

文章编号:1672-3031(2018)06-0586-05

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

李永龙^{1,3}, 王皓冉^{1,2}, 张 华³

(1. 清华四川能源互联网研究院, 四川 成都 610000; 2. 清华大学 水利系, 北京 100084;

3. 西南科技大学 信息工程学院, 四川 绵阳 621010)

摘要: 水下机器人已成为水利工程智能检测方面最具潜力的水下探测工具, 具备较大的发展空间, 对于水利工程除险加固和大坝日常安全管理等均具备十分重要的应用价值。本文梳理了水下机器人在水利水电工程领域的典型应用场景和检测实践现状, 归纳和分析了水下机器人的关键技术要点, 结合技术发展, 对水下机器人在水利工程领域的应用前景和发展趋势进行了展望。

关键词: 水下机器人; 水下检测; 智能运维

中图分类号: TV738

文献标识码: A

doi: 10.13244/j.cnki.jiwhr.2018.06.010

1 研究背景

我国是世界上水库大坝最多的国家, 已建成逾十万座水库大坝。在数量众多的存量高坝大库中, 一些工程由于长年运行, 加之受水工建筑物的结构老化和地震等地质灾害影响, 安全问题日益凸显, 如坝体渗漏、混凝土裂缝和缺失、冲蚀冲坑以及地形地貌变化、金属设备腐蚀等, 严重影响了工程的安全稳定运行和长期效益的发挥。由于此类工程安全隐患通常处于水面以下, 排查难度较大, 而大多数水库大坝不具备放空条件, 因此针对该类工程问题的水下安全隐患探查是一个急需解决的工程问题^[1]。

长期以来, 水下检测工作主要采用潜水员作为水下移动载体, 通过潜水员人工作业经验或者手持水下检测设备来完成, 如水下摄像监视机等^[2]。通过实际工程的检验^[3-4], 此方法是可行有效的检测手段。

我国从20世纪80年代开始从事水下机器人的研究和开发工作。近年来, 随着机器人技术发展和检测技术的提升, 水下机器人在水下结构检测方面得到了广泛的应用, 相对于潜水员作为水下载体, 水下机器人检测的优势主要体现在: (1)灵活性强, 多自由度的移动能力可自如应对水下环境的复杂多变; (2)作业时间长, 通过电缆供电的水下机器人基本没有作业时间的限制; (3)作业深度广, 潜水员下潜深度不宜超过50 m, 而水下机器人作业深度可达100 m以上; (4)作业半径大, 水下机器人可以覆盖大面积的检测工作任务^[5]。目前, 水下机器人已成为水利工程智能检测方面最具潜力的水下探测工具, 具备较大的发展空间, 对于水利工程除险加固和大坝日常安全管理等均具备十分重要的应用价值。本文梳理了水下机器人在水利水电工程领域的典型应用场景和检测实践现状, 归纳和分析了水下机器人的关键技术要点, 结合技术发展, 对水下机器人在水利工程领域的应用前景和发展趋势进行了展望。

2 水下机器人应用现状

水下机器人是一种具有智能功能的水下潜器, 通过搭载不同的作业工具, 完成特定领域的作

收稿日期: 2017-07-05

基金项目: 国家自然科学基金重大研究计划项目(20161301291); 四川省科技计划资助项目(18SYXHZ0078)

作者简介: 李永龙(1983-), 男, 山西人, 博士研究生, 高级工程师, 主要从事智能机器人等研究。

E-mail: liyonglong@tsinghua-eiri.org

业。目前,国内外专家根据作业空间、操控方式、动力特点,通常将水下机器人分为载人潜水器(Human Operated Vehicle, HOV)和无人潜水器(Unmanned Underwater Vehicle, UUV),而无人潜水器又可以进一步分为有缆遥控水下机器人(Remote Operated Vehicle, ROV)和自治水下机器人(Autonomous Underwater Vehicle, AUV),见图1。

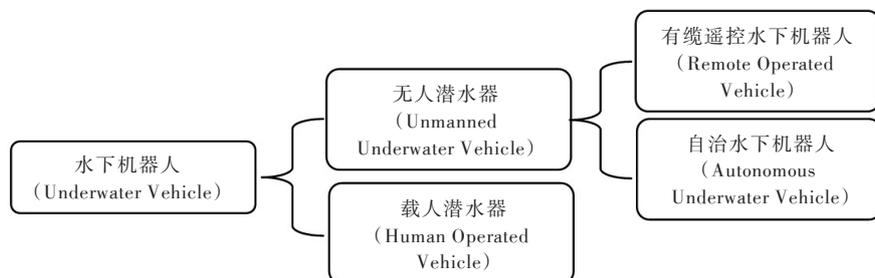


图1 水下机器人分类

载人潜水器是依据人的操作使机器人来完成水下任务,其优点是人工操作有利于处理紧急复杂事件,潜水员可直接观察水下环境,获得水下环境信息更加准确。但是由于水压、任务安全系数低等因素,载人潜水器在水下有一定的局限性(图2(a))。有缆遥控水下机器人的标志特点是具有脐带缆,有缆遥控水下机器人稳定性强,操作员可通过电缆传输介质向水下机器人传递信息进行遥控操作,在水下实现人-机交互控制。如Saab公司的Seaeeye工程系列ROV(图2b)。自治水下机器人不需要电缆对水下机器人进行控制,机器人有一定的自我判断能力,自身携带动力能源,不需要电缆提供动力,并且机器人按照人们预先编好的程序自动完成预定的水下作业,如蓝鳍水下机器人公司(Bluefin Robotics Corp.,)的AUV(图2(c))。



(a)蛟龙号载人潜水器

(b)Saab Seaeeye ROV

(c)美国BlueFin AUV

图2 水下机器人的主要形式

对于有缆遥控水下机器人下潜深度可达100 m以上;负载能力可达10 kg左右;电源从脐带缆供给,作业时间没有限制;结构主要以框架式为主,便于布放;综合各方面技术指标来考量,有缆遥控水下机器人(ROV)满足绝大多数水利水电工程检测的需求,在实际应用中,有缆遥控水下机器人(ROV)是水利水电工程水下检测与作业的主要机型。

3 水下机器人在水利水电工程应用中的关键技术

在水利水电工程检测中应用的ROV水下机器人是一个比较复杂的系统,按照功能划分,主要由供电系统、导航系统、推进系统、收放系统、通信系统、控制系统、检测系统、作业系统这8个部分构成。主要的关键技术包括:

3.1 负载和水流扰动下的运动控制 在对水利水电工程进行检测作业时,水下机器人需要携带定位设备以及检测设备,这些负载的添加,使机器人自身的质量和惯量都发生明显的局部变化;同时,水下作业时,大坝水流作用引起了扰动输入;此外,水下机器人动力学本质上是非线性的,并且各个自由度具有强耦合的特性;以上诸多因素构成了水下机器人运动控制设计面临的主要困难——非线性动力学特性、模型的不确定性和难以测量或估计的干扰^[6]。水下机器人控制研究就是运用H_∞控

制、模糊控制、神经网络控制^[7-8]、滑模变结构控制^[9-10]等控制方法,实现操作人员对水下机器人进行动操作的辅助控制系统或者自主运动控制系统的更准确的控制效果。经过控制算法有针对性的设计,水下机器人ROV系统可以在流速不大于1 m/s的水流环境中,携带10 kg左右负载稳定工作。

3.2 缺陷识别 ROV水下机器人检测系统中,缺陷目标识别是水利机器人的关键技术。水下环境的差异对水下作业和目标检测带来了一定的困难。特别在低能见度、浑浊水体、杂质水环境中,进行作业和检测是水下应用的难点^[11]。常用的水下缺陷检测手段为:(1)摄像机配合辅助光源照明,可在清水近距离,高清晰度的观测,最大作业深度为100 m;(2)声纳可对构筑物外轮廓、结构破损、水库淤积等进行检查,对水质无要求,最大作业深度为300 m;(3)水下超声测厚仪,用于金属材料测厚,最大作业深度20 m;(4)水下电位测量仪,用于金属结构物的电位测量,最大作业深度200 m^[5]。

3.3 缺陷定位 水利水电工程规模大,不仅需要识别出缺陷,还需要得到缺陷的准确位置,为检测结果和后期处理提供依据。因此,精确的导航与定位成为水下机器人的基本要求。由于水下机器人非线性动力学特性及水介质特殊等因素的影响,实现特定区域内长时间、大范围内的精确定位与导航成为一项艰难的任务。目前水下定位技术分为惯导、航位推算、声学定位、地球物理定位几类。单一定位方法的精度、可靠性都无法满足水下机器人在检测中的需求,因此将多种定位系统进行组合成为水下机器人定位导航技术的重要发展方向^[12]。目前国内水下定位可在水深45 m左右的水域,水下定位精度为5 cm,测深精度为30 cm,且测量误差不随时间累积^[13]。

总的来讲,水下机器人的控制技术、导航定位能力、搭载技术、视频摄像和声纳扫描成像技术等还有很大改进和提升空间,也是目前水下机器人在水利水电工程应用的主要研究内容。

4 水下机器人在水利工程检测的典型应用

经过20多年的发展,目前水下机器人在我国水利工程中也逐渐得到应用,如三渡溪水库除险加固、小湾电站大坝检测以及三峡水利枢纽导流底孔封堵检修门清理等^[14]均有得到应用。目前水下机器人在水利工程的水下检测应用场景主要集中于闸门检测、水下坝体结构检测和消能设施底板检测。

4.1 闸门检测 为了防止闸门有异物而造成闸门即放不下去也收不回来的危险状态,需要在收放闸门前对闸槽提前进行认真的观察检测,再三确认对闸门没有影响的情况下,才能落放闸门。

张守楠^[15]等人将Saab公司的Seaeye FALCON机器人应用于小湾水电工程闸门的检测,收到了良好的效果,积累了工程经验。小湾水电工程大坝坝高292.5 m,在其第三阶段蓄水之前,泄洪建筑物进水口处水深就可达70 m以上。根据大坝的结构及现场的环境条件,FALCON机器人采用了典型的ROV作业方式,本体与显控台分离,显控台放于大坝坝顶,ROV机器人本体利用船只运载至下水观测点附近,从坝顶将脐带缆放至作业船只,并留出足够的作业余量,再由工作人员在水面连接电缆和ROV本体,通电检查后直接从水面入水。

该案例中,ROV水下机器人使用了声纳和水下摄像机配合完成检查作业。通过声纳扫描的图像数据,可以掌握坝体建筑物水下部分的状态,主要用于操作人员对ROV进行水下定位及操作。在ROV从低孔门洞进入以后,采用水下摄像机近距离观察及声纳扫描整体观察的方式来进行作业。从检测数据来看,使用FALCON ROV发现了底坎淤积堆积状况,为门槽清理提供了依据,为闸门开落提供了安全保障依据。

4.2 坝体检测 水利大坝混凝土表面包括在水下部分随着时间推移,不可避免会出现裂缝、空洞等缺陷,尤其是在大坝刚建好服役的初期内部压力的释放,裂缝产生的速度会加剧,需要进行及时定期检查。

李钟群等^[16]采用ROV在永康三渡溪水库、杨溪水库、金华沙畈水库等工程的大坝水下进行了实际检查。实际检测中,为了对可能发现的缺陷进行精准定位以及作业的分布进行,对大坝防渗面进行了人工分块分区,并且通过水平方向上的岸上桩号以及垂直方向的水深传感器进行精确定位。根据水下环境的情况,选择水下摄像头或二维多波束声纳进行坝面检测,当人工在水面发现缺陷出现

时,通过笔记本电脑对图像资料以及当前ROV的定位信息进行保存。实际检测结果表明:ROV可以大大的提升检测效率,基本在1个星期内完成1个水库的检查工作。

杨超等^[17]以新安江水电站大坝水下裂纹检测应用需求,针对复杂水下环境对水下机器人裂纹检测平台硬件配置和运动控制提出了要求,进行了裂纹平台设计、顶流动力定姿算法和容错控制算法的研究,缺陷定位采用了喷墨示踪的方法。其水下机器人在天荒坪水电站进行了实际使用。

4.3 消力池或水垫塘底板检测 消力池或水垫塘是常见的消能形式之一,受到泄洪过程的冲击,消力池或水垫塘的底板不可避免会出现表面蜂窝麻面、错台挂帘、气泡等缺陷,进而对大坝带来安全隐患。

王祥等^[5]将ROV应用于某水库的消力池冲坑的实际检测。该水库泄洪闸段下游的消力池布置在主河床偏左岸,由于消力池长度不够,消能效果不佳,泄洪水流对消力池底板及前沿基础冲刷腐蚀十分严重。为了在水质差、流态不稳的复杂情况下进行检测,该案例中融入了视频摄像技术、多波束前视声纳技术,该技术可对百米范围内的水下结构、地形状况、淤泥和结构破损等问题进行全方位扫描。该案例的声纳扫描结果表明,消力池底板前沿基础的腐蚀情况严重,后经实测验证基本属实。

5 水下机器人在水利水电工程应用的发展趋势

5.1 全自主水下机器人检查 ROV遥控水下机器人需要由电缆与母船相连,电缆承担供能和通讯介质两项功能,根据检测深度实现电缆收放,细长的电缆悬在水下成为水下机器人最脆弱的部分,大大限制了机器人的工作半径和工作效率^[14],在应用过程中往往出现线缆易缠绕及难以发现大坝渗漏点等问题。随着人工智能、控制技术的发展,基于AUV技术的水利检测技术,将逐步完善,可以完全自主完成水下检测任务,无需人工干预,最大限度地提高了工作效率,以及缆绳带来的不便^[18]。

5.2 内部检查 目前,水下ROV系统在工程实际中只能发现工程设施的表面情况,无法检查内部缺陷。另一方面,在水体浑浊和表面附着物较多的条件下仅依靠声纳系统无法实现细致的缺陷检查,对裂缝、空洞等一些常规表面缺陷,无法准确测量其长度、宽度、深度^[16],大大限制了水下机器人的检测应用场景。随着水下无损探伤工艺和设备的提升,水下机器人检修系统将携带更丰富的无损探伤设备,对缺陷进行更加准确的判断,来指导修复工作。

5.3 水下维修 在漫湾水电站的工程实践中,已经采用水下浇筑混凝土的方法对水垫塘底板进行补强加固,并取得了良好的效果^[19]。随着水下机器人负载能力和本体稳定性的增强,操作结构的更加灵活,水下机器人将不但具备水下检测的功能,还将越来越多搭载各种机械手和 underwater 工具,替代潜水员进行水下加固维修的工作,能够有效应对坝前淤积和发电站进水口拦污栅前杂物的清理工作、泄洪涵洞及闸门的密闭、泄洪检修闸门门槽的维修工作,进一步增强水利水电工程的运维水平。

6 结语

综上所述,有缆遥控水下机器人是水利水电工程检测的主要载体形式,实际应用中需要解决的关键技术主要有负载和水流扰动下的运动控制;低能见度、浑浊水体、杂质水环境中的缺陷识别;长时间、大范围内的精确定位与导航。在已有典型应用中,水下机器人通过搭载摄像头和声纳检测设备,可对闸门、坝体、消能等设施进行水下结构、地形状况、淤泥和结构破损进行全方位的检测。随着控制技术、检测设备、负载能力、本体稳定性的技术提升,水下机器人将通过全自主的作业形式采集工程设施内外部的缺陷信息,并且完成水下加固维修的工作,进一步保障水利水电工程的长期安全运行,更好发挥其应有的社会和经济效益。

参 考 文 献:

- [1] 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.
- [2] 贝全荣. 水下工程检测技术及在堤坝上的应用[J]. 大坝与安全, 2004(1): 37-39.
- [3] 艾凯, 胡立明. 水下电视在病险水库检测中的应用[J]. 长江科学院院报, 2003, 20(2): 54-56.
- [4] 周光华, 罗超文, 何迈. 株树桥水库水下渗漏检测[J]. 人民长江, 2001, 32(12): 33-34.
- [5] 王祥, 宋子龙. ROV 水下探测系统在水利工程中的应用初探[J]. 人民长江, 2016, 47(2): 101-105.
- [6] LIU S, WANG D, POH E. Output feedback control design for station keeping of AUVs under shallow water wave disturbances[J]. International Journal of Robust and Nonlinear Control, 2009, 19(13): 1447-1470.
- [7] 曾德伟, 吴玉香, 王聪. AUV 深度的神经网络辨识和学习控制仿真研究[J]. 计算机工程与应用, 2017, 53(6): 258-263.
- [8] CUI R, YANG C, LI Y, et al. Adaptive neural network control of AUVs with control input nonlinearities using reinforcement learning[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 2017, 47(6): 1019-1029.
- [9] WANG Y, GU L, GAO M, et al. Multivariable output feedback adaptive terminal sliding mode control for underwater vehicles[J]. Asian Journal of Control, 2016, 18(1): 247-265.
- [10] BESSA W M, KREUZER E. Sliding mode control of a remotely operated underwater vehicle with adaptive fuzzy dead-zone compensation[J]. Pamm, 2011, 11(1): 803-804.
- [11] 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.
- [12] 许竞克, 王佑君, 侯宝科, 等. ROV 的研发现状及发展趋势[J]. 四川兵工学报, 2011, 32(4): 71-74.
- [13] 商承超, 王伟, 谢广明, 等. 水下机器人定位方法综述[J]. 兵工自动化, 2013(12): 46-50.
- [14] 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.
- [15] 张守楠, 李洪佳, 黄明辉. FALCON ROV 在小湾电站大坝检测中的应用[C]. 中国国际救援论坛, 2010.
- [16] 李钟群, 孙从炎, 蒋晓旺, 等. 水下机器人在浙江省水库大坝检测中的初步应用[J]. 浙江水利科技, 2010(3): 57-59.
- [17] 杨超. 大坝机器人渗漏检测系统与定姿控制研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2017.
- [18] MALLIOS A, RIDAO P, RIBAS D, et al. Toward autonomous exploration in confined underwater environments[J]. Journal of Field Robotics, 2016, 33(7): 994-1012.
- [19] 仲洪滔, 王国鹏, 郭士锋. 漫湾水电站水垫塘底板水下补强加固工程[J]. 西北水电, 2006(2): 25-27.

Application status and development trend of underwater robot in water and hydropower engineering detection

LI Yonglong^{1,3}, WANG Haoran^{1,2}, ZHANG Hua³

(1. Sichuan Energy Internet Research Institute, Tsinghua University, Sichuan, Chengdu 610000, China;

2. Department of Hydraulic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

3. College of Information Engineering, Southwest University of Science and Technology, Sichuan, Mianyang 621010, China)

Abstract: Underwater robot has become the most potential underwater development tool for intelligent detection of water projects, and has a large development space, which has very important application value for the reinforcement of water projects and the dam daily safety management. This paper summarizes the typical application scene and detection practice status of underwater robot in water and hydropower projects. Combined with the development of technology, this paper summarizes and analyzes the key technical points of underwater robot, and prospects the applicability and development trend of underwater robot in the field of water projects.

Keywords: Underwater Robot; Underwater detection; Intelligent operation and maintenance

(责任编辑: 杨 虹)