

周吉祥, 杨源, 单瑞, 等. ROV 技术在海底地震节点布设中的应用及展望[J]. 海洋地质前沿, 2020, 36(12): 72-77.

ROV 技术在海底地震节点布设中的应用及展望

周吉祥^{1,2}, 杨源^{1,2}, 单瑞^{1,2*}, 栾振东³, 杜凯^{1,2}, 余思远⁴

(1 中国地质调查局青岛海洋地质研究所, 青岛 266071; 2 青岛海洋科学与技术国家实验室海洋矿产资源评价与探测技术功能实验室, 青岛 266071; 3 中国科学院海洋研究所海洋地质与环境重点实验室, 青岛 266071; 4 中海辉固地学服务(深圳)有限公司, 深圳 518067)

摘要:海底地震勘探实施过程中, 传统的缆绳式地震节点布设方式受洋流及海底地形影响较大, 很难保证节点的数据采集质量和设备安全性。由于无人缆控潜水器 (Remote Operated Vehicle, ROV) 对海洋环境的良好适应性和强大的工程干预能力, 为探索海底地震节点布设提供了新方法。笔者综合介绍了 ROV 的技术特点, 结合具体工程实例讨论了基于 ROV 的海底地震节点布设的主要技术流程。通过分析对比采用 ROV 布放与传统甲板布放在布放回收效率、安全性及复杂地形适应性等方面的工作数据统计, 探讨了 ROV 布放技术在海底地震节点布设工作中的可行性、优势与局限性, 以及其应用发展前沿。具有更高精度和安全性的 ROV 节点布放技术作为一种新手段, 可作为传统布放方式的补充手段, 未来将在深远海的海底地震节点布设及其相关领域得到更广泛的应用。

关键词:海底地震勘探; 无人缆控潜水器; 海底地震节点; 节点布放; 深远海

中图分类号: P631; P714

文献标识码: A

DOI: 10.16028/j.1009-2722.2020.100

0 引言

海洋资源的精细化勘探和开发对地震勘探技术^[1-2]提出更高的要求。近年来, 海底地震节点 (Ocean Bottom Nodes, OBN) 技术在海底地震勘探过程中得到广泛的应用, 取得了巨大的经济效益。同拖地地震采集技术比, 其数据采集稳定性好、精度高, 是一种新型高效的局部三维地震数据采集手段。OBN 主要采用海底采集工作模式, 在地震勘探过程中需要在海底安置和定位大量 OBN 节点^[3]。受水压、海流、船速、复杂地形等恶劣海洋环境因素的影响, 传统有缆式的海面布设作业模式很难保证 OBN 节点布设位置的准确性和稳定性, 且随着水深的增加尤其明显。OBN 节点实际沉放位置与预设位置的偏

离量大小, 将直接影响地震勘探信息收集的质量。

目前, 水下无人潜器技术^[4]逐渐成熟, 已开始逐步应用于海洋资源的勘探开发和海洋工程建设中^[5]。其中, 无人缆控潜水器 (Remote Operated Vehicle, ROV) 通过光电复合缆实现水下与水面的实时通讯与动力传输, 具有较大的负载能力、可拓展性和较强的可操控性, 可实现长时间连续水下工作。相比较于传统的潜水作业方式, ROV 具有下潜深、成本低、安全性好等优点, 借助于高精度的水声定位技术, 可满足 OBN 的高精度节点布设要求。本文主要结合作业级 ROV 在非洲东海岸 1 次 OBN 节点布设中的应用实例, 探讨基于 ROV 的水下节点布设技术的可行性, 为后续国内开展海底地震节点布设提供参考。

1 ROV 技术特点

1.1 ROV 的系统构成

如图 1 所示, ROV 系统主要由水面及水下 2 部分组成。水面部分主要包括控制系统、动力系统、回收释放系统; 水下部分主要分为 ROV 潜器主体

收稿日期: 2020-07-03

资助项目: 中国地质调查局项目 (DD20191003); 国家自然科学基金 (41406115); 青岛市南区科技发展资金项目 (2016-3-015-ZH)

作者简介: 周吉祥 (1992—), 男, 助理工程师, 主要从事水下设备的使用及研发。E-mail: 496867434@qq.com

* 通讯作者: 单瑞 (1985—), 男, 在读博士, 助理研究员, 主要从事海洋地质调查与研究工作。E-mail: shanrui461@163.com

及电缆中继器(Tether Management System, TMS), 包含水下动力系统、电缆中继及通讯系统、航行辅助设备、外接探测工具等。其中潜器为 ROV 系统的主要单元, 配置多功能机械手及多台用于观察的水下摄像头, 可实现简单的水下仪器操作和工程干预。现役的深水 ROV 潜器水下航速一般不低于 3.5 节, 除了上述基本配置外, 潜器通常还能对外接工具提供各种规格的机械和通讯拓展接口, 并搭载高精度的定位设备。



图 1 深水 ROV 系统
Fig.1 Deep sea ROV system

1.2 ROV 技术的优势

作为一种近海底高移动定位精度的综合工作平台, ROV 技术相对于其他技术手段最显著的优势在于其对深海恶劣环境的适应性。ROV 技术具有可视化、可控性和功能拓展能力, 并可搭载高精度的定位设备, 完成高精度的水下作业任务, 近年来被广泛的应用于深远海的科学考察和海洋工程建设。

(1) 可视化、可控性和拓展能力

ROV 作为一种综合深潜平台, 除了其最主要的航行观察功能外, 还可以依托其搭载的水下工具实现丰富的拓展功能。主要应用于水下特定区域的取样勘探^[6]、实验测量, 例如海底冷泉热液区域的生物取样、矿物取样、水合物取样、原位实验等。

(2) 续航能力和航行稳定性

ROV 搭载了多种航行辅助设备, 具有优秀的续航能力、航行稳定性和主动避障能力。因此相比较于深拖和船载设备 ROV 工作时更接近海底, 测绘精度更高, 且能够采集连续稳定的视频资料。故常被用于局部区域的海底测绘工作^[7], 例如近海底多波束、侧扫、三维激光成像等。

(3) 高精度水下定位能力

现役多数深水潜器都配置了水下惯性导航系统(Inertial Navigation System, INS)、多普勒计程仪

(Doppler Velocity Log, DVL)以及高度计, 工作时与作业母船搭载的超短基线定位系统(Ultra Short Baseline, USBL)及广域差分 GPS 定位系统结合可实现分米级水下定位^[8], 能有效保障水下测量目标和施工的位置精度。

2 基于 ROV 的 OBN 水下布设技术

2.1 水面布放技术的局限性

如图 2 所示, 目前应用较为广泛的 OBN 布设方法其布设方式类似于铺设海底电缆, 即使用缆绳串联 OBN 节点从船端沿测线铺设。OBN 布设常规作业速度为 3~6 节, 布线完成后再进行震源作业和节点回收, 这种作业方式对船载设备的要求较高, 需要繁杂的水面自动化系统配合以保障工作效率。随着探测水深越来越大, 节点和缆绳受水流的影响越大, 节点的布设位置偏差也越大^[9-10]。深水区工作容易出现测线整体偏移、测点船向偏差、测点悬空失效等问题。在回收 OBN 节点时, 缆绳容易与海底地形凸起结构缠绕, 导致缆绳断裂或节点丢失。



图 2 船载 OBN 布设示意图
Fig.2 Shipborne OBN deployment

2.2 ROV 水下布放技术概况

OBN 节点将地震检波器直接安放在海底, 能接收到界面横波反射并有效减少回波的传输损耗, 相较于水面电缆采集能够获得更丰富的地层数据。而实现深远海、全地形的 OBN 采集对于更广阔海域的地质及能源勘探有着重要意义, 为解决传统布设方式遇到的安全性和准确性问题, 需要探索更安全可靠的海底布设技术。采用 ROV 水下定点投放的方式进行 OBN 节点布设回收工作是一次重要尝试, 可以验证此种作业方式的可行性, 为今后在深远海、海底地形复杂区域、自然保护区、海上油田

区域等受限区域进行海底探测设备的设置探索新的思路与方法。

基于ROV的OBN布设系统主要由ROV系统、USBL系统、OBN采集系统、作业母船及其他辅助设备5部分组成。其中OBN系统系统主要包括OBN节点、人工震源、节点充电及数据处理单元,辅助设备主要包括专用的ROV工具篮及其回收释放系统。本次作业的布设工作使用FCV3000型ROV和Geospace Technologies OBX型OBN节点,主要工具参数见表1。每个OBN节点水中净重8~9 kg。为保证潜器在水下的灵活性^[11],ROV最大额外负载应 ≤ 150 kg,即单次可携带节点数量 ≤ 16 个,故ROV潜器配重方案应为水中空载+50~+60 kg。此外,实现高精度的水下节点布设还依托于高效精确的导航定位系统,搭载了高精度USBL和SINS的ROV潜器位置为基准,依托组合惯导系统和ROV的姿态稳定性优势,实现精确的测点定位和节点布设。

2.3 ROV在海底地震节点布设应用实例

2.3.1 前期勘察及测线布置

本次作业区域为非洲东海岸某火山岛及附近海域,测区面积约为800 km²。经过前期对测区地

形的勘察,ROV布放区域中2条近岸测线经过当地主要渔业生产区,1条测线经过主要货运航道。如图3所示,测区内水深变化较大,同一条测线首尾两端水深落差超过800 m,海底多岩石、断崖、陡坡,ROV水下工作环境复杂,工作区海底地形情况。以图3中AB 2条测线为例,A测线为东西线,其中A1-A2、A3-A4段由ROV完成OBN节点布设,A1点以东、A2-A3段以人工方式完成OBN节点布设,A4点以西的区域由船载缆绳方式完成OBN节点布设;B测线横跨两岛间航道,B1-B2段由ROV完成OBN节点布设,其他部分以人工方式完成OBN节点布设。

表1 主要工具的性能参数

Table 1 Operation parameters of main instruments

工具名称	性能参数
ROV潜器	型号:FCV3000;最大工作水深:3 000 m;理论最大载重:270 kg;最大航速:3.5 kn
主机械臂	型号:Schilling Titan 4;理论最大负重:454 kg;最大臂展:1.922 m
副机械臂	型号:Schilling Rigmaster 2;理论最大负重:270 kg;最大臂展:1.372 m
OBN节点	型号:Geospace Technologies OBX;单个净重(空气):15.9 kg;最大工作水深:3 450 m;电池续航:30 d
辅助绞车	有效工作水深: $\geq 1 000$ m;有效负载: $\geq 3 000$ kg

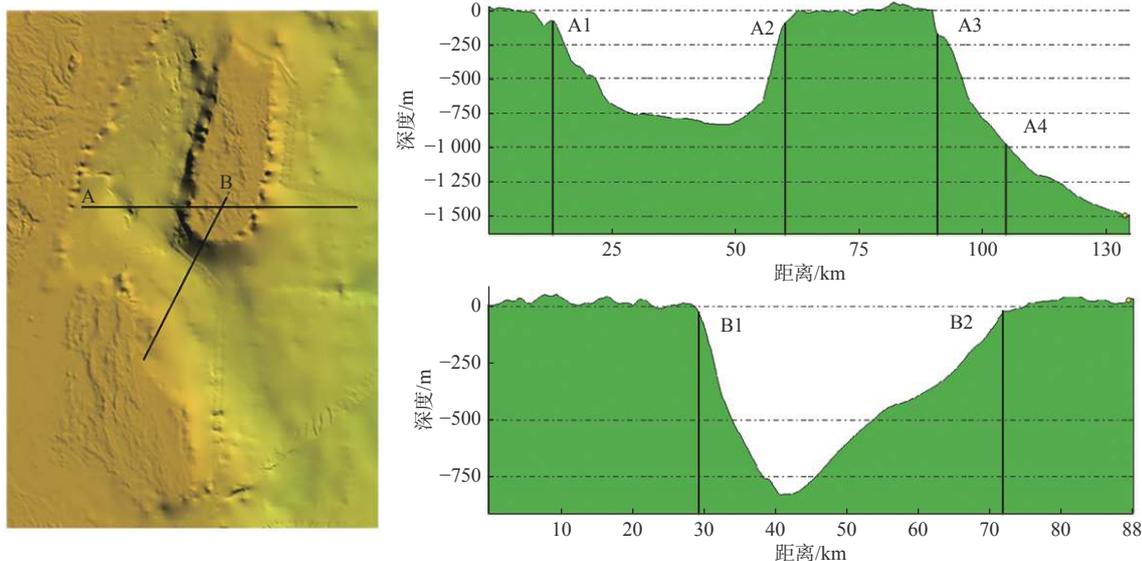


图3 工作海区海底地形图

Fig.3 Seabed topography of the study area

2.3.2 布放前准备工作

作业母船到达工作区域后开启动力定位模式^[12],ROV携带声速剖面仪(Sound Velocity Profiler, SVP)下潜至海底,以获取工作区域的声速剖面及水深数据;并在海床安置定点水下信标(Underwater Locator

Beacon, ULB),用以辅助进行超短基线定位系统安装误差校准工作。首次下潜完成后重新标定潜器的空载浮力,并通过潜器压载块的配置调整潜器水中空载浮力至+50~+60 kg。

为适应ROV的工作模式,正式开始布设前还需

将节点进行一定的改装。如图 4 所示, 改装主要分为以下 2 个方面: ①将原节点挂绳改为带浮球的硬质反光绳挂点, 以避免水下机械手操作时相互缠绕; ②将每个节点都单独编号并标记在节点正面醒目位置。



图 4 改装后的 OBN 节点
Fig.4 Modified OBN nodes

2.3.3 工作阶段

(1) 将 OBN 节点与释放器组合装入 ROV 工具篮, ROV 与工具篮同步下潜至海底;

(2) ROV 从工具篮中取出一组节点, 开始巡线释放;

(3) ROV 携带节点巡线至靶心点附近, 通过航行声纳和 underwater 高清摄像机寻找合适位置, 将节点放置在海底并借助水下激光尺和罗经调整节点艏向, 如图 5 所示;



图 5 海底断崖附近寻点布放
Fig.5 Locating nodes near a seabed cliff

(4) 如图 6 所示, 确认节点与海床耦合良好后, ROV 悬停于已布设节点上方, 记录节点布设位置和节点编号;

(5) 当连续潜水时间到达 10 h, 回收所有水下设备进行安全检查及常规保养。

2.3.4 工作时效性分析

布设作业时 ROV 单次携带 8~10 个节点, 每 50 m 布 1 个测点, 巡线速度 0.4~0.8 节; 回收作业时 ROV 单次携带 16 个节点, 巡线速度 0.6~1.0 节。



图 6 ROV 进行节点布设
Fig.6 Nodes layout of ROV

工作同时使用另一台辅助绞车往返甲板和海底运送节点, 工具篮单次可携带 4 组节点, 辅助绞车运送效率约 10 min/100 m 水深, 满足保障 ROV 水下连续要求。

从表 2 的现场作业统计来看, 理想工况(不计算水流、海底能见度、渔业生产等因素影响)下单台 ROV 进行短间距(50 m)布线作业时, 工作船速超过 0.6 节后就无法保证作业连续性, 作业过程中需要停船以等待 ROV 往返工具篮取放节点; 同样在进行节点回收作业时, 因为单次可携带节点数增多且单个测点的操作时间减少, 所以巡线速度相对布设时稍快, 但在船速超过 0.8 节后仍难以保持工作的相对连续性。整体来看, 采用单台 ROV 短间距布线效率约为 0.7 km/h, 回收效率约为 0.9 km/h。扣除总工时 15% 的设备保养及检查时间, 理想状况下每天可布线 14 km, 回收 18 km。

表 2 平均布设与回收效率统计

Table 2 Statistics of average layout and recovery efficiency

船速/节	布设效率/(个/h)	回收效率/(个/h)
0.2	7	8
0.4	12	15
0.6	14	18
0.8	14	20
1.0	-	20

综合本次作业, 影响 ROV 布设节点效率的有以下 3 个因素:

(1) 环境因素

受工区的特殊地形及潮汐影响, 现场水流情况复杂, ROV 工作期间表层水流较大时, 水面回收释放系统的负载增大, 导致潜器无法下潜到达目标水深。底层水流较大时, 潜器在工作时水下动力系统的负载增大, 导致潜器工作效率低下, 并且在回收时由于 TMS 在水流的影响下倾斜, 潜器无法在水中 TMS 合体, 存在较大的安全隐患。

(2) ROV 自身机械系统因素

由于工作过程中机械手等工具的高频使用导致机械手部分故障率较高,而机械手连接潜器本身的液压动力系统,机械手故障往往影响整个水下液压动力单元,需花费较多的维修时间。

(3) 作业流程因素

基于 ROV 的节点布设方法还处在实验阶段,本次作业中所用到的 ROV 工具自动化程度低,且没有针对性的设计改造,从而导致转运和投放环节效率低下。工作流程的设计还存在优化空间,工作流程设计之初对 ROV 水下完成特定动作的估时不准,水下工作的连续性存在一定的问题。

从工作的时效性上来看,相比较常规缆绳布设使用 ROV 布设节点虽然效率较低,但是工作方式更加灵活精确,ROV 能在陡坡、岩石、断崖等地形复杂区域主动寻找有利位置,布放工作时以设计布放点为圆心半径 5 m 范围内为设计布放范围,当设计布放范围内无有效布放位置时将寻址范围逐步扩大至距圆心 25 m 范围内,超过 25 m 范围无有效布放位置即将该测点标记为无效测点。使用 ROV 布设节点很大程度上确保了节点布设的精确性和单个测点数据采集的有效性。

3 应用与发展前景

近年来,基于 ROV 的水下定点布设技术被广泛应用,例如海底采油树、海底服务器、海底监测系统海洋工程及探测设备的安装架设,随着人们对海洋建设开发的不断深入,基于 ROV 的水下定点布设技术已经成为了海洋工程建设中不可或缺的一环。基于 ROV 的 OBN 节点布设技术是水下机器人技术在海洋地质勘查领域的应用扩展,与其他应用不同的是,ROV 需要应对多节点、重复性的巡线布设。虽然相对来说对布设的位置精度要求较低,但因为 OBN 节点的电池续航能力有限,对布设效率有一定要求。

ROV 在应对 OBN 节点等多次、重复性的目标物投放时,其布设效率上的缺点随着重复次数的增加逐渐被放大,所以,其工作效率是影响其大规模应用的最大因素,也是未来海洋工程技术人员亟需解决的问题。未来主要从以下 3 个方面解决:①提升 ROV 系统本身的性能^[13-14];②改进 OBN 节点技术;③探索新的技术方法。

3.1 ROV 系统性能优化

ROV 参与 OBN 节点回收释放时的工作效率很大程度上取决于其系统性能。例如 ROV 潜器的动力性能和负载能力,这 2 项性能的提升将直接影响 ROV 单次可携带节点数量和巡线速度。但近 10 年来受加工工艺、材料技术^[15]及水下通讯技术的限制,深水潜器技术难以取得突破性的进步。以材料技术为例,潜水器中用到了大量的绝缘和耐压材料^[16],其中绝缘材料的性能决定长距离输电及水变电压的功率上限,从而直接影响潜水器的动力性能;耐压材料的性能主要影响潜水器的自重、负载能力和结构稳定性。水下潜器中广泛应用的固体浮力材料,其密度与耐压强度成正比,耐压 70 Mpa 的浮力材料密度约为 0.7 g/cm³。对于 6000 米级深潜器来说,浮力材料密度每降低 0.1 g/cm³,其综合负载能力将提升 10%~15%。

3.2 新施工方法的探索应用

从本次实验的统计来看,在巡线速度超过 0.6 节时,一台 ROV 难以确保水下工作的连续性。未来可以通过 2 台 ROV 同时工作的方式来提高工作效率,在同一条母船的左右舷各安装一台 ROV,水下工作时交替布设。通过这种协作的方式能有效覆盖回工作过程中往返工具篮取放节点的耗时,同时可减少设备维修保养对工作连续性的影响,理论上可提升 0.2~0.4 节的巡线速度。同时在应对其他海域的工作时,可根据海底地形的复杂程度不同选择 ROV 主导或部分干预布设工作。例如在缆绳布设时使用 ROV 进行同步巡线检查,必要时干预调整缆绳及节点布设位置。

3.3 专用工具的开发

对于本文的案例,也可以从提升 ROV 的巡航速度和单个测点的布设效率角度出发,设计水下节点布设专用型 ROV 潜器^[17-18]和水下布设工具,提高工作的自动化程度。ROV 潜器改造时可移除通用型潜器的通讯拓展、机械手、高清摄像等设备,对其负载能力、自动巡航定位能力进行优化。

4 结论

通过对本次案例的统计数据进行分析对比,基

于 ROV 的 OBN 节点布设技术在工作效率上还难以满足大范围的布设要求, 目前该技术仍只能作为传统布设方式的补充手段。但相比于其他布设方式, ROV 在布设定位精度、人员设备安全性、单次下潜成本和恶劣环境的适应性等方面有较大的优势。且 ROV 作为一种新兴的深海探测技术手段, 其工作能力正随着各项新技术的发展应用不断增强, 尤其是材料技术和自动控制算法的迭代更新将为 ROV 的应用带来更多的可能性。综上所述, 随着各项新技术和施工方法的应用, 基于 ROV 的 OBN 节点布设技术在工作效率上具有较大提升空间, 该布放技术在深远海区域有较高可行性和较大的发展潜力。

参考文献:

- [1] 吴伟, 汪忠德, 杨瑞娟, 等. 地震采集技术发展动态与展望[J]. *石油科技论坛*, 2014, 33(5): 36-43, 48.
- [2] 王威, 徐华源, 孙波, 等. 高分辨率多道地震勘探技术在南海天然气水合物调查中的应用[J]. *海洋地质前沿*, 2019, 35(9): 19-24.
- [3] 刘慧敏, 王振杰, 吴绍玉, 等. 顾及声线弯曲的浅海多目标水声定位算法[J]. *石油地球物理勘探*, 2019, 54(1): 9-15, 5.
- [4] 左立标. 国外深海机器人技术发展现状及对我国的启示[J]. *采矿技术*, 2011, 11(5): 47-51.
- [5] 黄明泉. 水下机器人ROV在海底管线检测中的应用[J]. *海洋地质前沿*, 2012, 28(2): 52-57.
- [6] 陈宗恒, 田烈余, 胡波, 等. “海马”号ROV在天然气水合物勘查中的应用[J]. *海洋技术学报*, 2018, 37(2): 24-29.
- [7] 马小川, 栾振东, 张鑫, 等. 基于ROV的近海底地形测量及其在马努斯盆地热液区的应用[J]. *海洋学报*, 2017, 39(3): 76-84.
- [8] 单瑞, 董凌云, 杜凯, 等. 超短基线定位系统在深拖探测中的应用[J]. *海洋地质前沿*, 2019, 35(9): 29-35.
- [9] 刘慧敏, 王振杰, 赵爽. 深度约束的浅海多目标声学定位方法[J]. *石油地球物理勘探*, 2019, 54(6): 1181-1187, 1171.
- [10] LIU H M, WANG Z J, ZHAO S, et al. Accurate multiple ocean bottom seismometer positioning in shallow water using GNSS/acoustic technique[J]. *Sensors*, 2019, 19(6): 1406.
- [11] 张璐怡. 系统要素对深拖系统运动的影响[J]. *海洋工程*, 1998(3): 3-5.
- [12] 顾临怡, 宋琦, 殷宏伟, 等. 基于ROV等载体的水下搜救流程综述[J]. *中国科学(信息科学)*, 2018, 48(9): 1137-1151.
- [13] 邱晨辉, 任思远. 10767米!我国无人潜水器下潜新纪录诞生[J]. *军事文摘*, 2016(20): 34-37.
- [14] 王磊, 杨申申, 徐鹏飞, 等. 一种新型水下机器人的研究与开发[J]. *中国造船*, 2010, 51(1): 122-130.
- [15] 刘雪君. 基于水下机器人的磁干扰补偿算法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2018.
- [16] 张世政, 于良民, 李昌诚, 等. 深潜用固体浮力材料的研究进展[J]. *广州化工*, 2012, 40(18): 8-10.
- [17] 唐立志. 喷射式海底挖沟机试验研究[J]. *油气储运*, 2012, 31(2): 128-130, 167.
- [18] 曹金亮, 刘晓东, 张方生, 等. DTA-6000声学深拖系统在富钴结壳探测中的应用[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2016, 36(4): 173-181.

APPLICATION AND PROSPECT OF ROV TECHNOLOGY TO SUBMARINE SEISMIC NODE LAYOUT

ZHOU Jixiang^{1,2}, YANG Yuan^{1,2}, SHAN Rui^{1,2*}, LUAN Zhendong³, DU Kai^{1,2}, YU Siyuan⁴

(1 Qingdao Institute of Marine Geology, CGS, Qingdao 266071, China; 2 Laboratory for Marine Mineral Resources, Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266071, China; 3 Key Laboratory of Marine Geology and Environment, Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China; 4 China Offshore Fugro GeoSolutions (Shenzhen) Co., Ltd., Shenzhen 518067, China)

Abstract: The traditional submarine cable seismic node layout is greatly affected by water current and seabed topography, which make it difficult to ensure the quality of data acquisition and equipment safety. However, the ROV has excellent adaptability and engineering intervention ability to marine environment. In order to explore a new method for submarine seismic node layout, this paper discussed the feasibility of underwater seismic node deployment by ROV system. We compared it with the traditional water surface deployment, and both the advantages and limitations of ROV technology, and future prospects of the technology are presented and analyzed. As a new method, ROV node layout technology with higher accuracy and safety can be used as a supplement to the traditional layout method. In the future, it will be widely used in the submarine seismic node layout and related fields.

Key words: seabed exploration; ROV; submarine seismic node; node deployment; deep sea