

# 条件模拟的原理及应用

李星 赵彦超 王国庆

(中国地质大学,湖北武汉 430074)

**摘要** 本文采用条件模拟的方法原理,对某储层的物性参数进行非均质模拟。该方法克服了统计模拟和 Kriging 估值的缺陷,并充分考虑区域化变量的空间结构性,以实际数据为例,给出了若干个条件模拟结果。

**关键词** 物性参数 非均质模拟 统计模拟 Kriging 插值 条件模拟

## The Principle and Application of the Conditional Simulation Method

LI Xing ZHAO Yanchao WANG Guoqing  
(China University of Geosciences, Wuhan, Hubei 430074)

**Abstract** This paper deals mainly with the heterogeneity simulation of the properties of physical parameters for a certain reservoir by means of conditional simulation. The technique overcomes the limitations of the geostatistical simulation and the Kriging estimate. Besides it takes into account the spatial structures of regional variables. Several conditional simulation results are also given on the basis of actual data.

**Key words** properties of physical parameters heterogeneity simulation geostatistical simulation Kriging estimate conditional simulation

在油田开发过程中要提高油田采收率,就需要对油藏进行精细描述,需要对储层物性参数(如孔隙度、渗透率、沙体厚度等)进行非均质模拟。而这些参数一般都具有明显的结构性,即空间相关性、随机性和波动性。应用传统的插值和模拟方法对这些参数进行估值和模拟时,一般都没有充分考虑这些参数所具有的上述特征,从而达不到预测效果。例如,非条件模拟或称统计模拟,虽然保持了原始随机变量的数字特征,也在一定程度上再现了原始量的波动性,但这种方法不能保证在观测点上的模拟值等于实测值。Kriging 估值虽然保证了观测点处的估计值等于实测值,也考虑了数据构形的几何特征及区域化变量(如孔隙度、渗透率、沙体厚度)的空间结构性,但该方法具有明显的平滑效应,不能重现区域化变量的波动性、非均质性。而条件模拟方法,则能充分考虑到原始量的空间结构性、随机性和局部变异性,且能使模拟值在观测点处等于实测值,从而较好地解决了传统方法中难以克服的问题。

### 1 条件模拟的基本原理

条件模拟是在 Kriging 估值的基础上进行的,

这里首先介绍一下变差函数与 Kriging 法的概念。

#### 1.1 变差函数

设区域化变量  $z(x)$  满足二阶平稳假设(王仁铎等,1988),则其变差函数的定义为

$$r^*(h) = \frac{1}{2} E [z(x) - z(x+h)]^2$$

$N(h)$  表示相距为  $h$  的点对  $x_i, x_i+h$  共有  $N(h)$  对。

根据实验变差函数可以拟合出理论变差函数。其中球状模型理论变差函数应用最为广泛。其公式为

$$r(h) = \begin{cases} 0 & h = 0 \\ c_0 + c \left( \frac{3h}{2a} - \frac{h^3}{2a^3} \right) & 0 \leq h \leq a \\ c_0 + c & h > a \end{cases}$$

式中  $c_0$  为块金常数;  $c$  为拱高;  $c_0+c$  为基台值;  $a$  为变程。变程  $a$  是一个重要的结构参数,它反映了变量的影响范围。当  $|h| > a$  时,  $z(x)$  与  $z(x+h)$  就不存在空间相关性了。

#### 1.2 Kriging 法

设  $n$  个观测点的实测值为  $z_i (i=1, 2, \dots, n)$ ,

则 Kriging 估值为

$$z_k^* = \sum_{i=1}^n \lambda_i z_i$$

这里  $n$  个 Kriging 系数  $\lambda_i (i = 1, 2, \dots, n)$  必须满足条件: ①  $\sum_{i=1}^n \lambda_i = 1$  ② 使估计方差  $\sigma_k^2 = E(z - z_k^*)^2$  达到最小值。从下列 Kriging 方程组中可解出  $\lambda_i (i = 1, 2, \dots, n)$

$$\begin{cases} \sum_{j=1}^n \lambda_j c(x_i, x_j) - \mu = c(x_i, v) (i = 1, 2, \dots, n) \\ \sum_{j=1}^n \lambda_j = 1 \end{cases}$$

其中  $c(x_i, x_j), c(x_i, v)$  可根据公式

$$c(h) = c(0) - r(h)$$

### 1.3 条件模拟

首先利用计算机产生伪随机数, 然后根据已知变差函数, 用滑动平均法得到非条件模拟  $z_s(x)$ 。通过这种方法生成的  $z_s(x)$  与具  $z(x)$  有相同的期望及协方差或变差函数  $r(h)$ 。所以求  $z_s(x)$  的 Kriging 估值  $z_{sk}^*(x)$  所用的 Kriging 系数  $\lambda_i (i = 1, 2, \dots, m)$  与求  $z(x)$  的 Kriging 估值  $z_k^*(x)$  所使用的 Kriging 系数相同, 即

$$\text{根据 } z(x) = z_k^*(x) + [z(x) - z_k^*(x)]$$

$$\text{令 } z_{sk}(x) = z_k^*(x) + [z_s(x) - z_k^*(x)] \quad (1)$$

$$z_{sk}^*(x) = \sum_{i=1}^n \lambda_i z_s(x_i)$$

可以证明(王仁铎等, 1988)  $z_{sk}(x)$  与  $z(x)$  具有相同的期望及协方差或变差函数, 又因为

$$z_k^*(x_i) = z(x_i), z_{sk}^*(x_i) = z_s(x_i) (i = 1, 2, \dots, m)$$

结合(1)式得

$$z_{sk}^*(x_i) = z_s(x_i) (i = 1, 2, \dots, m)$$

故  $z_{sk}(x)$  是  $z(x)$  的条件模拟。

## 2 应用实例

已知某地区 84 个井点的井位坐标及相应的物性参数沙体厚度, 对该区的物性参数进行模拟。

为计算方便, 先对坐标进行平移变换, 即

$$x' = x - 20498220$$

$$y' = y - 4128501$$

得到坐标变换后的井位图(图 1)。通过自编程序计算出实验变差函数, 并绘制出实验变差图(图 2)。从图 2 可以看出, 在 0 度方向变程较大, 在 135° 方向的变程次之。根据实验变差函数可拟合出球状模型理论变差函数, 并得到其变差图(图 3)。

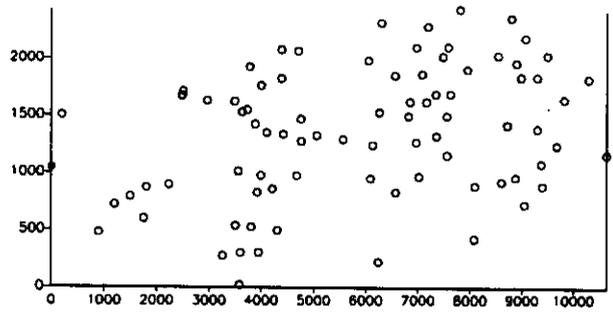


图 1 井位图

Fig. 1 Plot of wells position

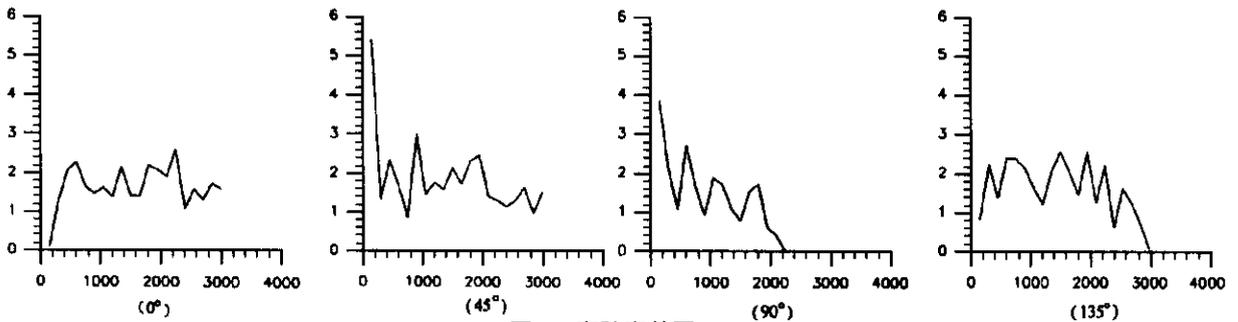


图 2 实验变差图

Fig. 2 Experimental variograms

综合考虑后, 取结构参数  $c_0 = 1, c = 2, a = 540$ 。根据这些结构参数, 对该地区的沙体厚度(图 4-a)进行插值模拟, 从而得到其 Kriging 插值(图 4-b)及若干个条件模拟结果(图 4-c, d, e)。

## 3 结语

条件模拟方法具有 3 个特点:

(1) 借助于变差函数这个有利工具, 充分考虑了原始量的空间结构性(或称空间相关性), 条件模

拟结果的均值、方差甚至协方差都接近于原始量。

(2) 由于利用了非条件模拟, 所以较好地再现了原始量的非均质性, 而非条件模拟可以有无穷多个结果, 于是条件模拟也可得到无穷多个结果, 即条件模拟是一个不确定模型。

(3) 尽管条件模拟具有随机性, 但在观测点上的模拟值等于实测值。所以随着观测点的增加, 条件模拟结果将越来越接近实测值。

需要指出的是, 条件模拟方法不同于估值, 其目

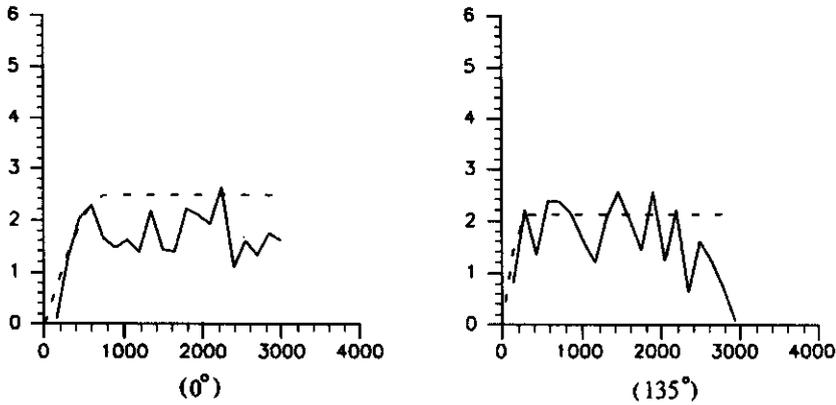


图3 球状模型理论变差图  
Fig.3 Theoretical variograms of sphere model

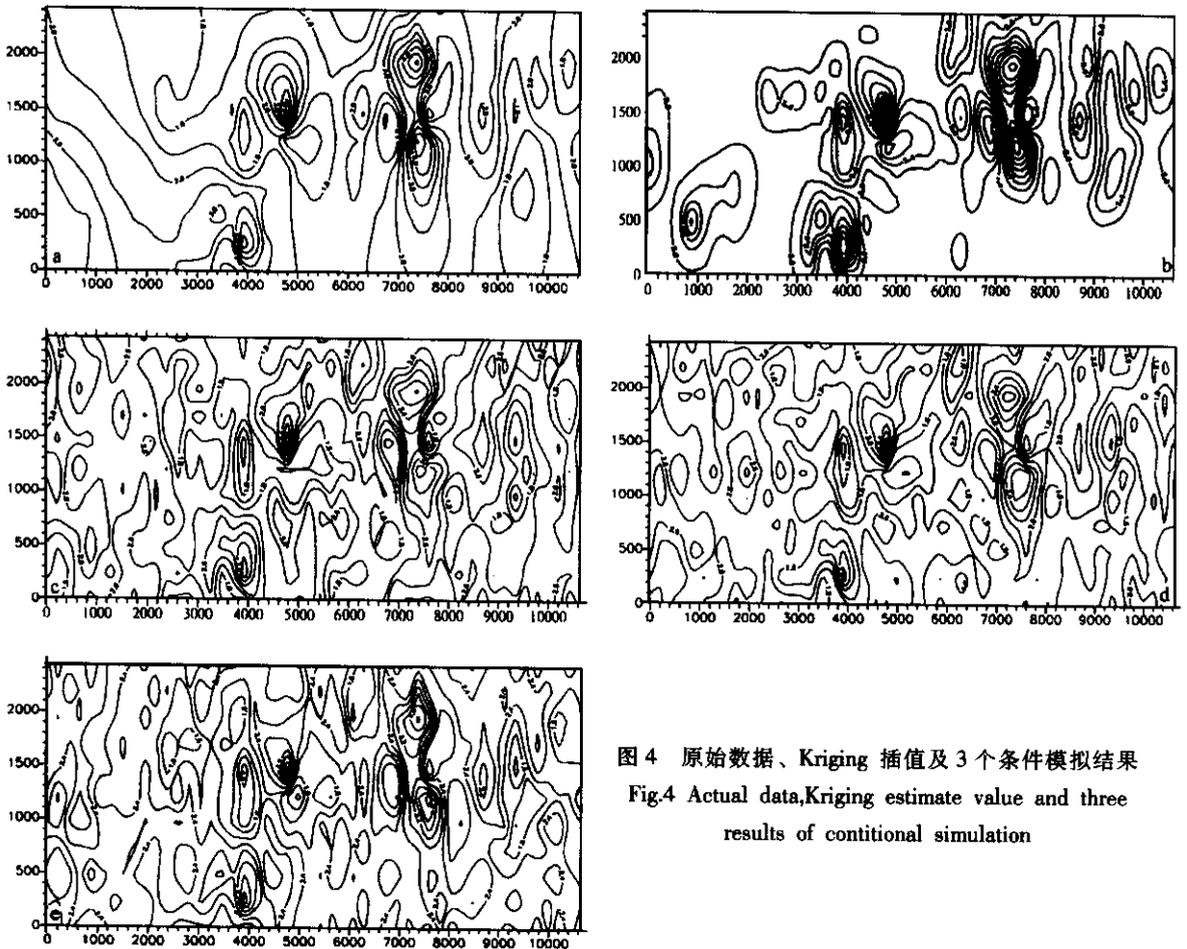


图4 原始数据、Kriging 插值及3个条件模拟结果  
Fig.4 Actual data, Kriging estimate value and three results of conditional simulation

的与用途也不同于估值。例如,从平均的角度上看, Kriging 估值更接近于真实值,但只有条件模拟才能更好地再现真实值的波动性、非均质性,这是实际应用中须加以注意的。

参考文献

陈亚新,徐英,史海滨等.2002.条件模拟原理和技术进展及在水资源系统中的应用.地质科学进展,13(2):246-252.

冯国庆,李娟,邓长明.2001.井间砂体分布的布尔条件模拟.石油钻探技术,29(4):52-63.  
胡小荣,俞茂宏,唐春安.2002.岩土体的非均质性及其力学参数的条件模拟赋值.岩石力学与工程学报,21(1):13-17.  
王仁铎,胡光道.1988.线形地质统计学.北京:地质出版社.  
徐景祯,刘晓冬,陶官仲.2000.渗透率建模的三维指示条件模拟方法及其应用.石油学报,21(3):61-65.  
于秀华,徐景祯,刘晓冬.2001.岩石渗透率三维指示条件模拟方法.大庆石油地质与开发,20(4):29-31.