

地质三维属性建模及其可视化

刘少华^{1,2}, 肖克炎³, 王新海²

LIU Shao-hua^{1,2}, XIAO Ke-yan³, WANG Xin-hai²

1. 油气资源与勘探技术教育部重点实验室, 湖北 荆州 434023;

2. 长江大学地球科学学院, 湖北 荆州 434023; 3. 中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100037

1. Key Laboratory of Exploration Technologies for Oil and Gas Resource, Ministry of Education, Jingzhou 434023, Hubei, China;

2. College of Geoscience of Yangtze University, Jingzhou 434023, Hubei, China;

3. Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China

摘要:从运筹学的角度出发,提出了基于带权线性规划的方法拟合变差函数,有效地保证了求解结果的非负性。将样本点建立空间三维网格索引,大大简化了待插点邻域样本的搜索过程,提高了 Kriging 属性建模的速度。最后结合 OpenGL 图形库,实现了属性模型的三维可视化,从而有效地实现了地质信息的定量化。

关键词:属性;建模;地质;三维;可视化

中图分类号:P611.5; P612

文献标志码:A

文章编号:1671-2552(2010)10-1554-04

Liu S H, Xiao K Y, Wang X H. Three dimensionation geological property model and its visualization. *Geological Bulletin of China*, 2010, 29(10):1554-1557

Abstract: Starting from the Operations Research, this paper proposes method of linear programming approach with weight to fitting variogram, effectively guarantee the non-negative of the results of solving. The sample points are established grid index of three-dimensional space, which greatly simplify the process of neighborhood searching sample points to insertion point, and improves the speed of model attributes based the general Kriging. In OpenGL graphics library, it achieves the three-dimensional of property model, which will effectively realizes quantitative of the geological information.

Key words: property; model; geology; three-dimensional; visualization

地质三维建模是在真三维空间中对地质实体的几何形态和地质实体内部属性参数的建模^[1-7]。地质实体的几何形态建模就是建立地质体结构模型,也叫构造建模。地质实体内部属性参数的建模就是求解地质体内部物理、化学属性参数模型,也叫属性建模。所以说三维地质属性建模是地质建模的重要组成部分。三维地质构造建模起步较早,目前市场上比较成熟的主要是国外的软件 Petrel、Micromine 等,基本上代表了当今三维地质模拟软件的最高水平,而国内目前还没有成熟的三维地质建模软件。地质

体内部含有多种反映地层岩性、油气资源分布等特性的参数,如孔隙度、渗透率、含油饱和度等,这些三维地质模拟软件主要偏重于对地质体结构进行建模,对于利用物化探属性数据建立地质体属性模型及其可视化还有一定的欠缺,还有许多问题有待于解决。本文在构造建模的基础上,利用普通 Kriging 空间插值法进行三维属性建模,从运筹学的角度出发,提出了基于带权线性规划的方法,将实验变差函数与理论变差函数进行有效的拟合。该方法有效地克服了加权回归多项式^[2]等方法求解结果的非负

收稿日期:2010-05-31;修订日期:2010-07-07

基金项目:国家“973”项目(编号:2009CB219608)、国家油气重大专项(编号:2009ZX05038)、湖北省高等学校优秀中青年团队计划项目(编号:T200602)和江西省数字国土重点实验室开发研究基金项目(编号:DLLJ200901)资助

作者简介:刘少华(1976-),男,在读博士,讲师,从事三维 GIS 数据模型、地质建模理论及应用研究。E-mail:ls811@126.com
?1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

性,并在属性建模过程中将样本点建立空间三维网格索引,大大地简化了待插点邻域样本的搜索过程,有效地解决了基于 Kriging 算法邻域选点的问题^[3],极大地提高了建模速度。最后基于 VC++6.0 编程语言,结合 OpenGL 三维图形库,实现了属性模型三维可视化,丰富发展了国内三维属性建模技术。

1 普通 Kriging 空间插值法

克立格法是在考虑了信息样品的形状、大小、待估区相互之间的空间分布等几何特征和变量的空间结构信息后^[4],为了达到线性无偏差和最小估计方差而对每个样品值赋予一定权值,利用加权平均值法来对待估区的未知量进行估计的方法,也就是说是一种待定的滑动加权平均。在区域化变量 $Z(x)$ 的数学期望为未知的情况下,建立克立格方程,也就是说此时 $E[Z(x)] = m$ 为未知常数。这时要求 $Z_V^* = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z_i$ 为无偏估计则必有条件限制。

普通克利格方程组: 它是 $n+1$ 个未知数, $n+1$ 个方程的方程组, 在本征假设条件下, 可用 $\gamma(h)$ 表示, 即

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{j=1}^n \lambda_j \overline{\gamma}(v_{\dot{b}} v_j) - \mu = \overline{\gamma}(v_{\dot{b}} V) \\ \sum \lambda_j = 1 \end{array} \right. \quad (1)$$

2 线性规划模型

一般地,假设线性规划数学模型中,有 m 个约束,有 n 个决策变量 $x_j, j=1, 2, \dots, n$, 目标函数的变量系数用 c_j 表示, c_j 称为价值系数。约束条件的变量系数用 a_{ij} 表示, a_{ij} 称为工艺系数^[5]。约束条件右端的常数用 b_i 表示, b_i 称为资源限量。则线性规划数学模型的一般表达式可写成 $\max(\min) Z = c_1x_1 + c_2x_2 + \dots + c_nx_n$

[illegible]

在用单纯法求解线性规划问题时,为了讨论问题方便,需将线性规划模型化为统一的标准形式。线性规划问题的标准型为:①目标函数求最大值(或求最小值);②约束条件都为等式方程;③变量 x_j 非负;④常数 b_i 非负。

将一般模型化为标准形：对约束条件中含有“ \leq ”的不等式，可在其左边加入一个非负变量（称为松弛变量），使之变为等式。对约束条件中含有“ \geq ”的不等式，可在其左边减去一个非负变量（称为剩余变量），使之变为等式。对约束条件中对某些变量无符号限制，可作变量替换，如 x_1 无符号限制，则令 $x_1 = x_2 - x_3$ ， x_2, x_3 为非负变量。

3 实验变差函数的拟合

变差函数的拟合过程以球状模型为例进行说明,球状模型理论公式如下:

$$\gamma(h)=\left|\begin{array}{l} 0 \\ c_0+c(\frac{3h}{2a}-\frac{h^3}{2a^3}) \\ c_0+c \end{array}\right|\left|\begin{array}{l} h=0 \\ 0\leq h\leq a \\ h>a \end{array}\right.\quad (3)$$

上式中的 c_0 、 c 和 a 为待求量。将变差函数的理论模型线性化, 当 $h=0$ 和 $h>a$ 时都比较简单, 主要是 $0 \leq h \leq a$ 的情况。令 $y=\gamma(h)$, $x_1=h$, $x_2=h^3$, $b_0=c_0$, $b_1=\frac{3c}{2a}$, $b_2=\frac{-c}{2a}$, 则上式可转为:

$$\gamma=b_0+b_1x_1+b_2x_2 \quad (4)$$

设已经求出稳健实验变差函数值, 共有 n 对数据点。记 $b_i (i=1, 2, \dots, n)$ 为实际求出的变差函数值, $h_i (i=1, 2, \dots, n)$ 为 n 个滞后距, $\gamma(h_i) = a_{i1}x_1 + a_{i2}x_2 + a_{i3}x_3$ 为对应的拟合值 (其中 $a_{i1}=1, a_{i2}=h_i, a_{i3}=-h_i^3$)。求解球状理论模型最优参数的过程则可以转化为求目标函数 $f(x) = c_1x_4 + c_2x_5 + \dots + c_nx_{n+3}$ 的极小值, 并满足以下约束条件

$$\begin{cases} a_{i1}x_1+a_{i2}x_2+a_{i3}x_3+x_{i+3}\geq b_i \\ a_{i1}x_1+a_{i2}x_2+a_{i3}x_3-x_{i+3}\leq b_i, i=1,2,\cdots,n \\ x_1,x_2,\cdots,x_{n+3}\geq 0 \end{cases} \quad (5)$$

目标函数 $f(x)$ 中的 c_i 为权系数 $t_i = \omega / h_i (i=1, 2, \dots, n)$, ω 是一个补偿系数, 以避免权系数 c_i 与 x_{i+3} 的乘积过小。该数学模型的求解就是一个线性规划问题, 可以采用二阶段单纯法进行解算, 解算的结果一定能保证所有的自变量的非负性, 就可解算出公式(3)中的 c_0 、 c 和 a_0 。

4 属性建模及三维可视化

根据实验变差函数的拟合求解得到的方程 $y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2$, 解 Kriging 方程组得到权重系数和待插

点的属性值,同时得到插值误差。用矩阵形式表示为: $C\lambda=C_m$,即

C_{11}

C_{12}

C_{13}

\cdots

C_{1n}

1

C_{21}

C_{22}

C_{23}

\cdots

C_{2n}

1

C_{31}

C_{32}

C_{33}

\cdots

C_{3n}

1

\cdots

\cdots

\cdots

\cdots

\cdots

1

C_{n1}

C_{n2}

C_{n3}

\cdots

C_{nn}

\cdots

1

1

1

\cdots

1

0

\times

λ_1

λ_2

λ_3

\cdots

λ_n

μ

$=$

C_{m1}

C_{m2}

C_{m3}

\cdots

C_{mn}

1

(6)

其中 C 是样本点间半方差值组成的矩阵,称为普通 Kriging 矩阵, C_{mi} 是待估值点 m 与已知点 i 间的半方差值和常数 1 组成的向量,又称 Kriging 向量, λ_i 代表第 i 个已知点的权重。同时有:

$C_{11}=C_{22}=\cdots=C_{nn}=C(0)=\gamma(\infty)=C_0+C(\text{即基台值})$

(7)

当 $i\neq j$ 时,

$C_{ij}=C(|X_i-X_j|)=C(0)-\gamma(|X_i-X_j|)$

(8)

在实际计算中(6)式中的 n 不能取得太大,否则

会严重影响属性建模的速度,一般都按上下、左右、前后的空间 6 个方向搜寻周围的样本点来组成方程组(6)式,每个方向都取待插点最近的样本点。本文以待搜点为中心的空间球方式搜索邻近的样本点,并将样本点建立空间三维网格索引,这样可以大大地简化搜索的过程,只要将目标范围定位在待插点周围的三维网格中(目标点本身的网格,还有其上下、左右和前后共 7 个网格),而不需要遍历整个样本点,极大地提高了建模的速度。

OpenGL 是一个开放的三维图形软件包,它独立于窗口系统和操作系统,以它为基础开发的应用程序可以十分方便地在各种平台间移植^[6]。笔者基于 VC++6.0 程序语言,结合 OpenGL 图形库,对 Kriging 属性建模算法进行实现。图 1(上)是井和分层数据通过地质构造建模生成的三维地层模型,图 1 中的 D1 和 D3 表示地层名,XYZ 为三维坐标

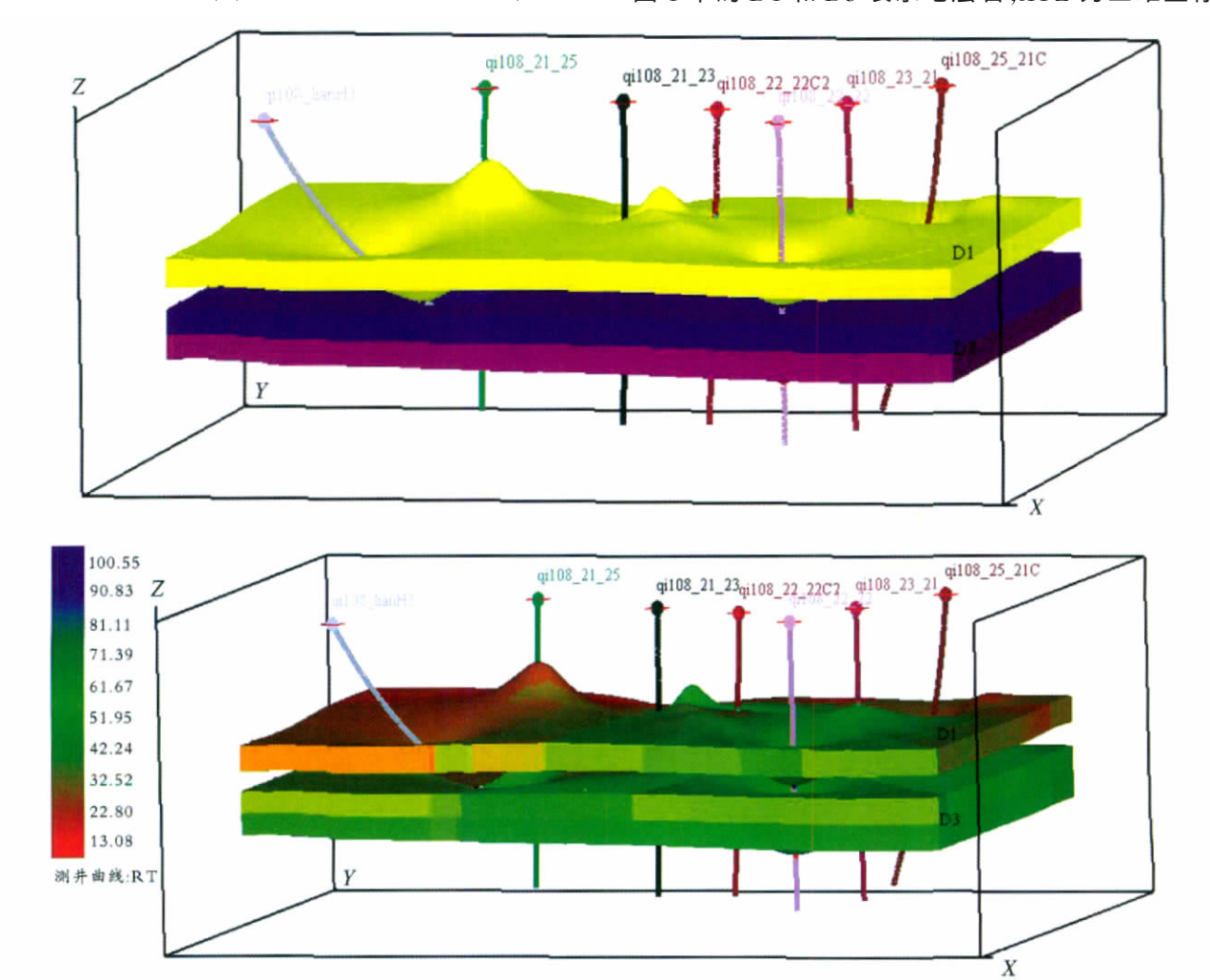


图 1 地层模型(上)和属性模型(下)

Fig. 1 Strata model and property model

©1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

轴,地质构造建模相关算法详见参考文献[7]。通过上述算法进行属性插值,建立了RT属性的三维地质属性模型,如图1(下)所示。建模的结果与实际比较吻合,说明了算法的可行性和准确性。

5 结 论

在石油、地质、矿山与地下工程研究领域,地质属性三维建模具有重要的意义,有助于实现地质行业属性数据的数字化和信息化管理,从而地质生产部门可做出更加科学的决策,指导实际生产。提出了基于带权线性规划的方法来拟合实验变差函数,有效地克服了最小二乘法等方法求解结果的非负性问题,并将样本点建立空间三维网格索引,大大地简化了待插点邻域样本的搜索过程、提高了建模速度。最后在 OpenGL 三维图形库下实现了属性模型的三维可视化,丰富和发展了国内三维属性建模技术,使

实现地质信息的定量化描述向前迈出了一大步。
致谢:本文的三维建模数据由汪中浩老师提供,在此表示感谢。

参考文献

[1]朱良峰,潘信,吴信才.三维地质建模及可视化系统的设计与开发[J].岩土力学,2006,27(5):8282-8321.
[2]王仁铎,胡光道.线性地质统计学[M].北京:地质出版社,1988.
[3]孙立双,王恩德,王井利,等.基于空间分布权系数 Kriging 邻域选点算法[J].沈阳建筑大学学报(自然科学版),2007,23(3):423-426.
[4]颜辉武,祝国瑞,徐智勇,等.基于 Kriging 水文地质层的三维建模与体视化[J].武汉大学学报(信息科学版),2004,29(7):611-613.
[5]于晓辉,张强.多目标线性生产规划的模糊联盟对策[J].运筹与管理,2009,18(2):66-72.
[6]刘少华,程朋根,陈斐.TIN 构建算法的研究及 OpenGL 下三维可视化[J].计算机工程与应用,2003,39(18):72-74.
[7]程朋根,刘少华,王伟,等.三维地质模型构建方法的研究及应用[J].吉林大学学报(地球科学版),2004, (2):309-313.



《地质通报》第 29 卷第 11 期要目预告

内蒙古中部地区晚志留世西别河组的区域构造学意义	张允平等
“不协调伸展”作用下裂陷盆地断层的形成演化模式	童亨茂
东昆仑造山带托牛山组火山岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄及其构造意义	张耀玲等
赣西北早二叠世晚期—晚二叠世地层	曾书明等
西藏措勤曲洛地区新发现侏罗纪地层	赵 兵等
陆相火山岩区填图方法研究新进展	
——“火山构造—岩性岩相—火山地层”填图方法	傅树超等
内蒙古东北部东乌珠穆沁旗乌兰哈德一带晚侏罗世满克头鄂博组	
的地质特征及岩性段划分	孟宪锋等
超临界 CO ₂ 流体萃取土壤中污染物的应用研究进展	欧阳勋等
珠江三角洲平原广东省佛山市顺德区土壤—蔬菜系统中 Pb 的健康安全预测预警	李 勇等
矿产资源评价系统(MRAS)在全国矿产资源潜力评价中的应用	娄德波等
中国西北地区矿产资源潜力地球化学评价中成矿元素异常的圈定方法	李宝强等
青海东北部木里煤田控煤构造样式与找煤预测	曹代勇等
河南汝阳地区竹园沟钼矿地质特征、成矿时代及地质意义	黄 凡等
辽南瓦房店金伯利岩剥蚀深度与金刚石剥蚀量计算	郭阳春等
贵州西南部普安—晴隆一带铋金矿勘查区沟系土壤地球化学测量试验	刁理品等
化学测量中不确定度的计算方法	
——不确定度连续传递模型计算示例	朱家平等
重液法分离密度差值很小的单矿物的技术及其应用	张美怡等