

水下机器人在大坝面板裂缝检测中的应用

李浪艇¹, 蒋才洋², 石朝波¹

1. 贵州乌江水电开发有限责任公司洪家渡发电厂, 贵州 毕节 551501

2. 中国电建集团贵阳勘测设计研究院有限公司, 贵州 贵阳 550081

DOI:10.61369/ME.2025070022

摘 要 : 水电站长期运行过程中, 大坝混凝土面板缺陷会直接威胁电站安全运营。当前针对大坝水上部分的检测手段较为丰富, 而水下部分检测方法相对单一。水下机器人搭载视觉系统可实现大坝面板水下部分的深度检测, 但现有产品在缺陷探测能力上存在不足, 尚未形成成熟的大坝面板检测体系。本文针对水下机器人在大坝面板检测中的应用短板, 提出改进方案, 并将其应用于贵州省某水电站大坝面板检测项目。检测结果表明, 改进后的检测方法能有效识别大坝水下表观缺陷, 为缺陷治理提供可靠技术支撑, 显著提升大坝安全系数。

关 键 词 : 水下大坝面板; 缺陷检测; 水下机器人

Application of Underwater Robots in Dam Face Slab Detection

Li Langting¹, Jiang Caiyang², Shi Chaobo¹

1. Hongjiadu Power Plant of Guizhou Wujiang Hydropower Development Co., Ltd., Bijie, Guizhou 551501

2. Power China Guiyang Engineering Corporation Limited, Guiyang, Guizhou 550081

Abstract : During the long-term operation of hydropower stations, defects in the concrete face slabs of dams directly threaten the safe operation of the stations. Currently, there are abundant detection methods for the above-water parts of dams, while the detection methods for the underwater parts are relatively limited. Underwater robots equipped with vision systems can realize in-depth detection of the underwater parts of dam face slabs, but existing products have shortcomings in defect detection capabilities and a mature detection system for dam face slabs has not yet been formed. This paper addresses the application shortcomings of underwater robots in dam face slab detection, proposes an improved scheme, and applies it to the dam face slab detection project of a hydropower station in Guizhou Province. The detection results show that the improved detection method can effectively identify the underwater apparent defects of the dam, provide reliable technical support for defect treatment, and significantly improve the safety factor of the dam.

Keywords : underwater dam face slab; defect detection; underwater robot

引言

自新中国成立以来, 我国水利水电事业成就斐然, 已修建近9万座堤坝, 其中混凝土坝占主导。从规模分布看, 水深15米以上大坝近2万座, 30米以上超3000座^[1]。随着运行年限增长, 大量大坝步入“老龄化”, 部分运行超30年, 甚至超半个世纪。长期服役中, 受水文、温度、水流及材料老化等因素影响, 大坝混凝土面板水下部分易现蜂窝、麻面、裂缝等缺陷, 威胁大坝结构安全。

其中, 大坝深水部位内部裂缝隐蔽性强, 常规检测难有效探测; 表面裂缝成因复杂, 若未及时处理, 会向内部扩展, 可能引发渗漏、结构失稳等安全事故^[2-3]。

当前, 大坝深水、高坝混凝土裂缝检查仍以人工目视和潜水员水下探摸为主, 但两者局限明显。人工目视检查视角和范围受限, 成果碎片化, 存在盲区, 效率低且安全风险高; 搭设满排架虽改善效果, 但投入大、工期长, 影响发电。潜水员水下探摸则面临安全风险高、作业深度受限、效率低等问题^[4-6]。

随着科技发展, 水下机器人视觉成像探测技术凭借安全、高效、精准优势, 在多领域广泛应用。将其用于水工建筑物检测, 可快速识别、精确测量、准确定位大坝水下裂缝, 成为研究热点。但现有水下机器人多为通用型, 难以适应大坝面板水下特殊环境。为此, 本文针对关键技术问题改进优化, 提出完整解决方案, 并在贵州某水电站应用, 验证了其可行性与有效性, 取得良好检测效果。

一、技术概况

水下机器人搭载高清水下摄像系统以视觉感观直接获取结构体表面状况，通过对结构体表面的成像直观反映混凝土的性状。高清水下摄像系统主要由水下机器人和地面控制站、水下定位系统三部分组成。

(1) ROV 水下机器人：外壳采用高强度金属材料，结构体连接处采用双层密封，确保在深水作业环境下，水下机器人能够正常工作。其动力机构运用大扭力直流电机推动外部高强度铝合金轮毂，从而实现机器人的行走和转向。

机器人配备高精度电子罗盘，可实现水下定向；配备暖色高亮度 LED 灯光系统，实现全方位照明功能；搭载的高清摄像头可实现 360 度全方位旋转，摄像头可以依靠机器人抬升机构实现不同视角观察目标物体。

(2) 地面控制站：地面控制平台主要由控制箱、显示器和遥控器组成。其中控制箱的作用是提供电源、信号控制处理、视频信息的、对水下机器人的状态进行监控；显示器能够实时监视水下摄像机的视频画面，监测水下机器人的动力系统、视频采集系统、深度、方向和位置等状态信息，同时，在软件界面上可以对整个系统的参数进行调节；遥控器能够对水下机器人进行前进、后退、上浮、下潜、姿态悬停、原地掉头、侧向平移、仰俯、翻转、比重调整等控制，同时能够对视频采集系统进行采集触发的控制。

(3) 水下定位系统：由于水下机器人非线性动力学特性及水介质的特殊性等因素的影响，实现水下机器人的远距离及长时间、大范围内的精确导航成为一项艰难的任务，该款仪器主要利用声学进行导航。

二、工程概况

(一) 面板概况

某水电站装机 600MW，保证出力 159.1MW，多年平均发电量 15.59 亿 kWh。总库容 49.47 亿 m³，调节库容 33.61m³，属多年调节水库，混凝土面板堆石坝坝顶长度 427.79m，坝顶宽度 10.95m，坝顶高程 1147.50m，防浪墙高程 1148.70m，最大坝高 179.5m，上下游平均坡度为 1:1.4，2020 年完成了大坝面板水上部分裂缝检测。针对大坝面板水下部分一直没开展相关检测工作。需开展大坝面板水下检测，以了解大坝的健康情况。

(二) 检测目的及测线布设

为了对大坝面板的安全评价及后期维修提供依据，水下检测工作需要混凝土面板有无凸起、变形、破损、裂缝等缺陷进行摄像、定位及尺寸描述。结合现场实际情况、设备性能及检测要求，平行面板缝管 1m 间隔布设检测测线，检测起点位于水面，终点为一期面板填土层，最长测线长约 120m。

三、问题及解决方案

(一) 水下机器人方式

目前市场上水下机器人以浮游行进为主，机器人配备不同方位推进器可实现前进、后退、上浮、下潜、姿态悬停、原地掉

头、侧向平移、仰俯、翻转等运动姿态。针对大坝面板水下裂缝检测，要求获取稳定清晰的影像资料及定位信息，传统机器人的浮游行进方式无法稳定沿大坝面板向下行进及驻停获取缺陷影像，因此，在机器人下方装载爬行四轮车，通过人工牵引的方式可使机器人紧贴大坝面板行走，同时可借助机器人自带助力系统，检测深部坝面情况。

(二) 坝面清淤

在大坝面板水下检测过程中，坝面淤沙清理是需要解决的一个关键性问题，针对该类工程特性，搭载水下机器人的四轮车可同时搭载抽水泵，抽水泵连接高压扇形喷头，接电后可实现向前进方向淤沙清理的目的

(三) 设备供电

大坝面板长、宽均为百米级别，在对面板进行网格式检测过程中，长距离设备供电是一个制约检测工作因素，若采用坝顶接电，通过电线拉至各个检测区域的方式供电，长距离线缆电力损耗及其重量累积将严重影响检测工作甚至导致供电不足。为此，开展水下检测工作时，将作业及工作平台设置在水上，利用发电机供电，整个作业平台可随测线更换而灵活移动，在解决供电问题的同时，提高了工作效率。

(四) 缺陷定位及尺寸确定

检测过程中，遇到缺陷时，需要驻停对缺陷位置及尺寸信息进行记录，Find ROV 搭载的声学定位系统通过水面放置声学发射器和水下机器人搭载的声学接收器获取两者方位及距离信息来确定缺陷的位置信息，在遇到缺陷时，可通过 ROV 搭载的激光标尺对缺陷尺寸做一个度量^[7]。

四、检测效果

(一) 垃圾及淤沙冲刷前后对比

通过对水下机器人具载四轮车改进，增加了对面板淤沙、垃圾冲刷的功能，高压水泵接电后，由扇形高压喷头喷射高压水柱，可将面板垃圾冲刷干净，便于影像检测面板缺陷情况，图 1-1 为面板冲刷前后效果对比图。



图 1-1 面板冲刷前后对比图

(二) 部分典型缺陷检测成果图

对大坝面板水下部分进行检测后，发现裂缝、表面脱落、露筋及表面破裂等缺陷，从成果中可以看到，影像灯光较均匀、照片分辨率较高，可清晰观测各缺陷发育特征、发育尺寸等，见 1-2 图。

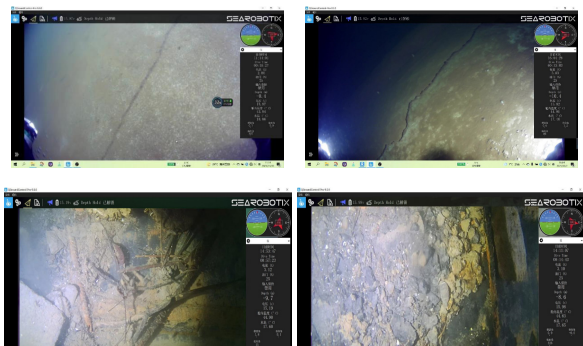


图 1-2 部分典型缺陷图

五、结论

基于贵州某水电站大坝面板水下检测项目实践，对水下机器人检测系统的行进、清淤、供电及缺陷量测方法改进后，有效解

决了传统检测手段的诸多问题，验证了其可行性与优越性。
改进后的水下机器人在大坝面板水下检测中特点显著：其一，工作状态稳定。加装爬行四轮车并人工辅助牵引，克服水流干扰，行进速度可由地面遥控器在 0.1 – 0.5 m/s 精准调控，能稳定下行，避免传统浮游机器人运动问题，保证摄像头拍摄距离和角度，为获取高质量影像资料提供稳定设备基础。其二，水下工作时间长。采用水面漂浮平台搭载发电机供电，摆脱传统电池供电限制，可连续 8 小时以上作业，短暂加油即可继续，大幅提升检测效率。其三，水下分辨率高。冲淤装置清理遮挡物，机器人精准驻停，多角度拍摄，缺陷识别准确率超 95%，为大坝缺陷治理提供可靠依据，对提升大坝安全意义重大^[8-10]。

参考文献

[1] 马从计. 水下机器人在大坝水下表面裂缝检测中的应用 [J]. 技术与市场, 2012, 19(09): 59.
[2] 洪云. 大坝安全检测的原理与应用 [D]. 南京: 河海大学, 2004.
[3] 王理华. 我国水电站大坝安全现状分析 [J]. 水力发电, 1994(6): 35–39.
[4] 李艳伟, 向航, 彭望. 基于无人机和水下机器人的高坝混凝土裂缝检测技术研究与应用 [J]. 建筑技术开发, 2021, 48(03): 52–54.
[5] 陈从平, 聂葳, 吴喆, 李林波. 基于视觉机器人的大坝水下表面裂缝检测系统设计 [J]. 三峡大学学报 (自然科学版), 2016, 38(05): 72–74+86. DOI: 10.13393/j.cnki.issn.1672-948X.2016.05.014.
[6] 沈清华, 杨青, 朱长富. 测量型水下机器人在水下构筑物缺陷检测中的应用 [J]. 水利技术监督, 2021(09): 9–11+56.
[7] 林海涛, 王皓冉, 李永龙, 等. 水下非均匀光照场景下的混凝土图像增强方法 [J]. 清华大学学报 (自然科学版), 2023, 63(07): 1144–1152.
[8] 刘巍, 葛海彬, 徐妍彦, 等. 基于智能机器人的水下建筑物裂缝检测方法与应用 [J]. 长江科学院院报, 2023, 40(04): 164–169+190.
[9] 徐刚. 水下机器人在福建水电工程水下建筑物质量检测中的应用 [J]. 水利水电快报, 2019, 40(11): 60–63..
[10] 钟惠钰, 尤林贤. 小型遥控水下机器人在水利工程中的运用 [J]. 水利建设与管理, 2008, 28(12): 35–36.