

# 国家天文台FAST工程索网索力调节施工技术

熊佳雯 莫德荣 沈理

(柳州欧维姆工程有限公司 广西柳州 545005)

**摘要:**国家天文台FAST工程球面索网结构由2225个节点, 6670根主索以及2225根下拉索组成, 该结构安装完成后需要后续对索网索力进行调节来达到该结构的设计要求。FAST工程球面索网通过150根边缘主索与圈梁连接, 边缘主索采用长度可调节的拉索结构, 其它主索均为长度固定的不可调拉索结构, 索网节点通过2225根下拉索连接于地锚。索网几何位置由边缘索调整实现, 索网节点后期的变位通过下拉索调整实现。本文将介绍FAST球面索网结构边缘主索索力调节的施工工艺。

**关键词:**FAST 索网 索力调节

**DOI:** 10.13211/j.cnki.pstech.2015.04.008

## 1 前言

500米口径球面射电望远镜 (Five hundred meters Aperture Spherical Telescope, 简称FAST) 是利用贵州独特喀斯特地形条件和极端安静的电波环境, 建造一个500米口径球面射电天文望远镜。

FAST是我国建造世界第一大单口径射电望远镜, 其主动反射面主体支承结构由主索网、下拉索、圈梁和格构柱以及格构柱基础组成。

主索网共2225个主索节点、6670根主索和2225根下拉索, 除边界节点外每个主索网节点连接6根主索和1根下拉索, 每节点上安装一个测量靶标, 靶标朝向索网中心方向。主索网通过150根边缘主索与钢圈梁相连接, 下拉索下端与地面促动器相连以控制整个索网变形。主动反射面索网是FAST工程后期运行, 实现寻源、聚焦的关键结构, 故索网安装完成后必须对整个索网的索力进行调节。本文主要针对主索与圈梁连接的150根索力调节进行介绍和分析。

## 2 索网结构调索思路

### 2.1 初步成形阶段

首先索网主索、下拉索均为无应力几何控制法施工, 按照工厂制索长度限制, 现场不可调, 边缘主索采用正反螺纹以实现长度调节, 索网安装完成之后, 利用570根下拉索作为调索控制基点, 并分区、分步、对称、循环张拉下拉索到几

何安装位置, 并临时与下拉索地锚连接固定, 形成基本的几何位置。

### 2.2 施工联测, 确定实际绝对形状

选取温度最为稳定的时段, 并根据7天联测的基础数据确定该工况下的索网的实际绝对形位和边缘索的应力值。

### 2.3 施工分析和形位误差分析, 确定调索控制思路

针对联测基础数据建模分析, 根据选定的测量稳定时段的初始数据对调索施工的16个步骤进行各阶段索网结构形位分析, 确定每步的张拉控制值和对应各测控点的形位理论值, 针对每步张拉后实际测量值与理论值相比较反馈, 并进一步建模分析, 确定及优化下一步边缘索张拉调整控制值。

### 2.4 调索施工实施

分阶段调索理论控制值(含形位和应力)确定后, 然后进行调索施工, 包括张拉机具安装、形位测量、应力测量、环境温度测量、数据反馈、数据分析、过程控制值下达等。

(1) 仅通过16步调索难以达到既定目标值, 需要多次反复循环, 循环次数则经过理论优化后确定;

(2) 若上述情况经过分析后次数较多, 增加施工难度和工艺复杂程度, 超出了施工各种控制目标, 则对称增加同步调索施工点, 并经过多次循环进行调索;

(3) 通过理论优化分析, 确定最佳的同步施工的部位和施工循环批次。

### 3 调索施工工艺

#### 3.1 调索总体方法

索网安装完成后, 570根下拉索按照索网成型后的运营位置全部放松350mm, 对570个节点的空间坐标及边缘150根索的索力进行测量。为避免结构对温度的敏感性, 在索网合龙之后, 通过边缘索监测系统对索网进行7天施工联测, 并拟合平均温度最为稳定的时段作为调索的最佳时段, 该时段也为检测边缘索索力的时段。根据实测数据对索力调整进行建模计算, 确定张拉调索的位置、每次张拉的控制应力、以及先张拉和后张拉对索网形成的影响。调索时, 按照五个区域对称调整原则, 每个区布设两个工作点即两套张拉调索系统。

#### 3.2 下拉索张拉调整

索网施工共有2225根下拉索, 布置图如图1所示, 如果全部张拉需要耗费较多的时间, 经计算分析, 对下拉索采取间隔张拉法, 仅需要张拉570根下拉索就能满足边缘调索的条件。

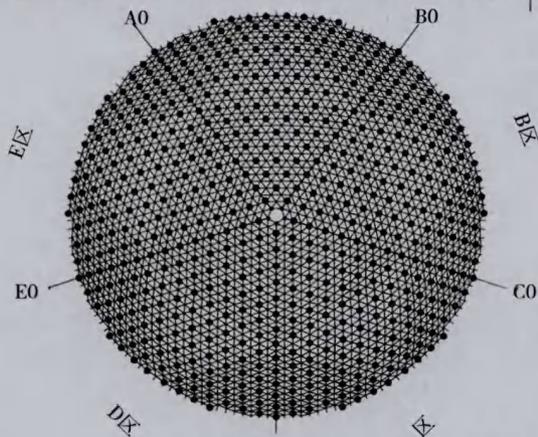


图1 下拉索张拉布置方案

#### 3.3 边缘主索张拉调整

张拉工艺采用双顶扁担张拉工艺, 锚拉板箍包在叉耳外圆面上, 使整个张拉工装(如图2所示)随着缆索角度的变化而变化, 避免局部出现弯曲、偏角现象。为保证两台千斤顶受力均匀, 张拉时两台千斤顶通过一个三通阀连接到同一台油泵上, 确保张拉过程中油压相同。

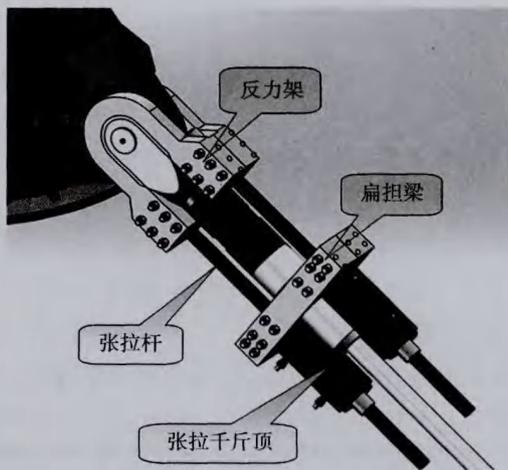


图2 边缘索张拉工装示意图

#### 3.4 调索顺序(以A区为例)

由于整个索网划分为5个旋转对称的区域, 对边缘主索进行索力调节时, 5个区同步进行。以A区为例, 从A区的中间开始, 对称向两边依次展开直至A区的两端, A区的边缘索调节完一遍之后, 如果发现索力没达到预期值的, 再进行调整, 直至整个测区的边缘索的索力达到预期值。边缘索调索顺序是由每个区中间向两边依次进行, 调索顺序如图3所示:

第1步: 调整第一根边缘索A30, 并进行所有测控点几何位置和150根索力进行同侧, 数据反馈到计算分析模型进行相比较, 并进行分析, 然后对下一步张拉进行修正和调整。

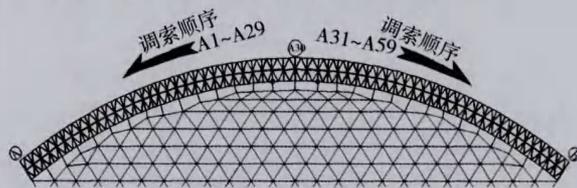


图3 边缘索调索顺序示意(A区)

第*i*步: 调整边缘索 $A_{30-2 \times (i-1)}$ 、 $A_{30+2 \times (i-1)}$ , 并重复上述步骤。

第16步: 调整边缘索A0, 并重复上述步骤。

第16*n*步: 每个区按照16*n*次循环张拉(*n*为多次, 需要计算分析确定)。

当5个区的边缘主索索力调节完一遍后, 便测量所有边缘主索的索力, 若主索之间的索力差值超过了设计范围, 则按上述步骤继续调节, 直至满足设计要求。



### 3 结语

FAST建成后将会是世界上第一大单口径射电望远镜,如此庞大的结构受温差变形影响极大,对结构制造及安装精度要求极高,FAST索网结构调节施工精度更是精确到了毫米,而且索网调节施工涉及到的多达720个施工工作面,每个工作面的一点变化将影响整个索网的结构;所以索网调节施工的整个过程必须经过严谨的计算和仔细的施工,根据索网不同阶段的受力情况依次逐步进行调节直至整个索网受力达到设计要

求。目前FAST索网结构调索施工技术已经在FAST项目得到实践,证实该调索技术适用于FAST项目的索网索力调节。

#### 参考文献

- [1] 韦福堂,朱万旭,田蕾蕾.国家天文台FAST工程索网安装施工技术[J].施工技术,2014(1):18-20.
- [2] 郭正兴,许曙东,刘志仁.预应力鞍形索网屋盖工程施工工艺研究[J].施工技术,1999,28(12):9-11.
- [3] 钱宏亮.FAST主动反射面支承结构理论与试验研究[D].哈尔滨工业大学工学博士学位论文,2007.
- [4] 孔旭,姜鹏,王启明.FAST索网高应力幅变位疲劳问题的优化分析[J].工程力学,2013(S1):169-174.
- [5] JGJ7-2010,空间网格结构技术规程[S].北京:中国建筑出版社,2010.

(上接第32页)

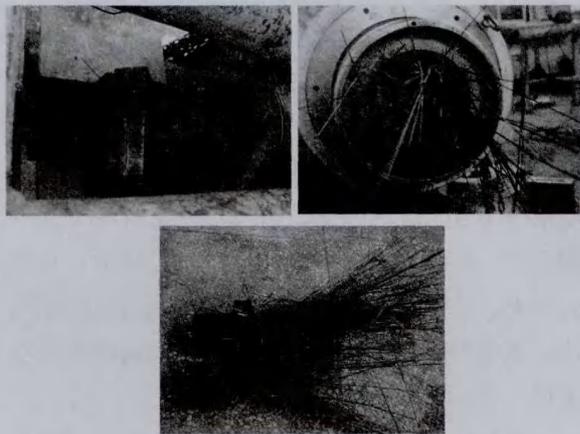


图5 试件保压后碳纤维板呈发散性破坏

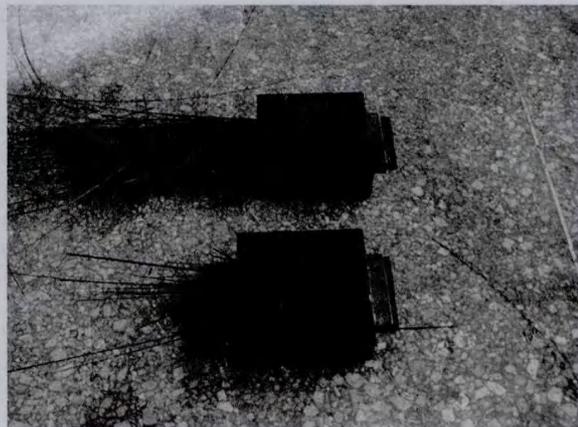


图6 锚具无滑移及破坏现象

表3

锚具型号	碳板规格(宽×厚) mm	试验破断力 kN	试验破断伸长率 %	碳板及锚具破坏形式	锚固效率系数
OVM.CFP50-1.2	50×1.2	154.1	1.61	碳板发散	1.07
OVM.CFP50-2.0	50×2.0	243.2	1.62	性破断,	1.01
OVM.CFP50-3.0	50×3.0	394.7	1.65	锚具无相	1.01
OVM.CFP100-1.4	100×1.4	332.6	1.62	对滑移及	0.99
OVM.CFP100-2.0	100×2.0	475.8	1.63	破坏	0.99

预应力碳纤维板与OVM锚具制作成组装件后,对其进行静载试验,试验结果表明,不同规格的碳板抗拉强度、伸长率等指标实测值均优于国标要求;锚具效率系数均>0.95,优于预应力筋的国标要求;碳板破断形式为发散性破坏,表明碳板张拉时受力均匀,有效减小了应力集中现象;碳板破断后锚具与碳板夹持处无滑移及破坏,表明锚具有效夹持碳板,可充分发挥碳板的力学性能。

### 5 结语

OVM预应力碳纤维板锚具作为一种新型的加

固方式,采用了机械式锚固技术,使其夹持碳纤维板的效果较传统方式有了明显提高,经大量试验验证,其稳定性及可靠性得到了检验,为其应用于桥梁加固提供了基础保证。

#### 参考文献

- [1] GB/T 14370-2007《预应力筋用锚具、夹具和连接器》[S].
- [2] GB 50728-2011《工程结构加固材料安全性鉴定技术规范》[S].
- [3] GB 50367-2013《混凝土结构加固设计规范》[S].
- [4] GB/T 21490-2008《结构加固修复用碳纤维片材》[S].
- [5] FIP1993《后张预应力体系验收建议》[S].