

三维成像声纳技术在水下结构探测中的应用

李斌¹, 金利军², 洪佳¹, 何恺恺³, 陆小蕾³

(1. 浙江省水利科技推广与发展中心, 杭州 310012; 2. 浙江省钱塘江管理局, 杭州 310016;

3. 浙江钱江科技发展有限公司, 杭州 310012)

摘要: 由于受到水利工程水下工作环境的制约, 常规的隐患探测方法很难实现对水下工程安全隐患的准确探测, 本文在对常用水下探测技术(设备)及其应用发展情况进行探讨的基础上, 介绍了三维实时声学成像声纳系统基本功能, 并在岩石岭水库和坎门渔港防波堤对该系统的功能和效果进行了探测。结果表明: 该系统可以快速、准确地对水库、海塘(堤防)等水利工程水下结构进行安全隐患探测, 实时生成连续、清晰的三维图像, 且具有较强的适用性, 可以为水利工程建设 and 安全运行管理提供数据参考。

关键词: 水下结构; 三维声纳; 隐患探测; 三维图像; 水利工程

中图分类号: TU745.39

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2015)03-0184-05

Application of three – dimensional imaging sonar technology in detection of underwater structure

LI Bin¹, JIN Lijun², HONG Jia¹, HE Kaikai³, LU Xiaolei³

(1. Science and Technology Promotion and Development Center of Water Resources, Hangzhou 310012, China;

2. Qian Tang River Administration of Zhejiang Province, Hangzhou 310016, China;

3. Zhejiang Qianjiang Technology Development Co., Ltd. Hangzhou 310012, China)

Abstract: Due to the restriction of work environment of water conservancy engineering underwater, the conventional hidden danger detection methods are difficult to achieve accurate detection of safety hidden danger of underwater engineering. On the basis of discussion on common used underwater detection technology (equipment) and application development, this article introduced the basic function of three-dimensional real time sonar imaging system, and practiced the technology in Yanshiling Reservoir and Kanmen fishing port breakwater. The result shows that the system can quickly and accurately detect the underwater safety hidden trouble to water conservancy project such as reservoir, seawall (dike), and can generate continuous and clear three-dimensional image, and has stronger applicability and can provide the data reference for the construction, safety operation and management of water conservancy.

Key words: underwater structure; three-dimensional sonar; hidden trouble detection; three-dimensional image; water conservancy engineering

水利工程安全隐患按照位置不同可以分为水上部分和水下部分两类, 水上部分可以采用常规技术手段进行隐患排查, 如眼看、耳听、手摸、脚踩等直观方法, 或辅以锤、钎、钢卷尺等简单工具对工程表面和异常现象进行检查量测^[1], 相比而言, 水下部分的安全隐患具有发现难、处理难、破坏性强、突发性强等特点, 致使水下部分安全隐患很难采用常规技

术手段进行探测和排查。为了解决这一技术难题, 本文引入了三维实时声学成像声纳系统 EchoScope (以下简称 ES), 该系统依靠声纳设备发出的声波, 以及该声波触碰到目标物后反射的回波进行定位和成像, 能够实时、准确地生成水下结构三维图像, 实现对水下隐患的探测^[2]。

收稿日期: 2015-01-21; 修回日期: 2015-04-13

基金项目: 浙江省水利科技计划项目 (RB1317)

作者简介: 李斌 (1979-), 男, 山东泰安人, 硕士, 工程师, 主要从事水利工程运行管理方面研究。

1 声纳技术的应用发展概况

1.1 各种水下探测设备的特点

目前水下探测设备和方法比较多,如水下机器人、浅地层剖面仪、多波束声纳、侧扫声纳、定点三维声纳等,但由于水利工程水下环境、工程结构、地质条件等比较复杂,某些设备在进行水下探测时,在探测精度、效果以及适用范围等方面存在不足,如水下机器人可以实时形成并传输高质量图像,但图像质量受水质环境影响较大,在水质较差环境中的成像不够清晰,且机器人的摄像头等装置容易损坏,在静水水域使用时效果较好,而流速过快的水域则无法精准操作等;浅地层剖面仪主要用于水下地质调查(如河流冲刷、水库淤积等),设备笨重、尺寸偏大,运输携带不方便,且探测深度受环境影响较大,适用范围比较有限;多波束声纳可以形成比较清晰的水下三维图像,但对于水下结构的细部构造无法立体的展现出来,对部分声影遮挡区域成像不佳,给隐患排查带来一定的不确定性;侧扫声纳只能观察水下地貌的变化,对物体的大小、深度只能凭经验和记录信号粗略计算得出,对工程计量作用不大。

1.2 声纳技术研究及应用现状

国外专家和技术人员对声纳技术的应用研究起步比较早,已有近100年的发展历史,按工作方式的不同,声纳大致可分为2类:主动声纳(或回声定位声纳)和被动声纳(噪声测向声纳或噪声测距声纳)。目前国内外水下探测仪器基本采用主动声纳系统,主动声纳原理是由自身发射声波,通过接受目标的回波来测定其方位、距离和径向速度等参数,主要分为侧扫声纳、合成孔径声纳、多波束探测系统和浅地层剖面仪等^[2]。

国外学者对声纳技术的研究和应用比国内更加普遍,且研究范围更广,不仅有理论和技术研究,还有成品应用,而国内学者对声纳技术的应用研究主要集中在应用软件和设备功能探索方面,且很少有成品应用于实际工作,其研究成果的实用性有待进一步验证。如赵建虎等^[3]提出了基于两套声纳图像信息融合获取高质量海床地貌图像的思想和方法,并给出了适合声纳图像融合的最优算法及完整的两套图像融合过程;王朋等^[4]在分析三维成像声纳波束形成算法原理基础上,设计了TMS320C6678处理芯片的三维成像声纳二维波束形成算法的并行实现方法,有效地减少了波束形成的计算量;卢亮^[5]在三维声纳成像算法仿真研究中,利用L型基阵特殊的阵列形式,将一

维MSB-RMU算法扩展到二维,用于三维成像;易媛媛等^[6]验证了多波束可对进出港口船舶底部进行扫描并形成外貌特性图像的功能。洪一帆等^[7]、柳俊峰等^[8]、苏程等^[9]、梁民赞等^[10]、万华等^[11]的研究主要集中在改变声纳信号的收集、搜索、处理方法,以及成像系统的优化等方面。

三维成像声纳是指能够获得距离、水平、垂直三维空间的目标信息的一种主动声纳技术。共分两种,一种是采用一维线阵,通过其机械平移合成二维面阵,将机械扫描各位置获取的二维数据用计算机合成三维图像;第二种是直接采用二维面阵,从而在水平、垂直、距离三个方向上直接获得分辨率,通常是先形成二维序列图像,然后进行计算机三维合成的方法,第二种类型的代表即为EchoScope系列三维声纳^[12-13],该声纳系统比较适合水下结构隐患探测,目前该技术广泛应用于世界各地军用、警用和民用领域,包括港口、水下施工、水底勘探、疏浚监控、水下地形勘测和水下建筑物探测等工程领域^[14]。

2 ES 系统介绍

2.1 系统组成与功能

ES通过水利部“948”项目引进,该系统主要由声纳头、电脑终端(PC)、电源以及设备安装支架三部分组成,声纳头通过以太网链路 with PC 连接,声纳头包含发射和接收阵,发射阵沿锥形方向以 $50^{\circ} \times 50^{\circ}$ 开角发射声学信号,由水听器接收阵接收反射回波,测距范围1~150 m。接收阵为 48×48 个水听器传感器组成的矩阵,可同时形成16384个声学波束,形成三维影像,其更新速率最多可达20次/s。

根据检测环境和对象的不同,声纳头有靠岸加固和随船移动(固定在船舷上)两种布放方式,目前第2种布放方式较为普遍,在实际操作时,通过调整UIS软件参数,可在三维环境下实时显示每个声学图像所对应的强度、坐标和距离等数据。同时,调整声纳头的发射和接收角度,可全方位实时观察目标,获取最佳探测效果,有效解决了传统单一系统使用时的弊端^[4]。但该系统只能在设备静止不动的情况下对目标进行探测,无法在设备行进中实现连续探测,且水域的风浪及船体的摇摆对成像质量有一定影响,为此,给该系统配备了GPS导航定位系统和姿态稳定系统,使其具备不间断连续探测和准确定位等功能,提高了系统在水利工程探测中的工作效率和实用性。



图1 ES系统组成

2.2 ES系统应用范围及其特点

目前,ES 系统在国内水利工程中的应用主要包括:水工建筑物水下结构安全监测、堤防护坡水下检查、水库库底和河道淤积、桥墩水下冲刷等方面,为工程除险加固、安全鉴定以及水下清淤等工作提供基础数据^[3],还可应用于水下沉船搜救和考古、探测和排除水下不明物体(如炸弹、航道障碍物等)检查和铺设海底管线等领域。

系统对水利工程水下结构进行三维探测,可全面掌握其工程现状,通过 PC 上的 UIS 软件,可实时读取工程结构的三维坐标和形状特征等数据,便于了解工程实际情况,为工程管理和安全运行提供数据参考,极大地提高了建筑物的安全管理综合系数^[15]。ES 系统可借助计算机专用软件绘制、显示水下地形图和施工断面图等工程图,极大地提高了水下施工作业的效率和测量精度,及时为水下开挖、回填等工程提供准确的数据,保证水下施工质量。

ES 系统与其他探测设备相比,在水下结构探测方面具有如下优点^[14]:

(1)能够实现水下目标实时探测,增强复杂 3D 结构的成像效果,诸如桥墩、水闸、泄水洞等,可以实时形成三维图像,比较直观、形象;

(2)集探测、跟踪、成像于一体,只要在设备探测范围内,均可实现远距离水下移动目标的探测、跟踪和静止目标的定位,并形成相应的三维图像;

(3)与可视化水下探测相比,不受探测水域水质的影响,可以在零能见度环境中正常工作;尤其是出江出海水闸及海塘等水域多数呈重度浑浊,对这些工程的水下部位检查,该设备具有独有的优势;

(4)与水下机器人相比,不受周围水流及波浪的影响,在静水和动水条件下均能进行准确探测。

3 工程实践应用

自 2011 年设备引进以来,课题组通过长时间的

学习培训及应用研究,不但很好地掌握了该套系统(ES)设备的应用方法,并且在许多水利工程上进行了拓展应用,取得了良好的效果。下面介绍一下其在富阳岩石岭水库和玉环坎门渔港防波堤修复工程中的应用情况。

3.1 富阳岩石岭水库水下安全检查

岩石岭水库位于富春江支流,总库容 4 460 万 m^3 ,是一座以灌溉为主,结合防洪、发电、养殖等综合利用的中型水库。该水库大坝长 175 m、坝底宽 36 m,坝顶宽度 7 m,为挑流式溢流坝,坝体为混凝土砌石坝,非溢流坝段坝顶 62.64 m。库区布置有大量网箱和网箱,本文主要针对库区部分水下地形(图 2)、岸坡(图 3)、库区水下渔网(图 4)、桥墩(图 5)等进行安全检查。

通过图像分析可以得出,库区小岛水下地形、库区岸坡分布、水下渔网布置以及桥墩水下结构情况均能比较完整、清晰展现出来,库区及岸坡水下岩体结构完整,渔网布置完整,桥墩轮廓清晰,无破损情况。可见三维实时声学成像声纳系统可以对水下地形、目标物、工程结构等实现比较全面、完整的探测,因此,该系统可以通过对水库大坝、水闸地板、河道堤防等进行水下探测,获得大坝坝体水下塌陷、水闸地板裂缝、不均匀沉降以及河道堤防水下冲刷情况等数据。

这些数据以三维图像为探测成果,可以实现从不同角度对破损或者隐患部位进行观察和识别,这是其他水下设备所不具备的功能,工程管理部门可以根据探测数据制定水库、水闸、堤防的维修养护或除险加固方案,做到及时发现问题,尽早解决问题,确保水利工程的安全运行。但实际应用过程中发现对于工程破损比较轻微、隐患部位变形不明显的情况,该系统无法进行比较精确的探测,需要跟水下机器人等其他水下设备配合使用,可以一定程度上弥补精度不够的问题。

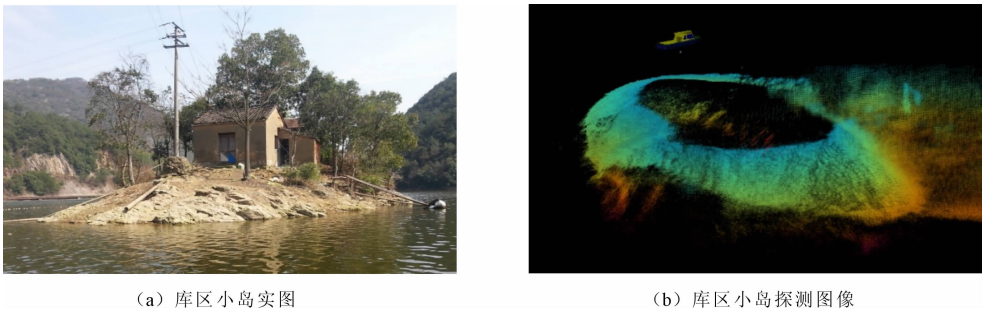


图2 库区小岛实图与探测图像

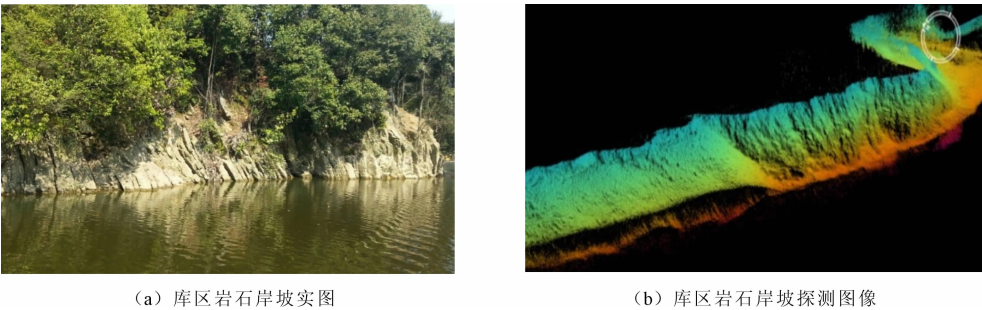


图3 库区岩石岸坡实图与探测图像

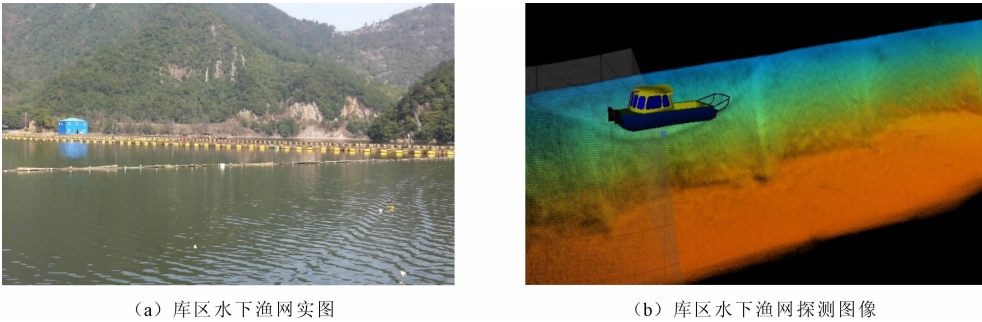


图4 库区水下渔网实图与探测图像

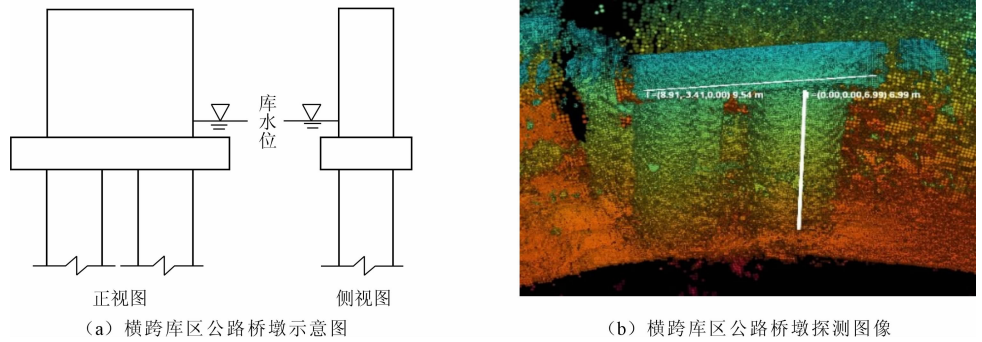


图5 横跨库区公路桥墩实图与探测图像

3.2 玉环坎门渔港防波堤修复工程水下施工质量检查

玉环岛坎门渔港防波堤西起黄门赤礁,东至坎门大山墩之间,总长1 846.91 m,其中口门宽为216.91 m,东堤长630 m,西堤长1 000 m。玉环坎门中心渔港防波堤修复工程是在现有防波堤基础上按照 100

年一遇的潮位和波浪要素进行整体修复加固改建。修复加固规模为防波堤东堤和西堤全段。项目自2014年3月19日开工建设,总工期26个月。

本次三维声纳探测区段为西堤施工段,主要探测目的是检查防波堤迎浪向水下施工质量是否达到设计标准,以及为建设单位提供水下施工方量计算

提供参考数据。

根据工程建设单位的实际需求,将三维声纳探测原始数据经过图 6 一系列数据转换和处理,得到西堤施工段图,图 7,按照每隔 50 m 取一断面,得出施工堤段的断面图(图 8b)。

通过数据和图像分析可以得出,经过水下探测形成的三维图像可以比较清晰的呈现防波堤扭王字块水下布放情况(图 7b)和水下施工开挖情况(图 8a),可以确定每个扭王字块水下具体坐标位置、水下开挖的深度、宽度等具体数据。将经过数据转换与处理后形成施工断面图与工程设计图进行拼接,得出工程水下开挖情况断面图(图 8b 中设计断面与实测断面对比情况),经过比对发现,大部分区段扭王字块排放符合要求,个别区段存在布放不到位的情况;水下开挖施工情况基本到位,但由于潮涌

和风浪的影响,在上部施工前,部分区段淤泥回填比较明显,给施工方量计算带来一定误差,因此,水下开挖完成后,应尽快进行方量计算和上部预制板施工,防止淤泥回填,影响工程质量。另外,由于该系统是采用发射和接收声学信号进行工作,所以只能探测工程表面平整度、完整性等情况,而对于多排扭王字块排列的内部情况则无法探测和识别。

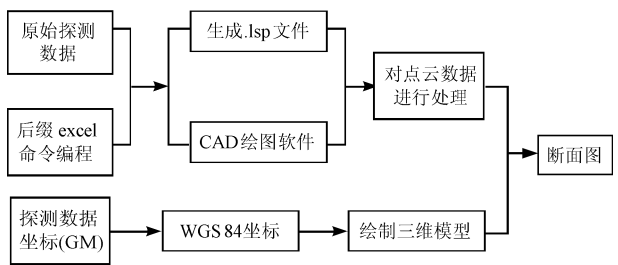
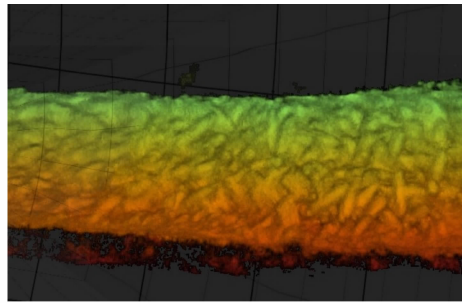


图 6 数据转换与处理流程图

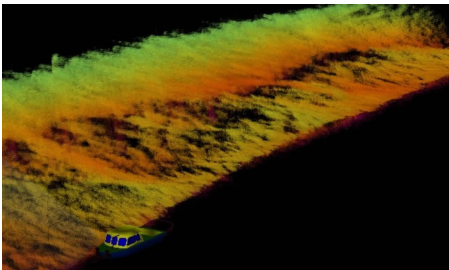


(a) 西堤扭王字块水上布放实景图

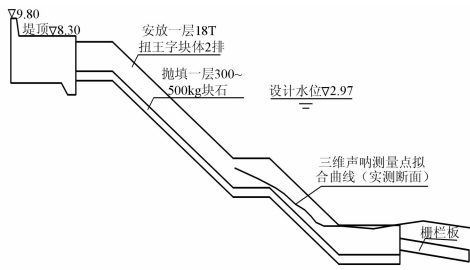


(b) 西堤扭王字块水下布放情况图像

图 7 西堤王字块水下布放情况



(a) 西堤水下开挖情况成像图



(b) 西堤水下开挖情况断面图

图 8 西堤水下开挖情况

4 结 语

通过对三维实时声学成像声纳系统(ES)的研究和应用,可以发现三维成像声纳技术在水下结构探测方面具适用性强、图像直观等优势,但也存在探测精度不够高等不足,具体如下:

(1)通过该系统定期对水利工程水下结构进行检查,可以发现水库大坝坝体水下破损及塌陷情况、水闸地板裂缝和不均匀沉降,以及堤防水下冲刷情

况等安全隐患,准确掌握水下部分结构安全隐患的位置、尺寸等数据。

(2)通过对水利工程的施工过程进行实时监测,以及图像分析和软件计算,可以准确掌握水下开挖、回填、清淤等施工范围和方量,以及水下构件的布放位置情况,同时可以获得水下结构的表面平整度和完整性等相关方面的图像和数据。

(3)由于受到探测原理和系统功能等方面制
(下转第 192 页)

弯刚度的静力识别试验具有较高的稳定性和精度,但试验条件要求较高。结合静力和动力识别数据可以增加识别结果的可信度。

4 结 语

本文结合静力试验识别结果和动力试验识别结果,对比分析各自的优缺点,完成了对该小比例 U 模型的结构性能评价,可得出以下结论:

(1)基于抗弯刚度和柔度曲率的损伤识别方法均能实现对 U 形梁的损伤识别,且识别结果基本一致。

(2)从动力实测结果来看,柔度曲率曲线除了在损伤处有明显突变外,在其它地方也有小的突变,说明基于柔度曲率的动力试验识别结果容易受到多种因素影响从而影响识别精度,在小损伤的情况下可能会造成识别误差。

(3)运用动静力测试数据对损伤识别精度的提高不很明显,结合动静力测试数据可增加对该 U 形梁识别结果的可信度。

参考文献:

- [1] 苏建华. 地铁 U 型梁的静载破坏试验分析[J]. 特种结构, 2008, 25(3): 84-86.
- [2] 庄严. 城市轨道交通 U 型梁静载试验研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2011.
- [3] 邓苗毅. 基于静载试验的梁桥结构损伤系统识别研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2003.
- [4] 崔飞, 袁万城, 史家钧. 基于静态应变及位移测量的结构损伤识别法[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2000, 28(1): 5-8.
- [5] 蒋华. 基于静力测试数据的桥梁结构损伤识别与评定理论研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2005.
- [6] 王玉珏. 基于柔度法的损伤识别研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2007.
- [7] 陈立. 基于柔度曲率矩阵的结构损伤识别研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2009.
- [8] 唐小兵, 沈成武, 陈定方. 结构损伤识别的柔度曲率法[J]. 武汉理工大学学报, 2001, 23(8): 18-20.
- [9] 马永欣, 郑山锁. 结构实验[M]. 北京: 科学出版社, 2001.
- [10] 胡锡勇, 卢文胜, 沈伟明. 预应力混凝土简支梁小比例结构模型相似关系[J]. 结构工程师, 2011, 27(1): 110-117.

(上接第 188 页)

约,该系统的水下探测精度还有待提高,如在探测宽度比较小的裂缝(厘米以下级别)方面存在不足;同时该系统只能探测工程表面情况而对工程内部结构和隐患(如坝内渗流、混凝土内部质量缺陷等)的探测存在不足。

参考文献:

- [1] 叶舟. 水库安全管理[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2012.
- [2] 戴林军, 郝晓伟, 吴静, 等. 基于三维成像声纳技术的水下结构探测新方法[J]. 浙江水利科技, 2013, 41(3): 62-65.
- [3] 赵建虎, 王爱学, 郭军. 多波束与侧扫声呐图像区块信息融合方法研究[J]. 武汉大学学报, 2013, 38(3): 287-290.
- [4] 王朋, 任宇飞, 黄勇, 等. 基于 TMS320C6678 三维成像声纳信号处理算法的设计与实现[J]. 海军工程大学学报, 2014, 26(2): 85-90+112.
- [5] 卢亮. 三维成像声纳成像算法仿真研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2010.
- [6] 易媛媛, 袁晓宇. 一种多波束声纳在水下安检中的应用[J]. 机械管理开发, 2013(2): 73-74.
- [7] 洪一帆, 宋坤坡, 夏顺仁, 等. 三维成像声呐图像后处理与可视化[J]. 计算机工程, 2011, 37(22): 196-197.
- [8] 柳俊峰, 章新华, 许林周. 动态规划算法在被动声呐目标检测中的应用[J]. 舰船科学技术, 2012, 34(3): 95-98.
- [9] 苏程, 俞伟斌, 倪广翼, 等. 深水多波束测深侧扫声呐显控系统研究[J]. 浙江大学学报(工学版), 2013, 47(6): 934-943.
- [10] 梁民赞, 孟华, 陈迎春, 等. 水声环境复杂性对声呐探测距离的影响[J]. 舰船科学技术, 2013, 35(4): 45-48.
- [11] 万华, 周凡, 胡银丰. 水下三维场景实时成像系统[J]. 计算机工程, 2013, 39(12): 280-284.
- [12] Rolf K H, EehoseoPe1600 - Realtime acoustical 3 - Deam- era[J]. Underwater Systems Design, 1995, 5: 32-34.
- [13] 唐利娜. 水下三维声成像及声呐图像处理技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2009.
- [14] 戴林军, 姜宇强, 朱振华. 三维成像声纳技术及其在水利工程中的应用[J]. 浙江水利科技, 2013, 41(5): 54-56.