

西安丝路塔钢结构关键施工技术及施工力学分析

邢遵胜^{1,2*}, 刘中华¹, 刘洋¹, 贾尚瑞¹

(1. 浙江精工钢结构集团有限公司, 浙江 绍兴 312030; 2. 天津大学 建筑工程学院, 天津 300072)

摘要: 西安丝路塔项目为全钢结构异形塔, 高约140 m, 塔身直径小, 采用地面分块拼装、重型塔吊附着塔身的方式进行吊装。结合塔式起重机设计规定, 本文首先提出了重型塔吊附着于超高柔性结构的安全性判定原则, 经检验该原则具有可行性且便于操作; 之后提出了一种用于超高位置大尺寸莫比乌斯环结构安装的装配式内支撑结构, 该支撑结构具有较好的施工安全性和操作便捷性。开发了用于无人机扫描数据修正的ICP算法, 该算法可用于百米高空位置的结构位形测量, 修正后测量结果的扫描精度得到明显改善。当采用提升施工工艺且提升高度较大时, 需分析被提升结构与周边结构的净距和不同风力等级下被提升结构的风致水平位移, 并进行提升碰撞风险分析, 进而采取选择风速较小的气象条件以避免大风出现或加大设计净距减少碰撞风险等措施, 以确保提升施工安全。

关键词: 钢塔; 施工力学分析; 莫比乌斯环; 塔吊附着; 碰撞风险分析

中图分类号: TU74

文献标志码: A

文章编号: 1671-9379(2025)10-0104-09

DOI: 10.13969/j.jzgjgz.20240512001

Key Construction Techniques and Mechanical Analysis of the Xi'an Silk Road Tower Steel Structure

XING Zunsheng^{1,2*}, LIU Zhonghua¹, LIU Yang¹, JIA Shangrui¹

(1. Zhejiang Jinggong Steel Building Group Co., Ltd., Shaoxing 312030, China;

2. School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

*Corresponding author: 65553089@qq.com

Abstract: The Xi'an Silk Road Tower is a special-shaped steel tower, which stands approximately 140 meters high. Given its small diameter, the tower was divided into several segments, which were assembled on the ground, and then lifted using a heavy-duty tower crane attached to the tower body. Based on the design codes and standards of the tower crane, safety assessment principles were proposed for the attachment of the heavy-duty tower crane to ultra-high slender structures, which was verified safe, feasible and easy to operate in practice. Additionally, a prefabricated inner support was designed for the installation of a large-scale Mobius ring. The designed inner support structure offered superior operating convenience and construction safety. Furthermore, an ICP algorithm for UAV scanning data correction was developed to measure the shape and position of the assembled structure at up to hundred meters high, and the scanning accuracy was significantly improved after correction. For the integral construction of steel structures, especially when the lifting height is significant, it is necessary to analyze the clear distance between the lifted structure and the surrounding structure, as well as the wind-induced horizontal displacement of the lifted structure under different wind levels. The lifting collision risk can be analyzed, and then measures can be adopted such as selecting the lifting period to avoid the occurrence of strong winds, or increasing the design clear distance to reduce the collision

收稿日期: 2024-05-12

作者简介:

邢遵胜(1982—), 男, 博士研究生, 正高级工程师, 主要从事钢结构设计、制造和施工方面的研究。

E-mail: 65553089@qq.com。(通信作者)

刘中华(1976—), 男, 硕士, 教授级高级工程师, 主要从事钢结构设计、制造和施工方面的研究。

risk, so as to ensure the safety of the lifting construction.

Keywords: steel tower; construction mechanical analysis; Mobius ring; crane attachment; collision risk analysis

1 概述

西安丝路塔项目位于中国陕西省西安市,是丝路欢乐世界项目的地标工程。丝路塔顶标高139.210 m,外观拥有极具辨识度的造型,施工难度非常大。



图1 项目实景照

Fig. 1 On-site photo of the project

研究者们对异形钢塔结构的施工过程进行全面调研、归纳和总结,对项目技术难题进行研究,形成了以实际工程为背景的成套关键施工技术,解决了西安丝路塔项目场地狭窄、顶部大尺寸莫比乌斯环结构施工难度大、临时支撑搭设困难、分块对接精度要求高等难题,可为类似工程提供参考。

2 项目概况

西安丝路塔项目为全钢结构异形塔,由内筒钢框架、外筒网壳、大悬挑轮辐式裙摆桁架、顶部大尺寸莫比乌斯圆环和外筒丝带构成,主要采用Q355B钢。钢塔的主要抗侧力结构为内筒钢框架+外筒网壳+连系杆组成的筒中筒结构。钢塔结构构造如图2所示。

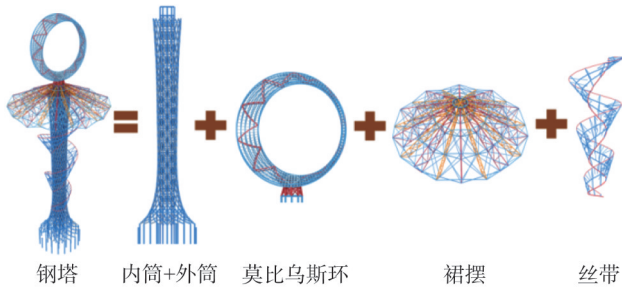


图2 钢塔结构图

Fig. 2 Steel tower structure diagram

2.1 内筒结构

内筒钢框架直径7.30 m,筒顶标高104.080 m,主要

由十根钢柱、框架梁和柱间斜撑组成。框架梁为H型钢,其他均为圆钢管,其中标高25.185 m、50.080 m、70.615 m、93.055 m处布置内外筒连系杆。

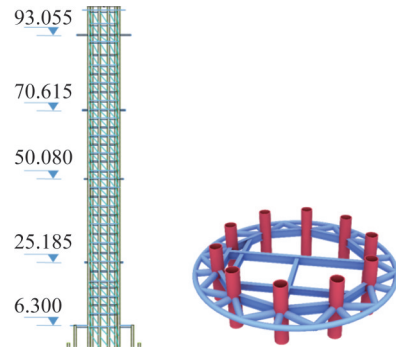


图3 内筒结构示意图(单位:m)

Fig. 3 Schematic diagram of inner tube structure (unit: m)

2.2 外筒结构

外筒顶标高94.781 m,为双向斜交圆钢管菱形网格结构,主次杆件数量各20根,规格为P325×36、P450×35、P500×25、P500×30、P600×30,均为空间弯弧圆管。外筒网壳底部直径为17.36 m,随高度增加直径逐渐减小,在标高30.785 m处直径最小为9.12 m,之后直径逐渐增大,至外筒顶部结构直径达13.25 m。

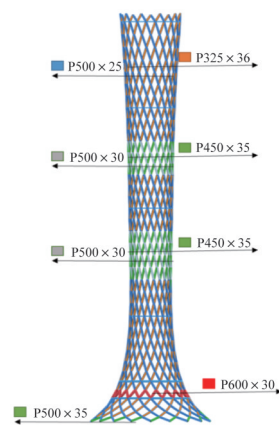


图4 外筒结构示意图

Fig. 4 Schematic diagram of outer tube structure

2.3 裙摆结构

裙摆结构底部标高80.807 m,顶部标高100.200 m,由20榀悬挑平面主桁架和4榀环桁架组成,悬挑长度约25.40 m,平面主桁架底部有两个支点,分别落在内外筒顶部,桁架杆件截面均为圆管,最大规格为P426×14。

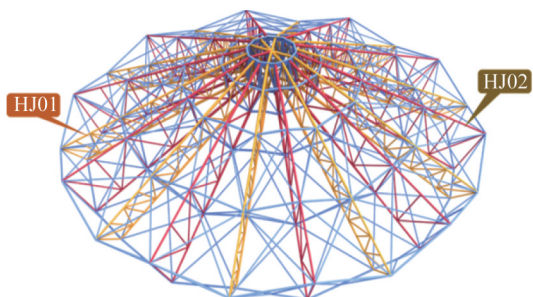


图5 裙摆结构示意图

Fig. 5 Schematic diagram of skirt structure

2.4 莫比乌斯环结构

顶部莫比乌斯环结构顶标高139.210 m,由6榀环状平面桁架和斜交桁架交叉环绕组成,环体宽度4.80 m~7.50 m不等,直径最大37.69 m;平面桁架间距0.90 m~1.50 m,单榀平面桁架高度最大1.35 m,杆件截面均为圆管,弦杆最大规格为P500×25,腹杆最大规格为P159×10。莫比乌斯环结构主杆为空间双向弯弧圆管,莫比乌斯环结构通过铸钢支座与内筒相连。

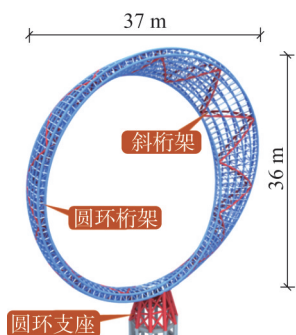


图6 莫比乌斯环结构示意图

Fig. 6 Schematic diagram of Mobius ring structure

3 技术难点及施工条件

3.1 施工场地狭小

因钢塔位于拟开业的游乐中心核心区,周边建筑均已建成,因此可用场地非常狭小。周边的交通条件也不允许大尺寸构件的远距离运输,因此,拟采用结构分块地面拼装、搭设重型动臂式塔吊分段吊装的施工方法。

3.2 钢塔塔身尺寸小,重型塔吊附着需进行专项分析

钢塔虽为筒中筒结构,但塔身高度达104.08 m,筒身直径最小仅9.12 m,高宽比较大,钢塔抗侧刚度小,在水平荷载作用下,结构变形明显。

综合考虑各种因素,该工程采用TSL750-50T型重型塔吊进行吊装,因安装高度高,钢塔施工过程中需设置三道附臂附着于塔身。邢遵胜等^[1]和蔡柳鹤等^[2]提出了塔吊附着于高层钢结构和具有较大刚度空间结构的设计方法,但重型塔吊附着于柔性钢塔的设计方法,尚无研究可供参

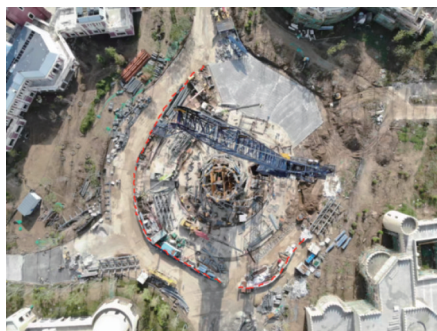


图7 施工现场俯视图

Fig. 7 Top view of the construction site

考。本文结合有限元分析结果和相关塔式起重机标准,提出重型塔吊附着于柔性钢结构的安全性评价原则。

3.3 项目施工难度大

综合考虑莫比乌斯环、裙摆和丝带的几何尺寸和位形关系,采用塔吊和汽车吊相结合进行分块吊装施工。总体施工顺序为:内筒吊装→外筒吊装(外筒和内筒穿插施工)→顶部莫比乌斯环吊装→裙摆提升→丝带吊装。

顶部莫比乌斯环直径36.80 m,底部标高102.286 m,其形状不规则;莫比乌斯环除了支座位置有小范围支撑外,下方仅有悬挑的裙摆结构,无法为施工提供可靠的临时支承;另因结构处于百米高空,无法采用从地面搭设临时支撑分段吊装的施工工艺,故而施工难度特别大。综合考虑施工条件和施工便利性,采用地面拼装+重型塔吊分块吊装的方式进行施工,并结合结构特点,设计配套的装配式内支撑体系。

4 重型塔吊附着超高柔性钢结构的施工力学分析和安全性判定

4.1 塔吊附着工况

施工现场安装一台ZSL750动臂塔吊(图8~图9),最大吊重为50 t,塔吊通过标准连接件与结构外筒连接,需随着结构往上安装升节,最多设置三道附臂,分别设置在标高35.300 m、65.300 m、95.300 m处。

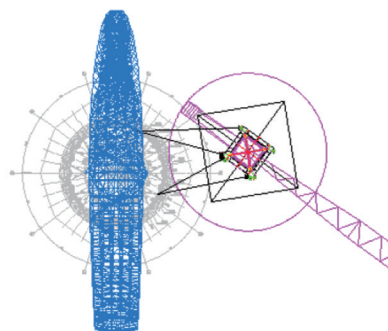


图8 塔吊平面布置图

Fig. 8 Layout plan of tower crane



图9 塔吊附着实景

Fig. 9 Attachments of tower crane

4.2 塔吊附着于柔性结构的安全性判定原则

目前塔吊附着于尺度较大、整体抗侧刚度较大的结构较为常见,如框架-核心筒体系的高层和超高层结构、平面尺寸较大的钢框架或框架-支撑结构等,而超高塔吊附着于柔性结构的施工方法,相关研究较少。

为评估重型塔吊附着于柔性钢塔的可行性,参考塔式起重机相关规范及标准^[3-6],提出判定原则和计算分析方法。

(1)《塔式起重机》(GB/T 5031—2019)^[5]的第5.2.4条给出要求:塔吊附着于结构时,安装到设计标高时,对于塔机本身,最高附着点以下塔身轴心线的垂直度误差不大于0.2%。即附着点水平位移不超过附着点高度 h 的1/500;

(2)工作状态时,对于塔机本身,规范《塔式起重机》(GB/T 5031—2019)^[5]的第5.2.5条和规范《塔式起重机设计规范》(GB/T 13752—2017)^[6]的第5.6.2条给出要求:在额定荷载作用下,塔机顶部水平静位移应不大于 $1.34H/100$ (H 为悬臂段高度)。

以上均是规范对塔机本身的要求,现行规范并没有对塔吊附着时主结构的刚度给出判断标准。结合相关规范,综合考虑塔机本身和附着主结构的整体刚度,以塔机安装垂直度偏差控制标准为依据,提出重型塔吊附着于柔性结构的可行性判定原则如下:

(1)主结构在施工阶段最不利荷载作用下的最高塔吊附着点水平变形与塔吊实际安装偏差之和,满足垂直度偏差允许值小于0.2%的要求;

(2)塔吊顶部在最不利荷载条件下的水平变形不超过悬臂段高度的1.34%;

(3)塔吊附着时的各种荷载作用下,主结构杆件承载力满足要求。

4.3 塔吊附着于柔性结构的整体力学分析

将塔吊塔身与结构一起建模,计算重型塔吊附着于结构时的变形和内力。分别考虑两种工况条件:

工况1:塔吊满负荷作业状态,风荷载按5级风考虑,风荷载方向与塔吊对钢塔产生的水平力同向考虑;

工况2:塔吊空载,遭遇极端条件9级风作用。

其中,钢塔及塔吊按实际布置情况建模,自重乘数取1.1。钢塔所受风荷载按《建筑结构荷载规范》(GB 50009—2012)^[4]规定计算,按线荷载施加。塔吊在各种荷载或作用下对钢塔产生的反力,根据塔吊设计手册取值。

经计算分析,工况1作用下塔吊顶部水平变形为499.22 mm,工况2作用下塔吊顶部水平变形为438.79 mm,考虑现场安装误差约50 mm,综合考虑施工期间结构变形和安装误差,工况1和工况2下塔吊顶部水平变形分别为549.22 mm和488.79 mm,均小于限值558.78 mm,满足设计要求。塔机顶部水平变形限值计算如下:

$$\Delta_1 = \frac{1.34H}{100} = \frac{1.34 \times 41\,700\text{ mm}}{100} = 558.78\text{ mm}$$

工况1钢塔最上层附着点位置结构最大水平变形为37.40 mm,工况2最高附着点位置结构最大水平变形为76.80 mm,考虑现场安装误差约50 mm,综合考虑施工期间结构变形和安装误差,工况1和工况2下结构最高附着点位移分别为87.40 mm和126.80 mm,均小于限值192.60 mm,满足设计要求。附着点水平位移限值计算如下:

$$\Delta_2 = \frac{2h}{1\,000} = \frac{2 \times 96\,300\text{ mm}}{1\,000} = 192.60\text{ mm}$$

工况1钢塔结构最大应力比为0.71,工况2钢塔结构最大应力比为0.91,均小于1.00,承载能力满足要求。

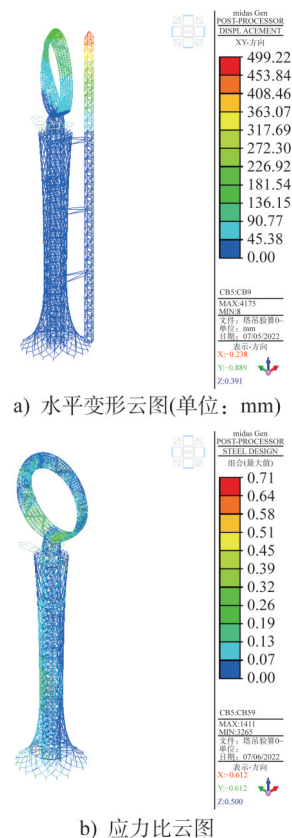


图10 工况1计算结果

Fig. 10 Calculation results of load case 1

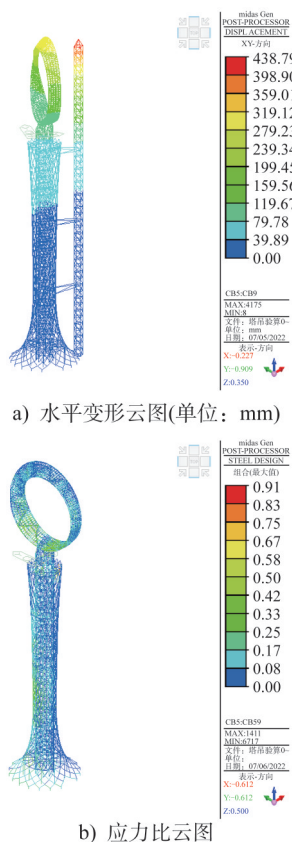


图 11 工况 2 计算结果

Fig. 11 Calculation results of load case 2

4.4 附着点的局部承载能力验算和加强处理

钢塔整体承载能力能够满足规范要求,但经验算,附着处局部杆件应力比超标,且面外变形较大,需进行加强处理。采用增设圆钢管的方式,将塔吊附着点处钢塔外筒与内筒钢柱相连接,每个附着点设置 4 根加强杆件,以保证节点承载力和节点侧向刚度满足要求(图 12)。

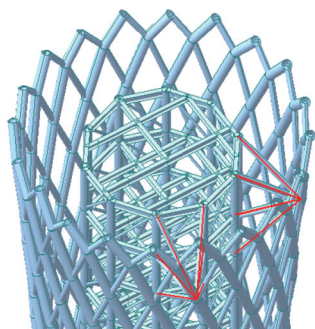


图 12 塔吊附臂位置加强示意图

Fig. 12 Schematic diagram of strengthening at the position of tower crane attached arms

综合以上计算结果及现场施工阶段塔吊测量结果,该项目重型塔吊附着在满足前述安全性评价标准情况下使用良好。

5 莫比乌斯环高空大单元吊装

5.1 莫比乌斯环施工工艺概述

莫比乌斯环总重约 250 t,采用地面拼装+重型塔吊分块吊装的方式进行施工,结构共分为 8 个分块,最重的分块达 38 t。

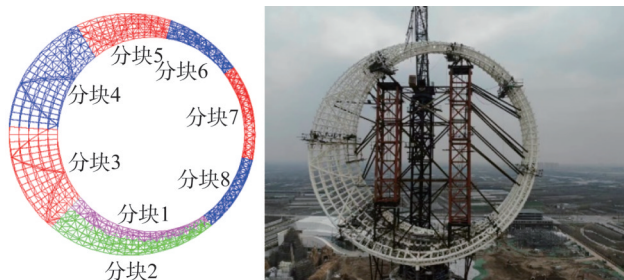


图 13 莫比乌斯环分段图及施工实景

Fig. 13 Segmented diagram and construction scene of the Mobius ring

分块吊装过程中必须设置临时稳定措施,然而由于结构的特殊性,临时措施如何设置是一个难题。

莫比乌斯环在安装时,下方裙摆结构尚未施工,即环体下方临空高度超过 100 m,无法从地面搭设支撑架。因此丁利等^[7]研发了一种内支撑结构,作为莫比乌斯环分块吊装过程中的稳定措施。内支撑结构由环体内侧的格构式支承框架、吊装分块与支承框架之间的临时连接杆组成。施工时以环体根部作为主要着力点,先将莫比乌斯环支座位置结构安装完成,再利用结构自平衡原理,两侧交替将分块吊装到位,以减小施工过程中的变形。

5.2 内支撑结构的设计

顶部莫比乌斯环分为 8 个吊装分段,2 个吊装分段由 3 道平面桁架及之间的连系杆组成,另外 6 个分段由 6 道平面桁架及之间的连系杆组成(图 14)。

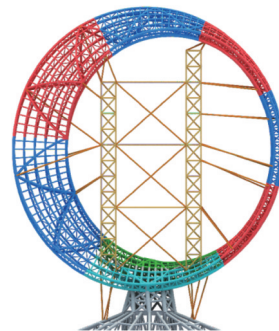


图 14 莫比乌斯环分段和临时支撑示意图

Fig. 14 Schematic diagram of the segmentation and temporary support of the Mobius ring

内支撑结构由内侧格构钢框架和连接杆组成,设计

时需注意以下几个关键点:

(1) 莫比乌斯环高度较高,内支撑结构作为临时施工措施需安拆方便,包括内框架和连接杆的安拆;

(2) 为控制莫比乌斯环分块吊装过程中的变形,内支撑结构在环体平面内需具有足够的侧向刚度;

(3) 支承框架是主要的抗侧力结构,需注意适当加厚杆件壁厚,验算连接节点的局部承载力是否满足要求。

内支撑结构采用装配式设计理念。内支承框架由两组标准支撑架和支撑架间的交叉杆件组成,交叉杆与连接杆节点、标准支撑架连接节点均采用销轴节点,方便安装和拆除。结合支撑架下部着力结构的布置,尽量加大两组支撑架的间距,以增大内支承框架的面内抗侧刚度。连接杆与标准支撑架立杆连接节点处采用局部贴板的方式进行加强,以满足局部承载力要求。

5.3 内支撑结构基于全过程仿真分析的一体化设计

在莫比乌斯环结构分块吊装和内支撑体系安拆过程中,结构处于复杂的动态受力过程,为了充分了解结构在施工过程中的受力和变形,对主结构和临时支撑体系进行一体化施工全过程仿真分析^[8],分析施工过程中主结构内力和位移的变化,以及临时支撑结构的反应,以保证施工方案的安全实施。

计算分析中考虑的荷载包括主结构和临时支撑结构杆件自重、节点重量等,为考虑节点重量,取结构自重系数为1.1。

有限元分析时临时支撑结构中的标准支撑架腹杆、支撑架之间的交叉杆以及支撑架与结构的连接杆采用桁架单元模拟,其他杆件均采用梁单元模拟。

根据验算结果(图15),莫比乌斯环安装完成时内支撑结构受力最不利杆件最大应力比 $0.30 < 1.00$;施工过程中,杆件最大应力比出现在第11步,最大应力比 $0.61 < 1.00$,满足规范要求;施工完成后,结构最大变形 $17.64 \text{ mm} < H/400 = 90.00 \text{ mm}$,满足规范要求。

5.4 基于无人机扫描测量的施工精度控制

莫比乌斯环安装难度高,精准测量困难,施工位形的高精度测控和精度保障是难点^[9-10]。为控制安装误差,采用了基于倾斜摄影的无人机扫描测量技术,用于大单元结构分块单元的精度检测和高空安装位形测量。采用大疆精灵4RTK无人机和配套的大疆智图软件,对莫比乌斯环大单元分块进行三维扫描和逆向建模。

莫比乌斯环分块单元地面拼装时,在各弦杆端部圆心处、两侧圆管侧壁上设置反光片,用于无人机扫描时作为控制点进行数据比对和处理(图16)。

为提高无人机扫描测量的数据精度,针对迭代最近点ICP(Iterative Closest Point)算法存在的严重依赖初始

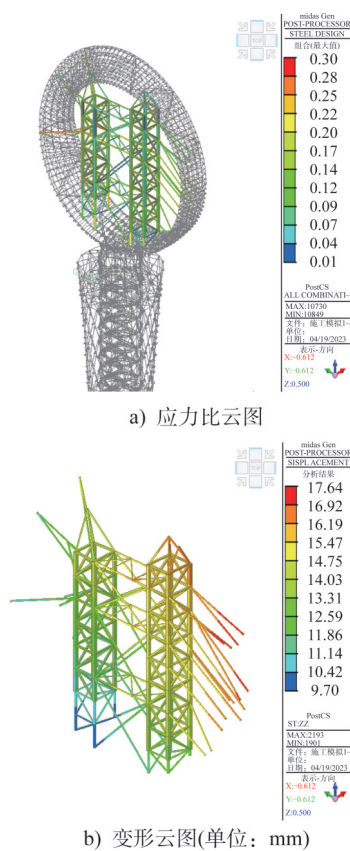


图15 内支撑结构计算结果

Fig. 15 Calculation results of internal support system



图16 反光片布点示意图

Fig. 16 Schematic diagram of reflector arrangement

最近点对的配准位置、计算过程中最近点对出现改变等问题,结合大单元钢结构吊装的测绘需求,提出一种预设高精关键点(刺点)手动配准的KP-ICP配准算法,用于对无人机扫描点云数据进行坐标修正以提高扫描精度。

具体而言,在拼装单元端口处设置关键测绘标记点,以高精度全站仪测量各关键点坐标,在施工过程中,该拼装单元均以该关键点作为刺点,以全站仪测量数据对已安装单元的高空无人机扫描点云数据进行手动配准和迭



图 17 已安装单元高空扫描

Fig. 17 Scanning of the assembled segment

代修正。将上述算法程序用于模拟分块对接,进行对接口的偏差预测。修正前后的三维模型控制点坐标与全站仪控制点坐标的偏差值如图 18 所示。

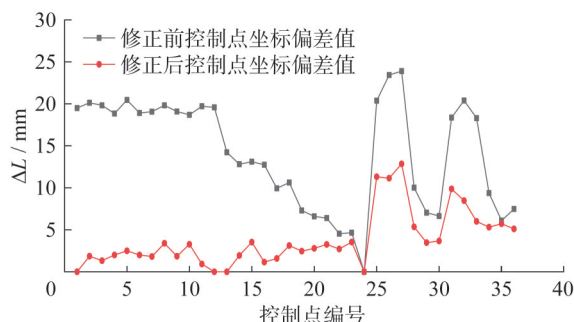


图 18 修正前后的偏差值

Fig. 18 Deviation values before and after correction

修正前的三维模型控制点坐标与全站仪控制点坐标 x 方向最大偏差为 22.73 mm, 平均偏差为 7.44 mm; y 方向最大偏差为 18.83 mm, 平均偏差为 8.45 mm; z 方向最大偏差为 13.01 mm, 平均偏差为 5.43 mm; 以各控制点空间距离表示各控制点的空间偏差值, 则最大偏差为 23.89 mm, 平均偏差为 14.11 mm。

经过三维映射修正后, 三维模型控制点坐标与全站仪控制点坐标 x 方向最大偏差为 11.52 mm, 平均偏差为 2.73 mm; y 方向最大偏差为 6.00 mm, 平均偏差为 1.64 mm; z 方向最大偏差为 3.29 mm, 平均偏差为 1.08 mm; 各控制点的空间偏差值最大值为 12.85 mm, 平均偏差为 3.76 mm。

数据结果表明, 高空已安装莫比乌斯环分块单元与地面拼装分块各对接口的平均距离为 23.89 mm, 最小距离为 11.82 mm; 施工时根据已安装就位吊装单元的对接口位形扫描分析数据, 在地面预先调整后吊装拼装分块主杆的对接口位形, 再进行吊装和高空对接, 可以保证莫比乌斯环分块的高空对接精度。经修正后的无人机扫描预拼装偏差检测, 可以为现场安装提供指导。

6 裙摆大悬挑环形桁架内环加强提升施工

裙摆结构是由 20 榀平面桁架及连系杆组成的环状轮辐式桁架结构, 仅内侧有支承边界, 为大悬挑结构。综合考虑结构造型、尺度和施工条件, 采用将裙摆桁架降至地面拼装后, 整体提升就位的施工方案^[11]。

6.1 提升方案概述

先将裙摆结构在地面原位进行拼装, 在环状裙摆结构内侧设置提升点, 然后进行悬挑提升。裙摆桁架提升部分为外筒以外的部分, 外筒以内部分与内外筒一起预先安装完成, 提升部分重量为 312 t, 提升高度约 85 m。

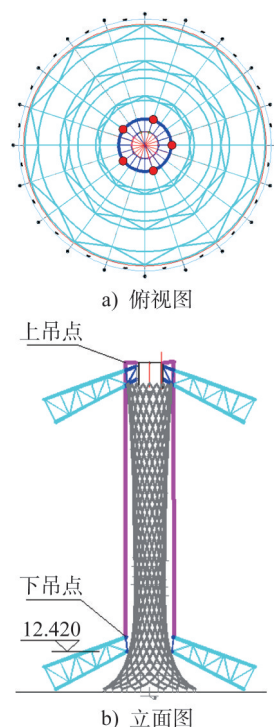


图 19 裙摆桁架提升工艺示意图

Fig. 19 Schematic diagram of skirt truss lifting process

被提升结构为 20 榀平面桁架组成的环状桁架结构, 提升施工时被提升结构与原设计支承结构断开。提升时结构无法提供有效刚度, 结构变形大, 不满足施工需要, 因此需采取临时措施对被提升结构进行加固处理, 增强被提升结构的整体刚度。

综合考虑结构形式和多种加固形式, 在下吊点位置设置一道环箍加强桁架(图 20), 对被提升结构进行加固, 以加强被提升结构的整体刚度。

综合考虑同步提升、不同步提升等工况作用, 被提升结构杆件最大应力比 $0.31 < 1$, 满足承载能力要求; 最大竖向变形为 26.47 mm, 最大水平变形为 14.74 mm, 均较小, 满足施工要求。

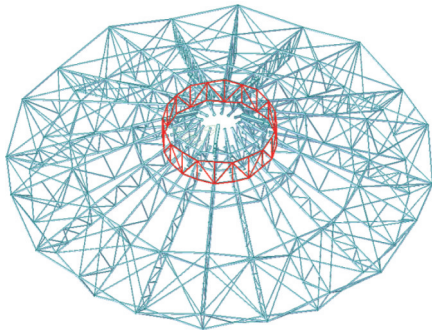


图20 加强桁架示意图

Fig. 20 Schematic diagram of strengthening truss

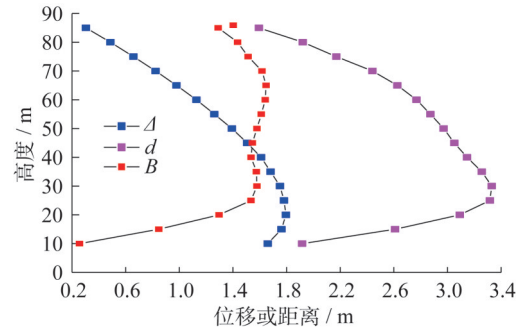
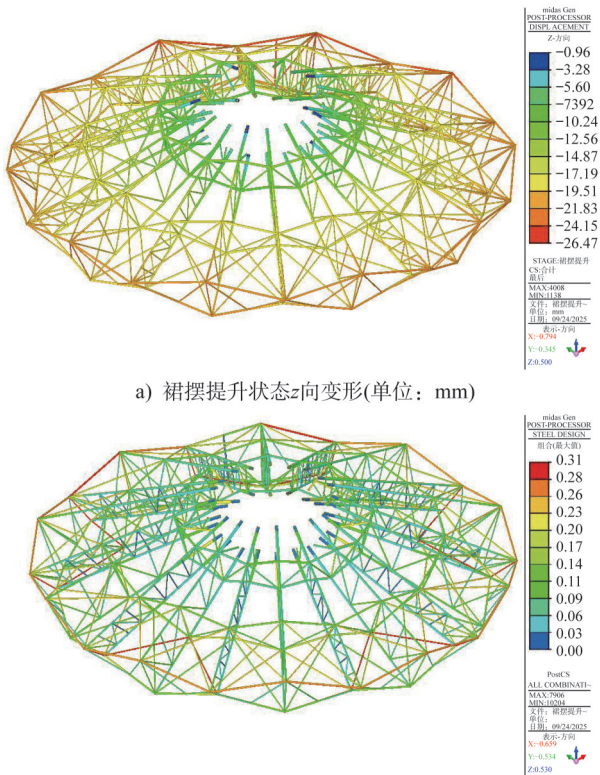


图22 d, Δ, B 随高度变化情况

Fig. 22 d, Δ, B changes with height



a) 裙摆提升状态z向变形(单位: mm)

b) 裙摆提升状态应力比

图21 裙摆结构提升施工计算结果

Fig. 21 Calculation results of skirt structure lifting construction

时的高度 h 为 10 m 左右, 即 h 为 10 m 左右时被提升结构与主结构发生碰撞的风险最大, 提升施工时应特别注意。

根据以上计算方式, 得出 7、8、9 级风的 Δ 值随高度变化的曲线, 并与 d 值对比如下。

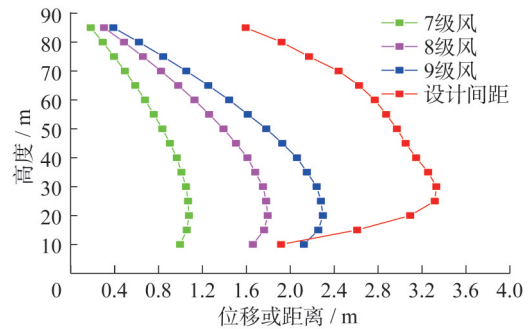


图23 7~9级风下结构位移和设计净距随高度变化曲线

Fig. 23 Displacement of structure and design net distance variation curves with height under 7~9 level wind

根据图 23 可知, 风速超过 8 级时, 在高度 h 约 10~12 m 的位置时被提升结构可能与主结构发生碰撞。因此, 提升施工前需对区域气象情况进行精准预测, 选择未来 2 天内风速较小的条件进行提升施工, 并在风速大于 6 级风的风速时启动预警措施, 将被提升结构与塔身用缆风绳进行临时拉结, 避免被提升结构晃动过大而发生碰撞。

对于类似结构的提升施工, 通过进行碰撞风险分析, 得到被提升结构各种风力等级下结构位移与塔身的净距, 除采取选择合适的天气之外, 还可以采用增加后装段长度, 即加大设计净距 d 的方式, 来减小被提升结构与塔身的碰撞风险。

7 结论

(1) 本文介绍了西安丝路塔项目的技术难点和施工条件, 提出了采用重型塔吊附着柔性塔身的分块吊装施工工艺, 保障项目顺利建成。

(2) 结合塔式起重机相关设计规定, 制定了重型塔

6.2 裙摆提升碰撞风险分析

裙摆提升过程中, 由于结构高, 风荷载较大, 受风荷载影响会出现水平位移, 而被提升结构内侧与主结构间设计净距 d 较小, 如果风荷载导致的水平变形 Δ 过大, 则可能出现碰撞的风险, 为保证提升施工安全, 需分析评估裙摆提升碰撞风险。

定义被提升结构与塔身之间的净距为 $B = d - \Delta$, 假定被提升结构变形规律接近单摆模型, 分析在十年期基本风压 (近似于 8 级风) 作用下, 被提升结构在不同提升高度下的水平变形如图 22 所示。

综上所述可知, 在高度 h 较低时 B 值较小, B 值最小

吊附着于超高柔性结构的安全性判定原则,经实际项目检验,安全可行且便于操作。

(3) 提出一种用于超高位置大尺寸莫比乌斯环结构安装的内支撑体系,根据装配式理念进行构造设计,保证施工安全的前提下,便于施工操作。

(4) 开发了用于无人机扫描数据修正的ICP算法,用于百米高空位置的结构位形测量,修正后扫描精度明显改善。

(5) 提出了一种利用中心钢塔提升外侧大悬挑裙摆结构的施工方法。对于内塔外环结构的提升施工,考虑到提升历时较长,需进行裙摆结构与塔身结构的提升过程碰撞风险分析,分析不同风力等级对提升施工结构变形和碰撞风险的影响,并采取选择风速较小的气象条件以避免大风出现,或加大设计净距减小碰撞风险等措施,以确保提升施工安全。

参考文献:

- [1] 邢遵胜,李银标,邹航,等.珠海歌剧院重型塔式起重机附着于柔性钢结构设计与施工[J].施工技术,2014,43(14):175-178.
XING Zunsheng, LI Yinbiao, ZOU Hang, et al. Design and construction for heavy-duty tower crane attached to flexible steel structures of Zhuhai opera house [J]. Construction Technology, 2014, 43(14): 175-178. (in Chinese)
- [2] 蔡柳鹤,马国良,马洁烽,等.高层建筑施工塔吊设计及其对主结构的影响[J].钢结构,2014,29(8):43-47,26. DOI: 10.13206/j.gjg201408010.
CAI Liuhe, MA Guoliang, MA Jiefeng, et al. The design of the tower crane and its influence on the main structure [J]. Steel Construction, 2014, 29(8): 43-47, 26. DOI: 10.13206/j.gjg201408010. (in Chinese)
- [3] 中华人民共和国住房和城乡建设部,中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局.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, General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine 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)
- [4] 中华人民共和国住房和城乡建设部,中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局.建筑结构荷载规范:GB 50009—2012[S].北京:中国建筑工业出版社,2012.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Load Code for the Design of Building Structures: GB 50009—2012 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012. (in Chinese)
- [5] 国家市场监督管理总局,国家标准化管理委员会.塔式起重机:GB/T 5031—2019[S].北京:中国标准出版社,2019.
State Administration for Market Regulation, National Standardization Administration. Tower Crane: GB/T 5031—2019 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2019. (in Chinese)
- [6] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,国家标准化管理委员会.塔式起重机设计规范:GB/T 13752—2017[S].北京:中国标准出版社,2017.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, National Standardization Administration. Design Rules for Tower Cranes: GB/T 13752—2017 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2017. (in Chinese)
- [7] 丁利,徐常森,贾尚瑞,等.超高空立面大直径莫比乌斯环内支撑体系施工关键技术[J].建筑钢结构进展,2024,26(10):94-99,106. DOI: 10.13969/j.cnki.cn31-1893.2024.10.011.
DING Li, XU Changsen, JIA Shangrui, et al. Key technologies for the construction of large-diameter mobius ring inner support systems for super high-altitude facades [J]. Progress in Steel Building Structures, 2024, 26(10): 94-99, 106. DOI: 10.13969/j.cnki.cn31-1893.2024.10.011. (in Chinese)
- [8] 邢遵胜,刘中华,徐德号,等.成都新世纪环球中心中央游艺区钢结构屋盖施工过程仿真分析[J].施工技术,2012,41(14):87-89,168.
XING Zunsheng, LIU Zhonghua, XU Dehao, et al. Simulation of the construction process of the steel roof in central entertainment area of Chengdu new century global center [J]. Construction Technology, 2012, 41(14): 87-89, 168. (in Chinese)
- [9] 唐寅兵.异型钢结构制作及安装精度控制技术分析[J].中国金属通报,2020(17):121-122,124. DOI: 10.3969/j.issn.1672-1667.2020.17.059.
TANG Yinbing. Technical analysis of fabrication and installation accuracy control of special-shaped steel structure [J]. China Metal Bulletin, 2020(17): 121-122, 124. DOI: 10.3969/j.issn.1672-1667.2020.17.059. (in Chinese)
- [10] 张月楼,刘祥,张良兰,等.“莫比乌斯环”环状落地大跨度拱形桁架多层钢结构设计及施工控制研究[J].建筑结构,2022,52(增刊2):513-518. DOI: 10.19701/j.jzjg.22S2701.
ZHANG Yuelou, LIU Xiang, ZHANG Lianglan, et al. Design of multi-layer steel structure with "mobius ring" large-span arch truss and construction control research [J]. Building Structure, 2022, 52 (Suppl. 2): 513-518. DOI: 10.19701/j.jzjg.22S2701. (in Chinese)
- [11] 丁利,贾尚瑞,吴楚桥,等.内侧支承大悬挑轮辐式桁架结构悬挑提升关键技术研究[J].钢结构(中英文),2024,39(4):34-40. DOI: 10.13206/j.gjgS23013101.
DING Li, JIA Shangrui, WU Chuqiao, et al. Research on key technologies of cantilever lifting of large cantilever spoke truss structure with inner support [J]. Steel Construction (Chinese & English), 2024, 39(4): 34-40. DOI: 10.13206/j.gjgS23013101. (in Chinese)