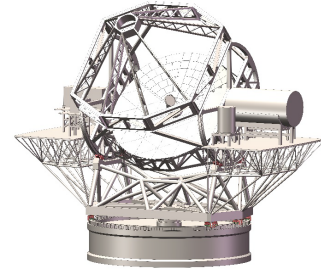




DOI: 10.12086/oe.2022.210402

# 三十米中国未来巨型望远镜 主桁架结构的概念设计

胡守伟<sup>1,2\*</sup>, 张勇<sup>1,2</sup>, 王跃飞<sup>1,2</sup>, 王佑<sup>1,2</sup><sup>1</sup>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;<sup>2</sup>中国科学院天文光学技术重点实验室, 江苏 南京 210042

**摘要:** 随着天文科学日新月异的发展和性能越来越高的天文望远镜的迫切需求, 目前, 国际上正在积极建设口径 20 m~40 m 量级的极大口径光学红外望远镜。这些望远镜为了实现更大口径, 也面临着巨大的技术挑战。其中, 为使望远镜达到光学设计要求, 需要创新解决方案来满足足够的负荷分担要求。本文简单介绍了国际上极大望远镜主桁架结构及关键结构件的多种设计方法, 分析了各种方案的优缺点, 提出了一种新的轻量化钣金焊接结构的 30 m 中国未来巨型望远镜方案, 并在此基础上进行了大量的有限元建模、优化和仿真分析。分析结果显示, 望远镜指向天顶时, 第一阶模态频率为 2.3 Hz, 结构最大变形为 3.8 mm; 而望远镜指向水平方向时, 第一阶模态频率减小为 2.1 Hz, 结构最大变形为 2.9 mm, 满足了望远镜的相关技术要求, 为我国未来巨型望远镜的研制提供了技术参考。

**关键词:** 极大望远镜; 主桁架结构; 有限元分析; 模态; 结构变形; 中国未来巨型望远镜

**中图分类号:** P111.2

**文献标志码:** A

胡守伟, 张勇, 王跃飞, 等. 三十米中国未来巨型望远镜主桁架结构的概念设计 [J]. 光电工程, 2022, 49(6): 210402

Hu S W, Zhang Y, Wang Y F, et al. Concept design for the main structure of 30 m Chinese Future Giant Telescope[J].

*Opto-Electron Eng*, 2022, 49(6): 210402

## Concept design for the main structure of 30 m Chinese Future Giant Telescope

Hu Shouwei<sup>1,2\*</sup>, Zhang Yong<sup>1,2</sup>, Wang Yuefei<sup>1,2</sup>, Wang You<sup>1,2</sup><sup>1</sup>Nanjing Institute of Astronomical Optical & Technology, CAS, Nanjing, Jiangsu 210042, China;<sup>2</sup>CAS Key Laboratory of Astronomical Optics & Technology, Nanjing Institute of Astronomical Optics & Technology, Nanjing, Jiangsu 210042, China

**Abstract:** In recent years, with the fast development of astronomical science and higher requirements for astronomical telescope's performance, the ground-based extremely large astronomical optical telescopes with aperture 20 m~40 m in diameter are being actively studied and constructed internationally. With the increase of the telescope aperture, these telescopes should face even greater challenges. In order to make them meet their optical design requirements, new solutions are needed to provide adequate load sharing. In this paper, several design methods of the main structures and key components of the extremely large telescopes are summarized, the advantages and disadvantages of various schemes are analyzed, a lightweight sheet metal welding structure for the 30 m Chinese Future Giant Telescope (CFGT) is put forward, and the finite element model design and analysis are carried out. The results show that when the telescope points to the zenith, the first modal frequency is 2.3 Hz

收稿日期: 2021-12-17; 收到修改稿日期: 2022-03-16

基金项目: 国家自然科学基金天文联合基金重点项目 (U2031207); 国家自然科学基金天文联合基金培育项目 (U1931126)

\*通信作者: 胡守伟, swhu@niaot.ac.cn。

版权所有©2022 中国科学院光电技术研究所

and the maximum deformation of the structure is 3.8 mm. While the telescope points in the horizontal direction, the first modal frequency is reduced to 2.1 Hz and the maximum deformation of the structure is 2.9 mm, which meets the technical requirements of CFGT. The design provides a technical reference for the development of extremely large telescopes in China in the future.

**Keywords:** extremely large telescope; main truss structure; finite element analysis; mode; deformation; Chinese Future Giant Telescope

## 1 引言

近年来,国际上正在研究和筹建中的口径 20 m~40 m 量级的地基极大口径天文光学望远镜主要有美国 30 m 望远镜 (TMT)、巨型麦哲伦望远镜 (GMT) 以及欧洲极大望远镜 (E-ELT)。其中欧洲南方天文台 39 m E-ELT 望远镜 (计划安装在智利的塞罗亚马桑) 和美国 30 m 望远镜 TMT (计划安装在夏威夷莫纳克亚) 均采用拼接镜面技术,而巨型麦哲伦望远镜 GMT (计划安装在智利的拉斯坎帕纳斯) 等效口径 24.5 m, 将采用 7×8.4 m 多镜面技术。这些望远镜的整体架构和主要系统的解决方案都是相当多样的,但也有些重要的共同点值得借鉴。本文将针对中国提出的 30 m 中国未来巨型望远镜 CFGT (Chinese Future Giant Telescope) 的主桁架支撑结构方面进行研究。

在极大望远镜系统中,为了获得高质量的成像,在光学、机械、自动化控制等多方面都存在着巨大的挑战。其中就主桁架结构而言,由于制造、安装、重力及传热和材料性质变化等原因,望远镜的主桁架结构会发生弹性变形和刚体位移。刚体位移和弹性变形可以通过主桁架结构的优化设计达到最小,再通过位移促动器的拼接镜面主动光学控制,使其满足高性能光学镜面支撑要求。

## 2 极大望远镜主桁架结构介绍

### 2.1 典型案例

目前,所有极大望远镜的解决方案都是基于所谓的“摇椅概念 (rocking chair concept)”而进行设计的。高度结构 (或望远镜镜筒) 设有两个大摇架,它们由方位结构支承在四个点上。然而,各望远镜对这种解决方案的实现方式却是有区别的,主要体现在高度结构的设计上,如图 1 所示。

极大望远镜的方位和高度结构可以使用大型焊接组件或使用更传统的典型矩形或圆形空心截面的空间网格结构。E-ELT、TMT 望远镜采用了节点对节点的连接方式,依次从顶层往下进行拓扑,这种结构节点连接关系简单,整体刚度较大,为上层桁架结构提供了很好的支撑,但是结构杆件繁多,其下层杆件较粗,重量较大,需要自下而上逐渐减小杆件口径而达到顶层拼接镜面的精密接口。TMT 最初的主镜桁架变形量大约 10 mm,为了减小位移促动器调节补偿量,在桁架结构的外围底部又增加了一层支撑杆件,称之为“Double Lower Tube Structure”。加固之后的主镜桁架支撑变形量可以控制在 5 mm 以内<sup>[1-3]</sup>,见图 2。

E-ELT 主镜桁架支撑采用的钢架桥结构模式,它

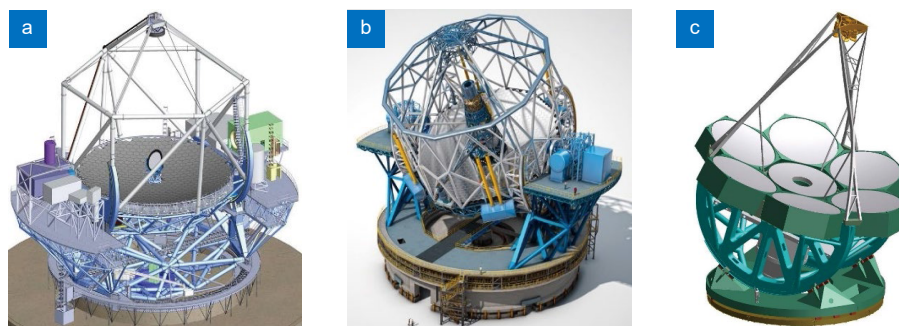


图 1 极大望远镜三维设计图。

(a) 30 米望远镜; (b) 欧洲极大望远镜; (c) 巨型麦哲伦望远镜

Fig. 1 Rendered images for the extremely large telescopes.

(a) Thirty Meter Telescope; (b) Extremely Large Telescope; (c) Giant Magellan Telescope

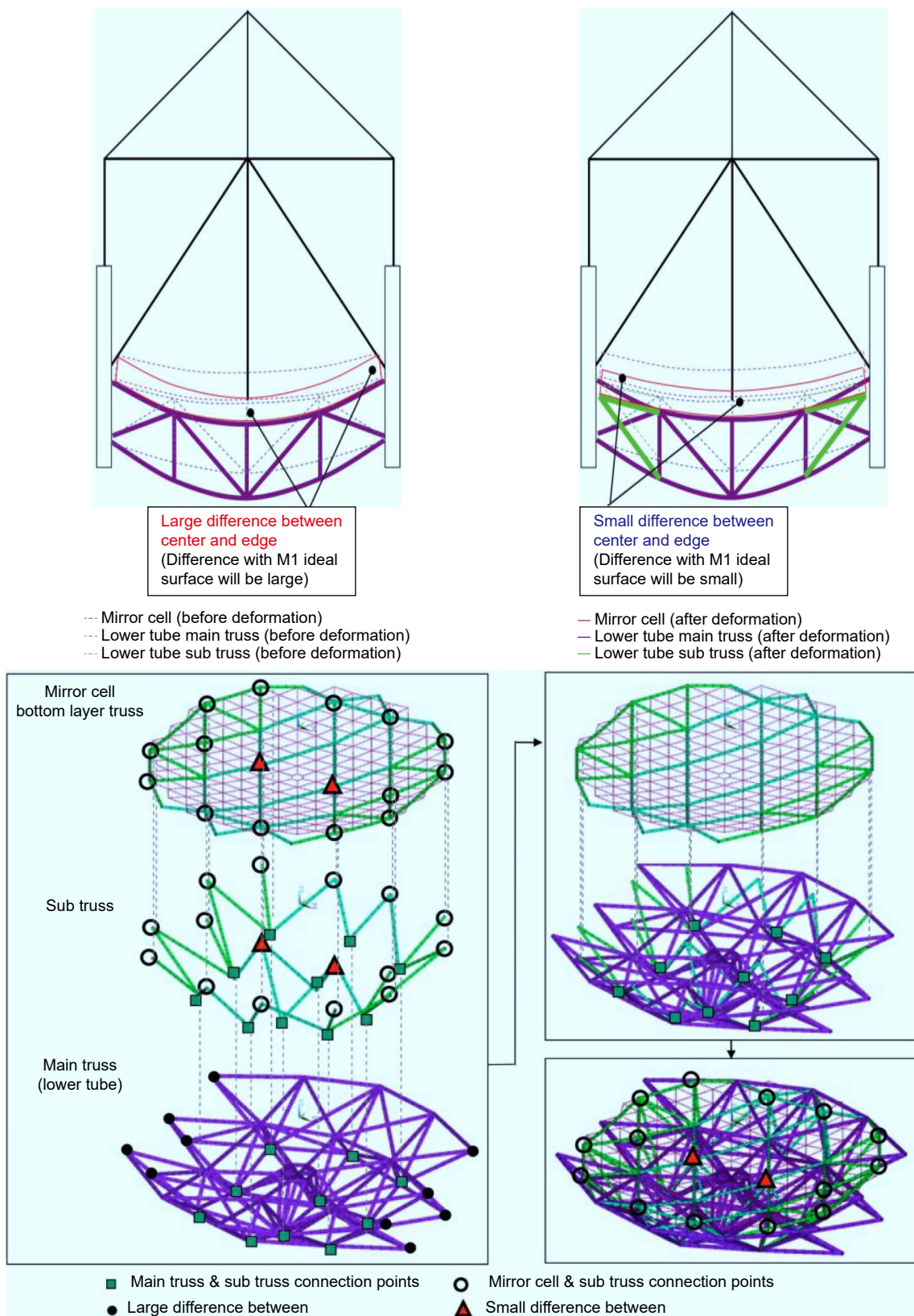


图 2 TMT 主镜桁架支撑结构的设计与优化

Fig. 2 Design and optimization of trussed supporting structure for the primary mirror of TMT

是由受弯的上部梁结构与承压的下部立柱整体结合在一起的结<sup>[4-8]</sup>。由于梁与柱的刚性连接，梁因柱的抗弯刚度而得到卸载作用，整个体系是压弯结构，也是有推力的结构。钢架桥的下净空间比较大，在同样净空要求下可修建较小的跨径，但是钢架桥结构施工较

复杂，E-ELT 主桁架支撑结构最大位移为 5.92 mm，见图 3。

GMT 望远镜的主镜是由多块镜面组合的，而不是常见拼接镜面<sup>[9-12]</sup>。因此，其高度结构采用的是轻量化焊接组件支撑方式，这种设计无需考虑顶层节点

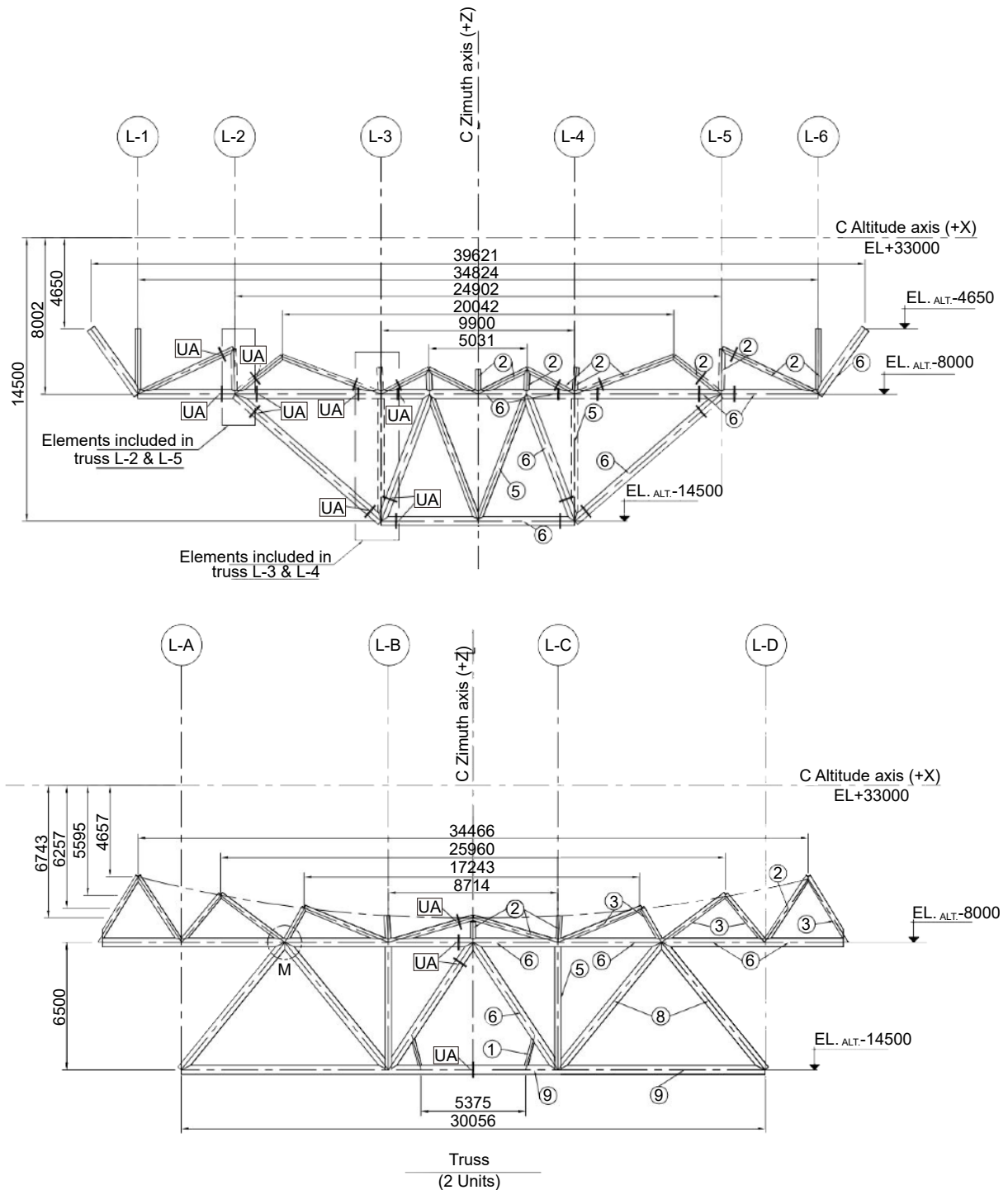


图 3 E-ELT 主镜钢架桥支撑结构

Fig. 3 Steel frame bridge supporting structure for the primary mirror of E-ELT



的对应问题, 见图 4。

### 2.2 新提出的设计方案

根据我们在国家重大科技基础设施 LAMOST 和多架射电望远镜机架桁架的建设经验基础上, 基于大型焊接组件 (参考 GMT 方案) 的设计理念, 提出了一种新的高度焊接结构支撑方式, 这种设计将非常利于

拼接镜子室和摇椅架结构的接口连接, 如图 5 所示。

该高度结构是一种轻量化的等格栅焊接结构, 等格栅网格由一系列钣金件组成, 通过沿不同方向延伸的一系列肋条彼此焊接, 并使用三角形结构, 整体结构力流的传递采用拱形钢架桥模式, 这种设计可以使

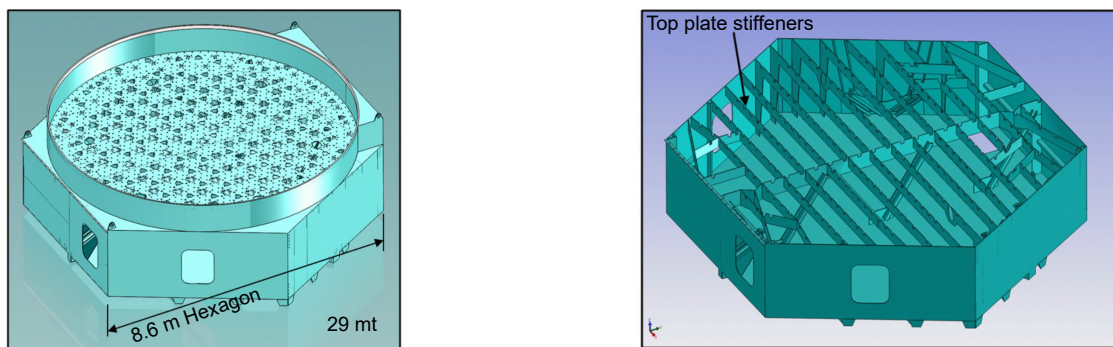


图 4 GMT 主镜钣金焊接支撑结构

Fig. 4 Sheet metal welding support structure for the primary mirror of GMT

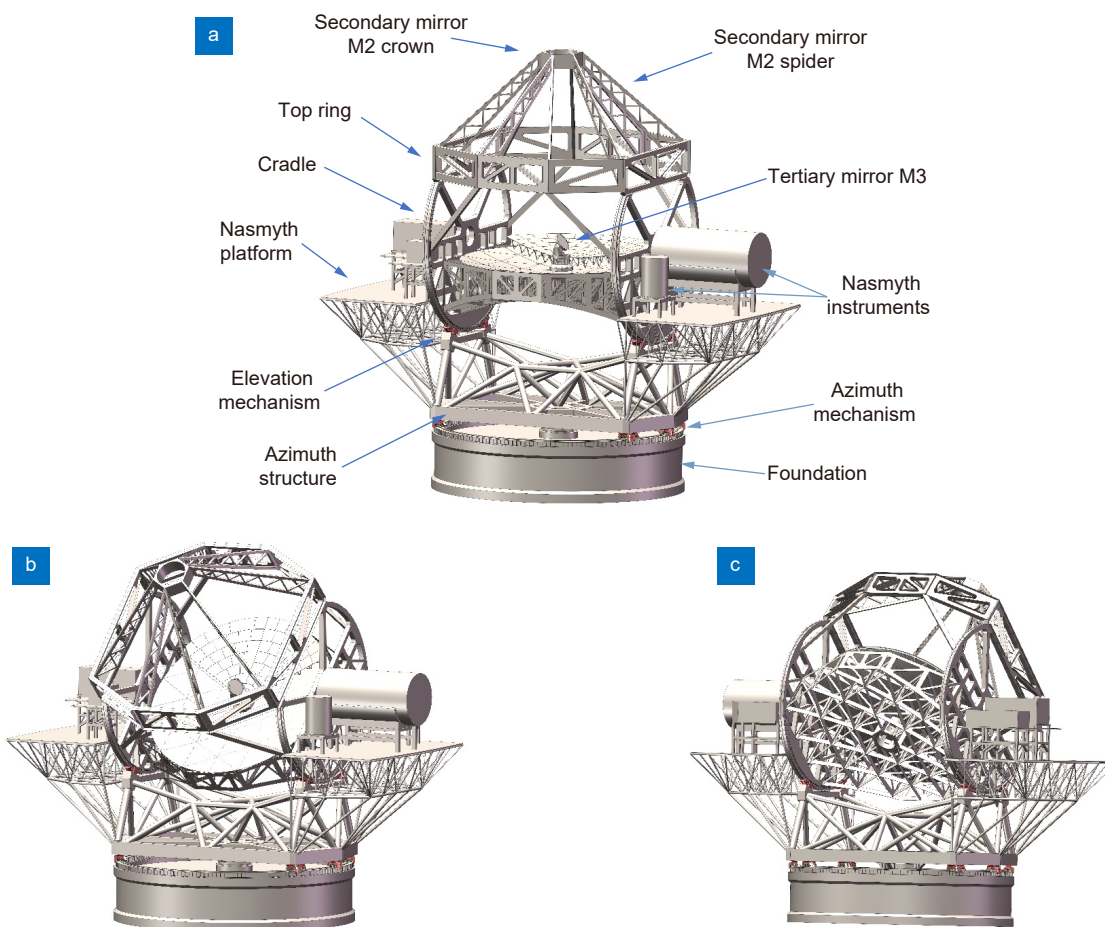


图 5 30 米中国未来巨型望远镜主体桁架结构概念设计图

Fig. 5 Concept design for the main truss structure of 30 m CFGT

支撑结构达到轻质且各向同性的效果, 该概念设计如图 6。除了轻量化之外, 这种等栅格结构的制造和装配比传统的 M1 支撑结构空间桁架的解决方案更简单。因为可以不用考虑传统桁架管件结构接口的设计, 而且钣金结构件非常有利于运输。该结构还可以减轻主镜结构和副镜结构关于高度轴系不平衡带来的配重设计难题。此外, 等栅格结构允许在镜子下方有更多的开放空间, 以便以简单的方式实现从下方到镜子的维护, 这在空间桁架的情况下是很难实现的。

### 3 分析与讨论

#### 3.1 模态分析

为了评估该 30 m CFGT 望远镜方案结构的性能, 使用 ANSYS 进行建模, 采用质量单元对非结构仪器和反射镜进行建模, 主镜 M1 每块子镜单元质量为 270 kg, 副镜单元质量为 2 t, 三镜质量为 1.2 t。参考国内外大型天文望远镜分析相关技术资料, 弹簧单元用于模拟望远镜方位和高度轴系静压油垫支撑以及直接驱动。为了节省计算资源, 忽略土壤和混凝土基础的

建模分析。表 1 列出了模型中使用的弹簧刚度取值。静压油垫采用油膜厚度 90  $\mu\text{m}$  计算。对于结构钢, 弹性模量为 200 GPa, 泊松比率为 0.3, 密度为 7850  $\text{kg}/\text{m}^3$ , 为了考虑连接质量, 增加 15% 至 9028  $\text{kg}/\text{m}^3$ , 阻尼采用 2%。耐焦平台质量按照 97.28  $\text{kg}/\text{m}^2$  计算。

当指向天顶和水平方向时, 望远镜结构的主要特征频率如表 2、3。第一模态值为 2.3 Hz, 望远镜指向天顶, 减少到 2.1 Hz, 分析结果如图 7 和图 8 所示。值得注意的是, 望远镜指向天顶时, 望远镜第一模出现在 M1 桁架中心, 表现为扭转变形。经过仔细分析以及研究发现, 为了避免高度轴系侧向液压支撑出现过约束现象, 采用图 9 所示的液压油路设计, 该设计引起了上述 M1 第一模态变化现象。为了避免该设计对主镜造成干扰, 将采用第二套设计方案, 限于篇幅原因, 后续将对该液压油路设计进行单独详细分析, 如图 10 所示。

另外, 由于高度轴系液压管路改进后, 望远镜最薄弱的环节将来自在副镜 M2 支撑 spider 的弯曲和扭转, 后续应该进行风载流体动力学分析, 对 M2 的 spider 支撑进行结构加强或者设置柔性结构的改进方

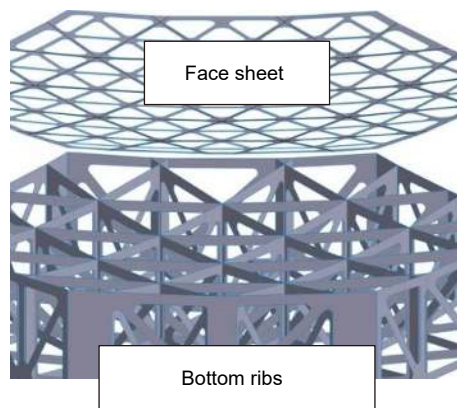


图 6 30 m CFGT 望远镜 M1 主镜室结构概念设计图

Fig. 6 Concept design for the primary M1 cell structure of 30 m CFGT telescope

表 1 有限元模型中使用的弹簧刚度

Table 1 Spring stiffnesses used in finite element model

弹簧类型	弹簧方向	刚度/(N/m)
静压油垫	方位轴轴向	$2.65 \times 10^{10}$
	方位径向	$1.67 \times 10^9$
	高度径向	$1.25 \times 10^{10}$
	高度轴向	$1.55 \times 10^9$
直线驱动	方位切向	$1.75 \times 10^8$
	高度切向	$1.49 \times 10^8$

表 2 CFGT 望远镜指向天顶时的模态值

Table 2 Eigenfrequencies for the CFGT telescope pointing at zenith

模态	频率/Hz	状态
1	2.3	M1 桁架中心扭转
2	2.4	M2 spider 弯曲
3	2.5	M2 spider 扭转

表 3 CFGT 望远镜指向水平时的模态值

Table 3 Eigenfrequencies for the CFGT telescope pointing at horizon

模态	频率/Hz	状态
1	2.1	M2 spider 弯曲
2	2.2	M1 桁架中心扭转
3	2.4	M2 spider 扭转

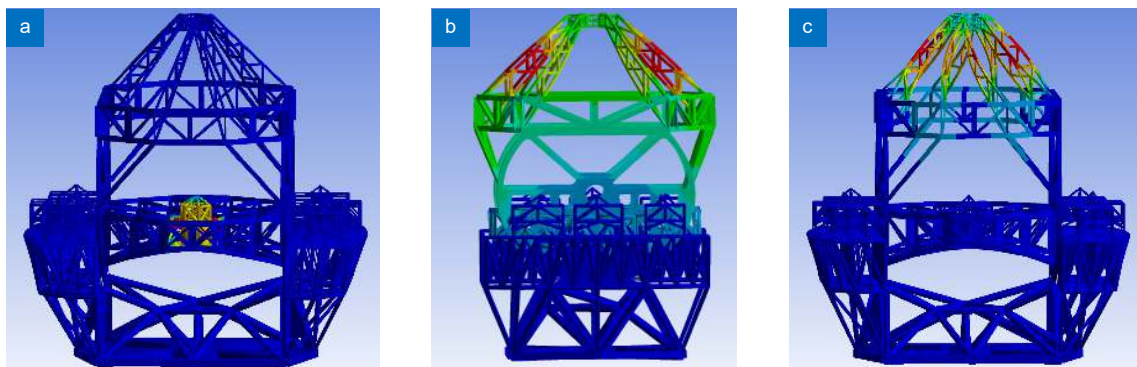


图 7 指向天顶方向的模态图。

(a) 模态 1: 2.3 Hz; (b) 模态 2: 2.4 Hz; (c) 模态 3: 2.5 Hz

Fig. 7 Mode shapes for pointing to zenith.

(a) Mode 1, 2.3 Hz; (b) Mode 2, 2.4 Hz; (c) Mode 3, 2.5 Hz

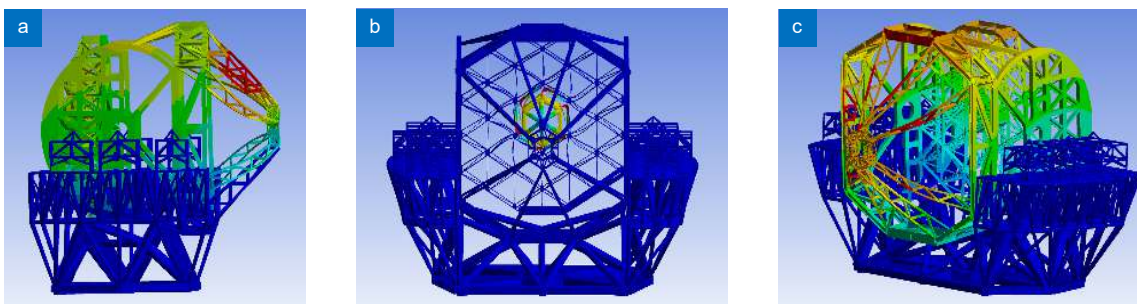


图 8 指向水平方向的模态图。

(a) 模态 1: 2.1 Hz; (b) 模态 2: 2.2 Hz; (c) 模态 3: 2.4 Hz

Fig. 8 Mode shapes for pointing to horizon.

(a) Mode 1, 2.1 Hz; (b) Mode 2, 2.2 Hz; (c) Mode 3, 2.4 Hz

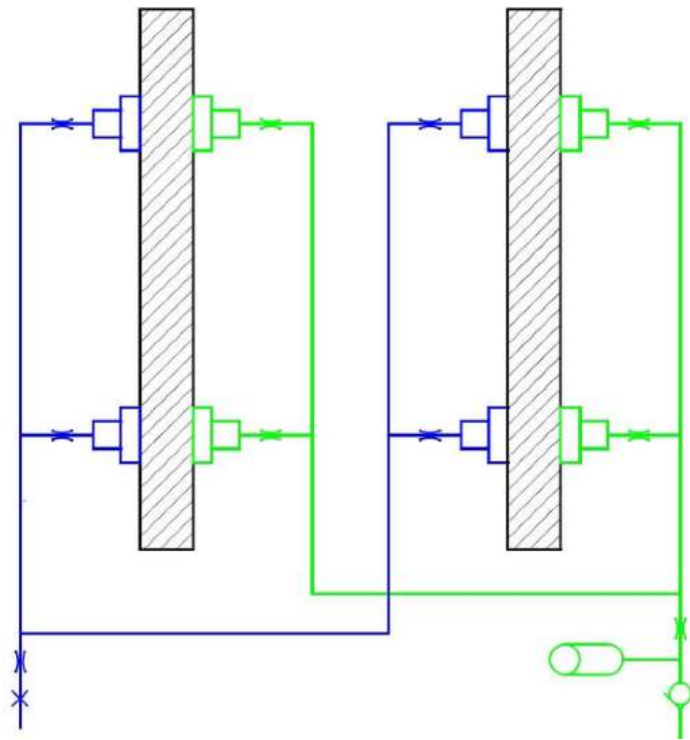


图 9 最初高度轴系液压 whiffletree 定位方式  
Fig. 9 Original elevation lateral bearings hydraulic whiffletree

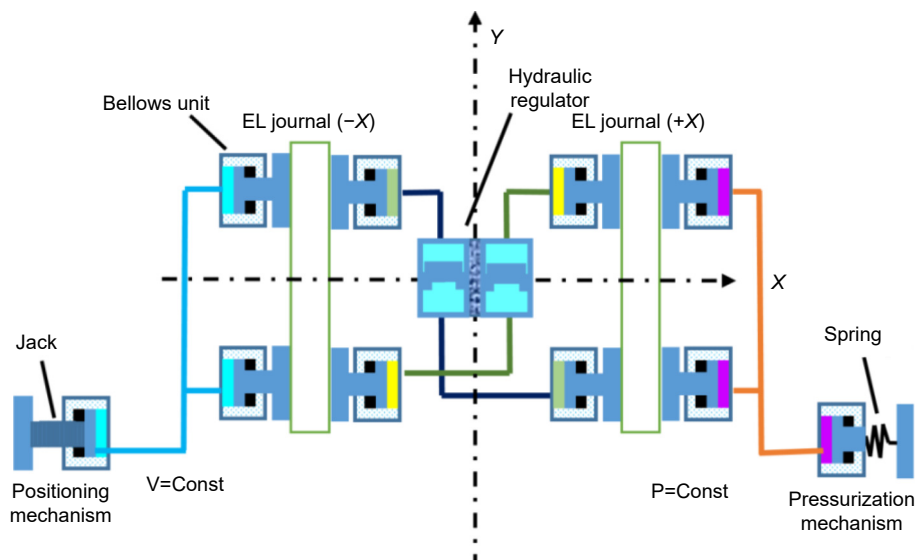


图 10 最新高度轴系液压 whiffletree 控制系统  
Fig. 10 Latest elevation lateral bearings hydraulic whiffletree arrangement



案和研究。

表 4 展示了该 CFGT 设计与 GMT、TMT 以及 E-ELT 主模态频率的对比, 可以看出, 等格栅焊接结构表现出了较好的刚性, 其第一频率略好于 TMT 的 2.0 Hz, 这主要是因为与传统的桁架结构相比, 具有高刚度-重量比的优势。

### 3.2 结构变形

望远镜的主桁架结构变形主要是由重力、温度以及稳态风荷载引起的, 对望远镜主桁架模型分别在重力、温度以及稳态风荷载三种载荷作用下进行了有限

元分析。分析结果表明, 在重力载荷作用下, 望远镜在指向天顶和水平方向时最大变形值分别为 3.8 mm 和 2.9 mm, 其中大部分为刚体位移, 并不影响光学变形, 见图 11。

望远镜主镜 M1 主桁架支撑结构在指向天顶时的总变形为 4.65 mm, 去除刚体位移后的相对位移不超过 1.9 mm, 其最大应力为 12.8 MPa。该位移变化完全处于位移促动器的可补偿范围之内, 见图 12。

图 13(a) 是望远镜在指向天顶时在垂直方向施加 6 °C 均匀梯度载荷变化情况下的结构变形, 环境参考

表 4 CFGT 望远镜与其它极大望远镜主模态频率对比

Table 4 Comparison about dominant modal eigenfrequencies for the extremely large telescopes

描述	GMT	TMT	E-ELT	本设计
主模态频率范围/Hz	3~12	2~5	1.56~6.0	2~5

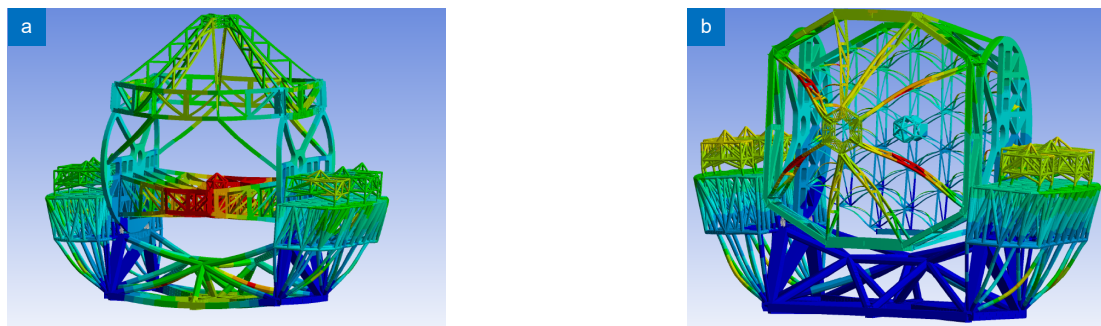


图 11 在重力载荷方向作用下的静态变形。

(a) 指向天顶; (b) 指向水平

Fig. 11 Gravitational deformation distributions pointing at zenith and horizon.

(a) Pointing to zenith; (b) Pointing to horizon

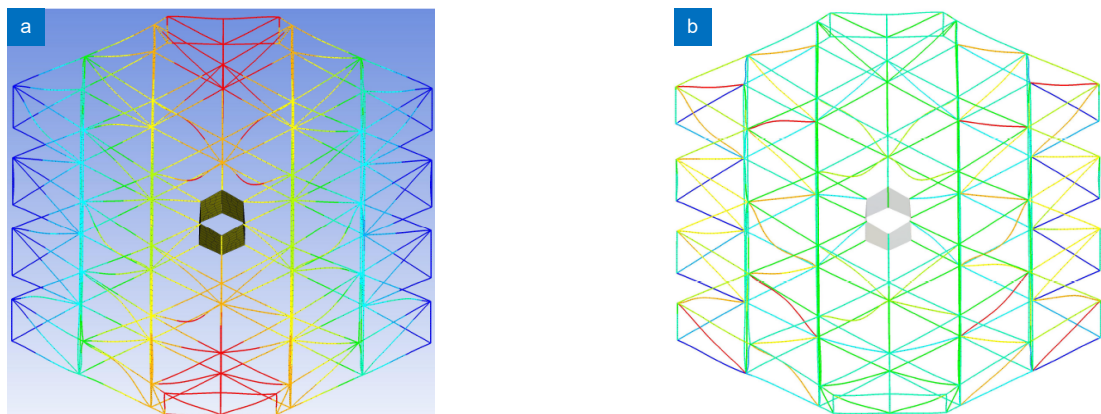


图 12 望远镜主镜桁架支撑结构 Z 向变形和等效应力。

(a) Z 轴方向相对变形; (b) 等效应力图

Fig. 12 Relative deformation along Z-axis and equivalent stress for the trussed supporting structure of the primary mirror M1.

(a) Relative deformation along the Z-axis; (b) Equivalent stress

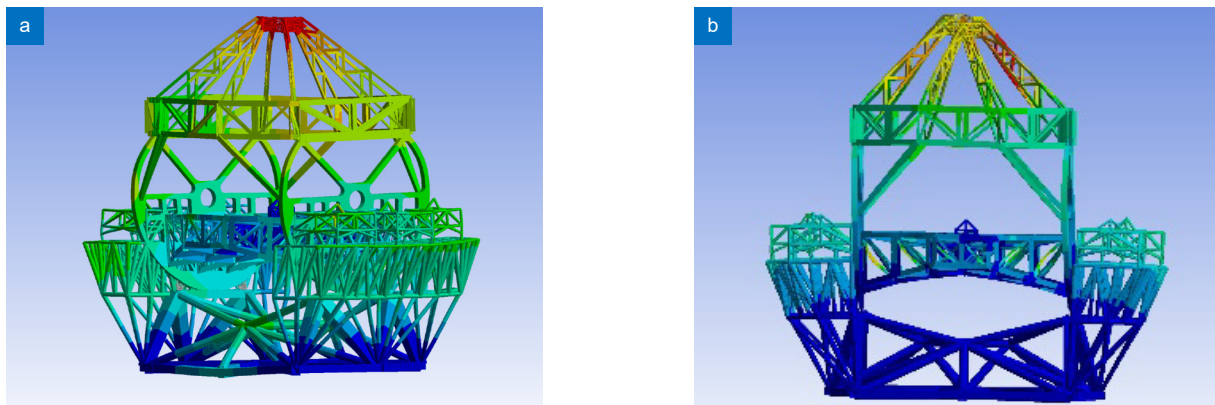


图 13 在望远镜在温度和稳态风荷载作用下的静态变形。

(a) Z 轴方向施加 0.12 °C/m 温度梯度载荷; (b) 平均静态风速 10 m/s

Fig. 13 Displacement distribution due to temperature and static wind for configuration.

(a) Temperature gradient of 0.12 °C/m along the Z-axis; (b) Static wind 10 m/s

温度为 22 °C, 望远镜总高度 68 m, 去除地基以及建筑高度 18 m, 望远镜实际结构高度 50 m, 从望远镜方位轴结构底部开始施加 0.12 °C/m 的线性函数温度载荷, 望远镜整体结构最大变形不超过 1.2 mm; 图 13(b) 是望远镜主体结构在 10 m/s (在顺风方向与正交方向的等效静态作用力大约分别为 10 kN 和 25 kN) 静态风荷载作用下的最大变形为 0.13 mm, 对结构的影响较小。

## 4 结 论

本文针对 30 m 中国未来巨型望远镜的主体桁架设计, 提出了一种新颖的钣金组件结构方案。经过有限元分析, 结果表明, 初步设计满足了该望远镜相关使用要求, 并且最低谐振频率大于 2 Hz, 主镜支撑结构相对变形小于 1.9 mm, 这种解决方案提供了非常好的刚度-质量比以及坚固的结构支撑。望远镜结构设计的发展, 包括其设计要求, 是一个迭代过程, 其中变形和谐振频率要求将从相关的误差预算中进行分配。我们将继续使用 FEA 工具和结合合理的工程实践指导和改进设计。下一阶段的望远镜结构设计工作将强调光学组件 (如拼接主镜、副镜支撑等) 的详细设计、局部结构的刚性增加和动力特性分析。

## 致 谢

本文工作得到了国家重大科技基础设施 LAMOST 望远镜以及国家自然科学基金天文联合基金重点项目

资助 (U2031207, U1931126)。郭守敬望远镜 (大天区面积多目标光纤光谱天文望远镜, LAMOST) 是由国家发展和改革委员会资助, 由中国科学院承建的国家重大科学工程项目。LAMOST 望远镜由中国科学院国家天文台负责运行和管理。国家自然科学基金天文联合基金重点项目 (批准号: U2031207) 的项目名称: 极大望远镜边缘传感器关键技术研究。国家自然科学基金天文联合基金培育项目 (批准号 U1931126) 的项目名称: 极大口径拼接镜面望远镜差动调频式电感位移传感器的关键技术研究。

## 参考文献

- [1] Usuda T, Ezaki Y, Kawaguchi N, et al. Preliminary design study of the TMT telescope structure system: overview[J]. *Proc SPIE*, 2014, **9145**: 91452F.
- [2] Ezaki Y, Kato A, Hattori T, et al. Overview of key technologies for TMT telescope structure[J]. *Proc SPIE*, 2016, **9906**: 99060Y.
- [3] Kamikawa K, Nagai A, Ashida T, et al. High precision machining in TMT (Thirty Meter Telescope) structure manufacturing[J]. *Proc SPIE*, 2020, **11445**: 114451R.
- [4] The E-ELT Project Office. *The E-ELT Construction Proposal* [M]. Garching: European Southern Observatory, 2011.
- [5] Chiozzi G, Kiekebusch M, Kornweibel N, et al. The ELT control system[J]. *Proc SPIE*, 2018, **10707**: 107070U.
- [6] Argomedo J, Andolfato L, Diaz Cano C, et al. ESO ELT M1 local control system software design and development status (Conference Presentation)[J]. *Proc SPIE*, 2018, **10707**: 107070V.
- [7] Nijenhuis J, Heijmans J, den Breeje R, et al. Designing the primary mirror support for the E-ELT[J]. *Proc SPIE*, 2016, **9906**: 990616.
- [8] Tamai R, Koehler B, Cirasuolo M, et al. The ESO's ELT

- construction progress[J]. *Proc SPIE*, 2020, **11445**: 114451E.
- [9] Fanson J, McCarthy P J, Bernstein R, et al. Overview and status of the Giant Magellan Telescope project[J]. *Proc SPIE*, 2018, **10700**: 1070012.
- [10] Angeli G Z, Bernstein R, Walls B, et al. Systems engineering for the Giant Magellan Telescope[J]. *Proc SPIE*, 2018, **10705**: 107050I.
- [11] Martin H M, Allen R, Gasho V, et al. Manufacture of primary mirror segments for the Giant Magellan Telescope[J]. *Proc SPIE*, 2018, **10706**: 107060V.
- [12] Fischer B M, Ranka T, Aguayo F, et al. The purpose, plan, and progress of the Giant Magellan Telescope primary mirror off-axis segment test cell[J]. *Proc SPIE*, 2020, **11445**: 114451H.

## 作者简介

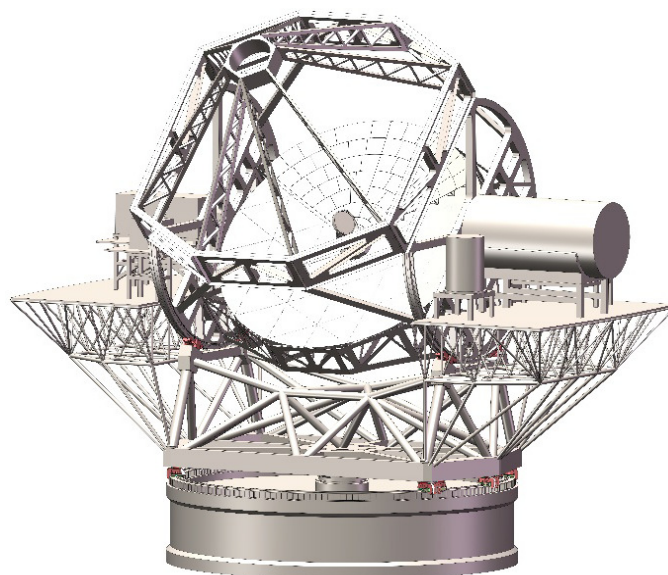


【通信作者】胡守伟(1987-), 男, 博士, 2018年获得中国科学院南京天文光学技术研究所天文技术与方法博士学位, 现为中国科学院南京天文光学技术研究所特别研究助理, 主要从事大型望远镜机械结构技术方面的研究。

E-mail: swhu@niaot.ac.cn

# Concept design for the main structure of 30 m Chinese Future Giant Telescope

Hu Shouwei<sup>1,2\*</sup>, Zhang Yong<sup>1,2</sup>, Wang Yuefei<sup>1,2</sup>, Wang You<sup>1,2</sup>



**Overview:** In order to achieve the desired performance a compact and lightweight isogrid fully integrated into the Altitude Structure is proposed. This structure is adapted to the mirror interfaces of the 30 m Chinese Future Giant Telescope. The aim of the M1 Support Structure is to provide stiff support for the Primary Mirror and, at the same time, contribute to the stiffness of the Altitude Structure, using a lightweight solution so that the unbalance of the altitude structure does not increase in an important way. Besides, the M1 Cell needs to offer an adequate interface to the different mirrors and thus avoid the generation of important local displacements at their support due to the weight of that mirrors. Furthermore, the M1 Cell must allow easy access for maintenance. The isogrid consists of a series of top and bottom plates welded to each other using a series of ribs extending in different directions and using a triangular pattern, resulting in a structure behaving like a lightweight isotropic material. The isogrid will have a constant thickness of 3200 mm to be accessed and will follow the same curved surface as the mirrors. Apart from being a lightweight solution, the fabrication and assembly of such an isogrid are simpler than those of a conventional space frame, which is the traditional solution for M1 Support Structures. Besides, the isogrid allows more open room below the mirrors, so that access from below to the mirrors for maintenance can be achieved easily and even carts up to 1 m height would be able to drive below the mirrors, which is difficult to achieve in the case of a space frame. This can be achieved using a continuous floor on the bottom plate. In order to avoid the fact that the ribs are an obstacle to the continuous floor, we propose using a modular and puzzle-like grating made of galvanized steel that can be mounted easily and the top surface is at the same height as the ribs. A grating based on 40 mm × 4 mm steel members with a spacing of 50 mm × 50 mm is proposed to fulfil the requirements. The different elements of the grating will be planar elements. Due to the low curvature of the surface containing the mirrors, it is expected that carts will be able to travel through it.

Hu S W, Zhang Y, Wang Y F, et al. Concept design for the main structure of 30 m Chinese Future Giant Telescope[J]. *Opto-Electron Eng*, 2022, 49(6): 210402; DOI: [10.12086/oe.2022.210402](https://doi.org/10.12086/oe.2022.210402)

Foundation item: Research on Key Technologies of the Edge Sensor for Extremely Large Telescopes Fund (U2031207) and Research on Differential Frequency Modulation Inductive Displacement Sensor Technology for Extremely Large Segmented Mirror Telescope Fund (U1931126)

<sup>1</sup>Nanjing Institute of Astronomical Optical & Technology, CAS, Nanjing, Jiangsu 210042, China; <sup>2</sup>CAS Key Laboratory of Astronomical Optics & Technology, Nanjing Institute of Astronomical Optics & Technology, Nanjing, Jiangsu 210042, China

\* E-mail: [swhu@niaot.ac.cn](mailto:swhu@niaot.ac.cn)