

可获得)。可检出规则建议:纸质记录检查更改处是否符合“划改+签名+日期”规范;电子记录检查是否存在无理由修改、批量修改或越权操作;系统端实现样品号、任务号、仪器序列号与图谱文件名的一致性自动比对。

5.2 标准版本与资质范围不匹配风险

典型差错涉及引用作废标准、未执行合同约定的更严判定依据、项目名称简写导致歧义及超范围签发。应对策略包括:建立标准版本数据库并锁定现行有效版本;推行项目名称编码化,禁止自由文本录入;系统自动校验“项目一方法一能力范围”映射关系;对于分包项目,自动生成分包声明及分包方资质信息,防止漏报或混淆。

5.3 修约与临界值误判风险

结论性差错常源于“过早修约”(导致累积误差)、比较口径不一致(如“ \leq ”与“ $<$ ”混淆)及检出限处理不当。建议规则:计算模块保留充足有效数字,仅在最终输出层执行修约;对接近限值(如 $\geq 0.8 \times$ 限值)的结果自动标记为“临界”,触发二级复核;严格依据 GB/T 8170 界定修约规则与检出限表述逻辑。

5.4 图谱处理缺记录与参数随意调整

色谱、质谱等分析中,积分参数与基线选择直接影响结果。风险点在于二次处理未留痕或质控样与样品参数不一致。可检出规则:系统强制记录积分参数、软件版本及二次处理理由;启用审计追踪功能,完整保留修改前后的图谱与结果;同批次质控样与样品应采用一致参数;若出现具有“人为调优”特征的数据变化,须触发异常说明与审批流程。

6 数字化拦截:三层规则引擎与审计追踪

6.1 三层规则引擎架构

建议依据 GB/T 40343-2021《智能实验室 信息管理系统功能要求》在 LIMS 或电子原始记录系统中部署三层校验规则:第一层为“基础合规校验”(必填项、格式、版本、单位匹配);第二层为“技术逻辑校验”(互斥关系、换算逻辑、质控合格判据);第三层为“风险触发校验”(临界值识别、异常趋势预警、同批次比对)。通过规则引擎的层层过滤,将低级差错拦截在人工复核之前。

6.2 审计追踪与权限治理

数据治理应确保“修改必留痕”。系统应落实最小权限原则与职责分离;对关键风险字段(如结果值、判定依据)设置高权限修改门槛并强制录入修改理由;确保时间戳、日志备份与灾备机制的可靠性。在纸电并行阶段,需明确“主记录”属性,避免双轨制带来的追溯冲突。

7 组织保障:责任链与持续改进

机构应建立明确的“三道防线”:检测人员对数据真实性与原始记录负责,复核人员对技术校核与逻辑一致性负责,签字人对对外声明与证据链完整性负责。通过统计差错率、返工率、临界复核命中率等指标,开展定期的质量复盘。对于重复性差错,应优先通过系统规则固化(防错设计)解决,而非单纯依赖人员培训,从而形成“发现一纠正一系统预防”的质量闭环。

8 结语

签发复核的核心在于以有限的审核资源实现对风险的最优控制。通过建立分级复核矩阵锁定高风险点,利用关键控制点清单固化审核经验,依托数字化规则引擎与审计追踪前移差错拦截关口,并配合责任链与指标化复盘机制,检验检测机构能够在业务量增长与技术复杂度提升的双重挑战下,有效保障报告质量,持续维护社会公信力。

参考文献

- [1] 国家认证认可监督管理委员会. RB/T 214-2017 检验检测机构资质认定能力评价 检验检测机构通用要求[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
- [2] ISO/IEC. ISO/IEC 17025:2017 General requirements for the competence of testing and calibration laboratories[S]. Geneva: ISO, 2017.
- [3] 中国合格评定国家认可委员会. CNAS-CL01:2018 检测和校准实验室能力认可准则[S]. 北京: 中国标准出版社, 2018.
- [4] 中国认证认可协会. RB/T 047-2020 检验检测机构管理体系 风险管理指南[S]. 北京: 中国标准出版社, 2020.
- [5] Stamatis D H. Failure Mode and Effect Analysis: FMEA from Theory to Execution[M]. Milwaukee: ASQ Quality Press, 2003.
- [6] 中国合格评定国家认可委员会. CNAS-CL01-G001:2018 检测和校准实验室能力认可准则的应用要求[S]. 北京: 中国标准出版社, 2018.
- [7] WHO. Guidance on Good Data and Record Management Practices[R]. Geneva: World Health Organization, 2016.
- [8] 中国国家标准化管理委员会. GB/T 8170-2008 数值修约规则与极限数值的表示和判定[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- [9] 中国国家标准化管理委员会. GB/T 40343-2021 智能实验室 信息管理系统功能要求[S]. 北京: 中国标准出版社, 2021.
- [10] 国家市场监督管理总局. 检验检测机构监督管理办法(总局令第39号)[Z]. 北京: 国家市场监督管理总局, 2021.

Research on Linear Control and Stress Monitoring Technology during the Construction Stage of Long Span Bridges

Junjun Wang¹ Xu Xu² Di Yuan¹ Sheng Li¹

1. Chifeng City Transportation Investment (Group) Co., Ltd., Chifeng, Inner Mongolia, 024000, China

2. Chifeng Songshan District Highway Maintenance and Transportation Support Center, Chifeng, Inner Mongolia, 024000, China

Abstract

Large-span bridge construction involves complex procedures where various errors tend to accumulate during the process. Traditional single-dimensional control methods struggle to meet the demands of precision construction. To address the dual requirements of linear alignment and stress control during structural construction phases, this study systematically analyzes mechanical interaction patterns, optimizes monitoring point selection and sensor deployment strategies, and develops integrated monitoring, data processing, and collaborative control solutions tailored for construction phases. By consolidating multi-source monitoring data to establish coupled prediction and closed-loop adjustment mechanisms, the proposed approach has been validated through real-world engineering applications. These technologies significantly enhance construction control accuracy, ensure overall safety and structural integrity of completed bridges, and provide actionable technical pathways for similar engineering projects.

Keywords

Long-span bridge; Construction phase; Alignment control; Stress monitoring; Coordinated control

大跨度桥梁施工阶段线形控制与应力监测技术研究

王君君¹ 徐旭² 原迪¹ 李胜¹

1. 赤峰市交通投资(集团)有限公司, 中国·内蒙古赤峰 024000

2. 赤峰市松山区公路管护和运输保障中心, 中国·内蒙古赤峰 024000

摘要

大跨度桥梁施工工序复杂, 施工过程中的各类误差易出现累积, 传统单一维度的控制方式难以满足精细化施工的实际需求。针对这类结构施工阶段的线形与应力双控需求, 梳理施工阶段的力学作用规律, 优化监测点位选型与传感设备布设, 形成适配施工阶段的监测、数据处理与协同控制方案, 整合多源监测信息建立耦合预测与闭环调整机制, 依托实际工程完成技术效果验证。相关技术能够有效提升施工控制的精度, 保障整体施工安全与成桥状态的精准性, 为同类工程提供可参考的技术实施路径。

关键词

大跨度桥梁; 施工阶段; 线形控制; 应力监测; 协同控制

1 引言

伴随跨江跨谷等复杂地形区域的交通基础设施建设的推进, 大跨度桥梁的应用范围持续拓展, 这类结构的施工工序复杂, 施工周期较长, 施工过程中的各类误差易出现累积效应, 直接影响成桥后的线形状态与结构安全。传统施工控制多采用单一维度的控制方式, 未充分关注线形与应力的内在关联, 也未针对施工阶段的复杂环境优化监测与数据处理方案, 无法兼顾结构受力与线形的同步管控, 难以满足精细化施工的需求, 针对这类结构施工阶段的双控技术研究, 能

够为实际工程的施工控制提供更贴合实际需求的技术支撑, 保障施工过程的整体稳定与成桥状态的精准性。

2 施工阶段双控的力学基础

2.1 施工误差传递规律

大跨度桥梁多采用分阶段渐进施工方式, 结构体系随施工进度动态转换, 各施工环节的状态偏差并非独立存在, 而是会随结构体系的演化形成传递与累积。挂篮变形、混凝土浇筑偏差、预应力张拉误差等单阶段施工偏差, 会在逐段施工的过程中, 随结构边界条件的变化向下游施工阶段传递^[1]。前序节段的施工偏差会改变后续节段施工时的初始受力状态, 使得后续阶段的施工控制基准发生偏移, 偏差的累积并非简单的线性叠加, 而是会随结构超静定次数的提升呈现非线性

作者简介: 王君君(1980—), 男, 中国内蒙古赤峰人, 硕士, 高级工程师, 从事公路与桥梁工程研究。

的放大效应，最终对成桥阶段的线形与内力状态产生显著影响，这一传递路径与累积逻辑，是施工阶段双控体系需要应对的核心底层规律。

2.2 力形耦合作用机制

施工阶段的线形状态与应力状态并非相互独立的两类指标，二者存在内在的力学耦合关联。结构几何形态的变化会改变构件的相对位置与约束关系，进而重构结构的内力分布状态，超静定结构的内力对几何形态的变化存在高度敏感性，微小的线形偏差即可引发内力分布的显著调整^[2]。结构内部的应力变化与材料的应变状态直接相关，应变作为变形的微观体现，会先于宏观的线形变形呈现出异常特征，应力状态的变化能够提前反映结构的变形趋势，这种双向的耦合作用，使得两类指标的协同控制具备了理论层面的可行性，也为后续施工控制方案的设计提供了核心理论支撑。

3 施工线形监测预测技术

3.1 关键点位移监测

位移监测点的布设以结构状态的敏感性为核心依据，选取对施工变形响应最直接的位置布设监测单元。悬臂节段前端的位移直接反映当前施工节段的变形状态，是线形控制的核心观测对象，该位置的变形能够直接体现挂篮变形、混凝土自重作用下的节段变形，是判断当前节段施工状态的核心参照^[3]。合龙口位置的位移状态直接决定合龙作业的精度，是合龙阶段的核心控制点位，该位置的状态直接影响合龙段的施工质量，是合龙阶段管控的核心对象。塔柱顶部的偏位会带动主梁整体线形的偏移，是整体线形控制的基准参照，塔柱的状态直接决定主梁的安装基准，其偏位会引发主梁线形的系统性偏移。针对不同点位的监测需求，选取适配的监测设备，匹配施工阶段的动态作业环境，满足不同点位的监测精度与频率需求，支撑后续的控制分析。

3.2 预拱度精细化计算

传统预拱度计算多采用简化的经验参数，难以适配大跨度桥梁复杂的施工条件。根据公式：

$$f_{pre} = \sum_{i=1}^k \Delta f_i$$

其中 f_{pre} 为待计算的预拱度值； Δf_i 为第*i*个施工工序产生的结构变形量，包含挂篮变形、张拉变形、自重变形等分项，*k*为施工工序的总数量。优化后的计算方法针对施工阶段的各类影响因素加入修正项，覆盖混凝土收缩徐变、环境温度效应、挂篮自身沉降等易被忽略的影响因素。详细情况如表1所示。

表1 预拱度分项组成统计表

变形分项	变形量 (mm)	占预拱度比例
挂篮变形	12	15.00%
预应力张拉变形	22	27.50%
结构自重变形	30	37.50%
混凝土收缩徐变变形	12	15.00%
其他施工变形	4	5.00%

不同施工节段的施工时序存在差异，收缩徐变的作用时长各不相同，温度效应的影响也随现场环境的变化存在差异，挂篮的沉降也会随使用次数的增加出现微小的变化^[4]。传统简化计算未考虑这些差异，依托有限元模型对每个施工节段的受力与变形状态进行细化分析，结合节段的施工时序、材料特性、现场环境条件，细化每个节段的预拱度参数，使得预拱度的计算结果能够贴合实际的施工过程，避免传统简化计算带来的偏差，为线形控制提供精准的初始基准。

3.3 线形动态预测修正

传统线形预测多采用施工前的静态计算结果，未考虑施工过程中的实际偏差，难以应对施工阶段的动态变化^[5]。动态修正方法依托前序已完成节段的实测位移数据，实时更新后续节段的线形预测值，每完成一个节段的施工，即依托该节段的实测状态调整控制模型的参数，修正后续节段的预测基准，使得预测结果能够贴合现场的实际施工状态，消解静态预测的滞后性，避免前序施工偏差的持续累积，保障线形控制的动态适配性。

4 施工应力监测数据处理技术

施工应力监测数据处理技术是双控体系中应力状态感知的核心支撑，针对施工阶段复杂的作业环境，围绕应力数据的精准获取与可靠处理，形成适配临时监测需求的完整技术方案，为后续的协同控制提供精准的受力数据支撑^[6]。传统应力监测多采用均匀布设的方案，未考虑施工阶段的应力分布特性，采集的数据难以反映结构的核心受力状态，也未针对施工环境的干扰做针对性处理，导致数据可靠性不足，难以支撑施工控制。

4.1 核心截面传感布设

应力监测点的布设以施工阶段的应力分布特性为核心依据，选取受力集中、对结构状态变化响应敏感的截面布设监测单元。梁体根部截面承受最大的施工弯矩，应力状态的变化直接反映结构的核心受力情况，能够体现结构整体的承载状态，跨中截面是施工阶段变形与受力的核心区域，其应力状态直接反映主梁中部的受力变化，支座位置的应力状态直接体现约束反力的分布，能够反映约束的工作状态，这些截面的应力数据能够为施工控制提供最直接的受力参照^[7]。针对施工阶段的临时监测需求，采用光纤光栅传感器完成布设，适配的安装方式保证传感器与构件形成协同变形，满足施工过程中应力数据的采集需求。

4.2 监测数据降噪补偿

施工阶段的现场作业存在大量干扰因素，原始监测数据易受各类噪声影响，难以直接用于控制分析。针对施工振动带来的高频干扰，采用适配的去噪方法剔除无关的噪声分量。针对环境温度变化对应变数据的干扰，根据公式：

$$\varepsilon_{\sigma} = \varepsilon_m - \alpha \Delta T$$

其中 ε_{σ} 为修正后得到的力学应变，用于计算结构应力；

ϵ_m 为传感器直接测量得到的总应变； α 为被测构件材料的线膨胀系数； ΔT 为监测周期内的温度变化量^[8]。加入温度补偿项修正数据偏差，消解环境因素带来的虚假应变，保证应力监测数据的可靠性，为后续的协同控制提供精准的受力数据支撑。详细情况如表2所示。

表2 应力监测数据修正前后对比表

监测阶段	原始测量应变 ($\mu\epsilon$)	温度补偿后应变 ($\mu\epsilon$)	降噪后力学应变 ($\mu\epsilon$)
挂篮就位后	120	105	102
混凝土浇筑中	210	192	189
混凝土浇筑后	180	168	165
预应力张拉前	150	138	135
预应力张拉后	230	215	212

率、环境监测的采集时序无法自然匹配，两类核心监测数据存在不同源、不同步的问题，难以直接用于协同分析。标准化融合处理针对施工阶段的监测数据特性，将三类数据统一到同一时间坐标系，完成量纲的标准化转换，把异源的监测数据整合为统一的结构化数据集，为后续的协同分析提供统一的数据基础。

5.2 耦合预测模型构建

传统的单项预测模型仅考虑单一指标的变化规律，未融入两类指标的耦合关联，难以适配大跨度桥梁的施工特性。融入力形耦合机制的预测模型，同时纳入线形与应力两类参数，形成双向的修正逻辑^[9]。应力实测数据能够反映结构的实际受力状态，用来修正线形预测的初始参数，消解理论假设与实际施工的偏差，线形的实测偏差能够反映结构几何形态的变化，用来修正应力的预警阈值，适配几何变化带来的内力分布调整，双向的修正逻辑使得预测结果能够同时贴合两类指标的实际状态，提升预测的精准度。

5.3 闭环调整策略设计

传统的施工控制多为开环的静态调整，难以应对施工阶段的动态变化，协同控制体系形成完整的动态调整流程，监测数据完成处理与融合后，进入协同分析环节，依托耦合模型完成状态预测，根据预测结果调整施工参数，完成调整后

5 线形应力协同控制方法

5.1 多源监测数据融合

不同监测设备采集的原始数据存在天然的异质性，位移、应力、环境三类监测数据的采样频率、时间基准、量纲体系均存在差异，位移监测的采样间隔、应力监测的更新频

再依托后续的监测数据验证调整效果，形成完整的循环^[10]。针对两类指标设计联动的预警阈值，单一指标的偏差仅触发常规提醒，两类指标同时出现偏差则触发高级预警，避免单一指标的误判，根据预测结果动态调整施工参数，消解前序偏差的持续累积，保障施工状态始终处于可控范围。

6 工程应用效果验证

6.1 依托工程概况

本次验证选取的工程为大跨度预应力混凝土连续刚构桥，采用悬臂浇筑的分阶段施工工法，该桥的施工周期较长，现场环境复杂，温度与施工荷载的波动较大，施工阶段的误差累积问题突出，传统单指标控制难以满足该工程的高精度控制需求，该工程的施工难点与本文提出的协同控制方法的适用场景高度匹配，能够充分验证技术方案的实际应用效果，因此选取该工程作为实证案例。

6.2 控制效果实测分析

应用前文提出的协同控制方法完成该工程的施工管控后，对施工阶段的实测状态进行分析，线形的预测值与实测值的贴合度较高，二者的偏差处于较小的范围，未出现传统方法中常见的预测偏差持续扩大的问题，应力的理论值与实测值也呈现出较高的一致性，未出现明显的受力异常。详细情况如表3所示。

表3 成桥线形状态偏差对比

监测截面	传统控制方法偏差 (mm)	本文双控方法偏差 (mm)	规范允许偏差 (mm)
梁体根部	12	3	20
1/4 跨截面	15	4	20
跨中截面	18	5	20
3/4 跨截面	14	4	20
梁体端部	11	3	20

对比该工程前期采用传统控制方法的节段，应用协同控制方法后，两类指标的控制精度均出现明显提升，前序施工偏差的累积效应得到有效消解，施工过程中未出现两类指

标同时超标的情况，合龙阶段的状态也满足高精度的作业要求，所有的状态监测均围绕施工阶段展开，未涉及运营期的长期跟踪。

7 结语

研究围绕大跨度桥梁施工阶段的线形与应力双控核心需求,梳理施工阶段的力学作用规律,明确误差传递与力形耦合的内在关联,针对线形监测需求形成关键点位布设、预拱度计算与动态修正的完整技术方案,针对应力监测需求完成核心截面的传感布设与数据降噪补偿处理,整合多源监测信息建立耦合预测模型与闭环调整策略,依托实际工程完成技术效果验证,相关技术能够有效提升施工控制的精度,为同类工程的施工控制提供可参考的技术路径,有效降低施工阶段的控制风险,保障施工过程的结构安全与成桥状态的精准性,适配大跨度桥梁施工的精细化控制需求。

参考文献

- [1] 张雪玲,闫瑞华,任敬磊,等. 超大跨度异型钢连桥动态成型施工关键技术研究与应用[J]. 钢结构(中英文),2022,37(06):45-52.
- [2] 周彦文,李书兵,唐剑. 大跨度钢管混凝土拱桥成拱线形控制技术[J]. 施工技术,2020,49(02):55-60+98.
- [3] 左继军,郭华,段方石,等. 大跨度桥梁施工阶段混凝土应力监测分析[J]. 青海大学学报,2019,37(02):58-65.
- [4] 孙步芹,艾祖斌,侯圣均. 大跨度钢桁架桥梁施工监控技术研究[J]. 城市道桥与防洪,2017,(12):129-133+15.
- [5] 吕上海,潘建芳. 大跨度预应力混凝土连续梁桥施工监控技术[J]. 交通标准化,2014,42(01):86-88.
- [6] 齐林,黄方林,贾承林. 连续刚构桥施工线形和应力的分析与控制[J]. 铁道科学与工程学报,2007,(02):29-33.
- [7] 郑聪霞. 大跨度桥梁施工力学理论及其应用[J]. 山西建筑,2007,(11):295-296.
- [8] 郭荣清,胡永志. 大跨度桥梁施工阶段应力状态和稳定安全度仿真分析技术[J]. 建筑安全,1999,(07):18-20.
- [9] 孙克亮. 大跨度中承式拱桥施工控制技术研究[D]. 合肥工业大学,2021.
- [10] 胡祥坤. 大跨度桥梁施工监控的自适应系统研究[D]. 合肥工业大学,2017.