



国家天文台FAST索网施工V区锚固平台研制

邹易清 陈立 韦福堂 张升华 韦富伦 伍柳毅 邓年春
(柳州欧维姆机械股份有限公司 广西柳州 545006)

摘要:国家天文台500m口径球面射电望远镜FAST (five hundred meters aperture spherical telescope) 是国家“十一五”规划建设的重大科学装置之一,其索网安装跨度500m,净高约130m,合计索根数8895根。FAST索网跨度大、索量多,要求精确度高,使得索网施工非常繁琐、复杂。V区锚固平台为FAST索网施工提供一个可移动的锚固平台,是索网施工过程中必不可少的关键设备。本文针对FAST索网施工对V区锚固平台的要求,使用ANSYS有限元软件,通过先进的结构优化设计和悬索找形方法,解决了V区锚固平台结构设计过程中的多个难题;创新地解决了V区锚固平台锚固和移动的问题;最终出色地完成了V区锚固平台的研制,为FAST索网施工提供了有力保障。

关键词:FAST索网施工 V区锚固平台 ANSYS优化设计 悬索找形分析 锚固形式

DOI: 10.13211/j.cnki.pstech.2016.03.001

1 前言

国家天文台500m口径球面射电望远镜FAST (five hundred meters aperture spherical telescope) 是我国建造的世界第一大单口径射电望远镜,也是国家“十一五”重大科学工程之一。FAST望远镜建成后,它将是全球最大的单口径射电天文望远镜,预计将在未来的20-30年保持领先地位,可以极大地提高我国在天文学领域的研究实力,并且可以在国防和国家安全方面发挥重要作用^[1-2]。

FAST主动反射面的主体支撑结构由主索网、下拉索、圈梁和格构柱以及格构柱基础组成,该工程索网安装主要为索网和下拉索结构的安装,结构示意图如图1所示^[3]。

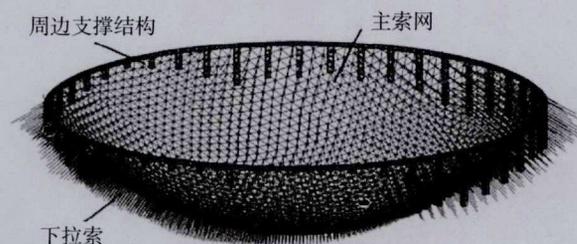


图1 FAST索网结构示意图

在施工过程中,索网安装跨度500m,净高约130m,合计索根数8895根,总重达1570t,面索索网体量、分布广,同时受地形制约,无法进行地面组装或搭设满堂架平台,必须借助圈梁进行空间牵引安装。跨度大、索量多,要求精确度

高,使得本工程索网施工繁琐、复杂、工期长,因此必须要精心组织,合理安排。根据面索网的对称性,索网结构划分为5个区域同时施工(5个区域俯视图呈现为V型)在每个V型区域相同位置安装径向施工通道以及施工索道。首先安装对称轴位置的拉索,然后通过圈梁移动台车和V型区域锚固平台的配合移动和锚固,拉索由中心对称的向两侧扩展施工,如图2所示^[4]。

V区锚固平台锚固在四根猫道承重绳上,为索网施工提供一个可移动的锚固平台,是索网施工过程中必不可少的关键设备。猫道总长为263m,空间跨度大,且为空间柔性结构,V区锚固平台需要在猫道上行走及锚固,V区锚固平台在保证足够的强度和刚度的前提下,质量越轻越有利猫道的整体设计,并且还得充分考虑V区锚固平台载荷对猫道线形的影响。如何实现柔性索道上可移动的锚固方式,是确保施工过程的可靠性,以及人员及设备的安全性的重要因素;因此V区锚固平台研制考虑因素多,难度大。

本文针对FAST索网施工对V区锚固平台的各项要求,使用ANSYS有限元软件,通过先进的结构优化设计和悬索找形方法,解决了V区锚固平台结构设计过程中的多个难题;创新地解决了V区锚固平台锚固和移动的问题;最终完成了V区锚固平台的研制,为FAST索网施工提供有力保障。

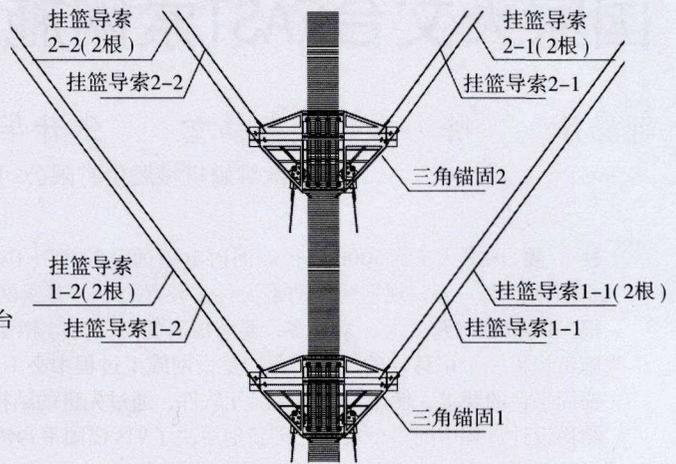
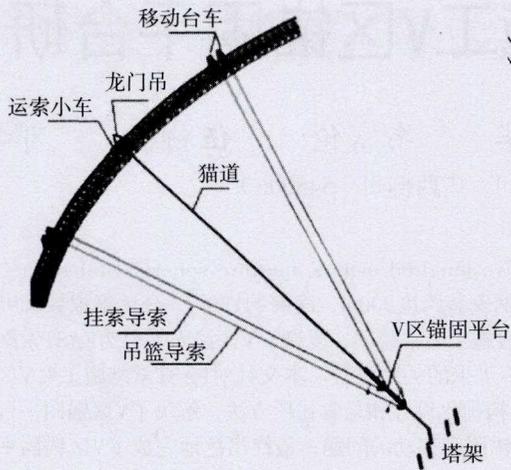


图2 V区锚固平台载荷示意图

2 V区锚固平台结构优化设计

2.1 V区平台结构

根据FAST索网施工方案需求，V区锚固平台结构如图3所示功能：

V区锚固平台分为上层平台和下层平台，上层平台满足实现在猫道上移动和锚固，下层平台为施工操作平台。V区锚固平台需要在满足强度和刚度的基础上，确保结构重量最轻；下层平台结构简单明确，依赖上层平台的整体布局，上层平台需要支撑索网施工过程中挂篮导索和牵索导索的最大载荷为200kN；对V区锚固平台结构和

边界条件进行简化，使用ANSYS软件进行建模，模型和边界条件如图4示：

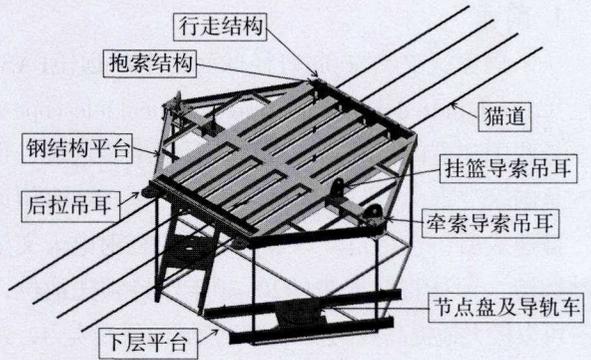


图3 V区锚固平台结构功能示意

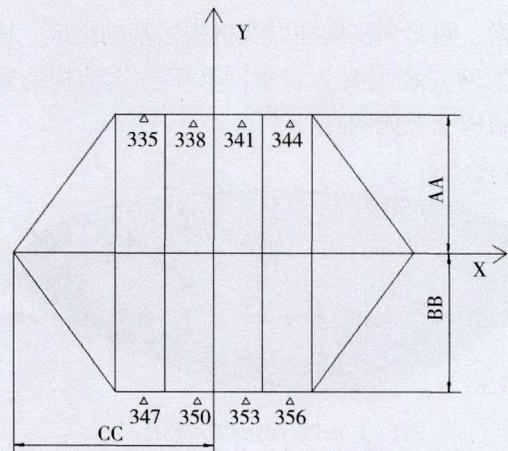
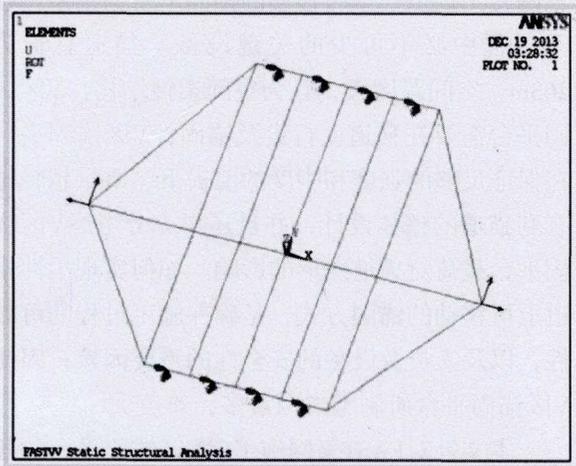


图4 ANSYS有限元优化设计模型及边界条件

2.2 结构优化设计

V区锚固平台结构尺寸由三个尺寸决定，分别为AA，BB和CC。索网施工过程中整个圆面划分为5个分区，每个分区的角度为72°；施工便

道由4根猫道索组成，每根猫道间距为0.5m；因此CC尺寸可以通过BB或AA求得，优化设计初选钢结构厚度为20mm。使用ANSYS命令流编写优化设计程序，AA和BB为设计变量，整体结构的

最大应力为目标变量，对V区锚固平台结果进行优化设计分析，获得结构应力最小情况下的V区锚固平台的最优尺寸。

ANSYS优化设计部分程序：

AA=1.5 m

BB=2.5 m

CC=BB × TAN (3.14 × 36/180) +1m

OPVAR, aa, DV, 0.2,2, ! 设计变量

OPVAR, bb, DV, 0.2,3, ! 设计变量

OPVAR, DMAX, SV, 0.005, 0.07, ! 状态变量
OPSAVE, 'OPT1', 'opt', ' ' !存储优化设计数据库

OPVAR, SMAXE, OBJ,,, !目标变量（应力）
优化设计结果为：AA=2m, BB=1.65m, CC=2.2m, 优化前后的结构数据如图5和表1所示：

在此基础上，在结构长度和宽度不变的情况下对不同厚度钢结构进行分析，计算结果如表2所示：

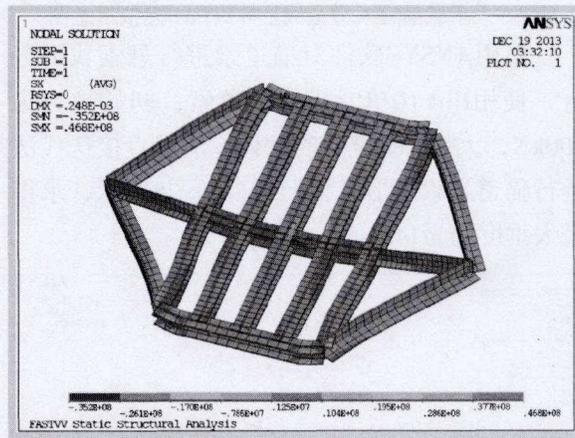
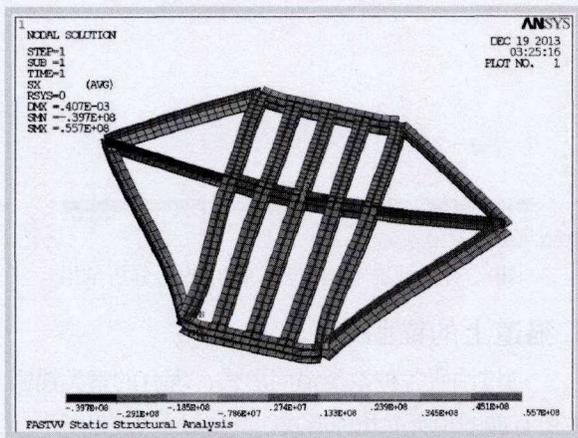


图5 V区锚固平台ANSYS优化设计前后应力分布图

表1 V区锚固平台ANSYS优化设计前后数据对比

	总长度(AA+BB/m)	总宽度(2×CC/m)	刚结构厚度(20mm)	最大应力(MPa)	最大应变(mm)	结构重量(吨)
优化设计前	4	7	20	55.7	0.4	4.7
优化设计后	3.65	4.4	20	46.8	0.25	2.7

表2 不同厚度钢结构分析结果

	最大应力(MPa)	最大应变(mm)	结构重量(t)
厚度20mm	46.8	0.25	2.7
厚度15mm	62.4	0.33	2.1
厚度10mm	93.7	0.508	1.45
标准H钢12×8mm	79.1	0.608	1.2

为了便于制造，使用标准的型材H钢（200mm×200mm×12mm×8mm）搭主体结构，ANSYS分析结果如图6所示；结构最大应力为79.1MPa，V区锚固平台为特种施工设备，为保障人员及财物的安全，结构安全系数选取相对保守。

根据优化设计结构，对V区锚固平台进行详细设计，补充上下层平台结构，使其满足各项功能需求，最后总体重量约为2.64t。

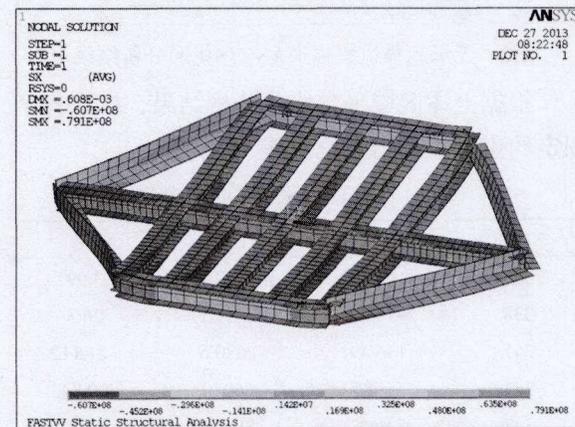


图6 标准H钢结构平台应力分布图

3 V区平台对猫道线形的影响

猫道索初始长度270m，两个支点高度差134m，设计最大垂度15m，猫道重量等效载荷250kg/m；猫道索形使用抛物线原理表示，使用

MATLAB软件模拟猫道索在无V区锚固平台负载情况下线形与FAST球面曲线的图形如图7所示:

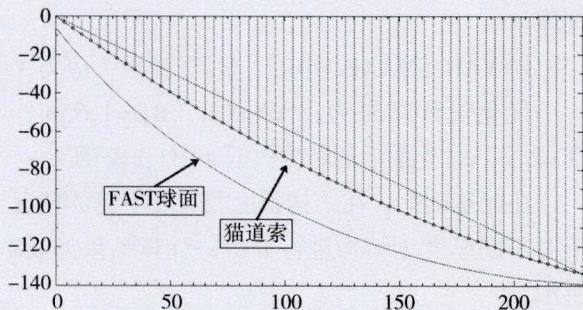


图7 无承载猫道索猫道线形MATLAB模拟示意图

使用ANSYS软件对猫道索进行悬索找形分析,使用link10单元模拟猫道索,初始拉力为100kN,无V区锚固平台负载,使用直接迭代法进行猫道悬索找形,找形结果如图8所示,求得最大垂度约为14.9m。

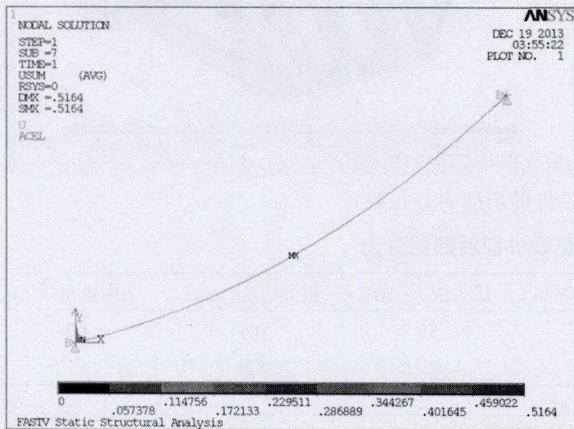


图8 无承载猫道索猫道ANSYS找形分析结果

根据上述区域平台优化分析结果,提取各个固定约束节点反力数据如表3所示:

表3 锚固约束节点反力数据

NODE	FX	FY	FZ
335	-35684	-66110	93.992
338	-195.2	-2611.1	26.3
341	196.49	-2620.6	-21.112
344	35685	-66040	-99.843
347	81606	-89459	110.22
350	481.53	-3660.7	32.31
356	-81609	-89509	-116.19

将节点反力极限状态加载到已经找形好的猫道索,可求得线形变化如图9所示;由V区锚固平台荷载引起的猫道索最大拉力为379kN,最大垂

度变化约为6.05m, V区锚固平台荷载对猫道索荷载引起的猫道索弯折角最大变化为15°。施工过程中需要考虑最大垂度变化对施工的影响。同时在设计V区锚固平台移动装置的时候需要考虑折角的影响。

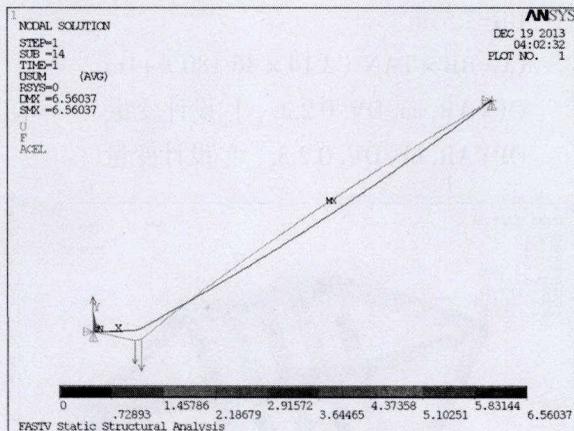


图9 有承载猫道索猫道ANSYS找形分析结果

4 猫道上的锚固

通过调研各种索类锚固形式,现有的索类锚固主要有如图10所示几种形式,其优缺点如表4所示:



图10 常用索类锚固形式

表4 常用索类锚固形式优劣对比

锚固结构名称	优点	缺点
索夹	牢固可靠	拧紧螺栓多,操作复杂
钢丝绳夹	使用较方便	需要考虑如何和结构连接
抱索器	操作方便,易于结构连接	提供的摩擦力较小
卡线器	操作方便,且压力越大压的越紧	需要考虑如何和结构连接
锚具	牢固可靠	松锚退锚操作复杂;易损伤猫道

利用抱索器操作方便,易于和其他结构连接的特点,对其进行改进以满足提供足够的摩擦力,改进后结构如图11所示:

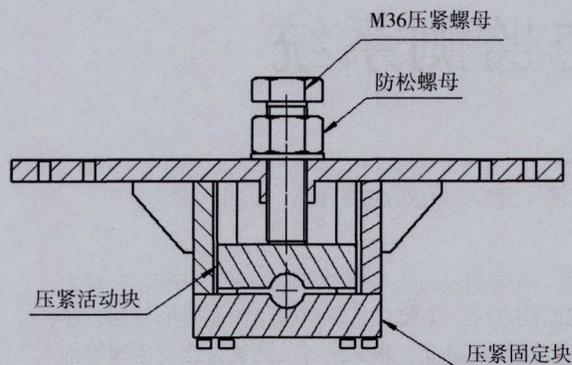


图11 改进后V区平台锚固结构

压紧预紧力计算:

根据节点反力分析结果,取最大值即大约需要提供的摩擦力为90kN,根据文献^[5]摩擦系数取:0.26;螺栓的预紧力矩及预紧力可根据公式进行验算;验算螺栓直径需要36mm,预紧力能够满足达到夹紧的要求。

5 猫道上的移动

在猫道上移动时,除V区锚固平台自重外无其他负载,平台自重2640kg,移动过程共8个导向轮受力,平均每个轮子受载荷330kg,轮子最小直径为38mm,载荷较小,轮子强度足够;导向结构充分考虑V区锚固平台载荷引起的猫道最大折角为15°,前后运动无阻滞,导向结构如图12所示:

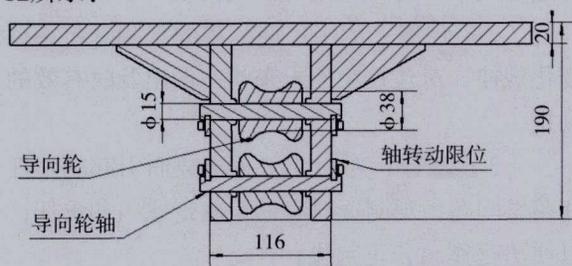


图12 V区锚固平台移动结构

6 V区锚固平台锚固性能试验

对V区锚固平台进行型式试验,验证其结构承载能力和锚固性能。设计静载实验方案如图13所示:

实验准备完成后,按1.25倍额定载荷(90kN)加载。静载试验的载荷按20%,40%,60%,70%,80%,90%,100%,110%,125%逐级往上加载。加载前,用石笔画出初始位置标识,在逐级加载时,对每一级进行保压3min,以

便加载试验过程中观测锚固装置夹持能力情况。试验结果表明,在逐级加载过程中,额定载荷100%以下,夹持处钢丝绳均无明显滑脱现象,额定载荷达到110%时钢丝绳夹持处有明显滑脱迹象,实验数据见表5。

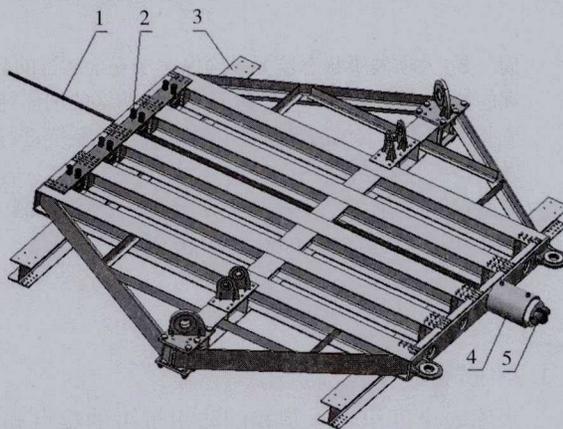


图13 V区锚固平台试验布置图

1. $\phi 32$ 钢丝绳 2. 抱索装置 3. 型钢垫梁;
4. YCWX150B型千斤顶 5. 卡销

表5 V区锚固平台锚固性能实验数据

额定荷载(90kN)比例	油压MPa	拉力kN	实验现象
20%	0.6	18	无滑脱
40%	1.21	36	无滑脱
60%	1.81	54	无滑脱
80%	2.42	72	无滑脱
90%	2.72	81	无滑脱
100%	3.02	90	无滑脱
110%	3.32	99	滑脱
125%	3.78	112.5	—

7 结论

国家天文台FAST属国家重大科学装置,它的建设举世瞩目,意义重大,影响深远。本文结合国家天文台FAST索网施工项目要求,针对施工过程中关键设备V区锚固平台,使用ANSYS有限元优化设计和悬索找形方法,结合可靠性试验验证,出色地完成了V区锚固平台的研制,解决了FAST索网施工过程中的关键难题,为FAST索网的顺利施工提供了保障。本文重点解决了以下关键问题:(1)使用ANSYS有限元软件编制优化设计程序,对V区锚固平台结构进行了优化设计分析,在保证结构强度和刚度的基础上,使得结构最轻;

(下转第26页)

4 计算分析

ST超高应力幅拉索锚固体体系锚具、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).