

连续梁桥悬浇施工技术与线性监控研究

白子君

(中交一航局西南工程有限公司)

摘要:为解决复杂地貌条件下连续梁桥施工过程中几何精度和结构安全性控制的难题,文章系统回顾了近年来悬臂浇筑施工技术与线性监控体系的研究进展。研究显示,悬臂浇筑施工技术因其对复杂地形的灵活适应性和较低的环境干扰,已成为大跨度桥梁施工的主流方法。通过优化挂篮设计、引入轻量化材料和智能化模块,施工设备的稳定性与操作精度得到了显著提升。基于高精度传感器网络和有限元仿真技术的线性监控体系,可以对施工过程中关键节点的动态荷载和线形变化进行实时监测与调整。悬臂浇筑与线性监控的融合技术在大跨度桥梁施工中取得了重要成果。

关键词:连续梁桥;悬臂施工;线性监控;数字孪生技术;预应力优化

0 引言

连续梁桥因其卓越的结构性能和适应性在现代桥梁工程中被广泛采用,尤其在跨越河流、峡谷及铁路等复杂地形条件下具有明显优势。随着桥梁结构跨度的增大和环境约束的日益复杂,传统施工方法在效率和安全性方面逐渐暴露出不足。这种背景下,悬臂现浇施工技术因其对施工场地的灵活适应性和较低的环境干扰成为主流施工方法之一。悬浇施工需要全面考虑施工荷载的动态变化及桥梁线形的精确控制^[1],挂篮设计的优化作为悬浇施工的核心技术,对提升施工安全性和效率具有决定性作用^[2]。悬浇施工技术的核心在于逐段浇筑与对称施工,但该技术对挂篮系统的设计、施工线形的实时控制以及动态荷载的分析提出了极高的要求。现代化施工设备与监控技术的引入极大提升了悬浇施工的精准性与效率。实践中,张晓刚^[3]通过结合有限元建模与现场监测,提出了一套基于数据反馈的施工调整方法,显著提高了施工质量。

线性监控技术是桥梁施工中不可或缺的一部分,其核心作用在于通过实时监测施工过程中的几何形态和内力变化,为施工调整提供科学依据。Anderson^[4]通过数据驱动的线性监控研究,提出了基于多传感器融合的施工状态实时监测模型,成功应用于多个复杂桥梁工程中,显著降低了施工阶段的偏差风险。邹俊^[5]针对多源数据融合技术的研究表明,通过整合位移、应力及温度等多维数

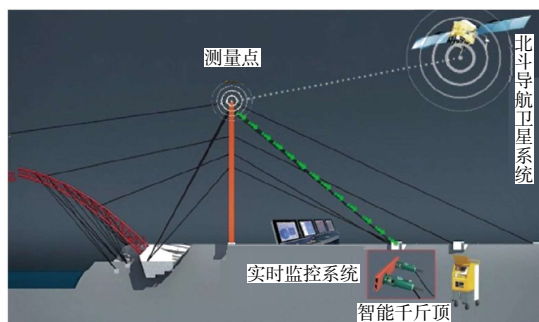
据,线性监控系统能够有效提升监测精度,并在动态荷载下保持施工状态的稳定性,为大型桥梁的安全施工提供了有力保障。

1 连续梁桥悬浇施工技术

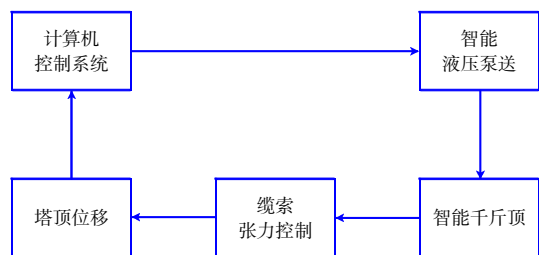
悬浇施工技术在大跨度桥梁工程中具有显著的技术优势,其核心在于通过挂篮定位、混凝土浇筑与预应力施加等一系列精细化施工工艺,实现对桥梁线形和结构稳定性的动态控制。悬浇施工技术起源于 20 世纪中期,最初被应用于跨越河流和峡谷的桥梁建设中。当时,挂篮设备设计较为简单,多采用钢桁架形式,由于缺乏精确的监控技术,施工质量的控制主要依赖于人工经验。国内早期研究中分析了传统挂篮施工的受力模式,发现挂篮在大跨径施工中存在受力不均与变形控制的难题。尽管通过有限元模拟分析了挂篮施工中的结构受力,提出优化挂篮设计和加载路径能够显著改善施工线形的稳定性。但由于当时施工设备与材料技术的限制,这些改进未能得到广泛应用。

进入 21 世纪,悬浇施工技术随着材料科学、计算机技术及施工设备的快速发展取得了显著进步。现代挂篮设计逐渐向轻量化、高强度方向发展,液压系统与传感器网络的结合使得挂篮移动与定位的精度显著提升。挂篮设计是悬浇施工的核心,其结构性能直接影响施工精度与效率。通过采用铝合金和碳纤维复合的轻量化材料与模块化设计,不仅降低了挂篮自重,还提升了其承载

能力和操作灵活性^[6]。Johnson 等^[7]进一步通过智能化模块设计,验证了挂篮在复杂桥梁工况下的适应能力,尤其是在大跨径桥梁中表现优异。图 1 为用于悬架和扣塔水平位移控制的原理及工作流程,显示挂篮系统在动态施工环境下,通过实时调整能有效应对荷载变化与外界干扰。



(a) 控制原理



(b) 工作流程

图 1 用于悬架和扣塔水平位移控制的原理及工作流程

悬臂浇筑施工工艺主要包括挂篮定位、混凝土浇筑与预应力施加等环节,连续梁桥悬浇施工关键技术研究进展见表 1。在实际工程中,通过实时监控混凝土浇筑过程中的温度梯度和变形,并结合动态调整预应力施加力的控制方法,可以有效减少施工偏差。这种技术在大跨度桥梁项目中尤为重要,能够显著提升施工的精度与效率^[3]。多点应力监测技术在悬浇施工中的应用极具潜力,通过实时捕捉结构受力变化,从而提高施工质量的稳定性,降低结构开裂风险^[8]。合龙段施工作为悬浇施工的关键节点,其质量直接影响成桥后的线形与内力分布。Taylor 等^[9]在跨河桥梁的合龙段施工中验证了智能监控系统的有效性,通过实时监控合龙段的温度与位移变化,可显著减少施工误差的累积。悬臂浇筑施工技术在关键环节的实时监控和动态调整能力,为解决复杂桥梁工程的质量控制难题提供了有力支持。

表 1 连续梁桥悬浇施工关键技术研究进展

施工技术	研究进展
挂篮设计与优化	轻量化设计(铝合金、碳纤维材料);模块化与智能化挂篮设计显著提升施工精度与效率
悬臂施工工艺	挂篮定位、混凝土浇筑与预应力施加的全过程动态控制;多点应力监测技术应用
合龙段施工技术	临时固结优化;温度与位移实时监控;动态调整荷载配置以减少误差
动态荷载与线形控制	结合有限元分析的动态调整方法;高精度传感器捕捉关键位置受力变化
数据融合与智能监控	应用 AI 和大数据分析;支持向量机算法优化施工过程;构建基于 BIM 的可视化监控平台

2 线性监控技术

线性监控的理论基础源于结构力学与几何设计的耦合分析,其核心目标在于保证施工过程中桥梁结构几何形态的精确控制与施工力学状态的稳定性。传统的线性监控方法以人工测量为主,常使用水准仪、经纬仪等工具进行桥梁施工中的线形控制。这些方法的优点在于设备简单、成本较低,但其受限于测量精度和实时性难以满足现代复杂施工条件的要求。在复杂环境中误差较大,且难以适应动态施工调整^[10]。

随着传感器技术和信息化技术的不断进步,现代线性监控技术在监测精度和效率方面取得了显著提升(见表 2)。在小清河特大桥的施工中引入了无线传感器网络,通过实时采集结构的位移和应力数据,结合数据处理算法实现了施工状态的实时监控与调整,显著减少了施工误差^[11]。此外,一种基于物联网的实时监控系统,集成了位移传感器、应变计和温度传感器,用于动态监控桥梁施工过程中的力学状态与几何形态,该系统已成功应用于多个跨河桥梁工程中,显著提高了施工效率与安全性^[4]。线性监控技术从传统人工测量向基于现代传感器网络和信息化管理的方向转

表 2 线性监控技术方法与应用

监控技术	技术方法与应用
数据采集与传感器技术	高精度光纤传感器、激光测距仪和多点应变计的结合;传感器冗余设计提高数据可靠性
数值模拟与仿真	使用有限元分析软件进行施工仿真;动态校正模型提高施工过程的精准预测
多源数据融合与分析	融合位移、应力、温度等多维数据,结合大数据分析实现实时调整与误差修正
数字孪生与 BIM 技术	创建全生命周期管理平台;虚拟与实际同步反映施工状态,辅助决策
智能化施工设备	引入智能挂篮与无人机监控技术,实现实时线形调整与施工质量监控

变,显著提升了桥梁施工的精确性和动态适应能力。结合高精度传感器和智能化监控算法,线性监控技术将在复杂施工环境中发挥更大的作用。

数值模拟与仿真技术在桥梁施工线性监控中具有重要价值,通过有限元分析软件实现对施工阶段变形和沉降的预测,为施工过程提供了精准的控制支持。尤其是将复杂桥梁的有限元模型与实测数据结合进行动态校正,不仅提升了仿真精度,还能实时反映结构状态的变化,为施工调整提供科学依据。使用有限元分析软件对青兰高速公路桥梁的施工阶段进行模拟显示,对施工变形与沉降进行预测可以显著提高施工过程的控制精度^[12]。通过构建复杂桥梁的有限元模型,结合实测数据动态校正,实现了对桥梁施工全过程的高精度仿真与预测。

3 悬浇施工与线性监控的耦合研究

3.1 施工过程中的协同控制

悬浇施工作为连续梁桥建造的主要技术,其施工进度直接关系到桥梁线形的动态演化与最终成桥精度。在研究连续梁桥悬浇施工关键技术时,施工过程中每个阶段的线形变化均会受到施工顺序与荷载分布的显著影响。施工荷载的动态变化不仅影响线形控制的稳定性,也对监控精度提出了更高要求。文国斌^[13]通过对大跨径连续梁桥施工荷载的分析,指出由于施工荷载的不均匀性,主梁跨中与合龙段的变形会显著增加,需要通过高精度传感器与动态调整技术来实时监测和控制这些关键区域。一种基于多源数据融合的荷载监测技术利用光纤传感器和加速度计采集桥梁各关键节点的荷载数据,并结合有限元模型实时分析荷载变化对线形的影响。研究结果表明,这种方法可以在施工荷载波动超过10%的情况下,仍然将监控误差控制在0.5 mm以内^[1]。

3.2 数据驱动的施工优化

大数据与AI技术的快速发展为桥梁施工监控注入了全新的动能。这些技术能够实时分析施工中的应力、变形等关键数据,通过机器学习算法预测可能出现的偏差,并以高精度的误差修正模型优化施工控制。尤其是在复杂地形条件下,基于AI的施工优化系统展现了极强的适应能力,在提高数据处理效率和控制精度方面表现出色。Jones等^[14]在其研究中采用大数据分析对桥梁施工过程中的应力和变形数据进行实时处理,并

结合机器学习算法预测施工中可能出现的偏差。结果表明,通过基于多变量回归的误差修正模型,可以将监测误差减少至0.3 mm。张伟强^[15]对某连续梁桥施工中的动态荷载和沉降数据进行分析,开发了一套基于AI的施工优化系统。该系统利用支持向量回归算法对实时传感器数据进行深度学习,显著提升了数据分析的效率和准确性。试验表明,该系统在复杂地形条件下仍能有效控制施工线形偏差。此外,建筑信息模型(BIM)技术与物联网(IoT)的结合,使施工管理更加直观和动态化。BIM技术的三维可视化和数据集成功能,为复杂施工条件下的精确控制提供了可靠保障。而通过IoT实现的实时数据更新和状态监控,则进一步提升了施工效率。刘海^[16]在研究连续梁桥上跨隧道施工的过程中,利用BIM技术实现了对施工过程的三维可视化与施工数据的动态集成,为复杂施工条件下的线形控制提供了可靠的技术支持。Williams等^[17]则提出了一种结合大数据与强化学习的桥梁施工监控模型,该模型通过对传感器采集的历史数据和实时数据进行比对分析,动态调整施工步骤,从而进一步优化了桥梁施工过程。该方法在实际项目中显著减少了人为干预,提高了施工精度和稳定性。Brown^[18]也通过将BIM与IoT技术相结合,开发了一套施工监控与管理系统。该系统能够实时更新桥梁施工进度与荷载数据,并通过BIM平台直观展示施工状态与关键技术参数。该技术在复杂桥梁工程中的应用,可将施工效率提高20%,同时显著减少因数据不一致导致的施工偏差。大数据、AI、BIM和IoT技术的应用,体现了桥梁施工从传统经验型管理向智能化、数据驱动型管理的转变。

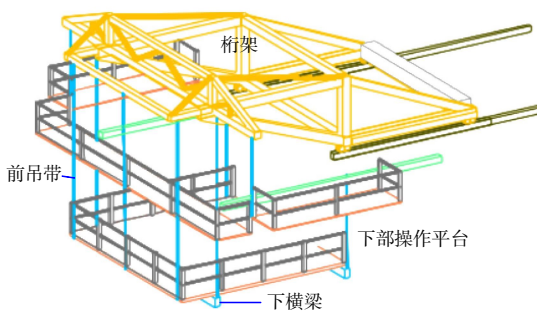
4 未来发展趋势

4.1 新材料与新技术的融合

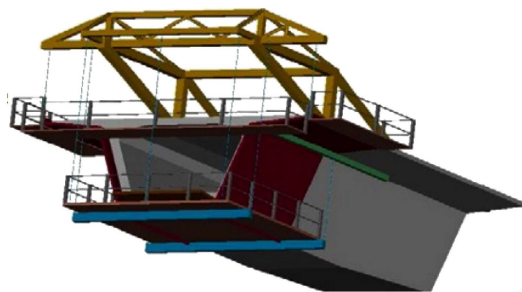
桥梁施工对设备性能的要求不断提升,挂篮作为悬浇施工的核心设备,其轻量化设计已成为重要研究方向。通过优化挂篮结构设计 with 材料选择,在大跨径桥梁施工中,采用轻量化挂篮可提升施工效率约15%^[19]。碳纤维复合材料在强度和耐久性方面优于传统钢材,且大幅减少了施工中的人为调整需求。在跨度超过200 m的连续梁桥施工中,轻量化挂篮能够显著降低施工误差累积^[1]。

轻量化挂篮设计和无人机监测技术共同推动了桥梁施工向高效化、智能化的方向发展。轻量

化挂篮的应用改善了设备性能,减少了施工误差,而无人机监测技术则通过提升监测效率和数据准确性,为施工风险控制提供了创新技术。采用无人机搭载激光扫描设备能够精确采集施工中的线形数据和环境影响参数,有效提高了监测范围与精度^[19]。同时,无人机监测技术在复杂桥梁施工中的应用潜力,通过多视角的快速数据采集,结合云端计算和实时数据处理技术,可显著提升施工过程中的问题识别能力,并提供高效的施工状态反馈。其应用于跨河桥梁时,将监测时间减少了 40%^[20]。通过进一步优化材料性能、完善无人机与云计算的协同机制,这些技术可能在复杂桥梁工程中发挥更大的潜力。



(a) 先进设备工作平台以及小车运行的轨道建模



(b) 先进设备、桥墩和桥台 3D 建模

图 2 桥梁施工场景中先进设备的 3D 建模

合的创新技术在桥梁施工中展现了巨大的应用潜力。通过动态反映桥梁施工中的线形与内力分布,数字孪生技术为施工调整提供了可靠依据。数字孪生技术能够动态反映施工中桥梁结构的线形与内力分布,为施工调整提供可靠依据^[19]。数字孪生与 IoT 技术结合形成的桥梁施工的全生命周期管理平台,可以实时同步施工过程的状态数据,生成虚拟模型以预测未来施工可能面临的风险与问题,该技术在多种桥梁工程中减少了 25% 的施工计划调整^[20]。

4.3 持续性与环保施工

通过采用低碳混凝土和可再生材料,显著减少了碳排放量,同时优化混凝土配合比并推进废弃物回收利用,有效降低了资源消耗。研究指出,通过优化混凝土配合比并控制施工废弃物的回收利用,绿色施工技术能够实现经济效益与环境效益的双赢^[16]。基于生命周期分析的绿色施工评价方法,通过对不同施工技术与材料的环境影响进行评估,优化了桥梁施工的环保性能,该方法在

4.2 数字化与智能化施工

智能挂篮设备的应用通过集成自动定位、力学调整与实时反馈功能,智能挂篮设备能够减少人工干预,提高施工精度^[21]。智能系统能够根据施工荷载和环境条件的变化,动态优化浇筑速度和压力,从而确保混凝土的均匀性与强度。试验结果显示,该设备在大跨度连续梁桥施工中减少了 20% 的施工时间^[22]。通过三维可视化技术对施工设备进行精确模拟与优化配置,先进设备的 3D 建模为施工过程的规划、监控及实时调整提供了重要支持,进一步展示了智能施工设备在复杂桥梁工程中的应用潜力(见图 2)。

数字孪生技术作为将物理结构与虚拟模型结

大型跨河桥梁项目中显著降低了施工碳足迹^[23]。绿色施工技术的推广契合了现代工程可持续发展的需求,将社会效益与经济效益相统一。

5 结语

近年来,连续梁桥悬浇施工与线性监控技术在理论与实践取得了显著进展。现代悬浇施工技术在挂篮设计与优化、合龙段施工工艺、以及施工过程的精确控制方面取得显著成效。线性监控技术通过传感器网络、数字孪生平台的协同应用,逐步实现了对桥梁施工全过程的动态监测和调整。通过集成多源数据的监控系统,可以将施工线形偏差控制在毫米级别。多个大跨度桥梁工程中均验证了这些技术的有效性。从合龙段动态监控到施工全过程中的荷载调整,已被广泛应用于复杂桥梁施工项目中。

尽管如此,目前的技术短板依然突出。特别是在复杂地质环境下的施工稳定性和大跨度结构的长期监控精度方面需深入研究。挂篮设计在极端荷载条件下有待优化,线性监控技术在数据可

靠性与实时性方面需进一步提升。现有监控系统在复杂施工条件下的多源数据整合与实时优化能力不足,也限制了其动态施工中的应用。未来,桥梁施工技术的发展将继续依托智能化与数字化技术,进一步提升施工的精度、效率与可持续性。智能挂篮设备与数字孪生技术的深度融合,以及物联网技术的广泛应用,将实现施工全过程的高精度监控与动态调整,为复杂地质条件下的桥梁建设提供可靠保障。

参考文献:

- [1] SMITH J, BROWN T. Advances in cantilever construction techniques for long-span bridges[J]. Journal of Bridge Engineering, 2021, 26(4): 450–467.
- [2] 胡鹏涛. 连续梁桥悬臂现浇施工研究[M]. 中铁十八局集团有限公司, 2020.
- [3] 张晓刚. 基于悬浇法的钢混合连续梁桥施工控制[M]. 山西路桥建设集团有限公司, 2024.
- [4] ANDERSON R. Integration of BIM and sensor networks in bridge construction[J]. International Journal of Civil Engineering, 2020, 18(3): 230–245.
- [5] 邹俊. 基于悬浇法的钢-混组合连续梁桥施工控制[M]. 江西省交通工程集团有限公司, 2024.
- [6] 刘新权, 梁凯. 悬臂现浇连续梁桥三角形挂篮施工技术研究[J]. 工程技术研究, 2020, 5(3): 103–104.
- [7] JOHNSON M, WILLIAMS D. Advanced monitoring systems in cantilever bridge construction[J]. Structural Monitoring and Maintenance, 2023, 10(3): 245–260.
- [8] MILLER K, SMITH J. Smart sensors in bridge cantilever construction[J]. Journal of Infrastructure Systems, 2021, 27(2): 1–12.
- [9] TAYLOR H, DAVIS C. Innovations in cantilever closure segment techniques[J]. Bridge Technology Quarterly, 2021, 29(4): 322–338.
- [10] 赵健. 连续梁桥悬臂现浇施工关键技术与控制方法研究[R]. 北京住总集团有限责任公司, 2023.
- [11] 牛爱国. 预应力混凝土连续梁桥悬臂现浇施工探讨[M]. 广饶县交通运输局, 2023.
- [12] 马荣, 张浩. 基于预拱度误差检验法的青兰高速公路连续梁桥悬浇施工监控[R]. 中建八局第四建设有限公司, 2023.
- [13] 文国斌. 连续梁桥悬臂现浇施工技术探讨[J]. 桥梁建设, 2022, 52(4): 45–50.
- [14] JONES P, DAVIS K. BIM and digital twin integration for bridge Engineering[J]. Engineering Structures, 2022, 251: 113976.
- [15] 张伟强. 基于人工智能的连续梁桥施工优化研究[J]. 中国公路学报, 2023.
- [16] 刘海. 挂篮悬浇连续梁桥上跨既有高铁隧道施工及监测关键技术[R]. 中交二航局第四工程有限公司, 2024.
- [17] WILLIAMS D, RODRIGUEZ P. AI and IoT applications in real-time monitoring of cantilever bridges[J]. Automation in Construction, 2023, 143: 104827.
- [18] BROWN T. Innovations in Closure Segment Techniques for River-Crossing Bridges[J]. Bridge Technology Today, 2019, 12(7): 390–412.
- [19] LIU H. Key technologies for construction and monitoring of cantilever cast-in-place continuous beam bridges over existing high-speed railway tunnels[R]. China Communications Construction Company, 2024.
- [20] MA R, ZHANG H. Monitoring of cantilever construction of continuous beam bridges on qinglan expressway based on camber error inspection method[R]. China State Construction Engineering Corporation, 2023.
- [21] 武松. 连续梁桥悬臂现浇施工技术研究[J]. 技术与市场, 2019, 26(2): 62–63.
- [22] ZHANG W. Research on construction optimization of continuous beam bridges based on artificial intelligence[J]. China Journal of Highway and Transport, 2023.
- [23] 路林振. 连续梁桥悬臂浇筑技术原理及应用[J]. 交通世界, 2020(8): 126–127, 130.