大跨度铁路节段拼装箱梁架设施工关键工艺与线形控制实践

王富楠

中铁十局集团第四工程有限公司 江苏 南京 210046

【摘　要】：节段拼装箱梁凭借工业化预制、现场快速拼装、对线下交通干扰小等优势，广泛应用于大跨度铁路及高速铁路桥梁工程。相较于现浇箱梁，节段拼装梁施工受预制制造误差、架桥机设备变形、温度日照效应、胶接缝施工质量、预应力张拉顺序、体系转换等多重因素耦合影响，线形误差具备累积放大效应，线形控制难度显著提高。若架设工艺管控不到位、线形监测纠偏不及时，易产生轴线偏移、高程偏差、节段错台、合龙偏差超限等质量问题，直接影响轨道铺设与列车运行平顺性。本文结合某大跨度铁路特大桥工程实例，阐述节段拼装箱梁梁段运输喂梁、节段姿态调位、胶接缝施工、临时与永久预应力张拉、体系转换等核心架设工艺，剖析线形偏差产生主要诱因，建立“预制预控-架设动态监测-分级纠偏-体系转换复核-成桥复核”全过程线形控制体系，明确三级监测纠偏管控流程。工程实践表明，通过标准化架设工艺与全过程线形闭环管控，有效抑制误差累积，成桥轴线、高程、反拱值均满足高速铁路规范限值，可为同类铁路节段拼装箱梁施工提供工程参考。

【关键词】：铁路桥梁；大跨度；节段拼装箱梁；架桥机；胶接拼装；架设工艺；线形控制；误差纠偏

DOI:10.12417/2811-0536.26.10.014

引言

我国铁路装配式建造技术快速发展，大跨度节段预制拼装箱梁逐步在客运铁路、高速铁路桥梁得到推广应用。节段拼装箱梁将整跨箱梁划分为若干标准节段，工厂完成预制生产，通过运梁设备转运至桥位，利用移动支架架桥机逐段拼装成型，具备施工周期短、现场现浇作业量少、绿色环保、跨既有线施工干扰小等突出优势。

节段拼装属于多构件装配施工，成桥线形不是单段梁简单叠加，制造偏差、吊装变形、温度梯度、架桥机桁架弹性变形、预应力张拉压缩变形均会产生累计效应。现场经常出现重视架设作业，轻视全过程线形管控；重视单节段就位精度，忽视累计偏差复核；重视张拉工序，忽略体系转换阶段线形复测，最终造成合龙口偏差超标、成桥反拱不满足设计，后期调改难度极大。

铁路桥梁对轨道基础平顺度要求严苛，梁体轴线、高程、预拱度直接决定无砟轨道铺设条件。因此必须将线形控制贯穿于预制验收、喂梁拼装、胶接施工、预应力张拉、体系转换、成桥复测全流程。本文依托某铁路特大桥 64m 简支节段拼装箱梁工程，梳理关键架设工艺，研究线形偏差诱因与闭环控制方法，总结现场实践经验。

1 工程概况与施工重难点

1.1 项目概况

某铁路特大桥，主跨采用 64m 大跨度节段拼装箱梁，单孔箱梁划分为 13 个预制节段，包含两端墩顶节段与 11 个标准节段；梁高 4.5m，单节段最大重量 58t；采用移动支架造桥机逐跨拼装施工，胶接拼装工艺，节段之间采用环氧树脂胶接缝，依次张拉临时预应力、永久预应力，完成梁体体系转换，梁体落至正式支座。本桥为客运铁路，成桥后需满足无砟轨道铺设对线形的精度要求。

1.2 施工重难点

（1）节段三维调位精度要求高：每一节段存在纵向、横向、竖向三个维度互相耦合，调整某一维度参数会改变另外两个方向姿态，调位需要多次迭代趋近目标坐标，对测量与液压调整系统协同要求高。

（2）误差累积风险突出：单节微小制造、安装偏差，逐段叠加，至跨中与合龙位置会被放大，容易出现超限。

（3）温度环境干扰明显：昼夜温差、日照单面受热，梁体、架桥机桁架产生变形，白天测量数据失真，关键测量复核宜选择日出前恒温时段开展。

（4）胶接缝与预应力耦合影响线形：环氧树脂胶层压缩、预应力钢束张拉产生的弹性压缩，会带来梁体缩短与高程变化，需要在拼装预设调整量。

（5）体系转换阶段受力复杂：由支架承受全部梁体荷载，逐步转换至支座承受梁体自重，支架卸载反弹，极易造成梁体高程突变，分级卸载与同步监测是重点。

1.3 线形偏差主要诱因分析

结合现场施工问题，将偏差来源分为四大类：

（1）预制制造因素：节段端面尺寸误差、剪力键

偏差、存梁期产生翘曲变形；

（2）设备系统因素：移动支架桁架弹性下挠、吊杆系统变形、液压调位系统同步性不足；

（3）现场环境因素：日照温差、风力扰动造成梁段姿态偏移；

（4）施工工艺因素：节段调位顺序不合理、胶接缝厚度不均、临时预应力张拉控制偏差、永久张拉分级顺序不当、体系转换卸载速率不合理。

2 大跨度节段拼装箱梁关键架设施工工艺

本项目采用移动支架造桥机逐跨胶接拼装，总体工序流程：架桥机就位调试→节段运输喂梁→首节段精确定位→后续节段起吊喂入→三维姿态调位→接缝面清理、环氧树脂涂胶→节段匹配贴合→临时预应力张拉→逐段循环拼装→整跨完成后穿束张拉永久预应力→分级体系转换、落梁至支座→架桥机过孔，转入下一跨施工。

2.1 节段运输、喂梁作业

预制节段出厂前完成外形尺寸、端面平整度、剪力键检查验收，不合格构件不得进场。运梁车转运至桥位下方，造桥机起重吊具连接节段预埋吊点，四点起吊，保证四点吊点同步，避免单点受力造成节段扭曲变形。喂梁过程低速平稳，大风天气停止吊装作业。节段吊装就位前核对梁段编号，防止错号拼装。

2.2 首节段精确定位工艺

墩顶两端首节段是整跨拼装基准，首节定位精度直接决定全跨线形质量。以墩顶垫石十字中心线、设计高程为基准，开展纵向、横向、竖向反复迭代调位：纵向控制支座中心对位；横向控制梁体中心线与线路中心线重合；竖向控制梁顶设计高程并计入预拱预留量。调位顺序执行：纵向→横向→竖向，循环多次，直至三维坐标满足规范限值，完成临时锁定，杜绝拼装过程首节发生位移滑移国家铁路局。

2.3 节段三维姿态调位工艺

后续标准节段吊入支架内部，利用吊点液压千斤顶实现三维姿态调整。调位过程中三个方向互相干扰，不能一次到位，采用“粗调-精调-复核-微调”迭代模式。重点控制指标：相邻节段错台、接缝间隙、梁体轴线、梁顶高程。调位完成后，复核腹板、顶板、底板错台，剪力键充分啮合，剪力键不得出现硬顶卡阻现象，若受日照温度影响姿态漂移，应避开高温时段重新校核定位。

表 1 节段拼装关键几何控制允许偏差

检查项目	允许偏差/mm	备注
梁段轴线平面偏位	≤3	每节段复测
梁顶面高程偏差	±4	计入预拱度预留
相邻节段顶板、底板错台	≤2	胶接缝拼装
胶接缝厚度	1-3	环氧树脂胶，不宜过薄过厚
整跨成桥轴线偏位	≤10	全跨贯通复测

2.4 胶接缝施工工艺

节段贴合前，彻底清理两端对接端面，清除浮浆、油污、积水，保持结合面干燥洁净。环氧树脂严格按照配比机械搅拌，均匀涂抹在顶板、腹板、底板接缝面，胶层厚度控制 1-3mm；预应力孔道周边设置密封圈，防止胶体挤压进入波纹管内部造成孔道堵塞。涂胶完成后及时进行节段贴合，在规定时间内完成临时预应力张拉，保证接缝面全截面均匀受压，胶接缝压应力满足设计不小于 0.3MPa 要求。胶缝挤出胶体及时清理，不得污染梁体表面。

2.5 临时预应力与永久预应力张拉

节段贴合就位后，施加临时预应力，保证胶接缝密贴。全部节段拼装完成，胶接缝达到规定强度之后，开展永久预应力施工。钢束穿束完成，严格按照设计规定顺序分级、对称张拉，遵循“先腹板束、后顶板底板束，上下左右对称”原则，防止不对称张拉造成梁体侧向偏移或者局部挠曲变形。张拉以张拉力控制为主，伸长量校核为辅；每完成一批钢束张拉，及时复测梁体轴线、高程变化，记录张拉带来压缩与挠度改变，作为下一阶段线形调整依据。

3 全过程线形闭环控制体系构建

针对节段拼装误差累积放大的特点，建立预制阶段预控、架设过程三级监测纠偏、预应力张拉监测、体系转换复核、成桥最终复核的全过程线形控制体系，将控制关口向前移，避免后期积累大偏差。

3.1 预制阶段线形预控

线形控制起点延伸至梁场预制。短线法预制时充分考虑竖曲线、平曲线、后期预应力压缩量，严格控制节段外形尺寸；加强存梁期监控，防止梁体不均匀翘曲变形；出厂前逐段检测梁段几何参数，不合格构件不允许运至桥位，从源头减少制造误差输入。

3.2 架设阶段三级动态监测纠偏机制

现场执行“单节段就位复核、拼装单元累计复核、

整跨拼装完成评估”三级监测模式。

（1）一级（单节段就位复核）：每一节段调位完成，立刻检测本段落轴线、高程、错台，本单节指标合格，方可进行下一节拼装；单节段出现小偏差，在本接缝进行微量纠偏，不留给下一节累积。

（2）二级（拼装单元累计复核）：每拼装完成 3-4 个节段，进行一次累计贯通测量，计算累计偏差值，预判偏差发展趋势；当累计偏差接近预警阈值，在后续 1-2 个接缝逐步消化，禁止将偏差全部积压至跨中。

（3）三级（整跨拼装完成评估）：全部节段拼装完毕，尚未张拉永久预应力前，开展全跨贯通测量，评估整体轴线、高程、预拱度，评估合龙口状态，若偏差偏大，在允许范围内进行整体微调。测量环境要求：为规避日照温度变形，关键贯通测量尽量选在日出前后环境恒温条件实施；高温日照时段只做一般性观测，不作为正式验收数据。

表 2 线形偏差三级预警管控表

预警等级	判定条件	处置措施
绿色正常	累计偏差≤2mm，趋势稳定	继续按方案拼装，常规监测
黄色预警	累计偏差 2-5mm，存在单向累积趋势	后续接缝逐步微量纠偏，加密复测频次，分析偏差来源
红色预警	累计偏差＞5mm，持续单向偏移	暂停拼装，核查设备、温度、节段匹配状态，制定专项纠偏方案，处置完成后方继续施工

3.3 预应力张拉阶段线形跟踪

每批次预应力钢束张拉完毕，立即观测梁体挠度、轴线偏移，记录张拉产生的变形量，对比理论计算值。如果实测变形和理论计算差值过大，要排查张拉质量、孔道摩阻异常等问题。张拉阶段发现高程单向漂移，及时分析，避免进入体系转换后无法调整。

4 工程实施效果分析

本项目 64m 节段拼装箱梁严格执行上述架设工艺与全过程线形管控体系。

（1）架设质量：各节段错台、胶接缝厚度全部满足规范；临时、永久预应力张拉各项指标合格；体系转换分级卸载过程平稳，没有出现梁体局部应力异常。

（2）线形成果：成桥之后全跨轴线最大偏位 7mm，梁顶高程最大偏差-3mm～+4mm，跨中实际预拱度与理论计算值偏差控制在 6mm 以内，全部满足铁路规范对无砟轨道桥梁的精度要求，没有出现合龙口超限问题。

（3）实践经验总结：①首节段定位质量是源头，首节出现偏差，后续很难完全消除；②不能只看单节合格，重点管控累计偏差，提前预警、逐缝消化；③温度日照对线形测量干扰巨大，关键测量必须选在恒温时段；④体系转换属于高风险工序，分级同步卸载与实时监测缺一不可。

5 结论

大跨度铁路节段拼装箱梁属于高精度装配化桥梁，架设工艺质量与全过程线形控制直接决定成桥品质。梁段制造误差、架桥机变形、温度效应、胶接施工、预应力张拉、体系转换都会带来线形改变，误差具有累积放大效应，不能仅依靠就位单节段精度控制整体线形。本文结合实桥工程，梳理喂梁调位、胶接缝施工、预应力张拉、分级体系转换等关键架设工艺，构建从预制预控、架设三级动态纠偏、张拉跟踪监测、体系转换复测至成桥复核的闭环线形控制体系。工程实践证明，坚持“源头预控、过程分级监测、小量逐缝纠偏、重视体系转换监测”，可以有效抑制误差累积，保障成桥线形满足铁路无砟轨道铺设标准。今后可以结合 BIM 模型、自动化倾角传感器、实时无线监测系统，实现拼装过程数据自动采集，进一步提升节段拼装箱梁线形控制的智能化水平，更好服务铁路装配式桥梁高质量建造。

参考文献：

[1] 王胜杰.高速铁路全胶接节段拼装连续梁建造关键技术[J].高速铁路技术,2025,16(03):102-107.

[2] 梁勇.预制节段梁架桥机拼装施工误差调控[J].工程技术研究,2026,11(11):89-92.

[3] 何鹏.64m 节段拼装箱梁移动支架造桥机施工技术[J].铁道建筑技术,2023(04):76-80.

[4] 张磊.高速铁路简支节段拼装箱梁线形控制技术[J].城市道桥与防洪,2024(07):138-141.

[5] 刘红平.短线预制节段拼装梁施工偏差对线形的影响分析[J].中国公路学报,2024,37(08):178-188.