

文章编号: 0253 - 9985 (2009) 02 - 0240 - 05

# 基于确定性和随机模型的薄储层岩性预测

李 军<sup>1</sup>, 熊利平<sup>1</sup>, 赵为永<sup>2</sup>, 刘 建<sup>3</sup>

(1. 中国石油化工股份有限公司 石油勘探开发研究院, 北京 100083; 2 中国石油天然气股份有限公司 青海油田分公司 勘探开发研究院, 甘肃 敦煌 736202; 3 中国石油化工股份有限公司 胜利油田有限公司 滨南采油厂地质研究所, 山东 滨州 256606)

**摘要:**三角洲前缘地区一直是油气勘探的重点, 但大多数情况下砂泥岩波阻抗值重叠, 而且薄砂层较多, 地震数据反演结果达不到分辨薄层的精度, 致使无法准确预测砂体分布规律。从综合利用不同储层建模技术各自优势识别薄砂层的思路出发, 针对三角洲前缘地区的特点提出了确定性建模和随机建模联合的方法, 即首先用确定性建模得到声波波阻抗, 在此基础上用随机模拟方法得到薄砂层的展布。采用的具体方法为地震与测井联合反演方法及马尔可夫链随机模拟方法, 随后按照此方法对松辽盆地北部 Y 地区进行了试验, 最终得到更为准确的薄砂体预测结果。

**关键词:**岩性预测; 薄砂层; 确定性建模; 随机建模; 松辽盆地

中图分类号: P631.4 文献标识码: A

## Lithology prediction of thin reservoirs based on deterministic and stochastic models

Li Jun<sup>1</sup>, Xiong Liping<sup>1</sup>, Zhao Weiyong<sup>2</sup>, Liu Jian<sup>3</sup>

(1. SINOPEC Exploration & Production Research Institute, Beijing 100083, China;

2. Exploration and Development Research Institute of PetroChina Qinghai Oilfield, Dunhuang, Gansu 736202, China;

3. Institute of Geology, Binnan Oil Production Plant of SINOPEC Shengli Oilfield Company, Binzhou, Shandong 25660, China)

**Abstract:** The delta front is always one of the focuses for oil and gas exploration. However, reservoirs in delta front commonly occur as thin sandstone layers, which cannot be recognized accurately for the low resolution of seismic inversion, hence the distribution pattern of sandbodies could not be accurately predicted, leading to the difficulties for exploration and production. Taking advantage of various reservoir modeling techniques, this paper puts forward a new methodology of joint deterministic-stochastic modeling for lithology prediction of thin reservoirs in delta front areas. It first obtains acoustic impedance through deterministic modeling, and then predicts distribution of thin reservoirs through stochastic modeling. The specific methods used are joint seismic-log inversion and Markov chain modeling. Case study in the Y block of the northern Songliao Basin shows that more accurate prediction of thin sand layers could be achieved.

**Key words:** lithology prediction; thin sand layer; deterministic modeling; stochastic modeling; Songliao Basin

随着大多数构造油气藏已被勘探发现, 勘探家们担负着如何找到更多的隐蔽岩性油气藏的艰巨任务, 而开展隐蔽岩性油气藏的勘探, 必须依靠地质与地球物理技术的发展。如三角洲前缘地区一直是勘探家们所关注的地区<sup>[1]</sup>, 但是由于此地

区砂层较薄, 油气多以隐蔽岩性油气藏的形式存在, 而且常规地震满足不了薄储层刻画的要求, 给勘探开发带来了一定的困难。目前在建立储层地质模型方法中, 一般分为确定性建模和随机建模两类方法, 其各自有着不同的特点和优势, 确定性

收稿日期: 2008 - 12 - 12。

第一作者简介: 李军 (1976—), 工程师, 地球物理与储层预测。

基金项目: 中国石油化工集团公司科技攻关项目 (JP06001)。

建模结果虽然分辨率束缚于原始地震数据的主频,预测结果精度不高,但结果与地震资料紧密相关,如波阻抗反演结果可得到研究区域砂体分布骨架模型<sup>[1]</sup>。而随机建模结果虽然不唯一具有随机性,但加入相关性较好的约束数据时其结果确定性增加,提高了预测的准确度<sup>[2]</sup>。因此本文从综合两种方法各自优势的思路出发,选择确定性模型和随机模型中代表性方法来对薄层砂岩空间展布进行预测,并对相关技术探讨研究,以达到提高岩性预测准确度和精度的目的。

## 1 方法与原理

确定性建模方法是指对井间未知区给出确定性的预测结果,从具有确定性资料的控制点出发,推测出点间确定的、唯一的、真实的储层参数,包括储层沉积学方法、储层地震学方法和地质统计学克里金等方法<sup>[3]</sup>。地震学方法中的地震反演方法为当前最常用的方法,地震反演技术就是综合运用地震、测井、地质等资料以揭示地下目标层(储层、油气层、煤层等)的空间几何形态(包括目标层厚度、顶底构造形态、延伸方向、延伸范围、尖灭位置等)和目标层微观特征,它是将大面积的连续分布的地震资料与具有高分辨率的井点测井资料进行匹配、转换和结合的过程。随着油气勘探对地震反演技术的需求和计算机技术水平的提高,近年来地震波阻抗反演技术得到了迅速发展,出现了各种各样的地震反演软件和反演方法,已被各油田广泛应用于勘探开发生产中,成为储层预测和地震油藏描述的主要及必备的技术手段。

而随机建模方法是近二十多年才发展起来的一门新型技术,其主要是运用露头、测井、地震以及其它地球物理资料等来对井间的储层发育情况进行预测<sup>[2]</sup>。随机模拟技术充分利用已知的信息,根据随机模型,可以提供任意多个等概率的储层预测结果,当数据信息不足时,建模结果不确定性就大一些,反之,当已知数据比较多时,不确定性就小一些。这种方法的优点是随机建模结果可以真实地反映储层属性的非均质性,可给地质人员提供不同参考。随机模拟方法有很多种,如序贯指示方法、截断高斯方法、马尔可夫方法及示性点过程方法等,其中大多依靠变差函数和协方差函数来描述储层的非均质性,而马尔可夫链模型

对空间结构的描述则不需要变差函数和协方差函数,它利用变量状态的转移概率矩阵对随机过程的未来状态进行分析预测,由于该模型考虑了地质体空间分布的连续性、不对称性和各向异性等特征,在实际应用中能更准确地反映地质体的空间分布特征<sup>[4~6]</sup>,其模型适用于地层在空间具有短程相关性、沉积规律较明显的地区,所以本文选取马尔可夫链随机模拟方法作为随机建模方法。

### 1.1 波阻抗反演

地震波阻抗反演从方法上大致可分为基于波动理论的波动方程反演和基于褶积模型的反演两大类<sup>[7]</sup>。其中以褶积模型为基础的地震反演,由于算法简单,对地震噪音敏感性小,一般情况下都能得到一个稳定的解,在生产中得到了广泛地应用。以褶积模型为基础的地震反演有递归反演<sup>[8]</sup>、约束稀疏脉冲反演<sup>[8,9]</sup>、地震约束测井反演等。递归反演用在无井或少井的情况下,但结果粗糙,在岩性预测中不多用,而多井的地震约束测井反演分辨率较高,但其对具备的数据要求高,一般要求钻井数在 9~10 口以上,因此此种方法在实际中往往难以应用,本文采用约束稀疏脉冲反演方法做为地震反演方法,其原理认为地震反射系数是由一系列大的反射系数叠加在高斯分布的小反射系数的背景上构成,反演的目的是通过迭代算法使目标函数值最小,目标函数  $J$  可以表示为:

$$J = \sum_{i=1}^L (r_i)^p + \sum_{i=1}^L (d_i - s_i)^q + \sum_{i=1}^L (t_i - Z_i)^2 \quad (1)$$

式中:  $r_i$  为样点的反射系数;  $Z_i$  为样点的波阻抗;  $d_i$  是原始地震道;  $s_i$  是合成地震道;  $t_i$  是用户提供的波阻抗趋势;  $\omega$  为趋势最小匹配加权因子;  $p, q$  为  $L$  模因子;  $i$  是地震道样点序号;  $\lambda$  为数据不匹配加权因子。

### 1.2 马尔可夫链随机模拟

马尔可夫链模型<sup>[10]</sup>是最早提出的一种进行随机过程分析的模型,这种随机模型的主要思想是认为系统在现在时刻  $t_0$  状态已知的情况下,其在时刻  $t > t_0$  状态的条件分布与在  $t_0$  之前的状态无关。也就是在已知过程“现在”的条件下,其“将来”不依赖于“过去”<sup>[11]</sup>。数学上把这种效应称为“马尔可夫性”或“无后效性”,其数学表达为:

$$Pr\{X_n = k \mid X_0 = h, \dots, X_{n-1} = j\} =$$

$$Pr\{X_n = k / X_{n-1} = j\} \quad (2)$$

其中  $X_0, X_{n-1}, X_n$  为马尔可夫链上第 1、第  $n$  以及第  $n+1$  个位置的状态;  $k, h, j$  为其状态取值。

随机过程中的时间参数也可以是其它的量,如在解决空间问题时用距离参数<sup>[12]</sup>。在一维的情况下,马尔可夫链可由一个简单的转移概率矩阵来表示,见公式(3),矩阵中的元素对应于  $n$  种不同状态之间的转移概率,每个元素都大于或等于 0,每行元素之和为 1。

该模型用于岩性模拟时,可以认为:沉积过程在整体行为上具有某种确定性规律的同时,由于受到各种环境因素的影响在局部范围内也具有随机性,从而沉积系统的变化可以被视为一个马尔可夫过程,相应的地层属性(如岩相、沉积相)具有短程相关性,即马尔可夫性<sup>[13,14]</sup>。在模拟过程中,未知点的岩性模拟结果受转移概率矩阵与约束数据的控制,用蒙特卡罗方法以概率采样的形式实现。

$$P = \begin{matrix} & \begin{matrix} \text{状态 1} & \text{状态 2} & \dots & \text{状态 } n \end{matrix} \\ \begin{matrix} \text{状态 1} \\ \text{状态 2} \\ \dots \\ \text{状态 } n \end{matrix} & \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & \dots & p_{1n} \\ p_{21} & p_{22} & \dots & p_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ p_{n1} & p_{n2} & \dots & p_{nn} \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (3)$$

## 2 联合建模

在理想情况下波阻抗、伽马等电性数据可以区分出不同的岩性,但往往在实际应用中测井电性特征对岩性不敏感,使得测井曲线无法完全区分岩性,此外如果存在火山岩、灰岩等复杂岩性,会造成岩性识别更为困难。常用的反演波阻抗数据在横向连续性较好,但由于反演结果受原始地震资料频带的限制,纵向分辨率往往不高,单纯追求反演结果高分辨率会造成假象。可以利用波阻抗对岩性有一定相关性的特点,在得到波阻抗数据的基础上,在随机建模中以波阻抗为岩性约束条件,则岩性预测结果的准确性和分辨率将大大提高。

基于以上思路,提出如下的联合建模方法步骤如下。

1) 地震数据、层位、测井资料的加载,合成记录的制作,初始模型建立及波阻抗反演;

2) 统计已知井中波阻抗值与岩性的关系,建立不同波阻抗范围的岩性概率表;

3) 将工区进行网格划分,测井位置上根据网格的大小将岩性网格化;

4) 将第 1 步的结果,即波阻抗数据体粗化后对所有待模拟的网格赋值;

5) 网格顶层初始化后,对每一个待模拟网格要根据周围网格已知岩性和待模拟网格的波阻抗数据计算各种岩性出现的概率;

6) 依次将各网格用蒙特卡罗法赋值,不同岩性赋予不同的颜色,实现一次模拟;

7) 重复步骤 6,直到得到满意的结果。

计算过程中关键步骤是反演中储层并震匹配分析、地震子波的提取以及初始波阻抗模型的建立,此外还要注意模拟过程中网格步长的选取,网格步长太小会造成模拟时间的大大增加,网格步长太大会达不到分辨薄储层的目的。

## 3 实例研究

### 3.1 工区概况

研究工区位于松辽盆地某油田内,油气聚集规律为大型湖泊三角洲前缘相带控制了岩性油藏在空间上的分布。该区的石油地质条件十分复杂,具有构造幅度低、断层断距小且延伸距离短、砂体发育且横向变化快并呈薄互层形式存在等特点。砂体类型以水下分流河道砂和前缘席状砂为主,一般为 1~3m 的薄层粉砂岩,主要目的层为 t1,工区主要岩性有泥岩、粉砂岩、泥质粉砂岩、粉砂质泥岩等。研究工区东西长 6 000 m,南北长 8 000 m,共钻井 4 口,分别为 Y1 井、Y2 井、Y8 井以及 Y9 井(图 1),本次岩性预测以过 Y1 井、Y2 井、Y8 井的剖面为例,其连井地震剖面如图 2 所示。



图 1 Y 地区工区示意图

Fig. 1 Location of the Y block

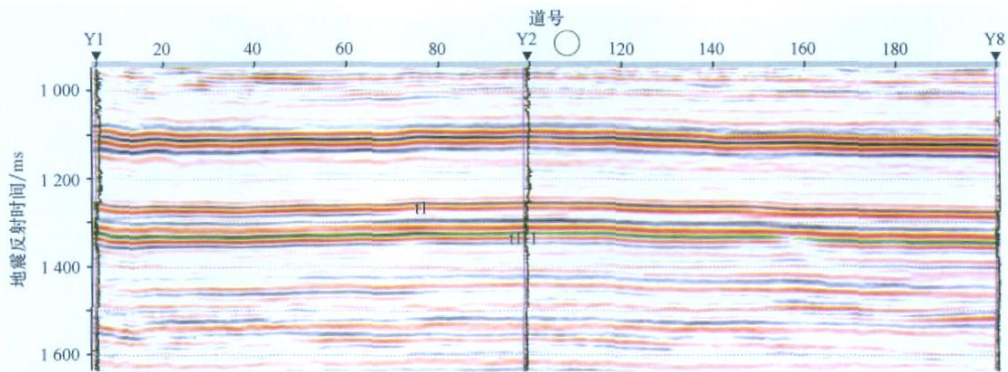


图 2 连井地震剖面

Fig. 2 Seismic section with three wells tied

### 3.2 岩性预测

首先对工区三口井的岩性与波阻抗值进行了统计,将岩性划分为两大类,即目标岩性粉砂岩和泥质粉砂岩划分为一类,粉砂质泥岩和泥岩划分为一类,并作出了两者的交汇图(图 3),由图可知,虽然砂岩采样点大多落在高波阻抗值区间,泥岩采样点大多落在低波阻抗值区间,但两者不能由确定的界线区分开来,即用波阻抗结果无法精确地描述砂体。

图 2 中 t1, t1 - 1 为目的层的顶、底界面,可以看出目的层分布较平缓,起伏不大,在地震剖面上表现为连续的强振幅。经过层位标定、初始模型的建立、波阻抗反演之后,其结果如图 4 所示,反演剖面中红色表示高阻抗值,蓝色为低阻抗值,因为粉砂岩大部分对应较高的波阻抗值区间,所以红色区为砂体发育的主要位置。由于反演结果一方面受到分辨率限制,另一方面无法识别高波阻抗泥岩,只能说反演结果对砂体分布有粗略的

揭示。

在随后的马尔可夫链随机模拟中,以波阻抗结果作为软约束数据进行岩性预测。取模拟井段为 1 550 ~ 1 750 m,网格取垂直方向的步长为 2 m,水平方向的步长为 40 m,模拟剖面为 217 × 100 的矩形系统。图 5 为多个随机模拟结果之一,虽然在地震剖面上、波阻抗剖面上地层分布较连续,

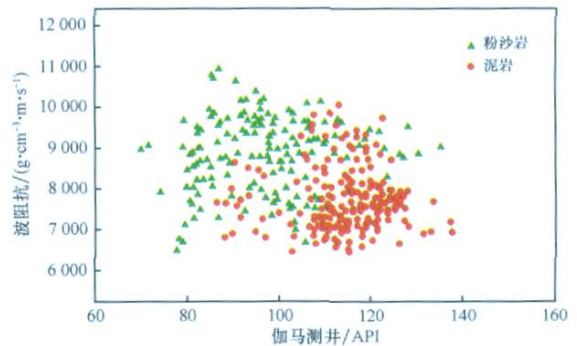


图 3 波阻抗与岩性交汇图

Fig. 3 Cross plot of impedance and lithology

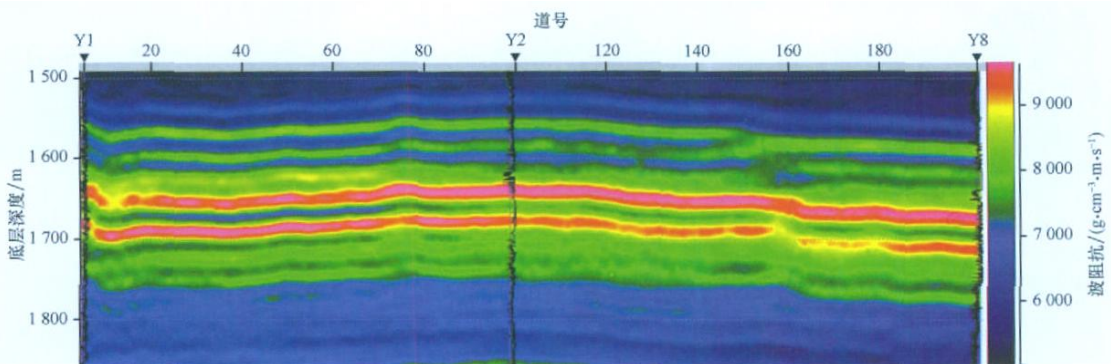


图 4 连井的波阻抗反演剖面

Fig. 4 Acoustic impedance inversion section with three wells tied

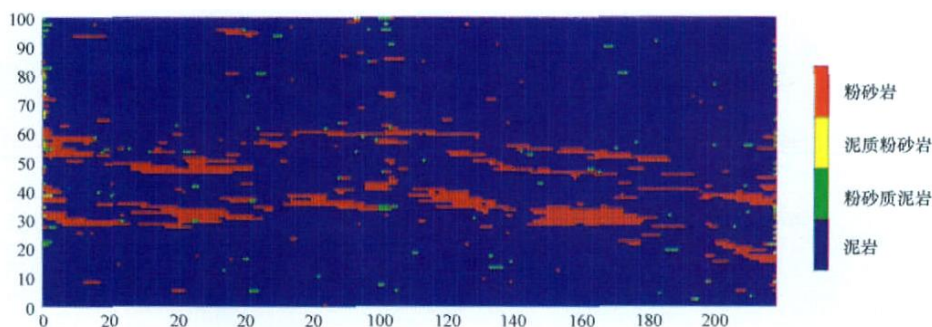


图 5 随机模拟结果剖面 (纵、横坐标为网格数)

Fig. 5 Section of stochastic modeling (the horizontal and vertical coordinates are the number of grid)

但从最终模拟结果可知其岩性分布是不连续的,且显示出了砂体的分布规律,即砂体在深度 1 700 m 上下发育,在水平方向上延伸 400 ~ 500 m 左右,可细分为 3 小层,其中上两层较薄,厚度在 2 ~ 4 m,最底下一层较厚,厚度在 10 m 左右,各层在空间上相互叠置,彼此之间并不连通。而泥岩作为背景岩性在剖面上广泛存在,粉砂质泥岩和泥质粉砂岩在工区不太发育。

## 4 结论

1) 确定性建模得到的波阻抗反演数据体可反映出砂体发育的主要位置,而随机建模的模拟结果在此基础上可得到分辨率较高的薄砂体分布,其更接近于地下的实际情况。

2) 确定性建模的结果受到的人为因素影响较多,如层位的解释方案的合理性,初始模型的建立,合成记录的制作等,此外,提高地震资料自身分辨率是减小多解性的重要途径。而在随机建模过程中,约束数据的多少及其相关性的高低决定着结果的精确度。

3) 在薄储层岩性预测中如三角洲前缘地区等,如果把确定性建模与随机建模结合起来,将会得到更加准确的结果。

## 参 考 文 献

1 孙立春,余连勇,柳永杰,等.三角洲沉积砂体骨架模型及储层属性地质模型的实现 - 以渤海某油田为例 [J]. 中国海上石油, 2006, 18 (3): 178 ~ 182

2 李军,郝天珧. 油气储层随机模拟方法综述 [J]. 地球物理学进展, 2006, 21 (2): 458 ~ 464

3 刘振峰,郝天珧,杨长春. 沉积模型和储层随机建模 [J]. 地球物理学进展, 2003, 18 (3): 519 ~ 523

4 Li W, Li B, Shi Y. Markov-chain simulation of soil textural profiles [J]. Geoderma, 1999, 92: 37 - 53

5 Carle S F, Fogg G E. Modeling spatial variability with one and multi-dimensional continuous Markov chains [J]. Mathematical Geology, 1997, 29 (7): 891 - 917

6 Elfeki A, Dekking M. A Markov chain model for subsurface characterization: Theory and applications [J]. Mathematical Geology, 2001, 33 (5): 568 - 589

7 范洪军,李军,肖毓祥,等. 地震分频技术在扇三角洲演化过程中的应用 [J]. 石油与天然气地质, 2007, 28 (5): 682 ~ 686, 692

8 胡水清,韩大臣,夏专庄. 高含水期地震约束储层建模技术 [J]. 石油与天然气地质, 2008, 29 (1): 128 ~ 134

9 穆星. 稀疏脉冲波阻抗反演参数对反演效果的影响研究 [J]. 工程地球物理学报, 2005, 2 (2): 104 ~ 108

10 刘振峰,郝天珧,方辉. 用 Markov 链模型随机模拟储层岩相空间展布 [J]. 石油学报, 2005, 26 (5): 57 ~ 60

11 盛骤,谢式千,潘承毅. 概率论与数理统计 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2002: 354 ~ 367

12 李汉林,赵永军. 石油数学地质 [M]. 东营: 石油大学出版社, 1998: 247 ~ 253

13 Schwarzer W. Repetitions and cycles in stratigraphy [J]. Earth Sci Rev, 2000, 50: 51 - 75

14 李军,郝天珧,刘建,等. 基于不同邻域系统的马尔可夫链模型的储层岩相随机模拟 [J]. 现代地质, 2006, 20 (4): 621 ~ 627

(编辑 董立)