

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2017.03.007

惠州某区薄储层反演技术研究及应用

梁立锋^{1,2}, 张宏兵¹, 刘秀娟², 曹呈浩¹, 潘益鑫¹

(1. 河海大学地球科学与工程学院, 江苏 南京 210098;

2. 中国海洋石油能源发展工程技术特普公司, 广东 湛江 524000)

摘要: 针对惠州某区滚动勘探阶段钻井较少、薄储层预测难度大的问题, 采用基于正则化算子的叠前同步反演技术解决钻井偏差分布难以确定砂体横向边界的问题, 从而确定更加合理的变程、变差函数等统计学参数, 并作为地质统计学反演的关键参数输入; 通过开展地质统计学反演, 提高薄储层的纵向薄储层识别厚度问题。反演结果表明: 预测设计井 X3 处储层发育, 新钻井 X3 资料验证了此结果; 目标区存在 A2UP、A2LOW、A2 共 3 套砂体, 且互不连通。

关键词: 惠州; 薄储层; 正则化; 地质统计学反演; 变差函数; 概率密度函数

中图分类号: P618.13 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2017)03-0230-05

Thin reservoir inversion technology in an area in Huizhou and its application

LIANG Lifeng^{1,2}, ZHANG Hongbing¹, LIU Xiujuan², CAO Chenghao¹, PAN Yixin¹

(1. School of Earth Science and Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. CNOOC Energy Development Engineering Geophysical Prospecting Institute of Technology, Zhanjiang 524000, China)

Abstract: In view of fewer drilling wells and the difficulty of thin reservoir prediction in the rolling exploration stage in an area in Huizhou, the pre-stack simultaneous inversion technique based on the regularization operator was adopted to solve the problems of the difficulty of determining the lateral boundary of sand using the skewed distribution of drilling. More reasonable variation and variation functions were determined and treated as the key parameter input for geo-statistics inversion. The predicted thickness of the vertical thin reservoir was improved by geo-statistical inversion. The inversion results show that the reservoir in the design well X3 will develop, and data from the new drilling well X3 verify the result. There are three sets of sand bodies in the target zone: A2UP, A2LOW, and A2, which are mutually unconnected.

Key words: Huizhou; thin reservoir; regularization; geo-statistical inversion; variation function; probability density function

惠州某区为已探明含油构造区块, 在构造最高点钻探了 X1 井并获得油气发现, 其中 A2 储层发育且获得油气显示, 但砂岩薄互层现象严重。构造高点附近钻探了 X2 评价井, 钻遇砂岩储层 A2LOW, 储层物性很好, 但厚度较薄仅 8 m。由于地震资料主频较低, 从地震成果剖面上很难分析 2 口测井 A2 储层是否连通, 并且该区块处于海洋勘探阶段, 钻井较少, 常规的波阻抗地震反演难以解决薄储层的预测问题。

地质统计学反演是目前较常用的薄储层预测方法, 有关地质统计学反演研究的热点之一是如何在地质

收稿日期: 2016-06-13

基金项目: 国家自然科学基金(41374116); 中国海洋石油总公司科技项目(CNOOC-KJ 125 ZDXM 07 LTD NFGC 2014-04); 中国海洋石油总公司能源发展科技项目(HFKJ-GJ2015001)

作者简介: 梁立锋(1978—), 男, 吉林长春人, 工程师, 博士研究生, 主要从事地震资料正反演工作。E-mail: lianglf@cnooc.com.cn

建模中充分利用地震信息,并完善加入地震约束项的地质统计学建模方法^[1-2]。针对开发初期的海上油气田,钻井数量较少,储层非均质性强,融入地震信息约束相比于仅应用测井资料约束的传统建模方法,其反演精度明显提高^[3-4]。变差函数作为地质统计学的主要工具,在地质统计学中占有举足轻重的地位,有学者^[5-6]深入分析了变异函数的各个参数(步长、容差角度、容差距离)对变异函数(变程、块金值、基台值)的影响;在实践上,地质统计学反演不仅应用于砂泥岩研究,也广泛用于碳酸盐岩等非均质性储层研究^[7-8],并取得了较好的应用效果。地质统计学反演实施前,一般需要进行确定性反演,其目的是调查砂体发育的规模,以便于确定变差变程等参数。目前主流的基于模型的叠前同步反演由于受初始模型影响及反演算法本身的局限性,反演的精度不高^[9-10]。

为解决研究区薄储层预测问题,笔者提出了叠前同步反演联合地质统计学反演的策略,并通过实例应用对该方法进行验证。

1 薄储层反演方法

1.1 基于正则化算子的叠前同步反演方法

正则化方法是基于变分原理建立的,其基本思想为:构造正则算子和确定正则参数,并在解空间内使非负泛函(即目标函数)达到最小。正则化方法最重要的是如何构造正则算子和确定正则参数。由于常规正则化方法是在结果上强加一个粗略的惩罚,从而使图像(或模型)全局平滑。然而,一个现实的地质模型不仅假设为由平滑区域组成,而且还被明显的边界(如层界面、断层、不整合、尖灭等)所分隔。这些边界都是模型中非常重要的特征,如何保护这些特征,避免边界过于平滑,是如何有效地使用正则化方法的难点所在。为此,本文提出了正则化叠前同步反演方法,该方法要求势函数为非平方型,其目标函数可以表示为^[11-17]

$$J(Z) = J_1 + \lambda^2 \cdot J_2 = \frac{1}{2\sigma^2} \|Y - W * R\|^2 + \lambda^2 \cdot \sum_C \varphi\left(\frac{D_C^k(Z)}{\delta}\right) \quad (1)$$

式中: Z ——待反演的参数(即纵波及横波速度、密度); J_1 ——数据项; J_2 ——先验项; σ ——标准方差; Y ——地震数据; W ——地震子波; R ——反射系数; λ 、 δ ——正则参数; φ ——势函数; $D_C^k(Z)$ ——待反演参数的梯度值; k ——先验项的平滑阶数,即 k 阶平滑; C ——邻域内数据点集;*——褶积符号。

式(1)中, J_1 是关于测量模型与数据的某种一致性,当 J_1 取最小值时,一致性或鲜明性变得很好,但解变得不稳定; J_2 是一个关于解“光滑性”的测量标准,当 J_2 取最小值时,可以获得一个稳定(或光滑)的近似解, J_2 中势函数的具体形式见文献[2]。 λ 是用于平衡数据项和先验项之间的相互影响; δ 是一种刻度参数,用于在检测的不连续处(或地层界面)调节梯度值。对于先验项,本文强加了一个 k 阶平滑($k=1,2,3$),当 $k=1$ 时,先验项求和是在目标点最邻近的水平和垂直方向上所有区域进行; $k=2,3$ 分别对应于邻近点之间的梯度矢量($k=2$)和 Hessian 矩阵差分($k=3$)。反演时,通过模拟退火算法搜索目标函数 $J(Z)$ 的全局极小值,以便反演纵波及横波速度、密度等3个参数,其中, R 依据 Zoeppritz 方程求取, W 依据测井数据和井旁地震数据由反褶积方法求取,在模拟退火过程中 λ 逐渐减小,而 δ 逐渐增大^[12]。

1.2 地质统计学反演方法

地质统计学反演采用马尔科夫链蒙特卡洛积分方法(Markov Chain Monte Carlo, MCMC)。MCMC 算法所用的思路非常明确:用贝叶斯推论方法构建一个后验概率密度函数(PDF)来表征在已知地质、地震、测井等信息的条件下储层的概率,记做 $P(\text{储层}|\text{地质统计学参数,地震,测井})$,然后利用马尔科夫链蒙特卡洛算法对 P 进行求解,求得近似解函数,从而获得各种所需的油藏属性体^[8]。在地质统计学反演中比较关键的是变差函数及 PDF。

变差函数一般由变程、块金值、基台值、拱高等参数共同描述,它指的是^[5]:假设空间点 u 只在一维 x 轴上变化,将区域化变量 P 在 u 和 $u+h$ 处的值之差的方差之半定义为区域化变量 $P(u)$ 在 x 轴方向上的变差函数,记为 $\gamma = (u, h)$,即

$$\gamma(u, h) = \frac{1}{2} \text{Var}(P(u) - P(u + h)) = \frac{1}{2} E(P(u) - P(u + h))^2 \quad (2)$$

式中: h ——距离滞后(或称步长); E ——数学期望; $P(u)$ ——在位置 u 处的变量值; $P(u+h)$ ——在位置 u 偏离 h 处的变量值。

PDF 是利用贝叶斯推断将各种信息源(测井、地震、岩性)的 PDF 函数综合起来求解,PDF 的实现过程,详见参考文献[6],由于上述这些信息可以包含小到几毫秒的地质微层或几微米的岩芯取样,大到绵延几十千米的地质沉积模式,因此它是一个真正意义上的能够综合体现多个变量特征的 PDF。

2 靶区应用实例

靶区惠州某区薄储层发育,且工区内砂岩分布区只有 3 口钻井(X1~X3),3 口钻井呈不均匀分布,由井资料统计的试验变程不能反映工区的砂体分布。图 1 为目标靶区典型地震剖面,图中椭圆所示区域为主要目的层。从图 1 中可以看出,目的层信噪比略低,波形复杂,振幅能量偏弱,加大了反演的难度。

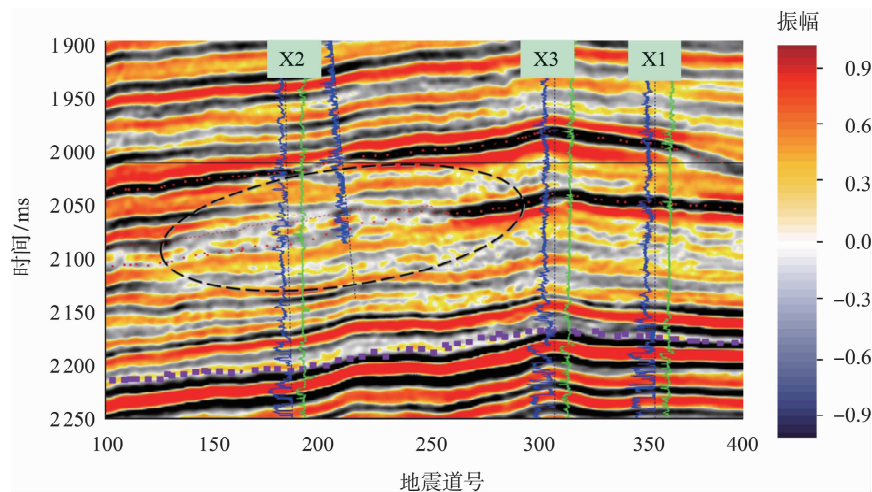


图 1 靶区典型地震剖面
Fig.1 Typical seismic section in target zone

分别对图 1 的叠前地震数据做基于模型的叠前同步反演(图 2(a))及基于正则化算子的叠前同步反演(图 2(b)),并提取了目标砂体的平面图。结合地质沉积规律,通过对比,2 种反演方法刻划的砂体边界及砂体细节不同,由此带来了砂体横向变程参数的差异;图 2(a)描述的大套砂岩精度较低,难以在地质上给出合理的解释。图 2(b)对砂体边界描述的更加合理,由此测量的横向变程参数也更合理。

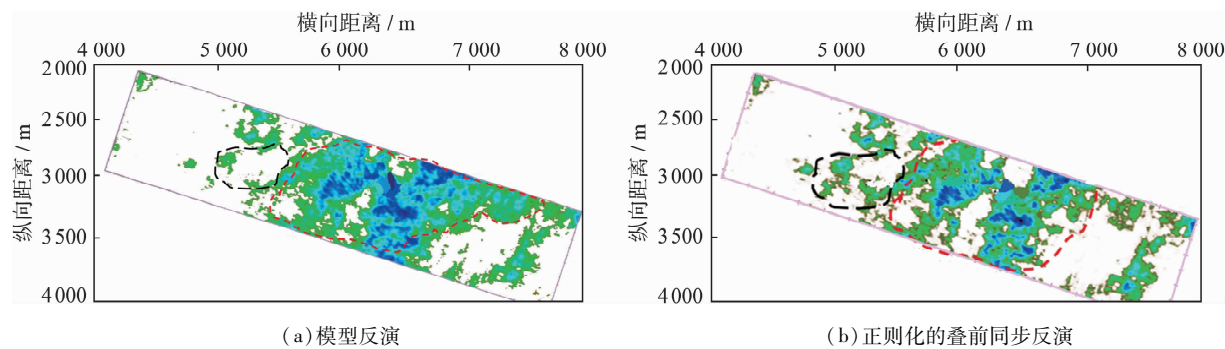


图 2 基于模型反演和正则化的叠前同步反演的砂体平面图
Fig.2 Sand distribution obtained from pre-stack simultaneous inversion based on model and regularization operator

在基于正则化算子反演的基础上进行地质统计学反演,建立了多个等概率的岩性实现数据体。在对多个等概率岩性数据体进行汇总、平均后,结合地震预测岩性概率模型与井点的匹配性分析结果,获得如图 3 所示的过反演工区 3 口井的地质统计学预测岩性概率剖面图。

从图 3 可以看出,X1 井钻遇 A2 油藏的砂岩主体部位,该部位砂体纵向厚度大、构造形态处于高部位,砂体在纵向沉积过程中存在相变,实钻结果钻遇 3 套不同厚度的隔夹层;X2 井钻遇的 A2 油藏砂体在沉积相态

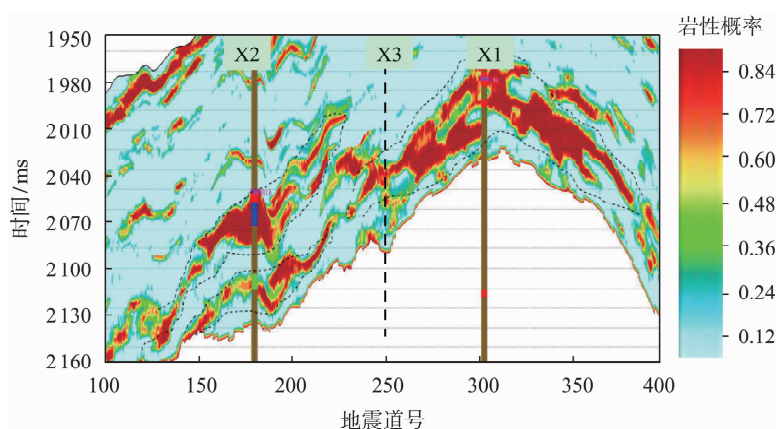


图3 地质统计学反演成果

Fig.3 Geostatistical inversion results

上具有岩性沉积特点,该井钻遇 A2 油藏砂体厚度大,无隔夹层分布,但该砂体向井点外方向呈快速相变(尖灭)特征。

前期的地质综合研究认为,A2 砂体与 A2UP 连通或者 A2 砂体与 A2LOW 连通,通过反演研究,A2UP、A2LOW 这 2 套砂体快速相变至尖灭,与 A2 砂体呈不连续分布,即呈现 3 套互不连通的砂体结构。新钻井 X3 井钻遇了 A2 储层,证实了钻前储层预测结果;由于 X3 井为含水油层,通过对区域的油气水系统分析,证实了反演所揭示的砂体连通关系,即 A2UP、A2LOW、A2 存在 3 套砂体,互不连通。

3 结 论

a. 针对钻井数量少且偏态分布情况下的薄储层预测问题,采用基于正则化算子约束的叠前同步反演技术配合地质统计学反演的地震反演策略,提高了统计学反演的精度,储层反演成果获得了新钻井验证。

b. 地震反演综合研究认为:目标区存在 A2UP、A2LOW、A2 共 3 套砂体,且互不连通,得到了新钻井 X3 井及区域油气水系统分析结果的支持。

参考文献:

- [1] 王镜惠. 地质统计学反演在油藏建模中应用的研究[D]. 西安:西安石油大学,2012.
- [2] 杨锴,艾迪飞,耿建华. 测井、井间地震与地面地震数据联合约束下的地质统计学随机建模方法研究[J]. 地球物理学报, 2012,55(8):2695-2704. (YANG Kai, AI Difei, GENG Jianhua. A new geostatistical inversion and reservoir modeling technique constrained by well-log, crosshole and surface seismic data [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2012,55(8):2695-2704. (in Chinese))
- [3] 李绪宣,胡光义,范廷恩,等. 基于地震驱动的海上油气田储层地质建模方法[J]. 中国海上油气,2011,23(3):143-147. (LI Xuxuan, HU Guangyi, FAN Ting'en, et al. A method of geological reservoir modeling based on seismic drive for offshore fields [J]. China Offshore Oil and Gas, 2011,23(3):143-147. (in Chinese))
- [4] 刘振峰. 致密砂岩油气藏储层建模技术方案及其应用[J]. 地球物理学进展,2014,29(2):815-823. (LIU Zhenfeng. Reservoir modeling program for tight oil & gas sands and its applications [J]. Progress in Geophysics, 2014,29(2):815-823. (in Chinese))
- [5] 刘焕荣. 实验变异函数及其理论模型的计算与拟合研究[D]. 云南:昆明理工大学,2014.
- [6] 王海虹. 地质统计学在石油勘探开发中的应用[D]. 黑龙江:东北石油大学,2013.
- [7] 姜文龙,杨锴. 岩石物理参数高分辨率地质统计学反演[J]. 石油物探,2012,51(6):638-648. (JIANG Wenlong, YANG Kai. Petrophysical parameters of high resolution geostatistical inversion [J]. Journal of petroleum exploration, 2012,51(6):638-648. (in Chinese))
- [8] 韩东,胡向阳,邹兴威,等. 基于地质统计学反演的缝洞储集体物性定量评价[J]. 地球物理学进展,2016,31(2):655-661. (HAN Dong, HU Xiangyang, WU Xingwei, et al. Quantitative evaluation for porosity of the fracture-cavity reservoir based on geostatistical inversion [J]. Progress in Geophysics, 2016,31(2):655-661. (in Chinese))
- [9] 梁立锋,但志伟,陈剑锋,等. 叠前密度反演的误差对含气饱和度估算的影响[J]. 工程地球物理学报,2011,8(3):257-

260. (LIANG Lifeng, DAN Zhiwei, CHEN Jianfeng, et al. The Influence of prestack density inversion error on gas saturation estimate [J]. Journal of engineering geophysics, 2011, 8(3): 257-260. (in Chinese))
- [10] ARTURO C, CARLOS T V, TIM F. Sensitivity analysis of data-related factors controlling AVA simultaneous inversion of partially stacked seismic amplitude data: Application to deepwater hydrocarbon reservoirs in the central Gulf of Mexico [J]. Geophysics, 2007, 72(1): C19-C29.
- [11] ZHANG Hongbing, SHANG Zuoping, YANG Changchun. Estimation of regular parameters for the impedance inversion [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2005, 48(1): 181-188.
- [12] ZHANG Hongbing, SHANG Zuoping, YANG Changchun. A non-linear regularized constrained impedance inversion [J]. Geophysical Prospecting, 2007, 55(6): 819-833.
- [13] ZHANG Hongbing, SHANG Zuoping, YANG Changchun. Adaptive reconstruction method of impedance model with absolute and relative constraints [J]. Journal of Applied Geophysics, 2009, 67(2): 114-124.
- [14] ZHANG Hongbing, YANG Changchun. A impedance constrained inversion method controlling by regular parameters [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2003, 46(6): 827-834.
- [15] ZHANG Jiashu, LYU Songfeng, LIU Yang. AVO inversion based on generalized extreme value distribution with adaptive parameter estimation [J]. Journal of Applied Geophysics, 2013, 98(11): 11-20.
- [16] ZHANG Zhigang, HUANG Lianjie, LIN Youzuo. Double-difference elastic-waveform inversion with prior information for time-lapse monitoring [J]. Geophysics, 2013, 78(6): R259-R273.
- [17] YAN Zhe, GU Hanming. Non-linear prestack seismic inversion with global optimization using an edge-preserving smoothing filter [J]. Geophysical Prospecting, 2013, 61(4): 747-760.

· 简 讯 ·

我国将开展河长制专项整治行动

全面推行河长制工作部际联席会议第一次全体会议 2017 年 5 月 2 日在北京召开。水利部部长、联席会议召集人陈雷表示,将针对侵占水域岸线、围垦湖泊、非法采砂、非法排污、破坏航道、非法养殖、电毒炸鱼以及河道黑臭水体、垃圾堆放等,开展清理整治和专项执法行动,严厉打击涉河湖违法违规行,维护良好的河湖管理秩序。

陈雷指出,全面推行河长制工作时间紧、任务重、要求高。目前,各地推进力度和工作进展不平衡,少数地区对推行河长制重视不够,有的市、县、乡工作进展相对缓慢,有的地方河长制实施方案深度不足,针对性和操作性有待提高。

陈雷强调,下一步,联席会议各成员单位要督促指导地方相关部门结合当地实际,按照“一河一策”要求,将有关任务细化实化、落实到位,因地制宜探索创新河湖管理保护模式。建立工作台账,明确目标任务、时限要求和量化指标,对地方落实河长制工作任务开展经常性督促检查,今年年底水利部和环保部将组织对各地全面推行河长制工作进展情况开展中期评估。动态跟踪各地河长制任务落实情况,总结提炼加强河湖管理保护的好经验好做法,及时汇总报送。发挥联席会议作用,共同推动河长制各项任务的全面落实。

据了解,目前,全国 31 个省(区、市)和新疆生产建设兵团均落实了河长制办公室或工作牵头部门,细化了责任分工。各省级工作方案已全部编制完成,其中 30 个省级工作方案已印发实施或经党委、政府审议通过,25 个省份已明确省级总河长和主要河湖的省级河长。

(本刊编辑部供稿)