

文章编号:0253-9985(2010)02-0244-06

双调和样条内插方法在测井和地震资料整合中的应用

夏吉庄

(中国石油化工股份有限公司 胜利油田分公司 物探研究院,山东 东营 257000)

摘要:利用格林函数,研究了双调和样条内插方法的原理及特点,推导了一维空间到多维空间双调和样条内插公式。这种算法的一种特点是滤波的曲率最小。在运用双调和样条内插方法的基础上,利用网格节点值会聚算法,把网格节点的值向着被它们包围的测井构造数据处的值的趋近、会聚,将分散的各口井的测井构造数据以一定的形式影响、改变附近的地震构造数据。从而,实现了测井数据和地震数据的整合。

通过胜利油田永3断块典型的复杂构造油气藏测井和地震数据的应用实例,并对其地质效果进行了讨论,证明了双调和样条内插方法的有效性。实际应用地实例显示,采用双调和样条插值算法,基于高精度三维地震数据作出的构造图的分辨率较高的特性,较好克服了单纯利用测井资料作出的构造图的分辨率较低而产生的误解。双调和样条插值算法,较好地解决了这两种资料在预测地层构造面中的有效整合,消除了单一资料的不确定性,使预测结果更准确、更合理。

关键词:双调和样条内插;格林函数;测井数据;地震数据;构造面

中图分类号:TE122.2 **文献标识码:**A

An application of biharmonic spline interpolation to integration of logging and seismic data

Xia Jizhuang

(Geophysical Prospecting Research Institute, Shengli Oilfield Company, SINOPEC, Dongying, Shandong 257015, China)

Abstract: By employing Green's function, the principle and pattern of biharmonic spline interpolation are studied, and the formulas of one to multiple dimensional biharmonic spline interpolation are deduced. One feature of this algorithm is its minimal filter curvature. On a basis of applying the biharmonic spline interpolation, a convergence algorithm of grid node value is used to approximate the grid-node values to their surrounded values at logging structure data, and to make the separate logging structure data in every well impact and change adjacent seismic structure data in a certain way, therefore resulting in an integration of logging and seismic data.

The effect of this biharmonic spline interpolation has been verified by its application in the typical complex reservoir in Yong-3 faulted block, Shengli oilfield. The application results indicated that the structural maps produced by this method on a basis of 3D seismic data with high precision can well avoid mistakes in the structural maps with lower resolution produced by only using logging data, due to higher resolution of the former maps. This method of biharmonic spline interpolation can effectively integrate seismic data with logging data in predicting stratigraphic-structural surfaces, and eliminate the uncertainties resulted from using a single type of data, thus making the prediction more accurate and reliable.

Key words: biharmonic spline interpolation, Green's function, logging data, seismic data, structural surface

随着油气田开发的油藏综合地球物理技术的快速发展,国内油气田对结合地震资料,发挥其横

向密集采样的优势,建立高精度地质模型的技术具有广泛的需求。然而,受技术和方法的制约,目

收稿日期:2009-09-25。

作者简介:夏吉庄(1955—),男,高级工程师、硕士,油藏精细描述。

基金项目:国家“863”重点项目(2007AA060500)。

前常规的开发阶段精细油藏地质建模技术,主要是基于测井资料。由于测井资料的分辨率低且井网分布不均,缺乏空间上高精度的地球物理信息约束,这样的建模技术很难满足油藏开发中后期提高采收率的需要^[3-5,10,11]。

测井资料与地震资料相结合进行地质构造的研究,是这两个技术学科相互融合匹配的过程。测井资料具有更高的纵向地质分辨率,通过多井对比可以精细确定地层分层点和断点数据。高精度三维地震具有更高的空间分辨率及空间组合优势,可以把分散、孤立的地质异常点信息,组合推断为有意义的地质事件。把测井资料与地震资料的有效融合,可发挥各种资料优势,消除单一资料的多解性,增加综合研究成果的确定性。

如何建立既符合地质构造运动演化规律,并且使得构造面保持较好的光滑性是该建模过程的一个重点。单纯利用测井数据的时候,最小曲率插值是地质学家们所满意的一种方法。然而,当同时利用测井数据和地震数据的时候,问题就变得复杂了。此时,既要考虑到构造面的光滑性问题,又要同时考虑测井数据和地震数据的通过性问题。所谓构造面具有测井数据的通过性,就是构造面在井点处的值等于这个井点处的表示构造高度的测井数据。同时,构造面具有地震数据的通过性,就是构造面在地震数据采样点的高度,应该等于相应的地震采样值。

围绕着测井数据和地震数据的整合问题,不断有新的方法出现,如协同克里金估计方法^[6],贝叶斯克里金方法^[7]等,但都有一定的局限性。

本文深入研究了双调和样条内插方法,是一种解决测井数据和地震数据综合应用的有效途径。

1 双调和样条内插

格林函数,也称为点源函数、或影响函数,是一种用来求解有边界条件的微分方程式的函数,它在物理学和力学中有着许多应用。格林函数的名称是来自于英国数学家乔治·格林(George Green)。他最先在1830年代提出这个概念。力学中的许多问题,如弹性力学和薄板弯曲等,均表现为利用格林函数方法求解双调和方程^[8]。

双调和算子 ∇^4 是在一般的调和算子 ∇^2 的基础上而定义的。调和算子 ∇^2 也称为拉普拉斯算子。

调和函数就是满足拉普拉斯方程的函数。作为双调和方程的解,一维和二维格林函数,可以解决不规则空间数据点的最小曲率插值问题。在每个数据点,插值曲线或插值曲面都是格林函数的一个线性组合。其加权系数则是通过解一个线性方程求得。

双调和样条内插,或称双调和样条滤波,是以格林函数为基础的双调和方程的求解过程。一维或二维空间的双调和样条插值技术,和三维空间的样条插值是等价的,而三维空间的插值就相当于多重二维的插值。

双调和样条滤波方法中,需要的模型参数的数目可以少于数据点的数目,使方程代表的线性系统是超定的。这时可用最小二乘问题去求解。模型参数的数量可以进行如此的调整,以便使得拟合的标准差等于原始数据的标准差。当使用大量不确定性的数据,或者是当不确定性的数据与确定性的数据结合时,此种特性显得非常重要。

双调和样条内插具有如下3个特点^[1]。首先,它是一个最小曲率插值。其次,格林公式的个数可以少于数据点的个数,从而使插值曲线不会与不准确的数据点相匹配。这种数据点数的减少也加强了计算的稳定性。最后,当用斜率和数值同时去确定一个曲面时,这个方法要比样条方法更灵活。

1.1 一维双调和样条内插方法

在一组不规则的空间数据点之间,通常可以利用3次样条函数找出最平滑的曲线或曲面。从力学的角度看,这个过程就是强迫一个弹性杆或弹性板去匹配各个数据点。这个插值产生的曲线或曲面满足双调和方程,因此具有最小曲率。

需要解决的问题是:通过 N 个数据点,找到一个双调和函数。以前的绘图员解决这个问题时,将一些重力加载于一个弹性杆或样条,并确定加力的空间位置 $x_i (i=1, \dots, 6)$,使得样条可以通过数据点。这些加于样条的力 $\alpha_i (i=1, \dots, 6)$,使得样条在重力作用下保持弯曲(图1)。图1的纵坐标 $w(x)$ 表示内插结果在空间位置 x 处的位移。当内插结果的空间位移 $w(x_i) = w_i (i=1, \dots, 6)$ 较小时,样条在除重力之外的其他地方,都有0阶,一直到4阶导数。

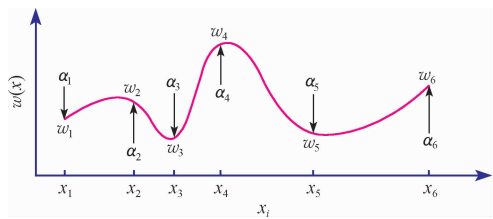


图 1 应用于弹性梁的各点的力 α_j 及其双调和函数 $w(x)$ ^[1]

Fig. 1 Force (α_j) at every point of elastic beam and their biharmonic functions [$w(x)$]^[1]

样条的格林函数的点压力满足双调和方程

$$\frac{d^4 \Phi(x)}{dx^4} = 6\delta(x) \tag{1}$$

这里, x 是空间位置; $\delta(x)$ 是 Delta 函数, 并满足:

$$\delta(x) \begin{cases} = \infty & (x = 0) \\ = 0 & (x \neq 0) \end{cases} \tag{2}$$

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \delta(x) dx = 1 \tag{3}$$

格林函数 $\Phi(x)$ 就是这个方程(1)的一个解, 表示内插曲线或内插曲面的位移, 是空间位置 x 的函数, 可以写成

$$\Phi(x) = |x|^3 \tag{4}$$

当这个格林函数用来对 N 个在 x_i 的数据点 w_i 进行插值时, 以上的双调和方程(1)就成为

$$\frac{d^4 w}{dx^4} = \sum_{j=1}^N 6\alpha_j \delta(x - x_j) \tag{5}$$

$$w(x_i) = w_i \tag{6}$$

式中: w_i 是内插曲线或内插曲面在空间位置 x_i 处的位移; x_j 为加权系数。

方程(5)和(6)的特解是可以表示成(7)右端, 也即为各个格林函数的一个线性组合。这些格林函数的中心在每个数据点。

$$w(x) = \sum_{j=1}^N \alpha_j |x - x_j|^3 \tag{7}$$

其中, 各个加权系数 α_j 可以通过解下面的线性方程组获得:

$$w_i = \sum_{j=1}^N \alpha_j |x_i - x_j|^3 \tag{8}$$

如果使用的斜率 s_i 的个数多于数据的个数, 那么每一个点压力的强度 α_j 的个数取决于下面的线性方程的解:

$$s_i = 3 \sum_{j=1}^N \alpha_j |x_i - x_j| (x_i - x_j) \tag{9}$$

图 2 的纵坐标 x 、横坐标 $w(x)$ 和的含义和图 1

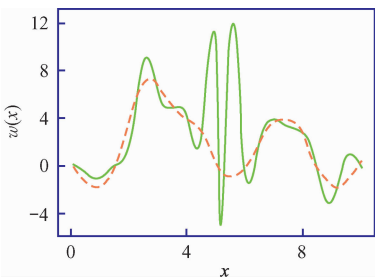


图 2 21 个数据点的三次样条的插值的结果(虚线), 和 11 个数据的双调和样条内插的结果(实线)^[1]

Fig. 2 Cubic spline interpolation result (dashed line) of 21 data points and biharmonic spline interpolation result (solid line) of 11 data points^[1]

中的相同。其中, 利用 21 个数据, 3 次样条内插的结果是用实线表示。然后, 当 21 个数据中一个隔一个地被删去后, 利用剩下的 11 个数据, 双调和样条内插的结果就是虚线。两者之间有着明显的区别。

双调和样条内插方法的一个重要进步就是: 需要的模型参数(例如 α_j 的值)可以少于数据点的数目。既然这样, 相应的线性系统是超定的, 可以作为一个最小二乘问题去求解。要调整参数的数量, 以便使得拟合的标准差等于原始数据的标准差。这种算法允许利用一个数据隔一个数据点地进行拟合(图 2)。当使用大量不确定的数据, 或者是当不确定数据(如地震解释数据)与确定数据(如测井解释数据)结合时, 此种特性非常重要。在这种情况下, 曲线(曲面)突然凸起的问题就没有这么严重了(图 2)。

1.2 二维或多维双调和样条的插值

双调和技术在二维或多维空间中的导数与一维空间中的导数的作用相似。在 m 维空间中, 利用 N 个数据点的曲面求解问题是

$$\nabla^4 w(x) = \sum_{j=1}^N \alpha_j \delta(x - x_j) \tag{10}$$

$$w(x_i) = w_i \tag{11}$$

其中, ∇^4 是双调和算子, x 是 m 维空间中的一个位置。其通解如下:

$$w(x) = \sum_{j=1}^N \alpha_j \Phi_m(x - x_j) \tag{12}$$

求解线性系统, 可以得到 α_j

$$w_i = \sum_{j=1}^N \alpha_j \Phi_m(x_i - x_j) \tag{13}$$

表 1 给出了一、二维空间中的双调和和格林函数 $\Phi_m(x)$ 。

表1 双调和格林函数

Table 1 Biharmonic Green's function

维数	格林函数 $\Phi_m(x)$	格林函数的 梯度 $\nabla\Phi_m(x)$
1	$ x ^3$	$x x $
2	$ x ^2(\ln x - 1)$	$x(2\ln x - 1)$

2 测井数据和地震数据的整合确定构造面

在使用双调和样条滤波的基础上,采用网格节点值会聚算法 (Convergent Gridder Algorithms) 研究地震数据和测井数据的整合。在这个算法的过程中,这些网格节点处的地震数据向着被它们包围的测井数据处的值趋近、会聚,将分散各口井的测井数据以一定的形式影响附近的地震网格节点上的地震数据。从而形象地说,这个算法实现了网格节点处的地震数据的会聚,达到地震数据和测井数据的有效整合。Roncaglia 等在他们的论文中,利用网格节点值收敛算法把 15 个反射面内插成 15 个地震面。

在图 3 中,地震数据是指在网格节点处(黑色)的数据,它们可以表示一个砂组的底面构造图。红色点是一个测井数据所在的位置,对应的数值是同一个砂组的底面构造图在该井点处的测井数值。图中黑色网格线是原始地震数据的网格线,在这些网格线的每一个交点处,都有一个地震数据相对应。黑色网格线之间的距离就是地震采样点的距离,在这里为 25 m。测井数据点一般都不是网格节点。

该网格节点值会聚算法由如下 3 个步骤组

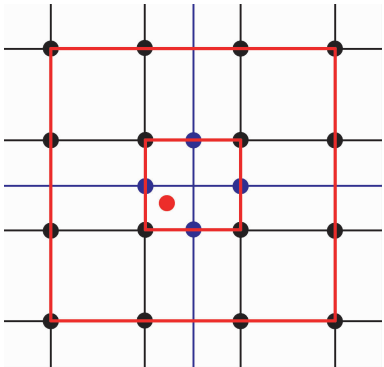


图3 测井数据点(红色)与地震数据网格节点(黑色、和兰色)

Fig. 3 Logging data points(red) and seismic-data grid nodes(black and blue)

成。为了生成出曲率最小、光滑的曲面,以下第一步和第二步主要是为了产生间隔为 5 m 网格节点处的内插值。如果把地震采样点数据直接地顺序相连,由于这些采样点之间距离太大,只能得到一条明显的折线^[9]。这些网格节点在图 3 中以地震数据采样点形成的黑线为基础,以 5 m 为间隔进行加密得来。为了以下叙述简便,把它们称为“加密网格节点”。把这些间隔较小的 2 维节点上的值连接起来,才能显示出曲率最小、光滑的曲面。

第一步,利用图 3 中外层的红色矩形框上的 16 个地震数据(黑色点)和 1 个测井数据(红色点)作为网格节点值会聚算法的输入数据,在间隔为 5 m 的“加密网格节点”处,在内层的红色矩形框和外层的红色矩形框之间的环形区域内,进行双调和样条的内插。同时,需要把地震数据形成的网格的间距进行加密 1 倍,形成了图 3 中内侧矩形框上的蓝色点,而且在第一步这些蓝色点处利用网格节点值会聚算法内插出数值。

第二步,利用在该测井数据周围最近的 4 个地震采样点(也就是在内侧的红色矩形框上的黑色点),再加上第一步滤波形成的、在内侧的红色矩形框上 4 个兰色点数据作为滤波的输入(图 3)。兰色点处的数值原来是不存在的,是通过第一步滤波而生成的。把该测井数据点再加上周围的 8 个网格节点处的 8 个数值,共计 9 个数值,再进行一次双调和样条滤波。显然,与第一步滤波结果相比,第二步滤波结果受到测井数据的影响要来得大。

这一步的双调和样条滤波得到的结果在内侧红色矩形框包围的区域内,生成“加密网格节点”处的内插值。对于第二步形成的内侧区域上的“加密网格节点”和第一步形成的“加密网格节点”,由于双调和样条滤波算法的特性,保证了分别构成的两张曲面在连接处是连续的。

第三步是 将该测井数据点处的最原始的测井数值移动到离其最近的一个“加密网格节点”上,也就是说,把这个“加密网格节点”处的数值修改成该测井数据点处的最原始的测井数值。这个步骤可以保证每一个测井数据点都确切地落在最后形成的构造面上。

以上描述的网格节点值收敛算法,是针对一个测井数据点的。对于每一个测井数据,都需要实施以上的网格节点值收敛算法,以便达到地震数据和测井数据的整合。

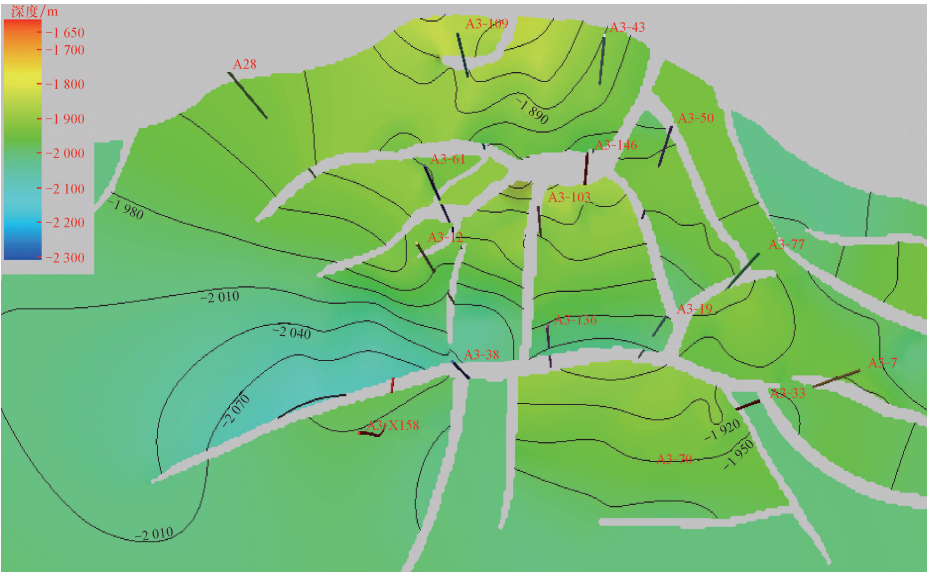


图4 用井点数据插值形成的砂组底面构造图

Fig. 4 Basal structure map of sand bed from interpolation of well point data

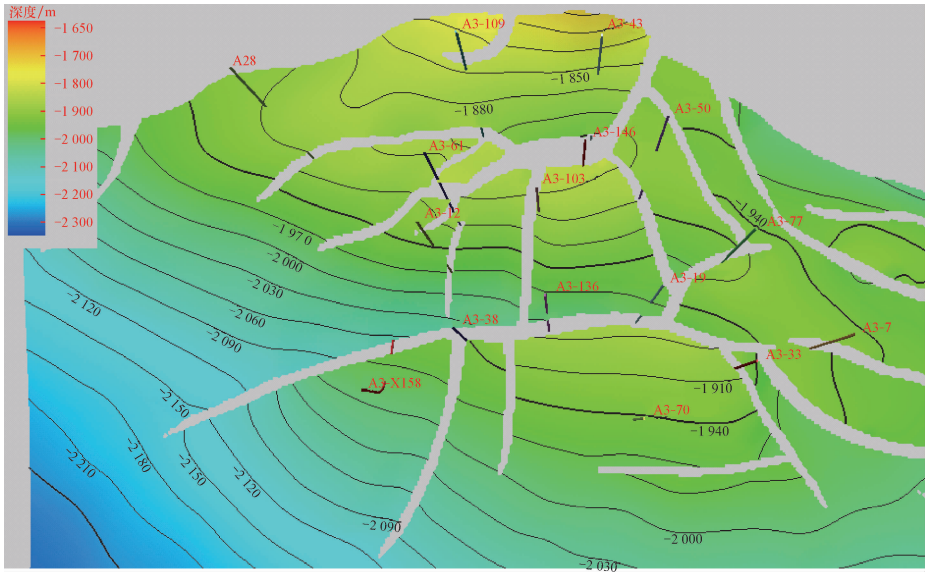


图5 用地震数据形成的砂组底面构造图

Fig. 5 Basal structure map of sand bed from seismic data

3 应用

永3断块位于济阳坳陷东营凹陷永安镇油田南部,东营凹陷的东北部是一个受永南断裂带控制的多油层多断块油气田,面积近10 km²。断块总体上受北界南倾近东西向的永3二级大断层控制,断层落差150~450 m。断块内部又发育二条规模较大的近东西走向的断层,将断块切割为4个台阶,内部由15条小断层切割成16个含油断

块,是一个典型的复杂构造油气藏。

本区有100多口井的测井资料和可细分面元为X,Y,Z方向,分别为25 m,25 m,5 m的高精度三维地震资料。利用本文提到的双调和样条插值算法,将测井资料与高精度三维地震资料进行整合,获得理想的构造建模效果。对于大的地质层位构造面,采用具有外部趋势约束的双调和样条插值算法,以地震资料解释地层的顶、底界面数据(时深转换后)作为趋势,用测井数据对比获得的分层数据联合匹配来建立。中间细分层界面根据

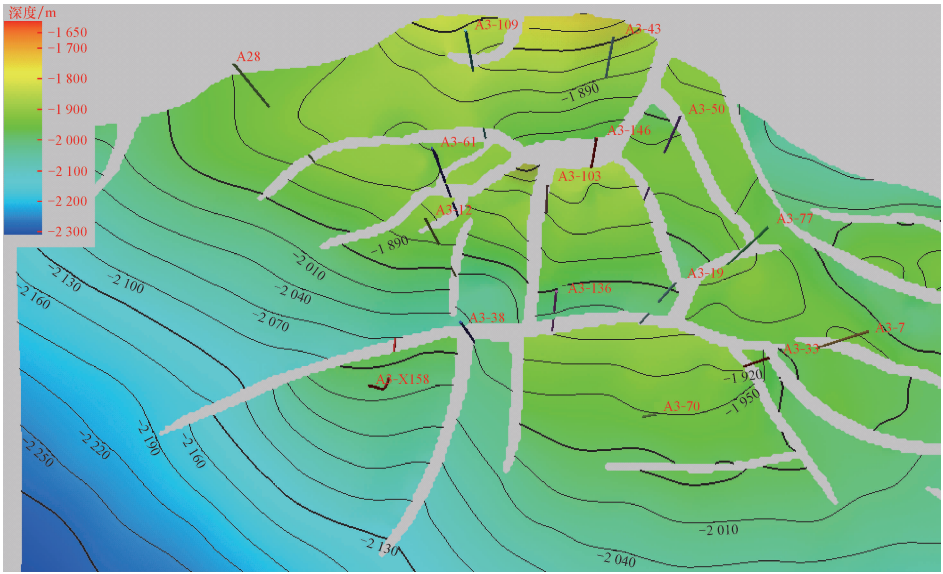


图6 利用井点数据插值及地震数据约束形成的砂组底面构造图

Fig.6 Basal structure map of sand bed from interpolation of well point data and constraint of seismic data

井上划分的地质标志层数据,在大的地质层位约束下通过内插获得。生成的层面作为不同建模单元的纵向分界面,在深度域空间将模型劈分为不同的建模单元。

断层模型反映的是三维空间地层上断面的展布形态。实际建模中,可以利用经过时深转换后的深度域三维地震资料解释的断面信息,建立断层模型。在建立断层模型时,将测井小层对比确定的断点组合形成断层面,与地震解释相对应的断层面通过双调和样条插值算法获得满意的空间断层面。在井点附近保持与对比断面一致,在无井区保持与地震解释断面一致。同时,可以通过对地震数据提取相干体,作为断面模型的一种空间约束和检查方式。

图4表示利用测井对比数据做出的构造图。图5表示利用地震解释数据做出的构造图。图6则表示利用双调和样条插值算法,将测井数据和地震数据整合的情况下得到的构造面。从这些图片中可以明显地看出,只利用井点得到的构造面为“被断层强烈破坏的断鼻构造”,经过地震数据控制处理后的构造面是复杂化的背斜构造。可见,地震控制后的构造面更加合理。

致谢:本文在写作过程中,得到了西安石油大学王家华教授的宝贵支持,作者谨表示衷心的感谢!

参 考 文 献

1 Sandwell D. Biharmonic spline interpolation of GEOS - 3 and

SEASAT altimeter data[J]. Geophysical Research Letter,1987, 14(2):139-142

2 Roncaglia L,Morgans H E G,Arnot M J,et al. Stratigraphy, well correlation and seismic-to-well tie in the Upper Cretaceous to Pliocene interval in the Kupe region,Taranaki Basin,New Zealand [A]. Introduction to the stratigraphic database in petroleum[C]. In:Lower Hutt. New Zealand:GNS Science Report,2008,(7):39

3 胡水清,韩大匡,夏吉庄. 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

4 刘文岭. 地震约束储层地质建模技术[J]. 石油学报,2008,29(1):64~68

5 尤少燕,时应敏,乔玉雷. 利用多尺度资料进行油藏地质建模[J]. 油气地质与采收率,2005,12(3):15~17

6 Lennert d B,Doyen P,Rothenhofer H. 3-D seismic porosity modeling using a new form of cokriging[J]. World Oil,1999,220(5):77-80

7 王家华,周叶. 利用测井数据和地震数据结合的方法绘制地层等深图——贝叶斯克里格技术的应用[A]. 中国地质学会数学地质专业委员会主编,中国数学地质(2)[C]. 北京:地质出版社,1990.5~11

8 祝渊陵. 弹性力学平面问题的双调和方程的格林函数解法[J]. 荆州师专学报(自然科学版),1999,22(2):12~14

9 杨化斌,王家华. 最小张力法在地层面光滑显示中的应用[J]. 西安石油学院学报,2003,17(2):83~85

10 李军,熊利平,赵为永,等. 基于确定性和随机模型的薄储层岩性预测[J]. 石油与天然气地质,2009,30(2):240~244

11 刘景亮. 准噶尔盆地车2井区储层建模[J]. 石油与天然气地质,2008,29(4):537~542

(编辑 高 岩)