水利水电工程施工技术创新与应用

何秀峰

都昌县城区堤防泵站管护中心　江西　九江　332000

摘　要：传统水利水电施工技术存在效率偏低、精度不足、能耗较高、生态扰动大等诸多短板，难以适配现代化大型复杂工程建设需求。本文立足工程施工现状，从智能化、绿色节能、主体结构、特殊工况四大维度，系统梳理各类新型施工创新技术，结合多项实际工程案例分析应用成效，总结技术落地推广中的成本、人才、体系等问题，并针对性提出标准完善、人才培育、技术推广与迭代升级等优化对策，助力水利工程施工高质量、绿色化、智能化发展。

关键词：水利水电工程；施工技术创新；应用

引言：水利水电工程是我国基础设施建设的核心组成部分，关乎水资源调配、防洪减灾与能源可持续发展。随着工程建设场景日趋复杂，传统施工工艺的局限性持续凸显，不仅制约工程建设质量与效率，还易引发生态破坏、安全管控薄弱等问题。为适配绿色基建与智慧建造发展趋势，破解传统施工痛点，各类新型施工创新技术逐步落地应用。本文结合工程实践，深入探究水利水电施工技术的创新方向、应用价值与现存问题，为行业技术升级提供参考。

1 水利水电工程传统施工技术及现存问题

1.1 传统核心施工技术概述

（1）土石方施工技术：传统开挖采用钻爆法配合推土机、装载机及自卸汽车挖装运卸；填筑遵循测量放线、基底清理、分层铺料、洒水调整、平整碾压流程，以振动碾或羊足碾压实。技术特点为设备组合固定、参数依赖经验，工序衔接紧密，但含水率及粒径控制粗放。（2）混凝土施工技术：传统浇筑以组合钢模或木模立模，混凝土由搅拌站拌制后经溜槽、吊罐或泵送入仓，插入式振捣器逐层振捣，养护以洒水或覆盖草袋为主，防渗依托止水带埋设、界面凿毛及防水涂层。工艺要点聚焦模板精度、振捣时间、温控防裂及施工缝处理，但人工干预较多[1]。（3）基础处理施工技术：传统地基加固包括振冲挤密、强夯置换及换填垫层；防渗墙采用冲击钻或抓斗成槽、泥浆固壁、导管法水下浇筑混凝土；桩基施工含钻孔灌注桩与预制打入桩。技术体系成熟，但设备移动与工序转换耗时较长。

1.2 传统施工技术应用短板

（1）施工效率偏低：开挖钻孔、模板安装、钢筋绑扎及振捣等环节高度依赖人工操作，施工速度受作业人员技能水平及天气条件制约明显，工序交叉时窝工现象常见，难以满足大型复杂工程高强度连续作业的工期需求。（2）施工精度不足：测量放样依赖全站仪配合人工读数，机械操作以驾驶员目测经验为主导，开挖边线、建基面高程控制误差较大，超挖、欠挖现象频发；混凝土配料计量及振捣时长把控不严，易产生裂缝、蜂窝、麻面及冷缝等质量缺陷。（3）资源能耗较高：土石方超填及混凝土超灌导致材料损耗率偏高，老旧设备燃油消耗大、电能利用效率低，养护用水缺乏循环利用机制，综合施工成本管控面临较大压力。

1.3 传统施工适配性与生态问题

（1）复杂工况适配性差：面对高山峡谷陡坡运输、深厚软土地基加固、深水围堰防渗、潮汐河段施工等特殊地形水文条件，传统工艺在设备就位、成槽稳定及混凝土水下灌注等方面局限性显著，难以保证施工质量与进度。（2）生态负面影响显著：大面积开挖扰动地表土层、破坏原生植被群落，基坑排水与混凝土冲洗废水直排导致受纳水体悬浮物浓度升高及 pH 值异常，施工弃渣占压土地且缺乏有效复垦措施，不符合绿色低碳基建发展要求。（3）安全管控难度大：安全风险识别以人工巡查和经验判断为主，对高边坡滑坡、地下洞室坍塌、围堰管涌渗漏等重大危险源的动态监测与预警能力不足，应急物资储备与演练机制不够健全，安全事故防范能力薄弱。

2 水利水电工程核心施工技术创新研究

2.1 智能化施工技术创新

（1）BIM 全流程施工技术：BIM 技术通过构建水利工程全要素三维数字模型，实现设计阶段方案可视化比选与工程量自动统计。临沂双堠水库建成 BIM 施工模

型和全库区 46 平方公里倾斜摄影模型，以 BIM 模型为载体实现工程建设全过程数据的实时汇集与智能分析。引江补汉工程依托 BIM+GIS 深度融合模型，精准还原 28 公里隧洞及周边 5 平方公里三维场景，动态关联施工进度、质量、安全等核心数据。寺桥水库通过 BIM 技术应用，隐患闭环处置率达 98%以上，建设管理效率提升 70%。（2）自动化智能施工技术：智能碾压系统融合北斗高精度定位与多模态感知算法，自主规划路线、调节施工参数、实时监控施工质量。吉林水利研究显示，北斗智能碾压系统可实现搭接区漏压实时预警，压实度合格率提升至 98.1%，不均匀沉降较传统工艺降低 48.6%。TB 水电站开展智能导引、无人碾压等关键技术研究，仅 18 个月碾压混凝土浇筑到顶，年最大上升 126m，刷新碾压混凝土重力坝取芯世界纪录[2]。（3）监测预警智能化技术：物联网传感器部署于边坡、围堰等关键部位，实时采集位移、渗压等数据。中铁水利设计集团研发端边云水利 AI 系统，边缘算力实现风险实时监测与秒级处置，云端算力负责深度研判与算法迭代，智能识别准确率超 90%。引江补汉工程落地“预报 – 预警 – 预演 – 预案”四预体系，针对 TBM 掘进、钻爆施工等关键工序实现围岩变形等风险的智能预判与快速处置。

2.2 绿色节能施工技术创新

（1）低扰动开挖施工技术：定向钻进技术采用高精度导向，在地下深处精准绕开敏感区域，大幅减少地表开挖与植被破坏。陕西佛坪抽水蓄能电站采用定向钻进核心技术，通过数字化手段全过程实时监测钻孔轨迹，贯通偏差仅 10 厘米。黔中水利枢纽首次将定向钻技术应用于输水工程建设，成功替代传统隧洞开挖，较原计划提前 238 天完成 784 米管道铺设。分层精准爆破通过优化孔网参数精确控制爆破范围，分段开挖缩小单次作业面暴露尺度，最大限度减少生态扰动。（2）新型环保材料应用创新：生态混凝土具备多孔透水与植被附着特性，可实现护坡结构防护与生态绿化功能一体化。新型防腐防渗复合材料融合高分子与无机材料优势，提升结构耐久性并降低全生命周期能耗。（3）节水节能施工优化技术：建立施工废水收集、沉淀、过滤循环利用系统。佛坪抽水蓄能电站通过泥浆循环利用、防渗收集处理等绿色施工工艺，最大限度减少工程扰动。配置扬尘抑制与污水处理一体化装置，实现施工污水达标排放[3]。

2.3 主体结构施工技术创新

（1）混凝土施工创新技术：自密实混凝土具有高流动性和抗离析性，无需振捣即可填充复杂模板。智能化养护系统布设温湿度传感器，联动喷淋装置按需自动调节养护参数，有效控制混凝土裂缝。双堎水库应用重力坝混凝土智能温控系统，实现大体积混凝土温度精准管控。（2）防渗工程创新技术：高压喷射防渗墙采用高压旋喷灌浆成墙技术，适用于高渗透性地层快速截渗。塑性混凝土防渗墙通过掺入膨润土降低弹性模量，增强墙体与地基的协调变形能力。复合土工膜防渗采用双缝热熔焊接工艺，提升接缝可靠性与整体防渗效果。（3）模块化施工技术：水工构件在工厂标准化预制后运抵现场组装，大幅缩短现场施工周期。模块化预制构件通过工厂化生产确保强度与精度，现场拼装将工期显著压缩，为水利工程工业化转型提供有益探索。

2.4 应急与特殊工况施工技术创新

（1）深水、高边坡复杂工况施工优化技术：白马航电项目针对 288 米特高边坡，创新采用无排架梯段循环施工技术，依托高支架钻孔、喷砼等专用设备，打破传统“一爆一护”接力模式，实现开挖与支护工序协同推进，系统性取代 90%以上高空人工作业。运用无人机航测与三维激光扫描定期获取坡面形变数据，动态调整施工参数。（2）工程抢险、加固补强新型施工技术：针对管涌、渗漏等险情，采用水下快凝注浆材料配合高压灌浆设备实现渗漏通道快速封堵。结构加固引入碳纤维布粘贴、高强钢丝网聚合物砂浆面层等工艺，在不影响工程正常运行的条件下完成水下修补加固，有效缩短抢险响应时间[4]。（3）滨海腐蚀环境下结构防腐施工创新技术：采用环氧树脂涂层钢筋与复合钢筋阻锈剂构成双重防护体系，降低氯离子侵蚀速率。大体积混凝土掺入矿渣微粉与硅灰，密实微观孔隙结构。外露钢结构应用热喷涂锌铝镁合金联合封闭涂层技术，形成长效牺牲阳极-屏蔽复合防护体系，切实提升滨海强腐蚀环境中的结构耐久性能。

3 水利水电工程创新施工技术工程应用与优化对策

3.1 创新技术工程应用案例分析

（1）智能化施工技术：浙江镜岭水库基于 BIM 构建大坝三维协同设计平台，实现模型动态调整与工程量自动统计；数字孪生平台闭环管理 11 个关键环节。济南太平水库以“BIM+GIS”构建智慧工地，实现进度预测、风险预警与质量溯源一站式管理，效率提升 30%。成都久隆水库主坝无人碾压集成北斗定位与智能调度，实现碾压全过程自动化。（2）绿色施工技术：南水北调引江补汉工程采用环水保智慧监测体系，实时监控扬尘、噪声、水质；配备 FCP 污水处理系统，废水处理后循环利用，处理能力 496 立方米/小时；边坡应用植被生态混凝土技术。黄金峡水利枢纽右坝肩采用同类技术，施工 2

个月坡面植被覆盖率达 70%。（3）模块化与防渗创新技术：鉴江高岭拦河闸采用封导结合基坑防渗技术，有效解决旧闸渗水，节省成本 561.26 万元。大石峡水利枢纽研发“大吨位、长行程液压智能建造机系统”，10 分钟整体顶升模板 1518.8 平方米，较传统作业缩短 4—5 天。

3.2 创新技术应用成效分析

（1）质量成效：智能碾压系统通过北斗定位与物联网传感器实时监控碾压轨迹、速度、遍数和层厚等关键指标。新疆哈密抽水蓄能电站应用智能碾压系统后，大坝压实合格率从 92% 提升至 98%。浙江天台抽水蓄能电站智能筑坝模式质量保证率达 99.5%。模块化模板使面板周边缝施工精度显著提升。（2）效益成效：智能筑坝模式相比传统方式减少人工成本约 50%，工期缩短 10%。哈密抽水蓄能电站智能碾压系统节省补强成本约 30 万元，燃油消耗降低 15%。大石峡水利枢纽智能建造机系统节约工期约 160 天。济南太平水库智慧化管理模式使工程效率提升 30%。（3）生态成效：引江补汉工程实现施工废水循环利用与硬质边坡生态复绿。植被生态混凝土技术使坡面植被覆盖率达 70% 以上。智能碾压系统优化作业流程，有效遏制材料浪费，使施工过程更加高效环保。

3.3 创新技术应用现存问题

（1）技术落地门槛高：BIM 与智能化设备前期投入成本较大，中小型水利工程受资金约束难以承担。新型设备如无人碾压机、智能拌和系统等采购与维护费用较高，限制了技术规模化推广。（2）人员专业能力不足：智能化、数字化技术对施工人员操作技能要求提升，传统施工队伍对新设备、新系统熟练度不足。一线技术人员普遍对数字化工具有畏难情绪，培训体系尚不完善。（3）技术体系不完善：当前水利工程施工信息模型应用缺乏统一标准和规范，导致模型创建、数据共享、协同工作等方面存在诸多问题。不同平台间数据接口互不兼容，跨系统协同机制缺失。部分创新技术标准与政策衔接不畅。

3.4 技术创新推广与优化对策

（1）完善技术标准体系：制定 BIM 交付、GIS 融合应用等统一数据标准，细化智能化施工与绿色施工操作规范及质量验收标准。加快推进“急用先行”标准制修订，建立覆盖设计、施工、运维全生命周期的技术标准框架。（2）强化人才队伍建设：开展智能化、绿色施工技术专项培训，建立“信息技术 + 传统产业”深度融合机制。持续实施卓越水利工程师培养工程，推动校企联合培养复合型人才。（3）优化技术推广模式：大型重点工程率先部署全流程智能建造体系，中小型工程重点推广模块化构件、智能碾压等成熟单项技术。建立创新技术试点示范工程，形成可复制推广的经验模式。（4）推动技术迭代升级：依托工程实践建立“应用—反馈—优化”闭环机制。推进 AI 智能体、数字孪生等前沿技术与水利施工深度融合，构建“顶层设计—技术突破—标准规范—人才支撑”全链条推进路径[5]。

结束语

综上所述，智能化、绿色化、模块化施工技术的创新应用，有效弥补了传统水利水电施工的诸多短板，显著提升了工程建设质量、效益与生态环保水平。但目前创新技术仍存在落地门槛高、专业人才匮乏、标准体系不完善等问题。未来需持续完善行业标准、强化人才建设、优化推广模式、推动技术迭代，加快新型施工技术规模化普及，推动水利水电工程建设迈向高效、绿色、安全、智能的全新发展阶段。

参考文献

[1] 刘耀儒, 侯少康, 程立. 水利工程智能建造进展及关键技术 [J]. 水利水电技术 (中英文),2022,53(10):116-120.

[2] 李庆斌, 马睿, 胡昱. 大坝智能建造研究进展与发展趋势 [J]. 清华大学学报 (自然科学版),2022,62(08):1252-1269.

[3] 王仁超, 张凯, 杨琛. 水利水电工程绿色施工技术创新与工程应用 [J]. 水利学报,2023,54(06):715-724.

[4] 陈述, 聂本武. 水利水电工程施工智能化改造与技术革新研究 [J]. 水力发电学报,2024,43(03):112-120.

[5] 李树民. 水利水电施工技术创新要点与工程实践应用 [J]. 水电水利,2025,9(11):157-158.