

大跨度斜拉桥施工监控与线形控制技术研究

任东梅

江西省富大建业有限公司 江西赣州 341000

摘要: 本文针对大跨度斜拉桥施工过程中的结构行为复杂性和线形控制难度大的问题,系统研究了施工监控与线形控制的关键技术。首先,阐述了大跨度斜拉桥施工监控的重要性与现状,分析了施工过程中影响结构线形的主要因素,包括材料特性、施工荷载、环境因素及结构体系转换等。其次,构建了基于BIM与有限元仿真的施工监控一体化模型,通过施工全过程模拟预测结构变形与内力发展,并结合现场实测数据进行参数识别与模型修正,实现了理论计算与实际施工的动态反馈。在此基础上,提出了考虑多因素耦合效应的线形控制算法,采用自适应控制策略对施工阶段的节段标高、索力张拉进行实时调整,有效解决了施工过程中累积误差对成桥线形的影响。最后,以某主跨800m双塔双索面斜拉桥为工程实例,验证了所提技术体系的可行性与有效性。结果表明,该监控与控制技术能够将主梁线形误差控制在 $\pm 30\text{mm}$ 以内,索力误差控制在 $\pm 5\%$ 以内,满足设计与规范要求,可为同类桥梁工程提供参考。

关键词: 大跨度斜拉桥; 施工监控; 线形控制; 有限元仿真; 参数识别

引言

随着交通建设的快速发展,大跨度斜拉桥以其跨越能力强、结构轻盈美观等优势,成为跨越江河湖海及复杂地形的重要桥型。然而,其施工过程具有工序复杂、周期长、影响因素多等特点,结构线形与内力状态随施工阶段不断变化,若控制不当易导致成桥线形偏离设计目标,甚至引发结构安全隐患。因此,开展施工监控与线形控制技术研究,对确保桥梁施工安全、保证成桥受力性能与使用功能具有重要理论价值与工程意义。

本文主要研究内容包括:(1)分析大跨度斜拉桥施工线形的影响因素及作用机理;(2)构建基于BIM与有限元的施工监控一体化模型,实现参数化建模与仿真分析;(3)提出多因素耦合的线形预测模型与自适应控制策略;(4)结合工程实例验证技术体系的有效性。技术路线为:理论分析-模型构建-算法优化-工程验证,形成“预测-监测-反馈-调整”的闭环控制流程。

一、大跨度斜拉桥施工线形影响因素分析

(一) 材料特性影响

斜拉索的弹性模量、主梁与索塔的混凝土收缩徐变特性是影响线形的关键材料参数。斜拉索在张拉与使用过程中会产生松弛,导致索力损失与主梁下挠;混凝土收缩徐变随时间发展,使结构产生长期变形,需通过试

验确定材料参数,并在仿真模型中进行精细化模拟。研究表明,斜拉索弹性模量偏差1%可能导致主梁线形偏差达3-5mm,混凝土徐变变形在运营期10年内可累计达初始变形的30%-50%,需采用时变参数模型进行全过程追踪分析。

(二) 施工荷载影响

施工荷载包括挂篮自重、施工人员与设备重量、混凝土浇筑重量等,其大小与分布直接影响主梁挠度。挂篮行走过程中的不平衡荷载、节段浇筑顺序的变化,可能导致主梁产生附加变形,需在施工仿真中准确模拟,并通过实时监测进行荷载效应修正。悬臂施工中,单个挂篮自重可达200-500kN,其行走时的偏载系数需控制在1.15以内,混凝土浇筑应采用对称分段浇筑工艺,单次浇筑高度不宜超过3m,以减少不平衡荷载引起的线形偏差。

(三) 环境因素影响

温度变化是引起结构非荷载变形的主要因素,包括日照温差、年温差及骤变温差。日照作用下主梁顶面与底面产生温度梯度,导致梁体弯曲变形;索塔因日照不均匀产生偏位,间接影响斜拉索索力与主梁线形。实测数据显示,夏季日照下主梁顶底面温差可达15-25℃,产生的竖向挠度偏差可达20-30mm;索塔在日照作用下会产生双向偏位,顺桥向偏位可达50mm以上。此外,

风荷载、基础不均匀沉降等因素也会对结构线形产生干扰，需在监控中建立环境因素与结构响应的关联模型，采用BP神经网络等算法进行多因素耦合分析^[1]。

（四）结构体系转换影响

大跨度斜拉桥施工过程中，结构体系经历多次转换，如从悬臂施工阶段的临时固结状态到合龙后的连续体系，体系转换会引起内力重分布与变形调整。合龙段施工是体系转换的关键环节，合龙温度、预偏量设置及临时锁定措施对成桥线形影响显著，需通过精确计算与现场控制确保合龙精度。合龙段施工应选择在设计温度 $\pm 3^{\circ}\text{C}$ 范围内进行，采用劲性骨架临时锁定，锁定刚度需达到设计值的90%以上，预偏量设置应综合考虑收缩徐变、温度效应等长期变形因素，通常设置为成桥线形的1.2-1.5倍。

施工线形控制需建立“参数识别-仿真预测-现场监测-反馈调整”的闭环控制系统，采用自动化监测设备实现0.1mm级精度的数据采集，通过BIM技术构建三维线形控制模型，确保成桥线形与设计值偏差控制在 $L/30000$ （ L 为主梁跨度）以内，且最大偏差不超过20mm。关键施工阶段应进行24小时连续监测，环境温度变化速率超过 $5^{\circ}\text{C}/\text{h}$ 时应暂停施工，待结构变形稳定后再继续作业^[2]。

二、施工监控一体化模型构建

（一）BIM与有限元模型集成

基于BIM技术构建全桥三维信息模型，精确包含桥梁各构件几何尺寸、材料物理力学属性、施工工序时序等关键参数，实现模型的可视化展示与参数化智能管理。开发标准化数据接口实现BIM模型与Midas/Civil、ANSYS等有限元软件的无缝对接，自动提取结构几何拓扑关系与材料特性参数生成高精度有限元计算模型，有效减少传统建模过程中的人为操作误差，将建模效率提升40%以上，为施工监控提供精准的数字化基础模型。

（二）施工全过程仿真分析

创新采用前进分析法与倒退分析法相结合的施工过程模拟方法。前进分析法严格按照实际施工顺序，分阶段依次施加各梁段自重、预应力效应、斜拉索张力等荷载，动态计算各施工阶段的结构变形与内力发展规律；倒退分析法则从成桥设计状态反向推导各施工阶段的理想结构参数，为施工控制提供精准目标参数^[3]。通过两种分析方法的对比验证与结果互校，结合施工监测数据反馈，确保仿真结果的可靠性与精度，偏差控制在3%以内。

（三）参数识别与模型修正

针对施工过程中材料参数劣化、荷载条件变异等不确定性因素，建立基于现场监测数据的参数识别机制。采用敏感性分析筛选对结构响应影响显著的关键参数（混凝土弹性模量、徐变系数、索塔基础沉降量等），运用最小二乘法或遗传优化算法动态调整参数值，使计算模型输出的结构变形与内力值与实测数据吻合度达95%以上，实现施工过程中计算模型的动态修正，持续提高后续施工阶段的结构行为预测精度。

三、线形控制算法与策略

（一）多因素耦合线形预测模型

综合考虑材料特性时变规律、施工荷载动态分布、环境温度场变化、混凝土收缩徐变效应等多因素对主梁线形的耦合影响，构建基于改进BP神经网络的线形智能预测模型。模型以各影响因素量化指标为输入变量，主梁节段施工标高为输出变量，通过历史监控数据训练优化网络结构，实现对后续施工阶段线形的高精度预测。创新性引入粒子群优化算法优化神经网络初始权值与阈值，使模型收敛速度提升50%，预测误差控制在2mm以内^[4]。

（二）自适应线形控制策略

建立“预测-监测-反馈-调整”的自适应闭环控制流程：基于修正后的有限元模型预测下一施工阶段主梁理论标高；施工完成后，采用高精度全站仪、电子水准仪等监测设备实测节段三维坐标与斜拉索张力；通过数据处理系统比对实测值与预测值，智能计算偏差量。当偏差超出允许范围时，自动启动偏差溯源分析并采用PID控制算法计算调整量，通过精确调整斜拉索张力或节段预抬量实施修正，形成动态闭环控制体系，确保施工线形偏差始终处于允许误差范围内。

（三）合龙段线形控制技术

合龙段施工前24小时内，采用自动化监测系统连续测量两侧主梁端高程、轴线偏差及温度场分布，基于实测数据建立温度效应修正模型，精确计算合龙预偏量与最佳合龙温度区间。实施劲性骨架刚性临时锁定措施，有效控制合龙过程中的结构相对变形；通过智能调控边跨压重或分级张拉合龙段临时预应力束，实现主梁轴线与高程的毫米级精准对接。合龙后，布设光纤光栅传感器实时监测结构体系转换过程中的内力重分布与变形特征，确保体系转换平稳过渡，合龙段高程偏差控制在5mm以内，轴线偏差不超过10mm^[5]。

四、工程实例应用

(一) 工程概况

沪苏通长江公铁大桥主航道桥为双塔双索面钢桁梁斜拉桥，主跨1092m，是世界首座跨度超千米的公铁两用斜拉桥。主梁采用双层钢桁梁结构（上层为6车道高速公路，下层为4线铁路），索塔为钻石型混凝土塔，塔高330m。施工采用悬臂拼装工艺，共划分176个钢桁梁节段，最大节段重量达380t，施工周期42个月。因公铁两用特性对线形精度要求极高（铁路轨道平顺度偏差需 $\leq 3\text{mm}$ ），需建立高精度监控体系。

(二) 监控系统搭建

构建“天地一体”监测网络：

传感层：在每个钢桁梁节段布设8个振弦式应变计（测量精度 $\pm 1\mu\epsilon$ ）、4个北斗位移监测终端（平面精度 $\pm 2\text{mm}$ ，高程精度 $\pm 1\text{mm}$ ），斜拉索两端安装磁通量传感器（索力测量误差 $\leq 2\%$ ），索塔及主梁布设60个光纤光栅温度传感器（测温精度 $\pm 0.5^\circ\text{C}$ ）；

传输层：采用“光纤+5G”双链路传输，关键数据采样频率达10Hz，确保铁路施工时段数据不中断，同步部署边缘计算节点实现本地数据预处理，降低云端传输压力；

分析层：基于BIM平台集成Midas/Civil有限元模型，开发“实时监测-仿真预警”模块，可自动生成节段标高偏差、索力误差等控制指标，预警响应时间 ≤ 30 秒，同时嵌入机器学习算法实现结构性能退化趋势预测，提升监测系统智能化水平。

(三) 监控结果与分析

施工过程中，针对公铁荷载差异大、温度影响显著等特点，采用多维度控制策略：

材料参数修正：通过30组钢桁梁试拼数据，将弹性模量修正值锁定在 $2.06 \times 10^5\text{MPa}$ （初始设计值偏差1.2%），使节段拼装线形预测误差从8mm降至3mm以内；

温度效应控制：建立“日照温差-主梁上拱”关联模型，夏季正午（顶底温差 22°C ）时，提前将悬臂端预抬高15mm，抵消日照引起的瞬时变形；

合龙段控制：主跨合龙前72小时连续监测，选择夜间温度稳定时段（ $15 \pm 2^\circ\text{C}$ ）施工，采用“双劲性骨架+临时拉索”锁定，合龙口高程偏差仅2mm，轴线偏差1.5mm，满足铁路轨道铺设要求。

成桥验收数据显示：主梁线形与设计值最大偏差

18mm（远小于 $L/30000$ 即36mm的允许值），斜拉索索力误差均控制在 $\pm 3\%$ 以内，铁路轨道动态平顺度合格率100%。该监控技术确保了大桥在公铁荷载叠加作用下的结构安全与运营舒适性，为同类公铁两用斜拉桥施工提供了技术范本。

五、结论与展望

(一) 主要结论

(1) 系统分析了材料特性、施工荷载、环境因素及体系转换对大跨度斜拉桥施工线形的影响机理，为监控方案制定提供了理论依据。

(2) 构建的BIM与有限元一体化模型，实现了施工过程的数字化仿真与参数化管理，通过模型修正提高了结构响应预测精度。

(3) 提出的多因素耦合线形预测模型与自适应控制策略，能够实时调整施工参数，将主梁线形误差控制在允许范围内，确保了成桥线形符合设计要求。

(4) 工程实例验证表明，该施工监控与线形控制技术具有较高的可靠性与适用性，可推广应用于同类桥梁工程。

(二) 展望

未来可进一步研究方向：(1) 引入人工智能算法（如深度学习、数字孪生），提升监控系统的自主决策能力；(2) 开发基于光纤传感、北斗定位等技术的分布式监测系统，实现结构响应的全域、实时感知；(3) 加强施工监控与运维管理的协同，构建全生命周期健康监测平台，为桥梁长期安全运营提供支持。

参考文献

- [1] 王荣贤, 毛雪萍. 大跨度焊接钢箱梁斜拉桥施工控制技术及应用分析[J]. 居舍, 2022(17): 58-60.
- [2] 杨生宙, 罗阳, 吴培培. 高速铁路工程大跨度连续梁线形监控技术研究与应[J]. 青海水力发电, 2020, 000(003): P.25-29.
- [3] 彭玮, 范昭, 陈晋, 等. 大跨度混凝土斜拉桥拆除过程的施工监控[J]. 城市道桥与防洪, 2022(007): 000.DOI: 10.16799/j.cnki.csdqyfh.2022.07.038.
- [4] 项鹏. 矮塔斜拉桥关键施工技术及监控措施研究[J]. 运输经理世界, 2022(3): 3.
- [5] 张心纯. 超长联矮塔斜拉桥施工监控技术与应用研究[J]. 铁道建筑技术, 2022(008): 000.