

文章编号: 1000-4750(2013)02-0400-06

巨型射电望远镜索网结构的优化分析与设计

姜 鹏, 王启明, 赵 清

(中国科学院国家天文台, 北京 100012)

摘 要: 500m 口径射电望远镜(FAST)主要以短程索网作为反射面支承结构。该文通过对三种短程索网分型的索网进行对比分析, 建议五轴对称分型方法作为优先选择索网分型方案。同时, 该文的优化设计工作进一步减少了主索网与圈梁连接节点的种类及数量, 并使索网能满足馈源舱检修升级功能。在此基础上, 针对现有两种反射面单元自重情况, 优化了索网截面和内力水平, 讨论了下拉索节点位置精度对索网变位精度的影响, 量化了索网变位过程中主索节点的侧偏量。

关键词: FAST 工程; 索网结构; 主动反射面; 力学分析; 有限元

中图分类号: O39 文献标志码: A doi: 10.6052/j.issn.1000-4750.2011.09.0578

OPTIMIZATION AND ANALYSIS ON CABLE NET STRUCTURE SUPPORTING THE REFLECTOR OF LARGE RADIO TELESCOPE FAST

JIANG Peng, WANG Qi-ming, ZHAO Qing

(National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100012, China)

Abstract: The geodesic meshed cable-net structure has been designed as the supporting structure of a Five-hundred-meter Aperture Spherical radio Telescope (FAST). The comparative investigation was performed among three types of geodesic meshed cable-nets in the present work, then a five-symmetry axis-plan was thusly suggested as a preferred mesh plan. Furthermore, the optimization work, according to the suggested mesh plan, has been performed to reduce the types and quantity of the connection joints between the cable-net and the ring beam. Finally, the finite element model has been established to study the influence of the selfweight of the reflector element on the force distribution of the cable-net, to discuss the sensitivity character of the position of a down tied cable to the precision of cable net deformations, and to calculate the tangential displacement of a cross node of cable in its deformation procedure.

Key words: FAST engineering; cable net structure; active reflector; mechanical analysis; finite element

500m 口径球面射电望远镜(简称 FAST)工程于 2007 年 7 月 10 日获得国家发改委的立项批准, 隶属于国家“十一五”重大科学工程项目。该望远镜的工作频率在 70MHz~3GHz 之间, 分辨率可达到 2.9', 指向精度可达到 $8''^{[1-2]}$ 。

FAST 几何光学工作原理如图 1 所示。根据需要观测天体(如图 1 中的 S_1 和 S_2 所示)的角度, 在 500m 口径反射面的不同区域形成直径为 300m 的抛

物面(有效照明区域)^[3]。为实现该主动变位功能, FAST 工程团队组织国内多所高校对多种支承方案进行了研究。

前期主要由同济大学对离散式反射面支承结构进行理论分析及试验研究^[4-6]。基本单元靠其角点两两相隔的 3 个促动器支承, 通过调节促动器的升降来实现反射面从球面到抛物面的变位, 在变位过程中基本单元之间相互独立。

收稿日期: 2011-09-05; 修改日期: 2011-12-03

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(11173035)

通讯作者: 姜 鹏(1978—), 男, 吉林人, 副研究员, 博士, 主要从事工程力学方面研究(E-mail: pjiang@bao.ac.cn)。

作者简介: 王启明(1961—), 男, 辽宁人, 研究员, 博士, 主要从事机器人机构学、机器制造和天文仪器等研究(E-mail: qmwang@bao.ac.cn);

赵 清(1983—), 女, 山东人, 助理研究员, 硕士, 主要从事索网变形策略研究(E-mail: qzhao@bao.ac.cn)。

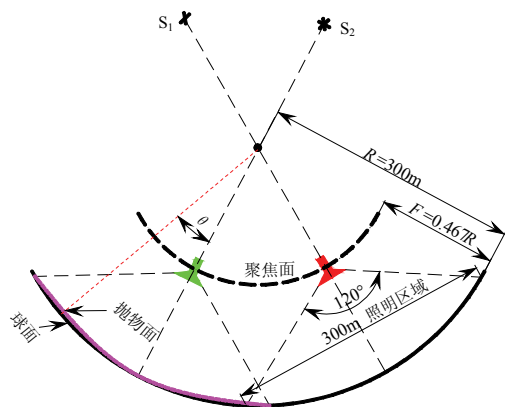


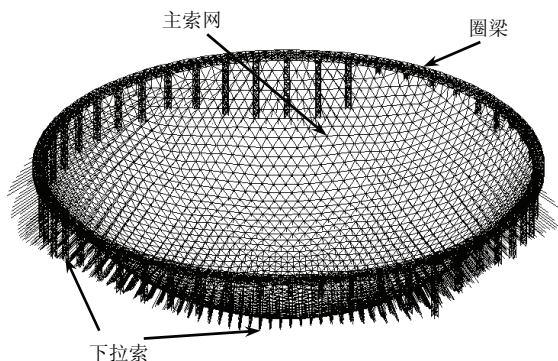
图1 FAST主动反射面工作原理

Fig.1 Optical geometry of the large radio telescope

受美国 Arecibo 望远镜反射面支承结构的启发, 2002 年提出了采用柔性的拉索来支承 FAST 主动反射面的构想。在国家天文台 FAST 的项目总体组的组织下, 多所科研院校(如清华大学、同济大学和哈尔滨工业大学等)参与了 FAST 主动反射面整体索网支承结构的研究。

其中, 清华大学提出了一种可以称之为索-膜一体化的设计方案^[7-8], 将反射面板直接铺设在球面主索网上, 主索网采用四边形网格划分方式, 每个主索节点设置 3 根下拉索。而同济大学的数值分析结果表明, 每个主索节点设置单根下拉索可以满足 FAST 的要求^[9]。

在上述研究的基础上, 哈尔滨工业大学对四边形网格、凯威特网格、三向网格、短程线网格等多种索网分型方案进行了比对分析。综合考虑索网受力的均匀性、索网网格种类及对称性, 建议采用短程线网格+刚性背架+单根下拉索的方案^[10](见图 2), 并于 2003 年通过验收, 形成 FAST 反射面支承结构的初步设计方案。

图2 FAST索网支承结构示意图^[10]Fig.2 Schematic drawing of the integral cable-net structure^[10]

目前 FAST 已经步入工程实施阶段, 相比于前期工作, 设计条件更加明确或有更新, 索网的设计

也需要在前期工作的基础上同步深入, 为此本文主要在以下几方面开展工作。

首先, 背架已经初步确定采用螺栓球网架的结构形式, 已经研制出了新型钢背架和铝合金背架, 可分别将反射面单元自重降低至 11kg/m^2 和 8kg/m^2 。根据该自重情况, 本文针对三种短程线网格形式进行比对分析, 确定索网的分型方案, 更新索网的用索规格。

在确定索网分型方案的基础上, 进一步优化索网结构, 一方面为了满足 FAST 馈源系统对于维修和升级的需求; 另一方面减少了圈梁与主索网的节点种类及数量, 降低索网的施工难度。

最后, 本文还将给出主索网变位过程中主索节点的侧偏量, 明确下拉索节点位置精度对索网内力及变位精度的影响, 为 FAST 索网施工提供依据。

1 分析方法

FAST 在不工作时, 索网节点保持球面的位形。当 FAST 在对天体进行观测时, 可分为两种工作方式, 即寻源工作方式和跟踪工作方式。

寻源过程, 即根据观测角度调节促动器将照射范围内的主索节点从球面调整到指定抛物面位置, 照射范围以外的主索节点不进行主动调节; 跟踪过程是, 跟随天体的运动, 将对应照射区域内的主索节点实时地调整到指定抛物面位置, 而抛物面以外的主索节点则恢复到球面位形的状态。

以反射面的球心为坐标原点, 以观测方向为极轴, 照明区域索网抛物面的极坐标方程可表示为:

$$\sin^2 \theta \cdot \rho^2 - 553.294 \cdot \cos \theta \cdot \rho - 166250 = 0 \quad (1)$$

式中: ρ/m 为极轴; $\theta/(\circ)$ 为极角(见图 1)。利用式(1)可求得抛物面与球面之间的距离, 见下式:

$$d(\theta) = \rho(\theta) - 300 \quad (2)$$

式中, d 的单位为 m 。

在反射面进行天体跟踪时, 可假设变位过程中主索节点是沿径向方向运动的, 主索节点的径向位移速度和加速度可表示为:

$$\begin{cases} v(\theta) = \frac{d(\rho(\theta))}{d\theta} \cdot \frac{d\theta}{dt} \\ a(\theta) = \frac{d\left(\frac{d(\rho(\theta))}{d\theta} \cdot \frac{d\theta}{dt}\right)}{d\theta} \cdot \frac{d\theta}{dt} \end{cases} \quad (3)$$

在抛物面运行的角速度为 $15^\circ/\text{h}$ 。代入到式(2)中, 便可求得在变位过程中, 主索节点速度不大于 1mm/s , 加速度则更是不足 $1\mu\text{m/s}^2$, 远远小于重力

加速度,可见索网的变位过程是准静态的。因此,跟踪过程可以看成是无数个连续的寻源过程。本文以后的分析均是用一系列的寻源过程代替跟踪过程。

本文采用 ANSYS 大型有限元软件进行分析,索网一共包含约 7000 根主索和 2300 根下拉索,采用 LINK10 单元建模。反射面单元自重采用集中荷载的形式作用在主索节点上,主索网与圈梁节点采用固定约束。

由前面的介绍可知,索网分析可以分为基准态分析和工况态分析,基准态是指索网结构受自重和预应力的共同作用下,主索节点位于指定球面上的状态,该状态也是索网在不工作时需要保持的状态,可采用迭代法进行分析^[10]。

工况态则是指通过下拉索促动器反馈控制,使照明区域的主索节点移动到工作抛物面上。通过对下拉索节点施加径向位移约束,控制主索节点从基准面到工作面移动,从而实现主索网基准态及工况态的仿真分析,可采用迭代分析方法^[10]。一般情况下,两次反馈控制便可达到 FAST 所需要的位形精度。

2 索网结构设计及建模

2.1 整体分型方案对比

FAST 索网采用短程线分型方法,索长度相对比较均匀,长度范围为 10.5m~12.5m。网格划分的均匀程度其实也代表了索网受力的均匀性。根据不同的切割角度,短程线主要可以分为 3 种,见图 3。

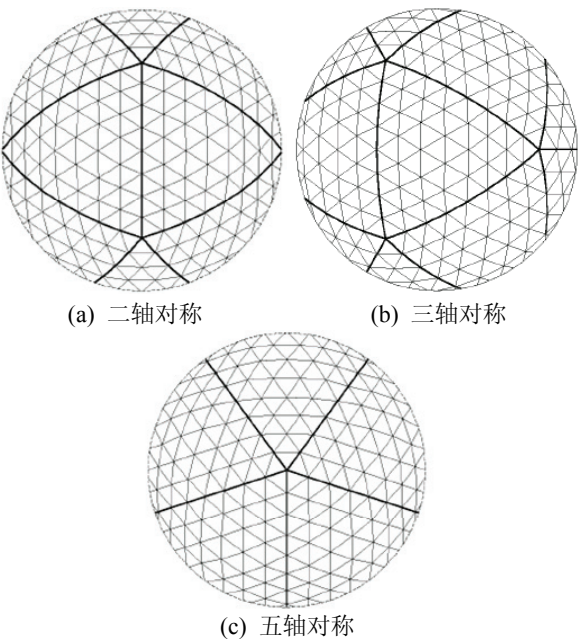


图 3 短程划分方案示意图
Fig.3 Schematic plan of three types of geodesic mesh plan

我们对这 3 种分型方法进行了优化分析,根据索的受力情况调整索截面的大小,使所有的索承受的应力都在 500MPa 左右,具体索截面分布及索的受力结果如表 1 所示。可见,3 种分型方法的索网结构的内力水平并无较大差异。

表 1 3 种索网分型的受力优化结果
Table 1 Comparison of optimization results among three types of cable-net mesh plan

分型方法	主索网				下拉索载荷/kN	
	最大应力/	最大拉力/	最大直径/	主要截面/	最大	最小
	MPa	kN	mm	mm		
二轴对称	607	606	36	24~30	37.2	1.0
三轴对称	588	596kN	36	24~30	36.0	1.1
五轴对称	647	600kN	36	24~30	38.0	0.7

考虑到第三种分型方法有更好的对称性,所有主肋的垂度方向都平行于重力方向,无论从施工控制上,还是从索网节点、背架单元的编号和分类上,都相对简单许多。为此,FAST 目前采用的是五轴对称的短程线划分方法。

2.2 索网局部优化

根据 FAST 望远镜的工作原理,馈源仓需要通过 6 个馈源塔,利用缆索悬挂在空中。FAST 需要保证 30 年工作年限,要考虑馈源仓及接收机系统的维修及升级改造。

为了保证馈源仓能顺利到达索网正下方的检修平台,索网设计中把中心节点的 5 根索去掉,预留了内接圆直径为 21.6m 的正五边形网孔,如图 4 所示,图 4 中虚线为去掉的主索^[11]。

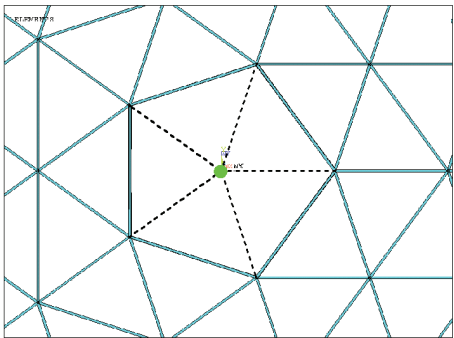


图 4 索网中心处理方法
Fig.4 Optimization in the cable-net center

由于反射面索网采用短程线分型,利用平面在一定高度对半径 300m 的短程线网格进行切割,便可得到 500m 口径球面索网。可是索网边缘的索无论长短还是方向都极其不规则、种类繁多,这给圈梁节点的制作和安装都带来极大的麻烦。为此,本文对主索网边缘的索进行了特殊处理。所有靠近圈

梁的主索节点, 都通过索垂直连到圈梁上, 如图5所示。

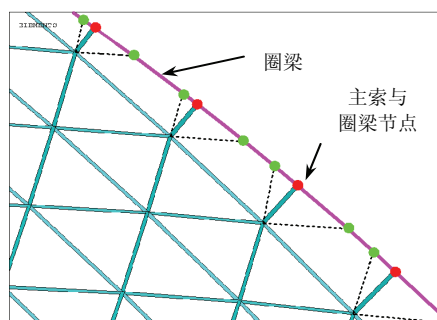


图5 索网边缘处理方法

Fig.5 Optimization on the cable-net outer edge

图5中虚线代表按短程线划分时, 与圈梁连接的主索。这样圈梁上的节点方向都是一样的, 而且节点数量也由原来的300多个(图5中虚线对应的节点所示)减少至150个(图5中实线对应的节点所示), 大大降低了圈梁节点的制作和安装的难度。但是索网构形的改变, 势必会改变索网的内力分布, 下面将利用有限元方法对其进行分析。

3 分析结果

3.1 钢-铝背架对比分析

FAST 项目组根据螺栓球网架结构形式, 已经研制出了新型的钢背架和全铝背架(见图6), 可将反射面单元的自重降至 11kg/m^2 和 8kg/m^2 。利用 ANSYS 软件可计算出每个网格单元的面积, 然后再计算每个单元的自重, 将该自重等分成3份分别加载到相邻的3个主索节点上。



(a) 钢背架



(b) 铝背架

图6 FAST 项目组研制的面板单元(螺栓球网架结构)

Fig.6 Two types of reflector elements made by FAST team (bolt-ball net frame structure)

分别针对两种自重情况, 利用上述分析方法对索网进行优化, 由最后的优化结果(见表2)可见, 铝背架可将最大单根索力降到452kN, 相比于钢背架降低了约25%。可见, 铝背架的采用较大程度地减小主索承受的载荷。

表2 针对两种面板单元的索网优化分析结果

Table 2 Comparison of optimization results between types of reflector element

背架种类	主索网				下拉索 载荷/kN	
	最大应力/	最大拉力/	最大直径/	主要截面/	最大	最小
	MPa	kN	mm	mm		
钢背架(11kg/m^2)	588	600	36	24~30	36.0	0.7
铝背架(8kg/m^2)	515	452	34	20~26	28.1	1.2

3.2 下拉索节点位置精度敏感性

在索网施工过程中, 下拉索节点的位置不可能完全精确确定, 势必会有偏差的存在。而且反射面下方有螺旋道路、排水渠及各种支护结构, 有时候可能会需要下拉索避让。为此, 本文进行了下拉索位置精度的敏感性分析, 以确定对施工精度的要求, 以及下拉索与其他结构有干涉时可以避让的程度。

原则上, 下拉索与地锚的节点位置, 应该是在反射面球心到主索节点的延长线上。在施工过程中, 下拉索节点位置应该是角度控制。本文在进行敏感性分析, 对下拉索引入误差时, 首先随机生成2组2275维的数组 α 和数组 β (如图7所示), 其中 $\alpha/(^\circ)$ 是0~5的随机数组, 表示偏离的程度; $\beta/(^\circ)$ 则是0~360的随机数, 表示偏离的方向。

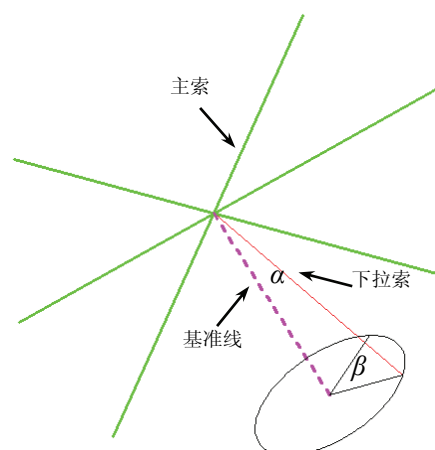


图7 下拉索误差示意图

Fig.7 Schematic drawing of construction error of down tied cable

由前面的分析可知, 下拉索的最短长度为4m。对于偏差为 5° 的情况, 下拉索节点的偏离距离为

0.34m, 这是施工过程中完全可以控制的误差, 而且这种随机误差的引入方法更能代表施工的实际情况。

在引入这样的误差后, 重新对索网进行基准态及变位态分析。分析结果表明, 相比于引入误差前, 主索和下拉索的索力变化不超过 10%; 索网的变位精度也未受到影响, 以变位到 $(0^\circ, 26^\circ)$ 为例(见图 8), 图 8 中横坐标极角同式(1)中的 θ 。经过两次反馈控制, 便可达到所需要的索网位形精度(2mm)。

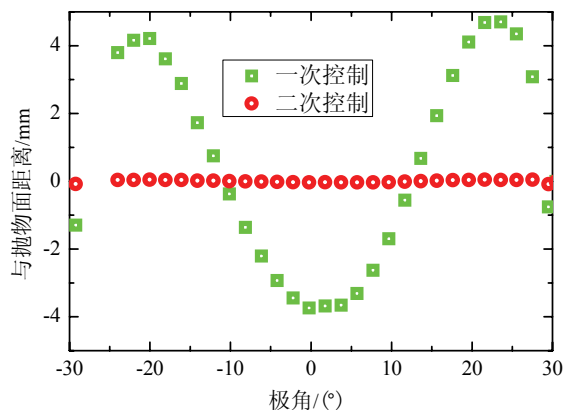


图 8 索网节点位置精度控制

Fig.8 The position error distribution of cable-net cross node after two times of iterating control

可见, 索网的变位精度对下拉索节点的位置施工控制要求并不高。至少在目前引入的误差情况下, FAST 索网仍可有效地实现变位工作。

3.3 侧偏量计算

实际上在索网变位过程中, 主索节点并不是严格沿径向移动, 或多或少有些沿球面切向的侧偏。根据目前的开挖方案, 主索节点与地面的最短距离长度约为 4m。如果促动器与地锚采用固接, 侧偏量的大小将直接决定促动器所承受的弯矩。

通过对数值结果的统计, 本文绘制出抛物面变位到几个特征角度时, 索网节点侧偏的向量见图 9。

由图 9 可见, 主索网节点的侧偏量大概是沿着抛物面中心对称, 最大侧偏量主要是与抛物面位置有关。当抛物面在索网中心时, 最大侧偏量约为 60mm; 当抛物面变位到 13° 时, 最大侧偏量约为 80mm; 当变位到 26° (抛物面在索网边缘) 时, 最大侧偏量约为 100mm。

可见, 侧偏量相比于变位距离(473mm)不可以忽略。因此本文建议, 促动器与地锚尽量采用铰接的连接方式, 以避免促动器承受过大的弯矩。

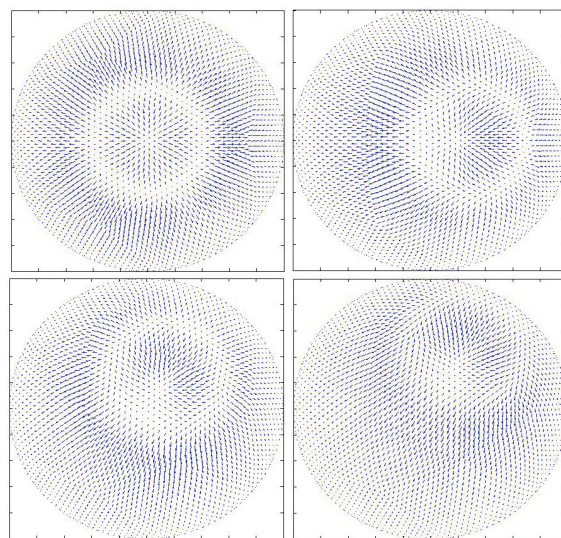


图 9 索网变位过程侧偏量的矢量图

Fig.9 Vector diagram of tangential displacement of cable-net cross node in its deformation procedure

4 结论

本文的索网优化设计工作, 在减少了圈梁与主索网结点的种类和数量的同时, 又使 FAST 索网满足馈源系统检测维修的功能要求。并基于 ANSYS 有限元软件, 建立了有限元模型, 针对 FAST 设计和施工中的关键问题进行分析。具体结论如下:

(1) 对比分析了短程线的三种网格划分形式, 由于内力水平相差不超过 2%, 因此本文推荐了对称性较好的五对称轴方案作为 FAST 的索网分型方案。

(2) 铝背架相比于钢背架会降低索力 25%左右, 对索网的内力优化贡献显著。

(3) 下拉索节点位置敏感性分析结果表明, 尽管索网变位精度要求较高, 但由于整个系统采用反馈控制, 下拉索的角度控制在 5° 以内即可满足要求。

(4) 侧偏量主要与变位角度相关, 当抛物面中心分别与索网中心偏离 0° 、 13° 和 26° 时, 相应的最大侧偏量分别为 60mm、80mm 和 100mm, 侧偏量也基本沿抛物面中心对称。由于侧偏量相比径向位移不可忽略, 因此建议在促动器与地锚采用铰接的连接方式。

另外, 索网在风载、温载及地震载荷作用下的响应情况, 还有待于进一步分析。

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, Zhu Wenbai, et al. Adaptive cable mesh reflector for the FAST [J]. Acta Astronomica Sinica, 2003, 44: 13—18.
- [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] 罗永峰, 邓长根, 李国强, 等. 500m 口径主动球面望远镜反射面支撑结构分析[J]. 同济大学学报, 2000, 28(4): 497—501.
Luo Yongfeng, Deng Changgen, Li Guoqiang, et al. Structural analysis of the reflector supporting system of the 500m active spherical telescope [J]. Journal of Tongji University, 2000, 28(4): 497—501. (in Chinese)
- [5] 罗永峰, 于庆祥, 李国强, 等. 大射电望远镜反射面支承张拉结构非线性分析[J]. 同济大学学报, 2000, 31(1): 1—5.
Luo Yongfeng, Yu Qingxiang, Li Guoqiang, et al. Nonlinear analysis of supporting tensegrity structure for reflector of large radio telescope [J]. Journal of Tongji University, 2000, 31(1): 1—5. (in Chinese)
- [6] 罗永峰, 杨薇, 李国强, 等. 大射电望远镜反射面全球面张拉索网体系静力分析[J]. 结构分析, 2004(2): 30—35.
Luo Yongfeng, Yang Wei, Li Guoqiang, et al. Static analysis of prestressed spherical cable network supporting reflector of large radio telescope FAST [J]. Structural Engineers, 2004(2): 30—35. (in Chinese)
- [7] Ren G X, Lu Q H, Zhou Z. On the cable car feed support configuration for FAST [J]. Astrophysics and Space Science, 2001, 278(1): 243—247.
- [8] 路英杰, 任革学. 大射电望远镜 FAST 整体变形索网反射面仿真研究[J]. 工程力学, 2007, 24(10): 165—169, 159.
Lu Yingjie, Ren Gexue. Simulation of the cable mesh reflector for the large radio telescope FAST [J]. Engineering Mechanics, 2007, 24(10): 165—169, 159. (in Chinese)
- [9] 沈黎元. 时变索网形状控制与 FAST 反射面结构分析[D]. 上海: 同济大学, 2004.
Shen Liyuan. Analysis on the time-varying form-finding of the cable net of FAST reflector [D]. Shanghai: Tongji University, 2004. (in Chinese)
- [10] 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)
- [11] Jiang P, Wang Q M, Zhao Q. Optimization and analysis on cable net structure supporting the reflector of the large radio telescope FAST [J]. Applied Mechanics and Materials, 2011, 94/95/96: 979—982.