 DOI: https://doi.org/10.12349/edc.v8i2.9336

Research and Practice on Key Technologies for Safe Construction of Super-Span Industrial Building Grid Structures

Wei Yang Zhennan Wang Cheng Dong

China Construction Eighth Engineering Bureau Co., Ltd., Shanghai, 200135, China

Abstract

In response to the technical complexity and high risks associated with constructing multi-span bolted spherical grid structures in large industrial buildings in coastal areas, this study systematically investigates the key technologies and management systems of the "segmented hoisting + high-altitude bulk loading" combined construction scheme, using the segmented fabrication workshop project at the Qidong Huisheng Offshore Engineering Equipment Base as a case study. The grid structure in this project has a maximum span of 50m and a single hoisting weight exceeding 93t, making it a high-risk sub-project of considerable scale. The research covers refined simulation and command systems for multi-machine coordinated lifting, a high-altitude bulk loading operation system based on dynamic turnover of temporary supports, and BIM-based digital auxiliary management throughout the process. Practical results demonstrate that establishing a technical support system predicated on precise calculations, a safety management system centered on risk classification and control, and a dynamic adjustment mechanism successfully achieved safe, high-quality, and efficient construction of individual factory buildings. These findings provide systematic technical and management references for similar complex spatial steel structure projects.

Keywords

Steel grid structure; Super hazardous mega project; Multi-machine lifting; High-altitude work; Construction safety; BIM technology; Project management

超大跨度工业厂房网架结构安全施工关键技术研究与实践

杨威 王振南 董成

中国建筑第八工程局有限公司，中国·上海 200135

摘 要

针对沿海地区大型工业厂房中多联体大跨度螺栓球网架结构施工的技术复杂性与高风险性，以启东惠生海工装备基地项目分段制作车间工程为背景，系统研究了“分块吊装+高空散装”组合施工方案的关键技术与管理体系。该工程网架单体最大跨度达50m，单次吊装重量超93t，属于超过一定规模的危险性较大分部分项工程。研究内容涵盖多机协同抬吊的精细化模拟与指挥系统、基于临时支撑动态周转的高空散装作业体系以及基于BIM的全过程数字化辅助管理。实践表明，建立以精确计算为前提的技术保障、以风险分级管控为核心的安防体系以及动态调控机制，成功实现了单体厂房安全、优质、高效建造，相关成果为类似复杂空间钢结构工程提供了系统的技术与管理参考。

关键词

钢网架结构；超危大工程；多机抬吊；高空作业；施工安全；BIM技术；项目管理

1 引言

大跨度空间钢网架结构凭借其优异的受力性能、灵活的空间造型及较快的施工速度，已成为大型工业厂房、体育场馆等公共建筑的首选结构形式之一[1-2]。然而，此类结构在施工阶段常面临构件数量庞大、节点连接复杂、安装精度要求高、高空作业密集以及大型吊装工况多等诸多挑战，尤其是当涉及多联体布置、超大跨度或超重构件吊装时，其施工过程被列为危险性较大的分部分项工程，安全与技术风险高度集中[3-4]。

启东惠生海工装备基地项目分段制作车间工程，集成了上述多项技术难点。项目网架结构总用钢量约 3 364 t，最大跨度 50 m。施工内容中存在多项超过一定规模的危险性较大工程，其中最核心的是采用四台大型移动式起重机进行百吨级网架单元的协同抬吊作业。同时，项目地处沿海，工期紧张，需在多单体间组织高效流水施工。因此，如何系统性地解决施工过程中的安全、质量、进度与成本矛盾，是本项目成功实施的关键。

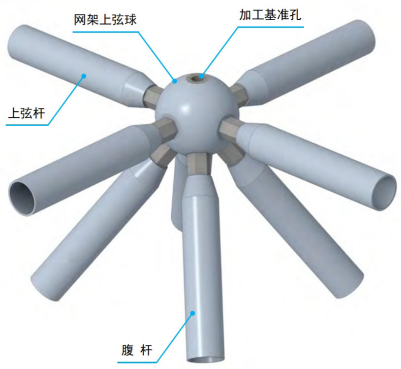
本文以该工程的专项施工方案及其实践为基础，系统梳理并总结了大跨度多联体网架结构在复杂环境下的成套施工关键技术与管理经验，以期为同类工程提供借鉴。

【作者简介】杨威（1993–），男，中国江苏盐城人，本科，工程师，从事土木工程研究。

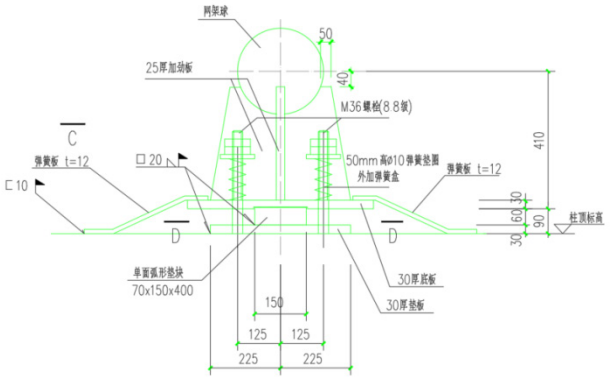
2 工程概况与施工重难点

2.1 工程概况

启东惠生海工装备基地项目分段制作车间网架结构形式为螺栓球节点正放四角锥，杆件采用 Q235B 高频焊管，节点球采用 45 号钢，高强螺栓为 40Cr。单体尺寸主要有 50 m（跨度）×165 m/195 m 和 36 m（跨度）×165 m/195 m 两种组合。网架支座设计标高为 25 m。结构设计使用年限为 50 年。



螺栓球节点



网架支座节点

2.2 主要施工重难点

本工程中跨度超过 36 m 的网架安装以及采用四机抬吊且单件起吊重量超过 100 kN 的作业，均属于超过一定规模的危险性较大分部分项工程。其中，最大吊装单元尺寸为 49.8 m × 36 m × 3.85 m，重量达 93.25 t，安全风险极高。

多机协同作业要求精准：四台大型吊车（如 220 t 汽车吊）抬吊超大面积、大吨位网架单元，要求指挥统一、动作同步，对地基处理、吊点选择、负载分配及通信保障提出了极限要求。

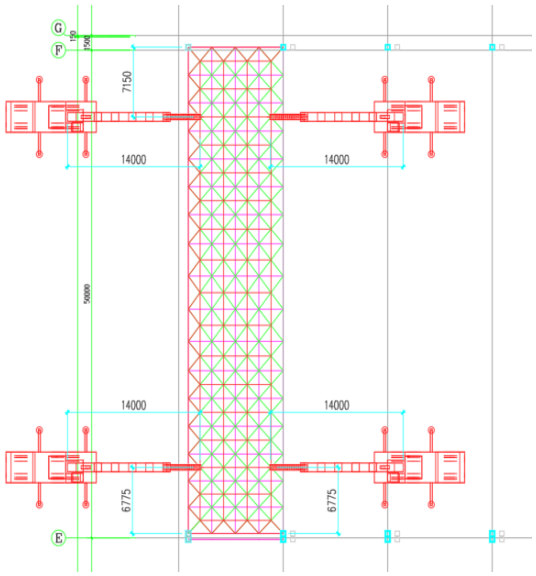
高空散装作业安全管控难度大：后续网架采用高空散装法推进，作业人员长期在 25 m 高空进行杆件与球的拼装，防坠落、防物体打击是安全管理的核心与难点。

多单体平行流水施工组织复杂：十个独立吊网架单元需统筹规划施工顺序、材料转运路径、机械设备调度及劳动力配置，以实现工期目标，组织协调工作量大。

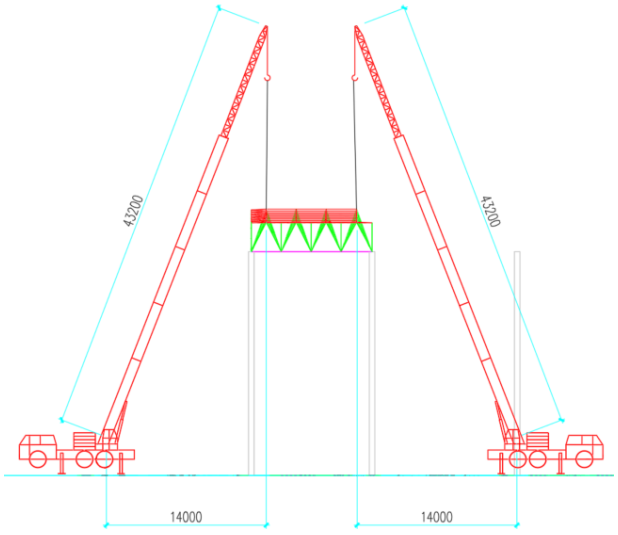
3 总体施工部署与关键技术

3.1 施工总体部署

采用“分区作业、流水推进、由边向中”的总体思路。将每个单体网架在平面上划分为边缘起步区和内部扩展区。施工顺序上，优先同步施工两侧的起步单元，待其形成稳定基准面后，再依次向中间轴线推进。核心工艺采用“网架分块吊装”与“高空散装”相结合：将起步单元在地面拼装成大型稳定块体后整体吊装；后续单元则以“三角锥”小拼单元形式，通过汽车吊吊运至高空进行嵌补散装（图 1）。



吊车站位平面示意图



吊车站位立面示意图

3.2 超危大吊装关键技术

3.2.1 吊装工况精细化模拟与验算

对每个起步吊装单元进行三维建模与受力分析，精确计算吊点反力。以最重的 93.25 t 单元为例，采用 4 台 220 t

汽车吊进行“四机八点”抬吊。经核算，在最不利工况（臂长 40.8 m，回转半径 16 m）下，单机最大计算负载（考虑 1.3 倍动力系数）为 30.29 t，约占该工况下额定起重量 41.1 t 的 73.7%，满足规范对多机抬吊负载率通常不超过 75% 的要求 [5]。同时，对吊车站位、臂架与结构间的抗杆干涉进行了三维模拟验证，并依据《建筑地基基础设计规范》（GB 50007-2011）对吊车支腿地基承载力进行了专项验算，要求处理后的地基承载力不低于 100 kPa，并铺设路基箱扩散应力。

3.2.2 多机协同指挥与同步控制系统

建立“一人指挥、多机联动、信号统一”的指挥体系。指定唯一持有特种作业操作证的经验丰富信号工，使用同频对讲机作为主指挥通信工具，辅以标准化旗语和手势。制定了严格的指挥流程，包括“预备 - 应答”确认机制和“紧急停止”信号的绝对优先权。吊装过程分为试吊（离地 300 mm 静置检查）、平稳起升、空中微调和分级卸载四个阶段。卸载时，采取分次、等量（每次约 1 t）、间隔停顿观察的方式，确保荷载平稳转移至结构支座。

3.3 高空散装作业体系与临时支撑技术

3.3.1 高空作业安全通道与防护

在已安装完成的网架上弦杆系上，采用钢管搭设宽度不小于 0.8 m 的纵向安全通道，两侧设置不低于 1.2 m 的防护栏杆，通道满铺脚手板并固定，下方张挂双层水平安全网，形成立体防护 [6]。作业人员上下通过随结构延伸而移动的“井字形”标准钢爬梯，并全程使用带有自锁器的双钩安全带，确保移动过程中始终有钩挂点。

3.3.2 动态临时支撑系统

设计了两套临时支撑体系以保障散装过程的结构稳定与安装精度：① 周转式轻型支撑：采用 $\phi 402 \times 12$ mm 钢管制成，高度可调，顶部设简易托架。用于在散装前沿，为待安装的下弦球提供临时标高支承。采用“前支后拆、循环倒用”的方式，即安装点向前推进两个网格后，后方第一个支撑即可拆除前移。支撑中部设置缆风绳（Φ16 钢丝绳）与地锚或已完结构拉结，保证其侧向稳定性。② 保险性重型支撑：在关键的大跨度起步单元下方挠度敏感点，布置由塔吊标准节构成的刚性支撑，顶部安装 20 t 机械千斤顶用于微调。该体系主要作为防止在后续安装过程中网架产生过大下挠的保险措施，待整体结构形成足够刚度后拆除。

3.4 测量与变形动态监测技术

建立基于强制对中观测墩的高精度施工测量控制网。在网架施工过程中，将监测靶标粘贴于代表性下弦球节点，采用高精度全站仪对网架的整体挠度与关键节点坐标进行跟踪测量 [7]。监测频率与施工进度联动，每安装完成一个柱距即测量一次。设定三级预警机制：当监测挠度达到设计允许值（L/250）的 80% 时为黄色预警，需加强观测并检查原因；达到 90% 时为橙色预警，需准备启动预案（如增设临时支撑）；达到 100% 时为红色警报，必须立即停止施工并采取加固措施。通过动态数据反馈，指导施工顺序调整与临时措施的施加。

4 数字化与精细化施工管理

4.1 BIM 技术全过程应用

应用 BIM 技术贯穿设计、施工阶段：① 深化设计阶段：建立全专业三维模型，进行碰撞检查，优化节点构造与构件分段，自动生成构件加工图和材料清单，提高了设计精度与效率。② 施工模拟阶段：进行 4D 施工模拟，可视化演示吊装流程、散装顺序及临时支撑设置，用于施工方案交底与优化，提前发现潜在问题 [9]。③ 进度与物料管理：将 BIM 模型与进度计划关联，实现进度可视化追踪；基于模型进行物料统计与发放管理。

4.2 全链条安全管理体系

构建了覆盖“人、机、料、法、环”的全方位、精细化安全管理网络。

人员准入管理：实施作业人员每日岗前体检（测血压、酒精）、安全晨会、可视化身份标识（安全帽编码、马甲工种）制度。特种作业人员持证上岗，证件联网核查。

设备入场验收：对汽车吊、高空作业车等流动机械，实行“资料核查 + 实体检查 + 联合验收签字”的准入制度。验收合格后张贴设备信息卡、安全操作规程和“五条铁律”警示牌。

作业过程许可：对起重吊装、动火作业等高风险作业，严格执行每日作业许可审批制度（“吊装令”、“动火令”），未经批准不得施工。

安全防护标准化：强制要求高处作业人员佩戴五点式双钩安全带并做到“高挂低用”；在作业面临边、爬梯等处设置标准化的生命线系统。

4.3 全面质量管理与绿色施工

严格执行“三检制”、隐蔽验收、样板引路等质量管理制度。对进场原材料（钢材、高强螺栓、涂料）及焊缝质量（20% 超声波抽检）进行见证取样送检。制定绿色施工专项方案，通过采用低噪音设备、设置喷淋降尘系统、废水沉淀后排放、建筑垃圾分类回收等措施，落实“四节一环保”要求。

4.4 应急管理体系

编制综合应急预案及各类专项预案（如防台风、高处坠落、火灾等）。成立应急救援指挥部，明确职责与联络方式。现场配备必要的应急物资（担架、灭火器、防汛沙袋等），并定期组织实战化应急演练，提升应急响应能力。

5 实施效果与结论

通过上述关键技术与管理措施的系统实施，启东惠生海工装备基地分段制作车间网架工程取得了显著成效：

安全：整个施工周期内，未发生任何安全生产事故，

成功管控了多机抬吊、高空散装等重大风险源。

质量：网架安装精度、焊缝质量、防腐涂层厚度等均一次验收合格，满足设计与规范要求。

进度：十座网架单体按计划完成主体安装，保证了项目总体工期。

管理：形成了可复制的大型复杂网架施工精细化、标准化管理流程。

6 结语

对于大跨度多联体工业厂房网架结构，其成功施工依赖于一套集成了精确模拟计算、多机协同控制、动态监测调控和 BIM 数字化管理的综合性技术解决方案。核心在于将超危大工程的风险管控前置并贯穿始终，通过精细化的施工组织与标准化的现场管理，将复杂的技术方案转化为可执行、可检查、可追溯的作业流程。本工程的研究与实践，验证了该技术与管理体系的有效性，为类似复杂空间钢结构工程的建造提供了系统的理论参考与实践范例。

参考文献

[1] 刘锡良. 现代空间结构[M]. 天津: 天津大学出版社, 2003.

[2] JGJ 7-2010，空间网格结构技术规程[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.

[3] 王宏， 陈志华， 王小盾. 大跨度空间钢结构施工关键技术研究进展[J]. 工业建筑, 2019, 49(10): 1-9.

[4] GB 6067.1-2010，起重机械安全规程 第1部分: 总则[S]. 北京: 中国标准出版社, 2010.

[5] JGJ 80-2016，建筑施工高处作业安全技术规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016.

[6] 秦杰， 徐瑞龙， 张然. 大跨度钢结构施工过程监测技术研究[J]. 施工技术, 2015, 44(18): 41-44.

[7] 李久林， 王勇. BIM技术在大型复杂钢结构工程施工中的应用[J]. 建筑技术, 2014, 45(10): 871-874.