

大跨度桥梁悬臂浇筑施工技术优化与质量控制研究

吴娟

云南交投集团投资有限公司 云南 昆明 650000

摘要: 随着我国交通基础设施建设的快速发展,大跨度预应力混凝土连续刚构桥因其跨越能力强、行车平顺性好、经济合理等优点被广泛应用于山区、峡谷及跨江跨海等复杂地形条件下的桥梁工程中。悬臂浇筑法作为此类桥梁的主要施工方法,其施工过程复杂、周期长、受力状态变化剧烈,对施工精度和结构安全提出了极高要求。本文系统分析了大跨度桥梁悬臂浇筑施工的关键技术环节,重点围绕线形控制、应力监测、合龙段施工及预应力张拉等核心问题展开研究。在此基础上,结合BIM技术、智能监测系统及精细化管理理念,提出了一系列施工技术优化策略,并构建了全过程、多维度的质量控制体系。所提出的优化措施可以有效提升施工效率与结构成桥质量,为类似工程提供理论参考与实践指导。

关键词: 大跨度桥梁;悬臂浇筑;施工技术优化;线形控制;应力监测;质量控制;BIM技术

引言

近年来,随着“交通强国”战略的深入推进,我国在西部山区、长江流域及沿海地区建设了大量大跨度桥梁工程。其中,预应力混凝土连续刚构桥凭借其良好的整体性、抗震性能及较低的后期维护成本,成为跨越深谷、大江大河的首选桥型之一。该类桥梁主跨普遍超过150米,部分甚至突破300米,对施工技术提出了严峻挑战。悬臂浇筑法(CantileverCastingMethod)是大跨度连续刚构桥最常用的施工方法。其基本原理是以桥墩为中心,对称逐段浇筑梁体节段,利用挂篮作为施工平台,通过预应力筋实现结构的逐步成形。该方法具有无需大型支架、适应性强、对通航或交通干扰小等优势,但同时也存在施工周期长、结构体系转换频繁、受环境因素影响显著等问题。在实际施工过程中,由于材料非线性、温度效应、徐变收缩、施工误差累积等因素的综合作用,极易导致桥梁线形偏离设计值、局部应力集中甚至结构开裂,严重影响成桥质量与服役寿命。因此,如何优化悬臂浇筑施工工艺、精准控制施工过程中的线形与应力状态、构建科学有效的质量控制体系,已成为当前桥梁工程领域的研究热点与技术难点。

1 悬臂浇筑施工关键技术分析

1.1 挂篮系统选型与设计

挂篮作为悬臂浇筑施工的核心承载与作业平台,其结构形式与力学性能直接决定了施工的安全性及效率。在大跨度桥梁工程中,挂篮不仅要承受单个节段混凝土自重及施工荷载,还需具备良好的抗风稳定性与行走同步性。目前工程实践中广泛应用的挂篮类型主要包括三角形、菱形和弓形等形式,其中菱形挂篮因主桁架呈空

间几何稳定结构,整体刚度高、自重轻、变形小,特别适用于主跨超过200米的连续刚构桥^[1]。挂篮的设计需综合考虑最大施工荷载工况下的强度与刚度要求,确保在最不利荷载组合下前端挠度控制在规范允许范围内,同时配备可靠的后锚固系统与防倾覆装置。此外,为提升施工效率与安全性,现代挂篮普遍集成液压同步顶推系统,实现平稳、对称的行走操作,有效避免因不同步行走引发的结构偏载风险。

1.2 线形控制技术

线形控制是悬臂浇筑施工成败的关键所在,其目标在于使桥梁在成桥状态下尽可能逼近设计理论线形。然而,由于施工过程中结构体系不断变化,且受到混凝土收缩徐变、温度梯度、临时荷载及材料参数离散性等多重时变因素的影响,实际线形往往与理论预测存在偏差。传统线形控制方法通常采用“前馈+反馈”机制:前馈部分基于设计参数进行正装计算,确定各节段的立模标高;反馈部分则通过现场实测数据反演实际结构行为,对后续节段的立模标高进行动态修正。尽管该方法在多数工程中取得了一定成效,但在面对复杂环境条件或长周期施工时,其对非线性效应的响应能力有限,易造成误差累积。近年来,随着计算力学与数据科学的发展,基于有限元模型更新与卡尔曼滤波等智能算法的线形预测技术逐渐被引入,能够更准确地识别结构实际参数并实时调整施工指令,从而显著提升线形控制精度。

1.3 应力监测与预警

在悬臂施工阶段,桥梁结构处于高度非对称与非稳定的受力状态,尤其在墩顶0号块、节段根部及合龙区域,极易出现局部拉应力超限或压应力不足的问题,进而诱

发裂缝甚至结构性损伤。因此,建立一套覆盖关键截面的实时应力监测系统至关重要。当前工程中多采用光纤光栅(FBG)传感器或振弦式应变计进行长期埋入式监测,这些传感器具有抗电磁干扰、耐久性好、精度高等优点,可有效捕捉结构在施工全过程中的应力演化规律。监测点的布设应聚焦于应力集中区域,如墩梁固结上下缘、预应力管道附近以及合龙段临时锁定前后位置。通过持续采集应力-时间数据,并与混凝土材料强度发展曲线进行比对,可设定合理的预警阈值。一旦监测值接近临界状态,系统可及时发出预警,指导施工方调整张拉顺序、增减配重或暂停作业,从而避免不可逆的结构损伤。

1.4 合龙段施工控制

合龙作为悬臂浇筑施工的收官环节,不仅标志着结构体系从双悬臂向连续体系的最终转换,也直接决定了成桥内力分布与线形精度。合龙段施工的复杂性在于其对温度、时间、荷载平衡及混凝土性能的高度敏感性。为最大限度减小温度应力的影响,合龙作业通常选择在日最低温时段(如凌晨2至5点)进行,此时结构处于相对稳定状态。在合龙前,需通过水箱在两侧悬臂端部施加等效配重,以模拟合龙混凝土的重量,并在浇筑过程中同步卸载,确保体系受力平衡^[2]。同时,采用劲性骨架与临时预应力束对合龙口进行双重锁定,防止两侧梁体在混凝土初凝前发生相对位移。此外,合龙段混凝土需具备微膨胀、早强及低水化热等特性,以补偿收缩变形并减少早期裂缝风险。整个合龙过程必须严格遵循专项施工方案,做到工序衔接紧密、操作精准、养护及时,方能确保结构安全与成桥质量。

2 施工技术优化策略

2.1 基于BIM的施工全过程模拟与协同管理

建筑信息模型(BIM)技术的引入为悬臂浇筑施工提供了全新的数字化管理范式。通过构建涵盖几何、材料、施工逻辑与进度信息的三维数字孪生模型,工程团队可在虚拟环境中对挂篮行走路径、节段浇筑顺序、预应力管道空间定位等关键环节进行全过程模拟与碰撞检测。这种前置化的仿真分析不仅有助于提前发现潜在冲突,优化施工组织,还能为现场技术人员提供直观的可视化交底依据。更重要的是,BIM平台可作为多方协同的工作中枢,集成设计、施工、监理与监测各方的数据流,实现信息的实时共享与动态更新。例如,结合无人机倾斜摄影与地面激光扫描获取的点云数据,可对已浇节段的实际几何形态进行逆向建模,并与设计模型自动比对,生成偏差报告与修正建议。这种“虚实融合”的管理模式显著提升了施工决策的科学性与执行的精准度。

2.2 智能监测与数字孪生驱动的动态调控

随着物联网与人工智能技术的发展,悬臂浇筑施工正逐步迈向智能化调控新阶段。通过在桥梁关键部位部署高精度传感器网络,包括光纤光栅应变计、GNSS位移监测站、温湿度传感器及风速仪等,可实现对结构响应与环境参数的全天候感知。这些数据经由5G或LoRa无线网络实时上传至云端数字孪生平台,在此平台上,基于机器学习算法(如LSTM神经网络)构建的预测模型可对结构未来状态进行滚动预报,并与理论值进行偏差分析。当监测数据偏离预设安全阈值时,系统可自动生成调控指令,如调整下一节段的立模标高、优化预应力张拉顺序或启动应急配重措施^[3]。这种“感知—分析—决策—执行”的闭环控制机制,将传统的被动纠偏转变为主动预防,极大增强了施工过程的鲁棒性与可控性,为高风险、长周期的大跨度桥梁施工提供了强有力的技术保障。

2.3 高性能材料与绿色施工工艺

材料性能的提升是优化悬臂浇筑施工质量的基础支撑。针对大跨度桥梁对混凝土耐久性与早期强度的严苛要求,工程实践中普遍采用掺加粉煤灰、矿粉及聚羧酸高效减水剂的高性能混凝土配合比,将水胶比控制在0.35以下,既降低了水化热,又提高了密实度与抗裂性能。在施工工艺方面,部分标准节段可探索工厂预制与现场拼装相结合的混合模式,将高空湿作业转化为地面干作业,有效缩短关键线路工期并改善作业环境。同时,挂篮结构本身亦可通过材料升级实现轻量化,例如采用Q690级高强钢替代传统Q345钢材,在保证承载能力的前提下减轻自重15%以上,从而降低对已浇梁体的附加荷载。此外,施工全过程应贯彻绿色建造理念,对拆除后的挂篮钢材、模板等资源进行分类回收再利用,减少建筑垃圾排放,推动桥梁工程向可持续发展方向迈进。

3 全过程质量控制体系构建

3.1 质量控制目标与原则

大跨度桥梁悬臂浇筑施工的质量控制应以“预防为主、过程受控、持续改进”为核心原则,确保成桥结构在几何线形、内力状态、材料性能及外观质量等方面全面满足设计与规范要求。具体控制目标包括:成桥线形偏差控制在 ± 15 毫米以内,关键截面实测应力与理论值偏差不超过 $\pm 10\%$,混凝土强度合格率达到100%,且结构表面裂缝宽度(非结构性)不超过0.2毫米。这些量化指标不仅是验收依据,更是施工全过程精细化管理的导向标尺,要求项目团队从源头把控、过程监控到终检评估形成闭环管理机制。

3.2 “五维一体”质量控制框架

构建涵盖“人员、机械、材料、方法、环境”五个维度的质量控制体系：

表1：“五维一体”质量控制框架

维度	控制要点
人员	特种作业持证上岗；技术交底全覆盖；设立专职质检员与测量复核制度
机械	挂篮进场验收；千斤顶、油泵定期标定；张拉设备双控（应力+伸长量）
材料	水泥、钢筋、预应力钢绞线见证取样；混凝土配合比试配验证；外加剂相容性试验
方法	编制专项施工方案；执行首件工程认可制；实施“三检制”（自检、互检、专检）
环境	监测昼夜温差、风速、湿度；高/低温季节制定专项养护措施；雨季施工防雨棚设置

3.3 关键工序质量控制要点

在悬臂浇筑施工的众多环节中，若干关键工序对整体质量具有决定性影响。0号块作为整个悬臂体系的起点，其施工质量直接关系到后续节段的稳定性。为此，支架必须进行分级预压以消除非弹性变形，混凝土浇筑应分层进行并严格控制入模温度不超过30℃，同时确保墩梁固结区域的钢筋精确定位，防止因偏位导致应力集中。标准节段施工中，挂篮安装前需进行等效荷载预压，模板安装精度应控制在高程±2毫米、轴线±3毫米以内；混凝土浇筑遵循“先底板、后腹板、再顶板”的对称顺序，避免偏载；养护阶段采用土工布覆盖配合自动喷淋系统，确保保湿时间不少于7天。预应力张拉是赋予结构承载能力的关键步骤，必须在混凝土强度达到设计值90%且龄期不少于7天后方可进行，张拉过程应采用智能张拉系统实现应力与伸长量的双重控制，误差控制在±5%以内；孔道压浆则需采用真空辅助工艺，确保浆体流动度、泌水率等指标符合规范^[4]。至于边跨与中跨合龙，除严格控制合龙口两侧高差与轴线偏位外，劲性骨架焊接质量须100%进行超声波探伤，合龙混凝土浇筑后立即实施保温保湿养护，防止因温差收缩引发早期裂缝。

4 结语

本文围绕大跨度桥梁悬臂浇筑施工中的关键技术难

题，系统开展了技术优化与质量控制研究，得出以下结论：线形与应力控制是悬臂施工的核心，需融合正装计算、实测反馈与智能预测，构建动态调控机制；BIM与物联网技术的深度融合，可实现施工全过程可视化、数字化与智能化管理；建立“五维一体”质量控制体系，强化关键工序管控，是保障成桥质量的根本途径。未来研究方向包括：开发基于数字孪生的自主决策施工机器人；探索碳纤维复合材料在挂篮结构中的应用；构建考虑极端气候（如强风、地震）的韧性施工预案；推动悬臂施工向“无人化、少人化”智能建造转型。随着新材料、新工艺与新一代信息技术的持续发展，大跨度桥梁悬臂浇筑施工将迈向更高水平的精准化、绿色化与智能化。

参考文献

- [1]牛芄.挂篮悬臂浇筑技术在大跨度桥梁施工中的应用[J].交通科技与管理,2025,6(16):68-70.
- [2]朱学伟.悬臂施工技术在大跨度桥梁工程中的应用分析[J].运输经理世界,2020,(15):107-108.
- [3]廖文成.大跨度桥梁菱形挂篮悬臂浇筑施工技术研究[J].运输经理世界,2024,(27):49-51.
- [4]杨胜文.大跨度桥梁施工中的悬臂施工技术[J].黑龙江交通科技,2020,43(08):116-117.