

文章编号 1004-924X(2025)21-3383-09

地基大口径光学望远镜圆顶钢结构设计

王文攀^{1,2*}, 王建立^{1,2}, 王志臣^{1,2}, 范文强^{1,2}, 王洪浩^{1,2}

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要:圆顶作为望远镜的存放保护装置,优良的结构性能是其安全运行的保障,也是望远镜能否正常观测的前提。随着地基光学望远镜口径的不断增大,圆顶的尺寸规模也随之逐渐变大,尺寸的增大对圆顶结构的稳定性、环境适应性和运行精度等提出一定挑战。因此,本文通过对比分析国内外大型圆顶结构形式和使用特点,对大口径光学望远镜圆顶的定位和结构设计进行了理论探索。结合本圆顶安装位置的自然环境特点,分析了圆顶设计过程中涉及的风载荷、地震载荷、雪载荷和温度载荷,采用权重系数得出圆顶综合载荷。最后,利用空间结构设计软件 3D3S 对圆顶开启和关闭状态下的载荷情况分别建模,并利用有限元仿真技术进行计算,实验结果表明,圆顶桁架系统开启和关闭状态下的最大结构应力分别为 144.58 MPa 和 189.51 MPa,均小于材料屈服极限。本研究对圆顶结构的计算和仿真分析,能为更大尺寸的圆顶设计提供一定的技术支持和参考。

关键词:望远镜;圆顶;钢桁架;综合载荷;变形比;应力比

中图分类号:TH643 **文献标识码:**A

doi:10.37188/OPE.20253321.3383

CSTR:32169.14.OPE.20253321.3383

Design of steel structure for the dome of ground-based large aperture optical telescope

WANG Wenpan^{1,2*}, WANG Jianli^{1,2}, WANG Zhichen^{1,2}, FAN Wenqiang^{1,2}, WANG Honghao^{1,2}

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences,
Changchun 130033, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

* Corresponding author, E-mail: wangwenpan281@163.com

Abstract: As the storage and protective enclosure for telescopes, the dome must exhibit superior structural performance to ensure safe operation and enable normal observation. With the increasing aperture of ground-based optical telescopes, dome dimensions have correspondingly expanded, presenting challenges to structural stability, environmental adaptability, and operational precision. This study examines the theoretical positioning and structural design of a dome for large-aperture telescope by comparing and analyzing the configurations and operational characteristics of large dome structures domestically and internationally. Based on the local environmental conditions at the installation site, wind, seismic, snow, and thermal loads were analyzed; combined design loads were then established using appropriate load factors. Load

收稿日期:2025-05-25;修订日期:2025-06-18.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 12303084)

cases for both open and closed states of the dome were modeled using the spatial structure design software 3D3S, and finite element simulations were performed. Results indicate that the maximum stresses in the dome truss system under open and closed conditions are 144.58 MPa and 189.51 MPa, respectively, both below the material yield strength. The calculations and simulations presented provide technical guidance and reference for the design of future large-scale telescope domes.

Key words: telescope; dome; steel truss; comprehensive load; deformation ratio; stress ratio

1 引 言

圆顶作为地基大口径光学望远镜的存放装置,不仅发挥着基础性保护作用,更为望远镜观测质量的提升提供全方位屏障。鉴于地基大口径光学望远镜的安置、运行与观测需求,圆顶的主要作用在于为望远镜提供环境隔离与动态防护,为提高望远镜观测效能提供精准窗口,最大限度减少外界杂散光对望远镜光学性能的影响,以通风制冷系统减小圆顶内视宁度,从内外相结合视角为望远镜的高效率工作提供支持^[1-3]。

地基光学望远镜的站址选择具有严格要求,一般位于全年天气干燥少雨的高海拔偏远地区^[4]。这些地区一年中晴天数较多,可以增加望远镜的观测时长,同时远离市区,光污染较小,可以减小杂散光对望远镜成像质量的影响,最关键的是这些区域具有优越的大气视宁度条件,可以减小地表大气湍流对望远镜观测的影响^[5]。然而,这些地区自然条件恶劣,强风、暴雨雪和极低温发生频率高,圆顶作为望远镜的主要存放防护装置,在设计、制造与安装过程中,以及结构安全、性能优良的基础上还需具备抗强风、抗强降雨雪和抗低温等极端环境防护能力,通过构建多维度的防护体系,全方位确保望远镜在复杂恶劣条件下的稳定运行,有效规避因极端天气因素导致的设备受损风险。

国外针对大口径望远镜的研究与实践起步较早,圆顶设计经验丰富,根据结构形式,常见的圆顶大致有球形圆顶、柱形圆顶和多边形圆顶;根据使用方式,主要有随动圆顶、可分离式敞开圆顶和夏洛特圆顶。3.67 m口径的AEOS望远镜采用多段升降式敞开圆顶^[6],4.3 m口径的SOAR望远镜采用球形随动圆顶^[7],6.5 m口径的小麦哲伦望远镜采用多边形随动式圆顶^[8],25.4 m口径的GMT望远镜采用柱形随动圆

顶^[9],30 mTMT口径的望远镜圆顶采用的是夏洛特形式随动圆顶^[10],39 m口径的ELT望远镜采用球柱形随动圆顶^[11]。

相较于国际上的大量研究与应用,我国大口径光学望远镜研究起步较晚,在核心技术、工程应用等方面还有很大发展空间。国内已开展研究与应用的地基光学望远镜口径多数在3 m左右,与国外超大型望远镜相比,圆顶尺寸相对较小,兴隆观测基地2.16 m望远镜和丽江2.4 m望远镜均采用球形随动圆顶^[12],云南天文台NVST望远镜、威海观测站1.2 m望远镜和2.5 m望远镜采用了敞开式圆顶^[4]。目前,对于3 m口径及以上光学望远镜圆顶的研究与具体应用较少,仍需要进一步开展系统性研究与技术攻关。近年来,我国也在积极推动大口径天文望远镜的发展,如国家天文台14.5 m光学红外望远镜、清华大学6.5 m望远镜^[13]和北京大学8 m通用型望远镜^[14]。这些望远镜的圆顶尺寸和质量远超目前国内多数圆顶,设计难度和系统复杂度较高。本文针对大口径地基光学望远镜的圆顶及其设计要求,对圆顶支撑骨架的钢结构桁架系统进行详细设计与分析,可为后续更大口径望远镜圆顶设计提供一定的技术支持和参考。

2 圆顶基本结构与设计

圆顶的尺寸跟望远镜的口径、高度和回转半径相关,本文设计的圆顶尺寸和规模相对比较庞大,参考大量国外同类型圆顶结构,采用随动方式,具体参数如表1所示,圆顶的结构形式如图1所示。

圆顶采用重钢结构,在满足望远镜回转要求的情况下,为了降低系统难度及复杂度,圆顶形状定为八边形。圆顶安装在圆形钢筋混凝土基墩上,基墩高度为6.6 m。圆顶底部为箱型截面的

表 1 圆顶结构的主要参数	
Tab. 1 Main parameters of dome structure	
Main parameter	Value
Telescope height/m	9.4
Telescope slewing radius/m	3.7
Dome maximum rotation diameter/m	20.5
Dome height/m	11.8
Steel structure weight/t	52
Pier foundation height/m	6.6
Number of rolling shutters	7
Internal crane lifting capacity/t	2
Number of bogie assemblies	16
Number of primary trusses	8
Number of secondary trusses	17

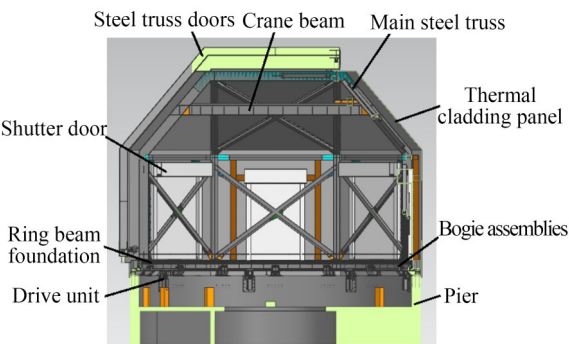


图 1 望远镜圆顶主要结构

Fig. 1 Main structure of the telescope dome

环梁,顶部为钢桁架结构,在钢桁架一侧开有狭缝,作为望远镜的观测窗口,窗口通过两个对开门左右移动实现开启和关闭。圆顶侧面安装 7 个卷帘门,在望远镜观测时,通过通风平衡圆顶内外气流和温差。圆顶内部安装 2 t 起重机,用于望远镜组件的安装和维护。圆顶外侧安装隔热铝合金板,可以有效阻挡阳光辐射,避免圆顶内部温度过高。

圆顶基墩上有 16 个固定不动的支撑轮组件,用于将圆顶支撑力传递至基墩,同时起到防止圆顶发生倾覆和侧向位移的保护作用。其中,支撑轮与圆顶环梁底部滚动接触,可以减少摩擦阻力,降低电机驱动力矩和功率,提高设备运行流畅度。

钢桁架结构是圆顶的骨架和其他附属结构安装界面,它的强度和刚度直接影响圆顶的可靠性、安全性和使用寿命,因此钢桁架结构是圆顶

设计中的重中之重。桁架结构采用 H 型钢和方钢,其中主梁和次梁采用 H 型钢,柱间支撑采用方钢,型钢之间通过螺栓连接。主梁的数量为 8 根,通过法兰安装在环梁上表面,是主要的受力和传力结构,起承重作用。次梁数量为 17 根,次梁和柱间支撑发挥着维护钢结构稳定的作用,防止其扭曲或变形。

3 圆顶结构设计因素与计算

3.1 圆顶设计中涉及的载荷类型分析与计算

圆顶结构设计需要充分考虑地基望远镜所在站址的自然地理特点和综合条件,根据实际情况,综合确定设计过程中需要考量的载荷类型和载荷系数。本圆顶所受载荷主要包含恒载荷(自身重力)、风载荷、雪载荷、地震载荷和温度载荷等,在计算时,通过对载荷类型进行排列组合来分析圆顶的综合受力情况^[15]。

3.1.1 恒载分析

恒载即为圆顶及其附属结构的自身重力,自重是影响圆顶变形的重要因素,它直接影响结构的承载能力和稳定性,因此自重的合理计算和控制对于结构安全至关重要。圆顶钢结构质量为 52 t,钢结构一经设计,其载荷就已确定,变异性小,统计较稳定,根据《建筑结构荷载规范》,载荷系数取 1.3。

3.1.2 风载荷及风载修正系数计算

本文研究涉及的地基望远镜位于新疆某地山顶,该地域海拔 4 500 m,圆顶建设在高度为 6.6 m 的基墩塔台上,根据站址信息确定基本风压、地表粗糙度和阻尼比。望远镜执行观测任务时,要求观测视场开阔,周边无遮挡物,因此选址常位于山峰之巅。当风载荷作用于圆顶时,存在爬坡效应,风速会随着高度的增加而增加,风压也会更高,风载荷修正系数也会相应变大。图 2 所示为山峰和山谷示意图,望远镜位于山顶 B 点。

山峰和山谷的风载修正系数为:

$$\eta_B = \left[1 + K \tan \alpha \left(1 - \frac{z}{2.5H} \right) \right]^2, \quad (1)$$

式中:tan α 为山峰或山谷在迎风面一侧的坡度,当 tan α 大于 0.3 时,取 0.3;K 为系数,对山峰取

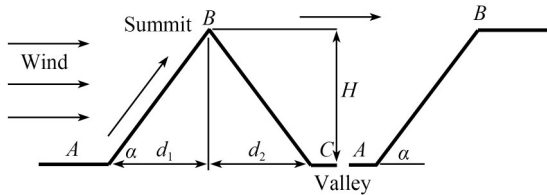


图2 圆顶所在地山峰和山谷示意图

Fig.2 Topographic map of peaks and valleys around dome

2.2,对山谷取1.4; H 为山顶或山高全高; z 为建筑物计算位置离建筑物地面的高度,当 $z > 2.5H$ 时,取 $z = 2.5H$ 。

由式(1)计算出圆顶所处位置风载修正系数为 $\eta_B = 1.66$,风载基本参数如表2所示。

表2 风载荷的基本参数

Tab.2 Basic parameters of wind load

Category	Value
Basic wind pressure KN/m^2	0.8
Surface roughness category	B
Damping ratio	0.02
Reference height/m	6.6
Height variation facto	1.66

3.1.3 地震载荷分析

地震具备极强的破坏能力,设计圆顶时必须充分考虑抗震设计和结构稳固性的强化,保证它具备足够的抗震能力,确保在地震发生时,望远镜圆顶能够保持结构完整性,有效规避因圆顶损坏而引发的望远镜设备损害风险。根据站址信息,结合圆顶站址地震分布带,可获取的具体参数如表3所示。

表3 地震载荷的基本参数

Tab.3 Basic parameters of earthquake load

Category	Value
Seismic intensity	9-degree (0.40 g)
Site class	II
Characteristic period/s	0.4
Number of vibration modes	9
Modal damping ratio	0.04
Period reduction factor	1
Mode combination method	CQC

3.1.4 雪载荷分析

本光学望远镜坐落在海拔4 500 m的高海拔区域,受地形地貌和气候条件影响,常年温度较低,雪季时间长,冬季频发的积雪对圆顶的承载力和结构稳定性的影响不可忽视。圆顶虽然具备一定的融冰除雪功能,但在设计计算时应将雪载荷列入计算载荷中,载荷位置为圆顶顶部平面,通过面载荷的方式施加,综合多年气象数据和积雪数值分析,圆顶面载荷值为 1 kN/m^2 。

3.1.5 温度载荷分析

圆顶作为一个封闭式的钢桁架系统,跨度比较大,温度变化时由于热胀冷缩效应,会导致钢结构发生变形而产生应力,甚至出现结构失稳乃至整体破坏的极端情况,影响整体安全性与可靠性。因此,在设计时要充分考虑温度载荷。首先需要考量环境温度的变化,根据光学望远镜站址信息,夏季最高气温可达 40°C ,冬季最低气温达 -40°C ,温差为 80°C ,因此设计时所取的温差为 $-40\sim 40^\circ\text{C}$ 。由于不同材料的热膨胀系数不同,光学望远镜位于低温高寒地区,圆顶钢结构设计时选择Q355D材料,该材料凭借其优异的低温韧性与环境温度适应性,能够在复杂气候条件下保持稳定的力学性能。

3.1.6 综合载荷分析

综合载荷是指圆顶所受的所有载荷之和,圆顶在不同时间和不同环境条件下所受载荷不一样,如冬季存在雪载而夏季没有,故而在钢结构设计过程中,需要对前述载荷进行综合计算,分析不同工况下钢结构的性能。综合载荷组合通过以下公式计算:

$$N = 1.3F_1 + iF_2 + jF_3 + kF_4 + uF_5, \quad (2)$$

式中: N 为各个载荷组合之和; F_1 为恒载,即圆顶自身重力; F_2 为风载; F_3 为温度载荷; F_4 为雪载; F_5 为地震载荷; i, j, k, u 为载荷系数, $i = 0, 1.5, 0.9, j = 1.5, 0.9, 0.6, 0, k = 0, 1.5, 1.05, u = 0, 1.4$ 。

载荷系数选取依据中国《建筑结构荷载规范》(GB 50009)和《钢结构设计标准》(GB 50017),载荷组合比较复杂,涉及到多载荷同时作用的概率问题,按照承载能力极限状态组合计算,各个系数组合起来代表基本组合、偶然组合和地震组合。具体选择为:恒载荷(如结构自重),变异性小,分项系数一般可取1.2~1.35;可

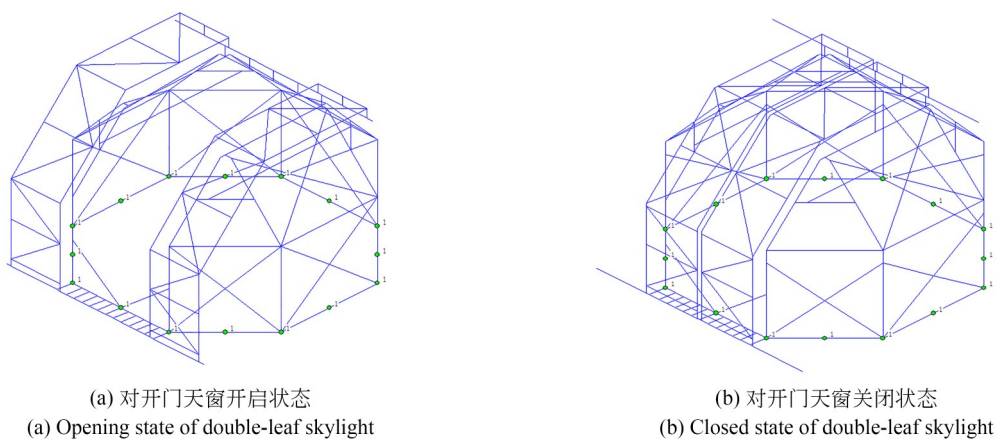


图 3 圆顶两种状态计算简图

Fig. 3 Calculation diagrams of dome in two states

变载荷(如雪载荷),变异性大,一般可取 1.3~1.5;风载荷不确定性高,一般可取 1.4~1.5;地震载荷,变异性高,具有突发性,一般可取 1.4~1.5。

3.2 圆顶钢结构设计计算

光学望远镜执行观测任务时,圆顶对开门天窗打开,形成观测窗口,天窗开口大小满足望远镜俯仰 0~90°内不遮挡视场,望远镜观测结束后,对开门天窗关闭,对望远镜保护。圆顶的受力随着天窗位置的变化而变化,因此必须对这两种状态下钢结构的受力情况进行分析计算。计

算采用 3D3S,作为一款全国产化的钢结构-空间结构设计软件,该软件可适用于各种钢结构分析计算,如空间网架结构、桁架结构、建筑索膜结构等。它的主要流程为建模-规定约束-截面荷载-内力分析-设计验算-节点-施工图,涵盖了从初始设计到最终施工的主要环节。

图 3 所示为圆顶对开门天窗开启和关闭状态下的计算简图(彩图见期刊电子版),主要包含立柱、主梁、次梁和节点等。其中,蓝色单元为普通桁架单元,绿色实心圆为支撑支座单元,调试钢结构支撑点位置,计算中所属材料特性如表 4 所示。

表 4 圆顶主结构材料特性

Tab. 4 Material properties of dome's main structure

名称	弹性模量/(kN•mm ⁻²)	泊松比	线膨胀系数	质量密度/(kg•mm ⁻³)
Q355D	206.0	0.300	1.20×10 ⁻⁵	7.85×10 ⁻⁶

由式(2)对上述计算简图施加不同工况下的综合载荷,可以计算出圆顶钢桁架系统的线性最大位移和组成圆顶钢结构的杆件应力。线性位移和杆件应力越小,钢结构越可靠,系统稳定;反之,钢结构越差。通过计算可知圆顶对开门天窗打开和关闭时,钢结构的位移最大值为 35.056 mm 和 27.940 mm,位置位于对开门天窗中部,对开门整体长度为 18 818 mm,变形比分别为 1/536 和 1/673.5,满足钢结构设计要求。

4 钢结构设计结果验算与仿真分析

4.1 设计结果验算分析

在钢结构设计中,应力比是构件实际工作应力与材料许用应力的比值,反应结构在综合载荷作用下是否满足强度要求,目的是确保结构的安全性和经济性。应力比≤1,其值越小,表示结构设计安全性越高,设计余量越大、系统安全性越好,但是材料利用率越低,浪费较多;应力比>1,则构件设计不合理,存在安全隐患,需要进一步改进。

在圆顶钢结构设计中,统计了不同构件应力

比占比分布,图4为圆顶对开门天窗开启时的杆件应力比分布,图5所示为圆顶对开门天窗关闭时的杆件应力比分布。由图可知,圆顶处于两种状态下,应力比小于0.7的构件占比超过99.6%,应力比为0.8~0.9的构件占比为0.4%,高于普通钢结构建筑的通常目标值,设计余量比较大,考虑到光学望远镜圆顶的特殊性及其在望远镜防护中的重要性,在合理范围内提高安全性是十分必要的。

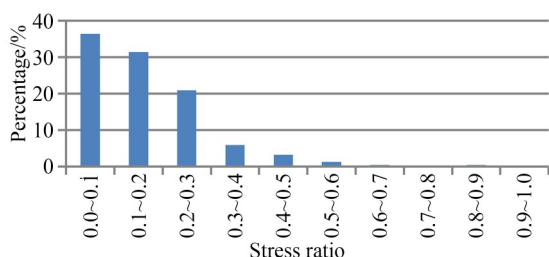


图4 圆顶对开门天窗开启时的杆件应力比分布

Fig. 4 Stress ratio distribution of dome with double-leaf skylight open

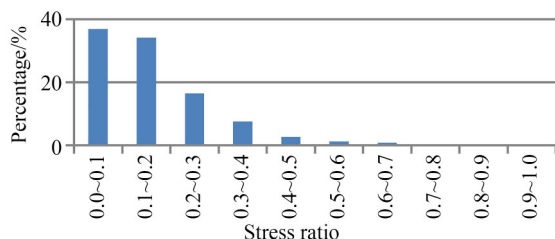


图5 圆顶对开门天窗关闭时的杆件应力比分布

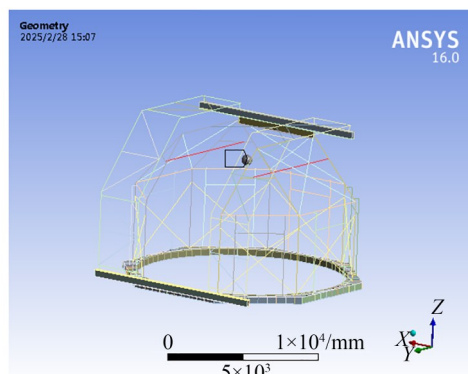
Fig. 5 Stress ratio distribution of dome with double-leaf skylight closed

4.2 有限元仿真分析

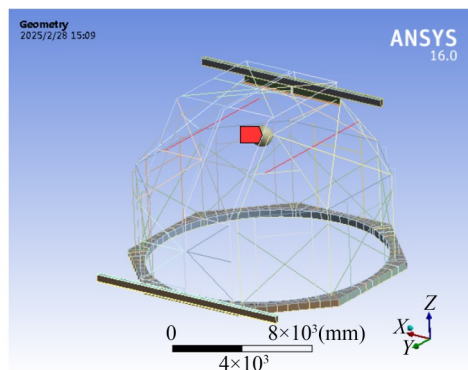
4.2.1 有限元模型的建立

本文对设计的圆顶钢结构进行有限元仿真分析,建模的部分主要包含底部基础环梁、主钢桁架、对开门桁架和对开门滑道。底部基础环梁和对开门滑道为箱型结构,采用面单元建模。桁架系统由H型钢和方钢焊接组成,为了便于分析,采用梁单元建模,梁单元和面单元设置接触连接,并允许相应容差。圆顶内部2 t吊车采用质量点替代,并与吊车梁关联,圆顶底部有16个支撑转轮,因此在支撑转轮的位置对有限元模型约束,载荷只考虑结构自身重力,图6为圆顶钢结构对开门

开启和关闭状态下的有限元模型。



(a) 圆顶打开状态
(a) Dome open state



(b) 圆顶关闭状态
(b) Dome closed state

图6 圆顶钢结构的有限元模型

Fig. 6 Finite element model of steel dome structure

4.2.2 设计数据的仿真分析与测算结果

4.2.2.1 对开门开启状态分析结果

本文主要针对圆顶钢结构在自身重力作用下的有限元分析,对开门窗口开启时其变形与应力云图如图7所示。通过分析可知,圆顶的最大变形为9.3 mm,位于对开门梁中心位置,对开门梁长度为18 818 mm,变形比为1/2023,满足钢结构建筑设计要求。基础环梁和上下轨道梁为面单元,其最大应力为144.58 MPa,位于桁架与基础环梁连接位置,小于材料屈服极限。由于采用梁单元建模,在Workbench软件中,通过查看杆结构内应力与弯曲应力的最大综合应力来判断结构的可靠性。通过分析可知,圆顶桁架组件综合应力最大值为35.39 MPa,小于材料屈服极限。

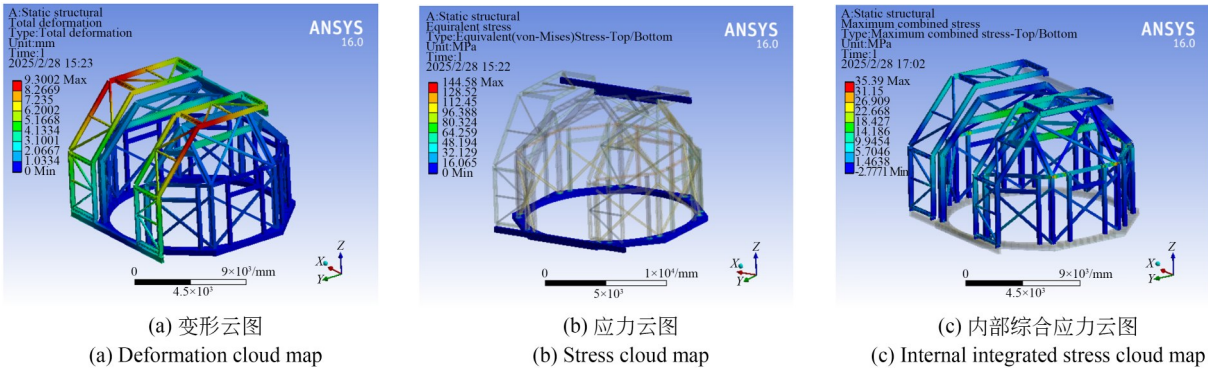


图 7 圆顶打开分析结果
Fig. 7 Analysis results for dome opening

4. 2. 2. 2 对开门关闭状态分析结果

对开门窗口关闭时其变形与应力云图如图 8 所示。通过分析可知,圆顶的最大变形为 6 mm,位于对开门梁中心位置,对开门梁长度为 18 818 mm,变形比为 1/3136,满足钢结构建筑设计要求。基础环梁和上下轨道梁为面单元,其最大应

力为 189. 51 MPa,位于桁架与基础环梁连接位置,小于材料屈服极限。由于采用梁单元建模,在 Workbench 软件中,通过查看杆结构内应力与弯曲应力的最大综合应力来判断结构的可靠性。通过分析可知,圆顶桁架组件综合应力最大值为 16. 95 MPa,小于材料屈服极限。

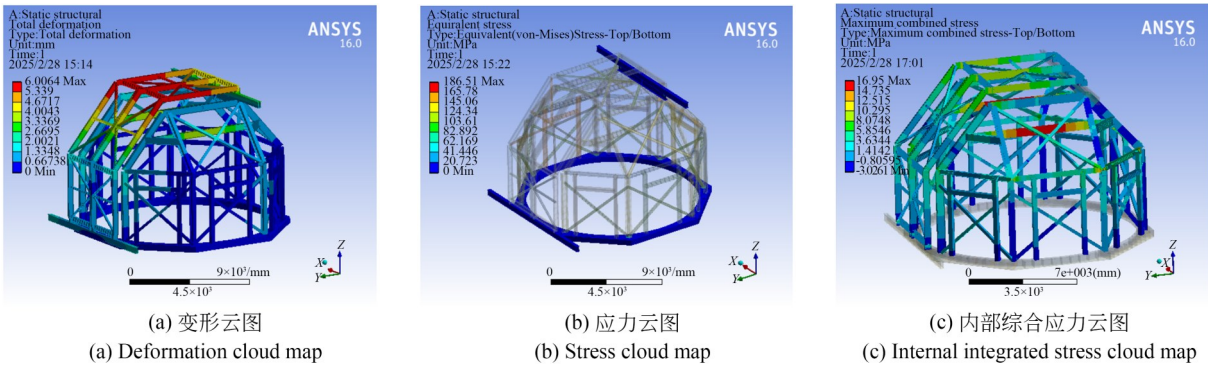


图 8 圆顶关闭分析结果
Fig. 8 Analysis results for dome closed

5 圆顶钢桁架建造

圆顶钢结构的建造是一个复杂而又充满挑战的过程,分析设计仅仅是其中一部分,实施过程中还需要考虑钢结构运输、安装方式、焊接质量控制、环境因素干扰和安装过程安全性等。其中,焊接质量控制是保证圆顶可靠性的重要因素,由于站址环境比较恶劣,在现场焊接过程中根据实际情况需要采取预热、挡风等基本措施,保证焊缝质量。图 9 所示为圆顶钢结构效果。



图 9 圆顶钢结构效果
Fig. 9 Dome steel structure rendering

6 结 论

本文以大口径地基光学望远镜圆顶为研究对象,对比了国内外各口径级别望远镜采用的圆顶结构特点,进行了圆顶结构概念设计。针对圆顶钢桁架的计算问题,重点介绍了计算方法、载荷类型、参数选取、计算过程和结果,并通过有限元分析对圆顶钢桁架进行了建模分析和验证,计算结果显示,所设计的钢桁架在圆顶开启和关闭时的最大变形比分别为1/536和1/673.5,应力

比小于0.7的占比均超过99.6%,满足钢结构设计的技术规范,对后续更大规模圆顶的设计具有一定的参考价值。

作者贡献说明:

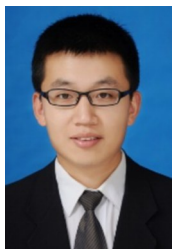
王文攀:桁架设计计算,论文构思和撰写;
王建立:桁架方案提出;
王志臣:桁架设计优化;
范文强:系统仿真分析;
王洪浩:论文编辑。

参考文献:

- [1] DEVRIES J, NEILL D R, BARR J, *et al.* The LSST dome final design[J]. *SPIE*, 2016, 99060N: 1-18.
- [2] 张景旭. 地基大口径望远镜系统结构技术综述[J]. *中国光学*, 2012, 5(4): 327-336.
ZHANG J X. Overview of structure technologies of large aperture ground-based telescopes[J]. *Chinese Optics*, 2012, 5(4): 327-336. (in Chinese)
- [3] 姚正秋, 周放. 近代天文圆顶发展概况[J]. *天文学进展*, 2003, 21(3): 206-218.
YAO ZH Q, ZHOU F. Progress in modern astronomical enclosure [J]. *Progress in Astronomy*, 2003, 21(3): 206-218. (in Chinese)
- [4] 刘祥意, 王志臣, 王志. 地基大口径望远镜圆顶设计[J]. *光学精密工程*, 2022, 30(23): 3031-3038.
LIU X Y, WANG ZH CH, WANG ZH. Dome design of large ground-based telescope[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2022, 30(23): 3031-3038. (in Chinese)
- [5] KONSTANTINOS V, HUGH T, JOHN R, *et al.* On the Relationship between Thermal Seeing and Observatory Design[J]. *SPIE*, 2022, 12187: 1-16.
- [6] LEWIS C, ROBERTS J R. Thermal conditioning of the AEOS telescope [J]. *SPIE*, 2003, 4837: 264-271.
- [7] BIGELOW B C, LOEWEN N P, VAN VUUREN E, *et al.* A survey of enclosure suspension and rotation systems for 3-15 m telescopes[C]. *Ground-based and Airborne Telescopes VI. Edinburgh, United Kingdom*. SPIE, 2016: 99060E.
- [8] TERAN J, PORTER D S, HILEMAN E A, *et al.* Unique dome design for the SOAR telescope project[C]. *Astronomical Telescopes and Instrumentation. Proc SPIE 4004, Structures/Telescopes, Enclosures, Controls, Assembly/Integration/Validation, and Commissioning, Munich, Germany*. SPIE, 2000, 4004: 155-163.
- [9] JAMES F, REBECCA B, DAVID A, *et al.* Overview and Status of the Giant Magellan Telescope Project[J]. *SPIE*, 121821C: 1-20.
- [10] GEDIG M H, BRZEZIK W, CROFOOT L, *et al.* Thirty Meter Telescope enclosure production readiness overview [C]. *Ground-based and Airborne Telescopes VIII. December 14-18, 2020. OnlyOnline, USA*. SPIE, 2020: 6.
- [11] STANGHELLINI S, MARTINEZ P, KRAUS M. Procurement of the dome and the telescope structure of the ELT: update status report [C]. *Ground-based and Airborne Telescopes VIII. December 14-18, 2020. OnlyOnline, USA*. SPIE, 2020: 7.
- [12] 李陶然, 王建峰. 兴隆2.16米望远镜圆顶吊装通道通风研究[J]. *天文研究与技术*, 2020, 17(2): 224-232.
LI T R, WANG J F. A study of hoist-ductventing for Xinglong 2.16 m telescope [J]. *Astronomical Research & Technology*, 2020, 17(2): 224-232. (in Chinese)
- [13] ZHANG Y C, LAO J S, WANG Z X, *et al.* MUST dome design based on dome seeing quantitative evaluation[J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2024, 530(1): 1235-1251.
- [14] 吴学兵, 江林华, 邓李才, 等. 中国大型通用光学望远镜EAST项目[J]. *青海科技*, 2024, 31(4): 37-45.
WU X B, JIANG L H, DENG L C, *et al.* The EAST project: a large general-purpose telescope in

- China [J]. *Qinghai Science and Technology*, 2024, 31(4): 37-45. (in Chinese)
- [15] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 钢结构设计标准: GB 50017—2017[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2017.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Standard for design of steel structures: GB 50017—2017[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2017. (in Chinese)

作者简介:



王文攀(1987—),男,山西吕梁人,硕士,副研究员,2014年于吉林大学获得硕士学位,主要从事光机结构设计及仿真方面的研究。E-mail: wangwenpan281@163.com



王建立(1971—),男,山东曲阜人,研究员,博士生导师,主要从事空间探测技术和地基高分辨率成像光电望远镜总体技术的研究。E-mail: wangjianli@ciomp.ac.cn