

双检与上下缆地震数据联合成像

张振波* 轩义华 刘 宾 薛志刚

(中海石油(中国)有限公司深圳分公司,广东深圳 518067)

张振波,轩义华,刘宾,薛志刚. 双检与上下缆地震数据联合成像. 石油地球物理勘探, 2014, 49(5): 884-891.

摘要 双检拖缆地震采集数据可以有效压制电缆鬼波,提高资料信噪比,而上下缆地震数据可以增强信号的低频并拓展其高频。将这两种非常规技术应用与南海北部潮汕拗陷进行高精度地震数据采集试验,对所获取的地震数据进行了联合成像处理分析,结果表明两种新技术对潮汕拗陷中深层地震信号弱、同相轴不连续、信噪比低的地震资料品质都有明显的改善。

关键词 双检 上下缆 鬼波 联合成像

中图分类号:P631 **文献标识码**:A

1 引言

常规海上拖缆地震采集技术是采用单源激发、单缆接收地震波的二维或双源激发、多缆接收地震波的三维方式。随着石油勘探不断向深水、深层和复杂地区发展,常规海上拖缆地震采集技术已经不能满足勘探需求。近年来,双检技术^[1,2]、上下源采集技术^[3]、上下缆采集技术^[4~8]和宽线等采集新技术相继出现。Barr等^[9]首次对双检技术进行了探讨,随后Fred^[10]和Hoffe等^[11]基于海底电缆地震资料分析了鸣震产生的物理机制;全海燕等^[12]提出一整套数据处理思路,着重强调做好双检记录的频率匹配,以便获得最佳效果;王振华等^[13]提出了采取精确的混波技术以及预测反褶积压制鸣震的方法;贺兆全等^[14]通过同时叠加水检和陆检数据,在去除鬼波的基础上,求取海底反射系数,消除上行微屈多次波。近年来上下缆地震数据采集技术发展较为迅速,Moldoveanu等^[15]对上下缆数据采集特点进行了全面分析,阐述了上下缆采集技术的优势;赵仁永等^[16]在南海进行上下缆和上下源的采集试验和处理,取得了明显效果。

本文针对南海北部潮汕拗陷中生界地层成像问

题,尝试应用双检和上下缆两种地震采集技术,将两种数据联合处理和分析,发挥各自的优势和特色,处理结果表明,通过特殊采集处理方案,该区地震资料信噪比和分辨率均有所提高,成像精度得到明显改善。

2 双检与上下缆地震数据采集原理

常规海上拖缆地震采集技术存在的缺陷主要表现在电缆沉放浅时高频能量强、低频能量弱;电缆沉放深时低频能量强、高频能量弱。双检和上下缆两种非常规拖缆地震采集处理技术的主要特点都是通过改善接收系统,以达到压制鬼波、同时拓宽低频和高频、改善中深层地震资料成像品质的目的。

2.1 双检采集原理

海洋拖缆双检地震采集是将速度检波器和压力检波器集成在电缆的同一个位置,并采用与常规二维、三维地震采集相同的拖带方式进行作业。

首先,因为双检合成处理采用的是水检压电检波器和陆检垂直速度检波器采集数据,所以在双检采集之前,要先弄清纵波传播方向与波场产生的压缩与膨胀以及和质点运动方向之间的关系。其中,水检压电检波器响应是波场传播产生的压缩和膨

* 广东省深圳市蛇口工业二路1号海洋石油大厦B座1601室,518067。Email:zhangzhib@cnooc.com.cn

本文于2013年6月16日收到,最终修改稿于2014年6月20日收到。

本文由国家科技重大专项课题项目(2008ZX05023)“近海大中型油气田形成条件及勘探技术”与中海石油(中国)有限公司科技项目(YXKY-2013-SZ-02)“珠江口盆地东部地震新技术应用效果评价”联合资助。

胀,陆检垂直速度检波器响应是波场传播引起的质点运动。纵波传播方向与质点运动方向相同或相反。当纵波传播方向和质点运动方向一致时就会产生一个压缩波场;当纵波传播方向和质点运动方向相反时就会产生一个膨胀波场。例如,如果波的传播方向始终为从左向右。当波从左向右传播时,会产生一个从左向右传播的压缩波场,其质点运动方向也是从左向右。另一方面,当波从右向左传播时,会产生一个从左向右传播的膨胀波场,其质点运动方向为从右向左。这就是纵波传播方向与质点运动方向及压缩和膨胀之间的关系,它也是双检采集能够实现的核心所在。

其次,要了解水检压电检波器和陆检垂直速度检波器的响应原理。水检压电检波器的响应是水中压力随着压缩和膨胀作用而变化且产生极性转换。当压缩挤压水检压电检波器时,会产生负向脉冲,膨胀时水检压电检波器产生正向脉冲。陆检垂直速度检波器的响应是质点运动方向,它随着质点运动方向的变化而产生极性变化。当质点向上运动时,陆检垂直速度检波器表现负极性,当质点向下运动时,陆检垂直速度检波器表现正极性。

2.2 上下缆采集原理

海洋上下缆采集在拖带方式上与常规地震采集有很大的不同^[15],它是将两条或三条电缆根据采集目的需要按照不同深度沉放到同一个垂面上进行野外施工。理论上,地震波在地层传播过程中,相比低频能量而言,高频能量易被大地吸收,并且地层越深,高频衰减越严重。在双电缆的采集过程中,电缆沉放越深,越有利于接收低频反射能量;电缆沉放越浅,越有利于高频反射能量接收。通过在不同深度上的上、下缆对地震信号的接收,并且在处理阶段再对上下缆接收的数据进行合并处理,即对浅层电缆接收到的高频成分和深层电缆接收到的低频成分进行叠加,从而达到拓宽频带的效果。不同沉放深度的电缆接收的子波振幅谱是不同的,沉放深度越浅的电缆接收到的子波振幅谱频率越高,沉放深度越深的电缆接收到的子波振幅谱频率越低。各沉放深度对应的陷波频率段和能量也不同,因此,利用其不同深度振幅谱的特性,经合并处理,可达到拓宽频带和提高振幅能量的效果。由于上下电缆沉放的深度不同,“鬼波”造成的电缆陷波频率也不同(图 1)。

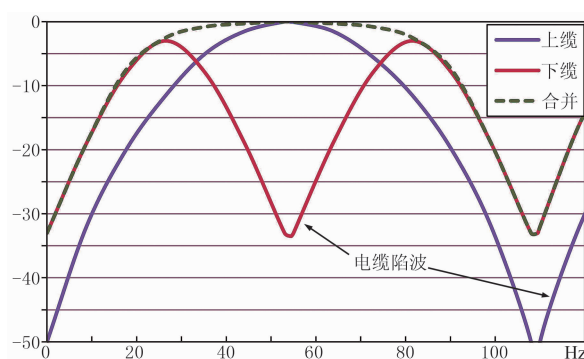


图 1 上下缆资料频谱示意图

3 双检与上下缆地震数据联合处理

由于空气与海水的波阻抗差很大,海面作为强反射界面,对上行波进行反射的同时,对产生的下行波有反转相位作用。在双检数据采集中,压力检波器是全方位的,其记录到的来自地层反射的上行波与经海面反射的下行波(即鬼波)的相位相反(图 2a 第一个负相位是上行(子)波,最后一个正相位是下行(子)波);速度检波器在水中可以一直保持垂直向上,并只记录垂向的速度变化,其记录到的上行波与下行波的相位相同(图 2b 第一个正相位是上行(子)波,最后一个正相位是下行(子)波)。文中描述的上行波和下行波用简单的子波表示,忽略了地层影响。

在双检地震资料处理中^[17],利用压力检波器与速度检波器接收到的上行波相位相反而下行波相位相同的特点,通过联合处理就可以压制“鬼波”。压力检波器接收到的地震波可以表示为

$$P(\bar{X}, t) = P_u(\bar{X}, t) + P_d(\bar{X}, t) \quad (1)$$

式中: $P_u(\bar{X}, t)$ 表示压力检波器接收到的上行波; $P_d(\bar{X}, t)$ 表示压力检波器接收到的下行波。

速度检波器接收到的地震波可以表示为

$$V(\bar{X}, t) = V_u(\bar{X}, t) + V_d(\bar{X}, t) \quad (2)$$

式中: $V_u(\bar{X}, t)$ 表示速度检波器接收到的上行波; $V_d(\bar{X}, t)$ 表示速度检波器接收到的下行波。

压力检波器和速度检波器被集成到电缆的同一位置,它们在水中的沉放深度相同,根据两种检波器的特性,得出以下公式

$$P_u(\bar{X}, t) = -V_u(\bar{X}, t) \quad (3)$$

$$P_d(\bar{X}, t) = V_d(\bar{X}, t) \quad (4)$$

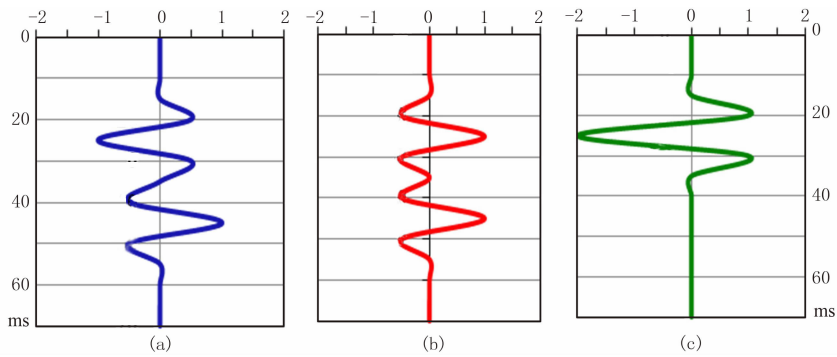


图 2 压力检波器(a)、速度检波器(b)接收的上、下行子波与合成的上行子波(c)

因此,上行波可以表示为

$$U(\bar{X}, t) = P(\bar{X}, t) - V(\bar{X}, t) \quad (5)$$

图 2c 为压力检波器和速度检波器合成的上行波。该上行波已经消除了电缆鬼波影响,但仍包含震源鬼波信息。

在上下缆地震资料处理中^[6,8],利用不同沉放深度电缆的陷波频率不同的特点,在消除电缆陷波的同时,实现上下缆高频和低频能量互补,达到提高低频能量增强高频能量的目的。图 3 是上下缆采集地震波传播示意图,上缆沉放深度为 d_1 ,下缆沉放深度为 d_2 ,上下缆垂向距离为

$$d = d_2 - d_1 \quad (6)$$

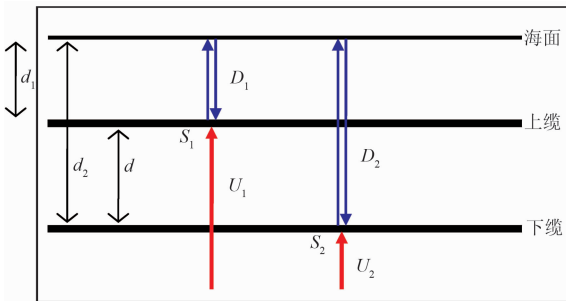


图 3 上下缆采集数据波场示意图

上缆接收到的地震波可表示为

$$S_1 = U_1 + D_1 \quad (7)$$

式中: U_1 是上缆接收到的上行波; D_1 是上缆接收到的下行波。下缆接收到的地震波可表示为

$$S_2 = U_2 + D_2 \quad (8)$$

式中: U_2 是下缆接收到的上行波; D_2 是下缆接收到的下行波。将上行波从下缆延拓至上缆,可表示为

$$U_1 = e^{i2\pi fd/v} U_2 \quad (9)$$

式中: v 为水速; i 为虚数单位。将下行波从上缆延拓至下缆,可表示为

$$D_2 = e^{i2\pi fd/v} D_1 \quad (10)$$

将式(9)、式(10)代入式(8)得

$$S_2 = \frac{U_1}{e^{i2\pi fd/v}} + e^{i2\pi fd/v} D_1 \quad (11)$$

解式(7)、式(11)得

$$U_1 = \frac{S_2 - e^{i2\pi fd/v} S_1}{\frac{1}{e^{i2\pi fd/v}} - e^{i2\pi fd/v}} \quad (12)$$

这样,通过上下缆地震资料的合并处理消除了电缆鬼波的影响,得到了上行波。

双检与上下缆地震采集技术的共同特点都是在采集系统的接收端进行了改进,可以将上述两种采集数据联合处理以达到精确勘探的目的。理论上,上下缆数据中的上行波与利用双检拖缆采集处理得到的上行波相同,都消除了电缆鬼波的影响,可以互相约束。而上下缆数据有效频带更宽,经过鬼波压制后的数据就可以进行常规偏移成像。

4 实际地震数据处理分析

4.1 数据采集试验

潮汕拗陷位于南海北部珠江口盆地东南部,该区的地球物理特征及油气勘探潜力已经引起人们的关注^[18~25]。该区水深变化较大,从 300~2000m 不等,面积超过 $1 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。其上构造层为第三纪海相沉积,厚度达 1000m,地震资料品质相对较好,有效信号能量强,波组清楚;下构造层为中生代海相沉积,厚度达 7000m,地震资料品质相对较差,有效波能量弱,波组特征不明显。经过二十多年的研究,认为潮汕拗陷具备生烃潜力和形成油气藏的条件。中生界油气勘探能否突破,关键在于能否打破地震资料品质差的瓶颈。为此,开展了以晚三叠统白垩系中生

界为主要目的层的二维地震双检采集试验和上下缆采集试验,目的在于通过新地震采集和常规拖缆地震采集资料的比较,找出提高中深层反射能量和信噪比的更好方法,提高深层地震资料品质。

本次双检拖缆地震采集使用了 8 缆物探船,在潮汕拗陷针对中生界地层采集了两条二维地震测线。主要采集参数见表 1。

表 1 潮汕拗陷中生界双检试验采集参数

激发参数				接收参数				记录参数		
炮间距 m	枪深 m	容量 in ³	压力 psi	缆长 m	缆深 m	道间距 m	采样率 ms	记录长度 s	低截滤波	高截滤波
25	15	6180	2000	8100	25	12.5	2	10.56	4.4Hz@12dB/Oct	214Hz@341dB/Oct

表 2 潮汕拗陷中生界上下缆采集试验采集参数

激发参数				接收参数				记录参数		
炮间距 m	枪深 m	容量 in ³	压力 psi	缆长 m	缆深 m	道间距 m	采样率 ms	记录长度 s	低截滤波	高截滤波
25	9	6220	2000	7500 8100	9 16	12.5	2	10.75	3Hz@6dB/Oct	200Hz@370dB/Oct

在满足提高地震资料信噪比要求的同时,为满足一定的地震资料分辨率,将震源沉放深度提升到了 9m,震源陷波频率约为 84Hz。配置上下两条电缆,上电缆沉放 9m,电缆陷波频率为 84Hz;下电缆沉放 16m,电缆陷波频率约为 47Hz。通过对上下缆地震资料的合并处理,得到含震源鬼波的上行波的陷波频率约为 84Hz。

4.2 地震数据联合处理与分析

为了便于进行资料对比,对双检和上下缆地震资料分别进行了联合处理,同时对上下缆地震资料的上缆和下缆分别进行了单缆地震资料的处理,并使用了完全相同的处理流程。通过对成果资料的浅

层和深层对比,表明两种新技术都能在一定程度上压制电缆鬼波,达到增强低频、拓宽高频的效果。

本次使用了一条 10 缆物探船、两条 6 缆物探船共进行了三次上下缆地震采集试验。本文主要介绍一条 6 缆船的采集参数(表 2)和资料对比。

层和深层对比,表明两种新技术都能在一定程度上压制电缆鬼波,达到增强低频、拓宽高频的效果。

图 4 是双检地震资料的浅层剖面 and 对应频谱图。频谱图上在大约 50Hz 位置的陷波由震源鬼波引起,与理论计算位置相同。由于实际施工中波浪对速度检波器影响非常大,在施工方原先提供的速度检波器资料中,20Hz 以下信号是通过压力检波器与速度检波器关系式重构的,压力检波器和速度检波器资料合并结果在 20Hz 位置出现明显的边界异常,同时在 30Hz 的位置仍然出现陷波,估计这也是由于资料重构原因,导致电缆鬼波没有完全消除。

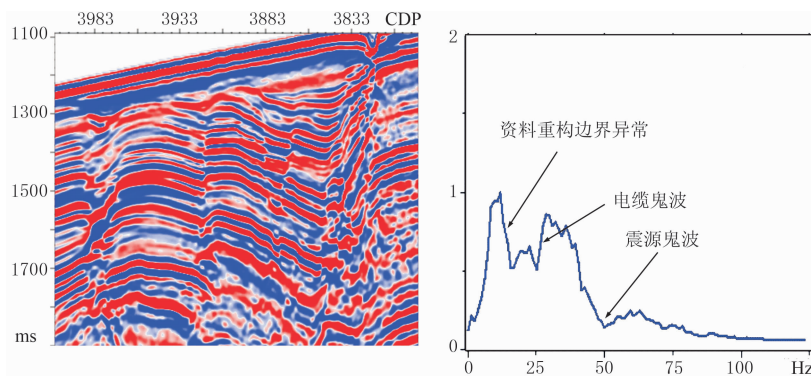


图 4 双检采集地震资料浅层剖面(左)及其频谱图(右)

图 5a 是上下缆地震资料的上缆浅层剖面和对应的频谱图。因为震源和电缆沉放深度相同,所以震源鬼波和电缆鬼波引起的陷波位置重合,最低点位置在 84Hz 左右,与理论计算位置相同。同时,由于上缆沉放相对较浅,虽然资料频率较高,但低频能量明显较低。图 5b 是上下缆地震资料的下缆浅层剖面和对应的频谱图。由电缆鬼波引起的陷波频率最低点位置在 47Hz,与理论计算位置相同。与上缆

资料相同,由震源鬼波引起的陷波频率最低点位置在 84Hz。与上缆相反,资料表现为低频能量强,高频能量弱。图 5c 是上下缆地震资料的双缆合并浅层剖面和对应的频谱图。频谱图上只有一个陷波存在,是由震源鬼波引起,最低点位置在 84Hz。下缆在 47Hz 左右引起的陷波得到了消除,相对于上缆,资料的低频得到增强。相对于下缆,资料高频得到拓宽。

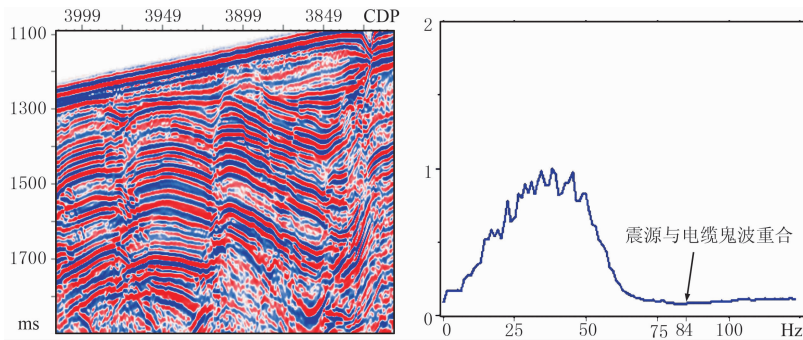


图 5a 上下缆采集的上缆地震资料浅层剖面(左)及其频谱图(右)

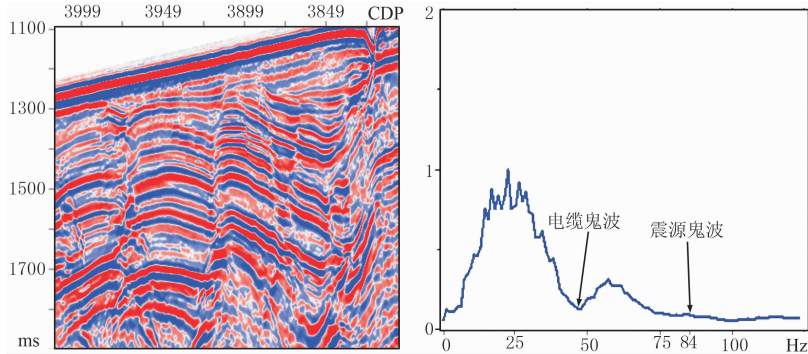


图 5b 上下缆采集的下缆地震资料浅层剖面(左)及其频谱图(右)

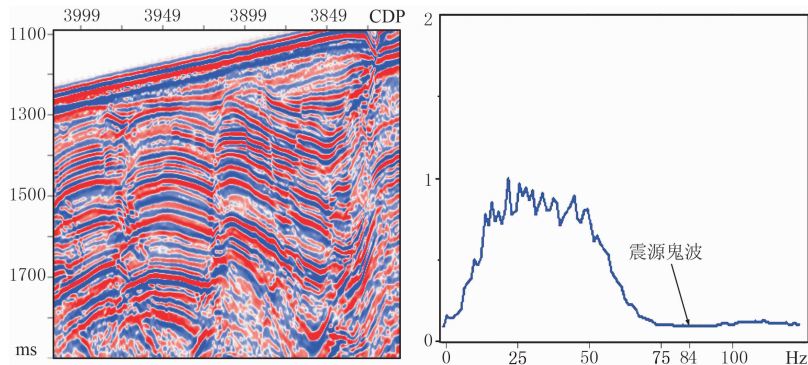


图 5c 上下缆采集双缆合并地震资料浅层剖面(左)及其频谱图(右)

图 6 是双检地震资料的深层剖面 and 对应频谱图。由于电缆沉放较深,高频成分能量明显较弱,50Hz 左右的震源鬼波已经处于高频噪声内。从频谱图上不难看出,相对于高频,20Hz 以下的低频能

量非常强,尤其是 8~15Hz,能量甚至是 15Hz 以上频率的 1.5~2.0 倍。但由于速度检波器资料 20Hz 以下信号是利用压力检波器资料重构的,成果资料中 20Hz 以下的信息其实也是来自压力检波器,速

度检波器对低频能量没有任何贡献。而由于该区目的层埋藏较深,本次采集处理的主要目的是增加低频能量、提高信噪比。因此,本次双检采集中,速度检波器的作用就显得非常有限。在海况非常好的情况下,将电缆沉放进一步加深以减少波浪对速度检波器的影响,使速度检波器的 20Hz 以下信号不再重构而能够直接使用,可能更有利于提高潮汕拗陷中生界地震资料信噪比、改善地层成像。

图 7 是上下缆地震资料的上缆深层剖面 and 对应的频谱图,图 8 是上下缆地震资料的下缆深层剖面 and 对应的频谱图。可见上缆资料比下缆资料频率明显偏高,但低频能量稍弱。两条剖面的 20~35Hz

能量衰减都较快,35~60Hz 高频成分上缆明显比下缆能量强。由于剖面位置较深,65Hz 之后基本上已经是高频噪声,所以上缆资料的“电缆鬼波”已经不明显,而下缆在 47Hz 左右的“电缆鬼波”还是隐约存在的。图 9 是上下缆地震资料的双缆合并深层剖面 and 对应的频谱图。剖面在保留低频成分的同时,补充了上缆资料的高频成分,消除了下缆 47Hz 左右的鬼波。与单独上缆和下缆资料相同,65Hz 之后已经是高频噪声,震源鬼波的影响已经不明显。三种资料在 10Hz 左右都有不同程度的陷波,这是由于震源在 10Hz 左右存在能量降低缺陷,跟电缆因素无关。

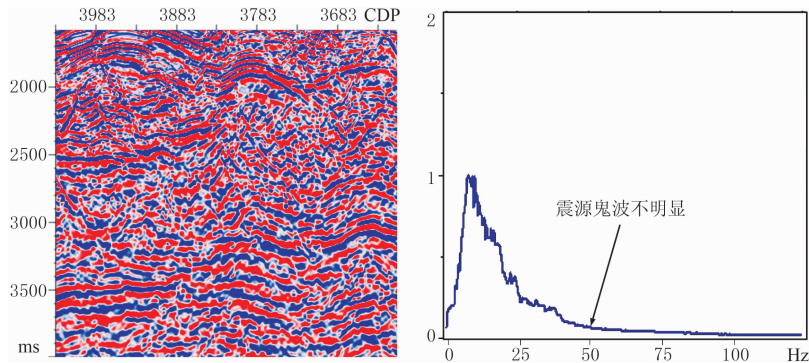


图 6 双检采集地震资料深层剖面(左)及其频谱图(右)

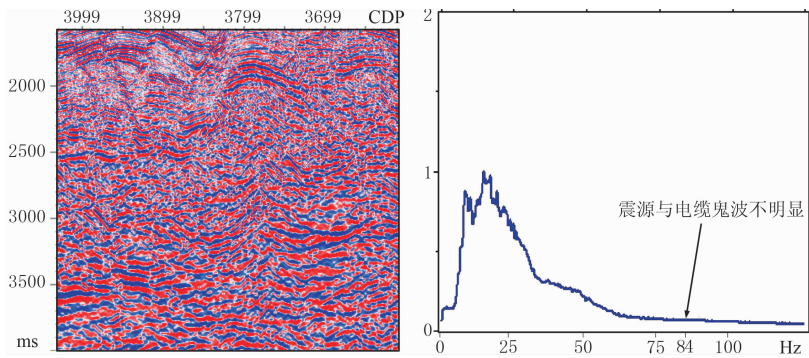


图 7 上下缆采集的上缆地震资料深层剖面(左)及其频谱图(右)

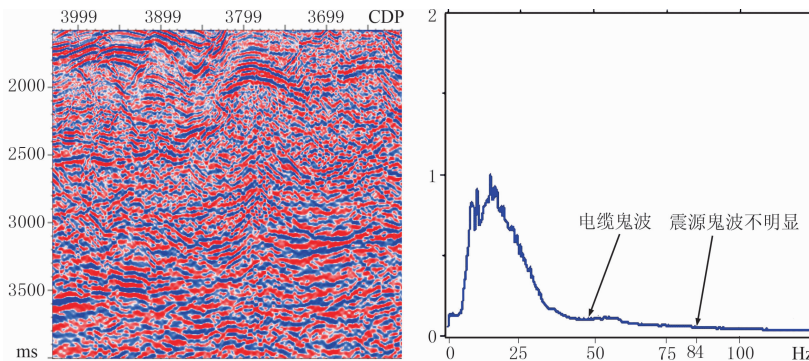


图 8 上下缆采集的下缆地震资料深层剖面(左)及其频谱图(右)

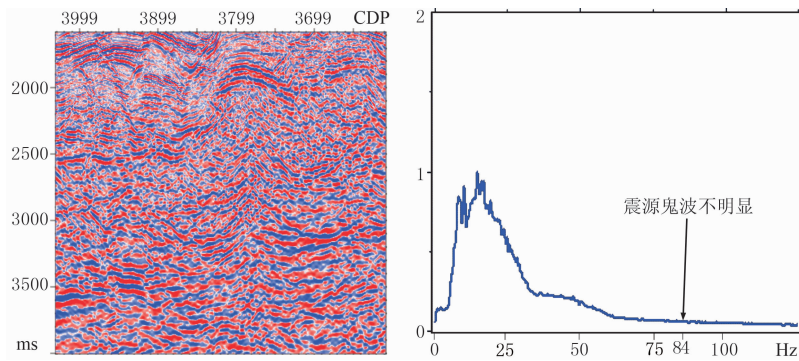


图9 上下缆采集地震资料深层剖面(左)及其频谱图(右)

对比图6和图9可以看出,两种采集新技术在中生界地层分别消除了30Hz和47Hz处的电缆陷波,低频和低频成分都得到了不同程度的拓宽。由于双检采集时电缆沉放较深,电缆陷波频率较低,同时20Hz以下速度检波器信号需要从压力检波器信号重构,使得资料合并时电缆鬼波得不到完全压制,从而对高频信号有一定的不利影响。尤其在深层中生界地层,其剖面与上下缆合并资料相比频率明显较低。上下缆合并资料使得上缆的高频和下缆的低频成分都得到了较好的表现,在保证深层中生界地震资料信噪比的同时,对提高分辨率又有一定的作用。

5 结论

对双检和上下缆两种海上拖缆地震资料的浅层和中深层地震剖面及其频谱图分别进行对比,认为两种采集新技术各有优劣,但都比常规地震采集技术有优势,可以得出如下结论。

(1)双检地震采集处理技术在一定程度上消除了电缆鬼波的影响,相对于常规采集方法,提高了信噪比,增强了低频能量,拓宽了高频成分。尤其是浅层的高频拓宽和中深层的信噪比提高,效果更加明显。

(2)为解决实际施工中波浪产生的低频噪声对速度检波器的影响问题,使用压力检波器地震资料重构了20Hz以下的速度检波器地震资料,导致合并后的地震资料在20Hz位置出现边界异常,没有完全消除电缆鬼波。这种情况在浅层资料中表现更加突出。

(3)上下缆地震采集处理技术消除了电缆鬼波,同时保留了下缆资料的低频成分和上缆资料的高频

成分。相对于常规采集地震资料(上下缆采集中的上缆或下缆),浅层的改善比较明显,深层也有一定程度的改善。

(4)双检和上下缆采集处理技术对南海北部潮汕拗陷中生界地层地震成像都有一定的改善作用,但都没有达到理想效果。对于双检采集技术,需要解决速度检波器受波浪低频干扰的问题。两种采集技术都需要改善激发条件,增大震源激发能量。

参考文献

- [1] Lie and Semb P H. A comparison of vintage hydrophone seismic and dual-sensor seismic offshore Cyprus. SEG Technical Program Expanded Abstracts, 2009, 28: 507-511.
- [2] Sollner W, Brox E, Widmaier M et al. Surface related multiple suppression in dual sensor towed streamer data. SEG Technical Program Expanded Abstracts, 2007, 26: 2540-2544.
- [3] Cambois G et al. Multi-level airgun array: a simple and effective way to enhance the low frequency content of marine seismic data. SEG Technical Program Expanded Abstracts, 2009, 28: 152-156.
- [4] Hill D, Combee L and Bacon J. Over/under acquisition and data processing: the next quantum leap in seismic technology. First Break, 2006, 24(6): 81-96.
- [5] Kragh E et al. A method for efficient broadband marine acquisition and processing. SEG Technical Program Expanded Abstracts, 2009, 28: 2722~2726.
- [6] Özdemir A K et al. Optimized deghosting of over/under towed-streamer data in the presence of noise. The Leading Edge, 2008, 27(2): 190-199.
- [7] Posthumus B J. Deghosting using a twin streamer configuration. Geophysical Prospecting, 1993, 41(3): 267-286.
- [8] Moldoveanu N et al. Over/under towed-streamer acquisition: A method to extend seismic bandwidth to both higher and lower frequencies. The Leading Edge, 2007, 26(1): 41-58.
- [9] Barr F, Sanders J I. Attenuation of water-column reverberations using pressure and velocity detectors in a

- water-bottom cable. SEG Technical Program Expanded Abstracts, 1989, 8: 653-656.
- [10] Fred J B. Dual-sensor OBC technology. The Leading Edge, 1997, 16(1): 45-51.
- [11] Hoffe B H, Lines L R, Cary P W. Applications of OBC recording. The Leading Edge, 2000, 19(4): 382-391.
- [12] 全海燕, 韩立强. 海底电缆双检接受技术压制水柱混响. 石油地球物理勘探, 2005, 40(1): 7-12.
Quan Haiyan, Han Liqiang. Using OBC dual-receiver to suppress reverberation of water column. OGP, 2005, 40(1): 7-12.
- [13] 王振华等. 消除海底电缆双检地震资料中的鸣震干扰. 石油地球物理勘探, 2008, 43(6): 626-635.
Wang Zhenhua et al. Elimination of singing interference in OBC dual-geophone seismic data. OGP, 2008, 43(6): 626-635.
- [14] 贺兆全等. 双检理论研究及合成处理. 石油地球物理勘探, 2011, 46(4): 522-528.
He Zhaoquan et al. Response characteristics of dual-sensor and their applications in OBC data processing. OGP, 2011, 46(4): 522-528.
- [15] Moldoveanu N, Combee L and Egan M. Schlumberger over/under towed-streamer acquisition: a method to extend the seismic bandwidth to both higher and lower frequencies. The Leading Edge, 2007, 26(1): 41-58.
- [16] 赵仁永, 张振波, 轩义华. 上下源、上下缆地震采集技术在珠江口的应用. 石油地球物理勘探, 2011, 46(4): 517-521.
Zhao Renyong, Zhang Zhenbo and Xuan Yihua. Application of over/under streamer and over/under source seismic acquisition in the Pearl River Mouth Basin. OGP, 2011, 46(4): 517-521.
- [17] Sollner W et al. Surface related multiple suppression in dual-sensor towed streamer data. SEG Technical Program Expanded Abstracts, 2007, 26: 2540-2544.
- [18] 陈隽, 郝沪军, 林鹤鸣. 潮汕坳陷地震资料的改善及中生界构造的新发现. 中国海上油气(地质), 2002, 16(4): 271-278.
Chen Juan, Hao Hujun, Lin Heming. Quality improvement of seismic data and new found of Mesozoic prospect Chaoshan depression. China Offshore Oil and Gas(Geology), 2002, 16(4): 271-278.
- [19] 郝沪军等. 潮汕坳陷中生界油气勘探的新领域. 中国海上油气(地质), 2001, 15(3): 157-162.
Hao Hujun et al. The Mesozoic in Chaoshan depression: A new domain of petroleum exploration. China Offshore Oil and Gas(Geology), 2001, 15(3): 157-162.
- [20] 陈冰, 王家林, 钟慧智. 潮汕坳陷北部区域断裂研究. 中国海上油气(地质), 2001, 15(4): 236-241.
Chen Bing, Wang Jialin, Zhong Huizhi et al. A study on regional faults in the northern Chaoshan depression, South China Sea. China Offshore Oil and Gas(Geology), 2001, 15(4): 236-241.
- [21] 赵岩, 张毅祥, 姜绍仁. 南海北部地球物理特征和地壳结构. 热带海洋, 1996, 16(2): 37-44.
Zhao Yan, Zhang Yixiang, Jiang Shaoren. Geophysical characteristics and crustal construction in the north of South China Sea. Tropic Oceanology, 1996, 16(2): 37-44.
- [22] 郝沪军等. 潮汕坳陷中生界及其石油地质条件——基于 LF35-1-1 探索井钻探结果的讨论. 中国海上油气, 2009, 21(3): 151-156.
Hao Hujun et al. Mesozoic sediments and their petroleum geology conditions in Chaoshan sag: a discussion based on drilling results from the exploratory well LF35-1-1. China Offshore Oil and Gas, 2009, 21(3): 151-156.
- [23] 邱燕, 温宁. 南海北部边缘东部海域中生界及油气勘探意义. 地质通报, 2004, 23(2): 142-146.
Qiu Yan, Wen Ning. Mesozoic in the eastern sea area of the northern margin of the South China Sea and its significance for oil/gas exploration. Geological Bulletin of China, 2004, 23(2): 142-146.
- [24] 蔡乾忠. 特提斯与海相油气——开拓我国海域油气新领域. 海洋地质动态, 1999, 7: 1-7.
- [25] 陈洁. 潮汕坳陷地球物理特征及油气勘探潜力. 地球物理学进展, 2007, 22(1): 147-155.
Chen Jie. Geophysical characteristics of the Chaoshan depression and its hydrocarbon exploration potential. Progress in Geophysics, 2007, 22(1): 147-155.

(本文编辑:金文昱)

作者简介

张振波 高级工程师, 1973 年生; 1995 年毕业于西南石油学院勘查地球物理专业, 获学士学位; 2010 年获长江大学石油与天然气工程硕士学位; 现在中海石油深圳分公司从事海上地震采集处理工作。

