

# FAST 主动反射面支承结构总体方案研究

沈世钊, 范 峰, 钱宏亮

(哈尔滨工业大学 土木工程学院, 黑龙江哈尔滨 150090)

**摘要:** 针对国家重大科学工程 500m 口径球面射电望远镜(FAST)主动反射面的工作特点, 提出了整体索网与背架结构共同支承反射面的结构方案, 对四边形及多种三角形球面索网网格划分方式进行分析 and 比较, 确定了短程线型网格为优选划分方式; 以反射面拟合精度及系统控制最易为综合目标, 确定了球面索网的网格尺寸及背架结构最优半径等; 对单根控制下拉索和 3 根控制下拉索两种方案从主动反射面的变位功能、索网结构的力学性能等方面进行了详细对比, 确定了采用下端设置促动器的单根控制下拉索, 实现反射面基准态的成型和工作态的变位。

**关键词:** FAST; 主动反射面; 索网结构; 结构方案

**中图分类号:** TU393.304 **文献标志码:** A

## Research on support structure scheme for active reflector of FAST

SHEN Shizhao, FAN Feng, QIAN Hongliang

(School of Civil Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China)

**Abstract:** FAST (Five-hundred-meter Aperture Spherical Telescope) is a major national scientific project. The support structure scheme for the active reflector was studied in this paper, including the integrated cable-net structure and the back-structure. The mesh modes of quadrangle and several types of triangles for the cable-net were compared, and the geodesic grid was determined as the optimal one. The grid size and the optimal radius of the back-structure were subsequently studied and determined with the fitting accuracy of the reflecting surface and the simplicity of the system control as the comprehensive goal. The schemes of one control cable and three control cables were compared in detail from aspects of the active shape-changing function of the reflector, mechanical properties of the cable-net structure and etc, the scheme of one control cable was determined and finally the forming of the benchmark state and the shape changing of the work state of the reflecting surface was realized.

**Keywords:** FAST; active reflector; cable-net structure; structural scheme

基金项目: 国家自然科学基金跨学科交叉重点项目(10435020), 国家自然科学基金天文联合基金项目(10778615)。

作者简介: 范峰(1971—)男, 安徽安庆人, 工学博士, 教授。E-mail: fanf@hit.edu.cn

收稿日期: 2010 年 10 月

0 引言

1994 年中国天文学家提出了利用贵州喀斯特洼地 ,建造 500m 口径具有主动反射面的大型射电望远镜 FAST ( Five-hundred-meter Aperture Spherical Telescope) 的计划<sup>[1-2]</sup> ,FAST 建成后将是世界上口径最大的单口径射电望远镜( 图 1) 。其灵敏度将比美国 Arecibo 望远镜提高 2. 25 倍 ,预测在未来 20 ~ 30 年保持世界领先地位。

2007 年 7 月 ,FAST 作为国家重大科学工程得到国家发改委正式批准立项 ,目前正在为其详细设计和将来的建造、运行及维护进行更全面、深入的理论技术攻关与实验模型验证 ,整个项目预计将在 2016 年建成。

自 2003 年起 ,在国家天文台 FAST 项目总体组的领导与支持下 ,哈尔滨工业大学空间结构研究中心一直参与主动反射面支承结构的研究<sup>[7-4]</sup> ,作为第一技术合作单位负责主动反射面支承结构的关键技术攻关 ,并完成了主动反射面支承结构的初步设计<sup>[3-4]</sup>。

本文首先详细分析了 FAST 主动反射面的工作特点 ,其后阐述了反射面支撑结构的总体方案以及各相关参数的确定。

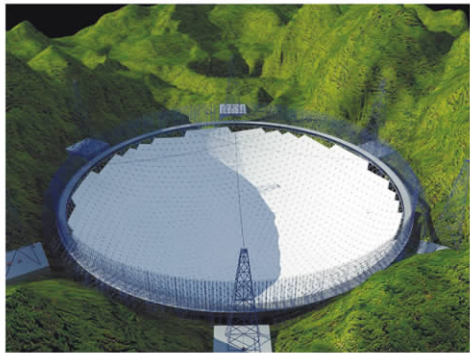


图 1 FAST 示意图  
Fig. 1 Sketch of FAST

1 主动反射面工作原理及其支承结构特点

主动反射面是 FAST 主要创新点之一 ,其实质是跟随所观测天体的运动将照射范围内反射面实时调整到指定抛物面位置 ,使天体发出的平行电磁波经反射面反射后始终汇聚于一点( 聚焦) 。反射面可以分为两个状态: 基准态和工作态。基准态时反射面为一半径固定的确定球面 ,工作态时反射面的形状随时间连续变化 ,但照射范围内的工作面均为一指

定抛物面。工作抛物面的形状及其与基准球面的相互位置可以通过优化求得。图 2 给出了基准态与某一工作态的剖面关系示意图( 当照射范围位于反射面底部时) ,反射面口径为 500m ,基准态为一半径 300m 的球面 ,照射范围内工作态抛物面的口径为 300m ,抛物面的焦距为  $0.4665R$  ,二者的最大距离为 67cm。

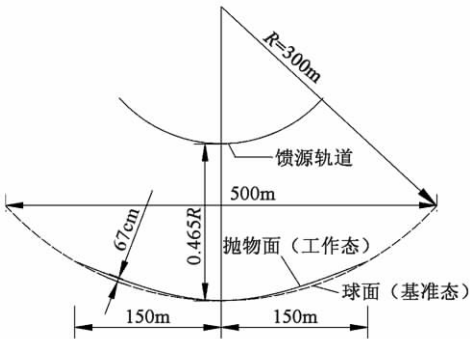


图 2 基准态与工作态关系示意图  
Fig. 2 Relationships between reference surface and working surface

根据地球的自转速度(  $360^{\circ}/24\text{h}$ ) 可以计算出工作抛物面大约以  $21.8\text{mm/s}$  的速度在基准面上移动。在将反射面由基准球面调节到工作抛物面过程中反射面径向移动最大速度约为  $1\text{mm/s}$ 。由此可见 ,工作时反射面虽然处于一个时变的运动状态 ,但是运动速度非常缓慢。

显然像 FAST 主动反射面这样一个特殊的巨大科学设施 ,对其支承结构必然会提出一系列有别于常规结构的特殊要求。首先 ,FAST 反射面支承结构是一个超大跨度的空间结构 ,相当于 30 个足球场;其次 ,反射面的主动性对其支承结构提出了可调控的要求 ,工作时 ,必须能够实时地将照射范围内反射面调整到指定抛物面位置 ,同时为了降低工作时反射面调整的难度 ,必须具有自重轻的特点 ,即反射面支承结构必须是一种轻型的可动而且可实时调控的结构;第三 ,根据射电望远镜电性能的要求及 FAST 的科学目标 ,对反射面成型精度提出的总体要求为拟合均方根小于  $5\text{mm}$  ,对于如此大的跨度(  $500\text{m}$ ) ,精度要求如此之高 ,可见其反射面支承结构实质上是一个高精度的巨型机械装置;最后 ,FAST 位于贵州的喀斯特洼地 ,其地貌比较适合于建造球冠状的 FAST ,但是也并非一理想的球面 ,因此反射面支承结构形式必须能够做到因地制宜 ,否则将会大大增加下部基础的土方工程 ,增加项目的总体造价。通过上述分析可知 ,FAST 反射面支承结构实质上是一个轻型的跨度超大、形式复杂、形状实时可调的高精度巨型机械装置。

2 主动反射面支承结构总体方案

结合主动反射面的工作原理及特点,采用整体索网与背架结构共同支承反射面板的方案,下面从整体索网结构、背架结构、主索节点及周边支承结构四方面对该方案进行介绍。

2.1 整体索网结构

按照一定的网格划分方式编织成 500m 口径的球面主索网,将主索网的四周固定于周边支承结构,每个主索网节点设置下拉索作为稳定索和控制索(在下拉索的下端设置促动器),来实现反射面基准态成形和工作态变位,称这种由球面索网(主索网)、下拉索及周边支承结构共同构成的结构为整体索网结构(图 3)。

球面主索网网格划分方式、网格尺寸的确定及下拉索的设置方式将在第 4.5 节具体说明。

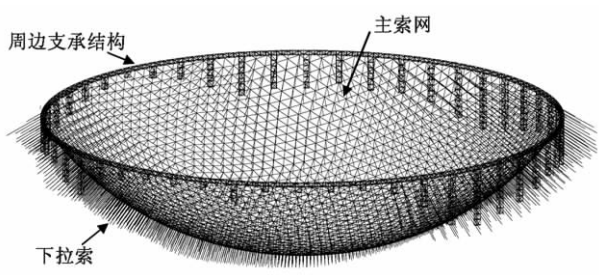


图 3 整体索网结构

Fig. 3 Abridged general view of integral cable-net structure



图 4 周边支承结构示意图

Fig. 4 Sketch of boundary supporting structure

2.2 背架结构

反射面板是望远镜直接接受天体辐射电磁波的部分,铺设在主索网上。反射面板一般采用厚 1mm 左右的开孔铝板或铝丝网,其面外刚度很弱,因此必须在索网网格范围内设置一层支承结构,并对其进行适当的网格划分,以方便反射面板的铺设,这一局部支承体系称为“背架结构”(图 5)。每个索网网格设置一个背架结构,背架结构自身具有一定的刚度,仅通过其角点与主索网节点相连,并且通过构造措施保证其仅以荷载的形式作用于主索节点,即在反射面变位时,背架结构不参与索网结构的共同作用。

在由“整体索网结构 + 背架结构”共同支承 FAST 反射面的总体方案中,确定主索网格形状及主索节点形式时必须结合背架结构综合考虑,而在进行索网结构优化及背架结构选型时可以单独研究。

背架结构的结构形式有多种可选方案:从结构形式分有平面结构、空间网格结构、张弦结构等,从材料分有钢材和铝合金两种<sup>[8-11]</sup>。



图 5 背架结构与整体索网结构示意图

Fig. 5 Sketch of sub-structure and integral cable-net structure

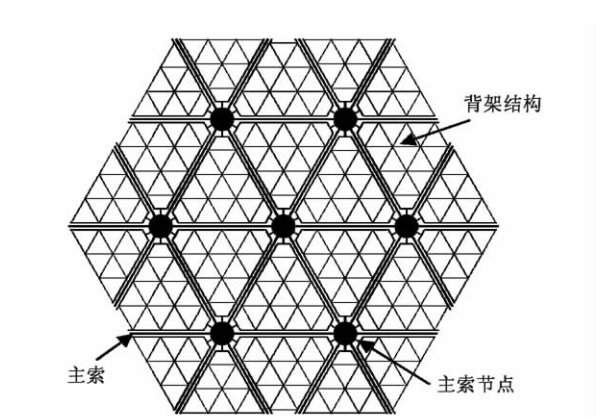


图 6 主索与背架结构连接示意图

Fig. 6 Sketch of main cable and sub-structure

2.3 主索节点

主索节点是整体索网结构中较为关键的环节之一,起着连接主索、下拉索及背架结构的作用,建筑领域一般采用相应夹具将相互交叉的拉索连接在一起,即拉索自身是连续的,这种连接方式在安装过程中很难精确控制索端各自的预应力。FAST 索网结构采用在主索节点处将主索断开的连接方式,图 6 以三角形背架结构方案为例给出了连接示意图,这种连接方式可以通过对每根主索的精确下料来保证结构的整体安装精度,同时也具有便于主索节点及背架角点的设计、能避免夹具对拉索的损伤等优点。

2.4 周边支承结构

喀斯特洼地与理想球面相距甚远,山体地质条件也存在一些不确定因素,考虑到反射面支承结构应该是一个均匀的整体结构,且有高精度要求,因此不宜将球面主索网的四周直接固定于山体。采取格构式钢圈梁与周边主索连接的方案,圈梁由格构式钢柱支承,钢柱的高度跟随喀斯特地貌作相应变化,圈梁和柱共同组成了索网结构的周边支承结构,图 4

为其结构示意图,这种支承方案简化了主索边界的连接固定,且易于主索网格的划分;闭合的圈梁具有良好的平面内刚度,且通过改变不同高度柱的截面可以使得钢圈梁刚度相对均匀,总体来看,结构形式相对简单,传力途径简单明了。

### 3 球面主索网格形式优选

球面索网单元网格的形状可以分为三角形网格和四边形网格。采用三角形网格能较好解决背架结构的支承问题,三角形单元可用来拟合任意曲面(包括球面和抛物面),有利于提高反射面的拟合精度;采用四边形网格方案时,球面上的四点无法同时移到指定的抛物面上,会影响反射面的拟合精度;另外,三角形单元与四边形单元相比其平面形状稳定性要好,构成的球面索网面内形状比较稳定,在工作变位过程中索网形状更易控制。因此,球面索网采用三角形单元网格划分方式。

FAST工作过程中,需将球面索网的任意区域调节到指定抛物面上,因此希望球面索网的网格划分比较均匀,主索网各索段受力没有明显的主次之分,同时球面网格的种类数越少,越有利于反射面结构(包括主索、背架结构等)的加工制作。

凯威特型和短程线型网格为较优的两种三角形网格划分方式,下面分别从网格单元尺寸和内力分布均匀性这两个方面对不同网格划分方式进行详细比较。

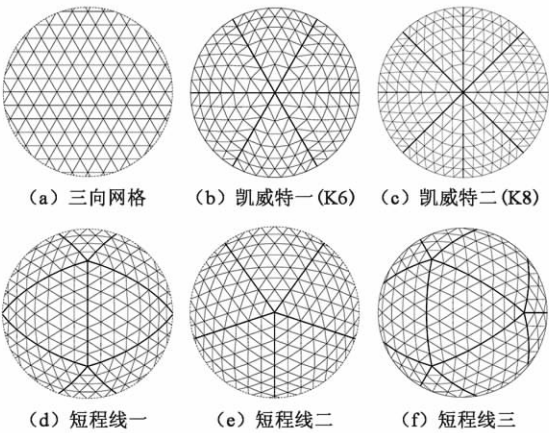


图7 三角形网格划分示意图

Fig. 7 Abridged general view of triangle lattice

凯威特型网格根据主肋的根数通常可以分为K6型(图7b)和K8型(图7c),图中粗线为网格的主肋;短程线划分方式首先将完整球面划分为20个相同的等边三角形,称与其对应的大圆弧为短程线网格的基本网格,然后再按照等弧长原则对基本网格进行细分,根据基本网格交点在反射面上位置的不同,

将短程线网格分为三种划分方式(图7d、7e及7f),其中粗线即为基本网格。

将球面主索网分别按照两种凯威特型和三种短程线型网格进行划分,三角形单元的边长均为11m左右(见第4节)。图8给出了不同网格划分方式主索长度的分布情况,凯威特型(尤其是K8型)网格主索长度范围为8.3~15.3m,比较离散,而三种短程线型网格长度分布趋势基本相同,且相对比较均匀,长度范围为10.5~12.5m。

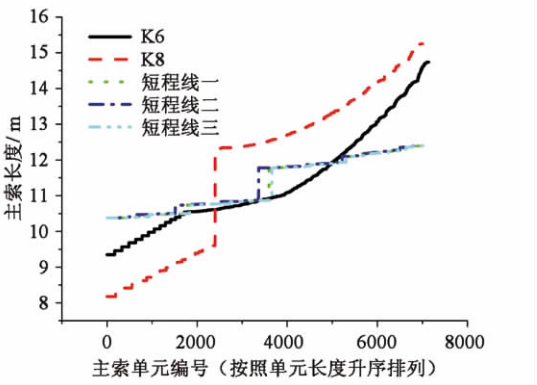


图8 不同网格主索长度分布

Fig. 8 Length distribution of main cables of different lattice

为了说明不同划分方式对索网受力均匀程度的影响,分别对两种凯威特型网格和三种短程线型网格的索网的基准态进行初始形态分析<sup>[8]</sup>,分析时其它计算条件均相同,图9、图10仅给出了凯威特型K6型和短程线二两种网格的主索应力分布图,凯威特型K6网格在主肋处索网应力不均匀,出现松弛现象,同时主肋的应力也高达945MPa以上,而短程线二网格的应力分布比较相似,应力范围为228~726MPa,相对比较均匀,应力较小的索单元主要分布于基本网格的交点处,仅基本网格对应的极个别索单元应力较大。可见索网受力均匀程度与网格尺寸的均匀性相同,短程线网格索网内力较均匀。另外,短程线网格中短程线二的对称性最好,因此采用短程线二作为球面索网的网格划分方式。

### 4 反射面拟合精度及单元网格尺寸

根据天文观测的需要,要求反射面与工作抛物面拟合偏差均方根值在理想情况下(不考虑加工、制作及主索网调节误差)小于2.5mm,且统计样点应在反射面上均匀布置,间距为1.5~2m。而通过下拉索仅能对主索节点(即背架结构角点)进行调控,背架结构的中间节点只能作相应随动,为了减小反射面与工作抛物面的拟合误差,将背架结构的上表面做成球面(或近似球面)形状,工作时用球面单元子块



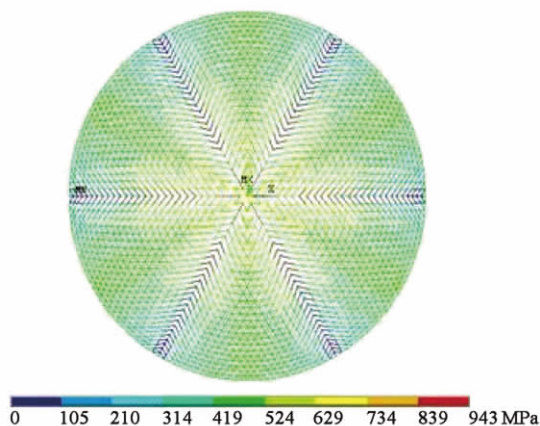


图9 主索应力云图(K6)

Fig.9 Stress distribution of main cables (K6)

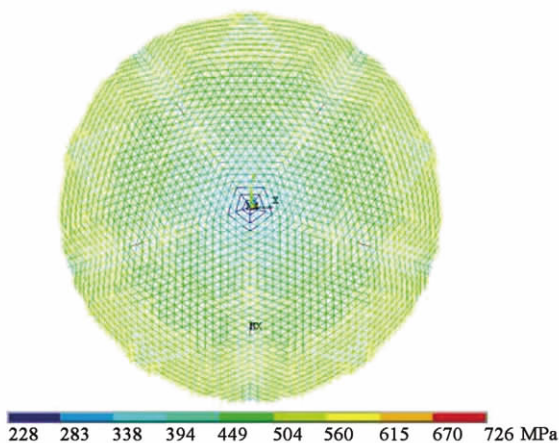


图10 索应力云图(短程线二)

Fig.10 Stress distribution of main cables  
(geodesic of type two)

去拟合抛物面,通过改变背架结构尺寸大小使得反射面满足拟合精度的要求,背架结构尺寸越小,拟合精度越高,但是同时也增加了索单元的数量,尤其是增加了下拉索的数量,增加了系统的控制难度及工程总造价。

背架结构与抛物面的拟合过程实际上是一个优化过程,优化参数主要两个:①球面子块的半径  $R_{bj}$ ,用各向曲率相同的球面子块去拟合沿着母线方向曲率各不相同抛物面, $R_{bj}$ 不同得到的反射面拟合精度也不同(图11a);②背架角点与抛物面垂直距离  $d_x$ ,并非将背架结构角点(主索节点)调控到抛物面(如图11b)时拟合精度最优,而是将其角点偏离抛物面一定的距离  $d_x$  时拟合精度最高(如图11c),在抛物面曲率半径不同的地方此偏离距离  $d_x$  也不同。

在球面索网单元网格尺寸一定的情况下,对于一个给定的背架结构球面子块半径,采用迭代的方法可以求得索网主索节点与抛物面偏离值  $d_x$  的最优值:通过调节每个主索节点的径向位移,使得该节点所控制的背架上反射面板统计点与目标抛物面偏差

的平均值为零(图12),进而得到反射面和抛物面的最小拟合偏差均方值;另外通过参数分析可以求得最优背架结构球面子块半径,及相应的  $d_x$  最优值,同时得到反射面与抛物面的拟合偏差均方值<sup>[8]</sup>。

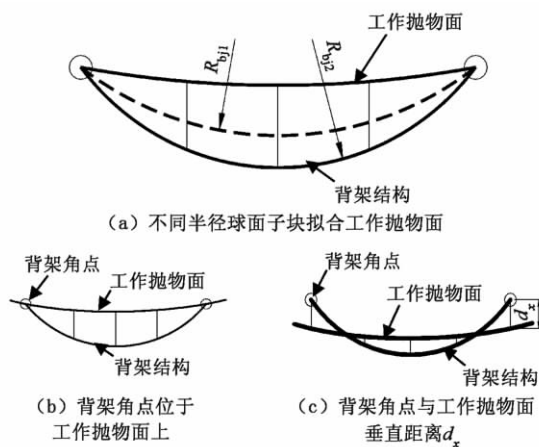


图11 背架结构与抛物面的拟合

Fig.11 Fitting of sub-structure and paraboloid

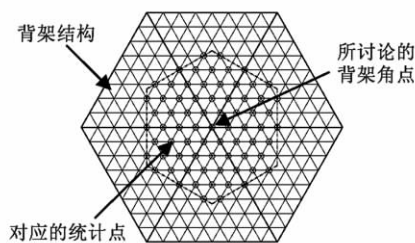


图12 背架结构拟合计算示意图

Fig.12 Diagrammatic sketch of sub-structure

采用上述方法,对背架结构不同球面子块半径的情况进行分析,图13给出了单元网格为11m左右时,反射面背架结构不同半径球面子块与抛物面拟合偏差均方根值,  $R_{bj}$  的最优值为318.6m,此时拟合偏差均方根值约为2.17mm,图14给出了抛物面不同位置主索节点与抛物面的偏移量  $d_x$ ,横轴表示主索节点与抛物面轴线的距离,可以看出,最大偏移量约为7mm左右。图15给出了不同单元网格尺寸时,在最优半径背架结构球面子块所对应的拟合偏差均方根。

采用上述方法,对背架结构不同球面子块半径的情况进行分析可知,单元网格为11m左右时最佳。此时,主索节点2276个,主索6985根,主索长度约11m。

## 5 索网调控方法及下拉索的布置

下拉索作为索支承结构的一个重要组成部分,不仅起着稳定索的作用,还起着控制索的作用,其根数越多控制系统越复杂,工程总造价及服役期间的

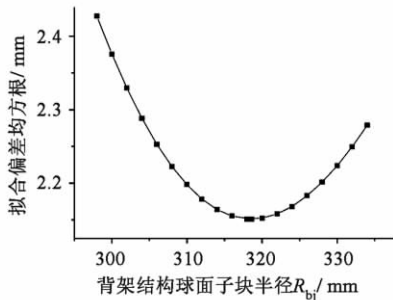


图 13 拟合精度与背架结构球面子块半径的关系  
Fig13 Relationship between radius of sub-structure and fitting precision

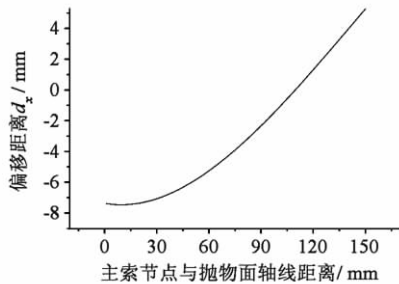


图 14 主索节点与抛物面的偏移量

Fig. 14 Offset between joints of main cables and paraboloid

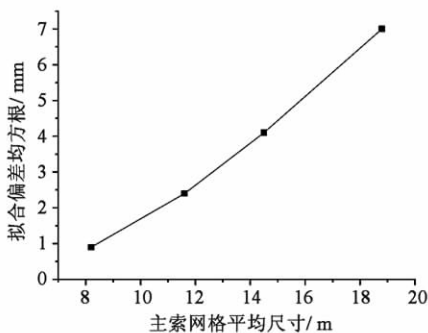


图 15 单元网格尺寸对反射面与抛物面拟合偏差均方根的影响

Fig. 15 Influence of lattice sizes on mean square root of fitting errors between reflecting surface and paraboloid

运行维护成本也越高,在单元网格尺寸确定的前提下,下拉索的根数主要由下拉索的布置方式决定。从稳定索角度看,每个主索节点只需设置一根下拉索,即可通过施加预应力使整个结构成为一个稳定体系。因此本节对索网调控方法进行研究,以确定下拉索的布置方式。

将局部主索网由基准球面位置调整到工作抛物面上有两种方法:①控制主索节点的三向位移,使工作照射范围内每个主索节点沿基准球面径向变位至抛物面位置,即没有切向位移,照射范围以外的区域索网形状保持不变,需要在每个主索节点设置 3 根下拉索(图 16),这种调控方式由索网变位过程引起

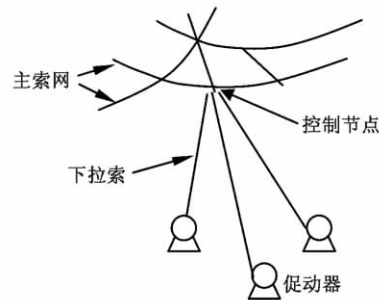


图 16 3 根下拉索方案

Fig. 16 Scheme with three control cables

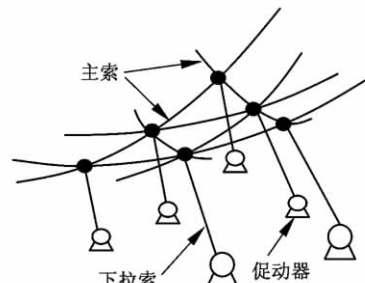


图 17 单根下拉索方案

Fig. 17 Scheme with one control cable

的索网应力响应比较大;②每个主索节点只设单根径向下拉索(图 17),只调控主索节点的径向变位,而不限制主索节点的切向位移,即在允许主索节点发生自适应切向位移的情况下,将照射范围内主索节点调整到抛物面位置,相对于 3 根下拉索的调控方法,索网变位过程中的应力响应有可能较小。

对设置多根下拉索和单根下拉索方案分别进行变位过程模拟,模拟采用调节下拉索下端节点位移逐步迭代的方法<sup>[5-6]</sup>,变位区域为反射面中间 300m 口径区域。多根下拉索方案为每个主索节点设置 3 根下拉索,变位时只允许主索节点发生径向变形,图 18 为变位后主索网的应力响应分布图,应力响应范围为  $-570 \sim 0\text{MPa}$ ;单根下拉索方案变位时在允许主索节点发生切线变形的前提下将主索节点调节到指定抛物面上,结果表明只设置单根拉索同样可以实现工作态的变位调节,图 19 为变位后主索网应力响应分布图,应力响应范围为  $-289 \sim 117\text{MPa}$ 。对比二者可以看出单根下拉索方案索网的应力变化幅度  $406\text{MPa} (289 + 117)$  小于 3 根下拉索方案的  $570\text{MPa}$ 。

通过对多根下拉索和单根下拉索方案的对比、分析可知,采用单根下拉索方案在不影响反射面变位调控精度的前提下,具有下拉索根数少,变位时索网应力均匀的优点,因此采用单根下拉索方案作为下拉索的布置方式。

结合球面索网网格的划分方式,可以得出 FAST 支承索网结构下拉索的根数约为 2300 根,即主索节

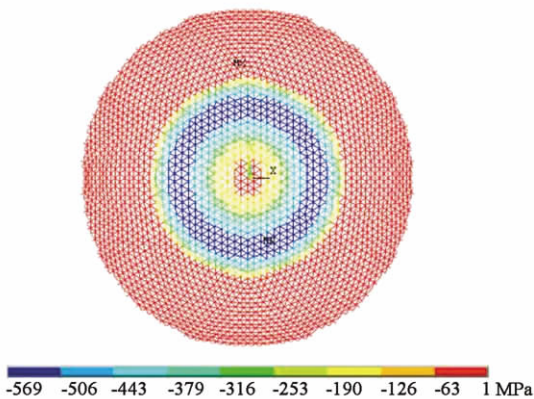


图 18 工作态索网应力云图 (3 根下拉索)

Fig. 18 Cable stress distribution on working state (three control cables)

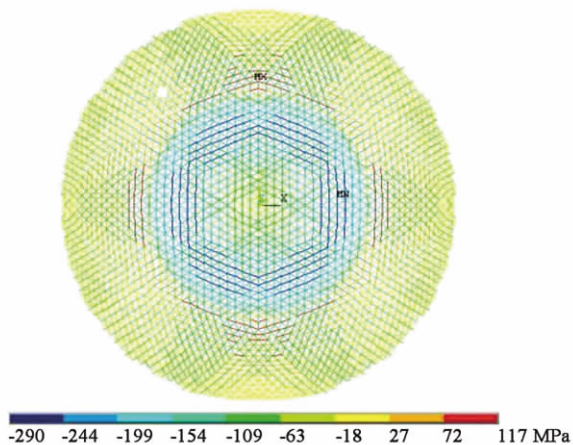


图 19 工作态索网应力云图 (单根下拉索)

Fig. 19 Cable stress distribution on working state (single control cable)

点个数,另外结合喀斯特洼地地貌可以初步得出下拉索的长度分布情况:下拉索长度从 3 ~ 50m 不等,绝大部分下拉索长度均在 30m 以内。

## 6 结论

FAST 反射面支承结构实质上是一个轻型的跨度超大、形式复杂、形状实时可调的高精度巨型机械装置,结合主动反射面工作原理,对反射面支承结构总体方案进行了系统研究,并确定了总体方案的各项主要参数:

(1) 提出的整体索网结构与背架结构共同支承反射面的结构方案具有结构自重轻、调控方便及能够适应喀斯特复杂地貌等优点。

(2) 球面索网三角形网格与四边形网格相比具有背架结构设置灵活,索网面内稳定性好的优点;短程线型三角形网格划分均匀,结构受力性能好,为优选网格划分方式。

(3) 以反射面拟合精度及系统控制最易为综合目标,确定了球面索网的网格尺寸及背架结构最优半径等。

(4) 采用单根下拉索方案作为下拉索的布置方式,在不影响反射面变位调控精度的前提下,单根下拉索方案具有下拉索根数少、变位时索网应力均匀的优点。

## 参 考 文 献

- [1] Qiu Yuhai. A novel design for giant radio telescopes with an active spherical main reflector [J]. Chinese Journal of Astronomy and Astrophysics, 1998, 22(3): 361-368.
- [2] Nan Rendong, Ren Gexue. Adaptive cable-mesh reflector for the FAST [J]. Acta Astronomica Sinica, 2003, 44(2): 13-48.
- [3] 钱宏亮,范峰,沈世钊,等. FAST 反射面支承结构整体索网方案研究[J]. 土木工程学报, 2005, 38(12): 18-23. (Qian Hongliang, Fan Feng, Shen Shizhao, et al. The cable-net structure supporting the reflector of FAST[J]. China Civil Engineering Journal, 2005, 38(12): 18-23. (in Chinese))
- [4] Fan Feng, Qian Hongliang, Shen Shizhao, et al. The cable-net structure for supporting the reflector of FAST [C]// Proceedings of IASS-APCS Symposium. Beijing, China: Commission for Spatial Structure of China Civil Engineering Society, 2006: 136-137.
- [5] 钱宏亮,范峰,沈世钊,等. FAST 反射面支承结构整体索网分析[J]. 哈尔滨工业大学学报 2005, 37(6): 750-752. (Qian Hongliang, Fan Feng, Shen Shizhao, et al. Analysis on cable-net structure supporting the reflector of FAST[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2005, 37(6): 750-752. (in Chinese))
- [6] 许海涛. FAST 原型子结构选型与 30m 模型索网动态模拟分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2005. (Xu Haitao. Study on FAST sub-structure and the 30-meter model emulation for working state [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2005. (in Chinese))
- [7] 杨光宇. FAST 30 米模型试验关键技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2005. (Yang Guangyu. The key techniques research of 30-meter FAST model experiment [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2005. (in Chinese))
- [8] 钱宏亮. FAST 主动反射面支承结构理论与试验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2007. (Qian Hongliang. Theoretical and experimental research on supporting structure of FAST reflector [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2007. (in Chinese))
- [9] 严开涛. FAST 背架结构选型及其受力性能分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006. (Yan Kaitao. Overall design and optimization of FAST back-structure

- [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology , 2006. ( in Chinese) )
- [10] 金晓飞. FAST 30 米模型健康监测研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学 , 2006. ( Jin Xiaofei. Research on health monitoring system of FAST 30-model [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology , 2006. ( in Chinese) )
- [11] 茆春. FAST 背架结构选型及优化研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学 , 2007. ( Mao Chun. Overall designs and optimization of FAST back-structure [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology , 2007. ( in Chinese) )
- [12] 商文念. FAST 索网结构优化研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学 , 2007. ( Shang Wennian. Optimization research on the cable-net structure of FAST [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology , 2007. ( in Chinese) )
- [13] 牛爽. FAST 背架结构精细化分析与试验研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学 , 2008. ( Niu Shuang. Refined analyses and experimental research of FAST back-structure [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology , 2007. ( in Chinese) )
- [14] 金晓飞. 500 米口径射电望远镜 FAST 结构安全及精度控制关键问题研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学 , 2010. ( Jin Xiaofei. Study of key issues of structural safety and accuracy control of the five-hundred-meter aperture radio telescope [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology , 2010. ( in Chinese) )