

储层空间连通性模拟*

冯国庆 张烈辉 李允

(“油气藏地质及开发工程”国家重点实验室·西南石油学院)

冯国庆等. 储层空间连通性模拟. 天然气工业, 2004; 24(11): 97~99

摘要 储层的空间连通性对于油气田的开发有很大程度的影响, 但如何正确地描述出储层的空间连通模式是地质学家所面临的难题之一。文章引入连通性的定义后, 将储层连通性的模拟问题转化为在模拟区域 G 中模拟一满足条件连通约束条件的平稳随机集 A , 利用随机模拟理论中的截断高斯模拟技术, 建立了在给定的连通约束条件下模拟储层岩相的空间展布的方法和具体的模拟步骤, 分析了影响连通性的因素。实例模拟结果表明: 模拟结果能很好地符合于连通约束条件; 由于不同的初始图像代表对模拟区域连通性的不同估计, 初始图像的不同, 会导致模拟结果上的差异, 这种差异性反映出模拟具有一定的多解性, 但它能为地质学家提供多种可供选择的连通模型。

主题词 油气藏 储集层 连通图 模拟 高斯定律

一、基本定义

将待模拟的区域网格化, 设模拟区域为 G , 它由 $n \times n$ 个网格组成, 即 $G = \{1, \dots, n\} \times \{1, \dots, n\}$, 具体到每个网格节点 $x = (i, j)_{1 \leq i, j \leq n}$, 它有四个邻点依次为: $(i-1, j)$, $(i+1, j)$, $(i, j-1)$, $(i, j+1)$ 。令 A 为 G 上的一平稳随机集, 它在 G 中所占比例 $p = P(x \in A)$, 它的协方差函数为 $C(h) = P(x \in A, x+h \in A) - p^2$, 在集合 A 上的有关连通性的定义参见文献[1]。引入上述定义后, 我们将要模拟的问题可以转化为在集合 G 中模拟一平稳随机集 A , 它满足条件 $A \in A(\Gamma)$, 高斯模型适合模拟这类问题^[1], 故选用高斯模型进行模拟。

二、条件模拟算法

设集合 G 中的高斯随机向量 $Y = (Y_x)_{x \in G}$, 它的数学期望为 $E\{Y_x\} = 0$, 协方差为 $\rho(h) = E\{Y_x \cdot Y_{x+h}\}$, $x, x+h \in G$, 向量 Y 的每次实现表示为 $y = (y_x)_{x \in G}$ 。对于集合 G 中任一元素, 它所对应的高斯向量为 Y , 如果 Y 的值大于等于给定的截止值 y_c , 认为该元素属于随机集 A , 即为:

$$A = \{x \in G, Y_x \geq y_c\} \quad (1)$$

y_c 由比例 p 求出:

$$p = P\{x \in A\} = 1 - G_1(y_c) \quad (2)$$

$$y_c = G_1^{-1}(p) \quad (3)$$

式中: G_1 为单变量的高斯累积分布函数; G_1^{-1} 为它的逆函数。

令 B 表示满足连通条件 Γ 的向量 $y \in \mathbf{R}^{|G|}$ 的集合。向量 Y 的条件模拟是在满足连通条件 Γ 下, 它的概率分布一次实现。在截断高斯模型中, 向量 Y 的概率密度函数为:

$$f(y) = \frac{g(y)I_B(y)}{\int_{\mathbf{R}^{|G|}} g(y)I_B(y)dy} \quad y \in \mathbf{R}^{|G|} \quad (4)$$

式中: g 为多元高斯概率密度函数; I 为指示函数, 有

$$I_B = \begin{cases} 1 & \text{如果 } y \in B \\ 0 & y \notin B \end{cases}$$

从文献[1]可知, B 的解集并不是由区间构成, 而是具有复杂的几何形状, 但对于满足条件的向量 $(Y_x = y_x)_{x \neq x_0}$, 向量 Y 的 Y_{x_0} 坐标一定属于 $\hat{B}_{x_0}$, $\hat{B}_{x_0}$ 由以下三个区间构成: $(-\infty, y_c)$, $[y_c, +\infty)$ 或 $\mathbf{R}$ 。具有概率密度 f 的向量 $\mathbf{R} \in B$ 不能用一步来模拟, 只能采用迭代方法处理, 在这里采用吉布斯抽样^[2]方法来模拟。该算法从初始图像 x_0 开始模拟, 吉布斯抽样只能得到与初始图像所对应的连通条件相一致的解。令 $(B_i)_{1 \leq i \leq n_c}$ 为 n_c 个解集 $A_i(\Gamma)$ 对应的向量 Y

* 本文由高等学校优秀青年教师教学科研奖励计划 (TRAPOYT) 资助。

作者简介: 冯国庆, 1974 年生, 博士; 主要从事油气藏描述和油气藏数值模拟研究。地址: (610500) 四川省成都市新都区。电话: (028) 83032581。E-mail: drfengqg@163.com

族, $g(B_i)$ 为它们的高斯密度函数 g 的测度, $g(\mathbf{R}^{n^2}) = 1$, 则 B 上的截断高斯密度函数 f 为:

$$f(y) = \frac{g(y)I_{B_i}(y)}{g(B)} = \frac{g(y)\sum_i I_{B_i}(y)}{\sum_i g(B_i)}$$

$$= \sum_i \frac{g(B_i)}{\sum_i g(B_i)} f_i(y) \quad (5)$$

式中: $f_i(y) = \frac{g(y)I_{B_i}(y)}{g(B_i)}$, 它是在 B_i 上的截断高斯密度函数。

综上所述, 该算法的具体步骤如下:

(1) 给定满足连通条件的初始图像 $x_0 = A(\Gamma)$ 和产生初始向量 $y_0 \in B$ 。

(2) 随机产生一条模拟路径 $\{x_1, x_2, \dots, x_n, k \in N\}$ 。

(3) 在计算 x_k 点的值时, 有: ①使用简单克里格计算该点的克里格均值 Y_{sk}^{SK} 和方差 $\sigma_{sk}^2(x_k)$; ②通过满足连通约束条件 Γ 的限制来计算 x_k 点的 Y 坐标所属于的区间, 即 $(-\infty, y_c)$ 、 $[y_c, +\infty)$ 或 $\mathbf{R}$; ③产生一独立的高斯变量 U_k , 它所属的区间与②相对应, 由 Y 所属的区间来决定 U_k 所属于的区间, 分别对应为 $(-\infty, U_c)$ 、 $[U_c, +\infty)$ 或 $\mathbf{R}$, 其中 $U_c = \frac{y_c - Y_{sk}^{SK}}{\sigma_{sk}(x_k)}$;

④计算 x_k 的值, $Y_{x_k} = Y_{sk}^{SK} + \sigma_{sk}(x_k)U_k$ 。

(4) 计算下一节点上的 Y 值, 直到所有节点都被模拟。

(5) 重复步骤(2)~(4), 直到满足收敛条件为止。

三、实例分析

下面结合具体实例来讨论对连通性模拟的一些影响条件。

假设待模拟区域的连通条件为图1所示, 即为: $(x_2 \leftrightarrow x_3); (x_3 \leftrightarrow x_4); (x_1 \leftrightarrow x_3), (x_5 \leftrightarrow x_3), (x_1 \leftrightarrow x_5)$, 为了比较比例 p 的影响, 分别取 p 为 0.2、0.4、0.7 按上述连通条件进行模拟, 所得结果见图2。从模拟结果可以看出, 随着比例 p 的增加, 更多的连通区域产生, 但整个模拟区域 A 内网格块内的连通情况很好地符合连通条件的限制(满足连通约束条件)。同时, 通过观察上述三种模拟结果的统计特征可以发现, 随着扫描次数的增加, 数据的统计特征均值、方差、协方差和比例逐渐趋于平稳, 但比例 p 对模拟结果的统计特征影响较大, 当 p 小于渗流截止概率 p_c 时, 所模拟的比例 $p^* \geq p$, 所模拟的高斯变量的均值

$E\{(y_x)^k\} \geq 0$, 它的变差函数大于基台值 1, 在扫描 100 次后数据的直方图向高值方向偏移; 而当 p 大于渗流截止概率 p_c 时, 模拟比例 $p^* \leq p$, 对应的高斯变量的均值 $E\{(Y_s)^k\} \leq 0$, 扫描 100 次后数据的直方图向低值方向偏移。

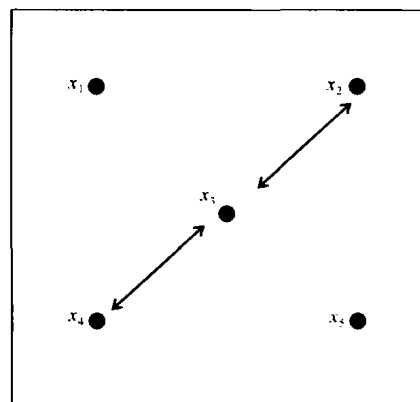


图1 连通条件示意图

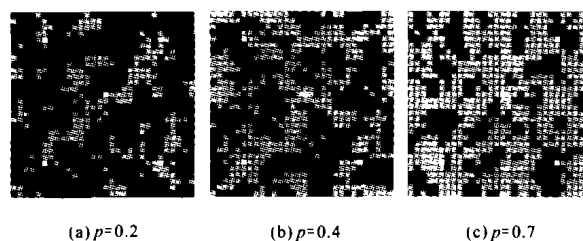


图2 对应连通条件的三种条件模拟图

(灰色块为集合 A 中的区域, 白色块为条件点)

模拟时, 初始图像选择的不同会对模拟结果造成一定的影响。初始图像表示对该模拟区域的连通情况的大概了解, 它作为已知信息输入到模拟参数中, 可以对模拟的结果进行控制, 不同的初始图像代表对模拟区域连通性的不同估计, 因而所模拟的结果也会不同, 这一点已在前面说明。选用图1所示的前两种满足连通条件的初始图像进行模拟, 选择模拟比例 p 为 0.6, 所得结果见图3。模拟结果的差异反应了模拟具有一定的多解性, 但它却能为地质

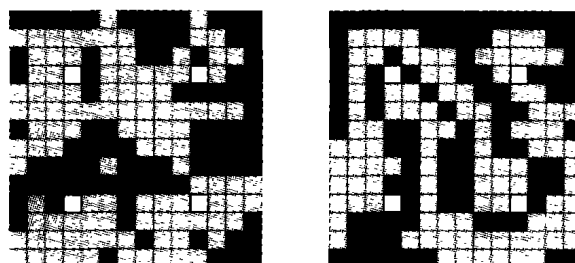


图3 不同的初始图像所对应的模拟结果

学家提供多种可供选择的连通模型,结合地质资料可优选出符合地层连通性的最优模型。另外,模拟比例 p 必须结合地质资料而给出,前面已经讲过,模拟的集合 A 是那些网格节点对应的高斯变量值大于或等于阈值值的点所组成的,在实际模拟之前,对模拟区域的已知资料的孔隙度、渗透率进行统计分析,找出该区域的阈值,来确定出合理的模拟比例 p 。

五、结 论

(1)应用截断高斯模拟建立了在给定连通条件下的岩相模拟模型,模拟结果能很好地忠实于连通约束条件,同时,模拟初始图像选择的不同,会导致模拟结果上的差异。

(2)随着比例 p 的变化,对模拟结果的统计特征(直方图、均值、方差、变差函数)也会造成相应的影响。

参 考 文 献

- 1 Allard D. Simulating a geological lithofacies with respect

to connectivity information using truncated Gaussian Mode. In: Armstrong I M *et al.* Geostatistical simulations. Kluwer Academic Publishers, 1993: 197—211

- 2 Geman S, Geman D. Stochastic relaxation, Gibbs distribution and the Bayesian restoration of images. IEEE Transactions: Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1984; 6: 721—741
- 3 Grimmet G. Percolation. New York: Springer-Verlag, 1992: 256—259
- 4 Gotway A *et al.* Stochastic simulation for imaging spatial uncertainty: comparison and evaluation of available algorithms. In: Armstrong JM *et al.* Geostatistical simulations. Kluwer Academic Publishers, 1993: 1—22
- 5 Deutsch, Journel. GSLIB: Geostatistical Software Library and User's Guide, 2nd edn. New York: Oxford University Press, 1998

(收稿日期 2004-09-05 编辑 韩晓渝)

“天然气、煤层气优化利用的催化基础”项目完成

由大连化物所、厦门大学、山西煤化所等单位承担的国家重点基础发展规划项目“天然气、煤层气优化利用的催化基础”于日前通过中石化为首的专家组验收。

5年来,7个课题组立足从本质上认识天然气、煤层气优化利用关键技术涉及到的“控制活化,选择转化”的核心问题,取得了如下突破性的进展:

- 甲烷在固体酸催化剂表面发生异裂而生成甲基正碳离子(CH_3^+)的发现开辟了甲烷活化和转化的新途径,加深了对 C—H 键在催化剂表面选择活化规律的认识,并发展出一种指导稳定 C—H 键无氧活化研究的新理论。

- 进一步加深了对超临界多相催化反应本质的认识,利用超临界技术打破催化反应中热力学平衡的限制,带动了超临界催化应用的发展;通过甲烷氧化偶联和乙烷 CO_2 脱氢反应耦合研究获得高浓度乙烯,为从天然气直接制乙烯这一过程的工业化奠定了基础。

- 针对真实条件下催化反应涉及到的结构和表面活性物种以及反应中间体的原位动态开展研究,初步形成基于动态概念的高温催化理论;在合成气通过二甲醚或合成气直接制乙烯的全套工艺和技术、多孔催化材料的制备技术、利用无机膜技术的天然气制合成气以及制氢整套技术等方面已形成了我国自主知识产权。

(钱伯章 供稿)