

公路桥梁隧道工程智能化建设管理要点研究

许超

山东省公路桥梁建设集团有限公司 山东 济南 250014

摘要：公路桥梁隧道工程智能化建设管理是交通基础设施现代化的核心方向。本文系统梳理了智能化建设管理的技术体系与实践路径，聚焦设计、施工、运维全生命周期的智能化应用。通过BIM+GIS集成设计、物联网感知网络、数字孪生模型等关键技术，实现工程状态的实时监测与动态优化；依托智能施工设备、自动化控制算法及大数据分析平台，提升施工效率与质量管控水平；结合AI风险预警系统与智能运维决策支持，构建预防性维护体系，旨在为交通基础设施高质量发展提供可复制的技术范式与管理框架。

关键词：公路；桥梁隧道；智能化建设；管理要点

引言

随着城市化进程加速与交通需求增长，公路桥梁隧道工程规模持续扩大，传统管理模式面临效率低、安全风险高、资源浪费严重等挑战。以5G通信、物联网、人工智能为代表的新一代信息技术，为工程全生命周期管理提供了技术突破口。智能化建设管理通过集成多源数据、构建动态分析模型、实现智能决策与精准控制，成为破解传统管理困境的关键路径。

1 智能化建设管理的理论基础与技术框架

1.1 核心理论支撑

公路桥梁隧道工程智能化建设管理的核心理论体系由精益建造理论、全生命周期管理理论及协同管理理论共同构成，三者从效率优化、系统整合与资源协同三个维度为智能化转型提供理论支撑。（1）精益建造理论源于制造业精益生产理念，其核心在于通过消除非增值活动实现资源高效配置。在工程领域，该理论强调对施工流程的精细化拆解与价值流分析，识别并剔除设计冗余、材料浪费、工序等待等隐性浪费环节。持续改进机制则要求建立反馈闭环，将施工数据、质量缺陷及运维问题反向输入设计阶段，推动设计标准与施工工艺的迭代升级，最终实现工程品质与经济效益的双重提升。

（2）全生命周期管理理论突破传统分段式管理思维，将规划、设计、施工与运维视为不可分割的有机整体。该理论强调以最终运维需求为导向反向驱动前期决策，例如在规划阶段通过仿真模型预测交通流量对桥梁结构的影响，在设计阶段预留智能监测设备安装接口，在施工阶段采集结构响应数据为运维模型提供初始参数^[1]。这种“以终为始”的思维模式确保各阶段目标的一致性，避免因阶段割裂导致的设计返工或运维困难。同时，全生命周期管理要求构建统一的数据底座，将BIM模型、地

质报告、施工记录及运维日志等异构数据整合为可追溯的数字资产，为后续智能化应用提供结构化数据支撑。

（3）协同管理理论聚焦多参与方之间的信息壁垒突破与决策协同优化。公路桥梁隧道工程涉及业主、设计单位、施工单位、监理方及设备供应商等众多主体，传统管理模式下各参与方往往基于局部利益独立决策，导致设计变更频繁、施工冲突频发等问题。协同管理理论通过建立标准化数据接口与共享平台，实现设计图纸、施工进度、质量检测等信息的实时同步，使各参与方能够基于统一数据源进行协同决策。

1.2 智能化技术体系

（1）感知层作为数据采集的前端，通过部署高精度传感器网络实现对工程状态的全方位监测，应力传感器可捕捉结构受力变化，位移传感器能追踪变形趋势，温湿度传感器则监测环境对材料性能的影响，各类传感器通过有线或无线方式组成自组织网络，确保数据采集的实时性与完整性。无人机巡检凭借其灵活性与高空视角，可快速完成大面积表观质量检测，识别裂缝、剥落等缺陷，而机器人作业则通过搭载机械臂或检测模块，深入人工难以到达的区域执行精细化操作，如隧道衬砌厚度检测或桥梁支座维护，两者共同构建起“空天地一体化”的立体感知体系。（2）传输层聚焦数据的高效可靠传递，5G网络凭借其低时延、高带宽特性，支持海量传感器数据的实时回传，而专网通信则通过频段独占与加密传输保障关键数据的安全性^[2]。边缘计算节点的部署将计算能力下沉至现场端，在数据源头完成初步处理与过滤，仅将有效信息上传至云端，既减轻了网络传输压力，又提升了应急响应速度，例如在隧道坍塌预警场景中，边缘节点可快速分析位移数据并触发警报，无需等待云端指令。（3）平台层是智能化技术的中枢，BIM与

GIS的集成实现了工程三维模型与地理空间信息的融合,为设计、施工与运维提供统一的空间基准。数字孪生模型通过持续同步物理实体的状态数据,构建出动态更新的虚拟镜像,支持对工程全生命周期的模拟与分析。AI分析中枢则集成机器学习、深度学习等算法,对多源异构数据进行挖掘与关联分析,提取隐藏的规律与模式,为上层应用提供智能决策支持。(4)应用层直接面向工程管理需求,智能设计优化通过算法自动生成多方案比选,平衡结构安全、施工便利与经济性;施工过程模拟利用数字孪生模型预演施工工序,识别碰撞冲突并优化资源配置;风险预警系统基于AI分析实时评估结构健康状况,提前识别潜在风险并推送处置建议。运维决策支持则整合历史数据与实时监测信息,生成维护计划与资源调度方案,实现从被动维修到主动预防的转变。四层架构环环相扣,共同推动工程管理向智能化、精细化方向演进。

2 公路桥梁隧道工程智能化管理关键要点

2.1 智能规划与设计阶段

公路桥梁隧道工程智能规划与设计阶段以数据驱动与多学科融合为核心,通过集成先进技术实现设计质量的跃升与资源的高效利用。(1)BIM正向设计突破传统二维设计局限,构建包含几何信息与非几何信息的三维模型,支持建筑、结构、机电等多专业在同一平台上并行作业,通过实时同步更新消除信息孤岛,确保各专业设计逻辑的连贯性与协调性^[3]。碰撞检测功能基于模型自动识别管线交叉、空间冲突等设计缺陷,提前修正错误避免施工返工,而工程量自动统计则通过解析模型构件属性,快速生成材料清单与造价估算,为成本控制提供精准依据。(2)地质与结构仿真技术将人工智能与数值模拟深度结合,基于地质勘探数据训练AI地质预测模型,通过机器学习算法分析地层分布规律,生成高精度地质模型,为隧道掘进或桥梁基础设计提供可靠的地质参数。结构受力动态分析则利用有限元方法模拟施工过程与运营期的荷载作用,结合材料本构模型与边界条件变化,预测结构应力应变演化趋势,识别潜在薄弱环节并优化配筋方案,确保结构全生命周期安全性。(3)绿色设计优化聚焦工程的环境友好性与资源可持续性,能耗模拟技术通过建立建筑热工模型,结合当地气候数据与运营场景,计算桥梁遮阳设施或隧道通风系统的能耗需求,优化设备选型与运行策略以降低全生命周期碳排放。材料循环利用方案生成系统则基于材料性能数据库与结构拆解模拟,评估混凝土、钢材等建材的再生利用潜力,提出构件标准化设计与模块化拆分建议,促进施

工废弃物的减量化与资源化。智能规划与设计阶段通过BIM模型的载体作用,将地质仿真、结构分析与绿色优化等模块的数据流贯通,形成“地质-结构-环境”多维度设计闭环,使设计方案在满足功能安全要求的同时,兼顾施工可行性、运维经济性与生态兼容性,为后续智能化施工与运维奠定坚实基础。

2.2 智能施工阶段

公路桥梁隧道工程智能施工阶段以实时感知、精准控制与全程可溯为核心,通过技术融合推动施工管理的范式变革。(1)施工过程动态监控聚焦关键参数的实时捕获与风险预判,桥梁施工中,大跨径梁体线形监测采用高精度全站仪与北斗定位系统,持续跟踪梁体挠度、扭转等变形指标,结合有限元模型反演结构受力状态,为合龙段施工提供精准调整依据。预应力张拉智能控制通过集成压力传感器与电动液压泵站,实现张拉力与伸长量的双控闭环,自动记录并上传施工参数,避免人工操作误差导致的结构安全隐患^[4]。隧道施工中,超前地质预报综合地质雷达、红外探水与TSP超前预报技术,构建前方地质条件的多维感知网络,提前识别断层、溶洞等不良地质体;围岩变形实时预警依托分布式光纤传感与激光测距技术,持续监测洞壁收敛与拱顶沉降,结合机器学习算法预测变形趋势,触发分级预警机制;爆破振动监测则通过部署三向振动传感器,捕捉爆破冲击波对周边环境的影响,动态优化装药参数与起爆顺序,确保施工安全与环境保护的平衡。(2)自动化施工装备的应用显著提升了施工效率与精度,智能架桥机集成视觉识别与路径规划算法,可自动完成梁体吊装、定位与调平,减少人工干预并缩短架设周期。3D打印混凝土技术通过逐层堆积工艺直接成型复杂结构构件,突破传统模具限制,实现异形构件的快速制造。隧道掘进机(TBM)自适应控制系统融合地质信息与设备状态数据,动态调整刀盘转速、推进压力与出渣速度,适应软硬不均地层掘进需求,降低卡机风险并提升掘进效率。(3)质量追溯体系依托物联网与区块链技术构建全流程信任机制,RFID标签附着于钢筋、水泥等原材料,记录生产批次、运输路径与进场时间,区块链分布式账本确保数据不可篡改。混凝土浇筑过程中,无线温度传感器与智能回弹仪实时监测入模温度与强度发展,数据自动上传至质量管理系统,当参数偏离阈值时立即触发预警,指导现场采取保温养护或补强措施,实现从原材料到成品的全程质量管控。

2.3 智能运维阶段

公路桥梁隧道工程智能运维阶段以全生命周期健康

管理为核心,通过多源数据融合与智能算法驱动,实现从被动维修到主动预防的运维模式转型。(1)结构健康监测系统依托高密度传感器网络与物联网技术,对桥梁与隧道的关键指标进行持续跟踪,桥梁监测聚焦索力波动、主梁挠度变化及混凝土裂缝扩展,通过光纤光栅传感器与图像识别技术捕捉结构响应的微小异常,结合结构力学模型反演损伤位置与程度。隧道监测则针对渗漏水、衬砌剥落及收敛变形等典型病害,采用湿度传感器、激光轮廓仪与分布式应变计构建立体感知体系,自动识别渗漏源位置、剥落区域面积及围岩变形速率,为运维决策提供实时数据支撑。(2)预测性维护决策系统基于机器学习算法构建剩余寿命预测模型,通过整合历史监测数据、环境荷载记录与材料性能退化规律,训练出能够预测结构失效时间的神经网络模型,提前识别高风险构件并生成维护优先级清单。运维工单智能派发模块结合地理位置、技能需求与资源可用性,动态匹配最优维修团队与设备,资源调度优化算法则根据工单紧急程度、路径距离与人力负荷,生成最小化响应时间的调度方案,减少非必要等待与重复出勤。(3)应急管理模块聚焦灾害场景下的快速响应能力,地震或洪水发生时,系统自动调用实时监测数据与结构有限元模型,通过快速有限元分析评估结构安全性,识别可能发生坍塌或功能失效的关键区域,为抢险救援提供科学依据^[5]。数字孪生驱动的应急疏散模拟则基于三维模型与人群动力学算法,模拟不同灾害场景下的人员流动路径与拥堵风险点,生成最优疏散路线与避难场所建议,辅助制定应急预案并开展虚拟演练,提升突发事件应对效率与人员安全保障水平。

2.4 智能化管理实施保障体系

(1)组织架构创新方面,通过设立“智能建造中心”打破传统部门壁垒,该中心作为智能化建设的核心枢纽,统筹规划、设计、施工、运维等环节的数据流动与资源整合,确保技术方案与业务需求深度融合。(2)

标准与规范建设是技术互联互通的前提,需制定涵盖设备层、平台层、应用层的全链条标准体系,明确智能化设备的性能参数、接入条件及测试方法,统一数据接口协议与传输格式,确保不同厂商设备与系统的兼容性。

(3)人才培养与团队建设需聚焦复合型能力构建,设计工程知识+信息技术+数据分析的交叉培养路径,通过校企联合课程、实战项目演练等方式,提升从业人员对智能算法、物联网、云计算等技术的理解与应用能力。

(4)安全与隐私保护是智能化管理的底线要求,需构建覆盖工业控制系统全生命周期的网络安全防护体系,通过入侵检测、访问控制、加密传输等技术手段,防范数据泄露、系统瘫痪等风险。

结语

综上所述,公路桥梁隧道工程智能化建设管理是技术革新与管理模式变革的双重实践。未来,随着边缘计算、5G专网、多模态AI等技术的成熟,智能化建设管理将向“全要素感知-多场景协同-自主决策控制”方向演进。建议行业加强核心技术攻关,完善标准体系,培养复合型人才,推动智能化技术与工程管理的深度融合,为构建安全、高效、绿色的现代交通基础设施体系提供坚实保障。

参考文献

- [1]刘文成.公路桥梁隧道工程智能化建设管理要点研究[J].中文科技期刊数据库(全文版)工程技术,2026,(1):132-135.
- [2]彭禹澍.公路桥梁隧道工程项目智能化建设管理措施探究[J].中国科技期刊数据库,工业A,2025,(2):078-081.
- [3]陈俊峰.公路桥梁隧道工程智能化建设管理要点研究[J].运输经理世界,2024,(31):85-87.
- [4]任壬,王健.公路桥梁隧道工程项目智能化建设管理措施探究[J].智能建筑与智慧城市,2024,(4):170-172.
- [5]杨俸.智能化技术在公路桥梁工程中的应用研究[J].中文科技期刊数据库(全文版)工程技术,2025,(2):103-106.