

纵横波联合反演在储层预测中的应用

——以沾化凹陷罗家地区沙一段生物灰岩为例

刘玉珍

(中国石化胜利油田分公司物探研究院, 山东 东营 257022)

摘要:目前油气勘探中单纯依靠纵波数据反演的结果存在多解性。利用纵波和转换横波地震数据进行联合反演,可以有效提高对横波阻抗的计算精度以及储层预测的可靠性。针对罗家地区沙一段生物灰岩储层岩性横向变化较大,常规纵波叠前反演难以准确预测储层及油水分布的问题,利用多波多分量地震勘探技术,开展纵横波联合反演研究,通过纵横波联合标定、转换横波压缩匹配,构造精细解释等方法建立联合反演初始模型,进而求取对岩性和流体敏感的纵横波速度比、密度等适用于储层预测与油藏描述的弹性参数。实际应用结果表明,纵横波联合反演得到的弹性参数能够识别沙一段生物灰岩储层变化,同时也能够反映储层流体分布,与研究区该层段56口井实钻资料的吻合率达到85%。

关键词:纵横波联合反演 纵横波速度比 储层预测 生物灰岩 罗家地区

中图分类号:P631.44

文献标识码:A

文章编号:1009-9603(2014)03-0045-03

目前油气勘探主要是利用地震资料的纵波数据开展反演来进行储层预测,而很多研究表明纵波数据反演结果存在多解性,难以满足需要^[1-2]。与单独应用纵波叠前反演相比,纵横波联合反演增加了转换横波数据,有效提高了对横波阻抗的计算精度,提高了储层预测的可靠性和准确性。通常,在油藏描述中的纵横波速度比等弹性参数可以通过叠前纵波AVO反演得到,但该类型的速度比并非真正利用了转换横波的信息,只是通过地球物理弹性波动力学方程进行近似推导得到的,而真实的纵波和转换横波数据则可以提供更加真实精确的纵横波速度比信息^[3-6]。在地震勘探过程中,地面产生压缩波时其中部分反射波的能量会转换成剪切波,即通常意义上所说的“转换横波”^[7-8],如果用特殊检波器进行接收就可在地面上直接接收到纵波和转换横波信息,为开展纵横波联合反演奠定了基础。

罗家地区位于济阳拗陷沾化凹陷陈家庄凸起北部的鼻状构造带。其北部由斜坡过渡至四扣—渤南洼陷,向西与四扣—邵家洼陷相连,东邻垦西地垒及三合村洼陷^[9]。罗家地区沙一段底部发育由生物碎屑灰岩、砂屑灰岩、螺灰岩和白云岩组成的碳酸盐岩。由于生物灰岩储层的岩性横向变化较大,纵波速度特征对岩性变化及油水分布不敏感,

用常规叠前纵波反演很难准确预测沙一段生物灰岩储层及其油水分布。为此,利用多波多分量地震勘探技术,开展纵横波联合反演方法研究,以期对该区的油气勘探提供指导。

1 纵横波联合反演原理与工作流程

1.1 反演原理

由于岩石的岩性以及所含流体性质的不同,导致其弹性参数对纵波与转换横波的影响存在差异^[10]。由于地震记录可以描述成与其反射系数相关的形式,进而可以建立在某一入射角下纵波和转换横波的联合反演矩阵^[11]。因此可以利用纵波与转换横波的振幅差异通过简化联合反演初始模型,通过迭代法求得方程的解,然后反演得到储层预测所需的纵波阻抗、横波阻抗、纵横波速度比以及密度等重要的岩性弹性参数进行岩性预测和油气检测^[12]。Fatti等人将Aki-Richards给出的纵波和转换横波反射系数方程^[13-14]简化为

$$R(\theta) \approx \frac{1}{2 \cos^2 \theta} \times \frac{\Delta V_p}{V_p} - 4 \frac{V_s^2}{V_p^2} \sin^2 \theta \frac{\Delta V_s}{V_s} - \frac{1}{2} \left(1 - 4 \frac{V_s^2}{V_p^2} \sin^2 \theta \right) \frac{\Delta \rho}{\rho} \quad (1)$$

收稿日期:2014-03-14。

作者简介:刘玉珍,女,工程师,从事地震反演与储层描述技术研究。联系电话:(0546)8791115, E-mail:liuyuzhen026.slyt@sinopec.com。
基金项目:国家“863”计划“油藏地球物理关键技术”(2011AA060300)。

$$R(\theta, \phi) = -\frac{\sin \theta}{2 \cos \theta} \left[\left(1 - 2 \frac{V_s^2}{V_p^2} \sin^2 \theta + 2 \frac{V_s}{V_p} \cos \theta \cos \phi \right) \times \frac{\Delta \rho}{\rho} - \left(4 \frac{V_s^2}{V_p^2} \sin^2 \theta - 4 \frac{V_s}{V_p} \cos \theta \cos \phi \right) \frac{\Delta V_s}{V_s} \right] \quad (2)$$

式中： $R(\theta)$ 为纵波反射系数； θ 为纵波入射角，($^\circ$)； ΔV_p 和 ΔV_s 分别为界面两侧地层的纵波速度和横波速度的差值，m/s； V_p 和 V_s 分别为界面两侧地层的纵波速度和横波速度，m/s； $\Delta \rho$ 为界面两侧地层密度的差值，g/cm³； ρ 为界面两侧地层密度的平均值，g/cm³； $R(\theta, \phi)$ 为转换横波反射系数； ϕ 为转换横波的反射角，($^\circ$)。

式(1)和式(2)适用于界面两侧弹性系数变化不大且 θ, ϕ 不超过临界角的地层。

1.2 反演工作流程

纵横波联合反演工作流程与传统的纵波反演基本一致，主要的差别是子波的提取、转换横波时间域数据的解释及纵波和转换横波时间域数据的压缩匹配等方面(图1)。通过纵横波联合反演可以得到相关的一系列弹性参数，在此基础上，可以得到衍生的其他弹性参数，从而用来进行后期的储层预测与油藏描述。

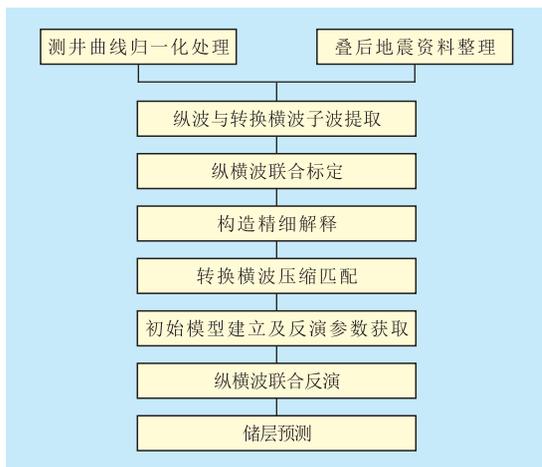


图1 纵横波联合反演工作流程

2 纵横波联合反演

2.1 纵横波联合标定

纵横波的联合标定是利用地震、测井、岩石物理等综合信息，赋予纵波和转换横波反射波组明确的地质意义和概念模型，形成统一的时深关系、反射波组和地质层位的对应关系，以便从地震响应特征的角度分析各种地质现象^[15-16]。从联合标定的结果来看，研究区的沙一段标志层 T_2 反射层较为稳

定， T_2 到 S_{1d} 之间厚度变化不大，强反射界面波组特征明显，与纵波有很好的对应关系，能够连续可靠追踪。沙一段整体地震数据和合成记录的匹配性较好，12口井目的层段平均相关系数达到0.618。在合成记录的基础上，根据研究区的构造特征、沉积模式进行了层位标定以及精细构造解释，确保纵波与转换横波层位趋势一致，构造形态吻合。

2.2 转换横波压缩匹配

由于转换横波速度低，其旅行时间与纵波不同，在进行联合反演之前需要对转换横波进行压缩，将其匹配到纵波时间域^[17]。因此，纵波与转换横波的匹配质量是影响纵横波联合反演结果可靠性的关键因素。转换横波数据体压缩是以纵横波联合标定和层位精细解释为基础来实现的。由于研究区的 T_2, S_{1d} 以及 T_6 等地震反射标志层稳定可靠，可以连续追踪，将其作为转换横波压缩的控制层，用于计算垂直Gama场，进而对转换横波数据进行压缩。研究区过罗37井的转换横波经过压缩的剖面与纵波时间剖面对比结果(图2)表明，转换横波层位与纵波层位匹配较好，构造形态与纵波剖面完全一致。

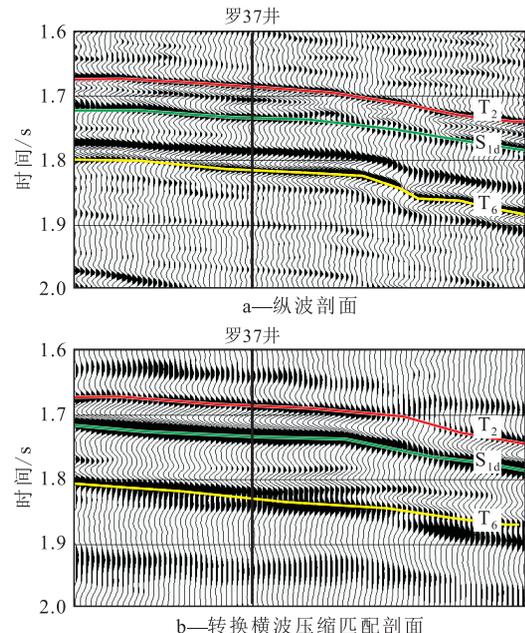


图2 过罗37井转换横波压缩匹配剖面与纵波剖面对比

2.3 初始模型建立及反演参数获取

转换横波压缩匹配完成后，在相同时间域分别提取参与反演的纵波和转换横波子波，根据精细构造解释成果，以地层沉积模式为层间约束，应用测井曲线与层位数据建立低频反演初始模型，进行反演约束和频带补偿，再将井点测井数据内插外推到整个三维模型空间^[18]，最终建立能够反映目的层

段真实地质特征及地层弹性参数空间变化的纵横波联合反演初始模型。

弹性属性的10~15 Hz范围的低频分量是建立反演初始模型所需的重要参数,而地震数据中缺少该频带信息,因此,应用测井资料插值、反距离加权平均以及低频带通滤波平滑处理的方法通过反复试验从初始模型中提取10~15 Hz的低频信号。此外,联合反演需要设定的横波阻抗与纵波阻抗之间以及密度与纵波阻抗之间的关系可以通过全波测井资料交汇的方式获得。

2.4 储层预测

在纵横波联合反演过程中,通过参数修改和迭代反演的反复运算,可直接得到纵波速度、横波速度、纵横波速度比和密度等弹性参数。罗66井—罗358井连井纵横波速度比剖面(图3)显示,低速度比的沙一段底部生物灰岩储层与测井速度比曲线显示的结果一致。罗37井和罗10井的低速度比特征指示较好储层,罗358井沙一段砂砾岩也显示为低速度比。总的看来,各井位的反演结果和实钻数据在地层上匹配得较好,测井数据中的主要特征在反演的结果中都有体现,但反演的垂向分辨率不如测井数据高,这是因为反演获取的信息主要来自于地震数据,虽然其所用频率通常略高于地震数据,但是却比测井速度比曲线的分辨率低。

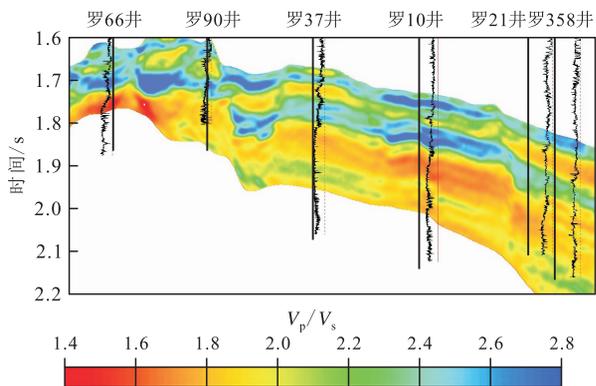


图3 罗66井—罗358井纵横波联合反演速度比连井剖面

3 应用实例

利用纵横波联合反演对研究区沙一段生物灰岩进行了储层和流体分布预测。与单一的纵波叠前反演(图4a)相比,纵横波联合反演得到的纵横波速度比(图4b)识别流体的能力明显得到加强,更好地反映了研究区生物灰岩储层的油水分布。其中,罗66井是高含水井,产油量为1.72 t/d,产水量为18.7 t/d,罗古1和罗37井是含水较低的工业油流

井。统计研究区该层段56口井的实际资料,吻合率达到85%,说明联合反演结果与各井的实钻结果匹配较好。

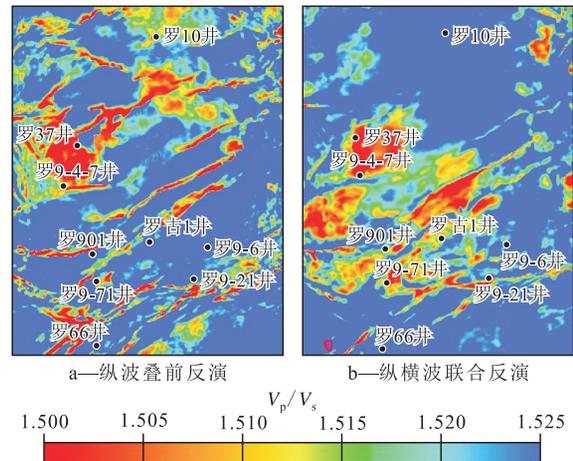


图4 罗家地区沙一段生物灰岩纵横波速度比参数平面分布

4 结束语

采用Fatti提出的纵横波反射系数方程并结合研究区纵波与转换横波的线性关系进行纵横波联合反演。研究表明,纵横波联合标定和构造精细解释是联合反演的基础,初始模型的建立及反演参数的合理调整是联合反演的关键。在罗家地区沙一段生物灰岩储层预测的实际应用结果显示,相对于纵波叠前反演,纵横波联合反演预测储层的稳定性和精度得到提高,反演结果更加可靠。研究区沙一段生物灰岩储层及油水分布预测结果与实钻数据吻合较好。同时,由于纵波与转换横波资料分辨率存在差异,会对联合反演的效果产生一定影响,2种资料的精细匹配是今后多波多分量技术应用研究的重点之一。

参考文献:

- [1] 王玉梅.叠前地震反演精度影响因素[J].油气地质与采收率, 2013,20(1):55-58.
- [2] 隋淑玲,唐军,蒋宇冰,等.常用地震反演方法技术特点与适用条件[J].油气地质与采收率,2012,19(4):38-41.
- [3] 夏位荣,张占峰,程时清.油气田开发地质学[M].北京:石油工业出版社,1999.
- [4] 韩文功,印兴耀,王兴谋,等.地震技术新进展[M].东营:中国石油大学出版社,2006.
- [5] 徐伯勋.地震勘探信息技术提取、分析和预测[M].北京:地质出版社,2001.
- [6] 程冰洁,唐建明,徐天吉,等.转换波3D3C地震勘探技术的研究现状及发展趋势[J].石油天然气学报,2008,30(2):235-238.

(下转第51页)