

浅地层剖面仪噪声特征分析及 采集参数优选

张彬彬, 赵国兴, 吴永亭, 张道建, 张海泉, 孙 杨, 刘 凯

(自然资源部 第一海洋研究所, 山东 青岛 266061)

摘 要: 浅地层剖面仪具有配置灵活、作业方便、经济高效、分辨率高等优点, 在海洋地质研究和海洋工程调查中得到了广泛应用, 但易受到噪声干扰。在分析浅地层剖面仪运行时干扰噪声形成机理的基础上, 设计噪声采集方案, 采集设备运行时的背景噪声和其他声学设备干扰, 分析干扰噪声特征, 为现场数据采集以及室内数据处理提供依据。通过分析浅地层剖面仪的噪声特征, 提出控制激发频率范围, 将激发能量集中在优势频带内, 并在采集时设置合理滤波参数, 滤除其他声学设备干扰噪声。以“向阳红 01”科考船浅地层剖面仪为例, 设置激发子波频带: 1.0~6.0 kHz, 脉冲长度设置为 10 ms, 信号接收时设置滤波门限为 1.0-2.0-6.0-10.0 kHz, 去除其他声学设备对剖面的干扰, 最终取得非常理想的浅地层剖面。

关键词: 浅地层剖面仪; 背景噪声; 声学干扰; 现场采集; 噪声压制

中图分类号: P716

文献标识码: A

文章编号: 1671-6647(2020)03-0455-08

doi: 10.3969/j.issn.1671-6647.2020.03.008

引用格式: ZHANG B B, ZHAO G X, WU Y T, et al. Noise characteristics analysis of Sub-Bottom Profiler and optimization of field acquisition parameters[J]. Advances in Marine Science, 2020, 38(2): 455-462. 张彬彬, 赵国兴, 吴永亭, 等. 浅地层剖面仪干扰噪声特征分析及现场采集参数优选[J]. 海洋科学进展, 2020, 38(2): 455-462.

浅地层剖面探测是一种基于水声学原理的连续走航式探测水下浅部地层结构和构造的地球物理方法^[1]。由于其具有配置灵活、作业方便、经济高效、分辨率高等优点, 在海洋科考调查中得到了广泛应用^[2], 其应用范围涉及海洋地质科学研究^[3-4]、海底资源调查^[5-7]、海洋工程^[8-11]等方面, 成为海洋地球物理调查必备的基础设备。而由于浅地层剖面仪作业时受到各种噪声干扰, 采集的数据信噪比较低、剖面的数据精度低, 影响了探测深度与分辨率, 给后续的解释工作增加了难度^[12]。目前, 一方面, 虽然浅地层剖面仪仪器检测与评价方法已有相应研究^[13], 但缺乏对设备安装及运行环境定量评价; 另一方面, 浅地层剖面仪数据处理方法多参常规地震资料处理的方法, 如自动增益、带通滤波、多域去噪、涌浪改正、反褶积、补偿技术、多次波压制等^[14-19], 很少根据野外数据采集条件以及数据噪声特点进行针对性处理, 缺乏对数据现场采集条件的定量评估。本文根据噪声的机理, 采集作业过程中的干扰噪声, 分析噪声特征, 提出现场采集参数设置的优化方案, 以降低噪声干扰, 提高浅地层剖面数据资料采集质量。

1 噪声干扰机理分析

根据噪声的形成机理, 可将噪声分为环境噪声和有源噪声, 前者是由设备的安装及运行环境引起的, 包括船舶动力及振动、洋流波浪、海洋生物等引起的干扰; 后者是由震源或次生震源形成的干扰噪声, 包括直达

收稿日期: 2019-07-15

资助项目: 国家自然科学基金项目——多道地震与海底地震仪联合处理在深部构造探测中的应用——以南黄海 OBS2013 测线为例 (41604046)

作者简介: 张彬彬(1990-), 男, 助理工程师, 硕士, 主要从事海洋地球物理方面研究。E-mail: zhangbinbin@fio.org.cn

(陈 靖 编辑)

波、多次波、绕射波和气泡效应等^[20]。在海洋综合科考船上,浅地层剖面仪一般为船载固定式安装设备,在船舶建造期间就将换能器阵安装在船底。船舶的推进器、船底线形、洋流与波浪均会在设备运行时产生噪声,影响设备性能,换能器阵的安装方式和安装位置也会决定噪声影响的大小,因此在换能器安装时应一并考虑。

声学换能器的安装方式一般分为嵌入式安装、导流罩安装、Gondola 安装方式等。嵌入式安装方式是在船体底部开口,安装声学设备换能器,与船底平齐,优点是设备安装不影响航速,缺点是受船体表面的气泡影响较大;导流罩安装、Gondola 安装方式会突出船体结构,降低浅层气泡影响,但会改变船舶线形,增加船体阻力,降低船速。海洋综合科考船多远赴大洋、深海和极地开展科学考察活动,考虑到船舶经济效益和浅地层剖面仪换能器较大,一般采用嵌入式安装方式^[21]。

换能器的安装位置对设备性能也具有一定影响。船舶航行时,碎浪会在海水上层形成充气层,气泡可以吸收和反射声波,极端海况下水面 5~10 m 水层都会产生大量气泡,甚至可以阻断声波信号的传播。如图 1 所示,在船舶航行时,船舶与海水的相互作用会产生边界层,包含层流和湍流,而边界层的厚度取决于船舶速度、船体流线以及船体的粗糙度。当充气层的气泡被压入船底时,会混入边界层,并从层流到湍流厚度增加,越往船尾方向,厚度会逐渐增加。换能器所处的环境极大影响声波信号的传播,为降低气泡对声波的影响,一般会改进船舶艏部线形,并优选艏部水线 1/3 处作为换能器阵的最佳安装位置。

此外,海洋综合科考船配备多套声学设备,如深水单波束、深水多波束测量系统、浅地层剖面仪、声学多普勒海流剖面仪、鱼探仪等,船底声学换能器的典型布局如图 2 所示。海上调查作业时会同时运行多种声学设备,存在相互干扰问题,一般使用声学同步器将各声学设备间隔激发,但会大大降低各设备的横向分辨率,对于深海调查更是如此。而海上地球物理综合调查一般会有磁力仪、重力仪、浅地层剖面仪、多波束地形地貌测量系统等设备同时运行,而多波束、侧扫声纳等声学设备的运行会对浅剖数据产生不同程度的干扰。因此,须对声学设备干扰程度进行定量分析,评估影响程度,为现场采集参数优选和室内数据处理提供指导。

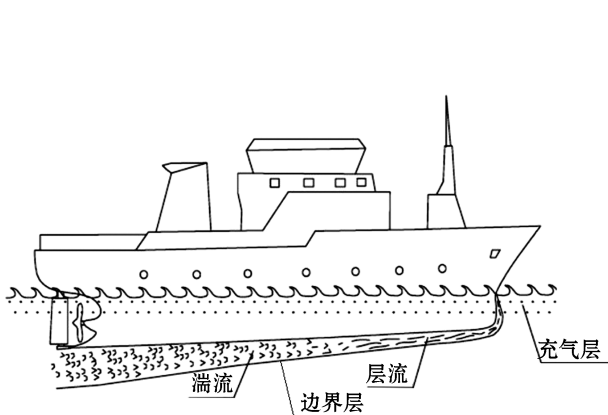


图 1 船底海水边界层

Fig.1 The boundary layer underneath the vessel

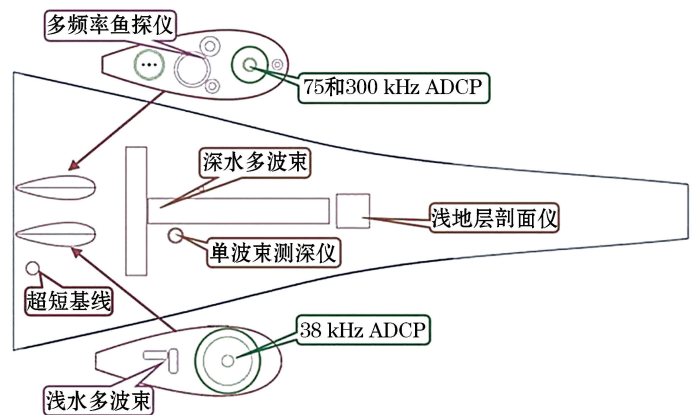


图 2 典型船底声学换能器布局

Fig.2 Typical layout of acoustic transducer on the vessel bottom

为了解浅地层剖面仪作业时噪声特征,需采集设备的背景噪声以及其他声学设备的信号,分析噪声特征,探索对应的处理方法。本文以海洋综合科考船“向阳红 01”船为例,使用船载浅地层剖面仪(TOPAS PS18)分别采集螺旋桨不同转速下船舶背景噪声和正常作业时其他声学设备干扰信号,分析噪声干扰特征,应用分析结果优选采集参数,获取理想的成果剖面,整体技术方案如图 3 所示。

2 数据采集与分析

本文以深水型浅地层剖面仪(TOPAS PS 18)为例,它适用于高分辨率浅地层剖面和水下目标探测,初级频率为 15~21 kHz、次级频率为 0.5~6.0 kHz、接收频率响应 0.030~100 kHz,工作水深为 20 m 至全海深,船底嵌入式安装,具有横摇、纵摇和升沉波束稳定功能,是各种精细、高分辨率调查的有效工具,调查船速可以达到 15 kn(依赖于船舶噪声水平)。根据噪声干扰调查及压制整体设计流程,具体采集方案设计见表 1。

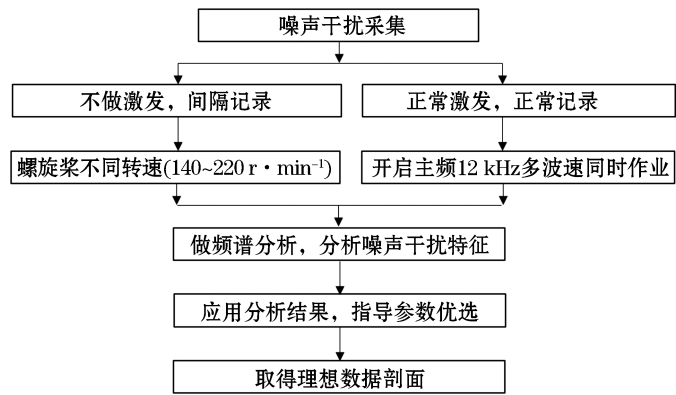


图3 噪声干扰调查及压制整体设计流程
Fig.3 Flowchart for investigating and suppressing noise interference

表 1 噪声采集方案
Table 1 Plan for acquisition of noise

震源激发	采样频率/kHz	记录长度/ms	记录间隔/ms	螺旋桨转速/ (r·min ⁻¹)	船速/kn
无震源激发	36	1 000	2 000	220	11.5
无震源激发	36	1 000	2 000	210	11.2
无震源激发	36	1 000	2 000	200	10.9
无震源激发	36	1 000	2 000	190	10.7
无震源激发	36	1 000	2 000	180	9.8
无震源激发	36	1 000	2 000	170	9.2
无震源激发	36	1 000	2 000	160	9.0
无震源激发	36	1 000	2 000	150	8.6
无震源激发	36	1 000	2 000	140	7.6
LMF(0.5~6.0 kHz)	36	800	2 000	210	11.3

首先,在某海域使用浅地层剖面仪 TOPAS PS18 进行数据采集,设置为无激发模式,记录长度为 1 000 ms,采样频率为 36 kHz,记录间隔为 2 000 ms,通过设定螺旋桨不同转速(140~220 r/min),记录船舶背景噪声。在记录过程中没有开启其他声学设备,选择螺旋桨转速为 200 r/min 时记录的数据作为典型数据,选择记录共 50 道,记录剖面图如图 4 所示。

由图 4a 中可知,浅地层剖面仪采集到的信号主要为随机噪声信号,波形特征表现杂乱无章,在时域无法观察出其特征。为突显换能器附近噪声干扰,纵向放大显示局部剖面(图 4b),由图 4b 可知在换能器附近噪声信号强度较强,成为信号的主要干扰部

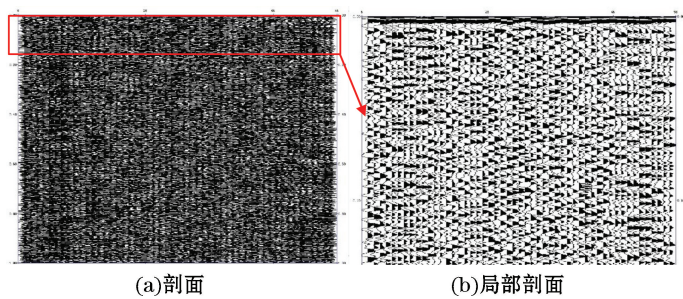


图 4 噪声记录剖面及局部显示
Fig.4 Profile of noise recording and partial display

分之一。利用傅里叶变换,对不同转速下采集到的背景噪音进行频谱分析,获得其平均曲线,如图 5 所示。

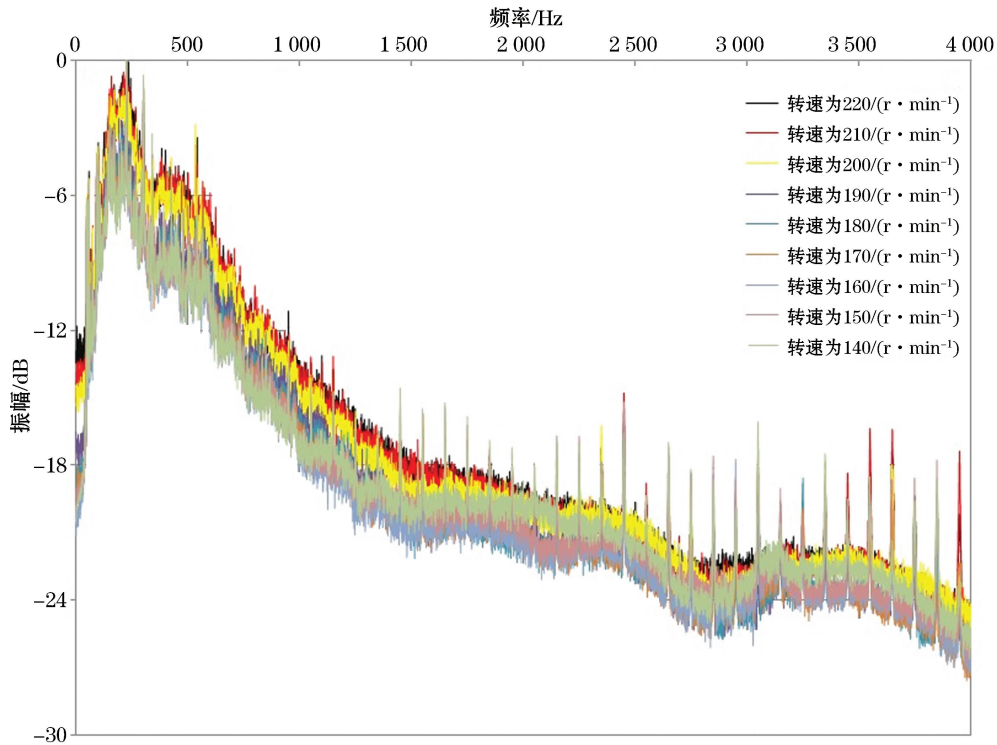


图 5 不同转速下背景噪声平均频谱

Fig.5 Average spectrums of background noise with different rotational speed

由图 5 知,在频域背景噪声范围为 $0 \sim 1.0$ kHz,背景噪声能量较强能量集中在 $0.05 \sim 0.75$ kHz, $0.75 \sim 1.00$ kHz 范围内的噪声能量相对较弱,高于 1.00 kHz 的随机噪声对数据质量的影响较小。再对比螺旋桨不同转速下采集噪声的频谱可知,随着转速的增加,噪声的主要能量向高频方向移动,会进一步降低浅地层剖面仪采集数据的信噪比,影响数据质量。

船载声学设备同运行会相互干扰,调查作业时使用声学同步器将各声学设备间隔激发,避免声学信号的相互干扰。但是,对于深海作业调查时,声学同步器的使用会大大降低数据的横向分辨率,不利于后续的资料解释。为此,设计在浅地层剖面仪运行的同时开启深水多波束(12 kHz),记录浅地层剖面仪接收到的声信号,在信号接收时不添加任何处理程序,记录的剖面如图 6 所示,由图 6 可知有许多杂乱无章的干扰分布在剖面中。再对图 6 剖面做频谱分析可知,在频域存在 2 个能量峰,分布在 12 kHz 附近(图 7),确定该噪声为多波束声学信号,该噪声的存在会严重影响剖面质量,给解释工作带来困难,因此需要做噪声压制处理。

综上分析,在浅地层剖面仪作业过程中存在随机噪声和声学设备干扰噪声两方面噪声: 1)随机噪声是以设备运行环境为背景的,主要来源为船舶动力系统、海洋涌浪,这类噪声在时域杂乱分布,在频域能量主要集中在 $0.05 \sim$

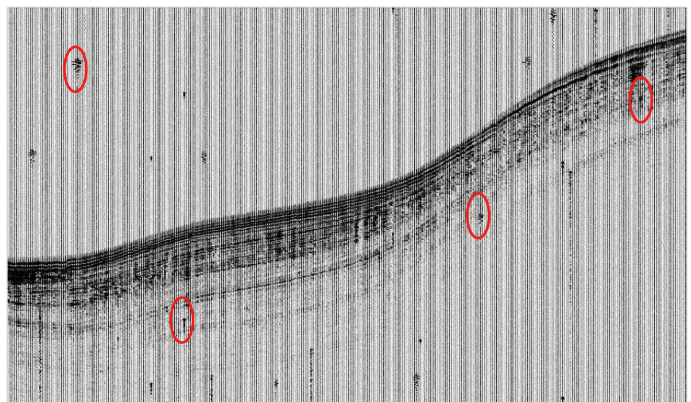


图 6 浅地层剖面仪与 12 kHz 深水多波束同时运行时数据剖面

Fig.6 The profile of Sub-Bottom Profiler simultaneously running with multibeam system

1.00 kHz,随着螺旋桨转速的增加能量向高频移动,但只有部分能量会影响到浅地层剖面仪的数据质量;2)声学设备干扰噪声主要是同时运行的其他声学设备产生的信号被浅地层剖面仪记录,该类噪声频率相对固定、能量相对集中,但是会影响到最终的剖面质量。

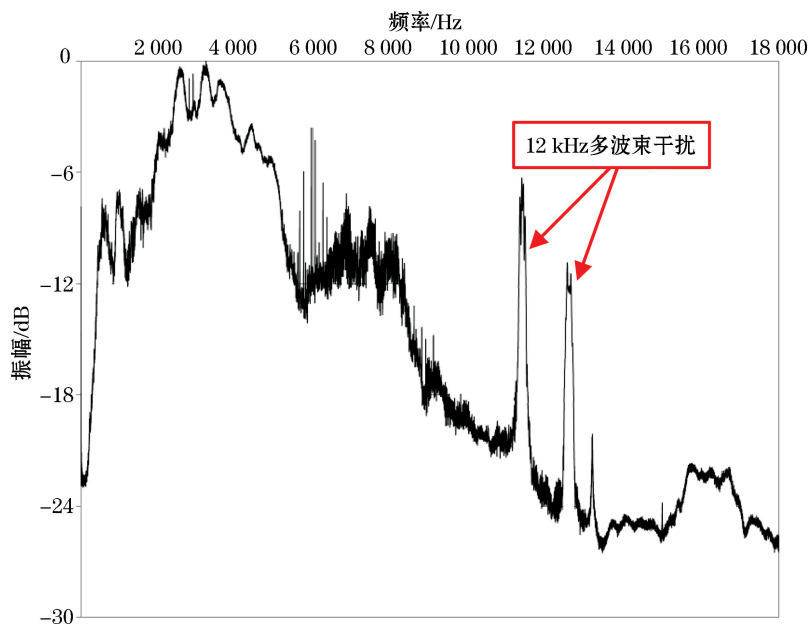


图7 浅地层剖面仪与12 kHz深水多波束同时运行时数据频谱分析

Fig.7 Spectrums of the Sub-Bottom Profiler simultaneously running with multibeam system

3 实际噪声压制方法与讨论

浅地层剖面仪运行接收到的噪声会影响剖面的质量,需在现场采集时或在室内处理时压制噪声干扰。根据以上分析,船舶的背景噪声以及其他设备声学干扰在频率域特征明显,可以在声波激发时规避背景噪声频带范围,在信号接受后做带通滤波处理,将能量集中在优势频带内并滤波处理掉其他声学设备对浅地层剖面仪的干扰。本研究以“向阳红01”科考船船载浅地层剖面仪(TOPAS PS18)为例,在现场调查作业时优化采集参数,降低干扰噪声对数据剖面的影响。

TOPAS PS18次级频率为0.5~6.0 kHz,接收频率响应0.03~100.00 kHz,具备一定的现场数据处理功能。为降低船舶背景噪声对数据质量的影响,兼顾仪器的分辨率和穿透能力,建议在现场作业时设置激发频率避开背景噪声频率范围,如将震源子波激发频带设置为1.0~6.0 kHz,脉冲长度设置为10 ms,这样设置就可以将激发能量集中在优势频带内,而不受船舶背景噪声的影响。为降低其他声学设备对浅地层剖面仪剖面的干扰,在数据接收后做带通滤波处理,设置滤波门限为1.0-2.0-6.0-10.0 kHz,滤除其他声学设备对剖面的干扰,如滤除12 kHz深水多波束声学信号的干扰。

在某海域,使用“向阳红01”科考船船载浅地层剖面仪进行实验测试,设置激发频带为2.0~6.0 kHz,波长10 ms,采样率为36 kHz,接受信号滤波设置为1.0-2.0-6.0-10.0 kHz,采集到的剖面如图8所示。由图8可知,浅地层剖面层位清晰,分辨率较高,整个记录的信噪比得到明显提高,未出现如图6所示的干扰信号,是较为理想的现场采集资料。但是,也在剖面的下半部分存在与海底形态相似的同相轴,该部位为多次波干扰,由于设备现场数据处理能力有限,建议到室内进行针对性处理,如采用SRME、基于同相轴追踪的多次波剔除与多道维纳滤波相结合的组合匹配衰减技术等方法。

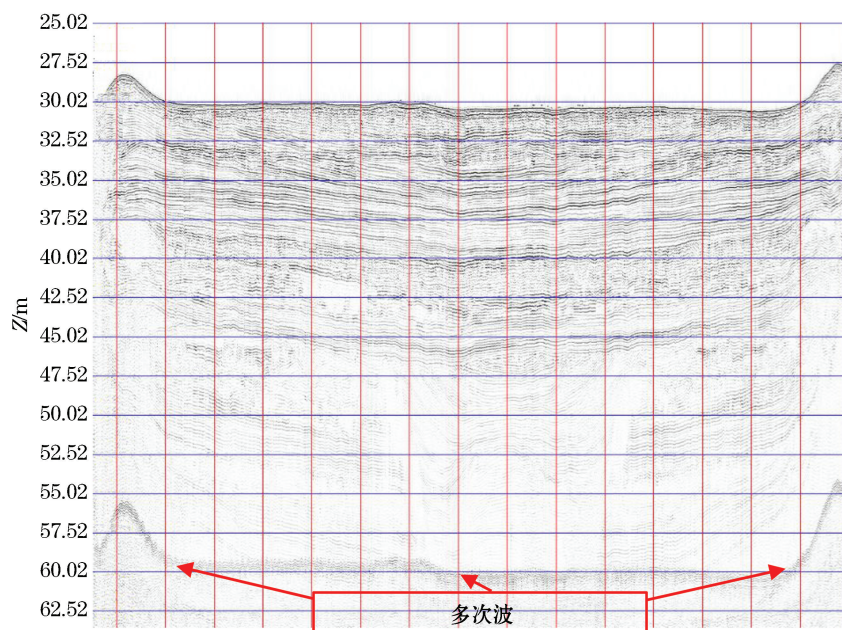


图 8 浅地层剖面仪数据剖面

Fig.8 Profile of the Sub-Bottom Profiler

4 结 论

本研究基于浅地层剖面仪作业时噪声形成机理,根据不同的噪声分别设计了背景噪声和其他声学干扰噪声的采集方案,并在针对性分析的基础上进一步提出了现场采集参数优化方案,且通过实例验证了优化方案的数据采集效果。得到如下认识:

1) 浅地层剖面仪的干扰噪声与设备的安装、运行环境存在密切联系,在调查作业前应采集设备运行时的背景噪声,并对其进行定量分析,指导现场作业参数的设置与室内处理流程;

2) 船舶等背景噪声信号主要低于 1.0 kHz,且随着船速的增加噪声能量向高频方向移动,而浅地层剖面仪(TOPAS PS18)激发的次级频率为 0.5~6.0 kHz,相互干扰频带有限,若在垂向分辨率允许的条件下,建议在现场作业时激发频率避开背景噪声频率范围,如将震源子波频带设置为 1.0~6.0 kHz,脉冲长度设置为 10 ms 采集,这样设置就可以将激发能量集中在优势频带内,而不受船舶背景噪声的影响;

3) 浅地层剖面仪信号接收频带为 0.03~100.00 kHz,当浅地层剖面仪与其他声学设备同时运行时,会接收到其他声学干扰,因此在外业采集时通过设置接收声学信号的频带范围而避免其他声学信号干扰。

参考文献(References):

- [1] LI P, DU J. Review on the probing of Sub-Bottom Profiler[J]. Marine Science Bulletin, 2011,30(3): 344-350. 李平, 杜军. 浅地层剖面探测综述[J]. 海洋通报, 2011, 30(3): 344-350.
- [2] WANG F Q, LÜ J F, SHEN H, et al. Pitfalls in interpretation of Sub-Bottom Profile data[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2013,37(6): 1061-1066. 王方旗, 吕京福, 申宏, 等. 浅地层剖面资料解释中的陷阱问题分析[J]. 物探与化探, 2013,37(6): 1061-1066.
- [3] KIM Y J, KOO N H, CHEONG S, et al. A case study on pseudo 3-D Chirp Sub-Bottom Profiler (SBP) survey for the detection of a fault trace in shallow sedimentary layers at gas hydrate site in the Ulleung Basin, East Sea[J]. Journal of Applied Geophysics, 2016, 133: 98-115.
- [4] WANG R, LI C Z, YAN X F. Application of Sub-Bottom Profiler to study riverbed structure and sediment density[J]. IOP Conference

- Series: Earth and Environmental Science, 2018, 128 [2019-06-15]. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/128/1/012113/pdf>. DOI: 10.1088/1755-1315/128/1/012113.
- [5] HE W G, LIANG D H, SONG C B, et al. Determining the distribution boundary of cobalt-rich crusts of guyot by synchronous application of sub-bottom profiling and deep-sea video recording[J]. Earth Science: Journal of China University of Geoscience, 2005, 30(4): 509-512. 何高文, 梁东红, 宋成兵, 等. 浅地层剖面测量和海底摄像联合应用确定平顶海山富钴结壳分布界线[J]. 地球科学—中国地质大学学报, 2005, 30(4): 509-512.
- [6] LI S J, TAO C H, CHU F Y, et al. A practical application of Sub-Bottom Profile system to cobalt-rich crust investigation in middle Pacific Ocean[J]. Ocean Technology, 2007, 26(1): 54-57. 李守军, 陶春辉, 初凤友, 等. 浅地层剖面在富钴结壳调查研究中的应用[J]. 海洋技术, 2007, 26(1): 54-57.
- [7] XUE H, DU M, SHANG J J, et al. The high precision processing technology in Sub-Bottom Profile for seabed gas leakage[J]. Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration, 2016, 38(5): 660-665. 薛花, 杜民, 尚久靖, 等. 海底天然气渗漏高精度浅层剖面处理技术[J]. 物探化探计算技术, 2016, 38(5): 660-665.
- [8] CHU H X, ZHAO T H, SHI H J, et al. The efficiency evaluation of non-Linear (parametric) sonar system application in sea engineering investigation[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2005, 29(6): 526-529. 褚宏宪, 赵铁虎, 史慧杰, 等. 参量阵浅地层剖面测量技术在近岸海洋工程的应用效果[J]. 物探与化探, 2005, 29(6): 526-529.
- [9] ZHOU X H, JIANG X J, SHI Y Z. Application of side scan sonar and sub-bottom profile in the checking of submerged pipeline in Hangzhou Bay[J]. Hydrographic Surveying and Charting, 2007, 27(4): 64-67. 周兴华, 姜小俊, 史永忠. 侧扫声纳和浅地层剖面仪在杭州湾海底管线检测中的应用[J]. 海洋测绘, 2007, 27(4): 64-67.
- [10] LI Y B, ZHANG Y F, LIU Y L, et al. Application of sub-bottom profiler to ocean engineering[J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2007, 4(1): 4-8. 李一保, 张玉芬, 刘玉兰, 等. 浅地层剖面仪在海洋工程中的应用[J]. 工程地球物理学报, 2007, 4(1): 4-8.
- [11] WEI Z Q, ZHANG Z Q, JIANG J J, et al. Application of sub-bottom profiler in inspecting investigation of Daya Bay seabed pipeline[J]. Hydrographic Surveying and Charting, 2009, 29(6): 71-73. 魏志强, 张志强, 蒋俊杰. 浅地层剖面仪在大亚湾海底管道检测中的应用[J]. 海洋测绘, 2009, 29(6): 71-73.
- [12] LI L Q, CHEN H J, PENG X C, et al. Mutual constraint processing technology for inconsistency time-lapse seismic data[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2011, 35(1): 86-92. 李丽青, 陈泓君, 彭学超, 等. 海洋区域地质调查中的高分辨率单道地震资料关键处理技术[J]. 物探与化探, 2011, 35(1): 86-92.
- [13] WANG F Q, ZHOU X H, DING J S, et al. Acoustic parameter test and detection performance evaluation methods of sub-bottom profiler and side-scan sonar[J]. Advances in Marine Science, 2017, 35(4): 559-567. 王方旗, 周兴华, 丁继胜, 等. 浅地层剖面仪和侧扫声纳仪器检测与评价方法研究[J]. 海洋科学进展, 2017, 35(4): 559-567.
- [14] DING W F, FENG X, FU X M, et al. Marine wave correction research on single channel seismic data and a subbottom profile[J]. Haiyang Xuebao, 2012, 34(4): 91-98. 丁维凤, 冯霞, 傅晓明, 等. 海上单道地震与浅地层剖面数据海浪改正处理研究[J]. 海洋学报, 2012, 34(4): 91-98.
- [15] FENG Q Q, WEN M M, WU H, et al. Data processing methods for marine sub-bottom profiles[J]. Marine Geology Frontiers, 2013, 29(11): 49-53. 冯强强, 温明明, 吴衡, 等. 海洋浅地层剖面资料的数据处理方法[J]. 海洋地质前沿, 2013, 29(11): 49-53.
- [16] XUE H, DU M, WEN P F, et al. The technology of data processing in sub-bottom profile based on the nonlinear frequency modulation signal[J]. Progress in Geophysics, 2014, 29(5): 2287-2292. 薛花, 杜民, 文鹏飞, 等. 非线性调频信号的浅地层剖面处理技术[J]. 地球物理学进展, 2014, 29(5): 2287-2292.
- [17] YAN Z H, LUAN X W, PAN J, et al. Key denoising techniques in marine sub-bottom shallow profiling[J]. Marine Geology Frontiers, 2016, 32(9): 64-70. 颜中辉, 栾锡武, 潘军, 等. 海上浅地层剖面处理的关键去噪技术[J]. 海洋地质前沿, 2016, 32(9): 64-70.
- [18] TAO H, LI Y J. Study on the method and application of quality improvement in shallow stratum profile[J]. Journal of Ocean Technology, 2017, 36(5): 135-140. 陶华, 李彦杰. 中浅地层剖面质量改进方法及应用[J]. 海洋技术学报, 2017, 36(5): 135-140.
- [19] ZHAO B, TAN J, LI J S, et al. Surface-related multiple prediction and attenuation of Sub-Bottom Profile[J]. Periodical of Ocean University of China, 2017, 47(8): 112-118. 赵波, 谭军, 李金山, 等. 浅地层剖面的自由界面多次波预测与衰减[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2017, 47(8): 112-118.
- [20] ZHENG J L, XU J, LI H D, et al. Analysis of how the background noise influencing the seismic data acquisition by single-channel seismograph[J]. Journal of Applied Oceanography, 2015, 34(1): 17-23. 郑江龙, 许江, 李海东, 等. 海上单道地震勘探中船舶等背景噪声的影响分析及压制[J]. 应用海洋学学报, 2015, 34(1): 17-23.
- [21] LI Z Y, ZHANG D J, WANG H Y, et al. Layout and optimization of investigation equipment for marine comprehensive research vessel[J]. Ship & Boat, 2017, 28(Supp.1): 92-100. 李治远, 张道建, 王海员, 等. 海洋综合科考船调查装备的布局与优化[J]. 船舶, 2017, 28(增刊1): 92-100.

Noise Characteristics Analysis of Sub-Bottom Profiler and Optimization of Field Acquisition Parameters

ZHANG Bin-bin, ZHAO Guo-xing, WU Yong-ting, ZHANG Dao-jian,
ZHANG Hai-quan, SUN Yang, LIU Kai

(*First Institute of Oceanography, MNR, Qingdao 266061, China*)

Abstract: The Sub-Bottom Profiler with advantages of flexible configuration, convenient operation, economic efficiency and high resolution, has been widely applied in the marine geology research and marine engineering investigation, and yet it is susceptible to noise interference. Based on analyzing the formation mechanism of the interference noise at the time of running the Sub-Bottom profiler, we design a data acquisition project to acquire the background noise and the interference noise of other acoustic equipment. Then analyzing characteristics of these noises will provide the basis for data acquiring and processing. Based on the noise characteristics, we propose that it is necessary to limit the range of transmitter frequency, and focus the energy on the superiority frequency band, and to apply reasonable filtering parameters to filter the noise of the other acoustic equipment. Finally, Taking the TOPAS PS 18 Parametric Sub-Bottom Profiler as an example, we set the source frequency range of '1.0~6.0 kHz', the pulse length of 10 ms, and the filtering threshold of 1.0-2.0-6.0-10.0 kHz, to suppress the noise from the other acoustic equipment, and we obtained a perfect sub-bottom profile.

Key words: Sub-Bottom Profiler; background noise; acoustic interference noise; field data acquisition; noise suppression

Received: July 15, 2019