

# 大射电望远镜反射面支承张拉结构非线性分析

罗永峰, 于庆祥, 陆 燕, 李国强

(同济大学 建筑工程系, 上海 200092)

**摘要:** 根据大射电望远镜(FAST)反射面系统的要求, 引入一种新颖轻巧的反射面支承结构方案——张拉整体体系. 通过对多种方案张拉结构体系的承载性能、变形特性、对促动器系统影响的分析以及与传统刚性结构体系(网壳)的比较, 并经过反复优化计算, 确定了张拉整体体系支承结构方案. 计算结构表明, 用于反射面支承结构的张拉整体体系比网壳结构自重轻约 72.5%, 结构作用于促动器的反力减小约 78.5%. 张拉整体体系是一种适合于大射电望远镜的合理的轻型支承结构.

**关键词:** 500 m 口径主动球面射电望远镜; 张拉结构; 非线性分析

**中图分类号:** TU39

**文献标识码:** A

**文章编号:** 0253-374X(2003)01-0001-05

## Nonlinear Analysis of Supporting Tensegrity Structure for Reflector of Large Radio Telescope

LUO Yong-feng, YU Qing-xiang, LU Yan, LI Guo-qiang

(Department of Building Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** According to the requirements of the five hundred meter aperture spherical telescope (FAST) project, a novel, simple and light structure, tensegrity system, is proposed for the FAST reflector supporting structure. Several different geometric forms of the tensegrity system for FAST reflector are devised and compared. A multi-purpose analysis, including the load-bearing capacity, deformation behavior and the comparison with traditional reticulated shells, is presented in the paper. The optimal analysis and design show that the self-weight of the tensegrity system is much smaller than the traditional reticulated shell. It is 72.5% lighter than that of the reticulated shell, which depends on the stiffness of the supporting structure. The reactions applying on the actuators are also much smaller, 78.5% down. The numerical results show that the tensegrity system is a suitable alternative supporting structure for FAST reflector from the structural and economical point of view.

**Key words:** five hundred meter aperture spherical telescope; tensegrity structure; nonlinear analysis

500 m 口径主动球面射电望远镜(FAST)<sup>[1,2]</sup>工程是我国天文界重点工程, 反射面第一阶段的预研究已于 2001 年初完成<sup>[2]</sup>. 在第一阶段研究中, 反射面支承结构采用传统的网壳结构, 并分别由钢和铝合金两种材料制作. 网壳结构虽然具有良好的空间整体性和刚度, 但与张拉结构相比, 其结构自重较大, 对其下部促动器作用力大, 影响促动器的工作性能及反射面的造价. 为了进一步改进 FAST 反射面系统, 降低造价, 本文提出可用于 FAST 反射面支承结构的新型结构——张拉整体体系, 通过对多种张拉结构体系的承载性能、变形性能、反射面板布置方案及对促动器影响的分析, 并与传统网壳作比较. 计算结果表明, 张拉整

收稿日期: 2002-05-21

基金项目: 大射电望远镜 FAST 反射面系统改进研究资助项目(FAST 预研项目 96)

作者简介: 罗永峰(1957-), 男, 陕西咸阳人, 教授, 工学博士.

Copyright © Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

体体系是一种适于 FAST 反射面支承结构的合理的轻型结构形式. 本文对该张拉支承结构的找形、承载性能、变形性能及结构自重和反力进行了计算比较.

# 1 几种可用于 FAST 反射面支承张拉结构的几何形式

## 1.1 FAST 反射面的基本要求

FAST 反射面是一个半径 300 m, 开口 500 m 的网格球冠面(见图 1). 当望远镜工作时, 反射面应根据需要实时变化其曲面形状, 以模拟一个所需要的抛物面. 为此, 将反射面划分为 1 788 个球面六边形基本单元<sup>[1]</sup>, 每个单元边长不超过 7.5 m, 支承于一个六边形支承结构上. 该支承结构又置于其下部沿周边对称布置的三个促动器上. 在模拟抛物面的运动中, 促动器根据实时控制指令, 带动反射面基本单元到达指定位置. 相邻基本单元及促动器的布置见图 1 所示.

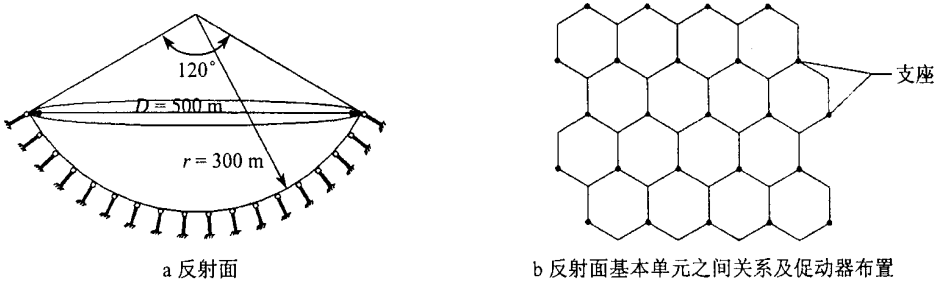


图 1 FAST 反射面支承布置  
Fig.1 FAST reflector

每个基本单元又由 54 个平面三角形组成, 三角形的每个角点均位于反射面球面上. 控制三角形平面与所模拟的球面间的几何误差不超过 1 mm. FAST 反射面对支承结构的设计要求为, 在望远镜工作期间, 每个基本单元的任一点由其支承结构变形所产生的法向位移不大于 1 mm.

## 1.2 可选的结构方案

适于反射面基本单元支承结构的方案很多, 传统的刚性结构体系(如梁、桁架或网壳)结构自重大, 对促动器及造价均不利. 张拉整体体系<sup>[3~6]</sup>是一种正在发展的预张拉索杆体系, 结构刚度来自于张拉后的预拉力, 结构构件为大部分的拉索和少部分的压杆, 结构自重轻, 便于制作、运输和安装, 是一种合理的支承结构体系.

## 1.3 所选结构体系的特点

根据反射面基本单元的组成和特点, 支承结构应具有相似的几何(网格)模式, 以保证反射面三角形铝面板的支承定位. 据此, 提出三种张拉结构体系几何构成方案(如图 2 所示), 以进行优化分析比较.

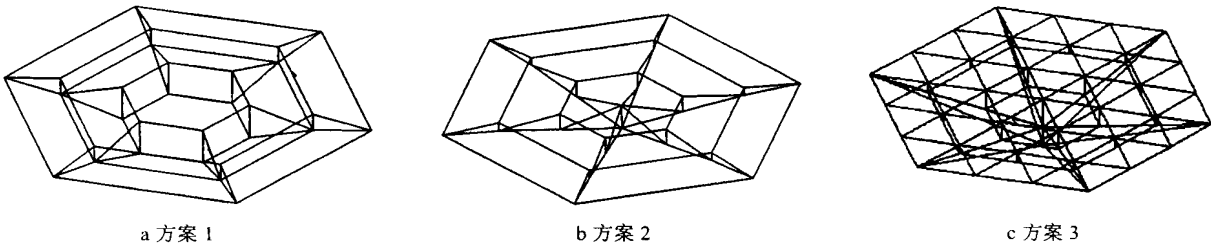


图 2 FAST 反射面支承张拉结构模型  
Fig.2 Tension structures for supporting FAST reflector

三种结构方案均似一个倒置的屋盖结构. 前两种方案除周边圈梁(6 个单元)和竖向杆(分别为 12 和 13 个单元)外, 其余单元均为索. 第三种方案中层 6 根径向梁和中心 1 根竖向杆为刚性杆, 其余单元均为

索.第一种方案易于施加预应力,单元内力分布较为均匀,但中心无支点,需增加辅助杆设置中心点,才能安装反射面板.第二种方案构件数目比第一种多 7 个单元(6 根索、1 根杆),其特点是不需增加辅助杆件即可方便安装反射面板,缺点是中心点处索的张力偏小,较难控制.第三种方案构件数目比前两种多 2 倍多,且周边索结点在张拉后偏离直线位置较多,反射面板定位难度大,故第三种方案后面不再考虑.

## 2 FAST 反射面支承结构非线性分析

张拉整体体系是一种强非线性结构体系,结构分析常分为两步进行:即预张拉找形分析和后期承载分析.找形分析是在无初始刚度的非结构几何网格上施加预张力并控制预张力达到一个预先指定的合理水平,以保证结构的初期刚度和形态;承载分析是在预张拉成型的结构初期形态上施加可能的荷载,验算结构的承载能力及在正常工作条件下的变形,以保证结构的安全性、工作精度和可靠性.该结构体系的难点是保证工作状态的变形精度.

在支承结构张拉成型过程中,为了便于张拉、准确成形并使张力均匀,6 根上弦径向边索作为主动张拉索,并分阶段同步均匀张拉.FAST 反射面的荷载很小,因而对结构初张拉的要求为,只要结构达到预定的刚度,能保证支承结构在工作条件下的工作精度即可,而此时经计算表明外荷载对结构的承载能力几乎没有影响.根据以上要求,为了减轻结构自重,对结构单元、结构高度进行反复优化计算,结果表明若将结构索单元的最大预张力控制在其强度的 60%左右,可得到合理的结构与张力系统.

### 2.1 荷载及工况

反射面支承结构的荷载有自重、风荷载、温度变化作用及可能的积雪.反射面板为网状铝面板,铝面板的净面积约为毛面积的 3/4,厚度不大于 1 mm.风速有两种:极端风速  $v_{\max}=20\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,工作最大允许风速  $v_w=4\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,温度变化范围在  $0\sim30\text{ }^{\circ}\text{C}$  左右.在非线性分析中考虑五种工况:自重+ $(\Delta t=20\text{ }^{\circ}\text{C})$ ,自重+ $(\Delta t=-10\text{ }^{\circ}\text{C})$ ,自重+风( $v=20\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ),自重+风( $v=4\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ),自重+积雪+风( $v=4\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ).

### 2.2 反射面基本单元支承张拉结构试验模型分析

#### 2.2.1 模型几何形式和构件确定

为了通过模型试验观察和测量反射面系统的综合工作性能,预研究制作了一个 4 块基本单元的 1/3 缩尺模型进行分析、设计与试验.为了优化并选择出合理的结构形式与经济的构件截面,本节对图 1 所示的第一和第二种结构体系进行分析计算.

结构模型均取正六边形,边长 2.340 m,三角形网格边长 0.833 m.模型 1 与模型 2 所用的索、杆和梁单元截面均相同.其中圈梁 90 mm×2 mm 方钢管,索为直径 3 mm 高强钢丝,压杆为直径 32 mm,壁厚 2 mm 的普通钢管.

#### 2.2.2 结构体系稳定性<sup>[3]</sup>

在张拉结构体系中,对于给定的空间铰接体系,设杆件数为  $h$ ,非约束节点数为  $n$ ,排除约束点中某些自由度不被约束的情况,非约束位移数为  $3n$ ,则体系平衡方程为

$$[A]\{t\}=\{f\} \tag{1}$$

式中:[ $A$ ]为平衡矩阵; $\{t\}$ 为杆件内力矢量; $\{f\}$ 为节点力矢量.设 [ $A$ ] 的秩为  $r$ ,则自应力模态数  $s=h-r$ .独立机构位移数  $m=3n-r$ .若  $m>0$ ,则须对体系进行稳定性判定.

当体系发生某一位移时,节点就会产生不平衡力即几何力.若这种不平衡力具有使节点恢复其初始位置的趋势,则使机构硬化.对 [ $A$ ] 的增广矩阵 [ $AI$ ] 进行高斯消元,可得到内部机构位移模态 [ $D$ ]= $[d_1\ d_2\ \cdots\ d_m]$ .一般的机构位移是各独立机构位移模态的线性组合,即

$$[D]\{\beta\}=\{d_1\}\beta_1+\{d_2\}\beta_2+\cdots+\{d_m\}\beta_m \tag{2}$$

其中: $\{\beta\}$ 为机构位移模态组合因子,可取任意实数.

当第  $a$  种自应力模态发生第  $b$  种机构位移模态时,可按如下步骤计算几何力.不失一般性,假定连于  $i$  点的单元有 2 个,即  $i_j$  和  $i_{j+1}$ ,则根据已发生的机构位移,式(1)所表示的平衡方程为

$$\begin{cases} [(x_i + u_{ix}) - (x_g + u_{gx})]t_l + [(x_i + u_{ix}) - (x_j + u_{jx})]t_k = f_{ix} \\ [(y_i + u_{iy}) - (y_g + u_{gy})]t_l + [(y_i + u_{iy}) - (y_j + u_{jy})]t_k = f_{iy} \\ [(z_i + u_{iz}) - (z_g + u_{gz})]t_l + [(z_i + u_{iz}) - (z_j + u_{jz})]t_k = f_{iz} \end{cases} \quad (3)$$

式中： $t_l, t_k$  为与节点  $i$  相连接杆件的内力分量； $u_{ix}, u_{iy}, u_{iz}$  为  $i$  点位移分量。

用式(3)减去式(1)得

$$\begin{cases} G_{abix} = (u_{ix} - u_{hx})t_l + (u_{ix} - u_{jx})t_m \\ G_{abiy} = (u_{iy} - u_{hy})t_l + (u_{iy} - u_{jy})t_m \\ G_{abiz} = (u_{iz} - u_{hz})t_l + (u_{iz} - u_{jz})t_m \end{cases} \quad (a = 1, \dots, s; b = 1, \dots, m) \quad (4)$$

记第  $a$  种自应力模态下的几何力为  $[G_a] = [G_{a1} \ G_{a2} \cdots \ G_{am}]$ , 应用判别式  $\{\beta\}^T [G]^T [D] \{\beta\} > 0$ , 若  $[G]^T [D]$  正定, 则机构稳定. 对 FAST 反射面张拉结构体系进行以上稳定性判定可知, 该模型体系稳定.

2.2.3 非线性计算结果及其比较

预张力通过对 6 根上弦径向边索所施加的初应变来控制, 经反复计算可得合理的初应变为 0.020, 相应的最大索张力达其强度的 60% 左右, 结构的合理高度为  $h=0.567\text{ m}$ .

两种结构体系在初张拉完成后, 径向索张力由外向内减小, 但同一圆周径向索内力基本相等; 同样, 环向索张力也由外向内减小, 同一圆周环向索内力基本相等. 张力最大的索仍为径向边索(见表 1), 与预定张力(强度的 60%)相差 4%. 两种结构方案张拉后实际几何坐标与理论坐标有微小偏差, 其中方案二上弦节点最大切向偏差为 0.15 mm, 在允许范围内, 最大法向偏差为 2.28 mm, 可用可调节节点修正.

对结构模型非线性分析所得的结构单元内力列于表 1 和表 2. 结构在工作允许最大风速下的变形列于表 3. 风速下的变形模态示于图 3 中.

表 1 张拉阶段的典型单元应力

Tab.1 Typical element stresses of the models in pre-stressing stage MPa

模型	径向索			环向索	
	1	2	3	1	2
模型 1	933.25	320.71	—	926.80	304.83
模型 2	921.30	388.34	205.19	915.78	218.40

表 2 受荷载阶段的典型单元应力

Tab.2 Typical element stresses of the models in loading stage MPa

模型	径向索			环向索	
	1	2	3	1	2
模型 1	926.35	305.80	—	917.90	314.83
模型 2	914.37	355.31	216.28	909.04	220.69

注: 径向索从外到内编号依次为 1~3, 环向索从外到内编号依次为 1~2, 表 2 同.

表 3 上弦节点在工作风速下的法向位移( $v=4\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ )

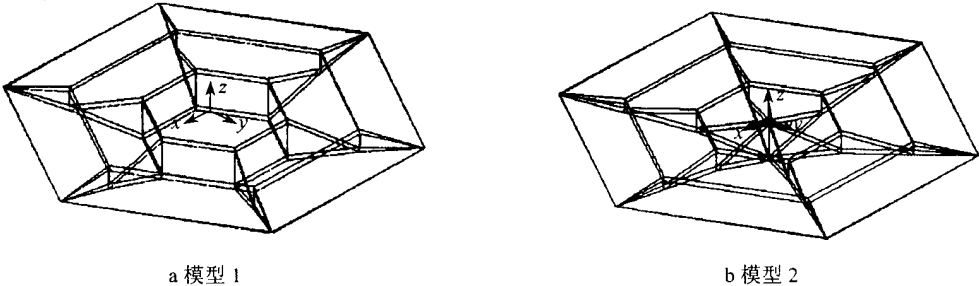
Tab.3 Displacements of upper chord joints under permitted wind for working( $v=4\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) mm

模型	节点位移			
	1	2	3	4
模型 1	0.082	0.204	0.268	
模型 2	0.077	0.196	0.222	0.224

注: 上弦节点从外到内编号依次为 1~4.

2.3 反射面基本单元支承张拉结构分析

本节对图 2 中所示的前两种方案反射面支承结构体系进行实际尺寸的计算分析, 通过多次找形及优化计算, 确定结构的最合理高度、最合理结构构件. 优化计算后得到结构构件为: 圈梁为焊接方钢管, 翼缘宽 172 mm, 厚 2.5 mm, 腹板高 290 mm, 厚 2 mm, 径向索直径分别为 10 mm, 8 mm, 6 mm(从外向内), 环向索直径分别为 10 mm, 8 mm(从外向内), 竖向钢管压杆直径分别为 38 mm, 32 mm, 壁厚 2 mm, 结构合理高度为 1.70 m. 初张拉



(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

图 3 模型结构变形图

Fig.3 Deformation of the pre-stressed models under external loads

阶段索的最大应变为 0.02,索中的张力控制在其强度的 64%。方案二索单元在极限荷载下的应力为 988.8 MPa,结构在最大允许风速下的最大位移为 1.22 mm,最大位移点为无支承的边界角点。结构自重为  $Q=760.5\text{ kg}$ ,平均密度为  $q=5.2\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ 。

不同结构对促动器的作用力列于表 4,不同结构的自重比较列于表 5。

表 4 促动器反力比较		表 5 结构自重比较		
Tab.4 Reactions of the actuators		Tab.5 Self-weight of the structure		
模型	反力/kN	模型	$q/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-2})$	结构自重 $Q/t$
模型 1	2.38	模型 1	5.07	0.74
模型 2	2.48	模型 2	5.20	0.76
钢网壳	11.56	钢网壳	19.64	2.87
铝合金网壳	7.48	铝合金网壳	10.80	1.58

### 3 结论及建议

- (1) 计算结果表明,用于反射面支承结构的张拉整体体系结构的自重比传统的网壳小得多,仅为钢网壳的 27.5%,且促动器反力减小 78.5%,因而张拉结构是一种合理的支承结构形式。
- (2) 对于 FAST 反射面,模型 2 既受力合理,又易于反射面安装,是张拉结构模型中最合理的一种。
- (3) 反射面支承张拉结构的合适高度为 1.7 m,便于初张拉,内力分布均匀。
- (4) 结构的初张拉应对称、同步进行,以保证结构网格的正确形态及内应力。
- (5) 张拉结构的施工难度大于网壳结构。

**致谢** 本文的研究工作是在自然科学基金和国家观测中心的资助下完成,在此表示感谢!

### 参考文献:

[1] QIU Yue-hai. The novel design for giant spherical radio telescope with active main reflector [J]. Acta Astrophysica Sinica, 1998, 18(2): 222—228.

[2] 罗永峰,邓长根,李国强,等. 500 m 口径主动球面望远镜反射面支承结构分析[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2000, 28(4): 497—501.

[3] 张立新. 索穹顶结构成型关键问题和风致震动[D]. 上海: 同济大学建筑工程系, 2001.

[4] Ariel Hanaor. Aspects of design of double-layer tensegrity domes[J]. Int J of Space Structures, 1992, 7(2): 101—113.

[5] Pellegrino S, Calladine C R. Matrix analysis of statically and kinematically indeterminate frameworks[J]. Int J Solids Structures, 1986, 22(4): 409—428.

[6] Motro R. Tensegrity systems and geodesic domes[J]. Int J of Space Structures, 1990, 5(3&4): 341—351.

•下期文章摘要预报•

钢结构框架体系整体非线性分析研究综述

李国强, 刘玉姝

较为全面地介绍了钢结构框架体系非线性分析方法的研究现状及发展趋势, 讨论了影响结构整体极限承载力的各种非线性因素及其考虑方法, 为实现钢框架结构的高等设计提供了理论基础.

©1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net