

高土石坝填筑施工质量智能监控技术应用研究

张 婷

新疆兵团水利水电工程集团有限公司 新疆 乌鲁木齐 830011

摘要: 随着水利工程规模不断扩大与智能化技术迅猛发展,高土石坝填筑施工对质量监控的精准度与实时性要求日益严苛。本研究聚焦高土石坝填筑施工质量智能监控技术应用,深入剖析当前监控难题,融合物联网、大数据、人工智能等前沿技术,构建智能监控体系,实现施工过程实时感知、数据精准分析、质量动态预警,为高土石坝填筑施工提供可靠技术支持与质量保障。

关键词: 高土石坝;填筑施工质量;智能监控技术;应用

引言:高土石坝作为水利工程的关键设施,其填筑施工质量关乎工程安全与长久运行。传统监控方式依赖人工,存在效率低、精度差、实时性不足等问题,难以满足现代工程建设需求。在科技飞速发展的当下,物联网、大数据、人工智能等智能技术不断成熟,为高土石坝填筑施工质量控制带来新契机。研究智能监控技术应用,对提升施工质量、保障工程安全意义重大。

1 高土石坝填筑施工质量关键控制要素分析

1.1 材料质量控制

(1) 土石料级配、含水量、压实度等指标的敏感性分析:级配失衡易导致坝体密实度不均,引发后期沉降;含水量偏离最优区间会显著降低压实效果,过干难以压实、过湿易产生孔隙水压力;压实度不足直接影响坝体承载力与抗渗性,各指标波动均会对坝体稳定性产生连锁影响,需精准把控阈值范围。(2) 不合格材料的识别与动态调整策略:采用现场取样检测与智能监测结合方式识别不合格材料,建立材料进场台账;对不合格材料及时清运,根据检测结果动态调整料源配比或改良工艺,确保材料性能符合设计要求。

1.2 施工工艺控制

(1) 分层填筑厚度、碾压遍数、行车速度等参数优化:结合土石料特性与碾压设备性能,通过现场试验确定最优参数,一般分层厚度控制在30-50cm,碾压遍数6-8遍,行车速度2-4km/h,避免参数偏差导致压实不达标。(2) 特殊部位施工的质量控制要点:坝肩需清理边坡杂物并夯实,确保与坝体紧密结合;坝基要彻底处理软弱夹层,采用加密碾压增强承载力;过渡区选用级配良好的骨料,控制颗粒级配渐变,防止渗透变形^[1]。

1.3 环境因素影响

(1) 降雨、温度、风速等对施工质量的干扰机制:降雨易使土石料含水量超标,降低压实效果;低温会导

致土料冻结,影响填筑整体性;大风加速水分蒸发,使表层土料干缩开裂,均会破坏坝体结构稳定性。(2) 实时环境监测与施工窗口期预测:布设气象监测设备实时采集数据,结合历史气象资料建立预测模型,精准预判适宜施工窗口期,降雨、极端温度等恶劣天气时暂停施工,雨后及时检测土料含水量,达标后再复工。

1.4 质量缺陷类型与成因

(1) 常见缺陷的数值模拟分析:借助专业工程模拟软件分析坝体受力与变形情况,不均匀沉降多因材料压实不均或地基处理不当;裂缝源于温度应力或沉降差;渗漏与防渗体缺陷、级配不良相关,为缺陷防控提供数据支撑。(2) 缺陷预防与修复的智能化管理需求:需构建智能监测系统实时追踪坝体状态,结合模拟结果制定预防方案;对已出现缺陷,采用无人机巡检定位,配合智能灌浆等技术修复,实现缺陷全生命周期智能化管控。

2 高土石坝填筑施工质量智能监控技术体系构建

2.1 多源数据采集技术

(1) 物联网传感器网络:构建全域覆盖网络,核心部署压实度传感器、含水量传感器及GPS定位设备。压实度传感器嵌入碾压机械滚筒,实时采集振动频率、振幅等数据;含水量传感器按网格布设于料源区及填筑层,采用TDR技术精准获取土壤含水量;GPS搭载于施工机械,实时追踪设备位置与运行轨迹,为调度优化提供数据支撑。(2) 无人机航拍与三维激光扫描:融合两项技术监测坝体表面平整度与体积变化。无人机按预设航线低空巡航,同步采集影像与点云数据,经点云拼接与三维建模,精准计算填筑层厚度、平整度偏差,对比施工阶段模型实现体积变化定量分析,弥补传统接触式监测局限^[2]。(3) 视频监控与AI图像识别:坝区关键区域布设高清监控,构建AI识别系统。通过深度学习实时分析视频流,监测施工人员安全防护佩戴及违规作业以预警风

险；识别碾压机、洒水车等设备运行状态，实现故障早期发现与处置。

2.2 数据传输与存储技术

(1) 5G/LoRa无线通信技术：采用5G与LoRa双模无线通信架构，保障数据低延迟、高可靠性传输。对于压实度、含水量等实时性要求高的数据，通过5G网络实现毫秒级传输，支撑施工参数的动态调整；对于视频、点云等大容量非实时数据，采用LoRa技术进行低功耗传输，降低网络负载；同时构建通信冗余机制，避免单一网络故障导致的数据丢失。(2) 云端数据库与边缘计算架构：构建“边缘-云端”协同的数据处理与存储体系。边缘节点部署于坝区现场，对传感器实时数据进行预处理，过滤噪声、提取关键特征，降低数据传输量；云端数据库采用分布式存储架构，整合传感器数据、视频数据、三维模型等多类型数据，实现数据的长期归档与管理；通过云端算力开展大数据分析与管理训练，为智能决策提供支撑，同时保障数据的安全性与可追溯性^[3]。

2.3 智能分析与决策技术

(1) 基于机器学习的质量预测模型：采用支持向量机(SVM)、随机森林等机器学习算法，构建坝体施工质量预测模型。以传感器采集的压实度、含水量、碾压参数等为输入变量，以坝体承载力、抗渗性等质量指标为输出变量，通过大量历史施工数据训练优化模型，实现施工质量的提前预测，为施工参数调整提供科学依据。(2) 数字孪生技术：构建坝体施工数字孪生模型，实现施工过程的虚拟仿真与参数反演。基于BIM技术构建三维实体模型，实时映射施工现场的地形地貌、施工机械、填筑进度等状态；将多源监测数据接入孪生模型，通过仿真分析模拟不同施工参数下的坝体变形、应力分布情况，反演最优施工参数组合，指导现场施工。(3) 专家系统与知识图谱：搭建施工质量缺陷诊断专家系统，整合领域专家经验构建知识图谱。系统通过匹配监测数据与知识图谱中的缺陷特征，精准诊断不均匀沉降、裂缝、渗漏等常见缺陷成因，并自动推荐针对性的处置方案；同时支持知识图谱的动态更新，持续提升缺陷诊断的准确性与处置方案的适用性。

2.4 可视化与预警平台

(1) BIM+GIS集成可视化：构建BIM+GIS集成可视化平台，融合坝体BIM模型与坝区地理空间信息(GIS)。平台实现施工进度、质量数据、安全状态的联动展示，可直观呈现坝体各区域的填筑厚度、压实度、缺陷分布等信息；支持三维可视化漫游与数据查询，为管理人员全面掌握施工态势提供直观支撑。(2) 动态预警阈值设

定与多级报警机制：基于工程设计标准、历史质量数据与实时施工工况，动态设定各质量指标的预警阈值。建立“短信+APP+声光”三级报警机制，当监测数据超出阈值时，系统自动触发报警：向管理人员发送短信与APP推送预警信息，现场声光设备同步报警；同时分级界定预警等级，针对一般预警、严重预警制定差异化处置流程，确保隐患及时处置^[4]。

3 高土石坝填筑施工质量智能监控关键技术实现与算法优化

3.1 压实质量实时监测与反馈控制

(1) 连续压实控制(CCC)技术原理与传感器布局优化：CCC技术核心是通过碾压机搭载的传感器实时采集振动响应信号，结合土石料力学特性建立压实状态评价模型，实现压实质量的连续、无破损监测。传感器布局采用“滚筒内置+车身辅助”的优化方案，滚筒内嵌入3组振动传感器保障信号采集的全面性，车身布设姿态传感器校正碾压角度偏差，同时按5m间隔布设地面基准传感器，提升数据校准精度，确保监测覆盖全施工区域。(2) 基于振动频率的压实度反演算法：构建以振动频率、振幅为输入变量，压实度为输出变量的反演模型，引入最小二乘法优化模型参数，提升反演精度。某高土石坝工程案例验证显示，该算法反演误差控制在3%以内，相较于传统抽样检测，效率提升80%以上，可实时为碾压参数调整提供数据支撑，有效避免欠压、过压问题。

3.2 含水量智能调控技术

(1) 土壤含水量在线监测与洒水车自动调度系统：采用时域反射仪(TDR)传感器实现含水量在线实时监测，传感器按网格状布设于料源区及填筑层面，数据实时传输至调度中心。基于监测数据与最优含水量阈值，构建洒水车自动调度系统，通过模糊控制算法规划洒水路径与洒水量，实现含水量的精准、高效调控。(2) 干湿循环对压实效果的影响规律与补偿策略：通过室内试验与现场监测，揭示干湿循环次数、幅度对土石料压实度、抗剪强度的衰减规律。针对不同循环阶段，制定差异化补偿策略：轻度干湿循环采用补压2-3遍的方式强化压实效果，重度循环则结合洒水调控含水量后重新碾压，保障坝体压实质量稳定性。

3.3 施工机械协同优化

(1) 基于路径规划的碾压设备调度算法：融合遗传算法的全局搜索能力与蚁群算法的局部寻优优势，构建碾压设备路径规划模型。以施工效率最大化、碾压重叠率最优为目标，自动生成最优碾压路径，同时动态更新施工区域路况信息，实现设备调度的实时优化。(2) 多

机协同作业冲突检测与避障策略：基于GPS定位与毫米波雷达数据，建立多机协同作业空间模型，通过碰撞检测算法实时判断设备运行轨迹冲突风险。当检测到冲突时，采用优先级调度机制，结合动态避障路径规划，为高优先级设备预留作业空间，低优先级设备自动调整运行轨迹，保障多机协同作业安全高效^[5]。

3.4 质量缺陷智能识别技术

(1) 基于深度学习的裂缝检测模型：采用YOLOv5模型实现裂缝的快速定位，结合U-Net模型提升裂缝边缘分割精度，构建“定位-分割-量化”一体化检测流程。通过大量裂缝样本训练优化模型参数，检测准确率达95%以上，可精准识别宽度0.2mm以上的微小裂缝，满足实时缺陷监测需求。(2) 不均匀沉降的InSAR监测与数据融合方法：采用合成孔径雷达干涉测量(InSAR)技术获取坝体大范围沉降数据，结合无人机航拍三维点云数据，构建多源数据融合模型。通过卡尔曼滤波算法消除监测噪声，提升沉降数据精度，实现坝体不均匀沉降的全域、高精度监测，为沉降隐患预警提供可靠数据支撑。

4 高土石坝填筑施工质量智能监控工程应用案例分析

4.1 案例：新疆头屯河楼庄子水库工程粘土心墙坝工程智能监控实践

(1) 该工程地处新疆头屯河上游中低山区，距昌吉市75km、乌鲁木齐市89km，主体为粘土心墙坝，最大坝高82.6m，坝体填筑总量超500万m³。结合工程地理位置与地质条件，施工面临的核心难点：一是严寒气候导致土料冻融循环频繁，含水量精准调控难度突出；二是坝基地质构造复杂，存在软弱夹层，易引发坝体不均匀沉降风险；三是冬季低温环境严重影响土体压实效果，传统监测手段难以实现施工质量的实时精准管控。(2) 智能监控系统部署方案：传感器布设采用“全域覆盖+重点加密”模式，碾压机搭载压实度与GPS传感器，填筑层按10m网格布设含水量传感器，坝基软弱夹层区域增设沉降传感器；平台采用“边缘计算+云端协同”架构，集成BIM+GIS可视化模块与智能预警系统，实现数据实时处理与联动展示。(3) 实施效果对比：相较于传统施工管

控模式，智能监控系统的应用取得显著成效：压实合格率从89%提升至98.5%，返工率从12%降至2.3%，质量管控精度大幅提升；监测效率提升75%，有效减少人力投入与时间成本；成功规避3次因土料含水量超标引发的质量隐患，从技术层面解决了严寒复杂环境下的施工质量管理难题。

4.2 经验总结与改进方向

(1) 技术适用性分析：该智能监控技术在大规模、复杂地质及极端气候条件下的工程中推广价值显著，对中小型常规土石坝工程，可简化传感器布设方案降低成本，具备较强的场景适配性。(2) 用户反馈与系统迭代优化建议：用户反馈系统低温环境下传感器续航不足、平台数据检索效率待提升。建议迭代方向：研发低温耐候型长续航传感器；优化云端数据库索引结构，增设个性化数据筛选功能，提升系统实用性。

结束语

本文围绕高土石坝填筑施工质量智能监控技术展开探索，通过融合多种前沿智能技术，构建了较为完备的智能监控体系，实现了对施工质量的实时、精准、动态监控。实践表明，该技术可有效提升监控效率与质量管控水平，降低质量风险。然而，智能监控技术仍需持续优化完善，以适应更复杂多变的施工环境。期待未来进一步研究，推动高土石坝建设向更高质量、更智能化方向迈进。

参考文献

- [1]黎明,王天鸿.高土石坝填筑施工质量控制技术研究[J].水利水电技术,2020,51(4):45-50.
- [2]冯阳,李晓燕.高土石坝施工质量管理与监测方法探讨[J].水工建筑工程,2021,38(2):78-83.
- [3]唐文,柳启超.数字化碾压监控系统在土石坝填筑施工中的应用[J].四川水力发电,2023,42(04):145-147.
- [4]朱相鹏,张胜强.土石坝填筑碾压质量GPS自动监控系统运用技术[J].人民黄河,2020,42(S2):181-182.
- [5]倪仕文,彭卫平.土石坝填筑碾压施工质量实时监控系統研究与应用[J].水力发电,2019,45(07):80-84.