

# 快速多点地质统计三维重建算法

左琛, 滕奇志, 何小海, 高明亮

(四川大学电子信息学院, 成都 610065)

**摘要:** 在 SNESIM 算法的基础上, 提出了一种快速多点地质统计三维重建算法. 首先利用红黑树构建模式集, 降低树结构高度, 快速检索匹配数据事件. 其次综合概率融合与连续逐层采样方法, 分别利用半模板与全模板进行点模拟, 提高模板中条件数据的比例, 缩小模式检索范围. 对二维河道图像、三维多孔介质图像和三维储集层岩心图像进行了多组重建实验, 结果表明该算法能够在不损失精度的同时显著提升时间效率, 且对于各向同性、各向异性岩心图像的重建结果都与真实数字岩心具有相似的视觉特征、统计特征和孔喉分布特征, 证明了算法的可靠性.

**关键词:** 三维重建; 快速多点地质统计; 半模板; 红黑树; 各向异性; 储集层岩心图像

**中图分类号:** TP391      **文献标识码:** A      **文章编号:** 0490-6756(2016)02-0337-10

## A fast 3D reconstruction algorithm of multiple point statistics

ZUO Chen, TENG Qi-Zhi, HE Xiao-Hai, GAO Ming-Liang

(College of Electronics and Information Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

**Abstract:** Based on the SNESIM algorithm, a fast three-dimensional (3D) reconstruction algorithm of multiple-point statistics simulation was proposed. First, pattern sets were built by the red-black tree. The height of tree structures was rapidly reduced. CPU time for retrieving matching data events was saved. Then, the algorithm combined the advantages of probability aggregation approach and the sequential two-dimensional (2D) simulations with sample data approach. Half-template and all-template were utilized in nodal simulation. The proportion of informed conditioning nodes in template was increased so that the amount of possible data event was declined. The algorithm was tested on 2D channelized reservoir section, 3D porous medium images and 3D reservoir rock images. The results showed that this algorithm achieved the efficiency without degradation of accuracy. No matter isotropic or anisotropic rocks, the visual characteristics, the statistics characteristics and the pores-throats structures of the reconstructions were similar to the corresponding real 3D digital rock images, which proved that this algorithm was reliability.

**Key words:** 3D reconstruction; Fast multiple-point geostatistics; Half-template; The red-black tree; Anisotropic; Reservoir rock images

# 1 引言

多点地质统计是一种使用广泛的三维重建算法. 该算法主体思想首先由 Srivastava 和 Guardiano 于 1993 年提出, 产生了 ENESIM (Extended Normal Equation Simulation) 算法<sup>[1]</sup>. 2002 年, Strebelle 提出了 SNESIM (Single Normal Equation Simulation) 算法<sup>[2]</sup>, 将数据事件和发生次数储存于搜索树中, 大大提升了运算效率. 为了进一步解决多点地质统计算法的“平稳性”问题, 并降低时间和内存消耗, 多点地质统计算法主要有两个研究方向<sup>[3]</sup>: (1) 将对单个像素点的模拟转变为对模式的模拟. SIMPAT (Simulation of Patterns) 算法<sup>[4]</sup>利用距离函数将模式集分为不同的簇, 通过限制簇的数量提高算法效率. FILTERSIM (Filter-based Pattern Simulation) 算法<sup>[5]</sup>对数据事件进行过滤和分类以识别模式特征; (2) 继续对单个像素点的模拟. Straubhaar 等人利用列表代替搜索树, 提出了允许并行计算的 IMPALA (Improved Parallel Multiple-point Algorithm) 算法<sup>[6]</sup>. Mariethoz 等人在 ENESIM 算法基础上提出了 DS (Direct Sampling) 算法<sup>[7]</sup>, 直接从训练图像中寻找匹配数据事件. Strebelle 致力于 SNESIM 算法的升级, 提出了多级网格策略、最优模板尺寸<sup>[3]</sup>等方法.

总体而言, 多点地质统计算法在近年取得了较大发展. 然而在石油勘探开发等领域, 三维储集层岩心图像拓扑结构复杂, 为了提高重建精度必须增加数据模板尺寸, 导致搜索树高度增加, 查找匹配数据事件的时间花销急剧延长. 同时由于高分辨率三维图像无法直接获取, 只能使用二维图像进行三维重建, SNESIM 等经典算法不能直接应用到实际工程中. 以多点地质统计算法为基础, 将高分辨率二维图像作为训练图像, 概率融合方法<sup>[8,9]</sup>和连续逐层采样方法<sup>[10]</sup>可以进行三维重建, 但概率融合方法的时间效率较低且加权因子不易确定, 连续逐层采样方法仅训练一张图像建立模式集, 只能重建各向同性多孔介质图像.

本文提出了一种快速多点地质统计算法, 利用二维训练图像重建三维图像, 首先有序排列数据事件, 利用红黑树构建模式集, 降低树结构高度, 快速检索匹配数据事件. 其次针对数据模板中已知条件数据较少而导致的较大检索量, 结合概率融合与连续逐层采样方法, 根据体素坐标筛选模板点, 通过半模板方法和全模板形态设计提高已知条件数

据比例, 缩小检索范围. 实验表明, 红黑树方法具有与搜索树相似的空间复杂度和更低的时间复杂度, 半模板方法和全模板形态设计能够复现多张训练图像模式信息, 且相比于概率融合算法和连续逐层采样算法, 极大地提升了时间效率, 能有效完成二维河道图像和三维多孔介质图像、三维岩心图像的重建, 特别是各向异性岩心图像的三维重建.

## 2 多点地质统计三维重建算法

### 2.1 建立模式集

多点地质统计算法首先需要统计训练图像中的数据事件和发生次数. 在具有  $K$  相变量的训练图像中, 利用数据模板  $\tau_n$  生成数据事件  $d_n$ ,  $n$  表示模板尺寸, 将全部数据事件和发生次数  $c$  储存在模式集中, 常用的模式集构建方法有搜索树<sup>[2]</sup>与列表<sup>[6]</sup>两种. 图 1(a) 为训练图像, 相数  $K=2$ , 图 1(b) 为数据模板  $\tau_{n=4}$ ,  $u$  表示中心点, 模板点中的数字表示生成数据事件的顺序, 建立搜索树和列表如图 2. 搜索树中灰色点表示中心点,  $W$  和  $B$  分别表示中心点为黑色与白色的发生次数. 列表中, 将距离中心点较远的像素置于数据事件的低位, 用 0 表示黑色相, 1 表示白色相, 发生次数  $c = (c_1, c_2)$ ,  $c_1$  表示中心点为黑色的发生次数,  $c_2$  表示中心点为白色的发生次数.

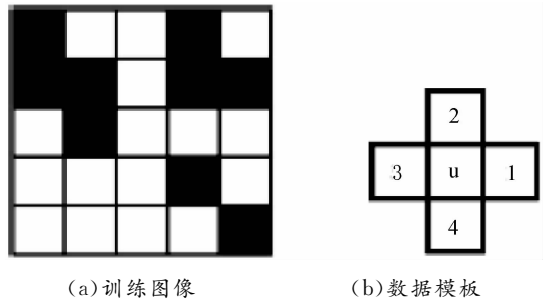


图 1 训练图像与数据模板示例

Fig. 1 An illustration for training image and data template

建立模式集完成之后就进入点模拟阶段, 利用数据模板提取多点信息为条件, 检索匹配数据事件获得条件概率, 就可以确定待模拟点像素值. 然而, 在实际工程中, 仍有以下三个原因限制了多点地质统计算法的推广.

首要原因就是较多的数据事件量. 计算机内存需求同数据事件量存在正指数关系<sup>[2]</sup>, 数据事件量的增长将剧烈消耗计算机内存. 假定训练图像中含有  $K$  相变量, 利用模板  $\tau_n$  构建数据事件, 那

么数据事件量最多为  $K^n$ . 例如对  $K=2$  图像使用数据模板  $\tau_{n=30}$ , 则最大数据事件量为  $2^{30} \approx 1.07 \times 10^9$ . 尽管模式集只存储出现在训练图像中的数据

事件, 但实际工程中数据事件量仍位于  $10^6 \sim 10^7$  之间.

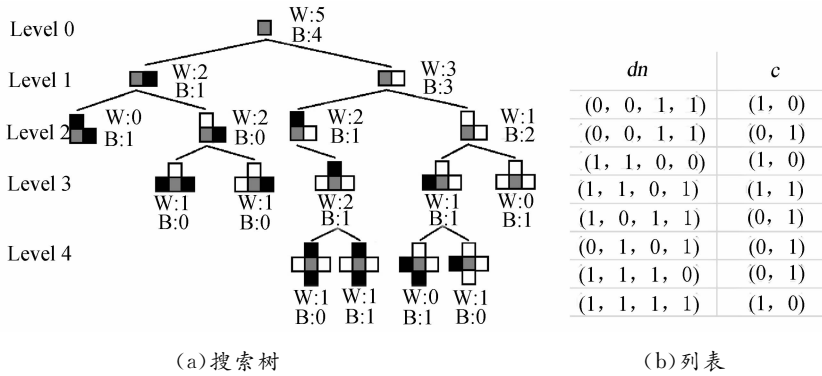


图 2 搜索树与列表  
Fig. 2 Search tree and list

其次, 是扩大的模板尺寸  $n$ . 对于具有复杂拓扑结构的训练图像, 必须使用大尺寸模板才能捕获足够的长程信息.  $n$  的扩大不仅增加数据事件量, 同时提升搜索树高度, 导致检索匹配模式时间延长.

他三维重建方法, 如基于过程重建法、模拟退火重建算法等重建三维图像, 随机采样三维图像获得初始点, 这无疑降低了算法效率. 同时由于采样率的限制导致重建初期硬数据稀少, 点模拟速度缓慢. 其次在求解全局概率的过程中, 加权因子需要随数据模板配置的变化而变化. 特别当使用多级网格策略<sup>[2]</sup>时, 不同训练图像反映了不同网格级别的信息, 加权因子不易确定.

最后, 就是条件数据的缺失. 匹配数据事件的数量同条件数据的数量呈负相关关系<sup>[3]</sup>, 在点模拟过程中, 如果数据模板  $\tau_n$  含有  $n'$  ( $n' \leq n$ ) 个已知点作为条件数据, 那么算法必须检索所有匹配数据事件  $d_{n'}$ . 例如当  $K=2$  时使用数据模板  $\tau_{n=30}$ , 若模板仅含 10 个条件数据点, 则匹配数据事件的数量为  $K^{n-n'} = 2^{20} \approx 1.05 \times 10^6$ , 尽管只需检索出现在训练图像中的数据事件, 但检索范围仍然较大, 导致点模拟速度缓慢.

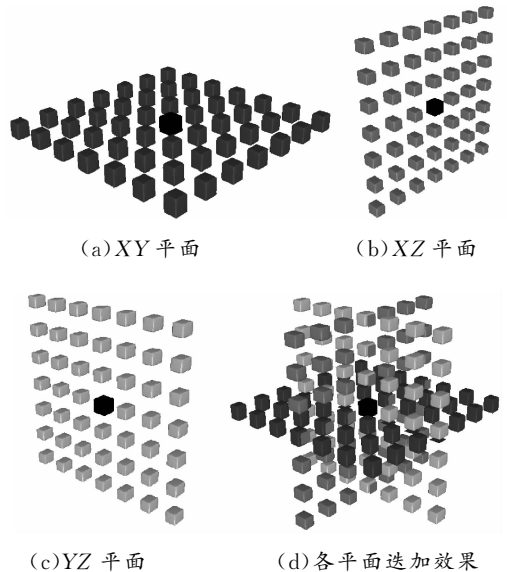


图 3 不同平面二维模板示例  
Fig. 3 Illustration for 2D template along different planes

### 2.2 概率融合方法

由于高维训练图像的缺失, 在点模拟中首先要进行降维处理, 以待模拟点为中心将三维图像分别沿  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  方向切开, 在三张二维图像中根据待模拟点周围的条件数据生成数据事件. 数据模板结构如图 3(a)(b)(c) 所示, 灰色表示模板点, 黑色表示待模拟点, 图 3(d) 为将三个平面模板迭加显示的结果. 分别检索模式集获得条件概率  $P_1 P_2 P_3$ . 随后, 将多个条件概率利用线性加权公式<sup>[8]</sup> 或 Bordley 公式<sup>[9]</sup> 等方法进行加权平均, 获得全局概率  $P_G$ , 确定待模拟点像素值. 该方法关键点在于三维图像初始状态的布置与加权平均方法. 首先需要创建初始状态作为硬数据, 该方法或者依据孔隙度等基本参数均匀随机布置采样点, 或者利用其

### 2.3 连续逐层采样方法

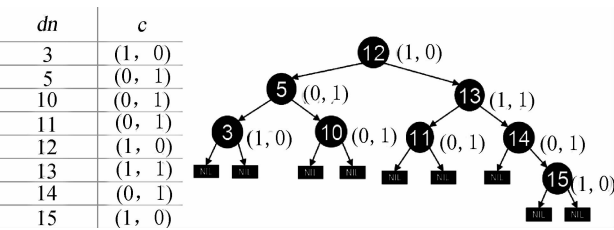
针对概率融合方法中的问题, 产生了连续逐层采样方法. 从前一层二维重建图像中采样出基本

形态点,布置到下一层中作为硬数据<sup>[9,10]</sup>,以硬数据点为条件依次模拟所有非采样点,完成一次二维重建.不断重复上述过程,最终将多次二维重建结果叠加组成三维图像.连续逐层采样方法的精度主要依赖采样点的选取,采样点需要同时保证层与层之间的连续性和变化性,复现训练图像中的模式信息.但是,该类算法仅仅使用一张二维训练图像,而假定缺失维度上的模式统计特性与已知维度相同,所以只能进行各向同性多孔介质图像的重建,制约了算法的推广.

### 3 快速多点地质统计三维重建算法

#### 3.1 针对模式集的改进

搜索树不具有自平衡性,导致结构中存在大量冗余,利用红黑树<sup>[11]</sup>可以有效改造树结构.在构建列表模式集(图 2(b))之后,由于数据事件在列表中杂乱无章,为了查找特定数据事件,需遍历整个列表,花费时间长.通过量化数据事件,实现列表的有序排列,可以缩小检索范围.例如对列表中的第一个数据事件(0,0,1,1),因训练图像中  $K=2$ ,将二进制数 0011 转换为十进制数 3.通过同样的方法,转换列表中的所有数据事件,并在列表中按升序排列,就可以获得有序列表图 4(a).利用红黑树实现有序数组,将数据事件作为键值,发生次数作为卫星数据.最终建立模式集如图 4(b),图中用黑色表示属性为黑色的结点,灰色表示属性为红色的结点,结点内数字表示数据事件,NIL 表示空结点,结点旁括号内标注了发生次数.



(a)列表 (b)红黑树

图 4 有序列表与红黑树

Fig. 4 Order list and red-black tree

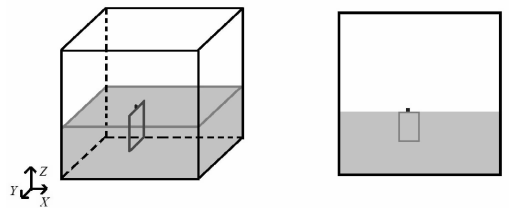
对高度为  $h$  的树结构进行查找、插入和删除等基本操作,在最坏情况下需要耗时  $O(h)$ .通过减少树高,可以有效降低时间消耗.使用数据模板  $\tau_n$  进行重建,搜索树模式集高度恒定为  $h_1=n$ ,而红黑树是一种自平衡二叉树,树高  $h_2=\log_2(m)$ ,其中  $m$  为树中元素的个数,即数据事件的实际数量,且  $m \leq 2^n$ ,所以有  $h_1 \leq h_2$ .现实应用中,训练图像中出

现的数据事件实际数量远小于理论数量,红黑树拥有更低的高度,在时间上更为高效.例如在二维河道图像重建实验中,数据模板  $\tau_n=20$ ,所有搜索树高恒定为 20.而最大红黑树的高度仅为 13,树操作时间大大降低.

#### 3.2 针对重建顺序的改进

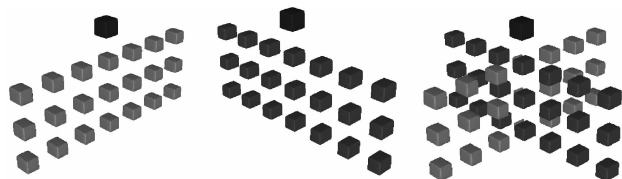
在概率融合方法中,在多个二维平面中构建数据事件,由于采样率一般被限定为 0.5%,在重建初期条件数据很不充分,算法时间效率低.为了增加模板中的条件数据量,参考连续逐层采样方法,不再沿三维空间中的一条随机路径遍历,而是以训练图像为最底层,逐层向上进行连续二维重建,在二维平面规划随机路径依次进行点模拟.

在图 5(a)所示的立方体三维图像中,重建方向为沿 Z 方向从下到上,浅灰色部分表示已经完成重建的部分,白色表示尚未重建的部分,灰白交界即为当前待重建层,深灰色点表示当前待模拟点.将立方体沿模板所处平面(YZ 平面)切开,可以得到图 5(b).在切面中,利用数据模板,即暗灰色方框内部分构建数据事件.由于只有待模拟点下方含有数据,所以将模板形状设置为普通矩形模板的一半,称其为半模板.图 5(c)(d)(e)表示了半模板的平面形态与空间迭加形态,浅灰色部分表示模板点,深灰色部分表示待模拟点.由于采用了自底向上的逐层重建方法,所有模板点上均为已知条件数据,匹配数据事件的范围大大缩小,点模拟速度很快.同时,采用逐层连续重建方法,有利于充分反映图像各相变量的连通性.



(a)半模板重建过程

(b)YZ 剖面



(c)XZ 平面

(d)YZ 平面

(e)迭加结果

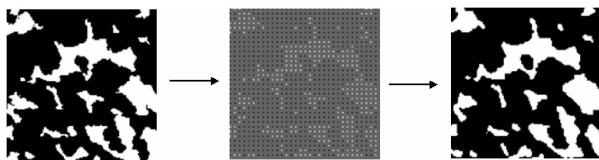
图 5 半模板方法示意

Fig. 5 An illustration for half-template

将训练图像中的模式信息,通过半模板复现于重建结果之中,根据各相在训练图像横纵方向上的弦长分布,确定半模板的尺寸,从而在模板总数据量保持不变的情况下充分提取模式信息.例如在岩心样本实验2中,训练图像2表征Z方向特征,该图像长宽为128个像素,黑色表征岩相,白色表征孔隙相.以孔隙相为目标相,计算X方向(横向)和Y方向(纵向)平均弦长分别为9像素和5像素,所以将半模板设计为长9像素、宽5像素的矩形.

### 3.3 针对融合方法的改进

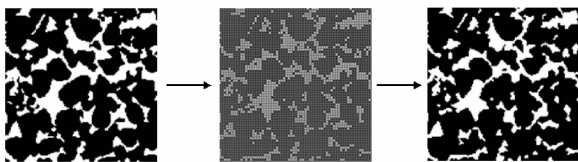
概率融合方法需要检索三次模式集获得全局概率,耗时较多.为了简化算法过程,减少检索次数,本算法在当前待重建层二维图像的X和Y两个方向上每隔 $n$ 个像素选择一个点,通过半模板确定这类点的像素值.再利用全模板在XY平面模拟剩余点.而 $n$ 值的选取,则同训练图像的均质性有着密切关系.利用局部孔隙度<sup>[12]</sup>的概念,可以衡量训练图像均质性的强弱.当训练图像局部孔隙度分选性较差时,即训练图像的均质性较差时,需要在较小的范围应用半模板布置硬数据,适当增大 $n$ 的取值,相对较多的使用全模板,以充分反映训练图像中的高阶信息.而当方差较小时,训练图像中孔隙分布均匀,可以适当减小 $n$ 值,扩大半模板使用范围.考虑到图像的一般大小与建模速度, $n$ 的取值一般为2、3或4.



(a)训练图像1 (b)硬数据点图像 (c)逐层重建结果

图6 各向同性岩心重建事件单次二维重建

Fig. 6 Once 2D simulation in isotropic rock reconstruction experiment



(a)训练图像1 (b)硬数据点图像 (c)逐层重建结果

图7 各向异性岩心重建事件单次二维重建

Fig. 7 Once 2D simulation in anisotropic rock reconstruction experiment

训练图像1,尺寸 $128 \times 128$ 像素,其局部孔隙度分选性较差,孔隙相(白色)主要由几个大孔隙构成,因此选择每隔 $n=4$ 像素利用半模板进行点模拟,可以得到图6(b),黑色点和白色点为已经确定像素值的硬数据点,灰色点表示待模拟点.半模板共模拟了1024个点,占有所有点的6.25%.随后,利用全模板模拟剩余点,获得二维重建结果图6(c).而对于各向异性岩心图像实验的训练图像1,即图7(a),由于该图中孔隙分布均匀,局部孔隙度的分选性较好,所以选择 $n=2$ ,半模板模拟点数为4096,占有所有点的25%.图7(a)~(c)表示了实验2的一次二维重建过程.

### 3.4 全模板形态设计

在半模板模拟完成后,利用全模板模拟剩余点.在这一过程中使用多级网格策略,可以有效提取训练图像的长程信息,多级网格的具体实现方法见文献[2].文献[3]对多级网格策略进行了改进,在两级网格之间增加子网格,进一步提高已知数据在数据模板中的比例,本文通过合理设计全模板形态,也达到了同样的效果.

图8(a)为某 $8 \times 8$ 待模拟网格,其中黑色点为硬数据,已经在上一级网格中模拟,白色点为待模拟点.根据纵横坐标是否为偶数,可以将所有待模拟点分为三类:点 $a$ 横坐标为奇数、纵坐标为偶数,点 $b$ 横坐标为偶数、纵坐标为奇数,点 $c$ 横纵坐标均为奇数.对这三种情况分别设计全模板.以点 $a$ 为例,根据硬数据与该点的位置关系,将数据模板设计为图8(b)所示,模板中采用镂空结构,含有黑点20个、深灰点2个和浅灰色1个.其中黑点必然含有硬数据,深灰点可能含有数据,浅灰色点为待模拟点.此时模板 $\tau_{n=22}$ 可能的数据事件数量最多为 $K^{n-n'}=2^2=4$ .如果仍采用 $7 \times 9$ 的矩形模板,则 $K^{n-n'}=2^{62-20} \approx 4.39 \times 10^{12}$ ,点模拟时间大大延长.同时由于已完成模拟的点会成为硬数据,成为下一次模拟的条件,使得算法具有一定的贪婪性,大量使用上级网格点硬数据进行重建,可以降低重建误差.全模板b和全模板c的设计方法同全模板a类似.

### 3.5 利用半模板重建算法的主要步骤

综上所述,可以得到利用半模板方法进行三维重建的主要步骤:

(1) 利用全模板从第1张二维训练图像中生成数据事件,构建数据集,并根据局部孔隙度分选性确定半模板使用范围.

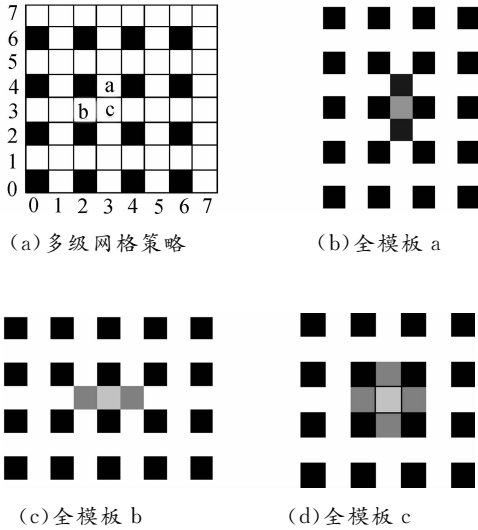


图 8 全模板设计方法

Fig. 8 Design method of all-template

(2) 对于各向同性多孔介质,利用半模板从第 1 张训练图像中生成数据事件构建模式集,而对于各向异性多孔介质,则利用半模板从另一张二维训练图像中生成数据事件。

(3) 以第 1 张训练图像为待重建三维图像的第 1 层,并进入下一待重建层。

(4) 随机访问一个处于半模板使用范围内的待模拟点,利用半模板方法进行点模拟,模拟完成后储存为硬数据。当所有范围内待模拟点都已完成模拟后,进入步骤(5)。

(5) 根据多级网格策略布置网格点,随机访问一个待模拟点,利用全模板方法进行匹配。当前重建层内的像素点都已完成模拟后,进入步骤(6)。

(6) 如果三维图像所有层都已完成重建,则输出实验结果,否则进入下一待重建层,循环步骤 4、5。

## 4 实验结果及分析

### 4.1 二维河道图像重建

利用红黑树方法构建模式集,相比于搜索树方法具有更高的时间效率。进行与文献[3]中类同的实验,以图 9(a)为二维河道训练图像,图像尺寸  $250 \times 250$  像素。利用 SNESIM 算法进行无条件二维重建,初始状态含随机布置的 58 个采样点,使用 6 重多级网格,构建 11 个搜索树,最大搜索树消耗内存 2 MB,进行 100 次重建,平均耗时 3.2 s,随机选取一组重建结果如图 9(b)。采用相同的参数和模板设计方法,利用红黑树方法构建模式集,最大

红黑树消耗内存 2.3 MB,进行 100 次重建,平均耗时 2.3 s,随机抽取一组重建结果如图 9(c)。该实验说明红黑树同搜索树相比具有相似的空间复杂度和更小的时间复杂度。本次实验采用 2.9 GHz Windows 计算机环境,下文所有实验均采用此种实验环境。

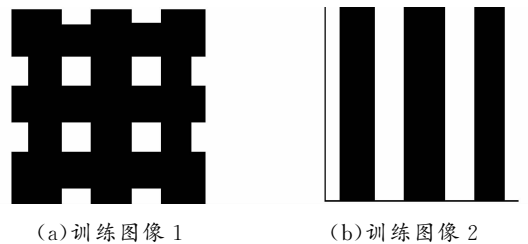


图 9 二维图像重建实验

Fig. 9 Experiment for 2D channelized reservoir section

### 4.2 多孔介质图像重建

将重建算法应用于具有简单规则结构多孔介质图像中。对于某各向同性的多孔介质样本 1,其横断面图像如图 10(a),尺寸  $128 \times 128$  像素。将该图分别通过全模板与半模板构建模式集 1 与模式集 2,进行三维重建,可以得到结果如图 11(a)。对于某各向异性的多孔介质样本 2,其横向剖面图与样本 1 相同,但纵向剖面图如图 10(b),尺寸同图 10(a),两张剖面图的形态有着强烈的差异。对于这类多孔介质,以图 10(a)为训练图像 1,用全模板构建模式,以图 10(b)为训练图像 2,用半模板构建模式,利用本文算法进行重建,可以得到结果如图 11(b)。



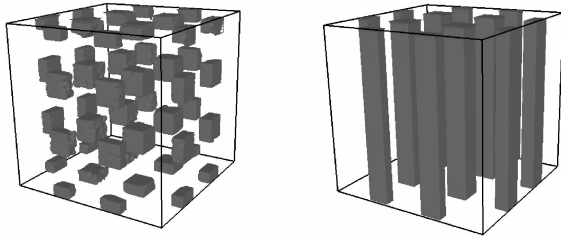
(a)训练图像 1 (b)训练图像 2

图 10 多孔介质图像重建实验训练图像

Fig. 10 Training image in 3D porous medias reconstruction experiment

两重建结果尺寸均为  $128 \times 128 \times 128$  像素,由于模式信息简单,单次三维重建耗时 20 s。观察两重建结果,实验 1 结果中含有若干正方体,实验 2 结果中含有若干长方体,两样本虽然拥有着相同的横截面,其实际结构却存在很大差异。说明对于各向同性样本,一张训练图像就可以反映样本的整体特征,重建算法应充分利用该图信息。而对于各向

异性样本, 一张训练图像不能反映样本整体特征, 需要从多张图像中提取多方向模式信息进行重建.



(a) 实验 1 (b) 实验 2

图 11 多孔介质图像重建实验结果

Fig. 11 Simulated realizations in 3D porous medias reconstruction experiment

### 4.3 储集层岩心图像重建

利用计算机断层扫描 (CT, Computed Tomography) 技术, 可以获得某些储集层岩心的真实三维图像. 为了对比实验结果, 验证算法有效性, 从 CT 图像中抽取一张或多张二维图像进行三维重建. 在地质统计学中, 经常使用统计特征函数, 如两点相关函数和线性路径函数<sup>[13]</sup>, 来描述孔隙空间, 通过对比重建结果与岩心 CT 图像的统计函数可以验证算法. 同时, 孔隙与喉道的尺寸是岩心结构的重要参数, 孔隙网络模型<sup>[14]</sup>可以提取孔隙空间的拓扑结构, 利用该模型计算两个三维图像的孔隙参数, 也可以用于验证算法.

利用本文所述算法, 对多组岩心样本进行了实验, 均获得了理想结果, 以下展示随机抽取的两组实验结果, 分别代表了各向同性和各向异性的岩心图像的三维重建.

4.3.1 实验 1 各向同性岩心的重建 现获得某岩心样本 CT 序列图像, 该图像在 X、Y、Z 方向统计特性函数分布近似, 认定该岩心具有各向同性. 从 CT 图像中随机抽取一张作为训练图像 (图 12), 尺寸 128×128 像素, 白色表示孔隙相, 黑色表示岩石相. 根据本文算法进行三维重建, 半模板  $\tau_{1(n=49)}$  尺寸 7×7, 全模板  $\tau_{2(n=22)}$ , 重建结果尺寸 128×128×128 像素. 图 13(a)(b) 分别呈现重建结果与岩心 CT 图像的孔隙相透视图, 孔隙相用灰色显示, 岩石相不显示; (c)(d) 分别为重建结果与岩心 CT 图像的剖面图, 其中孔隙相用浅灰色显示, 岩石相用深灰色显示. 观察重建结果与岩心 CT 图像, 两者视觉特征基本相符.

利用两种参考算法进行本组实验, 概率融合方法采用各加权因子相等的线性加权公式, 连续逐层采样方法使用 9×9 搜索模板, 具体参数与运算时

间列于表 1. 本文算法进行一次重建仅耗时 35 s, 在时间效率上具有较大优势.

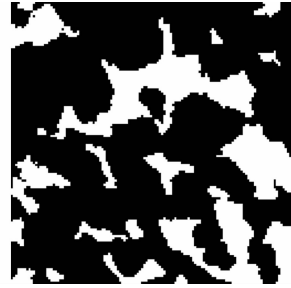
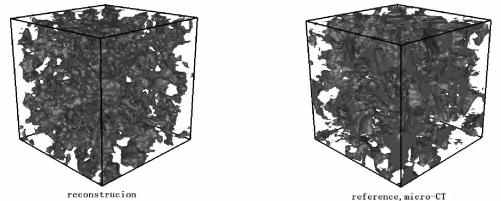


图 12 各向同性岩心重建实验训练图像  
Fig. 12 A training image in isotropic rock reconstruction experiment

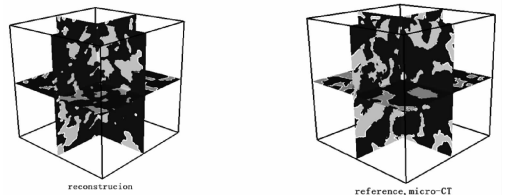
表 1 岩心图像实验 1 各算法详细参数与运算时间

Tab. 1 Detailed parameters and CPU times for three approach in isotropic rock reconstruction experiment

Algorithm	Detailed parameter	Multiple grids	Data template	CPU time(s)
Probability aggregation	$\omega_{1,2,3}=0.33$	4	$\tau_{n=48}$	899
Sequential 2D simulation	$\tau_n=9 \times 9$	3	$\tau_{n=48}$	334
Fast multiple point statistics	$n=4$	2	$\tau_{1(n=49)} \tau_{2(n=22)}$	35



(a) 重建结果孔隙结构 (b) 真实岩心孔隙结构

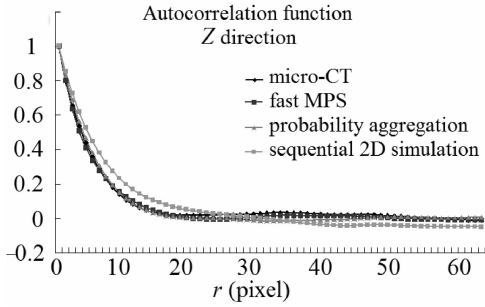


(c) 重建结果剖面图 (d) 真实岩心剖面图

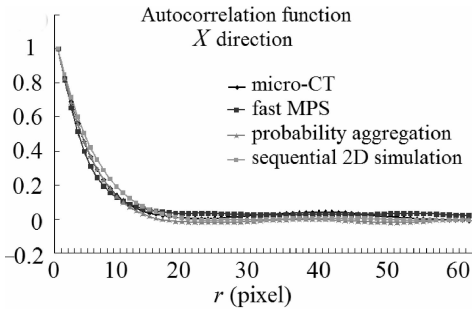
图 13 各向同性岩心图像实验重建结果视觉特性对比

Fig. 13 Visual characteristic comparison in isotropic rock reconstruction experiment

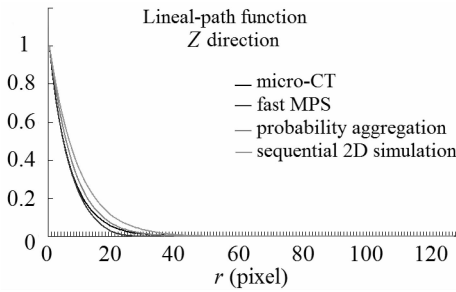
图 14(a)~(d) 分别列出了岩心 CT 图像和三种算法重建结果在 Z 方向两点相关函数、X 方向两点相关函数、Z 方向线性路径函数、X 方向线性路径函数的分布情况. 岩心 CT 图像用黑色, 本文算法用深灰色,



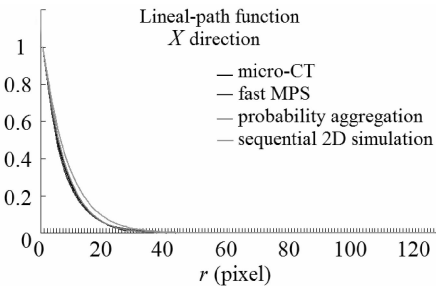
(a)Z 方向两点相关函数曲线



(b)X 方向两点相关函数曲线



(c) Z 方向线性路径函数曲线



(d)X 方向线性路径函数曲线

图 14 各向同性岩心图像实验重建结果统计特性曲线  
Fig.14 Statistics characteristic comparison in isotropic rock reconstruction experiment

概率融合算法与连续逐层采样算法分别用浅灰色。结果表明三组重建图像和岩心 CT 图像具有吻合的统计特征。因在重建过程中对 X 方向与 Y 方向采用了相同的处理方法,重建结果表明两方向统计特性相

同,所以此处仅列出 X 方向统计特性曲线。

最后,在原始 CT 图像和本文算法重建结果中构建孔隙网络模型,分析两个三维图像的孔隙与喉道尺寸,点长度设定为  $1\mu\text{m}/\text{pixel}$ ,计算结果如表 2 所示,说明两组图像孔喉参数相近。以上结果证实,本文算法能够通过一张二维训练图像,完成了对各向同性岩心三维图像的重建,得到了理想结果。

表 2 岩心图像实验 1 孔喉参数对比

Tab.2 Pore throat parameters comparison in isotropic rock reconstruction experiment

Pore throat parameters	CT images	Simulated realization
Average shape factor	0.029	0.030
Average pore radius( $\mu\text{m}$ )	23.417	24.6408
Average throat radius( $\mu\text{m}$ )	11.078	12.651
Average pore volume( $\text{m}^3$ )	$1.200 \times 10^{-12}$	$1.270 \times 10^{-12}$
Average throat volume( $\text{m}^3$ )	$8.868 \times 10^{-14}$	$9.139 \times 10^{-14}$
Average pore throat ratio	0.287	0.267

4.3.2 实验 2 各向异性岩心的重建 图 15 中绘制了某岩心样本 CT 图像的 X 方向两点相关函数曲线(灰色)和 Z 方向两点相关函数曲线(黑色),两者存在较大差异,说明该样本在 Z 方向上具有更强的连续性,样本各向异性较强烈。从该岩心样本的 CT 序列图像中,抽取两张相互垂直的二维图像,以图 16(a)为训练图像 1,以图 16(b)为训练图像 2,尺寸均为  $128 \times 128$  像素。利用本文算法进行重建,半模板  $\tau_{1(n=45)}$  尺寸  $9 \times 5$ ,全模板  $\tau_{2(n=22)}$ ,重建结果尺寸  $128 \times 128 \times 128$  像素,呈现于图 17 中,表达方式同图 13。两组图像具有相似的视觉特征。由于连续逐层采样算法不能重建各向异性图像,以概率融合方法作为对照,具体参数同实验 1,图 18 表示了原始 CT 图像和两种算法重建结果的统计函数曲线,表达方式同图 14。结果表明,三组图像具有吻合的统计特征。

最后在原始 CT 图像和本文算法重建结果中构建孔隙网络模型,点长度  $1\mu\text{m}/\text{pixel}$ ,计算结果如表 3,两组图像孔喉参数相近。以上结果证实,本文算法能够通过多张表征不同方向模式特征的二维训练图像,完成对各向异性岩心三维图像的重建,得到了理想结果。

表 3 岩心图像实验 2 孔喉参数对比

Tab.3 Pore throat parameters comparison in anisotropic rock reconstruction experiment

Pore throat parameters	CT images	Simulated realization
Average shape factor	0.030	0.030
Average pore radius( $\mu\text{m}$ )	22.767	23.282
Average throat radius( $\mu\text{m}$ )	10.165	10.587
Average pore volume( $\text{m}^3$ )	$8.870 \times 10^{-13}$	$9.25 \times 10^{-13}$
Average throat volume( $\text{m}^3$ )	$5.634 \times 10^{-14}$	$4.977 \times 10^{-14}$
Average pore throat ratio	0.292	0.268



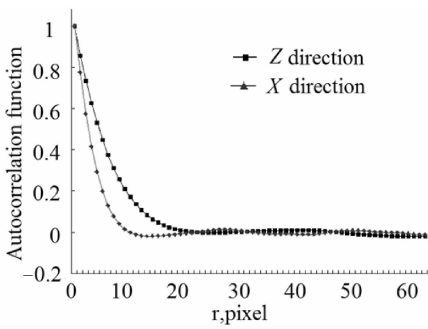
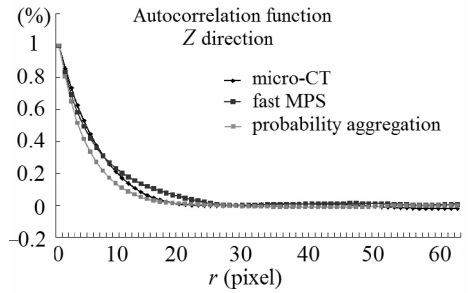
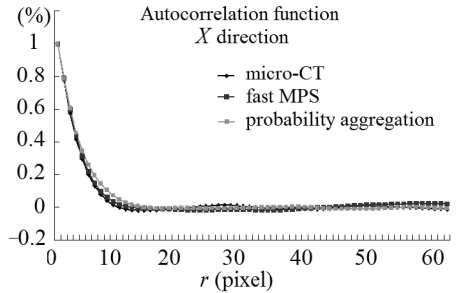


图 15 各向异性岩心 CT 图像 X、Z 方向统计特性对比

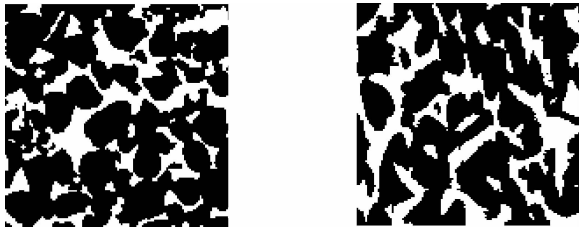
Fig. 15 Statistics characteristic comparison between x-direction and z-direction in anisotropic rock reconstruction experiment



(a) Z 方向两点相关函数曲线

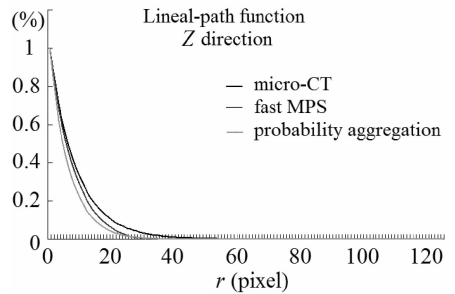


(b) X 方向两点相关函数曲线

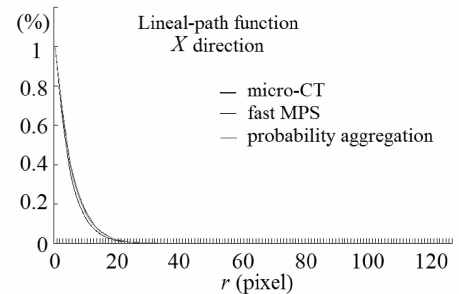


(a) 训练图像 1 (b) 训练图像 2

图 16 各向异性岩心重建实验训练图像  
Fig. 16 Training images in anisotropic rock reconstruction experiment

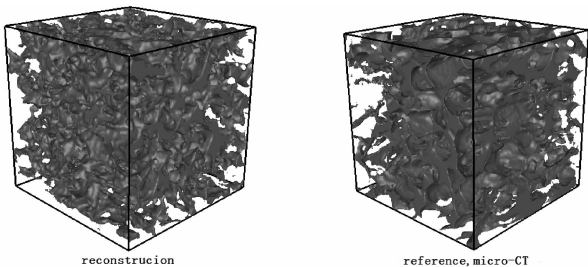


(c) Z 方向线性路径函数曲线

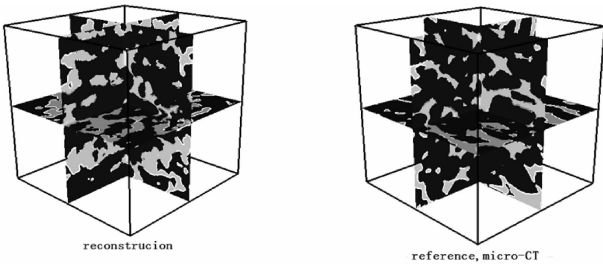


(d) X 方向线性路径函数曲线

图 18 岩心图像实验 2 重建结果统计特性对比  
Fig. 18 Statistical characteristic comparison in anisotropic rock reconstruction experiment



(a) 重建结果孔隙结构 (b) 真实岩心孔隙结构



(c) 重建结果剖面图 (d) 真实岩心剖面图

图 17 岩心图像实验 2 重建结果视觉特性对比

Fig. 17 Visual characteristic comparison in anisotropic rock reconstruction experiment

### 5 结束语

本文以多点地质统计算法为基础, 从一张或者多张二维训练图像中提取各方向模式信息, 通过红

黑树构建模式集,利用半模板或全模板进行点模拟,最终在短时间内完成图像三维重建.将重建算法应用于二维河道图像、三维多孔介质图像和三维储集层岩心图像的重建中,证明了算法可以在保证重建精度的同时显著提高时间效率.无论各向同性还是各向异性岩心,重建结果与岩心 CT 图像有着相似的视觉特性、统计特性与孔喉分布特征,说明重建算法成功复现了训练图像的模式特征,有效完成了岩心图像特别是各向异性岩心图像的三维重建.

#### 参考文献:

- [1] Guardiano F, Srivastava M. Multivariate geostatistics: beyond bivariate moments[C]//Proceedings of 4th International Geostatistical Congress. Troia 92 Troy;Kluwer Academic Publ, 1993.
- [2] Strebelle S. Conditional simulation of complex geological structures using multiple-point statistics[J]. *Math Geology*, 2002, 34(1): 1.
- [3] Strebelle S, Claude C. Solving speed and memory issues in multiple-point statistics simulation program SNESIM[J]. *Math Geosci*, 2014, 46(2): 171.
- [4] Arpat B, Caers J. Conditional simulation with patterns[J]. *Math Geology*, 2007, 39(2): 177.
- [5] Wu J, Zhang T, Journel A. A fast FILTERSIM simulation with score-based distance [J]. *Math Geosci*, 2008, 40(7): 773.
- [6] Julien S, Alexandre W, Philippe R. Parallel multiple-point statistics algorithm based on list and tree structures[J]. *Math Geosci*, 2013, 45(2): 131.
- [7] Eeef M, Guillaume P, Gregoire M. A practical guide to performing multiple-point statistical simulations with the direct sampling algorithm[J]. *Comput & Geosci*, 2013, 52: 307.
- [8] Comunian A. Probability aggregation methods and multiple-point statistics for 3D modeling of aquifer heterogeneity from 2D training images[D]. Neuchâtel; University of Neuchâtel, 2011.
- [9] Comunian A, Renard P, Straubhaar J. 3D Multiple-point statistics simulation using 2D training images [J]. *Comput & Geosci*, 2012, 40: 49.
- [10] Alireza H, Aliakbar S, Farhadpour F, *et al.* A multiple-point statistics algorithm for 3D pore space reconstruction from 2D images[J]. *Advwat res*, 2011, 34(10): 1256.
- [11] Tomas C, Charles L, Ronald R, *et al.* Introduction to algorithms, Third Edition[M]. 殷建平,等译.北京:机械工业出版社,2013.
- [12] Sheehan N, Torquato S. Generating microstructures with specified correlation functions [J]. *Appl Phys*, 2001, 89(1): 53.
- [13] Yeong C, Torquato S. Reconstructing random media. II. Three-dimensional media from two-dimensional cuts [J]. *Phys Rev E*, 1998, 58(1): 224.
- [14] Blunt M, Bijeljic B, Dong H, *et al.* Pore scale imaging and modelling[J]. *Advwat res*, 2013, 51: 197.