

冯 京, 尉 佳, 刘长春, 等. 参量阵浅剖及电火花震源浅剖互补性分析[J]. 海洋地质前沿, 2019, 35(9): 63-68.

参量阵浅剖及电火花震源浅剖互补性分析

冯 京^{1,2}, 尉 佳^{1,2}, 刘长春^{1,2}, 潘 军^{1,2}

(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试点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)

摘 要:参量阵浅剖和电火花震源浅剖均具有分辨率高的特性, 通过对比探测原理以及分析实测剖面, 发现电火花震源浅剖和参量阵浅剖频带范围互不干扰, 电火花震源浅剖的鬼波效应造成海底以下 10 m 范围内地层判读困难, 而参量阵浅剖则在 10 m 以浅地层内具有极高的分辨率, 基于二者良好的互补性, 提出在海洋区域地质调查中同步应用参量阵浅剖和电火花震源浅剖两种技术手段的设想, 进而提高区域地质调查精度, 丰富区域地质调查成果。

关键词:高分辨率; 参量阵; 电火花; 互补性

中图分类号: P736; P56

文献标识码: A

DOI: 10.16028/j.1009-2722.2019.09010

0 引言

高分辨率浅剖探测设备研制始于 20 世纪 40 年代, 成熟设备推出于 20 世纪 70 年代^[1], 随着 20 世纪 90 年代电子信息技术的发展, 数字化的高分辨率浅地层剖面仪广泛出现, 由于其具有地层剖面分辨率高、探测成本低、采集效率高等特点^[2-3], 在海洋地质调查和海洋工程建设中得到广泛应用^[4-6], 尤其在大规模的海洋区域地质调查中起到了重要作用^[7-9]。通过对浅地层剖面调查数据的解译可以识别海底地层结构、推断海洋沉积环境演化、研究海底灾害地质因素等科学问题, 为海洋经济建设提供科学依据。笔者以近年来获取的不同采集模式的浅地层剖面数据为

基础, 通过对比采集原理、剖面主频、剖面分辨率及穿透深度来分析不同采集模式下的浅地层剖面的优缺点, 提出参量阵浅剖和电火花震源浅剖同步作业的设想, 兼顾浅层和中深层地层分辨率, 提高海洋区域地质调查的效率, 进而提高区域地质研究精度, 丰富区域地质调查成果。

1 基于发射声波类型的浅剖分类

浅地层剖面是利用声学探测信号在海水和海底沉积物中的传播和反射特性对海底沉积物地层结构进行探测, 进而获得直观的海底地层沉积剖面的一种海底声学探测技术。根据发射声波类型, 浅地层剖面探测系统可以分为调频发射和电火花发射 2 种模式, 其中调频模式又分为线性调频和非线性调频 2 种, 参量阵浅剖是非线性调频的典型代表。

1.1 参量阵浅剖

参量阵原理最早出现在 18—19 世纪, 利用参

收稿日期: 2019-05-25

基金项目: 中国地质调查局项目(DD20191003)

作者简介: 冯 京(1983—), 男, 工程师, 主要从事海洋地球物理调查与研究。E-mail: fengjing200272@163.com

量阵原理研制浅地层剖面仪始于 20 世纪 70 年代^[10],20 世纪末出现成熟的参量阵浅地层剖面仪,典型代表是德国 INNOMAR 公司 SES-2000 型参量阵浅地层剖面仪(图 1)。



图 1 SES-2000 型参量阵浅地层剖面仪

Fig.1 SES-2000 parametric array sub-bottom profiler

参量阵浅剖的工作原理是基于水介质的非线性特性,发射 2 个沿同一方向传播的非常接近的高频声波,利用 2 个高频声波信号的差频来探测海底沉积物的结构。当换能器向海底发射 2 个接近的高频声波信号(f_1, f_2)作为主频,所以差频($f_1 - f_2$)的频率就很低,其中反射回来的主频信号用于高精度的水深测量,差频用于海底地层的探测^[11]。以 SES-2000 参量阵浅地层剖面仪为例,基于此原理,将声波信号的激发和接收集成于同一个换能器,实现了换能器的小型化设计,而且波束角很小,分辨率较高。由于其体积小,作业中可进行便携式安装,同时可将 GPS 定位装置固定在安装杆上,后期不需再进行定位校正,图 2 为参量阵浅剖外业施工中的设备布设图。根据探测目的

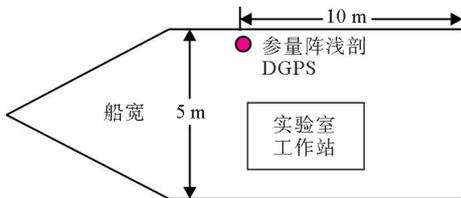


图 2 参量阵浅剖作业示意图

Fig.2 Schematic diagram of the parametric array operation

的不同,SES-2000 参量阵浅地层剖面仪设置了 4、6、8、10、12 kHz 等 5 种可选频率参数,作业中根据实际地震地质条件及探测目的,通过反复的试验,对比后选定作业参数。

1.2 电火花震源浅剖

电火花震源是最早应用于海洋地震勘探的非炸药震源,世界上第 1 台电火花震源系统由阿尔卑斯地球物理公司在 1957 年研制推出^[12]。电火花震源因其能量强,穿透深度大,同时具有较高的分辨率,因此被广泛应用在海洋地质调查中。

电火花震源浅剖的原理是基于电火花产生的声脉冲信号,通过对不同声阻抗界面反射回的声脉冲信号的放大和处理,生成海底地层的沉积剖面,揭示海底地层的沉积演化。以英国 AAE 公司 CSP-D2400 为例(图 3),电火花震源主要由充电回路、震源箱体(电容器组、触发开关、能量控制)、高压盒、放电电缆、放电筏体、放电电极等组成(图 4)。通过对震源箱体中的电容器组进行充电,当达到额定电压后,随着采集工作站发出的触发信号,高压电流在放电电极端释放,瞬间产生高温高压环境,将水汽化,产生等离子体从而形成地震波,进而进行地震勘探^[13]。

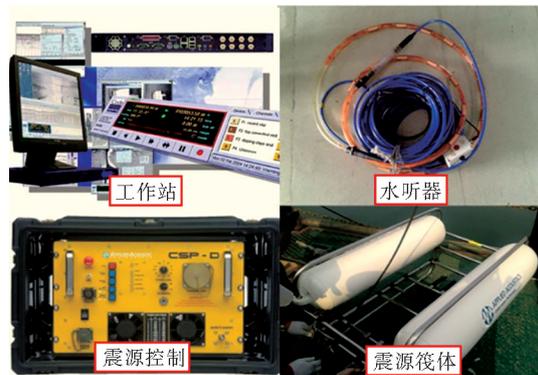


图 3 CSP-D2400 电火花震源系统

Fig.3 CSP-D2400 spark source system

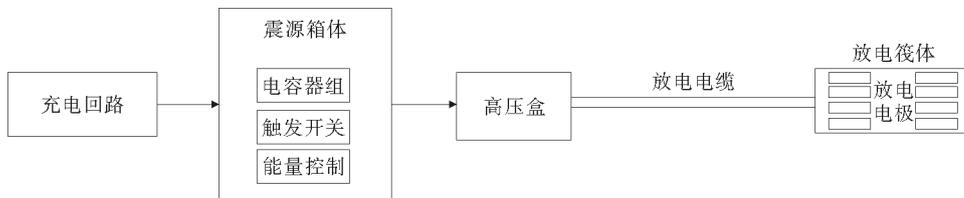


图 4 电火花震源示意图

Fig.4 Schematic diagram of spark source

电火花震源采用拖曳式作业方式,根据船体噪声大小配合信号接收电缆选取合适的拖曳距离,图 5 为某浅剖项目实施中的设备布置图。电火花震

源能量的大小往往根据探测目的层的要求来确定,同时结合水听器特性,通过在实际调查区域进行多参数组合测试来确定最佳的采集参数^[14]。

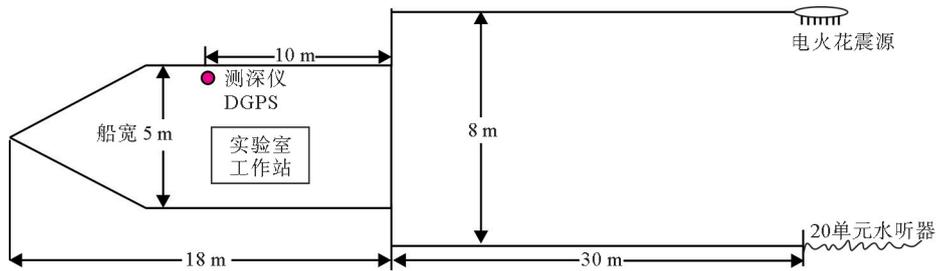


图 5 电火花震源浅剖作业示意图

Fig.5 Schematic diagram of spark source operation

2 主频、分辨率及穿透深度对比

近年来我国海洋区域地质调查中完成了大量的浅地层剖面调查任务,从海岸带综合地质调查到大洋浅层地质调查,其中应用最广泛的浅剖设备为参量阵浅剖测量系统和电火花震源浅剖测量系统,以下将通过两者的主频、分辨率以及穿透深度进行详细的对比分析。

以舟山近海获取的参量阵和电火花震源浅剖资料为例,图 6 为参量阵 SES-2000 获得的浅剖面及对应的频谱图,从图 6 中可以发现有效频带范围在 3.5~16.5 kHz,主频集中在 10 kHz;图 7

为电火花震源 DA500 浅剖设备获得的浅剖剖面及对应的频谱图,从图 7 中可以发现有效频带范围在 250~950 Hz,主频集中在 600 Hz。因此,在数据采集过程中两者互不干扰,具备同步作业的可能性。

浅剖调查中分辨率通常指的是垂向分辨率,其与反射信号脉冲宽度有关,理论公式如下^[15]:

$$t_R = \frac{1}{2}CT \tag{1}$$

式中: t_R 为垂向分辨率;

C 为声速;

T 为脉冲宽度。

从公式(1)可知,浅剖的分辨率与发射脉冲有

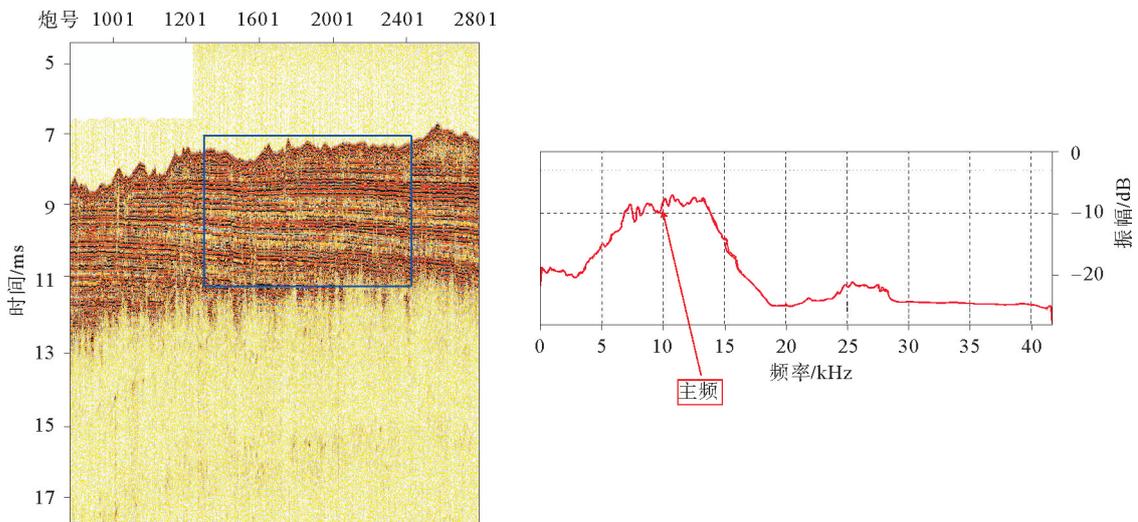


图 6 参量阵浅剖剖面及频谱图

Fig.6 Sub-bottom profile and spectrum of parametric array

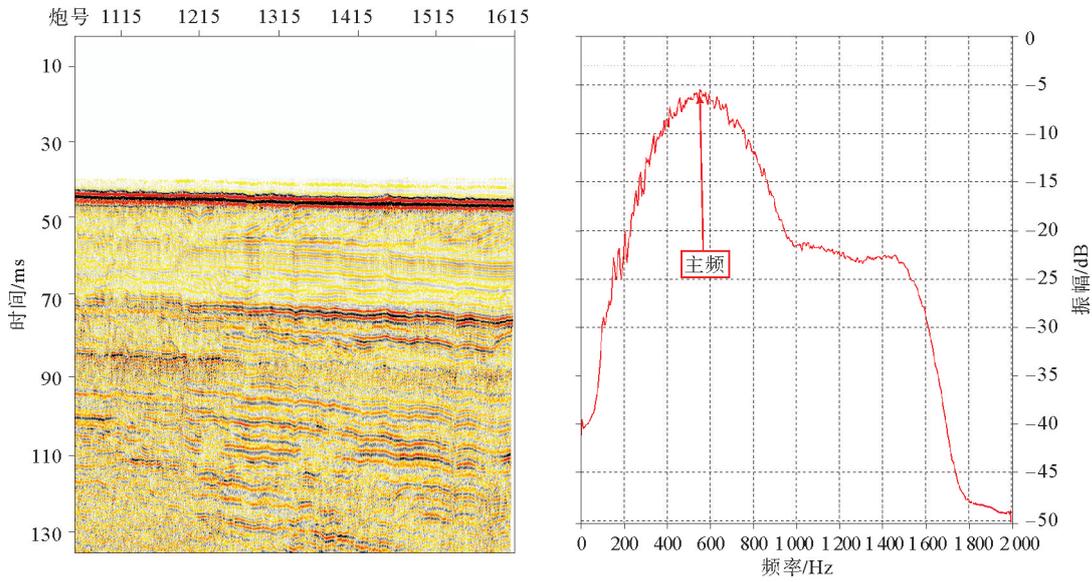


图7 电火花浅剖剖面及频谱图

Fig.7 Sub-bottom profile and spectrum of spark source

直接关系,信号脉冲宽度越窄,分辨率越高,最小分辨率为 $\frac{1}{2}CT$,但发射功率和脉冲宽度的相关性决定了发射功率越大,信号脉冲宽度也越大,而浅剖的穿透深度与发射功率有正相关性,因此发射功率越大,分辨率越低,穿透深度越大,发射功率越低,分辨率越高,穿透深度越小,由此可以得知浅地层剖面的分辨率和穿透能力是相互矛盾的。实际作业过程中,需考虑地层的属性,如沙质、泥质等,结合浅剖设备的性能进行多参数综合试验,确定最佳作业参数。

图8为近年在舟山海域获得的参量阵浅地层

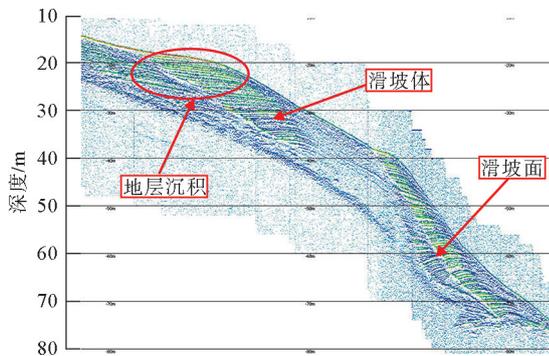


图8 参量阵浅剖实测滑坡体剖面

Fig.8 Sub-bottom profile of a landslide by parametric array

典型剖面,采集设备为 SES-2000 参量阵浅地层剖面仪,表 1 为综合试验后的采集参数。从图 8 可以看出,剖面同相轴连续,分辨率极高,海底以下地层的沉积层理清晰可见,穿透深度 10~20 m,海底滑坡面清晰可见,海底滑坡目标体的厚度可精确计算。

表 1 参量阵浅剖采集参数

Table 1 Acquisition parameters of parametric array sub-bottom profile

设备型号	激发模式	激发频率
SES-2000	单频	10 kHz

图 9 为近年在渤海湾某处海域获得的电火花震源浅地层剖面典型资料,采集设备为 DA500 工作站,震源为 CSP-D2400 型电火花设备,表 2 为实测海域综合试验后选取的采集参数。从图 9 中可以看出,地层反射清晰,地层剖面同相轴连续,可清晰识别地层沉积界面,有效划分地层沉积序列,地层剖面分辨率较高,同时地层穿透深度近 100 m,且能清晰的反映出深部地层信息,但是从图 9 中也可以明显发现海底以下 10 m 内地层信息被鬼波效应所覆盖,造成地层信息拾取困难,无法有效判读地层沉积特征,对全新世地层的研究带来较大困难。

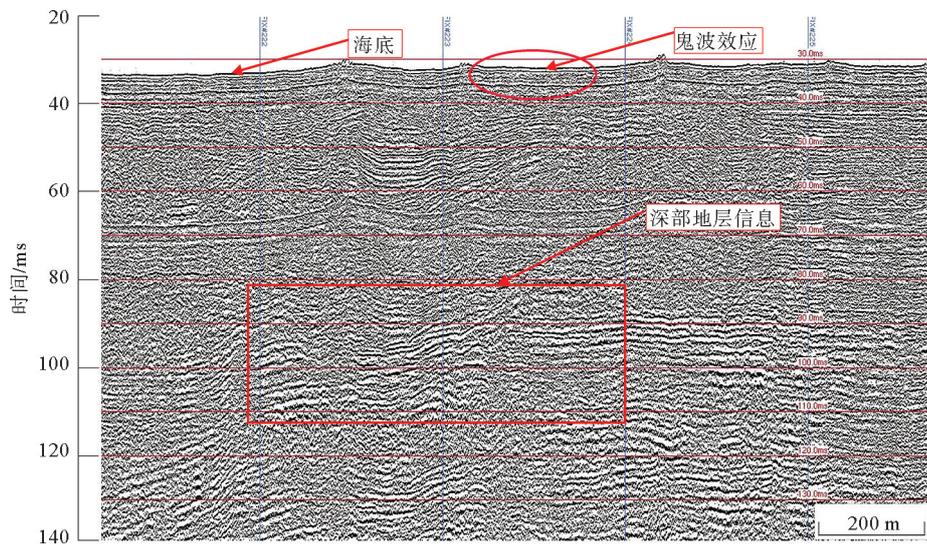


图 9 电火花震源浅剖实测地层剖面

Fig.9 Sub-bottom profile of spark source

表 2 电火花震源浅剖采集参数

Table 2 Acquisition parameters of spark source sub-bottom profile

激发能量/ J	触发间隔/ ms	震源换能器 沉放深度/m	水听器沉放 深度/m	震源换能器 拖放长度/m	水听器拖放 长度/m	带通滤波/ Hz	记录量程/ ms
600	800	0.3~0.6	0.2	40	40	300~3 000	300

3 结论

通过对比探测原理和邻近海区实测浅地层剖面,SES-2000 参量阵浅剖有效频带范围为 3.5~16.5 kHz,电火花震源浅剖有效频带范围为 250~950 Hz,因此二者在频率域具有互补性;参量阵浅剖 10 m 以浅分辨率可达到 10 cm,能很好的解决海洋地质调查中全新世地层演化研究的科学问题,但地层穿透深度很难达到 20 m 以上;电火花震源浅剖受鬼波效应影响,造成 10 m 以浅地层信息判读困难,但其具有丰富的有效频带宽度,分辨率可达 50 cm,有效穿透地层深度可达 100 m,可满足第四纪地质层序分析。因此,通过结合两者的优点,可进行同步作业的尝试,测量数据可提高海洋地质调查的精度,丰富海洋区域地质调查的成果。另外,采集数据的频带范围与采集参数的设置密切相关,因此在不同的海区需进行充分的海上参数试验论证分析,最终确定是否可同步测量。

参考文献:

- [1] 金翔龙.海洋地球物理研究与海底探测声学技术的发展[J].地球物理学进展,2007,22(4):1243-1249.
- [2] 张金城,蔡爱智,郭一飞,等.浅地层剖面仪在海岸工程上的应用[J].海洋工程,1995,13(2):71-74.
- [3] 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):87-93.
- [4] 刘保华,丁继胜,裴彦良.海洋地球物理探测技术及其在近海工程中的应用[J].海洋科学进展,2005,23(3):374-384.
- [5] 赵铁虎,李军,张昇彪,等.舟山海域海砂资源声地层剖面探测研究[J].物探与化探计算技术,2011,33(3):340-345.
- [6] 张训华,孙晓明,印萍,等.推进海岸带综合地质调查,为社会经济持续发展提供支撑[J].海洋地质前沿,2015,31(1):1-8.
- [7] 陈晓辉,张训华,李日辉,等.渤海海峡海域灾害地质研究[J].海洋地质与第四纪地质,2014,34(1):11-19.
- [8] 仇建东,张勇,孔祥淮,等.SES-96 山东半岛南部滨浅海区晚第四纪声学地层[J].海洋地质与第四纪地质,2015,35(2):1-10.
- [9] 孔祥淮,毕世普,刘健,等.南黄海西部陆架区末次盛冰期古河谷体系地貌形态特征[J].海洋地质与第四纪地质,2016,36(6):123-133.

- [10] 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.
- [11] 张兆富.SES-96参量阵测深/浅地层剖面仪的特点及其应用[J].中国港湾建设,2001,21(3):41-44.
- [12] 裴彦良,王揆洋,刘晨光,等.电火花震源系统充放电技术研究[J].海洋技术,2007,26(3):73-76.
- [13] 蒋辉,李海军,高斌,等.电火花震源在石油地震勘探中的应用[J].物探装备,2018,28(1):42-56.
- [14] 冯京,赵铁虎,刘怀山,等.高分辨率浅剖数据采集参数分析[J].物探化探计算技术,2014,36(2):200-206. DOI: 10.3969/j.issn.1001-1749.2014.02.13.
- [15] 万芑,牟泽霖. Chirp型浅地层剖面仪和参量阵浅地层剖面仪的对比分析[J].地质装备,2015,16(4):24-28.

COMPLEMENTARITY ANALYSIS OF PARAMETRIC ARRAY AND SPARK SOURCE SUB-BOTTOM PROFILERS

FENG Jing^{1,2}, WEI Jia^{1,2}, LIU Changchun^{1,2}, PAN Jun^{1,2}

(1 Qingdao Institute of Marine Geology, CGS, Qingdao 266071, China; 2 Laboratory for Marine Mineral Resources, Pilot National Laboratory for Marine Science and Technology (Qingdao), Qingdao 266071, China)

Abstract: Both the parametric array and spark source sub-bottom profilers have high resolution. By comparing the working principles and measured profiles, it is found that parametric array and the spark source sub-bottom profilers do not interfere with each other. And the ghost wave effect of the spark source may cause difficulties in the interpretation of the sub-bottom profilers within 10m below the seabed, while the parametric array sub-bottom profiler has a very high resolution in the profile within 10m. The good complementarity of the two methods makes us possible to use them in the geological survey offshore, and the accuracy of regional geological survey can be much improved.

Key words: high resolution; parametric array; spark; complementarity