

水下吸附机器人系统及其应用研究

田金章¹ 谭界雄² 雷勇³ 贾强强¹

(1.长江勘测规划设计研究有限责任公司, 湖北, 武汉, 430010

2.国家大坝安全工程技术研究中心, 湖北, 武汉, 430010

3. 浙江大学流体动力与机电系统国家重点实验室, 浙江大学机械工程学院, 浙江, 杭州, 310058)

摘要: 重力坝长期运行过程中, 大坝可能出现渗漏、结构破损等病害。对于大坝上游面水下部分的病害, 为提高检测的安全性和效率、减低检测成本, 笔者团队研发了一套具备沿坝面吸附爬行和水中浮游两种工作模式的水下吸附机器人系统, 并开展了应用研究。本文首先介绍了水下吸附机器人系统的组成部分和功能特点, 并研究了该系统在重力坝水下检测中的应用方案, 通过工程应用验证了水下吸附机器人系统可用于重力坝渗漏、结构破损、拦污栅锈蚀和坝前淤积等病害的检测, 为类似工程检测提供了参考。

关键字: 水下吸附机器人 重力坝 渗漏 水下检测

Research on underwater adsorption robot system and its application

Jinzhang Tian¹ Jiexiong Tan² Yong Lei³ Qiangqiang Jia¹⁺

(1.Changjiang Survey, Planning, Design and Research Co.,Ltd. Wuhan 430010, China

2.National Dam Safety Research Center. Wuhan 430010, China

3.State Key Lab of Fluid Power and Mechatronic Systems,School of mechanical engineering, Zhejiang University. HangZhou 310058,China)

Abstract : During the running process of gravity dams, diseases such as leakage and structural damage may occur. For the diseases of the underwater part of the upstream of the dam, in order to improve the safety and efficiency of detection and reduce the cost of detection, the author team developed an underwater adsorption robot system with two working modes of adsorption crawling along the dam surface and floating in the water. And carried out applied research. This paper first introduces the components and functional characteristics of the underwater adsorption robot system, and studies the application scheme of the system in underwater detection. Through engineering application, it is verified that the underwater adsorption robot system can be used for the detection of gravity dam leakage, structural damage, trash rack corrosion and siltation in front of the dam, which can provide a reference for similar engineering detection.

Keywords: underwater adsorption robot, gravity dam, leakage, underwater detection

收稿日期:

基金项目: 国家重点研发计划资助 (2016YFC0401604)

作者简介: 田金章, 男, 工程师, 主要从事水库大坝安全领域的研究。E-mail: 563951505@qq.com

1. 前言

我国现有水库大坝 9.8 万多座，位居世界首位，其中重力坝作为主要坝型，建设成就突出，已建三峡、丹江口、龙滩、龙羊峡等高混凝土重力坝，在我国防洪、发电、灌溉、供水等方面发挥了重要作用^[1]。但随着时间推移，重力坝特别是早期建设的浆砌石重力坝出现了渗漏、混凝土结构缺陷等病害^{[2]-[3]}，而位于水面以下的缺陷采用潜水员检查风险大、效率低，且水深超过 60m 时，常规空气潜水无法实施。

随着水下机器人技术的发展和在水利工程中的应用，采用水下机器人对建筑物水下缺陷、渗漏等进行检测已取得一定成果^[4]。黄泽孝^[5]等人将水下机器人应用在隧洞检测中，对混凝土底板磨损、表面缺陷和结合部位进行了检查；郑发顺^[6]总结了遥控水下机器人系统在水库大坝水下检查中的作业步骤，对不同检查条件下的应用进行了研究；李永龙^[7]等人总结了水下机器人在水利水电工程应用中的关键技术和典型应用工况。以上研究为水下机器人在水利工程中的应用奠定了良好的基础，但主要利用现有浮游式水下机器人平台进行的应用研究，针对特定坝型应用的水下机器人系统的研究还不充分。本文针对重力坝上游坝面高效水下检测需求，研究了一种即可沿坝面吸附爬行又可在水中浮游的水下吸附机器人系统，并在实际工程中进行应用，取得了较好的应用效果。

2. 水下吸附机器人系统研究

水下机器人是一种通过搭载不同的检测或作业工具执行特定任务的水下潜水器。根据作业空间、操作方式和动力特点，通常将水下机器人分为载人潜水器（HOV）和无人潜水器（UUV），无人潜水器又可分为有缆遥控水下机器人（ROV）和自治水下机器人（AUV）。在水利水电工程中，有缆遥控水下机器人应用最为广泛^{[8]-[9]}。

水下吸附机器人属于 ROV 的范畴，为更好的适应垂直坝面检测而研发的专用水下机器人系统，系统主要由水下潜水器（主机）、脐带缆及绞车、岸上控制系统及导航定位系统、检测系统组成。

水下吸附机器人主机（图 1）包括聚乙烯框架（含浮材）、框架下部的后驱移动底盘、框架四角的推进器、负压吸盘和电子仓等部分。后驱移动底盘由四个直径 8cm 的车轮和两个带驱动器的无刷直流减速电机组成，固定于框架下部；为实现水中浮游功能和潜水器由浮游到垂直吸附爬行的姿态转换，在框架四周布置 8 个推进器，每个角布置一个水平推进器和一个垂直推进器；负压吸盘位于框架的中心，装有离心叶轮式吸盘和驱动电机，为主机提供负压吸力，使主机可非接触式的吸附在垂直坝面上；电子仓是岸上控制

器和水下主机的连接中枢，电子仓通过脐带缆与岸上控制系统连接，实现岸上对水下潜水器的控制、潜水器姿态反馈、检测成果的传输等功能。

水下吸附机器人脐带缆采用铜芯电缆，400V 直流供电，检测成果和控制信号通过载波传输；脐带缆长度 200m，岸上配备手动绞车用以收集脐带缆。岸上控制系统与电源模块集成，控制系统可实时显示潜水器导航定位状态并对水下运动姿态和水下灯光、摄像、声呐和云台等传感器进行控制。

水下吸附机器人系统配备的水下导航定位系统包括深度传感器和姿态传感器等，可提供水下潜水器深度、角度、倾斜等三维空间中的运动姿态。检测系统作为水下吸附机器人最主要的功能模块，配备有 5000 流明 LED 灯、120° 旋转云台、高清摄像头等视频检测系统，以及特制的水下高清摄像示踪系统和 Blueview M900 多波束图像声呐。

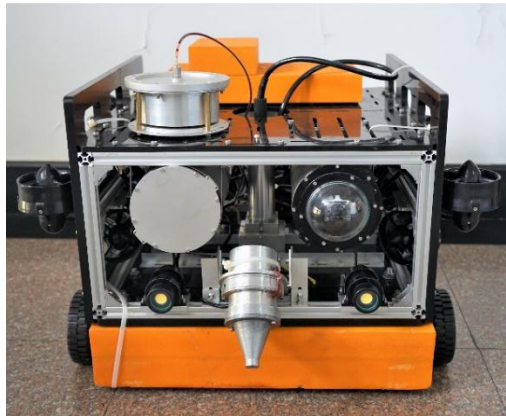


图 1 水下吸附机器人

Fig.1 The underwater adsorption robot

水下吸附机器人系统是在传统浮游机器人基础上，针对重力坝上游垂直坝面检测研发的专用、高效检测系统，具备水下浮游和吸附爬行两种工作模式，搭载水下高清摄像示踪系统、图像声呐、高清摄像、云台和灯光等设备，具备如下功能特点：

(1) 工作模式自由切换，适应不同检测条件。对于重力坝上游复杂结构，如进水口、拦污栅等部位可采用水下浮游功能进行检测；对于平整坝面利用吸附爬行模式进行检测（图 2），驱动轮同向转动实现前进、后退，驱动轮差速运动实现转弯，电机停机实现坝面驻停，可有效克服浮游状态时水下摄像头晃动和无法驻停等难题。



图 2 吸附爬行工作模式
Fig.2 Adsorption crawling mode

(2) 搭载集成的水下高清摄像示踪系统，可对水下视频检查的缺陷部位或疑似渗漏部位进行喷墨示踪验证，用于检查结构缝或裂缝渗漏。

(3) 搭载的多波束图像声呐能在低能见度环境中根据距离已知结构物距离为水下吸附机器人平台提供辅助导航，配合深度传感器实现坝面缺陷的定位。

(4) 根据固定深度下多波束图像声呐成果分析，可大致确定坝前淤积情况，为运行管理提供依据。

3. 重力坝水下检测方案

根据重力坝结构特点，重力坝水下检测的重点内容包括上游坝面混凝土缺陷、上游结构缝缺陷和渗漏、进水口混凝土缺陷和金属结构锈蚀、坝前淤积等。针对以上水下检测内容，结合水下吸附机器人功能特点，提出重力坝水下检测方案如下：

(1) 上游结构缝缺陷和渗漏检测。水下吸附机器人浮游至结构缝前方，通过推进器控制水下吸附机器人保持与结构缝之间的距离，并自上而下检测。检测时，每隔 0.5m 进行水下示踪，通过示踪剂在水中运动判断是否存在渗漏。当需要对某个部位进行仔细检查时，控制主机吸附在垂直坝面上并驻停，对缺陷进行详查和渗漏示踪摄像检查。

(2) 上游坝面混凝土缺陷检测^[10]。水下吸附机器人主机浮游至重力坝坝面前方，通过推进器和负压吸盘使主机吸附在上游坝面上，然后自上而下吸附爬行检测直至底部，然后掉头后偏移 0.5m 后自下而上检测至水面，依次往复直至检测完成。检测过程中，主要通过高清摄像头实时检查坝面混凝土缺陷，当遇到裂缝时，可沿裂缝走向进行检测。

(3) 进水口混凝土缺陷和金属结构锈蚀。主要利用水下浮游功能通过图像声呐进行辅助定位，并通过高清摄像检查进水口混凝土破损等缺陷和拦污栅、闸门槽埋件锈蚀情况。

(4) 坝前淤积。水下吸附机器人系统配备的 Blueview M900-130 型多波束图像声呐可在 100m 范围内获取高精度水下声呐图像。通过在固定水深、不同位置的声呐图像测量即可得出坝前库底淤积线。

4. 工程应用

4.1 工程概况

某水库大坝为浆砌石重力坝，坝顶高程 473.0m，最大坝高 76m，是一座以发电为主，兼顾防洪、养殖、过木等综合效益的中型水利工程，坝后引水式电站装机容量 37.5MW。水库正常蓄水位 470.0m，校核洪水位 470.22m，死水位 430.0m。大坝自左向右为左岸非溢流坝段、溢流坝段、右岸非溢流坝段，其中右岸非溢流坝段（坝右 0+067）设坝式进水口，进水口中心线高程 427.25m，洞径 2.5m；发电进水口左侧布置放空底孔，进水口中心线高程 420.0m。

工程兴建于 1988 年，1995 年开始蓄水运行，自工程投运以来，大坝即存在渗漏问题。为解决大坝渗漏问题，2010 年在上游坝面重新浇筑防渗面板，高程 448.0m 以上面板厚 50cm，高程 448.0m 以下面板厚度按 1/60 水头计，设计坡比 1:0.22，底部最大厚度 150cm，表层纵、横向钢筋为 $\Phi 10@150\text{mm}$ ，面板间设伸缩缝，间距 15m。加固后，灌浆廊道和排水廊道内仍存在渗漏，下游坝面出现散浸（图 3）。

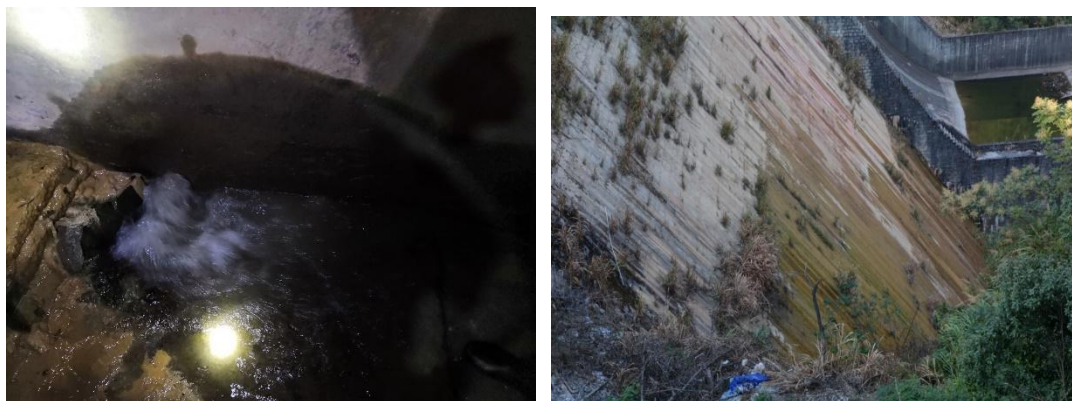


图 3 大坝廊道及下游坝面渗漏

Fig.3 Leakage of dam gallery and downstream dam surface

4.2 检测目的和内容

大坝加固后近十年来，库水位基本维持高水位运行，对上游坝面未进行过任何检测。结合大坝渗漏情况和结构特点，主要检测内容包括：①高程 450m 以下的上游防渗面板表面巡查；②防渗面板结构缝和水平施工缝缺陷及渗漏检测；③进水口和坝前淤积检测；④进水口拦污栅锈蚀检查。

4.3 典型检测成果

(1) 高程 450m 以下上游防渗面板检测

采用吸附爬行方式对上游坝面进行巡查，检查面积约 2100m²。根据检测成果，大坝上游防渗面板整体情况较好，防渗面板内未发现较严重的缺陷和渗漏情况；个别部位存在混凝土表面不平整、露筋等缺陷，但尚不影响结构整体性（图 4）。放空底孔左侧（高程 432.0m、桩号 0+045）大坝上游坝面存在一个约 40cm×10cm（长×高）的孔洞，洞深约 5cm。经水下示踪检测未见渗漏吸入现象，可能为施工期留下的孔洞，但该处面板厚度不满足设计要求，长期挡水运行存在渗漏可能（图 5）。



图 4 防渗面板露筋（高程 444.7m）

Fig. 4 Exposed reinforcement of anti-seepage panel (EL.444.7m)



图 5 面板混凝土孔洞（高程 432.0m）

Fig.5 Holes in the concrete face (EL.432.0m)

(2) 水平施工缝和垂直结构缝检测

施工缝和结构缝采用水下浮游模式进行左右和上下检测。发现发电洞进水口右侧、高程 448m 水平施工缝存在明显的破损，形成一条长约 40m 的破损带，靠近进水口的 6.5m 范围内的施工缝张开，宽 2~5cm，深约 10cm。在施工缝下部吸附驻停后，水下高清摄像示踪检测发现该施工缝存在明显渗漏，为大坝渗漏通道（图 6）。

防渗面板垂直结构缝中有 10 条缝存在模板遗留，总长度约 74m；部分结构缝张开，缝宽 1~2cm，缝口混凝土剥落，但示踪检查未见明显渗漏吸入现象（图 7）。



图 6 水平施工缝渗漏（高程 448.0m）

Fig. 6 Leakage of horizontal construction joint(EL.448.0m)

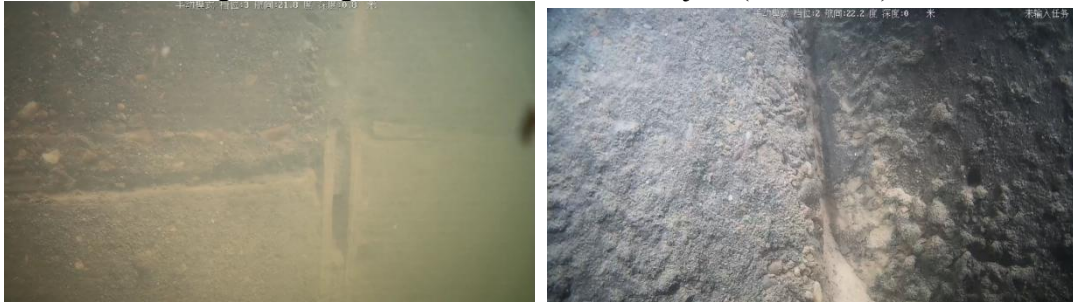


图 7 垂直结构缝缺陷

Fig.7 Defects of structural joints

(3) 发电洞进水口

进水口采用水下浮游模式进行检测，图像声呐扫描发现进水口结构完整，无明显混凝土缺陷（图 8）；进水口拦污栅栅条锈蚀较严重（图 9），栅前杂物较多，以树枝、淤泥为主，堆积顶高程 428.0m 左右。

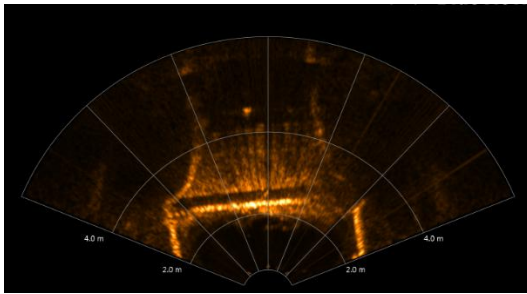


图 8 进水口声呐图像

Fig.8 Sonar image of the water inlet



图 9 拦污栅栅条锈蚀

Fig.9 Corrosion of trash rack

4.3.4 坝前淤积

通过坝前 50m 附近、高程 430m 处不同位置的多波束图像声呐成果分析，坝前库底淤积情况较严重，最大淤积深度 16m，发电洞进水口前淤积至高程约 423.0m 左右，放空底孔附近已淤积至高程 415.0m 左右（图 10）。

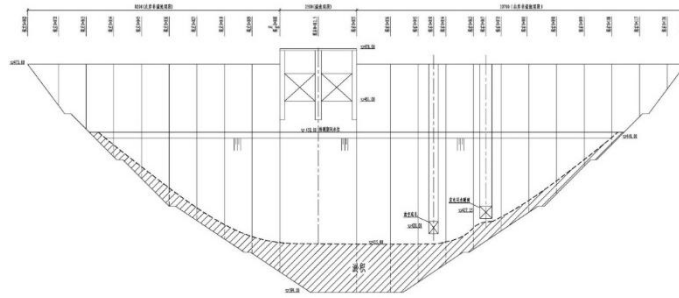


图 10 坝前淤积高程示意图

Fig.10 Elevation diagram of siltation in front of dam

4.4 检测成果分析

根据水下检测成果，新建防渗面板完整性较好，结构缝内遗留有模板，部分结构缝缝宽较大，但不存在明显渗漏；发电洞进水口右侧高程 448m 水平施工缝存在严重破损，缝口张开 2~5cm，长度约 40m，深约 10cm，示踪检查显示存在明显的吸入现象，为大坝渗漏通道；河床部位坝前淤积约 16m，发电洞进水口前淤积至高程 423m，拦污栅前堆积较多杂物，堆积高度超过拦污栅高度的一半，严重影响过流；拦污栅栅条存在锈蚀。

根据以上检测成果，大坝新建防渗面板起到了很好的防渗作用，但作为连接面板的水平施工缝存在结构缺陷，成为大坝渗漏通道。建议降低水位对查明的渗漏施工缝进行封闭处理；因流域多暴雨，洪水集中，携带沙石和树枝等再无堆积在坝前导致坝前和进水口前部淤积严重，浑水发电对机组造成诸多不利影响，建议对进水口前淤积进行清理，并清理进水口前杂物，确保发电安全。

5. 结论

针对水下浮游机器人在水下检测中的悬浮晃动、检测成果质量低等问题，根据重力坝实际检测需求，研究了一套具备水中浮游和坝面吸附爬行两种工作模式的水下吸附机器人系统，并配备水下示踪系统、多波束图像声呐系统、高清摄像系统等检测设备。通过实际工程应用，总结的上游坝面吸附爬行巡查检测、结构缝悬浮检查、异常区域吸附驻停示踪详查和图像声呐检查淤积等检测方案为重力坝水下检测提供了可行参考，实现了高效、安全的重力坝水下检测。

参考文献

- [1] 2018 年全国水利发展统计公报[M]. 中国水利水电出版社，中华人民共和国水利部，2019.
- [2] 赵修林，胡海，王新生. 水库浆砌石重力坝渗漏原因分析及危害[J]. 煤炭技术，2004, 23(6).
- [3] 谭界雄，位敏，徐轶，谭政. 水库大坝渗漏病害规律探讨[J]. 大坝与安全，2019(04):12-19.
- [4] 王秘学，谭界雄，田金章，等. 以 ROV 为载体的水库大坝水下检测系统选型研究[J]. 人民长江，2015, 46(22):95-98.
- [5] 黄泽孝，孙红亮. ROV 在深埋长隧洞水下检查中的应用[J]. 长江科学院院报，

2019, 36(7):170-174.

- [6] 郑发顺. 遥控水下机器人系统在水库大坝水下检查中的应用[J]. 水利信息化, 2014(2):45-49.
- [7] 李永龙, 王皓冉, 张华. 水下机器人在水利水电工程检测中的应用现状及发展趋势[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2018, 16(6):586-589.
- [8] 谭界雄, 田金章, 王秘学. 水下机器人技术现状及在水利行业的应用前景[J]. 中国水利, 2018(12):33-36.
- [9] 梁俊, 甘孝清, 韩贤权, 刘超. 水下无人探测系统在岩坎爆破效果调查中的应用[J]. 长江科学院院报, 2010, 27(02):16-19.
- [10] 何亮, 马琨, 李端有. 多波束联合水下机器人在大坝水下检查中的应用[J]. 大坝与安全, 2019(05):46-51.

第一作者: 田金章 湖北省武汉市江岸区解放大道 1863 号 18502776078 563951505@qq.com