

文章编号: 0253-9985(2005)01-0120-05

渤东凹陷蓬二号构造地震资料测井约束反演

朱伟^{1,2}, 马朋善¹, 谭承军¹, 程喆¹

(1. 中国地质大学能源学院, 北京 100083; 2. 中国石化中南分公司研究院, 湖南长沙 410007)

摘要: 根据岩心、岩相资料和速度统计, 对目的层馆陶组砂泥岩速度差异及其相应的地震反射界面进行了分析。通过精细的速度研究与地震地质模型分析, 以及多次子波提取与反复细致标定, 将常规地质界面型剖面反演成地层岩性型剖面, 得到了4个低波阻抗段。这4个低波阻抗段分别对应的储层段为: (1) 3 150~3 170 m 井段, 为蓬 x12 井测井解释的含水、油层段; (2) 3 215~3 250 m 井段, 为蓬 x12 井测井解释的主要含油层段; (3) 3 300~3 400 m 井段, 为蓬 x12 井测井解释的含油水层段; (4) 3 465~3 495 m 井段, 为蓬莱 x12 井测井解释的含油水层段。

关键词: 测井约束反演; 子波提取; 综合标定; 渤东凹陷

中图分类号: P631.825

文献标识码: A

Logging constrained inversion of seismic data in Peng No. 2 structure in Bodong sag

Zhu Wei^{1,2}, Ma Pengshan¹, Tan Chengjun¹, Cheng Zhe¹

(1. Department of Energy Resources, China University of Geosciences, Beijing;

2. Petroleum Exploration and Development Research Institute of Central-South Company, SINOPEC, Changsha, Hunan)

Abstract: Velocity contrast of sandstone and mudstone and the corresponding seismic reflecting horizons in the targeted Guantao Formation are analyzed based on core and lithofacies data and velocity statistics. Through detailed velocity study and seismogeological model analysis, as well as multiple wavelet extractions and repeated and detailed calibrations, the conventional geologic interface profile is inverted into a stratigraphic-lithologic profile. Four low wave impedance intervals are identified which correspond to the following 4 reservoir intervals: (1) 3 150–3 170 m, log interpreted water and oil-bearing interval in Peng x12 well; (2) 3 215–3 250 m, log interpreted main oil-bearing interval in Peng x12 well; (3) 3 300–3 400 m, log interpreted water-oil-bearing interval in Peng x12 well; (4) 3 465–3 495 m, log interpreted water-oil-bearing interval in Peng x12 well.

Key words: well log constrained inversion; wavelet extraction; comprehensive calibration; Bodong sag

地震反演技术是储层预测的一项核心技术, 其功能是利用地震资料反演波阻抗或速度, 把常规的地质界面型剖面反演成地层岩性型剖面。波阻抗反演具有明确的物理意义, 是储层岩性预测和油藏特征描述的确定性方法。我国从 20 世纪 70 年代末至 80 年代初开始研究地震反演技术。与此同时, 国外先后推出了各种地震波阻抗反演技术。依据反演方法可分为两大类, 即递推反演

和基于模型的约束反演。递推反演如 Seislog, V-Log, G-Log, RM; 基于模型的约束反演如 Strata, Parm, Jason, ISIS, BCI 等^[1~10]。本文是利用地震剖面所过井位声波测井资料作为约束条件, 正、反演结合进行迭代求取地下波阻抗的方法。该方法利用测井资料的高频成分, 拓宽了地震信号的频带, 可以获得薄层和薄互层的波阻抗信息, 因而在储层预测中得到广泛应用^[11]。

1 概况

蓬二号构造位于渤东低凸起大断层下降盘渤东凹陷内。该区地震资料在目的层段分辨率低、信噪比低、连续性较好。工区内施钻的 x12 井从馆陶组上段到东营组中段均有明显的油气显示,显示井段多达 39 层,共 171.0 m。结合录井和测试资料,测井解释油层 19.0 m/13 层,油水同层 2.9 m/1 层,含油层 29.6 m/10 层。

目的层馆陶组主要以低弯度曲流河和辫状河为沉积特征,其中曲流河主要位于 2 469.0~2 748.5 m 井段,辫状河主要位于 2 753.05~3 164.0 m 井段。整个馆陶组砂岩含量为 58.6%。主要储集体类型为低弯度曲流河主河道砂体和边滩砂体。单层砂体厚度为 1.5~30.0 m,平均单层厚度为 7.8 m,总厚度 124.0 m,测井解释孔隙度在 14.1%~25.8%,平均 20.2%,属于中等孔隙,渗透率在 $3.1 \times 10^{-3} \sim 36.7 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,平均 $16.8 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,属于低渗透率。另一目的层东营组发育多期三角洲沉积,可进一步划分为三角洲平原、三角洲前缘和前三角洲亚相。东营组一段上部(3 164.0~3 278.5 m)发育三角洲平原亚相,依据岩性和电测曲线,该段可细分出分流河道与分流河道间微相。三角洲前缘-前三角洲亚相位于 3 278.5~3 605.0 m 井段,依据岩性和电测曲线可将三角洲前缘划分为水下分流河道、水下分流河道间、河道侧翼、河口坝、支流间湾、席状砂、远砂坝等 7 个微相。

馆陶组、东营组上段储层由砂层组成,上部单砂层较厚,下部则较薄。通过对 x12 井的密度、速度和波阻抗统计分析(表 1),从馆陶组到东营组共存在 3 个速度界面:第一个速度界面位于 2 460 m

附近,第二个速度界面位于 2 900 m 附近,第三个速度界面位于 3 160 m 附近。砂泥岩之间也存在比较明显的速度和波阻抗界面,因此,本区馆陶组中泥岩与砂岩可形成较强的地震反射。反映在地震相上表现为连续的、平行的、稳定的、中强振幅的地震反射同相轴。

2 方法与原理

为了分析地震道并试图重构地下速度和阻抗结构,我们采用了叠后地震反演。反演的基础模型是一维褶积模型。

$$T(i) = \sum r(j) W(i-j+1) + n(i) \quad (1)$$

式中 $T(i)$ 为振幅; $r(j)$ 为以时间序列表示的零偏移距地下反射系数; $W(i)$ 为地震子波,假设为不变的; $n(i)$ 为噪声, i 为测得振幅 $T(i)$ 的样点号。

反演可以看作是已知地震道 $T(i)$, 估算反射系数的过程。因为在地下,反射系数是与地层的声阻抗相关的

$$r(j) = \frac{I(j) - I(j-1)}{I(j) + I(j-1)} \quad (2)$$

式中 $I(j) = \rho(j) v(j)$; $I(j)$ 为波阻抗, $\text{g}/\text{cm}^3 \cdot \text{m}/\text{s}$; $\rho(i)$ 第 i 层的密度, g/cm^3 ; $V(i)$ 第 i 层的速度, m/s 。

首先,要建立一个速度模型,在地震数据上拾取主要的反射层,并对来自于声波测井的速度数据进行插值,得到每个地震道的各样点的速度值。拾取的地震构造层位作为插值的一个横向控制。

在方程(1)中,模型道与原始道 $T(i)$ 不同。用最小二乘优化法使 M 和 T 之间的误差尽可能地小。定义误差道为

$$e(i) = T(i) - M(i) \quad (3)$$

假设正确的反射系数为

$$r(i) = r_o(i) + \Delta r(i) \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (4)$$

然后,找到修正量 $\Delta r(i)$,使其平方误差最小。通过 $\Delta r(i)$ 的变化,反复迭代直至获得最佳结果。

模型约束反演的基本特点:以测井资料丰富的高频信息和完整的低频成分补充地震资料有限带宽的不足^[11]。该反演方法其横向分辨率取决于对地震资料解释的精细程度,其纵向分辨率取决于测井资料和模型的采样率。该反演方法的分辨

表 1 砂泥岩储层参数表

Table 1 Parameters of sandstone and mudstone reservoirs

层段/m	岩性	参 数		
		平均密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	平均速度/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	平均波阻抗/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
2 460~2 900	砂岩	2.21	3 246	7 142
	泥岩	2.46	3 403	8 340
	差值	0.25	157	1 198
2 900~3 160	砂岩	2.26	3 276	7 404
	泥岩	2.47	3 430	8 491
	差值	0.21	154	1 087

率高,但容易产生多解性。该方法是因为更多地利用了地震解释成果和测井资料的纵向分辨率。所以对薄砂体的识别有一定的优势,但它适合于沉积稳定,井比较多的地区。

3 反演过程

3.1 测井资料处理

首先对测井曲线进行野值剔除。在此基础上,分析各曲线之间的关系以及它们与储层之间的关系。通过交汇图(图1)分析可知,蓬莱x12井的馆陶组到东营组,砂岩储层主要表现为低密度、

低速(高声波)、低波阻抗的特征,而且,从浅到深存在着几个速度界面,反映了不同地层的变化特征。从波阻抗与几种不同曲线的交汇图来看,它们之间的相关性相当好(图1),而这些都为后面的储层反演预测奠定了良好的基础。

3.2 子波提取

子波的好坏与子波的长度、子波的时窗、子波的波形、子波的频谱等密切相关。子波提取与合成记录的制作是密不可分、循环往复的过程。首先,利用经验时深对一个标准子波做出最初的合成记录道,将此合成记录道与井旁地震道对比,

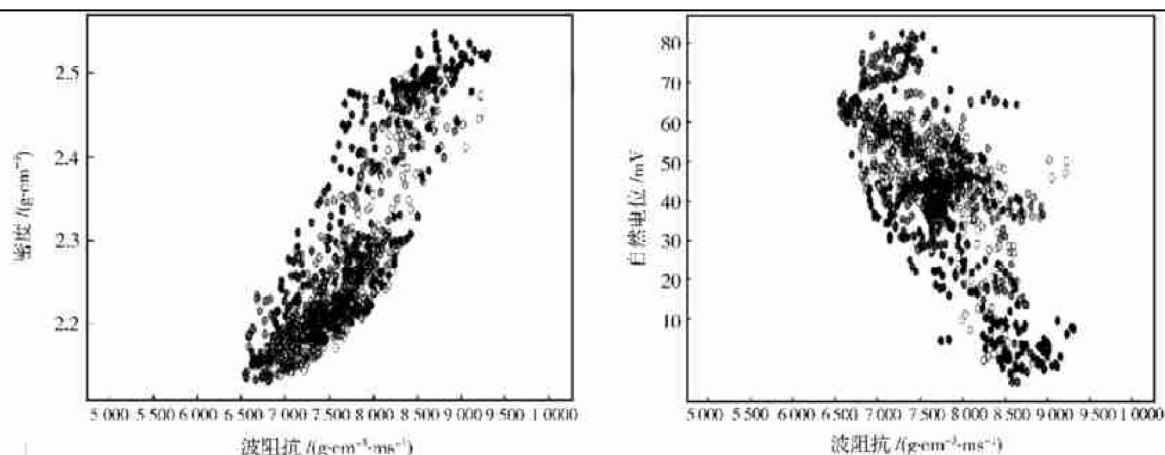


图1 交汇图

Fig. 1 Crossplot

a—密度—波阻抗;b—自然电位—波阻抗

通过标准层标定得到新的时深关系并估算子波,然后用新子波重做合成记录与井旁道对比、标定,如此反复,直到子波及合成记录两者皆达到要求为止。本区的目的层段为馆陶组、东营组,子波的长度选择了120 ms,时窗范围为1.5~3.0 s。提取的子波波形稳定,能量主要集中在子波中央的主瓣上(图2)。

3.3 极性判别

地震剖面极性的判别,是一个非常困难的问题,一般的反演工作中所提供的地震资料,都应该是在常规处理阶段,将地震资料进行零相位化处理,如果不处理就必须在最终的剖面上标明其极性,以免给解释反演带来不必要的麻烦。我们采用了提取子波判别法,结合垂直法地震反射(VSP)资料,进行极性的判别。具体方法就是,利用VSP资料确定合成地震道与地震剖面的波组关系,在

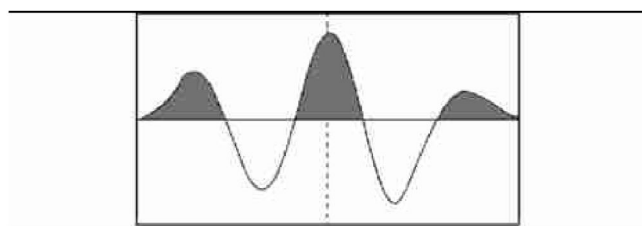


图2 子波

Fig. 2 Wavelet

此基础上提取子波,然后对子波的相位进行一定间隔的改变,分别分析在不同相位子波的情况下,合成地震记录与井旁地震道的匹配程度和相关系数,当它们达到最佳时的子波相位,就是地震剖面的相位,这样就确定了地震剖面的极性。

3.4 综合标定

在地震剖面上准确的识别所研究储层的反射

层位是测井约束反演及储层横向预测的前提和基础。如果储层标定不准,将会导致整个反演及储层横向预测的失败。地震层位的标定,采用了“多元标定法”。具体标定过程中要遵守以下几个原则:充分利用已有的钻井分层;④测井曲线的标准化处理;⑤测井曲线的合理利用(包括:声波测井、密度测井);速度的参考包括单井VSP速度和本区平均速度的参考。即以钻井的地质分层和区域性的标志层作为约束,进行初次标定;利用VSP资料、测井解释、自然电位(SP)、自然伽马(GR)、地层电阻率(RT)等曲线,在初次标定的基础上进行二次标定,修改时-深关系,再标定,直到井旁道和合成记录达到最佳匹配为止。所得结果有较高的相关系数,大大提高了标定的精度(图3)。

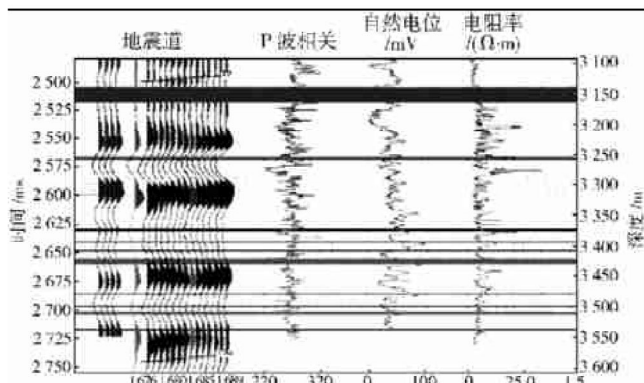


图3 合成地震记录

Fig. 3 Synthetic seismogram

根据剖面的特征和测井曲线的特点,依据单井阻抗模型及各井对比分析的结果,将层位标定在井对应的井旁地震道上。特别是根据合成记录的情况,对目的层段的储层反射层进行了地震地质标定。通过标定,不同岩性、不同电性的地层与地震剖面反射特征就有了对应关系。

4 建立地质模型

地下沉积体的空间接触关系是十分复杂的,计算机无法一次确定各个层位之间的拓扑关系,因此建立地质框架是按沉积体的沉积顺序从下往上逐层定义各层与其他层的接触关系(可以是整合、断层、上超、底超、削截、河道等)。当遇到断层时,为了合理地封闭层位,必须要单独处理,这样得到的地质框架模型才是一个平滑闭合的层模型。地质模型的建立在于充分利用地震、测井和

地质资料,从地震资料出发,以测井资料和钻井数据为基础,建立基本反映沉积体地质特征的初始模型。具体做法是根据地震解释层位,按照地质沉积规律在层序之间内插很多小层建立一个地质框架结构,并根据一定的插值方式对测井数据进行内插和外推,产生一个平滑、闭合的实体模型(图4)。

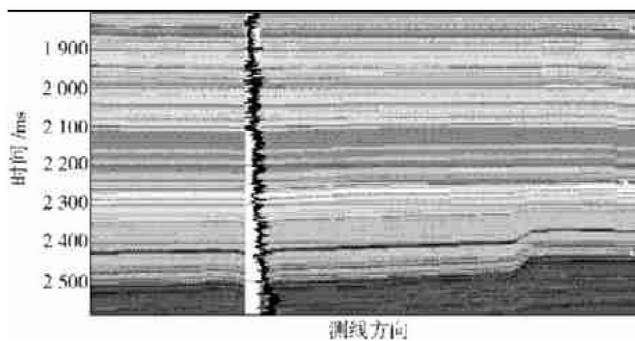


图4 波阻抗初始模型剖面

Fig. 4 Initial model profile of wave impedance

5 反演处理

在完成以上各项工作的基础上,选定时窗和地震道范围,采用基于模型的方法进行反演。反演中,先对过井剖面进行反演,调整反演参数,进行反复试验、分析,确定合适的参数,然后对全区进行反演。经实验主要参数为:波阻抗最大改变量选用60%,子波幅值比例因子取3。

6 效果分析

由于 T_2 以下储层物性较差,且为砂泥岩薄互层,最大砂岩厚度只有9m,反演剖面根本无法将他们区分开来,得到的只是大套砂岩的综合响应,即比较厚的波阻抗界面,为了搞清这几套低波阻抗段所对应的储层段,我们采用正演的方法,将测井上的波阻抗曲线进行处理,划分成4个低波阻抗储层段(图5),计算其对应的合成道。

从图5中可知,4个低波阻抗段分别对应的储层为:第一个低波阻抗段对应井深3150~3170m井段,储层段为31~33储层,厚度为19m,本段也是蓬x12井测井解释的含水、油层段;第二个低波阻抗段对应井深3215~3250m,储层段为35~40储层,厚度为38m,是蓬x12井测井解释的主要含油层段;第三个低波阻抗段对应井深3300~3400m,储层段为44~48储层,厚度为77m,是蓬x12井测井解

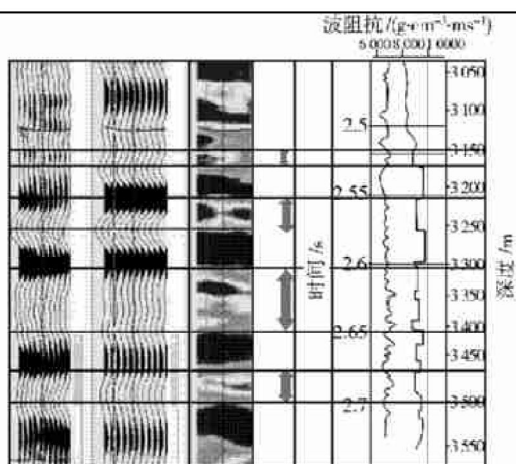


图5 正演模型

Fig. 5 Forward model

释的含油水层段; 第四个低波阻抗段对应井深 3 465~ 3 495 m 井段, 50~ 55 储层, 厚度为 58 m, 是蓬莱 x12 井测井解释的含油水层段。

我们对波阻抗体沿主要储层段进行沿层提取, 得到平均波阻抗。图 6 为沿层向下 12 ms 进行提取得到的平均波阻抗平面分布图。从沿层切片上可以看出, 蓬莱 x12 井附近储层的分布主要呈北东-南西向, 且东边储层较厚, 反映了较大区域的沉积特点, 即物源主要是由东向西。而在研究区的中间凸起部位, 可以看出明显的三角洲河道砂体分布特征。

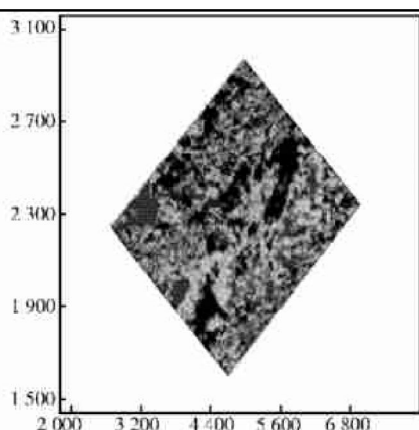


图6 沿主油层向下 12 ms 的时间切片

Fig. 6 Time slice per 12 ms along the main oil reservoir

参 考 文 献

- 王者顺, 王尚旭, 唐文榜. 塔河碳酸盐岩溶洞油藏的地震响应及频率差异分析[J]. 石油与天然气地质, 2004, 25(1): 95~ 96
Wang Zheshun, Wang Shangxu, Tang Wenbang. Seismic response and

frequency difference analysis of cavern-type reservoirs in carbonate in Tahe oilfield[J]. Oil & Gas Geology, 2004, 25(1): 95~ 96

- 吴海燕, 朱留方. 成像、核磁共振测井在埕北裂缝性储层评价中的应用[J]. 石油与天然气地质, 2002, 23(1): 45~ 48
Wu Haiyan Zhu Liufang. Application of imaging and nuclear magnetic resonance to assessment of fractured reservoirs in Chengbei[J]. Oil & Gas Geology, 2002, 23(1): 45~ 48
- 蒋进勇, 樊怀阳, 刘丽. 子波反褶积在塔河油田地震解释中的应用[J]. 石油与天然气地质, 2002, 23(1): 55~ 57
Jiang Jinyong, Fan Huaiyang, Liu Li. Application of wavelet deconvolution to seismic limestone banks in central Tarim Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2002, 23(1): 55~ 57
- 云美厚, 管志宁, 曹广华. 油藏特性与时间推移地震监测[J]. 石油与天然气地质, 2001, 22(4): 355~ 358
Yun Meihou, Guang Zhining, Cao Guanghua. Reservoir characteristics and time-lapse seismic monitoring[J]. Oil & Gas Geology, 2001, 22(4): 355~ 358
- 朱伟, 朱玲, 吴新民. 宽带约束反演在江陵凹陷谢凤桥油田储层预测中的应用[J]. 石油与天然气地质, 2001, 22(3): 273~ 276
Zhu Wei, Zhu Ling, Wu Xinmin. Application of wide-band constrained inversion to prediction of Xiefengqiao oilfield reservoir in Jiangling depression[J]. Oil & Gas Geology, 2001, 22(3): 273~ 276
- 谢占安, 张国栋. 北堡陆地二维地震的进展[J]. 石油与天然气地质, 2000, 21(4): 324~ 326
Xie Zhanan Zhang Guodong. Progress of 2-D seismic exploration in Beipu region[J]. Oil & Gas Geology, 2000, 21(4): 324~ 326
- 张玉兰, 陈贤德. 复杂断块区低品质地震资料解释方法[J]. 石油与天然气地质, 2000, 21(4): 330~ 332
Zhang Yulan, Chen Xiande. Interpretation method on low quality seismic data of complex fault blocks[J]. Oil & Gas Geology, 2000, 21(4): 330~ 332
- 马劲风, 王家珉. 垂直入射假设对井旁地震道子波提取的影响及改进措施[J]. 石油与天然气地质, 2000, 21(3): 191~ 196
Ma Jingfeng, Wang Jiamin. Effect of wavelet extracting with a seismic trace near well based on normal incidence assumption and its improving method[J]. Oil & Gas Geology, 2000, 21(3): 191~ 196
- 魏力民, 柳梅青. 川西新场蓬莱镇组层序地层研究与储层横向预测[J]. 石油与天然气地质, 2000, 21(3): 220~ 225
Wei Limin, Liu Meiqing. Study on sequence stratigraphy of Penglaizhen Formation in Xinchang, west Sichuan and reservoir lateral prediction[J]. Oil & Gas Geology, 2000, 21(3): 220~ 225
- 石万忠, 陈开远, 陈新军, 等. 地震属性参数在胜坨油田气藏预测中的应用[J]. 石油与天然气地质, 2003, 24(2): 196~ 198
Shi Wanzhong, Chen Kaiyuan, Chen Xinjun, et al. Application of seismic attribute parameters to prediction of gas reservoir in Shengtuo oilfield[J]. Oil & Gas Geology, 2003, 24(2): 196~ 198
- 张玉芬. 测井资料约束的层速度反演[J]. 石油与天然气地质, 1998, 19(3): 227~ 231
Zhang Yufeng. Interval velocity conversion constrained by log data[J]. Oil & Gas Geology, 1998, 19(3): 227~ 231