

布莱克海域变道距采集地震资料 角道集优化处理

王嘉琳¹, 童思友^{1,2*}, 张海啟³, 吴志强^{2,4}

(1 中国海洋大学海底科学与探测技术教育部重点实验室, 青岛 266100;

2 青岛海洋科学与技术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 266200;

3 中国地质调查局发展研究中心, 北京 100037; 4 中国地质调查局青岛海洋地质研究所, 青岛 266071)

摘要: 布莱克海域天然气水合物储量丰富, ODP164 航次采集的地震资料中明显表现出丰富的 BSR 特征。结合测井提供的纵横波速度、密度等信息和地震角道集叠加数据开展叠前弹性波阻抗反演, 对水合物藏准确识别取得显著效果。研究发现, 反演效果的好坏与角道集的质量密切相关, 因为, 该海域地震资料是变道距采集, 覆盖次数不均匀, 不同角度的角度体质量差别大, 为了给后续精细的叠前弹性波阻抗反演提供高质量的角度叠加数据, 开展改善角道集质量的处理十分必要。研究采用高精度抛物线拉东变换和面元优化处理等技术, 很好地补充了偏移距信息的缺失, 角度信息更加均匀, 提取的角道集振幅能量和同相轴连续性得到提高。正演模拟资料证明了该方法的保真性和可靠性。从实际资料叠前弹性波阻抗反演的敏感属性对比中也可以清楚看到, 经过角道集优化处理后的反演剖面在反映水合物层丰度变化和 BSR 特征上有很大改善。该技术对其他海域类似采集方式得到的地震资料角度道集质量的提高有很好的借鉴意义。

关键词: 变道距采集; 偏移距缺失; 角道集; 优化处理; 抛物线拉东变换

中图分类号: P631.4

文献标识码: A

DOI: 10.16028/j.1009-2722.2016.11008

布莱克海域变道距采集的地震资料, 由于部分偏移距缺失, 导致覆盖次数不均匀, 角度信息不完整, 而获得高精度的叠前弹性波阻抗反演结果的前提是要有高质量的角度道集作为支撑。为此, 需要对不同角度的地震资料加以完善和优化, 提取高质量的角度道集, 来达到满足高精度的叠前弹

性波阻抗反演的要求。

本文在对该地震资料进行角道集优化处理中, 采用最小平方的抛物线拉东变换方法进行缺失地震道的重构, 用该方法进行地震道重构可以有效地保证原始地震道的真实性, 重构出的地震道也具有较高的可靠性。另外通过面元优化技术的结合, 使更多的地震道参与到角道集叠加中, 确保了高质量角度叠加数据的获得。利用改善后的角度叠加数据进行叠前弹性波阻抗反演得到的属性剖面在识别水合物层的精度上明显提高。

1 拉东变换重构地震道原理

利用拉东变换做地震道重构主要应用的是基

收稿日期: 2016-05-23

基金项目: 国家自然科学基金重点项目 (41230318; 41210005); 青岛海洋科学与技术国家实验室鳌山科技创新计划项目 (2015ASKJ03)

作者简介: 王嘉琳 (1990—), 男, 在读硕士, 主要从事地震资料处理及反演方法方面的研究工作. E-mail: ouc_wjl@163.com

*** 通讯作者:** 童思友 (1969—), 男, 博士, 教授, 主要从事海洋地球物理方法方面的研究工作. E-mail: tsy@ouc.edu.cn

于最小平方的抛物线拉东变换原理^[1,2]。该理论首先是由 Hampson^[3]于 1986 年提出并迅速应用于工业;后来, Beylkin^[4]提出了离散形式的最小平方拉东变换表达式;接着国内学者将道均衡技术和抛物线拉东变换有机结合起来,提出了迭代加道均衡抛物线拉东变换方法^[5-7],提高了地震道重构的效率和精度。

对于离散形式的地震数据,抛物线拉东变换的正反形式也需要离散化,具体形式如下:

$$m(\tau, q_j) = \sum_{k=1}^n d(t = \tau + q_j x_k^2, x_k) \quad (1)$$

$$d(t, x_k) = \sum_{j=1}^m m(\tau = t - q_j x_k^2, q_j) \quad (2)$$

式中: $d(t, x_k)$ 为时间域数据;

$m(\tau, q_j)$ 为拉东域数据;

x_k 为第 k 道的偏移距;

q_j 为曲率参数;

τ 为截距时间。

可以看到(1)式和(2)式中 τ 和 t 是线性关系,将其变换到频率域为:

$$M(\omega, q_j) = \sum_{k=1}^n D(\omega, x_k) e^{i\omega q_j x_k^2} \quad (3)$$

$$D(\omega, x_k) = \sum_{j=1}^m M(\omega, q_j) e^{-i\omega q_j x_k^2} \quad (4)$$

对于(3)式和(4)式, ω 是一个单独的频率分量,因此,可以对其进行矩阵形式表示:

$$M = LD \quad (5)$$

$$D = L^H M \quad (6)$$

式中: $L = e^{i\omega q_j x_k^2}$, L^H 为 L 的逆算子,即 $L^H L = 1$ 。但通常情况下, L 并不为方阵,在实际应用中需要采用最小平方使目标函数最小的方法求取其广义逆。这就分为 $n > m$ 和 $n < m$ 的情况,当 $n > m$ 时,正变换形式可表示为:

$$M = (L^H L + \mu I)^{-1} L^H D \quad (7)$$

当 $n < m$ 时,正变换形式可表示为:

$$M = L^H (L L^H + \mu I)^{-1} D \quad (8)$$

式中: μ 为阻尼因子;

H 为单位矩阵。

另外计算中还需要通过控制曲率参数 q , 来避免重构过程中假频的产生。具体应用发现, q 的采样间隔 Δq 一般取临界采样率的 $\alpha = (0.8 \sim 0.9)$ 倍,并且 q 的范围应该满足:

$$q_{\max} \leq \frac{\alpha}{2x_{\max} \Delta x f_{\max}} \quad (9)$$

式中: $x_{\max}$ 为最大偏移距;

$f_{\max}$ 为最大有效频率。

最终通过参数的控制和正反抛物线拉东变换迭代修正,重构出缺失的地震道数据。下面通过正演模型检验该方法对原始地震道集的保真性和可靠性。

2 正演模型试验

本文设计如下简单层状速度模型,如图 1 所示,海水深度 500 m,海底以下设置 3 个地层,模型参数如表 1 所示。观测系统设置为:子波主频 40 Hz,炮间距 50 m,90 道接收,道间距 25 m,最小炮检距 100 m。

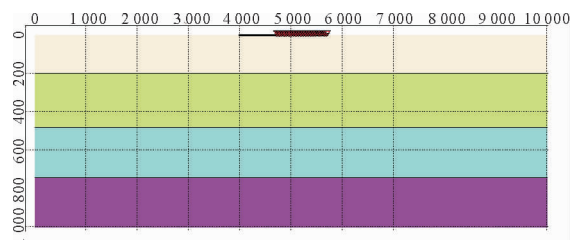


图 1 速度模型

Fig. 1 The velocity model profile

表 1 正演模拟地层参数

Table 1 Forward modeling formation parameters

深度/m	纵波速度/(m/s)	密度/(kg/m ³)
0~500	1 500	1 000
500~950	1 800	1 500
950~1 400	1 900	1 700
1 400~2 000	2 100	1 800

图 2 所示为通过正演模型模拟得到的单炮地震记录,将该单炮地震记录每隔一道抽稀,再通过抛物线拉东变换对抽稀的地震道进行重构并进行面元优化,得到如图 3 所示的地震记录。对比图 2 和图 3 可以发现地层的同相轴几乎没有差别,抽稀道在相应处得到了准确重构,没有虚假同相轴产生。对比抽稀的地震记录提取的角道集(图 4a),经过重构和面元优化后的地震记录角道集(图 4b)角度信息更加均匀,角道集振幅能量和同相轴连续性更高。证明用该方法进行角道集优化处理在保证原始道信息真实性和填补缺失道角度信息上有较理想的效果。

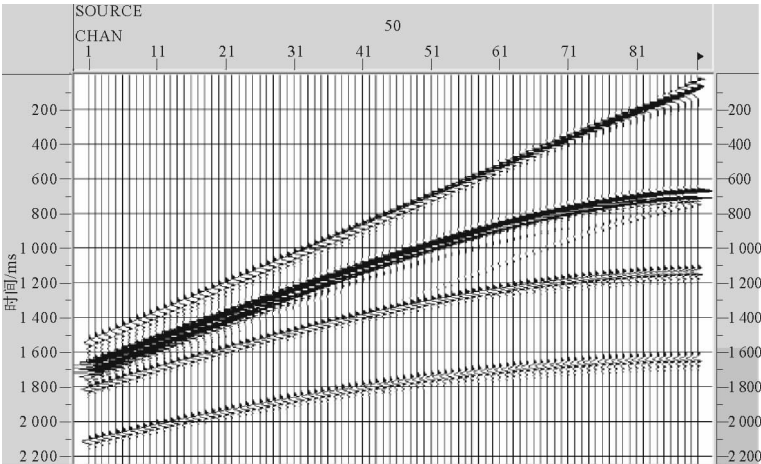


图 2 模型原始单炮地震记录

Fig. 2 The original shot record of the model

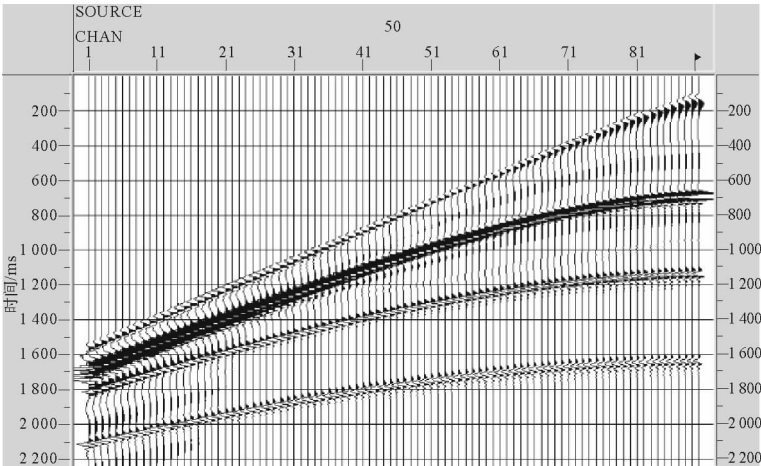


图 3 拉东变换对抽稀道重构之后的单炮地震记录

Fig. 3 The shot record of blank trace after Radon transform

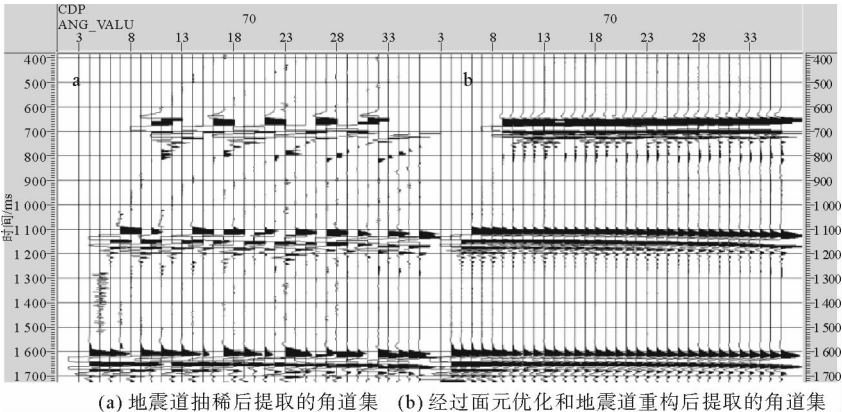


图 4 处理前后地震角道集对比

Fig. 4 Comparison of angle gathers between processed and unprocessed seismic data

3 实际资料处理效果

针对该布莱克海域某测线变偏移距 48 道拖缆采集得到的地震资料^[8](拖缆总长 3 600 m, 近炮点处为第 48 道, 25~48 道的道间距为 25 m, 24~25 道的道间距为 75 m, 1~24 道的道间距为 100 m; 炮间距 50 m; 最小偏移距 75 m), 通过建

立观测系统之后得到图 5 所示的原始单炮记录, 明显存在偏移距缺失导致的分辨率不足的问题。类比正演模型中的处理方式, 通过抛物线拉东变换对缺失的偏移距道进行重构, 并进行面元优化, 得到如图 6 所示的单炮记录, 可以看到其分辨率明显提高, 同相轴连续性变好。对原始的 48 道单炮数据与经过抛物线拉东变换之后的相应道作差, 得到的结果如图 7 所示。比较两者之间的误

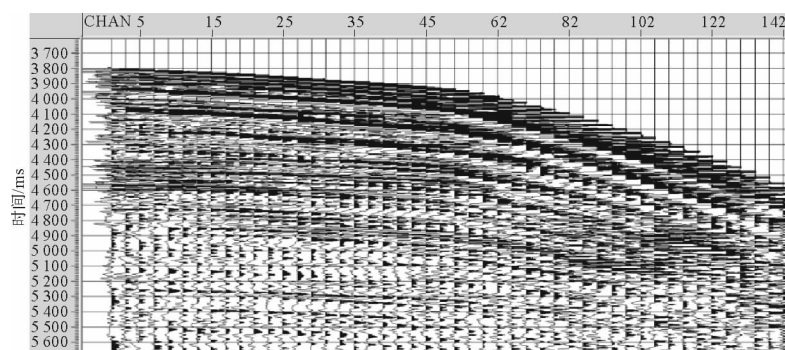


图 5 原始单炮记录

Fig. 5 The original shot record

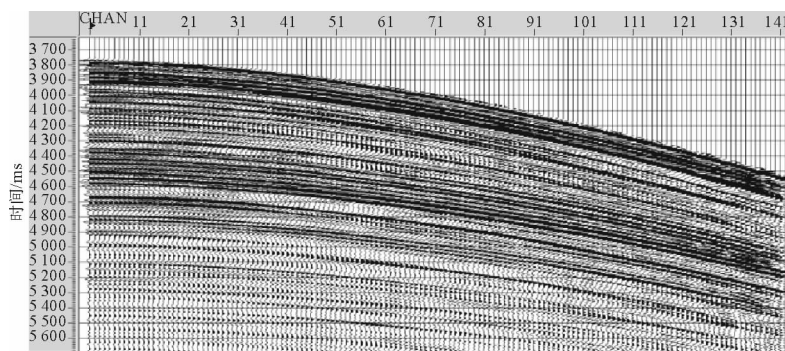


图 6 面元优化和重构得到的单炮记录

Fig. 6 The shot record after binning optimization and reconstruction

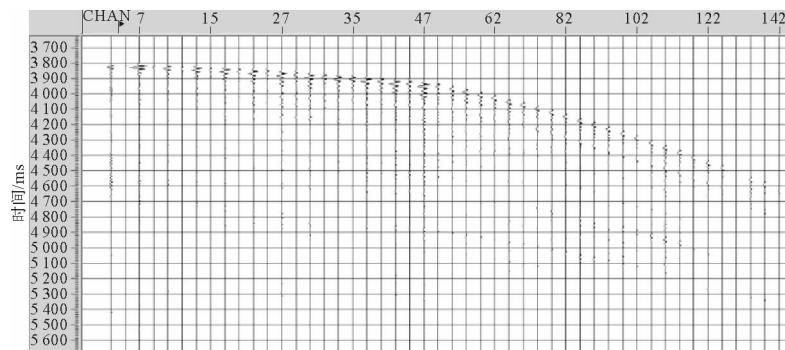


图 7 原始地震道记录与经过拉东变换后相应道之间的误差

Fig. 7 Difference between the original data of traces and the corresponding traces after Radon transform

差,说明拉东变换后并没有对原始道记录产生明显影响,验证了该方法在实际海洋变道距地震资料处理中仍有良好的效果。

图 8(a)和(b)所示为该实际地震数据经过面

元优化和道重构前后提取的角道集记录,可以清楚的看到图 8(b)所示的角道集包含的角度信息更加完整,同相轴更加连续,振幅能量和分辨率更高。

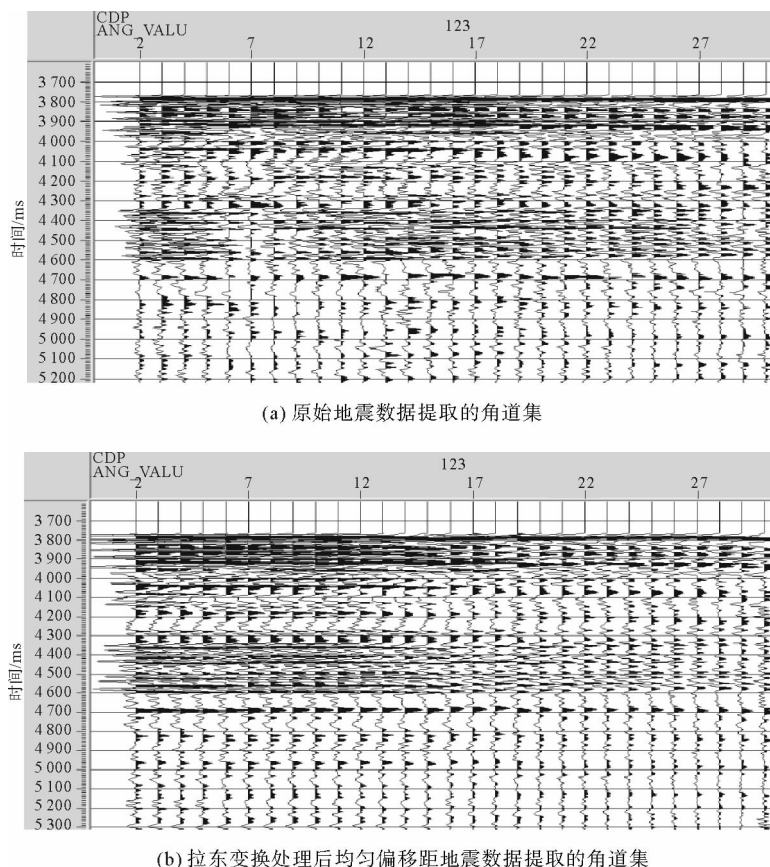


图 8 原始地震数据(a)和重构道地震数据(b)提取的角道集

Fig. 8 Angle gathers of original seismic data (a) and the data after interpolation and reconstruction(b)

图 9 所示为角道集优化前后分别抽取的部分角度体剖面,对比图 9(a)和(b)可以明显看到,经过角道集优化处理后的抽取的角度体剖面角度信息更加丰度,具体体现在同相轴连续性和振幅能量提高,地层信息更加清晰,资料品质得到提升。

对角道集优化处理前后分别得到的角度叠加剖面分别进行叠前弹性波阻抗反演,得到如下图 10(a)和(b)所示的属性(λ/μ)剖面,对比可以明显看到,经过角道集优化处理最终得到的属性剖面分辨水合物藏特征更加细致,精确体现了水合物藏横向和纵向的丰度变化。另外对比 BSR 的强度和连续性可以更清晰地识别水合物层的底界。

证明了角道集优化处理对叠前弹性波阻抗反演结果的品质和精度有较大的提高。

4 结论

通过正演模型验证了最小平方抛物线拉东变换对地震道重构和角道集优化中的可行性。结合面元优化处理能较好的保持原始地震道振幅能量和准确重构缺失地震道,通过角道集对比明显看到角度信息更加均匀和完整。将该处理应用到实际海洋变道距距采集的地震资料中,同样明显改善了地震资料的品质,包括角度信息

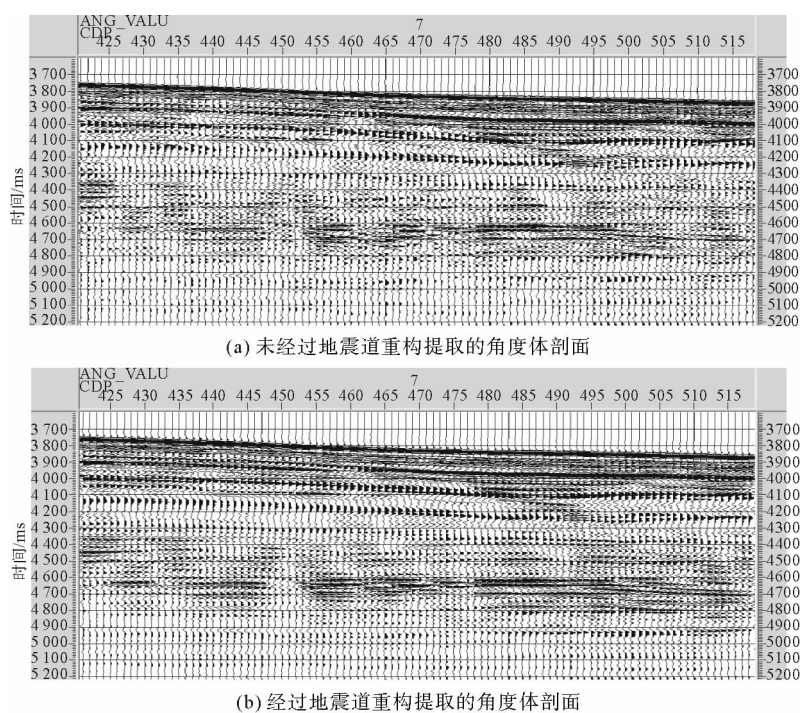


图 9 地震道经重构前(a)后(b)提取的角度体剖面

Fig. 9 The profile of angle data before(a) and after(b) traces reconstruction

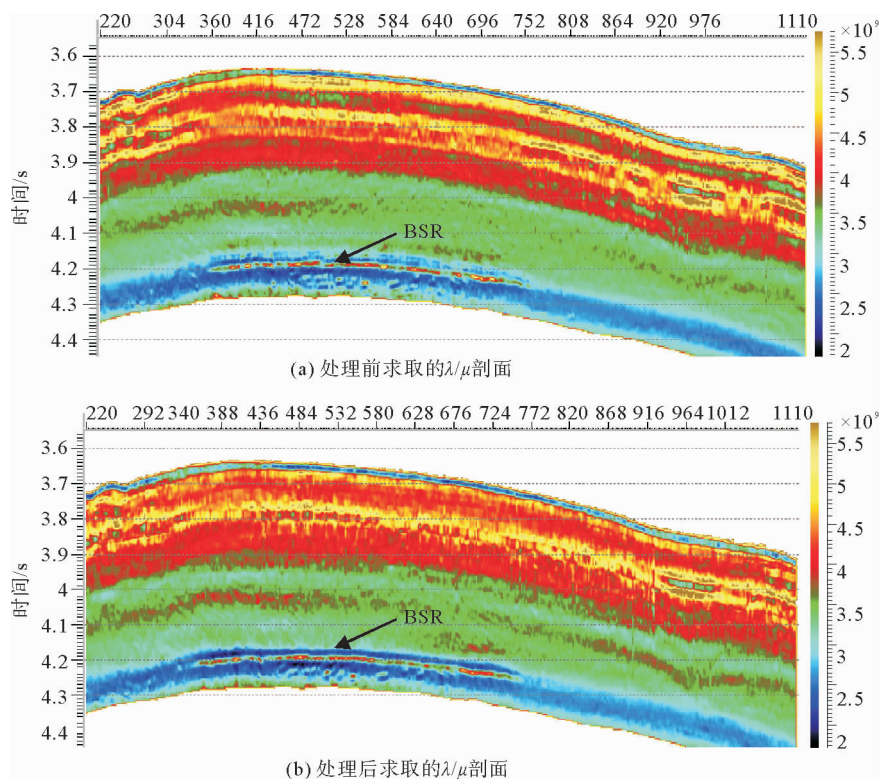


图 10 地震道重构处理前后叠前弹性波阻抗反演属性(λ/μ)剖面

Fig. 10 The attribute(λ/μ) profile of pre-stack elastic wave impedance inversion before(a) and after(b) trace reconstruction process

更加丰富和均匀,角道集记录和角度体剖面反映的同相轴更加连续、能量提高,资料的信噪比和分辨率更高。而且通过叠前弹性波阻抗反演的属性剖面对比,明显看到经过面元和角道集优化处理的地震数据反演精度提高,增强了对水合物层丰度变化和 BSR 特征的识别效果。

这种方法不但适用于改善水合物目标的类似观测系统的地震资料角道集质量,也适用于改善其他目标的变道距或偏移距缺少的地震资料角道集的品质。

致谢:感谢大洋钻探计划的工作人员们无偿提供海洋天然气水合物相关数据。

参考文献:

- [1] 平利姣. 基于道集记录的地震道内插算法研究[D]. 中南大学, 2010.
- [2] 黄新武, 吴 律, 牛滨华. 基于抛物线拉东变换的地震道重构[J]. 中国矿业大学学报, 2003(5): 68-73.
- [3] 张保卫. Radon 变换及其在地震数据处理中的应用[D]. 西安: 长安大学, 2007.
- [4] Beylkin G. Discrete Radon Transform[J]. IEEE Transaction on Acoustic, speech and Signal Processing, 1987, 35(2): 162-172.
- [5] 王维红, 刘 洪. 道均衡抛物线 Radon 变换法地震道重建[J]. 石油地球物理勘探, 2005, 40(5): 518-522.
- [6] 刘喜武, 刘 洪, 李幼铭. 高分辨率 Radon 变换方法及其在地震信号处理中的应用[J]. 地球物理学进展, 2004(1): 8-15.
- [7] 李唐律. 浅海地震资料自由表面多次波压制方法研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2014.
- [8] Umberta T, Emanuele L, et al. The Blake ridge bottom-stimulation transect: tomographic velocity field and theoretical model to estimate methane hydrate quantities[R]. 2000.
- [9] Bardan V. Trace Interpolation in Seismic Data Processing[J]. Geophysical Prospecting, 1987, 35(3): 343-358.
- [10] Spitz S. Seismic trace interpolation in F-X domain[J]. Geophysics, 1991, 56(6): 785-794.
- [11] 吴志强, 闫桂京, 童思友, 等. 海洋地震采集技术新进展及对我国海洋油气地震勘探的启示[J]. 地球物理学进展, 2013(6): 3056-3065.
- [12] 刘怀山, 王福海, 童思友. 滩浅海高精度地震资料处理研究[J]. 青岛海洋大学学报, 2003, 33(增刊): 32-36.

THE OPTIMIZED PROCESS OF ANGLE GATHERS FOR SEISMIC DATA COLLECTED BY CHANGING INTERVAL CHANNELS AT BLAKE OCEAN

WANG Jialin¹, TONG Siyou^{1,2*}, ZHANG Haiqi³, WU Zhiqiang^{2,4}

(1 Key Laboratory of Submarine Geosciences and Prospecting Techniques, Ministry of Education, Ocean University of China, Qingdao 266100, China; 2 Function Laboratory of Marine Geo-Resource Evaluation and Exploration Technology, Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266200, China; 3 Development and Research Centre, China Geological Survey, Beijing 100037, China; 4 Qingdao Institute of Marine Geology, CGS, Qingdao 266071, China)

Abstract: The Blake Ocean is rich in marine gas hydrate. The seismic data from Leg ODP164 clearly shows an excellent indication of BSR. Combining the p-wave velocity, s-wave velocity, density information from well logging and seismic angle gathers stack data to do the pre-stack elastic wave impedance inversion, we achieved a significantly effective and accurate results for recognition of the gas hydrate zone. However, we found that the inversion is closely related to the quality of angle gathers. Because the acquisition in this area uses a changing-trace interval, making the fold uneven, the quality of angle data of different angle has a big difference. In order to provide high quality angle stack data for pre-stack elastic wave impedance inversion, it's necessary to carry out the process to improve the quality of the angle gathers. In this study, we adopt precise parabolic Radon transform and binning

Key words: changing trace interval acquisition; loss of offset; angle gathers; optimizing process; parabola radon transform

(上接第 54 页)

JIANG Yu¹, CHEN Hua¹, YAO Gang¹, LI Yanqing²

(1 Shanghai Branch of CNOOC Ltd. , Shanghai 200335, China; 2 COSL Ltd., Tianjin 300451, China)

Key words: wide-azimuth; acquisition design; geometry-variable design; Xihu Sag