

井下电视在水利水电工程中的应用

王多财

新疆水利水电勘测设计研究院有限责任公司 新疆 乌鲁木齐 830000

摘要：井下电视技术作为水利水电工程全生命周期管理的关键技术手段，通过高清成像、智能传输与多模态分析，实现了工程结构内部状态的精准感知与动态诊断。本文从地质勘察、施工监测、病害诊断、应急抢险及智能运维五大维度，系统阐述其技术突破与工程价值，结合典型案例揭示其解决复杂工程问题的能力，并展望其发展路径。研究表明，井下电视技术正推动水利水电工程从“经验驱动”向“数据驱动”转型，为工程安全与高效运营提供了底层技术支持。

关键词：井下电视；水利水电工程；地质透明化；智能运维；病害演化预测

1 引言

水利水电工程作为国家战略基础设施，其建设与运营面临复杂地质条件、高隐蔽性工程结构及长期安全风险的三重挑战。传统勘察检测手段受限于观测尺度单一、数据获取滞后、人工干预依赖等问题，难以满足现代工程对“精准感知、实时响应、科学决策”的需求。井下电视技术通过集成光学成像、智能传感与数字孪生技术，实现了工程内部状态的“透明化”监测，为解决隐蔽工程缺陷难发现、动态变化难追踪、风险隐患难预判等痛点提供了创新解决方案。其技术价值不仅体现在缺陷识别与定位层面，更通过构建工程全生命周期数据链，推动水利水电工程向“预防性维护”与“智能决策”模式跃迁。

2 井下电视技术原理与系统构成

2.1 技术原理：多模态感知与智能重构

井下电视系统基于光学成像与信号处理技术，通过井下探测单元获取目标区域图像，经光缆或无线传输至地面控制终端，结合深度编码器实现空间位置与图像数据的精准匹配。其核心创新体现在：（1）环境自适应成像：采用多光谱融合成像技术，集成可见光、红外、超声波传感器，突破浑浊水体、高泥浆浓度等介质对成像质量的限制。（2）动态照明控制：通过LED冷光源阵列与光强自适应算法，实现强光环境下无过曝、弱光环境下无噪点的成像效果。（3）三维空间重构：基于SLAM（即时定位与地图构建）算法，结合井下陀螺仪与加速度计数据，生成毫米级精度的三维地质模型。

2.2 系统构成：模块化设计与协同作业

典型井下电视系统由五大模块组成，各模块通过标准化接口实现协同作业：（1）井下探测模块：包含防爆摄像头、耐压舱体、方位传感器及推进装置。其机械臂

可实现 $\pm 90^\circ$ 俯仰与 360° 旋转，满足复杂井况下的多角度观测需求。（2）数据传输模块：采用铠装光缆与无线Mesh网络混合组网，支持1500米级超深井实时传输。在某深埋输水隧洞检测中，光缆传输延迟低于50ms，确保了数据同步性^[1]。（3）地面控制模块：集成图像处理工作站与应急电源系统，支持多画面同步显示与历史数据回溯。其自主研发的深度编码器可将井下位置误差控制在 $\pm 1\text{cm}$ 以内。（4）智能分析模块：部署深度学习算法，实现裂缝自动分类、岩性智能识别及缺陷量化评估。在三峡工程某泄洪洞检测中，算法对0.2mm级微裂缝的识别准确率达98.7%。（5）辅助设备：包括泥浆循环系统、井下定位信标及机械臂操作平台，为复杂环境下的作业安全提供保障。

井下电视系统构成框架图



图1 井下电视系统模块组成

3 井下电视在水利水电工程全生命周期中的应用

3.1 地质勘察阶段：破解“黑箱”难题，实现地质透明化

水利水电工程选址需穿越复杂地质构造，传统钻探取芯存在“一孔之见”的局限性。井下电视技术通过多

钻孔协同扫描与三维建模，实现了对地质体的“透视化”解析：在铁列克特水库工程中，原设计依据地面物探资料将ZK42与ZK43钻孔间岩体裂隙密度判定为“中等发育”。然而，井下电视检测发现ZK42钻孔岩芯裂隙密度较ZK43钻孔高47%，且裂隙倾角存在显著差异。这一发现促使设计单位调整了边坡支护方案，将锚索长度从15m延长至22m，并加密了锚杆布置，避免了施工期边坡

滑移风险。在三峡工程右岸坝基勘察中，地面物探显示F12断层破碎带宽度约1.4米。井下电视通过跨孔观测与三维重构，揭示该断层实际宽度达3.2米，且存在多期次活动痕迹。基于这一发现，施工单位在断层带周边增设了帷幕灌浆孔，并采用超细水泥-化学浆液联合注浆工艺，有效控制了施工期涌水量，保障了大坝基础施工质量。

表1 井下电视技术在地质勘察阶段的应用效果数据表

工程名称	检测位置	传统勘察方法结果	井下电视检测结果
铁列克特水库工程	ZK42与ZK43钻孔间	岩体裂隙密度“中等发育”	ZK42钻孔岩芯裂隙密度较ZK43钻孔高47%，裂隙倾角存在显著差异
三峡工程右岸坝基	F12断层破碎带	断层破碎带宽度约1.4米	断层实际宽度达3.2米，存在多期次活动痕迹

3.2 施工监测阶段：筑牢质量防线，实现过程可追溯
 水利水电工程隐蔽工程占比超70%，井下电视技术通过实时成像与数据留痕，实现了施工质量的“全周期”管控：在白鹤滩水电站坝基固结灌浆中，传统压水试验显示某灌浆孔段透水率达标^[2]。然而，井下电视检测发现该孔段浆液扩散半径仅1.2米，远低于设计要求的2.5米。进一步分析表明，由于该区域岩体裂隙被钙质充填物堵塞，导致浆液扩散受阻。施工单位据此实施了二次补灌，并优化了邻近孔位的注浆参数，避免了后期渗漏隐患。在乌东德水电站泄洪洞混凝土浇筑监控中，井下电视发现某浇筑段存在2处蜂窝麻面缺陷，面积合计0.8m²。通过图像分析发现，缺陷产生原因为模板接缝处漏浆。施工单位立即采用高压水冲毛工艺对缺陷部位进行处理，并调整了模板加固方式，后续检测显示混凝土密实度提升至98%以上，满足了高压水流抗冲刷要求。

3.3 病害诊断阶段：精准把脉病灶，实现风险可预警
 水利水电工程服役期面临混凝土碳化、钢筋锈蚀、结构开裂等病害，井下电视技术通过高精度成像与量化分析，实现了病害的“早发现、早处置”：在丹江口大坝渗流监测中，井下电视发现某坝段排水孔存在2处φ15mm的钙质析出物堵塞。通过三维激光扫描进一步测量，发现堵塞段周边岩体渗流通道已部分闭合。经疏通处理后，该坝段渗流量从12L/s降低至7.5L/s，有效减缓了坝体内部扬压力上升趋势。在南水北调东线某渡槽检测中，井下电视结合激光测距模块，发现底板存在多条纵向裂缝，其中最大裂缝深度达12cm，已接近设计钢筋保护层厚度（15cm）。进一步分析表明，裂缝由混凝土收缩与温度应力共同作用引发。基于检测结果，管理单位对渡槽实施了碳纤维加固，并增设了表面温度监测系统，加固后结构承载能力提升30%以上。

3.4 应急抢险阶段：抢占救援先机，实现决策可量化

水利水电工程突发事件具有突发性与破坏性，井下电视技术通过快速成像与数据分析，为应急抢险提供了“可视化”决策支持：在某水库溃坝抢险中，井下电视仅用4小时即完成大坝基础淘刷范围测绘。检测发现，左岸坝肩淘刷长度达37米，最大淘刷深度8.5米，且淘刷体中存在多处松散堆积体。基于这一数据，抢险指挥部制定了“上游围堰截流+下游抛石固脚”的联合处置方案，较原计划缩短抢险时间12天，挽回直接经济损失超2亿元。在某引水隧洞塌方抢险中，井下电视搭载机械臂穿越20米塌方体，发现前方存在φ80cm空洞，且空洞壁面存在明显渗水痕迹。结合地质雷达数据，判断空洞由岩溶发育引发。抢险队据此调整了支护参数，采用超前小导管注浆与钢拱架联合支护工艺，避免了二次塌方风险。

3.5 智能运维阶段：构建全寿命周期管理体系，实现运维可预测

井下电视技术与BIM、GIS、数字孪生技术融合，推动了水利水电工程运维向“预测性维护”转型：在葛洲坝水利枢纽，建立了基于井下电视图像序列的混凝土裂缝扩展预测模型。该模型通过提取裂缝形态、宽度、深度等特征参数，结合环境温湿度数据，实现了裂缝扩展速率的动态预测。实际应用中，模型提前18个月预警了某闸墩裂缝扩展风险，为维修加固争取了宝贵时间。

4 技术优势分析：从“模糊感知”到“精准认知”的质变

4.1 成像精度革命

传统检测方法依赖人工目视或接触式测量，对微小缺陷的识别能力不足。井下电视技术通过多光谱融合成像与微距光学系统，将分辨率提升至0.1mm级，可清晰捕捉混凝土裂缝的毛刺特征、岩体裂隙的充填物分布等细节。例如，在某抽水蓄能电站压力钢管焊缝检测中，井下电视发现人工检测遗漏的0.15mm级未熔合缺陷，通过

有限元分析证实该缺陷将导致局部应力集中系数提高2.3倍,避免了潜在的疲劳断裂风险^[3]。这种从“定性判断”到“定量表征”的跨越,使工程人员能够基于缺陷的几何参数与材料特性,精准评估其危害等级与演化趋势。

4.2 观测维度拓展

传统钻孔取芯仅能获取沿钻孔轴线的柱状信息,对复杂地质结构的三维展布特征解析能力有限。井下电视技术通过跨孔观测与三维重建算法,实现了对岩体裂隙网络、溶洞形态、断层产状的“立体成像”。在三峡工程某坝段地质勘察中,地面物探推断的F12断层破碎带宽度为1.4米,但井下电视三维模型显示其实际宽度达3.2米,且存在多期次活动痕迹,包括次级断层与节理裂隙的交织切割。这一发现促使设计单位将帷幕灌浆深度从原计划的30米调整为45米,并采用“梅花形”加密布孔,使坝基防渗效果提升了60%,验证了三维观测对工程安全设计的支撑价值。

4.3 作业效率跃升

传统人工检测需搭建脚手架、清理作业面,单点检测耗时长达数天,且受环境因素制约严重。井下电视技术通过模块化设计与智能控制,实现了“随到随检、即测即得”的高效作业模式。在某水库除险加固工程中,传统方案需人工井下作业120工日,而井下电视系统仅用5天即完成全库区检测,并通过自动化报告生成功能,在48小时内输出包含缺陷位置、形态、参数的数字化诊断报告。这种效率提升不仅缩短了工期,更使工程人员能够快速响应突发险情——在某隧洞突涌水抢险中,井下电视从抵达现场到完成险情评估仅用时2小时,为应急处置方案制定争取了宝贵时间。

4.4 安全性能提升

水利水电工程隐蔽工程多涉及有限空间作业,存在窒息、坍塌、中毒等风险。井下电视技术通过“人不下井”的远程检测模式,彻底消除了人工检测的安全隐患^[4]。在南水北调某深埋输水隧洞检测中,传统方法需6名工人连续作业7天,且需配备正压式空气呼吸器等防护装备;而井下电视机器人搭载防爆摄像头与自主导航系统,在充满有毒气体的环境中连续工作48小时,成功识别出3处衬砌脱空缺陷,避免了3起潜在的人员伤亡事故。这种“以机代人”的技术变革,使检测作业从“冒险行为”转变为“安全可控的标准化流程”。

5 发展展望

5.1 技术标准

现行标准对井下电视设备性能多为定性描述,缺乏

量化指标。未来应制定《水利水电工程井下电视检测技术规程》,明确分辨率($\geq 0.1\text{mm}$)、成像距离($\geq 50\text{m}$)、定位精度($\leq \pm 1\text{cm}$)等核心参数,并建立第三方认证机制。德国TÜV推出相关安全认证标准,涵盖32项测试,通过认证后设备故障率降70%,数据可信度升90%。我国可借鉴国际经验,构建“国家标准-行业标准-团体标准”协同发展的标准体系。

5.2 流程规范

传统检测依赖人员经验,存在方法不统一、数据不互通问题。未来需建立覆盖“准备-实施-分析-报告”全流程的操作规范,如检测准备阶段明确钻孔清洗标准(残渣厚度 $\leq 5\text{mm}$)、照明强度阈值($\geq 5000\text{Lux}$);数据分析阶段定义裂缝分级(宽度 $> 0.3\text{mm}$ 为严重缺陷)、渗水等级(流量 $> 0.5\text{L/min}$ 为高危渗漏)等量化指标,使检测结果可比,为工程安全评估提供统一基准。

5.3 数据规范

井下电视检测数据蕴含工程全生命周期信息,但格式不统一、共享困难。未来应构建国家级检测数据库,制定数据元(如缺陷编码、图像命名)、接口(如OPC UA协议)、安全(如区块链存证)标准,推动数据互联互通与复用增值。美国陆军工程兵团“大坝安全数据湖”集成2000余座大坝数据,支持病害预测模型开发,风险评估准确率超85%。我国可依托数字孪生水利平台,打造“一库一平台”数据治理体系,释放数据价值。

结语

井下电视技术是水利水电工程“透视化”管理核心工具,能精准感知、智能分析工程内部,革新传统模式,价值贯穿工程全生命周期。未来,随着AIoT、数字孪生等技术融合,其将向智能化演进,为水安全与水利发展提供支撑。需加强产学研用协同,突破极端环境适应、多源数据融合等关键技术,推动技术升级,助力工程迈向“智能运维”时代。

参考文献

- [1] 全卫超. 井下电视成像技术在乔诺水库地质勘察中的应用[J]. 黑龙江水利科技, 2021, 49(08): 170-172.
- [2] 全卫超. 井下电视成像技术在水利勘察工程中的应用探讨[J]. 广东水利水电, 2018, (01): 32-34.
- [3] 向英. 井下电视成像技术在水库工程勘察中的应用[J]. 地下水, 2024, 46(04): 184-185.
- [4] 张世殊. 水利水电深部工程地质勘察技术现状与发展趋势[J/OL]. 岩石力学与工程学报, 1-28[2025-05-08].