

# FAST 一次支撑系统的实验研究<sup>\*</sup>

虞黎明 索双富 季林红 任革学

(清华大学机械学院 北京 100084)

## 摘 要

介绍了 FAST 光机电一体化索支撑轻型指向跟踪系统的关键技术之一——一次支撑系统, 并对一次支撑系统 1:30 缩尺模型进行了系统的实验研究, 测试了小车在跟踪模式下不同轨迹上的控制效果, 测量并计算了小车的等效刚度, 通过刚度系数估计了小车的风载响应. 实验结果表明, 本文所提出的一次支撑方案可以达到一次支撑结构所要求的位置控制精度. 本文的研究对利用大跨度悬索体系实现对空间目标的精确位置控制具有一定的参考价值.

**关键词** 大射电望远镜; 馈源; 缩尺模型; 一次馈源支撑系统

## 1 引言

随着天文学的发展, 建造新一代大射电望远镜已经成为越来越迫切的需要. 目前, 世界上许多国家都在开展这方面的研究, 研究方案积极采纳现代电子技术、计算机技术、激光检测等技术的最新成果, 提出了许多富有创新性的方案, 如美国的 1-Hectare, 荷兰的 SKAI, 加拿大的 LAR 等. 中国科学家利用中国贵州省南部独特的 Karst 地形提出了一种新颖的设计思路, 准备建造 500m 口径的大射电望远镜, 称为 FAST(Five Hundred Meter Aperture Spherical Radio Telescope). FAST 计划一旦实现, 我们将拥有世界上口径最大的射电望远镜, 从而跻身世界射电天文强国之列. 关于 FAST 项目的详细内容请参考“大射电望远镜 FAST 预研究”工作汇报<sup>\*\*</sup>. 清华大学承担了 FAST 关键技术之一——光机电一体化索支撑轻型指向跟踪系统的预研究工作, 下面我们将对其中的关键技术之一——一次支撑系统的研究作详细的叙述.

## 2 一次支撑系统缩尺模型的实验研究

一次馈源支撑系统的功能是: 支撑二次馈源悬挂系统及其上部的信号收集系统、辅助材料系统、控制装置、维修人员等, 同时实现较精确的位置控制, 在风载荷的作用下, 馈源舱的位置偏移不能超过 50cm. 因而一次支撑系统可行性研究最关键的问题是从理论和实验上确证一次支撑系统能否达到所要求的位置控制精度.

FAST 望远镜主动反射面如图 1 所示, 曲率半径  $R = 300\text{ m}$ , 开口角  $\theta = 120^\circ$ , 开口直径  $D = 520\text{ m}$ . 在跟踪观测射电源时, 馈源相位中心总是在以  $O$  为曲率中心、以  $R_{fd} = 150\text{ m}$

<sup>\*</sup> 中国科学院国家天文观测中心大射电望远镜实验室资助项目

2002-02-01 收到原稿, 2002-09-15 收到修定稿

<sup>\*\*</sup>1999 年度“大射电望远镜 FAST 预研究”工作汇报, 2000.3, 国家天文观测中心, 大射电望远镜实验室

为半径、开口角为  $120^\circ$  的球冠上运动. 我们称这个虚拟球冠为馈源球冠, (参见图 1). 由馈源球冠的几何尺寸, 可以大致看出馈源的运动范围. 如图 1, 馈源球冠的曲率半径为 150 m, 球冠高度为 75 m, 上开口的直径为 250 m. 因而, 我们要建立实际结构的 1:1 模型显然是不现实的. 为了从实验上验证方案的可行性, 我们设计了 1:30 的  $20\text{ m} \times 20\text{ m} \times 6\text{ m}$  缩尺模型. 通过时变索系结构动力学方程我们建立了实际模型和缩尺模型之间的动力学相似律, 如表 1 所示. 借助于相似律不仅确定了模型参数, 而且将模型试验结果映像成真实系统的相关参数估计. 模型相似律由几何相似比  $\lambda_L$  和索直径的相似比  $\lambda_D$  决定. 相似律推导请参考“20 m 移动小车式馈源支撑模型”实验报告\*. 实验中采用瑞士 Leica 公司生产的 TCRA1102 无反射棱镜自动跟踪型全站仪, 其测量精度为 1 mm.

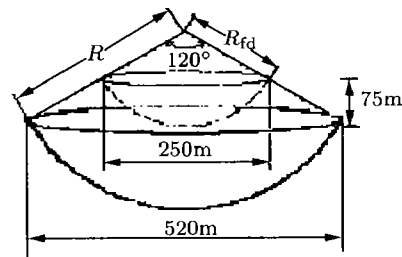


图 1 FAST 望远镜的主反射面和馈源球

Fig.1 The spherical surface of main reflector of FAST

表 1 移动小车馈源支撑方案模型 ( $\lambda_L = 1:30$ ,  $\lambda_D = 1:15$ )

Table 1 The feedback support models for the moving trolley

| 序号 | 变量             | 模型参数         | 相似律                          |                 | 原型参数   |
|----|----------------|--------------|------------------------------|-----------------|--------|
|    |                |              | (模型变量: 原型变量)                 |                 |        |
|    |                |              | (m : p)                      |                 |        |
| 1  | 长度 (m)         | 塔-塔距离: 20    |                              |                 | 600    |
|    |                | 馈源球冠口径: 8.33 | $\lambda_L$                  | 1:30            | 250    |
|    |                | 馈源球冠半径: 5    |                              |                 | 150    |
| 2  | 馈源小车移动速度 (m/s) | 0.002        | $\sqrt{\lambda_L}$           | 1 : $\sqrt{30}$ | 0.011  |
| 3  | 索直径 (m)        | 0.0018       | $\lambda_D$                  | 1:15            | 0.027  |
| 4  | 索线密度 (kg/m)    | 0.0198       | $\lambda_\rho = \lambda_D^2$ | 1:225           | 4.455  |
| 5  | 小车质量 (kg)      | 6.2+0.66     | $\lambda_L \lambda_D^2$      | 1:6750          | 46305  |
| 6  | 索中张力 (N)       | 预应力索张力: 20   | $\lambda_L \lambda_D^2$      | 1:6750          | 135000 |

20 m 一次支撑小车缩尺模型见图 2. 一次支撑系统采用它驱方案, 2 对正交的索道, 由 4 个塔支撑. 小车靠驱动索驱动行走在承载馈源舱的两对相互正交的索道 (承重索) 上, 承重索和驱动索不在同一高度. 馈源舱的 2 对相互正交的承重索一端固定, 另一端分别由 2 个电机驱动, 在馈源舱移动过程中作较小变化. 而 4 条驱动索则分别由 4 个电机驱动. 通过 6 个电机控制 2 对承重索和 4 条驱动索的长度变化来调整馈源舱在空间的位置, 使其能够按照预定的轨迹在空间运动. 为了增加系统的刚性, 我们附加了 4 条恒拉力稳定索. 在运动过程中, 由测量系统实时检测馈源在空中运动的位置, 并反馈给中央计算实现闭环控制.

\* 任革学. 20 m 移动小车式馈源支撑模型实验报告. 2001, 清华大学工程力学系

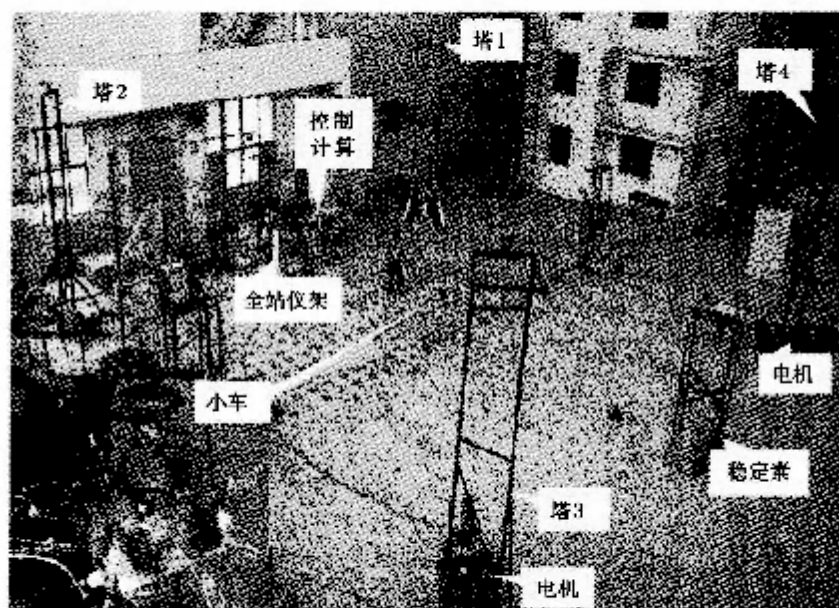


图 2 运动学及动力学相似模型 1:30, 尺寸 20 m × 20 m × 6 m

Fig.2 The kinematics and kinetic model with ratio 1:30

### 3 实验结果与分析

模型馈源跟踪的相似速度为 0.0028 m/s. 测试表明, 速度增大控制效果变差. 为缩短

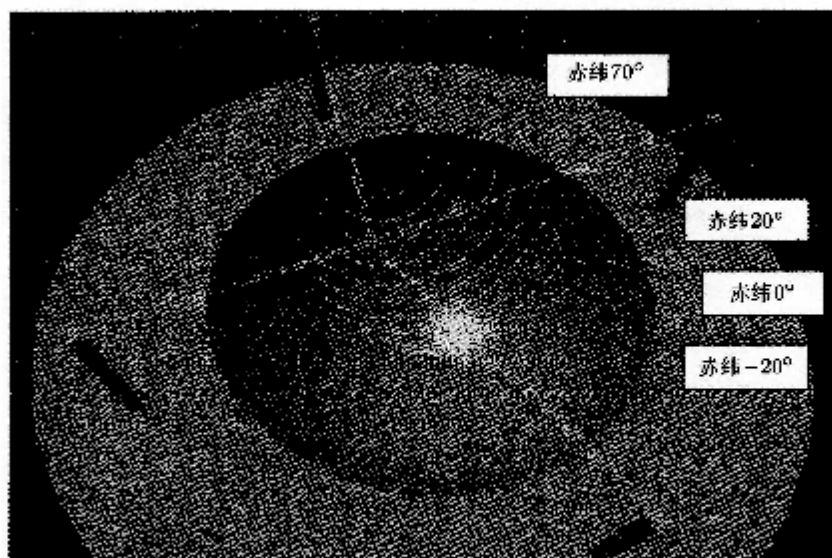


图 3 馈源球冠上的工作轨迹

Fig.3 The working track on the feedback sphere

记录时间, 小车的跟踪速度采用 0.005 m/s. 测试的馈源轨迹见图 3.

工作轨迹的赤纬范围从  $-20^\circ$  到  $70^\circ$ , 每隔  $10^\circ$  一条, 共 10 条; 每条轨迹的时角范围都是  $60^\circ$ . 表 2 显示了 8 条轨迹上位置误差的均方根值. 表中  $x, y, z$  是位置误差的 3 个坐标分量,  $R$  是位置误差向量的长度. 由实验结果可知: 由于小车的移动速度相对较慢, 小车的运行还是非常平稳的, 对馈源小车位置控制精度影响较小.

小车在风载荷作用下的响应, 可以根据系统的刚度进行估计. 系统的刚度利用加载小车的位移进行计算. 垂向受载时结构的对称性保持较好, 这时的刚度系数容易测量. 相似模型小车在不同偏航角、仰角的垂向刚度系数见表 3. 表 4 中列出的是一组小车在水平方

表 2 跟踪模式搜索不同馈源轨迹的均方根位置误差

Table 2 The average squareroot variation of different feedback traces in different following methods

| 1:30 模型测量结果 |               |                |                |                |                | 原型相似律<br>预测结果  |
|-------------|---------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| 轨迹<br>(赤纬)  | 运动速度<br>(m/s) | $x$ rms<br>(m) | $y$ rms<br>(m) | $z$ rms<br>(m) | $R$ rms<br>(m) | $R$ rms<br>(m) |
| $-20^\circ$ | 0.0050        | 0.00266        | 0.00101        | 0.00157        | 0.00341        | 0.1023         |
| $-10^\circ$ | 0.0052        | 0.00259        | 0.00146        | 0.00173        | 0.00363        | 0.1089         |
| $0^\circ$   | 0.0051        | 0.00233        | 0.00124        | 0.00168        | 0.00330        | 0.0990         |
| $10^\circ$  | 0.0052        | 0.00233        | 0.00135        | 0.00176        | 0.00340        | 0.1020         |
| $20^\circ$  | 0.0050        | 0.00213        | 0.00144        | 0.00182        | 0.00333        | 0.0999         |
| $40^\circ$  | 0.0050        | 0.00219        | 0.00143        | 0.00206        | 0.00349        | 0.1047         |
| $50^\circ$  | 0.0050        | 0.00230        | 0.00131        | 0.00189        | 0.00341        | 0.1023         |
| $70^\circ$  | 0.0051        | 0.00212        | 0.00135        | 0.00229        | 0.00357        | 0.1071         |

表 3 相似模型小车垂向刚度测量

Table 3 The vertical stiffness of the trolley model

| 位置<br>( $\theta, \phi$ ) | 1<br>( $0^\circ, 0^\circ$ ) | 2<br>( $20^\circ, 180^\circ$ ) | 3<br>( $40^\circ, 180^\circ$ ) | 4<br>( $20^\circ, 225^\circ$ ) | 5<br>( $40^\circ, 225^\circ$ ) | 平均值 |
|--------------------------|-----------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|-----|
| 10 N 载荷 (mm)             | 2.1                         | 1.8                            | 2.6                            | 2.4                            | 2.6                            | 2.3 |
| 20 N 载荷 (mm)             | 4.4                         | 4.100                          | 4.7                            | 4.3                            | 5.3                            | 4.6 |
| 刚度系数 (N/mm)              | 4.8                         | 5.6                            | 3.8                            | 4.2                            | 3.8                            | 4.3 |

表 4 相似模型小车水平刚度测量

Table 4 The horizontal stiffness of the trolley model

| 位置<br>( $\theta, \phi$ ) | 1<br>( $0^\circ, 0^\circ$ ) | 2<br>( $20^\circ, 180^\circ$ ) | 3<br>( $40^\circ, 180^\circ$ ) | 平均值 |
|--------------------------|-----------------------------|--------------------------------|--------------------------------|-----|
| 10 N 载荷 (mm)             | 3.4                         | 2.0                            | 1.8                            | 2.4 |
| 20 N 载荷 (mm)             | 6.3                         | 4.600                          | 3.3                            |     |
| 刚度系数 (N/mm)              | 2.9                         | 5.0                            | 5.6                            | 4.1 |

向的刚度测量值. 利用垂向刚度系数及水平刚度系数, 估算出模型馈源小车在风载荷下的响应, 根据相似律计算出原型小车相应位置的响应.

由小车的等效刚度系数可以估算小车在不同风载作用下的响应, 为保守估计利用最小的等效刚度进行计算. 水平刚度系数取  $2.9 \text{ N/mm}$ , 垂直刚度系数取  $3.8 \text{ N/mm}$ . 小车按照  $15 \text{ m} \times 15 \text{ m} \times 6 \text{ m}$  的实心结构计算最大迎风面积. 脉动风压引起的方差位移一般较平均风压引起的均值位移小一个数量级. 按平均风压的 20% 计入风载荷值, 不同风速下的模型小车风载响应位移见表 5. 在表 5 中, 原型风载荷为作用在实心馈源小车上的风力, 原型风载荷与模型风载荷相似比为  $\lambda_L \lambda_D^2 (6750)$ , 原型相似预估位移与模型合成位移相似比为  $\lambda_L (30)$ , 模型合成位移由模型风载荷除以相应刚度系数获得. 贵州省 FAST 台址的环境风速在通常情况下不超过  $8 \text{ m/s}$ , 因而由表中数据可知, 由相似律所获得的实际模型的位移可以达到  $50 \text{ cm}$  的精度要求.

表 5 不同风速下模型小车位移响应估算值  
Table 5 The estimated responding displacement  
in different velocities of the trolley model

| 基本风速 (m/s,<br>离地面高度 10 m) | 馈源高度风速 (m/s,<br>离地面高度 150 m) | 原型风载荷 (N)  | 模型风载荷<br>(N) | 模型合成<br>位移 (mm) | 原型相似<br>预估位移 (cm) |
|---------------------------|------------------------------|------------|--------------|-----------------|-------------------|
| 2.0                       | 4.8                          | 铅垂方向 5285  | 0.8          | 0.3             | 0.9               |
|                           |                              | 水平方向 3398  | 0.5          |                 |                   |
| 4.0                       | 9.5                          | 铅垂方向 20705 | 3.1          | 1.1             | 3.3               |
|                           |                              | 水平方向 13310 | 2.0          |                 |                   |
| 6.0                       | 14.3                         | 铅垂方向 46913 | 7.0          | 2.4             | 7.2               |
|                           |                              | 水平方向 30157 | 4.5          |                 |                   |
| 8.0                       | 19.0                         | 铅垂方向 82818 | 12.3         | 4.2             | 12.7              |
|                           |                              | 水平方向 53238 | 7.9          |                 |                   |

## 4 结论

通过对馈源一次支撑系统 1:30 仿真模型的实验结果分析, 可以得出清华大学所提出的一次支撑结构可以达到 FAST 一次支撑系统所要求的位置精度. 在国内外, 利用大跨度悬索体系来实现对空间目标的精确位置控制的研究开展得并不多, 因而本文的研究对利用大跨度悬索体系结构实现对目标的精确控制具有一定的参考价值.

## 参 考 文 献

- [1] Duan Baoyan. The optic-electric-mechanical investigation and design of new FAST. *Mech. Eng., China*, 1999, 10: 1002—1004, in Chinese (段宝岩. 新一代大射电望远镜机电光一体化设计研究. 中国机械工程, 1999, 10(9):1002—1004)
- [2] Wang Wenli. The Simulation model design of large scale spherical surface radio telescope. *Group Lathe Autom. Man. Tech.*, 1999, 11:10—13, in Chinese (王文利. 大型球面射电望远镜仿真模型设计. 组合机床与自动化加工技术, 1999, 11:10—13)

- [3] Shen Shizhao. Structure Design of Suspension Wire Rope. Beijing: China Publishing Press of Construction Engineering, 1997, in Chinese (沈世钊. 悬索结构设计. 北京: 中国建筑工业出版社, 1997)
- [4] Shan Shengdi. Theory and Application of Suspension Wire Rope. Changsha: Science and Technology Press of Hunan, 1983, in Chinese (单圣涤. 悬索曲线理论与应用. 长沙: 湖南科学技术出版社, 1983)
- [5] Yu Liming, Suo Shuangfu. The structure investigation of first feed back system for FAST. *Eng. Des.*, 2001, 4: 173—175, in Chinese (虞黎明. FAST 一次支撑系统的结构研究. 工程设计, 2001, 4:173—175)

## EXPERIMENTAL RESEARCH OF FIRST FEED-SUPPORT SYSTEM OF FAST

YU Liming SUO Shuangfu JI Linhong REN Gexue

(School of Mechanical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084)

### Abstract

The first feed-support system, which is one of the key techniques of FAST, is introduced in this paper. Systemic experimental research with the scaled model, which is one of thirtieth of actual structures, is made. In the experiment, the position deflection of the feed-car was analyzed when the feed-car ran along the part of a circle. Furthermore, the equivalent rigidity of the system was measured and the position deflection of the feed-car resulting from wind was computed. The research results confirmed that the first feed-support system meets the required position control precision. Also, the results are very helpful to the precise position control of the large span cable structures.

**Key words** Large radio telescope, Source feed, Scaled model, First feed-support system