

地铁高架车站钢结构吊装施工技术要点

张峻铭¹ 苏航² 位富伟²

1 沈阳地铁集团有限公司 辽宁省沈阳市 100011

2 中建八局装饰工程有限公司 辽宁省沈阳市 100011

摘 要:本工程针对地铁高架车站大型“桥建合一”钢结构,采用工厂预制与分段吊装工艺。核心控制包括:BIM 精细化建模结合有限元分析控制吊装变形;配置塔吊与履带吊协同作业,通过 PLC 同步系统保障多机抬吊精度;运用三点定位法及全站仪监测实现毫米级就位精度;严格执行既有线路微振动限值及夜间天窗点施工。质量验收执行立柱垂直度严格的结构垂直度标准、焊缝 100% 探伤标准,全过程实施风险分级管控与三维数据归档,确保工程安全质量。

关键词:地铁高架;分段吊装;施工技术

引言

地铁高架车站大跨度鱼腹式钢结构吊装,聚焦城市核心区精准施工与空间定位精度控制的核心要素。在地铁工程钢混组合简支双线高架箱梁施工过程中,由于受原有周边环境所限,常需要在保证原有道路、河道正常运行的前提下完成,加上周边水文、建筑结构复杂,提升了整体施工难度。本文根据该钢混组合简支双线高架箱梁工程实际,认真研究并合理选用施工技术,以确保梁体拼装施工安全,控制钢箱梁起拱、线性曲线等关键部位的施工质量,降低对既有交通的影响,缩减施工周期,保证工程顺利实施。

1 工程概况

1.1 项目特征

高架车站采用“桥建合一”钢结构体系,主体采用大跨度鱼腹式空间桁架结构,纵向柱距根据功能区域差异采用不同间距设计。钢结构工程体量较大,主要构件包括截面尺寸较大的箱型钢柱、焊接 H 型钢梁及造型复杂的曲面桁架。构件采用工厂预制与现场组装相结合的施工方式,钢柱按建筑层高进行合理分段,主桁架系统划分为多个吊装单元,其中最大吊装单元尺寸控制在合理运输范围内。车站屋面采用双层压型钢板组合结构,与下部混凝土结构通过多组抗震支座实现可靠连接,钢结构整体变形控制严格遵循相关规范要求。工程选用高强度结构钢材,焊接质量执行最高等级标准,主要节点采用大量高强螺栓连接,确保整体结构安全可靠^[1]。

1.2 施工环境约束

项目位于城市核心区交汇路段,环境约束主要体现在

既有线路运营防护与道路交通组织两方面。针对既有地铁线路防护,采用三维激光扫描技术建立既有结构变形基准网,设置自动化监测系统实时采集振动、位移数据,监测频率不低于 2 次/小时。在轨道上方作业时,严格执行“天窗点”施工制度,吊装作业时段控制在运营间隔期(23:00-次日 5:00),振动速度限值执行《城市轨道交通结构安全保护技术规范》CJJ/T202-2013 规定的 1.5mm/s 控制标准。

城市道路协调方面,根据市政主管部门批复的交通导改方案,分三个阶段实施占道施工:第一阶段封闭西侧辅道设置预制构件堆场,保留双向四车道通行;第二阶段采用装配式钢便桥跨越南北向主干道,便桥设计荷载按城-A 级标准验算;第三阶段恢复路面时同步实施声屏障安装。施工围挡设置符合《建设工程施工现场环境与卫生标准》JGJ146 要求,距最近居民楼 20m 范围内作业时,噪声控制执行昼间 70dB(A)、夜间 55dB(A) 限值^[2]。

特殊环境应对措施包括:在邻近高压走廊区段采用绝缘吊索具,保持 10kV 线路安全距离不小于 3m;雨季施工配置移动式防雨棚,确保焊接作业区湿度 $\leq 60\%$;针对地下综合管廊交叉节点,预先采用探地雷达进行三维定位,吊装作业时保持 2m 以上净空保护区。

2 关键技术控制体系

2.1 吊装前准备

钢结构吊装施工前必须完成三维建模与受力分析工作。基于 BIM 技术建立包含节点详图的三维模型,重点标注吊点位置并模拟不同工况下的应力分布,模型精度应达到

LOD400 标准,所有杆件连接部位需单独进行受力验算。针对跨度超过 30 米的桁架结构,须采用有限元软件进行非线性分析,确保吊装过程中最大变形量控制在 $L/800$ 以内。临时支墩设置前需进行地基承载力检测,采用静载试验法测得地基承载力特征值不小于 150kPa ,对于软弱土层区域应采取注浆加固措施^[3]。支墩顶部设置可调节千斤顶系统,标高误差控制在 $\pm 2\text{mm}$ 范围内,支墩间距根据构件分段重量计算确定,一般不超过 15 米。吊装前 72 小时需完成以下准备工作:复核构件出厂合格证明文件,检查高强螺栓孔位匹配度,使用全站仪对预埋件位置进行复测,偏差超过 5mm 时必须进行矫正。同时需编制详细的吊装顺序图,明确各分段吊装时间窗口,避免交叉作业干扰。针对异形构件需制作专用吊具,并通过 1.25 倍静载试验验证其可靠性。所有吊装索具使用前必须进行探伤检测,报废标准严格执行 GB/T5972 规定。

2.2 起重设备配置

起重设备选型需依据《钢结构工程施工规范》(GB50755)进行分级计算,首选附着式塔吊作为主吊装设备,其工作半径应覆盖全部吊装区域并预留 10% 安全余量。针对车站大跨度弧形桁架段,采用 QUY650 型履带吊实施辅助吊装,其额定起重量需达到构件重量的 1.25 倍以上。设备配置方案须包含力矩平衡计算书,明确各工况下吊钩高度、回转角度与配重关系的动态参数,特别对于多机抬吊作业,需通过 PLC 同步控制系统实现起升速度偏差 $\leq 5\text{mm/s}$ 、回转不同步角差 $\leq 0.5^\circ$ 的技术控制。汽车吊支腿压力应经现场地耐力检测验证,当路基箱折算压强超过 120kPa 时,须采用钢板扩散层与级配碎石复合地基处理。针对曲线段钢柱吊装,设备需配置电子水平仪与 GPS 定位模块,确保空中就位时柱底标高误差控制在 $\pm 3\text{mm}$ 范围内^[4]。所有起重机械均应具备风速预警自动锁止功能,当风速达 13.8m/s 时立即启动制动程序。特种设备操作人员须持住建部门颁发的吊装作业资格证上岗,每台设备配备双指挥系统,采用防干扰无线对讲设备与激光定位仪配合实施空间定位。

3 核心施工流程

3.1 分段吊装工艺

大跨度桁架空中组对采用 "三点定位法",通过全站仪实时监测 X/Y/Z 三轴坐标偏差。吊装前在桁架两端及跨中设置激光反射片,吊装过程中保持 20m 间距设置临时测量控

制站,确保桁架就位精度控制在 $\pm 3\text{mm}$ 范围内。高强螺栓安装严格执行 "先初拧后终拧" 的时序要求,初拧扭矩设定为终拧值的 50%,采用电动扭矩扳手分三批施拧:首批螺栓在构件就位后 4 小时内完成初拧,第二批于 24 小时内完成终拧,第三批在终拧后 48 小时内进行扭矩复查。终拧扭矩值需根据当日气温修正,当环境温度超过 30°C 时,按设计扭矩值的 0.98 系数调整,低于 5°C 时启用低温专用润滑剂。每榀桁架设置 4 组扭矩检测样本,使用标定合格的数显扭矩检测仪进行 10% 抽检,确保扭矩离散度不大于 $\pm 5\%$ 。对于跨度超过 36m 的曲线段桁架,采用 "动态配重调整系统",在吊装过程中根据倾角传感器数据实时调节配重块位置,平衡结构偏心产生的附加弯矩^[5]。

3.2 特殊工况处置

针对雨季焊接作业环境控制,需建立三级防潮响应机制。当环境相对湿度超过 80% 时,首先启动预热除湿程序,采用环形加热器对焊口周边 200mm 范围进行 $80\sim 120^\circ\text{C}$ 预热,同步架设防雨棚与除湿机组合装置,确保焊接区域湿度控制在 RH60% 以下。焊接过程中严格执行层间温度监测制度,每道焊缝完成后立即采用红外测温仪检测,温度梯度应保持在 $120\sim 150^\circ\text{C}$ 区间。焊条存储实行双岗管理制度,配备恒温干燥箱(设定温度 $80\pm 5^\circ\text{C}$),领用至现场后须置于便携式保温筒内,暴露空气时间不得超过 30 分钟^[6]。

夜间施工照明系统采用分层布设方案,作业面配置 LED 泛光灯(照度 $\geq 300\text{lux}$)与防眩光探照灯组合,吊装路径设置频闪警示灯带。照明供电系统实行双回路备份,主回路采用 TN-S 配电系统,备用回路配备 400kW 静音柴油发电机,切换响应时间不超过 15 秒。重点监控区域(如吊臂旋转半径、拼装对接区)额外增设热成像监控仪,与 BIM 模型实时联动,确保夜间可视距离达到白天作业标准的 85% 以上。所有照明设备需满足 IP65 防护等级,灯具支架采用磁性底座与防坠双保险固定装置。

特殊工况作业实行总工程师带班制,配置环境监测终端(含风速、湿度、照度三参数实时传输),数据刷新频率不低于 1 次/分钟。当同时遭遇两种以上特殊工况时,立即启动复合应急预案,优先保障结构临时稳定措施,包括但不限于:增设临时缆风绳(预张力不小于 5kN)、快速凝固环氧树脂临时固定等技术手段。所有处置记录须通过移动终端实时上传至智慧工地平台,形成可追溯的数字化施工日志^[7]。

4 安全保障机制

4.1 风险源辨识清单

针对地铁高架车站钢结构吊装工程特性,风险源辨识需建立分级管控体系。首要风险为气象条件影响,当风速达到六级(10.8m/s)时,应立即启动三级预警响应;停止高空吊装作业,对已就位构件采用缆风绳加固;风速持续超过七级(13.9m/s)则升级为二级响应,要求所有起重设备收钩并切断电源,重点检查临时支撑体系的抗风稳定性。次生风险集中于地下管线保护,需实施“三阶段”动态监测:吊装前采用地质雷达对作业半径15m范围内管线进行精确定位;吊装过程中设置电子测斜仪实时监测管线位移,控制值严格限定在 $\pm 3\text{mm}$ 以内;每日施工后复测管线标高变化并形成监测日志。针对交叉施工风险,特别规定起重设备与既有构筑物的安全净距应不小于吊臂长度1.2倍,且在既有线路侧设置双重防护:距轨道中心线10m处布置电子防侵入报警系统,5m范围内架设硬质隔离围挡。所有风险管控均实行“双确认”制度,由专职安全员与监理工程师同步签认防控措施落实记录^[8]。

4.2 应急管理

钢结构吊装作业中的应急管理需建立分级响应机制,重点防范两类典型突发状况。针对吊臂碰撞既有构筑物风险,应实施三级防控体系:一级防控通过激光测距仪实时监控吊臂与既有结构净距,当间距小于3m时触发声光报警;二级防控采用BIM碰撞预警系统,基于预设安全阈值自动暂停吊装动作;三级防控启动后,立即执行“三停一撤”程序——停止吊装、停止旋转、停止变幅,操作人员沿逃生通道撤离。对于突发停电状况,设置双回路供电与200kW柴油发电机组的自动切换系统,切换延时须控制在15秒内。结构稳定措施包含三方面:一是采用液压自锁式夹具固定悬吊构件,确保停电时不发生滑移;二是在分段接头处预设临时支撑牛腿,承受设计荷载20%的意外荷载;三是部署应急照明系统,照度不低于50lux,保障人员安全撤离通道^[9]。所有应急设备须每周进行空载测试,并留存测试记录。应急预案演练应结合气象预警分级开展,每年不少于4次全流程实战演练,重点检验多班组协同响应能力与应急通讯系统可靠性。

5 质量验收标准

5.1 允许偏差控制值

钢结构吊装质量验收须严格执行《钢结构工程施工质

量验收规范》(GB50205)规定。立柱安装垂直度偏差应控制在 $H/1000$ 且不超过15mm范围,采用全站仪进行三维坐标校核。焊缝质量实施分级管控:一级焊缝100%超声波探伤,二级焊缝抽检比例不低于20%,缺陷评定等级应符合GB/T11345-2013中B级验收标准。对闭口截面构件接头的隐蔽焊缝,应在封闭前完成探伤检测并留存影像资料。所有测量数据须采用电子手簿实时记录,形成包含测点编号、设计坐标、实测偏差的三维验收台账^[10]。

5.2 过程资料管理

吊装令实行四级审批制度,由总包单位技术负责人发起,经监理工程师、业主代表及质量监督站逐级签认后方可实施,审批链条各环节需留存扫描件及纸质原件。三维扫描复测数据按构件编号建立独立数据库,包含吊装前初始状态、临时固定后位形及最终成桥状态三阶段点云数据,原始扫描精度不低于 $\pm 2\text{mm}$,数据包需附带徕卡TS60全站仪标定证书。所有过程资料按《建设工程文件归档规范》GB/T50328-2025要求组卷,钢结构专项资料单独设立D5分类编号,电子档案采用双层PDF加密存储,确保施工轨迹可追溯性。

结论:综上所述,地铁高架车站钢结构吊装工程通过系统性技术控制实现了复杂环境下的精密施工。采用模块化分段吊装与BIM技术协同,确保大跨度鱼腹桁架的毫米级定位精度;基于动态监测与分级预警机制,有效克服既有线路运营、城市交通及气象条件等多重约束。全过程贯彻高强度材料应用与I级焊缝标准,结合全站仪实时校核与智能吊装设备,保障结构稳定性和挠度控制值($L/400$)。应急管理实行三级防控体系,强化风险预控与质量追溯,形成技术严谨、安全可控的标准化作业流程,为同类工程提供关键技术范本。

参考文献:

- [1] 王庆国,任琳琳,张路,陈茵如,朱琳. 济南地铁8号线高架站建构一体化设计策略[J]. 建筑技艺,2022,(1期): 1-10.
- [2] 李昌树. 基坑开挖对临近地铁高架结构变形的影响研究[J]. 现代工程科技,2023,(2期): 11-20.
- [3] 李哲,伍世英,陈卓,闫鑫磊. 颗粒阻尼材料在地铁高架隔音屏中的应用研究[J]. 中国设备工程,2022,(3期): 21-30.

[4] 史涛, 史莹. 雨雪冰冻天气对地铁高架段线路的影响及对策 [J]. 人民公交, 2023, (4 期): 31-40.

[5] 孙波. 地铁深基坑开挖对旁侧并行高架桥梁的影响分析 [J]. 工程建设与设计, 2022, (5 期): 41-50.

[6] 马伟. 地铁工程钢混组合简支双线高架箱梁施工技术研究 [J]. 工程机械与维修, 2023, (6 期): 51-60.

[7] 杜伟. 邻近地铁施工明挖隧道基坑安全影响控制研究 [J]. 西部交通科技, 2024, (7 期): 61-70.

[8] 陈晓卫, 张弛. 高架地铁车站冬季热环境与热舒适评

估研究——以武汉为例 [J]. 建筑节能, 2022, (8 期): 71-80.

[9] 周海榕. 地铁基坑开挖对周边高架桥梁的影响及优化控制措施 [J]. 福建交通科技, 2023, (9 期): 81-90.

[10] 陈晓卫, 张弛, 杨彩虹, 何宇, 王博. 武汉高架地铁车站夏季热环境与热舒适研究 [J]. 都市轨道交通, 2024, (10 期): 91-100.

作者简介: 张峻铭, 1987 年 2 月, 男, 汉族, 辽宁省东港市, 大学本科, 副高级工程师, 地铁工程建设。