

FAST 背架结构选型及优化

钱宏亮^{1,2}, 范峰¹, 茆春¹, 沈世钊¹

(1. 哈尔滨工业大学 土木工程学院, 哈尔滨 150090, qhlhit@tom.com;

2. 哈尔滨工业大学(威海) 土木工程系, 山东 威海 264209)

摘要: 背架结构是巨型射电望远镜(FAST)反射面支承系统中的一个重要组成部分,其性能直接影响整个系统的精度和造价.为了给FAST反射面结构的实际选型提供理论依据,首先针对FAST特殊功能要求,提出了背架结构保形设计方法,然后对所提出的空间网格结构、弦支结构、混合结构等多种背架结构进行了优化,从结构力学性能、加工工艺等多方面对其进行比较,结果表明局部双层网格结构具有自重轻、刚度好及加工制作简单的优点.

关键词: 巨型射电望远镜;背架结构;结构选型

中图分类号: TU391

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2010)04-0546-04

Form selection and optimization of FAST back-structure

QIAN Hong-liang^{1,2}, FAN Feng¹, MAO Chun¹, SHEN Shi-zhao¹

(1. School of Civil Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China, qhlhit@tom.com;

2. Dept. of Civil Engineering, Harbin Institute of Technology (Weihai), Weihai 264209, China)

Abstract: The back-structure is an important part of the supporting system of the FAST reflectance surface. Its performance directly affects the precision of the FAST and its costs. In this paper, a shape-keeping method for the design of sub-structures is proposed. Then several kinds of back-structures are provided, followed by optimization of the advanced back-structures such as spatial latticed, strain stressed and hybrid structures. After a comparison of their structural behaviours and manufacturing processes, it is concluded that the double-layer latticed structure in local areas has advantages of small weight, large stiffness and easy manufacturing process.

Key words: FAST; back-structure; structure form selection

500 m 口径球面射电望远镜(Five-hundred-meter Aperture Spherical Telescope, FAST)项目,自1994年经过历时13年的预研究^[1-5],于2007年通过国家发改委批准,作为国家“十一五大科学工程”正式立项,目前已进入可行性研究及初步设计阶段,预计于2016年完成整个项目的建设.FAST反射面采用由“整体索网结构”+“背架结构”共同支承的结构方案^[6-7],其结构示意图见

图1、图2.由主索按照短程线型网格划分方式编织成半径为300 m,口径为500 m的球面索网,球面索网网格尺寸(三角形边长)大约为11 m,在每个主索节点设置径向下拉索作为控制索以调节反射面的形状从而跟踪天体的运动;为了铺设反射面板,在整体索网结构上还需设置一层背架结构,通过构造措施使其仅以荷载的形式作用与主索网节点上,背架结构平面尺寸与主索网格尺寸相对应,即为边长11 m左右的曲面(半径约为300 m)三角形.背架结构数目众多(约4700个),其造价约占FAST项目总造价的20%,而且FAST拟建喀斯特洼地地形复杂,其加工、制作及运输等问题的难易程度将影响项目的建造工期及制造成本,因此,对背架结构的设计方法及结构形式进行研究有着非常重要的意义.

收稿日期: 2008-08-22.

基金项目: 哈尔滨工业大学优秀青年教师培养计划资助项目(HITQJNS.2008.062);中国博士后科学基金资助项目(20080430915).

作者简介: 钱宏亮(1977—),男,博士,讲师;

范峰(1971—),男,教授,博士生导师;

沈世钊(1933—),男,教授,中国工程院院士.

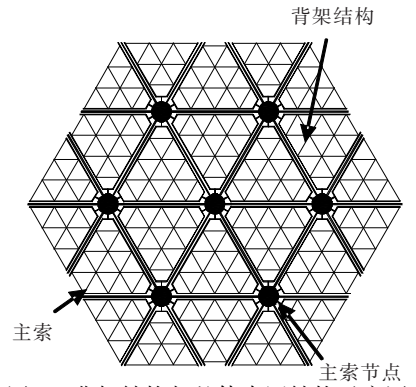


图 1 背架结构与整体索网结构示意图

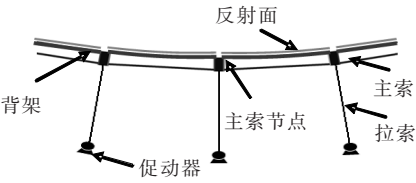


图 2 主索与背架结构连接示意图

1 背架结构简介

1.1 背架结构总体要求

首先,望远镜的特殊功能对背架结构形状精度提出了严格的要求:反射面在工作时每个反射面子块(即每块背架结构)与指定球面(半径约为 300 m)拟合“偏差均方根值”小于 1 mm,采样点间距在 1.5 ~ 2 m;其次,背架结构作为外荷载作用于整体索网结构之上,背架结构越重,则索网结构刚度、索段截面尺寸、下拉索拉力等都会相应增大,从而增加结构总体造价及系统运行维护成本.因此形状精度高、自重要求轻是 FAST 背架结构在选型及优化时的两个主要目标.

1.2 背架约束方式及荷载

根据 FAST 反射面支承结构方案的总体要求,背架结构仅以荷载的形式作用于主索节点,索网变形时背架结构不产生附加应力,因此整体索网对每个背架结构提供的必须是一个静定约束.针对这一要求提出了如图 3 所示约束形式,主索节点对背架结构的三个角点在面内方向分别施加单向铰接,同时面外方向均施加单向铰接.

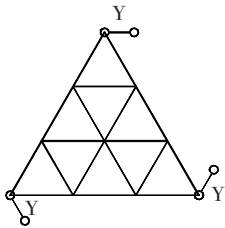


图 3 背架结构约束形式

FAST 背架结构主要承受恒荷载、风荷载及温度作用(影响很小可不考虑).恒荷载主要为背架

和反射面板(包括檩条)自重,面板按照 1 mm 厚的开孔(孔洞率为 60%)铝板考虑,面板和檩条自重取 4 kg/m^2 ;风荷载分为工作风速(4 m/s)和极限风速(14 m/s),风压分布系数的取值参考文献[8].

2 FAST 背架结构保形设计方法

传统望远镜跟踪天体时反射面会发生转动,转动角度最大可达 $\pm 90^\circ$,反射面转动时由于重力的作用反射面的形状会发生变化,同时风荷载及温度作用也会引起反射面的较大变形,这也是制约建造更大射电望远镜的主要因素之一(目前最大传统望远镜口径为 100 m),一般采取在反射面与背架结构之间增设高度可调节点来进行“保形”,其实质是增设了一套反射面形状实时调节系统.

FAST 背架结构与传统望远镜背架结构有着明显的区别:(1)FAST 在跟踪天体时转动角度最大约 0.63° ,由转动引起的结构自身相对形状变化很小,可以忽略;(2)背架结构相对于主索网为一个静定结构,温度变化时其可以自由变形(不产生温度应力),且其曲率半径很大,接近于一个平面,变形以面内为主,面外则很小,对反射面拟合精度的影响可以忽略;(3)反射面所受到的工作风荷载相对较小,实际工作过程中背架结构的变形主要是由结构自重引起;(4)FAST 背架结构的尺寸(三角形边长 11 m)比传统大口径望远镜背架结构尺寸(相当于望远镜的口径)小很多,在工作风荷载、结构自重作用下的变形也会相应减小.

基于上述分析,提出了 FAST 背架结构“保形设计”方法:(1)控制背架结构构件初始下料长度(或形状),使得结构在自重作用下达到指定的形状(指定半径的球面),消除由于结构自重变形而引起的反射面与指定球面的拟合误差,这种方法在建筑领域为了减小结构跨中挠度时也常用到,一般称之为起反拱,但是 FAST 背架与之不同,必须保证每个节点均在指定球面位置,这可以采用迭代法进行初始形态分析来解决^[1];(2)通过提高背架结构的刚度来保证反射面在工作风荷载作用下反射面与指定球面的“偏差均方根值”小于 2 mm.

为了说明背架结构保形设计的方法及采用该方法进行背架结构设计的优点,以图 4-b 所示结构形式为双层曲面网架的背架结构为例,分别按照常规设计和保形设计进行分析.

首先,按照常规设计方法进行分析,除了保证

在自重和极限风荷载作用下结构的安全,还必须使结构在自重、工作风荷载作用下其形状与指定球面的“偏差均方根值”满足要求,对结构参数进行了优化.表 1 中第一行给出了相关计算结果,在工作风荷载作用下径向位移偏差均方根为 1.85 mm(仍不能满足要求),另外可以看出由自重和风荷载引起的法向位移偏差均方根分别为:1.8 和 0.07 mm,节点的径向位移主要是由结构自重引起的,构件的选取主要是由结构的整体刚度控制,构件的应力较小,结构自重(21.02 kg/m^2)较大.而采用“保形设计的方法”计算结果见表 1 第二行,结构的高度减小为 0.6,结构的刚度很好,在风荷载作用下反射面拟合均方差为 0.35,杆件的选取主要由材料的强度控制,结构自重仅为 8.17 kg/m^2 .可见本文提出的保形设计方法对减小结构自重是非常有效的.

表 1 背架结构参数及响应

保形设计	网架高度/m	拟合偏差均方根/mm			杆件最大应力比	结构自重/(kg/m^2)
		自重	工作风速	自重 + 工作风速		
不考虑	1.2	1.8	0.07	1.85	0.23	21.02
考虑	0.6	0	0.35	0.35	0.9	8.17

3 背架结构优化选型

本文提出了多种背架结构形式,可以分为空间网格结构(图 4)、弦支结构(图 5)及混合结构

(图 6)3 大类,其中前两类结构根据局部层数的不同又可再进行分类.按照保形设计的方法,对不同类型背架结构的网格划分方式、结构高度、拉索预应力水平、杆件截面尺寸等关键参数进行了优化,并结合加工制作难易程度,得到结构各项性能指标(表 2),为 FAST 背架结构的选型提供依据,下面分别进行介绍.

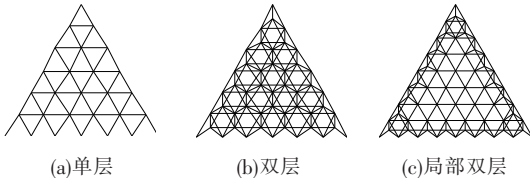


图 4 空间网格结构

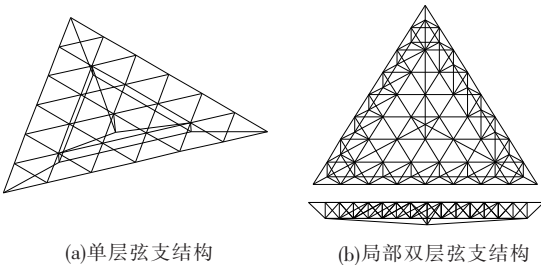


图 5 空间网格结构

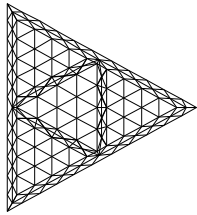


图 6 混合结构

表 2 背架结构综合性能

背架结构形式		结构自重/ (kg/m^2)	法向偏差均方根/ mm	构件数目	预应力构件	施工复杂程度
空间网格结构	单层	16.45	1.04	少	否	易
	双层	8.17	0.35	多	否	较易
	局部双层	9.13	0.48	较少	否	易
张弦结构	单层	11.14	0.85	少	是	较复杂
	局部双层	9.45	0.40	较多	是	复杂
混合结构	局部索网	7.0	0.73	较少	是	复杂

3.1 空间网格结构

空间网格结构主要有 3 种形式:单层、双层和局部双层网格结构.单层网格结构可以看成是一种平面梁系结构,形式简单,构件数量少,杆件可以采用薄壁矩形管、角钢或 C 型钢等,易于加工制作,节点连接形式采用焊接;但是其平面外刚度较弱,为了保证工作态反射面的形状精度,必须加大构件截面,因此结构自重较大,分析表明其边缘构件截面尺寸远大于中间构件,这是由结构的支承条件决定的.

由于单层网格结构平面外刚度较差,结构由刚度控制,其杆件截面进一步降低的空间很小,提出双层网格结构(网架结构)形式,该种结构空间刚度大,结构自重轻,杆件一般采用薄壁圆管截面,连接节点采用螺栓球连接;其缺点是构件数目多,但由于网架结构加工制作已成熟,加工也较容易.

根据单层结构的受力特性,荷载通过中间构件传递到边缘构件,然后再传递到支座角点,边缘构件受力较大,同时其跨度也大,因此将边缘构件

做成格构式桁架结构,即形成了图4-c所示局部双层网格结构.杆件截面可以采用薄壁圆管或者角钢等,连接形式为焊接,该种结构刚度较好,其自重位于单层网格结构与双层网格结构之间,构件数目相对较少,加工制作简单.

3.2 弦支结构

弦支结构主要有两种形式:单层弦支结构和局部双层弦支结构.单层弦支结构是由上部的单层结构和下弦的拉索通过撑杆连接而成(图5-a),上部单层结构构件形式同单层结构,撑杆采用圆钢管.结构为空间结构,整体刚度较好,下弦受力构件采用拉索,充分发挥了材料强度,结构自重较轻,杆件数目较少.但属于预应力结构,施工难度相对较大,且会发生索段松弛现象.

单层弦支结构增加了下弦拉索,虽然减小了上部单层结构的构件截面,但是边缘构件的截面仍然较大,局部双层弦支结构则是将此边缘构件替换为桁架而得到的结构形式,同时撑杆及下弦拉索的布置方式也稍有改变(图5-b),与单层弦支结构相比,结构自重稍轻,但是杆件数量也稍有增加.

4 混合结构

混合结构是由空间管桁架与单层平面索网组合而成的一种结构体系(图6).通过边缘桁架结构给中间平面索网施加一定的预应力,使其具有一定的刚度,以承受外荷载.这种结构形式最大的优点就是结构自重轻,但需要说明的是其不能如其它形式一样通过控制构件初始下料长度,来保证结构在自重作用下为球形形状,需要通过在索网节点设置特殊构造措施来实现,显然混合结构属于预应力结构,施工难度相对较大,且会发生索段松弛现象.

5 结 语

针对FAST的特殊功能要求,提出了FAST背

架结构的“保形设计”方法,可以非常有效的减小结构自重;通过对多种背架结构的优化对比,推荐局部双层网格结构作为首选结构形式,它具有结构自重较轻、刚度好的优点,同时双层网格结构和弦支单层网格结构也具有较大的优势,前者结构自重轻,后者结构形式简单、构件数量少;背架结构形式的确定除了考虑结构自重的大小,还需要考虑加工、制作、服役期间维护的难易程度等因素,建议对三者分别进行试验研究,以最后确定背架结构的形式.

参考文献:

- [1] NAN Rendong, REN Gexue. Adaptive cable-mesh reflector for the FAST[J]. Acta Astronomica Sinica, 2003, 44: 13-18.
- [2] QIU Yuhai. A novel design for giant radio telescopes with an active spherical main reflector. Chin[J]. Astrophys, 1998, 22(3): 391-368.
- [3] 邱育海. 具有主动反射面的矩形球面射电望远镜[J]. 天体物理学报, 1998, 18(2): 222-227.
- [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.
- [5] 罗永峰, 于庆祥, 陆燕, 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.
- [6] 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.
- [7] 钱宏亮, 范峰, 沈世钊, 等. FAST反射面支撑结构整体索网方案研究[J]. 土木工程学报, 2005, 38(12): 18-23.
- [8] 钱宏亮, FAST主动反射面结构理论与实验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2007.

(编辑 赵丽莹)