



基于 ROV 等载体的水下搜救流程综述

顾临怡^{1,3}, 宋琦^{1,3*}, 殷宏伟^{2,3}, 贾杰^{1,3}

1. 浙江大学流体动力与机电系统国家重点实验室, 杭州 310027

2. 杭州宇控机电工程有限公司, 杭州 310015

3. 蓝天救援队杭州分队, 杭州 310027

* 通信作者. E-mail: sq-q@zju.edu.cn

收稿日期: 2017-12-25; 接受日期: 2018-03-30; 网络出版日期: 2018-08-30

国家重点研发计划 (批准号: 2017YFC1404704) 资助项目

摘要 随着水下机器人技术的飞速发展, 水下搜寻与救捞朝着精细作业方式发展. 本文将搜救流程分解为大面积声学扫描与疑似点标识、近底声学成像与疑似点辨认、坐底声学精确定位与标志物投放、目标近距离观察与挂钩救捞/海底非开挖穿缆工程与织网救捞 4 个阶段, 综述了各阶段所采取的搜寻与救捞方法、需要的搜寻与救助工具、搜救载体, 以及国内外的典型成功案例.

关键词 水下搜救, 水下机器人, ROV, 声呐, 作业工具

1 引言

随着水下机器人技术的飞速发展, 水下搜寻与救捞不再局限于传统的盲搜、拖网搜救等传统搜救方式, 而是朝着精细作业、综合作业方式发展, 水下机器人的作业能力强、人机实时交互的信息量大, 在水下精细搜寻与确认、最终救捞上具有很大优势. 然而, 如果搜救团队没有完整地各类水下机器人、搜寻救助工具的优势、短板和适用场合, 甚至不了解搜救的作业方法, 那么在沉水事件突然发生时, 就盲目地使用或租用能力单一的搜救载体, 不仅会耗费大量的人力物力, 还会错过搜救的黄金期. 因此理清水下搜救流程, 比较各种搜寻与救助方法的优缺点、适用场合, 以及需要配置的搜寻救助工具与搜救载体, 完善不同搜救目标和搜救阶段的最优搜寻或救捞方案, 是非常必要和迫切的.

通常搜救人员对沉水事件发生水域的水底信息状况了解程度有限, 而搜救流程是一个从粗到精的过程, 大致分解为 4 个阶段: (1) 粗扫阶段, 即大面积声学扫描与疑似点标识; (2) 精扫阶段, 即近底声学成像与疑似点辨认; (3) 定位阶段, 即坐底声学精确定位与标志物投放; (4) 打捞阶段, 即目标近距离观察与挂钩救捞/海底非开挖穿缆工程与织网救捞. 本文针对不同搜救目标和搜救阶段, 详细介绍了水下综合搜救体系中的搜救流程以及不同搜救阶段的方法、工具及载体, 并通过实际案例介绍一套面向目标与场景的基于 ROV (remotely operated vehicle) 等载体的水下搜救方案优选流程, 对于提高搜救能力具有指导意义.

引用格式: 顾临怡, 宋琦, 殷宏伟, 等. 基于 ROV 等载体的水下搜救流程综述. 中国科学: 信息科学, 2018, 48: 1137–1151, doi: 10.1360/N112017-00283
Gu L Y, Song Q, Yin H W, et al. An overview of the underwater search and salvage process based on ROV (in Chinese). Sci Sin Inform, 2018, 48: 1137–1151, doi: 10.1360/N112017-00283

2 大面积声学扫描与疑似点标识的方法、工具及载体

大面积声学扫描与疑似点标识即为粗扫阶段, 其过程为: 船底或水下机器人安装换能器收发阵列(声呐探头), 换能器向海底发射声波带, 船或水下机器人在航行时, 线动成面, 实现大面积声波扫描, 同时可以接收海底地形以及可疑目标物反射和散射的声波, 对比不同波束角下获得回波的时间, 得到精确的水深信息, 获得高精度的水下地形数据, 绘制包括可疑目标物在内的海底地形图, 再通过读图初步锁定疑似点, 缩小精扫阶段的作业范围, 对可疑目标物进行标识^[1]. 近年来多波束测深在全海深、高测量精度、高分辨率以及集成化等方面都取得突破性的进展^[2]. 国外的前沿产品有 R2SONIC 公司的 SONIC 2024 宽带超高分辨率多波束测深仪¹⁾、ELAC 公司的 SeaBeam3012 型全海洋深度多波束测深系统等.

2.1 大面积声学扫描与疑似点标识的方法

水下地形扫描的方法包括: 机载激光测深、侧扫声呐测深、多波束测深等. 机载激光测深技术利用了光在海水中的传播特性, 在激光器发射出衰减系数最小的蓝绿激光后, 接收器分别接收海面反射和海底反射的激光, 根据接收时间差计算水深; 机载激光测深的高效率、全覆盖特点适用于浅水区域的扫描测深^[3]. 侧扫声呐的基本工作原理请参考文献^[4]中的图 2.2, 利用水下机器人等载体安装的换能器发出声脉冲, 当声波传播至海底, 海底反射或散射的回波陆续按原路返回至换能器, 而硬的、凸出的地形返回的声波强, 软的、平坦的或凹陷的地形返回的声波弱, 被凸出地形或目标物遮挡的区域则无回波^[4]. 多波束和侧扫声呐的基本工作原理相似, 均是利用换能器发出声脉冲并接收海底反射或散射的回波, 分析回波获取信息. 不过两者对回波接收和处理方式不同, 侧扫声呐是根据回波的强度、次数、时间间隔换算成地形影像图的长短、黑度变化, 多波束则是结合声波波束角以及声波传播的时间获得精确的水深信息, 融合定位及姿态信息后得到海底地形图^[5]. 三者相较而言, 激光在海水中的衰减特性使得激光测深技术多用于沿海浅水区域, 而多波束的应用会受到波束角及水深的限制, 然而其大面积全覆盖的高效率扫描更适合水深更深的水下搜救的粗扫阶段. 目前, 国际上已实现了多波束海底地形和地貌探测的产品有 seabat7125, EM3000 等^[6], 而 QTC 公司通过进一步提供软件数据分析, 可以实现多波束海底底质分类和识别^[7]. 国内多波束海底地形地貌探测技术也已经取得显著进展^[8,9], 但多波束分类尚处于基础阶段^[10]. 总之, 基于多波束测深声呐平台实现海底地形、地貌与识别等大面积扫描作业是最为有效的手段之一.

2.2 大面积声学扫描与疑似点标识的工具

随着电子、材料、计算机等技术的发展, 多波束测深技术在全覆盖测量、全海深测量、高精度高分辨率测量, 以及模块集成化等方面取得突破进展^[2]. 国际上已有成熟的多波束测深产品, 例如 SEABEAM 公司的 Sea Beam 系列、R2SONIC 公司的 SONIC 系列、Atlas 公司的 Hydrosweep 系列、ELAC Nautik 公司的 SeaBeam 系列和 Reson 公司的 SeatBat 系列等, 表 1 为目前世界上几款具有代表性的多波束测深仪产品, 其多支持多频工作, 在体积重量进行小型化设计, 例如 SONIC 产品将声呐处理器嵌入到声呐头中, 大大简化了系统, 更加适用于水下机器人等小型平台搭载, 并且多波束测深系统在测深精度、工作水深级别上足够满足一般水下搜救要求.

1) SONIC 2024. <https://www.r2sonic.com/product/sonic-2024/>.

表 1 代表性多波束测深仪
Table 1 Several representative multibeam bathymetric system

Manufacturer	Product model	Vehicle	Performance index
ELAC Nautik	ELAC SeaBeam 3020	Vessel	Depth rating 50~9000 m, beam width 1°/2°, depth accuracy in accordance with IHO SP44 for depths greater than 100 m
R2SONIC	SONIC 2026	ROV/AUV, vessel	Sounding depth 800 m, beam width 0.45°×0.45° (450 kHz), resolution 1.25 cm
Atlas	Hydrosweep MD/30	Vessel	Sounding depth 5~7000 m, beam width 1°×1°, resolution 6 cm
Reson	Reson SeatBat IDH T50-R	Vessel	Sounding depth 0.5~550 m, beam width 0.5°/1°/2°, resolution 6 mm

2.3 大面积声学扫描与疑似点标识的载体与使用方法

多波束测深系统在努力实现高精度、高分辨测量的同时,在集成度和小型化方面也在不断发展.轻便小型的设备不仅适用于海洋,也适合在水浅船小的内陆湖泊中使用,能够有效降低人力、物力成本.小型化的特性使其在船舶及 ROV 等水下机器人均适用,适应性和灵活性较好 [11].

船载多波束多安装在船只侧舷,通过作业船只的移动来进行大面积扫描工作.根据现场水域情况选择不同类型的作业船只,在扫描区域较小的内陆水库湖区一般选用小型工作船,在扫描区域较大的海洋一般选用大型的作业船只.安装多波束设备时要尽量避免噪声和振动的影响,并保证安装在牢固不活动的部位,且远离船只动力源等噪声源和振动源,船舷边安装 L 字型收放探头支架更有利于探头的使用安全,在无需探测的时候避免船只的航行对探头造成影响与伤害.而水下机器人相较水面船只而言体积小、惯性小,多波束设备的安装对其运行有影响,还需要综合考虑水下机器人和多波束系统的性能需求进行布置,水下机器人多波束测深系统布置图请参考文献 [12] 中的图 11.

3 近底声学成像与疑似点辨认的方法、工具与载体

近底声学成像与疑似点辨认即为精扫阶段,通过侧扫声呐进行近底扫描,返回的声波被声呐的换能器接收并传输到接收机进行放大并处理,最后传输到终端精确显示扫描物体外形和水下声学成像状态,通过分析地形图中显示的疑似目标的形状,从而可以粗略判断辨认可疑目标物是否为真目标.国外的 Klein, Edge Tech, Deep Vision, Konsberg, ATLAS 等公司都有自己成熟的侧扫声呐产品 [13].

3.1 近底声学成像与疑似点辨认的方法

回声探测依然是比较常用和有效的微地形扫描及疑似点辨认手段,近底声学成像与疑似点辨认的工作过程为,水下机器人或拖鱼上携带的侧扫声呐进行扫描,借助拖体上换能器阵列向海底发射声波,在拖曳过程中对海底进行扫描,当海底表面存在地物时,回波被声呐两侧的换能器接收并传输到接收机进行放大并处理,最后传输到终端显示器形成一定宽度的条带式二维声像图,通过解译声学图像中显示的可疑目标物形状 [5, 14, 15],从而可以判断辨认可疑目标物是否为真目标.为适应水下机器人等小平台,声呐系统的换能器阵等负载急需小型化.换能器波束发射多结合相控偏转等技术,原理图请参考文献 [16] 中的图 2.2,通过对线阵中各阵元施加不同的延迟时间改变延迟相位,从而利用简单的数

字电路实现波束发射角度 θ 的偏转, 简化了系统结构^[16, 17].

3.2 近底声学成像与疑似点辨认的工具

近底侧扫声呐是现在比较常用的工具之一. 侧扫声呐有许多种类型, 根据发射频率的不同, 可以分为高频、中频和低频侧扫声呐; 根据发射信号形式的不同, 可以分为 CW 脉冲和调频脉冲侧扫声呐; 根据安装方式的不同, 还可以划分为舷挂式和拖曳式侧扫声呐等²⁾. 侧扫声呐可以通过水下机器人或拖体近底探测, 分辨率很高. 实际使用时, 可以通过校正参数得到无畸变的图像, 经过解译海底地形图像, 辨认判读出目标细节³⁾. 数字化处理技术的应用使得测扫声呐进入全新的发展阶段, 为了适应复杂工作环境、提高分辨率, 双频工作模式正逐渐取代传统的单频工作模式^[13], 国外 EdgeTech 公司的 4125P 是一款便携式高频测扫声呐系统, 其支持双频工作模式, 能够适探测不同工作场景, 采用了全频谱 CHIRP 技术, 具有更高成像分辨率⁴⁾.

3.3 近底声学成像与疑似点辨认的载体

侧扫声呐通常安装于水下机器人两侧或拖鱼上. 由于水下环境恶劣危险, 人的潜水深度有限, 水下机器人已成为水下探测的重要工具. 水下机器人又称为无人潜器 UUV (unmanned underwater vehicles), UUV 分为无人遥控潜水器 ROV 和自治水下机器人 AUV (autonomous underwater vehicle). ROV 是近底扫描或实施辨认的常用载体之一. 它的工作原理是由水面母船通过连接 ROV 的脐带缆提供动力和控制信号, 操纵或控制 ROV, 通过声呐等专用设备进行探测, 还可以通过机械手操作作业工具, 进行水下作业^[18~20]. AUV 则是一种无缆的、自带动力的、自主航行的水下机器人^[21]. AUV 在勘测过程中通过声通讯系统从水面接收艏向、深度、作业等工作指令, 进行海底搜索、录像拍摄、海底探测等一系列勘探作业^[22, 23]. ROV 通过脐带缆与水面母船实现动力、控制信号, 以及数据图像的传输, 而 AUV 无需脐带缆与母船连接, 自身携带动力, 能够实现自主航行. 二者相比, AUV 更加机动灵活、作业范围更加广泛, 而 ROV 不受限于动力, 技术更加成熟^[24].

拖鱼则是一种流线型的稳定拖曳体, 包括拖体前部和拖体后部. 前部由拖曳挂钩、换能器舱、鱼头等组成, 拖曳挂钩用于将拖鱼与拖缆连接, 进而与母船绞车连接, 可以通过调整母船航速和拖缆长度将拖鱼拖曳至合适的工作深度, 实现拖曳功能, 并且能够通过电缆进行信号传递. 后部由电子舱、尾翼、鱼尾等部分组成, 尾翼可以使拖鱼运行更加平稳^[13]. 拖鱼搭载声呐系统, 能够贴底进行勘测, 减少因水深深度导致的误差, 从而获得更高质量和更高分辨率的海底图像.

拖曳式近底扫描可以更快速地对大范围区域进行二次确认, 缩小目标物探测区域, 精确显示扫描物体外形和水下声学成像状态. AUV 受动力限制在扫描时间上不如拖曳式设备, 但能根据预设作业轨迹得到轨迹内的视频数据, 方便搜救作业更详细地确认物体的状态. ROV 有缆式的作业方式虽然限制了水下作业区域, 但强大的动力支持与人机互换的操作模式可以准确且高效地完成对目标物的精细观测与搜救操作, 从而完成最终搜救打捞的作业目的.

2) [装备] 侧扫声呐. http://uzone.univs.cn/news2-2008_138331.html.

3) 侧扫声呐. http://www.gkzhan.com/Tech_news/Detail/170338.html.

4) 4125: ultra high resolution lightweight, portable. <https://www.edgetech.com/products/side-scan-sonar/4125-ultra-high-resolution-lightweight-portable/>.

4 坐底声学精确定位与标志物投放的方法、工具与载体

坐底声学精确定位与标志物投放即为定位阶段,经过粗扫阶段和精扫阶段后,携带着声学应答器的 ROV 向着目标物靠近并在距离目标一定范围内坐底,对 ROV 进行定位并投放标志物.国外的 EvoLogics, iXBlue, EdgeTech 等公司都拥有成熟的商业定位产品.

4.1 坐底声学精确定位与标志物投放的方法

经过粗扫和精扫后,ROV 向着目标物靠近,在离目标 50 m 左右的范围时坐底.通过声学定位系统测定应答器的位置来对 ROV 进行定位,然后在 ROV 的指导下在目标附近人工投放标志物,确保标志物的投放位置离目标距离小于 20 m.投放标志物的目的是为了让 ROV 在潜水的全过程中,都能从声呐的屏幕上看到标志物.如果在目标物附近已经有这样的标志物了,则无需投放.

水下声学定位系统的工作原理是将声学应答器安装于水下机器人上,通过定位系统测定应答器的位置来对设备进行定位.按照声基线的距离或激发的声学单元的距离对声学定位系统进行分类,主要分为 3 类声学定位系统.其中,长基线声学定位系统精度最高,且与水深无关,无需安装电罗经、姿态传感器等,但系统复杂、价格昂贵;短基线精度次之,并且其精度受限于基线的布设,超短基线声学定位系统精度最低,但使用方便灵活,造价低,短基线和超短基线定位均需要结合电罗经、GPS 等,来精确得到水下机器人的大地坐标^[25].

4.2 坐底声学精确定位与标志物投放的工具

由于长基线定位需要布置水下基阵,一般水下搜救作业采用短基线或超短基线定位并依靠一些外围传感器进行校准定位,EvoLogics 公司的 S2CR 型超短基线定位系统⁵⁾,可以在以 33 kbits/s 的速率发送数据的同时进行定位,系统的耐压壳体内还可以加装运动传感器,从而提供母船的纵横摇和艏摇的数据.系统能跟踪 255 个目标,其测距精度为 1.5 cm (静态目标)或 5~10 cm (快速运动目标).该系统已在 ROV, AUV 和其他水下运动体的水下定位中获得广泛应用.iXBlue 公司的 ROVINS 水下光纤罗经惯导系统⁶⁾,最大工作深度可达 3000 m,采用了 Kalman 滤波器提高了操作效率,特别是在精确定位、航向和姿态数据方面得到了巨大的提高.由于传统的声学定位系统各具优缺点,联合式的组合定位模式正逐渐应用到一些作业场景,组合定位系统通常设备更为复杂,但其结合了不同定位系统的优势,往往能提高精度、扩大作业范围,是声学定位的新趋势^[26].

4.3 坐底声学精确定位与标志物投放的载体

坐底声学定位过程一般选择观察型 ROV.此类型 ROV 是由螺旋桨推进系统、摄像照明系统、水下定位与避险声呐、控制系统、机械手系统(可选)等几个部分组成.图 1 为国内杭州宇控机电工程有限公司生产的一款多用途、高适应性的观察型水下机器人——海螺号 ROV,框架尺寸仅为 1.1 m×0.8 m×0.66 m,拥有 5 个 1 kW 的推动器,在同大小级别 ROV 中具有更强大的推力.此类 ROV 更加小型灵活,便于水下定位.

5) R-Series USBL. <https://www.evologics.de/en/products/USBL/index.html>.

6) Survey grade inertial navigation system. <http://www.ixblue.com/products/rovins>.



图 1 (网络版彩图) 海螺号 ROV
Figure 1 (Color online) Conch ROV

5 目标近距离观察与挂钩救捞的方法、工具与载体

目标近距离观察与挂钩救捞以及海底非开挖穿缆工程与织网救捞都为打捞阶段, 这两种救捞方法, 可以根据目标物的大小、易损程度和挂钩难度选择. 挂钩救捞水下打捞适用于较小的、方便挂钩的目标物打捞作业, 目标较小的物体或者重量较轻的物体可以直接使用 ROV 机械手进行抓取, 目标较大或者在水中较重的物体需要特殊的打捞工具配合 ROV 进行打捞, 易碎易坏的目标物则需要更为特殊的打捞工具进行打捞. 美国、日本、法国等国家均有代表性的作业型 ROV, 例如美国 MBARI 的 Tiburon ROV 可根据任务搭载不同作业工具进行锯钻、采样等作业, 而“海马号”与“6000 米级深海科考型 ROV”是国内自主研发的具有代表性的重载作业型 ROV. 另外, 国外典型的商用 ROV 机械手有 Schilling Robotics Systems Inc. 的 Orion 7P、加拿大海洋科学研究所 (ISE) 的 Magnum 7F、Western Space and Marine 公司的 The Arm 66 等^[27].

5.1 目标近距离观察与挂钩救捞的方法

水下光视觉观测能够获得含有丰富颜色和纹理信息的视频图像, 便于理解和识别, 是水下作业中最直接有效、最形象的目标近距离观测方法. 在经过粗扫、精扫、定位并投放标志物后, 通常选择作业型 ROV 返航携带挂钩工具, 继续下潜, 通过标志物的引导逐渐接近目标物, 并根据 ROV 与目标物的距离, 不断调整前视声呐的俯仰角度和量程, 到达目标物附近后, 打开水下电视摄像机进行近距离观察. 当水深超过 30 m 时, 由于自然光线几乎完全被吸收了, 还需要配置照明设备为摄像机提供光源^[28,29]. 当水下环境恶劣、摄像图像不清时, 还需要借助二维或三维成像声呐. 传统的二维成像声呐利用多波束声学原理, 采用超窄波束角和超宽视角, 能对水体中移动或固定的目标物进行实时探测, 从而帮助 ROV, AUV 等完成前视避碰、地形探测和目标物搜寻定位观察作业, 弥补摄像图像不清带来的对打捞作业产生的不确定因素影响^[30]. 三维成像声呐具有更高的分辨率, 可以提供水下目标更清晰的轮廓细节信息, 还可对图像进行三维旋转观测. 当 ROV 运行到合适位置, 机械手进行作业将挂钩工具与被救捞物挂钩, 进行救捞.

5.2 目标近距离观察与挂钩救捞的工具

目标近距离观察需要配置人工照明、水下摄像机、二维或三维成像声呐等设备. 目前最前沿的三维成像声呐以声透镜技术为基础, 提供目标的实时动态视频图像, 质量小、尺寸小, 可以装载到各种 AUV, ROV 上进行水下作业. 三维声呐能够在水质恶劣、能见度很差的混水区域得到较为准确的物体

表 2 代表性成像声呐
Table 2 Several representative imaging sonar

Manufacturer	Product model	Vehicle	Performance index
Teledyne BlueView	BlueView P900	ROV/AUV, vessel, etc.	2D imaging sonar, depth rating 1000 m, beam width $1^{\circ}\times 20^{\circ}$, resolution 2.5 cm
Tritech	Gemini 720im	ROV/AUV, vessel	3D imaging sonar, depth rating 200 m, beam width $90^{\circ}\times 20^{\circ}$, resolution 8 mm
Teledyne BlueView	BlueView BV5000	ROV/AUV	3D imaging sonar, depth rating 300 m, beam width $1^{\circ}\times 1^{\circ}$, resolution 1.3 cm
Sound Metrics 公司	ARIS VOYAGER 3000	ROV/AUV	3D imaging sonar, depth rating 4000 m, beam width $0.3^{\circ}\times 15^{\circ}/0.2^{\circ}\times 15^{\circ}$, resolution 3 mm~10 cm

三维图像, 在摄像头无法清晰观测的情况下为打捞作业提供更多的目标信息^[31]. 表 2 为世界上几款比较有代表性的成像声呐产品, 可以看到成像声呐在图像分辨率上可以达到较为准确的结果.

水下救捞工具多根据打捞物体的实际情况而设计, 目标较小或者重量较轻的目标物可以直接使用机械手进行抓取打捞, 大型目标物如船舶、车辆等物体的打捞作业很难使用 ROV 携带工具提出水面, 最为直接的方法是进行挂钩作业. 大型水下目标物在沉入海底时由于水下地形的不同自身姿态也发生相对变化, ROV 辨别目标物姿态和挂钩点的位置情况后, 进行打捞钩的选型. 一般情况下打捞挂钩工具分为常规的吊机挂钩、水下绳套挂钩, 以及机械卡扣挂钩等类型, 基本满足大多数物体打捞, 吊机根据获取的位置信息将吊钩放入水下对应深度, ROV 使用机械手进行挂钩作业后, 吊机进行打捞. 更为特殊的水下物体, 例如易碎易坏的目标物, 则需要更为专业的水下工具完成作业, 一般针对特殊打捞作业, 打捞工具需要临时进行改造, 所以一机多用的打捞工具相对较少.

此外, 在打捞作业中会经常遇到目标物与其他水下障碍物发生缠绕的情况, 或者是目标物发生大面积淤泥掩埋, 为避免对目标物造成损坏, 提高打捞的成功率, 还要先对水下障碍物进行清除. 此类水下作业工具有多种类型, 括水下液压钳、移动式吸泥泵、水下切割机、柱状提升器等, 多为液压驱动完成动作. 并且工具多为模块化设计, 方便水下机器人实现快速搭载^[27].

5.3 目标近距离观察与挂钩救捞的载体

目标近距离观察与挂钩救捞的载体一般选择搭载机械手系统的作业型 ROV. 表 3^[27] 中介绍了世界上几款代表性 ROV 及配置情况, 从中可以看出深海 ROV 作业系统配置要素相近, 作业工具各有不同, 如图 2 所示. 国内自主研发的“海马号”与“6000 米级深海科考型 ROV”⁷⁾是具有代表性的自主研发重载作业型 ROV.

机械手作业系统则包括了机械手和作业工具. 作业型 ROV 通常配置两个机械手, 其左舷机械手主要为定位型机械手, 主要实现 ROV 悬浮作业的定位功能, 承担部分作业任务, 结构比较简单, 自由度比较少, 一般可采用开关控制. 右舷机械手主要为作业型机械手, 主要负责完成作业任务, 自由度高, 更加灵活, 一般采用主从式电液伺服控制. 较为成熟的水下作业机械手多为欧美国家研制, 如加拿大海洋科学研究所 (ISE) 的 Magnum 7F 机械手, 可以根据需求选择主从式或开关式, 以及添加力反馈

7) 我国首套 6000 米级遥控潜水器 (ROV) 圆满完成首次深海试验, 创造我国 ROV 下潜最深纪录. http://www.sia.cas.cn/xwzx/kydt/201709/t20170930_4867474.html.

表 3 世界几款代表性 ROV 及配置情况
Table 3 Several representative ROVs in world and their configuration

Manufacturer	Product model	Depth rating (m)	Manipulator	Main tools
WHOI	Jason 2/ Medea	6000	Two 7-function manipulators, Schilling Orion, Kraft Predator II	12 cameras, optional tools, samplers, etc.
ISE	HYSUB-150	6000	Two 7-function manipulators	6 cameras; optional tools,such as cutter, sampler, etc.
MBARI	Tiburon	4000	Two 7-function manipulators, Schilling Conan, Kraft Raptor	2 cameras, optional tools,such as drill, sampler, etc.
MBARI (ISE)	Ventana	1850	Two 7-function manipulators, Schilling Titan3, ISE Magnum	11 cameras, drill, etc.
SAAB Seaeye	Jaguar	6000	one 7-function manipulators, one 4-function manipulators, Schilling Orion 7P, Schilling Orion 4R	2 cameras, optional tools, samplers, etc.



图 2 (网络版彩图) (a) “6000 米级” 深海 ROV; (b) “海马号” ROV
Figure 2 (Color online) (a) “6000 m” deep sea ROV; (b) “Hippocampus” ROV

控制方法等, 机械手装载空间小的特点使其更适应 ROV 平台⁸⁾; 美国 Navy DSV-3 深潜器配置的 The Arm 66 采用了力反馈方法和全面的压力补偿方案, 适应 1800 m 水下作业⁹⁾; MAX Rover 和 Panther 等 ROV 上配置的 HLK-HD6 为 6 功能机械手, 可以承受较重的工作载荷, 适用于较小型及中型工作级 ROV¹⁰⁾; 美国 FMC Schilling 公司的 ORION 7P/ 7R 是一款轻量型七功能液压机械手, 宜用作小型或中型 ROV 的右手系统, 我国自行研制的 7000 m 载人潜水器选购的就是该机械手¹¹⁾, 表 4 为世界上几款具有代表性的水下作业机械手. 这些机械手能够满足大多数较复杂水下搜救与水下工具的使用要求, 根据搜救场景和目标物的情况选用合适的载体设备是降低成本、提高成功率的必要条件.

6 海底非开挖穿缆工程与织网救捞的方法、工具与载体

海底非开挖穿缆工程与织网救捞是沉船等沉积物打捞手段之一. 其利用水下攻泥器等钻进打洞, 将打捞沉船等沉积物的钢缆穿引过沉积物底部进行打捞. 国外具有代表性的水平定向钻机有 DITCH

8) ISE group of companies. <http://www.ise.bc.ca/>.
9) DSV Turtle. https://en.wikipedia.org/wiki/DSV_Turtle#References.
10) Hydro-Lek innovative design engineering. <http://www.hydro-lek.com/>.
11) Schilling robotics. <http://www.schilling.com/>.

表 4 代表性水下作业机械手
Table 4 Several representative underwater operation manipulator

Manufacturer	Product model	Vehicle	Performance index
FMC Schiling	ORION 7P/7R	light-/medium-class ROV	7-function position/rate controlled hydraulic manipulator, weight 54 kg (air)/38 kg (water), standard depth 6500 msw
FMC Schiling	TITAN 4	ultra-heavy work class ROV	7-function position controlled hydraulic manipulator, weight 100 kg (air)/78 kg (weight), standard depth 4000 msw/7000 msw
FMC Schiling	CONAN 7P	light-/medium-class ROV	7-function position controlled hydraulic manipulator, weight 107 kg (air)/ 73 kg (water), standard depth 3000 msw
SAAB Seaeye Hydro-Lek	HLK-43000	light-class ROV	5-function manipulator, weight 6 kg (air)/4 kg (water), standard depth 80/160 bar

WITCH 公司的 JT2720、Vermeer 公司的 D200×300、CASE 公司的 6030 等^[32], 国内具有代表性的是上海打捞局与上海交通大学合作研制的深鳗 I – 水下导向攻泥器^[33].

6.1 海底非开挖穿缆工程与织网救捞的方法

一些大型的、无法进行挂钩打捞的沉积物常借助穿缆作业进行织网打捞. 海底非开挖穿缆工程包括传统的人工钻进作业和定向钻机钻进作业. 人工钻进作业已经比较成熟, 但工程量太大, 潜水员作业强度高, 耗时久. 定向钻机钻进作业结合了石油工业的定向钻进技术和管线施工方法, 在一定曲率半径范围内, 将打捞沉船的钢缆穿引过沉船船底, 进行沉船打捞. 其工作原理请参考文献^[34]中的图 2, 安装好导向管架后, 定向钻机固定在母船上, 钻杆通过导向管架攻入海底, 从沉船另一侧攻出, 钻机接入高压气体, 潜水员根据气泡冒出位置寻到钻杆并将钢缆拴在钻杆上, 钻杆回拖完成穿缆. 非开挖装备技术在陆上应用已经非常广泛, 海底非开挖装备在此基础上结合了深海钻探技术和连续管技术, 实现深水海底水平定向非开挖千斤洞穿缆的功能, 更加安全、快速^[34,35]. 为提高这类救捞的成功率, 还常常结合封舱充气抽水法、浮筒抬升法、填充浮力材料法等^[32], 多管齐下.

6.2 海底非开挖穿缆工程与织网救捞的工具

海底非开挖穿缆工程的相关作业器材有定向钻机、钻杆、辅助导向管架、控向系统等. 定向钻机安装在母船上提供动力, 钻杆为中空, 内部接入高压气体时便于潜水员判断钻杆位置, 导管架辅助钻杆导向, 控向系统则监控钻头钻入海底后的位置并引导钻头沿正确方向钻进. 交通运输部上海打捞局与上海交通大学从 2010 年开始合作研制的深鳗 I – 水下导向攻泥器 JTD-01 (请参考文献^[33]中图 6), 可用于水下自动攻千斤, 最大工作深度 200 m, 海底定向钻进距离大于 100 m.

6.3 海底非开挖穿缆工程与织网救捞的载体

水下导向攻泥器与水下机器人系统均为大型综合水下作业系统, 承载这样的系统一般应用载人潜水器支持母船或三用工作船, 两种船只的特点是为水下作业系统配置大吨位风浪补偿吊机或支撑门架, 预留大面积作业甲板空间以支持水下系统布放与作业, 是带有级别较高的 DP 定位系统、支持水下系统的定点作业的多用途海上工程船只.

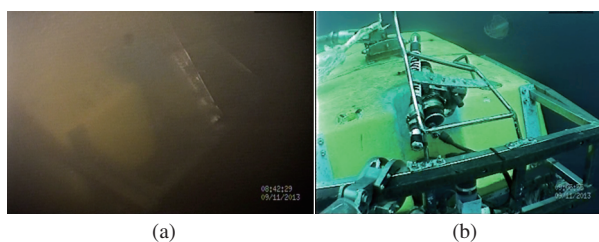


图 3 (网络版彩图) (a) 救援 ROV 发现失事 ROV; (b) 救援 ROV 抓起失事 ROV

Figure 3 (Color online) (a) The rescue ROV discovers the losing ROV; (b) the rescue ROV grabs the losing ROV

由中海油田服务股份有限公司定制, Rolls-Royce 设计公司 与武船集团联合设计的“海洋石油 691”三用工作船, 可为海上平台提供拖带等服务, 能够搭载支持 ROV 水下机器人. 其装载的 100 吨主动升沉补偿深海吊机, 可以在水下 2000 m 进行精细的设备安装作业, 其 250 吨 A 字架不仅可以实现海上工程的大型起吊, 还能够拖带挖沟机潜入海底, 挖设管沟, 进行海底非开挖穿缆工程¹²⁾.

7 国内 ROV 水下搜救的应用现状

随着海上运输和海洋资源开发的日益增多, 海洋事故越来越多, 每年全世界沉没的船舶就有上百艘, 如埃及的“萨拉姆 98 号”、我国的“1124”特大海难, 以及其他海难事故、飞机坠海等, 造成巨大的生命财产损失^[36]. 面对复杂的水下环境与恶劣的水下条件, 传统的潜水员搜救是一项成本高且危险耗时的工作. 海洋水下搜救现场多存在能见度低、压力大等因素, 使得潜水员不能及时高效地进行救援作业, 贻误搜救的最佳时机. 因而使用水下机器人来弥补或者替代潜水员是未来水下搜救的重要方向. 除海洋外还有多种水域场景和事故情况, 可以大致分为“海上事故搜救、内陆湖泊水域搜救、港口与大坝沿岸搜救、多体联合搜救、复杂水域特殊搜救”5 大搜救背景.

7.1 ROV 水下搜救典型案例

第 1 个案例为失事 ROV 海上搜救打捞作业. ROV 进行海洋工程作业时, 由于水下作业的复杂性和海况的不确定性, 有时会出现脐带缆断裂、ROV 丢失掉落海底的情况, 这时就需要另外一台 ROV 对其进行搜救. 2013 年为中国海洋石油服务的一台作业型 ROV 由于台风影响导致脐带缆断裂, ROV 丢失, 作业公司立即派出另一台 ROV 对其进行打捞救援.

救援工作总共分为 4 步:

第 1 步, 救援 ROV 来到失事海域附近, 下潜海底, 使用其携带的声呐设备进行大面积扫描, 标记发现的疑似点;

第 2 步, 救援 ROV 靠近各个疑似点, 使用摄像头进行逐步排查, 确认目标, 如图 3(a);

第 3 步, 工作母船下放回收笼至水面 10 m 以下;

第 4 步, 救援 ROV 选取合适位置将失事 ROV 抓起并放入回收笼中, 然后跟随回收笼上浮至水面, 确认其成功打捞出水面, 如图 3(b) 和图 4.

该案例搜救过程正如前文描述总体分为 4 个阶段: 粗扫阶段, 救援 ROV 携带声呐设备进行大面积扫描, 标定疑似点; 精扫阶段, 救援 ROV 通过摄像排查疑似目标, 确认真目标; 定位阶段, 工作母船

12) “海洋石油 691”交付使用. http://zjrb.zjol.com.cn/html/2015-09/19/content_2911769.htm?div=-1.

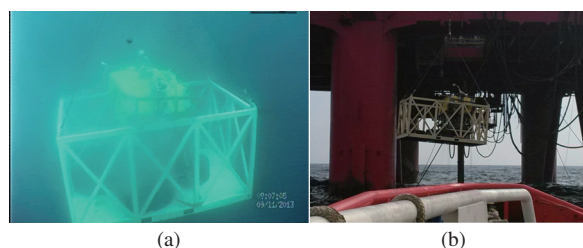


图 4 (网络版彩图) (a) 将失事 ROV 放入回收笼中; (b) 回收笼将失事 ROV 回收出水面
Figure 4 (Color online) (a) Put the losing ROV in the basket; (b) the basket takes back the losing ROV

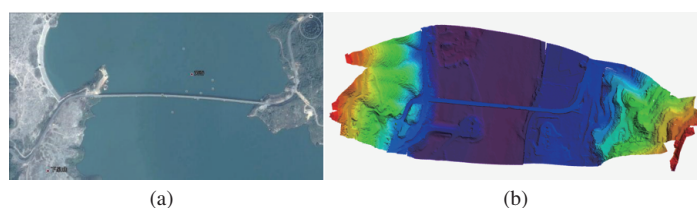


图 5 (网络版彩图) (a) 实际卫星成像图; (b) 多波束声呐成像图
Figure 5 (Color online) (a) Actual satellite imagery; (b) multibeam Sonar imagery



图 6 (网络版彩图) (a) ROV 从船边下放; (b) 根据 ROV 位置下放标志物
Figure 6 (Color online) (a) Drop ROV from shipside; (b) drop markers based on the location of ROV

下放作业工具回收笼; 打捞阶段, 救援 ROV 通过近距离观察抓取失事 ROV 送入回收笼, 由母船回收缆绳完成打捞. 由于失事 ROV 本身颜色明显, 搜救过程中未投放标志物, 并且救捞工具采用了回收笼, 回收更快速安全. 从而也可看出搜救过程并非一成不变, 具体操作细节还要根据实际情况进行调节.

第 2 个案例是湖泊搜救. 湖泊搜救的特点为水下地形复杂、障碍物多、水底淤泥松软、水质浑浊, 2012 年在杭州发生的 6.10 青田案于 2015 年 1 月成功打捞核心证物. 该案是警方在水下抛尸案件中首次使用水下机器人协助案件侦破的案例, 核心证物打捞过程再一次印证了前文所述的搜救过程.

首先, 劳雷公司、715 所、海洋二所等多家国内企事业单位采用 SONIC2024 宽带超高分辨率多波束测深仪对库底进行大面积探测, 对面积为 970 m^2 的北山大桥两侧各 70 m 范围进行声呐扫描, 最终得出该范围地形三维信息, 并标记 10 个可疑目标点, 如图 5.

然后, 母船行驶至可疑目标点附近, 通过轻型独臂吊机将轻型观察级电动 ROV “海螺号” 下放到水中, ROV 下潜到水底对 10 个可疑目标进行近底排查, 最终确认目标物的位置, 紧接着母船根据 ROV 的定位点下放标志物, 如图 6, 以便 ROV 每次下水可根据标志物行驶至目标物附近.

最后, ROV 对目标物进行近距离观察, 如图 7, 确定是一只铁笼, 最终使用 ROV 携带 4 只打捞钩



图 7 (网络版彩图) ROV 观测水下铁笼情况

Figure 7 (Color online) ROV observes the cage underwater

钩住铁笼四角提出水面。

上述救捞过程经过了多波束大面积扫描与疑似点标识、ROV 近底排查与目标确认、定位于标志物投放、ROV 挂钩救捞 4 个阶段, 搜救过程中用到轻量级观察级 ROV 进行近距离观察以及挂钩作业, 降低了人力物力成本, 成功完成作业任务。

7.2 ROV 其他搜救案例

除海上搜救、湖泊搜救外, 还有其他种类水域的搜救案例。2016 年的水库闸门遇难潜水员搜救作业在综合分析了水电站现场条件及水深、时间、成本等情况后, 采用机动性好作业能力强的中型 ROV 进行救捞作业, 搜救过程中 ROV 使用了二维成像声呐以及摄像头进行扫测观察, 确认目标状态后使用机械手使遗体脱出闸门口并上浮至水面; 2017 年 9 月潘家园潘家口水库遇难潜水员遗体打捞案例中采用了小型观察级 ROV 进行作业, 成功找到两名潜水员遗体。这些案例展示出 ROV、声呐、机械手等设备在水下搜救中强大优势。

8 展望

针对不同搜救目标和搜救阶段, 形成一套面向目标与场景的水下搜救方案优选流程, 对于快速拟定搜救方案、高效实施搜救作业、提高搜救成功率具有重要指导意义。水下搜救流程总体可分解为 4 个阶段: 大面积声学扫描与疑似点标识 (粗扫阶段)、近底声学成像与疑似点辨认 (精扫阶段)、坐底声学精确定位与标志物投放 (定位阶段)、目标近距离观察与挂钩救捞/海底非开挖穿缆工程与织网救捞 (打捞阶段)。大面积粗扫阶段用以标识疑似目标, 近底精扫阶段用以确认真目标, 定位阶段可视情况决定是否投放标志物, 打捞阶段则选择合适的载体与作业工具完成打捞作业。

虽然传统的潜水员搜救因其“人”所具备的优越性仍然无法被水下机器人搜救所完全取代, 但水下机器人等新兴技术的发展正逐渐替代潜水员完成部分作业, 特别是目前发展较为成熟的 ROV, 而更加机动灵活的 AUV 受限于动力等问题应用不如 ROV 广, 但其无缆的特性使其在深水搜救中拥有重要的发展前景。随着各类技术的快速发展, 水下搜救过程中的作业载体与作业工具不断的升级换代, 水下机器人等载体以及更高效准确的探测定位设备和工具在水下搜救体系中将发挥无法取代的重要作用。

参考文献

- 1 Wu Z Y, Zheng Y L, Chu F Y, et al. Research status and prospect of sonar-detecting techniques near submarine. *Adv Earth Sci*, 2005, 20: 1210–1217 [吴自银, 郑玉龙, 初凤友, 等. 海底浅表层信息声探测技术研究现状及发展. *地球科学进展*, 2005, 20: 1210–1217]
- 2 Liu J N, Zhao J H. The present status and developing trend of the multibeam system. *Hydrographic Surv Charting*, 2002, 22: 3–6 [刘经南, 赵建虎. 多波束测深系统的现状和发展趋势. *海洋测绘*, 2002, 22: 3–6]
- 3 Zhai G J, Wang K P, Liu Y H. Technology of airborne laser bathymetry. *Hydrographic Surv Charting*, 2014, 34: 72–75 [翟国君, 王克平, 刘玉红. 机载激光测深技术. *海洋测绘*, 2014, 34: 72–75]
- 4 刘晨晨. 高分辨率成像声纳图像识别技术研究. 博士学位论文. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2006
- 5 李富会, 史青法. 多波束和声纳在大面积水域中探测水下目标物的组合方法. *城市建设理论研究: 电子版*, 2014. doi: 10.3969/j.issn.2095-2104.2014.07.0463
- 6 Sun W C, Xiao F M, Jin S H, et al. Comparison of the methods of multibeam echo intensity data recording. *Hydrographic Surv Charting*, 2011, 31: 35–38 [孙文川, 肖付民, 金绍华, 等. 多波束回波强度数据记录方式比较. *海洋测绘*, 2011, 31: 35–38]
- 7 Anderson J T, Holliday D V, Kloser R, et al. Acoustic Seabed Classification of Marine Physical and Biological Landscapes. ICES Cooperative Research Report. No. 286. 2007
- 8 Liu X, Li H S, Zhou T, et al. Multibeam seafloor imaging technology based on the multiple sub-array detection method. *J Harbin Eng Univ*, 2012, 33: 197–202 [刘晓, 李海森, 周天, 等. 基于多子阵检测法的多波束海底成像技术. *哈尔滨工程大学学报*, 2012, 33: 197–202]
- 9 Li H S, Xu C, Zhou T. High-resolution integrated detection of underwater topography and geomorphology based on multibeam interferometric echo sounder. *Appl Mech Mater*, 2012, 212: 345–350
- 10 Tao C H, Jin X L, X F, et al. The prospect of seabed classification technology. *Donghai Mar Sci*, 2004, 22: 28–33 [陶春辉, 金翔龙, 许枫, 等. 海底声学底质分类技术的研究现状与前景. *东海海洋*, 2004, 22: 28–33]
- 11 Roberts H H, Shedd W, Jr J H. Dive site geology: DSV ALVIN (2006) and ROV JASON II (2007) dives to the middle-lower continental slope, northern Gulf of Mexico. *Deep Sea Res Part II*, 2010, 57: 1837–1858
- 12 Sun Y S, Li Y R, Sheng M W, et al. Application prospect of multi-beam echosounder on AUV. *China Offshore Platform*, 2017, 32: 14–20 [孙玉山, 李优仁, 盛明伟, 等. 多波束系统在智能水下机器人中的应用展望. *中国海洋平台*, 2017, 32: 14–20]
- 13 李冬, 刘雷, 张永合. 海洋侧扫声呐探测技术的发展及应用. *港口经济*, 2017, 6: 56–58
- 14 梁业松. SIS-1000 型海底图像系统在大面积扫海中的应用. *海洋测绘*, 2001, 2: 52–54
- 15 Zhao J H, Lu Z B, Wang A X. Development status of marine surveying and mapping technology. *J Geomatics*, 2017, 6: 1–10 [赵建虎, 陆振波, 王爱学. 海洋测绘技术发展现状. *测绘地理信息*, 2017, 6: 1–10]
- 16 Wang X L. High resolution sonar based on sparse feature. Dissertation for Master Degree. Xi'an: Xidian University, 2014 [王雪磊. 基于稀疏特征的高分辨声呐成像. 硕士学位论文. 西安: 西安电子科技大学, 2014]
- 17 孙文玉. 图像声纳的相控发射机设计. 硕士学位论文. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2009
- 18 Ren F J, Zhang L, Wang D J, et al. Development state of underwater vehicles. *J Jiamusi Univ Natl Sci Edition*, 2000, 18: 317–320 [任福君, 张岚, 王殿君, 等. 水下机器人的发展现状. *佳木斯大学学报 (自然科学版)*, 2000, 18: 317–320]
- 19 Smallwood D, Bachmayer R, Whitcomb L L. A new remotely operated underwater vehicle for dynamics and control research. In: *Proceedings of the 11th International Symposium on Unmanned Untethered Submersible Technology*, Durham, 1999. 370–377
- 20 Yuh J. Design and control of autonomous underwater robots: a survey. *Auton Robot*, 2000, 8: 7–24
- 21 Xiao F M, Xia W, Wang Z G, et al. Analysis on relation between the cone of multibeam silence and the height of distinguishable target. *Hydrographic Surv Charting*, 2013, 33: 13–15 [肖付民, 夏伟, 王志光, 等. 多波束声静区与可分辨目标高度关系研究. *海洋测绘*, 2013, 33: 13–15]
- 22 Yang W D, Li B, Zhang Y B. Study on well site investigation contents and techniques in deepwater oil and gas field. *Offshore Oil*, 2011, 31: 1–7 [杨文达, 李斌, 张异彪. 深水油气井场调查内容及方法技术研究. *海洋石油*, 2011, 31: 1–7]

- 23 温明明, 肖波, 徐行, 等. 深水油气田井场调查技术方法浅析. 南海地质研究, 2007, 118–126
- 24 Feng Z P. A review of the development of autonomous underwater vehicles (AUVs) in western countries. Torpedo Technol, 2005, 13: 5–9 [冯正平. 国外自治水下机器人发展现状综述. 鱼雷技术, 2005, 13: 5–9]
- 25 Wu Y T, Zhou X H, Yang L. Underwater acoustic positioning system and its application. Hydrographic Surv Charting, 2003, 23: 18–21 [吴永亭, 周兴华, 杨龙. 水下声学定位系统及其应用. 海洋测绘, 2003, 23: 18–21]
- 26 Li S J, Bao G S, Wu S G. A practical overview and prospect of acoustic positioning technology. Ocean Technol, 2005, 24: 130–135 [李守军, 包更生, 吴水根. 水声定位技术的发展现状与展望. 海洋技术学报, 2005, 24: 130–135]
- 27 Yan Y, Ma P S, Wang D Y, et al. Development of deep sea ROV and its working system. Robot, 2005, 27: 82–89 [晏勇, 马培荪, 王道炎, 等. 深海 ROV 及其作业系统综述. 机器人, 2005, 27: 82–89]
- 28 Li C S. Research of visibility improving method for underwater observation video images. Dissertation for Master Degree. Qingdao: Ocean University of China, 2011 [李长顺. 水下视频观测图像清晰化方法研究. 硕士学位论文. 青岛: 中国海洋大学, 2011]
- 29 Ge Z F. Study on the restoration and mosaicing methods of underwater video. Dissertation for Master Degree. Qingdao: Ocean University of China, 2012 [葛中峰. 水下视频图像复原与拼接方法研究. 硕士学位论文. 青岛: 中国海洋大学, 2012]
- 30 徐静. 三维成像声纳. 2017. <http://www.docin.com/p-769178147.html>
- 31 张小平. 高分辨率多波束成像声呐关键技术研究. 博士学位论文. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2005
- 32 吴军民. 沉船打捞穿绳技术的探讨与研究. 硕士学位论文. 上海: 同济大学, 2005
- 33 Wang Z W. Current development of rescue and salvage equipments. J Mech Eng, 2013, 49: 91–100 [王祖温. 救助打捞装备现状与发展. 机械工程学报, 2013, 49: 91–100]
- 34 Zhang W, Zhou X Q, Lou R. Technology of using trenchless horizontal directional drilling passing lifting wires through the wreck. Sci Technol Ind, 2013, 13: 136–139 [张伟, 周绪强, 娄睿. 非开挖水平定向钻机在沉船打捞中的应用. 科技和产业, 2013, 13: 136–139]
- 35 Zhang W, Zhou P F, Zhou X Q, et al. Discussion on application of non-digging technology in excavating steel wire holes in wreck removal operation. In: Proceedings of the 6th China International Rescue and Salvage Conference, Xi'an, 2010 [张伟, 周鹏飞, 周绪强, 等. 非开挖技术在沉船打捞攻打千斤洞中的应用探讨. 见: 第 6 届中国国际救援论坛, 西安, 2010]
- 36 贾现军. 小型水下救援机器人位姿控制及其在水下搜救中的应用. 硕士学位论文. 杭州: 浙江大学, 2014

An overview of the underwater search and salvage process based on ROV

Linyi GU^{1,3}, Qi SONG^{1,3*}, Hongwei YIN^{2,3} & Jie JIA^{1,3}

1. *State Key Laboratory of Fluid Power and Mechatronic Systems, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;*

2. *Hangzhou Universal Control Mechatronic Engineering LLC., Hangzhou 310015, China;*

3. *BLUE SKY RESCUE Hangzhou Branch, Hangzhou 310027, China*

* Corresponding author. E-mail: sq.q@zju.edu.cn

Abstract With the rapid development of underwater robotics technology, underwater search and salvage develops in a fine operation way. This article divides the search and salvage process into four stages: large area acoustic scanning and suspected point marking, bottom acoustic imaging and suspected point identifying, sit-on-bottom acoustic precise positioning and marker releasing, and goal close observation and hook salvage/submarine trenchless pulling wire rope engineering and salvage. This article reviews the methods of search and salvage, the need for search and salvage tools and vehicles, and typical successful cases at home and abroad in each stage.

Keywords underwater search and salvage, underwater robot, ROV, scanner, work tool



Linyi GU was born in 1973. He received the Ph.D. degree in fluid drive and control in mechanical college from Zhejiang University, Hangzhou, in 1998. Currently, he is a professor at the State Key Laboratory of Fluid Power and Mechatronic Systems. His research interests include deepwater hydraulic manipulators, underwater robot hydraulic propulsion systems, AUVs, and ROVs.



Qi SONG was born in 1993. She received the B.S. degree in mechatronic engineering from Zhejiang University, Hangzhou, in 2016. Currently, she is a Ph.D. candidate at the State Key Laboratory of Fluid Power and Mechatronic Systems. Her research interests include underwater manipulators, AUVs, and ROVs.