

海底电缆数据中压力分量与垂直分量的分析与应用

张文波, 朱光明

(长安大学 地质工程与测绘工程学院, 陕西 西安 710054)

[摘要] 根据海底电缆多波勘探中压力检波器和垂直方向速度检波器产生相同极性的上行波信号和相反极性下行波信号的原理, 通过将压力分量数据和垂直分量数据匹配后进行相加合并, 可以消除水层鸣震。从理论上分析了速度检波器和压力检波器对上、下行波场以及水层鸣震的响应特点, 得到在理想情况下消除水层鸣震的两种数据振幅匹配系数, 用该匹配系数对理论模型模拟的两种数据进行相加处理, 并在分析实际数据振幅、频率、波形和初至特征的基础上, 对实际资料进行了试算, 验证了该方法的有效性。

[关键词] 海底电缆多波勘探; 压力检波器; 速度检波器; 鸣震

[中图分类号] P315.3+1 [文献标识码] A [文章编号] 1672-6561(2005)01-0072-04

[作者简介] 张文波(1974-), 男, 山东冠县人, 博士研究生, 从事地球物理地震数据成像研究。

20世纪90年代以来, 随着人们对海洋资源的日益重视以及海底电缆(OBC)多波采集技术的成功, 海上多波地震方法得到迅速发展。海底电缆(OBC)多波地震勘探采集的数据包括压力分量、垂直分量、 X 方向水平分量和 Y 方向水平分量。垂直分量是由速度检波器接收到铅垂方向上的质点振动速度, 压力分量是由压力检波器接收到由质点振动引起的水压变化。由于全方位的压力检波器和垂直方向的速度检波器产生相同极性的上行波(一次反射信号)和相反极性的下行波(海水鸣震信号), 因此可以综合利用垂直分量与压力分量来消除水层鸣震和多次波反射, 提高信号的信噪比。国内外已有学者利用垂直分量与压力分量消除水层鸣震和多次波反射的成功实践, 如国外 Barr 和 Sanders, 国内中国海洋石油公司和中国地质大学周建新等, 都是通过将压力分量数据和垂直分量数据进行合并, 来实现消除水层鸣震的目的。笔者从理论上分析了速度检波器和压力检波器对上下行波场以及水层鸣震的响应特点, 对理论模型和实际资料进行了试算, 验证了该方法用于消除水层鸣震

的有效性。

1 方法原理

1.1 压力检波器和速度检波器对上下行波场响应

由于现代地震研究主要是纵波, 因此, 可以用声波方程来代替弹性波方程。设 v_z 表示 z 方向上的质点位移速度, p 表示压力。令 ρ 表示介质的密度, k 表示压缩系数, 则由压力 p 表示的声波方程为

$$\frac{\partial^2 p}{\partial z^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} \quad \left(c = \sqrt{\frac{k}{\rho}} \right)$$

根据牛顿第二定律和虎克定律, p 和 v_z 之间关系为:

$$\rho \frac{\partial v_z}{\partial t} = - \frac{\partial p}{\partial z} \quad (1)$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} = - k \frac{\partial v_z}{\partial z} \quad (2)$$

因为一维声波方程的达朗贝尔解为:

$$p = p^+ f(z - ct) + p^- f(z + ct) = D + U \quad (3)$$

式中: D 表示下行波场; U 表示上行波场。若取 z 轴向下为正, 则由式(1)和式(3)可得:

$$\begin{aligned} \frac{\partial v_z}{\partial t} &= \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} = \frac{1}{\rho} p^+ f'(z - ct) + \\ &\quad \frac{1}{\rho} p^- f'(z + ct) \end{aligned} \quad (4)$$

式(4)两边对时间积分可得:

$$v_z = -\frac{1}{\rho c} p^+ f(z - \alpha) + \frac{1}{\rho c} p^- f(z + \alpha) = \frac{1}{\rho c} [U - D] \quad (5)$$

由式(3)和式(5)可知, 在理想情况下, 压力检波器与速度检波器对上下行波场的响应为:

$$\begin{cases} p = D + U \\ v_z = \frac{1}{\rho c} [U - D] \end{cases} \quad (6)$$

在没有上行波的情况下 $p = D$, $v_z = -\frac{1}{\rho c} D$, 下行波本身就对压力 p 和质点速度 v_z 都提供了一个运动的扰动, 并且 v_z 与 p 之比是这种物质的固有导纳, 即 $\frac{v_z}{p} = -\frac{1}{\rho c}$. 在没有下行波的情况下 $p = U$, $v_z = \frac{1}{\rho c} U$, 压力与质点速度的比值是 ρc . 因此, 压力检波器和速度检波器记录到的下行波场极性相反, 上行波场极性相同。

1.2 压力检波器和速度检波器对水层鸣震的响应

对于 OBC 勘探(图 1), 震源在海面(忽略震源放到水中的深度)激发纵波, 检波器被放置在海底接收纵波和转换横波。由于海底和海面都是良好

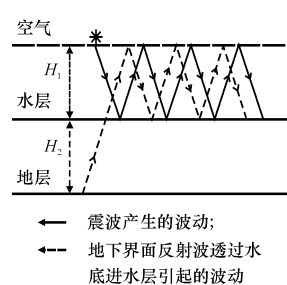


图 1 海水鸣震示意图

Fig. 1 Water column reverberation

反射界面, 由震源激发产生的波动和由地下界面反射波透过水底进入水层引起的波动会在其之间来回反射, 形成强烈地鸣震。假设海底与海面之间的垂直距离为 H_1 , 纵波在海底与海面之间的双程旅行时为 2τ , 单位延迟算子 $Z = e^{2i\omega\tau}$, 海面的反射系数为 -1 , 海底的反射系数为 R , 下行波首次到达检波器的时刻 $t = 0$, 则在垂直入射的情况下, 海底处由震源激发引起的水层鸣震上行波场 U 和下行波场 D 在 Z 域的表达式为:

$$\begin{cases} D(Z) = 1 - RZ + R^2Z^2 - R^3Z^3 + \dots = \frac{1}{1+RZ} \\ U(Z) = R - R^2Z + R^3Z^2 - R^4Z^3 + \dots = \frac{R}{1+RZ} \end{cases} \quad (7)$$

将式(7)代入式(6)可得压力检波器和速度检波器对由震源引起的水层鸣震响应:

$$\begin{cases} p(Z) = U + D = \frac{1+R}{1+RZ} \\ v_z(Z) = \frac{1}{\rho c} (U - D) = -\frac{1}{\rho c} \frac{(1-R)}{1+RZ} \end{cases} \quad (8)$$

由式(8)可以看出, 利用压力检波器和速度检波器对波场的不同响应, 给垂直分量 $v_z(Z)$ 乘以系数 $\rho c \cdot \frac{1+R}{1-R}$ 并与压力分量 $p(Z)$ 相加, 便可以消除由震源引起的水层鸣震。

当水层鸣震由地下界面的反射波透过水底进入水层产生时(图 1), 设上行反射波首次到达检波器的时刻 $t = 0$, 则上行波场 U 和下行波场 D 为:

$$\begin{cases} D(Z) = -Z + RZ^2 - R^2Z^3 + R^3Z^4 + \dots = \frac{Z}{1+RZ} \\ U(Z) = 1 - RZ + R^2Z^2 - R^3Z^3 + \dots = \frac{1}{1+RZ} \end{cases} \quad (9)$$

将式(9)代入式(6), 可得压力检波器和速度检波器对由地下界面反射波透过水底进入水层产生的水层鸣震的响应为:

$$\begin{cases} p(Z) = U + D = \frac{1-Z}{1+RZ} \\ v_z(Z) = \frac{1}{\rho c} (U - D) = \frac{1}{\rho c} \frac{(1+Z)}{1+RZ} \end{cases} \quad (10)$$

将式(10)中垂直分量 $v_z(Z)$ 乘以系数 $\rho c \cdot \frac{1+R}{1-R}$ 并与压力分量 $p(Z)$ 相加可得:

$$S(Z) = p(Z) + \rho c \frac{1+R}{1-R} v_z(Z) = \frac{2}{1-R} \quad (11)$$

由式(11)可知, 给垂直分量 $v_z(Z)$ 乘以系数 $\rho c \cdot \frac{1+R}{1-R}$ 并与压力分量 $p(Z)$ 相加, 可以消除由地下界面反射波透过水底进入水层产生的水层鸣震, 并且能够保留地下界面上行反射波, 只是使上行波的振幅变为原来的 $\frac{2}{1-R}$ 。笔者是在假设地震波信号为单频平面波前提下推导的两种数据的匹配系数。根据付氏变换理论实际, 地震波信号可以看成是各个频率分量信号的线性叠加, 又因为两种数据的匹配系数与频率无关(在不考虑介质的色散效应的情况), 因此, 该研究方法不失一般性, 得到的匹配系数适用于实际地震数据的处理。

2 试算

2.1 理论模型

在图 1 的模型中,取水层厚度 H_1 为 45 m,声波在水中的传播速度为 $1\,500\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,水底的地下界面的厚度 H_2 为 200 m,纵波速度为 $2\,000\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,海面反射系数为 -1 ,海底反射系数为 0.5 。假设震源置于海面,检波器放在震源正下方。计算水层鸣震的上下行波旅行时间与主频为 50 Hz 的 Richer 子波褶积,得到水层鸣震的上行波场信号(图 2a)和下行波场信号(图 2b),根据压力检波器和速度检波器和对上下行波场的响应关系式(7),得到由压力检波器得到的压力分量信号(图 2c)和由速度检波器得到的垂直分量信号(图 2d)。垂直分量信号 $v_z(Z)$ 乘以系数 $\rho_c \cdot \frac{1+R}{1-R}$ 并与压力分量信号 $p(Z)$ 相加可得到两种数据合并后的信号(图 2e)。通过上述处理,可以完全消除水层鸣震,并保留地下界面上行反射波,只是上行波振幅变为原来的 $\frac{2}{1-R}$ 。

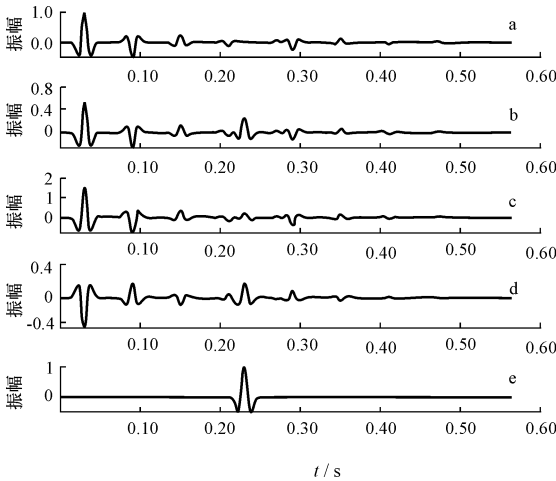


图 2 模型模拟信号

Fig. 2 Analog signal of model

2.2 实际资料

2.2.1 压力分量和垂直分量野外记录特征分析

用墨西哥湾地区的一个炮集记录(图 7a 和图 7b)对压力分量和垂直分量进行了对比分析。从分析结果可得:

(1)压力分量与垂直分量的初至波极性相反,如图 3,这与理论相符,也与模型模拟结果一致。

(2)两个分量的频谱有较大差异,与垂直分量

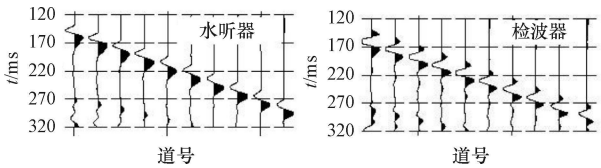


图 3 初至波极性

Fig. 3 Polarity of first break wave

相比,压力分量的频带宽、主频高,如图 4。压力分量频带约为 $5\sim70\text{ Hz}$,主频约为 50 Hz ,垂直分量频带约为 $10\sim50\text{ Hz}$,主频约为 30 Hz 。

(3)压力分量的振幅和能量都高于垂直分量的振幅和能量,但不同频率段差别不同,如图 5。在低频端 $0\sim20\text{ Hz}$ 和高频段 $40\sim100\text{ Hz}$ 。压力分量的能量明显高于同相同频率的垂直分量的振幅;而在 $20\sim40\text{ Hz}$ 频段内,两个分量的能量差别不大。

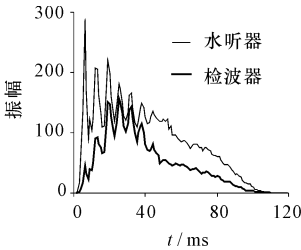


图 4 振幅谱

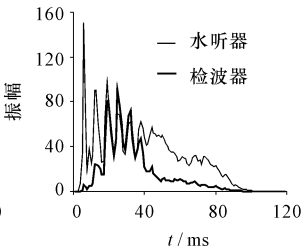


图 5 功率谱

Fig. 4 Amplitude spectrum

Fig. 5 Power spectrum

(4)两个分量记录波形也有较大差异,如两个分量记录的平均道如图 6。压力分量信号锯齿状抖动明显。

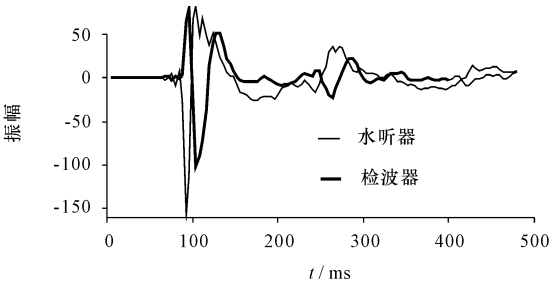


图 6 平均道记录

Fig. 6 Average trace

2.2.2 压制水层鸣震试验

在分析两种分量数据特征的基础上,对该野外炮集记录做了压制水层鸣震试验。由于两种数据的振幅不仅取决于两种检波器自身的灵敏度,还和检波器与水底的耦合程度、检波器的置放方向、水底的反射系数以及随机与相关噪音有关,因此,两种数据的振幅匹配因子不是固定的常量。基于该想法,在对两种数据进行合并相加时,首先根据时变谱白化原理,对两种数据做了频率调整,缩小两

种数据频带和主频的差异;其次,对于每一道数据,选择一个移动时窗,根据两种数据所选时窗内的统计能量,求出一个随时间变化的振幅匹配系数;最后,将垂直分量信号乘以振幅匹配系数并与压力分量信号相加就可得到两种数据合并后的信号。图7c为压力分量和垂直分量相加后的结果。从处理结果可以看出,相加后海水鸣震明显得到了压制,有效信号得到了增强。

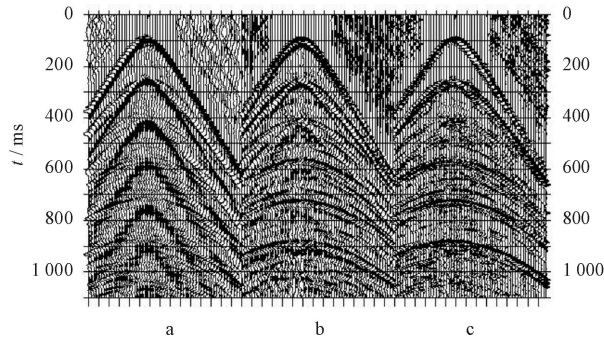


图7 实际资料和处理结果

Fig.7 Field data and combined result

3 结论

(1)压力检波器和速度检波器记录到的下行波场极性相反,上行波场极性相同。

(2)海底电缆数据中的压力分量与垂直分量相加可消除水层鸣震。

(3)由于两种检波器自身性能的不同和外部条件的影响,两个分量的野外数据在振幅、波形和频

率上都有较大差异,因此,两种数据相加之前必须进行匹配。

(4)在理想情况下,振幅标定因子只与反射系数有关,但实际数据的振幅标定因子取决于两种检波器本身的灵敏度、检波器与水底的耦合程度、检波器的置放方向、水底的反射系数以及随机与相关噪音。

[参 考 文 献]

- [1] 周建新,姚姚.双检波器压制海上鸣震[J].中国海上油气(地质),1999,13(5):359~362
- [2] 马在田.地震成像技术—有限差分法偏移[M].北京:石油工业出版社,1989
- [3] 克利尔波特J F.地球物理数据处理基础[M].陈玉,陈乾元,刘则仁,等译.北京:石油工业出版社,1983
- [4] 克利尔波特A J.地震偏移[M].马在田,张叔伦译.北京:石油工业出版社,1983
- [5] Richard G Lyons. Understanding digital signal processing [M]. 英文影印版.北京:科学出版社,2003
- [6] Barr F J, Sanders J I. Attenuation of water column reverberation using pressure and velocity detectors in a water bottom cable [A]. Expanded Abstracts of 59 st SEG Mtg [C]. 出版地及出版者不详. 1989. 635~656.
- [7] Paffenhoze J, Barr F J. An improved method for deriving water bottom reflectivities for processing dual sensor ocean bottom cable data [A]. Expanded Abstracts of 65 st SEG Mtg [C]. 出版地及出版者不详. 1995. 987~990.
- [8] 李桂花,朱光明,张文波.剩余静校正异常对叠加结果的影响与采集参数和反射特征的关系[J].地球科学与环境学报,2004,26(4):75~80

Analysis and application of pressure and vertical components of the ocean bottom cable data

ZHANG Wen bo, ZHU Guang ming

(School of Geological Engineering and Surveying Engineering, Chang'an University, Xi'an 710054, China)

Abstract Hydrophone and vertically oriented geophone induce upward wave signal with identical polarity and downward wave signal with opposite polarity in OBC seismic prospecting, so the water column reverberation can be eliminated by scaling and summing pressure and velocity seismic data. This paper analyzes theoretically the characteristic of hydrophone and vertically oriented geophone responding to up and downward wave field and water column reverberation, obtains the scale factors of the pressure and velocity data under ideal circumstance and processes the analog model signal by using the scale factor. On the basis of analyzing the characteristic of the amplitude, frequency, shape and polarity of the field data, this paper also proves the availability of this method by the test of field data.

Key words OBC seismic prospecting; pressure geophone; velocity geophone; reverberation

[英文审定:李庆春]