

# 水利工程安全检测标准体系研究

隋峰, 刘志浩, 丁悦璐\*

(山东汇科检测技术服务有限公司, 山东 东营 257091)

**摘要** 为了提高水利工程运行安全管理水平, 本文以某大型水库安全检测项目为例, 通过分析水利工程安全检测标准体系构建及关键技术应用要点, 剖析无人机载智能化快速巡检、水下综合一体化检测以及水下地层精细检测等方法, 提出系统标准建设配技术应用的实施措施。研究表明, 构建健全的安全检测标准体系, 采用先进检测技术, 可切实提升水利工程运行安全性能和管理效率, 为相关工程提供参考。

**关键词** 水利工程; 安全检测; 标准体系; 风险预警

**中图分类号**: TV5

**文献标志码**: A

**DOI**: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.11.034

## 0 引言

水利工程是承担防洪、灌溉及供水功能的关键基建项目, 其安全运行直接关系到经济发展和人民生命财产安全。工程规模逐步扩大, 运行环境愈发复杂, 人工巡检结合单一检测的传统模式, 已无法契合现代水利工程安全管理的需求。为提高检测效率和精准度, 构建科学、系统的水利工程安全检测标准体系十分关键。以某大型水库项目为研究样本, 借助无人机智能巡检、水下综合检测及地层精细检测等关键技术, 研究水利工程安全检测标准体系的构建与运用, 为强化工程运行安全效能提供理论参考。

## 1 水利工程安全检测标准体系的重要意义

防洪、供水、灌溉及水资源调控都离不开水利工程这一重要基础设施, 其运行安全直接关系到区域经济发展、社会稳定和人民生命财产安全。水利工程规模不断扩大, 运行环境愈发复杂, 传统人工巡检加经验式管理模式面临诸多挑战, 如检测效率低、数据缺乏体系、风险预警滞后等问题。构建科学健全的水利工程安全检测标准体系意义重大。标准体系可统一检测规范, 规范检测环节, 划定检测指标、方法和技术要求, 能让各类水利工程的安全巡检、数据采集及分析等环节遵循统一标准, 提升检测工作的科学属性与可比水平, 降低操作不统一引发的安全风险<sup>[1]</sup>。其次, 标准体系可促进先进技术应用和整合, 无人机巡检、水下综合检测及地层精细检测等新技术不断发展, 标准化体系为推广这些技术提供规范依据, 推动先进设

备和方法实现系统化落地, 进一步强化工程检测效率和精度, 完成快速、全面、精细化安全评估。此外, 标准体系对风险预警和决策支持有推动作用, 建立统一的检测数据采集、处理及分析标准, 可构建完善数据库和风险评价模型, 对潜在安全隐患做早期识别与科学预警, 给管理部门制定维护、加固或应急方案提供凭据, 降低事故发生概率。

某大型水库位于我国南方地区, 主要履行防洪调蓄、农业灌溉及城市供水等数项任务, 库区设施有混凝土重力坝、输水隧洞、溢洪道及多条主、次级输水渠道, 累计运行 25 年; 例行巡检发现坝体局部存在渗水现象, 输水隧洞结构出现轻微裂缝变形, 部分输水渠道衬砌有明显破损, 需实施系统化安全检测和维护行动, 维持工程长期安全稳定运行。

## 2 水利工程运行安全检测关键技术分析

### 2.1 无人机载智能化快速安全巡检技术

在大型水库安全管理中, 常规的人工巡查方式弊端在于工作强度繁重, 巡查速度较慢, 对于隐蔽部位以及险要之处无法进行探测等缺陷; 为了提高巡查的速度和准确性, 使用固定翼无人机与多旋翼无人机结合的自动化巡查, 制定出“大规模快速勘探——重点部位精确探测”的工作流程, 固定翼无人机的主要工作任务是对库区以及上下游的大规模巡查, 搭载有高像素可见光学镜头以及红外热成像装置, 可以采集到库区大坝以及溢洪道和输水道的大尺寸图像。同时, 设定飞行高度为 250 m, 单次巡查面积可达约 120 km<sup>2</sup>

**作者简介**: 隋峰 (199-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 水利工程。

**\*通信作者**: 丁悦璐 (1993-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 水利工程。E-mail: 609858341@qq.com

左右,获取的数据分辨率达到12 cm,能够迅速发现大坝裂缝漏水、渠道堵塞以及植被异常问题,为后期的精查预警发出提示;多旋翼无人机能够对重要结构进行近距离详细勘查,搭载有高精度LiDAR设备、多光谱相机以及高解析度可见光学镜头,飞行高度限制为40~60 m范围内,可实现对混凝土重力坝体、输水隧道以及主干输水道的精细化点云建模<sup>[2]</sup>。

同时,LiDAR点云密度最大达1 500点/m<sup>2</sup>,多光谱信息可以用来研究大坝体表面湿润程度、裂缝宽度及衬砌老化情况,依托三维建模和多光谱分析,能够精准捕捉到大坝局部漏水的风险、隧道微弱变动及衬砌破坏的情况等;数据分析上,利用无人机航拍影像无缝拼接、点云建模以及AI图像智能识别软件,对巡视信息进行迅速地解析并转化为可视化图像,同时还能自动生成大坝体健康指标、结构偏移程度与渗漏部位分布图供决策者参考,降低人工巡视的安全隐患,大幅提高了巡视速度与精度。精确锁定库区大坝体出现漏水的地方与输水道的损坏部分,测算出细微的隧道变化,为后期维护加固提供参考<sup>[3]</sup>。具体流程如图1所示。

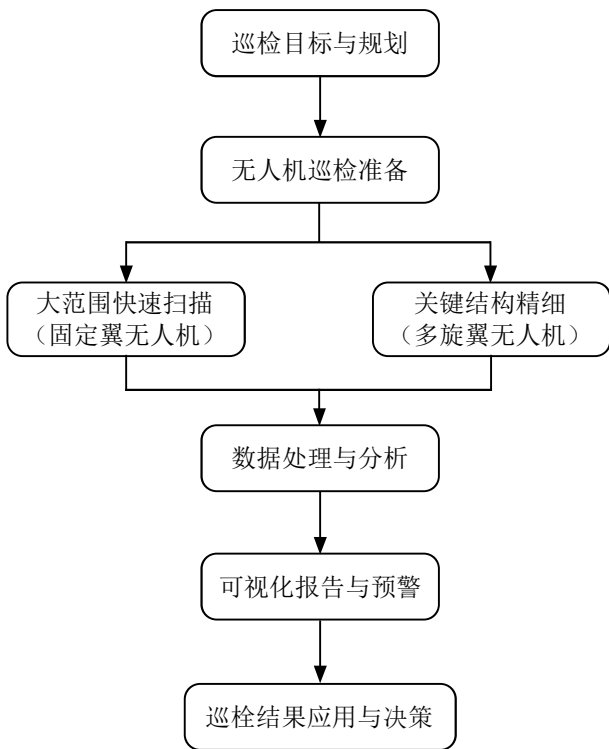


图1 水库无人机智能化巡检流程图

## 2.2 水下综合一体化安全检测技术

水库引水隧洞、大坝下游和下水渠道的安全状况是整个水利工程建设是否稳定的关键。光衰减、散射

和悬浮粒子经常影响水下光学成像,导致对比度较低、细节损失等严重阻碍了现有的基于传统的视觉检查的应用;为了克服这些问题,本工程采用水下一体化综合安全检测技术,该技术结合了高清晰度光学摄像、多频段声纳扫描和时空间重建的图像重构技术,对水下的结构进行精确的探测。

聚焦光学图像退化问题,采用时空信息联合建模的水下图像复原技术(见表1)。首先,把采集的降质图像切分成三种规格的图像块,创建多尺度对比度编码图像,并制作两类增强图像:一类突出细节内容,主打裂缝、剥蚀及衬砌破损检测;另一类暗度消除,实现整体亮度恢复<sup>[4]</sup>。采用多尺度融合算法,把增强图像与原始图像合并,同步保留水下结构的纹理信息和亮度信息,单帧图像分辨率达0.5 mm/pixel,图像对比度提升35%左右,可契合微小裂缝检测需求,处理悬浮物干扰,建立时空显著性模型,解析视频序列不同帧的像素特征,自动检测不同形态(圆形、纤维状)、不同大小(直径1~50 mm)的悬浮颗粒。其次,依托视频帧冗余特性,高保真修复被遮挡的区域,实现图像连续特性和空间一致特性,水下多波段声纳系统(频率500~1 200 kHz)和光学成像联动作业,可生成三维点云,点云密度最高1 000点/m<sup>2</sup>,为隧洞拱顶、坝体底板及渠道衬砌打造精准模型。该技术整合自动化定位和导航功能,无需人工安放标定点,无人水下航行器,可实现±2 cm的定位精度,给结构缺陷检测可靠空间参照,数据处理平台可同步处理60 fps的图像视频流,实现水下结构的连续监测与精细建模,给水利工程安全检测提供完整的技术支撑。

## 2.3 水下地层精细安全检测技术

水利工程水下的地层稳定状态关系到工程中坝基的安全和水库后期使用可靠与否;在应对地质基础土质较杂、水中的沉降物质厚度起伏较大、传统的地质钻探难以了解清楚的问题上,该工程采用了水下地层精确安全探测技术来对水中地基和沉降层进行精确探测研究,核心技术即声测、亚底界反射地震成像以及水下电磁法三种探测技术的应用<sup>[5]</sup>。首先,水下声探测仪(频率范围:3~15 kHz)用于测量地层厚度和软硬土层次界线,可以探测大约15 km<sup>2</sup>的库床,垂直分辨率可达0.05 m,水平探测间距为0.5 m,能够较为准确地反映大坝底部和输水渠道沿线的沉降物质分布情况,基于多个反射波的研究,可以量化地层的厚度,水分含量以及孔隙度等参数,取得沉降层最大可达12 m厚的空间分布情况信息。其次,亚底部反射地震利用

表 1 水下综合一体化安全检测技术参数

技术模块	设备与方法	核心参数	功能与应用
光学图像复原	多尺度图像块建模	图像块尺寸: 5×5 cm <sup>2</sup> 、10×10 cm <sup>2</sup> 、20×20 cm <sup>2</sup> ; 单帧分辨率: 0.5 mm/pixel	提升图像对比度与细节保留
悬浮物检测	时一空显著性模型	检测颗粒形态: 圆形 / 纤维状; 颗粒直径: 1 ~ 50 mm	自动识别水体悬浮物, 修复遮挡区域
三维建模	多波段水下声呐 + 光学相机	声呐频率: 500 ~ 1 200 kHz; 点云密度: 1 000 点 / m <sup>2</sup>	精细建模隧洞拱顶、坝体底板及渠道衬砌
定位与导航	AUV+INS+USBL	定位精度: ±2 cm; 视频流处理: 60 fps	实现水下结构连续监控与高精度空间定位

高频 (200 ~ 500 Hz) 震源和多个水下检波器, 通过普通的时间—深度转换法可获得水下地层结构三维切片图像, 垂直方向上的探测精度可达 0.02 m, 水平方向精度约为 0.3 m, 可以探测到断层面、松散层以及一些小规模坍塌区域, 从而为地基加固设计提供参考。探测过程中发现坝基地表下有 0.8 ~ 1.5 m 的高压淤泥夹层, 输水隧道下部分砂层的孔隙率为 32%, 为风险预警和维护提供了相关信息; 使用频率 50 ~ 200 Hz 的水下电磁感应仪测试不同的地层之间的导电性能差异, 与声学数据以及反射地震数据进行多元数据分析整合, 可精准评定地层含水量、渗透性及孔隙结构。

此外, 纵向探测精度达 0.1 m, 5 m<sup>2</sup> 空间分辨率, 有助于发现潜在的液化区和流砂层。在数据处理方面, 借助三维建模软件融合声波、地震及电磁数据, 生成高精度地层模型, 完成坝基及渠道底部地层可视化分析, 为后续地基加固、沉积物清理及结构优化提供科学支撑。该技术能连续、高精度监测水下地层, 给水利工程安全运行奠定了技术基础。

### 3 水利工程运行安全检测关键技术应用效果分析

结合无人机智能巡检、水下综合检测及水下地层精细检测技术, 水利工程的安全监测实现了量化与可视化管理。为了客观评估工程整体运行状态, 本文采用健康指数模型 HI 对各类检测数据进行综合评价:

$$HI = \sum_{i=1}^n w_i \cdot \frac{S_i - S_{min}}{S_{max} - S_{min}} \quad (1)$$

式 (1) 中,  $S_i$  表示各检测指标 (包括裂缝宽度、渗水量、衬砌破损率、地层孔隙率等),  $w_i$  为各指标权重,  $S_{min}$  与  $S_{max}$  分别为该指标的最小和最大允许值。通过这个模型, 可统一量化无人机巡检、光学和声呐及地层精细检测结果, 得出工程健康指数, 直接体现水利设施安全水平, 实际应用反馈, 健康指数落在 0.80 ~ 0.90 区间, 坝体局部及渠道底部稍低于整体平均水平, 需

着重抓好局部加固与维护; 以公式量化推导, 实现了不同技术检测结果的统一评价, 也可动态监测工程健康状态变化, 为运维决策提供科学参照。此方法全面展现数据驱动智能安全管理的各项优势, 能精准识别并预警水利工程运行风险。

### 4 结论

本文围绕大型水利工程运行阶段出现的坝体渗漏、输水隧洞微小变形及渠道衬砌破损等安全问题, 探究了水利工程安全检测标准体系及关键技术应用。测试结果表明: (1) 依靠无人机智能巡检技术, 能快速覆盖库区及上下游重点结构, 构建高精度模型, 给结构健康评估提供可靠数据; (2) 水下综合一体化检测技术采用时空联合建模和多源数据融合, 优化水下结构成像效果及悬浮物干扰处理能力, 实现监控的连续性;

(3) 声波、地震反射及电磁感应与水下地层精细检测技术结合, 对坝基及渠道底部地层做精准量化分析, 为地基稳定性评估及加固决策提供依据。因此, 统筹各类技术, 可构建全链条、安全、规范的水利工程安全检测体系, 为长期运行、风险预警提供支撑。

### 参考文献:

- [1] 赵一琦, 曾彬. 新型水利工程智能安全监测系统研究 [J]. 科技与创新, 2025(24):80-82.
- [2] 柴晓燕, 王利娟. 水利水电工程施工安全管理技术 [J]. 城市建设理论研究 (电子版), 2025(35):193-195.
- [3] 徐子轩. 水利工程管理中安全生产的实践与思考 [J]. 江苏水利, 2025(12):65-68.
- [4] 任云. 厦门港航道疏浚工程施工全过程安全管控机制研究 [J]. 珠江水运, 2025(22):59-61.
- [5] 刘晓瑞. 水利工程管理安全生产标准化存在的问题及对策研究 [J]. 水上安全, 2025(22):22-24.