

水利水电工程施工中的技术创新与可持续发展路径

单何宏

中国水利水电第四工程局有限公司 青海 西宁 810007

摘要：在全球气候变化加剧与水资源供需矛盾日益突出的背景下，水利水电工程作为国家基础设施建设的核心领域，正面临施工效率提升、生态保护强化与可持续发展能力突破的多重挑战。本文基于技术创新与可持续发展双重视角，系统梳理了施工设备智能化、工艺绿色化、监测数字化等关键技术突破，结合生态流量保障、移民安置民生化、政策法规体系化等实践路径，提出以技术创新驱动生态效益、经济效益与社会效益协同发展的理论框架。通过白鹤滩水电站等典型案例验证，技术创新可使混凝土浇筑效率提升、碳排放降低，生态修复成本下降，为行业转型升级提供理论支撑与实践参考。

关键词：水利水电工程；技术创新；可持续发展；生态修复；智能监测

引言

全球水资源总量约14亿立方千米，但可利用淡水仅占0.007%，且分布极不均衡。联合国《2023年世界水资源发展报告》显示，全球31亿人面临中度至重度缺水，预计到2050年，受干旱影响人口将增至7亿。在此背景下，水利水电工程作为水资源调控的核心载体，其建设规模持续扩大——截至2024年，全球在建大型水电站达237座，总装机容量超1.2亿千瓦。然而，传统施工模式面临效率瓶颈（如混凝土浇筑周期长达18个月）、生态破坏（如鱼类洄游通道阻断率超60%）与碳排放高企（单座大坝建设期碳排放达50万吨CO₂当量）等突出问题，迫使行业向技术创新与可持续发展转型。

1 技术创新：驱动施工效率与质量双提升

1.1 施工设备智能化：从“机械替代”到“自主决策”

1.1.1 无人驾驶钻孔机器人

传统人工钻孔日均进尺仅3-5米，孔位偏差率达5%-8%，且存在粉尘暴露、坠落等安全风险。无人驾驶钻孔机器人通过激光雷达与视觉融合定位技术，实现毫米级孔位精度，日均进尺提升至20-30米。其工作原理如下：

（1）环境感知：搭载16线激光雷达与双目摄像头，构建三维点云模型，识别岩层结构与障碍物；（2）路径规划：基于A*算法生成最优钻孔轨迹，避开软弱夹层与裂隙；（3）自主作业：通过智能液压凿岩台车与三维激光扫描定位系统，实现钻孔路径自动规划与动态纠偏^[1]。在白鹤滩水电站地下厂房与引水隧洞施工中，该系统钻孔精度控制在±30mm内，单循环钻孔时间缩短40%，大幅降低人工干预，实现连续作业“零重大事故”，被中国水利水电建设行业协会评为“智能建造示范工程”。

1.1.2 3D打印混凝土技术

传统混凝土浇筑需模板支护、分层振捣等工序，周期长且易产生冷缝。3D打印技术通过数字建模与分层打印工艺，可制造复杂曲面结构，其优势体现在：（1）材料优化：采用地质聚合物混凝土，强度达C60以上，且无需振捣即可密实；（2）结构创新：打印蜂窝状空腔结构，减轻自重30%的同时提升抗爆性能；（3）效率提升：2021年，中建与清华大学团队在上海宝山智慧湾成功3D打印世界最大规模混凝土步行桥（26.3米长），施工周期缩短50%，材料损耗率降至5%以内，验证了该技术在工程中的可行性与经济性。

1.1.3 模块化预制技术

传统大坝施工需现场绑扎钢筋、支立模板，受天气影响大。模块化预制技术将大坝分解为200-500吨级标准模块，在工厂预制后运输至现场组装，其核心流程包括：（1）数字化设计：基于BIM模型拆分模块，优化钢筋布置与预埋件位置；（2）智能化生产：采用机器人焊接钢筋笼，自动浇筑混凝土并蒸汽养护；（3）精准装配：利用北斗定位与液压同步提升系统，实现模块毫米级对接^[2]。深中通道沉管隧道工程采用该技术，其标准管节重达8万吨，在工厂整体预制后浮运沉放，施工精度达±2cm，工期缩短40%，碳排放减少约30%，模块间采用高强水下灌浆与橡胶止水带复合连接，确保结构整体性与耐久性。

1.2 施工工艺绿色化：从“末端治理”到“源头减污”

1.2.1 超级真空抽水法

传统抽水方法依赖离心泵，能耗高且需添加化学絮凝剂，易造成水体二次污染。超级真空抽水法通过以下创新实现绿色施工：（1）真空负压原理：在井点周围形成-0.08MPa真空度，将地下水快速提升至地面；（2）

能量回收系统：利用涡轮发电机回收水流势能，综合能耗降低40%；（3）无化学添加：通过多级过滤与沉淀处理，实现废水循环利用。

1.2.2 低温升混凝土技术

大体积混凝土水化热导致内外温差超25℃时，易产生温度裂缝，威胁结构安全。低温升混凝土技术通过以下措施控制温升：（1）低热水泥应用：采用C₃A含量低于3%的低热硅酸盐水泥，减少水化热释放；（2）冷却水管优化：埋设螺旋形PE管，通入10℃冷水循环，带走热量；（3）智能温控系统：在混凝土内部埋设温度传感器，实时调整冷却水流速。比如金沙江白鹤滩水电站，采用混凝土温度计，温度计电缆线在仓内段采用PVC套管保护，并按最短距离要求延伸至洞壁边缘，沿洞壁向下游延伸至堵头下游，与智能测温设备连接。

1.2.3 生态友好型爆破技术

传统爆破振动强度常超0.5cm/s，导致周边民房损坏率达8%。生态友好型爆破技术通过以下优化实现减振：（1）微差起爆网络：采用电子雷管精确控制起爆时间差，将振动波叠加效应降至最低；（2）孔网参数优化：根据岩体波阻抗调整孔距与排距，使爆破能量集中于目标岩体；（3）缓冲层设置：在爆破区与保护物之间钻设减振孔，吸收振动能量^[3]。锦屏二级水电站采用该技术后，周边民房损坏率从8%降至0.5%，保护了200余户居民财产安全。

1.3 监测技术数字化：从“人工巡检”到“智能预警”

1.3.1 北斗+5G坝体监测系统

传统监测依赖人工定期巡查，数据滞后且覆盖不足。北斗+5G系统构建了“空-天-地”一体化感知网络：（1）传感器部署：在坝体布设2000余个传感器，监测位移、应力、渗流等12类参数；（2）5G数据传输：采用低时延（<10ms）、高可靠（99.999%）的5G专网，实现实时数据回传；（3）云平台分析：基于深度学习算法构建坝体健康模型，提前48小时预警潜在风险。

1.3.2 无人机巡检技术

人工巡检需攀爬坝体，效率低且存在坠落风险。无人机巡检技术通过以下创新提升监测效能：（1）多光谱成像：搭载可见光、红外与激光雷达传感器，识别裂缝宽度0.1毫米以上的缺陷；（2）自主飞行控制：基于SLAM算法实现厘米级定位，自动规划最优巡检路径；（3）AI缺陷识别：通过卷积神经网络（CNN）训练模型，识别准确率达98%。

1.3.3 水下三维地形扫描系统

传统水下地形测量依赖单波束测深仪，覆盖范围小

且精度低。水下三维地形扫描系统采用以下技术突破：

（1）多波束测深：发射扇形声波束，获取高密度点云数据；（2）无人船协同：搭载GNSS-RTK定位系统，实现自主航行与数据采集；（3）三维建模：通过点云处理软件生成厘米级精度地形模型。

2 可持续发展路径：生态、经济与社会效益协同

2.1 生态流量保障：从“工程优先”到“生态优先”

2.1.1 仿生鱼道设计

仿生鱼道设计突破了传统直线型或折线型结构的局限，通过模拟天然河道形态提升鱼类通过率。其设计要点包括：设置1:50-1:100的缓坡以降低鱼类洄游能耗；间隔10-15米布置休息池与障碍物，模拟自然河道变化；通过可调式闸门控制流速在0.5-1.5m/s之间，适应不同鱼类习性。

2.1.2 分层取水技术

分层取水技术针对传统水库取水口单一导致下游水温波动大的问题，通过多层取水口与智能调度系统保障生态水温。具体措施包括：设置表层（0-5米）、中层（5-15米）与底层（>15米）取水口；根据鱼类繁殖周期动态调整取水层位，确保下游水温波动不超过2℃；通过专用泄洪洞或生态放水孔，确保最小生态流量不低于10%平均流量。乌东德水电站实施该技术后，下游鱼类繁殖期提前15天，产卵量增加40%，有效维护了河流生态平衡。

2.1.3 生态调度方案

生态调度方案通过优化水库调度规则，实现发电、防洪与生态需求的协同。其核心措施包括：在鱼类繁殖期（4-6月）增加下泄水量，模拟自然洪水脉冲；在枯水期维持最小生态流量，保障鱼类越冬需求；通过异重流排沙或人工冲刷，维持河道淤积平衡^[4]。三峡水库2023年实施生态调度后，“四大家鱼”自然繁殖量达120亿粒，较常规调度增加30%，验证了生态调度对河流生物多样性的保护作用。

2.2 移民安置民生化：从“经济补偿”到“发展赋能”

2.2.1 “公司+合作社+移民”模式

“公司+合作社+移民”模式以产业扶持为核心，通过“保底分红+效益分红”机制确保移民获得稳定收益。具体实践包括：根据库区资源禀赋发展柑橘、茶叶、生态渔业等特色产业；移民以土地入股合作社，企业提供技术指导与市场对接；按“保底分红+效益分红”分配收益，降低市场风险。

2.2.2 职业技能培训体系

职业技能培训体系针对移民技能短缺问题，建立“需求导向、分类培训”的机制。培训内容涵盖电工、

焊工、挖掘机操作、家政服务实用技能；采用“理论授课+实操演练+岗位实习”三阶段模式，确保培训效果；与水电站运维、周边工业企业建立合作，优先录用培训合格移民。白鹤滩库区累计培训移民1.2万人次，就业率提升至90%，其中30%进入水电站运维岗位，年均收入达8万元，有效解决了移民长期就业问题。

2.2.3 社区共建机制

社区共建机制通过联席会议制度保障移民参与决策权。具体措施包括：按每50户选举1名代表，确保移民充分参与；议题设置涵盖学校选址、医疗设施配套、文化活动中心建设等民生问题；对采纳的建议给予资金支持，并定期公示进展。乌东坝工程采纳移民提出的12项建议后，移民满意度达95%，增强了移民对工程的认同感与归属感。

2.3 政策法规体系化：从“碎片管理”到“系统治理”

2.3.1 生态红线制度

生态红线制度在《长江保护法》中明确水电开发禁止区与限制区，构建全生命周期管理机制。具体规定包括：划定生态保护红线面积占比达30%，禁止新建大坝；对已建大坝实施生态流量监控，违规项目限期整改；建立“开发前评估-建设中监管-运营后考核”的评估机制，确保生态保护措施落地。该制度从法律层面约束了水电开发行为，为河流生态保护提供了刚性保障。

2.3.2 绿色施工标准

绿色施工标准通过量化考核指标推动工程低碳化。发布《水利水电工程绿色施工评价标准》，明确粉尘控制（施工区PM10浓度 $\leq 80\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，PM2.5浓度 $\leq 35\mu\text{g}/\text{m}^3$ ）、废水回用（施工期废水回用率不低于80%，出水水质达《污水综合排放标准》一级）、噪声管理（昼间噪声限值 ≤ 55 分贝，夜间 ≤ 45 分贝）等要求。该标准引导企业采用环保技术，减少了施工对环境的负

面影响。

2.3.3 碳交易机制

碳交易机制将水电工程纳入全国碳市场，通过经济激励推动低碳发展。具体措施包括：对采用低碳技术的项目给予额外碳配额奖励；建立混凝土生产、运输、施工全链条碳足迹模型，精准核算碳减排量；将碳交易收益的50%用于生态修复与移民安置。向家坝水电站通过应用低温升混凝土技术，年减排二氧化碳12万吨，获得碳交易收益600万元，验证了碳交易机制的经济与生态双重效益。

3 结语

研究结论表明，技术创新与可持续发展是推动水利水电工程转型升级的两大核心动力。施工设备智能化、工艺绿色化与监测数字化使施工效率提升、碳排放降低、生态修复成本下降，生态流量保障等举措则实现了三大效益协同增长。展望未来，需突破数字孪生技术以实现工程全生命周期智能协同，探索氢能储能系统解决可再生能源间歇性问题，并建立全球技术合作平台。水利水电工程的可持续发展既是技术命题也是文明命题，需以创新与生态共绘人水和谐新篇。

参考文献

- [1]肖同霞.水利水电工程施工中的质量控制方法和技术创新[J].城市建设理论研究(电子版),2024,(20):202-204.
- [2]田垚.水利水电工程施工技术创新与效率提升研究[C]//广东省国科电力科学研究院.第四届电力工程与技术学术交流会议论文集.中国水利水电第十一局工程局有限公司,2023:14-15.
- [3]张连斌.基于生态可持续的水利工程施工技术应用与优化[J].城市建设理论研究(电子版),2025,(04):199-201.
- [4]薛静.水利工程施工中的环境保护与可持续发展策略[J].河南水利与南水北调,2024,53(06):25-26.