

基于数字孪生的复杂环境铁路桥梁转体施工风险管控与智能决策探索

陈 龙 王洪泽 安磊基 郭明明

中铁建大桥工程局集团第四工程有限公司 黑龙江哈尔滨 15000

摘要: 复杂环境下铁路桥梁转体施工面临多源、动态风险,传统以人工和经验为主导的风险管理方法难以实现及时有效的应对。本文提出一种基于数字孪生技术的施工风险管控与智能决策方法,通过构建桥梁结构数字孪生模型,实时融合多源监测数据,实现动态风险识别与预测,并结合施工控制模型进行智能决策支持。在某铁路跨线转体桥工程中的应用表明,该方法能够将关键风险事件的提前预警率提高至92%,转体偏差严格控制在设计限值以内,显著提升了施工安全性与管理效率。本研究为复杂环境下铁路桥梁施工提供了数字化、智能化的技术路径,也为类似工程的风险管控与决策支持提供了可推广的解决方案。

关键词: 铁路桥梁; 转体施工; 风险管控; 数字孪生; 智能决策; 动态监测

引言

铁路桥梁转体施工是一种高效、经济的桥梁建造技术,特别适用于跨越既有铁路、公路、城市交通枢纽以及其他复杂环境条件下的桥梁建设。近年来,随着我国基础设施建设的快速发展,转体施工技术不断取得突破,创造了多项世界纪录。例如,重庆市快速路二横线项目成功实现了“五桥同转”,刷新了桥梁集群式转体数量最多、总重量最重的世界纪录;山西大同平城街西延跨铁路桥梁新建工程作为全国首座双向不对称钢混结合斜拉桥,转体重量达25000吨,跨越16条铁路线,刷新了国内两端转体重量极不平衡、转体桥面变化最大、跨越铁路股道数量最多三项纪录。

然而,复杂环境下的铁路桥梁转体施工面临着多源、动态的风险挑战。这些风险主要包括结构风险(如梁体应力超限、支点刚度不足、摩阻力变化)、施工风险(如设备故障、操作失误)、环境风险(如地质条件不确定性、气象变化、交通干扰)以及管理风险(如信息传递滞后、决策失误)等。桥梁自身重量巨大(动辄数千吨乃至上万吨),转体过程中结构受力复杂,环境因素不确定性强,使得施工过程具有高度不确定性。以山东临临高速公路上跨瓦日铁路转体桥为例,其重量达3.9万吨,转体过程中任何微小偏差都可能放大为显著风险。设计规范要求合龙时水平偏差不得超过 $\pm 5\text{ mm}$,竖向高差不得超过 $\pm 3\text{ mm}$,这样的精度要求在如此大吨位的转体桥中属于极高的标准。

传统依赖人工巡检、定期测量和经验决策的风险管

控方式,存在风险识别滞后、应对不及时、主观性强等局限性。在跨越高速铁路或重要道路等复杂场景时,施工窗口期极为有限(如西安秦汉大道上跨陇海铁路立交桥施工窗口期仅为80分钟),进一步增加了精度控制和风险管理的难度。因此,如何实现施工风险的实时识别、精准预测和智能决策,成为制约复杂环境下桥梁转体施工安全与质量的关键问题。

随着信息化和智能化技术的快速发展,数字孪生技术^[1]为桥梁施工风险管理提供了新的解决思路。数字孪生通过构建物理实体的虚拟映射,实现虚实之间的实时交互与协同分析,为施工过程提供全生命周期的数字化管理平台。国内外学者和工程界已在数字孪生技术应用与桥梁工程方面进行了初步探索,但多数研究集中于结构健康监测和后期运维阶段,针对转体施工全过程的动态风险管控与智能决策研究仍相对较少。

基于此,本文提出一种数字孪生驱动的风险管控与智能决策方法,通过多源监测数据融合、动态风险识别及决策优化,实现复杂环境下铁路桥梁转体施工的风险可视化与智能化管控。本研究旨在解决转体施工过程中的风险识别滞后、控制精度不足和决策支持缺乏等关键问题,为提升我国铁路桥梁转体施工的智能化水平提供技术支持和实践参考。

一、数字孪生风险管控系统架构

本文构建的基于数字孪生的铁路桥梁转体施工风险

管控系统,是一个集成了物理空间、虚拟空间和数据交互的综合性智能平台^[2]。系统采用“三模块一平台”的总体架构,包括数字孪生模型构建模块、多源数据融合与风险预测模块、智能决策与控制模块,以及统一的信息化集成平台。这一架构实现了从数据采集、处理、分析到决策执行的全流程闭环管理。系统工作原理是通过部署在物理桥梁上的传感器网络实时采集各类监测数据,通过5G/物联网技术传输至数据处理中心,经过清洗、融合和分析后驱动数字孪生模型更新。虚拟模型中的仿真分析和预测结果通过决策模块生成控制指令,反馈给物理现场的施工设备和人员,实现风险的实时预警和智能控制。这种虚实映射、实时交互的机制,确保了施工过程的高度透明和可控。

数字孪生模型是整个系统的基础和核心^[3],需要准确反映物理桥梁的几何特性、力学特性和状态变化。本文采用BIM+有限元分析+GIS技术集成的方法,构建了多维度、多尺度的数字孪生模型。具体构建过程包括三个阶段:首先,基于Revit软件建立桥梁结构的高精度BIM模型,包括上部结构、下部结构和转体系统,模型精度达到LOD300以上,包含详细的几何信息和材料属性。其次,将BIM模型与施工现场地理信息结合,通过SketchUp软件进行场地建模,融合地形、铁路线路、周边建筑物等环境信息,形成完整的施工场景模型。最后,开发数据接口,将多源监测系统的实时数据接入平台,实现监测数据与BIM模型的动态联动^[4]。模型能够实时反映梁体在转体过程中的姿态变化和应力分布,为风险识别提供基础数据。特别是针对转体施工的关键要素,如支点刚度差异、摩阻力分布和千斤顶推力分配等,模型进行了精细化建模,确保虚拟空间能够准确映射物理空间的真实状态。

复杂环境下的转体施工需要综合多种监测数据,才能全面掌握结构状态和风险情况。本文设计的多源数据融合系统集成全站仪、GNSS、三维激光扫描及环境传感器等多种监测手段,通过加权最小二乘法与卡尔曼滤波进行实时数据融合。全站仪以其高精度和稳定性,能够对桥梁关键控制点进行连续监测,适合反映局部的精细变化;GNSS监测在捕捉整体坐标与大尺度位移趋势方面具有优势,尤其适用于跨度大、转体周期长的桥梁工程;三维激光扫描则能够在特定阶段快速获取高密度点云数据,完整反映桥梁空间线形;环境传感器负责采集风速、温度、振动等参数,为环境风险评估提供数据支

持。数据融合后,系统建立风险指标体系与动态评估算法,针对环境风险、结构风险、施工风险和管理风险四类主要风险,分别设置风险权重和阈值参数。通过历史数据训练和机器学习算法,系统能够实现风险等级的自动判定与趋势预测。风险预测模型采用时间序列分析和神经网络算法,能够提前5-10分钟预测可能出现的风险事件,为干预措施留出充足时间。

智能决策模块是数字孪生系统的“大脑”,负责根据风险预测结果生成施工控制方案。决策模块采用规则库+算法库的双重决策机制,规则库基于专家经验和历史案例构建,算法库则基于优化算法和机器学习模型构建。对于识别出的高风险事件,系统可自动提出干预措施,如调整千斤顶推力分配、优化转体速度、增加支点润滑或暂停施工。决策模块可对不同干预方案进行仿真评估,通过模拟偏差变化和 risk 指数,选择最优方案并通过信息化平台下发施工指令。这一过程形成了“监测-分析-决策-执行-反馈”的完整闭环控制,实现了施工风险的动态管控与智能化决策。系统还配备了应急预案管理功能,针对可能发生的突发情况(如设备故障、天气突变等),预先制定了多套应急响应方案。一旦发生异常情况,系统能够快速调用相应预案,指导现场人员采取有效措施,最大限度降低风险影响。

二、工程应用与验证

本文所述方法在某铁路跨线转体桥工程中得到全面应用与验证。该桥梁是连接两个重要区域的关键节点工程,主跨长128米,总重量约5600吨,需跨越一条高速铁路和城市主干道,施工环境复杂,对精度要求极高。设计规定,在对接闭合时,桥梁水平偏差不得超过 ± 5 mm,竖向高差不得超过 ± 3 mm。数字孪生系统在施工前三个月开始构建,完成了梁体几何、支点刚度、千斤顶布局及摩阻力分布等信息的数字化建模。施工过程中,在桥梁两端和关键控制点布设了4台高精度全站仪,采集频率为5秒/次;在梁端和跨中设置了GNSS监测点,采集频率为1秒/次;在关键转角阶段(30° 、 45° 、 60°)采用三维激光扫描获取点云数据;同时布置了10个环境传感器,实时监测风速、温度和振动参数。所有数据通过5G网络实时传输至施工监控平台,并在数字孪生模型中进行可视化。转体施工选择在夜间铁路运行低谷期的“天窗期”进行,总用时88分钟,顺利完成88度转体。整个过程中,数字孪生系统实时显示梁体姿态、应力变化和 risk 指标,为指挥人员提供了全方位的决策支持。

监测数据显示,转体初期(转角 15° 时),梁端水平偏差1.2毫米,竖向高差1.0毫米,整体状态良好;至 30° 阶段,水平偏差2.3毫米,竖向高差2.5毫米; 45° 阶段,水平偏差3.6毫米,竖向高差接近3.0毫米。数字孪生模型预测若不干预,转角至 60° 时水平偏差将超过5.5毫米,超出设计限值。根据智能决策模块建议,施工方及时调整了千斤顶推力分配,并对支点进行润滑处理,同时将转体速度从每分钟0.02弧度降低至0.015弧度。实施修正措施后,梁端偏差得到了有效控制。当转角达到 60° 时,实测水平偏差为3.2毫米,竖向高差为2.7毫米;最终闭合时,水平偏差为2.8毫米,竖向高差为2.1毫米,全部满足设计要求。在整个转体过程中,数字孪生系统成功提前预警关键风险事件10次,其中9次干预措施有效避免了超限偏差,提前预警率达到92%。这些风险事件包括:3次因风速突变引起的振动异常,2次因温度变化导致的梁体变形,3次因设备液压波动引起的推力偏差,以及2次因摩擦力增大导致的轨迹偏离。

为验证本文方法的优越性,将其与传统依赖人工经验与单一测量手段的控制方式进行了对比分析。传统方法在类似规模工程中的闭合偏差一般为 ± 5 mm左右,而本案例应用数字孪生方法后,闭合偏差被控制在 ± 3 mm以内,精度提升约40%。在风险预警方面,传统方法主要依靠定期巡检和人工判断,预警率通常低于60%,且预警时间提前量不足5分钟;而数字孪生系统将预警率提高至92%,预警时间提前量达到10-15分钟,为干预措施留出了充足时间。在经济性方面,虽然数字孪生系统的初始投入较高(约增加成本15%),但其通过风险预防、工期缩短和资源优化带来的综合效益显著。本工程中,因风险事件减少带来的直接经济损失降低约35%,工期缩短20%,总体成本降低约12%,证明了该方法的经济可行性。

结语

本文将数字孪生技术深度融合于转体施工风险管控的全过程,通过构建虚实映射的数字化模型,集成多源监测数据与动态预测算法,实现了施工风险从被动应对向主动预警的根本性转变。工程应用表明,该方法能将关键风险事件预警率提升至92%,转体精度控制在毫米级(水平偏差 $\leq \pm 3$ mm,竖向高差 $\leq \pm 3$ mm),显著优于传统人工控制方式。系统通过多传感器融合与智能决策闭环,解决了大吨位桥梁转体中的同步性控制、环境干扰补偿和实时调控等难题,为复杂环境下桥梁施工提供了可复制的技术范式。未来研究需进一步优化极端气象条件下的模型鲁棒性,深化人工智能算法在自适应控制中的应用,并推动技术与工程管理的全流程融合,以全面赋能交通基础设施的智能化建造与安全管理。

参考文献

- [1] 罗丹, 黄晓琴, 冷费贤, 等. 数字孪生在交通基础设施智能建造中的应用与挑战[J]. 交通运输工程学报, 2025, 25(03): 33-64. DOI: 10.19818/j.cnki.1671-1637.2025.03.003.
- [2] 郭峰, 李婷, 毛阿立. 基于数字孪生的桥梁深水基础智能安全管控研究[J/OL]. 中外公路, 1-9[2025-09-23]. <https://link.cnki.net/urlid/43.1363.U.20250122.1522.008>.
- [3] 宫志群, 王永志, 廖少明. 基于数字孪生的建设工程项目管理数字化[J]. 土木工程学报, 2024, 57(07): 106-128. DOI: 10.15951/j.tmgcxb.23040317.
- [4] Geng Z, Zhang C, Jiang Y, et al. Integrating multi-source data for life-cycle risk assessment of bridge networks: a system digital twin framework[J]. Journal of Infrastructure Preservation and Resilience, 2025, 6(1): 9.