

大跨度双曲钢结构网架施工模拟

Simulation Construction of Large Span Hyperbolic Steel Structure Grid Structure

供稿|赵彦章 / ZHAO Yanzhang

内容导读

济宁大安机场屋面航站楼钢网架造型奇特、跨度大、杆件种类繁多，结构形式多变。施工中面临诸多难题：运输中大体积构件防碰撞问题；网架在顶升以及卸载过程中受力复杂；单元组合误差控制级别高；液压单元同步顶升技术难度大；现场气温、网架下部支撑结构的沉降收缩、人为和施工条件等因素对变形监测的精确度提出了严峻挑战。通过本项目的实践研究，形成了大跨度双曲钢结构网架施工技术体系，成功解决了复杂钢网架安装面临的施工难题，取得了较好的社会经济效益。

随着我国钢结构行业的快速发展，钢网架凭借其造型新颖、施工周期短和节能降碳等优势，逐步在机场、高铁站、体育馆、热力热电厂等各类建筑中被推广使用。目前国内对于钢网架安装技术研究较多，对于超长跨度钢结构网架提出了累积顶推滑移施工技术，接续拼装整体顶升施工等技术^[1]，同时对基于建筑信息模型（BIM）的异型双曲面钢结构屋面空间进行了数值模拟与优化分析^[2]。本文通过借鉴类似经验，对济宁大安机场航站楼钢网架工程进行研究，形成从运输到吊装整个过程的施工管理体系，主要包括：基于“事前模拟，过程监测，实时复核，专项突破”的施工方法；以 BIM 技术为基础的施工模拟，碰撞检查和力学软件校核方法；以数字化监测设备、点云扫描仪配合无人机、全站仪等工具对网架拼装过程进行实时监测和纠偏，对现场监测数据进行实时复核的技术方法；大跨度钢网架提升定位技术、钢结构网架焊接支撑技术、网架结构型建筑的形变监测技术、网络铺设激光测距技

术。该施工管理体系保证了网架的安装进度和作业安全，缩短工期并降低造价，可为同类型钢网架安装施工提供借鉴经验。

双曲钢网架结构施工方法

航站楼钢网架造型奇特、跨度大、杆件种类繁多，结构形式多变。一旦施工出现质量问题，整改的难度和造价非常高，急需研究一种新的施工体系，用于指导施工确保安装验收合格率，提高经济效益。通过大量研究，提出“事前模拟，过程监测，实时复核，专项突破”的钢结构网架施工方法。

事前模拟：基于 BIM 技术的施工模拟、力学分析、碰撞检查、材料统计与导出等技术的应用来前瞻存在的技术问题。

过程监测：运用专业数字化监测设备连入信息综合处理平台，结合无人机、定点监控、全站仪等辅助设备对现场进行过程实时监测；

实时复核：由于现场存在大量环境以及人为干

扰因素，为保证精度，制定实时复核策略来细化施工单元，实时进行纠偏。

专项突破：针对双曲钢网架金属屋面拼装顶升过程中存在同步顶升控制、高空焊接作业和网架空中对接难度大等一系列重难点问题进行专项攻坚。

本施工方法注重全过程控制，从事前、事中和事后分别研究并提出技术管控措施，可有效降低网架的返工率和材料损耗，保证了网架的施工质量和进度，社会经济效益显著。

基于 BIM 的施工模拟技术

航站楼网架采用液压单元顶升技术施工，涉及网架地面精确组装定位、球杆材料快速确定所属位置、特殊区域节点受力分析、焊接组装流程优化、杆件碰撞与空间位置分析等一系列施工难题亟待解决。

为快捷高效的解决上述问题，采用基于 BIM 的施工模拟技术，结合 Revit、Tekla、Rhino、Abaqus、Midas 等一系列工程建模及力学分析软件，对网架整体施工过程进行建模和施工模拟，解决精确定位、受力分析、材料分析、流程优化、碰撞模拟、施工模拟，将问题发现和解决过程完成在模型里。

BIM 运输模拟

航站楼钢网架结构构件为工厂预制，在运输途中为防止被破坏并保证其稳定性，与钢网架专业分包、预制工厂共同使用 BIM 技术进行模拟运输建模，确定最优方案。联合钢结构专业分包利用 Revit、Lumion 等软件对运输方案进行建模模拟（图 1），并对运输到项目的材料进行复核验证（图 2），得到最优运输方案。

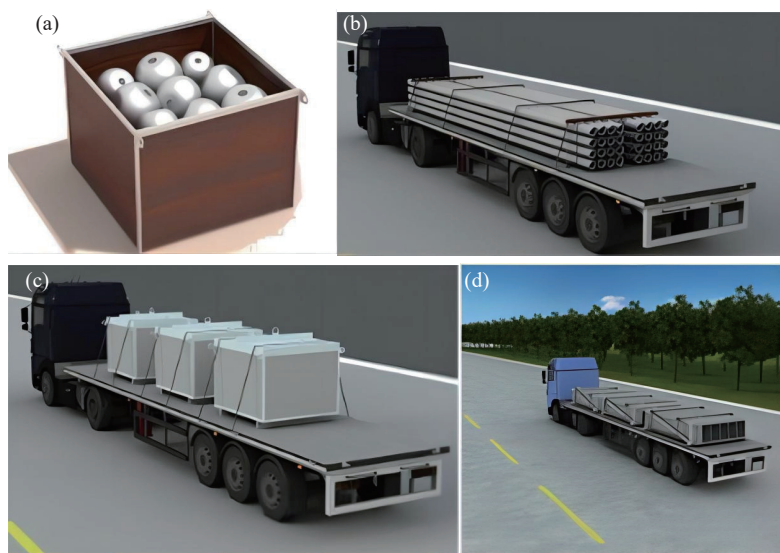


图 1 网架杆件以及焊接球等部件捆绑运输方案模拟：(a) 焊接球装箱模拟；(b) 网架杆件捆绑运输模拟；(c) 焊接球箱体捆绑运输模拟；(d) 网架散装构件装箱运输模拟



图 2 焊接球构件进场验收

节点有限元力学分析

机场航站楼屋顶采用的钢网架结构形式多变，受力复杂，通常的受力计算方式已经不满足现实需求。为解决此难题，针对典型与特殊区域节点进行建模，特别针对大跨度网架跨中位置下沉值、网架日字柱支撑体系、网架受力杆件节点等，采用 Midas、Abaqus 等有限元力学分析软件对结构进行受力分析，对区域节点进行精确计算从而使网架从地

面组装、分段顶升到支撑卸载全过程受力满足相关规定和材料力学特性。

对特殊及典型位置杆件进行力学软件断裂分析，确定杆件受力是否满足要求。对于不满足杆件力学性能要求的部位在 BIM 模型中进行定位标注，在施工过程中对于 BIM 模型中标注的部位进行调整或加固。

面域有限元力学分析

利用 Midas 对网架分块单元进行力学建模与受力分析，重点对顶升架卸载前后区域的受力情况进行分析对比，形成网架卸载前后结构变形云图及杆件应力云图，测算网架卸载过程中结构构件最大组合应力比（表 1）均满足标准 GB50017—2003 钢结构设计规范（<1.0）要求。

表 1 顶升四单元区域不同工况校核

杆件替换数量/根	替换后网架杆件最大应力比
177	0.82
219	0.83
139	0.83
112	0.84

经测算，网架各区域各个结构在卸载完成后位移最大值为 22.2 mm，满足标准 GB50017—2003 钢结构设计规范（<72 mm）要求，同时满足构件安装精度要求。

经云图测算，卸载过程中结构构件最大组合应力为 65.2 MPa（表 2），小于 Q235 材料设计强度，满足规范要求。

表 2 各分区网架卸载变形最大位移及应力值

位移最大值/mm	规范要求/mm	最大组合应力/MPa	设计要求/MPa
22.2	72.0	65.2	215
15.8	62.5	39.4	
18.1	67.5	58.7	
18.0	72.0	61.8	

模拟顶升与校核

钢网架结构顶升是钢网架屋盖拼接安装技术的重难点问题，采用 BIM+思维，除使用 BIM 软件建模进行顶升模拟外，还利用无人机、全站仪、专业平衡分析仪和顶升同步仪器在现场进行同步校核，保证了钢网架的顺利顶升^[3]。

如图 3，整体钢网架模拟顶升步骤为：

- （1）使用 BIM 软件虚拟构筑拼装台，明确砌筑胎架基础与钢管的衔接和组合；
- （2）模拟下弦球拼装胎架的定位和摆放；
- （3）模拟测量定位焊接球体焊缝方向、球内肋板的安装方向及球中心坐标、以及固定在拼装胎架；
- （4）模拟杆件定位、下弦杆件安装、折线形构件安装、马道、支撑横梁及走道板安装到上弦杆件与杆件的焊接过程。

通过 BIM 模拟顶升校核技术，实现了网架单元拼接全程的预先可视化模拟演练，校核确定了单元网架定位点，为前期方案制定和后期指导施工提供了有力抓手。

通过对以上技术的深化应用，解决了杆件材料运输难、网架节点面域力学分析难等难题，缩短了

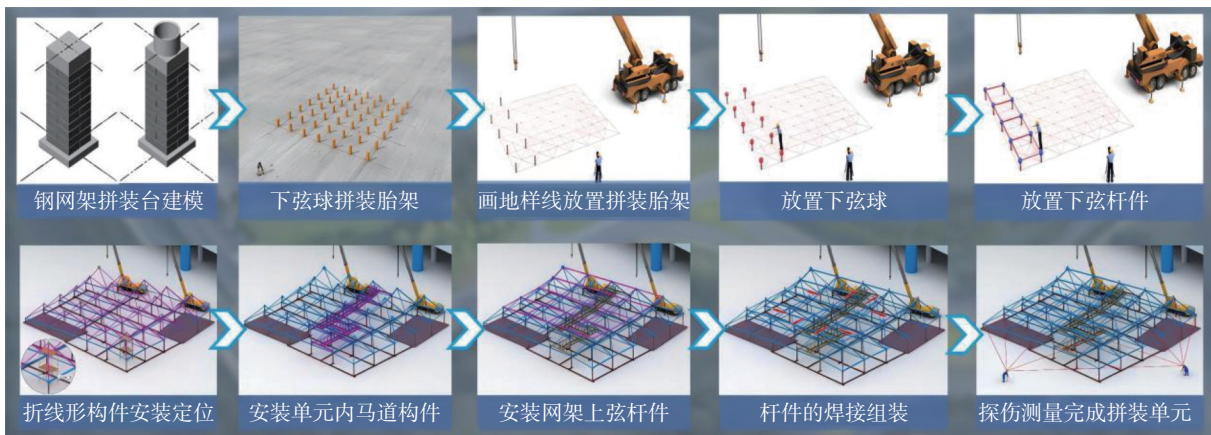


图 3 单元网架施工工程 BIM 全模拟

工期，提高了施工精度和效率，大大节约了成本。

钢网架实时检测与材料追溯技术

创新内容

多元外接设备偏移监测技术

以双曲钢网架 BIM 模型为接口，引入无人机全站仪、顶升平衡仪、力学传感器等多种外部设备，实现了现场网架结构实时数据抓取和实时偏移校核（图 4）。



图 4 网架上方布置的力学传感器抓取设备

通过现场多种观测仪器、传感器件的信息抓取和分析，获得网架观测点的实时位置，将数据变量导入 BIM 模型，使得偏移点和偏移量以所在结构部

位的颜色变化得以体现，实现了对网架整体偏移量的实时监测，方便后续有针对性的开展纠偏工作。

网架建模与加工设备数据交互技术

施工过程中发现，现场通过各种仪器测量、模型建立和软件分析所获得精确 BIM 数据极为丰富，但是这些数据却无法与材料生产设备进行有效的信息交互。基于此，研究出了一种 BIM 建模数据导出技术。该技术通过“提取、导入、转化”的思维完成了项目数据与加工设备直接有效的数据对接问题。该技术流程如下：

- （1）通过研发的插件将 BIM 工程软件与力学分析软件中所取得的数据加以提取并导出。
- （2）将导出数据加以整理，取得所需信息，再将整理后的数据进行格式转化，转化为加工设备所适配的数据格式。
- （3）与工程进行信息沟通，导入数据信息。
- （4）在试件出料无误后，依据项目提供的数据信息对项目所需材料进行精准出料，从而完成了供应方到应用方的信息流闭环^[4]（图 5）。

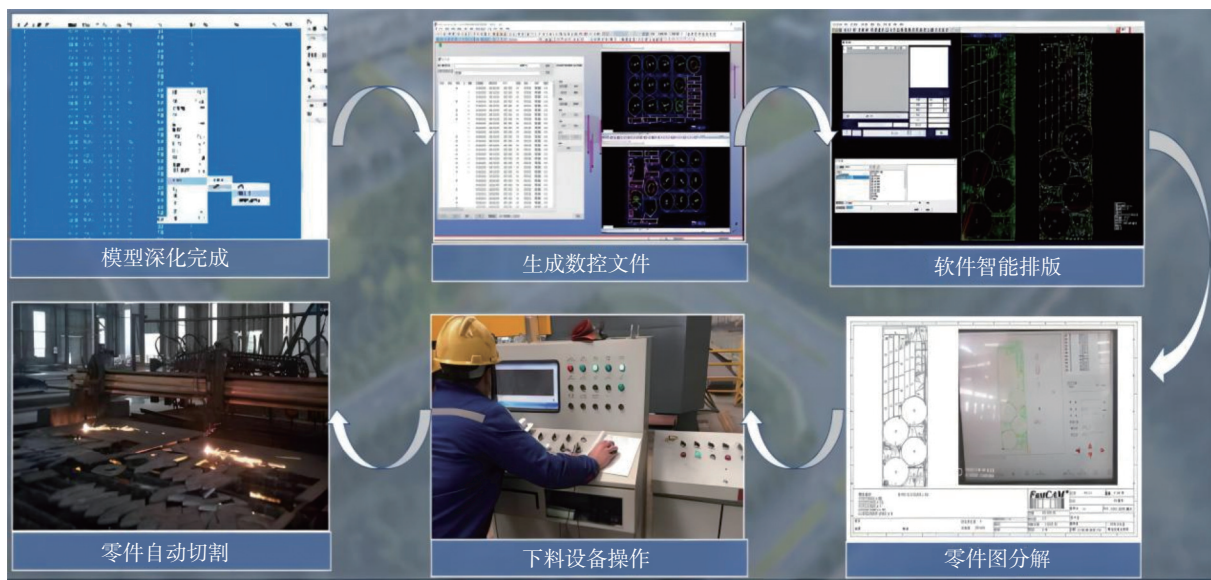


图 5 根据 BIM 数据精准出料

基于 BIM 的网架点云扫描技术

在点云测量过程中，由于在外业测量中每一站测量坐标系都是相互独立的，为了能使测量的点云数据保持正确的三维空间关系，所有的点云数据必须统一配准到同一个坐标系下，这样就保证了测量

点云相对关系的正确性，也就是需要求得不同测站公共区域内点的旋转参数和平移参数。假设在 A、B 两个位置布设测站分别对同一目标进行扫描。经过测量，获得两组不同点云数据，内业数据配准就搜寻两站测站点中测量目标 M 的同名点，将 M 点坐

标在同一坐标系下重合,假设点云之间是进行刚性变换,则在配准过程中需要对点云进行旋转和平移就是二者公共区域点云重合(图6)。

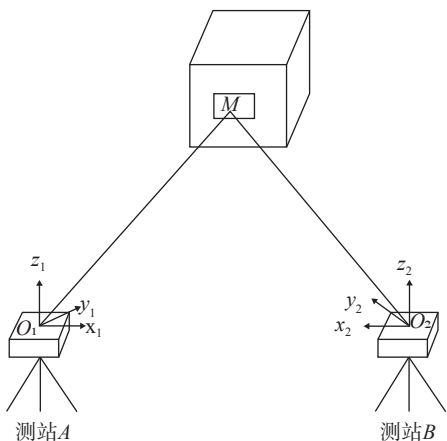


图6 两个观测位置点云扫描需保证观测位置处于同一个坐标系下

运用基于BIM的点云实测实量技术见图7~8,用测量仪器对现场进行实测实量和复核工作,极大地节省了人工,提高了工作效率,生成的点云模型精度高,效果好。

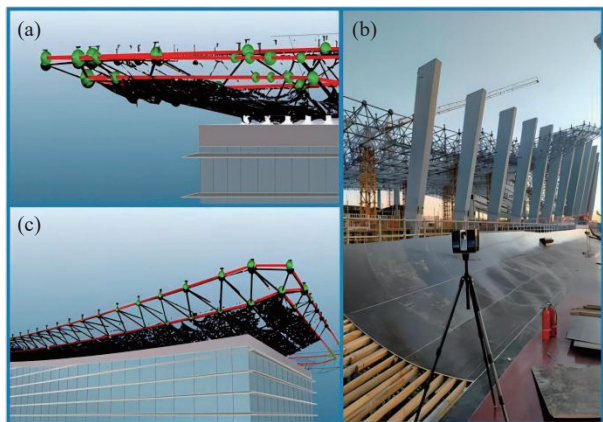


图7 点云扫描仪器和导入BIM软件的扫描图:(a)网架一区导入BIM软件的扫描图;(b)点云扫描仪器扫描图;(c)网架二区导入BIM软件的扫描图

基于BIM的网架点云扫描技术,以高于人工3倍以上的速度对网架各个杆件节予以扫描,高精度地录入杆件位置信息并导入BIM模型,可获得完全还原现场的网架点云模型图,该技术对于精确建模、节点定位、数据复核、偏移监测都起到了巨大作用(图9)。

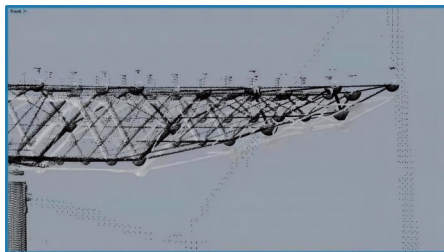


图8 屋盖网架一角的原始扫描图

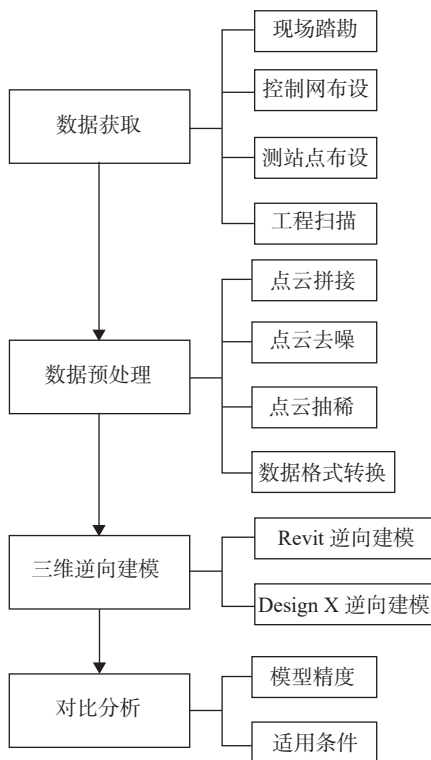


图9 基于BIM的点云扫描流程图

通过多元外接设备偏移监测技术、网架建模与加工设备数据交互技术、网架材料电子标签双向追溯技术、基于BIM的网架点云扫描技术解决了大量数据偏移监测难、模型数据与加工设备数据交互难、现场材料属性信息查找回溯难、大规模精确快捷采集网架位置信息难等一系列难题,缩短了工期,提高了施工精度和效率,有效节约了成本^[5]。

液压单元顶升技术

液压单元顶升技术,施工前网架可在二层楼面上拼装完成,既能保证质量要求,又能避免高空作业,极大地避免了伤亡事故的发生;提升的技术保证措施要求较高且操作简单;网架顶升过程中,可

以分区交出现场施工工作面，可穿插施工砌体、安装、装修等分项，能够缩短总工期 0.5~1 个月。但是，本工程单元网架体积较大，一次性同步顶升完成所需技术难度大，安全性和稳定性不足，故此决定以此方案为基础改良出一种使用于钢网架分块顶升的技术。

网架单元划分技术

由于大跨度双曲钢网架结构跨度大，面积广，无法一次性液压同步顶升完成，所以将整个网架拆分为 4 个单元，分块进行吊装施工。减轻各单元顶升偏心受力影响的同时，方便了现场工序穿插，更加灵活^[6]。

每个单元进行独立安装，按照：施工准备→放线定位→顶升区域拼装→安装马道及檩托→顶升一区→复核尺寸、调整网架轴线→顶升二区与三区→顶升二区和顶升三区顶升到位之后补嵌顶升区之间次杆→顶升四区→升四区顶升到位之后补嵌顶升区之间次杆→卸载→拆除顶升设备的整体顺序，完成网架的顶升。

对于如何划分单元网架，运用有限元力学软件对于预设划分区域单元进行力学计算和云图生成，根据模拟力学特性进行不断的调整优化，最终确定了四个单元位置的具体划分。通过力学性能分析，结合现场工序穿插，最终确定了划分方案（图 10）。

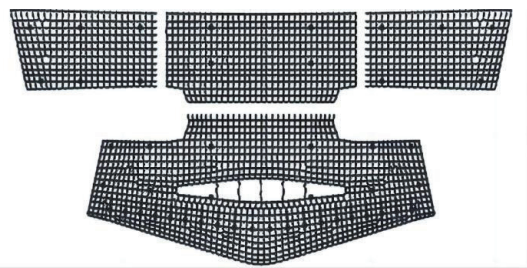


图 10 网架单元划分矢量示意图

单元荷载计算技术

在取得单元分区方案后，依据各分区重量进行单元荷载计算。屋面网架顶升区分为 4 个顶升单元，顶升一区重 279 t，布置 12 台 100 t 液压顶升油缸，液压千斤顶的使用负荷能力将额定负荷能力乘以折减系数 0.5。1200 t×0.5=600 t>279 t，满足顶升要求；顶升二区和三区各重 178 t，各自布置 6 台

100 t 液压顶升油缸，600 t×0.5=300 t>178 t，满足顶升要求；顶升四区重 519 t，布置 30 台 100 t 液压顶升油缸，3000 t×0.5=1500 t>519 t，满足顶升要求。

基于 BIM 的网架顶升点位确定技术

由于网架呈双曲面布置，造型复杂，其质量分布很不均匀，因此选择提升点位置时要综合考虑钢结构、支撑胎架和混凝土结构三方面的安全。提升点位置选择原则：

- （1）网架和提升点的受力要均衡。
- （2）支撑架设在混凝土结构的梁柱部位。
- （3）设在网架形状变化较小的部位。

按照上述原则，经 BIM 模拟施工计算分析（图 11），结合顶升架规格以及力学性能，最终确定了各提升点的位置（图 12）。

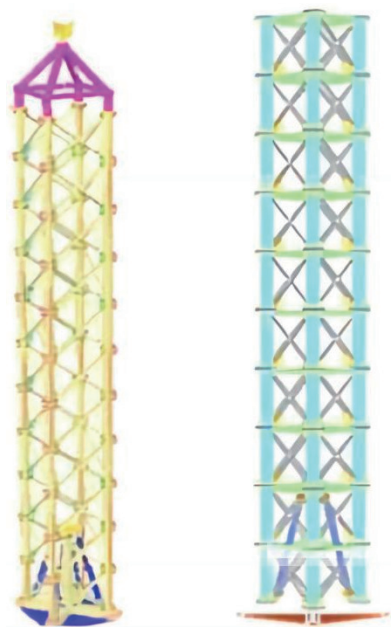


图 11 顶升支架标准节 BIM 模型透视图

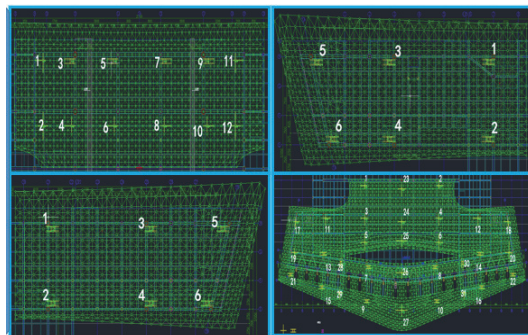


图 12 四个单元区域支撑点生产图

网架增强加固系统

由于双曲钢网架结构各项精度指标均需控制在毫米级，天气、下部支撑结构的沉降收缩、人为、施工条件等影响因素都对精度控制提出了不小的挑战。故而设计并安装增强网架系统，在现场原有钢柱处加设钢性限位设施，增强网架在合理的位移值内平稳上升，有利于观察参照位移距离大小。

为了应对现场复杂多变的施工环境和外界影响，增强网架顶升抗风险能力，提高安全保证系数，研发制定网架固定增强技术，将钢构件以稳固的力学形态因地制宜地布置在已经固定好的网架巨大承力钢柱上，以四角辐射形式将周边网架扩散连接（图 13），增强整体网架在顶升前的稳定性^[7]。



图 13 网架增强加固系统图

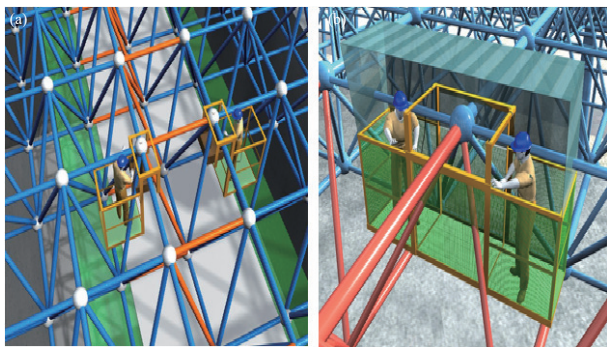


图 14 BIM 模拟高空焊接厢式操作平台：(a) 单人高空焊接厢式操作平台；(b) 双人高空焊接厢式操作平台

高空焊接防护技术

现场网架单元存在一定量的外檐悬挑结构需要高空拼接，过程中由于风力等一系列因素，传统的挂设安全带无法提供有效保障，因此设计高空焊接厢式操作平台（图 14），对高空作业人员进行全方位防护，方便施工，对于操作平台无法容纳的空间，设计悬挂式安全绳及配套支撑杆（图 15），安全灵活。此方式实现了网架高空焊接过程安全保障的全覆盖^[8]。

钢结构网架提升定位装置改良技术

在钢结构网架提升过程中需要扭曲提升钢缆、转动调节方向进行对接定位，对这种调节定位方式进行了改良，增加了抓握转动筒的设置，解决了不

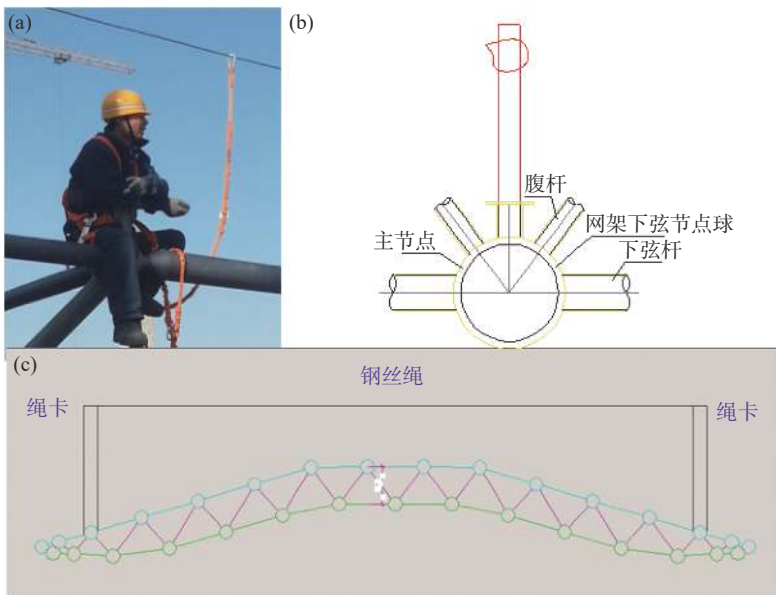


图 15 架设式安全绳生命线布置系统示意图：(a) 单人高空架设式安全绳作业；(b) 架设式安全绳配套支撑杆节点示意图；(c) 架设式安全绳生命线立面布置示意图。

能直接对钢结构网架节点球进行锁紧提升且大量消耗人力的问题（图 16）。



图 16 原始的调节方式需要直接拉动钢缆

网架变形监测与激光测距改良技术

网架施工过程中传统的监测方式取点单一，操作复杂，无法很好地满足现场需求，改良变形监测装置，使其通过调节机构调节多个监测杆移动，能够同步对多个网格进行检测，有效提高对建筑网格

的检测效率。同时，装置增设了定位机构，能够通过定位机构自动调节调节杆在建筑网架上的位置，通过确定调节杆的位置，使得每个检测机构位于对应网格的中心处，有效提高对建筑网架变形检测的精确度。装置还通过设置防损组件，在驱动压力传感器对网格侧壁所受的压力进行检测时，能够有效保护压力传感器，同时设置警示灯，能够快速观察建筑网架的形变状况，更加直观、精确。同时对现场激光测距仪器进行改良，增加一层防护罩装置使其能更广泛地应用到各种环境中，避免激光测距主体出现磕碰损伤，提高激光测距主体的使用寿命。

钢结构网架焊接用支撑装置技术

改良钢结构网架焊接用支撑装置（图 17~18），通过装置内安装环和固定杆的配合，能够将杆件快速调整到所需要的焊接高度上。解决了现有支撑装置不能满足对不同角度的杆件进行支撑和不便根据焊接的高度进行快速调节的问题。

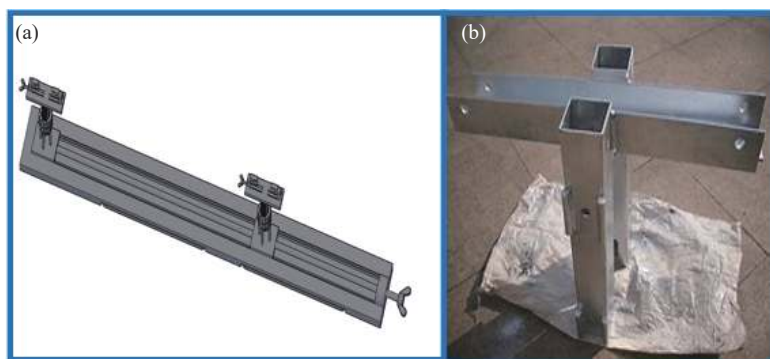


图 17 改良前后焊接支撑装置对比：(a) 改良前焊接支撑装置；(b) 改良后焊接支撑装置



图 18 现场使用改良后的焊接支撑装置进行单元网架拼接

结束语

通过对以上技术的施工模拟，解决了网架跨度

大，难以一次顶升、单元荷载计算困难、网架顶升点精确度要求高、网架稳定系统抗风险能力弱、高空焊接安全系数低、网架定位以及监测措施操作不便捷、网架焊接原有辅助工具操作不便捷等一系列网架顶升过程问题，缩短了工期，提高了施工精度。

参考文献

- [1] 晏金洲，周宏斌，吴兴明，等. 超长跨度钢结构网架屋盖安装关键技术. 施工技术(中英文), 2023, 52(8): 61
- [2] 张昊，张金平，吴森，等. 基于 BIM 的异型双曲面钢结构屋面空间数值模拟与优化分析//2022 年全国土木工程施工技术交流会

- 会. 北京, 2022
- [3] 彭科, 钟亚雯, 王宁军. 大型室内体育场馆屋盖钢网架的施工技术与管理. 建筑经济, 2020, 41(S2): 170
- [4] 杨凯, 刘云, 丁茂玲, 等. 多层钢网架施工技术. 建筑技术开发, 2023, 50(5): 35
- [5] 任斌, 王晓颖, 冯亦军. BIM 技术在北京大兴国际机场东航维修机库中的应用. 建筑科学, 2019, 35(11): 133
- [6] 王加宏. 浅谈钢网架结构高空散装法施工技术应用. 中国建筑金属结构, 2022(11): 20

- [7] 马志力, 付青石. 某体育馆钢网架可靠性鉴定与加固分析. 建筑结构, 2021, 51(S2): 1329
- [8] 夏顺强. 大型体育馆钢网架施工技术. 科技创新与应用, 2023, 13(13): 174

作者简介: 赵彦章 (1984—), 男, 山东省济宁市人, 工程师, 主要研究方向: 建设工程管理。通信地址: 山东省济宁市任城区金塔路北首; E-mail: 282435940@qq.com。