

超高扇形流线型相贯线钢灯柱制作工艺

邓先锋 张春雷

防城港中一重工有限公司

DOI: 10.32629/jpm.v7i9.9039

[摘要] 中国东盟（北海）体育实训基地体育场设置两座 57.06m 扇形流线型钢灯柱，结构分三段工厂预制。该异形管桁架施工难点主要包括空间相贯节点加工精度难保障、钢管壁厚差异大造成焊接变形、分段构件拼接曲面错位、超长构件运输磕碰损伤。针对上述工程难题，项目依托 BIM 数字化技术开展全流程模拟分析，提前预判构件拼装、焊接及运输过程中可能出现的偏差风险。项目采用数字化建模与数控切割、定型胎架拼装、分层对称焊接、工厂整体预拼装等技术，结合成品防护与破损防腐修补工艺，控制加工与运输阶段质量缺陷。对比传统加工工艺，优化工艺的成品精度、作业效率提升显著，有效降低现场安装返工概率，可为同类超高异形钢结构工厂预制提供完整可行的技术方案，对大跨度异形公共建筑钢结构构件的工厂化制造具有一定参考借鉴价值。

[关键词] 流线型；圆管桁架；钢灯柱；相贯节点；数字化预制；工厂预拼装

Manufacturing Process for Ultra-High Fan-Shaped Streamlined Intersecting-Line Steel Lamp Poles

Deng Xianfeng Zhang Chunlei

Fangchenggang No.1 Heavy Industry Co., Ltd.

[Abstract] The China-ASEAN (Beihai) Sports Training Base features two 57.06 m sectoral streamlined steel light columns, with their structures prefabricated in three segments at the factory. The primary construction challenges for this irregular-shaped pipe truss include ensuring processing precision for spatially intersecting nodes, mitigating welding deformations caused by significant differences in steel pipe wall thickness, addressing surface misalignment during the splicing of segmented components, and preventing impact damage to ultra-long components during transportation. To address these engineering challenges, the project leveraged BIM digital technology to conduct full-process simulation analyses, enabling early prediction of potential deviations during component assembly, welding, and transportation. The project employed techniques such as digital modeling, CNC cutting, standardized jig assembly, layered symmetrical welding, and integrated factory pre-assembly, combined with protective measures for finished components and anti-corrosion repair processes for damaged parts, thereby controlling quality defects during fabrication and transportation phases. Compared to conventional fabrication methods, this optimized approach significantly improved product precision and operational efficiency, effectively reducing the likelihood of rework during on-site installation. This study provides a comprehensive and feasible technical solution for the factory prefabrication of similar ultra-high, irregular-shaped steel structures, offering valuable reference value for the industrialized manufacturing of steel components in large-span irregular-shaped public buildings.

[Key words] streamlined design; circular tube truss; steel lamp posts; intersecting nodes; digital prefabrication; factory pre-assembly

1 工程概况

中国东盟（北海）体育实训基地体育场配套两座完全一致

的超高扇形流线型钢灯柱，单柱总高 57.06m，为空间变截面圆管桁架结构，单座钢结构自重 98t。受设备、道路运输及现

场吊装条件约束，灯柱竖向分为底部、中部、顶部三段，工厂预制后运输至现场拼装安装。

灯柱为扇形流线造型，底部截面宽大，中段收窄，顶部再次外扩，整体空间曲面造型复杂，无固定标准化加工参数，属于典型非标异形钢结构构件。桁架由多种规格无缝钢管组成，主管、腹杆管径与壁厚差异大，杆件空间交汇角度无统一标准，全部节点采用空间相贯全熔透焊接，下料、组装及焊接质量控制要求严苛，对工厂精细化预制能力、工艺管控水平有着极高要求。灯柱外侧安装双曲铝单板幕墙，钢结构制作精度直接决定幕墙安装平顺度，钢结构线形偏差、节点错位、杆件变形都会直接造成后期幕墙收口不顺、板面翘曲、密封不严等质量问题。同时，该项目地处北海沿海区域，属于高盐雾、高湿度腐蚀环境，钢结构防腐体系的完整性直接决定灯柱长期使用的安全性与耐久性。构件外形异形、整体刚度偏弱，转运与吊装过程极易发生磕碰、扭曲与杆件变形；加工切割、现场焊接、校正调形等工序会局部破坏原有工厂预制防腐层，必须配套规范、标准化的防腐修补工艺，全方位保障构件出厂质量与长期结构稳定性。

2 工厂制作核心重难点与解决措施

结合钢灯柱非标、变截面、管材壁厚悬殊、相贯角度多变的结构特点，总结工厂制作主要难点并制定对应工艺措施。

2.1 多角度相贯成型节点精度控制：数字化建模 + 五轴数控切割

桁架杆件均为空间异形相贯节点，相交角度 $30^{\circ} \sim 120^{\circ}$ ，无统一标准角度。传统三轴切割配合人工打磨模式，难以匹配多变的空间坡口角度，人工打磨精度离散，造成主管腹杆对接间隙超标，焊接填充量增大，易产生气孔、夹渣等焊缝缺陷，降低节点连接强度。

本工程建立 1:1 完整三维模型，精准识别杆件位置、管径壁厚、节点交汇角度，自动输出数控切割数据，替代人工尺寸计算。采用五轴数控相贯切割设备，依据实际相交角度设置坡口形态与切割路径，相贯线和坡口一次成型，无需后续人工修整，全程控制对接间隙，保证相贯节点加工精度。

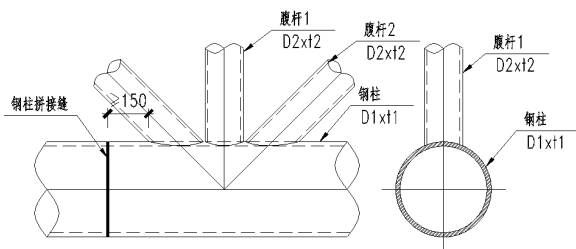


图1 多角度相贯成型节点

2.2 厚薄壁组合管材焊接变形控制：定型胎架组对 + 分层对称焊接

桁架底部主管最大壁厚 45mm，顶部腹杆壁厚仅 8mm，厚壁、薄壁钢管热容量、冷却速率差异显著。若采用常规一次性连续满焊，受热不均会造成杆件弯曲、钢管椭圆变形、整体线形偏移，后期校正工作量大，过度校正还会对母材造成二次损伤。

项目依据专业软件输出图纸制作刚性拼装胎架，对胎架基础硬化、顶面抄平，控制胎架平整度。杆件按编号吊装就位，依靠胎架定位锁定空间位置，严格管控对口间隙、错边量与杆

件线形，自检互检合格后开展焊接。采用分层、分段、对称施焊工艺，控制单道焊层厚度，分散焊接热输入，均衡构件受热冷却，降低残余应力，抑制焊接变形。

2.3 分段加工对接错位控制：厂内整体预拼装

灯柱分三段独立加工，若仅单段校验尺寸，加工微小误差不断累积，现场高空拼接时易出现线条不顺直、曲面错位、对口超差。高空校正作业难度大、安全风险高，影响结构外观与幕墙后续施工。

各分段加工校正完成后，搭设整体预拼装胎架，模拟现场实际工况完成三段整体拼装，核查总高度、线形走势、对口精度、曲面平顺度，在工厂消除误差累积，标记对位基准线，从源头规避现场拼接曲面错位，降低高空施工难度。

2.4 破损部位防腐质量控制：标准化局部防腐修补

下料、组对、焊接、校正工序会局部破坏原有防腐涂层，破损点分散无规律。修补工艺不统一会造成涂层薄厚不均、附着力不足、漏涂，在沿海高盐雾环境下易发生锈蚀，损害结构耐久性能。

制定统一修补流程，焊接、打磨、磕碰破损区域统一打磨除锈至规范除锈等级，分层涂刷配套防腐涂料，管控涂层厚度和均匀度，实现破损区域全覆盖修补，保证出厂防腐体系完整。

2.5 超长异形构件运输防护：专项加固防护措施

单段构件尺寸大、外形异形，缺少规整支撑面，运输固定难度大。车辆颠簸、构件挤压磕碰易造成杆件变形、坡口损坏、漆面脱落，损害安装精度与防腐体系。编制专项打包加固方案，薄弱杆件、坡口、边角增设护板与临时支撑，隔离构件摩擦接触面；管控装车、固定、转运、卸车全流程，减少磕碰变形。

3 详细工厂制作工艺流程

整体工艺流程：施工图纸复核→三维数字化建模与参数校核→数控切割程序导出→原材料进场复检与管材调直→五轴数控相贯线下料切割→管材坡口清理与质量检验→定型胎架精准组对定位→分层对称焊接施工→焊后静置释放残余应力→构件整形校正→单段构件尺寸自检→三段整体工厂预拼装→线形及尺寸复核→破损位置局部防腐修补→构件打包加固→出厂转运。

3.1 三维数字化深化建模

依据施工图纸建立整体三维模型，还原竖向收分、杆件空间位置、节点相交角度，杆件赋予独立编号。开展碰撞模拟、整体尺寸复核，修正图纸偏差，批量输出下料尺寸、坡口参数，生成数控切割文件，消除人工计算、放线带来的人为误差。

3.2 原材料进场预处理

钢管进场核对规格、材质证明文件，全数检查外观、直线度、圆度；轻微弯曲管材进行调直，清除表面锈蚀油污，为切割焊接提供合格母材。

3.3 五轴数控相贯切割施工

将模型导出数控程序导入五轴切割设备，调试切割参数，实现管材旋转、割炬多向摆动联动，适配各类空间相贯切口及坡口。切割完成检查切口平整度与坡口角度，清除毛刺氧化皮，样板复核切口贴合精度，不合格杆件二次处理。

3.4 胎架组对及分层对称焊接

搭设刚性拼装胎架并做好基础与抄平处理；杆件按编号就位，管控对口、错边、线形，自检互检合格施焊。按照 GB50661-2011 一级焊缝标准，执行“先主杆、后腹杆，先内

侧、后外侧，对称分层”原则，同一节点两名焊工同步对称施焊；控制单道焊层厚度，每层完成清理焊渣冷却后再施焊下一层，规避大风高湿等不利作业环境。

3.5 焊后校正与整形

焊接完成后构件静置释放残余应力，检测直线度、圆度与整体线形；轻微变形采用液压、低温微调校正，禁止高温烘烤损伤母材。校正后复检，满足 GB50205-2020 规范要求。

3.6 工厂整体预拼装

单段构件验收合格后转运至预拼装胎架，按底-中-顶顺序模拟现场拼装。检测总高、线形、对口精度与曲面平顺度，标记现场对位标识，工厂内完成偏差整改，记录拼装数据指导现场安装。



图2 工厂卧式预拼装现场图

3.7 局部防腐修补作业

焊缝、打磨、磕碰损伤部位打磨清除焊渣浮锈及破损涂层，基材达到规范除锈等级；分层补涂底漆、中间漆、面漆，保证修补涂层厚度均匀，新旧涂层衔接平顺，防腐性能一致。

3.8 构件打包加固与出厂转运

预拼装及防腐验收完成，坡口、边角、薄弱杆件加装防护与临时支撑；标准化捆绑装车，避免滑动挤压磕碰，保障转运过程构件完好。

4 新旧制作工艺对比分析

将数字化预制工艺同传统人工放样、三轴切割、无胎架散拼工艺进行多维度对比。

加工精度方面，传统工艺人工放样打磨，间隙偏差大，误差累积明显；新工艺依托模型参数、五轴一体化切割、刚性胎架定位，相贯接口间隙可控，杆件角度线形精度与稳定性显著提升。

变形控制方面，传统自由焊接热输入无序，厚薄管材变形差异大，校正工作量大；胎架约束 + 分层对称焊接均衡内部应力，构件整体变形大幅降低。

现场安装适配性，传统工艺无厂内预拼装，误差累积，高空拼接错位风险高；新工艺通过厂内预拼装提前消除偏差，降低现场施工难度，缩短工期。

成品运输保护，传统工艺缺少标准加固防护，构件易损坏；新工艺配套专项加固防护加防腐修补，运输质量缺陷得到有效抑制。

综合效益：新工艺前期虽需要投入一定的三维建模、胎架制作与数字化设备成本，但从整体施工全周期来看，能够彻底

解决传统异形钢结构预制精度差、返工量大、质量不稳定的行业痛点。数字化精准下料从源头控制材料损耗，分层对称焊接大幅降低构件变形率，厂内整体预拼装提前排查并消除累积误差，极大减少了现场高空校正、杆件切割返工、二次焊接整改的工作量。同时标准化防腐修补与全程运输防护，有效保障了钢结构防腐体系完整，降低后期运维除锈、补漆、构件更换的运维成本。整体来看，该成套数字化预制工艺显著提升构件一次成型合格率，缩短项目加工与现场安装工期，保障工程外观质量与结构安全，综合施工质量、安全、工期、经济效益均优于传统加工工艺，具备极高的工程推广价值。

5 结论

本文针对 57.06m 超高扇形流线型钢灯柱非标、异形、变截面、多相贯节点的施工特点，系统分析了超高异形钢灯柱工厂预制过程中存在的异形相贯节点成型精度不足、厚薄壁组合管材焊接变形量大、分段预制拼接误差累积、长途运输构件磕碰损伤、沿海环境防腐修补不规范等系列技术难题。结合项目现场实际工况与沿海高腐蚀环境要求，针对性采用三维数字化建模深化、五轴数控精准切割、Tekla 定型刚性胎架组对、分层对称可控焊接、厂内三段整体预拼装、标准化局部防腐修补、全程构件防护加固的成套预制施工工艺。厂内整体预拼装模式有效规避了分段加工误差累积问题，大幅降低高空拼装错位风险，减少高空作业带来的安全隐患；数字化切割技术搭配刚性胎架定位，精准把控相贯节点坡口形态与杆件对接精度，从源头抑制焊接变形，提高节点连接可靠性；专项运输防护与标准化防腐修补工艺，全方位保障异形构件出厂完整性以及结构防腐耐久性能。施工全过程同步开展构件尺寸复核、焊接质量探伤检测，对关键节点实行多道工序校验，及时纠偏各类制造偏差，进一步夯实构件质量基础。工程实践表明，该成套工艺适配超高流线型钢灯柱的预制施工需求，有效提升构件加工精度、施工效率与成品合格率，保障结构施工质量与后期使用安全性。可为体育场、市政场馆、景观地标等同类超高异形圆管桁架钢结构的工厂精细化预制、质量管控与现场安装提供成熟可行的技术参考，助力市政异形钢结构工程朝着数字化、标准化、精细化方向发展。

【参考文献】

- [1]中华人民共和国住房和城乡建设部. GB 50205-2020 钢结构工程施工质量验收标准 [S]. 北京：中国建筑工业出版社，2020.
- [2]中华人民共和国住房和城乡建设部. GB 50661-2011 钢结构焊接规范 [S]. 北京：中国建筑工业出版社，2011.
- [3]郭彦林，周锋. 空间圆管桁架相贯节点加工精度控制技术 [J]. 土木工程学报，2016,49 (S1):112-118.
- [4]张素梅，刘阳. 五轴数控相贯切割技术在异形管桁架工程中的应用 [J]. 钢结构，2021,36 (05):89-93.
- [5]李国强，吴韬. 大变截面钢管桁架预制加工变形控制研究 [J]. 施工技术，2019,48 (12):76-79.
- [6]王静峰，丁兆东. 复杂曲面管桁架数字化深化与预制关键技术 [J]. 工程力学，2020,37 (S1):201-204.