

约束稀疏脉冲波阻抗正反演参数研究

乔中林,杜立筠

(中石化华北油气分公司勘探开发研究院,郑州 450006)

摘要:约束稀疏脉冲反演技术作为一项成熟的技术已经在石油和天然气勘探领域得到广泛应用,且在后期的深度域地质统计学反演中,约束稀疏脉冲反演得到的波阻抗数据体也起到关键作用。从正演出发,首先设计典型的透镜体地质模型,然后根据自激自收原理正演地震数据。再进入反演环节,通过分析不同反演参数的作用和影响,得出各参数的最佳范围,设置合理的参数反演出原始的透镜体地质模型。最后对改善波阻抗反演的效果提出新的设想。

关键词:约束稀疏脉冲;正演;透镜体模型;反演模型

中图分类号: P315.3

文献标识码: A

DOI:10.16028/j.1009-2722.2016.08007

约束稀疏脉冲反演是常用的波阻抗反演方法,其稳定的算法和遵从地震数据的原理是其最大的优点。稀疏脉冲约束反演是一种基于地震道的反演,它有效地综合了测井数据并受地质模型的约束,充分利用了测井纵向分辨率、地震横向分辨率高这两大优点^[1],既较完整地保留了地震数据的基本特征,又提高了分辨率,这对于无井和少井区储层预测具有重要意义。目前,虽然反演流程的可操作性提高了,但是反演的效果却因人而异^[2]。通过本次模型正演,模拟出一套地震数据体,再利用这套数据体反演出地质模型,通过正演和反演的对比研究,明确反演中所需参数的控制作用及最优化方案,为后续的地质统计学反演打下坚实的基础。

1 约束稀疏脉冲反演理论

稀疏脉冲反演建立在一个趋势约束的脉冲反演算法上,其基本出发点是地下的强反射系数界

面不是连续分布的,而是稀疏分布的。它是一种递推地震波阻抗反演方法,基于范数反褶积和最大似然反褶积。其基石是假设地层的反射系数序列是由一系列稀疏且不连续的大反射系数和成高斯分布的小反射系数叠和所成。从地质角度解释,大反射系数代表地下不连续界面、岩性分界面^[3]。约束稀疏脉冲反演基于地震数据,用波阻抗趋势进行约束,以期用最少的反射系数脉冲对合成记录与地震道进行最佳匹配。主要包括 3 个过程:①通过最大似然反褶积求得一个具有稀疏特性的反射系数序列;②通过最大似然反演导出宽带波阻抗;③通过道合并得到一个全频带的绝对波阻抗^[4]。

首先由约束稀疏脉冲的基本假设得到目标函数:

$$J = \frac{1}{R^2} \sum_{K=1}^L r^2(K) + \frac{1}{N^2} \sum_{K=1}^L (K) - 2M \ln \lambda - 2(L-M) \ln(1-\lambda) \quad (1)$$

式中: R^2 为反射系数均方差;

N^2 为和噪音均方差;

$r(K)$ 为第 k 个采样点的反射系数;

$n(K)$ 为噪音;

M 为反射层数;

收稿日期:2016-03-10

作者简介:乔中林(1980—),硕士,工程师,主要从事石油勘探开发中的物探资料解释方面的工作。E-mail:qiaozl_186@163.com

L 为总采样数;

λ 为既定反射系数似然值。

可经迭代计算出反射系数。其次用最大似然反褶积反演得到的反射系数,采用递推算法,结合初始波阻抗趋势,得到波阻抗模型:

$$Z(i) = Z(i-1) \frac{1+R(i)}{R(i)} \quad (2)$$

式中: $Z(i)$ 为第 i 层的波阻抗值;

$R(i)$ 为第 i 层的反射系数。

最后约束稀疏脉冲反演依据目标函数逐一地震道计算出的初始波阻抗进行调整,并调整反射系数。得到目标函数:

$$F = L_P(r) + \lambda L_q(s-d) + a^{-1} L_1 \Delta Z \quad (3)$$

式中: r 为反射系数;

ΔZ 为阻抗趋势差;

d 为地震道;

s 为合成地震道;

λ 为残差权重因子;

a 为趋势权重因子;

q 为 L 模因子。

式(3)右边分别是反射系数的绝对值和,合成声波记录与原始地震数据的差值,趋势约束项^[5]。

2 正演模型的构建

块状均匀模型波阻抗正演就是用块来描述地质模型,以介质作为单元,其优点是能够描述任意复杂的地质模型,并能保证射线正确追踪^[6]。本次研究从正演出发,首先设计了一种三维地质模型,模型的平面面积为 180 km^2 ,设计时间域深度为 $0 \sim 400 \text{ ms}$,其中在三维模型的中部为一个透镜状地质体。在工区内随机均匀分布了 5 口井位,其中 B 井在地质体中心,D 井在地质体过渡部位,E 井在最边部,A、C 井在地质体外部。如下图 1 所示。

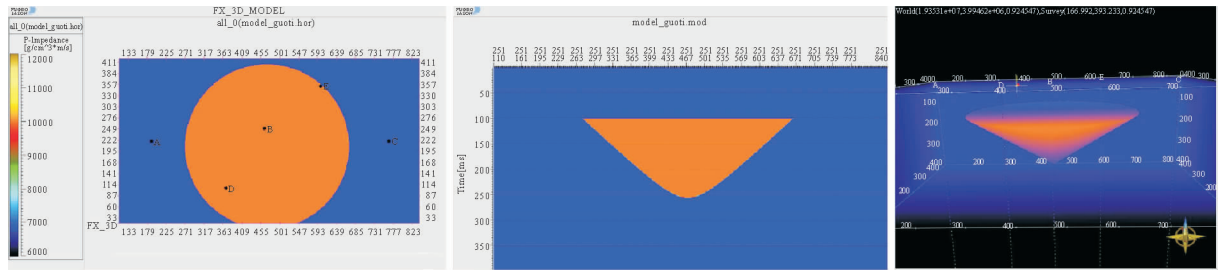


图 1 三维模型平面图、剖面图及立体图

Fig. 1 Plane, section and perspective diagrams of a 3D model

透镜体波阻抗为 $10\,000 \text{ g/cm}^3 \cdot \text{m/s}$,时间域厚度为 $0 \sim 200 \text{ ms}$,围岩波阻抗为 $6\,900 \text{ g/cm}^3 \cdot \text{m/s}$ 。正演所用的常规地震数据体也没有使用正常的波形数据体,因为在正演过程中必须要输入地震数据体,但是地震数据体内容对正演结果并没有影响,故使用常数 $5\,000$ 填充,采样率 1 ms ,如图 2 所示。

2.1 框架层位的设计及波阻抗数据体的填充

正演模型由两个层状模型加上内嵌的透镜状地质体构成,因此需要 4 个层位来搭建 3 个波阻抗空间。其中组成 2 层层状模型的顶底 3 个层位为常数,设计较简单,难点在于透镜体底层位位的生成。设计的思想是围绕 1 个中心点环状展开

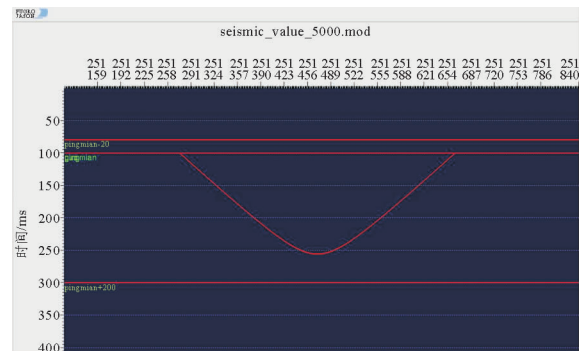


图 2 正演使用常数填充的常规地震剖面

Fig. 2 Constant seismic section used in forward inversion

来,利用 FunctionMod 的层位计算功能,设计公式运算出层位, $\text{Result} = ((\text{line}-207) \cdot (\text{line}-207))$

$+(cdp-470) \cdot (cdp-470)) \leq 40\ 000? \ 300-\sqrt{((line-207) \cdot (line-207) + (cdp-470) \cdot (cdp-470))}; 100$

框架空间搭建完成后,波阻抗数据体共填充 2 种,透镜状地质体模拟高波阻抗为 $10\ 000\ g/cm^3 \cdot m/s$,双层模型模拟低波阻抗为 $6\ 900\ g/cm^3 \cdot m/s$ 。利用了 FunctionMod 模块的体计算功能,利用层位控制在整个三维模型内填充了波阻抗数据。

2.2 伪井曲线的提取

在实际生产项目中,测井曲线全部都是实测准确的,代表了地下岩石的实际波阻抗。为了模拟这种情况,在 5 口虚拟井位置以上述波阻抗模型数据体为实体,分别提取出波阻抗曲线。在以往正演模型设计时,总是先假设出各种介质的速度和密度,然后推算出波阻抗数据,本次为了研究的针对性略去了中间过程,一步到位,直接提取出波阻抗曲线(图 3)。在虚拟井拥有了波阻抗曲线后就可以正常完成后续的井震标定和反演流程,并不需要速度和密度曲线。

3 正演地震数据体

3.1 初始模型的建立

在实际生产中,由于地震数据体分辨率的限制,解释的层位只是表征了大套地层的边界,对于小地质体的刻画精度很低。为了模拟这种情况,假设层位只解释了双层模型的顶底,以包括住地质体的任意 3 个水平层位(地质体顶界面延伸的平面层位 hor1, hor1-20 ms, hor1+200 ms)为层位输入建立 layer1 和 layer2 两个层段。并按照反距离加权算法,把虚拟井的波阻抗曲线插值到 layer1 和 layer2,形成井间内插外推的波阻抗数据体,这个数据体的作用是在做稀疏脉冲反演时作为一种初始模型(图 4)。从对比可知,这种利用井曲线和层位约束插值形成的波阻抗数据体和真实的地质体相似度很差,只是在井旁道完全相同,因此,这种初始模型可以模拟实际生产中的情况,即地下地质体的形状是不可预知的。

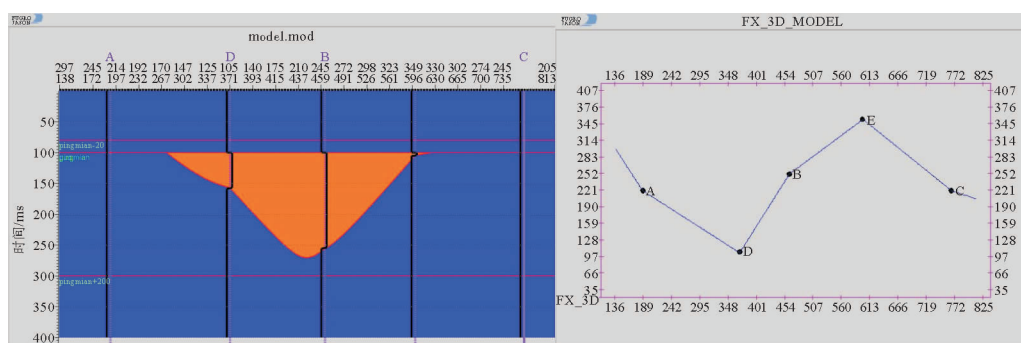


图 3 连井伪波阻抗曲线显示

Fig. 3 The section of pseudo P-impedance curves

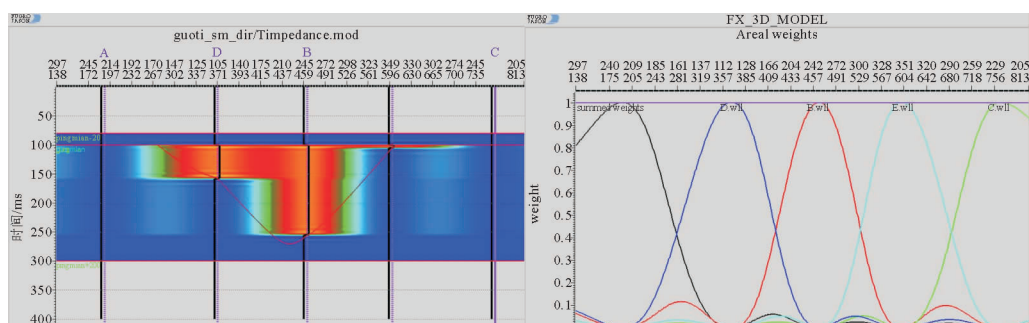


图 4 连井插值波阻抗剖面及各井权重剖面图

Fig. 4 The section view of well interpolation P-impedance and weight

3.2 正演数据体的生成

对于正演流程来说,万事俱备,只欠东风。利用约束稀疏脉冲反演模块,输入常数地震数据体、比例化后的雷克子波、控制层位、初始模型波阻抗数据体。此处的波阻抗数据体决定了正演剖面的形态,如果输入的是 solidmodel 生成的波阻抗模

型,则正演出来的是一种剖面;如果输入的是原始三维模型的填充波阻抗数据体,则正演出来的是符合要求的正演剖面(图 5)。通过正演流程的理论分析可知,在做正演时,约束稀疏脉冲模块的硬约束、软约束和空间约束、以及剪切频率等所有控制反演质量的参数是不起作用的。

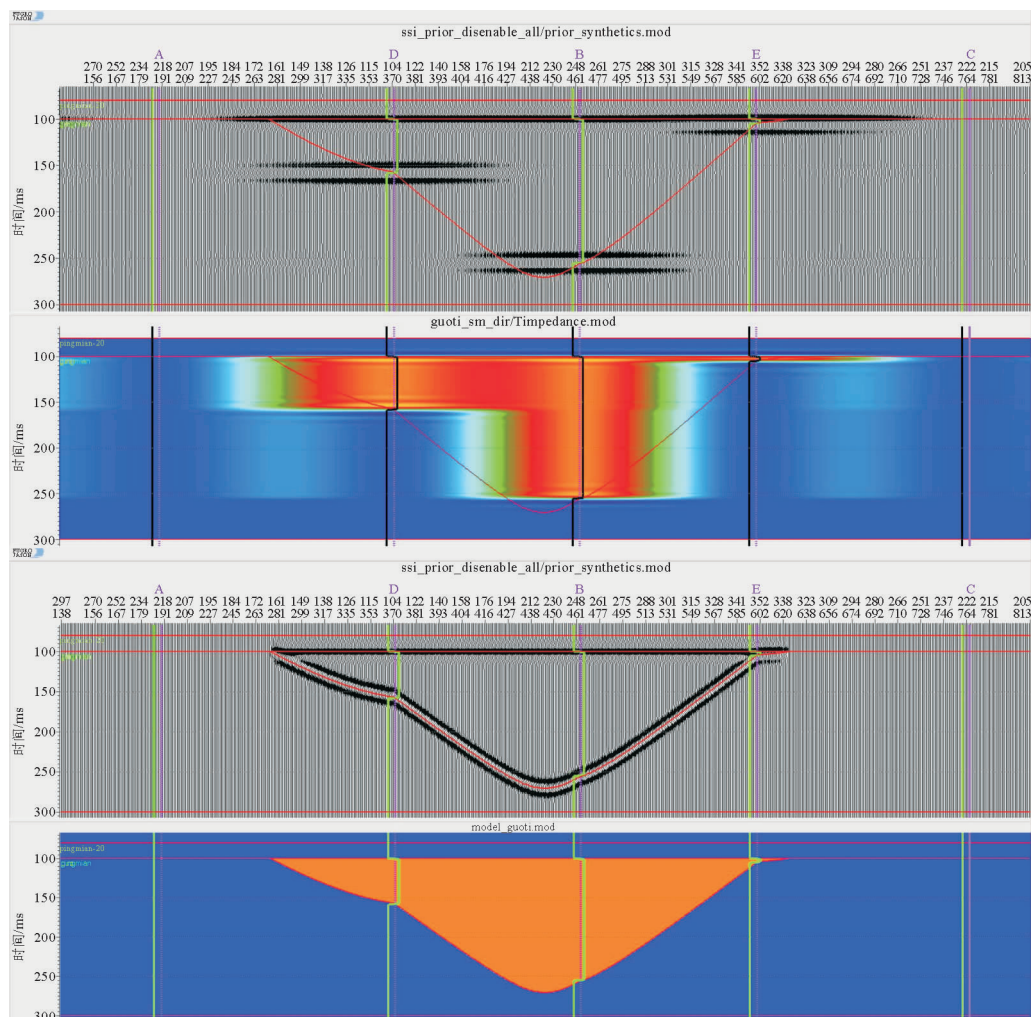


图 5 井插值波阻抗模型和透镜体填充波阻抗模型形成的正演剖面差异

Fig. 5 The difference of seismic section between well interpolation model and the lens model

通过数次的试验可知,正演数据体的采样率由输入的地震数据体即上文的常数数据体的采样率决定,而不是由波阻抗模型数据体的采样率决定,应尽量提高输入地震数据体的采样率可以有效减少正演数据体的台阶现象。同时较高的采样率也会对后续的反演产生一定影响。根据褶积理

论可知,正演数据体的时窗长度为定义的时窗长度,上下各延伸半个子波长度。

4 反演波阻抗数据体模型

把以上井资料、井插值的初始模型和正演的

地震资料作为输入信息,以波阻抗反演中最常用的稀疏脉冲反演完成模型的反演工作。反演以主要影响反演质量的关键参数作为分析的目标,分析了初始模型、低切频率、地震数据体、子波、硬约束软约束空间约束的作用。

4.1 初始模型及低切频率的影响

为了确定各变量的影响大小,采用固定一些因素只改变某一变量的原则。首先分析初始模型的影响,分别使用地质体模型和井插值模型作为初始模型测试反演结果。在其余参数设置完全一样的情况下,反演剖面出现了明显差异,通过对比发现,初始模型的准确程度决定反演的准确程度。生初始模型时所使用井数量越多,初始模型越接近真实地质体,则波阻抗反演结果越可靠(图 6)。

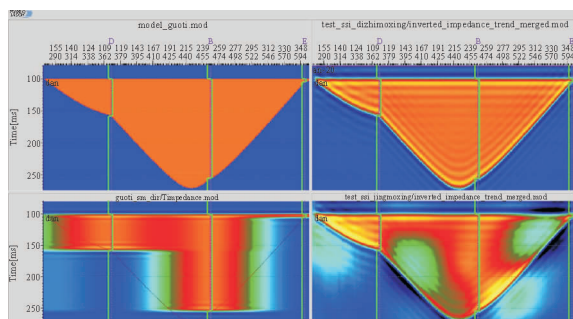


图 6 原始模型及反演剖面(上)和井插值模型及反演剖面(下)对比

Fig. 6 The difference between the lens model, inversion section (top) and well interpolation model, inversion section (bottom)

根据反演的原理及经验证实,反演结果由地震资料频率段和低频段 2 部分组成。在正常参数设置的情况下,地震数据体占反演结果最大的影响比重,地震数据体的形态和质量直接决定了反演结果的好坏。初始模型的作用是补充反演结果的低频部分,也即低切频率之前的部分,而地震资料的作用是完成低切频率至高截频率之间的部分,因此波阻抗反演的最终结果是初始波阻抗模型和地震资料的综合反应,而低切频率是权衡地震数据体和初始模型两者的关系,低切频率越大则从初始模型中补充的比重越大,地震资料所占比重越小,反演剖面更倾向于初始模型;反之低

切频率越小则从初始模型中补充的比重越小,地震资料所占比重越大,反演剖面更倾向于地震资料(图 7)。因此,低切频率这一关键参数的选取应当谨慎,根据实际地震资料的品质情况选取,防止出现一边倒的情况。

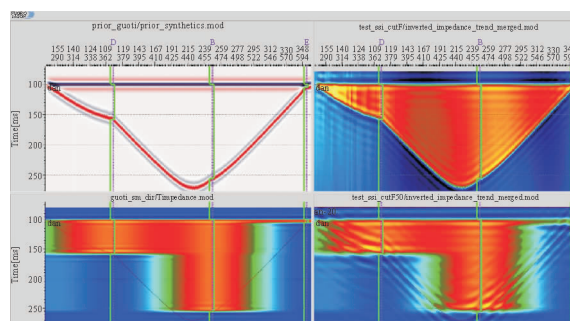


图 7 低切频率设置过小(右上)和低切频率设置过大(右下)效果对比

Fig. 7 The effect of small Low-cut frequency (top right) and high low-cut frequency (lower right)

4.2 约束的影响

在约束稀疏脉冲反演中,为了对比硬趋势约束、软趋势约束及软空间约束这 3 种约束对反演结果的影响,分别做了反演测试。经分析对比发现,在其他参数相同的情况下,约束只对反演剖面起到一定的平滑作用,总体影响不大,甚至在井点处也不能达到反演剖面与井波阻抗完全一致的效果(图 8)。因此,在实际操作时,一般只加上软趋势约束和软空间约束即可达到理想的剖面效果。

4.3 子波的影响

在分析子波影响时,我们使用了普及性及适用性最广的雷克子波。子波频率选择地震资料的主频 30 Hz。之后的关键参数是子波比例化这一个参数,它的具体作用又是什么呢? 这里选取 2 种极端情况作测试和正常参数做比较,一种是子波比例很大,一种是子波比例很小,效果如图 9 所示,两种极端情况都不能达到理想的效果。故在正常设置时,针对不同的数据体,要进行比例化,使用和地震振幅匹配的子波才能达到最理想的效果。

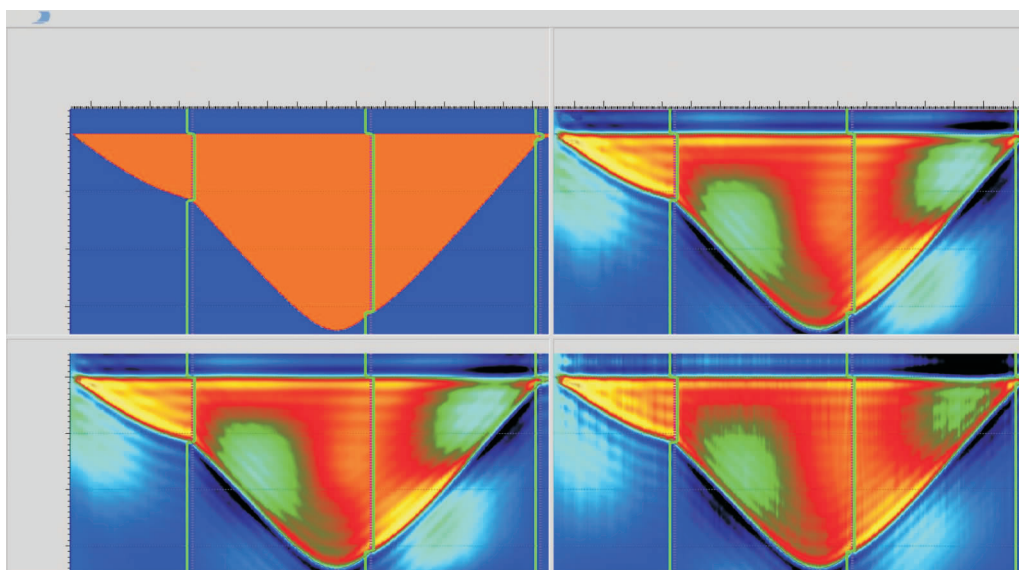


图 8 3 种约束都用(右上)、3 种约束都不用(右下)和不要硬约束(左下)反演剖面对比
Fig. 8 The inversion section of all constraints,noconstraints and no hard constraints

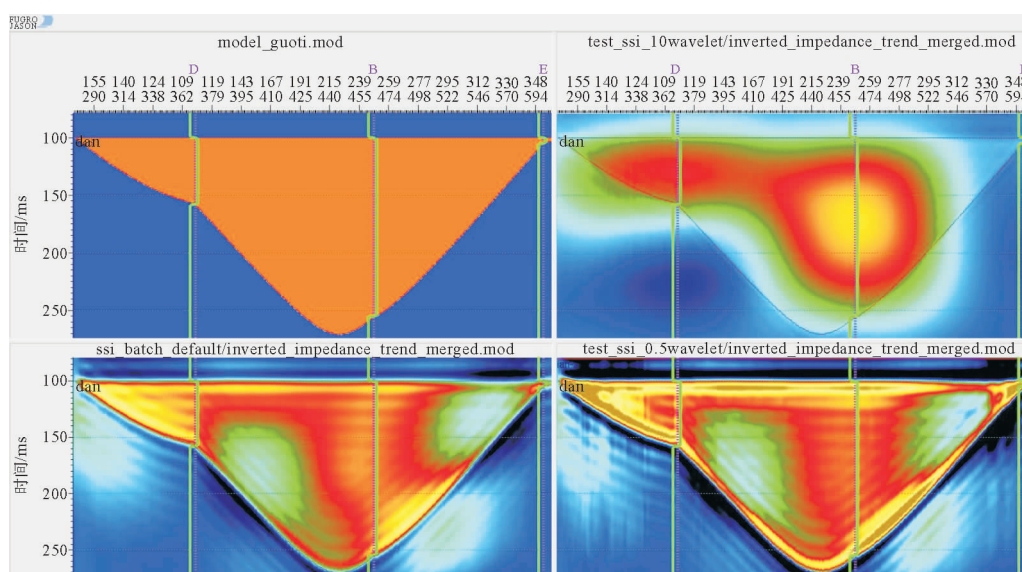


图 9 子波比例变大(右上)、子波比例正常(左下)、子波比例变小(右下)

Fig. 9 The difference between wavelet scale:large(top right) ,normal(lower left) and small(lower right)

5 结论

通过以上影响波阻抗反演的关键参数的分析与设置,我们已经能反演出较理想的波阻抗数据体(图 10)。结论如下:①初始模型应最大化的准确,确保每口井的测井质量情况下,多使用测井曲线建立初始模型;②低切频率应根据地震资料品

质和最低频率选择优化;③软硬约束的作用效果不大,只起到剖面的平滑作用;④子波调整时应根据地地震资料主频选择频率,子波的振幅和地震资料进行匹配。

虽然通过参数的调整可以得到满意的反演效果,但是波阻抗反演的缺陷也暴露无疑:一定程度上很依赖初始模型,在井稀少也即在初始模型上存在大缺口的位置,将影响反演质量,阻抗反演将

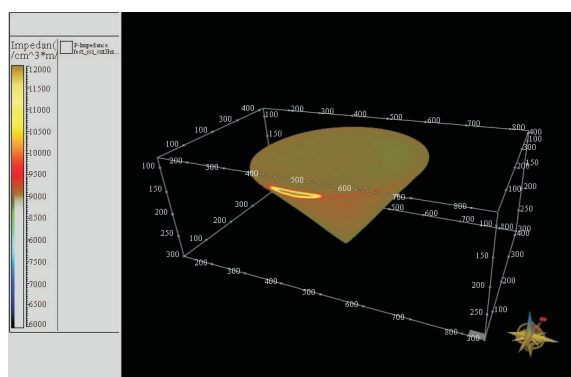


图 10 参数设置合理后反演波阻抗数据体
(隐藏了围岩的颜色)

Fig. 10 The P-impedance volume after setting reasonable parameters (no color for surrounding rock)

是不准确的。故应在反演时尽可能均匀分布井位置,以减少这种缺陷带来的危害。

考虑到在波阻抗反演中初始模型的重要性,只要初始模型越逼近真实的地质体,反演的结果

就会越可靠,因此,我们可以用迭代的思想,把第 1 次的反演结果作一些处理,例如把它与井信息合并后再做为模型进行一次迭代反演,结果不会越来越优有待进一步研究证实,也许这是一个能把波阻抗反演做到更好的新思路。

参考文献:

- [1] 范洪军,王云雷,徐春雨. 多井约束稀疏脉冲反演的原理、关键环节及其应用[J]. 内蒙古石油化工, 2007, 33(12): 335-338.
- [2] 齐金成,厉玉乐,韦学锐,等. 约束稀疏脉冲波阻抗反演及其应用[J]. 内蒙古石油化工, 2004, 30(1): 120-122.
- [3] 张卫东. JASON 约束稀疏脉冲反演在西南某地区的应用[J]. 科技创新与应用, 2015(14): 15-16.
- [4] 郭朝斌,杨小波,陈红岳,等. 约束稀疏脉冲反演在储层预测中的应用[J]. 石油物探, 2006, 45(4): 397-400.
- [5] 张义,尹艳树. 约束稀疏脉冲反演在杜坡油田核三段中的应用[J]. 岩性油气藏, 2015, 27(3): 103-107.
- [6] 李显贵,邵吉华,张涛. 波阻抗模型正演技术在砂岩储层预测中的应用[J]. 石油物探, 2004, 43(6): 584-586.

RESEARCH ON IMPEDANCE FORWARD AND INVERSION PARAMETERS OF CONSTRAINED SPARSE SPIKE METHOD

QIAO Zhonglin, DU Lijun

(Exploration and Development Institute of North China Branch of Sinopec, Zhengzhou 450006, China)

Abstract: The method of constrained sparse spike inversion has been widely used in oil and gas exploration as a matured technology, and the result of constrained sparse spike inversion also plays a key role in depth domain of Geostatistical Inversion. In this paper, we firstly designed a typical lenslike geological model, and then, make forward processing based on the principle of self-exciting and self-receiving. In the processing of inversion, the authors obtained the optimum range of each parameter by analyzing the impact of different inversion parameters, then inversed the original lenslike geological model by setting reasonable parameters. Finally, the authors proposed some new ideas to improve the effect of P-impedance inversion.

Key words: constrained sparse spike; forward method; lens model; inversion model