

·研究简报·

500 m 口径主动球面望远镜反射面支撑结构分析

罗永峰¹, 邓长根¹, 李国强¹, 邱育海²

(1. 同济大学 建筑工程系, 上海 200092; 2. 北京天文台, 北京 100012)

摘要: 根据望远镜主动反射面的变形及运动要求, 提出了反射面支撑结构体系设计方案, 通过对承载能力及正常工作状态的详细设计计算, 说明了该结构体系的受力、变形、构造及经济合理性, 并分别给出了采用钢结构体系及铝合金结构体系的力学性能、变形特点、耐久性及经济指标。

关键词: 反射面支撑结构; 钢结构; 铝合金结构; 变形特点; 造价

中图分类号: TU 392 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-374X(2000)04-0497-04

Structural Analysis of the Reflector Supporting System of the 500 m Active Spherical Telescope

LUO Yong-feng¹, DENG Chang-gen¹, LI Guo-qiang¹, QIU Yu-hai²

(1. Department of Building Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;

2. Beijing Astronomical Observatory, Beijing 100012, China)

Abstract: According to the deformation and motion requirements of the active reflector of the telescope, the design and analysis of the supporting structure of the reflector is presented in this paper. The load-bearing behavior, deformation, construction and economic reasonableness of the structure, as well as the mechanical performance, deformation characteristic, durability and cost of steel structure and aluminum alloy structure, are discussed through detailed design calculation under normal working condition and load-bearing capacity ultimate state.

Key words: supporting structure of the reflector; steel structure; aluminum alloy structure; deformation characteristic; cost

为了提高天文深空探测能力, 1993 年, 在京都国际无线电科联大会上^[1], 中、澳、加、法、德、印、荷、俄、英、美等国射电天文学家联合倡议, 筹划建造接收面积为 1 km^2 的巨型射电望远镜, 其灵敏度比目前世界上最大的望远镜(Arecibo, $D = 305 \text{ m}$)高两个数量级。此后, 我国天文界成立了大型射电望远镜(LT)中国推进委员会, 提出了利用我国贵州喀斯特洼地(Karst Base), 建造具有主动球面反射面的巨型射电望远镜的计划(five-hundred meter aperture spherical telescope, FAST)^[1]。

FAST 工程在北京天文台科学家们的主持下, 于 1994 年开始可行性研究, 此后不久即进入科学与技术上的预研究, 1999 年进入模型试验研究阶段, 期望将来进入国家“十五”规划项目。FAST 工程的预研究跨越多种学科, 研究课题数量多, 技术难度大。国内参加预研究的单位有十几家, 同济大学于 1998 年参加 FAST 项目的研究工作, 所承担的科研任务主要有: ①主动球面反射面板及其支撑结构系统的分析、设计研究; ②反射面板拟合运动中的间隙补偿方法研究; ③馈源支撑结构系统的分析、设计研究; ④主动反射面拟合运动的传动系统、控制系统及馈源系统的传动系统、控制系统的设计研究。

收稿日期: 1999-07-06

基金项目: 中国科学院知识创新重大资助项目

作者简介: 罗永峰(1957-), 男, 副教授, 工学博士。

本文根据望远镜主动反射面的变形及运动要求,对反射面支撑结构的承载能力及正常工作状态变形进行了详细设计计算,分别给出了采用钢结构体系及铝合金结构体系的受力性能、变形特点及经济指标。

1 反射面的基本单元及反射面材料

反射面的基准面为一曲率半径 $r = 300$ m、口径 $D = 500$ m 的球面,该球面由 1 788 个曲率半径 $r = 300$ m、边长 $a = 7.5$ m 的六边形球面基本单元组合而成。每一个基本单元在球面反射面体系中为一独立不变的子单元,在主动反射面拟合抛物面的运动中为一独立不变的子结构系统,并与相邻单元协调运动,达到拟合预定抛物面的目的。构成反射面的六边形球面基本单元又由 54 个边长为 $b = 2.5$ m 的平面三角形组成,各三角形在基本单元中的位置是固定的。该六边形球面基本单元如图 1 所示。

根据天文科学及望远镜系统环境等方面的要求,主动反射面的反射板采用铝板,该铝板为厚度 $t \leq 1$ mm 的网格铝板,网格铝板中铝肋条的宽度约 3 mm,肋条间隙 3 mm,铝肋面积占板平面总面积 75% 左右。每个基本单元的面积 $A_1 \approx 146.142$ m²,反射面的总面积约为 $A = 261\,301.9$ m²。铝材的线密度 $\rho = 2.8$ t·m⁻¹,若反射面板厚为 $t = 1$ mm,则整个反射面的铝板材约需 548.7 t。

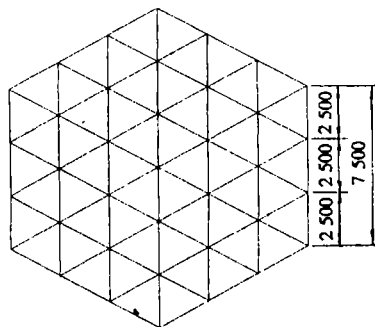


图1 六边形球面基本单元(单位:mm)

Fig.1 Basic spherical hexagon block (unit:mm)

2 反射面支撑结构方案

根据反射面基本单元的运动特点,每个基本单元的支撑结构只有三个均布在结构边缘的铰支支撑点(其中一个为固定铰,两个为可移动铰),故此支撑结构应有可靠的整体性、空间刚度及可靠性。对比现阶段常用的网壳及桁架体系的结构特点,空间网壳结构体系比交叉桁架体系具有更好的空间刚度、整体性能、结构可靠性及经济指标,且制作安装方便,易于控制结构几何形态及变形。故此,反射面的支撑结构采用 1 788 个与球面基本单元相协调的六边形球面网壳结构,以利制作、安装、控制变形及保证结构的可靠性。反射面的支撑方式如图 2 所示。

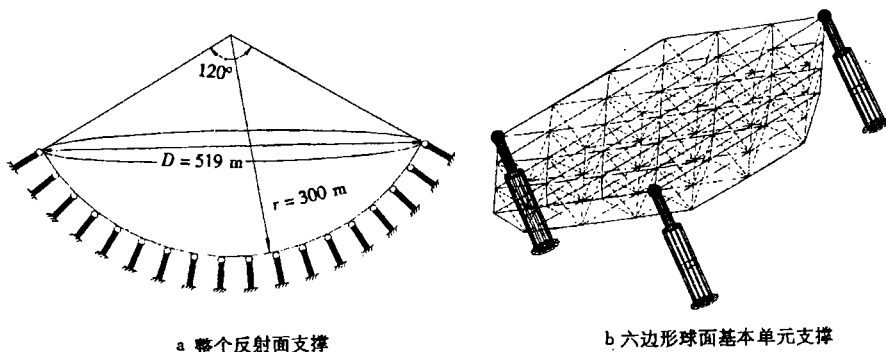


图2 反射面支撑体系

Fig.2 Supporting system of the reflector

该六边形球面网壳结构的上弦曲率半径为 $r_1 = 300.035$ m,边长初定为 $a_1 = 7.4$ m(a_1 的取值取决于球面基本单元的运动行程,在不发生拟合运动中结构相互干涉的条件下,尽可能取大一些),网壳厚度 $h = 1.2$ m,网壳的上弦节点均位于曲率半径 $r_1 = 300.035$ m 的球面上。在保证结构整体性及可靠性的条件下,为了减轻结构自重、降低造价,该网壳采用三角锥体系。其结构布置如图 3 所示。

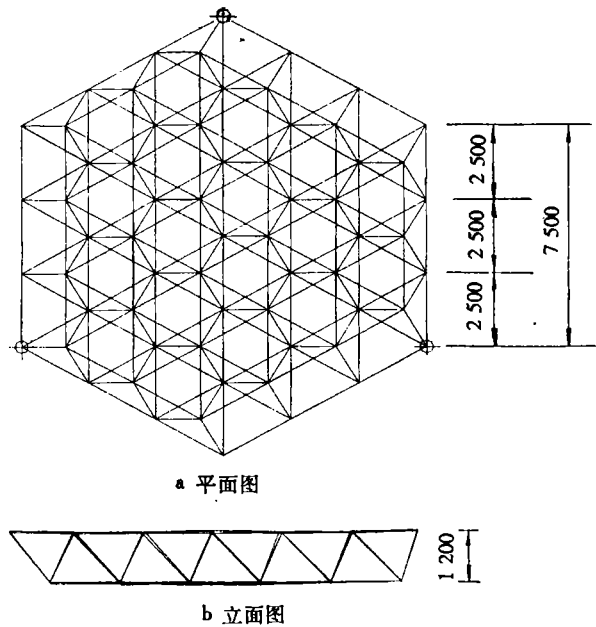


图 3 反射面板支撑网壳结构(单位:mm)
Fig.3 Reticulated shell supporting the reflector(unit:mm)

3 支撑网壳结构设计计算

该项目为国家重大工程,应考虑百年大计,因而对支撑网壳的设计计算进行了多次比较优选.根据结构的承载性能及工作使用条件分别进行多种荷载组合设计计算,并采用两种不同的结构材料(钢及铝合金)进行设计计算及各方面技术评估^[2,3].采用钢结构的特点:优点是钢结构刚度大、变形小、加工制作容易、造价低;缺点是钢结构自重大、与反射面铝板变形不协调(线胀系数不同)、耐腐蚀性差、结构的后期维护工作量大、费用高.采用铝合金结构的特点:优点是结构自重轻、耐腐蚀、结构后期维护工作量大(甚至不用维护)且费用低、结构与反射面铝板变形一致;缺点是加工(主要是焊接)较难、造价较高(材料成本高).

3.1 支撑网壳的承载能力设计计算

支撑网壳结构所承受的主要荷载为风荷载、反射面铝板重、结构自重、温度、地震及可能的积雪.结构的布置及计算模型如图 3 所示.根据反射面拟合抛物面的运动条件及要求,每个结构单元均有 3 个铰支点的布置,其中 1 个为固定球铰,2 个为可移动铰.

结构材料分别选用钢(Q235)及铝合金(LD30,相当于美国规范中的 AA 6061 - T6),对这两种材料的结构体系分别进行设计计算及对比,结果列于表 1 及表 2 中,以资比较.结构初步设计选用的型材:钢管为 $\phi 73\text{ mm} \times 3\text{ mm}$, $\phi 45\text{ mm} \times 3\text{ mm}$;铝合金管为 $\phi 60\text{ mm} \times 6\text{ mm}$, $\phi 50.80\text{ mm} \times 6.35\text{ mm}$.

表 1 网壳结构系统用料指标
Tab.1 Material consumption of the supporting structure

材料	单位面积用量/(kg·m ⁻²)			反射面结构总用量 Q/t
	底部(0°)	边缘(60°)	平均	
钢(Q235)	9.780	9.650	9.715	2 538.53
铝合金(AA6061 - T6)	4.947	6.329	5.638	1 473.22

从表 2 中可看出,钢结构的切向反力大于铝合金结构的反力,这样对于反射面的驱动或传动系统来说,机械设计随着切向反力增加而难度增大,费用增高.

表 2 支撑网壳的支座反力
Tab.2 Supporting reaction of the structure

材料名称	切向反力/kN		法向拉力/kN		法向压力/kN	
	底部(0°)	边缘(60°)	底部(0°)	边缘(60°)	底部(0°)	边缘(60°)
钢	0	20.539	-6.535	-15.127	10.836	11.448
铝合金	0	12.934	-3.814	-14.089	13.563	11.811

3.2 支撑网壳的工作状态变形验算

根据天文科学工作的要求,望远镜在进行观察工作中,需要反射面保持一定的几何变形精度,因而支撑网壳在工作状态荷载作用下应满足这一变形精度的要求。

望远镜反射面支撑结构在工作条件下的荷载除反射面铝板及结构自重外,尚需考虑工作允许风速产生的风压及温差效应。根据天文台提供的资料,目前初估工作风速为 $4\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。由以上条件及已确定的支撑网壳结构形体、构件单元形式,验算工作状态下的网壳结构变形。对两种材料的结构体系在风、温度及铝板作用下的分析结果列于表 3 中,以资比较。

表 3 网壳结构在工作状态的上弦节点最大位移
Tab.3 Largest displacement of the upper chord joints under working state

材料	最大位移/mm	
	底部(0°)	边缘(60°)
钢	0.43	0.15
铝合金	0.54	0.20

4 结论及建议

(1)通过资料分析及设计计算表明,反射面支撑结构宜采用具有很强的空间整体性能的网壳结构,以保证望远镜反射面工作中良好的空间整体性、刚性、可靠性及投资建设的经济性。

(2)在结构材料的选择上,虽然铝合金结构造价较高,但铝合金结构的优点正是望远镜反射面所需要的。同时,铝合金结构的造价是一次性投资大,从长远来看,采用钢结构后的维护保养费用在后期的投资也是巨大的,且后期维护工作量大,影响望远镜正常工作。总体来说,两者造价相当,故以采用铝合金结构为宜。

(3)钢结构网壳比铝合金网壳对驱动或传动系统产生的切向反力更大,因而相对于钢结构网壳系统,独立的驱动系统造价要高一些。

参考文献:

[1] 邱育海.具有主动主反射面的巨型球面射电望远镜[J].天体物理学报,1998,18(2):222-227.
[2] JGJ7—91,网架结构设计与施工规程[S].
[3] The Aluminum Association. Specifications for aluminum structures[M]. Washington: The Aluminum Association, 1986.