

DOI: 10.7672/sgjs2025080032

融合数字孪生技术的 NURBS 曲面体网壳 拼装提升施工技术*

钱正鑫¹, 范亦灵¹, 戴超^{1,2}, 周祎³, 向洋³(1. 中建三局集团有限公司, 湖北 武汉 430075; 2. 中建三局集团西南有限公司,
四川 成都 610218; 3. 西南交通大学, 四川 成都 610031)

[摘要] 金沙演艺综合体项目城市雨棚为大跨度 NURBS 曲面体单层相贯圆管钢结构网壳。提出一种融合数字孪生技术的 NURBS 曲面体网壳拼装提升施工技术, 将数字孪生技术等智慧建造理念融入其中, 实现数字化施工指导。在数字孪生层面, 采用 Revit, Tekla 软件进行三维建模, 并利用 MIDAS Gen, 3D3S 等软件进行验证计算; 在物理孪生层面, 基于三维扫描重建技术和 BIM-QR 技术, 对构件加工、拼装进行复核验证。最终采用渐扩渐升方法进行 NURBS 曲面体网壳不等高分步累积整体提升。基于数字孪生五维模型, 确保 NURBS 曲面体单层相贯圆管钢结构网壳的安装效果, 从而满足结构安全与建筑造型要求。

[关键词] 钢结构; 网壳; 建筑信息模型; 数字孪生; 三维激光扫描; 拼装; 提升

[中图分类号] TU17

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2025)08-0032-08

NURBS Curved Reticulated Shell Assembling and Lifting Construction Technology Based on Digital Twin Technology

QIAN Zhengxin¹, FAN Yiling¹, DAI Chao^{1,2}, ZHOU Yi³, XIANG Yang³(1. China Construction Third Engineering Bureau Group Co., Ltd., Wuhan, Hubei 430075, China;
2. China Construction Third Engineering Bureau Group Southwest Co., Ltd., Chengdu,
Sichuan 610218, China; 3. Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan 610031, China)

Abstract: The urban canopy of Jinsha Performing Arts Complex project is a large-span NURBS curved reticulated single-layer intersecting tubular steel reticulated shell. A NURBS curved reticulated shell assembly and lifting construction technology integrating digital twin technology is proposed, which integrates the intelligent construction concepts such as digital twin technology into it to realize digital construction guidance. At the digital twin level, Revit and Tekla software were used for three-dimensional modeling, and MIDAS Gen and 3D3S software were used for verification and calculation. At the physical twin level, based on the three-dimensional scanning reconstruction technology and BIM-QR technology, the component processing and assembly are reviewed and verified. Finally, the method of gradual expansion and gradual rise is used to carry out the step-by-step cumulative overall lifting of the unequal height of the NURBS curved reticulated shell. Based on the digital twin five-dimensional model, the installation effect of the NURBS curved single-layer intersecting tubular steel reticulated shell is ensured to meet the requirements of structural safety and architectural modeling.

Keywords: steel structures; reticulated shell; building information modeling (BIM); digital twin; 3D laser scanning; assembling; lifting

0 引言

数字孪生以现实世界中的物理实体为载体, 通过数字化手段创建虚拟模型, 通过虚拟与现实的互动反馈, 实现物理实体与虚拟模型间的数据交互。

* 2022 年度四川省住房城乡建设领域科技创新课题; 基于数字孪生技术的 NURBS 曲面体网壳智能建造研究 (SCJSKJ2022-34)

[作者简介] 钱正鑫, 工程师, E-mail: 569772126@qq.com

[通信作者] 周祎, 讲师, E-mail: suzhouhouyi@163.com

[收稿日期] 2024-11-20

通过数据融合、数据分析、智能决策和优化迭代等手段,提升物理实体的智慧化水平。因此,通过数字孪生技术可实现物理实体与虚拟模型在全生命周期内的高效、实时和智能连接^[1-3]。

Grievens 教授于 2003 年提出数字孪生的概念,并定义其为包括实体产品、虚拟产品及二者间的连接^[4]的三维模型。2011 年,美国空军研究实验室与 NASA 合作提出构建未来飞行器的数字孪生体,并将其定义为一种高度集成的多物理场、多尺度、多概率仿真模型。该模型能够利用物理模型、传感器数据和历史数据,反映对应实体的功能、实时状态及演变趋势。

在数字孪生技术的建筑工程应用方面,三峡集团数字产业的东岳庙 IDC 项目从大数据保存、开发、防灾备份及未来网络演进技术入手,打造了一个集中型、规模化、绿色环保的新型数据中心基地^[5]。湖南建工集团致力于建筑工程设计、施工的精细化管理,利用 BIM、云计算、物联网等技术构建工程数据的整合与链接,促进了公司数字化转型发展^[6]。

基于数字孪生技术及其在工程项目中的智慧化应用,本文提出一种融合数字孪生技术的 NURBS 曲面体网壳拼装提升施工技术。以金沙演艺综合体项目城市雨棚为物理实体进行虚拟建模,采用 Revit, Tekla 软件进行三维建模,并利用 MIDAS Gen, 3D3S 等软件进行验证计算。以虚拟建模得到的孪生数据为基准,在物理环境下通过三维重建技术和 BIM-QR 技术对构件加工进行复检验证,完成网壳拼装。施工过程中,采用渐扩渐升的方法,实现了 NURBS 曲面体网壳不等高分步累积整体提升,最终使单层相贯圆管钢结构网壳的安装效果满足结构安全与建筑造型要求。数字孪生技术融入复杂钢结构网壳施工,以数字化理念指导施工,解决了传统施工技术的不足,如数据传输滞后、监测误差大及数据可追溯性较差等问题。

1 数字孪生五维模型

现实世界中的物理模型是客观存在的,通常由多种功能子系统组成,并通过子系统间的协作完成特定任务,构成数字孪生中的第一维模型。而虚拟模型是物理实体的数字镜像,构成了数字孪生中的第二维模型,包含:①工程模型,具有温度、湿度、能耗等工程参数;②几何模型,描述尺寸、外形和位置关系;③物理模型,反映应力、位移和变形等物理特性;④行为模型,真实呈现外部驱动和扰动的力学响应;⑤规则模型,涵盖物理实体的运行规律和规

则。基于物理实体和虚拟模型,数字孪生构建了一个集评估、控制和优化等功能于一体的服务系统,提供智能操作、精确控制和可靠的运行维护服务。该系统是数字孪生中的第三维模型。孪生数据是数字孪生运行的核心驱动力,构成了其第四维模型。其包括与物理实体、虚拟模型和服务系统相关的数据,以及领域知识和融合数据。这些数据随着实时数据的产生不断更新和优化,为数字孪生提供持续支持和精确建模。通过有效的实时数据传输,将上述 4 个模型两两连接,实现了数字孪生中的第五维模型——实时交互^[5]。这种连接确保了各部分间的一致性和迭代优化,为数字孪生发展和应用提供了坚实基础。数字孪生主要特征如表 1 所示。

表 1 数字孪生主要特征

Table 1 Main characteristics of digital twin	
特征	描述
物理孪生	物理环境中客观存在的物理实体 (如实体框架结构)
数字孪生	虚拟环境中存在的虚拟实体 (如有限元模型)
物理环境	物理孪生存在的环境
虚拟环境	数字孪生存在的环境
状态	从各环境和孪生体测得的数据, 是某一时间点两孪生体的精确表示

2 融合数字孪生技术的网壳拼装提升技术框架

城市雨棚项目充分利用物理产品与虚拟产品在设计中的协同作用,制定了详细的产品方案。该方案涵盖了物理与虚拟产品仿真优化数据、融合数据及全生命周期数据,有效减少了实际产品行为与设计期望行为间的不一致。通过建立高还原度的数字仿真模型等方法,显著提升了施工质量和效率。为保证本工程物理孪生目标的决策能力并提高预测精度,本应用采用了基于数字孪生理念的有限元建模(如 ABAQUS, 3D3S 软件)和模型参数更新等技术。这些技术相互协调,共同构建了完整的数字孪生体系。

1) 物理实体方面。无论是全要素物理资源的多维融合、高还原度虚拟模型的模拟计算,还是数据的分析处理,都以物理实体为基础。同时,物理实体也驱动着各部分的运转。城市雨棚作为全要素物理实体,为 MIDAS Gen, 3D3S 虚拟模型的仿真计算和数据分析处理提供了基础。

2) 建模方面。在数字孪生体建模框架^[7]和建模过程^[8]的研究中,建模理论方面取得了一定进展,包括物理行为研究^[9]及量子误差和置信度估计研究^[10]。这些研究辅助确定了模型参数,构建了行

为约束,并验证了模型的准确性。根据模拟分析的内容及步骤,运用 MIDAS Gen 建立了模型。该模型分为4部分:网壳 B、C 区提升部分、立面网壳部分、胎架部分及整体计算模型。

3)信息物理融合方面。信息数据包括钢网壳实体参数、通过激光扫描建立的钢网壳模型及基于监测软件云平台的钢网壳施工实时监测数据。这些要素经过数字化整合后,回输到各部分,参与并推动各部分的运转。

4)交互方面。在实时生产数据收集^[11]和人机交互^[12]理论方面的研究,有助于实现物理世界与虚拟世界间的互动与协作。利用 MIDAS Gen,3D3S 软件对全过程进行仿真分析,确定了模型建立、杆件单元选取、材料设置、荷载输入及施工阶段模拟方法。为满足提升过程中有限元快速验算的需求,通过倾角仪和配套智能数据采集仪,确保网架在提升过程中的实时姿态能通过倾角数据快速传递,并由有限元软件进行快速验证。

3 物理孪生

金沙演艺综合体项目位于成都市青羊区西三环路内侧,地下3层,地上5层,包括2个单体,分别为剧院和文化中心。项目总建筑面积约 67 090m²,其中地上面积约 33 630m²,城市雨棚分布于文化中心及剧场中庭区域,为空间 NURBS 双曲面单层网壳结构,如图 1 所示。

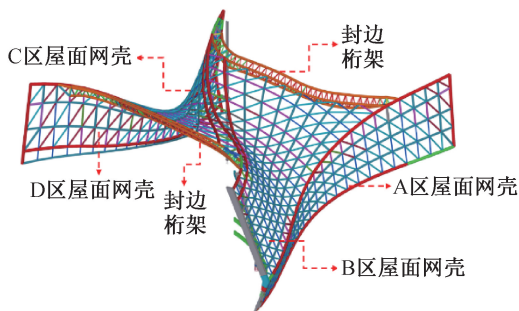


图 1 城市雨棚钢结构模型

Fig. 1 Steel structure model of urban canopy

1)钢网壳共 16 种截面,且网壳主管均为异形扭曲圆管,次管连线为双曲线,主管和次管均采用相贯口连接,构件加工难度大,加工及拼装精度要求高。

2)钢网壳屋面区域最低点与最高点高差 15.6m,结构异形且不对称,施工难度大。

3)由于城市雨棚整体结构为双曲面单层相贯圆管钢结构网壳,且结构高差大,对现场施工测量提出了较高要求。

钢结构网壳的立面网壳和封边桁架采用分片

地面拼装、分片吊装的方式。工程主要难点集中在屋面网壳安装,施工方案如下。

1)方案 1。屋面网壳采用高空原位散拼,即通过搭设满堂脚手架方式,采用汽车式起重机或塔式起重机等垂直运输设备,将构件吊运至高空进行原位拼装。

2)方案 2。屋面网壳采用整体提升方式,在地下室顶板进行地面拼装,通过液压提升技术,将网壳整体提升至设计标高,再进行后续预留杆件的安装。

3)方案 3。采用分步累积提升方法,将屋面网壳根据高度划分为多个提升单元。在地面完成提升单元 1 拼装,提升至一定高度后,在提升单元 1 两侧地面拼装提升单元 2,待提升单元 1,2 合龙后,再将其整体提升至一定高度,在提升单元 2 两侧地面拼装提升单元 3,待提升单元 1,2,3 整体合龙后,再将其整体提升至设计高度,最后完成预留杆件安装。

4 基于数字孪生的钢网壳拼装技术

运用 BIM-QR 技术,建立深化设计、材料加工及材料运输的共享平台,实现构件生产可视化管理。构件出厂前采用三维激光扫描技术,构建数字模型,通过软件将实体数字模型与 BIM 模型进行比对^[13]。

首先进行仪器精度分析与校验,安置棱镜作为控制点。在多个不同方位模拟测量方法,每次通过边角后方交会测量获取控制点的空间坐标。传统单点测量方式的精度较低,而借助三维激光扫描仪获取物体表面的三维精确数据,可满足对物体三维点的高精度测量需求。三维激光扫描点云数据处理技术包含色彩灰度、目标处理强度、目标空间信息等要素。通过点云数据的后处理模式,能充分发挥其在项目分析、测量、模拟、仿真和检测等方面的高精度优势^[14]。采用三维激光扫描仪收集三维坐标并对构件进行点云扫描(见图 2),通过数据重建、降噪等处理,最终得到高精度的单一钢构三维实物模型。

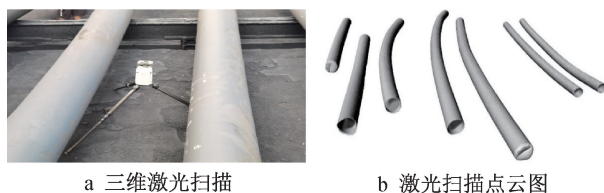


图 2 三维激光扫描

Fig. 2 3D laser scanning

根据图纸,采用 Tekla 等三维模型软件建立 1:1

实体建模。数字模型应保持与安装、制造构件的一致性,模型应处于整合状态且保持单个构件的独立性。

在三维数据采集过程中,由于环境、仪器和人为等因素会产生许多噪声点,这些噪声点不利于点云数据的精准配准和三维模型重构等后续工作的进行,因此需对采集到的数据进行降噪处理。噪声点分为物体轮廓外的明显噪声点和轮廓内的噪声点。对于不影响物体形貌的明显噪声点,可手动删除;而对于轮廓内的噪声点,则根据点云数据类型,选取相应的降噪方法去除。降噪后激光扫描模型如图 3 所示。

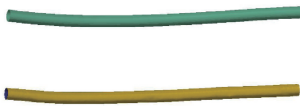


图 3 数据降噪后激光扫描模型

Fig. 3 Laser scanning model after data denoising

点云数据预处理后,进行点云数据几何重建。几何重建包括基于特征线和基于特征面的方法。在点云数据预处理及与设计模型完成配准后,需进行钢结构构件的试组装。试组装过程中,首先分析点云数据模型与设计模型间的配准误差,并采用软件对配准后的三维测量数据与设计模型进行偏差计算。若偏差在允许范围内,则拟合点云数据模型的典型控制面,得到构件断面中心点坐标,通过比较对应中心点坐标,计算试拼接后两构件间的相对误差。根据误差分析结果(见图 4),对不合格的构件进行返厂整改,验收合格后方可运输至施工现场。

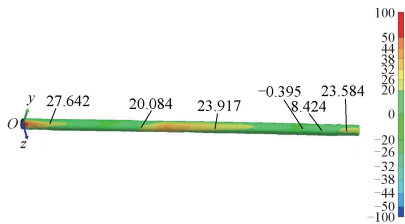


图 4 构件中心点坐标相对误差(单位:mm)

Fig. 4 Relative error of component center point coordinates(unit:mm)

将虚拟拼装的模型与三维设计模型进行线形比对和精度分析(见图 5)。首先进行数据粗配准,对已有模型通过离散获得一组点云数据,根据所得点云数据与实测点云数据的三维坐标计算出旋转和平移矩阵,然后进行点云的精确配准。三维数据精确配准采用 IPC 算法,该方法的思路是不断寻找一组点云数据中的每一个点与另一组点云中最近的点直至相互对应点距离达到最小为止,完成点

云数据模型与 CAD 模型的配准。

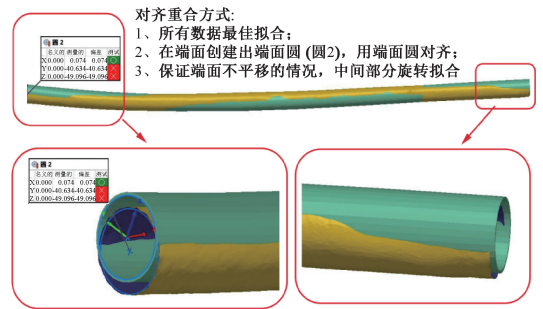
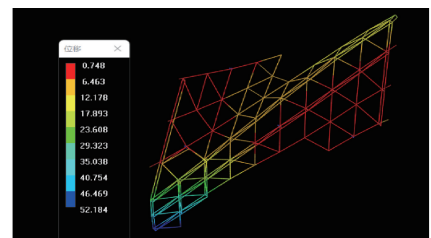


图 5 线形对比与精度分析

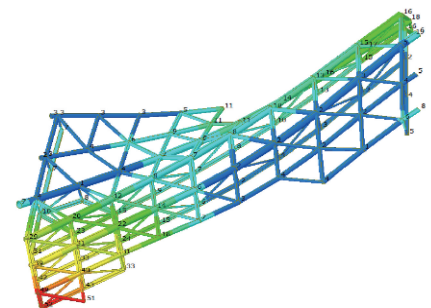
Fig. 5 Linear comparison and accuracy analysis

5 基于数字孪生的钢网壳提升技术

根据设计图纸,建立网壳提升区三维模型。在施工模拟分析过程中,由于参数设置、计算方法、规范引用、软件版本等因素的影响,计算结果可能存在偏差,难以满足曲面体施工质量控制的精度要求。为避免误差带来的不利影响,可运用 3D3S, MIDAS Gen 等有限元分析软件进行模拟分析(见图 6),从多角度验证网壳应力应变情况,为施工过程的结构安全和准确安装提供决策依据。模拟分析需详细划分施工全过程及其工况,并梳理工况间的转换关系,包括拼装工况(工况 1)、分步提升工况(工况 2)及卸载工况(工况 3)等,采用多种方式,基于垂直位移、应力应变、倾角等控制指标进行计算分析。



a 采用 3D3S 软件



b 采用 MIDAS Gen 软件

图 6 提升变形(单位:mm)

Fig. 6 Lifting deformation(unit:mm)

方案 1 与方案 2,3 相比,存在大量高空焊接作业,工期长,安全风险大,且需投入大量措施材料,

施工成本高,与项目建设目标相悖,故不进行有限元分析,直接对方案 2,3 进行数字模型对比。

1) 方案 2。依照整体提升思路,并根据拼装胎架布置进行网壳拼装模拟分析,得到网壳拼装过程变形结果。由图 7 可知,铝板区域(图 7 下半部分)最大变形为 5mm,玻璃幕墙区域(图 7 上半部分)最大变形为 9mm,在左上角区域变形最明显。可以发现该位置未布置拼装胎架,造成了网壳局部变形相比其他区域大,但整体变形数值较小,在可控范围内。

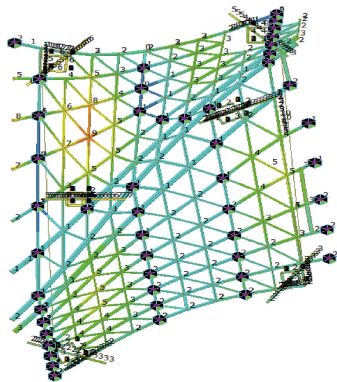


图 7 网壳拼装过程变形(单位:mm)

Fig. 7 Deformation of reticulated shell assembling process(unit:mm)

模拟网壳整体提升过程,明确网壳变形情况,由图 8 可知,铝板区域最大变形为 65mm,玻璃幕墙区域最大变形 42mm,右下角区域变形最明显。可以发现该位置未设置吊点,造成了网壳局部变形相比其他区域大,靠近提升塔架的区域变形减小,是因为提升塔架提供了一定约束。并且由于 B,C 提升区域范围大、结构自重较大,导致整体变形较大。

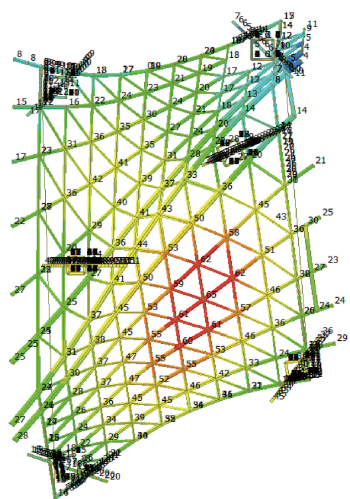


图 8 整体提升过程变形(单位:mm)

Fig. 8 Deformation of overall lifting process(unit:mm)

2) 方案 3。依据分步累积提升思路,并根据拼装胎架布置位置及拼装流程对网壳进行模拟分析,得到网壳变形结果^[15]。根据应力模拟分析,结构杆件组合应力分布整体较均匀。工况 2 与工况 1 相比,结构杆件组合应力差异较大,这是因为工况 2 为基于 TS1 提升后的结果。工况 3 与工况 2 相比,应力变化不大。综上所述,地面拼装应力满足要求,不影响施工工艺应用。拼装过程应力分析结果如图 9 所示。

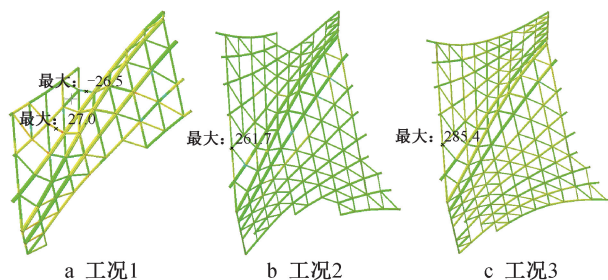


图 9 拼装过程应力分析结果(单位:MPa)

Fig. 9 Stress analysis results of assembling process(unit:MPa)

根据拼装变形模拟分析,结构整体变形趋势较均匀,且变形最明显的位置主要发生在未设置拼装胎架的薄弱位置,与工况 1 相比,变形较显著,因为工况 2 与工况 3 是基于累积提升后的结果,工况 3 与工况 2 相比,变形增加 3mm,表明分步拼装变形相差较小。拼装过程变形分析结果如图 10 所示。

根据分步提升模拟分析,部分区域杆件变形较大,应力应变结果为其抗变形加强措施提供理论依据。根据模拟结果优化调整吊点布置,对结构优化后剩余的少量应力超限杆件采取加强或换杆处理。提升过程变形分析结果如图 11 所示。

依据提升模拟分析应力及变形情况,对变形较大区域采取加强措施(见图 12),采用在提升单元脊线主管下部增设桁架的方法,增加被提升单元刚度。在网壳相应位置主管与次管相贯节点区域下方设置圆管,规格为 $\phi 180 \times 8$,圆管下方增设 H 型钢,规格为 $H250 \times 250 \times 9 \times 14$,材质为 Q355B。

方案 2 与方案 3 相比,地面拼装胎架高差约 15.6m,拼装难度较大,且措施投入较高。综上所述,结合实际条件,最终选择了立面网壳和封边桁架分片吊装、屋面网壳分步累积提升的技术方案。

6 基于物理孪生的钢网壳提升技术

基于数字孪生技术,利用物理传感器采集的数据进行模型校准,结合 BIM 技术建立钢网壳累积提升施工的数字孪生模型;利用激光传感器及力学传

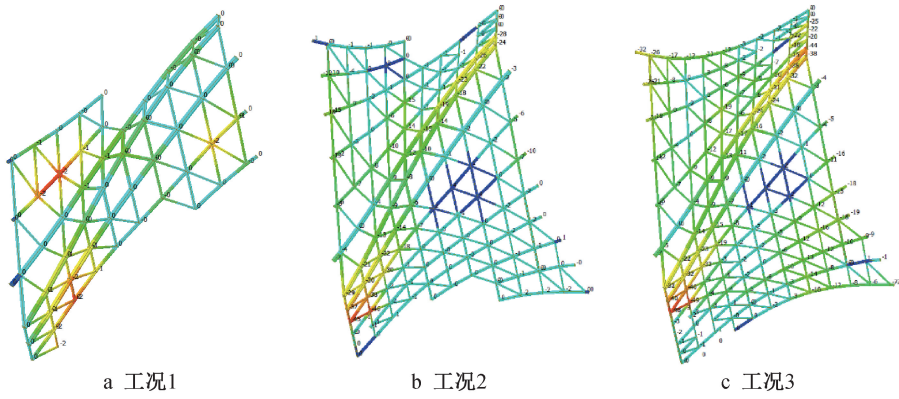


图 10 拼装过程变形分析结果(单位:mm)

Fig. 10 Deformation analysis results of assembling process(unit:mm)

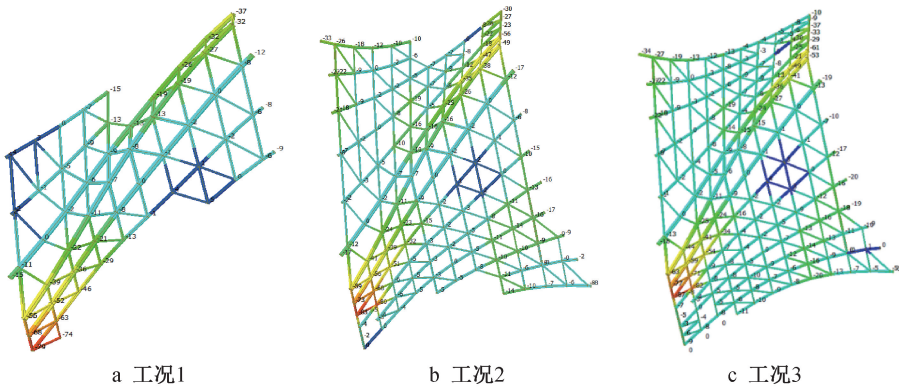


图 11 提升过程变形分析结果(单位:mm)

Fig. 11 Deformation analysis results of lifting process(unit:mm)

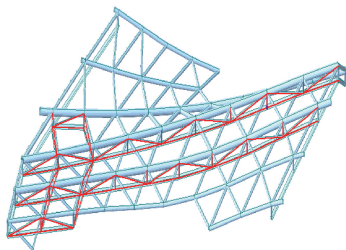


图 12 加强措施区

Fig. 12 Strengthening measure area

传感器的实时数据,搭建网壳提升动态监控平台,实时分析提升过程数据。基于动态实时交互,将钢网壳实体、数字虚拟模型和动态监测平台整合为一个有机整体,实现物理信息与数字信息的交互与传输;在平台上进行可视化展示,分析虚拟模型存储的数据及物理提升过程中实时采集的多源异构数据。通过信息物理融合,实现数字孪生数据在全生命周期的融合与交互,最终实现安全风险的实时预测及风险演化规律分析。

立面网壳和封边桁架采用 2 台 50t 汽车式起重机进行地面拼装,并利用 150t 履带式起重机安装;屋面网壳采用 2 台 50t 汽车式起重机进行地面拼

装,并利用 10 台 75t 液压提升设备分步累积提升^[16]。提升吊点布置如图 13 所示。

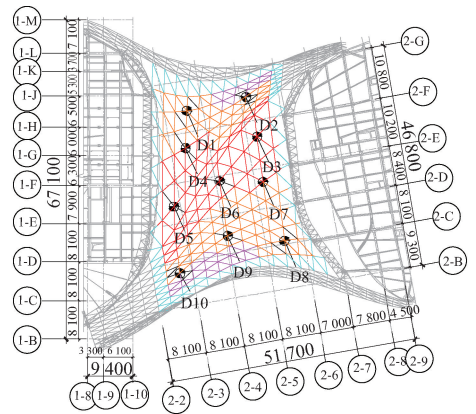


图 13 提升吊点布置平面

Fig. 13 Layout plan of lifting points

1)在混凝土楼面搭设拼装胎架,并拼装提升单元 1,在混凝土结构上搭建提升塔架,提升塔架及提升设备在提升单元 1 提升前全部安装完成,使其形成整体稳定结构。提升塔架顶部支撑横梁(上吊点)上安装液压提升器等,在与上吊点对应位置的网壳节点上安装下吊点临时吊具等,利用液压同步

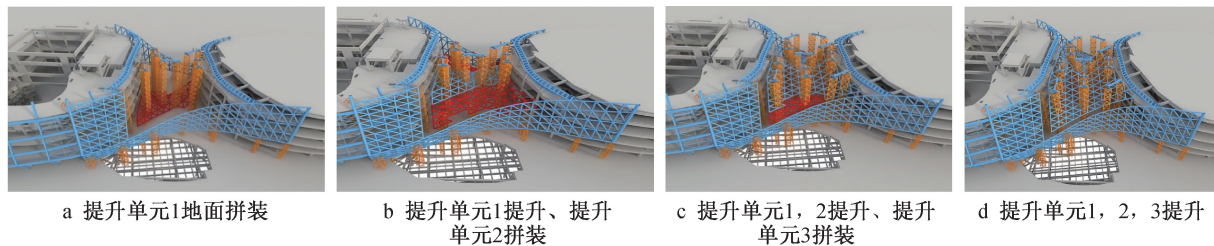


图 14 屋面网壳提升流程

Fig. 14 Lifting process of roof reticulated shells

提升系统将网壳提升单元 1 整体提升约 4.15m 后, 暂停提升; 开始拼装提升单元 2, 拼装完成后, 提升单元 1, 2 合龙, 继续提升 3.6m 后, 暂停提升; 开始拼装提升单元 3, 拼装完成后, 提升单元 1, 2, 3 合龙, 利用液压同步提升系统将雨棚网壳整体提升至设计标高, 后补杆件安装完成后, 拆除提升临时措施, 完成网壳安装^[17]。屋面网壳提升流程如图 14 所示。

2) 整体提升包括 3 个步骤。①提升前的设备检查及调试。检查提升临时措施结构状况和设备的电子操作系统、动力管道和承重工作节点, 拆除提升结构临时固定措施, 清理提升过程中可能产生影响的障碍物。②试提升。在液压系统设备检查无误后开始试提升。根据数值模拟计算的各起吊点反力值, 并将压力损失考虑在内, 确定液压葫芦所需伸出、缩回油缸压力。试提升开始时, 将液压葫芦伸出油缸压力逐步上调至所需压力的 20%, 40%, 60%, 在工况无误的情况下, 继续加载至 70%, 80%, 90%, 95%, 100%, 直至吊装单元全部脱离组塔。在分级加载过程中, 每步分级加载完成后, 应暂停并检查上部吊点结构、下部吊点结构、吊装单元等加载前后变形情况及主体结构稳定性。在一切正常的情况下, 继续分级加载。检查结构焊缝状态, 并检查吊装单元及临时结构变形情况, 确保满足吊装要求; 若满足要求, 则进行离地加载。当分级加载至吊装单元即将离塔时, 可能出现各点离地不同步的情况, 应降低吊装速度, 密切观察各点离地情况, 必要时进行单点控制, 确保吊装单元顺利离地。③提升。在正式提升过程中, 基于 NURBS 曲面体钢网壳累积提升施工数字孪生模型, 利用激光传感器及力学传感器的实时数据, 搭建网壳提升动态监控平台, 实时分析提升过程数据, 并在平台上可视化展示; 分析虚拟模型存储数据及物理提升过程中实时采集的多源异构数据, 实现提升安全风险的实时预测及风险演化规律分析。提升单元的监测内容包括垂直位移、应力应变和倾角, 全部采

用动态实时监测技术, 随提升过程同步完成监测及数据传输。在正式提升过程中, 通过垂直位移监测器和倾角监测仪监测提升同步性。倾角仪布置及安装实景图如图 15 所示。

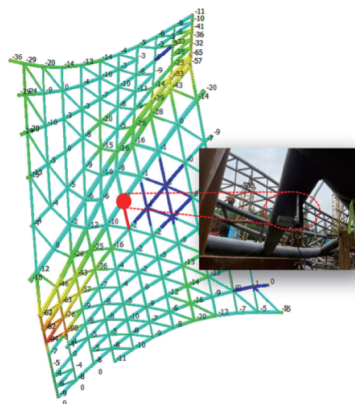


图 15 倾角仪布置及安装实景图

Fig. 15 Tiltmeter layout and installation

7 结语

针对大跨度钢网壳生产加工与提升等问题, 提出基于数字孪生的 NURBS 曲面体网壳渐扩渐升不等高累积液压提升技术。基于数字孪生五维结构模型, 分析大跨度钢网壳物理实体特征, 建立虚拟模型; 融合智能感知技术, 实现虚实信息数据的交互, 为大跨度钢网壳加工、拼装及提升提供新思路, 提升了复杂钢网壳智慧建造水平, 以数字化思路指导建造全过程。

参考文献:

- [1] TAO F, CHENG J, QI Q, et al. Digital twin-driven product design, manufacturing and service with big data [J]. The international journal of advanced manufacturing technology, 2018, 94(9-12): 3563-3576.
- [2] TAO F, ZHANG M. Digital twin shop-floor: a new shop-floor paradigm towards smart manufacturing [J]. IEEE access, 2017, 5: 20418-20427.
- [3] 陶飞, 程颖, 程江峰, 等. 数字孪生车间信息物理融合理论与技术[J]. 计算机集成制造系统, 2017, 23(8): 1603-1611. TAO F, CHENG Y, CHENG J F, et al. Cyber-physical fusion theory and technology of digital twin workshop [J]. Computer integrated manufacturing system, 2017, 23(8): 1603-1611.

- [4] GRIVES M. Digital twin; manufacturing excellence through virtual factory replication [EB/OL]. [2018-11-10]. http://www.apriso.com/library/whitepaper_Dr_Grievés_DigitalTwin_ManufacturingExcellence.php.
- [5] 辜斌,张晨,陈娣,等. 数字孪生技术在 IDC 建设中的应用研究与实践 [J]. 建筑经济, 2022, 43(S2): 56-60.
GU B, ZHANG C, CHEN D, et al. Application research and practice of digital twin technology in IDC construction [J]. Construction economy, 2022, 43(S2): 56-60.
- [6] 沈娟斐,李超,陈岳飞. 数字孪生在建筑工程领域的应用 [J]. 中国检验检测, 2022, 30(3): 6-10.
SHEN J F, LI C, CHEN Y F. Application of digital twinning in construction engineering [J]. China inspection and testing, 2022, 30(3): 6-10.
- [7] 张立霞,张帅. 面向数字孪生的通信控制组件设计与应用验证研究 [J]. 中国管理信息化, 2020, 23(24): 200-203.
ZHANG L X, ZHANG S. Design and application verification of communication control components for digital twins [J]. China management informationization, 2020, 23(24): 200-203.
- [8] MORENO A, VELEZ G, ARDANZA A, et al. Virtualisation process of a sheet metal punching machine within the Industry 4.0 vision [J]. International journal on interactive design and manufacturing (IJIDeM), 2017, 11(2): 365-373.
- [9] MAJUMDAR P K, FAISALHAIDER M, REIFSNIDER K. Multi-physics response of structural composites and framework for modeling using material geometry [C] // AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference, 2013.
- [10] SCOTTEMUAKPOR O, GEORGE T, BECK J, et al. Material property determination of vibration fatigued DMLS and cold-rolled nickel alloys [C] // International Gas Turbine Institute Turbo Expo, 2014.
- [11] UHLEMANN H T, SCHOCK C, LEHMANN C, et al. The digital twin; demonstrating the potential of real time data acquisition in production systems [J]. Procedia manufacturing, 2017, 9: 113-120.
- [12] WANG X V, KEMENY Z, VÁNCZA J, et al. Human-robot collaborative assembly in cyber-physical production; classification framework and implementation [J]. CIRP annals, 2017, 66(1): 5-8.
- [13] 黄三珊. 大跨度钢网架结构整体提升施工关键技术及 BIM 应用研究 [D]. 广州: 华南理工大学, 2014.
HUANG S S. Research on key technology of integral lifting construction of large-span steel grid structure and BIM application [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2014.
- [14] 韩晓川. 三维激光扫描点云数据处理与应用技术探讨 [J]. 智能城市, 2020, 6(19): 76-77.
HAN X C. Data processing and application technology of 3D laser scanning point cloud [J]. Intelligent city, 2020, 6(19): 76-77.
- [15] 卓新,董石麟. 施工阶段内力与变位叠加法及其应用 [J]. 浙江大学学报(工学版), 2003(5): 60-63.
ZHUO X, DONG S L. Superposition method of internal force and displacement in construction stage and its application [J]. Journal of Zhejiang University (engineering science), 2003(5): 60-63.
- [16] 沈阳建筑大学,东北金城建设股份有限公司. 建筑施工起重吊装工程安全技术规范: JGJ 276—2012 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
Shenyang Jianzhu University, Northeast Jincheng Construction Co., Ltd. Technical code for safety of lifting in construction: JGJ 276—2012 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012.
- [17] 中国建筑科学研究院. 空间网格结构技术规程: JGJ 7—2010 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
China Academy of Building Research. Technical specification for space frame structures: JGJ 7—2010 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010.