

大跨度弧形管桁架钢结构施工关键技术 与风险耦合管控研究

白尧尧

中国一冶集团有限公司, 湖北 武汉 430081

DOI:10.61369/ERA.2026020044

摘要 : 针对中原高铁港数字展贸城展厅钢结构工程跨度大、重量大、工期紧、技术难度高的特点, 本文以该工程 16 个展厅 32554t 五弦弧形管桁架施工为研究对象, 系统开展关键技术集成优化与风险耦合管控研究。通过分析工程核心技术难点, 构建“加工-拼装-提升-焊接-监测-防控”一体化技术体系, 建立多维度风险耦合管控模型, 解决了大跨度桁架安装同步性、焊接质量控制、高精度拼装、复杂风险协同防控等技术难题。工程实践表明, 该技术与管控体系实现了施工全过程零安全事故, 桁架拼装精度误差 $\leq 2.8\text{mm}$, 提升同步性误差 $\leq 4.2\text{mm}$, 焊缝一次合格率达 99.2%, 工期提前 5 天完成, 为类似超危大钢结构工程施工提供了成套技术与管理解决方案。

关键词 : 大跨度钢结构; 弧形管桁架; 液压同步提升; 风险耦合; 施工技术; 安全管控

Research on Key Construction Technologies and Risk Coupling Management and Control for Large-Span Curved Pipe Truss Steel Structures

Bai Yaoyao

China First Metallurgical Group Co., Ltd., Wuhan, Hubei 430081

Abstract : Addressing the characteristics of large span, heavy weight, tight construction schedule, and high technical difficulty in the steel structure project of the exhibition halls in the Digital Exhibition and Trade City of Zhongyuan High-Speed Rail Port, this paper focuses on the construction of 32,554 tons of five-string curved tubular trusses across 16 exhibition halls as the research subject, systematically conducting research on the integrated optimization of key technologies and risk coupling management and control. By analyzing the core technical challenges of the project, an integrated technological system encompassing "processing-assembly-lifting-welding-monitoring-prevention and control" was established, along with a multi-dimensional risk coupling management and control model. This approach resolved technical issues such as the synchronization of large-span truss installation, welding quality control, high-precision assembly, and coordinated prevention and control of complex risks. Project practice demonstrates that the technology and management and control system achieved zero safety incidents throughout the construction process, with truss assembly accuracy errors $\leq 2.8\text{ mm}$, lifting synchronization errors $\leq 4.2\text{ mm}$, a first-pass weld qualification rate of 99.2%, and the project completed 5 days ahead of schedule. This provides a comprehensive technological and management solution for similar ultra-hazardous large-scale steel structure projects.

Keywords : large-span steel structure; curved tubular truss; hydraulic synchronous lifting; risk coupling; construction technology; safety management and control

引言

随着现代建筑工程向大跨度、复杂化、集成化方向发展, 弧形管桁架结构因其受力合理、造型美观等优势, 在大型会展中心、体育场馆等公共建筑中得到广泛应用。但此类结构存在构件重量大、安装跨度广、施工工艺复杂、风险因素多且耦合效应显著等问题, 给施工技术与安全管控带来巨大挑战^[1]。中原高铁港数字展贸城展厅钢结构工程作为典型的超危大工程, 包含 164 榀五弦弧形管桁架, 最大跨度 99.5m, 单榀桁架重量 198.5t, 施工涉及加工、运输、拼



图 1 项目效果图

装、提升、焊接等多个复杂环节，且面临100天的紧张工期，技术集成与风险管控难度极大。

目前国内外相关研究多集中于单一技术优化或独立风险防控，缺乏对大跨度弧形管桁架施工技术的系统集成及多维度风险的耦合管控研究^[2]。基于此，本文结合中原高铁港项目实际及管控措施，构建关键技术集成体系与风险耦合管控模型，通过工程实践验证其有效性，为同类工程提供技术参考与实践指导。

一、工程概况

(一) 工程基本特征

中原高铁港数字展贸城展厅钢结构工程位于河南省郑州市航空港区，总建筑面积488866 m²，地上二层、地下一层，展厅建筑高度25.5m，中轴主拱高度38.0m。工程由16个展厅组成，分为标准展厅（01~06#、10~16#，共13个）、小型展厅（07~08#，共2个）、中型展厅（09#，共1个），采用五弦弧形管桁架+铰接钢管柱+背拉索结构形式。

钢结构核心参数如下：

桁架系统：共计164榀屋面桁架，总重量32554t，单榀桁架尺寸104.5×17×(4.2~5.7)m，跨度99.5m，间距18.0m；主桁架宽3.0m，翼桁架宽14.0m，拱高4.2~5.7m。

· 构件参数：主桁架上弦杆采用Φ508×22/15钢管（Q355B/Q460C），下弦杆采用Φ508×60/34/14钢管（Q460C），腹杆采用Φ325×8~Φ406×30钢管；A型柱中间段为Φ610×20钢管（Q460C），背拉杆为Φ90钢管（Q650）。

· 施工部署：分四个工区同步施工，采用“工厂分段加工+现场原位拼装+液压同步提升”工艺，标准展厅按4+4+3榀分三次提升，中型展厅按3+3+3榀分三次提升，小型展厅按3+3榀分二次提升，计划工期100天。

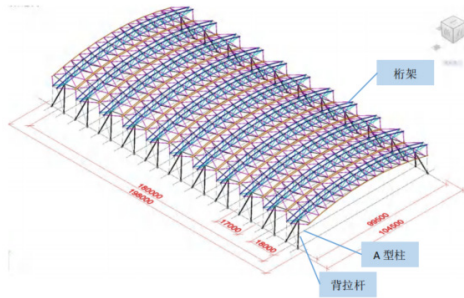


图2 单个标准展厅钢桁架主结构模型图

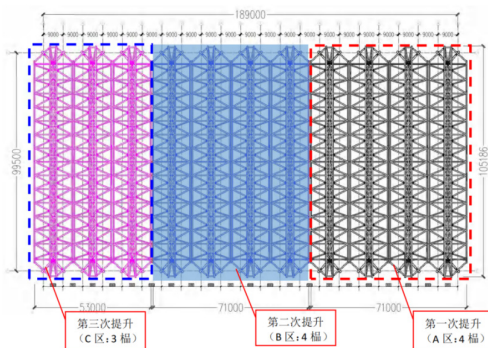


图3 同步提升分区示意

(二) 工程施工重难点

1. 工程量大且工期紧张

钢结构总重量达32554t，164榀桁架需在100天内完成安装，平均每日安装效率需达325.5t。构件加工、运输、拼装、提升等环节需高效衔接，且涉及8个制作厂同步生产、2个中转场协调调度，供应链管理难度大。

2. 安装跨度大且难度高

桁架最大跨度99.5m，单榀重量198.5t，远超常规吊装极限，需采用分块提升工艺。提升过程中需控制多吊点同步性，避免结构受力不均产生变形，提升架基础承载力需≥130kPa，临时支撑体系需满足高承载力与稳定性要求。

3. 焊接难度大且质量要求高

现场焊接量大，最大钢管厚度60mm，涉及Q355B、Q460C等多种高强度钢焊接，需控制焊接变形与残余应力。焊缝类型涵盖平、立、仰、横等多种位置，一级焊缝需100%探伤合格，外观质量需满足外露结构B/C级标准^[3]。

4. 精度控制要求高

桁架拼装整体误差需≤3mm，胎架标高误差≤±1mm，提升同步性误差≤5mm，A型柱垂直度偏差≤12mm。构件连接采用法兰螺栓与销轴连接，需满足机加工精度要求，且测量需克服日照温差、风力等环境因素影响^[4]。

5. 季节性施工影响显著

施工周期覆盖郑州夏季高温（最高气温≥38℃）与雨季（降水量占全年55%），需应对高温焊接变形、雨季地基沉降、大风天气吊装安全等问题。

二、关键技术集成优化

(一) 构件加工精度控制技术

1. 材料预处理与下料优化

采用数控等离子切割机、自动切割机、相贯线切割机分别进行管材与板材下料，切割误差≤±1mm。对Q355B、Q460C钢材进行预处理，去除氧化皮与锈蚀，确保焊接质量。主桁架弦杆分为6段加工，通过数字化建模模拟焊接变形，预控分段长度误差≤2mm。

2. 出厂检验强化

采用激光扫描仪对构件进行三维检测，关键尺寸检测覆盖率100%，重点核查弦杆直线度、管口椭圆度、法兰螺栓孔位置等关键参数。不合格构件严禁出厂，确保现场拼装精度^[5]。

(二) 现场拼装优化技术

1. 模块化胎架设计

设计模块化拼装胎架，由路基箱、管托、支撑型钢组成，立柱采用HW350/HW200型钢，通过可调螺栓调整标高，精度误

差 $\leq \pm 1\text{mm}$ 。胎架基础经碾压处理,地基承载力 $\geq 130\text{kPa}$,铺设 $6 \times 1.8 \times 0.2\text{m}$ 路基箱分散荷载。

2. 侧立式拼装工艺

采用“侧立式拼装”方法,先拼装主桁架弦杆,再拼装腹杆及翼桁架,拼装顺序从中间向两侧对称进行。在胎架操作平台设置全站仪测放控制线,焊接前采用激光扫描仪检测拼装精度,超差部位采用火焰校正^[6]。

(三) 液压同步提升技术

1. 提升设备选型与布置

选用16台YS-SJ-180液压提升器(单台额定提升力180t)、4台YS-PP-15液压泵源系统、1套YS-CS-01同步控制系统,钢绞线采用 $1 \times 7-17.8-1860$ 型,安全系数 ≥ 3.0 。每个展厅设置8个提升吊点,位于桁架反弯点处,采用销轴连接方式,提升耳板与桁架下弦杆插板一体化设计^[7]。

2. 同步控制策略

采用“吊点油压均衡+位移同步控制”双控策略,提升速度控制在 5m/h 。分级加载(20%、40%、60%、80%、90%、95%、100%),确保结构受力均匀。提升过程中通过NTS全站仪332R4实时监测各吊点位移,同步性误差 $\leq 5\text{mm}$ 。

3. 提升架与基础设计

提升架采用LC-1.5系列工具式支撑体系,由1.8m和3.3m标准节组合而成,材质Q355B,最大承载力满足提升要求。提升架基础采用 $4000 \times 4000 \times 700\text{mm}$,C30混凝土独立基础,周边设置排水沟,避免雨水浸泡^[8]。

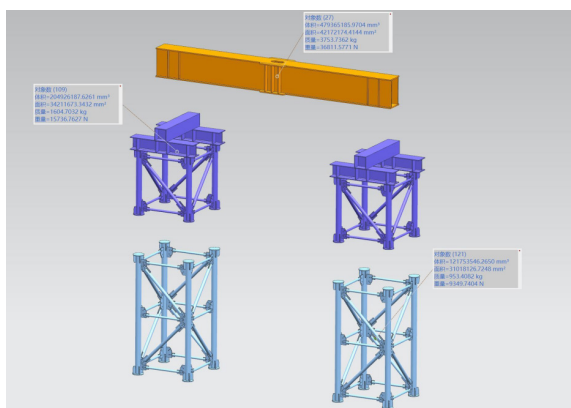


图4 LC-1.5系列工具式支撑体系提升支架示意图

(四) 焊接质量控制技术

1. 焊材选用与工艺优化

Q355B钢材采用E5015焊条($\Phi 3.2/4.0$)、ER50-6焊丝($\Phi 1.2$);Q460C钢材采用E5515焊条、ER55-D2焊丝。厚钢板焊接采用“多层多道焊”工艺,预热温度 $\geq 80^\circ\text{C}$,层间温度控制在 $60\sim 220^\circ\text{C}$, CO_2 气体保护焊参数:电流 $220\sim 320\text{A}$,电压 $29\sim 34\text{V}$,焊速 $350\sim 450\text{mm/min}$ ^[9]。

2. 焊接顺序与变形控制

桁架主弦杆焊接从中间向两侧对称进行,每个焊口配备2名焊工对撑焊;腹杆焊接先下弦后上弦,先主桁架后翼桁架。采用锤击法减小焊接残余应力(根部焊道除外),避免焊接变形^[3]。

3. 质量检测强化

焊接完成24h后进行无损检测,一级焊缝100%超声波探伤^[9],二级焊缝20%抽检。外观检查无裂纹、夹渣、焊瘤等缺陷,焊缝尺寸满足设计要求。

(五) 施工监测监控技术

1. 监测内容与设备

监测内容包括桁架挠度、A型柱垂直度、提升架沉降、焊接应力等。选用NTS全站仪332R4(精度2秒)、DT8380测温仪、EPK600-F漆膜测厚仪、ASMB2-32焊接应力检测仪器等设备^[10]。

2. 监测频次与预警标准

A型柱每天监测1次,桁架提升过程每4h监测1次,卸载后一周内每天监测1次。预警值设定:桁架挠度 20mm ,A型柱垂直度 12mm ,提升架垂直度 15mm ,超预警值立即停工处理。

(六) 季节性施工技术

1. 高温施工措施

避开正午(11:00-15:00)进行焊接与测量校正,焊接作业区搭设遮阳棚,焊材存放于阴凉干燥处。涂装环境温度控制 $\leq 38^\circ\text{C}$,相对湿度 $\leq 85\%$ 。

2. 雨季施工措施

提升架基础周边设置排水沟,配备12台150QJ40-100/10型潜水泵排水。雨天停止高空焊接,构件堆放垫高 200mm ,避免积水浸泡。雨后复查胎架沉降,沉降值 $> 5\text{mm}$ 时及时调整。

3. 大风天气应对

风力 ≥ 6 级时停止吊装作业,已吊装构件采用缆风绳固定。提升过程中监测钢绞线斜度, $> 1^\circ$ 时暂停提升,通过钢丝绳限制水平摆动。

三、风险耦合管控体系

(一) 多维度风险辨识

基于《危险性较大的分部分项工程安全管理规定》^[1],构建“体系管理-起重吊装-施工机具-高处作业-施工用电”五大风险维度,识别296项风险因子:

体系管理维度(72项):包括责任制度、专项方案、人员资质、安全交底等,如特种作业人员无证上岗(Ⅰ级风险);

起重吊装维度(37项):涉及设备检测、索具选用、吊装工艺等,如起重机超载作业(Ⅱ级风险);

施工机具维度(24项):包含电焊机、气瓶、运输车辆等,如气瓶暴晒(Ⅳ级风险);

高处作业维度(35项):涵盖安全帽、安全网、临边防护等,如高空作业未系安全带(Ⅰ级风险);

施工用电维度(36项):涉及接零保护、配电线路、配电箱等,如配电系统未采用TN-S系统(Ⅰ级风险)。

风险等级划分采用“可能性-后果严重性”二维模型,分为Ⅰ级(极高风险,58项)、Ⅱ级(高风险,76项)、Ⅲ级(中等风险,89项)、Ⅳ级(低风险,73项)。

(二) 风险耦合效应分析

1. 耦合类型识别

直接耦合:起重吊装设备故障(施工机具)→高空坠落(高处作业);

间接耦合：专项方案不完善（体系管理）→焊接质量缺陷（施工工艺）→结构安全风险；

反馈耦合：施工用电违规（施工用电）→火灾（文明施工）→钢结构构件损坏→二次风险。

2. 耦合度量化

通过风险耦合度公式计算，各维度耦合度排序：起重吊装-高处作业（0.87）>施工用电-文明施工（0.79）>体系管理-起重吊装（0.76）>高处作业-施工机具（0.72），明确起重吊装与高处作业为耦合管控重点^[2]。

（三）管控措施实施

1. 组织保障

建立三级责任体系，项目经理为第一责任人，下设安全管理部门、技术质量管理部等专职部门，明确26个岗位安全职责。特种作业人员100%持证上岗，开展三级安全教育培训，累计时长 ≥ 48 学时。

2. 技术防控

起重吊装与高处作业耦合管控：吊装设备进场前专项检测，高空作业设置角钢护栏、操作平台、30个防坠器，作业人员100%系挂安全带；

施工用电与文明施工耦合管控：采用TN-S接零保护系统，设置6个一级配电箱、14个二级柜，电缆采用YJLV系列铝芯电缆；配备5台焊烟收集器，动火作业办理审批手续，设置消防通道及水源；

精度管控：通过胎架调整、激光扫描检测、实时监测反馈，确保拼装与安装精度^[4]。

3. 应急处置

建立“1+5”应急组织体系（总指挥+抢险救灾组、协调联络组、后勤保障组、安全保卫组、医疗救治组），制定8类突发事件应急预案（设备故障、火灾、高空坠落、触电等）。储备挖掘机、发电机、急救箱等应急物资，每月开展1次应急演练。

四、工程应用效果

（一）安全绩效

施工全过程实现零安全事故，I级风险整改合格率100%，II级风险整改合格率98.7%，风险耦合事件发生率为0。高处作业防护到位，未发生坠落事故；施工用电规范，无触电、火灾事件；起重吊装设备运行正常，无设备故障引发的安全问题^[2]。

（二）质量绩效

加工精度：构件加工尺寸误差 ≤ 1.5 mm，满足拼装要求；

拼装精度：桁架拼装整体误差 ≤ 2.8 mm，胎架标高误差 $\leq \pm 0.8$ mm；

提升同步性：多吊点提升同步性误差 ≤ 4.2 mm，低于设计限值5mm；

焊接质量：焊缝一次合格率99.2%，一级焊缝探伤合格率100%，无裂纹、夹渣等缺陷；

结构变形：桁架跨中挠度最大值18.5mm（预警值20mm），A型柱垂直度偏差 ≤ 10 mm（预警值12mm），满足规范要求^[5]。

（三）工期绩效

四个工区同步推进，构件安装效率达325.5t/天，较计划效率提升12%。16个展厅钢结构安装实际工期95天，提前5天完成，其中单榀桁架拼装时间从4天缩短至3.2天，提升效率较传统工艺节省3h/次^[6]。

（四）经济效益

通过技术集成优化与风险管控，减少构件返工量3%，节约钢材120t；降低焊接缺陷率，减少焊缝返修费用约86万元；缩短工期5天，节约管理费用约45万元，累计创造直接经济效益131万元^[7]。

五、结论

1. 中原高铁港展厅钢结构工程通过构建“加工-拼装-提升-焊接-监测-防控”一体化技术体系，有效解决了大跨度弧形管桁架施工中的精度控制、同步提升、焊接质量、季节性施工等技术难题，关键技术参数均满足设计与规范要求。

2. 建立的多维度风险耦合管控体系，识别296项风险因子，明确起重吊装与高处作业为耦合管控重点，通过组织保障、技术防控、应急处置三大支撑，实现了施工全过程零安全事故。

3. 工程应用表明，该技术与管控体系显著提升了施工效率与质量，缩短了工期，节约了成本，为跨度 ≥ 90 m、重量 ≥ 30000 t的超危大钢结构工程施工提供了成套技术与管理参考。

4. 后续可结合BIM技术与物联网技术，实现施工过程的数字化、智能化管控，进一步提升风险预判与技术优化的精准度。

参考文献

- [1] 住房和城乡建设部. 危险性较大的分部分项工程安全管理规定 [Z]. 2018.
- [2] 王要武, 刘洪磊. 超高层建筑钢结构施工安全风险耦合效应分析 [J]. 建筑结构学报, 2022, 43 (增刊 1): 345-352.
- [3] GB50661-2011, 钢结构焊接规范 [S].
- [4] GB50026-2020, 工程测量标准 [S].
- [5] GB50205-2020, 钢结构工程施工质量验收标准 [S].
- [6] 李国强, 周健. 大跨度钢结构液压同步提升技术研究与应用 [J]. 土木工程学报, 2021, 54 (6): 89-98.
- [7] GB51162-2016, 重型结构和设备整体提升技术规范 [S].
- [8] JGJ80-2016, 建筑施工高处作业安全技术规范 [S].
- [9] GB11345-2013, 钢焊缝手工超声波探伤方法和探伤结果分级 [S].
- [10] 张志强, 王丽. 大跨度钢结构施工过程监测技术研究 [J]. 建筑科学, 2022, 38 (8): 65-71.