

DOI :10.3876/j.issn.1000-1980.2012.02.010

涠西南地区地震数据叠前同步反演

刘 涛¹ 樊小意¹ 方中于¹ 邓志勇² 任科英² 张宏兵³ 魏奎烨³

(1. 中海油能源发展股份有限公司钻采工程研究院地球物理研究所, 广东 湛江 524000 ;
2. 中海石油(中国)有限公司湛江分公司研究院, 广东 湛江 524057 ; 3. 河海大学地球科学与工程学院, 江苏 南京 210098)

摘要 : 针对涠西南地区复杂的地质条件, 以及基于地震资料预测储层需要纵、横波阻抗及速度、密度等弹性参数, 对涠西南地区开展了地震数据叠前同步反演. 该反演方法使用改进的 Fatti 方程, 可以同时获得各种弹性参数, 应用预白化处理来控制反演的噪音水平, 使反演结果更稳定. 使用不同子波来均衡不同角度部分叠加数据体之间振幅、频率和相位差异, 使反演结果更准确. 实际地震资料处理结果表明, 随着角度增大, 子波主频减小. 精度验证结果表明, 叠前同步反演精度达到了要求, 其中纵波阻抗和横波阻抗反演结果精度都比较高, 密度反演结果精度相对较差.

关键词 : 地震数据反演 ; 叠前同步反演 ; 改进的 Fatti 方程 ; 角度子波 ; 涠西南地区

中图分类号 : P315.6 **文献标志码** : A **文章编号** : 1000-1980(2012)02-0180-06

Pre-stack simultaneous inversion of seismic data in Weixi 'nan area

LIU Tao¹ , FAN Xiao-yi¹ , FANG Zhong-yu¹ ,
DENG Zhi-yong² , REN Ke-ying² , ZHANG Hong-bing³ , WEI Kui-ye³

(1. Geosciences Institute of CNOOC Ltd. , Zhanjiang 524000 , China ;
2. Zhanjiang Branch of CNOOC Ltd. , Zhanjiang 524057 , China ;
3. College of Earth Sciences and Engineering , Hohai University , Nanjing 210098 , China)

Abstract : Based on the complex geological conditions of the Weixi 'nan area , pre-stack simultaneous inversion of seismic data in the Weixi 'nan area was conducted , in order to obtain the elastic parameters including the impedances of both P- and S-waves , velocity , and density for the reservoir forecast. The improved Fatti equation was utilized to obtain the elastic parameters , and the noise of inversion was controlled through pre-whitening processing to make the inversion results stable. Various wavelets were used to balance the differences in amplitude , frequency , and phase between multi-angle stacked seismic data , in order to ensure the accuracy of the inversion results. The result of processing of field seismic data show that the peak frequency of the wavelet decreased with the increase of the angle. The accuracy verification indicates that the accuracy requirement of the pre-stack simultaneous inversion was satisfied. The accuracies of the inversion results for the impedances of P- and S-waves were high , while the accuracy of the density result was relatively low.

Key words : inversion of seismic data ; pre-stack simultaneous inversion ; improved Fatti equation ; angle wavelet ; Weixi 'nan area

在地震勘探中, 狭义的地震反演是指波阻抗反演, 即从有限频带宽度的地震数据中恢复出宽带的波阻抗(或速度)参数. 因此, 波阻抗反演在地震反演中具有特殊的地位, 是油藏描述与储层预测中的关键技术^[1-2].

自 20 世纪 70 年代出现波阻抗直接反演方法, 到 90 年代地震、测井和地质联合约束反演, 波阻抗反演方法得到了极大的发展^[3-4]. 地震数据反演分为叠前反演和叠后反演. 叠后地震数据反演使用全角度多次叠加地震资料, 损失了很多储层和油气信息^[5], 并且只能获得纵波阻抗. 叠前地震数据反演利用小、中和大不同角

度地震道上的振幅及频率等信息,可以同时获得纵、横波阻抗及速度、密度、泊松比等弹性参数.最近十几年,地震反演的研究重心已经由叠后反演转到叠前反演^[6-7].地震数据叠前反演的理论基础是 Zoeppritz 方程.为了克服由 Zoeppritz 方程导出的反射系数形式复杂及物理上的非直观性,许多学者对 Zoeppritz 方程进行了简化^[8-11].Aki 等^[8]在假设相邻地层介质弹性参数变化较小的情况下,给出了较为简单直观且精度较好的反射和透射系数的近似表达式;Shuey^[9]给出了突出泊松比的相对反射系数近似表达式;郑晓东^[10]利用幂级数对 Zoeppritz 方程进行了近似表示,给出了物理意义明确的反射系数的近似形式.此外,在 Aki 等近似表达式的基础上,苑书金等^[5]、Fatti 等^[12]给出了以相对波阻抗变化表示的近似方法,将改进的 Fatti 方程应用预白化处理来控制反演的噪音水平,使反演结果更稳定.本文着重讨论改进的 Fatti 方程,用于实现地震数据的叠前反演,并对涪西南地区的实际地震资料进行反演处理.

1 地震数据叠前同步反演方法

1.1 Zoeppritz 方程及其近似

根据界面上位移连续和应力连续的性质以及 Snell 定律,可得到由矩阵形式表示的 Zoeppritz 方程:

$$\begin{bmatrix} \sin\varphi_1 & \cos\psi_1 & -\sin\varphi_2 & \cos\psi_2 \\ -\cos\varphi_1 & \sin\psi_1 & -\cos\varphi_2 & -\sin\psi_2 \\ \sin 2\varphi_1 & \alpha\cos 2\psi_1 & \beta\sin 2\varphi_2 & -\beta\alpha\cos 2\psi_2 \\ \alpha\cos 2\psi_1 & -\sin 2\psi_1 & -\beta\alpha\cos 2\psi_2 & -\beta\sin 2\psi_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_{PP} \\ R_{PS} \\ T_{PP} \\ T_{PS} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sin\varphi_1 \\ -\cos\varphi_1 \\ \sin 2\varphi_1 \\ -\cos 2\psi_1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: R_{PP}, R_{PS} ——以位移振幅表示的反射纵波和反射横波的反射系数; T_{PP}, T_{PS} ——以位移振幅表示的透射纵波和透射横波的透射系数; φ_1, ψ_1 ——纵波和横波的反射角; φ_2, ψ_2 ——纵波和横波的透射角; α ——纵波与横波的速度比值; β ——界面下层与上层介质的波阻抗比值.

式(1)给出了由反射角和透射角函数表示的平面波反射系数和透射系数与弹性参数之间的关系.尽管该方程早在 20 世纪初就已经建立,但由于其数学上的复杂性和物理上的非直观性,一直没有得到直接应用.为了克服由 Zoeppritz 方程导出的反射系数形式复杂及不易进行数值计算的困难,许多学者对 Zoeppritz 方程进行了简化,Fatti 方程就是其中的一种近似关系.

1.2 改进的 Fatti 方程

叠前同步反演中最具代表性的是纵波阻抗、横波阻抗和密度同步反演,其基本原理就是将 Aki-Richards 方程写成如下 Fatti 方程的形式:

$$R_{PT}(\theta) = c_1 R_P + c_2 R_S + c_3 R_D \quad (2)$$

其中

$$c_1 = 1 + \tan^2\theta \quad c_2 = -8\gamma^2\sin^2\theta \quad c_3 = -\frac{1}{2}\tan^2\theta + 2\gamma^2\sin^2\theta$$

$$R_P = \frac{1}{2}\left(\frac{\Delta V_P}{V_P} + \frac{\Delta\rho}{\rho}\right) \quad R_S = \frac{1}{2}\left(\frac{\Delta V_S}{V_S} + \frac{\Delta\rho}{\rho}\right) \quad R_D = \frac{\Delta\rho}{\rho} \quad \gamma = \frac{V_S}{V_P}$$

式中: $R_{PT}(\theta)$ ——随着角度变化的纵波反射系数; θ ——入射角($^\circ$); V_P ——纵波速度, m/s; V_S ——横波速度, m/s; ρ ——密度, g/cm³; ΔV_P ——纵波速度变化量, m/s; ΔV_S ——横波速度变化量, m/s; $\Delta\rho$ ——密度变化量, g/cm³.

式(2)揭示了反射振幅与入射角的关系,该式存在一个很大的问题,就是其中各系数在数量级上不同,将会导致在小角度时求解 R_P 和 R_S 不稳定.由于 Z_P, Z_S 和密度三者之间存在着相关性,因此可利用这种相关关系消除上述问题.在背景为含水岩层的情况下,有如下趋势关系:①由 $V_S/V_P = \gamma = \text{常数}$,得到 $\ln Z_S = \ln Z_P$

+ $\ln \gamma$;②由 $\rho = aV_P^b$,得到 $\ln \rho = \frac{b}{1+b}\ln Z_P + \frac{\ln a}{1+b}$.由此可以得到更一般的背景趋势关系:

$$\begin{cases} \ln Z_S = k\ln Z_P + k_C + \Delta L_S \\ \ln \rho = m\ln Z_P + m_C + \Delta L_D \end{cases} \quad (3)$$

这样,改进的 Fatti 方程可以写成如下形式:

$$\mathcal{T}(\theta) = \tilde{c}_1 \mathcal{W}(\theta) \Delta L_P + \tilde{c}_2 \mathcal{W}(\theta) \Delta L_S + c_3 \mathcal{W}(\theta) \Delta L_D \quad (4)$$

其中
$$\bar{c}_1 = \frac{1}{2}c_1 + \frac{1}{2}kc_2 + mc_3 \quad \bar{c}_2 = \frac{1}{2}c_2 \quad L_P = \ln Z_P$$
式中: $W(\theta)$ ——角度子波; D ——偏导算子; Z_P ——纵波阻抗, $(\text{m/s}) \cdot (\text{g/cm}^3)$; Z_S ——横波阻抗, $(\text{m/s}) \cdot (\text{g/cm}^3)$; L_S ——横波阻抗变化量取对数(用于控制反演噪音); m, m_C ——变量; ΔL_D ——密度的变化量取对数(用于控制反演噪音)。

与原来的 Fatti 方程相比,式(4)有如下优点:(a)各变量之间有关联,使得算法更加稳定;(b)建立了含水岩层背景下各变量之间的区域岩石物理特征关系;(c)可以对变量 ΔL_S 和 ΔL_P 应用预白化处理来控制反演的噪音水平;(d)在实际处理过程中,不同子波可均衡不同角度部分叠加数据体之间的振幅、频率和相位差异,使反演估算结果更准确。

依据修改的 Fatti 方程,就可利用 1 组 AVA 地震数据、AVA 子波、井的 AVA 弹性阻抗数据,以类似于叠后波阻抗反演的方式在层位数据、井数据及地质模式约束下完成纵、横波阻抗和密度的同步反演,得到纵波阻抗、横波阻抗和密度等参数的数据体,进而根据纵波速度、横波速度、密度与岩石弹性参数之间的理论关系得到泊松比、剪切模量、拉梅系数等多种弹性参数数据体。叠前同步反演主要工作步骤如下:(a)地震子波提取;(b)井震标定;(c)建立初始波阻抗模型;(d)选择反演方法和最优化算法;(e)进行属性体反演。

2 涪西南地区地震数据的叠前同步反演

2.1 叠前反演的角道集

地震数据叠前同步反演工作中参与计算的基础资料主要有测井资料、层位解释资料和地震道集资料。测井资料需经过环境校正处理和全工区标准化处理,层位资料在叠后反演数据体上进行解释、闭合、调整。道集资料是叠前反演的基础,其质量决定了反演结果的品质。

使用叠前道集和叠加速度资料,通过计算得到全区的角道集数据。在经过比较分析后优选目的层段 $2^\circ \sim 33^\circ$ 范围作为反演的有效角度。为进一步的提高道集的质量,同时开展了超道集试验(图 1),通过比较明显地发现超道集的校平质量更好,更适合叠前反演。因此最终选择有效角度范围为 $2^\circ \sim 33^\circ$, 11 个偏移距,增量为 3° 。

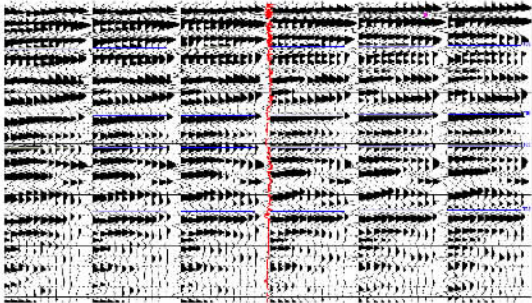


图 1 超道集剖面(涪西南凹陷 1 井)
Fig. 1 Super gather profile for well No. 1 in Weixi 'nan area

2.2 子波提取、层位标定

在地震数据叠后反演的各种方法中,通常结合测井声波时差、密度曲线和井旁地震记录提取地震子波,使用统一的子波,或者采用空变和相变子波。对比叠后反演,叠前反演依据角道集为入射角的函数,同时子波也为入射角度的函数。为确保反演结果的精度,对于不同角度地震记录应用不同的子波。本次研究中,在有效角度范围内提取了 2 个不同角度的子波,角度步长为 15° , 2 个子波对应的角度范围分别为 $2^\circ \sim 18^\circ$ 和 $18^\circ \sim 33^\circ$ 。为了保证反演的稳定性,子波设为零相位子波。图 2 为涪西南凹陷 1 井旁提取的 2 个子波。从图 2 可以看出,2 个子波

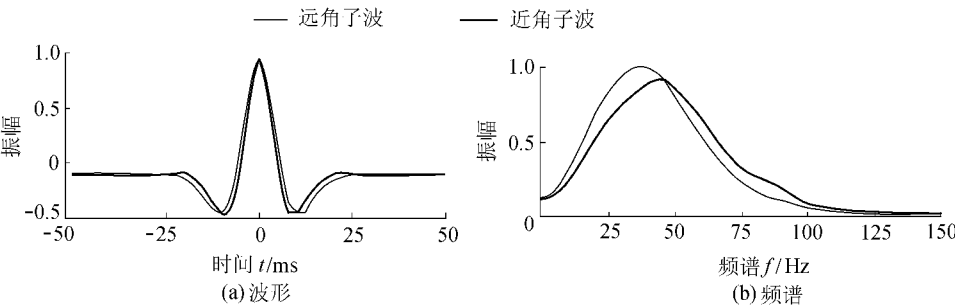


图 2 提取的 2 个不同角度的子波
Fig. 2 Wavelets from two angles

的波形和频谱曲线相差不大,主频幅度值如下:近角度子波主频约为 50 Hz,远角度子波主频约为 38 Hz,频带宽度为 20~60 Hz。随着角度增大,子波主频有所衰减。此外,叠前同步反演共用涪西南凹陷工区井 6 口,依据提取的子波对试验区内各井数据进行层位标定,合成记录与井旁地震记录吻合比较好,相关系数都在 0.80 以上。该结果为构建可靠的初始模型、测井约束数据提供了保障。

2.3 Z_P 与 Z_S 以及 Z_P 与 ρ 之间关系的建立

由叠前同步反演方法原理可知,欲反演横波阻抗和密度这 2 个参数,需先建立 Z_P 与 Z_S 以及 Z_P 与 ρ 之间的关系。因此,利用已知井资料计算出 Z_P 、 Z_S 、 ρ ,然后通过最小二乘法拟合求得参数 k 、 k_c 、 m 和 m_c ,即可得到适合本地区的改进后的 Fatti 公式。由井数据拟合所得的 Z_P 与 Z_S 以及 Z_P 与 ρ 之间的关系见图 3。拟合关系式如下:

$$\begin{cases} \ln Z_S = 1.34976 \ln Z_P - 3.77978 \\ \ln \rho = 0.228813 \ln Z_P - 1.17623 \end{cases} \tag{5}$$

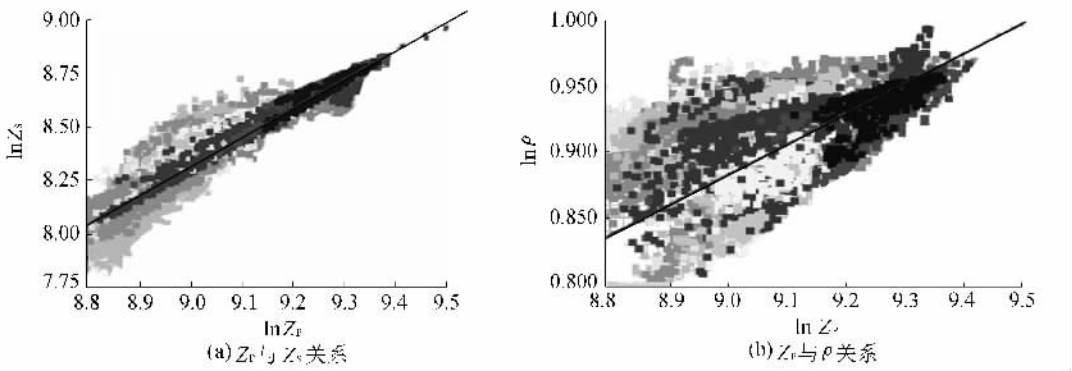


图 3 由井数据拟合所得的 Z_P 与 Z_S 以及 Z_P 与 ρ 之间的关系

Fig. 3 Relationships between Z_P and Z_S , and between Z_P and ρ fitted by well data

2.4 实际资料的反演效果及精度检验

反演过程中选择适当的迭代次数非常重要,既能保证反演结果的精度,又可提高反演效率。本次研究共进行 10、20、30、40、50、60 和 70 等不同迭代次数的试验,经过在涪西南凹陷井 1 和井 2 处对比反演结果与测井数据(包括纵波阻抗、横波阻抗和密度等参数),最终选用迭代次数 50 次进行叠前同步反演。

在子波提取及层位标定的基础上,利用工区内 6 口井和目的层段 4 个层位建立反演初始模型。建模过程中考虑了地层之间的接触关系和构造形态。图 4 为 1 个初始模型剖面,该模型为低频模型,趋势合理,能反映地层纵波阻抗在纵向以及横向上的变化特征。

在初始模型中有 3 口井资料,其中井 2 和井 3 作为约束井,参与反演。井 1 不参与反演,只作为验证井,用于检验叠前反演的精度。图 5 为叠前同步反演获得的纵波阻抗、横波阻抗和密度剖面。将用于检验的井 1 参数插入反演结果,可以看出井旁各反演参数与井 1 的测井曲线吻合较好。从剖面可以看出参数反演结果与测井曲线之间整体上相吻合,3 个参数反演结果反映的地质特征一致,横向连续性比较好,纵向层次清晰,尤其是密度剖面,既达到了反演精度的要求,又在反演分辨率上有所提高。

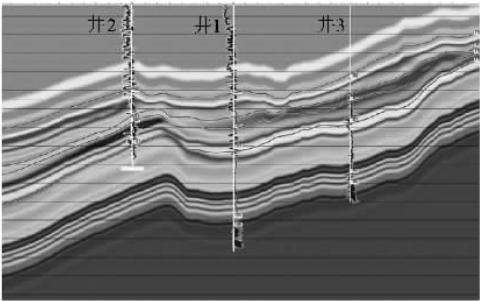


图 4 通过 3 口井的密度初始模型剖面

Fig. 4 Profile of initial density model through three wells

2.5 叠前同步反演结果的精度检验

在储层预测研究中,反演结果的精度至关重要,需要对其进行检验。为此,将图 5 中井 1 处的反演结果与井 1 的测井曲线一起显示在图 6 中进行对比。图 6 自左向右第 2、第 3 和第 4 道分别为纵波阻抗、横波阻抗和密度对比曲线,其中分辨率较高的为各参数测井曲线(粗线),比较平滑的为各参数的反演结果(细线)。从图 6 中 T80~T83 段可以看出,3 项参数曲线的测试结果与各自的反演结果相互之间基本吻合,其中纵波阻抗和横波阻抗参数曲线吻合得较好,密度曲线的吻合略

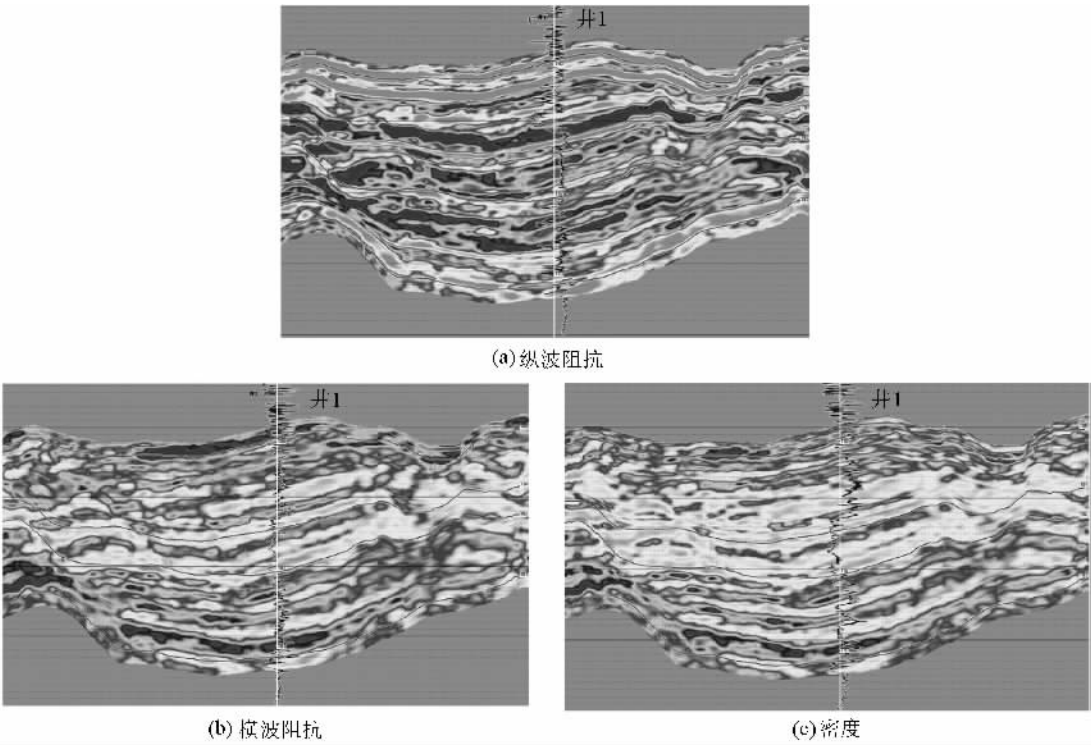


图 5 叠前同步反演获得的纵波阻抗剖面、横波阻抗剖面 and 密度剖面

Fig. 5 Profiles of P-wave impedance , S-wave impedance , and density obtained by pre-stack simultaneous inversion

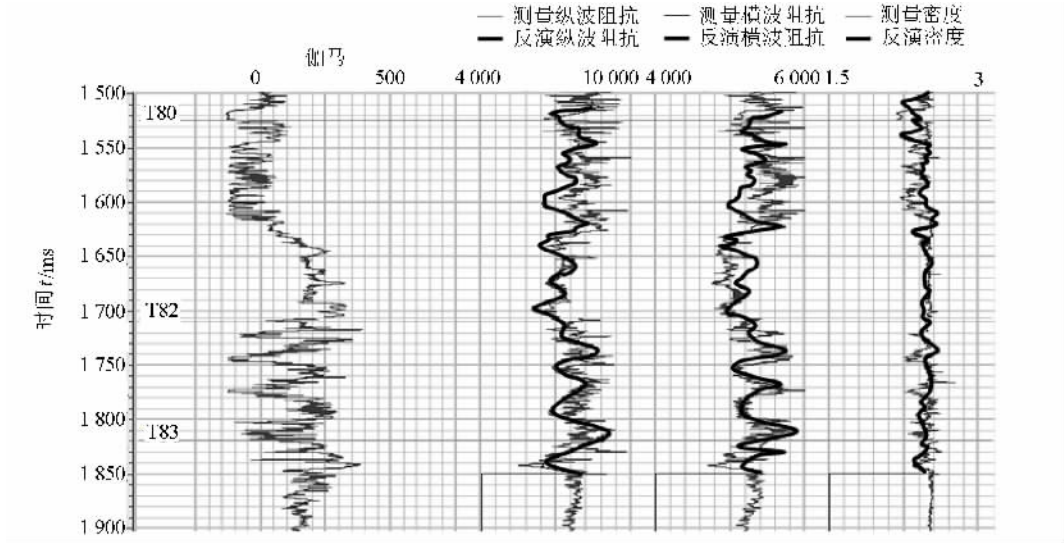


图 6 井 1 的各参数反演结果与测井曲线对比(截屏图)

Fig. 6 Comparison of inversion results and logging data of various elastic parameters for well No.1

差.对比每个层段,在 T82 ~ T83 段横波阻抗参数的测试结果与反演结果吻合最好,在 T80 ~ T82 段纵波阻抗参数的测试结果与反演结果吻合最好.因此可以得出结论:尽管叠前弹性波阻抗反演各参数结果精度有差异,但是各参数结果是可靠的,这为后续的储层预测奠定了良好基础.

3 结 语

综合上述正演数值模拟结果,可以针对碳酸盐岩生物礁归纳几点认识,为下一步识别碳酸盐岩生物礁、分析其横向及纵向内部结构提供理论依据.

a. 地震数据叠前同步反演方法通过改进的 Fatti 方程可以同时获得纵波阻抗及速度、横波阻抗及速度、密度等参数,应用预白化处理来控制反演的噪音水平,使用不同子波可均衡不同角度部分叠加数据体之间振

幅、频率和相位差异,使反演结果更准确.

b. 在叠前弹性波阻抗反演中,子波提取和层位标定效果非常重要.实际角度子波提取结果表明,子波需要按照不同入射角提取.随着角度的增大,角度子波的主频略有降低.2个研究区的合成记录与井旁地震记录相关系数都很高,为后续的反演工作提供了可靠的约束数据.此外,测井参数的标准化处理、可靠的初始参数模型建立、合理的反演参数优选等都对反演结果有很大影响.

c. 实例验证结果表明,地震数据叠前同步反演精度达到了要求,其中纵波阻抗和横波阻抗反演结果的精度都比较高,密度反演结果的精度相对较差.

参考文献:

- [1] 李庆忠.论地震约束反演的策略[J].石油地球物理勘探,1998,33(4):423-438.(LI Qing-zhong. On strategy of seismic restricted inversion[J]. Oil Geophysical Prospecting, 1998, 33(4):423-438.(in Chinese))
- [2] 杨文采.评地球物理反演的发展趋向[J].地学前缘,2002,9(4):389-396.(YANG Wen-cai. A perspective to development of geophysical inversion[J]. Earth Science Frontiers, 2002, 9(4):389-396.(in Chinese))
- [3] 张宏兵,杨长春.正则参数控制下的波阻抗约束反演[J].地球物理学报,2003,46(6):827-834.(ZHANG Hong-bing, YANG Chang-chun. A impedance constrained inversion method controlling by regular parameters[J]. Chinese J Geophys, 2003, 46(6):827-834.(in Chinese))
- [4] 张宏兵,尚作萍,谭胜章,等.波阻抗反演的快速模拟退火算法[J].河海大学学报:自然科学版,2005,33(4):434-437.(ZHANG Hong-bing, SHANG Zuo-ping, TAN Sheng-zhang, et al. Fast simulated annealing algorithm for wave impedance inversion[J]. Journal of Hohai University: Natural Science, 2005, 33(4):434-437.(in Chinese))
- [5] 苑书金,董宁,于常青.叠前联合反演P波阻抗和S波阻抗的研究及应用[J].石油地球物理勘探,2005,40(3):339-342.(YUAN Shu-jin, DONG Ning, YU Chang-qing. Study of pre-stack joint inversion of P-wave impedance and S-wave impedance and its application[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2005, 40(3):339-342.(in Chinese))
- [6] 杨午阳,王丛斌.利用叠前AVA同步反演预测储层物性参数[J].石油地球物理勘探,2010,45(3):414-417.(YANG Wu-yang, WANG Cong-bin. Utilizing pre-stack simultaneous inversion to predict reservoir physical properties[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2010, 45(3):414-417.(in Chinese))
- [7] 陈建江,印兴耀,张广智.基于贝叶斯理论的振幅随偏移距变化三参数同步反演[J].中国石油大学学报:自然科学版,2007,31(3):33-38.(CHEN Jian-jiang, YIN Xing-yao, ZHANG Guang-zhi. Simultaneous three-term AVO inversion based on Bayesian theorem[J]. Journal of China University of Petroleum, 2007, 31(3):33-38.(in Chinese))
- [8] AKI K I, RICHARDS P G. Quantitative seismology-theory and method[M]. New York: FREEMAN W H Company, 1980.
- [9] SHUEY R T. A simplification of the Zoeppritz equations[J]. Geophysics, 1985, 50(4):609-614.
- [10] 郑晓东. Zoeppritz 方程的近似及其应用[J].石油地球物理勘探,1991,26(2):129-144.(ZHENG Xiao-dong. Approximation of Zoeppritz equation and its application[J]. Oil Geophysical Prospecting, 1991, 26(2):129-144.(in Chinese))
- [11] OSTRANDER W J. Plane waves reflection coefficients for gas sands at normal angles of incidence[J]. Geophysics, 1984, 49(10):1637-1648.
- [12] FATTI J L. Detection of gas in sandstone reservoirs using AVO analysis: a 3D seismic case history using the Geostack technique[J]. Geophysics, 1994, 50:1362-1376.