

大型射电望远镜结构总体方案研究

刘 岩¹, 钱宏亮², 范 峰²

(1. 长安大学 建筑工程学院, 陕西 西安 710061;
2. 哈尔滨工业大学 土木工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150090)

摘 要: 针对我国待建的 110 m 全可动射电望远镜(QTT)的工作特点, 以提高主反射面精度为目标, 以最佳吻合抛物面为拟合标准, 分析了传统结构方案致使精度较低的本质原因为反射体变形不均匀, 主要源于如下三方面: 主反射面存在集中荷载作用、背架结构支承方案不合理、背架结构体系空间受力性能不佳。基于此, 改变副反射面撑腿坐落位置, 对背架结构采用三角锥、四角锥相结合的网架式结构方案, 并对其引入一种高度极对称的伞撑式支承方案。最终提出的全可动望远镜结构总体方案显著提高了主反射面精度, 其 RMS 最大值可降至 0.306 mm; 相较目前世界最大的全可动射电望远镜 GBT 而言, 其反射面积增大了 10%, 精度提高了 12.6%, 自重降低了 40%, 其研究成果达到国际先进水平。

关键词: 结构方案; 全可动射电望远镜; 主反射面精度; 背架结构; 极对称

中图分类号: TU393.304 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)07-2097-08

Research on large radio telescope structure scheme

Liu Yan¹, Qian Hongliang², Fan Feng²

(1. School of Civil Engineering, Chang'an University, Xi'an 710061, China;
2. School of Civil Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China)

Abstract: Aiming at the 110 m fully-steerable radio telescope(which is called QTT for short) to be built in the future, in order to improve the main reflector precision, the traditional structural concepts were analyzed based on the best fit paraboloid. It is the uneven deformation of the reflector that results in the lower precision. It is mainly due to the following three aspects: the concentrated loads exist on the main reflecting surface, the back frame supporting system is unreasonable and the back frame structure has a poor performance. Based on this, the catching points of the secondary reflector supporting legs were changed, the space truss structure combining cones and quadrangular pyramids were adopted as the back frame structure design, and a kind of polar symmetry umbrella structure was proposed as the supporting system for the back frame structure. Finally the introduced scheme for the fully-steerable radio telescope significantly improved the main reflector precision, its maximal RMS was reduced to 0.306 mm. Compared with the fully-steerable radio telescope GBT which has the largest diameter in the world, the reflective surface area of QTT increases 10%, the surface precision improves 12.6% and the total weight

收稿日期: 2014-11-20; 修订日期: 2014-12-24

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金(310828151067)

作者简介: 刘岩(1984-), 男, 讲师, 博士, 主要从事大跨空间结构稳定性、大型射电望远镜结构技术方面的研究。

Email: liuyan_841114@126.com

decreases 40%. The QTT performance reaches the international advanced level.

Key words: structural scheme; fully-steerable radio telescope; main reflector precision; back frame structure; polar symmetry

0 引言

为满足国家各项深空探测领域的需要,中国科学院、国家发展和改革委员会及新疆维吾尔自治区将在奇台建造一口直径为 110 m 的望远镜。建成投入使用后,将是世界上最大的全可动射电望远镜,性能将超越美国 GBT (110×100 m) 和德国的 Effelsberg (100 m),达到国际先进水平。

作为衡量望远镜性能的重要指标,灵敏度和分辨率随着望远镜口径的增大而提高。然而建造如此超大跨度的望远镜,从结构技术角度最为突出的问题如下:传统结构方案存在若干不合理之处,自重作用严重降低了主反射面精度(也称主反射面 RMS),制约了其性能的发挥。因此,需要分析望远镜传统结构技术的不合理之处,归纳出共性问题,有针对性地提出创新或者改进,旨在引导望远镜结构总体方案的研制^[1-3]。

1 望远镜结构形式及有限元建模

全可动望远镜结构总体由副反射面系统、主反射面系统、俯仰机构、方位座架及轮轨系统等组成,如图 1 所示。

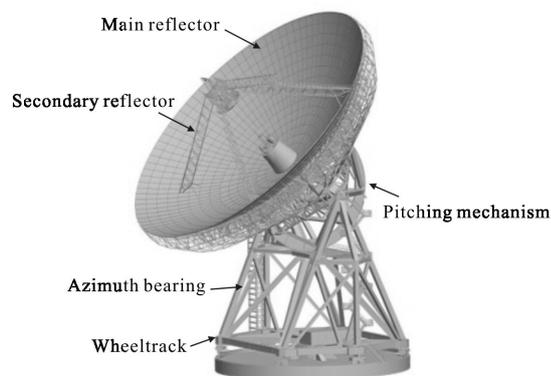


图 1 全可动望远镜结构模型

Fig.1 All moveable telescope structure model

(1) 副反射面系统:副反射面采用铝蜂窝夹层结构,几何面型为一旋转双曲面,在 45°方向由 4 根钢

桁架作为支撑系统将其支撑在主反射面表面。

(2) 主反射面系统:主反射面由铝蜂窝面板和调整促动器构成,主反射面连接于背架结构上弦,通过调节二者间连接装置(促动器)的长度以保证反射面的超高精度;背架结构的主要作用是承接主反射面并维持其几何面型,是望远镜结构设计中的关键,它通常采用空间桁架体系,杆件之间采用相贯连接,并在节点处焊有加劲肋。

(3) 俯仰机构:由扇形大齿轮、俯仰轴承座及俯仰平台组成。首先,俯仰平台作为直接支承背架结构的部分,一般由多边形框架梁构成;其次,俯仰轴承座安装于方位座架的两个顶点,将主、副反射体及俯仰机构的自重通过这两点传递至方位座架;而最下面的扇形大齿轮则是通过电磁装置的驱动^[4],使得俯仰机构及以上部分(简称俯仰旋转部分)绕着俯仰轴承座发生转动,从而实现俯仰角方向的变位旋转,转动范围可从 5°转至 90°,如图 2 所示。

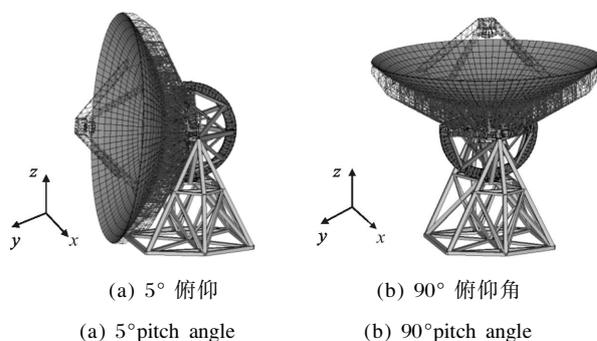


图 2 俯仰角转动范围

Fig.2 Coverage of pitch angle

(4) 方位座架为箱型截面构成的空间框架结构,支承于底部的方位滚轮之上。滚轮分为主动轮和从动轮^[5],整个座架通过主动轮的驱动,绕着中心枢轴在水平面内转动,完成方位角方向的旋转变位。针对望远镜结构各部分受力特点^[6-7],研究分析中采用不同的计算单元予以模拟,表 1 和表 2 分别为模型中单元及材料的使用情况说明。而平台、护栏、馈源、机房等附属部分均以集中质量的形式施加于结构相应节点。

表 1 有限元分析中采用的单元

Tab.1 Simulating elements in finite element analysis

Componets	Simulating element
Back frame structure	Pipe 16
Core tube, wheel gear	Shell 63
Pitching mechanism, azimuth bearing, actuator	Beam 4
Drive rod	Link 8
Balance weight	Mass 21
Reflector panel	Shell 181

表 2 材料属性

Tab.2 Material properties

Properties	Steel	Aluminium
Elasticity modulus $E/N \cdot m^{-2}$	2.06×10^{11}	0.7×10^{11}
Poisson ratio λ	0.30	0.33
Density/ $kg \cdot m^{-3}$	7 850	2 700

2 反射面精度拟合

由于外荷载以各种形式存在,反射面几何形状不能与理想抛物面形状完全吻合,会产生一定的误差,影响望远镜的工作性能。而其工作性能的好坏取决于表面各点间的相对误差,并非各点的绝对误差^[8-11]。设计抛物反射面在荷载的作用下发生变形,这一变形过程可以分解为两部分:第一部分源于设计抛物面的刚体位移(代表着转动和移动);后一部分则是在既有刚体位移的基础上反射面各点又发生了微小的弹性变形。其中对反射面几何形状造成影响的只有后者,而具备拟合标准的抛物面有无数个,但其中必定存在一个抛物面,可使得反射面各点对该抛物面半光程差的均方根值(简称 RMS,以此作为精度的衡量指标,具体统计计算如公式(1)~(3))达到最小,这样的拟合抛物面叫做最佳吻合抛物面。

$$\Delta = \frac{1}{2\sqrt{f(f+z_0)}} \times [x_0(u-u_A) + y_0(v-v_A) - 2f(w-w_A) - 2hz_0 + y_0\phi_x(z_0+2f) - x_0\phi_y(z_0+2f)] \quad (1)$$

式中: N 为反射面节点数; Δ 为反射面各点法向偏差。

$$\Delta_D = \frac{\Delta}{\sqrt{1 + \left(\frac{r}{2f}\right)^2}} \quad (2)$$

式中: r 代表反射面上一点到所在口面圆心的距离; f 为抛物面焦距。

$$RMS = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N \Delta_D^2}{N}} \quad (3)$$

式中: Δ_D 为反射面各点半光程差。

故反射面进行精度拟合时是以最佳吻合抛物面为基准,而非原设计抛物面。最佳吻合抛物面与设计抛物面的位置关系如图 3 所示,相应的坐标转换关系如图 4 所示。

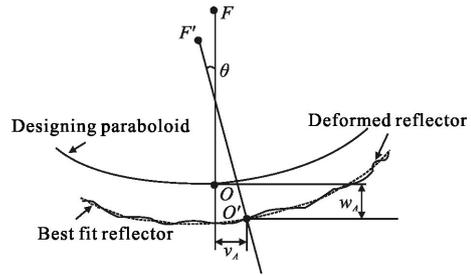


图 3 最佳吻合抛物面与设计抛物面

Fig.3 Best fit paraboloid and design paraboloid

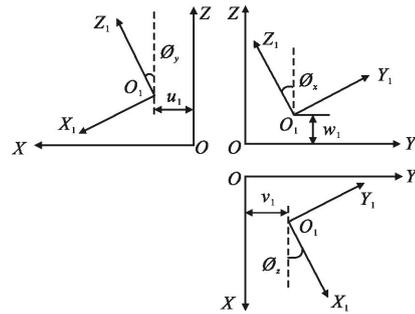


图 4 坐标变换

Fig.4 Coordinate conversion

3 结构总体方案

通过公式(1)可以看出反射面变形的均匀程度直接影响着反射面 RMS 值,若要提高精度(降低 RMS 值),必须最大程度降低这种变形的不均匀性。对传统望远镜结构进行细致的研究分析,发现如下 3 个因素:副反射面支撑方案、背架结构支撑方案、背架结构形式对主反射面变形不均匀性均产生了显著影响,后续针对这 3 个因素分别展开研究,提出新的结构方案。

通常会选取某一俯仰角 γ 进行反射体的安装,并在此角度下通过反射面板与背架结构间的促动器将反射面调到理想抛物面形状,认为此刻状态为望远镜反射面安装的最终状态。显然,对于安装完毕的望远镜结构,当俯仰角转动至其他 α 角时,反射面形

状将会与理想抛物面形成新的偏差,这种偏差以望远镜指平(0°)和仰天姿态(90°)时最为严重,如图 5 所示。通过计算分析发现,这两种最不利姿态下反射面 RMS 值的大小分别随背架结构安装角度的变化而变化,但二者的 RMS 值之和始终不变。因此,在望远镜俯仰变化范围内,必然可以找到某一合适角度进行背架结构的安装,最终使得望远镜反射面 RMS 的最大值(可选取 0° 或 90°)达到最小^[12]。

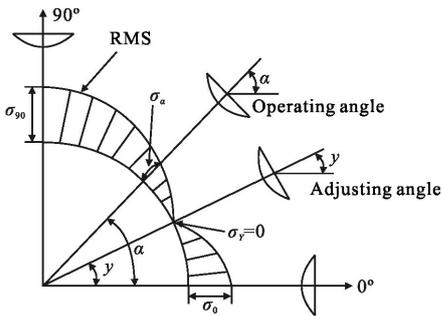


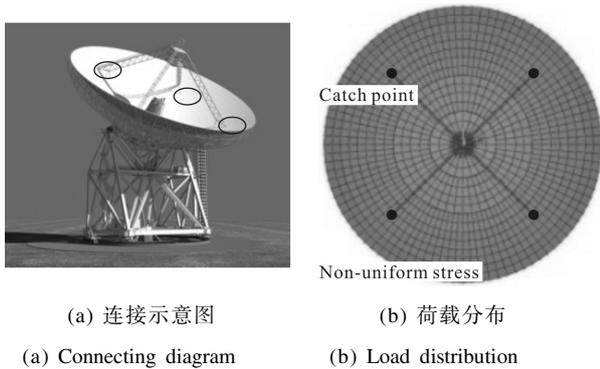
图 5 主反射面精度随俯仰角变化

Fig.5 Relationship between RMS and pitch angle

后续在对各结构方案或连接措施进行研究时,统一选取俯仰角 90° 模型为分析对象,以最佳安装调整角修正后的反射面 RMS 值作为方案效果的比选依据。

3.1 副反射面支撑方案

传统结构方案中,望远镜副反射面通过 4 条撑腿直接与背架结构上弦(即反射面表面)相连,如图 6 所示。由此带来问题:副反射面及撑腿的重力以荷载的形式作用于反射面相应节点,集中力的存在必会引起反射面变形的不均匀,从而降低反射面精度。



(a) 连接示意图

(b) 荷载分布

(a) Connecting diagram

(b) Load distribution

图 6 副反射面传统支撑方案

Fig.6 Traditional supporting design of secondary reflector

鉴于此,提出新的连接方案,通过撑腿穿过背架结构上弦网格与俯仰机构直接相连,如图 7 所示。具体连接方式为:在俯仰平台的对应位置分别升起 4

片伸臂小桁架作为副反射面撑腿的支撑点,使得副反射面及撑腿的重量直接传递给俯仰机构,具体连接局部放大如图 8 所示。这一改进措施完全消除了背架结构表面集中力的作用。

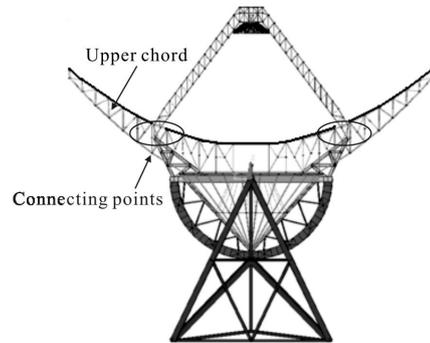
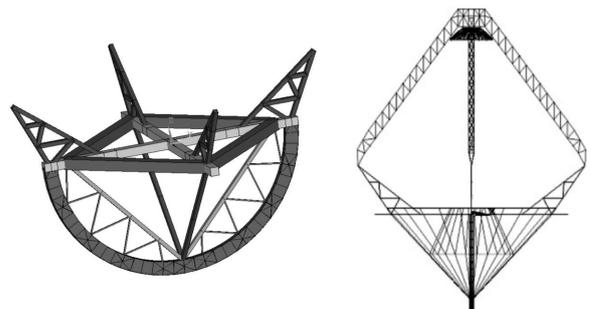


图 7 新方案主视图

Fig.7 Front view of new design



(a) 伸臂小桁架

(b) 支撑连接点

(a) Overhaul jack truss

(b) Connecting points

图 8 新支撑方案局部放大

Fig.8 Partial enlargement of new supporting design

以桁架式背架结构为例对这两种副反射面支撑方案进行计算对比,图 9 给出了两种方案俯仰角为 90° 时背架结构在自重下的上弦变形(三向位移)图,可以看出新的连接方案每一环节节点的变形比传统方案要均匀。



(a) 传统方案

(a) Traditional scheme



(b) 新方案

(b) New scheme

图 9 副反射面支撑方案上弦变形

Fig.9 Upper chord deformation of secondary reflector supporting design

表 3 给出了两种方案望远镜工作时反射面 RMS 值,其中 RMS 值具体计算方法为:选取 90°俯仰角,在自重作用下反射面发生变形,提取反射面表面节点的坐标及三向位移,求取该姿态下的最佳吻合抛物面,采用最小二乘法将变形后的反射面与最佳吻合抛物面进行面型偏差拟合,得到该俯仰角下的反射面 RMS 值(针对每一种连接措施改进后的反射面 RMS 值计算均如此,后续不再赘述)。可以看出新方案的 RMS 值为 0.49 mm,远小于传统方案的 0.826 mm。因此,将副反射面撑腿直接支撑于俯仰机构的连接方案可以有效提高主反射面精度。

表 3 副反射面不同支撑方案对比

Tab.3 Comparison of different secondary reflector supporting design

Supporting scheme	Deformation homogeneity of upper chord for 90°	RMS/mm
Traditional scheme	Little uniform	0.826
New scheme	Relatively uniform	0.490

3.2 背架结构支撑方案

俯仰机构作为反射面背架结构的支承部分,其约束形式直接影响着背架结构杆件内力的分布及变形模式。因此,对背架结构与俯仰机构的连接方案进行研究至关重要。为了提高反射面精度,应尽量保证背架结构变形均匀,即在俯仰角 90°时,应该将背架结构及其约束条件设计成关于中心轴极对称的形式^[13-15]。通过对传统方案的研究可发现,背架结构本身就是由一榀单元(对应圆心角为 15°)绕中心轴旋

转而成,满足极对称形式^[16],如图 10 所示。

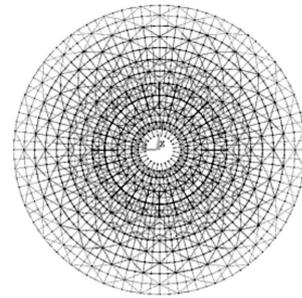


图 10 传统背架结构

Fig.10 Traditional back frame structure

然而传统方案中,支承背架结构的俯仰机构两端悬挂有大齿轮,另两端装有俯仰轴承座,不可能实现极对称设计,只能实现双轴对称设计,如图 11 所示。因此,只有在中心轴上将背架结构与俯仰机构进行连接,才能保证背架结构的约束条件关于中心轴极对称。为了实现这种连接方式,设计一种伞形支撑结构,简称伞撑。伞撑由上部平台与下部斜向杆件组成,通过上部平台的 3 环节点与背架结构直接相连,组成一个整体,如图 12 所示。

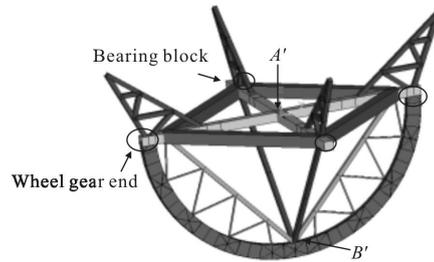


图 11 传统俯仰机构

Fig.11 Traditional pitching mechanism

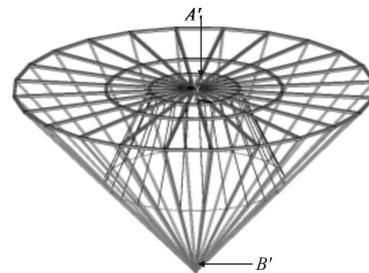


图 12 伞撑结构

Fig.12 Umbrella supporting structure

通过伞撑中心轴上的 A、B 点分别与俯仰机构的 A'、B' 相连,实现了俯仰机构对整体背架结构的极对

称约束,如图 13 所示。为了说明极对称方案的优越性,将传统的双轴对称约束支承方案和伞撑式极对称约束支承方案进行对比。

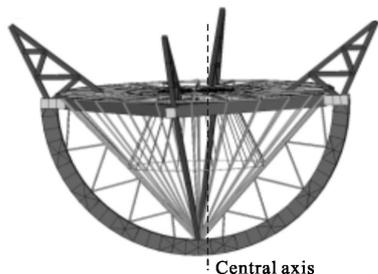
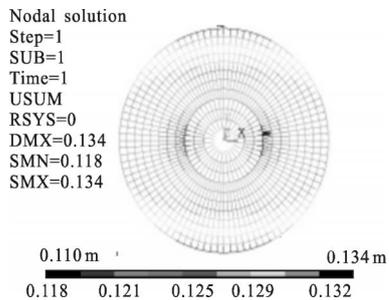


图 13 约束极对称

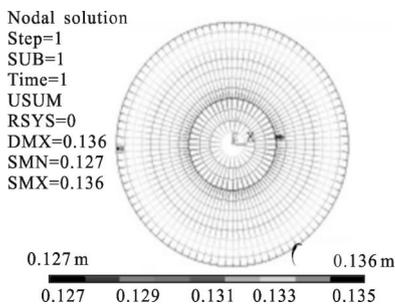
Fig.13 Polar symmetry constraints

图 14 中给出俯仰角为 90°时两种方案背架结构上弦变形(三向位移)图,可以看出极对称约束支承方案的各环变形比传统的双轴对称约束支承方案要均匀;表 4 给出两种方案下反射面 RMS 值,极对称约束支承方案为 0.49 mm,远小于双轴对称约束支承方案的 1.05 mm。因此,极对称结构方案可以有效地提高反射面精度。



(a) 传统方案

(a) Traditional scheme



(b) 新方案

(b) New scheme

图 14 背架结构支承方案上弦变形

Fig.14 Upper chord deformation of back frame structure supporting design

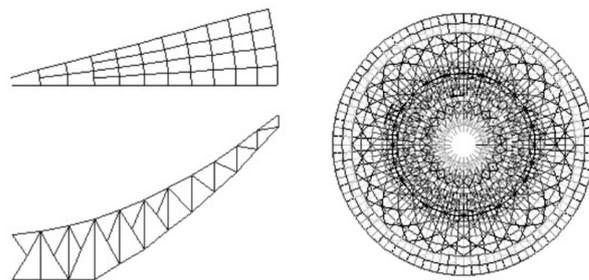
表 4 不同背架结构支承方案对比

Tab.4 Comparison of different supporting designs for back frame structure

Supporting scheme for back frame structure	Deformation homogeneity of upper chord for 90°	RMS/mm
Traditional scheme	Little uniform	1.05
New scheme	Relatively uniform	0.49

3.3 背架结构选型

传统望远镜背架结构采用的都是肋环形交叉桁架系空间网格结构^[17-18],图 15(a)给出背架结构一榀单元上弦平面及立面布置图。其中,一榀单元对应圆心角为 15°,整个背架结构由 24 榀单元连接而成。这里选取有代表性的一类:上弦共 11 环,984 个节点,采用沿圆周方向均布的 24 分主辐射梁、48 分副辐射梁、96 分副辐射梁以及若干环向杆件组成。由一榀单元立面图看出,网格布置从核心筒处第 1 至第 6 环采用大网格嵌套小网格,自第 7 环开始向后收为单体网格。整体背架结构如图 15(b)所示。



(a) 一榀单元示意

(b) 整体平面示意

(a) A unit diagram

(b) Whole plane diagram

图 15 交叉桁架系空间网格结构

Fig.15 Ensemble of back frame structure using truss system

针对这种传统交叉桁架系空间网格结构,依次变化上弦节点环数、上弦各环节节点个数、横断面杆件分布方式及桁架高度,做出多个不同的方案,以反射面 RMS 值为评价指标,通过大量计算分析后发现这些方案间并无显著差别。本质原因是肋环型交叉桁架基本仍属于平面受力体系,结构空间作用较弱,上弦网格不够均匀,从而导致上弦各点变形均匀性不够高。

基于此,提出背架结构采用角锥体系空间网格结构。其一榀单元示意如图 16(a)所示。该方案与传

统的交叉桁架系方案不同之处在于:首先上弦网格由于引入了过渡三角形,使得网格分布更为均匀,接近双向板受力状态;其次从立面图看,总体呈现出上下两层,上层网格采用三角锥,下层网格采用四角锥,靠近悬挑端过渡为单体四角锥。两种角锥单元合理搭配,使得整个背架结构网格更为均匀,杆件布置更为密集,较前述桁架系方案空间受力更好。角锥系方案的整体背架结构如图 16(b)所示。

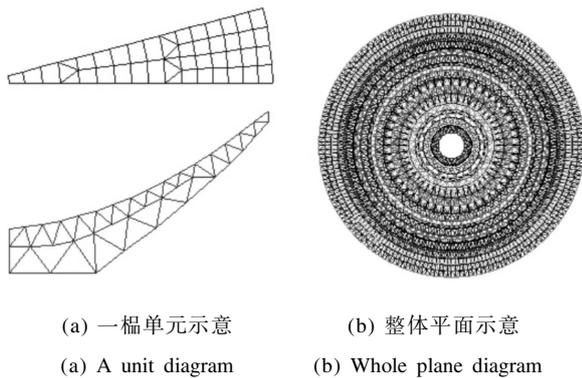


图 16 角锥系空间网格结构

Fig.16 Ensemble of back frame structure using pyramid system

为了说明角锥系空间网格结构比交叉桁架系空间网格结构更为优越,对这两种不同类型的背架结构方案进行对比。选取不同俯仰角姿态,分别给出两种方案在自重作用下不同俯仰角时的主反射面精度,如图 17 所示。可以看出,在俯仰角变化范围内,角锥系空间网格结构方案反射面 RMS 值始终小于桁架系空间网格结构方案的对应值,且最大值为 0.306 mm,比桁架系方案的最大值 0.49 mm 小了 38%,精度得到了显著提高。这也充分印证了前面提及的角锥系方案空间作用更强,杆件受力更为均匀,从而表现出背架结构上弦变形的均匀一致性更高。

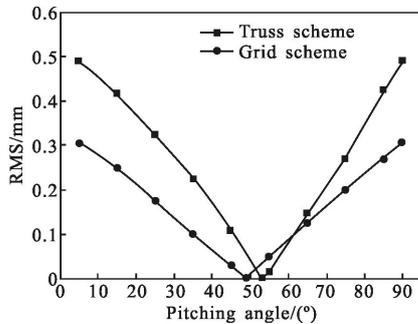


图 17 自重作用下反射面 RMS 值

Fig.17 RMS of reflector surface under the gravity load

后续又对两种背架结构方案,选取若干工况模型进行分析,对其他相关性能指标进行了对比,见表 5。可以看出,角锥系空间网格结构方案较桁架系空间网格结构方案,其质量更轻、结构刚度更大、自重作用下的反射面 RMS 值更小,充分反映出角锥系方案这一空间受力形式的优势,各方面性能指标均优于交叉桁架系方案。这里将新疆 110 m 望远镜与当前世界上性能最佳的同类望远镜进行对比,见表 6。可以看出,文中提出的全可动射电望远镜结构方案与性能最佳的美国 GBT 相较而言,其反射面面积增大了 10%,精度提高了 12.6%,自重降低了 40%,达到国际先进水平。

表 5 两种背架结构方案对比

Tab.5 Comparison of two kinds of back frame proposals

Comparison index	Truss	Grid
Back frame structure weight/t	1 038	826
Balance weight/t	656	616
Maximum RMS of reflector/mm	0.49	0.306
Maximum displacement of 90°pitching angle/mm	120	108
Maximum displacement of 45°pitching angle/mm	135	120
Maximum displacement of 5°pitching angle/mm	150	128

表 6 世界知名射电望远镜对比

Tab.6 Comparison among famous radio telescopes in the world

Radio telescope	Diameter/m	RMS/mm	Weight/t
GBT in USA	110×100	0.35	7 300
Bonn in Germany	100	0.50	3 200
Lovell in UK	76	1.00	3 200
Shanghai 65	65	0.73	2 640
QTT in China	110	0.31	4 322

4 结 论

针对巨型全可动望远镜结构总体方案展开了研

究,主要结论如下:

(1) 以主反射面精度最高为目标,分析出影响精度的本质原因是其变形不均匀,然后从造成变形不均匀性的源头出发,探究了望远镜结构传统方案的不合理之处。基于该变形不均匀性,分别从副反射面支撑方案、背架结构支撑方案、背架结构形式等三方面进行了创新和改进。

(2) 提出了新的副反射面支撑方案,具体连接措施为:在俯仰平台的对应位置分别撑起 4 片伸臂小桁架作为副反射面撑腿的支撑点,将撑腿穿过背架结构上弦网格与伸臂小桁架相连,使得副反射面及撑腿的重量直接传递给俯仰机构,从而完全消除背架结构上弦这种非均匀荷载的影响,这一措施使得精度提高了 43%。

(3) 引入一种新型伞撑式背架结构支撑方案,具体连接措施为:将伞撑斜杆通过俯仰机构平台与背架结构相连,组成一个整体,实现了对背架结构的极对称约束,使得主反射面变形关于中心轴呈现极对称;这一系列措施使得精度可提高 53%。

(4) 针对背架结构自身,采用角锥体系空间网格结构,相比传统的交叉桁架系空间网格结构而言,其空间受力更为明显,变形更加均匀,不但精度提高 38%,同时重量减轻 20.4%。

参考文献:

- [1] Qiu Y H. 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] Leve R, Melosh R. Computer design of antenna reflectors[J]. *Journal of Structural Engineering*, 1973, 99 (11): 2011-2030.
- [3] Von Hoerner. Homologous deformations of tilttable telescope [J]. *Journal of Structural Engineering*, 1967, 93(5): 1305-1325.
- [4] Zhang Yalin. The static and dynamic analysis of the 50 m-diameter radio telescope antenna structure [J]. *Electro-Mechanical Engineering*, 2004, 20(6): 37-40. (in Chinese)
- [5] Zhang Yalin, Liu Weiming. Dynamic design of 50 m-diameter radio telescope antenna pedestal structure [J]. *Radio Communications Techniques*, 2003(5): 5-6. (in Chinese)
- [6] Zhang Zhanguo. Control system design and experimental software for the large radio telescope fine tuning platform [D]. Xi'an: Xi'an Electronic Science & Technology University, 2008: 21-30. (in Chinese)
- [7] Qian Hongliang, Liu Yan, Fan Feng. The analysis on solar radiation of Shanghai 65 m radio telescope [J]. *Engineering Mechanics*, 2012, 29(10): 379-380. (in Chinese)
- [8] Ye Shanghui. The Antenna Structure Design [M]. Beijing: National Defence Industrial Press, 1980. (in Chinese)
- [9] Duan Baoyan. Analysis and Measurement of Antenna Structure Optimization [M]. Xi'an: Xi'an Electronic Science & Technology University Press, 2006. (in Chinese)
- [10] Wang Jian. The Principle and Design of Antenna [M]. Beijing: National Defence Industrial Press, 1993. (in Chinese)
- [11] Christianson W N. Radio Telescope [M]. Beijing: China Science Press, 1977. (in Chinese)
- [12] Liu Yan. Structural selection and accuracy control of the large aperture all-movable telescope [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013: 20-21. (in Chinese)
- [13] Cheng Jingquan. The Principle and Design of Astronomical Telescope[M]. Beijing: China Science and Technology Press, 2003. (in Chinese)
- [14] Pang Yi. Key technologies of large antenna mechanical design [J]. *Electro-Mechanical Engineering*, 2011, 27 (3): 28-30. (in Chinese)
- [15] Ma Pingzhong. Design and research of the large telescope[J]. *Applied Optics*, 1994(03): 6-11. (in Chinese)
- [16] Li Jianfeng. Heat transfer analysis and design of large photovoltaic array telescope structure [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2007. (in Chinese)
- [17] Qiu Yuhai. Large spherical radio telescope with the active reflector [J]. *Astrophysical Journal*, 1998, 18 (2): 107-113. (in Chinese)
- [18] Yang Shijie. Several problems in the manufacture of modern telescopes[J]. *Acta Astronomica Sinica*, 1962(2): 203-207. (in Chinese)