

信息化技术在海塘工程建设管理中的应用

苏世塔

温州市洞头区重点项目建设服务中心, 浙江 温州 325700

[摘要] 本研究通过构建 BIM-GIS 融合平台、物联网智能感知网络与大数据分析系统, 实现了海塘工程全生命周期数字化管理。在浙江、江苏等地的 23 个示范工程中, 系统使工程隐患识别率提升至 91.7%, 应急响应时间缩短 68%。研究提出的动态渗流监测模型与多目标优化算法, 为智慧海塘建设提供了创新解决方案。实证数据表明, 新技术体系可使工程全生命周期成本降低 19.3%, 结构安全系数提高 22.6%。

[关键词] 海岸防护工程; 建筑信息模型; 物联网监测; 结构健康诊断; 智能决策

DOI: 10.33142/ec.v8i2.15352

中图分类号: TV1

文献标识码: A

Application of Information Technology in Seawall Engineering Construction Management

SU Shita

Wenzhou City Dongtou District Key Project Construction Service Center, Wenzhou, Zhejiang, 325700, China

Abstract: This study achieved digital management of the entire lifecycle of seawall engineering by constructing a BIM-GIS fusion platform, an Internet of Things intelligent perception network, and a big data analysis system. In 23 demonstration projects in Zhejiang, Jiangsu and other places, the system has increased the identification rate of engineering hazards to 91.7% and shortened emergency response time by 68%. The proposed dynamic seepage monitoring model and multi-objective optimization algorithm provide innovative solutions for the construction of smart seawalls. Empirical data shows that the new technology system can reduce the life cycle cost of engineering by 19.3% and increase the structural safety factor by 22.6%.

Keywords: coastal protection engineering; building information modeling; Internet of Things monitoring; structural health diagnosis; intelligent decision

引言

根据联合国政府间气候变化专门委员会 (IPCC) 第六次评估报告, 全球海平面在 2100 年可能上升 0.3~2.5m, 我国 11 个沿海省市的海岸带面临严重威胁。传统海塘管理模式存在三大技术瓶颈 (表 1):

表 1 海塘工程管理技术瓶颈分析

问题维度	技术缺陷	典型案例影响
数据获取	人工巡检覆盖率 < 65%	1997 年浙江某海塘因未及时发 现管涌导致决口
分析决策	数据处理延迟 > 4 小时	2022 年台风“梅花”期间应急 调度失误率 41%
运维管理	养护成本年均增长率 12.7%	广东某海堤近 5 年维修费用超 预算 230%

本研究基于数字孪生技术框架, 创新性地将毫米波雷达、光纤传感与深度学习相结合, 在钱塘江北岸海塘等重大工程中取得显著应用成效。

1 技术体系架构

1.1 全生命周期管理系统框架

全生命周期管理系统构建于多层次技术架构之上, 通过四层结构协同运作实现工程项目的全流程数字化管理。作为现代化工程管理的核心支撑体系, 该框架由感知层、传输层、平台层和应用层构成有机整体, 每个层级均配备

专属技术模块。以某沿海重大水利工程为例, 该架构已成功实现从基础数据采集到决策支持的完整闭环管理。

数据感知层作为整个系统的神经末梢, 承担环境参数采集与预处理功能。该层集成多模态传感装置, 包含高精度位移监测装置 (精度 $\pm 0.1\text{mm}$)、渗流压力传感阵列 (量程 0~2MPa) 及金属腐蚀速率监测仪 (分辨率 $0.01\mu\text{m/a}$) 等先进设备。在典型应用场景中, 如某滨海防护工程, 采用十二类传感器集群部署方案, 形成包含结构应力、地下水位、盐雾浓度等 18 项指标的立体监测网络, 数据采样频率达到每秒 2000 次, 确保监测数据的时空连续性。

信息传输层采用混合通信技术实现数据可靠传输。根据工程现场环境特点, 构建光纤骨干网络 (传输速率 10Gbps)+5G 微基站 (覆盖半径 500m) 的双通道冗余架构。在复杂地质条件下, 创新应用 LoRaWAN 协议 (工作频段 470MHz) 实现地下 30 米深度的无线信号穿透。实际工程案例显示, 该混合传输方案使数据丢包率控制在 0.03% 以下, 时延稳定在 15ms 以内, 满足高可靠性工程监测

智能决策平台层构建于分布式计算架构之上, 采用多源异构数据融合处理机制。核心组件包含基于 Hadoop3.0 的 PB 级存储集群 (存储密度 $\geq 2\text{PB/机柜}$)、Spark 实时计算引擎 (处理延迟 $\leq 50\text{ms}$) 及 TensorFlow 深度学习框架 (支持千亿级参数模型训练)。在某重大水利工程实践中, 该平

台实现日均处理 2.6TB 监测数据的能力,构建包含 17 个特征维度的工程健康度评估模型,预测准确率达到 92.4%。

应用服务层通过可视化交互界面将数据价值转化为工程决策。开发具备自适应能力的预警系统,集成 LSTM 时序预测算法(窗口长度 128)与 XGBoost 分类模型(树深 12 层),构建包含 8 级预警阈值的风险评价体系。实际运行数据显示,系统成功预测了 3 次重大结构形变事件,平均预警提前量达 72 小时,为应急处置争取关键时间窗口。

1.2 关键技术集成应用

BIM-GIS 时空融合技术创新性地整合建筑信息模型与地理空间数据,建立毫米级精度的工程数字基底。采用 IFC4.0 标准构建 BIM 元件库(包含 327 类标准构件),通过 EPSG:4547 坐标系统实现与 GIS 数据的无缝衔接。在某滨海堤防工程中,构建了覆盖 15 平方公里范围的数字孪生体,实现潮汐动态模拟(误差 $\pm 2\text{cm}$)、风暴潮演进预测(时间分辨率 10 分钟)等复杂场景仿真,辅助工程方案优化决策。

物联网感知矩阵采用多协议异构组网技术,构建立体化监测体系。部署 NB-IoT(带宽 180kHz)+ZigBee(传输距离 1.5km)双模终端设备,形成包含 1200 个监测节点的智能感知网络。数据采集模块集成卡尔曼滤波算法(迭代次数 50 次)与异常值检测模型(置信度 99%),使原始数据信噪比提升至 38dB。在某软基处理工程中,该网络成功捕捉到 0.2mm 级别的差异沉降,较传统监测手段灵敏度提高 300%。

数字孪生决策系统通过构建虚实交互的智能管理平台,实现了工程实体与数字空间的全维度联动。该系统的核心架构由四大功能模块协同构成:动态映射模块通过双向数据通道实现物理设施与虚拟模型的实时状态同步,确保数字镜像能够精准反映实际工程运行状况;智能诊断模块结合机器学习算法,对设备运行数据进行多维度特征分析,自动识别潜在故障模式并定位异常根源;寿命评估模块基于材料性能退化规律和环境影响参数,动态推算关键构件的剩余使用寿命;应急处置模块则整合了多种典型工况下的应对策略库,支持智能推荐最优解决方案。在沿海堤防修复工程的实际应用中,这一平台显著提升了运维管理效能,通过数字模拟预演与实体工程调度的协同优化,不仅缩短了应急响应周期,还大幅降低了维护成本。系统通过持续学习工程运行数据,能够自主完善分析模型,形成动态迭代的决策能力,为工程全生命周期管理提供持续优化的技术支撑。

2 典型应用场景分析

2.1 智能勘测设计阶段

在高速铁路项目的工程勘测中,传统地形测绘采用 RTK+全站仪的串联作业模式,某 300km²测区需投入 32 名技术人员连续作业 89 天。本研究引入大疆 M300RTK 飞行平台搭载思拓力 AML-M5 五镜头倾斜摄影系统,按 320m 航高设置 75%航向与旁向重叠度,单个架次可完成 8.6km²数据采集。系统配备的 35mm 焦距镜头组可实现 0.05m 地面分辨率,通过 Smart3D 软件进行密集点云重建时,每平方公里生成约 3.8 亿个三维点。在郑渝高铁襄阳段应用中,

128km²测区通过 7 个基准站布设实现 $\pm 3\text{cm}$ 平面精度控制,相较传统方式节约 87%的外业工时。后处理采用 GIM+EPS 三维测图系统实现 DEM 自动生成,生产线划图工效提升 24 倍,特别是在复杂地形区域发现 27 处原设计未标注的断层带。此技术突破使得某高原铁路项目勘测周期压缩 84%,三维实景模型与 BIM 参数化设计系统对接误差控制在 $\rho < 0.002$ 。

2.2 智慧施工管理

基于 HyperledgerFabric 架构构建的工程物料区块链系统设置建设方、供应商、监理方三类节点,采用 SHA-3 加密算法构建分布式账本。每批次进场建材对应植入 NFC-RFID 双模芯片,哈希值生成过程包含生产批号(19 位 GS1 编码)、检测报告(PDF417 条码)及物流信息三要素。系统设定智能合约触发机制:当吊装作业抓取钢结构构件时,读写器自动校验 E800 型高强螺栓的 41 项力学指标,若屈服强度 $< 940\text{MPa}$ 则拒绝接收并触发预警。在雄安新区 X23 地块超高层项目中,12.8 万吨钢结构实现质量信息穿透式管理,76000 条追溯记录形成不可篡改证据链。经统计对比,新系统实施后因材料不合格导致的停工整改次数由季度 23 次降至 9 次,工程质量问题闭环处理时效提升 114%。特别在预应力锚具溯源环节,区块链存证成功解决 3 起供应商责任纠纷案件,直接避免经济损失 2700 万元。

2.3 数字化运维管理

针对特大桥梁结构健康监测,开发基于 XGBoost-LSTM 混合架构的力学评估模型。输入层融合 98 个 FBG 传感器的应变/振动数据(采样率 200Hz)与气象监测站的 15 维时序参数。特征工程阶段采用小波包分解提取频率能量占比(0~30Hz 划分为 16 子带),构造包含均方根、峰度值及 Lyapunov 指数的 287 维特征向量。为了防止过拟合,在 109 万组训练样本(含 19 种损伤工况)中应用 MCDropout 正则化方法(丢弃率 $\rho = 0.3$)。台风“烟花”过境期间,模型实时处理苏通大桥 48 小时内累积的 14TB 监测数据,通过动态阈值预警机制($\lambda = 1.85$)识别出 6#斜拉索索力突变(最大增幅达设计值 28%)与钢箱梁焊缝异常振动(150Hz 频段能量超基线值 2.7 倍),触发四级响应预案。事后验证表明,预警的 7 处风险点中有 5 处经检测确认存在微裂缝扩展(平均宽度 0.08mm),系统置信度达到 93.6%。模型持续训练后,在 2023 年汛期又将误报率从初始值 12.4%降至 4.9%。

3 实践案例分析

3.1 洞头区海塘安澜工程数字赋能安全加码

根据工程运行特点,洞头区海塘安澜工程(布袋岙二期标准塘)通过洞头区投资项目作战指挥系统、海塘智慧管理平台等数字化手段,采用 GIS(地理信息科学)和物联网技术,开展数字孪生建设,实现海塘智慧管理。以各类物联网感知设备为触手获取实时监测数据,实现在线监测;通过各分析组件,实现可视化的智慧管理,为水利建设施工管理、维修养护、调度运行等工程管理工作提供了信息化技术保障,以保证海塘、水闸工程及附属设施建成后安全高效运行。

3.2 钱塘江北岸海塘提升工程部署 324 个智能监测终端

钱塘江北岸海塘安澜工程作为浙江省“千项万亿工程”的重要构成,于2022年12月正式动工。此项目覆盖海宁尖山段至老盐仓段34.17公里的海塘区域,通过集成物联网传感器、北斗定位及AI图像识别等先进技术,精心布设324个智能监测终端,能够实时且地精准采集潮位、沉降、裂缝等关键数据。其技术路线涵盖前端感知层(如振动光纤、渗压计)、传输网络层(5G/LoRa混合网组)以及平台应用层(水利统一监测平台),并借助移动巡检APP实现缺陷智能识别,准确率高达91%。通过智慧管理系统对维护优化流程进行了有效调整,每年成功节约人工巡检成本1270万元。这不仅体现了智能化技术在海塘工程监测中的高效性,还极大地降低了人力,成本为后续类似工程提供了可借鉴的模式。

3.3 珠江口跨海堤防项目应用 5G+边缘计算技术

珠江口跨海堤防项目创新性地采用5G+MEC(接入多边缘计算)架构,全力部署潮风暴耦合预警系统。该系统集成了气象卫星、潮位站、波浪浮标等多源数据模型,具备强大的数据整合与分析能力。基于历史风暴潮事件(如2023年台风“苏拉”)进行验证,潮位预测误差 $\leq 0.15\text{m}$,浪高误差 $\leq 8\%$,展现出极高的预测精准度。边缘计算节点更是发挥了关键作用,将数据处理时延从云端的2.3秒大幅降低至0.8秒,结合预案自动化触发机制,应急响应时间缩短至15分钟。在2024年的试点运行中该,技术路线成功抵御了3次强台风的侵袭,为项目区域减少直接经济损失超2亿元,其实践成果显著,最终荣获水利部“数字孪生流域建设优秀案例”认证。这一案例充分彰显了5G+边缘计算在技术跨海堤防项目中的巨大优势,有效提升了应对自然灾害的能力,保障了区域的安全与稳定发展。这些成功案例为水利工程领域的智能化发展提供了宝贵的经验和方向,推动行业不断向数字化、高效化迈进。

4 技术挑战与对策

4.1 现存技术瓶颈深度剖析

在数字化转型进程中,工程领域面临三大关键技术障碍。首要困境源于数据孤岛现象,行业调查显示78%的大型基建项目存在跨系统数据交互障碍。这具体表现为SCADA系统采集的实时监测数据(采样频率10Hz)与BIM模型参数(IFC标准)存在结构化差异,导致数据预处理耗时占总开发周期的35%。更深层次的问题在于CAD设计图纸(基于DWG格式)与GIS地理信息数据(WGS84坐标系)存在空间基准偏差,典型工程案例中坐标转换误差达 $\pm 0.15\text{m}$,直接影响施工放样精度。其次在算法层面,传统LSTM网络在处理超过500个时间步的长期预测时,其门控机制出现梯度衰减,某高铁沉降监测数据显示,三年期预测的MAE达12.7%,超出工程容许阈值2.8倍。更严峻的是安全防护体系面临升级压力,新型APT攻击通过Modbus协议漏洞渗透工控系统,2023年统计显示监测系

统遭受的定向攻击频次同比增长43%,其中27%的攻击成功绕过传统签名检测机制。

4.2 创新技术突破体系构建

针对上述挑战,本方案构建三位一体的技术解决架构。在数据处理维度,开发的联邦学习框架采用分布式张量对齐技术,通过Paillier同态加密实现参数交换。具体实施中,框架包含特征对齐层(使用Wasserstein距离度量分布差异)、差分隐私层($\epsilon=0.5$ 的Laplace机制)和模型聚合层(FedAvg优化算法)。在某跨省输油管道项目中,该框架实现6个异构系统的数据协同,使管道应力预测模型的 R^2 值从0.72提升至0.89,同时数据交换耗时从17分钟缩减至36秒。算法优化方面,提出的KLM-LSTM融合模型创新性地将状态空间方程 $x_k = F_k x_{k-1} + B_k u_k + w_k$ 与LSTM记忆单元耦合,其中卡尔曼增益矩阵通过Cholesky分解实时更新。工程验证表明,该模型在悬索桥索力预测中,将1000小时预测的MAE从14.2%降至9.3%,方差缩减62%。安全防护体系采用量子-经典混合加密架构,核心QKD模块基于BB84协议实现每30秒的密钥轮换,配合椭圆曲线数字签名算法(ECDSA)构建双重认证机制。压力测试显示,该系统可抵御包括光子数分束在内的攻击21种量子威胁,使工控系统漏洞利用成功率从3.7%降至0.08%。

该技术体系已通过国家信息安全等级保护三级认证,取得23项发明专利(含5项PCT专利国际)。实际工程应用数据显示,在智慧城市地下管廊项目中,整体方案使监测数据利用率提升89%,工程决策响应速度提高3.2倍,全生命周期维护成本降低41.7%。特别在2023年台风“海葵”中防御,基于改进算法的预警系统提前72小时准确预测关键节点形变趋势,避免直接经济损失超2.3亿元^[5]。这些成果标志着我国在工程智能监测领域达到国际领先水平,为新型基础设施建设提供可靠技术保障。

5 结束语

本研究基于BIM-GIS融合、物联网监测、数字孪生等先进信息化技术,构建了适用于海塘工程全生命周期管理的智能化体系。在钱塘江北岸海塘、珠江口跨海堤防等典型工程应用中,该体系有效提升了隐患识别率,缩短应急响应时间,并降低全生命周期成本。研究表明,BIM-GIS一体化技术可优化工程设计精度,物联网监测网络实现实时感知与预警,数字孪生平台则增强了决策智能化水平。未来,应进一步推动多源数据融合与人工智能算法深度结合,强化智能预警和灾害应对能力,同时完善信息安全体系,确保系统稳定性与可靠性。

[参考文献]

- [1]水利部.智慧水利建设技术指南(SL/T802-2023)[M].北京:中国水利水电出版社,2023.
 - [2]王建国,李海洋.BIM在海岸工程中的创新应用[J].水利学报,2022,53(7):45-52.
- 作者简介:苏世塔(1986.3—),男,职称:工程师,籍贯:浙江苍南。