

高分辨率层序格架约束的地震反演及应用

曹彤, 郭少斌

中国地质大学能源学院, 北京 100083

摘要 在油藏勘探开发中, 利用地震波阻抗反演技术预测储层空间分布特征, 自应用以来发挥着非常重要的作用。特别是在油藏开发中后期, 需要对薄层、薄互层等油层进一步开发时, 该项技术显得尤为重要。尽管该方法以测井和地质等资料为约束, 但依据传统的构造解释方法建立的初始构造模型不够准确, 仍然无法降低地震反演的多解性, 井间储层分布与后验井存在较大差别, 预测出的薄层、薄互层及储层岩性的可信度较低。本文利用测井资料进行高分辨层序地层划分, 依据单井合成地震记录将划分结果标定在地震剖面上, 并完成各层序界面的地震层位解释, 井震结合建立高分辨率层序地层格架。结果表明, 将该地层格架作为初始模型进行测井约束的地震资料波阻抗反演, 对不同旋回发育的薄层或薄互层储层, 横向预测不会以一套厚储层呈现, 提高了储层反演预测储层分布的精度。通过大庆长垣高台子油田中的具体应用, 展示了高分辨率层序地层格架约束下的波阻抗反演技术在薄层、薄互层储层预测中的广阔应用前景。

关键词 测井约束反演; 初始模型; 高分辨层序地层; 薄互层储层

中图分类号 TE19

文献标志码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2013.09.005

Seismic Inversion Constrained by High-resolution Sequence Stratigraphy Framework and Its Applications

CAO Tong, GUO Shaobin

School of Energy Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China

Abstract During the reservoirs exploration and development, the impedance inversion method based on seismic data could be adopted to predict the reservoir distribution. Especially in the stage of reservoirs development, it is necessary to know the thin layer and thin interbed reservoirs distribution and to take measures in the further development. In order to acquire accurate inversion results, it is important to build a refined initial model. Although the impedance inversion is based on log and geological data, the initial model built on the traditional structure interpretation results is not accurate enough, and is unable to reduce multi-solution problem of seismic inversion. The impedance inversion based on high-resolution sequence stratigraphy framework has been introduced. Firstly the high-resolution sequence stratigraphy classification results could be calibrated in the seismic profile by the synthetic seismogram. Then every sequence interface must be interpreted in the seismic profile. As to the sequence interface that does not have the corresponding seismic wave in seismic profile, it could be traced according to the logging data. The initial model for the log-constrained impedance inversion has been constructed on the basis of the interpretation of high-resolution sequence framework. Finally the reservoirs distribution is able to be required from the inversion results. The method is successfully applied to the Gaotaizi Oil Field of Daqing Placanticline. The predictive reservoirs have been confirmed by the later real drilling data. The case study indicates the wide application prospects for the inversion method constrained by high-resolution sequence framework in the prediction of the thin interbed reservoir.

Keywords log-constrained inversion; initial model; high-resolution sequence stratigraphy; thin interbed reservoir

收稿日期: 2012-11-22; 修回日期: 2013-01-15

基金项目: 国家重大科技专项(2011ZX05013-006)

作者简介: 曹彤, 博士研究生, 研究方向为地震解释和储层预测与评价, 电子信箱: caotong1023@qq.com

0 引言

波阻抗反演技术利用地震数据预测储层分布,该方法最早出现在 20 世纪 70 年代,并在此后的几十年迅速发展成熟。Cooke^[1]在 20 世纪 80 年代提出了广义线性反演方法。周竹生、李宏兵等在 20 世纪 90 年代先后提出了约束反演方法和递推反演与宽带约束反演相结合的方法^[2-4]。之后,有人进行了无井和有井多道反演的研究^[5,6]。21 世纪以来,随着开发地震技术的出现,波阻抗约束反演技术也随之得到发展,出现了 Vanguard、Strata 和 Jason 等波阻抗反演软件并用于储层预测,为油藏进一步开发提供较为可靠的依据。但是,随着这些方法在生产中的推广应用,人们逐渐发现,已知的井点预测结果还比较可靠,但井间储层分布往往与后验井存在较大差别,而且预测出的薄层、薄互层及储层岩性的可信度很低。尽管这些方法以测井和地质等资料为约束,但井点之外,横向构造的约束条件不正确,仍然无法降低反演的多解性^[7,8]。可见在波阻抗反演中,约束条件的构建是至关重要的一步。高分辨率层序地层学的出现使得这种条件的构建得到改进与完善,将建立的高分辨率层序地层格架作为一个约束条件来约束地震反演,预测出储层尤其是薄层的可靠性会大大提高。

1 测井高频层序划分

单井高频层序的划分与建立是建立高分辨率层序地层格架的基础。一般需要对单井的目的层段地层层序划分到最小沉积事件,即 1 个短期基准面旋回。在测井系列中,自然伽马曲线与沉积物的泥质含量、粒度中值密切相关,所以,该测井曲线常是基准面旋回划分与对比的首选。正旋回沉积,泥质含量逐渐增多,自然伽马值逐渐变大;反旋回沉积,泥质含量逐渐减少,自然伽马值逐渐减小^[9-11]。然后,根据自然伽马的测井响应特征,结合由测井曲线解释出的岩性和沉积微相剖面、岩屑录井或综合录井图等确定短期基准面旋回。最后,依据短期旋回叠置形成的叠加样式来确定中长期基准面旋回。旋回叠加样式为:每 1 个小的沉积事件是 1 个短期基准面旋回,中期基准面旋回是短期基准面旋回的叠加,而几个中等基准面旋回构成 1 个长期基准面旋回。如此可以对每口井从沉积单元、小层、砂岩组到油层组逐级层序划分,而在实际划分中,考虑到井与井地层可对比性,往往是与之相反的步骤,一般先划分长期基准面旋回,确定标志层,再分成几个中等基准面旋回,进一步细分短期基准面旋回。

2 井震结合建立高分辨率层序地层格架

一般来说,对于不同中、长期基准面旋回,其沉积物物理性质有较大差异,存在明显的波阻抗界面。因此,地震剖面上的地震反射波的组合特征能够识别中、长期基准面旋回,建立宏观的层序地层等时格架^[12]。但要想在地震剖面上建立高分辨率地层格架,必须结合测井划分的高频层序。

层位标定是将测井曲线上划分的层序标定在地震剖面上。通常利用声波和密度资料(没有密度,可以采用 Garden 公

式计算)制作合成记录,并与井旁地震道获得最佳匹配来获得时深转换关系。在实际工作中,首先要确定标志层的地震响应,再细化到小层标定;然后在单井标定的基础上,利用过井、连井剖面进行多井标定。

在层位标定的基础上,对每一个层序界面在地震剖面上追踪解释,并实现空间等时。由于标准的地震反射界面基本是等时面或平行于地层内的等时界面,而地层基准面旋回与界面具有成因地层单元和时间界面的含义,地震反射界面平行或相当于基准面旋回界面。因此,对于标定的波峰或波谷界面上的层序界面,是容易追踪和识别的。而对于在地震上找不到稳定对应反射界面的小层地震解释,可以采用地层厚度比插值法对其进行插值获得,井点处保证与标定结果相符,井间参考地震上可以或已经追踪的层位。最后加密测线解释,在空间上完成地层等时对比与闭合。这样就可以建立起井-震一致的高分辨率层序地层格架。

3 地震反演处理

以井震结合建立的高分辨率层序地层格架作为控制,对井点的初始波阻抗沿层进行内插、外推,产生一个平滑、闭合的实体模型,作为初始波阻抗反演模型。然后采用正、反演迭代法,实现对初始波阻抗模型的不断更新。当模型的合成地震记录与实际地震剖面吻合最佳时,波阻抗模型便是反演结果。

在高分辨率层序地层格架下的初始模型基础上进行测井约束反演。由于有短旋回的层序地层格架约束,不同短旋回时期发育的薄层储层不会在横向上反演预测成一套厚层储层。该方法能较为可靠地预测薄层砂岩的分布,建立井间砂泥岩薄互层精细模型,并能进一步解决薄互层厚度、储层连通性、流体分布等复杂的油藏地质问题,特别是在油藏的后期开发调整中有着非常重要的现实意义。

4 实例应用

研究区位于大庆长垣高台子油田,目前该块局部已完成开发井网非均匀二次加密调整,常规井网密度为 300m×300m,局部井网密度为 212m×212m。主要目的层为葡 I 组油层,油层埋藏深度为-800~-1150m,地层厚度在 57~68m 之间,属于三角洲前缘亚相沉积,发育水下分流河道、河口坝、水下分流河道间、水下决口扇、远砂坝、席状砂等微相类型。砂体发育规模较小,单层砂岩厚度一般为 1.0~2.0m,呈断续窄条带状及透镜体或零星分布面。三维地震资料面元为 10m×10m;采样率为 1ms,主频为 45Hz,有效带宽 10~80Hz,地震剖面上的响应为 2.5 个波形。

抽取 T4-29 和 T4-31 两口井的地震数据,分别进行测井约束反演和基于高分辨率层序格架模型的测井约束反演实验,位于两口井中间的 T4-30 井作为后验井来验证反演效果。图 1 是研究区 T4-29 井的葡 I 组单井层序划分结果,自下而上划分为 12 个短期基准面旋回(小层),3 个中期基准面旋回(砂岩组)。

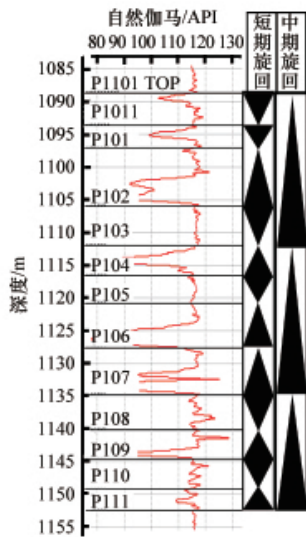


图 1 T4-29 井葡 I 组高分辨层序划分

Fig. 1 High-resolution Pu I Formation sequence classification of for Well T4-29

采用合成地震记录将单井的高分辨率层序地层划分结果标定在地震剖面上。先标定标志层葡 I 组油层顶界 (P1011 TOP) 为强波峰反射, 然后标定波形较为稳定的小层, 如 P103 为波谷, P107 为波峰, P111 为波谷 (图 2)。

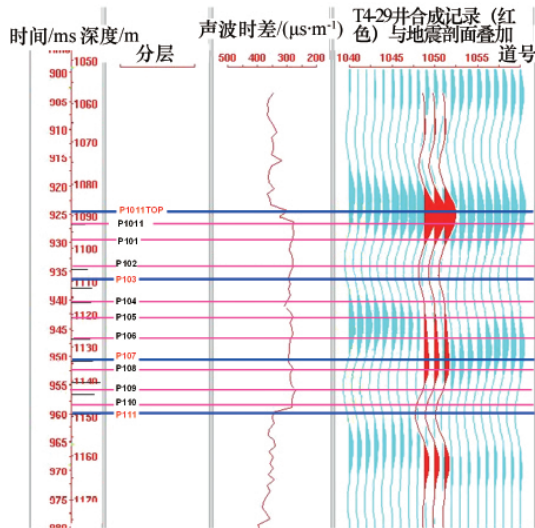


图 2 T4-29 井合成地震记录

Fig. 2 Seismogram of well T4-29

依据标定的结果先解释 P1011TOP、P103、P107、P111 4 个层位 (图 3 中红色线), 然后内插解释其余小层 (图 3 中蓝色线), 建立高分辨率层序地层格架。

图 4 是采用 P1011TOP、P103、P107、P111 4 个层位建立地层格架用于反演得到的反演剖面, 而图 5 是采用高分辨率层序地层格架约束波阻抗反演得到的反演剖面。两种反演结

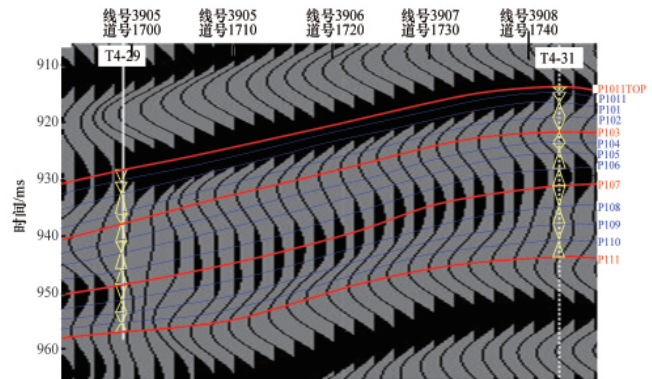


图 3 T4-29 井与 T4-31 井连井地震解释剖面
Fig. 3 Seismic profile between well T4-29 and well T4-31

果在预测砂体形态和横向连通性方面存在较大区别, 后者砂岩薄互层明显要多。对于 P102、P103 这两个小层的砂岩, 在 4 个层位约束时, 预测为一套厚砂层, 而高分辨率层序地层格架约束下的波阻抗反演预测为两层薄砂岩的叠置, 是两期发育的, 而不是一套厚砂层。后验井 T4-30 也证实了该方法预测的正确性。因此可以说, 在高分辨率层序地层格架模型约束下的反演, 其分辨率提高了, 该方法对薄互层砂岩储层有较好的预测效果。

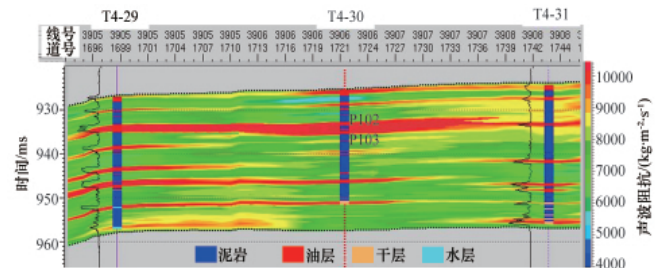


图 4 T4-29 井与 T4-31 井连井反演剖面 (4 个层位控制)
Fig. 4 Inversion profile between well T4-29 and well T4-31 (Constrained by four horizons)

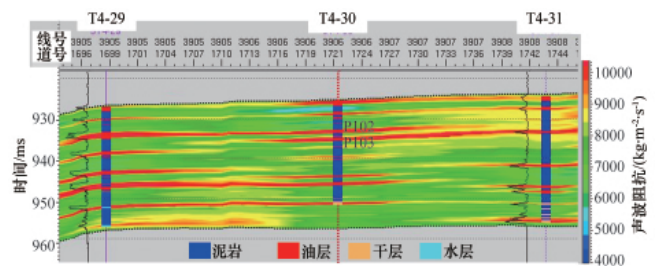


图 5 T4-29 井与 T4-31 井连井反演剖面 (高分辨率层序地层格架控制)
Fig. 5 Inversion profile between well T4-29 and well T4-31 (constrained by high-resolution sequence framework)

5 结论

在油藏的开发中后期开展储层预测工作对储层预测精度和减少地震反演多解性提出了更高的要求。本文利用测井资料进行高分辨层序地层划分,依据单井合成地震记录将划分结果标定在地震剖面上,完成各层序界面的地震层位解释,建立高分辨率层序地层格架,并在大庆长垣高台子油田中进行应用。结果表明:

(1) 建立正确的初始模型,尽可能地接近实际地层情况的波阻抗模型,是减少最终反演结果多解释性的根本途径。

(2) 测井信息纵向分辨率高,而横向上探测范围小,地震可获得横向上连续的地层信息,但纵向分辨率差,两者相结合,是高分辨率层序地层划分与地层格架建立的关键。

(3) 将高分辨率层序地层格架作为地震反演初始模型,为地震反演提供了一个高分辨率的约束条件。

(4) 基于高分辨率层序地层格架下的地震反演储层预测,因短旋回的层序约束,对不同旋回发育的薄砂岩,横向预测不会串为一套砂岩。该方法能较为可靠地预测薄砂岩的横向分布,建立井间砂泥岩薄互层精细模型。

参考文献 (References)

- [1] 姚姚. 地球物理反演基本理论与应用方法[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 2002: 16-81.
Yao Yao. Geophysical inversion theory and application[M]. Wuhan: China University of Geoscience Press, 2002: 16-81.
- [2] 刘百红, 李建华. 测井和地震资料宽带约束反演的应用[J]. 石油物探, 2004, 43(1): 76-79.
Liu Baihong, Li Jianhua. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2004, 43(1): 76-79.
- [3] 秦月霜, 梁海龙. 利用井约束反演技术进行油藏描述研究 [J]. 世界地质, 2003, 22(1): 91-94.
Qin Yueshuang, Liang Hailong. Global Geology, 2003, 22(1): 91-94.
- [4] 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 Wencai. Earth Science Frontiers, 2002, 9(4): 389-396.

- [5] 刘喜武, 年静波, 吴海波. 几种地震波阻抗反演方法的比较分析与综合应用[J]. 世界地质, 2005, 24(3): 270-274.
Liu Xiwu, Nian Jingbo, Wu Haibo. Global Geology, 2005, 24(3): 270-274.
- [6] Li G F, Ma Y Y, Xiong J L, et al. Analysis of the ambiguity of log-constrained seismic impedance inversion[J]. Petroleum Science, 2011, 8(2): 151-156.
- [7] 彭真明, 张启衡, 龚奇. 波阻抗反演中的全局寻优策略[J]. 物探化探计算技术, 2003, 25(2): 151-156.
Peng Zhenming, Zhang Qiheng, Gong Qi. Computing Technologies for Geophysical and Geochemical Exploration, 2003, 25(2): 151-156.
- [8] Hoversten G M, Milligan P, Byun J, et al. Crosswell electromagnetic and seismic imaging: An examination of coincident surveys at a steam flood project[J]. Geophysics, 2004, 69(2): 406-414.
- [9] Lazatatos S K, Marion B P. Cross-well seismic imaging of reservoir changes caused by CO₂ injection [J]. The Leading Edge, 1997, 16(9): 1300-1306.
- [10] 朱筱敏. 层序地层学[M]. 东营: 石油大学出版社, 2001: 1-41, 108-202.
Zhu Xiaomin. Sequence Stratigraphy[M]. Dongying: University of Petroleum Press, 2001: 1-41, 108-202.
- [11] 操应长. 断陷湖盆层序地层学[M]. 北京: 地质出版社, 2002: 101-117.
Cao Yingchang. Sequence stratigraphy of faulted lake basin[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2002: 101-117.
- [12] 郭魏, 刘招君, 董惠民, 等. 松辽盆地层序地层特征及油气聚集规律 [J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2004, 34(2): 216-221.
Guo Wei, Liu Zhaojun, Dong Huimin, et al. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2004, 34(2): 216-221.
- [13] 雷雪, 李忠, 巫芙蓉, 等. 高分辨率层序地层学在川西地震资料反演中的应用[J]. 石油物探, 2003, 42(4): 493-500.
Lei Xue, Li Zhong, Wu Furong, et al. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2003, 42(4): 493-500.
- [14] 余杰, 陈钢花. 测井资料高分辨率层序地层分析[J]. 测井技术, 2007, 31(1): 21-24.
Yu Jie, Chen Ganghua. Well Logging Technology, 2007, 31(1): 21-24.
- [15] Sheline H E. Crosswell seismic interpretation and reservoir-characterization: An offshore case history[J]. The Leading Edge, 1998, 17(7): 935-939.

(责任编辑 张玉肖, 齐志红)

· 学术动态 ·

“中国科协年会”内容

中国科协年会一般包括“1+3+X”内容模块,其中“1”指大会开幕式及大会特邀报告,“3”指专题论坛、学术交流、科普三项主要活动,“X”指院士、专家与地方政府官员座谈交流及其他相关活动。开幕式及大会特邀报告邀请党和国家领导人和院士、专家。开幕式还颁发“求实杰出青年奖”和香港求是科技基金会“求是杰出科学家奖”。专题论坛根据举办地经济社会发展需要而设立,旨在促进专家学者与党政部门、企业之间的交流和对话。学术交流主要由全国性学会组织,围绕科技前沿动态、学科交叉和科技创新中的重大问题设立若干专题,旨在搭建专家学者之间的学术交流平台。科普活动由相关部门联合全国学会进行,重点邀请参加年会的院士、专家参与面向学校、社区、企业、农村的各类活动。