

DOI : 10.3901/JME.2017.07.062

500 m 口径射电望远镜索网与面板单元自适应 连接机构设计分析*

李庆伟^{1,2} 姜 鹏^{1,2} 南仁东^{1,2}

(1. 中国科学院国家天文台 北京 100012 ;

2. 中国射电天文重点实验室 北京 100012 ;

摘要 :500 m 口径射电望远镜(Five-hundred-meter aperture spherical radio telescope, FAST)采用柔性索网+刚性面板的设计方案,变位观测过程中索网呈柔性,而面板单元则呈刚性,这就需要在面板和索网节点之间设计自适应连接机构,以避免面板在单元变位过程中受附加应力的影响。因应 FAST 的技术需求,主要完成了以下工作:进行自适应连接机构的自由度设计及机械设计,建立包含连接机构的 FAST 反射面整体有限元模型,并通过与理论分析结果的对比,验证了有限元模型的准确性;应用建立的有限元模型,计算索网在变位过程中自适应连接机构的运动范围,为 FAST 工程提供了必要的设计参数。

关键词 :500 m 口径射电望远镜;索网结构;主动反射面;自适应机构;有限元

中图分类号: TG156

Design and Analysis of the Adaptive Connecting Mechanism between the Cable-net and Panel of Five-hundred-meter Aperture Spherical Radio Telescope

LI Qingwei^{1,2} JIANG Peng^{1,2} NAN Rendong^{1,2}

(1. National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100012;

2. Key Laboratory of Radio Astronomy, Beijing 100012)

Abstract : The reflector system of the five-hundred-meter aperture spherical radio telescope (FAST) is designed as rigid panels supported by a flexible cable-net structure. Shape-changing operation in process of observation will lead to relative displacements between the adjacent nodes of the cable-net. Meanwhile, three nodes on a rigid panel are fixed relatively. Thus, adaptive connecting mechanisms between panels and the cable-net are certainly needed to avoid the influence of additional stress during shape-changing operation. The present work focuses on the following aspects according to the technical requirements of FAST. The degrees of freedom and the structure of the adaptive connecting mechanisms are designed, and the finite element model of the reflector system with the adaptive connecting mechanisms is established. Then the theoretical algorithm is applied to verify the results calculated by the finite element analysis. The finite element analysis is carried out to calculate the scope of motion of adaptive connecting mechanisms during the shape-changing of the cable-net, thus providing input parameters for the design of adaptive connecting mechanisms.

Key words : five-hundred-meter aperture spherical radio telescope ; cable-net structure ; active reflector ; adaptive connecting mechanism ; finite element

0 前言

500 m 口径球面射电望远镜(Five-hundred-meter

aperture spherical radio telescope, FAST), 隶属于国家“十一五”重大科学工程项目,是目前正在建设中最大的单口径射电望远镜。该望远镜的工作频率在 70 MHz ~ 3 GHz 之间,分辨率可达到 2.9', 指向精度可达到 8"^[1]。国家天文台于 1994 年开始,联合众多高校及科研单位,对多种支撑结构形式进行可行性研究,最终采用柔性索网+刚性面板的设计方

* 国家自然科学基金(11303059)、国家自然科学基金面上(11673039)、中国科学院关键技术人才基金和中国科学院青年创新促进会人才基金资助项目。20160608 收到初稿,20170103 收到修改稿

案^[2-7]。

反射面采取主动变位的独特工作方式,即根据观测天体(如图 1 中的 S_1 和 S_2 所示)的角度,在 500 m 口径反射面的不同区域,形成直径为 300 m 的抛物面,即有效照明区域^[8-9]。为了实现反射面的主动变位特性,FAST 采用柔性索网作为主要支承结构。索网结构采用短程线分型方法划分,共包括 6 670 根主索单元,及 2 225 个主索节点。每个主索节点设置单根下拉索,通过促动器拖动下拉索来控制索网变位,从而在 500 m 口径范围内的不同区域形成 300 m 口径的抛物面^[10-12]。

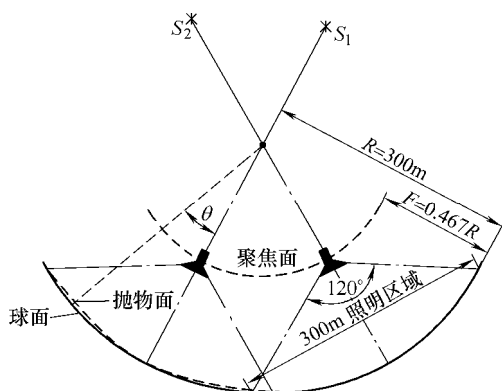


图 1 FAST 主动反射面工作原理图

FAST 变位过程中,柔性索网各节点之间有相对位移,而刚性面板单元的三个节点位置相对固定。为了使面板单元在变位过程中自适应于索网运动,避免面板因受附加应力而影响面型精度,需要设计自适应连接机构。

基于上述需求,本文主要进行以下几方面工作:进行自适应连接机构的自由度设计及机械设计,保证面板单元既可以适应于索网节点的运动而不受附加应力,同时又可以保持合理限位约束;进行数值与理论分析,计算索网变位过程中自适应连接机构的运动范围,为连接机构节点盘的设计提供数据支持。

1 自适应连接机构设计

FAST 面板单元在三个顶点上均装有连接装置,将面板单元固定在主索节点上,与索网一起构成反射面系统。在索网变位工作过程中,连接机构需保证面板单元能自适应于索网的变位运动,且能免受附加应力进而保证面形精度。这就需要自适应连接机构的自由度即不能欠约束,也不能过约束,因此设计约束面板的 6 个自由度。另外,在索网变位过程中,还要考虑面板不会因位移过大而导致互相碰撞,故对面板的一个顶点约束 3 个自由度,以保证单个面板的位置相对固定。自由度设计如图 2 所示。

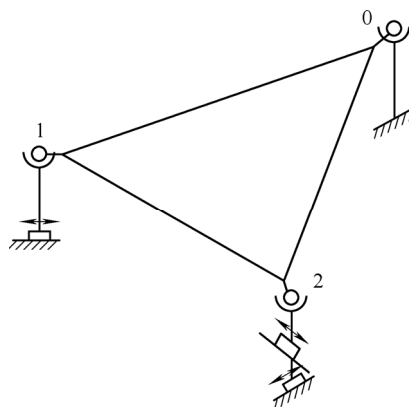
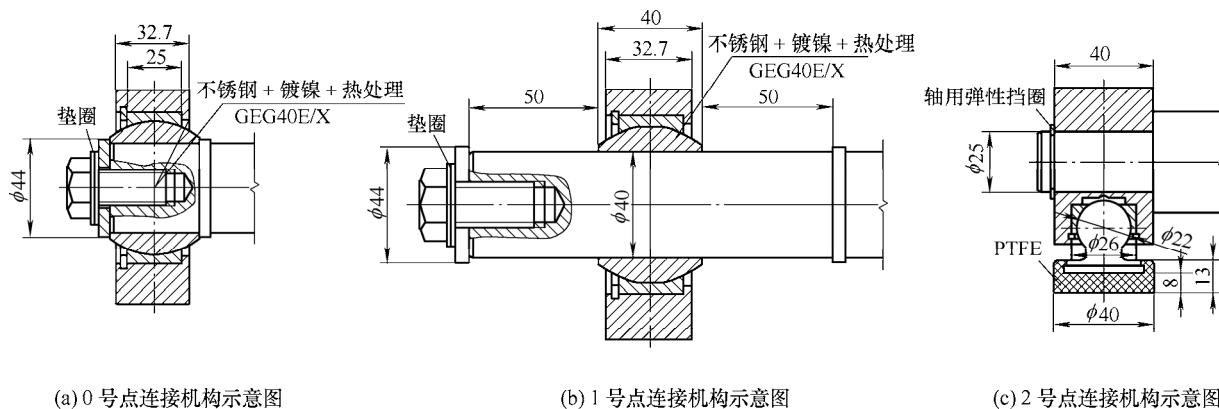


图 2 自适应连接机构的自由度设计

在图 2 中,三个连接机构均为铰接,完全释放转动自由度。其中连接机构“0”约束节点的三个平动自由度($U_x=U_y=U_z=0$),连接机构“1”释放节点沿连接杆轴向的平动自由度($U_y=U_z=0$),连接机构“2”释放反射面单元平面内的两个平动自由度($U_z=0$)。在此约束条件下,假定与反射面单元连接的主索节点固定不动,则单个面面板单元为静定结构。

根据自适应连接机构的自由度设计,设计了“0”、“1”和“2”自适应连接机构的具体结构,“0”和“1”采用向心关节轴承+不锈钢杆,“2”采用球轴+平面滑动副(在有限措施的连接机构节点盘上自由滑动)的方案,如图 3 所示。



(a) 0 号点连接机构示意图

(b) 1 号点连接机构示意图

(c) 2 号点连接机构示意图

图 3 连接机构做法示意图

索网采用短程线分型方法^[11-15], 索网共 2 225 个节点, 反射面单元总共有 4 450 块。根据几何拓扑关系, 每个主索节点需要布置有 6 个连接机构, 这就需要考虑“0”、“1”和“2”号机构点在 2 225 个主索节点上的布置形式。“0”、“1”、“2”号机构间隔布置形式被采纳, 见图 4。

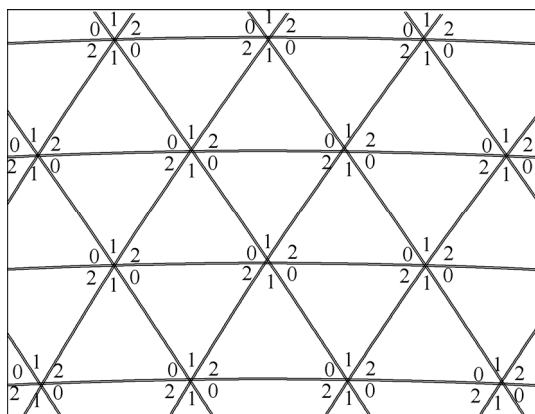


图 4 连接机构布置示意图

该布置形式使所有主索节点上的连接机构布置形式一致, 可避免安装时出错。另外, 这种间隔布置形式基本可以避免相邻两个连接机构都布置为“2”号连接的情况, 可以尽量减少在 FAST 运行过程中连接机构出现相互干涉的可能性。

2 分析方法

采用 ANSYS 建模计算, 用壳单元 SHELL63 模拟反射面板及其背架, 按等刚度代替的原则用梁单元 BEAM44 模拟反射面单元连接机构的节点盘(取钢节点圆盘直径为 450 mm, 厚度为 12 mm), 在梁端释放相应的自由度, 分别模拟连接机构“0”、“1”、“2”, 如图 5 所示。

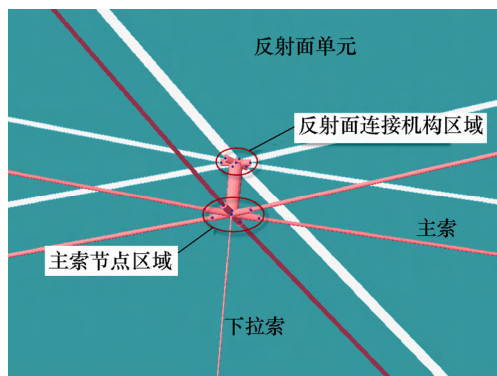


图 5 计算模型中反射面单元与主索网连接方式

主索节点同样按等刚度代替的原则采用梁单元进行模拟, 6 个梁单元固结在一起。主索节点与自适应机构之间使用梁单元连接以形成整体, 梁单

元节点采用固接方式。

基准态时, 取相邻反射面单元之间缝隙为 100 mm, 对应邻边相互平行。环梁结构则采用 BEAM4 单元进行建模。整体有限元模型见图 6。

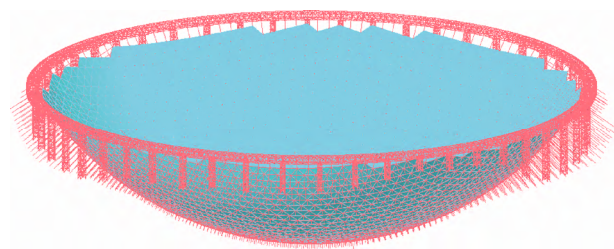


图 6 FAST 反射面系统整体有限元模型

为验证模型计算方法的正确性, 本文采用理论解析算法作为对比手段。图 7 为主索节点与面板单元节点几何关系示意图, 图中 M 表示连接机构“0”处与主索节点对应面板上节点的编号, m 表示连接机构“0”与面板相连处节点编号, 变位后相应的点分别用 M' 和 m' 表示。同理, 用 N 、 n 和 P 、 p 分别表示连接机构“1”和“2”处与主索节点对应面板上节点的编号及连接机构与面板相连处节点编号, 变位后的相应节点用 N' 、 n' 和 P' 、 p' 表示。

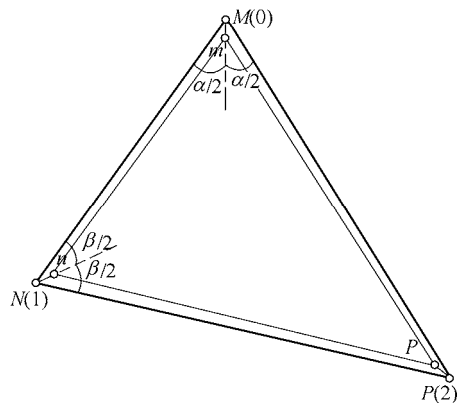


图 7 主索节点与面板单元节点几何关系示意图

由于变位前后主索节点的坐标是已知的, 因此可以从几何关系和边界约束条件出发, 采用解析的方式求解出变位后连接机构节点的准确位置。为简化求解过程, 忽略影响较小的因素, 做出如下假定:

反射面单元采用桁架式背架和铝合金面板组成, 刚度较大, 可假定为一刚性面板, 不考虑其弹性变形; 由于主索节点盘盘面基本朝向主索网球面法线方向, 在运行过程中偏转幅度很小, 因此忽略主索节点的转角位移; 实际结构中, 连接机构轴向为相邻两主索夹角的平分线在节点盘平面内的投影方向, 由于主索节点盘在实际运行过程中偏转幅度不大, 可以认为变位后“0”、“1”号连接机构也位于顶角平分线上。

结合上述假定, 根据图 7 所示的几何关系和边界约束条件, 建立了求解变位后点 m' 、 n' 、 p' 的节点坐标方程组, 见方程组(1)~(3)。

根据假定, 不考虑面板的弹性变形, 因此变位后点 M' 和点 m' 的距离等于变位前点 M 和点 m 标的距离 L_{Mm} , 联立直线 $M'm'$ 的参数方程可得到方程组(1), 其中矢量 $M'm'$ ($a_{M'm'}, b_{M'm'}, c_{M'm'}$) 是直线 $M'm'$ 的方向矢量, $t_{m'}$ 是参数。

$$\begin{cases} (x_{m'} - x_{M'})^2 + (y_{m'} - y_{M'})^2 + (z_{m'} - z_{M'})^2 = L_{Mm}^2 \\ \frac{x_{m'} - x_{M'}}{a_{M'm'}} = t_{m'} \\ \frac{y_{m'} - y_{M'}}{b_{M'm'}} = t_{m'} \\ \frac{z_{m'} - z_{M'}}{c_{M'm'}} = t_{m'} \end{cases} \quad (1)$$

同理, 变位后点 m' 和点 n' 的距离等于变位前点 m 和点 n 标的距离 L_{mn} , 联立直线 $N'n'$ 的参数方程可得到方程组(2), 其中矢量 $N'n'$ ($a_{N'n'}, b_{N'n'}, c_{N'n'}$) 是直线 $N'n'$ 的方向矢量, $t_{n'}$ 是参数。

$$\begin{cases} (x_{n'} - x_{m'})^2 + (y_{n'} - y_{m'})^2 + (z_{n'} - z_{m'})^2 = L_{mn}^2 \\ \frac{x_{n'} - x_{m'}}{a_{N'n'}} = t_{n'} \\ \frac{y_{n'} - y_{m'}}{b_{N'n'}} = t_{n'} \\ \frac{z_{n'} - z_{m'}}{c_{N'n'}} = t_{n'} \end{cases} \quad (2)$$

根据变位后 m' 和点 p' 的距离与变位前点 m 和点 p 标的距离 L_{mp} 相等, 变位后 n' 和点 p' 的距离与变位前点 n 和点 p 标的距离 L_{np} 相等, 联立面板单元变位后所在平面的平面方程可得到关于 p' 点坐标的方程组(3), 其中 a 、 b 、 c 为平面方程的三个实常数。

$$\begin{cases} ax_{p'} + by_{p'} + cz_{p'} = 1 \\ (x_{p'} - x_{m'})^2 + (y_{p'} - y_{m'})^2 + (z_{p'} - z_{m'})^2 = L_{mp}^2 \\ (x_{p'} - x_{n'})^2 + (y_{p'} - y_{n'})^2 + (z_{p'} - z_{n'})^2 = L_{np}^2 \end{cases} \quad (3)$$

方程组(1)~(3)中的未知参数可以由方程式(4)~(10)得到。

根据假设, 矢量 $M'm'$ ($a_{M'm'}, b_{M'm'}, c_{M'm'}$) 的方向与 $N'M'P'$ 的角平分线一致, 故方程组(1)中参数 $a_{M'm'}$ 、 $b_{M'm'}$ 和 $c_{M'm'}$ 可以由式(4)利用已知的节点坐标直接进行运算求得

$$M'm' = \frac{M'N'}{|M'N'|} + \frac{M'P'}{|M'P'|} \quad (4)$$

同样, 矢量 $N'n'$ ($a_{N'n'}, b_{N'n'}, c_{N'n'}$) 的方向与 $M'N'P'$ 的角平分线一致, 故方程组(2)中参数 $a_{N'n'}$ 、 $b_{N'n'}$ 和 $c_{N'n'}$ 可以由式(5)利用已知的节点坐标直接进行运算求得

$$N'n' = \frac{N'M'}{|N'M'|} + \frac{N'P'}{|N'P'|} \quad (5)$$

方程组(3)中, a 、 b 、 c 为面板单元变位后所在平面的平面方程的三个实常数, 可以由已知坐标 M' ($x_{M'}, y_{M'}, z_{M'}$)、 N' ($x_{N'}, y_{N'}, z_{N'}$)、 P' ($x_{P'}, y_{P'}, z_{P'}$) 通过方程组(6)求得

$$\begin{cases} ax_{M'} + by_{M'} + cz_{M'} = 1 \\ ax_{N'} + by_{N'} + cz_{N'} = 1 \\ ax_{P'} + by_{P'} + cz_{P'} = 1 \end{cases} \quad (6)$$

根据面板为刚性的假定, L_{Mm} 、 L_{mn} 、 L_{mp} 和 L_{np} 的长度可由式(7)~(10)求得

$$(x_M - x_m)^2 + (y_M - y_m)^2 + (z_M - z_m)^2 = L_{Mm}^2 \quad (7)$$

$$(x_n - x_m)^2 + (y_n - y_m)^2 + (z_n - z_m)^2 = L_{mn}^2 \quad (8)$$

$$(x_p - x_m)^2 + (y_p - y_m)^2 + (z_p - z_m)^2 = L_{mp}^2 \quad (9)$$

$$(x_p - x_n)^2 + (y_p - y_n)^2 + (z_p - z_n)^2 = L_{np}^2 \quad (10)$$

综上, 已知变位前后主索节点坐标以及变位前连接结构位置坐标的情况下, 方程组共有 m' 、 n' 、 p' 的坐标以及参数 $t_{m'}$ 及 $t_{n'}$ 11 个未知数, 方程组(1)~(3)可组成共有 11 个方程非线性方程组。

采用 Matlab 的牛顿迭代法可以解出 m' 、 n' 、 p' 的坐标, 但是由于是二次方程组, 各点求解出的坐标位置都各有两个, 不是唯一解。而实际结构中显然只能有唯一的位置, 因此可根据几何关系, 利用式(11)~(13)进行判定。

显然 m' 坐标需要满足

$$\angle N'M'm' < \angle N'M'P' \quad (11)$$

n' 坐标需要满足

$$L_{N'n'} = \min(L_{N'n'_1}, L_{N'n'_2}) \quad (12)$$

式中, n'_1 和 n'_2 为求解出的点 n' 的两个位置, $L_{N'n'_1}$ 、 $L_{N'n'_2}$ 分别为点 N' 到 n' 、 n'_1 、 n'_2 的距离。

p' 坐标需要满足

$$L_{P'p'} = \min(L_{P'p'_1}, L_{P'p'_2}) \quad (13)$$

式中, p'_1 和 p'_2 为求解出的点 p' 的两个位置, $L_{P'p'_1}$ 、 $L_{P'p'_2}$ 分别为点 P' 到 p' 、 p'_1 、 p'_2 的距离。

采用以上方法可以得到反射面变位后连接机构位置坐标的解析解, 为验证模型计算的准确性,

本文选取以 A073(图 8)为中心点的抛物面工况,具体变位工况说明及分析方法参见文献[10]。分别提取 300 m 口径抛物面范围内,索网变位前、后的主索节点的坐标,采用解析方法求出变位后 300 m 口径范围内所有连接机构的节点坐标,并与有限元整体模型计算的分析结果进行了比较。两种计算方法下三种类型连接机构在 300 m 口径范围内所有连接机构的节点位置坐标最大偏差见表 1。

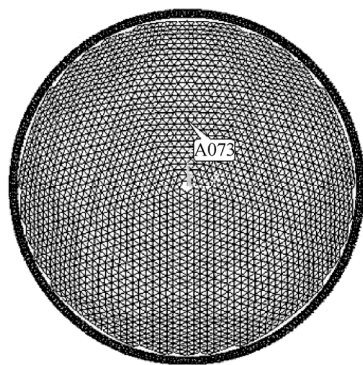


图 8 A073 位置示意图

表 1 连接机构节点最大位置偏差(mm)

连接机构类型	最大位置偏差		
	dx	dy	dz
“0”号连接机构	1.36	1.18	1.68
“1”号连接机构	2.55	1.16	1.02
“2”号连接机构	3.90	2.90	1.60

由表 1 中数据可以看到,用解析方式求解出的节点位置与有限元计算出的结果最大偏差为 3.9 mm。本文统计了连接机构节点位置偏差超过 2 mm 的 171 个节点的位置,发现这些节点主要集中在变位后的抛物面边缘。分析可知,这是由于该区域上主索节点盘在变位时发生偏转的角度较抛物面上其他部位大,从而导致忽略了节点盘偏转影响的解析方法计算的节点位置结果误差稍大。总体而言,两种计算方法得到的结果符合性良好。因此,可以用本文建立的有限元模型模拟结构的实际运行状态。

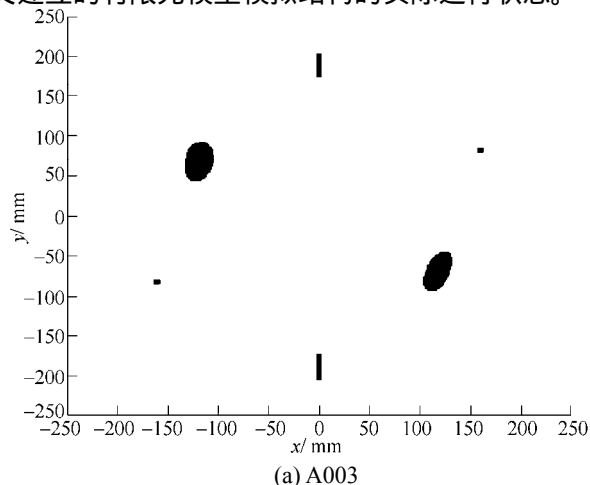


图 10 A003、E055 处连接机构节点位置分布散点图

3 自适应连接机构运行空间分析

FAST 所有与反射面单元相连的连接机构都是放置在圆形节点盘上,节点盘又通过十字肋板支承在主索节点盘上,节点盘的外径和连接机构的构造尺寸决定了连接机构的运行空间。反过来,通过研究连接机构的运行空间,也为实际工程中节点盘的设计尺寸提供依据。

FAST 索网进行变位分析时,将索网连续的变位过程简化为一系列离散的抛物面,由于抛物面变位区域不超出 500 m 边缘,照明口径为 300 m,可得抛物面中心的活动区域为 26.4° 。以该区域内节点作为抛物面中心点,总共有 550 个变位工况,可以认为该 550 个工况能基本代表了望远镜的所有变位工况^[12]。

为了研究连接机构运行空间,本文通过有限元模型分析 550 个变位工况,计算反射面所有节点盘上 6 个连接机构节点在 550 个变位形态下的位置坐标。限于篇幅,本文选取两处位置(图 9)的计算结果。根据位置坐标结果绘制了这两处节点盘上 6 个连接机构节点在 550 个变位形态下的位置散点分布图,如图 10 所示。

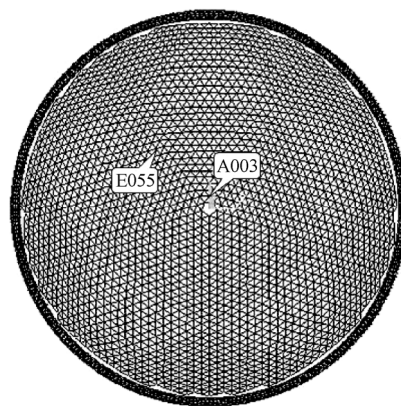
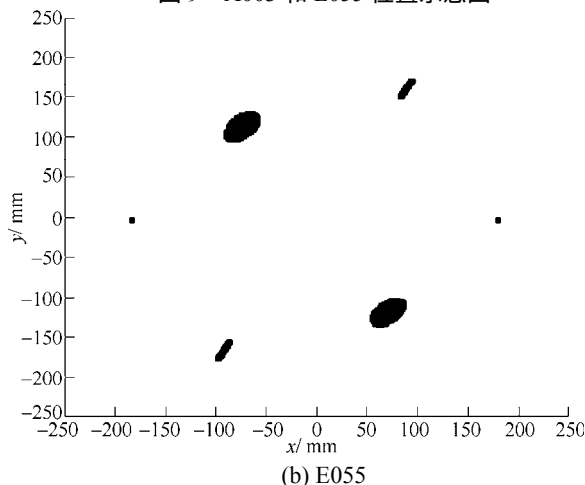


图 9 A003 和 E055 位置示意图



由散点分布图可以看出, 连接机构“1”的位置分布范围呈直线型, 外伸(向坐标原点方向)和内收都小于 30 mm; 连接机构“2”的位置分布范围基本呈椭圆型, 外伸(向坐标原点方向)和内收都小于 30 mm, 切向(垂直于外伸方向)活动空间均小于 50 mm。

由自由度设置情况可知, 如果支撑连接机构的节点盘直径过小, 在连接机构“1”和“2”相邻布置的地方最有可能发生连接机构互相干涉的情况, 统计基准态下相邻两连接机构的轴向夹角, 最大值为 72° , 最小值为 54° 。本文选取连接机构“1”和连接机构“2”在夹角为 54° 相邻布置的情况, 来考察 FAST 正常运行状态下节点盘上连接机构的实际运行空间。仍取节点盘直径为 450 mm, 依据连接机构设计尺寸(图 3), 可得到连接机构“1”和连接机构“2”的最大活动空间如图 11 中虚线所示。

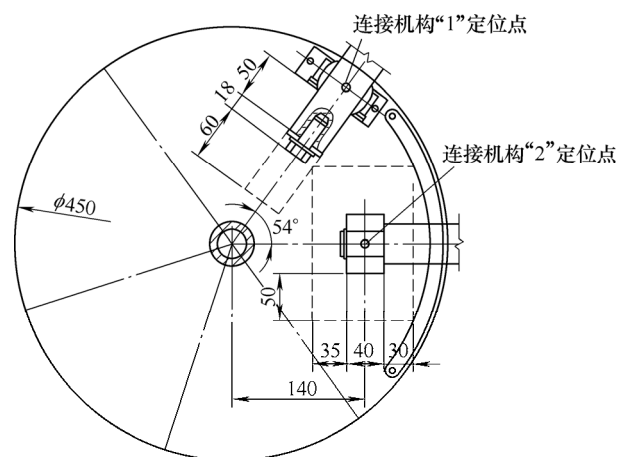


图 11 连接机构“1”和“2”相邻布置的情况

由图 11 可以看到, 在节点盘直径 450 mm 时, 连接机构“1”的活动范围为外伸 50 mm 至内收 60 mm; 连接机构“2”的活动范围为外伸 30 mm 至内收 35 mm, 切向活动空间为 ± 50 mm。

对比本文上述有限元分析结果可知, 选用大小为 450 mm 直径的节点盘基本能够避免相邻连接机构相互干涉的情况。由于以上分析都未考虑节点盘转动的影响, 且为理论结果, 自适应连接机构的工程设计中, 应对连接机构的活动范围进行一定程度的放大以保障设计的可靠性, 因此本文建议在实际工程中取节点圆盘直径为 500 mm。

4 结论

(1) 合理设计了满足 FAST 工程需求的自适应连接机构, 使其即可对面板单元进行合理的限位约束, 又能使其免受索网运动导致的附加应力, 保证

面板精度。

(2) 完成了自适应机构的拓扑布置设计, 使所有节点上的连接机构布置形式一致, 在满足技术要求的同时, 有利于大批量构件的生产、安装。

(3) 采用验证后的有限元模型, 分析研究了 FAST 所有变位工况下自适应连接机构的运动空间, 根据分析结果, 确定了连接机构节点盘的设计尺寸。

参 考 文 献

- [1] NAN Rendong, REN Gexue, ZHU Wenbai, et al. Adaptive cable mesh reflector for the FAST[J]. Acta Astronomica Sinica, 2003, 44: 13-18.
- [2] LI Guoqiang, SHEN Liyuan, LUO Yongfeng, et al. Analysis for reflector aluminum mesh panels of five-hundred meter aperture spherical telescope[J]. Astrophysics and Space Science, 2001, 278(1): 225-230.
- [3] YAO Rui, ZHU Wenbai, HUANG Peng. Accuracy analysis of Stewart platform based on interval analysis method[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2013, 26(1): 29-34.
- [4] 罗永峰, 于庆祥, 李国强, 等. 大射电望远镜反射面支撑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.
- [5] REN Gexue, LU Qiuhai, ZHOU Zhou. On the cable car feed support configuration for FAST[J]. Astrophysics and Space Science, 2001, 278(1): 243-247.
- [6] 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.
LU Yingjie, REN Gexue. Simulation of the cable mesh reflector for the large radio telescope FAST[J]. Engineering Mechanics, 2007, 24(10): 165-169.
- [7] 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.
- [8] 钱宏亮, 范峰, 沈世钊, 等. FAST 反射面支撑结构整体索网分析[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 : 750-752.
- [9] 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.
- [10] JIANG Peng , NAN Rengdong , QIAN Lei , et al. System solutions study on the fatigue of the FAST cable-net structure caused by form-changing operation[J]. Research in Astronomy and Astrophysics , 2015(15) : 1758-1772.
- [11] 姜鹏, 王启明, 赵清. 巨型射电望远镜索网结构的优化分析与设计[J]. 工程力学, 2013 , 30(2) : 400-405.
- JIANG Peng , WANG Qiming , ZHAO Qing. Optimization and analysis on cable net structure supporting the reflector of large radio telescope FAST[J]. Engineering Mechanics , 2013 , 30(2) : 400-405.
- [12] 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 , 30(增刊) : 169-174.
- KONG Xu , JIANG Peng , WANG Qiming. Investigation on fatigue life of FAST cable-net under high stress amplitude produced by long-time active[J]. Engineering Mechanics , 2013 , 30(Suppl.) : 169-174.
- [13] 刘钰, 高峰. FAST 反射面支撑索网结构的初始状态求解[J]. 机械工程学报, 2013 , 49(6) : 66-73.
- LIU Yu , GAO Feng. Study of the initial status of cable-net structure reflector for the FAST[J]. Journal of Mechanical Engineering , 2013 , 49(6) : 66-73.
- [14] 杨癸庚, 杨东武, 杜敬利, 等. 一种基于力密度的网状可展开天线索网结构初始形态设计方法[J]. 机械工程学报, 2016 , 52(11) : 34-41.
- YANG Guigeng , YANG Dongwu , DU Jingli , et al. Method for deployable mesh antenna cable network structures' form-finding design based on force density[J]. Journal of Mechanical Engineering , 2016 , 52(11) : 34-41.
- [15] ZHAN Jingqing , ZHANG Xianmin. Topology optimization of compliant mechanisms with geometrical nonlinearities using the ground structure approach[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering , 2011 , 24(2) : 257-263.
-
- 作者简介: 李庆伟, 男, 1980 年出生。主要从事大型射电望远镜的研制。
E-mail : qwli@nao.cas.cn
- 姜鹏(通信作者), 男, 1978 年出生, 研究员。主要从事工程力学、大型射电望远镜的研制等方向的研究。
E-mail : pjjiang@bao.ac.cn