数字化大坝技术在土石坝填筑施工中的应用及问题对策

罗　磊　王登攀　王正平　陈明明　刘春雷

中国葛洲坝集团第一工程有限公司　湖北　宜昌　443000

摘　要：土石坝为水利水电工程常用坝型，填筑施工质量直接关乎大坝运行安全与服役年限。传统人工管控模式存在数据采集滞后、质控粗放、溯源困难等问题，无法适配现代大坝高精度标准化施工要求。本文依托物联网、北斗定位、大数据等数字化大坝核心技术，结合工程实际，梳理该技术在土石坝填筑施工应用中的技术适配不足、设备运维薄弱、数据融合不畅、专业人才匮乏等问题，对应提出针对性优化对策，助力提升土石坝填筑施工精细化、数字化管控能力，为水利工程智能施工建设提供参考。

关键词：数字化大坝技术；土石坝；填筑施工；质量管控；智能施工

引言

随着我国水利水电工程建设向高坝、大库、复杂化方向发展，土石坝填筑施工的质量监测、智能化分析与精准化管控，有效弥补传统施工模式的不足。本文结合现阶段土石坝填筑施工标准、精度要求和管控难度持续提升，传统人工主导的施工管理模式弊端逐步凸显。数字化大坝技术作为水利工程智能化建设的核心手段，可实现填筑施工全过程数据化工程实践，系统探究数字化大坝技术的应用逻辑、现存短板与优化路径，助力水利工程施工行业数字化转型落地。

1 数字化大坝技术及土石坝填筑施工概述

数字化大坝技术依托北斗定位、物联网、大数据、BIM及数字孪生等信息技术，构建覆盖大坝施工筹备、现场作业、质量检测、安全管控及竣工验收的全流程智能化管控体系，以数据为核心实现施工可视化、精细化管理，摒弃传统人工经验管控的粗放模式，具备实时、精准、可追溯的应用优势，广泛适用于各类水利坝体工程建设。土石坝填筑是大坝施工的核心工序，主要包含坝料运输、摊铺平整、洒水保湿、分层碾压、质量检测、分层验收等关键环节，施工需严格把控坝料级配、摊铺厚度、碾压参数、土体含水率及压实度等指标，规避坝体沉降、渗漏、变形等隐患。传统人工抽样管控模式数据覆盖有限，易出现漏碾、欠压、超厚摊铺等问题，填筑质量稳定性较差[1]。数字化大坝技术可适配填筑全工序管控需求，全天候自动采集施工核心数据，对比设计标准实现违规施工自动预警，完整留存施工全周期数据档案，有效提升填筑施工合格率，降低返工隐患，缩减人工管控成本，全面提升土石坝施工标准化与智能化建设水平，为大坝长期安全稳定运行筑牢施工基础。

2 数字化大坝技术在土石坝填筑施工应用中存在的问题

2.1 技术适配性不足现场应用受限

目前市面上主流数字化大坝技术系统多为通用化设计，研发阶段侧重标准化工程场景，未充分适配不同地形、不同坝型土石坝的差异化施工特征，现场技术适配性缺陷较为明显。多数山区土石坝施工现场地形起伏大、山体遮挡严重、电磁环境复杂，北斗高精度定位信号容易出现抖动、偏移甚至短时中断，导致坝面摊铺厚度、碾压轨迹、压实频次等核心施工数据采集精度下降，难以满足大坝填筑厘米级的精细化管控标准。不同工程项目的坝料级配、填筑分层厚度、设计压实指标存在明显差异，但通用数字化系统参数固化性较强，自定义调整空间有限，无法精准匹配各类工程的个性化施工质控需求[2]。同时，现场智能传感、定位终端等设备环境适应性有限，在高温暴晒、连续阴雨、施工现场扬尘等恶劣工况下，设备灵敏度下降，易出现数据传输延迟、信息失真、采集漏缺等问题，大幅削弱数字化管控的实际效果，制约智能化技术的落地应用。

2.2 设备运维体系不完善稳定性较差

数字化大坝智能化施工体系高度依赖前端传感设备、北斗定位终端、数据传输模块及云端管控平台，各类设备长期部署于露天施工现场，持续承受荷载振动、粉尘侵蚀、温湿度剧变影响，设备老化、部件损耗、精

度偏移问题频发。多数施工单位重设备采购、轻运维管理，尚未建立规范化、常态化的设备运维管理制度，日常巡检流于形式，故障排查、精度校准工作落实不到位。定位终端、压实度传感器等核心设备长期服役后会出现数据偏差，未及时校准修复会造成采集数据与现场实际工况不符，误导施工管控决策。部分工程沿用老旧硬件设备，硬件性能无法适配新版数字化平台运行要求，频繁出现数据对接失败、系统卡顿、智能预警失灵等故障。加之设备故障维修流程繁琐、专用配件补给滞后，容易造成数字化系统阶段性停运，形成施工管控盲区，影响填筑施工的连续性与质量稳定性。

2.3 数据融合共享程度低管控碎片化

土石坝填筑数字化施工涵盖坝料运输、坝面摊铺、分层碾压、质量检测、安全管控等多个工序，涉及施工、监理、建设、检测多方主体，但当前多数工程数字化系统存在明显的数据壁垒与碎片化管控问题。各施工工序的监测子系统独立运行、单独存储数据，系统之间缺乏互联互通通道，摊铺监测、碾压管控、质量检测数据无法实时共享，造成数据重复采集、信息冗余杂乱，大幅增加现场数据管理工作量。不同厂家的智能设备数据采集标准、编码格式、传输协议不统一，数据整合、筛选、分析难度较大，云端平台无法实现全工序数据联动分析，难以精准追溯施工质量问题的根本成因。施工方与监理方、建设方的数据对接存在滞后性，现场违规施工、参数超标等异常数据无法实时同步监管终端，质量监管多为事后整改，无法实现全过程动态预判与实时管控，导致数字化技术的综合管控效能无法充分发挥。

2.4 专业技术人才储备不足实操能力薄弱

数字化大坝技术属于水利工程与信息技术交叉融合的新型技术，对从业人员的综合专业素养要求较高，既需要掌握土石坝填筑施工工艺，也需具备设备操作、系统运维、数据分析的专业能力。当前施工现场从业人员以传统水利施工人员为主，拥有丰富的现场实操经验，但普遍缺乏数字化智能设备操作与大数据系统运维能力，无法高效完成系统参数调试、数据核查、故障排查等核心工作。高校相关复合型人才培养体系滞后于行业发展，课程设置与施工现场实际需求衔接不足，行业内专业化智能施工人才缺口持续扩大[3]。施工单位日常培训多聚焦传统填筑工艺，针对数字化技术、智能设备的专项培训频次少、内容浅，从业人员技能提升缓慢。长期的人才短板造成数字化设备操作不规范、系统利用率低下，大量智能设备与数字化系统闲置，出现重投入、轻应用的问题，严重浪费工程技术资源。

3 数字化大坝技术应用优化对策

3.1 优化技术适配方案贴合现场施工需求

针对数字化大坝通用系统与土石坝施工现场适配性不足、智能管控精度不稳的突出问题，需立足工程实地工况开展定制化技术优化升级，切实贴合填筑施工实际需求。施工前期技术人员需全面摸排工程场地地形地貌、气候环境、坝体设计参数以及坝料物理特性，结合填筑分层厚度、设计压实标准等核心质控指标，对数字化管控平台的监测阈值、识别精度、预警机制进行针对性调试修改，打破通用系统参数固化的局限，适配不同项目的个性化施工要求。针对山区施工现场山体遮挡、地形起伏复杂导致的北斗定位信号偏移、中断等问题，通过加装信号增益设备、优化空间定位算法、增设边缘点位辅助校准等方式，修正采集数据误差，保障碾压轨迹、摊铺厚度等核心数据达到厘米级管控精度。同时优化前端智能监测设备的硬件适配性能，升级防尘、防水、耐高温、抗电磁干扰结构，有效应对施工现场高温、降雨、扬尘等恶劣工况，降低数据延迟、失真、断连等故障概率。结合土石坝填筑摊铺、碾压、验收各工序质控重点，升级系统智能识别模块，强化超厚摊铺、漏碾欠压、局部碾压不均等常见施工问题的自动筛查与预警能力，切实提升数字化技术与现场施工的适配度，充分发挥智能管控的提质增效作用。

3.2 健全设备运维机制保障系统稳定运行

为解决数字化设备运维不规范、运行稳定性差、系统故障率高的问题，需建立全流程、标准化、常态化的设备运维管理体系，全面保障数字化管控系统持续稳定运行。施工单位需明确技术部门、现场班组、运维人员的岗位职责，细化设备巡检、精度校准、故障维修、设备更新、台账管理等全环节工作流程，杜绝运维责任模糊、管理松散等问题。建立日巡检、周核查、月维保的常态化工作机制，每日对定位终端、传感设备、数据传输模块、云端后台进行全面排查，及时处理线路松动、设备卡顿、数据异常等基础问题；每周对设备运行数据进行汇总分析，排查潜在故障隐患；每月按照行业技术标准开展整机保养与精度校验，彻底解决设备长期使用产生的精度偏移、参数偏差等问题。同步建立完善的设备全生命周期管理台账，详细记录设备安装时间、运行状态、故障处置、维保记录、校准数据，实现设备运维可查、可溯、可管控[4]。定期排查老旧设备性能，及时迭代升级硬件设备与系统版本，保障软硬件适配匹配。搭建现场应急配件储备库，简化故障报修与维修审批流程，缩短设备故障停运时长，彻底规避数字化管控

盲区，保障填筑施工全过程智能监管不中断。

3.3 构建一体化数据体系实现数据共享融合

针对当前土石坝填筑施工数字化系统数据碎片化、壁垒突出、融合利用率低的问题，需搭建统一标准化的数据融合共享平台，实现全工序数据一体化管控与高效利用。结合工程施工管理架构，整合坝料运输、坝面摊铺、分层碾压、质量检测、安全监测等各类独立子系统，统一各终端设备的数据采集标准、编码格式与传输协议，解决不同系统数据不兼容、数据重复采集、信息冗余杂乱等问题，实现施工数据集中存储、统一管理、联动调用。依托大数据分析技术搭建专业化数据研判模型，对填筑施工全过程的碾压速度、碾压遍数、摊铺厚度、土体含水率、压实度等核心数据进行整合分析，精准梳理施工参数与填筑质量的内在关联，快速定位质量缺陷、施工隐患的产生根源，为施工工艺优化提供精准的数据支撑。搭建多级数据共享权限体系，为施工班组、技术部门、监理单位、建设单位配置分级访问权限，实现施工数据实时同步、动态更新，让监管人员可全天候掌握现场施工工况，及时干预违规施工、超标作业等行为。完善数据归档、筛选、溯源、复盘功能，构建完整的施工数字档案，为工程竣工验收、质量评定、后期运维检修提供全面、可靠的数据支撑，形成闭环数字化管控体系。

3.4 强化人才队伍建设提升专业实操水平

为破解数字化施工专业人才短缺、实操能力薄弱、技术落地效果差的难题，需构建系统化、分层化、常态化的人才培养体系，打造适配智能水利施工的复合型专业队伍。施工单位需结合现场施工岗位需求，联动高校、科研院所、数字化设备厂家开展定向人才培育，针对性开设数字化大坝系统操作、智能设备运维、施工数据研判、数字化工艺优化等专项培训课程，补齐从业人员信息技术与智能管控专业短板。推行分层分类培训模式，针对一线操作工人，重点开展智能碾压设备、监测终端的实操教学与基础故障处理培训，保障设备规范操作；针对现场技术人员，重点培训系统参数调试、数据整合分析、施工质量优化等专业技能；针对管理人员，重点强化数字化管控流程、质量监管体系、智能工程管理思维的培养[5]。建立配套的岗位考核与激励机制，将数字化设备操作、系统运维、数据应用能力纳入绩效考核，倒逼从业人员主动提升专业技能。同时加大专业人才引进力度，吸纳水利工程与信息技术交叉型人才，优化现有人才队伍结构，依托专业人才推动数字化技术落地落地落地，切实提升土石坝填筑施工数字化、精细化管控整体水平。

结束语

综上所述，数字化大坝技术推动土石坝填筑施工走向智能与精细，能够改善传统施工质控粗放、数据滞后、溯源困难等问题，保障大坝工程施工质量。当前现场应用仍存在技术适配不足、设备运维薄弱、数据融合不畅、专业人才短缺等短板，影响技术效能发挥。工程实践中要立足现场条件，优化技术方案，完善设备运维机制，打通数据壁垒，培育复合型人才，持续提升数字化大坝技术落地效果，推动水利水电工程智能化建设。

参考文献

[1] 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(4):145-147.

[2] 王梦竹. 土石坝填筑施工技术在小型水库施工中的应用 [J]. 珠江水运,2023,(5):77-79.

[3] 刘刚. 大坝填筑施工技术在水利水电工程中的应用研究 [J]. 数码设计（电子版）,2023,(4):0424-0426.

[4] 祝伟铎. 土石坝填筑质量控制及检测 [J]. 科技风,2020,(17):157-157.

[5] 张林昌. 土石坝坝体填筑施工关键技术探讨 [J]. 中国科技纵横,2023,(18):123-125.