

地震波形反演技术的应用

张荣忠¹ 袁诚²

1.中国石化胜利油田分公司物探研究院 2.中国石油川庆钻探工程公司

张荣忠等.地震波形反演技术的应用.天然气工业,2009,29(2):52-54.

摘要 地震波形反演利用的信息不只波至时间和振幅信息,还包括波形细节变化信息。在总结了波形反演方法的分类、求解方法、实现波形反演的优化解法,以及波形反演当前的应用现状等基础上,指出旅行时和波形反演相结合,叠前反演与叠后反演相结合是当前发展波形反演技术的两种可行思路。

关键词 地震数据 反演 时间域 频率域 应用

DOI:10.3787/j.issn.1000-0976.2009.02.012

1 波形反演的求解方法

1.1 梯度法非线性波形反演法

非线性最优化反演方法可分为随机全局最优化方法和迭代最优化方法。1984年,Albert Tarantola提出的梯度法^[1]非线性波形反演就是迭代最优化方法的典型代表。地震波形反演通常用梯度类的方法来解,但该算法存在局限性:由浅到深“逐面”反演降低了运算速度,浅部的反演结果影响深部的反演结果;且容易陷入局部极小点,从而影响反演结果的精度。

1.2 Gauss-Newton法^[2]

Tarantola(1987)定义Newton法为:

$$m^{n+1} = m^n - \alpha(J^T J)^{-1} J^T \Delta d = m^n - \alpha[H_n]^{-1} J^T \Delta d$$

式中: H_n 是近似Hessian矩阵。由偏导数波场的零延迟互相关可得到近似Hessian矩阵的元素。

Gauss-Newton法受制于提出时的计算机速度,算法在近几年才具有了可行性,很多人也在地震波形反演的研究中应用了Gauss-Newton法。但由于计算矩阵需要巨大的计算成本和时间,所以仍不太愿意应用该类算法。

1.3 向后传播算法

应用向后传播算法,可以不直接计算Jacobian矩阵就可以计算出不闭合函数梯度。在实际地震数据中应用波形反演时,由于地下速度是通过模拟数据与实际数据的匹配得到的,所以噪音是其中的一

个问题。因而,找到在波形有噪音时也稳定的目标函数是很有价值的。通常在存在地震噪音时, L_1 模比 L_2 模更为稳健。然而,当剩余值变为零时, L_1 模存在一个奇点问题。即使剩余值不为零,而是很小时,反演过程也会失败。

2 实现波形反演的优化方法

2.1 时间域平面波全波形反演

Denes Vigh和E.William Starr^[3]研究了时间域平面波全波形反演求取速度场的方法。共检波器道集通过 $\tau-p$ 变换后,把反射数据变换到平面波域。平面波全波形反演方法就是在变换到平面波域的反射数据上进行的。这种变换后的平面波域提供了几个选择,如改变平面数与在两个方向上增加面元尺寸等。这些特点使3D数据的反演速度较快。

2.2 大规模并行频率域全波形反演算法

全波形反演(FWI)的频率域公式对于建立复杂构造的精确速度模型是有效的。尽管FWI的频率域公式具有吸引力,但FWI的计算费用比较高,因而FWI算法应该充分利用并行计算机^[4]。

F.Sourbier等(2007年)用SEG/EAGE逆冲断层模型(图1-a)来验证该算法。测试是用12个HPDL145G2集群的处理器来做的,互连网络是Infini-band。模型网格为 801×187 ,网格间距25m。反演了3.5~20Hz间的7个频率。用一个2D Gaussian滤波器平滑实际模型就可得到初始模型(图1-b)。在第一个测试中,从低频到高频逐次反演7个频率。震

源子波是 Ricker 子波,主频 10 Hz。每个频率迭代计算 15 次,用时间约 10 min。最终的模型见图 1-c。

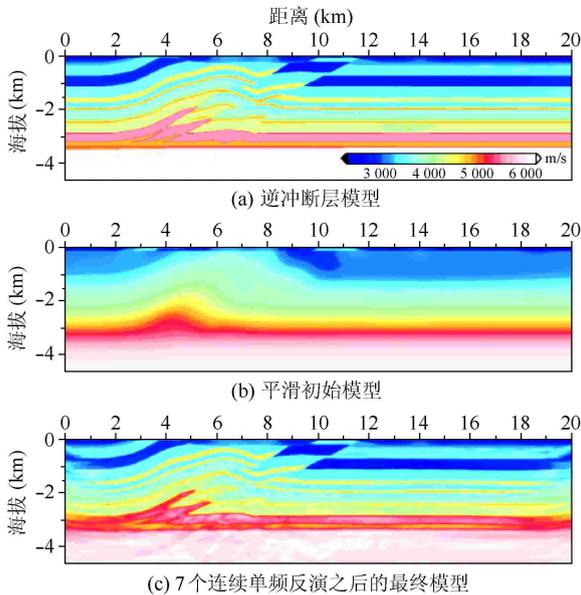


图 1 全波形反演模型图

3 波形反演的应用

3.1 波形和旅行时联合反演

众所周知,复杂构造成像过程中存在诸多问题^[5]。Priyank Jaiswal 和 Colin A. Zelt^[6]研究了如何应用 2D 旅行时和波形反演估算速度模型,然后用于常规的处理和解释。首先,用初至旅行时反演估算出地下介质的长波长平滑速度模型;然后,用反演得到的速度模型进行 Kirchhoff 叠前深度偏移。对于较浅的断层,由于其深度偏移成像质量不好,用 2D 波形反演改进旅行时反演出的速度模型的分辨率。

波形反演模型和深度偏移成像相结合可以进行 Naga 逆冲断层及其他目标层位的解释。由于缺少井控资料而无法进行地层对比,所以以前只能进行逆冲断层带的解释。图 2 中虚红线表示的构造 E 为上中新世不整合。根据上超(红色箭头)解释出 CMP650~700 之间的 Girujan 顶,附近的探井解释出 Tipam 顶。在波形反演模型上,CMP450~500 间模糊地显示有一个向西北倾斜的构造,该构造的顶

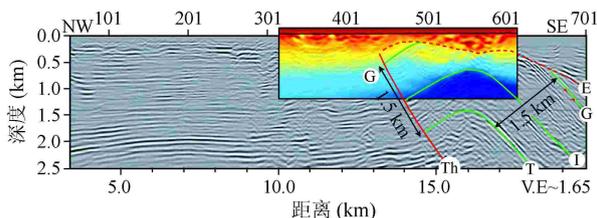


图 2 综合解释图

解释为 Girujan 顶。根据反射也在 Girujan 组内发现一个中间层,在图 2 中标为 I,该层可能富含砂岩。

3.2 全波形反演量化天然气水合物

大陆边缘天然气水合物稳定带的底界通常由似海底反射层 BSR 识别。BSR 与海底起伏相似,通常与地层层理斜交,并表现为一强振幅的负极性反射。在天然气水合物的地震研究中,全波形反演被证实是非常有用的研究方法。

Christophe Barnes^[7]提出利用非线性全波形反演量化天然气水合物,并用一个实际数据集测试这种方法的稳定性。资料是由法国、日本地震区试验(SFJ)组采集的。用了一条线的一小部分数据进行波形反演可行性研究。反演可以得到 5 个场:P 波速度、S 波速度、密度、 ϵ 和 δ 等 Thomsen 各向异性参数。图 3 是估算的 P 波速度场,约束非常好,估算值可靠。两个天然气水合物层被很好地恢复出来。

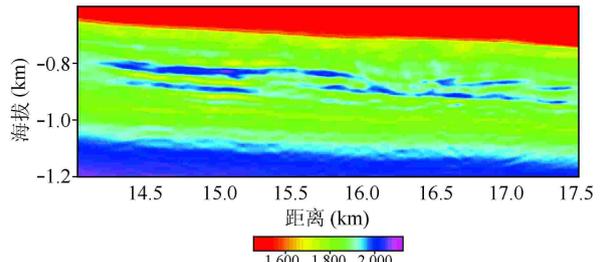


图 3 估算的 P 波速度场图

3.3 叠前、叠后混合反演

不同的反演方法具有不同的特点和应用条件:叠前反演结果分辨率高、不需要井的约束,但抗噪能力弱、运算时间极长;基于模型的叠后反演在有井约束的条件下分辨率高,但在勘探程度低、探井极少的深水陆坡区则难以满足油气勘探的需要。

叠前叠后混合地震反演技术就是将叠前、叠后反演有机地结合起来,相互取长补短,可以在无井条件下为储层岩性识别提供重要的波阻抗信息。2003 年,Apache 埃及公司与 RWE Dea 埃及公司在尼罗河三角洲的西地中海深海区进行了一个 1 500 km² 叠前反演大项目^[8]。该反演项目的主要目的是获得 3 个主要弹性参数的 3D 数据体,这 3 个参数是:P 波阻抗、泊松比和密度。然后用这些数据求出岩石物理参数,如含水饱和度等,从而改进油藏模型,进一步优化本区充填气体的复杂河道及堤成砂岩上开发井的定位。

在研究区钻的 Abu Sir2X 井期望在整个高振幅

区钻到商业性油气。然而,第 2 个高振幅却与低饱和和气砂岩有关。该砂岩的储层性质与上覆产气砂岩类似,但是其含气饱和度却只有上覆砂岩的一半。根据 AVO 分析,从近炮检距叠加和远炮检距叠加剖面来看,本区具有很好的含油气前景。

图 4 为 Abu Sir 2X 井附近的非商业性气层的 3

种属性剖面:振幅、P 波阻抗和密度。常规的振幅技术显示,在 Abu Sir 2X 附近有一个高振幅区,该区与低气饱和层有关,而密度和 P 波阻抗显示该区前景不大。这 3 个属性图都显示工业性油气聚集带在建议的 Abu Sir 3X 处,位于 Abu Sir 2X 的 GWC(气水接触面)之下。

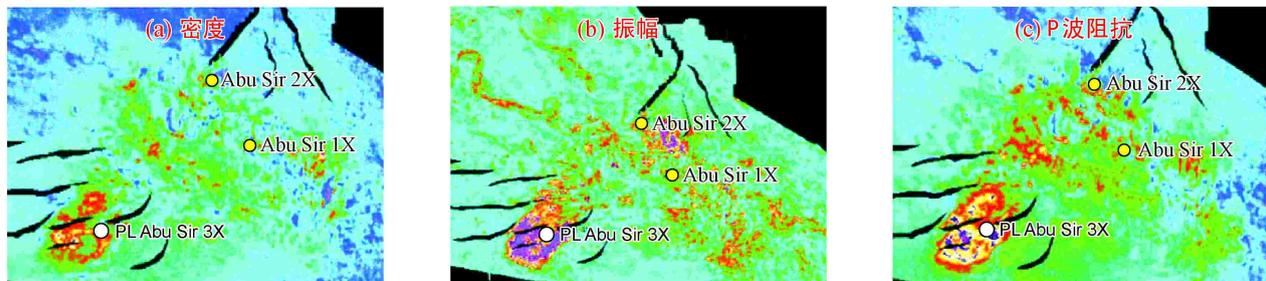


图 4 Abu Sir 2X 井附近的振幅、密度和 P 波阻抗图

4 结论与认识

1)地震波形反演可以分为线性和非线性两类,本身地震波形反演是非线性问题,应该应用非线性优化方法来解决。但是在地质构造比较简单或对背景速度场有很好的先验知识时,是可以应用线性反演法的。

2)全波形反演计算量非常大,为了减少计算量,可以在频率域,也可以在时间域进行全波形反演。

3)叠前反演结果作为非常有用的信息,但不是灵丹妙药,其前提是有井控、地质框架和油藏特性信息。

4)目前,波形反演的应用还比较有限,旅行时反演与波形反演可能是当前实现地震波形反演的现实途径,旅行时反演用于求取长波长速度信息,波形反演求取短波长速度信息,这样,最后得到的模型包含了速度结构的长波长与短波长部分,这是一种解决近地表速度建模较理想的方法。

参 考 文 献

- [1] TARANTOLA A. Inversion of seismic reflection data in acousitic approximation [J]. *Geophysics*, 1984, 49: 1259-1266.
- [2] DONG-HOON SHEEN, CHANG-EOB BAAG, KAGAN

TUNCAY, et al. Elastic waveform inversion using Gauss-Newton method [J]. 2006 SEG75 SI P1.6: 1743-1746.

- [3] DENES VIGH E, WILLIAN STARR. 3D prestack plane wave full waveform inversion [J]. 2007 SEG77, SI3.6: 1830-1833.
- [4] FLORENT SOURBIER, STEPHANE OPERTO, JEAN VIRIEUS, et al. A massively parallel frequency-domain full-waveform inversion algorithm for imaging acoustic media; application to a dense OBS data set [J]. 2007 SEG77 SI P1.3: 1893-1896.
- [5] 杨金华, 满益志, 刘洋, 等. 复杂构造成像能力及其存在问题 [J]. *天然气工业*, 2008, 28(6): 34-36.
- [6] PRIYANK JAISWAL, COLIN A ZELT. 2-D waveform and travelttime inversion for seismic imaging of the Naga thrust fault, India [J]. 2007 SEG77 SI1.7: 1755-1758.
- [7] CHRISTOPHE BARNES. Feasibility study to quantify gas hydrates using an anisotropic full waveform inversion in the time domain [J]. 2007 SEG77 SI3.5: 1825-1828.
- [8] ROBERTS R, BEDINGFIELD J, PHELPS D, et al. Hybrid inversion techniques used to derive key elastic parameters; a case study from the Nile Delta [J]. *The Leading Edge*, 2005: 86-92.

(收稿日期 2008-12-17 编辑 韩晓渝)