot (Z^T S - \dot{\hat{P}}) \leq 0$. 设选定的常数 $K_s > 0$, 并令

$$- S^T u + S^T Z \dot{P} = - S^T K_s S, \quad (11)$$

即 $u = K_s S + Z(\dot{X}_{ref}, X) \hat{P}$. 由式(10)和(11)可知 $\dot{V} < 0$. 根据 Lyapunov 稳定性理论, 滑模可达且参数估值收敛, 系统轨道将沿滑模面趋于零误差点.

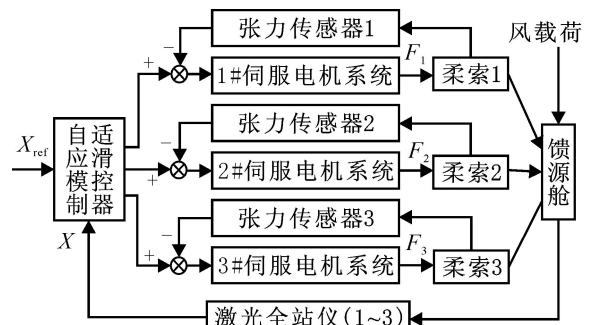


图 3 舱索控制系统

与传统的滑模控制不同,控制律(8)不含开关函数,控制作用在边界层内部是连续变化的,因此不会导致控制信号频繁切换,从而避免了切换面内的振颤现象.图3为舱索控制系统原理,图中的激光全站仪用于实时检测馈源舱的空间位置.

4 仿真结果和分析

为了验证上述控制方法,采用大射电望远镜50 m 缩尺模型的参数分别对 PID 控制和自适应滑模控制进行仿真计算.其中 $R = 22.5$ m, $H = 14.7$ m.为了精确地描述柔性悬索的动力学特性,采用了离散柔索模型,即将每根柔索离散为由铰链连接的 n 个弹性索杆单元^[6,7]. n 越大,模型越精确,求解越复杂(本例 n 取为 5).柔索的主要参数为:直径 $d = 10.4$ mm,密度 $\rho = 0.803$ kg/m,杨氏模量 $E = 1.7 \times 10^{11}$ Pa,阻尼比 $\zeta = 0.005$;馈源舱形状为直径 1.2 m 的半球,其质量 $M = 720$ kg;设脉动风速的均方差为 1.286 ^[8];仿真计算采用变步长的四阶 Runge Kutta 方法. PID 控制器参数采用扩充临界比例度法和手工调整相结合的方法确定,对于自适应滑模控制器,考虑到 $C_1 B$ 是正定对称矩阵,可以建立 3 个约束方程.这样,初步选取反映系统带宽的 ω_c 和 6 个参数 a_i 即可确定 C_1 阵,并根据仿真结果局部调整这些参数.本例中

$$C_1 = \begin{bmatrix} 2 & 1 & 5 & 2 & 10 & 4 \\ 3 & 4.68 & 8 & 4 & 22 & 13.06 \\ 8 & 4.57 & 12 & 16 & 50 & 25.36 \end{bmatrix},$$

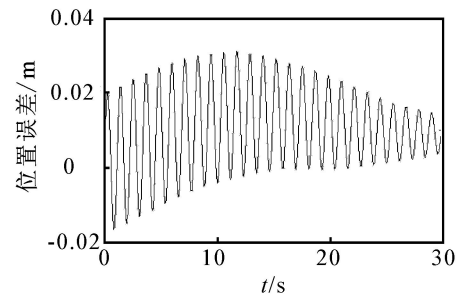
$$K_s = 4\ 500,$$

$$i = 300, i = 1, 2, \dots, 9,$$

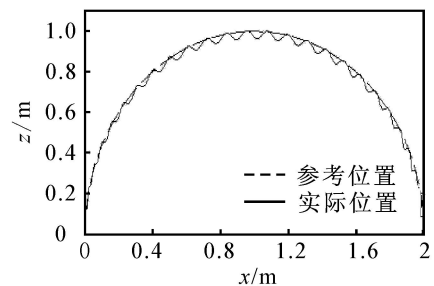
$$p_k^+ = -p_k^- = 500, k = 1, 2, \dots, r.$$

假定馈源舱的理想轨迹为 xoz 平面内从原点出发的直径为 2 m 的半圆,其运动速率为 105 mm/s.图4和图5表示的分别是不计风扰时,传统的 PID 控制和自适应滑模控制的结果.从仿真数据可知:采用 PID 控制时,馈源舱的最大位置误差为 30.2 mm;采用自适应滑模控制时,馈源舱的最大位置误差为 9.6 mm,即减小到 PID 控制时的 31.8%.

图6和图7表示的是控制器参数不变时,在 10 m/s 的水平风作用下的仿真结果.图6表明采用 PID 控制时,馈源舱的最大位置误差增大为 42.3 mm;图7表明采用自适应滑模控制时,馈源舱的最大位置误差基本未变,为 9.9 mm.其原因分析如下:舱索系统具有变结构的特性,采用 PID 控制时, PID 参数无法根据系统模型的变化实时整定,所以当馈源舱位置变化时,其控制性能发生变化,最终导致位置误差显著变化;而采用自适应滑模控制时,由于控制器能够实时补偿模型变化和外部扰动,当馈源舱

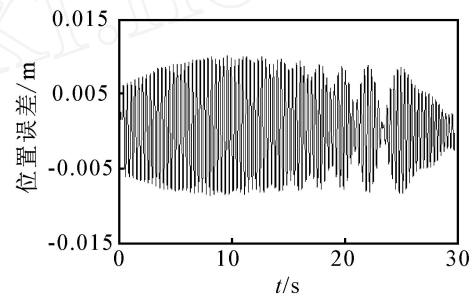


(a) 位置误差

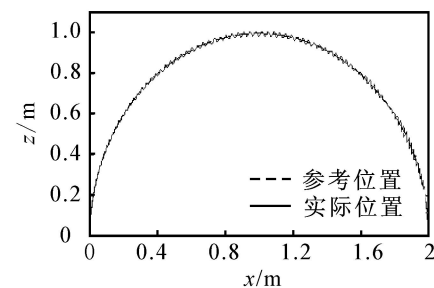


(b) 跟踪轨迹

图4 无风扰时的仿真结果(PID控制)



(a) 位置误差



(b) 跟踪轨迹

图5 无风扰时的仿真结果(滑模控制)

位置变化时,其位置误差变化很小.基于同样的原因,系统对风扰的作用也表现出较好的鲁棒性,从而获得了优于 PID 的控制性能.

需要说明的是:在仿真计算中采用的是由离散的索杆单元构成的舱索系统模型(而不是式(1)表示的系统简化模型),考虑了悬索的物理特性和受到的风载荷,尽管柔索的参数不会引入到控制器中,但仿真计算结果能更真实地反映实际情况.另外,如果不能准确地选择待估计参数的上、下边界 p_k^+ 和

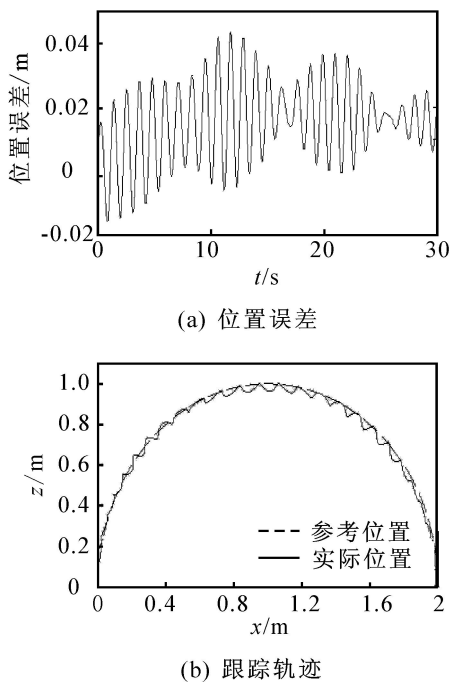


图 6 在 10 m/s 水平风作用下的仿真结果(PID 控制)

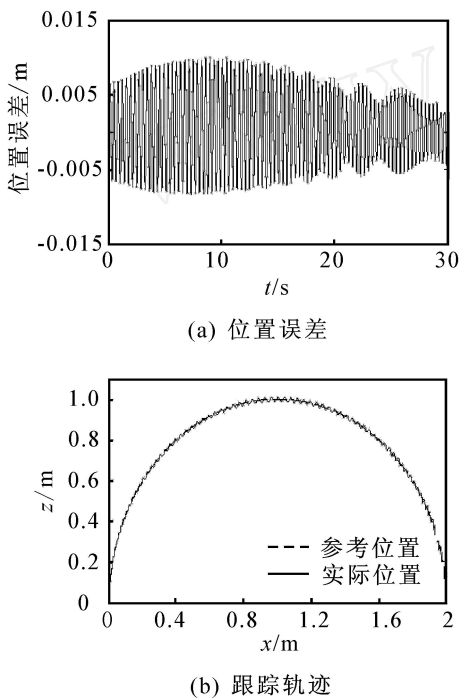


图 7 在 10 m/s 水平风作用下的仿真结果(滑模控制)

p_i , 式(5)表示的参数自适应也会导致控制作用频繁切换,从而引起高频振动。

5 结 语

本文提出了一种大射电望远镜舱索伺服系统的

自适应滑模控制方法,通过引入参数自适应律在线估计作用于系统的扰动并加以补偿,从而减小由模型偏差、随机风扰、姿态和 Stewart 平台调整对跟踪精度的影响. 对大射电望远镜 50 m 缩尺模型的仿真结果表明,采用自适应滑模控制后,不但馈源舱跟踪精度得到提高,而且系统跟踪性能对外部扰动的作用也不敏感。

参考文献(References)

- [1] Schilizzi Richard T. The square kilometer array [C]. Proc of SPIE. Bellingham: International Society for Optical Engineering, 2004: 62-71.
- [2] Pedram Mousavi, Lotfollah Shafai, Bruce Veidt, et al. Feed-reflector design for large adaptive reflector antenna [J]. IEEE Trans on Antennas and Propagation, 2001, 49(8): 1142-1154.
- [3] 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.
- [4] 苏玉鑫, 段宝岩, 彭勃, 等. 大射电望远镜馈源轨迹跟踪的模糊预测控制 [J]. 控制与决策, 2002, 17(1): 85-88.
(Su Y X, Duan B Y, Peng B, et al. Adaptive fuzzy predictive tracking of the feed for large radio telescope [J]. Control and Decision, 2002, 17(1): 85-88.)
- [5] 夏元清, 黄一, 许可康, 等. 大射电望远镜 FAST 馈源舱位姿控制 [J]. 控制与决策, 2004, 19(2): 195-203.
(Xia Y Q, Huang Y, Xu K K, et al. Attitude control of cabin structure of a large spherical radio telescope [J]. Control and Decision, 2004, 19(2): 195-203.)
- [6] Meyer Nahon. Dynamics and control of a novel radio telescope antenna [R]. Reston: AIAA, 1999.
- [7] 黄进, 段宝岩. 一种柔性悬索结构的建模和控制 [J]. 西安电子科技大学学报, 2006, 33(1): 37-40.
(Huang J, Duan B Y. Modeling and control of a flexible cable structure [J]. J. of Xidian University, 2006, 33(1): 37-40.)
- [8] 仇原鹰, 陈杰. 大射电望远镜悬挂馈源的风振模拟 [J]. 应用力学学报, 2000, 17(3): 91-95.
(Qiu Y Y, Chen J. Simulation of the wind induced vibration of the suspended feed cabin in largest radio telescope under random wind forces [J]. Chinese J of Applied Mechanics, 2000, 17(3): 91-95.)