

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2020.09.005

30 m 望远镜宽视场光谱仪支撑结构选型研究^{*}

郑凌宇¹, 张大旭^{1*}, AMAN · Shrestha¹, 宋振森¹, 高圣彬¹, 徐 腾², 许明明²

(1. 上海交通大学 船舶海洋与建筑工程学院, 上海 200240;

2. 中国科学院 国家天文台南京天文光学技术研究所, 江苏 南京 210042)

摘要:针对 30 m 望远镜宽视场光谱仪承载能力与轻量化程度低的问题, 对于已有的桁架支撑结构方案, 提出了宽视场光谱仪板壳支撑结构方案。建立了两者的有限元模型, 分别从质量、变形、应力与基频等方面对钢桁架和钢板壳结构性能进行了评价, 利用等刚度理论确定了碳纤维复合材料板壳结构的构件厚度, 并与钢板壳结构的性能进行了对比。研究表明:碳纤维复合材料板壳支撑主结构质量为 1.93 t, 最大相对位移为 0.286 mm, 最大应力为 30.94 MPa, 基频为 7.98 Hz, 均满足设计要求, 是宽视场光谱仪支撑结构的理想形式, 对大口径望远镜光学仪器支撑结构选型与设计具有指导意义。

关键词:30 m 望远镜; 宽视场光谱仪; 结构选型; 有限元分析

中图分类号:TH751;TH703

文献标识码:A

文章编号:1001-4551(2020)09-1020-07

Structural form selection of supporting structures for WFOS of TMT

ZHENG Ling-yu¹, ZHANG Da-xu¹, AMAN · Shrestha¹, SONG Zhen-sen¹,
GAO Sheng-bin¹, XU Teng², XU Ming-ming²

(1. School of Naval Architecture, Ocean and Civil Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China; 2. National Astronomical Observatories/Nanjing Institute of Astronomical Optics & Technology, CAS, Nanjing 210042, China)

Abstract: Aiming at the problem of the low bearing capacity and lightweight rate of WFOS of TMT, a shell supporting structure scheme was proposed for the existing truss supporting structure scheme. The finite element models for two type of structures were developed. The performance of truss structure and shell structure, both composed of invar, were evaluated from the aspects of mass, displacement, stress and fundamental frequency. By the principal of equivalent stiffness, the thickness of carbon fiber composite shell components were determined. The results indicate that under the action of gravity in the most unfavorable direction of rotation, the mass of the composite structure is 1.93 t with a fundamental frequency of 7.98 Hz. The maximum relative displacement between each optical element is 0.286 mm, and the maximum stress is 30.94 MPa. Hence, the composite shell structure meets the design requirements which makes it an ideal supporting structural form. The results of this study can guide the selection and design of the supporting structure for optical instruments of extremely large telescopes.

Key words: thirty-meter telescope(TMT); wide-field spectrograph (WFOS); structure selection; finite element analysis (FEA)

收稿日期:2019-12-27

基金项目:国家自然科学基金资助项目(U1831105,11272207,11603054);江苏省自然科学基金资助项目(BK20191507)

作者简介:郑凌宇(1996-),男,山东枣庄人,硕士研究生,主要从事结构设计与优化方面的研究。E-mail:zly0616@sjtu.edu.cn

通信联系人:张大旭,男,副教授,博士生导师。E-mail:daxu.zhang@sjtu.edu.cn

0 引言

目前,中国正在参与设计建造 30 m 望远镜,包括宽视场光谱仪。其中,WFOS 是 TMT 望远镜的首选仪器,该仪器适合开展暗弱天体多目标光谱观测,是大口径望远镜终端仪器中使用频率最高的光学仪器^[1]。

随着大口径望远镜直径的增加,其内部光学仪器的尺度也在不断增加,其受到外界的影响也变得多种多样,导致造价也在成倍增加^[2-3]。光学仪器结构性能对望远镜成像质量影响较大,其轻量化的需求也相应提高^[4],因此,设计出质量轻、性能好的光学仪器支撑结构对提高望远镜系统性能十分重要。

为了降低成本,实现结构轻量化目标,8.2 m 口径的 VLT 望远镜 MUSE 光谱仪采用碳纤维复合材料板壳结构。LEWIS 等^[5]对其进行了载荷布局优化和结构性能影响分析,结果证明碳纤维复合材料在该光谱仪上的应用效果良好。GTC 望远镜的 CIP 和 ELMER 仪器结构采用低碳钢桁架, FARAH 等与 RONQUILLO 等^[6-7]对其在重力载荷下的变形进行了有限元分析。美国著名的 Keck II 望远镜 ESI 仪器采用钢桁架结构,也考虑过选用比刚度更高的复合材料,但由于设计人员对其不够熟悉,且工期紧张的原因最终没有采用^[8]。BALDWIN 等和 MUELLER 等^[9]对 GMT 望远镜的 CLEF 板壳结构光谱仪进行了详细研究,对碳纤维复合材料、钢钢和低碳钢结构性能进行了对比分析,结果表明只有碳纤维复合材料板壳结构才能满足仪器成像技术指标要求。

目前,世界上主要的大口径望远镜宽视场光谱仪支撑结构形式为桁架结构与板壳结构,其中桁架结构多采用钢钢材料,板壳结构多采用碳纤维复合材料,已逐渐成为望远镜光学仪器结构的主要轻量化材料。目前,我国没有 30 m 级大口径光学望远镜,关于大口径望远镜宽视场光谱仪支撑结构研究也较少,并且对于具体的两种宽视场光谱仪支撑结构形式性能的比较目前还没有进行研究。WFOS 成像质量与其结构性能相关,对整个 TMT 性能影响较大,如何根据 WFOS 光学子系统的布置和技术指标要求,建立质量轻、刚度大、变形小的仪器支撑结构是目前有待解决的问题。

在 30 m 望远镜 WFOS 现有桁架支撑结构方案的基础上,结合支撑结构的设计要求,笔者提出一种 WFOS 板壳支撑结构方案,利用有限元软件 ABAQUS 分析并比较两种结构的性能,最后结合工程实践,研究碳纤维复合材料在 WFOS 板壳支撑结构上应用的可行性。

1 宽视场光谱仪光学系统

基于 X-change 的 WFOS 方案属于狭缝多目标光谱仪,具有宽波段、多分辨率模式和高通光率的特点,可以同时观测 50~80 个物体进行狭缝观测,其设计思路与智利 GMT 望远镜的 GMACS 仪器类似^[10]。该系统可以根据仪器所需的分辨率,通过切换平面镜和光栅实现不同的观测模式,一次曝光可覆盖整个工作波段。

目前,WFOS 正处于概念设计阶段,共有竖直和水平两种支撑方案。水平设计方案的主要依据在于减少一块反射镜的使用,做到结构尺寸和制造成本的可控,但对于实际工程具体方案的选择仍需进一步进行分析^[11]。

2 宽视场光谱仪支撑结构设计

随仪器绕水平轴转动,WFOS 内部光学元件位置发生不断变化,不同转动方位下仪器的重力载荷也将发生变化;同时,WFOS 转动工作模式产生的离心力也会影响结构性能,这就对 WFOS 支撑结构的设计提出了较高要求。

WFOS 结构选型设计的目的是得到能够满足性能要求的轻质结构,因此,需要综合考虑结构形式、结构布局、内部光学元件尺寸、结构材料性能、载荷情况等因素。

2.1 支撑结构的组成

WFOS 支撑结构组成如图 1 所示。

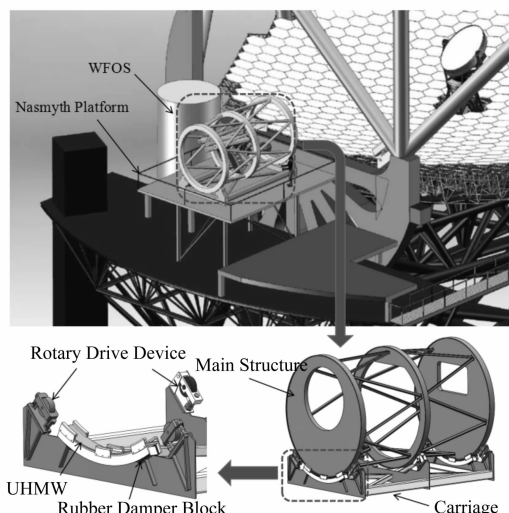


图1 WFOS 支撑结构组成

由图 1 可知,WFOS 被安装在 TMT 的 Nasmyth 平台上,整个仪器能够绕水平轴转动,以消除视场旋转引起的像旋,其正常工作状态下的转速为 15°/h。WFOS

支撑结构由仪器架固定部分和主结构旋转部分两部分组成,其中,旋转部分由仪器架上的滚轮驱动,固定部分与旋转部分之间通过约束结构连接;在约束结构内衬有超高分子聚乙烯材料,以保护旋转部分的驱动表面。为了增加结构的安全性能,在固定部分的钢板鞍座结构中封装有阻尼橡胶块,以减轻地震作用对结构的影响。

WFOS 支撑结构的功能如下:

(1) 为所有光学元件、仪表设备以及电缆的敷设提供支撑和连接点;

(2) 提供可转动装置,以消除视场旋转引起的像旋,提高成像质量;

(3) 将光学系统与 TMT-Nasmyth 平台的变形隔离;

(4) 地震中可以安全约束宽视场光谱仪,避免内部光学元件遭到破坏。

2.2 结构设计要求

WFOS 内部光学元件总质量为 6 109 kg,支撑结构的力学性能将影响光学系统的成像质量。WFOS 结构形式与尺寸由内部光学系统所决定,结构既不能对光路产生影响,同时还应具有良好的刚度和承载能力。

30 m 级望远镜宽视场光谱仪的体量庞大,随望远镜的运动结构会产生变形,主动补偿技术的发展能够有效补偿因结构变形引起的图像漂移,确保仪器的性能稳定。SURYA A^[12]证明了 WFOS 在结构最大变形为 1 mm 量级时,其自动补偿系统能够很好地满足光学系统的设计要求。设计要求 WFOS 支撑结构最大变形量应小于 1 mm,主结构质量应小于 3 000 kg。在满足结构变形要求的前提下,结构的动力特性极为重要。TMT 整机工作频率为 2 Hz^[13],为了保证仪器正常工作,避免与 TMT 整机发生共振引起结构损坏,WFOS 基频应大于 4 Hz。

综上所述,宽视场光谱仪支撑结构的设计主要考虑以下因素:

(1) 结构最大变形应在 WFOS 自动补偿系统的要求范围内;

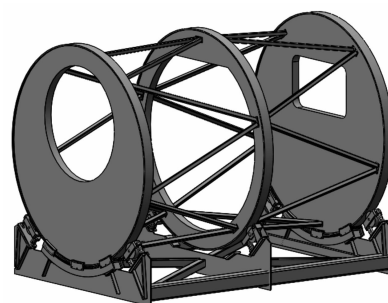
(2) 具有良好的动力学性能,避免与 30 m 望远镜整机或内部光学元件产生共振;

(3) 在满足各项性能要求的情况下,尽可能提高结构轻量化程度。

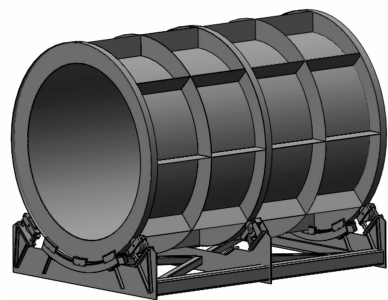
2.3 支撑结构设计参数

桁架和板壳结构是大型望远镜仪器常用的两种支撑结构形式。

两种 WFOS 支撑结构方案如图 2 所示。



(a) 桁架结构



(b) 板壳结构

图 2 WFOS 支撑结构方案

桁架结构质量与变形较小,是宽视场光谱仪支撑结构的常用形式,但其刚度往往小于板壳结构。

由图 2(a) 可知:该结构采用空间桁架连接 3 个单轴圆盘的形式,单轴圆盘外径为 4 200 mm,桁架杆的横截面积为 1 670 mm²。这些单轴圆盘作为支撑结构一部分,由滚轮驱动和支撑。为了减轻结构质量,单轴圆盘内部由四边形轻量化孔结构构成,其间距为 200 mm,壁厚为 2 mm。桁架结构圆盘内部结构复杂,制造加工过程较为复杂,同时在制造时轻量化孔焊点多,易对结构振动特性产生不利影响。

针对桁架结构制造加工复杂、振动特性与强度表现较差的特点,笔者提出了一种 WFOS 板壳结构方案。由于薄壁圆柱壳结构受力合理,且具有质量轻、耗材少以及便于制造加工等特点,被广泛应用于航空航天、船舶制造等诸多领域,故该方案主体结构采用薄壁圆柱壳的形式。

由图 2(b) 可知,该方案由薄壁圆柱壳与外部加筋肋板组成。根据 WFOS 内部光学系统位置与前期参数化研究结果,笔者取圆柱壳内径为 3 400 mm,筒壁厚度为 5 mm。为了增加筒体结构扭转刚度和防止筒壁屈曲,圆柱壳上设有多道环向与纵向加筋肋板,厚度为 10 mm,该加筋柱壳结构同样通过驱动转子支撑和驱动。为了减小主结构与驱动滚轮接触部分的应力集中现象,在环向肋板外边缘设置环型壳,以增大接触面积。通常,这种加筋圆柱壳结构整体性较好、易于加工制造、抗变形能力强、振动特性好。

2.4 支撑结构材料的选择

为保证宽视场光谱仪的光学成像质量,在仪器支撑结构材料选择时,材料必须具有高比刚度、高比强度、低热膨胀系数等性能。

大口径望远镜支撑结构通常采用的材料为铝合金、钢(4J32)、低碳钢和碳纤维复合材料,常用材料属性如表1所示。

表1 大口径望远镜光学仪器支撑结构常用材料属性

材料	密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	弹性模量/ GPa	热膨胀系数/ ($10^{-6} \cdot \text{K}^{-1}$)
铝合金	2.8	71	23.6
钢(4J32)	8.1	141	0.3 ~ 1.0
钢(45)	7.8	210	11.6

由表1可知,钢材料热膨胀系数小,被大多数光学仪器支撑结构采用。为了保证仪器尽可能地不受温度变化的影响,笔者首先对钢材料 WFOS 桁架支撑结构与板壳支撑结构进行性能研究。

3 仿真实验与结果分析

3.1 有限元模型的建立与网格划分

结合 WFOS 支撑结构设计要求,为了分析比较重力作用下两种宽视场光谱仪结构的性能,笔者利用 ABAQUS 软件对两种支撑结构进行模态分析以及各转动方位重力作用下的响应分析。

笔者分别建立 WFOS 桁架支撑结构与板壳支撑结构对应的有限元模型。相对于结构整体尺寸,由于桁架结构与板壳结构的壁厚较小,桁架模型与板壳模型主结构与支撑架结构均用 S4R 四边形壳单元进行网格划分,其中,桁架模型杆采用 T3D2 单元建立。

现阶段主要分析 WFOS 支撑结构的变形性能与动力特性,因此,笔者在有限元分析中 WFOS 的光学元件被简化为质量点,通过 MPC 连接器与 WFOS 主体结构之间进行运动学约束。

3.2 WFOS 桁架结构与板壳结构性能对比

由于仪器在正常工作状态下旋转速度较慢,在分析时可不考虑离心力作用对结构变形的影响。因此,笔者在有限元分析时将结构视为静态模型,以旋转角度每隔 15° 取作一个工况进行分析,以减少分析时间。

WFOS 各转动方位结构最大变形如图3所示。

由图3可知,对于桁架结构而言,其结构重心位置随转动方位变化,结构变形主要由支撑结构自身重心改变与光学元件位置变化共同引起。根据各光学元件初始质心位置分布可知,由于 0° 转动方位结构的重心

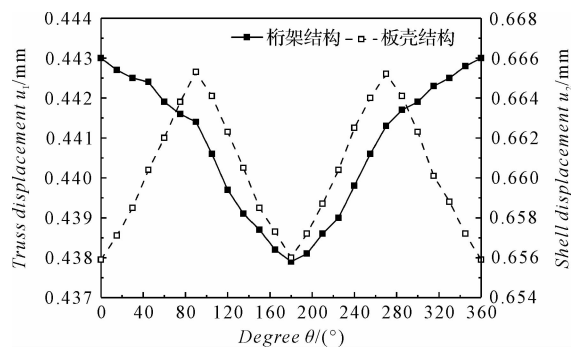


图3 WFOS 各转动方位结构最大变形

在轴心以下,在该方位轴心以下结构刚度大于轴心以上结构刚度,结构变形最大。对于板壳结构来说,其结构中心对称,整体刚度均匀,结构位移变化主要由于内部光学元件的位置变化引起,因此,当结构转动至 $90^\circ/270^\circ$ 方位时变形最大。

两种结构最不利转动方位变形云图如图4所示。

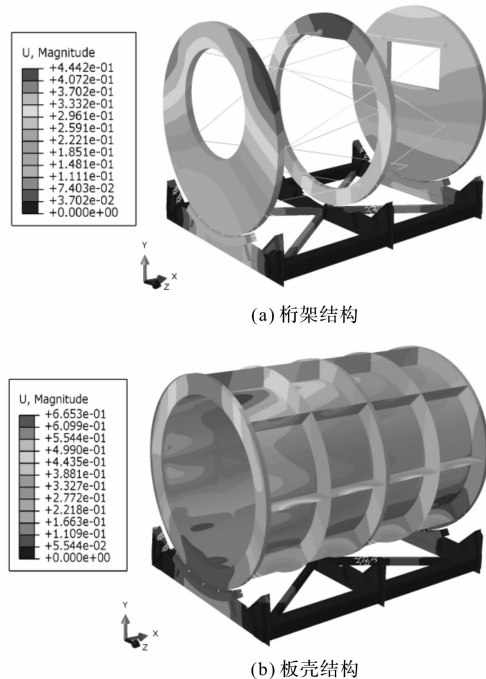


图4 WFOS 最不利转动方位变形云图

由图4可知:在最不利转动方位重力作用下,桁架结构最大绝对变形为 0.444 mm ,内部光学元件相对位移为 0.248 mm ,板壳结构最大绝对变形为 0.665 mm ,光学元件最大相对位移为 0.283 mm ,桁架结构变形性能略优于板壳支撑结构,两种支撑结构方案均能满足自动补偿系统的最大变形设计要求。

两种结构最不利转动方位应力云图如图5所示。

由图5可知:桁架结构与板壳结构的最大应力均小于钢材料屈服强度,故两种支撑结构均满足结构设计强度的要求。其中,板壳结构最大等效应力为

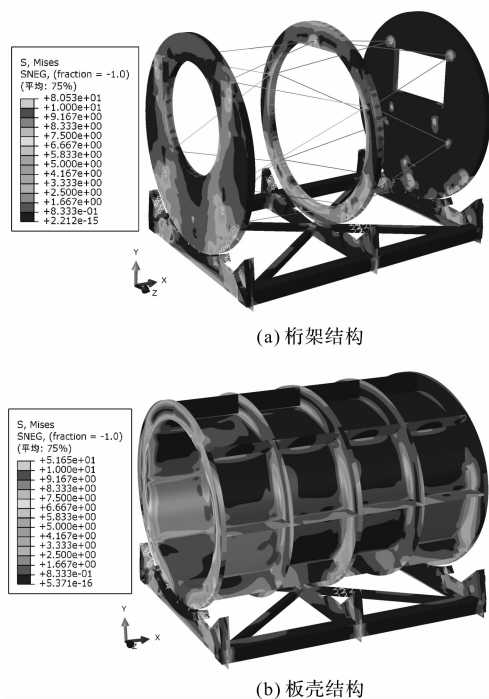


图5 WFOS 最不利转动方位应力云图

51.65 MPa, 小于桁架结构最大等效力 80.53 MPa, 故板壳结构具有较好的内力分布表现。

WFOS 结构模态频率与振型可以通过结构的无阻尼振动方程得到, 即:

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{u}} + \mathbf{K}\mathbf{u} = 0 \quad (1)$$

式中: $\mathbf{u}$ —结构位移矢量; $\mathbf{M}$ —结构质量矩阵; $\mathbf{K}$ —结构刚度矩阵。

假定多自由度体系的自由振动为简谐振动, 则其位移函数可写成:

$$\mathbf{u} = \mathbf{U}\sin(\omega t + \theta) \quad (2)$$

式中: $\mathbf{U}$ —振型模态矩阵; θ —相位角。

无阻尼振动方程的特征方程为:

$$|\mathbf{K} - \omega_i^2 \mathbf{M}| = 0 \quad (3)$$

式中: ω_i —结构固有圆频率。

则结构固有频率为:

$$f_i = \frac{2\pi}{\omega_i} \quad (4)$$

式中: f_i —结构固有频率。

其中的最小值即为系统的基频, 相应的振型为基本振型。

两种结构的一阶模态振型如图 6 所示。

由图 6 可知, 两种结构一阶振型均为沿结构长度方向的平移模态。其中, 底部支架为结构薄弱部位, 在后续优化时将考虑增强该部位; WFOS 桁架结构基频为 5.75 Hz, 板壳结构基频为 6.97 Hz, 两种结构基频均大于 4 Hz, 故这两种结构方案均满足设计要求。经

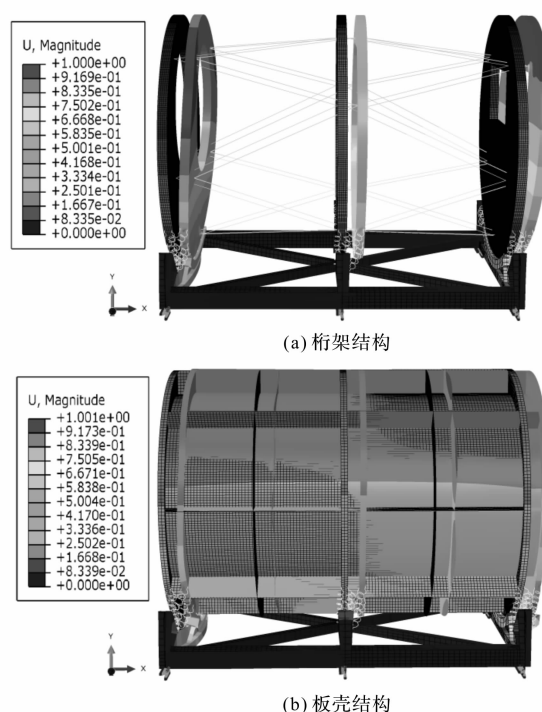


图6 WFOS 一阶模态振型图

比较发现, 板壳结构基频大于桁架结构, 说明板壳方案的结构刚度更大。

综合以上分析, WFOS 桁架结构和板壳结构性能对比如表 2 所示。

表2 WFOS 桁架结构和板壳结构性能对比

参数	桁架结构	板壳结构
主结构质量/t	3.77	4.91
基频/Hz	5.75	6.97
最大绝对变形/mm	0.444	0.665
最大相对变形/mm	0.248	0.283
最大应力/MPa	80.53	51.65

由表 2 可知, 桁架支撑结构具有较好的抵抗变形能力, 但由于其圆盘内部采用轻量化孔结构形式, 加工制造困难, 且成本高、制造周期长, 后续轻量化空间较小; 而板壳支撑结构整体性较好, 结构刚度分布均匀, 加工制造简单, 适合进行较高度度的轻量化设计。

虽然桁架结构质量相对板壳结构较小, 但仍不能满足结构轻量化设计要求, 碳纤维复合材料在轻量化设计上具有较大优势, 但其成形工艺复杂, 不适合应用于桁架结构。为满足结构轻量化设计要求, 笔者选择板壳支撑结构进一步进行研究。

3.3 WFOS 钢钢与复合材料板壳结构性能对比

若原有结构形式不变, 采用高比强度、高比刚度的碳纤维复合材料进行材料替换是一种有效的轻量化方法^[14]。

在这里, 其主结构的轻量化材料选用碳纤维/环氧复

合材料(T300/5208),其单层板力学性能参数如表3所示。

表3 T300/5208 单层板力学性能参数

属性	参数
0°拉伸模量/GPa	181
90°拉伸模量/GPa	10.3
剪切模量/GPa	7.17
ν_{12} 泊松比	0.28
密度/(g·cm ⁻³)	1.75

在 MSC Patran 软件中,利用有限元法计算可得 T300/5208 对称铺层 1 mm 层合板的等效弹性模量为 69.7 GPa。在材料替代中,考虑到 WFOS 结构设计要求,基于等刚度近似理论^[15],对结构板壳壁厚进行修改以保持结构刚度不变。

其中,单个构件刚度与厚度的近似关系为:

$$K = \beta(\lambda) Et^\eta \quad (5)$$

式中: $\beta(\lambda)$ —构件几何系数; E —弹性模量; t —构件厚度; η —厚度指数系数。

式(5)表明,结构刚度是厚度的非线性函数。在不同工况下,各种形状的板壳构件都适用该公式。

假设原材料的弹性模量为 E_0 , 替换后材料的弹性模量为 E_1 ($E_0 > E_1$), 则可得:

$$\delta_t = \frac{t_1}{t_0} = \left(\frac{E_0}{E_1} \right)^{\frac{1}{\eta}} \quad (6)$$

式中: δ_t —材料替换前后的厚度之比。

基于上述理论,指定厚度指数系数为 2,通过计算得到板壳支撑结构复合材料圆柱壳壁及加筋肋板厚分别为 7 mm 和 14 mm。

根据复合材料经典层合板理论^[16],层合板的物理方程可表示为:

$$\begin{bmatrix} N \\ M \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ B & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \epsilon \\ \kappa \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中: N —总内力矩阵; M —总弯矩矩阵; A —拉伸刚度矩阵; B —耦合刚度矩阵; D —弯扭刚度矩阵; ϵ —应变矩阵; κ —曲率矩阵。

由于碳纤维复合材料板壳支撑结构是由单层板通过不同铺层角度和顺序铺设而成的层合板结构,根据 WFOS 板壳支撑结构的情况与结构形式,考虑到实际的工程使用要求,笔者选取经典铺层 $[45^\circ/-45^\circ/0^\circ/90^\circ]$ 。进行分析,铺层沿中面对称,以消除耦合刚度,4 个角度的铺层比例均为 25%,单层板厚度为 0.25 mm。

同样,选择结构质量、基频、最大变形与应力作为结构性能的评价指标,WFOS 钢钢与复合材料板壳结构性能对比如表 4 所示。

表4 WFOS 钢钢与复合材料板壳结构性能对比

参数	钢钢	碳纤维复合材料
主结构质量/t	4.91	1.93
基频/Hz	6.97	7.98
最大绝对变形/mm	0.665	0.639
最大相对变形/mm	0.283	0.286
最大应力/MPa	51.65	30.94

由表 4 可知,碳纤维复合材料板壳结构与钢钢材料板壳结构最大变形基本一致,最大应力减少至 30.94 MPa,结构重量为 1.93 t,较原钢钢材料板壳结构质量减少达 60.6%,很好地实现了结构轻量化设计目的。

此外,复合材料板壳结构基频为 7.98 Hz,较钢钢材料板壳结构有所提高,具有更好的振动特性。因此,碳纤维复合材料板壳结构具有很好的应用前景。

总之,碳纤维复合材料越来越多地应用于大型望远镜光学仪器支撑结构,虽然已有这方面的研究,但内容和深度上有限。随着地基大口径望远镜尺度的不断增大和技术指标的提升,复合材料在此类结构上的应用将更广泛。

4 结束语

笔者运用有限元软件分别建立了 WFOS 桁架与板壳支撑结构模型,分析了其在最不利转动方位重力作用下的结构性能;通过对结构形式以及轻量化材料选取,设计出了符合使用要求、制造相对简单的碳纤维复合材料板壳支撑结构,即碳纤维复合材料板壳结构质量为 1.93 t,结构最大相对变形为 0.286 mm,最大应力为 30.94 MPa,基频为 7.98 Hz。

最后笔者利用有限元软件对此进行了分析验证。结果表明:在满足结构变形性能的前提下,碳纤维复合材料板壳结构提高了宽视场光谱仪板壳支承结构的强度,改善了其振动特性,符合 WFOS 的使用要求。

值得指出的是,该研究未考虑复合材料结构加工制造和造价的因素。通常情况下,复合材料结构在制备工艺、连接构造、尺寸控制等方面比钢结构存在更多问题,而且造价较高,值得今后进一步研究。

(下转第 1038 页)

本文引用格式:

郑凌宇,张大旭,AMAN·Shrestha,等.30 m 望远镜宽视场光谱仪支撑结构选型研究[J].机电工程,2020,37(9):1020-1025,1038.

ZHENG Ling-yu, ZHANG Da-xu, AMAN·Shrestha, et al. Structural form selection of supporting structures for WFOS of TMT[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2020,37(9):1020-1025,1038.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>