

中图法分类号: TP391.77 文献标志码: A 文章编号: 1006-8961(2011)05-0835-09

论文索引信息: 汪彦龙, 张挺, 刘金华. 结合软硬数据的连续型多点地质统计渗透率图像模拟方法 [J]. 中国图象图形学报, 2011, 16(5): 835-843

## 结合软硬数据的连续型多点地质统计 渗透率图像模拟方法

汪彦龙<sup>1),2)</sup>, 张挺<sup>3)</sup>, 刘金华<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>(浙江传媒学院电子信息工程系, 杭州 310018) <sup>2)</sup>(中国科学技术大学电子工程与信息科学系, 合肥 230027)

<sup>3)</sup>(中国科学技术大学近代力学系, 合肥 230027)

**摘要:** 渗透率图像的预测模拟对油田的开发具有重要意义。充分利用条件数据可以提高渗透率模拟的精度, 因此提出一种基于连续型多点地质统计法和软硬数据的渗透率图像模拟方法。首先, 利用过滤器得分操作对渗透率图像降维, 所有的过滤器得分形成了一个过滤器得分空间; 其次, 通过两步划分法将得分空间划分, 得到每个非空得分分类的特征, 形成一个“特征库”; 最后, 通过自定义的距离函数从“特征库”提取已知模式的特征, 以完成对节点的模拟。比较各情况下渗透率模拟图像可以看出, 将软硬数据同时作为条件数据的模拟图像由于采用了较为丰富的条件数据信息, 因此与真实情况下的渗透率分布在结构特征上最为接近。

**关键词:** 多点地质统计法; 软数据; 硬数据; 渗透率; 过滤器; 变差函数

### A simulation method of permeability image based on continuous MPS using soft data and hard data

Wang Yanlong<sup>1),2)</sup>, Zhang Ting<sup>3)</sup>, Liu Jinhua<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>(Department of Electrical and Information Engineering, Zhejiang Institute of Communication and Media, Hangzhou 310018 China)

<sup>2)</sup>(Department of Electronic Engineering and Information Science, University of Science and Technology of China, Hefei 230027 China)

<sup>3)</sup>(Department of Modern Mechanics, University of Science and Technology of China, Hefei 230027 China)

**Abstract:** The simulation and prediction of permeability image are quite significant to the development of oil fields. Because the accuracy of permeability can be improved by integrating conditional data including soft data and hard data, a method based on continuous multiple-point geostatistics (MPS) is proposed to improve the accuracy of permeability in a simulated permeability distribution image. First, filters can reduce the dimensions of permeability images to create a “filter score” space. Second, “filter score” space is partitioned by a two-step partition method to obtain the patterns of each non-empty class and forms a “database” of patterns. Finally, a known pattern is drawn from the above “database” of patterns by a self-defined distance function to achieve a simulated value for an unknown node. The simulated images were compared, showing that the structural characteristics of the permeability image simulated by using both soft data and hard data as conditional data are most similar to those of real data from the training image because of the usage of abundant conditional data.

**Keywords:** multiple-point geostatistics; soft data; hard data; permeability; filter; variogram

收稿日期: 2009-10-13; 修回日期: 2010-01-25

基金项目: 国家高技术研究发展计划项目(2006AA010107); 浙江省自然科学基金项目(Y1080379); 浙江省教育厅科研项目(Y200803026)。

第一作者简介: 汪彦龙(1971—), 男, 副教授。2002年浙江工业大学获硕士学位, 现为中国科学技术大学信号与信息处理专业在职博士研究生, 主要从事图像重建与图像增强方面的研究。E-mail: lenin@mail.ustc.edu.cn。

## 0 引言

渗透率与岩石和地层的内部结构密切相关,它是表征岩石和地层内部裂隙网络的重要参数。因此,弄清地层渗透率的分布特性,对于地热能、油气田和煤层气的开发具有重要意义<sup>[1-2]</sup>。由于地质统计学可以进行储层表征与建模,因此能够模拟预测未知区域内变量值的分布特征。传统的两点地质统计学在储层建模中主要应用于两大方面:1)应用各种克里格(Kriging)方法建立确定性模型;2)应用各种随机建模的方法建立可选的、等可能的地质模型。上述方法的共同特点是均以变差函数(variogram)为工具<sup>[2]</sup>。

然而,变差函数只能体现空间上两点之间的相关性,因而难以表征复杂的空间结构和再现复杂目标的几何形态,尤其是难以表征具有长距离曲线形状的地理对象(如弯曲的河道)。而当采样数据较少时,用于计算变差函数的点对很少,它也就无法正确反映空间两点之间的相关性<sup>[3-4]</sup>。

多点地质统计法(MPS)由Strebelle等人提出<sup>[3]</sup>,其是相对于传统的两点地质统计学而言的。鉴于两点地质统计学只能考虑空间两点之间相关性的不足,MPS可以表征多点之间的相关性。MPS方法通过在训练图像中寻找与待模拟点周围条件数据分布完全相同的事件个数来确定概率分布,因而可以反映多点之间的相关性,克服两点地质统计学的不足<sup>[3-4]</sup>。

在MPS模拟过程中,条件数据对模拟结果的精度影响较大。这些条件数据是指统计学概念上的硬数据和软数据。在许多领域里,由于受到客观条件或技术水平限制,所能得到的硬数据非常有限,但是可以获得相对比较丰富的软数据(先验信息)。划分硬数据和软数据的依据是,数据是否来自于客观实在。硬数据是基于对客观存在的事物或现象进行测量和观察的结果。软数据通常是基于人们的主观判断所得到的统计指标,也可能是实验设备获取的整个研究区域内某个属性值的变化趋势。例如在油藏描述过程中,所能获得的硬数据(井位数据)往往非常少,而关于所研究变量的软数据(如地质解释和地震资料等)却相对较为丰富。软数据一般提供了较广泛范围内的低分辨率信息。如果能充分利用较为丰富的软数据,那么必然会提高重构结果的精度<sup>[5-7]</sup>。

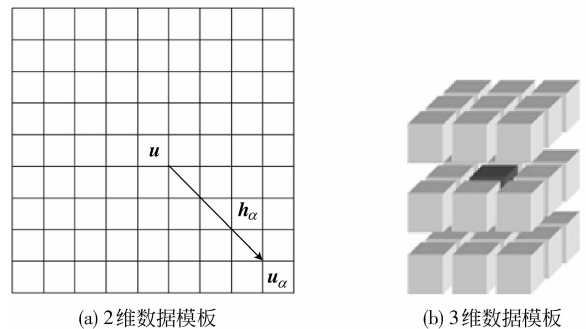
基于文献[8]提出的基于过滤器的MPS方法,利用地层渗透率体数据作为3维训练图像数据,同

时将软数据与硬数据信息共同作为MPS方法渗透率图像模拟的条件数据,以提高模拟结果的精度。通过与无条件数据和仅使用硬数据情况下模拟结果的比较发现,该方法模拟得到的渗透率图像的结构特征与训练图像最为接近。

## 1 基本概念

### 1.1 数据模板和数据事件

Strebelle等人<sup>[3-4]</sup>对数据模板和数据事件进行了定义。设数据模板为 $\tau_n$ ,它是由 $n$ 个向量组成的几何形态, $\tau_n = \{h_\alpha; \alpha = 1, 2, \dots, n\}$ 。设模板中心位置为 $u$ ,模板其他位置 $u_\alpha = u + h_\alpha (\alpha = 1, 2, \dots, n)$ 。例如图1(a)就是一个 $9 \times 9$ 节点组成的2维模板,它由中心 $u$ 和80个向量 $u_\alpha$ 所确定;图(b)是由 $3 \times 3 \times 3$ 节点组成的3维模板,模板中心点 $u$ 用深色表示。



(a) 2维数据模板

(b) 3维数据模板

图1 数据模板

Fig. 1 Data template

假定一种属性 $S$ 可取 $K$ 个状态值 $\{s_k; k = 1, 2, \dots, K\}$ 。由数据模板中 $n$ 个向量 $u_\alpha$ 位置的 $n$ 个状态值所组成的“数据事件” $d_n$ 可以定义为<sup>[2-3]</sup>

$$d_n = \{S(u_\alpha) = s_{k_\alpha}; \alpha = 1, 2, \dots, n\} \quad (1)$$

式中, $S(u_\alpha)$ 表示在 $u_\alpha$ 位置的状态值, $d_n$ 表示 $n$ 个向量在 $u_\alpha$ 位置的 $S(u_1), \dots, S(u_n)$ 分别为状态值 $s_{k_1}, \dots, s_{k_n}$ 。图2表示利用数据模板扫描训练图像时获得一个数据事件的过程。该训练图像仅包含两种状态值,分别用黑色和白色节点表示。图3(a)(b)所示为利用图1(a)(b)的数据模板所捕获的两个数据事件,数据事件中的非白色节点表示已知数据。具有相同颜色的节点具有相同的状态值<sup>[5-7]</sup>。

### 1.2 过滤器和过滤器得分

过滤器是指与具有 $n$ 个像素的数据模板 $\tau_n$ 相对应的 $n$ 个权值的集合。假定有 $F$ 个不同的过滤

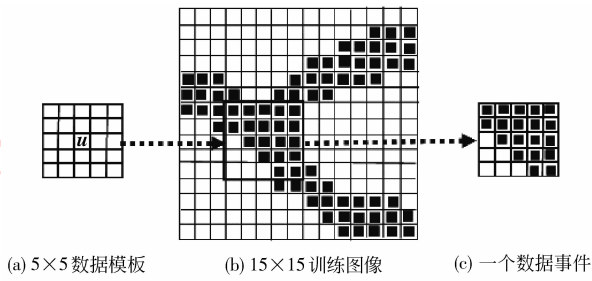


图2 利用5×5的数据模板扫描训练图像获得一个数据事件  
Fig.2 Illustration of a data event captured by a 5×5 template

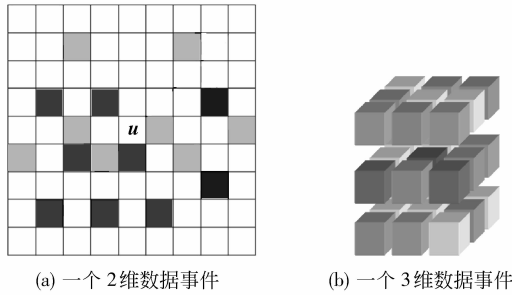


图3 利用图1的数据模板捕获的数据事件  
Fig.3 Data events captured by the data templates shown in Fig. 1

器 $\{f_k(\mathbf{h}_j); j=1, \dots, n; k=1, \dots, F\}$ , 每个过滤器都定义为与含有 $n$ 个像素的数据模板 $\tau_n$ 具有相同的尺寸。将训练图像中的一个以 $\mathbf{u}$ 为中心的局部图案的第 $k$ 个“过滤器得分”定义为下列加权值的和<sup>[8-9]</sup>:

$$S_{\tau,k}^T(\mathbf{u}) = \sum_{j=1}^n f_k(\mathbf{h}_j) T(\mathbf{u} + \mathbf{h}_j) \quad (2)$$

$$k = 1, \dots, F$$

式中, $T(\mathbf{u} + \mathbf{h}_j)$ 是训练图像在 $\mathbf{u} + \mathbf{h}_j$ 位置的状态值。“过滤器得分”会被赋值给予该局部图案对应的数据模板 $\tau_n$ 的中心位置 $\mathbf{u}$ 。即用模板扫描训练图像得到数据事件的各属性值的加权和来代替局部图案中心位置处的属性值。例如,图4(a)表示一个15×15像素的过滤器,对应各位置像素的权值如状态条所示。将图4(a)所示的过滤器应用于图4(b)所示的图案,可以根据式(2)获得该图案的“过滤器得分”,该得分值被赋给该图案的中心位置(见图4(c)深色节点)。

每个“过滤器得分”都是一幅训练图像中的某个局部图案权值之和,代表了该图案的某个模式特征。仅仅使用一个过滤器不足以反映一个图案的特征,因此需要定义一组 $F$ 个过滤器来反映一幅图案的多个不同特征。将这 $F$ 个过滤器应用到某个局

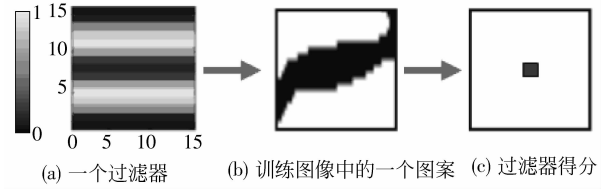


图4 “过滤器得分”概念示意图

Fig.4 Illustration of obtaining a filter score of a training pattern

部图案上,可以生成一个包含 $F$ 个分量的向量;然后利用该向量来描述一个图案的特征,可以达到减少所需记录特征值数目的效果<sup>[9-11]</sup>。例如,如果将6个不同的15×15的过滤器应用到一个2维的图案之上,则该图案所需记录特征值的数目从所有节点的225个值下降到6个值,即6个“过滤器得分”。

3维情况下的“过滤器得分”是式(2)的一种特殊情况,将式(2)改写为

$$S_{\tau,r}^T(i, j, k) = \sum_{z=-m_2}^{m_2} \sum_{y=-m_1}^{m_1} \sum_{x=-m_1}^{m_1} [f_r(x, y, z) \times T(i+x, j+y, k+z)] \quad r = 1, \dots, 9 \quad (3)$$

式中, $f_r(\cdot, \cdot, \cdot)$ 表示定义于 $n = (2m_1 + 1)^2(2m_2 + 1)$ 个体素位置上的第 $r$ 个过滤器。在3维情况下,确定权值大小的9个过滤器分别定义为<sup>[9-11]</sup>

$$f_1(x, y, z) = 1 - \frac{|y|}{m_1} \in [0, 1] \quad (4)$$

$$f_2(x, y, z) = 1 - \frac{|x|}{m_1} \in [0, 1] \quad (5)$$

$$f_3(x, y, z) = 1 - \frac{|z|}{m_2} \in [0, 1] \quad (6)$$

$$f_4(x, y, z) = y/m_1 \in [-1, 1] \quad (7)$$

$$f_5(x, y, z) = x/m_1 \in [-1, 1] \quad (8)$$

$$f_6(x, y, z) = z/m_2 \in [-1, 1] \quad (9)$$

$$f_7(x, y, z) = \frac{2|y|}{m_1} - 1 \in [-1, 1] \quad (10)$$

$$f_8(x, y, z) = \frac{2|x|}{m_1} - 1 \in [-1, 1] \quad (11)$$

$$f_9(x, y, z) = \frac{2|z|}{m_2} - 1 \in [-1, 1] \quad (12)$$

$$x = -m_1, \dots, +m_1$$

$$y = -m_1, \dots, +m_1$$

$$z = -m_2, \dots, +m_2$$

$f_1-f_3$ 过滤器分别表示南-北方向、东-西方向和上-下方向均值; $f_4-f_6$ 过滤器分别表示南-北方向、东-西方向和上-下方向梯度; $f_7-f_9$ 过滤器分别表示南-北方向、东-西方向和上-下方向曲率。

## 2 划分过滤器得分空间

如果在一个给定的训练图像上滑动  $F$  个与数据模板  $\tau_n$  对应的过滤器,那么可以生成  $F$  个“过滤器得分”图像。这  $F$  个图像定义了一个  $F$  维的“过滤器得分”空间,简称“得分空间”。任何从训练图像中提取出的局部图案模式都和该得分空间中的一个点相映射。由于得分空间的维数大大小于数据模板的尺寸,上述的过滤器分类方法会使得所需记录特征值的数目大大减少。

下面的“两步划分法”可以用于将得分空间进行简单划分<sup>[9]</sup>:

1) 将得分空间的每个过滤器所得分值均匀划分成若干相同的区间。如果得分空间的维数是  $F$ , 而每个过滤器得分被划分为  $M(3 \leq M \leq 5)$  个区间, 这样整个得分空间被划分为  $M^F$  个“子空间”, 每个子空间命名为 Cell。然而, 由于每个过滤器得分的划分是相对独立进行的, 一些 Cell 必然会为空, 这意味着没有训练图像的图案模式在其中。对于每个过滤器所得分值独立地进行均匀划分的做法并不能保证在这个  $F$  维得分空间中对所有分值可以实现均匀划分。只有那些非空的 Cell 将会被存储在内存中, 被用于模拟生成最终的图像。

每个非空的 Cell 可以被称为一个“得分类”。对于每个非空的得分类, 可以定义一个“原型”——Prototype, 该 Prototype 是训练图像中属于该得分类的所有局部图案各像素位置的均值。设  $\mathbf{h}_j$  表示在一个尺寸为  $n$  的模板中的向量位置, Prototype 的值  $prot^{(l)}(\mathbf{h}_j)$  表示属于一个得分类  $l$  中的所有图案在各个  $\mathbf{h}_j$  位置的值  $T(\mathbf{u}_i^{(l)} + \mathbf{h}_j)$  的均值, 定义为

$$prot^{(l)}(\mathbf{h}_j) = \frac{1}{c_l} \sum_{i=1}^{c_l} T(\mathbf{u}_i^{(l)} + \mathbf{h}_j) \quad (13)$$

$$j = 1, \dots, n; l = 1, \dots, L$$

式中,  $\mathbf{u}_i^{(l)} (i = 1, \dots, c_l)$  是属于得分类  $l$  的局部图案的中心位置;  $c_l$  表示属于得分类  $l$  的局部图案的数目;  $T$  表示训练图像;  $L$  表示非空的 Cell 在得分空间的数目, 同时也是 Prototype 的数目。

2) 在对图案划分后, 有的 Cell 中的图案特征仍然不够相似, 因此有必要对其进行进一步划分。是否进行划分的判定标准要由得分类中的最多图案数  $c_{\max}$  和最少图案数  $c_{\min}$  来控制。一般  $c_{\max}$  可以指定为  $c_{\min}$  的 2 倍。对于一个得分类中的图案数目而言, 如果其大于  $c_{\min}$  并且小于  $c_{\max}$ , 那么就不用对该得分类

进行进一步的划分。

另外, 对于一个连续型变量组成的训练图像, 定义它的“相似”指数如下

$$SI^{(l)} = 1 - \left( \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \sigma_j^2 \right) / \sigma^2 \quad (14)$$

式中,  $\sigma_j^2$  表示得分类  $l$  中的图案在第  $j$  个位置处的方差, 由于过滤器含有  $n$  个位置, 故共有对应各个位置的方差  $n$  个。  $\sigma^2$  表示得分类  $l$  中所有图案各位置处的方差, 该方差与图案某个具体位置无关。  $SI^{(l)}$  的值越大说明在得分类  $l$  中所有图案越“相似”。

3) 重复步骤 2) 直到所有得分类满足一定的“相似”指数或者  $c_{\max}$  限定的条件。这些限定条件如下:

(1) 如果一个得分类包含的图案数目少于  $c_{\max}$ , 那么对该类不再划分;

(2) 如果一个得分类包含的图案数目大于  $c_{\max}$ , 但是它的“相似”指数比较大 ( $\geq 0.95$ ), 那么对该类不再划分;

(3) 否则, 就按下面的方法将该类继续划分为两个部分:

① 对于得分类中的各个过滤器得分, 试探着将该类在中间值位置进行划分;

② 计算划分后两个子类各自的“相似”指数;

③ 保留可以为两个子类提供最大的“相似”指数的那种子类划分方法。

重复步骤(1)–(3)直到不需要对得分类进行划分为止。

图 5 是采用上述“两步划分法”对一个 2 维“过滤器得分”空间进行划分后的示意图。第 1 步划分中  $M = 3$ , 用实线表示; 第 2 步划分用虚线表示, 此时  $c_{\min} = 4, c_{\max} = 8$ 。每个分值点对应一个训练图像中的局部图案, 用黑色实心点表示。  $S_1$  和  $S_2$  分别表示两个过滤器得分的最大值。

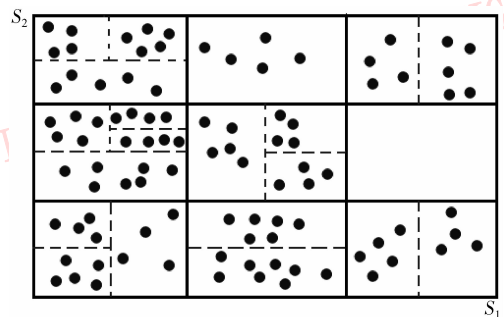


图 5 划分 2 维得分空间的示意图

Fig. 5 Illustration of a two-dimensional partition of the filter score space

### 3 基于软硬数据和连续型MPS的渗透率图像模拟过程

1) 定义一条随机路径访问待模拟区域所有节点,检查当前网格中的待模拟节点  $u_0$  是已知的硬数据还是已模拟节点。

2) 如果是已知的硬数据或已模拟节点,则回到步骤1)对随机路径上的下个节点进行判定,否则转向步骤3)。

3) 检索以  $u_0$  为中心的数据模板  $\tau_n$  内的所有已知的  $n'$  ( $\leq n$ ) 个数据;如果  $n' = 0$ ,意味着硬数据数目为 0,那么可以从渗透率训练图像所有的 Prototype 中利用“距离公式” $D_l$  选取一个与软数据最为接近的 Prototype (假定各位置软数据全部已知),“距离函数”定义为

$$D_l(u_0) = \sum_{d=1}^3 \omega(d) Ave | dat_d(u_0 + u) - prot^{(l)}(u) | \quad l = 1, \dots, L \quad (15)$$

设  $d$  表示数据类型,一共有 3 种数据。

(1)  $d = 1$  表示原始硬数据节点,它们被分配到距离其最近的模拟网格的节点位置上;

(2)  $d = 2$  表示已经模拟过的节点,它们被用作硬数据;

(3)  $d = 3$  表示通过“粘贴”训练图像的 Prototype 或图案而己知的节点,这些节点会被重新模拟。

式(15)中的  $\omega(d)$  是与 3 种数据相对应的 3 种权值,并且规定  $\omega(1) \geq \omega(2) \geq \omega(3)$ 。可见原始硬数据节点和已经模拟过的节点在“距离函数”中的作用大于  $d = 3$  情况下对应的节点。 $dat_d(u_0 + u)$  表示待模拟区域的数据模板在  $u_0 + u$  位置的节点值, $u$  表示模板内各向量的位置。 $Ave | \cdot |$  表示对所求的绝对值项求均值。

在选取一个与软数据最为接近的 Prototype 后,将该 Prototype 直接“粘贴”到以当前模拟节点  $u_0$  为中心的待模拟区域上。该软数据必须与待模拟区域具有相同大小和分辨率。注意在“距离函数” $D_l$  中只是对于那些已知的  $n'$  ( $\leq n$ ) 个节点进行计算。

4) 一旦与条件数据事件  $d_n$  差别最小的 Prototype 被确定,则从该 Prototype 类随机提取出一个图案(命名为 patch),然后将 patch“粘贴”到以当前模拟节点  $u_0$  为中心的待模拟区域上,但是对于该模拟区域上的原始硬数据节点和已经模拟过的节点不做变动。

如果  $n' > 0$ ,即以  $u_0$  为中心的数据事件  $d_n$  非空,但是  $d_n$  中仍然存在未知节点,那么利用软数据中对应未知节点位置的数据项“填满” $d_n$ ,然后在渗透率训练图像所有的  $prot^{(l)}$  中利用“距离函数” $D_l$  寻找与当前数据事件  $d_n$  最为接近的  $prot^{(l)}$ 。

5) 将 patch 视为由两个部分组成:inner 和 outer。inner 部分会被固定为硬数据,不会再对其进行模拟。虽然 patch 的 outer 部分会被当做条件数据参与条件模拟,但是该部分的所有节点之后会被当做未知点重新模拟。如果一个 patch 的 inner 部分被设定得较大,那么模拟速度会比较快,但是容易产生局部的不连续性;反之,较小的 inner 部分会导致模拟速度比较慢,但是模拟效果会较好。

6) 重复步骤 1)~6),继续对其他节点进行模拟,直到随机路径上的所有节点被模拟完毕。此时得到最终的渗透率模拟图像。

### 4 模拟图像效果的评价方法

变差函数能够反映空间变量在某个方向上空间结构变化的相关性和变异性,它被用作 MPS 模拟效果的评价依据。如果两幅图像中的某个属性值在同一个方向上具有相似的变差函数曲线,那么可以说明这两幅图像中的该属性值在此方向上具有相似的结构特征;反之,这两幅图像中的该属性值在此方向上的结构差异较大。

MPS 模拟与传统模拟方法有较大的区别,主要体现在评价模拟效果的标准上。传统模拟方法中的模拟图像与原始图像的相似度是由两者在每个相同位置具有相同状态值的体素占全部体素的比例决定的。在传统模拟方法中,该比例越高,模拟相似度就越高,但是这个判定标准对于 MPS 随机模拟并不适用。MPS 模拟并不要求随机模拟结果与原始图像完全一致,它的真正作用体现在捕捉训练图像的结构特征,并将这些特征复制到待模拟区域中。MPS 模拟可以给出多个模拟结果,这些结果是对训练图像结构特征的反映。模拟效果的优劣取决于这些结构特征是否被复制到模拟图像中。由于变差函数能够反映空间结构的变化特征,所以它成了判定 MPS 模拟图像效果的工具<sup>[11-12]</sup>。

### 5 实验结果和分析

#### 5.1 与仅使用硬数据和无条件数据模拟的比较

图 6 为一幅实际测得的某区域的真实地层渗

透率分布图,将其作为训练图像 ( $80 \times 80 \times 40$  体素)。渗透率分布为  $0.5 \sim 1.6$  (单位:  $10^{-3} \mu\text{m}^2$ )。图 6(a)(b) 分别是训练图像的外表面和剖面图 ( $X=40, Y=40, Z=20$ )。训练图像所示渗透率的平均值为  $0.6121$  (单位:  $10^{-3} \mu\text{m}^2$ ), 方差为  $0.041$ 。由于该训练图像所示的渗透率分布为实验测得的真实值, 可以作为衡量模拟结果精度的参考数据。如果模拟结果与训练图像结构相似, 那么说明模拟结果精度高。从训练图像提取  $0.5\%$  的随机点作为硬条件数据 (见图 7(a)), 这些随机点的平均值为  $0.6335$  (单位:  $10^{-3} \mu\text{m}^2$ )。图 7(b) 所示为训练图像所在区域的地层渗透率的软数据, 尺寸为  $80 \times 80 \times 40$  体素, 均值为  $0.6386$  (单位:  $10^{-3} \mu\text{m}^2$ ), 方差为  $0.047$ 。

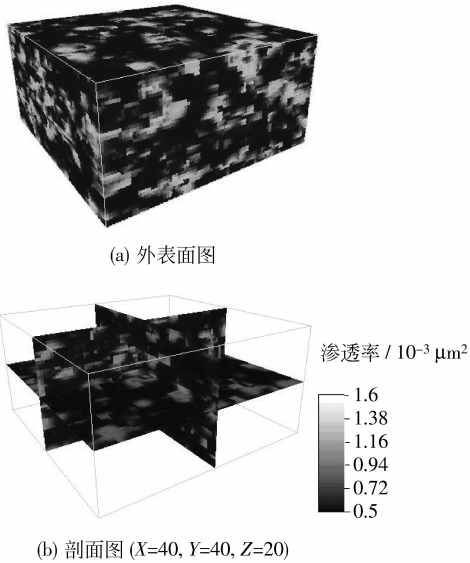


图 6 训练图像  
Fig. 6 The training image

基于软数据和硬数据, 利用连续型 MPS 对地层渗透率进行模拟。待模拟区域为  $80 \times 80 \times 40$  体素。“距离函数”  $D_l$  的权值  $\omega(d)$  分别设置为  $0.5 (d=1)$ ,  $0.3 (d=2)$  和  $0.2 (d=3)$ , inner 部分设置为  $5 \times 5 \times 3$  体素,  $c_{\min} = 8, c_{\max} = 16$ 。模拟结果如图 8 所示, 可见该结果与训练图像的渗透率分布特点比较接近。

为了与使用软硬数据情况下 MPS 的模拟结果进行比较, 又利用 MPS 方法分别在无条件数据和只使用硬数据情况下模拟地层渗透率的 3 维图像。重构图像的尺寸均为  $80 \times 80 \times 40$  体素。图 9 和图 10 分别是无条件数据和只使用硬数据情况下的模拟图像。这两种情况下模拟的结果图像均较好地再现了训练图像渗透率的结构特征。

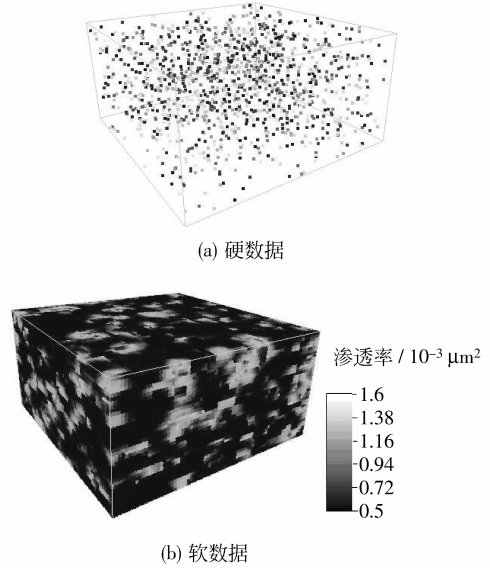


图 7 硬数据和软数据  
Fig. 7 Hard data and soft data

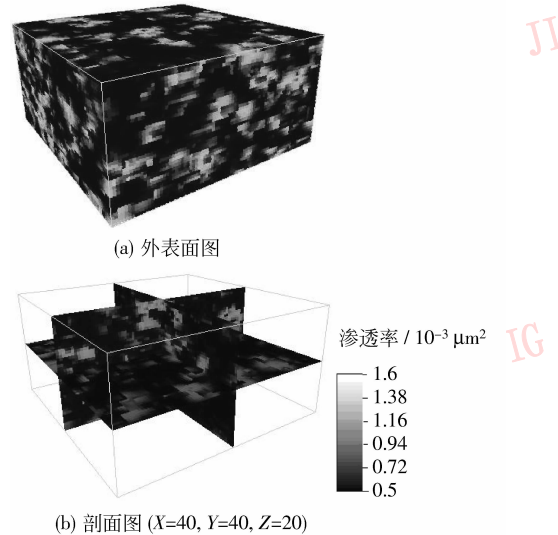


图 8 使用软硬数据的 MPS 模拟结果  
Fig. 8 Simulated results of permeability using soft data and hard data based on MPS

训练图像, 同时使用软硬数据、仅使用硬数据和无条件数据情况下的渗透率直方图如图 11 所示, X 轴表示渗透率, Y 轴表示百分比。可见 3 种情况下的 MPS 模拟结果直方图与训练图像直方图均比较接近, 说明 MPS 方法在模拟渗透率时的实用性。使用软硬数据、仅使用硬数据和无条件数据情况下所需的最大内存、CPU 时间、均值和方差值如表 1 所示 (机器配置: CPU 采用 Athlon 2 GHz, 内存为 2 GB DDR, 操作系统 Windows Server 2003)。可见使用软硬数据时的最大内存和 CPU 时间最少, 而其均值和



图 9 无条件数据的 MPS 模拟结果  
 Fig. 9 Simulated results of unconditional simulation based on MPS

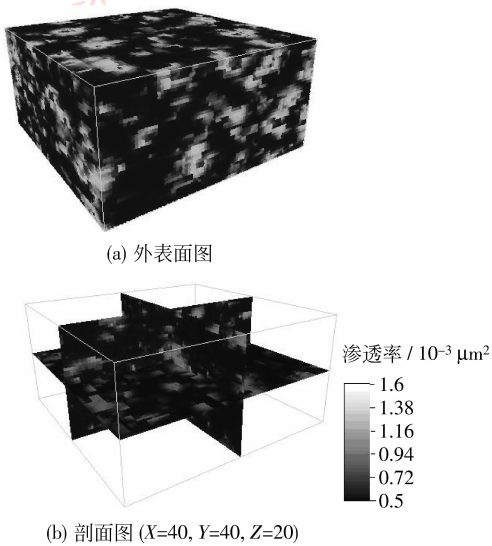


图 10 仅使用硬数据的 MPS 模拟结果  
 Fig. 10 Simulated results using hard data only based on MPS

方差值与训练图像也最为接近。

### 5.2 与两点地质统计法的比较

为了与两点地质统计法进行比较,又采用了两点地质统计法中的序贯高斯模拟 (SGSIM) 方法和简单克里格 (SK) 方法对图 7 (a) 的采样点进行插值运算,以获得渗透率分布。模拟图像的尺寸均为  $80 \times 80 \times 40$  体素。图 12 (a) 是采用 SGSIM 方法生成的地层渗透率外表面,图 12 (b) 是其剖面图。图 13 (a) 是利用 SK 方法生成的地层渗透率外表面,图 13 (b) 是其剖面图。可以看出,SGSIM 和 SK 方法获得的

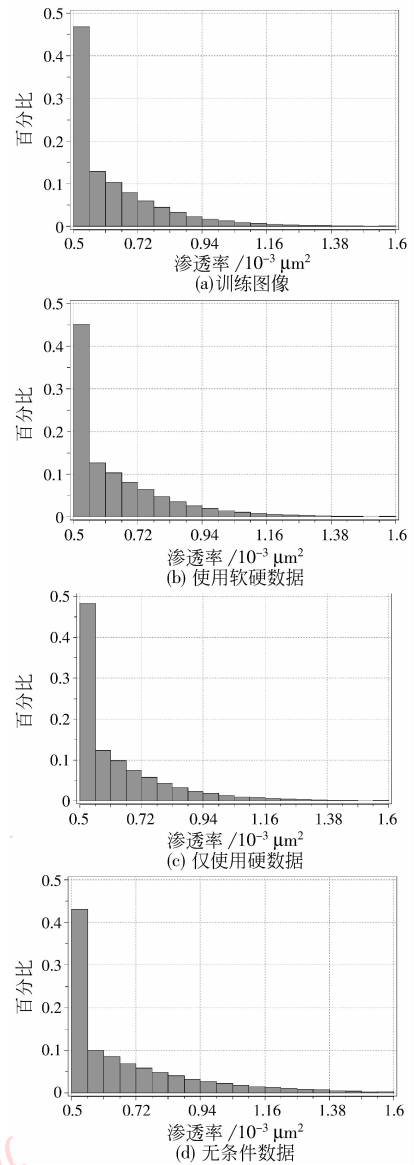


图 11 训练图像,同时使用软硬数据、仅使用硬数据和无条件数据情况下的渗透率直方图

Fig. 11 The histograms of the training image, the image using soft data and hard data, the image using hard data only and the image of unconditional simulation

表 1 使用软硬数据、仅使用硬数据和无条件数据情况下所需的最大内存、CPU 时间、均值和方差值

Tab.1 The memory demand, CPU time, average and variance of images of using soft data and hard data, using hard data only and unconditional simulation

|                             | 使用软硬数据  | 仅使用硬数据  | 无条件数据   |
|-----------------------------|---------|---------|---------|
| 最大内存/MB                     | 425     | 522     | 643     |
| CPU 时间/s                    | 1 321   | 1 676   | 1 981   |
| 均值/ $10^{-3} \mu\text{m}^2$ | 0.633 0 | 0.656 4 | 0.688 7 |
| 方差                          | 0.045   | 0.055   | 0.067   |

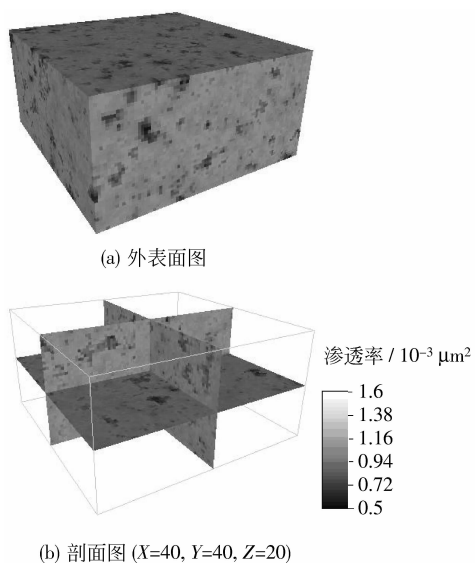


图 12 使用 SGSIM 模拟得到的图像  
Fig. 12 Simulated results using SGSIM

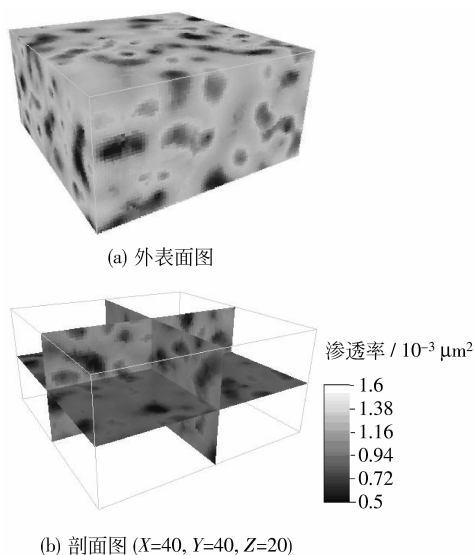


图 13 使用 SK 模拟得到的图像  
Fig. 13 Simulated results using SK

图像与训练图像的渗透率分布特征差异较大。SGSIM 和 SK 模拟结果的渗透率直方图如图 14 所示,可见与训练图像的直方图(图 11(a))区别较大。

### 5.3 变差函数的比较

如前所述,变差函数可以作为评价模拟效果的工具。假定  $X$ 、 $Y$  和  $Z$  方向上相邻体素间距离为 1, 则变差函数的计算点对间在  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  方向上最大滞后距分别为 79、79、39。分别得到训练图像、使用软硬数据图像、仅使用硬数据图像、无条件数据模拟图像、SGSIM 和 SK 模拟图像在  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  方向的变差函

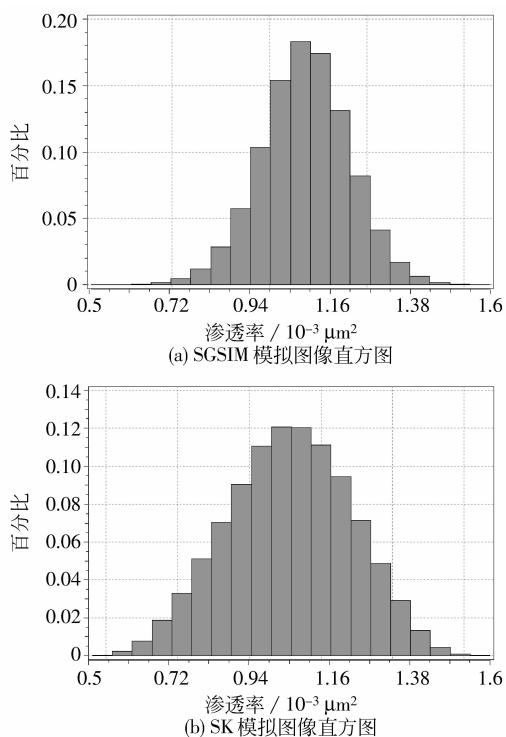


图 14 SGSIM 和 SK 模拟结果的渗透率直方图

Fig. 14 The histograms of images simulated by SGSIM and SK

数曲线,如图 15(a)—(c)所示。可见使用软硬数据图像和训练图像在  $X$ 、 $Y$  和  $Z$  方向的变差函数最为接近,说明两者的结构特征非常相似。仅使用硬数据时的变差函数与训练图像也较为接近,但是仍然差于使用软硬数据情况,而其他情况下的模拟图像与训练图像在上述 3 个方向的变差函数均有较大不同。从而证明连续型 MPS 模拟方法在结合使用软硬数据时的有效性。

## 6 结 论

提出一种利用连续型 MPS 模拟渗透率图像分布的方法,模拟过程中结合使用软数据和硬数据,可获得与训练图像结构特征相似的模拟结果。由于训练图像为实际测得的真实值,因此模拟结果与真实情况非常接近。实验仿真结果说明,与仅使用硬数据和无条件数据的情况相比,使用软硬数据时的模拟精度最高,同时 CPU 时间和内存消耗最少(见表 1);与两点地质统计法相比,连续型 MPS 方法的变差函数曲线与训练图像的最为接近(见图 15),可见在模拟渗透率图像时更为精确。同时,本方法应用范围较广,不但可以用于模拟渗透率图像,而且还可

用于模拟估计其他已知条件数据情况下的空间信息分布。不过该方法所使用的过滤器并不一定是最佳过滤器,对于不同的训练图像可以选择不同的过滤器,如何定义合适的过滤器将是未来工作的方向。

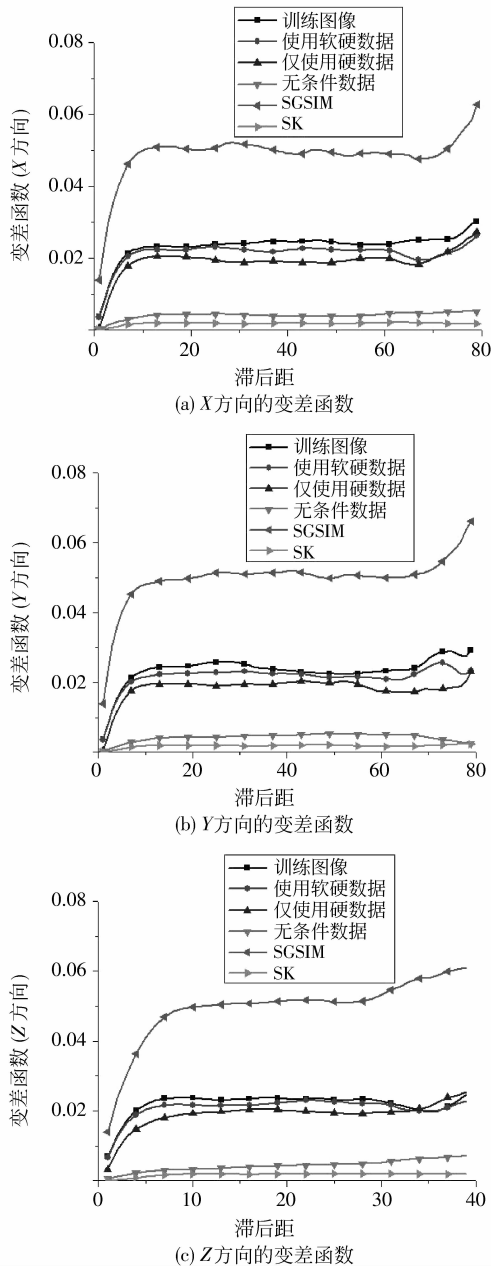


图 15 训练图像、使用软硬数据、仅使用硬数据、无条件数据、SGSIM 和 SK 情况下图像的变差函数  
Fig. 15 Variograms of the training image, images simulated by using soft data and hard data, using hard data only, unconditional simulation, SGSIM and SK

参考文献 (References)

[ 1 ] Zhang Yuan, Zhao Yangsheng, Wan Zhijun, et al. Experimental study on effect of pore pressure on feldspar fine sandstone permeability under different temperatures [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(1): 53-58. [张渊,赵阳升,王志军,等.不同温度条件下孔隙压力对长石细砂岩渗透率影响试验研究[J].岩石力学与工程学报,2008,27(1):53-58.]

[ 2 ] Wu Shenghe, Li Wenke. Multiple-point geostatistics: theory, application and perspective [J]. Journal of Palaeogeography, 2004, 7(1): 137-144. [吴胜和,李文克.多点地质统计学:理论、应用与展望[J].古地理学报,2004,7(1):137-144.]

[ 3 ] Strebelle S. Sequential Simulation Drawing Structures from Training Images[D]. Los Angeles: Stanford University, 2000.

[ 4 ] Strebelle S. Conditional simulation of complex geological structures using multiple-point statistics [J]. Mathematical Geology, 2002, 34(1): 1-21.

[ 5 ] Zhang T, Lu D T, Li D L. A statistical information reconstruction method of images based on multiple-point geostatistics integrating soft data with hard data [C]//Proceedings of International Symposium on Computer Science and Computational Technology. Washington DC, USA: IEEE Press, 2008: 573-578.

[ 6 ] Zhang T, Lu D T, Li D L. Porous media reconstruction using a cross-section image and multiple-point geostatistics [C]//Proceedings of International Conference on Advanced Computer Control. Washington DC, USA: IEEE Press, 2009: 24-29.

[ 7 ] Lu D T, Zhang T, Yang J Q, et al. A reconstruction method of porous media integrating soft data with hard data [J]. Chinese Sci. Bull, 2009, 54(11): 1876-1885.

[ 8 ] Zhang T F, Bombarde S, Strebelle S, et al. 3D porosity modeling of a carbonate reservoir using continuous multiple-point statistics simulation [EB/OL]. (2008-01-12) [2008-10-15]. <http://www.onepetro.org/mslib/servlet/onepetroreview? id = SPE-96308-PA&soc = SPE>.

[ 9 ] Zhang T F. Filter-based Training Pattern Classification for Spatial Pattern Simulation [D]. Los Angeles: Stanford University, 2006.

[ 10 ] Wu J B. 4D Seismic and Multiple-Point Pattern Data Integration Using Geostatistics [D]. USA: Stanford University, 2007.

[ 11 ] Zhang Ting. Research on the Reconstruction of Porous Media Based on Multiple-Point Geostatistics [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2009. [张挺.基于多点地质统计的多孔介质重构方法及实现[D].合肥:中国科学技术大学,2009.]

[ 12 ] Remy N, Boucher A, Wu J B. Applied Geostatistics with SGeMS: A Users' Guide [M]. New York: Cambridge University Press, 2009: 107-118.