

珠江口盆地惠州某区平缆与斜缆地震资料 叠前反演综合研究

轩义华¹,代一丁¹,张振波¹,但志伟²,肖 为²,朱美娟²

(1.中海石油(中国)有限公司深圳分公司,广东 深圳 518000;

2.中海油能源发展股份有限公司工程技术物探技术研究所,广东 湛江 524057)

摘要:针对珠江口盆地惠州某区斜缆采集及平缆采集地震资料进行攻关,对2种地震资料采集方式下的频谱、保真保幅性、岩石物理、叠前反演效果等进行了分析,对地震井资料、地震剖面进行了对比和研究。结果表明:斜缆地震资料具有进行叠前反演的可行性,并且斜缆地震反演具有更高的精度,在刻画储层厚度、物性定量预测等方面均具有更大优势。斜缆地震资料低频信息丰富,有利于开展叠前反演工作,有助于获得更丰富的地质认识。

关键词:斜缆地震资料;反演可行性;叠前反演;宽频;珠江口盆地

中图分类号:TE13

文献标志码:A

文章编号:1672-1926(2017)11-1755-06

引用格式:Xuan Yihua, Dai Yiding, Zhang Zhenbo, *et al.* Research of pre-stack inversion equal depth and variable-depth streamers seismic data in one block in Pearl River Mouth Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2017, 28(11): 1755-1760. [轩义华, 代一丁, 张振波, 等. 珠江口盆地惠州某区平缆与斜缆地震资料叠前反演综合研究[J]. 天然气地球科学, 2017, 28(11): 1755-1760.]

0 引言

斜缆地震资料采集处理是近年来CGG公司发展的一套新的地震资料采集处理流程,主要为了满足勘探开发对于地震资料宽频的需要。在国内,珠江口盆地东部海域惠州某区首次尝试采用斜缆采集处理技术。其中地震采集作业采用8条长度为6 000m的电缆,缆间距为100m。电缆沉放深度从首道的5m沉放渐变到电缆长度为4 500m时沉放为50m,电缆后部的1 500m电缆则为等深沉放50m。通过常规和斜缆宽频采集的地震资料频谱对比,斜缆采集处理的资料在成像方面已经体现出其宽频优势性^[1]。

珠江口盆地惠州地区为勘探成熟区。随着勘探程度的加深,该区的岩性圈闭和隐形圈闭是勘探突破的重点之一。斜缆采集的地震资料有助于复杂圈闭的地层成像,但此类宽频资料对复杂储层预测的可行

性及特性的优势尚不明确。因此,笔者针对珠江口盆地某区块斜缆地震资料,在充分研究斜缆地震资料特点的基础上,结合叠前反演对地震数据的要求,分析斜缆数据叠前反演的可行性,分析了斜缆反演的技术与方法。最后通过实际地震资料的应用效果对比分析,证明了斜缆地震资料反演的优势性和可靠性。

1 斜缆叠前地震资料反演可行性分析

1.1 频谱对比分析

斜缆宽频采集水下拖缆采用的是变深度的拖拽方式,因而产生多样化的鬼波陷波频率—鬼波陷波差异性。利用鬼波频率的差异性,通过先进的联合反褶积算法将鬼波去除,大大拓宽了有效的频带宽度。同时电缆拖的越深,对低频信号的接收越好。根据斜缆地震资料采集的原理,相比于平缆地震资料,斜缆数据主要的特点是频带更宽。图1为工区

内目标层段斜缆与平缆数据按照 $3^{\circ}\sim 10^{\circ}$ 、 $10^{\circ}\sim 20^{\circ}$ 、 $20^{\circ}\sim 30^{\circ}$ 、 $30^{\circ}\sim 40^{\circ}$ 、 $40^{\circ}\sim 50^{\circ}$ 分入射角度范围对各数据进行频谱分析。可以看出:整体上斜缆低频能量强,平缆数据高频能量强。平缆叠前数据随角

度的增大主频基本不变,频带略变窄;而斜缆叠前数据随角度的增大主频降低,频带范围逐渐变窄,且斜缆地震的角度范围更广,有效角度约为 50° ,平缆有效角度约为 40° 。

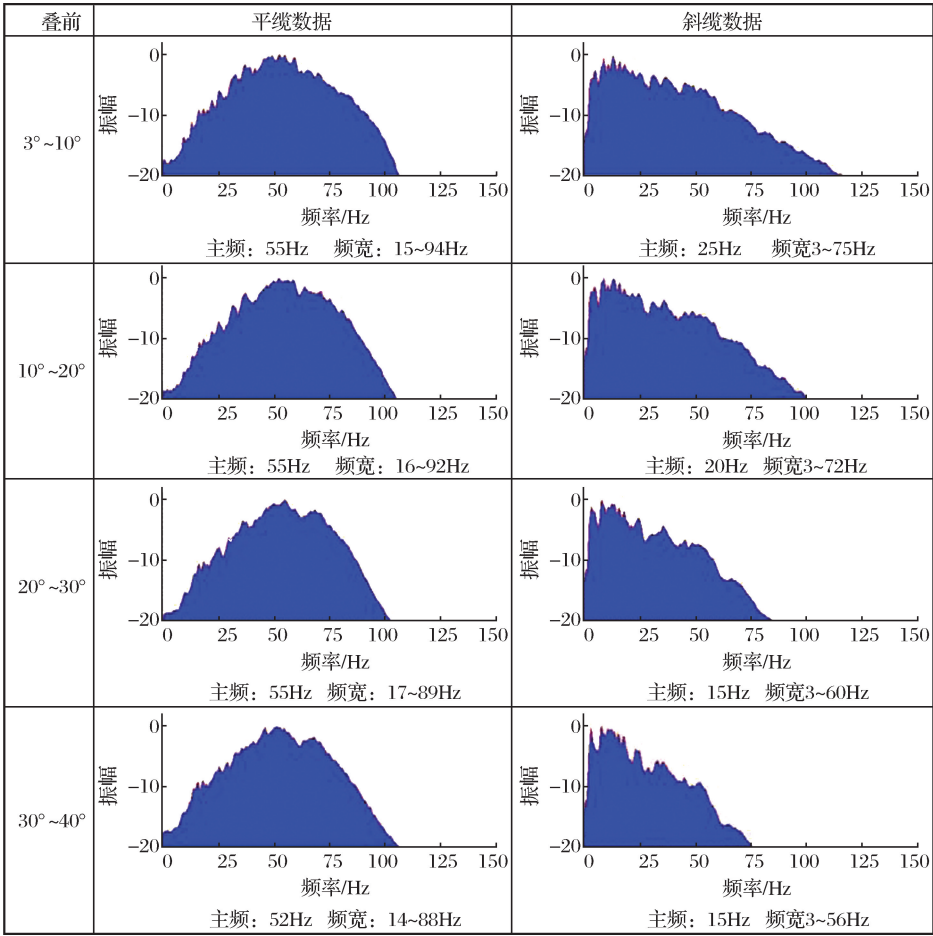


图 1 斜缆和平缆频谱对比分析

Fig.1 Comparison and analysis of variable steamer and normal steamer

1.2 斜缆叠前数据保真保幅性评价

目前实际生产中广泛应用的叠前反演方法为基于 Zoeppritz 方程反演,首先要满足 Zoeppritz 方程中的正演模型^[2-9]。同时,叠前反演最主要须满足叠前道集在入射角方向 AVO 变化特征和井正演模型一致。用斜缆道集对井进行叠前标定,若井正演道集的 AVO 形态和实际地震道集的 AVO 特征相同,认为叠前道集保真保幅性较好,否则,认为不满足叠前反演的要求。

利用斜缆地震统计子波和测井数据正演出叠前道集,对正演得到的叠前道集和斜缆实际道集进行 AVO 特征对比分析。笔者运用标定评价斜缆地震的保真性,标定结果表明:斜缆叠前资料在标志层的 AVO 类型和测井正演一致,在局部薄层有所差异;

总体斜缆叠前资料保幅性较好,保真程度与平缆接近,能够满足叠前反演的要求。

2 储层敏感参数优选

地球物理测井参数分析主要是寻找对储层岩性、物性、含油气性敏感的弹性参数,建立关系图版,指导后续反演结果的分析解释。本文主要是优选出能有效识别储层的属性进行平缆数据和斜缆数据的反演对比。

通过分析发现,密度对储层最为敏感,砂岩储层表现为相对低密度,泥岩表现为相对高密度;其次,纵波阻抗对储层也有较好的识别效果,储层表现为低的纵波阻抗值。对其他多口井进行分析,结论基本相同。因此,密度属性能很好地区分砂泥岩,并且

阻抗对储层也有较好的响应。由于受压实作用等因素的影响,区分砂泥岩的密度门槛值和阻抗门槛值随深度的增加而增大。密度和纵波阻抗可以作为斜缆和平缆叠前反演对比的目标属性。因此本文研究利用纵波阻抗属性识别储层,利用密度属性转换孔隙度识别储层物性。

3 斜缆与平缆数据叠前反演方法分析

对于叠前反演结果影响较大的因素有以下几种:初始模型的建立、子波的选取、反演参数的选择等。反演参数又包括反演角度范围,建立 Z_p 与 Z_s 、 Z_p 与密度之间关系,迭代次数等。

基于模型的反演最重要的是建立合适的初始模型,初始模型解决的是补充带通地震数据缺失的低频,相当于目的层纵波阻抗平均值的纵向及横向变化趋势。尽可能建立接近实际地质情况的初始模型,是减少反演最终结果多解性的十分重要的一环。一般反演是通过井插值建立低频背景模型,常规井差值建立初始模型的过程实际上就是把地震界面信息(横向连续性)与测井信息(纵向分辨能力)有机结

合起来的过程。对测井资料而言,其作用是为起控控制作用的波阻抗界面提供构造信息。对地震资料来说,其作用是为波阻抗界面间的地层赋予合适的波阻抗信息,改善地震反演结果的低频和低频成分。

斜缆和平缆叠后地震数据最主要的差异性在于频带,斜缆拥有丰富的低频信息,约到 3Hz。所以在建立斜缆低频背景模型时,考虑利用测井补充斜缆缺失低频成分。首先利用测井(目标砂体为 60m)对平缆和斜缆都建立 3Hz 低频背景模型,选择目标砂体 6m 和 110m 为验证井。

图 2 为 3 口井井点处平缆和斜缆对应的反演结果。对比分析可知,在参与井处,目标砂体斜缆反演结果和实际测井吻合较好,而平缆反演结果虽然和实际测井趋势一致,但差异性较大;在验证井 1 处(目标砂体为 6m),斜缆反演结果略好于平缆反演结果,在验证井 2 处,斜缆反演结果远远好于平缆反演结果。这说明斜缆数据对薄层和厚层的反演都能够提高反演精度。同样的初始模型,斜缆数据具备 3~15Hz 地震低频分量,而平缆数据缺失该部分能量,导致反演结果差异性很大。这表明低频能量对

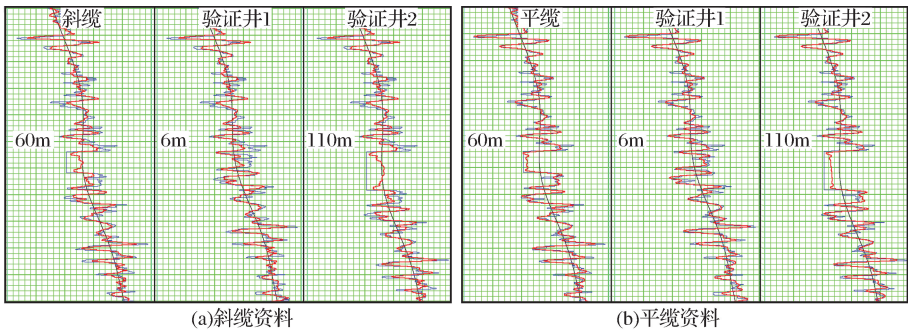


图 2 斜缆与平缆地震资料反演结果

Fig.2 Variable depth streamer and equal depth streamer data inversion results

反演有很重要的作用。

仍然利用测井(目标砂体为 60m)对平缆和斜缆都建立 15Hz 低频背景模型,选择目标砂体 6m 和 110m 为验证井。研究结果表明:在参与井处目标砂体斜缆反演结果和平缆反演结果相似,均与实际测井吻合较好。然而在 2 口验证井目标砂体处,斜缆反演结果都好于平缆反演结果。

叠前反演的迭代次数,斜缆和平缆差异不大,约 10 次就能达到很好的收敛效果。斜缆地震叠前反演相比与平缆地震叠前反演只需要建立超低频背景模型(反映地层压实趋势),使得建立的模型外推可靠性更高,相比于平缆地震反演更容易实现;斜缆数据低频成分重的特点对提高确定性反演的精度是有

利的,对厚层和薄层的预测精度都有明显改善。

4 斜缆与平缆叠前反演效果对比

4.1 单井反演效果对比

进一步对过井点处平缆中浅层重处理数据和斜缆反演剖面进行对比分析。图 3(a)、图 3(b)为过井反演剖面的对比,图中井曲线为以颜色显示的阻抗曲线,图 3(c)为井点处反演结果的放大显示。由图 3(c)可以看出,虽然二者波阻抗反演结果都能够反映出储层的变化,但斜缆反演结果和实际测井吻合更好;从图 3(a)、图 3(b)剖面井点处对比可知斜缆对厚度的刻画更加的准确,对薄层和厚层反映均比平缆更准确。

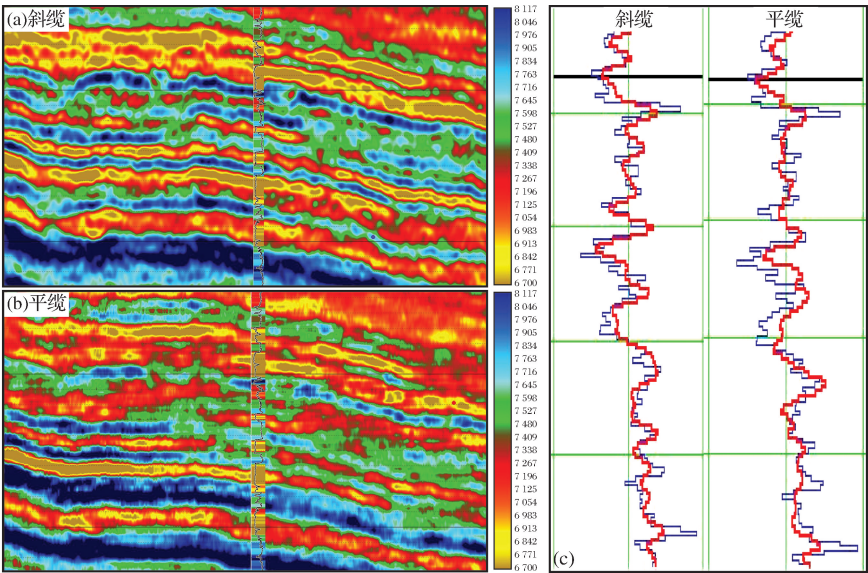


图 3 反演效果对比图 (纵波阻抗)
Fig.3 Inverse profile comparison (Z_p)

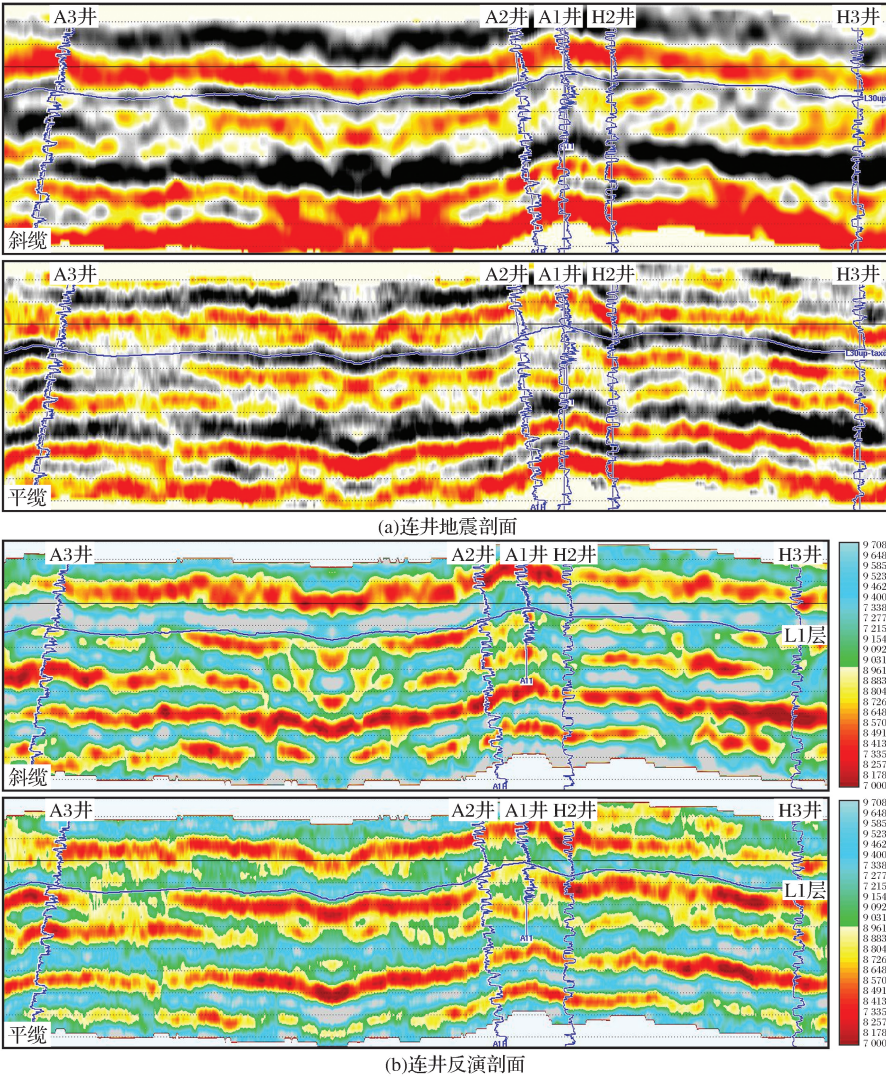


图 4 过 M 构造连井地震剖面 and 储层反演剖面
Fig.4 Continuous seismic profile and well inversion profile

4.2 连井反演厚度对比

M构造 L1 层为该区重点产油层,图 4 为过 2 口探井和 3 口开发井的连井地震剖面和其对应的储层反演剖面。对比可以看出,平缆反演结果显示该层为较厚储层,横向连续性较好,斜缆反演结果显示该储层横向变化较快。而根据实际钻井认识 L1 层含灰质,物性、厚度横向变化大。因此可见,斜缆地震资料横向分辨率更高,振幅信息更加真实可靠,反演结果更加准确,能够真实地描述岩性砂体的横向变化。对各井斜缆和平缆反演厚度进行统计(表 1),对比可以看出斜缆反演误差远远小于平缆的反演误

表 1 L1 层斜缆和平缆反演厚度统计

Table 1 L1 layer inversion thickness table

测井名称		钻遇厚度/m	常规反演预测/m		斜缆反演预测/m	
			砂体厚度	误差	砂体厚度	误差
探井 (参与井)	H1	12.3	14.3	−2	11.5	0.8
	H2	11.4	15.7	−4.3	10.8	0.6
	H3	6.9	15.5	−8.6	8.7	−1.8
开发井 (验证井)	A3	11.9	15.2	−3.3	13.2	−1.3
	A2	11.1	17.1	−6	13.8	−2.7
	A1	8.7	14.8	−6.1	10.1	−1.4

差,对于厚度的刻画更加精确。

4.3 连井反演物性对比

图 5 为 L1 层孔隙度平面图,对各口井孔隙度反演结果与实际钻井对比,斜缆孔隙度反演结果更接近于测井钻遇孔隙度。图 6 为过 M 构造连井孔隙度剖面,图中插入为以颜色显示的孔隙度曲线。对各口井孔隙度反演结果进行统计(表 2)表明:斜缆孔隙度反演结果更接近于测井钻遇孔隙度。2 种反演结果平面图对比可以看出,平缆反演结果显示该层横向连续

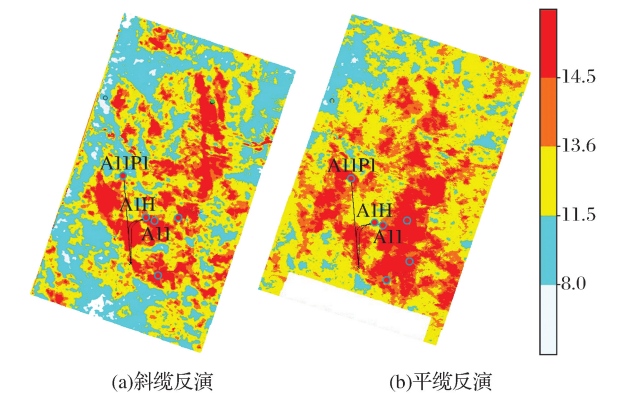


图 5 L1 层孔隙度平面图

Fig.5 L1 layer porosity plan picture

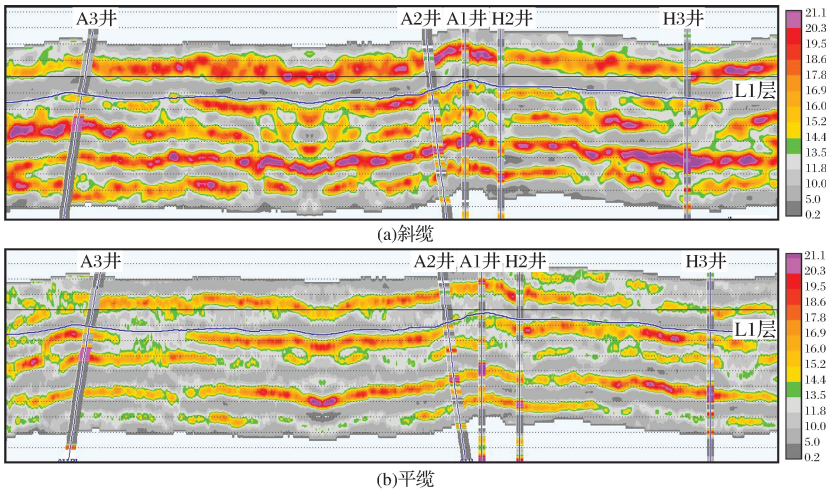


图 6 过 M 构造连井孔隙度反演剖面

Fig.6 Porosity inversion profile

性较好,斜缆反演结果显示该储层横向变化较快,而根据实际钻井认识 L1 层含灰质,物性、厚度横向变化大。综合以上,斜缆地震资料横向分辨率更高,振幅信息更加真实可靠,反演结果更加准确,能够真实地描述岩性砂体的横向变化。

5 结论

(1)分析了斜缆叠前地震数据频率随角度的变

化特点,利用已有测井数据进行了叠前标定分析,根据叠前反演对地震数据的要求,评价了斜缆地震数据叠前反演的可行性,认为斜缆数据完全适用于叠前同时反演。

(2)斜缆数据低频成分重带来更高精度的反演结果,在进行斜缆地震叠前反演时,低频模型的建立是关键,针对斜缆叠前地震反演,建议建立超低频的初始背景模型,或者适用地震处理成像的低频速度

信息;更广角度的反射信息参与反演能一定程度的提高叠前反演密度和 V_p/V_s 属性的精度。在斜缆叠前道集子波随偏移距变化明显的情况下,子波的精确求取对提高反演的精度尤为重要。斜缆实际数据叠前反演获得的纵波阻抗波、横波阻抗、密度和 V_p/V_s 的精度均高于平缆数据。

表 2 L1 层斜缆和平缆反演孔隙度统计
Table 2 L1 layer inversion porosity statistics

测井名称		钻遇孔隙度/%	常规反演预测/%		斜缆反演预测/%	
			反演孔隙度	误差	反演孔隙度	误差
探井 (参与井)	H1	16	14.1	−1.9	15.5	−0.5
	H2	16.6	21	4.4	15.1	−1.5
	H3	20	17.2	−2.8	16.1	−3.9
开发井 (验证井)	A3	24.4	17.1	7.3	17.3	7.1
	A2	19.4	13.7	5.7	17.6	1.8
	A1	17.6	14.4	3.2	16.4	1.2

(3)对斜缆数据和平缆数据的叠前反演结果进行了系统的对比分析,认为斜缆地震反演在叠前具有更高的精度,在刻画储层的厚度、物性定量预测等方面均具有更大优势。

(4)进一步开展斜缆地震资料处理技术攻关,挖掘斜缆地震资料的潜力,更进一步提高斜缆地震资料低频段的保真性,拓宽斜缆地震深层的高频成分,为反演提供更宽频更保真的地震数据。

参考文献(References)

[1] Zhang Zhenbo, Li Dongfang. Variable-depth streamer seismic acquisition and processing in Pearl River Mouth Basin[J]. Oil

Geophysical Prospecting, 2014, 49(3): 451-456. [张振波, 李东方. 斜缆宽频地震勘探技术在珠江口盆地的应用[J]. 油气地球物理勘探, 2014, 49(3): 451-456.]

[2] Li Qingzhong. Road Tow and Precious Exploration[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1993. [李庆忠. 走向精确勘探的道路[M]. 北京: 石油工业出版社, 1993.]

[3] Wang Yanguang. Seismic reservoir inversion algorithm and the key problems and policies in its application[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2002, 41(3): 299-303. [王延光. 储层地震反演方法及应用中的关键问题与对策[J]. 石油物探, 2002, 41(3): 299-303.]

[4] Zhang Yonggang. The present and future of wave impedance inversion technique[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2002, 41(4): 385-390. [张永刚. 地震波阻抗反演技术的现状和发展[J]. 石油物探, 2002, 41(4): 385-390.]

[5] Zhao Minghai. Evaluation and analysis on the post-stack wave impedance inversion technique in common use[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2004, 11(1): 36-38. [赵铭海. 常用叠后波阻抗反演技术评析[J]. 油气地质与采收率, 2004, 11(1): 36-38.]

[6] Zhang Yuhang. Research and Application of Seismic Inversion in Reservoir Prediction[D]. Xi'an: Changan University, 2009. [张宇航. 地震反演在储层预测中的研究与应用[D]. 西安: 长安大学, 2009.]

[7] Wang Dongyan. Study on Inversion and Application of Seismic Constrained Wave Impedance[D]. Xi'an: Chang'an University, 2006. [王东燕. 地震约束波阻抗反演及应用研究[D]. 西安: 长安大学, 2006.]

[8] Meng Xianmin, Jiang Weiping. Elastic impedance inversion technology and its application effect[J]. Coal Geology of China, 2009, 21(1): 52-54. [孟宪民, 蒋维平. 波阻抗反演技术及其应用效果[J]. 中国煤炭地质, 2009, 21(1): 52-54.]

[9] Shuey R T. A simplification of the Zoeppritz equations[J]. Geophysics, 1985: 609-614.

Research of pre-stack inversion equal depth and variable-depth streamers seismic data in one block in Pearl River Mouth Basin

Xuan Yi-hua¹, Dai Yi-ding¹, Zhang Zhen-bo¹, Dan Zhi-wei², Xiao Wei², Zhu Mei-juan²
(1. Shenzhen Branch of CNOOC Ltd., Shenzhen 510000, China;
2. CNOOC EnerTech-Drilling & Production Co., Development & Prospecting Geophysical Institute, Zhanjiang 524057, China)

Abstract: Based on the research of equal depth streamer and variable depth streamer, we analyzed the seismic spectrum, seismic fidelity preserving, rock physics, pre-stack inversion and so on. And we study the seismic well material and the seismic profile. The result suggests that the variable depth streamer has the feasibility of inversion work, and the seismic inversion of the variable depth streamer has higher precision. The variable depth streamer seismic has a greater advantage in identifying reservoir thickness, predicting physical properties and so on, also, it is rich in low-frequency information. It is conducive to carry out pre-stack inversion work, help to get a richer geological understanding.

Key words: Variable-depth streamers seismic data; Inversion feasibility; Pre stack inversion; Broad band; Pearl River Mouth Basin