

大型水电站坝体检测水下机器人研究进展

徐鹏飞¹, 陈梅雅¹, 开艳¹, 王子鹏¹, 李新宇², 万刚², 王延杰³

(1. 河海大学 港口海岸与近海工程学院, 南京 210098; 2. 中国长江电力股份有限公司, 宜昌 443000;
3. 河海大学 机电工程学院, 南京 213022)

摘要: 中国是水电大国, 水电站大坝除涉及自身经济效益外, 还关系到人民生命财产安全, 因此需要定期开展大型水电站坝体缺陷检测, 确保水电站大坝安全运行。目前, 使用有缆遥控水下机器人(remotely operated vehicle, ROV)进行水电站坝体缺陷检测能减少人工检测带来的诸多不利, 同时提高检测精度和效率。该文对大坝环境条件和水电站坝体缺陷检测的主要内容进行了调研, 梳理了大型水电站坝体检测 ROV 的研究现状, 从坝体检测 ROV 总体技术、吸附技术、动力系统、检测技术、水下定位与控制系统等方面, 分析了 ROV 在国内外水工检测领域的技术研究进展, 并对坝体检测 ROV 关键技术的发展趋势进行了展望。

关键词: 水下机器人; 水电站大坝; 缺陷检测; 总体技术; 吸附技术; 声光融合检测技术; 动力系统; 水下定位与控制

中图分类号: TN247 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-0054(2023)07-1032-09

DOI: 10.16511/j.cnki.qhdxxb.2023.26.018

中国水电站建设发展迅猛。根据国际大坝委员会的统计^[1], 截至 2020 年 4 月, 中国现有大坝数量 23 841 座, 占全球总量的 40.6%。三峡、白鹤滩等 5 座装机容量排名世界前十的水电站相继投入使用。水电站从投入使用开始, 大坝混凝土表面就会随着时间推移不可避免地出现空蚀、冲蚀、溶蚀、冻融等病害, 甚至出现裂缝、渗漏等问题, 因此相关部门要求定期进行水下缺陷检测。目前, 大坝水下检测的大部分工作由潜水员携带专业检测设备完成, 但水电站水下坝体水流深度大、环境恶劣、缺陷分布广, 潜水员探查手段有限, 检测风险高、效率低^[2]。因此, 应用坝体检测水下机器人可有效规避潜水员的生命安全风险, 提高检测效率。

有缆遥控水下机器人(remotely operated vehicle, ROV)是一种功能全面、应用广泛的科研与检测作业设备, 已在船舶海洋工程、海洋地质学和生物学、军事等领域展现出重要的工程价值^[3]。近年来, 随着对智能装备研究探索的深入, ROV 研究技术逐步趋于成熟, 其生产和应用也日趋标准化、商业化^[4]。美国、英国、法国等海洋大国在

ROV 领域不断加深研究, 针对不同任务和场景研制了不同类型且各具优势的 ROV。美国 SeaBotix 公司研制的 LBV (little benthic vehicles) 型 ROV^[5], 外形坚固、操作简单, 可实现六自由度运动; 英国 Saab Seaeeye Limited 公司针对海洋及沿海水域石油和天然气开发研制了 Seaeeye Panther Plus ROV^[6], 具有非常好的操控性能, 为钻井和勘测作业提供支持; 中国上海交通大学水下工程研究所研制的“海龙”号 ROV, 在小范围内定点作业、精细作业方面具有明显优势, 能很好地完成大洋科考任务^[7]。随着 ROV 的广泛应用, 越来越多的科技工作者将 ROV 技术从海洋探测领域应用到水工检测领域。

根据检测和作业需要, ROV 可搭载不同的传感器, 实现水下移动巡检、缺陷特征自动识别、岸站信息交互储存功能^[8], 为保障水电站大坝安全和稳定运行提供了新的技术手段, 有效提高了水下检测效率、定位精度和数据质量。本文对大型水电站坝体检测 ROV 进行了调研和综述, 分析了水电站坝体检测 ROV 关键技术, 在此基础上对坝体检测 ROV 的未来发展和研究方向进行了展望。

收稿日期: 2022-10-31

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFB4703401, 2018YFF0215005); 江苏省海洋科技创新专项(HY2018-15)

作者简介: 徐鹏飞(1982—), 男, 教授。E-mail: xupengfei@hhu.edu.cn

1 水电站坝体检测 ROV 研究现状

ROV 通过脐带缆与水面岸站实现信息交互,可以在危险系数大的深水域代替潜水员进行检测作业,同时可满足 24 h 作业需求,本研究列举了部分国内外具有代表性的 ROV,如表 1 所示。ROV 本体通常为开架式结构,根据应用需求搭载相应功能的传感器。部分水电站坝体检测 ROV 的基本情况如表 2 所示。

日本五洋建设有限公司参与了由日本国土交通部举办的“社会基础设施机器人检测研讨会”,研发了勘探 ROV,并于 2001 年 11 月在日本宫瀨大坝进行了现场调查试验,调查内容包括检测坝壁混凝土、模拟试件、泄洪道和大坝最深处的状态^[9]。试验过程中,ROV 水平移动了约 50 m,但没有发现分层、剥落等退化迹象。

西班牙赫罗纳大学提出了一种水电站大坝视觉检测的自动化方案,研制了一种小型自主水下飞行器 Ictineu (图 1a),搭载了机械扫描成像声呐、Doppler 测速仪(Doppler velocity log, DVL)、摄像

机、姿态传感器、成像声呐、回声测深器和水面浮标驱动器,用于自主探测大坝坝壁,并进行了大坝实地试验,最终得到坝壁的拼接图像,可以看到大量的藻类植物,验证了该系统在大坝检测方面的可行性^[10]。

日本东京农工大学开发了用于大坝的水下检测系统,即大坝检测系统(dam inspection system, DIS),由水面无人船(unmanned surface vessel, USV)和 ROV 组成,USV 也称为水面平台(surface water platform, SWP),ROV 也称为水下平台(under water platform, UWP),SWP 和 UWP 通过水下电缆连接^[11]。与现有 ROV 系统相比,DIS 中 UWP 的检测位置无需外部设备即可估算,其在水下的上浮或下潜由连接的水下电缆控制,在水中的位置由水下电缆吊放的长度和 SWP 的水面位置确定,无需安装垂推,因此能够避免推进器掀起泥沙引发水体浑浊的情况。该研究团队在日本八场大坝进行了试验,获得了坝面和水闸门的稳定图像,验证了这种悬挂式 ROV 系统稳定^[12]。

表 1 国内外部分 ROV 主要技术参数

团队	名称	关键设备	相关参数	功能
美国 Seabotix 公司	LBV-300	摄像照明系统、Tritech Micron 扫描声呐,可选机械手、侧扫声呐、切割器、壁厚测量仪等	0.520 m×0.445 m×0.260 m; 最大下潜深度 300 m; 最大速度 2.8 节	施工潜水支持、水下观察、无损检测、轻型打捞等
美国 Oceaneering 公司	Magnum plus ROV	高清摄像机、LED、机械手等	2.600 m×1.600 m×1.900 m; 最大下潜深度 4 000 m	钻井支持、深水观察作业等
英国 Perry Tritech 公司	SCORPIO ROV	遥控摄像机、机械手、照明设备等	2.430 m×1.220 m×1.220 m; 最大下潜深度 1 520 m; 最大速度 4 节	海洋救援、海底作业等
英国 Saab Seaeye 公司	Panther-XT Plus	高清摄像机、扫描声呐、SM7 清洁刷、机械手、超声波测厚仪、CP 探针等	2.140 m×1.060 m×1.217 m; 最大下潜深度 1 000 m; 最大速度大于 4 节	钻井支持、管道调查和打捞等
法国 ECA 公司	H800	高性能摄像系统,可根据需要增加各种传感器	最大下潜深度 1 000 m; 最大速度 4.5 节	水下工程监视、管线测量等
挪威 Argus 公司	Argus Mariner	彩色摄像机、LED、机械手、深度计、高度计等	1.800 m×1.100 m×1.200 m; 最大下潜深度 6 000 m; 最大速度大于等于 3 节	海洋调查监测、海底检测作业等
上海交通大学	海龙号	多功能摄像机、静物照相机、泛光照明灯、高亮度氙气灯、机械手等	3.170 m×1.810 m×2.240 m; 作业深度 3 500 m	科研考察等
中科院沈阳自动化所	海星 6 000	高清摄像头、照明设备、机械手	最大下潜深度 6 000 m	科研考察、海底打捞等
深之蓝	江豚	扫描声呐、高清摄像头、照明系统、机械手等	0.780 m×0.520 m×0.500 m; 最大下潜深度 300 m; 最大速度 3 节	救助打捞、水利水电、海上风电、环保监测等

表 2 部分水电站坝体检测 ROV 基本情况

年份	研究机构	名称	检测设备	现场测试	投入应用
2001	日本五洋建设有限公司	—	光学摄像机、清洗装置、壁厚计、探空锤	是	—
2004	哈尔滨工程大学	TB-1 型	浅剖声呐、高频成像声呐	是	—
2010	西班牙赫罗纳大学 Ridao 团队	Ictineu	扫描成像声呐	是	—
2015	日本东京农工大学 Ahimono 团队	SWP+UWP	彩色数码相机、LED 灯、直线激光投影仪	是	—
2016	日本东京工业大学 Yang 团队	Anchor Diver 5.2	4 个 LED、摄像头、水镜 (water loupe)、尼龙刷	是	—
2018	日本东海大学 Sakagami 团队	—	负压吸附推进器、摄像头、LED 灯	是	—
2020	长江电力	450 缆水下机器人	水下摄像、导航声呐、侧扫声呐、超短基线定位	是	是
2021	中国水电甘再项目公司	—	高清摄像头、水深计、红色示踪剂	否	是

日本东海大学研制了带负压吸盘的框架式 ROV(图 1b), 搭载了 2 台垂直推进器和 4 台带负压吸盘的水平推进器^[13]。当 ROV 接近大坝表面时, ROV 通过负压吸盘与大坝表面接触, 并依靠橡胶轮导向, 完成在垂直坝面的运动。该 ROV 在日本夕张大坝进行了现场试验, 但尚未投入应用。

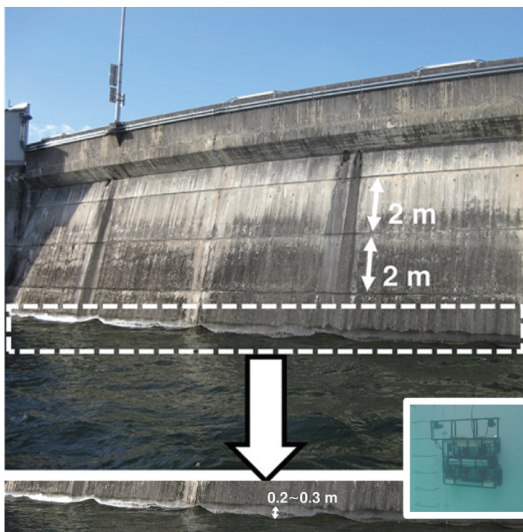
(a) Ictineu 飞行器现场测试环境^[10](b) 日本东海大学水下检测 ROV 在夕张大坝试验^[13]

图 1 国外部分坝体 ROV

日本东京工业大学投入研究的 Anchor Diver 5.2 提出水镜这一全新概念^[14]。水镜是一个矩形-金字塔的透明盒子, 里面装满了清澈的水, 连接在水镜顶点的前置摄像头通过清澈的水对混凝土墙进行成像, 能够有效提高水环境浑浊检测时的清晰度, 同时水面无人船起吊装置通过系绳的张紧度估计水下无人船的位置。该团队在日本尼瀨大坝进行现场测试, 采集的图像能够较好地辨认裂缝状况, 并确认沉积物表面情况。

近几年, 随着水下智能装备迅速发展, 国内多家研究所和公司生产的 ROV 已投入到实际工程应用中。哈尔滨工程大学成功研发 TB-1 型堤坝 ROV(图 2a), 工作水深 300 m, 在葛洲坝水电站进行了探查试验, 可检测堤坝表面厘米级的细小裂纹, 覆盖垂直坝体与水平结构体等多种工况^[15]。

长江电力研制的水电站 450 m 缆 ROV(图 2b) 由主机单元和多种加装层组合而成^[16]。主机单元携带了水下摄像、导航声呐、测扫声呐、超短基线定位等多功能搭载件, 可实现水下定位、目视检查、声波检查等, 加装层根据实际需要与主机单元组合使用, 可对向家坝水电站消力池底板区、溪洛渡水电站尾水洞流道和尾调室等进行全覆盖检查。

中国水电甘再项目公司采用 ROV 携带高清摄像头、水深计、红色示踪剂等进行水下视频、图像检测, 通过数据分析完成对甘再水电站水库大坝的渗漏检测, 初步判定渗漏点位置^[17]。河海大学依托国家重点研发计划质量专项研制的港航工程水下检测吸附 ROV(图 2c), 自主开发了模块化的涡流吸附器, 可在水下壁面稳定吸附, 显著提高机器人检测作业的稳定性, 并开展了重力式码头检测应用。



(a) 哈尔滨工程大学TB-1型堤坝ROV



(b) 长江电力450 m缆ROV



(c) 河海大学水下吸附ROV

图2 国内部分坝体检测ROV

此外,利用ROV对其他结构物进行智能检测的研究也对坝体智能检测水下机器人的发展具有一定借鉴意义。法国ECA公司针对船体水下检测需求,研制了一种爬行/浮游混合型ROV,零稳心高度的设计使其可翻转 90° ,依靠垂推与结构表面接触,采用履带在检测面爬行^[18]。为提高风浪和水流抗扰能力,在ROV底部设计2台涡流效应盘,增加ROV与船体的附着力。西湖大学、飞马滨(青岛)智能科技有限公司采用并参考ECA公司设计理念,研制了船体水下清洗机器人并开展了码头实船测试^[19]。

目前ROV主要应用于深海探索与作业,在水电站坝体缺陷检测方面应用较少。针对水电站出现的裂缝、渗漏等问题,利用ROV进行缺陷智能检测具有突出优势,未来随着技术发展,水电站坝体检测ROV将成为值得重点关注与发展的领域。

2 坝体检测ROV关键技术

2.1 总体技术

坝体检测ROV的研制是一种系统性极强的工

程,在满足总体技术要求的前提下各单项指标要兼顾协调,利用有限的空间资源实现最大的作业功能。总体设计中涵盖了外形的参数化建模、结构强度与刚度的有限元计算与分析、能源动力与推进、水动力性能分析与预报等众多学科的研究分析,设计过程与内容如图3所示,其中水动力性能分析在总体设计中占有非常重要的地位。

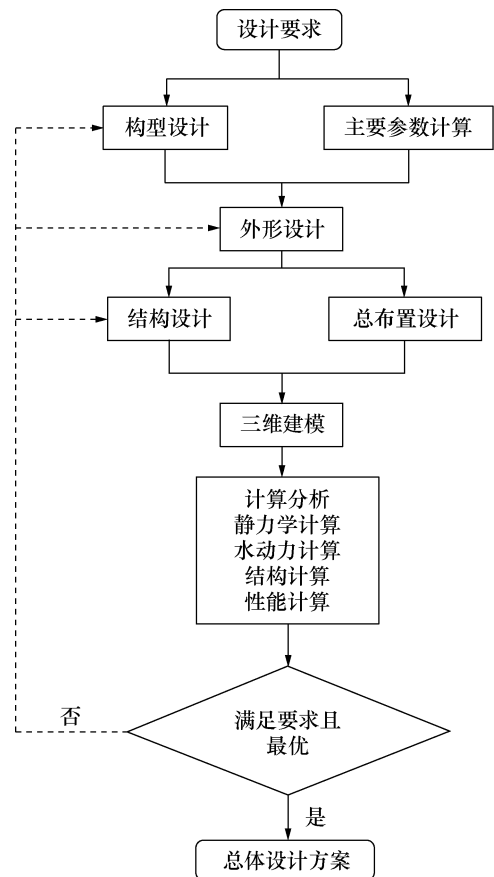


图3 ROV总体设计过程与内容

针对ROV的外形设计,传统ROV外形结构较为单一,多为框架式和方箱式,浮心略高于重心,依赖多推进器的协调驱动实现全向运动,而大坝检测要求坝体检测ROV满足水下坝体的水平面、直立面和斜坡面等多种工况检测要求,传统框架式ROV很难满足深水大坝的快速稳定检测,因此针对水电站坝面检测的ROV设计需要开展仿生流线型设计、高稳性本体设计和轻量化设计。

基于独立性原则,开展水下机器人的功能模块划分以及总体尺度优化方法研究,综合分析水下抗流抗扰控制、缺陷精细检测和导航定位等技术需求,设计构建模块化的水下机器人集成平台。

2.2 动力与吸附技术

ROV 各设备的动力主要经由脐带缆进行电力输送,其行进和姿态主要由推进器完成。脐带缆是水面岸站控制中心与水下 ROV 本体之间的连接线缆,具有向下供电、发送操作指令、向上传输检测信号的功能。考虑到大坝环境水流紊乱,且大坝表面有水生植物大量附着生长的可能,脐带缆进入水中,在航行作业过程中极易发生脐带缆缠绕的意外情况,需考虑脐带缆的布放和回收^[20]。

推进器是 ROV 不可缺少的一部分,由电机、控制器和螺旋桨组成,是主要的动力来源。近几年,矢量推进器被大量使用,传统螺旋桨式矢量推进器在 ROV 周围矢量布置多个固定螺旋桨和二元矢量螺旋桨,可满足 ROV 多个自由度运动要求,具有实用性强、推进效率高等优点^[21]。中国自主研发设计的“蛟龙”号潜水器采用固定螺旋桨和二元矢量螺旋桨组合的矢量推进方式,通过操作控制系统,能够使潜水器拥有六自由度的空间运动能力。螺旋桨是推进器的核心部分,要求其具有推进效率高、震动小、噪声低等特点,通过对其建模分析,计算优化得到适合作业环境的高推动比螺旋桨,能够有效提高动力推进效率^[22]。

在坝体检测 ROV 进行下潜检测作业时,水电站浑浊的水体要求坝体检测 ROV 非常靠近检测对象,这极大增加了 ROV 与坝体碰撞的风险。目前,操作人员很难通过遥控操作方式保持坝体检测 ROV 的位置稳定和方位准确,大多采用机械接触、磁吸附、负压吸附等方式保持 ROV 与坝面的稳定接触和相对距离。机械式接触方法直接通过推进器产生的推力把 ROV 推到要检查的物体上,但是其基础稳定性不够,抗流抗扰能力差,甚至可能破坏结构物表面;磁吸附方式采用磁吸装置,通过控制 ROV 与表面之间的间隙调节磁力,此方式产生的磁吸力较大,多用于船体检测,而水电站大坝坝体主要为混凝土结构,磁吸附方式不再适用。

负压吸附方法采用涡流叶盘的高速旋转使涡流罩内形成负压,产生的吸附力起到固定支撑的作用。河海大学基于 Bernulli 原理的水下涡流吸附技术研制了水下壁面吸附器,并通过码头实验验证了吸附器作业稳定^[23]。但涡流吸附技术对检查面形态要求较高,作业面的平整性、适应性等都可能严

重影响吸附效果。同时考虑到抗流抗扰稳定性和表面吸附检测能力是坝体检测 ROV 适应大坝特殊应用场景的关键,因此研发适用于不同坝面的吸附技术,提高检测稳定性是未来的发展趋势。

2.3 水下缺陷检测技术

深水大坝表面缺陷检测工作面临水体浑浊、弱光、附着淤积等难题,这对坝体检测 ROV 的检测精度提出了更高的要求。目前,ROV 检测技术主要分为光学和声学系统,检测机理和成像结果如图 4 所示。

光学系统主要由高清摄像机、照明设备等组成,且满足摄像头和照明设备同时转动,保证摄像头在进行工作时无照明死角,具有结构简单、成像结果直观性强、测量精度高等优点^[24]。加拿大 2G Robotics 公司的水下激光三维扫描仪通过线结构光提取与空间三维重构技术,成像分辨率达 0.2~0.6 mm,可实现结构缺陷近距离检测;中科院沈阳自动化研究所自主研发的水下光学 3D 成像设备也已应用于深海目标精细化三维重建与测量领域。

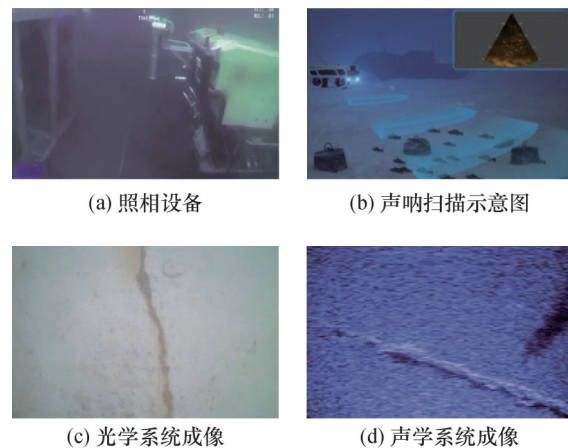


图 4 检测设备机理和成像结果

声学系统现多通过搭载前视多波束声呐、侧扫声呐等,完成对整个水下环境的成像扫描,具有探测范围广、不受水质影响等优点。声学系统成像原理是通过仪器发射声波,当声学仪器碰到海底或水中物体时发生散射(也称回波),信号回传到仪器,经过处理可以快速描绘水下地形特征^[25]。如英国 BluePrint 公司的 Oculus 高频图像声呐,最高频率 3 MHz,分辨率 2~2.5 mm,但由于水声信道噪声干扰以及旁瓣效应,实际精度与分辨率差异明显。

实际上, 声学系统成像普遍存在成像质量差、对比度低、边缘模糊等缺陷, 极易受到水中噪声干扰,

影响检测精度。国内外具有代表性的水下表面缺陷检测装置如表 3 所示。

表 3 国内外部分水下表面缺陷检测装置

检测原理	机构	类型	型号	检测范围/m	距离分辨率/mm
光学系统	加拿大 2G Robotics 公司	水下三维激光扫描仪	ULS-200	—	0.2~2.5
	加拿大 Voyis 公司	水下三维激光扫描仪	Insight Nano	0.13~1.00	0.1~1.2
	中海达	激光雷达	ARS-1000	—	50.0
声学系统	美国 BlueView 公司	水下三维全景成像声呐	BV5000	1.00~20.00	150.0
	英国 BluePrint 公司	高频图像声呐	Oculus	0.20~200.00	2.0~2.5
	中科探海	前视多波束成像声呐	FLMB600	150.00	30.0
	海研电子	高分辨率图像声呐	C-MAX-SeaKing Hammerhead	—	7.5

同一表面缺陷形态在不同检测模式下成像特征存在差异性, 而不同的表面缺陷形态在某些复杂环境下成像特征又存在相似性, 这给水下坝体表面缺陷的精准识别带来了实质性的困难。当前, 计算机技术对坝体表面缺陷实现高精度检测成为热点, 利用计算机语言(深度学习、聚类分割等)对图像特征进行有效识别, 在提高检测效率的同时也可提高检测精度^[26]。

2.4 水下定位技术

精准定位是 ROV 在复杂环境中完成运动控制、缺陷检测以及安全运行的关键基础。现有水下定位导航技术主要包括声学导航、惯性导航、视觉导航和地球物理导航等^[27]。目前水下导航以惯性导航、水声定位及其组合方法为主。惯性导航是一种常见的导航方式, 通过速度计和罗经测量 ROV 的加速度和角速度并进行积分运算, 从而实现导航作用。常用的水下定位方式有长基线定位、短基线定位、超短基线定位(ultra-short baseline, USBL)和 DVL 水下定位系统等, 其中长基线和短基线定位系统多用于深海, 不适用于水库大坝区域; DVL 水下定位系统常用于浅水区域, 面向大坝深水区域工作时, 其精度会受到较大影响; USBL 凭借其操作方便、测量精度高等优点, 成为面向水电站大坝开展检测工作的首选。

针对缺陷位置的确定问题, 一般首先通过 USBL 与惯性导航组合定位确定机器人的水下位置, 然后结合声光探测的图像识别结果, 最终完成缺陷位置定位。当前, 水下精确定位技术的难点在于坝体检测 ROV 水下作业时一般靠近坝面,

此时坝面受限水域的水声传播信道存在二次反射与界面混响等干扰, 影响实际定位效果, 需展开进一步研究。

2.5 控制技术

与海洋开阔水域相比, 水电站大坝水下环境更复杂, 坝面附近流速较快、紊流密集, 存在浮泥、苔藓等表面附着物。ROV 在靠近坝面巡检时存在碰撞及时规避、悬停稳定控制以及脐带缆缠绕等相关问题, 因此 ROV 在现场作业过程中, 运动控制需要着重考虑自身的强非线性、耦合性、时变性运动以及环境干扰等因素。由于常规的控制方法存在局限性, 需要结合人工智能方法设计具有环境适应性和平台鲁棒性的控制器, 实现 ROV 作业时的稳定运动控制。

坝体检测 ROV 在完成水下智能检测任务时需要根据检测设备特性、大坝结构等条件沿着期望的轨迹自主航行, 跟踪控制的精度将直接影响监测数据的完整性和坝体检测 ROV 的安全可靠性。沈阳自动化研究所将三维障碍物描述、避障声呐布置、避障声呐探测区域和运动控制统一, 建立了三维水下障碍物模型, 提出了一种基于水平面模糊避障规划和垂直面模糊避障规划相结合的三维实时避障规划方法^[28]。自适应控制航迹跟踪能够提高坝体检测 ROV 检测适配性, 针对水下坝体水平面、直立、斜坡面等多种工况要求优化控制算法设计, 提高运动控制算法的抗流抗扰稳定性。

3 总结

水电站坝体检测 ROV 针对坝体缺陷智能检测具有突出优势, 应用前景广泛。然而, 坝体检测

ROV 在实现精准检测、高效作业上仍存在较大困难,坝体检测 ROV 还有很多亟待突破的问题,具体如下:

1) 水电站坝体检测 ROV 目前缺少统一的技术标准和作业流程规范,考虑到现场环境复杂以及作业条件不充分,导致水下应用受限,亟需依托水电站相关单位构建并完善适应大型水电站坝体智能检测的 ROV 技术体系。

2) 现有 ROV 多为框架式结构,难以满足水电站大坝水下快速检测的要求,可结合仿生流线型、高稳定性和轻量化设计思想,实现坝体检测 ROV 的多工况稳定作业。同时开展功能布置和机械结构模块化设计,满足现场可拆装、多任务的水下检测需求。

3) 针对水电站坝体检测水域流速较大、紊流流较多的特点,优化推进系统的高推重比,加强水下机器人的抗流动力。针对近坝面运动控制需求,提高运动控制算法的抗流抗扰稳定性。结合水下吸附技术,提升抗流抗扰悬停作业能力。

4) 针对大型水电站坝体水环境浑浊、弱光、附着泥沙等问题,亟需开展有效的声光融合三维精细探测技术研究,辅以水下机械手检测作业功能,提升不同水体环境条件下的坝面缺陷检测能力。

5) 目前大坝缺陷检测过程中定位精度难以满足预期,现场水面支持保障存在困难,应结合动力浮标等水面支持系统辅助进行水声定位和脐带缆安全管理,同时使水面动力浮标与坝体检测 ROV 在吊放作业过程中实现一体化布放回收。

参考文献 (References)

- [1] 陈亮. 大坝表面异常巡检装置设计及裂缝检测算法研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2020.
CHEN L. Design of patrol inspection device for abnormal dam surface and research on crack detection algorithms [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2020. (in Chinese)
- [2] 王文超, 谢洪鑫, 李佳栋, 等. 智能巡检机器人在大型水电站的应用 [J]. 云南水力发电, 2022, 38(8): 298 - 300.
WANG W C, XIE H X, LI J D, et al. Application of intelligent patrol inspection robot in large hydropower station [J]. Yunnan Water Power, 2022, 38(8): 298 - 300. (in Chinese)
- [3] 于庚, 凌宏杰, 王志东, 等. 深海作业型机器人总体设计及性能分析 [J]. 舰船科学技术, 2020, 42(4): 90 - 95.
YU G, LING H J, WANG Z D, et al. Overall design and performance analysis of deep-sea ROV [J]. Ship Science and Technology, 2020, 42(4): 90 - 95. (in Chinese)
- [4] CAPOCCI R, DOOLY G, OMERDIE E, et al. Inspection-class remotely operated vehicles: A review [J]. Journal of Marine Science and Engineering, 2017, 5(1): 13.
- [5] 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, 102.
WANG M X, TAN J X, TIAN J Z, et al. Study on selection of underwater detection equipment of reservoirs and dams using ROV as carrier [J]. Yangtze River, 2015, 46(22): 95 - 98, 102. (in Chinese)
- [6] 刘畅. 腹部作业型 ROV 定深控制及水面监控系统设计 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2017.
LIU C. The depth control and surface monitoring system design on an abdominal operating ROV [D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2017. (in Chinese)
- [7] 刘晓阳, 杨润贤, 高宁. 水下机器人发展现状与发展趋势探究 [J]. 科技创新与生产力, 2018(6): 19 - 20.
LIU X Y, YANG R X, GAO N. Exploration on development status and trend of underwater robots [J]. Sci-Tech Innovation & Productivity, 2018(6): 19 - 20. (in Chinese)
- [8] 陈从平, 聂葳, 吴喆, 等. 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(5): 72 - 74, 86.
CHEN C P, NIE W, WU Z, et al. Design of underwater dam surface crack detection system based on visual robot [J]. Journal of China Three Gorges University (Natural Sciences), 2016, 38(5): 72 - 74, 86. (in Chinese)
- [9] SUGIMOTO H, MORIYA Y, OGASAWARA T. Underwater survey system of dam embankment by remotely operated vehicle [C]//Proceedings of 2017 IEEE Underwater Technology (UT). Busan, Republic of Korea: IEEE, 2017: 1 - 6.
- [10] RIDAO P, CARRERAS M, RIBAS D, et al. Visual inspection of hydroelectric dams using an autonomous underwater vehicle [J]. Journal of Field Robotics, 2010, 27(6): 759 - 778.
- [11] SHIMONO S, TOYAMA S, NISHIZAWA U. Development of underwater inspection system for dam inspection concept and evaluation of simplified dynamics model [C]// Proceedings of the OCEANS 2015 MTS/IEEE Washington. Washington, USA: IEEE, 2015: 1 - 6.

- [12] SHIMONO S, TOYAMA S, NISHIZAWA U. Development of underwater inspection system for dam inspection: Results of field tests [C]//Proceedings of the OCEANS 2016 MTS/IEEE Monterey. Monterey, USA: IEEE, 2016: 1-4.
- [13] SAKAGAMI N, YUMOTO Y, TAKEBAYASHI T, et al. Development of dam inspection robot with negative pressure effect plate [J]. *Journal of Field Robotics*, 2019, 36(8): 1422-1435.
- [14] YANG Y, HIROSE S, DEBENEST P, et al. Development of a stable localized visual inspection system for underwater structures [J]. *Advanced Robotics*, 2016, 30(21): 1415-1429.
- [15] 孙玉山, 庞永杰, 万磊, 等. 堤坝检测水下机器人GDROV方案研究 [J]. *船海工程*, 2006, 35(1): 84-86.
- SUN Y S, PANG Y J, WAN L, et al. Design plan of GDROV for the underwater inspecting robot of dikes [J]. *Ship & Ocean Engineering*, 2006, 35(1): 84-86. (in Chinese)
- [16] 贾洪刚. 水下机器人方案设计及在水电站的应用 [EB/OL]. (2020-09-29) [2022-10-28]. <http://www.hydropower.org.cn/showNewsDetail.asp?nsId=29021>.
- JIA H G. Underwater robot scheme design and application in hydropower stations [EB/OL]. (2020-09-29) [2022-10-28]. <http://www.hydropower.org.cn/showNewsDetail.asp?nsId=29021>. (in Chinese)
- [17] 刘福, 马保东, 马祥, 等. 水下机器人在水库大坝渗漏检测中的应用 [J]. *陕西水利*, 2022(3): 197-199.
- LIU F, MA B D, MA X, et al. Application of ROVs in reservoir dam leakage inspection [J]. *Shaanxi Water Resources*, 2022(3): 197-199. (in Chinese)
- [18] JOUVENCEL B, DUCOIN M, FORGIARINI J, et al. Modelling and control of an inspection class ROV for deep-sea intervention [J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2016, 21(6): 2982-2992.
- [19] 仲昭杰. 一种船体清洗机器人设计及关键技术研究 [D]. 镇江: 江苏科技大学, 2022.
- ZHONG Z J. Design and key technology research of a hull cleaning robot [D]. Zhenjiang: Jiangsu University of Science and Technology, 2022. (in Chinese)
- [20] 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.
- TAN J X, TIAN J Z, WANG M X. Future application of underwater robots in water sector and its technology status [J]. *China Water Resources*, 2018(12): 33-36. (in Chinese)
- [21] 张帅, 肖晶晶. 水下矢量推进器研究综述 [J]. *舰船科学技术*, 2019, 41(4): 1-5.
- ZHANG S, XIAO J J. Review of underwater vector propulsion devices [J]. *Ship Science and Technology*, 2019, 41(4): 1-5. (in Chinese)
- [22] 罗庆生, 刘星栋, 弓瑞, 等. 矢量喷水推进式水下机器人的建模仿真与验证 [J]. *应用科技*, 2017, 44(2): 7-14.
- LUO Q S, LIU X D, GONG R, et al. Simulation and experimental validation of an autonomous underwater vehicle equipped with multi-vector thrusters [J]. *Applied Science and Technology*, 2017, 44(2): 7-14. (in Chinese)
- [23] XU P F, HAN C B, LV T, et al. Underwater absorber for a remotely operated vehicle [J]. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2022, 10(4): 485.
- [24] 徐鹏飞, 孟昊, 李同飞, 等. 一种基于线结构光的水下目标三维信息测量方法 [J]. *机器人*, 2022, 44(5): 564-573.
- XU P F, MENG H, LI T F, et al. A 3D information measuring method of underwater targets based on line-structured light [J]. *Robot*, 2022, 44(5): 564-573. (in Chinese)
- [25] 朱俊, 张洪星. 三维成像技术在大坝水下垂直结构面缺陷检测中的应用 [J]. *水利技术监督*, 2018(5): 47-50.
- ZHU J, ZHANG H X. Application of 3D imaging technology in underwater vertical structural plane defect detection of dam [J]. *Technical Supervision in Water Resources*, 2018(5): 47-50. (in Chinese)
- [26] 王超, 贾贺, 张社荣, 等. 基于图像的混凝土表面裂缝量化高效识别方法 [J]. *水力发电学报*, 2021, 40(3): 134-144.
- WANG C, JIA H, ZHANG S R, et al. Image-based quantitative and efficient identification method for concrete surface cracks [J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2021, 40(3): 134-144. (in Chinese)
- [27] 张柏楠, 韩勃, 李宁博, 等. 长距离水工隧洞运营期无人检测技术及病害识别方法研究进展 [J]. *应用基础与工程科学学报*, 2021, 29(5): 1245-1264.
- ZHANG B N, HAN B, LI N B, et al. Research progress on unmanned inspection technology and disease identification method of long-distance hydraulic tunnels in operation period [J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2021, 29(5): 1245-1264. (in Chinese)
- [28] 刘鑫, 魏延辉, 高延滨. ROV运动控制技术综述 [J]. *重庆理工大学学报(自然科学)*, 2014, 28(7): 80-85.

LIU X, WEI Y H, GAO Y B. Review of ROV motion control technology [J]. Journal of Chongqing University of

Technology (Natural Science), 2014, 28(7): 80 - 85. (in Chinese)

Research progress on remotely operated vehicle technology for underwater inspection of large hydropower dams

XU Pengfei¹, CHEN Meiya¹, KAI Yan¹, WANG Zipeng¹, LI Xinyu², WAN Gang², WANG Yanjie³

(1. College of Harbour, Coastal and Offshore Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. China Yangtze Power Co., Ltd., Yichang 443000, China;

3. College of Mechanical and Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing 213022, China)

Abstract: [Significance] China uses a large amount of hydropower, and the safety of hydropower dams is related to the safety of people's lives, properties, and the national economy. Therefore, regular inspection of dam defects in large hydropower plants is vital to ensure their safe operation. Most of the common dam defects, such as cracks and leakage, originate from the surface of the structure and can affect the service life of the dams. In recent years, remotely operated vehicles (ROVs) have been used for the underwater inspection of dam defects in hydropower plants, as they can mitigate many disadvantages associated with manual inspections while improving detection accuracy and efficiency. [Progress] Thus, we explore the environmental conditions of dams and the main content of dam defect inspection in hydropower plants and review the research on ROV application for underwater inspection in large hydropower dams. We find that different sensors can be combined with ROVs to inspect large hydropower dams underwater according to detection and operation needs. The method can achieve intelligent mobile inspection and remote control of dam operation safety, automatically identify dam defect characteristics, and store shore-station interactive information. At present, ROVs are less used for inspecting dam defects in large hydropower plants but are widely used in fields such as deep-sea exploration, undersea operations, and rescue assistance. The use of ROVs for crack and leakage inspection in hydropower plants has tremendous advantages. The research on using ROVs for the intelligent inspection of other structures has certain implications for developing ROVs for the intelligent underwater inspection of large hydropower dams. We analyze the progress of ROV technology in domestic and international research on hydropower engineering in terms of the overall technology, underwater absorber, power system, inspection technology, underwater positioning, and control system. Moreover, we explore the modular design and overall scale optimization of ROVs for underwater inspection in large hydropower dams, with the design objectives of lightweight, high stability, and high anti-current and anti-disturbance capability. Thrusters with high propulsion ratios have been developed to ensure high ROV power. Adsorbers have been added to the ROV systems to control the hovering of ROVs, which can also improve their underwater anti-disturbance ability to ensure stable detection and operation. Acoustic-optical inspection technology has been proposed to improve detection accuracy, and intelligent algorithms have been used for defect identification and image post-processing. Regarding underwater positioning and control systems, a complementary approach combining information from multiple sensors has been adopted, and the dam defect inspection is validated to improve the operational capability of the ROV movement and inspection. [Conclusions and Prospects] The use of ROVs for underwater inspection in large hydropower dams has major advantages in targeting cracks and other dam defects, and the research on the intelligent inspection of hydropower dams opens up a wide range of prospects.

Key words: remotely operated vehicle; hydropower dams; defect inspection; overall technology; underwater adsorber; acoustic-optical fusion inspection technology; power system; underwater positioning and control system

(责任编辑 金延秋)