基于信息化技术控制独塔双索面斜拉桥塔身和主梁的施工技术研究

王庭
中交路桥华南工程有限公司　广东 中山　528400

摘　要　独塔双索面斜拉桥因单塔支撑的结构非对称性，在塔身垂直度控制、主梁线形调整及索力均衡协调等核心施工环节面临显著挑战。本研究聚焦信息化技术在该类桥梁施工控制中的实践应用，在系统分析结构非对称受力特征、施工阶段动态力学变化及精准管控需求的基础上，提出多源监测、有限元预测、数据融合修正及信息化平台集成4项核心技术。多源监测整合北斗高精度定位、光纤光栅传感与无人机巡检等设备，实现塔梁变形、应力及索力数据的实时采集；有限元模型通过融入材料非线性、施工荷载动态变化等参数，精准预测各施工阶段线形与索力理论值；数据融合采用卡尔曼滤波与神经网络结合算法，滤除噪声干扰并智能识别误差成因；信息化平台集成BIM、5G通信技术，构建全流程可视化管控体系。研究成果为独塔双索面斜拉桥施工提供了可靠的技术支撑与实践范式，具有重要的工程价值与行业引领意义。

关键词　信息化技术；斜拉桥施工；主梁施工；线形

Research on Construction Techniques for Controlling the Tower and Main Girder of a Single-Tower Double-Cable-Plane Cable-Stayed Bridge Based on Information Technology

Wang Ting
CCCC Road and Bridge South China Engineering Co., Ltd., Zhongshan 528400, Guangdong Province, China

Abstract　Single-tower double-cable-plane cable-stayed bridges face significant challenges in controlling tower verticality, girder alignment, and cable force coordination due to structural asymmetry. This study proposes four core information-based technologies for construction control: multi-source monitoring, finite element prediction, data fusion correction, and an integrated information platform. Multi-source monitoring uses BeiDou positioning, fiber sensors, and UAVs to collect real-time deformation and stress data. Finite element models predict alignment and cable forces by incorporating material nonlinearity and dynamic construction loads. Data fusion combines Kalman filtering and neural networks to filter noise and identify error sources. The platform integrates BIM and 5G for full-process visualization. These solutions offer reliable technical support and practical frameworks, demonstrating significant engineering value and industry leadership.

Key words　Information Technology; Cable-Stayed Bridge Construction; Main Girder Construction; Alignment

随着交通建设向复杂地形延伸，独塔双索面斜拉桥因跨越能力强、适应性好被广泛应用。但其单塔受力的非对称性，使塔身垂直度控制、主梁线形调整及索力均衡成为施工核心难题，传统依赖经验的控制方法易导致偏差累积，影响结构安全与通行性能[1]。当前信息化技术的飞速发展为解决这一问题提供了新路径，BIM、大数据等技术的融合应用，推动桥梁施工从经验驱动转向数据驱动。本文以独塔双索面斜拉桥塔身和主梁为研究对象，系统探究信息化技术在施工控制中的应用路径，构建精准、实时施工控制体系，旨在破解复杂桥梁施工痛点，为同类工程提供技术参考，助力桥梁施工领域的智能化升级。

1　信息化技术在桥梁工程中的发展

1.1 信息化技术的应用现状

当前信息化技术已深度融入桥梁工程全生命周期，成为提升施工精度与效率的核心支撑。在独塔双索面斜拉桥等复杂桥梁建设中，BIM技术实现了塔身与主梁的三维可视化建模，将设计参数、材料属性等信息集成于模型中，为施工方案优化提供直观依据。物联网技术通过在塔身模板、主梁挂篮等关键部位布设传感器，实时采集沉降、应力、变形等数据，构建施工过程动态监测网络。大数据与云计算技术则打破数据孤岛，对施工过程中的海量数据进行快速分析，为进度调整、质量管控提供决策支持。此外，无人机巡检、智能张拉等技术的应用，

进一步拓展了信息化技术的应用场景，改变了传统桥梁施工依赖经验判断的模式，推动施工控制向精准化、智能化方向转型，为复杂桥梁结构施工提供了可靠技术保障[2]。

1.2 国内外信息化施工控制研究进展

国外在桥梁信息化施工控制领域起步较早，研究重点集中于智能算法与施工控制的融合。通过引入机器学习、数字孪生等技术，构建桥梁施工虚拟仿真系统，实现施工过程的预演与动态调控，部分发达国家已在大跨度斜拉桥施工中实现设计、施工、运维的全流程信息化联动。国内近年来依托重大桥梁工程实践，在信息化施工控制技术上取得显著突破，形成了以BIM技术为核心，结合北斗定位、无线传感网络的一体化施工控制体系，在独塔双索面斜拉桥施工中，实现了塔身垂直度与主梁线形的实时监测与自动调整。同时，国内科研机构在数据融合算法、国产化监测设备研发等方面不断创新，逐步构建起符合国内工程特点的信息化施工控制标准体系，缩小了与国际先进水平的差距，为复杂桥梁施工控制提供了自主技术支撑。

1.3 信息化技术在桥梁工程的核心价值与应用趋势

信息化技术为桥梁工程带来的核心价值，体现在安全保障、效率提升与管理优化的全方位革新。从施工安全角度，实时监测系统可提前预警结构形变与应力异常，如分布式光纤传感器网络能精准捕捉微小形变，为风险防控提供时间窗口；施工效率上，智能设备与信息化系统联动可缩短施工周期，智慧造桥机的应用已实现单跨施工效率提升40%的实践成效。管理层面，三级监测平台体系推动监测数据从“采数”到“用数”的闭环管理，支撑养护决策与应急响应。未来趋势呈现多技术深度融合特征，数字孪生与AI算法的结合将实现施工过程自主预判，5G与北斗的协同应用会强化远程精准管控，同时监测数据资产化应用将为桥梁全生命周期管理提供持续动能，推动行业向数字经济转型[3]。

2 独塔双索面斜拉桥结构特点与施工控制需求分析

2.1 独塔双索面体系结构受力特征

独塔双索面斜拉桥以单塔为核心受力支撑，区别于双塔结构的对称受力模式，其整体受力呈现明显的非对称性，塔体需承担更大的单侧水平拉力与弯矩。双索面通过左右对称布置的拉索，将主梁荷载均衡传递至塔体，显著提升结构横向抗扭刚度与稳定性，有效抑制主梁在车辆、风荷载作用下的侧弯与扭转变形。拉索作为力的传递载体，其索力分布直接影响塔梁受力状态，合理的索力体系可使塔体处于压弯平衡状态，主梁承受的弯剪应力大幅降低。塔梁墩连接方式对受力传递至关重要，半漂浮体系通过支座释放部分约束，使拉索更多承担主梁水平力。这种结构体系在满足跨越能力的同时，对各构件协同受力要求极高，任一部位受力异常都可能引发整体结构变形。

2.2 施工阶段力学特性

独塔双索面斜拉桥施工阶段与运营阶段的力学特性差异显著，结构体系随施工工序逐步形成，受力状态呈现动态变化特征。主梁施工过程中，随着节段延伸，悬臂长度不断增加，主梁自身重力产生的弯矩持续增大，易出现下挠变形，因此拉索张拉成为调整主梁受力的核心手段，通过精准控制索力可平衡悬臂弯矩，约束变形发展。塔体施工中，随着高度提升，其抗倾覆稳定性逐渐降低，需通过临时固结措施控制塔身偏移，同时关注施工荷载与日照温差引发的塔身应力变化。拉索张拉工序中，单次张拉会改变已施工节段的受力平衡，导致塔体微量倾斜与主梁线形波动，形成“牵一发而动全身”的连锁反应。

2.3 施工控制关键指标与指标体系

独塔双索面斜拉桥施工控制关键指标体系围绕几何形态与力学性能构建，核心指标涵盖塔体、主梁、拉索三大核心构件。塔体控制指标以垂直度和轴线偏差为主，垂直度直接影响拉索受力分布的均衡性，施工中需控制塔身倾斜量在设计允许范围内，同时监测塔体应力变化，防止出现局部压应力超标。主梁控制指标包括线形、高程及应力状态，主梁线形决定桥梁通行平顺性，悬臂施工中需将节段高程偏差控制在毫米级，同时通过应力监测确保主梁在弯剪作用下处于安全受力区间。拉索控制指标以索力精度为核心，索力偏差需严格控制在设计值的一定范围内，避免因索力失衡引发塔梁变形，为施工决策提供精准依据[4]。

2.4 控制需求

独塔双索面斜拉桥的施工控制需求源于结构受力复杂性与施工过程的动态性，核心需求体现为精准性、实时性与协同性。精准性需求体现在各施工环节的参数控制上，拉索张拉索力、主梁节段高程等关键参数的精准控制，是确保结构最终形态与受力符合设计要求的基础，偏差过大会导致后期调节困难，影响结构安全。实时性需求源于施工过程的动态受力变化，需通过实时监测捕捉塔梁变形、应力及索力波动，及时发现偏差并快速调整，避免偏差累积。针对独塔结构的非对称特性，需强化施工过程中的抗倾覆控制需求，通过临时支撑与动态监测结合，保障施工安全。

3 信息化技术控制独塔双索面斜拉桥塔身和主梁的施工技术

3.1 基于多源监测的塔身与主梁实时变形监控技术

基于多源监测的实时变形监控技术通过整合多元感知设备，构建覆盖塔身与主梁的全方位监测网络，实现施工变形的精准捕捉与实时反馈，如图1所示。在塔身监测中，采用北斗高精度定位技术与光纤光栅传感器组合模式，北斗系统实时采集塔身顶点三维坐标数据，动态追踪垂直度与轴线偏移；光纤光栅传感器则嵌入塔体混凝土内部，同步监测应力分布与应变变化。主梁施工阶段，在挂篮已施工节段关键截面布设位移计与倾角传感器，实时获取主梁高程、线形及转角数据，采用高精度的测量技术，对主梁整体线形进行周期性复核，弥补单点监测的局限性。



图1 独塔双索面斜拉桥施工监测数据接收端及处理系统

3.2 基于有限元模型的塔梁施工线形与索力预测控制技术

基于有限元模型的预测控制技术以数值仿真为核心，通过构建精细化塔梁整体有限元模型，实现施工过程中线形与索力的精准预测和动态调控。施工前依据施工工序对模型进行分步加载仿真，预测各施工阶段主梁线形、塔体变形及拉索索力的理论值，以此作为施工控制基准。施工过程中，将多源监测获取的实时数据与模型预测值进行对比分析，通过参数识别算法修正模型误差，使模型能够动态反映结构实际受力状态，保障塔梁施工精度。

3.3 多源数据融合与施工误差智能修正技术

多源数据融合与施工误差智能修正技术通过整合监测数据、模型数据及设计数据，利用智能算法实现施工误差的精准识别与自动修正，提升控制效率与精度。数据融合阶段采用卡尔曼滤波与神经网络结合的算法，对北斗定位、传感器监测、无人机测量等多源数据进行时空配准与信息融合，滤除环境干扰、设备误差等噪声，提取结构真实状态信息。基于融合后的精准数据，构建误差识别模型，通过机器学习算法挖掘数据背后的关联规律，自动识别主梁高程偏差、塔体垂直度偏移、拉索索力偏差等各类施工误差，并分析误差产生的原因。针对不同类型的误差，系统结合有限元模型预测结果，智能生成修正方案，修正过程中实时跟踪效果，动态调整修正参数，确保误差控制在设计允许范围内，实现施工误差的智能化、精细化管控。

3.4 基于信息化平台的塔梁施工全过程集成控制技术

基于信息化平台的塔梁施工全过程集成控制技术构建集数据管理、模型分析、过程管控、协同办公于一体的综合性管理平台，实现塔梁施工全流程的信息化、可视化管控。平台核心功能包括：数据集成模块，统一管理设计图纸、施工方案、监测数据、模型数据等各类信息，打破信息孤岛；模型应用模块嵌入精细化有限元模型，支持施工过程动态仿真与预测分析；过程管控模块实时展示施工进度、质量指标、安全状态，自动对比实际参数与控制基准，生成偏差分析报告；平台采用BIM技术实现塔梁施工的三维可视化展示，将监测数据、施工进度与BIM模型实时关联，直观呈现结构状态与施工进展，提升整体施工管理水平[5]。

4 结束语

本文围绕独塔双索面斜拉桥塔身和主梁施工控制，构建了以多源监测、有限元预测、数据融合修正及信息化平台集成为核心的信息化控制技术体系。未来可进一步融合人工智能与数字孪生技术，优化预测模型精度，推动施工控制向自主决策、无人化调控升级，为桥梁工程施工技术的创新发展注入更强动力。

参考文献

[1]胡海波.混合主梁独塔斜拉桥施工过程受力性能分析[J].安徽建筑,2023,30(4):135-136,144.

[2]何振华,李湘华,罗国,等.独塔双索面非对称斜拉桥边跨现浇梁各施工阶段受力研究[J].西部交通科技,2024(10):143-145.

[3]于垂来,裴福才.钢混组合梁斜拉桥仿真分析[J].山东交通科技,2023(5):109-111.

[4]贾永健.不对称独塔斜拉桥施工过程受力分析与优化[J].施工技术(中英文),2024,53(3):60-64.

[5]李冰.窄翼缘组合梁柔性斜拉桥施工期受力性能分析[J].铁道建筑技术,2024(8):127-130.

（本文编辑 曹 阳）