蛟龙号载人潜水器在深海精细地形地貌探测中的应用

张同伟^{1,2,3*}, 唐嘉陵¹, 李正光¹, 周玉斌¹, 王向鑫¹

1. 国家深海基地管理中心, 青岛 266237;

2. 青岛海洋科学与技术国家实验室海洋地质过程与环境功能实验室, 青岛 266061;

3. 青岛海洋科学与技术国家实验室海洋观测与探测联合实验室, 青岛 266237

* E-mail: tongwei.zhang@outlook.com

收稿日期: 2017-04-13; 收修改稿日期: 2018-01-03; 接受日期: 2018-03-09; 网络版发表日期: 2018-05-16

国家重点研发计划项目(编号: 2017YFC0305700)、青岛海洋科学与技术国家实验室开放基金项目(编号: QNLM2016ORP0406)、国家自然科学基金项目(批准号: 41641049)、泰山学者工程专项项目(编号: TSPD20161007)、山东省自然科学基金项目(编号: ZR2015EM005)、山东省重点研发计划项目(编号: 2016GSF115006)和青岛市自主创新计划项目(编号: 15-9-1-90-JCH)资助

摘要 高分辨率测深侧扫声纳很好的延续了传统侧扫声纳的侧扫功能, 同时具备相应的测深功能, 能够实现海底地形、地貌的同步测量. 海底微地形地貌探测能力和先进的水声数字通信是蛟龙号载人潜水器的4个技术亮点之一. 高分辨率测深侧扫声纳实现了7000m级深度的海底地形地貌精细探测, 成功测绘出了马里亚纳海沟局部的微地形地貌图. 本文首先简要介绍了蛟龙号载人潜水器和高分辨率测深侧扫声纳, 然后分析了影响测深侧扫声纳探测结果成图的关键因素, 最后给出了典型的探测结果图.

关键词 精细地形地貌, 载人潜水器, 深海, 测深侧扫声纳, 蛟龙号

1 引言

围绕海洋的科学研究、资源开发、工程建设以及军事等活动, 通常都需要准确地获取所关注区域内的海底地形地貌信息作为基础资料与支撑依据. 因此, 如何去了解海洋地形地貌信息, 对海洋地形地貌信息进行有效的测绘, 获取海洋地形地貌信息图谱, 成为了目前海洋资源开发和海洋空间利用中的重要问题(金翔龙, 2007; 赵建虎等, 2009), 特别是海洋地形地貌信息对海洋空间利用具有更大的价值.

深海海底地形地貌探测主要包括全海深地形探测和近海底微地形探测. 全海深地形探测是指利用船载深水多波束测深声纳进行大面积走航式测量, 其主要特点是测量范围大、测量速度快、测量效率高, 特别适合进行大面积的海底地形探测, 但对于深海海底地形地貌的测量精度有限. 近海底微地形探测是指利用各类水下移动载体, 如声学拖体(徐建等, 2011; 刘晓东等, 2015; 曹金亮等, 2016; 陶华等, 2016)、水下机器人(汤民强, 2009)、遥控潜器(罗柏文等, 2006; 许克克等, 2011)和载人潜水器(刘保华等, 2015)等搭载多波束

中文引用格式: 张同伟, 唐嘉陵, 李正光, 周玉斌, 王向鑫. 2018. 蛟龙号载人潜水器在深海精细地形地貌探测中的应用. 中国科学: 地球科学, 48: 947–955, doi: 10.1360/N072017-0012

英文引用格式: Zhang T W, Tang J L, Li Z G, Zhou Y B, Wang X X. 2018. Use of the Jiaolong manned submersible for accurate mapping of deep-sea topography and geomorphology. Science China Earth Sciences, 61: 1148–1156, <https://doi.org/10.1007/s11430-017-9187-3>

测深声纳、侧扫声纳和测深侧扫声纳等到海底附近进行精细探测. 与全海深地形探测相比, 它可以获得更加精细的海底微地形地貌.

2 大深度载人潜水器

2.1 蛟龙号载人潜水器

据美国海洋技术协会(MTS)载人潜水器分会的数据库显示, 目前世界上下潜深度超多1000m的载人潜水器共有16台(Kohnen, 2013; 刘保华等, 2015; 刘峰, 2016). 其中具有代表性的大深度载人潜水器包括美国“阿尔文”号(4500m级)、法国“鹦鹉螺”号(6000m级)、俄罗斯“和平I”号和“和平II”号(均6000m级)、日本“深海6500”号(6500m级)和中国“蛟龙号”(7000m级).

蛟龙号载人潜水器研制是国家“十五”期间的“国家重点研发计划项目”(863)计划重大专项之一(刘峰, 2010), 通过全国近百家优势科研院所的联合攻关, 蛟龙号载人潜水器经历设计、加工制造、总装联调、水池功能性试验等研制阶段, 于2008年初具备了出海试验的技术条件, 并于2009~2012年, 先后完成了1000m级、3000m级、5000m级(崔维成等, 2011)和7000m级(崔维成等, 2012)的海上试验任务, 最大下潜深度达到了7062m, 这个深度覆盖了地球上99.8%海洋面积. 在圆满完成了7000m级海试后, 蛟龙号载人潜水器转入试验性应用. 2013~2017年, 蛟龙号完成了4个试验性应用航次(大洋31、35、37、38航次), 先后在中国南海海山/冷泉区、东北太平洋多金属结核区、西北太平洋海山区、西南印度洋热液区、西北印度洋热液区、西太平洋雅浦海沟区、西太平洋马里亚纳海沟区等七大海区, 开展了100多次成功下潜, 作业覆盖海山、冷泉、热液、海沟、海盆等典型海底区域, 获取了大量生物地质样品、影像资料和探测数据, 积累了丰富的复杂环境载人深潜作业经验, 建立中国载人深潜应用技术体系, 有效地推动了我国深海科学与技术的发展.

蛟龙号载人潜水器可以搭载3名人员(1名潜航员和2名科学家)到达极端深海环境进行科考作业, 它由结构、液压、控制和声学等系统组成, 不仅可进行照相、摄像和海底地形地貌精细测绘, 而且可以使用机械手等工具抓取海底的水样、沉积物和生物等样品.

2.2 声纳系统

由于电磁波在海水中衰减很快, 声波成为水中探测、信息传输的主要手段. 根据蛟龙号载人潜水器应用需要和声学系统的总体技术要求, 蛟龙号载人潜水器声学系统由9种16部声纳组成(朱敏等, 2014), 分别为水声通信机(2部)、水声电话(1部)、超短基线定位声纳(1部)、长基线定位声纳(1部)、测深侧扫声纳(1部)、成像声纳(1部)、声学多普勒计程仪(1部)、避碰声纳(7部)和高度计(1部). 蛟龙号载人潜水器声学系统总体布置图如图1所示.

在开展深海海底微地形地貌探测时, 测深侧扫声纳主要用于获取微地形地貌探测数据, 是微地形探测的基础; 超短基线定位声纳和长基线定位声纳主要提供导航定位数据, 是地形地貌测绘必不可少的; 水声通信机用于将水面支持母船上的超短基线定位声纳对载人潜水器的定位结果发送给水下潜水器, 可用于确定组合导航系统的初始位置; 声学多普勒计程仪主要提供潜水器速度信息, 用于组合导航. 此外, 运动传感器主要提供潜水器的姿态和艏向角, 用于测深侧扫探测数据的补偿; 温盐深仪(CTD)主要提供声速数据, 用于测深侧扫声纳探测数据修正; 高精度深度计主要提供潜水器深度数据, 即测深侧扫声纳深度, 结合测深侧扫声纳探测地形数据, 可以给出海底地形的绝对深度.

3 测深侧扫声纳

测深侧扫声纳(朱维庆等, 2003, 2006; 孙宇佳等, 2009)换能器安装在载人潜水器的两侧(图1), 能够测量海底的微地形地貌和海底、水中的目标, 实时绘制出现场的三维地图. 它能在复杂的海底上工作, 给出目标的高度, 因此十分适合在钴结壳区域勘察工作和在大洋热液场测量热液喷口“烟囱”的几何尺寸. 国际上已有的载人潜水器上尚未装有此种声纳. 它和水声通信机是蛟龙号载人潜水器4个技术亮点之一.

3.1 基本原理

为了将侧扫技术和多波束测深技术结合起来, 实现海底地貌和海底地形的同步测量, 测深侧扫声纳应运而生.

图1 蛟龙号载人潜水器声学系统总体布置图

引自朱敏等(2014)

测深侧扫声纳利用多个接收阵来测得海底回波的到达角度,并根据此角度和回波传播时间来获得声纳探测点的水深值,其作用距离较远,具有分辨率高、声纳阵小、能耗低等优点。图2给出了测深侧扫声纳工作原理示意图。T1是发射换能器,R1~R8是8个接收换能器单元,声纳阵面法线与水平面成 30° 角。通过分析各接收信号的相位差,计算出海底回波的方向;根据回波到达的时间推算海底的距离;二者相结合即可获取海底位置。中国科学院声学研究所研制的测深侧扫声纳采用先进的多子阵海底自动检测——信号子空间的信号参数估计技术,使其能够把不同方向同时到达的回波区分开来,并能自动检测海底。

测深侧扫声纳具有体积小、重量轻和功耗低等优点,特别适合安装在水下拖体、水下机器人、遥控潜水器和载人潜水器上,对海底地形地貌进行近底精细测量。

3.2 系统组成

把与测深侧扫声纳有关所有设备分为两个部分,一部分安装载人舱内,另一部分安装在载人舱外。载人舱内以测深侧扫声纳主控器为主;安装在载人舱外的

有电子舱、左舷换能器阵、右舷换能器阵,以及辅助传感器。

测深侧扫声纳换能器阵的长轴要求与潜水器本体的长轴平行,换能器面法线要求与水平面成 30° 角,并且要求在起吊过程中安装支架的变形要尽可能小以避免损伤换能器阵,因此安装在潜水器的4号和5号站之间。此处是潜水器的圆柱段,换能器阵安装后的线型较好,安装支架独立于承重框架,降低框架变形对换能器的影响。

4 影响探测结果成图的因素

通常,利用水下自主航行器和深拖等搭载多波束进行海底微地形测量时,影响海底微地形探测数据成图质量的因素主要有水平定位精度、垂直定位精度、测深精度、传感器时间统一和传感器位置统一等5类。然而,与水下自主航行器和深拖等小型载体不同,以蛟龙号为代表的大型载人潜水器,搭载测深侧扫声纳进行海底微地形地貌测量时,又有其特殊性,如姿态控制平稳性低、测深侧扫换能器左右舷安装,且间距大等。通过对蛟龙号载人潜水器历次下潜采集的测深侧

图2 测深侧扫声纳工作原理示意图

扫声纳探测数据进行处理,发现影响其成图质量的因素主要包括潜水器姿态、测深侧扫声纳换能器左右舷位置和导航精度。

4.1 潜水器姿态对探测成图的影响

根据国际海道测量组织第44号特别出版物(第5版)(IHO S-44 5th),在95%置信度条件下,海底微地形探测成图的特级标准要求测深精度为0.25m,0.75%深度,1级标准要求0.5m,1.3%深度。除声速计和测深侧

扫声纳外,测深精度还受光纤罗经的影响。光纤罗经包含航向角(Heading)、纵倾角(Pitch)、横倾角(Roll)三个分量。与航向角和纵倾角不同,测深侧扫声纳的测深精度对横倾角更敏感。例如,在声纳距底50m高、作用距离250m时,如保证0.5%精度,横倾角传感器精度要求0.06°;如果横倾角传感器精度0.1°,在距底50m高时,如保证0.5%精度,作用距离约为143m。受载人潜水器流线型和人为操控等影响,潜水器姿态控制平稳性较差,使得潜水器姿态对测深侧扫探测结果成图有较大影响。

以某潜次冷泉区海底微地形探测为例,说明横倾角滤波对改善测深成图质量的重要性。图3a给出了冷泉区山顶区域的海底微地形图,发现存在4处明显抖动,严重影响了成图质量。图4给出了测深侧扫声纳记录的潜水器姿态横倾角、纵倾角和航向角随时间的变化曲线。显然,海底地形图的剧烈抖动与潜水器姿态横倾角的剧烈抖动呈一一对应关系,而与纵倾角和航向角无明显的相关性。

为了尽可能地降低潜水器姿态横倾角剧烈抖动对成图质量的影响,对横倾角做中值滤波和平滑处理。图3b给出了横倾角滤波平滑后的海底微地形图。显然,横倾角滤波平滑能够在一定程度上抑制海底微地形图的剧烈抖动,改善成图质量,但并不能够完全消除。

4.2 左右舷位置对探测成图的影响

海底微地形探测涉及长基线、超短基线、多普勒

图3 某潜次冷泉区山顶区域的海底微地形图

(a) 横倾角未进行任何处理; (b) 横倾角平滑滤波处理

图 4 测深侧扫声纳记录的横倾角、纵倾角和航向角变化曲线
(a) 横倾角; (b) 纵倾角; (c) 航向角

计程仪、光纤罗经和测深侧扫换能器阵等传感器, 要求精确已知各传感器相对于坐标原点的坐标, 以及安装误差. 多波束一般采用T型换能器阵, 安装在水下移动载体的正下方; 测深侧扫声纳一般采用两条平行的换能器阵, 对称安装在水下移动载体的左右舷. 由于水下自主航行器或深拖的径向尺寸较小, 当测深侧扫声纳换能器阵安装在这类水下载体上时, 两换能器阵的间距较小, 约为0.5m. 然而, 蛟龙号载人潜水器尺寸

较大, 安装在其腹部的两条测深侧扫换能器阵间距较大, 约为2.46m. 测深侧扫声纳通过左右舷分别找底, 并以此为准分别计算测深结果; 测深侧扫声纳在斜坡区域探测时, 当左右舷声纳阵间距较大时, 左右舷找底会有明显的不同. 此时, 如果还利用之前水下自主航行器或深拖上测深侧扫声纳的处理方法, 不考虑左右舷换能器阵间距明显变大的这种差别, 必然会导致测深侧扫声纳换能器阵正下方的海底地形图过渡不

理想。

以某潜次冷泉区海底微地形探测为例, 说明斜坡海底时, 测深侧扫换能器阵左右舷间距对测深成图质量的影响。图5a给出了未考虑左右舷声纳阵间距时冷泉区斜坡区域的海底微地形图, 图5b给出了重新补偿左右舷声纳阵间距后冷泉区斜坡区域的海底微地形图。通过对比发现, 未考虑左右舷声纳阵间距时, 测深侧扫声纳换能器阵正下方区域的测深结果成图质量较差, 左右舷之间的过渡不理想; 而在后处理过程中需要计入左右舷换能器阵的安装间距, 对左右舷进行分别处理, 然后再拼接到一起, 则左右舷海底微地形图的过渡比较平滑, 成图质量得到了明显的改善。

图6给出了冷泉区斜坡区域单帧测线的测深结果, 其中浅色点线表示未补偿30°安装偏角, 深色点线表示已补偿30°安装偏角。由深色点线可以看出, 左右舷的找底结果并不相同。如果硬将左右两侧拼接在一起, 必然会导致声纳阵正下方海底地形图的过渡不理想。

4.3 导航精度对探测成图的影响

一般的水平定位精度垂直航迹分辨率为5cm, 沿着航迹分辨率与角度有关, 为0.5~5m。综合考虑上述因素, 根据国际航道测量组织第44号特别出版物(第5版)(IHO S-44 5th), 在95%置信度条件下, 海底微地形探测成图的特级标准定位精度要求2m, 1级标准要求5m+5%声纳距底高度。水平定位涉及的主要传感器有

长基线、超短基线、多普勒计程仪和光纤罗经。长基线的静态定位精度为2.5~5m, 动态定位精度要低于静态, 且与声速剖面、地形、校准和信噪比等因素有关; 超短基线的定位精度约为0.2~0.5%斜距, 且与声速剖面、GPS和信噪比等因素有关; 多普勒计程仪的精度取决于声速、安装偏角、测速偏差和信噪比; 光纤罗经的精度与纬度和速度有关。

在某潜次作业过程中, 利用测深侧扫声纳对冷泉区进行了详细探测, 以此为例, 说明导航精度对测深侧扫声纳探测结果拼图的影响。图7给出了冷泉区山顶区域两条测线的拼图结果。由于未使用长基线定位系统, 以处理后的超短基线定位数据作为成图用导航数据。由图可见, 两条测线获得的海底地形图并不能够很好的拼接在一起, 无法获得良好的拼图结果。这是由于超短基线的定位精度无法满足测深侧扫声纳的拼图要求。

为了进一步分析潜水器的导航精度, 需要选取长基线定位系统正常工作的潜次。遗憾的是, 该潜次作业过程中, 并未使用长基线定位系统。为此, 选取另一潜次数据进行分析, 具有一定代表性, 原因如下: (1) 下潜过程中, 长基线定位系统工作正常, 定位精度高; (2) 长基线定位系统正常工作过程中, 潜水器航行轨迹比较丰富, 既有较长的直线航行, 又有拐弯航行。

图8给出了某潜次下潜作业过程中长基线定位、超短基线定位、航控计算机导航和航位推算法导航的结果。根据长基线定位声纳海试结果, 可以认为长基线

图5 某潜次获得的冷泉区斜坡区域的海底海底地形图

(a) 未考虑左右舷声纳阵间距; (b) 计入左右舷声纳阵间距

图 6 某潜次冷泉区斜坡区域单帧测线的测深结果

图 7 某潜次获得的冷泉区山顶区域两条测线的拼图结果

定位系统的定位结果是可靠的, 比较准确地反映了潜水器在水下的位置. 由图可见, 超短基线定位结果与长基线定位结果由较大的差别, 导航精度无法满足测深侧扫声纳要求. 航控计算机导航和航位推算法虽然可以在较大范围内比较合理地描绘了潜水器的航迹, 但随着时间的推移, 误差会逐步增大, 特别是到第二个拐弯位置.

5 典型探测结果

图9给出了某潜次(蛟龙号7000m级海试)测深侧扫

图 8 某潜次长基线定位、超短基线定位、航控计算机导航和航位推算法导航

声纳获得的海底微地形地貌图. 图10给出了某潜次(冷泉区山顶)测深侧扫声纳获得的海底微地形地貌图. 地形图的等深线间隔为2m, 海底的诸多细节得到了合理展示, 侧扫图和地形图相对照, 可以获得更多的信息.

6 总结

蛟龙号载人深潜器是中国首台自主设计、自主集成研制的作业型深海载人潜水器, 设计最大下潜深度为7000m级, 也是目前世界上下潜能力最深的作业型

图9 某潜次测深侧扫声纳获得的海底微地形地貌图(7000m海试)

(a) 微地形图; (b) 地貌图

图10 某潜次测深侧扫声纳获得的海底地形图(冷泉区山顶)

(a) 微地形图; (b) 地貌图

载人潜水器。蛟龙号配备有中科院声学所研制的高分辨率测深侧扫声纳, 它和水声通信机是蛟龙号载人潜水器4个技术亮点之一。

测深侧扫声纳是由侧扫声纳发展而来的, 很好的延续了传统侧扫声纳的侧扫功能, 同时具备了相应的测深功能, 能够实现海底地形、地貌的同步测量。海洋测绘中的侧扫图和地形图蕴含着不同的信息, 两者的相互对照, 往往可以获得更多的信息。

与水下自主航行器和深拖等小型水下移动载体不同, 利用蛟龙号载人潜水器搭载测深侧扫声纳进行海

底微地形地貌测量时, 成图质量主要受潜水器姿态、换能器阵的左右舷安装位置, 以及导航精度等的影响。

致谢 中国船舶重工集团第702研究所、中国科学院声学研究所、中国科学院沈阳自动化研究所为蛟龙号主要研制单位, 中国大洋协会作为业主, 国家海洋局是蛟龙号海试和试验性应用的组织部门, 中国大洋协会具体负责海试的组织实施, 向阳红09船为海试与试验性应用支持母船, 众多的单位参与其中。蛟龙号的成功是整个蛟龙团队团结协作、拼搏奉献的成果。感谢领导、专家、同事

和参试队员在蛟龙号研制、海试和试验性应用过程中给予支持和帮助。特别感谢中国科学院声学研究所刘晓东研究员、张东升研究员和曹金亮副研究员提供的技术指导。

参考文献

- 曹金亮, 刘晓东, 张方生, 李琦, 张东升, 王弘毅. 2016. DTA-6000 声学深拖系统在富钴结壳探测中的应用. 海洋地质与第四纪地质, 36: 173–181
- 崔维成, 刘峰, 胡震, 朱敏, 郭威, 刘诚刚. 2012. 蛟龙号载人潜水器的 7000 米级海上试验. 船舶力学, 16: 1131–1143
- 崔维成, 刘峰, 胡震, 朱敏, 郭威, 王春生. 2011. 蛟龙号载人潜水器的 5000 米级海上试验. 中国造船, 52: 1–14
- 金翔龙. 2007. 海洋地球物理研究与海底探测声学技术的发展. 地球物理学进展, 22: 1243–1249
- 刘保华, 丁忠军, 史先鹏, 于凯本, 李德威, 李宝钢. 2015. 载人潜水器在深海科学考察中的应用研究进展. 海洋学报, 37: 1–10
- 刘峰. 2016. 深海载人潜水器的现状与展望. 工程研究-跨学科视野中的工程, 8: 172–178
- 刘峰, 崔维成, 李向阳. 2010. 中国首台深海载人潜水器——蛟龙号. 中国科学: 地球科学, 40: 1617–1620
- 刘晓东, 赵铁虎, 曹金亮, 王志博, 侯德永, 张东升. 2015. 用于天然气水合物调查的轻便型声学深拖系统总体方案分析. 海洋地质前沿, 31: 8–16
- 罗柏文, 卜英勇, 周知进, 刘军. 2006. 一种深海钴结壳微地形近程探测方法的探索研究. 金属矿山, 41: 15–19
- 孙宇佳, 刘晓东, 张方生, 邱志强. 2009. 浅水高分辨率测深侧扫声纳系统及其海上应用. 海洋工程, 27: 96–102
- 汤民强. 2009. 以 AUV 为载体的深海测绘新技术. 全国测绘科技信息交流会暨首届测绘博客征文颁奖论文集. 856–863
- 陶华, 罗进华, 李彦杰, 聂明涛. 2016. 深拖在深水崎岖海底作业的研究. 水道港口, 37: 213–216
- 徐建, 郑玉龙, 包更生, 吴学文, 张恺, 金肖兵. 2011. 基于声学深拖调查的海山微地形地貌研究——以马尔库斯-威克海岭一带的海山为例. 海洋学研究, 29: 17–24
- 许竞克, 王佑君, 侯宝科, 杨立浩. 2011. ROV 的研发现状及发展趋势. 四川兵工学报, 32: 71–74
- 赵建虎, 李娟娟, 李萌. 2009. 海洋测量的进展及发展趋势. 测绘信息与工程, 34: 25–27
- 朱敏, 张同伟, 杨波, 刘烨瑶, 唐嘉陵. 2014. 蛟龙号载人潜水器声学系统. 科学通报, 59: 3462–3470
- 朱维庆, 刘晓东, 张东升, 张方生, 秦高林, 廖净, 方常乐. 2006. 高分辨率测深侧扫声纳. 海洋技术, 24: 29–35
- 朱维庆, 朱敏, 刘晓东, 潘锋, 张向军, 汪玉玲. 2003. 海底微地貌测量系统. 海洋测绘, 23: 27–31
- Kohnen W. 2013. Review of deep ocean manned submersible activity in 2013. *Mar Technol Soc J*, 47: 56–68

(责任编辑: 赵西西)