

智慧智造产业园钢结构工程施工技术研究

——以环普重庆项目为例

李阳光

上海中尧达建筑工程有限公司，上海 201400

DOI:10.61369/ERA.2026060029

摘要： 本文以环普重庆智慧智造产业园钢结构施工为研究对象，从大跨度钢梁吊装、狭小高强螺栓节点、立体仓库智能设备接口精度等施工难点出发，对施工痛点和相应的技术策略进行系统的分析。对高低起伏场地构件运输及吊装、螺栓节点精度控制、屋面防水及结构平整度等提出智能化数控加工、模块化工厂预装、数字化质量检测相结合的施工方法。前期场地优化、施工精度全程控制、数字化支撑等措施，使关键节点偏差控制在 $\pm 2\text{mm}$ 以内，提高施工效率、质量，给类似智慧智造产业园钢结构工程提供可以复制的经验。

关键词： 智慧智造；产业园；钢结构工程；施工技术

Research on Construction Technology of Steel Structure Engineering in the Smart Manufacturing Industrial Park — Taking the Huanpu Chongqing Project as an Example

Li Yangguang

Shanghai Zhongyaoda Construction Engineering Co., Ltd., Shanghai 201400

Abstract： This paper takes the steel structure construction of the Huanpu Chongqing Smart Manufacturing Industrial Park as the research object. Starting from construction challenges such as the hoisting of large-span steel beams, narrow high-strength bolt joints, and the precision of interfaces for intelligent equipment in three-dimensional warehouses, it systematically analyzes the construction pain points and corresponding technical strategies. Construction methods that combine intelligent CNC processing, modular factory pre-assembly, and digital quality inspection are proposed for the transportation and hoisting of components on uneven terrain, precision control of bolt joints, roof waterproofing, and structural flatness. Through measures such as preliminary site optimization, full-process control of construction precision, and digital support, deviations at key nodes are controlled within $\pm 2\text{mm}$, improving construction efficiency and quality. This provides replicable experience for steel structure projects in similar smart manufacturing industrial parks.

Keywords： smart manufacturing; industrial park; steel structure engineering; construction technology

伴随着智能制造产业的迅速发展，智慧智造产业园作为新型产业发展的重要载体，对钢结构工程施工提出了更高的要求。钢结构因跨度大、施工速度快，被用作产业园主体结构的主要方案。但是产业园功能集成化、设备智能化、场地复杂性给钢结构施工带来空间精度高、节点受力复杂、管线接口协调难等问题。本文以环普重庆智慧智造产业园钢结构施工为研究对象，对施工技术及难点进行分析，并提出相应的对策，探索智能化加工、模块化安装、数字化质量检测在钢结构工程中的应用，为产业园区建设提供一定的参考。

一、项目概况

环普重庆临空智慧智造产业园项目，环普重庆智慧智造产业园位于渝北区玉峰山镇，厂房及仓库大多为单层钢结构和框架组合，基础条件复杂，有天然地基和旋挖桩。场地起伏大、施工工序多、对钢结构高精度安装有较高要求。环普重庆智慧智造产业园位于渝北区玉峰山镇，建有1#至6#厂房及6#仓库等建筑，主体为单层钢结构、框架结构，基础条件复杂（天然地基+旋挖灌注桩）。

二、智慧智造产业园钢结构施工难点

环普重庆智慧智造产业园钢结构施工过程中存在诸多技术难题，大部分是由施工环境复杂、施工精度高造成的。大跨度钢梁吊装不能忽略。施工场地高低差为6米，不平坦的地形造成吊装时钢梁横向摆动，导致梁端和柱节点对接精度无法控制，影响后面自动化设备如堆垛机的安装精度。钢梁重量大、大跨度结构特点，任何偏差都会被放大，影响整个结构的稳定以及后续施工。

高强螺栓节点安装同样是高强螺栓节点施工的又一难题。施工现场工作空间只有1.2米，狭小的工作空间造成施工人员无法操作螺栓，从而导致螺栓的安装精度不能保证。螺栓孔位偏差一般为0.4mm，螺栓穿入孔位困难，导致节点受力分布受到影响，造成节点强度不足，钢结构整体稳定性差。

立体仓库智能设备的安装精度要求比一般的高。预埋孔位偏差为5mm左右，虽然数值不大，但是对高度自动化设备安装而言，会造成设备接口不准确，进而影响设备正常运转。所以准确的接口精度要求成了本项目施工的一大难题。

钢结构施工本身所具有的高精度要求，也给施工过程带来了诸多的难题。梁柱节点预紧力 $\pm 5\%$ 以内，平台平整度 $\pm 3\text{mm}/\text{m}$ ，智能设备预留孔位误差 $\leq 2\text{mm}$ 。因此构件加工到现场安装的每一个环节都要严格控制，不能有丝毫的偏差影响结构稳定和设备安装精度。项目所在施工场地基础条件复杂，有天然地基、旋挖桩等多种类型的基础设施，施工团队土方及桩基处理工作量大。由于基础条件复杂、场地高低差大，施工人员在钢结构安装前需要对基础进行详细的处理，保证不因地基不稳造成结构安装偏差。

最后屋面施工难度也大。屋面不但要具有良好的防水性，还要严格控制平整度。屋面平整度偏差都会影响到防水层整体性，进而影响到整个产业园功能性。

三、钢结构工程施工要求分析

智慧智造产业园钢结构施工要实现功能适配、高精度控制、绿色施工三者之间的协调统一。产业园内部集成智能化生产设备、自动化物流系统，对梁柱节点承载性能、平台平面度、管线接口精度有要求，生产车间梁柱节点预紧力控制在 $\pm 5\%$ 以内，立体仓库平台平面度控制在 $\pm 3\text{mm}/\text{m}$ 以内，智能设备预留孔位误差控制在2mm以内。施工过程中运输、吊装操作容易造成尺寸偏差，需要用工厂数控加工、三维扫描检测、可调导向夹具、数字扭矩扳手等技术来实现全过程的精度控制。屋面檩条的布置和锁边屋面板的安装精度要求很高，天沟、天窗节点防水要求严格。钢构件预制率为90%、钢材边角料回收率为95%体现了绿色智能施工的思想。因此，产业园钢结构施工要准确对接功能布局、数字化支撑施工精度，在绿色施工和安全高效施工之间取得平衡，为后续智慧运维打下基础。

四、钢结构工程施工技术

（一）智能化构件加工技术

钢结构施工，尤其是大跨度、复杂造型构件加工时，任何尺寸偏差都会对整体结构精度、稳定性造成影响。为了保证构件加工的高精度，环普重庆智慧智造产业园项目使用了先进的智能化加工技术。项目采用数控等离子切割设备，按照构件CAD模型自动生成切割路径，控制切割误差在 $\pm 0.5\text{mm}$ 之内。数字化切割方式可以消除人工切割产生的尺寸误差，保证构件的准确加工。其

次，在焊接过程中加入了焊接机器人，焊接机器人带有视觉识别系统，能够对焊缝位置实施实时检测，按照钢材材质、厚度等要素自行调节焊接电流、电压以及焊接速度，从而保证焊缝熔深符合设计标准，并且焊接期间没有出现气孔、夹渣等缺陷。对复杂的曲面构件项目用Tekla软件做深化设计，满足产业园特殊造型钢结构施工要求。最后用三维扫描仪对构件进行全尺寸检测，将扫描数据与设计模型实时对比，发现偏差及时反馈给加工设备进行调整，保证每个构件都符合安装标准，为现场安装提供高质量的构件保障。

（二）模块化安装技术

模块化安装技术对于智慧智造产业园钢结构施工来说，起着非常重要的作用，在缩短施工周期、提高施工精度方面有着明显的优势。项目钢结构施工团队将整个钢结构系统拆解成若干个标准模块，模块化处理使构件的组装、管线预装、防腐涂装等工序可以在工厂内完成，现场施工时只需进行模块的拼接和安装。施工周期明显缩短，现场作业的复杂程度也大幅度降低。每个模块的重量不大于起重机额定起重量的80%，保证吊装时安全、稳定。现场安装时使用了带GPS定位系统的汽车起重机和塔式起重机配合作业，模块安装位置实时定位、监控。为了保证螺栓连接精度，项目采用数控钻孔技术加工螺栓孔，保证孔径公差H12，防止由于孔位偏差造成安装困难。高强螺栓节点安装过程中，施工人员使用可调导向夹具、数字扭矩扳手，使螺栓安装更加准确，节点平面度误差控制在 $\pm 2\text{mm}$ 以内，受力均匀。项目用全站仪复测、微调支撑板的方式，使预埋孔位精确对接，避免了设备安装过程中出现的冲突问题，为堆垛机的顺利安装打下了精确的基础。

（三）大跨度钢梁吊装技术

大跨度钢梁吊装是钢结构施工中的一大难题，在场地存在较大高低差的时候，钢梁吊装时容易出现横向摆动，造成节点的偏差。环普重庆智慧智造产业园项目场地起伏达6米，大跨度钢梁吊装更加复杂。为保证吊装精度，施工人员在工厂对钢梁分段预装，并留有临时支撑孔。现场吊装时，用吊索张力传感器对梁体状态进行实时监测，在吊装过程中，根据传感器反馈的数据，施工人员可以准确地调节吊装过程中每一个参数，保证吊装安全、精确。为了提高安装精度，项目用液压千斤顶微调梁体位置，保证梁端轴线和平面度满足设计要求。现场吊装时，在梁端设激光反射标志，和全站仪、GPS设备联动，精确定位，使梁体安装轴线、标高误差控制在 $\pm 3\text{mm}$ 以内。该技术手段很好地解决了大跨度钢梁吊装精度问题，保证了后面自动化设备安装的精准对接，给复杂场地下钢梁吊装提供可复制的经验。

（四）钢屋面系统安装与防水保障

屋面施工时檩条间距、屋面板锁边、天沟、天窗节点防水等施工精度要求高，累积误差容易造成渗漏。施工前复测钢屋面梁标高、平整度，重新校核檩条布置线；檩条安装用全站仪放线、拉线复核，超限位置用专用矫正夹具调整；屋面板锁边采用“首块控制+逐块推进”，锁边工序为“人工初咬+机械锁边”。天沟、天窗节点做蓄水试验，密封胶厚度、宽度严格控制。采用上

述技术措施后,屋面安装精度和防水性能均得到保证,施工方法可以推广到其它工业厂房屋面系统。

（五）钢结构精度控制与螺栓节点技术

钢结构施工中高强螺栓节点安装,由于操作空间小、孔位偏差,施工难度大。环普重庆智慧智造产业园项目施工现场空间只有1.2米,螺栓孔位偏差一般为0.4mm,造成螺栓穿入困难,影响节点受力分布。施工团队使用可调导向夹具、数字扭矩扳手来解决问题。螺栓安装时导向夹具可以保证螺栓正确地插入孔内,减小人为操作误差。数字扭矩扳手可以准确地控制螺栓的拧紧力,保证节点受力均匀,达到设计要求。节点安装时施工人员使用动态校核系统对节点安装的精度进行实时监控,保证作业时节点的平面度、受力分布满足设计要求。

（六）数字化检测技术

智慧智造产业园钢结构施工过程中,数字化质量检测技术是施工质量控制的重要手段,在施工的整个过程里起着作用。项目使用超声波探伤仪对焊缝进行检测,利用超声波扫描可以实时得到焊缝内部的缺陷信息,检测精度为 $\pm 1\text{mm}$,满足焊接质量要求。钢结构变形检测项目使用全站仪、数字水准仪对关键节点进行测量,准确掌握结构的平面度、垂直度等主要参数,误差控制在 $\pm 2\text{mm}$ 以内,及时发现并纠正超过允许范围的偏差。项目采用涂层测厚仪、附着力测试仪对钢结构防腐涂层进行检测,保证防腐涂层达到设计要求的厚度,涂层与钢材的附着力大于 5MPa ,防止涂层脱落、腐蚀现象的发生。施工过程中每一个环节都可以得到实时的监控和反馈,保证工程质量达到智慧智造产业园长期运行的要求。

五、心得体会

通过对环普重庆智慧智造产业园钢结构施工项目进行分析,

得出了一些施工经验,这些施工经验不仅可以保证本项目的顺利实施,而且可以给类似的项目提供经验借鉴。

精度控制在施工的全过程都有所影响。钢结构工程中任何一个环节出现的细微偏差都会对整个结构的稳定造成影响。因此精度控制要贯穿构件加工到现场安装的全过程。在环普重庆项目中使用了智能化数控加工、数字化测量工具(全站仪、激光扫描仪等)对整个过程进行精度控制,保证每一个构件、节点的误差都在设计允许的范围内,保证钢结构高精度安装。大跨度钢梁吊装技术属于本项目主要难点之一,在高低差较大的场地内吊装钢梁容易造成精度误差。为了解决上述问题,项目采用吊索张力传感器、液压千斤顶微调梁体位置等方式对吊装过程中各个环节进行实时监测,准确调节每一个环节,保证钢梁安装精度和稳定性。这些技术的应用,一方面可以解决大跨度钢梁吊装精度问题,另一方面也为后面自动化设备安装精准对接打下了基础。

从以上经验可以看出,钢结构施工今后会越来越依赖智能化、数字化技术,给产业园区建设提供更高效、更安全、更绿色的施工方案,也为智能制造、数字建造技术的发展打下了基础。

六、结束语

智慧智造产业园钢结构施工要达到结构安全、功能匹配、施工精度和绿色智能发展的四个目的。环普重庆项目实践证明,用智能化构件加工、模块化安装、数字化质量检测三者结合的方式可以提高施工效率、保证关键节点精度、保证屋面防水和设备接口精度,为智慧智造产业园长期稳定运行提供保障。伴随着智慧制造、数字建造技术的发展,钢结构施工会向着高效、绿色、智能化的方向前进,给新型产业园区的创建赋予可靠的技术工程支撑。

参考文献

- [1] 宋涛,袁波宏,张雄,等.智慧产业园项目 BIM 技术的综合应用 [C]//中国图学会土木工程专业分会,《土木建筑工程信息技术》编辑部.《第12届 BIM 技术国际交流会——数智建造助力城市高质量发展》论文集.2025:248-252.
- [2] 夏昊,张少森,谈丽华,等.苏州工业互联网产业园“科技之环”钢结构分析与设计 [C]//中国建设科技集团股份有限公司,2024:293-297.
- [3] 罗敏.钢结构工程施工质量控制措施 [J].江苏建材,2022,(05):145-146.
- [4] 张国珍.某数字产业园钢结构厂房施工技术方案 [J].福建建设科技,2021,(06):91-93+134.
- [5] 侯兆新,刘晓刚.钢结构建筑产业化关键技术与示范 [J].建筑钢结构进展,2021,23(10):1-11.