

大跨度钢结构施工过程监测与变形控制技术研究

白尧尧, 许毅, 李建伟, 郭群

中国一冶集团有限公司, 湖北 武汉 430081

DOI:10.61369/ETQM.2026020038

摘 要 : 为解决大跨度钢结构施工过程变形控制难度大、安装精度要求高的问题, 以中原高铁港展厅大跨度弧形管桁架结构为研究对象, 建立了一套完整的施工过程监测与变形控制技术体系。通过分析大跨度钢结构施工过程变形影响因素, 确定了监测内容与监测参数, 研发了基于“全站仪+激光扫描仪+传感器”的多源融合监测技术, 提出了针对拼装、焊接、提升、卸载等不同施工阶段的变形控制技术。工程实践表明, 该技术体系实现了施工过程变形的精准监测与有效控制, 桁架拼装主弦杆直线度偏差 $\leq 3\text{mm}$, 提升同步误差 $\leq 5\text{mm}$, 焊接变形 $\leq 2\text{mm}$, 卸载后跨中最大挠度 4.8mm ($\leq$ 设计允许值 5mm), 满足设计与规范要求。该研究成果为大跨度钢结构施工过程监测与变形控制提供了科学依据与技术支持, 具有重要的工程应用价值。

关 键 词 : 大跨度钢结构; 弧形管桁架; 施工监测; 变形控制; 多源融合监测; 同步控制

Research on Monitoring and Deformation Control Technology during the Construction Process of Large-Span Steel Structures

Bai Yaoyao, Xu Yi, Li Jianwei, Guo Qun

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

Abstract : To address the challenges of significant deformation control difficulties and high installation accuracy requirements during the construction of large-span steel structures, this study takes the large-span curved tubular truss structure of the Central Plains High-Speed Rail Port Exhibition Hall as the research object and establishes a comprehensive technical system for construction process monitoring and deformation control. By analyzing the factors influencing deformation during the construction of large-span steel structures, the monitoring content and parameters are determined. A multi-source fusion monitoring technology based on "total station + laser scanner + sensors" is developed, and deformation control techniques tailored to different construction stages such as assembly, welding, lifting, and unloading are proposed. Engineering practice demonstrates that this technical system enables precise monitoring and effective control of deformation during the construction process. The straightness deviation of the main chord members in truss assembly is $\leq 3\text{ mm}$, the lifting synchronization error is $\leq 5\text{ mm}$, welding deformation is $\leq 2\text{ mm}$, and the maximum deflection at the mid-span after unloading is 4.8 mm ($\leq$ the design allowable value of 5 mm), meeting design and specification requirements. The research findings provide a scientific basis and technical support for monitoring and deformation control during the construction of large-span steel structures, holding significant engineering application value.

Keywords : large-span steel structure; curved tubular truss; construction monitoring; deformation control; multi-source fusion monitoring; synchronous control

引言

大跨度钢结构具有跨度大、刚度小、柔性大等特点, 在施工过程中, 结构受力状态不断变化, 易产生较大变形^[1-3]。施工过程变形不仅影响结构安装精度, 还可能导致结构受力不合理, 甚至引发安全事故^[4-5]。因此, 对大跨度钢结构施工过程进行实时监测与变形控制, 确保结构变形在允许范围内, 是保证工程质量与安全的关键^[6-7]。国内外学者对大跨度钢结构施工过程监测与变形控制进行了大量研究。国外学者主要采用有限元分析与现场监测相结合的方法, 研究施工过程结构变形规律与控制措施; 国内学者在

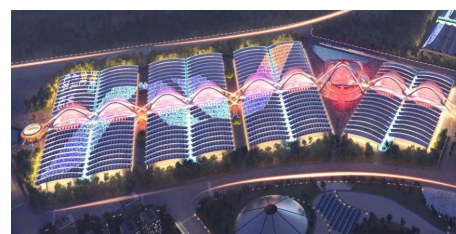


图1 项目效果图

监测技术、变形控制方法等方面取得了一系列研究成果,提出了基于 BIM 的施工监测技术、液压同步提升变形控制技术等^[8]。但现有研究大多侧重于单一施工阶段的变形控制,缺乏针对大跨度弧形管桁架全施工过程的系统性监测与变形控制技术体系,且监测数据与变形控制的联动性不足^[9]。

中原高铁港展厅项目采用大跨度弧形管桁架结构,单榀桁架跨度99.5m,重量198.5t,施工过程包括拼装、焊接、提升、卸载等多个阶段,每个阶段结构受力与变形特性不同,变形控制难度大。本文基于该项目施工实践,系统研究大跨度钢结构施工过程监测与变形控制技术,建立监测体系,提出控制措施,为同类工程提供参考^[10]。

一、工程概况与变形影响因素分析

(一) 工程基本概况

中原高铁港数字展贸城展厅项目位于河南省郑州市航空港区,包含16个钢结构展厅,总建筑面积488866 m²。图2所示,展厅钢结构采用五弦弧形管桁架+铰接钢管柱+背拉索结构形式,单榀桁架长104.5m,宽17m,高4.2~5.7m,跨度99.5m,重量198.5t,共计164榀屋面桁架,总重量32554t。如图3,项目采用分区分块原位拼装+液压同步提升的施工方法,标准展厅厅分为4+4+3榀分三次提升,中型展厅分为3+3+3榀分三次提升,小型展厅分为3+3榀分二次提升,总工期123个工作日。设计要求:桁架跨中最大挠度(恒荷载) $\leq 5\text{mm}$,最大挠度(恒荷载+活荷载) $\leq 120\text{mm}$;桁架安装垂直度偏差 $\leq h/2500$ (h为桁架高度);整体平面弯曲偏差 $\leq L/1500$ (L为桁架跨度)且 $\leq 25\text{mm}$ 。

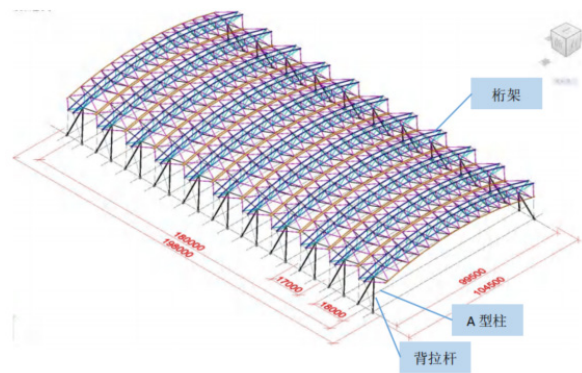


图2 单个标准展厅钢桁架主结构模型图

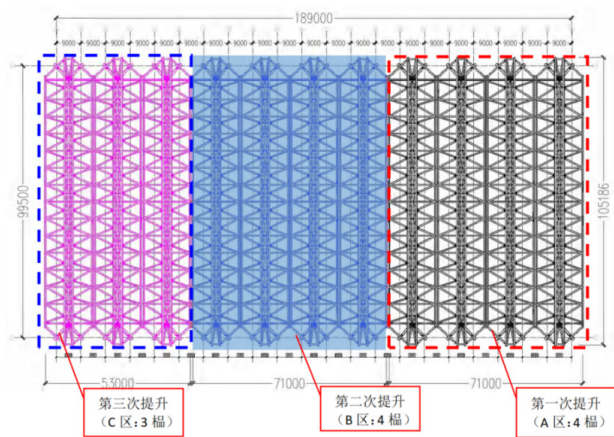


图3 同步提升分区分示意图

(二) 变形影响因素分析

大跨度钢结构施工过程变形影响因素复杂,主要包括以下几个方面:

1. 结构自重: 桁架自重较大,单榀重量198.5t,施工过程中结构自重逐步施加,易产生弯曲变形与轴向变形。尤其是在提升与卸载阶段,结构自重引起的变形更为显著。
2. 施工荷载: 拼装过程中的吊装荷载、焊接作业荷载、人员设备荷载等施工荷载,会引起结构局部变形。施工荷载分布不均会导致结构产生不均匀变形,影响安装精度。
3. 焊接变形: 焊接过程中产生的焊接热输入会导致构件温度不均匀分布,产生焊接残余应力与焊接变形,包括收缩变形、弯曲变形、角变形等。Q460C 高强度厚板焊接的焊接变形控制难度较大。
4. 温度变化: 施工过程中环境温度变化会引起结构热胀冷缩,产生温度变形。郑州地区夏季高温,昼夜温差较大,对结构变形影响显著。
5. 提升与卸载: 液压同步提升过程中,结构受力状态变化会引起变形;卸载过程中荷载转移会导致结构产生二次变形。提升同步性、卸载顺序等对变形影响较大。
6. 地基沉降: 拼装胎架与提升架基础沉降会引起结构附加变形。基础沉降不均匀会导致桁架拼装精度下降,甚至影响提升过程的同步性。

二、施工过程监测体系建立

(一) 监测目标

1. 实时监测结构施工过程中变形与受力状态,确保结构安全,关键杆件应力不超过设计限值。
2. 确保结构变形符合设计要求,桁架跨中最大挠度(恒荷载) $\leq 5\text{mm}$,安装精度满足规范要求。
3. 及时发现结构异常变形与受力,预警安全风险,采取应急措施。
4. 为施工过程调整提供依据,通过监测数据优化施工参数,实现变形闭环控制。

(二) 监测内容与参数

根据项目特点与施工流程,监测内容包括变形监测、应力监测、基础沉降监测、环境监测四个方面,具体监测参数与允许值如下表所示:

表1 监测参数与允许值

监测类别	监测内容	监测参数	允许值	监测方法
变形监测	拼装变形	主弦杆直线度、桁架跨度、拱高	直线度 $\leq 3\text{mm}$, 跨度 $\pm 5\text{mm}$, 拱高 $\pm 3\text{mm}$	全站仪、激光扫描仪
	提升变形	吊点位移、桁架垂直度、跨中挠度	同步误差 $\leq 5\text{mm}$, 垂直度 $\leq h/2500$, 挠度 $\leq 5\text{mm}$	位移传感器、全站仪
	焊接变形	焊接前后关键部位位移变化	$\leq 2\text{mm}$	激光扫描仪、百分表
	卸载变形	跨中挠度、支座沉降	挠度 $\leq 5\text{mm}$, 沉降 $\leq 3\text{mm}$	全站仪、水准仪
应力监测	关键杆件应力	上弦杆、下弦杆、斜腹杆应力	$\leq$ 设计限值的 70%	振弦应变计
基础沉降监测	胎架与提升架基础	基础沉降量	$\leq 5\text{mm}$	水准仪
环境监测	施工环境	环境温度、风速	—	温度传感器、风速传感器

（三）监测方法与设备

1. 变形监测方法

（1）全站仪监测：采用 NTS 全站仪 332R4（精度 2 秒，平面位置误差 2mm，高程误差 2mm），采用极坐标法、三角高程法进行三维坐标测量，监测桁架关键点的三维位移。在桁架关键部位粘贴反光片，提高监测精度。

（2）激光扫描仪监测：采用 FARO Focus S70 激光扫描仪，扫描精度 $\pm 0.1\text{mm}$ ，扫描距离 0.6–70m，对桁架拼装完成后、焊接前后进行整体扫描，获取点云数据，与理论模型对比，分析变形情况。

（3）水准仪监测：采用 DS03 水准仪，精度 $\pm 0.3\text{mm/km}$ ，监测基础沉降与桁架高程变化。

（4）位移传感器监测：采用拉线式位移传感器，量程 0–500mm，精度 $\pm 0.1\text{mm}$ ，在提升过程中监测各吊点位移，实时反馈提升同步性。

2. 应力监测方法

采用振弦应变计进行应力监测：振弦应变计型号为 JMZX-212，量程 $\pm 1500\mu\epsilon$ ，精度 $\pm 0.1\%F.S$ ，温度补偿范围 -20°C – 80°C 。应变计安装在桁架关键杆件表面，采用粘贴式安装，安装前对杆件表面进行打磨、清洁处理，确保安装牢固。通过 JMZX-3000 自动化数据采集仪采集数据，采样频率 1Hz，应力计算采用公式： $\sigma = \epsilon \times E$ （其中 σ 为应力， ϵ 为应变，E 为钢材弹性模量，Q355B 与 Q460C 钢材弹性模量均为 $2.06 \times 10^5\text{MPa}$ ）。

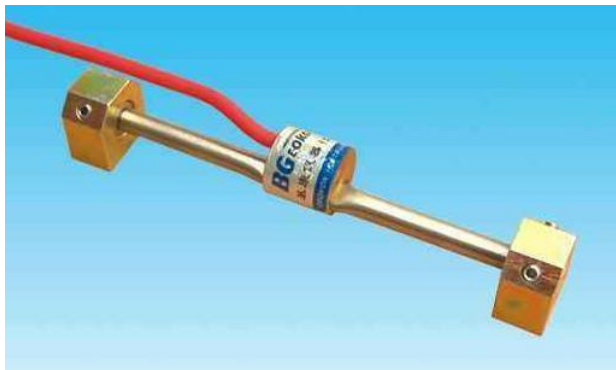


图4 振弦应变计

3. 环境监测方法：采用温度传感器监测环境温度，型号为 DS18B20，精度 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ ；采用风速传感器监测风速，型号为 FS-3000，精度 $\pm 0.1\text{m/s}$ 。监测数据通过无线传输模块实时传输至中央控制室，为变形分析提供依据。

（四）测点布置

1. 变形监测测点：每个桁架设置 12 个变形监测控制点，包括桁架两端支座处、跨中、1/4 跨、3/4 跨等位置，在测点处粘贴反光片，便于全站仪监测。164 榀桁架共设置 984 个变形监测测点。

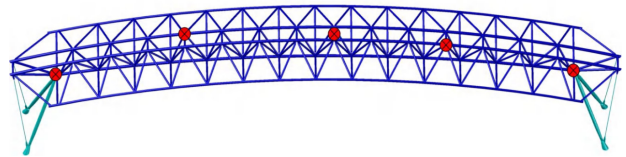


图5 桁架监测控制点的布设

2. 应力监测测点：抽选 4 榀桁架，在每榀桁架的上弦杆、下弦杆、斜腹杆等关键杆件上布置应变测点，共 140 个应变测点，每个测点设置 1 个振弦应变计。

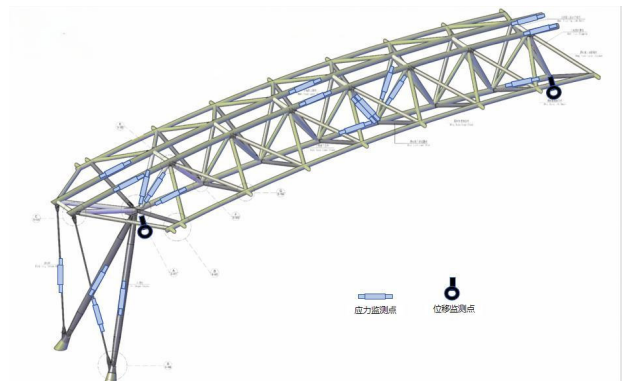


图6 桁架应变及竖向位移测点布置图

3. 基础沉降测点：每个拼装胎架基础与提升架基础设置 1 个沉降观测点，共设置 240 个沉降测点。

4. 环境监测测点：在施工现场设置 3 个环境监测点，监测环境温度与风速。

（五）监测频率与预警标准

1. 监测频率

监测频率和要求如下表：

表2 监测频率和要求

监测阶段	监测频率及具体要求	核心监测参数	单位
拼装阶段	1. 每完成 1 个节段监测 1 次； 2. 整榀拼装完成后全面监测 1 次	主弦杆直线度、桁架跨度、拱高	mm
提升阶段	1. 提升前 1 次（初始数据）； 2. 每提升 2m 1 次；3. 就位后 1 次；4. 试提升静置每 2h 1 次	吊点位移、桁架垂直度	mm/°

环境监测	1. 日常每天4次（8:00、12:00、18:00、22:00）； 2. $\geq 35^{\circ}\text{C}$ 每2h1次， $\geq 6\text{m/s}$ 每1h1次	温度、风速	$^{\circ}\text{C}/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$
------	--	-------	---

2. 预警标准

根据设计要求与规范规定，制定监测预警标准，分为三级预警：

表3 超高大钢结构施工监测预警标准

预警等级	预警触发条件	响应措施
一级预警	1. 变形达到对应允许值的70%（A型柱垂直度12mm、桁架挠度20mm、胎架/提升架垂直度0.7L/1000）； 2. 关键杆件应力达到设计限值的70%	发出预警通知，加强监测频率，密切关注变化趋势
二级预警	1. 变形达到对应允许值的85%（A型柱垂直度12.75mm、桁架挠度25.5mm、胎架/提升架垂直度0.85L/1000）； 2. 关键杆件应力达到设计限值的85%	发出报警通知，暂停施工，分析原因，采取调整措施
三级预警	1. 变形超过对应允许值（A型柱垂直度 $> 15\text{mm}$ 、桁架挠度 $> 30\text{mm}$ 、胎架/提升架垂直度 $> L/1000$ ）； 2. 关键杆件应力超过设计限值	发出紧急报警，立即停止施工，启动应急预案，采取应急处置措施

三、变形控制技术

（一）拼装阶段变形控制技术

1. 胎架精度控制：拼装胎架搭建完成后，严格检查其标高、水平度、垂直度，确保胎架精度满足要求，为桁架拼装提供准确的基准。胎架上口水平度控制在 $\pm 1\text{mm}$ 以内，立柱垂直度控制在 $h/1000$ 以内。
2. 拼装顺序控制：采用对称拼装顺序，从桁架中间向两侧对称拼装，减少累计变形；先拼装主弦杆，再拼装腹杆，确保主弦杆定位准确后再进行腹杆拼装。
3. 刚性固定措施：在桁架拼装过程中，采用临时支撑、拉撑等刚性固定措施，限制结构拼装变形，待焊接完成、结构形成整体后再拆除临时固定措施。
4. 温度变形控制：避免在正午高温时段进行桁架拼装与精度调整，选择在早晨或傍晚温度相对稳定的时段进行拼装精度检测与调整，减少温度变形影响。

（二）焊接变形控制技术

1. 焊接工艺优化：采用小电流、快速度、多层多道焊接工艺，减少焊接热输入，降低焊接变形；合理选择焊接顺序，对称焊接，减少焊接变形累积。
2. 焊接预热与后热：对于厚度大于20mm的钢板焊接，采用焊前预热（预热温度 $80\sim 120^{\circ}\text{C}$ ）与焊后后热（后热温度 $200\sim 250^{\circ}\text{C}$ ，保温时间2~3小时）措施，减少焊接残余应力与变形。
3. 刚性固定焊接：焊接过程中采用刚性固定夹具固定构件，限制焊接变形，尤其是相贯线焊接部位，采用专用夹具固定。
4. 焊接变形矫正：对焊接后的局部变形，采用火焰矫正法进行矫正，矫正温度控制在 $600\sim 800^{\circ}\text{C}$ ，严禁超过 900°C ，矫正后缓慢冷却。

（三）提升阶段变形控制技术

1. 同步提升控制：采用液压同步控制系统，确保各吊点同步

提升，同步误差控制在5mm以内，避免因同步性差引起的结构扭曲变形。

2. 提升速度控制：提升速度控制在5m/h以内，平稳提升，避免速度过快引起结构冲击变形。

3. 姿态调整控制：提升过程中实时监测桁架姿态，通过同步控制系统微调各吊点高度，确保桁架水平提升，垂直度偏差控制在 $h/2500$ 以内。

4. 风荷载控制：提升过程中若风速超过6m/s，暂停提升，采取防风措施，避免风荷载引起结构振动变形。

（四）卸载阶段变形控制技术

1. 分级卸载控制：采用分级卸载方式，每级卸载量控制在20%以内，每级卸载后静置5~10分钟，监测结构变形，无异常后再进行下一级卸载，避免荷载突然转移引起的结构过大变形。
2. 同步卸载控制：各吊点同步卸载，确保荷载平稳转移，避免局部荷载集中引起的结构变形。
3. 卸载顺序控制：卸载顺序与提升顺序相反，先卸载中间吊点，再卸载两侧吊点，减少结构二次变形。

（五）温度变形控制技术

1. 施工时间安排：避免在夏季高温时段进行钢结构焊接与精度调整，合理安排施工时间，减少温度变形影响。
2. 遮阳防护措施：在桁架拼装与焊接区域搭设遮阳棚，减少阳光直射引起的结构温度不均匀分布。
3. 温度补偿措施：根据监测的环境温度数据，对结构变形进行温度补偿计算，调整拼装与安装精度。

（六）基础沉降变形控制技术

1. 地基处理：拼装胎架与提升架基础采用压路机压实，承载力不足区域采用砖渣换填处理，确保地基承载力不小于 130kPa 。
2. 基础监测：加强基础沉降监测，若沉降量超过5mm，及时采取加固措施，如增加路基箱、铺垫钢板等。
3. 胎架调整：根据基础沉降监测数据，及时调整胎架标高，补偿基础沉降引起的结构变形。

四、工程应用效果

中原高铁港展厅钢结构安装工程通过建立完善的施工过程监测体系，采用有效的变形控制技术，取得了良好的应用效果：

1. 变形控制效果：桁架拼装精度满足要求，主弦杆直线度偏差控制在3mm以内，跨度偏差控制在 $\pm 5\text{mm}$ 以内；提升过程同步性良好，同步误差控制在3mm以内；焊接变形控制在2mm以内；卸载后桁架跨中最大挠度为4.8mm，小于设计允许值5mm，满足设计要求。
2. 应力控制效果：关键杆件最大应力为设计限值的65%，未超过设计限值，结构受力状态良好。
3. 安装精度效果：钢结构安装完成后，整体垂直度偏差为8mm，小于允许值15mm；整体平面弯曲偏差为12mm，小于允许值25mm，安装精度满足规范要求。
4. 安全预警效果：施工过程中未发生异常变形与应力超限情

况, 监测体系运行正常, 及时预警2次基础沉降异常, 采取加固措施后恢复正常, 确保了施工安全。

五、结论与展望

本文基于中原高铁港展厅大跨度弧形管桁架项目, 系统研究了大跨度钢结构施工过程监测与变形控制技术, 建立了一套完整的技术体系, 得出以下结论:

1. 全面分析了大跨度钢结构施工过程变形影响因素, 包括结构自重、施工荷载、焊接、温度、提升与卸载、基础沉降等, 为监测体系建立与变形控制提供了依据。
2. 建立了涵盖变形监测、应力监测、基础沉降监测、环境监

测的施工过程监测体系, 明确了监测内容、方法、测点布置、监测频率与预警标准, 实现了施工过程的精准监测。

3. 提出了针对拼装、焊接、提升、卸载等不同施工阶段的变形控制技术, 形成了全施工过程的变形控制体系, 有效控制了结构变形。

4. 工程实践表明, 该技术体系实现了施工过程变形的精准监测与有效控制, 确保了工程质量与安全, 具有重要的工程应用价值。

未来研究方向: 一是进一步完善多源融合监测技术, 提高监测数据的准确性与可靠性; 二是加强施工过程数值模拟与监测数据的融合分析, 实现变形的预测与主动控制; 三是研发智能化变形控制系统, 实现监测与控制的自动化、一体化。

参考文献

[1] 李国强, 周健. 大跨度钢结构施工技术研究进展 [J]. 建筑结构学报, 2020, 41(1): 1-20.
[2] 郭彦林, 田广宇. 大跨度管桁架结构施工技术综述 [J]. 工业建筑, 2019, 49(8): 1-8.
[3] 刘学武, 王勇. 大跨度弧形桁架液压同步提升施工技术 [J]. 施工技术, 2021, 50(12): 65-68.
[4] 张其林, 王磊. 大跨度钢结构施工过程力学分析与控制 [J]. 土木工程学报, 2018, 51(7): 1-12.
[5] 王仕统, 陈驹. 超大跨度桁架结构安装技术研究 [J]. 建筑施工, 2020, 42(5): 789-791.
[6] 李惠, 赵军. 大跨度钢结构液压同步提升技术应用 [J]. 钢结构, 2019, 34(3): 98-102.
[7] 周绪红, 董石麟. 大跨度空间钢结构技术发展展望 [J]. 建筑结构, 2021, 51(1): 1-10.
[8] 钱稼茹, 赵作周. 大跨度钢结构施工安全风险管控技术 [J]. 施工技术, 2020, 49(9): 1-5.
[9] 刘洪滨, 孙晓燕. 大跨度弧形管桁架提升吊点优化设计 [J]. 钢结构工程, 2021, 37(4): 56-60.
[10] 赵阳, 李娜. 大跨度桁架提升过程姿态控制技术 [J]. 施工技术, 2022, 51(3): 78-81.