

超大索网结构建造创新技术研究 ——国家天文台FAST项目应用

张国强 孙长军 韦福堂

(柳州欧维姆工程有限公司 广西柳州 545005)

摘要:国家天文台FAST索网结构是整个体系的支承和角度调整机构,在工作阶段一直处于变幅、不等应力水平的往复荷载作用,拉索的应力松弛、变形,疲劳都会对整个FAST结构产生影响,拉索索力重新分配并导致反射面形态发生变化,都会影响FAST整体稳定性。尤其在建成之后的数十年时间内,其变化情况更为显著。因此,国家天文台项目对索网建造提出了非常高的技术要求。根据索网建造苛刻的技术标准,研发出500MPa超高应力幅拉索,并采用新工艺制造高精度拉索和节点盘。现场提出“1/5旋转对称、大跨度索网高空散拼”的施工工艺,成功完成索网安装工作。

关键词:FAST 索网超高应力幅高空散拼索道

DOI: 10.13211/j.cnki.pstech.2016.03.004

1 前言

500m口径球面射电望远镜(Five hundred meters Aperture Spherical Telescope,简称FAST)是我国建造的世界第一大单口径射电望远镜。该项目的主动反射面主体支承结构由主索网(主要由主索、主索节点、下拉索等组成)、圈梁和格构柱以及格构柱基础组成。其中,索网为短程线型三角形网格,安装跨度高达500m,净高超过130m,拉索总数高达8895根,总重1570t(见图1)。

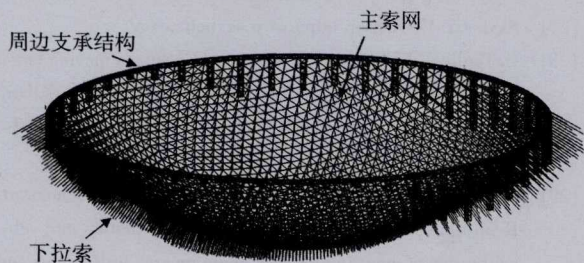


图1 FAST索网结构示意图

主索为500MPa超高应力幅拉索,采用两端叉耳连接,制作精度为 $\pm 1\text{mm}$ 。节点盘共565种规格,采用42CrMo制造,加工几何精度:外径 $\pm 1\text{mm}$;轴承孔位:环向 $\pm 1\text{mm}$,径向 $\pm 0.1\text{mm}$ 。索网安装完成后,边缘主索索力误差在5%以内,节点位置安装精度必须控制在 $\pm 5\text{mm}$ 以内,其相对精度达到十万分之一。这使得FAST索网成为世界上跨度最大、精度最高的索网结构(见图2)。

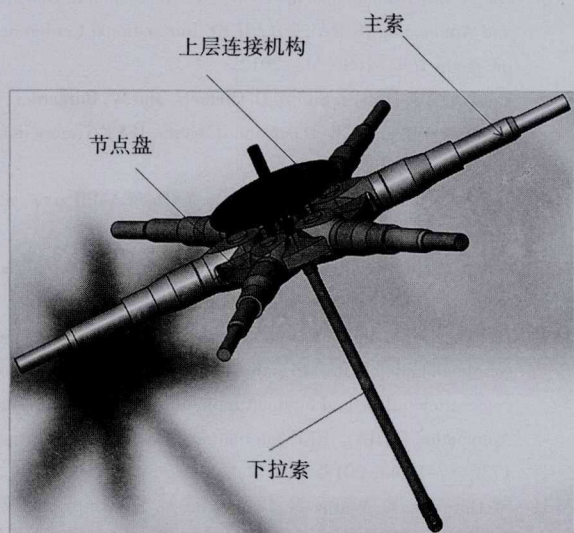


图2 FAST索网单元总成示意图

FAST工程利用贵州省境内喀斯特地貌中的天然洼地作为台址,全新设计思路加得天独厚的台址优势,FAST射电望远镜突破极限,其直径超过美国阿雷西博射电望远镜(350m),成为世界最大射电望远镜。但多松散碎石的陡坡和峭壁地形也给索网安装带来巨大的施工难题。

拉索和节点盘的工厂制造技术要求严格,同样,索网现场安装既不能在地面组拼整体挂设,又没有条件搭设满堂支架,普通缆索吊装法又解决不了圈梁变形、节点精度、交叉作业、施工进度以及主材运输等多方面的要求。如何研制高精

度高应力幅拉索,采用何种工艺制造高精度节点盘,如何克服500m跨度高空拼装索网是索网建造的关键技术所在。

2 技术要求

2.1 索网主索

FAST项目对索网主索的疲劳性能要求:应力幅500MPa,疲劳寿命100万次,无断丝且满足规范规定的水密性要求,钢丝与钢绞线集合成束,处于平行状,扭角小于 0.8° 。索体弹性模量经100万次疲劳试验后,变化不超过 $0.05 \times 105\text{MPa}$ 。100万次疲劳试验后主索索长变化不超过0.5mm。索长在温度为 20°C 时,插耳中心之间的距离最大误差不超过 $\pm 1\text{mm}$,且误差按照正态分布规律调整。当索体材料强度为1860MPa时,主索等效直径在20mm~40mm之间,相邻规格索等效直径差距不高于2mm,即主索有效直径规格至少可按20mm、24mm、26mm、28mm、30mm、……、…40mm等提供。

2.2 主索节点

主索节点盘材质为42CrMo。热处理后材料的力学性能不低于以下数值:屈服强度 $\sigma_s \geq 810\text{MPa}$,抗拉强度 $\sigma_b \geq 930\text{MPa}$,断后伸长率 $\delta_5 \geq 18\%$,断面收缩率 $\psi \geq 18\%$ 。材料的疲劳极限、疲劳强度通过试验确定。主索节点盘加工几何偏差要求:外径偏差不大于 $\pm 1\text{mm}$,轴承孔位置精度:环向 $\pm 1\text{mm}$,径向 $\pm 0.1\text{mm}$ 。

2.3 索网安装

由于FAST索网工程跨度大,地形复杂,要求精度高,因此,针对FAST索网工程提出的“1/5旋转对称、大跨度索网高空散拼”的施工技术必须满足以下技术要求。

- 1) 挂索施工过程中,面索要在无应力状态下安装;
- 2) 安装时要保证五分之一旋转对称,防止圈梁变形过大;
- 3) 在500m范围内面索组装全部要在空中完成;
- 4) 索网最终位型通过下拉索+促动器完成;
- 5) 不考虑促动器控制因素,索网张拉完成以

及反射面板安装完成后,索力允许偏差不大于5%。

6) 位形控制:不考虑促动器控制因素,索网张拉完成以及反射面板安装完成后,满足以下要求:

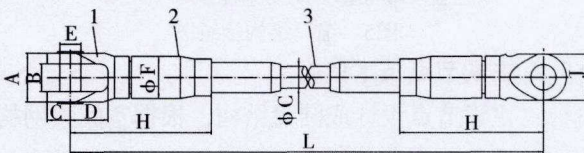
- a) 主索节点沿反射面法线方向的位置偏差满足 $\text{RMS} \leq 2\text{mm}$ 。
- b) 主索节点位置偏差 $\leq 20\text{mm}$ 。

3 技术措施

3.1 主索技术措施

ST超高应力幅拉索锚固体系的结构如图3所示,拉索由索体、两端锚具和叉耳组件构成。ST超高应力幅拉索索体构造顺应了国际拉索技术发展的趋势,具有以下优点:

- 1) 各受力单元相互隔离,防腐效果好;
- 2) 预应力筋不相互接触,减少钢丝间的微动磨损,为拉索满足疲劳应力幅为500MPa的性能要求奠定基础;
- 3) 钢丝与钢绞线的组合,使拉索受力规格丰富、完整,更适于工程设计选用。



1. 叉耳组件 2. 锚具 3. 索体
图3 高应力幅拉索示意图

拉索索体的受力单元为目前最为常用的1860MPa级 $\phi 15.2\text{mm}$ 低松弛预应力钢绞线。为了减小相邻规格拉索的级差在钢绞线的基础上增加3根均布的1860MPa级 $\phi 5\text{mm}$ 低松弛预应力钢丝。钢绞线表面环氧喷涂,钢丝镀锌,每根钢绞线表面涂覆油脂并单根挤包HDPE,独立防腐。钢丝与钢绞线集合成束,处于平行状,扭角小于 0.8° ,缠包高强聚酯带后挤包外层HDPE护套。根据FAST项目对拉索规格的具体需要,索体分两种形式,一种全部由 $\phi 15.2\text{mm}$ 环氧喷涂无粘结钢绞线组成,一种由 $\phi 15.2\text{mm}$ 环氧喷涂无粘结钢绞线加3根 $\phi 5\text{mm}$ 镀锌钢丝复合而成(见图4)。

钢绞线和钢丝在锚杯中与填料挤压握裹,组成整体受力进行锚固。采用这样的锚固方式,无论拉索受力如何,锚固单元的握裹力都是不变

的,在拉索低应力,甚至受负应力状态下都锚固可靠,同时也使得钢绞线与钢丝共同锚固成为可能。密封筒内灌注密封填料将预应力筋隔离包裹,与密封件一起对锚具内部的预应力筋段形成双重防腐(见图5)。

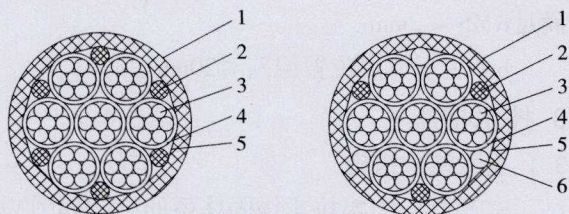
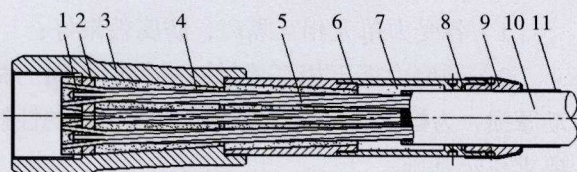


图2a 钢绞线索体截面图 图2b 钢绞线加钢丝索体截面图

1. 外层HDPE 2. 填充绳 3. 环氧涂层钢绞线
4. 内层HDPE 5. 高强聚酯带 6. 镀锌钢丝

图4 拉索截面图



1. 锥套 2. 锚板 3. 锚杯 4. 握裹填料
5. 钢绞线 6. 延长筒 7. 密封填料 8. 密封筒
9. 压盖 10. 索体 11. 热缩套

图5 锚具结构示意图

3.2 主索节点技术措施

主索节点设计成圆盘结构,根据空间索网构造的需要在节点盘的表面设置相应数量的销孔,在每个销孔处安装一套向心关节轴承,通过销轴及向心关节轴承的转动实现拉索相对节点盘垂直方向及水平方向的转动要求。

节点盘表面设置有用于换索的圆孔,节点盘周边上设置有用于换索的螺纹孔,通过在表面圆孔或周边螺纹孔安装临时拉索,将原工作拉索的受力荷载转移至临时拉索。卸载原工作拉索上的受力,拆下原工作拉索,重新安装新拉索,完成拉索的更换工作。节点盘结构详见图6。

3.3 索网安装技术措施

根据面索网的对称性,索网结构划分为5+1个区域施工(图7),其中5个区分别为A区、B区、C区、D区和E区。五个区成72°旋转对称,在索网施工时需要对称同步施工。

F区的面索和下拉索采用支撑胎架安装,然后在 $\phi 80\text{m}$ 的圆周上对称为五个区设置独立塔

架,并在圈梁上设置可移动式台车、龙门吊、猫道和施工索道等。五个区面索、下拉索采用塔式吊机垂直运输到圈梁顶部的运索小车,由其沿圈梁运输到五区对称轴位置的猫道索上方,通过设在圈梁顶部的龙门吊,单件下放到猫道上方的溜索索道,由其溜滑到下端。通过尾部接长工艺和牵引工艺安装面索和下拉索。首先安装对称轴位置的拉索,然后对称向两侧扩展施工。面索和下拉索安装完成后,促动器预紧张拉下拉索。

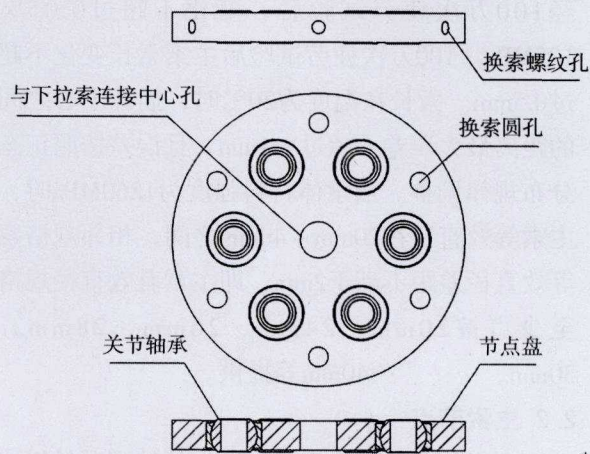


图6 节点盘方案图

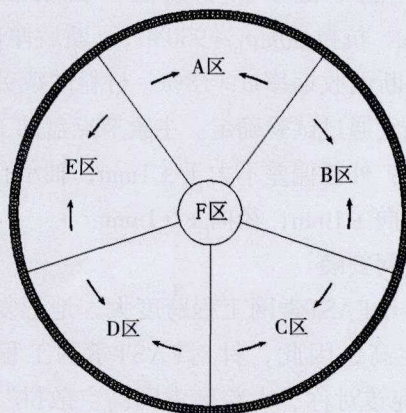


图7 索网施工区域划分示意图

3.3.1 索网安装临时措施

高空缆索吊装作业超过70%的面索都需要在空中完成拼装,需要缆索上、下锚固、主材运输、高空移动操作平台等大量临时措施(见图8)。

3.3.2 索网安装顺序

索网安装先散拼F区150根主索,然后再以每个区的对称线为安装位置,向两侧对称安装直至合拢(见图9)。

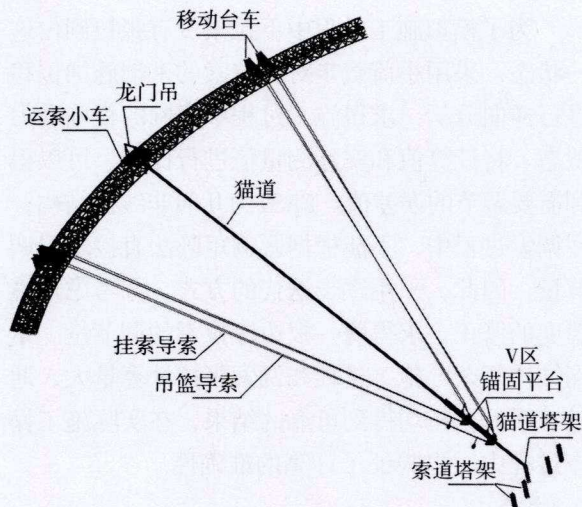


图8 索网安装临时措施布置示意图

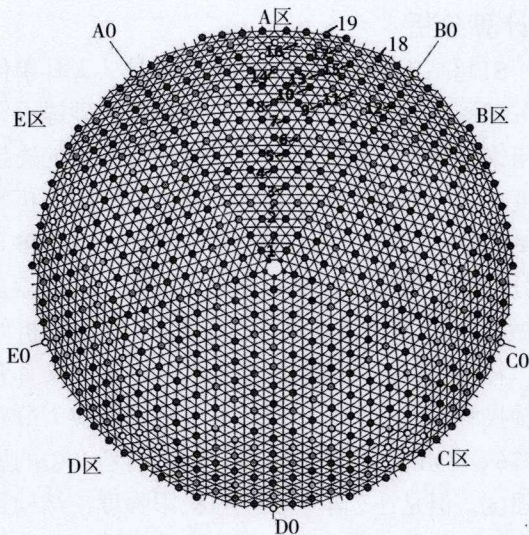


图10 下拉索张拉分批布置图

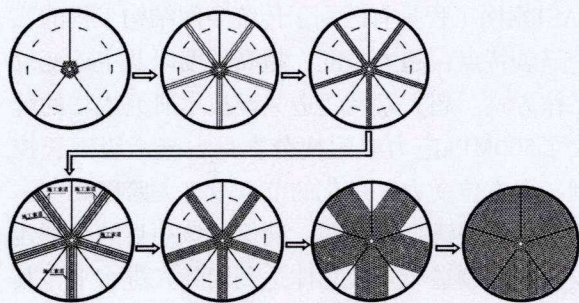


图9 索网安装顺序示意图

3.3.3 索网形位调整

根据设计要求,在不考虑促动器控制因素,索网张拉完成以及反射面板安装完成后,索力允许偏差不大于5%,主索节点沿反射面法线方向的位置偏差满足 $RMS \leq 5mm$;主索节点位置偏差 $\leq 20mm$ 。

在未安装下拉索促动器的前提下,为了达到索网形位调整的预期,先将下拉索下端接长。长度按照无应力条件下促动器高度+350mm,采用手拉葫芦和花篮螺栓配合的方式进行锁定和调整。

由于需要张拉的下拉索数量较多,且需要五个区同步进行,因此每批次张拉的下拉索数量不宜过多。通过ANSYS有限元分析软件进行建模计算,将570根下拉索分为19批进行张拉时,下拉索受力较为合理。因此下拉索张拉顺序由中心向周边,编号1~19,每批30个以中心呈轴对称分布,如图10所示。

边缘索调节顺序是按五大区域对称进行,用笔记本电脑运行采集软件采集索力数据。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。

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,使整个张拉工装随着缆索角度的变化而变化,避免局部出现弯曲、偏角现象。千斤顶采用YCW50b型千斤顶,张拉杆采用 $\phi 32$ 精轧螺纹钢。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,如图11所示。边缘索调索最大过程控制应力不大于60t。

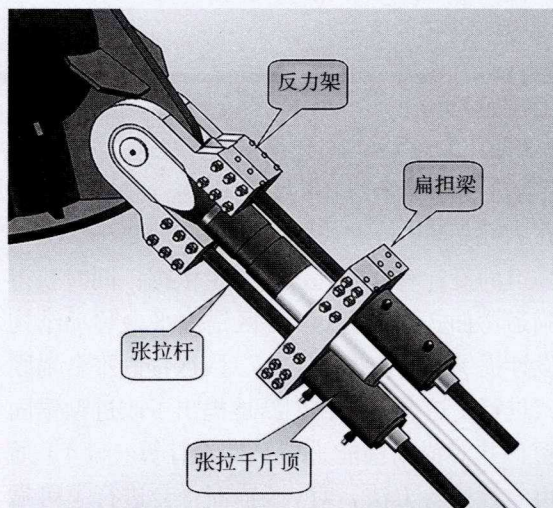


图11 边缘索张拉工装示意图

4 计算分析

ST超高应力幅拉索锚固体系锚具、叉耳组件为关键受力件，锚具中采用冷铸环氧铁砂锚固钢丝与钢绞线，已是成熟技术，关键是螺纹的连接强度、叉耳的受力强度设计。通过有限元分析软件ANSYS建模，整体模型选取solid185实体单元划分六面体网格，叉耳和销轴、销轴和法兰盘之间做接触分析，摩擦系数取0.15。得到分析结果：在受到拉索标准极限索力的情况下，叉耳和销轴接触的地方由于应力集中，其最大应力分别为776.848MPa和738.229MPa，接近材料40Cr的屈服强度，但是还远小于其抗拉极限强度，结构是安全的。另外，在实际工程中，其最大拉力为索力的0.45倍，因此，在实际使用中，叉耳和销轴的应力在350MPa以下，有2.5倍以上的安全系数。

主索节点是整个索网结构中的关键受力件之一，考虑选用热处理性能及力学性能较好的42CrMo材料。通过有限元分析软件ANSYS建模计算可知：节点盘受到最大拉应力在599.473MPa~703.354MPa范围之间，最大mises应力在545.832MPa~726.254MPa范围之内，都小于材料的屈服强度810MPa，更远小于材料的抗拉强度930MPa，节点结构是安全可靠的。

FAST反射面支承结构属于巨型空间结构，受力十分复杂。因此，施工过程采用大型通用有限元软件ANSYS，考虑结构具有双重非线性（几何非线性和材料非线性），计算中考虑几何大变形和应力刚化效应。并通过二次开发编制APDL语言程序进行计算分析。

（上接第7页）

（2）使用ANSYS有限元悬索找形方法，分析解决了V区锚固平台对猫道索的影响，获得了猫道索在V区锚固平台载荷作用下垂度的变化情况，为猫道的设计和安装提供了理论依据；同时获得了猫道弯曲折角数据，为V区锚固平台移动结构的设计提供理论依据；（3）对V区锚固平台锚固方式进行了选型对比，创新地提出了改进型锚固装置，并对锚固性能进行了理论计算；（4）通过可靠性试验方法，对V区锚固平台进行了可靠性试验验证，成功完成了V区锚固平台的研制。

为了模拟施工过程中下拉索没有张拉到位这一状态，采用小荷载步对下拉索的末端施加位移进行逆向分析，求得施工过程中索网的精确受力状态。将计算值和实际测量值进行比较，可以得到需要调节的误差值。FAST为几何非线性结构，在调索过程中，不能根据影响矩阵法直接求得调节量，因此，采用逐步迭代的方式，并考虑环境温度的修正，求得每一根边缘拉索的调节量。索网结构复杂，施工过程和调索张拉计算量大，通过有限元分析均得到可靠的结果，在实际施工操作过程中，也验证了计算的准确性。

5 结论

作为巨型射电望远镜的主要支撑结构，FAST索网工程具有区别于传统空间结构工程的三个显著特点：超大跨度、超高精度以及主动变位工作方式。超大索网建造关键技术研究成功的解决了500MPa应力幅耐疲劳索具、毫米级索长控制、多方位受力轻量化的节点盘、大跨度高空索网散拼等关键技术难题，确保了该项目的顺利建设。索网制造与安装总体达到国际先进水平，其中高应力幅索具研发和高精度索的制造达到国际领先水平。

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, 43(02): 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] 杨帆, 朱万旭, 黄颖, 等. 空间索网结构用节点盘及方便换索的空间索网[P]. 中国. CN201320138023.X. 2013-09-18.
- [4] 王凯, 肖全东, 丁桂平. FAST索网和圈梁结构优化设计及施工方案研究报告[R]. 2012

参考文献

- [1] Nan R. Five hundred meter aperture spherical radio telescope (FAST)[J]. Science in China(Series G:Physics, Mechanics & Astronomy), 2006, 49(2):129-148.
- [2] 李辉, 朱文白, 潘高峰. FAST望远镜馈源支撑中的力学问题及其研究进展[J]. 力学进展, 2011, 41(2):133-154.
- [3] 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, 2015(4):18-20.
- [4] 伍柳毅, 韦福堂, 邓年春等. 天文台圈梁移动台车设计及应用[J]. 预应力技术, 2015(1):23-28.
- [5] 黄小辉, 张砾. 不同槽型小车牵引钢丝绳夹绳板性能研究[J]. 起重运输机械, 2011(S1).