

FAST 大跨度索牵引运动控制系统全过程仿真分析^①

孙京海^② 朱文白 李 辉

(中国科学院国家天文台 北京 100012)

摘 要 分析了 500m 口径球面射电望远镜 (FAST) 使用柔性索牵引加之二次位姿精调机构的支撑方案在实现接收机的大范围精确运动时对结构和控制系统设计带来的巨大挑战, 在现有概念方案的基础上, 建立了馈源支撑系统在原型尺度上的完整机构和环境扰动模型, 提出了相应的控制策略, 并设计了控制器模型来实现精确定位与指向功能。利用全过程数值仿真分析方法, 研究了系统的动力学响应以及各种扰动参数对控制效果的影响。仿真结果显示, 现有的馈源支撑设计具备良好的控制性能, 验证了方案的可行性, 并为进一步的优化设计提供了参考依据。

关键词 射电望远镜, 柔性索牵引, Stewart 并联机器人, 运动控制, 全过程仿真

0 引 言

我国正在建造的 500m 口径球面射电望远镜 (FAST) 是世界上最大最灵敏的单口径射电天文望远镜, 主要组成部分包括汇聚电磁波的主动控制反射面、收集电磁波的馈源接收机以及实现接收机精确定位与指向功能的馈源支撑系统^[1]。观测期间, 指向射电源的 300m 口径反射球面主动变形为回转抛物面并随射电源位置的改变而运动。同时, 装备接收机的馈源舱需要精确定位到瞬时抛物面焦点上。在望远镜的观测范围内, 焦点轨迹形成了位于反射面上方 140m, 开口直径 206m 的球冠面。巨大的空间尺度使得在接收机与反射面之间难以实现刚性连接。FAST 用一种新型的柔性馈源支撑系统^[2]来实现接收机的大跨度和高精度定位和指向功能: 在反射面周边设立支撑塔, 使用钢索悬吊并拖动直径 15m、重 30t 的馈源舱完成大范围运动。馈源舱内, 使用两轴转向机构和 Stewart 并联机器人对接收机前端的位姿进行二次精调, 通过主动控制实现最终的 10mm 空间定位精度要求。

大跨度柔性支撑结构与高精度控制要求给系统的研制带来了巨大的挑战。在初步设计阶段, 基于相似率的缩尺模型实验被应用于对不同方案的分析

与验证, 为设计的改进提供了大量的参考依据^[3,4]。但是, 缩尺研究结果无法反映原型的全部特性, 模型实验存在周期长、建设费用高和结构参数难以修改的弱点, 制约了模型实验的深入应用。而采用全过程数值仿真方法进行原型尺度的研究, 能够弥补这些不足, 正在成为研制大型设备的一种不可缺少的工程分析和设计手段^[5]。由于馈源接收机的控制精度主要受到结构动力学性质、控制系统的性能以及外界环境的干扰三类因素的影响, 本研究建立了馈源支撑系统在原型尺度上的完整的结构、控制和环境扰动模型, 并使用全过程仿真全面模拟和评估系统在实际使用环境下的性能表现, 为最终优化设计方案的确立提供参考依据。

1 索牵引系统

1.1 柔性索支撑结构有限元模型

有限元方法能够提供柔性索支撑结构的精确动力学描述。使用 ANSYS 建立的模型包括均匀分布在直径 600m 圆上的 6 座 150m 高的支撑塔、每座塔底部的钢索绞盘、馈源舱框架以及绕过支撑塔顶端连接绞盘与馈源舱的 6 根钢索 (图 1)。对原始非线性模型进行静力学计算可以得到系统的平衡状态, 然后基于平衡状态在工作位置附近线性化并进行模

① 863 计划 (2006AA04Z133), 国家自然科学基金 (10973023) 和中国科学院国家天文台青年人才基金资助项目。

② 男, 1983 年生, 博士生; 研究方向: 射电望远镜技术, 机构设计及运动控制仿真; 联系人, E-mail: sjh@bao.ac.cn (收稿日期: 2010-05-25)

态分析。使用模态表述可以方便地对初始模型进行减缩,在保证有效地反映系统主要动力学行为的同时降低计算机的处理难度。使用减缩后得到的 300 个主自由度振型和前 150 阶振动频率(0~3.3Hz),可以方便地在仿真软件中建立起状态空间方程用于频域和时域的仿真^[6]。

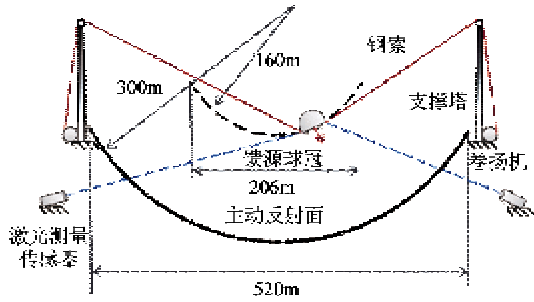


图1 FAST 馈源支撑系统索支撑结构

索支撑结构的动力学响应可以看作是刚体模态和柔性模态的叠加 $\mathbf{G} = \mathbf{G}_r + \mathbf{G}_f$ 。其中,刚体模态的状态空间方程($\mathbf{G}_r$)通过刚体模态矩阵 Φ_r 表示为

$$\begin{bmatrix} \dot{\mathbf{p}}_r \\ \ddot{\mathbf{p}}_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \mathbf{I}_r \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{p}_r \\ \dot{\mathbf{p}}_r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \Phi_r^T \end{bmatrix} \mathbf{f}_e \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{\mathbf{q}}_{er} \\ \ddot{\mathbf{q}}_{er} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Phi_r & 0 \\ 0 & \Phi_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{p}_r \\ \dot{\mathbf{p}}_r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \Phi_{er} \Phi_r^T \end{bmatrix} \mathbf{f}_e \quad (2)$$

而柔性模态部分($\mathbf{G}_f$)通过柔性模态矩阵 Φ_f 、模态频率 ω_j 及模态阻尼比 ξ_j 表示为

$$\begin{bmatrix} \dot{\mathbf{p}}_f \\ \ddot{\mathbf{p}}_f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\text{diag}(\xi_j \omega_j) & \text{diag}(\rho_j \omega_j) \\ -\text{diag}(\rho_j \omega_j) & -\text{diag}(\xi_j \omega_j) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{p}_f \\ \dot{\mathbf{p}}_f \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \text{diag}(\frac{1}{\rho_j \omega_j}) \Phi_f^T \end{bmatrix} \mathbf{f}_e \quad (3)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{\mathbf{q}}_{ef} \\ \ddot{\mathbf{q}}_{ef} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Phi_f & 0 \\ -\Phi_f \text{diag}(\xi_j \omega_j) & \Phi_f \text{diag}(\rho_j \omega_j) \\ \Phi_f \text{diag}(2\xi_j^2 \omega_j^2 - \omega_j^2) & -\Phi_f \text{diag}(2\xi_j \rho_j \omega_j^2) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{p}_f \\ \dot{\mathbf{p}}_f \\ \mathbf{n}_f \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \Phi_{ef} \Phi_f^T \end{bmatrix} \mathbf{f}_e \quad (4)$$

式中, $\rho_j = \sqrt{1 - \xi_j^2}$, $\mathbf{n}_f = \text{diag}(\frac{\xi_j}{\rho_j}) \mathbf{p}_f + \text{diag}(\frac{1}{\rho_j \omega_j}) \dot{\mathbf{p}}_f$ 。

使用减缩的线性化模型,能够在设定的静平衡位置附近代替原非线性模型对结构的动力学性质进

行精确的描述^[7]。频域分析结果显示(图2),索支撑结构具有较低的固有频率和阻尼($\sim 0.2\%$),无法避开环境中脉动风扰频率。馈源舱很容易受到风载荷的激励而产生振动。

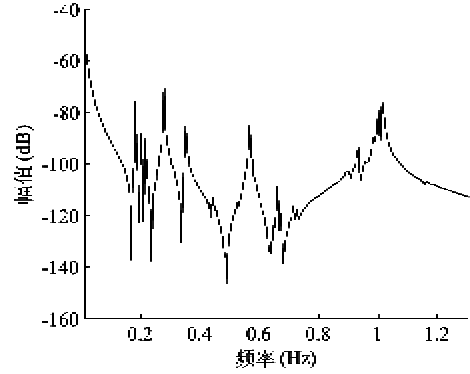


图2 馈源舱在外界扰动输入下的频率响应

1.2 卷扬机模型

作为索牵引控制的输入端,卷扬机由电机驱动,通过减速器、联轴节带动绞盘旋转,能够改变钢索长度(图3)。其动力学方程表示为

$$J_M \ddot{\varphi}_M = T_M - T_c \quad (5)$$

$$J_D \ddot{\varphi}_D = T_c - T_D \quad (6)$$

式中, φ_M 为电机减速器输出端转角, φ_D 为绞盘转角; J_M 为电机和减速器的转动惯量, J_D 为绞盘的转动惯量。联轴节近似为弹簧阻尼系统,传递的扭矩为 T_c 。钢索对绞盘的反作用力矩为 T_D 。

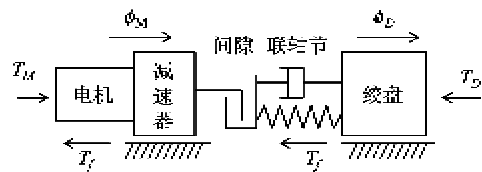


图3 卷扬机结构模型

建模过程中考虑了机构的摩擦和空空间隙。仿真计算显示,这些非线性因素对控制精度的影响小于2%,可以忽略不计。

2 馈源舱内二次位姿精调机构

当存在外界扰动时,仅靠索支撑结构难以保证接收机系统的定位精度,需要在馈源舱内安装额外的位姿调整机构(图4)。与大跨度悬索的柔性相比,馈源舱结构近似为刚体。使用 SimMechanics 工

具包,能够方便地在 SIMULINK 下建立位姿精调机构的多体动力学模型。主要建模步骤包括:指定刚体的质量、转动惯量、自由度和约束;指定刚体的初始运动状态;指定刚体所受的力和力矩。

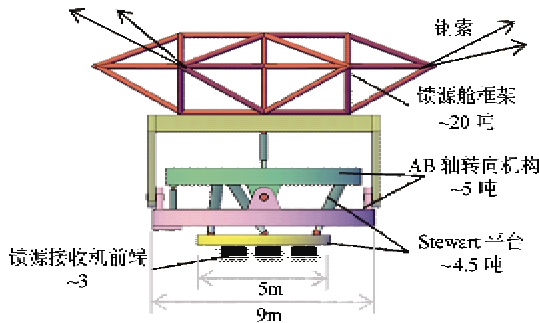


图 4 FAST 馈源舱结构

2.1 AB 轴转向机构

AB 轴转向机构由两个自重轻、刚度高的环形框架组成,其中,A 环通过转动副与馈源舱背架连接,B 环框架通过转动副与 A 环框架连接。它们由直线驱动杆驱动,能够分别绕两个相互正交的转动轴(X、Y)旋转,轴上装有角度编码器提供转角反馈,如图 5(a)所示。

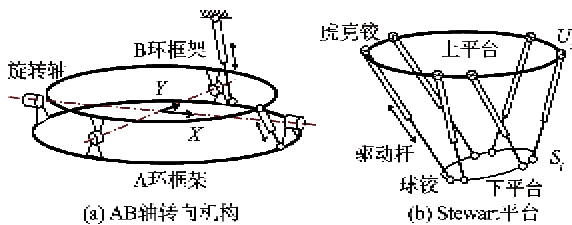


图 5 馈源舱内二次精调机构

AB 轴转向机构通过旋转 Stewart 平台来调整接收机前端的大范围指向角度。设 B_R 为 B 环相对于 A 环的旋转矩阵, A_R 为 A 环相对于馈源舱平台的旋转矩阵。当 B 环沿 Y 轴旋转角度 β 、且 A 环沿 X 轴旋转角度 α 时, B 环框架(Stewart 上平台)相对于馈源舱平台的旋转矩阵(C_R)可表示为

$$\begin{aligned} {}^C_R &= {}^A_R \times {}^B_R \\ &= \begin{bmatrix} \cos(\beta) & 0 & \sin(\beta) \\ \sin(\alpha)\sin(\beta) & \cos(\alpha) & -\sin(\alpha)\cos(\beta) \\ -\cos(\alpha)\sin(\beta) & \sin(\alpha) & \cos(\alpha)\cos(\beta) \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (7)$$

2.2 Stewart 平台

Stewart 平台作为 6 自由度并联运动机构,具有

高刚度、高运动精度和很好的动力学响应。通过与 B 环框架相连的 6 根长度可调的直线驱动杆,Stewart 平台承载重量 3t、需要精确定位的馈源接收机前端(图 5(b))。每根驱动杆由移动副连接,并分别使用虎克铰和球铰与上、下平台相连。

改变驱动杆长度,能够实现 Stewart 下平台相对上平台的 6 个自由度运动,从而完成接收机前端小范围内位置和姿态的精确调整。下平台位姿($O_A O_B, R$)与 6 根驱动杆长度($U_i S_i$)的关系可以表示为

$$U_i S_i = O_A S_i - O_A U_i \quad (8)$$

$$O_A S_i = O_A O_B + R \times O_B S_i \quad (9)$$

式中, $O_A U_i$ 为虎克铰在上平台固连坐标系中的坐标, $O_A S_i$ 和 $O_B S_i$ 分别表示球铰在上、下平台固连坐标系中的坐标, $O_A O_B$ 和 R 分别表示下平台相对于上平台的位置和姿态。

3 控制系统设计与建模

馈源支撑系统使用闭环控制来补偿由风载荷、温度以及机构摩擦、间隙等因素引起的误差,使接收机前端在馈源球冠上的定位及指向精度分别达到 10mm 和 0.004rad。基于结构上的差异,控制分为索牵引、AB 轴转向机构和 Stewart 平台 3 个部分(图 6),参照馈源舱轨迹规划给出的各个运动部件的参考位置和姿态,各自独立地完成不同的控制任务。

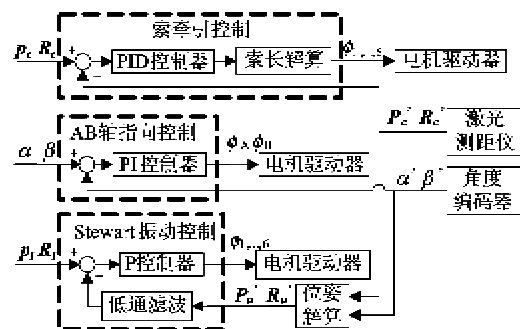


图 6 馈源支撑系统控制策略

3.1 轨迹规划

已知射电源的位置,可以计算出反射面瞬时焦点位置及接收机前端所在的 Stewart 下平台中心点坐标和指向角度。当 Stewart 平台处于平衡位置时,馈源舱框架在 AB 轴转向机构的旋转轴交点处的位置坐标唯一确定。而姿态需要通过优化得到最优

解。姿态优化的目标是使索力最大最小值之差最小,保证6索受力均匀,索系达到最大刚度^[8]。优化结果会导致馈源舱的指向角度与接收机前端所需的指向角度之间存在差异,由式(7)可以将姿态的偏差转换为AB轴转向机构的转角,从而最终得到Stewart下平台的参考姿。

3.2 控制策略

索牵引控制将馈源舱的参考位姿数据(p_c, R_c)与传感器反馈(p_c', R_c')比较,计算出6跟钢索长度的改变量和相应的绞盘转角($\phi_1, \dots, \phi_6$),由卷扬机完成调整,从而实现接收机在馈源球冠上的大范围6自由度位姿调节。由于索支撑结构具有很大的惯量,控制只能补偿馈源舱静态偏移量,无法抑制振动。

馈源舱与Stewart平台所需的指向角度偏差在 $\pm 20^\circ$ 之内均匀连续分布。AB轴指向控制器参照轨迹规划给出的X、Y轴转角补偿量(α, β)以及编码器反馈(α', β')计算改变量(ϕ_A, ϕ_B),由电机驱动A、B环补偿角度的偏差。AB轴指向控制避免了Stewart平台的大范围运动,有助于Stewart平台的小型、轻型化设计,提高控制的快速性、精确性,降低Stewart下平台与馈源舱体之间存在的动力学耦合。

作为最终的调整机构,Stewart平台补偿由馈源舱振动产生剩余的位置和指向误差,将控制精度从厘米量级缩小到毫米量级,达到接收机前端的轨迹跟踪和指向精度要求。根据馈源舱位姿以及AB轴转角的反馈数据,可以解算出Stewart上平台的实际位姿(p_u, R_u),结合Stewart下平台的参考数据(p_l, R_l)使用Stewart平台逆解得到6根驱动杆的长度变化量和相应的电机转角($\phi_1, \dots, \phi_6$),交由电机控制器完成调整。

3.3 馈源舱位姿传感器

控制系统需要在300m距离外对馈源舱位姿进行快速、精确的非接触测量,计划使用激光测距仪来测量馈源舱框架的动态三维刚体位姿数据。激光测距系统由安装在馈源舱上的3个反射靶标和安装在在反射面附近固定基础上的3台激光跟踪仪组成(图1)。通过测量靶标与激光设备之间的相对距离和角度,可以解算出3个靶标的空间位置坐标,进而得到馈源舱的空间6自由度位姿。

在全过程仿真中,根据产品的实际参数(表1),建立了模拟传感器实际性能的仿真模型,用来分析传感器对控制性能的影响。

表1 传感器性能参数

产品型号	Leica TCA2003	API Tracker 3
采样频率	3.3Hz	> 100Hz
测量延时	~0.16s	< 0.01s
测量精度	5mm + 2ppm	10ppm

4 风载荷模型

在FAST的使用环境中,馈源舱上所受顺风向水平风是影响馈源支撑系统控制精度的最主要扰动源。结构所受风力由风速计算得到:

$$F_w(z, t) = A \frac{\rho}{2} (\bar{V}(z) + V(z, t))^2 \quad (10)$$

式中, A 为馈源舱有效迎风面积(75m^2), ρ 为空气密度。风速分解为平均风速与脉动风速之和。在馈源舱高度上的平均风速计算公式为

$$\bar{V}(z) = V_{10} \left(\frac{z}{10} \right)^\alpha \quad (11)$$

式中,地表影响系数 $\alpha = 0.16$, V_{10} 是距离地面高度10m处的平均风速,馈源支撑系统设计参照的最大工作风速 $V_{10} = 4\text{m/s}$ 。

脉动风速使用Davenport功率谱来描述^[9]。为了在时域中建立风载荷模型,需要构造线性滤波器(式12)来近似Davenport风谱,使用曲线拟合方法能够确定滤波器的各项系数。仿真中,使白噪声通过近似滤波器即可在时域中模拟脉动风速。

$$T_a(s) = \frac{b_1 s + b_0}{s^2 + a_1 s + a_0} \quad (12)$$

5 全过程仿真实验

将系统各部分的模型集成到SIMULINK软件中,得到描述馈源支撑系统及其运行环境的全过程仿真模型(图7)。时域下的全过程仿真,能够检验系统在实际扰动中的控制性能,综合分析馈源接收机前端的定位和指向误差来源。

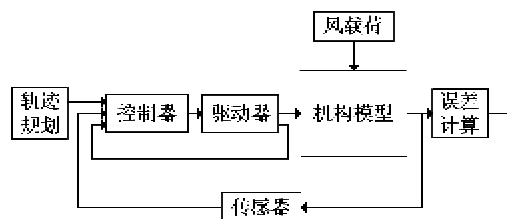


图7 馈源支撑系统全过程仿真模型

在 $V_{10} = 4\text{m/s}$ 的工作风速下以 11.6mm/s 的速度执行轨迹跟踪任务时,接收机前端在馈源球冠中

心(WP1)和边缘位置(WP2、WP3)的定位和指向误差如图 8 所示。

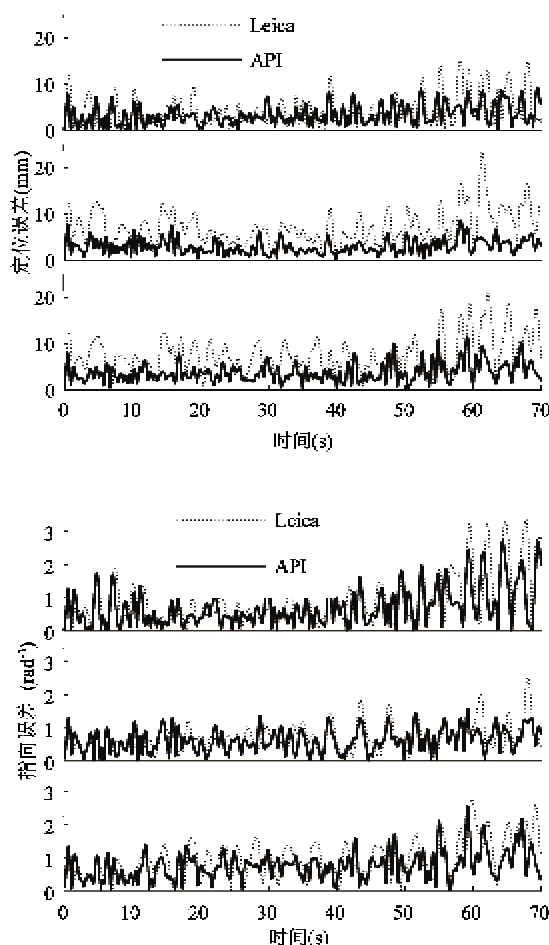


图 8 接收机前端控制误差时程曲线

望远镜对馈源接收机的定位和指向精度要求是基于观测期间出现误差的统计平均值——均方根 (root mean square, RMS) 误差。假设在一段时间内采样得到了 N 个时刻的误差值 e_i , 则 RMS 误差的计算公式为

$$e_{RMS} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N e_i^2}{N}} \quad (13)$$

统计结果显示,使用 Leica 全站仪的测量反馈时,接收机前端定位 RMS 误差为 8.5mm,指向 RMS 误差 $1.2 \times 10^{-3} \text{ rad}$ 。而使用 API 激光跟踪仪定位和指向的 RMS 误差能够降低至 4.1mm 和 $0.93 \times 10^{-3} \text{ rad}$, 均能满足设计要求的 10mm 和 $4 \times 10^{-3} \text{ rad}$ 的定位精度要求。

当环境风载荷变化时,接收机前端的定位和指向误差如表 2 所示。可见,随着风速的增大,馈源支

撑系统的控制精度显著下降。当地面 10m 处的平均风速达到 6m/s 时,已经无法达到接收机前端的定位和指向精度要求。

表 2 不同风速下的位姿控制结果

风速 (m/s)	定位误差 (mm)		指向误差 (rad^{-3})	
	RMS	Max	RMS	Max
4	4.03	10.70	0.93	2.70
6	10.55	29.89	2.52	7.60
8	21.17	69.63	5.20	13.30

6 仿真结果分析

无论采用 Leica 全站仪或是 API 激光跟踪仪的位姿反馈,都会带来时滞和测量误差,对 Stewart 平台的控制性能有很大影响。Stewart 平台安装在阻尼很小的柔性基础上,如果控制指令出现偏差,驱动器的反作用力容易激起枪索系统高阶模态的共振,导致控制发散。因此,需要对测量数据进行低通滤波,消除或减少由传感器带来的错误高频振动数据,保证控制的稳定性。

低通滤波的结果是,Stewart 平台忽略了馈源舱的高阶振动模态,通过主动缩小控制带宽来保证系统运行的稳定性。在控制频率范围外的高频振动,成为接收机前端定位和指向误差的主要来源。

API 激光跟踪仪与 Leica 全站仪相比,具有更高的采样频率,测量精度以及更小的时滞,因 Stewart 平台的控制带宽可以从 0.2Hz 提高到 0.4Hz,从而减少了剩余的高频振动,实现了更高的控制精度。

7 结论

本文在原型尺度上建立了大跨度柔性索牵引控制系统完整的机构动力学模型,结合实际的传感器、驱动器参数和环境扰动情况设计了实现馈源接收机精确定位与指向的控制系统。全过程仿真结果显示,环境风载荷是影响控制精度最主要因素。而控制误差的大小主要取决于系统阻尼的大小和位姿测量传感器的性能。在 4m/s 极限工作风速下,现有方案通过主动控制能够满足接收机的定位和指向精度要求,设计方案的可行性得到了确认。

参考文献

- [1] Nan R D. Five hundred meter aperture spherical radio telescope (FAST). *Science in China Series G: Physics Me-*

- chanics and Astronomy*, 2006, 49(2): 129-148
- [2] Kärcher H, Li H, Sun J H, et al. Proposed design concepts of the FAST focus cabin suspension. In: Proceedings of SPIE Vol. 7012, Ground-based and Airborne Telescopes II, Bellingham, USA, 2008. 701239-1-9
- [3] Duan B Y. A new design project of the line feed structure for large spherical radio telescope and its nonlinear dynamic analysis. *Mechatronics*, 1999, 9(1): 53-64
- [4] Zhu W B, Nan R D, Ren G X. Modeling of a feed support system for FAST. *Experimental Astronomy*, 2004, 17(1-3), 177-184
- [5] Gawronski W. Control and pointing challenges of large antennas and telescopes. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2007, 15(2): 276-289
- [6] Schönhoff U. Practical Robust Control of Mechatronic Systems with Structural Flexibilities; [Ph. D. dissertation], Darmstadt: Fachbereich Maschinenbau an der Technischen Universität Darmstadt, 2003. 31-46
- [7] Lazanowski M, Kärcher H, Li H, et al. Estimation of the dynamic validity range of linearised structural mechanical models. In: Proceedings of the 9th International Conference on Computational Structures Technology, Stirlingshire, UK, 2008. 187
- [8] Li H, Nan R D, Kärcher H, et al. Working space analysis and optimization of the main positioning system of FAST cabin suspension. In: Proceedings of SPIE Vol. 7012, Ground-based and Airborne Telescopes II, Bellingham, USA, 2008. 70120T-1-11
- [9] Gawronski W. Modeling wind-gust disturbances for the analysis of antenna pointing accuracy. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, 2004, 46(1): 50-58

End to end simulation of the large span cable control system in FAST

Sun Jinghai, Zhu Wenbai, Li Hui

(National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100012)

Abstract

To achieve the required pointing accuracy of the five-hundred-meter aperture spherical radio telescope (FAST) by positioning and orienting the receiver properly, a fine adjusting system was employed, and a model for FAST cabin suspension was created. The end to end simulation was carried out to evaluate the control performance. As a result, the control system showed the satisfied performance in compensating the position and orientation errors. The simulation work approved the feasibility of this engineering concept, and also presented an efficient approach for optimization of the future design work.

Key words: radio telescope, flexible cable, Stewart manipulator, motion control, end-to-end simulation