

# 大跨度弧形管桁架液压同步提升关键技术及工程应用

白尧尧, 许毅, 张桂军, 李俊杰

中国一冶集团有限公司, 湖北 武汉 430081

DOI:10.61369/ERA.2026020043

**摘 要 :** 针对大跨度弧形管桁架结构跨度大、重量重、安装精度要求高的技术难题, 以中原高铁港数字展贸城展厅项目为工程背景, 研发了“分区分块原位拼装-液压同步提升-精准对位卸载”一体化施工技术。通过深化设计优化、拼装胎架模块化设计、液压提升系统参数优化、提升过程同步控制等关键技术创新, 解决了大跨度桁架运输吊装困难、焊接变形控制、提升同步性保障等核心问题。工程实践表明, 该技术实现了单榀重量 198.5t、跨度 99.5m 桁架的安全高效安装, 提升同步误差控制在  $\pm 5\text{mm}$  以内, 焊接一次合格率达 99.2%, 桁架跨中最大挠度满足设计要求 ( $\leq 5\text{mm}$ ), 大幅缩短了施工周期, 降低了施工安全风险。该研究成果为同类大跨度钢结构工程施工提供了重要的技术参考与工程借鉴。

**关 键 词 :** 大跨度钢结构; 弧形管桁架; 液压同步提升; 拼装胎架; 同步控制; 变形控制

## Key Technologies and Engineering Applications for Hydraulic Synchronous Lifting of Large-Span Curved Pipe Trusses

Bai Yaoyao, Xu Yi, Zhang Guijun, Li Junjie

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

**Abstract :** Aiming at the technical problems of large span, heavy weight and high installation accuracy of long-span arc tube truss structure, taking the exhibition hall project of Zhongyuan High-speed Railway Port Digital Exhibition and Trade City as the engineering background, the integrated construction technology of "in-situ assembly in blocks-hydraulic synchronous lifting-accurate contraposition unloading" was developed. Through deepening design optimization, modular design of assembling jig, parameter optimization of hydraulic lifting system, synchronous control of lifting process and other key technical innovations, the core problems such as difficulty in transportation and lifting of long-span truss, control of welding deformation and guarantee of lifting synchronization have been solved. The engineering practice shows that the technology realizes the safe and efficient installation of a truss with a single weight of 198.5t and a span of 99.5m, the synchronous error of hoisting is controlled within 5 mm, the first-pass rate of welding reaches 99.2%, and the maximum deflection of the truss span meets the design requirements ( $\leq 5\text{mm}$ ), which greatly shortens the construction period and reduces the construction safety risk. The research results provide important technical reference and engineering reference for similar long-span steel structure engineering construction.

**Keywords :** long-span steel structure; arc tube truss; hydraulic synchronous lifting; assembling jig frame; synchronous control; deformation control

## 引言

随着现代建筑工程向大跨度、大空间、复杂化方向发展, 弧形管桁架结构因其受力合理、跨度大、造型美观等优势, 在会展中心、体育场馆、交通枢纽等大型公共建筑中得到广泛应用<sup>[1-3]</sup>。然而, 大跨度弧形管桁架通常具有体积大、重量重、跨度大等特点, 传统吊装方法存在施工难度大、安全风险高、安装精度难以控制等问题<sup>[4-5]</sup>。尤其是当桁架跨度超过 90m、单榀重量接近 200t 时, 常规起重机吊装能力不足, 且高空拼装工作量大, 施工效率低下, 安全风险突出<sup>[6-7]</sup>。液压同步提升技术作为一种先进的大跨度钢结构安装技术, 具有提升重量大、同步性好、安全可靠、施工效率高优点, 已逐渐应用于大跨度钢结构安装工程<sup>[8-9]</sup>。但针对弧形管桁架的曲面特性、复杂节点构造以及超危大工程的安全管控要求, 液压同步提升技术仍面临提升吊点优化、提升过程姿态控制、高空精准对接等技术挑战<sup>[10]</sup>。

中原高铁港数字展贸城展厅项目包含 16 个钢结构展厅, 采用五弦弧形管桁架结构形式, 单榀桁架跨度 99.5m, 重量 198.5t, 属于超过一定规模的危险性较大分部分项工程。本文基于该项目施工实践, 系统研究大跨度弧形管桁架液压同步提升关键技术, 包括深化设计优化、拼装胎架设计、液压提升系统配置、提升过程同步控制、焊接质量控制等, 形成一套完整的施工技术体系, 为同类工程提供技术参考。



图1 项目效果图

## 一、工程概况与技术难点

### (一) 工程基本概况

中原高铁港数字展览城项目位于河南省郑州市航空港区迎宾大道与会展五路交叉口东南部，总建筑面积488866 m<sup>2</sup>。项目包含16个钢结构展厅，其中标准展厅13个（198×108m）、中型展厅1个（163×104.5m）、小型展厅2个（109×104.5m），共计164榀屋面桁架，总重量32554t。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，主桁架高度24.0m，跨度99.5m，间距18.0m。桁架材质主要为Q355B、Q460C 高强度钢，背拉杆采用Q650材质，桁架主弦杆直径最大508mm，壁厚最大60mm，项目钢结构施工总工期123个工作日。

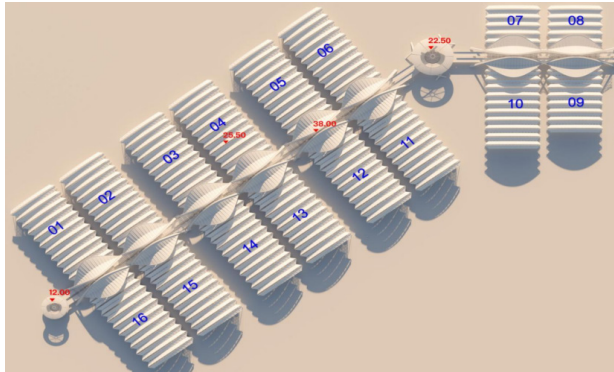


图2 展厅分布效果图

### (二) 核心技术难点

1. 结构规模庞大，安装难度高：图3、4(a)(b)所示，单榀桁架长104.5m，宽17m，高4.2~5.7m，重量198.5t，跨度99.5m，远超常规钢结构安装范畴，运输与吊装难度极大，传统吊装设备难以满足施工要求。

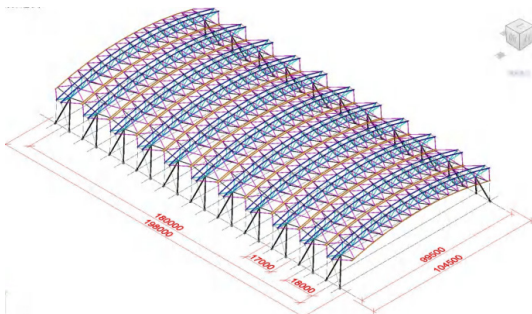


图3 单个标准展厅钢桁架主结构模型图

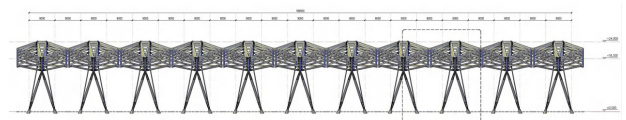


图4(a) 单个标准展厅横向立面图

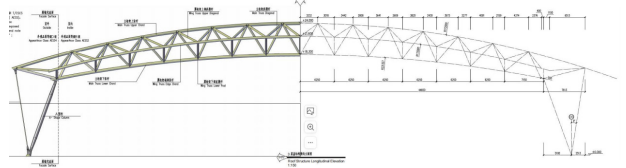
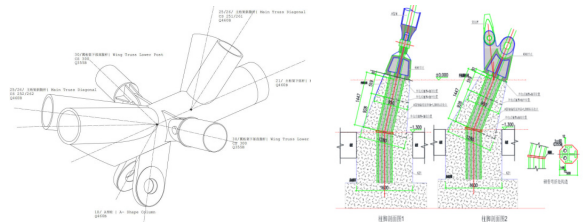
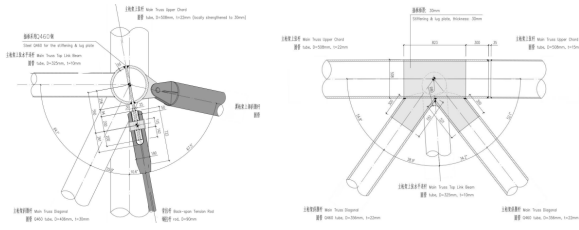


图4(b) 单个标准展厅纵向立面图

2. 节点构造复杂，焊接质量要求高：桁架节点多为相贯线节点与铸钢节点，焊接工作量大，最大钢管厚度60mm，Q460C 高强度钢焊接及多头节点熔透焊技术难度高，需严格控制焊接变形与残余应力，确保焊接质量。



(a) A型柱上部连接节点 (b) A型柱、背拉杆柱脚(铸钢件)连接节点



(c) 背拉杆上部连接节点 (d) 主桁架上弦杆与斜腹杆连接节点

图5 相关节点示例

3. 提升同步性要求高：桁架采用分区块提升方案，标准展厅分为4+4+3榀分三次提升，提升过程中需保证各吊点同步升降，避免桁架扭曲变形，同步误差需控制在5mm以内。

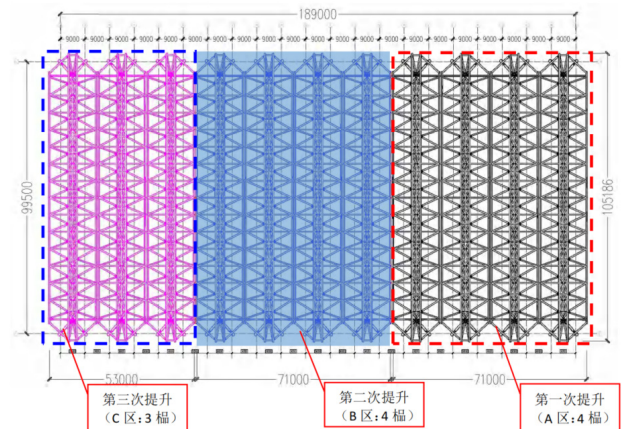


图6 同步提升分区示意

4. 安装精度要求高：桁架与桁架之间采用法兰螺栓连接，伸缩缝采用关节轴承连接，需满足机加工精度要求，桁架安装垂直

度、跨度、拱高等参数偏差需严格控制在设计允许范围内。

5. 施工环境复杂：施工周期涵盖夏季高温与雨季，需采取针对性技术措施应对温度变形与雨水影响，同时多专业交叉作业频繁，安全管控难度大。

## 二、关键技术创新

### (一) 深化设计优化技术

1. 基于 BIM 的三维建模与节点优化采用 BIM 技术建立全专业协同三维模型，对桁架、钢管柱、背拉杆等构件进行参数化建模，实现设计、加工、安装全过程一体化管控<sup>[1]</sup>。针对桁架与 A 型柱连接节点、背拉杆连接节点等关键部位，采用铸钢件节点形式，提高节点承载能力与连接精度。将桁架下弦杆插板延长作为提升耳板，实现提升吊点与永久结构的一体化设计，减少临时措施对结构的影响，提升耳板厚度 30mm，经计算验证满足提升受力要求。

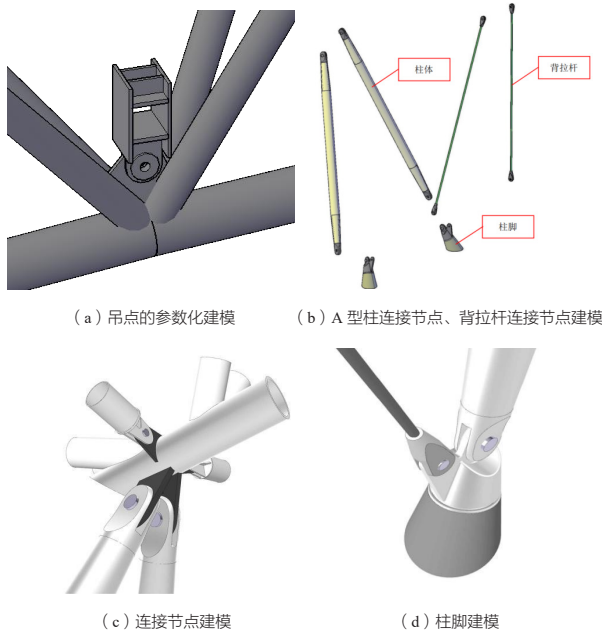
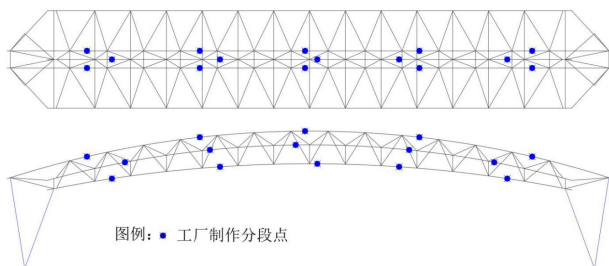


图7 BIM 建模相关应用示例

2. 构件分段优化设计结合运输限制与施工可行性，对桁架主弦杆进行分段设计，上弦杆与下弦杆各分为六段加工，腹杆散件运输，现场拼装。分段点经设计确认满足受力要求，分段位置避开节点核心区域，主弦杆分段长度控制在 11~20m 之间，便于运输与吊装。分段接口采用法兰螺栓临时固定 + 焊接永久连接的形式，确保连接质量与安装精度。



图例：● 工厂制作分段点

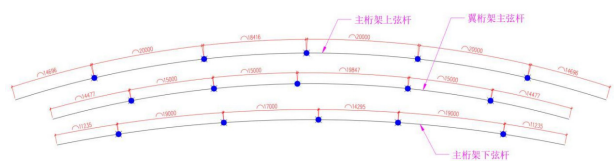


图8 桁架分段示意

3. 施工仿真分析采用 Midas Gen 有限元分析软件对桁架拼装、提升、卸载等关键工况进行受力分析与变形预测<sup>[2]</sup>。建立桁架整体有限元模型，模拟不同提升阶段桁架的受力状态与变形情况，优化吊点布置与提升顺序。分析结果表明，吊点布置在桁架下弦轴力变号节点处时，桁架受力最接近设计状态，最大应力为设计限值的 65%，最大挠度 4.8mm，满足设计要求。

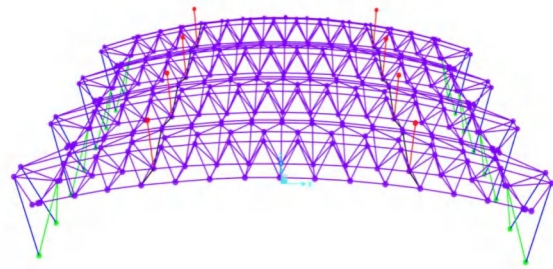


图9 Midas Gen 有限元模型

### (二) 拼装胎架模块化设计与施工技术

1. 胎架设计原则与参数：拼装胎架作为桁架地面拼装的关键临时设施，需满足承载力、刚度与稳定性要求，同时具备快速拆装、周转使用的特点。胎架设计遵循“承载力充足、刚度达标、稳定性可靠、经济性合理”的原则，具体设计参数如下：

- (1) 承载力：胎架最大受力节点荷载达 187.6kN，结构安全系数不小于 1.5；
- (2) 刚度：胎架立柱最大挠度控制在  $L/1000$  以内 ( $L$  为立柱高度)；
- (3) 稳定性：抗倾覆安全系数不小于 2.0；
- (4) 材质：主立柱采用 HW350×350×12×19 型钢（主桁架区域）与 HW200×200×8×12 型钢（翼桁架区域），支撑与斜撑采用 HW100×100×6×8、HW125×125×6.5×9 等型钢；
- (5) 基础：胎架底部铺设 6.0×1.8×0.2m 路基箱，地基承载力经处理后不小于 130kPa。



图10 施工现场胎架拼装

2. 胎架模块化设计采用模块化设计理念：将胎架分为标准单

元模块，每个模块由立柱、横梁、斜撑、路基箱组成，模块之间采用螺栓连接，实现快速拆装与周转使用<sup>[9]</sup>。16个展厅共配置12套胎架，采用“拼装-提升-拆除-周转”的流水作业模式，相邻展厅胎架交替使用，提高使用效率，降低施工成本。胎架单元在桁架下方布置，根据桁架拱度变化调整胎架高度，最小拼装高度5.86m，最大拼装高度11.26m。

3. 胎架施工与精度控制：胎架地基采用压路机压实，对承载力不足区域采用砖渣换填处理，分层压实厚度不小于300mm，经轻型动力触探检测合格后方可铺设路基箱。胎架搭设过程中采用全站仪与水准仪进行实时监测，胎架上口水平度控制在±1mm以内，立柱垂直度控制在h/1000以内（h为立柱高度）。在胎架搭设前，根据桁架设计尺寸布设地样控制线，采用激光扫描仪进行复核，确保拼装基准精度。

**(三) 液压同步提升系统配置与控制技术**

1. 提升设备选型与配置：

根据桁架重量与提升要求，选用YS-SJ-180型液压提升器，单台额定提升能力180t，配套YS-PP-15型液压泵源系统与YS-CS-01型同步控制系统<sup>[4]</sup>。钢绞线选用1×7-17.8-1860规格，破断拉力不小于355kN，安全系数3.04-3.13，满足提升安全要求。每个提升区域设置8个吊点（4榀桁架）或6个吊点（3榀桁架），吊点布置在桁架下弦反弯点处，确保提升过程中桁架受力接近设计状态。



图11 (a) 液压提升器

图11 (b) 液压泵源系统

2. 提升设备配置表如下：

序号	设备名称	型号规格	数量	额定参数	用途
1	液压提升器	YS-SJ-180	16台	额定提升力180t	桁架提升
2	液压泵源系统	YS-PP-15	4套	工作压力31.5MPa	提供液压动力
3	同步控制系统	YS-CS-01	1套	同步误差±5mm	提升同步控制
4	钢绞线	1×7-17.8-1860	144根	破断拉力≥355kN	承重索具

3. 提升架设计：

提升架采用门式格构式结构，由LC-1.5系列标准节组成，标准节高度1.8m和3.3m，可根据提升标高组合调整<sup>[5]</sup>。提升架主立柱采用Φ159×8钢管，横杆与斜杆采用Φ60×5、Φ89×5钢管，提升架顶部设置提升平台，平台由上分配梁（B350×350×16×16）、下分配梁（B350×350×12×19）、提升梁（B800×500×20×30）组成。提升架基础采用4000×4000×700独立基础，混凝土强度等级C30，基础地基承载力不小于130kPa，基础周边设置排水沟，避免雨水浸泡。



图12 施工现场提升架及提升设备安装

4. 同步控制技术：

采用“吊点油压均衡+位移同步控制”的双重控制策略，通过计算机同步控制系统实时采集各吊点位移与荷载数据，自动调整各提升器的提升速度与压力，确保提升过程同步性<sup>[6]</sup>。

同步控制流程如下：

(1) 数据采集：通过位移传感器采集各吊点位移数据，通过压力传感器采集各提升器荷载数据，采样频率10Hz；

(2) 数据处理：计算机控制系统对采集的数据进行实时处理，计算各吊点位移偏差与荷载偏差；

(3) 控制指令输出：根据偏差数据，向液压泵源系统输出控制指令，调整各提升器的流量与压力；

(4) 反馈调整：实时监测调整效果，持续优化控制参数，确保同步误差控制在±5mm以内。

**(四) 焊接质量控制技术**

1. 焊接材料与设备选型：根据母材材质选用匹配的焊接材料，Q355B钢选用E5015焊条与ER50-6焊丝，Q460C钢选用E5515焊条与ER55-D2焊丝，Q650钢选用专用高强钢焊丝<sup>[7]</sup>。焊接材料进场后进行复验，合格后方可使用。焊接设备采用CPXS-350型二氧化碳气体保护焊机与ZXE1-3×500/400型直流焊机，配备电焊条烘箱、保温筒等辅助设备，确保焊接材料烘焙质量与焊接过程稳定性。

2. 焊接工艺优化：施工前针对不同母材、接头形式、焊接方法进行焊接工艺评定，确定最佳焊接参数<sup>[8]</sup>。Q460C钢厚板焊接工艺参数：焊接电流220-320A，电压29-34V，焊接速度350-450mm/min，层间温度60-220℃，气体流量20-80L/min。采用多层多道焊接工艺，每层焊缝厚度控制在3-5mm，每道焊缝焊接完成后及时清理焊渣与飞溅物，检查无缺陷后再进行下一道焊接。

3. 焊接顺序优化：主弦杆对接焊缝从中间向两侧对称焊接，每个焊口由2名焊工对称施焊；腹杆焊接先焊下弦杆与腹杆接口，再焊上弦杆与腹杆接口，避免焊接变形累积。对厚度大于20mm的钢板焊接，采用焊前预热（预热温度80-120℃）与焊后后热（后热温度200-250℃，保温时间2-3小时）措施，减少焊接残余应力与变形。

4. 焊接质量检测：所有焊缝均进行100%外观检查，焊缝表面

不得有裂纹、夹渣、焊瘤、气孔等缺陷，焊缝外形尺寸符合设计要求，咬边深度不大于0.05t且不大于0.5mm（一级焊缝）<sup>[9]</sup>。一级焊缝进行100%超声波探伤，二级焊缝进行20%超声波探伤，探伤时间在焊接完成24小时后进行，超声波探伤符合GB11345-2013标准，缺陷等级不低于Ⅱ级。对检测发现的缺陷，制定专项返修方案，采用碳弧气刨清除缺陷，返修后重新进行检测，直至合格，返修次数不超过2次。

### （五）提升与卸载施工技术

#### 1. 提升施工流程：

（1）提升前准备：对液压提升器、泵源系统、同步控制系统进行全面调试，检查设备运行状态与连接可靠性；检查桁架拼装质量、焊接质量，确认构件连接牢固；清除提升区域障碍物，设置警戒线与安全警示标志。

（2）试提升作业：按照设计荷载的20%、40%、60%、80%、90%、95%、100%逐级加载，每级加载后暂停5-10分钟，观察提升设备与桁架结构的变形情况。当桁架脱离胎架100-150mm后，暂停提升，静置12小时，全面检查提升架、提升器、钢绞线等关键部位的受力与变形情况，测量桁架垂直度与水平度，确认无异后进行正式提升。

（3）正式提升：提升速度控制在5m/h以内，避免速度过快造成结构冲击。提升过程中实时监测桁架姿态，通过同步控制系统进行微调，确保桁架水平提升，避免倾斜。安排专人监测提升设备运行状态、钢绞线受力情况与桁架变形情况，发现异常立即停止提升，排查处理后再继续作业。

（4）提升就位：当桁架提升至设计标高附近时，降低提升速度，进行精准对位，调整桁架位置与标高，确保与A型柱、背拉杆等构件的连接精度。桁架就位后，采用导链、码板等进行临时固定，确保结构稳定。

#### 2. 卸载施工技术：

采用“分级卸载、同步下降”的原则进行卸载，卸载顺序与提升顺序相反，每级卸载量控制在20%以内<sup>[10]</sup>。卸载过程中监测桁架变形与受力变化，确保荷载平稳转移至永久结构。

卸载流程如下：

第一级卸载：卸载20%荷载，静置5分钟，监测桁架变形与受力；

分级卸载：依次卸载至50%、80%、100%荷载，每级卸载后静置5-10分钟，持续监测；

荷载转移确认：卸载完成后，监测桁架跨中挠度、支座反力等参数，确认荷载已平稳转移至永久结构，桁架变形稳定后拆除临时固定措施。

## 三、工程应用效果

如图中原高铁港展厅钢结构安装工程通过采用上述关键技术，成功解决了大跨度弧形管桁架安装的技术难题，确保了工程质量、安全与工期目标的实现，具体应用效果如下：

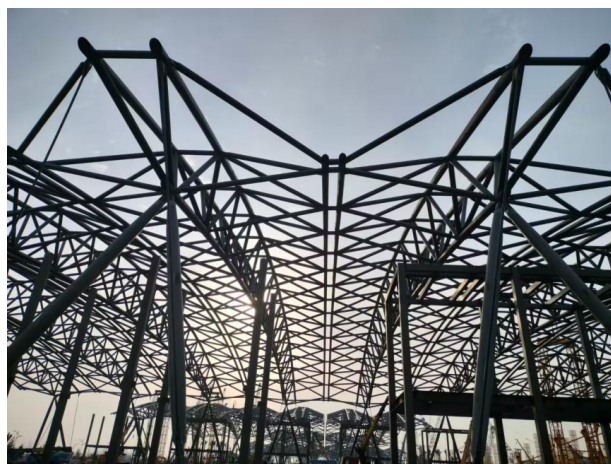


图14 桁架提升后效果图

### （一）质量效果

拼装精度：桁架拼装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，拱高偏差控制在 $\pm 3\text{mm}$ 以内，满足设计与规范要求。

提升精度：提升过程同步误差控制在 $\pm 3\text{mm}$ 以内，桁架就位后垂直度偏差为8mm，小于允许值15mm；整体平面弯曲偏差为12mm，小于允许值25mm。

焊接质量：焊接一次合格率达99.2%，一级焊缝超声波探伤合格率100%，无重大焊接缺陷。

变形控制：桁架卸载后跨中最大挠度为4.8mm，小于设计允许值5mm，满足设计要求。

### （二）安全效果

施工过程中未发生任何安全事故，实现了责任工亡率、重伤率、重大火灾事故发生率、群死群伤事故发生率等安全目标均为0的要求。特种作业人员持证上岗率100%，重大隐患整改合格率100%，提升过程中未发生设备故障、结构失稳等安全风险。

### （三）工期效果

通过分区流水施工、胎架与提升架周转使用、交叉作业协调等措施，提前5天完成钢结构安装任务，实际施工工期118个工作日，为后续工程施工创造了有利条件。单榀桁架拼装时间控制在6天以内，提升时间控制在2天以内，施工效率显著提高。

### （四）经济效果

采用模块化胎架与提升架周转使用，减少了临时设施用量，降低临时设施费用约15%；液压同步提升技术减少了高空作业量，降低了人工成本与安全防护费用约20%；焊接工艺优化提高了焊接效率，降低了焊接材料损耗约8%。总体而言，采用该套关键技术累计节约工程成本约380万元，经济效益显著。

## 四、结论与展望

本文基于中原高铁港数字展贸城展厅项目，系统研究了大跨度弧形管桁架液压同步提升关键技术，取得了以下研究成果：

1. 提出了基于BIM的深化设计优化技术，通过三维建模、节点优化、构件分段优化与施工仿真分析，为现场施工提供了精准

的技术支撑，确保了结构安全与安装精度。

2. 研发了拼装胎架模块化设计与施工技术，实现了胎架的快速拆装与周转使用，降低了施工成本，提高了施工效率，胎架精度控制在  $\pm 1\text{mm}$  以内，满足桁架拼装要求。

3. 优化了液压同步提升系统配置与控制技术，采用“吊点油压均衡 + 位移同步控制”策略，提升同步误差控制在  $\pm 5\text{mm}$  以内，实现了大跨度桁架的平稳提升与精准就位。

4. 建立了完善的焊接质量控制体系，通过焊接材料选型、焊接工艺优化与焊接质量检测，确保了焊接一次合格率达99.2%，满足高强钢焊接质量要求。

工程实践表明，该套关键技术安全可靠、经济高效，成功解决了大跨度弧形管桁架安装的技术难题，可为同类大跨度钢结构工程施工提供重要的技术参考与工程借鉴。

未来研究方向：一是进一步优化液压同步提升控制算法，提高提升过程的同步精度与抗干扰能力；二是研发智能化监测与预警系统，实现施工过程的实时监测、智能预警与自动处置；三是探索数字化施工技术在大跨度钢结构工程中的深度应用，实现设计、施工、运维全过程的数字化管控。

## 参考文献

- [1] 李洋, 张宇. BIM 技术在大跨度钢结构深化设计中的应用 [J]. 建筑科学, 2019, 35(10): 123-128.
- [2] 张剑, 刘芳. 大跨度桁架施工过程有限元分析 [J]. 计算力学学报, 2020, 37(3): 365-370.
- [3] 刘军, 张莉. 模块化拼装胎架在大跨度钢结构中的应用 [J]. 建筑施工, 2021, 43(2): 234-236.
- [4] 黄勇, 赵刚. 液压同步提升设备选型与配置优化 [J]. 建筑机械技术与管理, 2021, 34(5): 76-79.
- [5] 刘敏, 王超. 门式格构式提升架受力分析 [J]. 建筑结构, 2022, 52(4): 145-149.
- [6] 赵军, 李惠. 液压同步提升控制系统设计与实现 [J]. 控制工程, 2020, 27(6): 1123-1128.
- [7] 孙晓燕, 刘洪滨. 高强钢焊接工艺优化研究 [J]. 焊接技术, 2020, 49(5): 45-48.
- [8] 张莉, 刘军. 钢结构焊接工艺评定与应用 [J]. 焊接学报, 2019, 40(8): 101-106.
- [9] 陈明, 张伟. 钢结构焊缝无损检测技术应用 [J]. 无损检测, 2021, 43(6): 56-60.
- [10] 刘刚, 王欣. 大跨度钢结构卸载施工技术 [J]. 施工技术, 2022, 51(8): 90-93.