

万 芑, 温明明, 牟泽霖. 单道地震电缆检波器线性组合特性分析[J]. 华南地震, 2015, 35 (2): 60–66. WAN Peng, WEN Mingming, MU Zelin. Characteristics Analysis of Geophone Linear Array in Single-channel Seismic Cable[J]. South china journal of seismology, 2015, 35(2): 60–66.]

## 单道地震电缆检波器线性组合特性分析

万 芑<sup>1, 2</sup>, 温明明<sup>1, 2</sup>, 牟泽霖<sup>1, 2</sup>

(1. 国土资源部海底矿产资源重点实验室, 广州 510075; 2. 国土资源部广州海洋地质调查局, 广州 510075)

**摘要:** 单道地震电缆采用检波器线性组合方式, 单道地震剖面的信噪比和分辨率与检波器线性组合特性密切相关。将对检波器线性组合方式的方向特性和滤波特性进行了理论分析, 并结合海上试验数据, 对不同勘探目的、作业水深和检波器线性组合参数条件下的单道地震剖面及其频谱进行对比分析。研究结果认为: 在浅水海域, 或探测目标层较浅的海洋单道地震勘探中, 可选择检波器数量较少且相邻检波器间距较小的检波器组合方式, 以提高资料分辨率; 而在深水海域和探测目标层较深的海洋单道地震勘探时, 应该选择检波器数量较多且相邻检波器间距较大的检波器组合方式, 以改善资料信噪比。

**关键词:** 单道地震、接收电缆、检波器、分辨率、信噪比

中图分类号: P631.443 文献标志码: A 文章编号: 1001-8662 (2015) 02-0060-07

DOI: 10.13512/j.hndz.2015.02.010

## Characteristics Analysis of Geophone Linear Array in Single-channel Seismic Cable

WAN Peng<sup>1, 2</sup>, WEN Mingming<sup>1, 2</sup>, MU Zelin<sup>1, 2</sup>

(1. Key Laboratory of Marine Mineral Resources, Ministry of Land Resources, Guangzhou 510075, China;

2. Guangzhou Marine Geological Survey, Ministry of Land Resources, Guangzhou 510075, China)

**Abstract:** The single channel seismic cable uses geophone linear array to acquisite seismic profile, The profile's signal to noise ratio and resolution is closely related to the character of geophone linear array. This paper analyzes the directional character and filter character of the geophone linear array, and does comparative analysis of single channel seismic profiles and spectrums which are acquisited in different exploration purpose, water depth and parameters of the geophone linear array by combining with test data. The results show that: we should choose the geophone linear array which uses fewer geophones and smaller adjacent geophone spacing to detect shallower target layer in the shallow waters, so that we can improve the profile's resolution. On the other hand, we should choose the geophone linear array which uses more geophones and bigger adjacent geophone

收稿日期: 2014-08-27

基金项目: 国家 863 课题: 天然气水合物冷泉声学采集技术(课题号: 2013AA0925010102)

作者简介: 万 芑 (1983-), 男, 工程师, 从事海洋地质勘查技术方法研究。

E-mail: wanpeng9999@126.com.

spacing to detect deeper target layer in the deep waters, so as to improve profile's signal to noise ratio in this way.

**Key words:** Single channel seismic; Seismic cable; Geophone; Resolution; Signal to noise ratio

## 0 引言

单道地震探测系统是一种可用于水域高分辨地震勘探的调查设备,主要由震源、接收电缆以及震源触发控制和数据记录主机组成<sup>[1]</sup>。单道地震电缆采用检波器线性组合接收技术,通过多个检波器串联或并联连接,线性排列密封在充满油的塑料管内,拖曳在作业船船尾接收地震反射信号。作为单道地震系统的信号接收单元,它的接收性能将直接影响最终剖面质量。

一直以来,在地震勘探中,噪音是提高资料分辨率的最大“公敌”<sup>[2]</sup>。在地震勘探中,利用检波器线性组合的方向特性和滤波特性,作为提高资料信噪比的主要手段之一,已经被广泛应用于实际野外资料采集系统中<sup>[3-4]</sup>。然而,检波器线性组合的低通滤波特性,在提高了资料信噪比的同时,也损失了有效信号的高频成分,致使有效信号的频带宽度变窄,这样就降低了资料的整体分辨率<sup>[5-6]</sup>。目前,国内外针对陆地地震的检波器组合特性研究较多<sup>[7-8]</sup>,而针对海洋地震勘探中的检波器线性组合特性研究较少。检波器线性组合具两面性,即提高资料采集信噪比的同时降低了采集分辨率。在海洋单道地震勘探中,针对不同勘探目的和作业水深,如何选择适当的检波器线性组合参数,压制水体中的高频噪音和随机噪音,提高资料的信噪比,又能保证采集分辨率,最终获得高质量的采集资料,这一问题一直是开展高分辨海洋单道地震勘探技术方法研究过程中的难点。

本文将从水声学的基础理论研究出发,结合野外试验,对不同勘探目的、作业水深和组合参数条件下的检波器线性组合特性进行详细分析,为野外作业中的检波器组合参数的选择提供理论依据。

## 1 多检波器线性组合原理

设有 $n$ 个检波器沿直线等距排列,检波器间距为 $\Delta x$ 。为简化讨论,设地震波为平面波,波前和地面夹角为 $\alpha$ 。地震波速度为 $V$ (如图1所示)。把第一个检波器接收到的振动时间记为零,振动函数为 $f(t)$ 。又设各检波器接收到的振动波形和

振幅一样,只是有相对时差。那么第二个检波器接收到的振动相对于第一个要晚 $\Delta t$ 。这个时差 $\Delta t$ 与 $\Delta x$ 、 $V$ 、 $\alpha$ 三个参数有关。

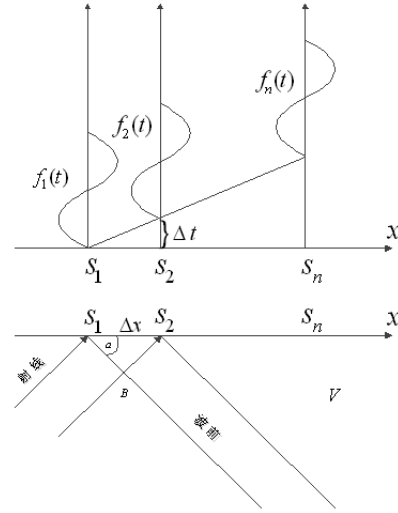


图1  $n$ 个检波器线性组合示意图

Fig.1 The diagram of  $n$  geophones linear array

$$\Delta t = \frac{S_2 B}{V} = \frac{\Delta x \sin \alpha}{V} \quad (1)$$

第二个检波器接收到的振动是 $f(t-\Delta t)$ ,第三个检波器接收到的振动是 $f(t-2\Delta t)$ ,依次类推,第 $n$ 个检波器接收到的振动是 $f(t-(n-1)\Delta t)$ 。

设 $f(t)$ 的频谱是 $g(j\omega)$ ,根据延时定理,有: $f(t-\Delta t)$ 的频谱为 $g(j\omega)e^{-j\omega\Delta t}$ , $f(t-2\Delta t)$ 的频谱为 $g(j\omega)e^{-2j\omega\Delta t}$ , $f(t-(n-1)\Delta t)$ 的频谱为 $g(j\omega)e^{-(n-1)j\omega\Delta t}$ 。

组合后的和振动为:

$$F(t) = f(t) + f(t-\Delta t) + f(t-2\Delta t) + \dots + f(t-(n-1)\Delta t) \quad (2)$$

对上次进行傅里叶变换后,将 $F(t)$ 的傅里叶变换为 $G(j\omega)$ :

$$G(j\omega) = g(j\omega) [1 + e^{-j\omega\Delta t} + e^{-2j\omega\Delta t} + \dots + e^{-(n-1)j\omega\Delta t}] \quad (3)$$

设定 $K(j\omega) = 1 + e^{-j\omega\Delta t} + e^{-2j\omega\Delta t} + \dots + e^{-(n-1)j\omega\Delta t}$

$$= \sum_{i=1}^{n-1} e^{-j\omega i \Delta t} = \frac{1 - e^{-nj\omega\Delta t}}{1 - e^{-j\omega\Delta t}}$$

又设定 $\Delta\varphi = -\omega\Delta t$ ,则有

$$K(j\omega) = \frac{1 - e^{-nj\Delta\varphi}}{1 - e^{-j\Delta\varphi}} \quad (4)$$

化简后得到:

$$K(j\omega) = \frac{\sin \frac{n\Delta\varphi}{2}}{\sin \frac{\Delta\varphi}{2}} e^{j\frac{n-1}{2}\Delta\varphi} \quad (5)$$

通常称为组合的方向频率特性, 由公式(5)可知,  $K(j\omega)$  是一个复数, 它的振幅特性为:

$$|K(j\omega)| = \frac{\sin \frac{n\Delta\varphi}{2}}{\sin \frac{\Delta\varphi}{2}} \quad (6)$$

它的相位特性为:

$$\theta(\omega) = +\frac{(n-1)}{2}\Delta\varphi \quad (7)$$

根据公式(6)和公式(7), 设定单个检波器收到的振动振幅为  $A_0$ , 初相位为 0 的简谐波  $f(t) = A_0 \sin \omega t$  时, 则  $n$  个检波器线性组合的输出  $F(t)$  可写成:

$$F(t) = A_0 \frac{\sin \frac{n\Delta\varphi}{2}}{\sin \frac{\Delta\varphi}{2}} \sin \left( \omega t + \frac{(n-1)}{2}\Delta\varphi \right) \quad (8)$$

根据式(8)可知, 总输出信号的振幅为:

$$A_{\Sigma} = A_0 \frac{\sin \frac{n\Delta\varphi}{2}}{\sin \frac{\Delta\varphi}{2}} \quad (9)$$

也即  $A_{\Sigma}$  与  $\Delta\varphi$  和  $n$  有关, 其中  $\Delta\varphi = -\frac{\omega \Delta x \sin a}{V}$ 。

这就表明总振动  $A_{\Sigma}$  与波的入射角  $a$  有关。从深层水平界面来的反射波差不多垂直入射到地面 (即  $a \approx 90^\circ$ ), 这时  $A_{\Sigma} \approx nA_0$ , 即总振幅增加了  $n$  倍, 说明有效波得到加强, 而对其它角度的干扰波, 则相对地受到压制<sup>[9-10]</sup>。

通常用组合后总振动的振幅与组合前单个检波器接收到的振动振幅的  $n$  倍之比值

$$\begin{aligned} \varphi(n, \Delta\varphi) &= \frac{A_{\Sigma}}{nA} = \frac{\sin \frac{n\Delta\varphi}{2}}{n \sin \frac{\Delta\varphi}{2}} \\ &= \frac{1}{n} \frac{\sin (N\pi \Delta x / \lambda^*)}{\sin (\pi \Delta x / \lambda^*)} \end{aligned} \quad (10)$$

$\varphi(n, \Delta\varphi)$  称为组合的方向特性, 表示组合对来自不同方向的波的相对加强或压制效果<sup>[11-12]</sup>。

由图 2 可知, 组合检波为低通滤波器,  $\varphi(n, \Delta\varphi) \geq 0.707$  对应区域为通带, 而  $\varphi(n, \Delta\varphi) < 0.707$  对应的区域为阻带, 而且带通宽度, 随着  $n$ 、 $\Delta t$ 、 $\Delta x$  增大而变窄, 由于采集分辨率信号频率和带宽有关, 信号频率越高, 带宽越大, 分辨率越高, 即采集分辨率随着  $n$ 、 $\Delta t$ 、 $\Delta x$  增大而变低<sup>[13]</sup>。

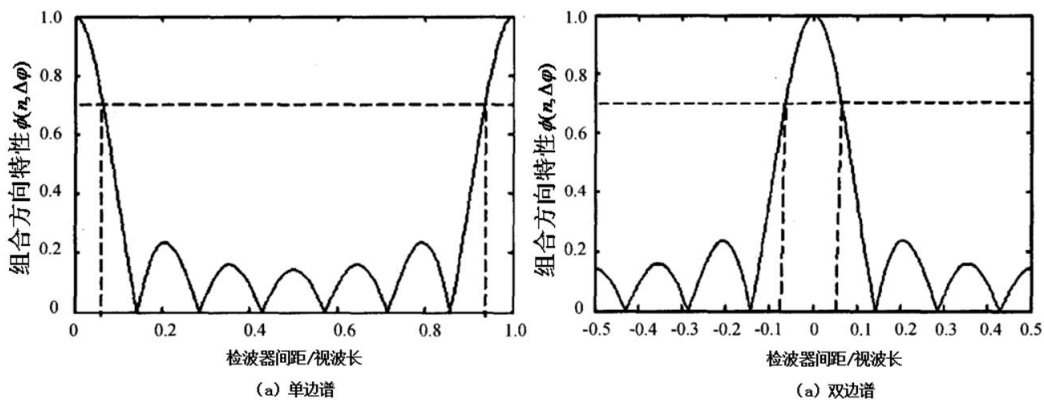


图 2 7 个检波器线性组合方向特征曲线

Fig.2 The directional characteristic curve of seven geophones linear array

通过上述理论分析可以得出: 由于检波器组合的方向特性, 检波器数量越多, 其对噪音的压制效果越好, 可提高采集信噪比, 而检波器数量的增加也增强了检波器组合的滤波效应, 降低了采集分辨率; 检波器线性组合相邻检波器间距的减小, 可以削弱检波器组合的滤波效应, 提高采集分辨率, 但同时也降低了采集信噪比。

## 2 实例分析

海洋单道地震勘探具有采集分辨率高、设备操作维护简单和作业效率率高且费用低等特点, 主要用于海底沉积物地层结构的探测, 可适用于天然气水合物资源调查<sup>[14]</sup>、海洋区域地质调查、海洋井位调查以及浅水工程物探调查<sup>[15]</sup>等。单道地震

电缆的检波器线性组合参数作为海洋单道地震勘探中的一个重要作业参数，其直接影响最终资料采集效果。为了开展海洋地震勘探中的检波器线性组合特性研究，在不同作业水深条件下，笔者开展了两次海上对比试验。

(1) 第一次海上对比试验。2013 年 3 月，笔者采用 SIG2MILE 小容量电火花震源，IXSEA DELPH 数字记录系统，分别使用 GEO 接收电缆和 AAE 接收电缆接收数据，在南海北部海域浅水海域（水深大约 20 m）开展海上对比试验。本次海上试验技术参数见表 1。

本次海上对比试验中采用小容量电火花震源。该类型震源的主要技术特点：主频高且频带宽，其采集分辨率高，但是震源能级较小，且声波主频越高，声波传播过程中能量损失越大。因而这类小容量电火花震源地层穿透能力不强，一般在几百毫秒以内，主要适用于作业水深较浅且探测目的层较浅的高分辨率单道地震勘探，如浅水井

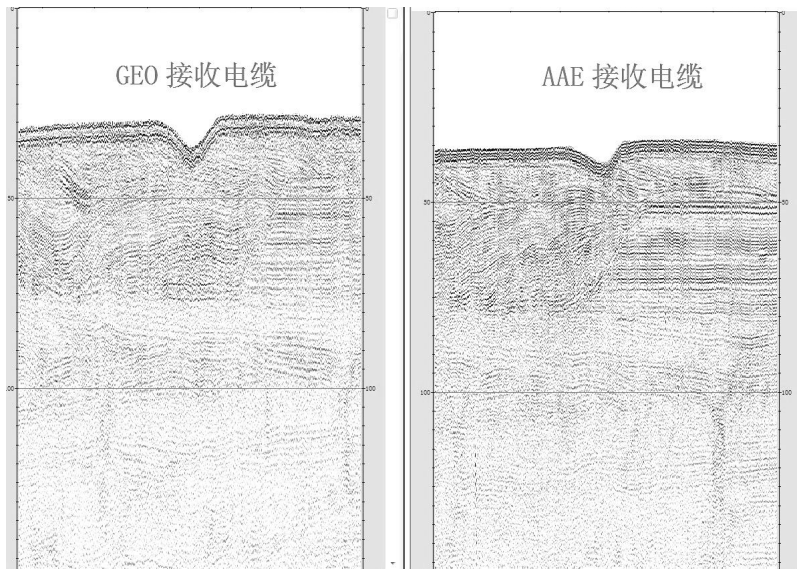
位调查和近岸工程物探调查等。

GEO 接收电缆和 AAE 接收电缆两种单道地震接收电缆采集的单道地震剖面及其频谱对比如下图 3 和图 4 所示。

GEO 接收电缆检波器单元数量要多于 AAE 接收电缆，而且 GEO 接收电缆检波器相邻检波器间距也要大于 AAE 接收电缆，根据上文的理论分析，GEO 接收电缆信噪比高，而 AAE 接收电缆采集剖面分辨率高。在图 3 采集剖面对比图中，可以看出，从海底到海底以下 100 ms，AAE 接收电缆的地层分辨率要明显高于 GEO 接收电缆，这样验证了上述的理论分析结论。另外从图 4 频谱对比图可以看出，GEO 接收电缆接收主频在 600 Hz，而 AAE 接收电缆接收主频在 900 Hz，两者频带宽度都为 1 000 Hz 左右，从信号频谱方面来看，AAE 接收电缆海底浅部沉积物地层分辨率要高于 GEO 接收电缆；由于作业区域水深较浅，电火花震源能量在传输过程中损失较小，相邻检波器间

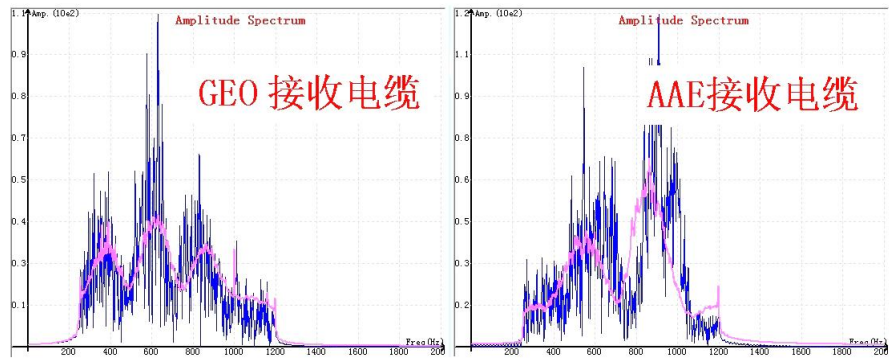
表 1 第一次海上南海北部对比试验主要设备及其技术参数  
Table 1 Major equipments and technical parameters in first sea test

单道地震震源	震源激发能量	震源主频/Hz	记录系统	接收电缆型号	检波器单元个数/个	相邻检波器间距/m	检波器灵敏度	检波器接收带宽/Hz
SIG2MILE 小容量电火花震源	1000J	600~1200	IXSEA DELPH 数字记录系统	GEO-SENSE 接收电缆	48	0.33	-201dB ref 1v per $\mu$ Pa	1~10 000
				AAE 接收电缆	20	0.15	-167dB ref 1v per $\mu$ Pa	100~10 000



左图：SIG 接收电缆采集剖面；右图：AA 接收电缆采集剖面  
图 3 采集剖面对比图

Fig.3 Comparison chart of seismic profile



粉红色线为单 PING 频谱，蓝色线为整个剖面频谱叠加

图 4 采集剖面频谱对比图

Fig.4 Spectrums comparison chart of seismic profile

距对信噪比的影响很小，从图 4 频谱对比图中可以看出，两种电缆接收的主频振幅幅值相差不大。

通过图 3 和图 4 的试验数据对比分析可知：针对浅水海域、探测目标层较浅的高分辨率调查项目中，单道地震震源通常采用高分辨率电火花震源，在这种情况下，采用检波器单元个数较少，且相邻检波器间距较小的检波器组合方式可以采集到更好的高分辨率单道地震资料。

(2) 第二次海上对比试验。2013 年 10 月，笔者采用气枪组合震源，IXSEA DELPH 数字记录系统，分别使用 SIG 接收电缆和 AA 接收电缆接收数据，在南海中部深水海域(水深大约 2 200 m)开展对比试验。本次海上试验技术参数见表 2。

本次海上对比试验采用气枪组合震源。该类型震源的主要技术特点：主频低且频带窄，其采集分辨率低要低于电火花震源，但是震源能级较大，且声波主频越低，声波传播过程中能量损失越小。因而气枪组合震源地层穿透能力远强于电火花震源，一般在几百毫秒到一千毫秒以上，主要适用于作业水深较深且探测目的层较深的单道地震勘探，如深水海洋区域调查等大范围地质构造普查。

SIG 接收电缆和 AA 接收电缆两种单道地震接收电缆采集的单道地震剖面及其频谱对比如下图 5 和图 6 所示。

SIG 接收电缆检波器单元个数要多于 AA 接收

表 2 第二次海上南海北部对比试验主要设备及其技术参数

Table 2 Major equipments and technical parameters in second sea test

单道地震震源	气枪组合总容量	震源主频/Hz	记录系统	接收电缆型号	检波器单元个数/个	相邻检波器间距/m	检波器灵敏度	检波器接收带宽/Hz
气枪组合震源	680 in <sup>3</sup>	100	IXSEA DELPH 数字记录系统	SIG 接收电缆	48	1.0	-90dB ref 1v per $\mu$ Pa	15~1 000
				AAE 接收电缆	24	0.45	-167dB ref 1v per $\mu$ Pa	100~7 000

电缆，而且 SIG 接收电缆检波器相邻检波器间距也要大于 AA 接收电缆，根据上文的理论分析，SIG 接收电缆信噪比高，而 AA 接收电缆采集剖面分辨率高。

在图 5 采集剖面对比图中，可以看出，在地震剖面某些局部上，AA 接收电缆采集剖面的分辨率要高于 SIG 接收电缆，但是 AA 接收电缆采集剖面的整体信噪比要远低于 SIG 接收电缆，SIG 接收

电缆采集剖面的连续性和海底沉积物地层可辨识度要更好，其采集剖面效果更有利于后期数据解释。另外从图 6 频谱对比图可以看出，SIG 接收电缆接收主频在 100 Hz，而 AA 接收电缆接收主频在 150 Hz，两者频带宽度都为 150 ~200 Hz，AA 接收电缆的接收主频及频带宽度都要略高于 SIG 接收电缆，从上述理论分析可知：AA 接收电缆采集分辨率要略高于 SIG 接收电缆。由于作业区域



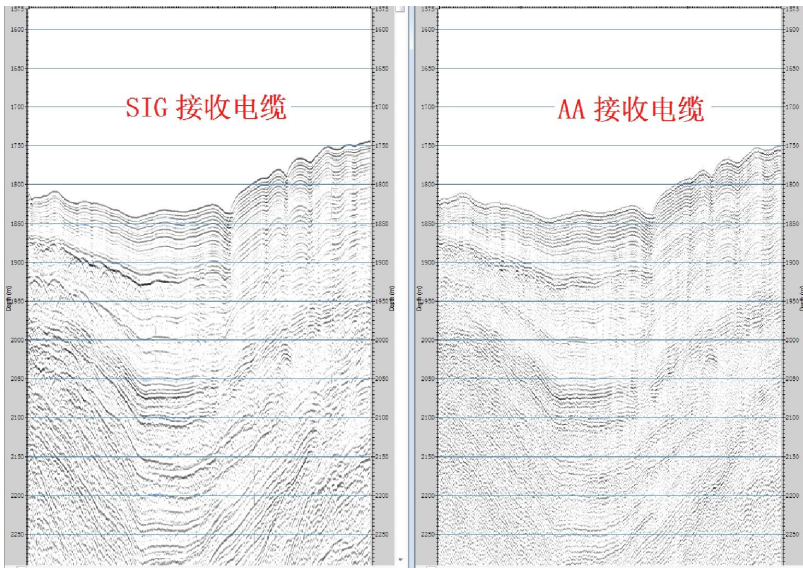
水深较深，震源能量在声波传播过程中损失较大，采用不同检波器组合参数其采集信噪比相差较大。从图 6 可以看出，SIG 接收电缆采集信号的有效信号振幅幅值要明显大于 AA 接收电缆。

通过图 5 和图 6 的试验数据对比分析可认为：针对深水海域且探测目标层较深的海洋单道地震勘探项目中，通常对地层分辨率要求较低，单道地震震源一般采用气枪震源，在这种情况下，采用检波器单元个数较多，而且相邻检波器间距较大的检波器组合方式可以采集到高信噪比的单道地震资料。

3 结语

通过上述检波器线性组合原理的方向特性和滤波特性的理论分析，并结合两次野外数据对比试验，对海上单道地震勘探中的检波器线性组合参数的选择有以下几点认识：

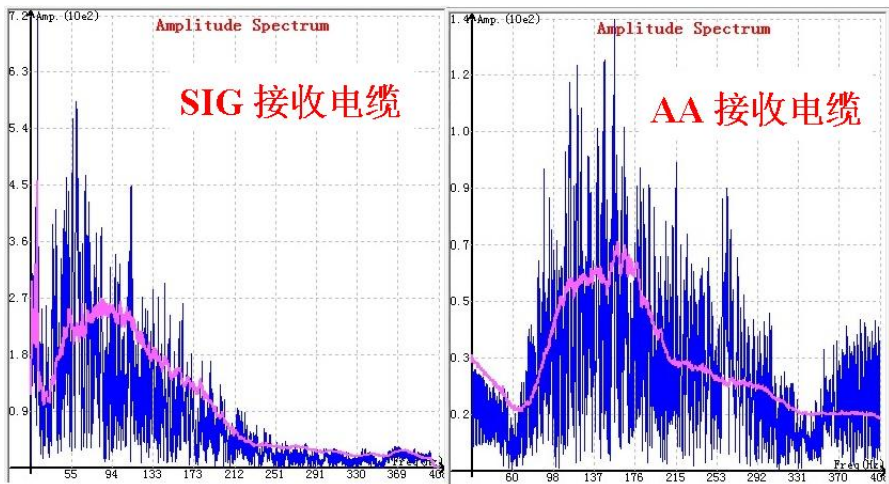
(1) 检波器组合由于其方向特性和滤波特性，会直接影响最终采集资料的分辨率和信噪比。检波器数量越少、相邻检波器间距越小，其采集分辨率越高，同时信噪比越低；而检波器数量越多、



左图 SIG 接收电缆采集剖面，右图为 AA 接收电缆采集剖面

图 5 采集剖面对比图

Fig.5 Comparison chart of seismic profile



粉红色线为单 PING 频谱，而蓝色线为整个剖面频谱叠加

图 6 采集剖面频谱对比图

Fig.6 Spectrums comparison chart of seismic profile

相邻检波器间距越大,其采集信噪比越高,但是分辨率越低。在野外作业中,应根据不同的勘探目的和作业水深,选择不同的检波器组合参数,达到分辨率和信噪比的最佳平衡,以获取最佳资料采集效果。

(2) 在浅水海域作业,针对探测目标层较浅的高分辨率海洋单道地震勘探中,单道地震震源一般采用电火花震源。由于声波传输距离短,其能量损失小,其采集剖面的信噪比可以得到保证,在作业中应以提高作业分辨率为主,应选择检波器数量较少和相邻检波器间距较小的检波器组合方式,这样可在保证信噪比的基础上,提高资料分辨率。

(3) 在深水海域作业,针对探测目标层较深的海洋单道地震勘探时,单道地震震源通常采用气枪震源。由于声波传输距离长,其能量在传输过程中损失较大,这就要求在作业中,应尽量提高资料采集的信噪比。因此,建议选择检波器数量较多和相邻检波器间距较大的检波器组合方式,这样才能采集到高信噪比的单道地震资料。

在此特别向广州海洋地质调查局徐行教授致谢,感谢他对本文提出的许多有益的建议。

#### 参考文献:

- [1] 何汉漪. 海上高分辨率地震技术及其应用[M]. 北京: 地质出版社, 2001.
- [2] 李庆忠. 地震高分辨率勘探中的误区与对策[J]. 石油地球物理勘探, 1997, 32 (6): 751-783.
- [3] E.J.W. Jones. Marine Geophysics [M]. Chichester: John Wiley, 1999.
- [4] 钱绍瑚, 李套山. 高分辨率地震勘探中接收系统的滤波效应[J]. 石油物探, 1997, 36 (3): 39-45.
- [5] 张山. 线性相干噪声及消除方法[J]. 石油物探, 1986, 25 (3): 14-22.
- [6] 王庆海, 徐明才. 抗干扰高分辨率浅层地震勘探[M]. 北京: 地质出版社, 1991.
- [7] 陆基孟. 地震勘探原理[M]. 北京: 中国石油大学出版社, 1993.
- [8] Mark H. Chebyshev optimized geophone arrays[J]. Geophysics, 1963, 28 (2): 145-155.
- [9] 张智, 李飞, 黄志芳, 等. 地震勘探中检波器组合特性研究[J]. 地球物理学进展, 2009, 24 (6): 2117-2121.
- [10] 王珂. 检波器组合对高分辨率地震勘探的影响[J]. 中国煤炭地质, 2010, 22 (7): 62-65.
- [11] 代金芝, 朱峰, 段天友, 等. 检波器组合模型对比分析研究[J]. 石油天然气学报(江汉石油学院学报), 2011, 33 (4): 88-91.
- [12] 李辉峰, 王旭. 地震勘探中检波器组合之组内距选择方法探讨[J]. 物探化探计算技术, 2002, 24 (4): 294-297.
- [13] 蒋莲斌, 何樵登, 王建民, 等. 一种计算检波器线性组合响应曲线的使用方法[J]. 石油物探, 1998, 37 (1): 84-88.
- [14] T.M. McGee. A single-channel seismic reflection method for quantifying lateral variations in BSR reflectivity[J]. Marine Geology, 2000, 164 (1-2): 29-35.
- [15] 李军峰, 肖都, 孔广胜, 等. 单道海上反射地震在海上物探工程中的应用[J]. 物探与化探, 2004, 28 (4): 365-368.