

油田三维地质建模技术及其软件实现

凌咏红, 黄小微

(武汉理工大学计算机学院, 武汉 430070)

摘要: 针对油田地质工程的特点, 将地层抽象为规则方格组成的集合, 基于离散的地质钻孔信息, 以规则网格法实现地层的几何建模; 采用 Kring 插值法将离散钻孔内地层属性值插值得到各地层层面网格点处的地层属性值, 提出根据网格点处属性值对空间任意点处的属性进行插值的形函数方法。开发油田地质建模软件 GeoPetrel 以实现三维地层的可视化、地质柱状图及地质剖面图的绘制等功能。

关键词: 三维地质建模; 规则网格; Kring 插值; 形函数插值

3D Geologic Modeling Technology of Oilfield and Its Software Implementation

LING Yong-hong, HUANG Xiao-wei

(School of Computer Science and Technology, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070)

【Abstract】 For the oilfield geologic information project, the geometry modeling is realized by regulation grid method which transforms the discrete drill data to regulation grid collection. A method called Kring interpolation is used to acquire attribute values of layer-upon-layer grid points from the interpolation of the drill data geo-property. And the shape function is brought forward to get any space point's property from the attribute values. Based on the method, the 3D visualization of geological entity, the drawing of geologic column and the drawing of geologic section can be realized by the software called GeoPetrel for oilfield geologic modeling.

【Key words】 3D geologic modeling; regulation grid; Kring interpolation; shape function interpolation

1 概述

随着计算机技术和信息技术的发展, 以“数字地球”为支撑系统的三维地质模型建模技术成为当前的研究热点之一。在石油工程中, 传统的工程地质勘察报告已难以满足工程的需要, 而新兴的数字化三维地质建模技术不仅能够以三维可视化的形式直观地提供地质构造的描述, 还可以根据用户需要对地质对象进行全方位、动态的分析、描述和利用^[1]。国外在这方面的研究进展较快, 并已开发出许多商业化软件, 如美国的MinTech、澳大利亚的MicroMine。国内学者主要通过软件平台来实现地质体的三维可视化功能, 他们更关心三维地质模型的使用, 如模型的可视化、任意点处地质柱状图和地质剖面图的绘制、相关地质属性等的直线显示。因此, 在后台建模的基础上, 一个优良的前台可视化系统及工程应用系统是地质建模所不可或缺的。

本文从三维地质几何模型的建立、地质属性数据的空间预测、地层信息的应用系统 3 个方面研究, 并在此基础上开发了地质建模软件 GeoPetrel, 以实现地质模型的可视化及常见地质柱状图、地质剖面图等绘制。

2 三维地质几何模型

三维地层信息模型实际上是地质及其相关各类信息在计算机中的数据表达, 近年来, 国内外对于构造三维数字地质模型的数据模型已有不少研究与探索, 比较典型的有三维栅格模型、TIN 模型、八叉树体元模型以及混合模型等。由于栅格模型数据结构简单直观、空间数据的叠置和组合方便、便于实现各种空间分析, 其数据量也可以通过一定的手段进行较高效率的压缩, 因此系统采用当前广泛应用的三维栅格

模型, 不同地层均是由格网分解而成的。

在地质环境中, 构建三维地层模型的主要数据源是工程钻孔数据。但工程钻探的成本较高, 在一个特定的研究区域, 往往只能获取有限的钻孔数据, 这些稀疏的钻孔资料不但数量少, 而且分布不均衡, 往往极不规则地分布在相对广袤的研究区域, 有的区域相对密集, 有的区域则非常稀疏甚至没有任何采样数据, 此时, 需要采用合理的插值方法根据有限的钻孔信息推测各栅格点处的地质信息^[2]。

Kring法是建立在地质统计学基础上的一种插值方法。该方法充分吸收了地理统计的思想, 认为任何在空间连续变化的属性是非常不规则的, 不能用简单的平滑函数进行模拟, 只可以用随机表面函数给予恰当描述。若研究区域内有 n 个钻孔, 第 i 个钻孔的空间坐标为 X_i , 该钻孔内某地层面的高程为 $P(X_i)$, 则该区域内任意点 X_0 处的高程 $\hat{P}(X_0)$ 可由 $P(X_i)$ 插值得到^[3-4]:

$$\hat{P}(X_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i P(X_i) \quad (1)$$

其中, λ_i 为权系数; n 为测点个数。Kring 法的关键在于权重系数的确定, 在满足无偏性和有效性的前提下, 由式(1)可得克立格方程组:

$$\begin{cases} \sum_{j=1}^n \lambda_j \gamma(X_i, X_j) + \mu = \gamma(X_i, X_0) \\ \sum_{j=1}^n \lambda_j = 1 \end{cases} \quad (2)$$

作者简介: 凌咏红(1969-), 女, 副教授, 主研方向: 数据库应用, 电子商务, GIS; 黄小微, 硕士

收稿日期: 2008-03-02 **E-mail:** x_w_huang@sohu.com

其中, $\gamma(X_i, X_j)$ 为 X_i 处高程值与 X_j 处高程值的方差。该方程常采用球状模型和高斯模型。

算例 在一长 60 m、宽 20 m 的地层中共进行 20 次取样, 各钻孔的中心坐标及该钻孔处某地层上表面的高程和该地层的渗透系数值如表 1 所示。

表 1 钻孔处地层表面高程及渗流系数测量值

钻孔编号	x 坐标/m	y 坐标/m	高程/m	渗透系数/(m·s ⁻¹)
1	56.7	2.3	49.1	1.61×10 ⁻⁷
2	58.7	4.0	52.8	1.73×10 ⁻⁷
3	38.0	4.7	66.2	2.17×10 ⁻⁷
4	5.3	5.0	71.4	2.34×10 ⁻⁷
5	29.7	5.3	53.1	1.74×10 ⁻⁷
6	40.7	5.7	68.6	2.25×10 ⁻⁷
7	21.3	8.3	68.0	2.23×10 ⁻⁷
8	29.7	10.7	59.8	1.96×10 ⁻⁷
9	46.3	10.7	43.0	1.41×10 ⁻⁷
10	49.3	10.7	78.1	2.56×10 ⁻⁷
11	7.3	11.3	55.5	1.82×10 ⁻⁷
12	11.7	11.3	72.9	2.39×10 ⁻⁷
13	34.7	12.0	68.9	2.26×10 ⁻⁷
14	42.7	14.7	60.7	1.99×10 ⁻⁷
15	17.3	15.0	57.0	1.87×10 ⁻⁷
16	26.0	15.0	56.1	1.84×10 ⁻⁷
17	37.3	16.0	65.9	2.16×10 ⁻⁷
18	2.7	16.3	62.5	2.05×10 ⁻⁷
19	58.7	16.3	59.2	1.94×10 ⁻⁷
20	20.7	17.3	50.0	1.64×10 ⁻⁷

将区域均匀剖分为 5 m×5 m 网格, 采用 Kring 法对各网格点上的高程渗透系数进行插值, 插值结果如图 1 所示。

		x 向网格编号				
		1	2	3	4	5
y 向 网格 编号	1	59.8	56.4	55.2	62.8	71.7
	2	68.9	65.3	60.4	63.4	65.0
	3	75.9	74.7	73.2	63.7	56.7
	4	75.9	74.7	70.5	56.7	47.0
...	

图 1 网格处的高程值(m)

根据图 1 的高程值, 采用本文实现的软件系统 GeoPetrel 画出该地层的三维立体图, 结果如图 2 所示。

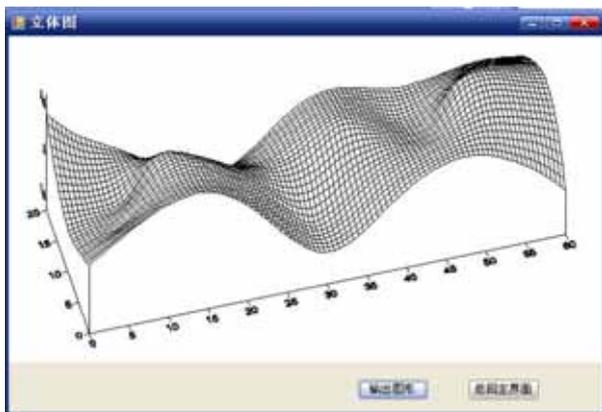


图 2 地层表面立体图

3 地质属性数据预测

地质建模的主要目的之一就是预测一个或多个工程地质变量的空间变化。在工程勘察中, 由于经济及技术方面的原因, 对某些研究区域的相关地质变量常常难以进行连续的测量, 因此往往取一些有代表性的点, 然后利用各种不同的预测技术推测出整个研究区域中该地质变量的空间变化规律, 事实上, 地层的地质属性同样可以采用 Kring 插值法进行插值^[5], 比如, 对表 1 的渗透系数采用 Kring 插值法, 可以得到如图 3 所示的格点上的渗透系数值(单位: m·s⁻¹)。

		x 向网格编号				
		1	2	3	4	5
y 向 网格 编号	1	1.96×10 ⁻⁷	1.85×10 ⁻⁷	1.81×10 ⁻⁷	2.06×10 ⁻⁷	2.35×10 ⁻⁷
	2	2.26×10 ⁻⁷	2.14×10 ⁻⁷	1.98×10 ⁻⁷	2.08×10 ⁻⁷	2.13×10 ⁻⁷
	3	2.49×10 ⁻⁷	2.45×10 ⁻⁷	2.40×10 ⁻⁷	2.09×10 ⁻⁷	1.86×10 ⁻⁷
	4	2.49×10 ⁻⁷	2.45×10 ⁻⁷	2.31×10 ⁻⁷	1.86×10 ⁻⁷	1.54×10 ⁻⁷
...	

图 3 网格点上的渗透系数估计值

采用 Kring 方法可以得到地层层面上网格点处的地质属性值, 但对于三维地层, 工程上常常需要得到空间任意点处的地质属性, 这就需要采用合适的插值方法根据网格点处的插值得到任意点处的地质属性值。形函数插值法是一种高效的插值法, 对于图 4 所示的栅格, 目标点 (x, y, z) 位于上层面的网格点 1~4 和下层面的网格点 5~8 组成的六面体内, 各网格的坐标分别为 (x_i, y_i, z_i) , 各网格点处的属性值分别为 $p(x_i, y_i, z_i)$, 则目标点处的属性值 $p(x, y, z)$ 可由各网格点处的属性值 p_i 插值得到:

$$p(x, y, z) = \sum_{i=1}^8 N_i(x, y, z) p(x_i, y_i, z_i) \quad (3)$$

其中, N_i 为 p_i 所对应的插值函数, 且对于 $i=1, 2, \dots, 8$, 均有

$$N_i(\xi, \eta, \zeta) = \frac{1}{8}(1 + \xi_i \xi)(1 + \eta_i \eta)(1 + \zeta_i \zeta) \quad (4)$$

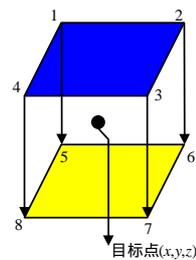


图 4 地质属性插值示意图

4 地层信息的应用系统

在油藏工程中, 工程技术人员更关心三维地质模型的使用, 比如模型的可视化、任意点处地质柱状图和地质剖面图的绘制。由于这部分内容较多, 因此本文以工程中经常用到的地质柱状图及地质剖面的绘制为例, 说明前述地质建模方法在 GeoPetrel 中的实现及实际应用^[6]。

4.1 地质柱状图的绘制

有了地质模型、插值算法, 就可以根据需要模拟研究区域内任意点处的地质柱状图, 其流程如图 5 所示。

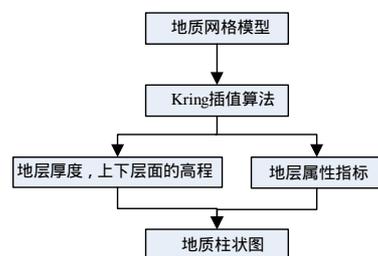


图 5 地质柱状图绘制流程

具体过程如下:

- (1) 从第 1 层开始, 依次插值计算各目标点处地层的标高和底面标高, 进而计算各层的厚度。
- (2) 整理各层的土层情况, 如果层厚度小于一个给定值, 则认为该土层尖灭掉, 地质柱状图中不考虑该层。
- (3) 土层叠加, 根据各层的顶板及底板标高, 依次将各层

画在柱状图上。

(4)插值计算地层的地质属性指标，并标在图上。

(5)柱状图显示或输出。

4.2 地质剖面图的绘制

地质柱状图只能反映一点处的地层情况，为更准确、全面地反映研究区域内的地层情况，必须使用地质剖面图。要实现地质剖面图的绘制，只需要在剖面线上选择若干个特征点，依次画出各特征点处的柱状图，并将各特征点处相同地层连接成一个整体即可，其实现流程如图6所示。

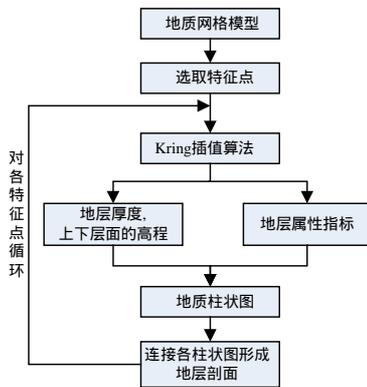


图6 地质剖面绘制流程

需要指出的是，当有地层尖灭时，由于地层在不同特征点处的尖灭情况可能不相同，因此在连接柱状图形成剖面图时需要进行必要的平滑^[7]。

(上接第236页)

实验目的是对SVDD与LS-SVM, Ant-Miner分类器在每个数据集上的分类正确率进行比较。每个分类器的分类正确率是在测试集上成功预测的实例占总实例的百分比，采用10次交叉验证法估计分类器的正确率。表2列出了3种方法的平均分类正确率与标准方差。

表2 分类正确率比较 (%)

DataSet	SVDD	LS-SVM	Ant-Miner
Iris	99.86 ± 0.02	99.35 ± 0.07	98.26 ± 0.24
Pima	83.42 ± 0.05	67.12 ± 0.06	75.37 ± 0.18
Breast	97.58 ± 0.01	94.72 ± 0.04	96.14 ± 0.27
Cleveland	89.53 ± 0.02	85.89 ± 0.78	57.48 ± 1.78
TicTacToe	96.74 ± 0.06	93.72 ± 0.36	73.04 ± 2.53

从实验结果可以看出，本文算法在所有测试数据集上的分类正确率都大于其他2种方法，且标准偏差也最小。因此，其稳定性较好，对同一数据集的不同训练数据，分类正确率不会产生较大的波动。

另外，本文还对算法的运行时间进行比较，在所有测试集上的运行时间如表3所示。从表中的数据可以看出，SVDD在所有数据集上的运行时间都低于LS-SVM和Ant-Miner。原因在于SVDD分类器能为每类数据构建最小超球体，此超球体边界可以有效地把目标对象和奇异点进行分离，从而减少对一些无关数据不必要的训练时间。同时，采用可行方向来优化求解SVDD分类器中的二次规划问题，该方法可以有效缩小用于训练SVDD的支持向量数目，因此，节约了运行

5 结束语

本文针对油田地质工程的特点，基于离散的地质钻孔信息，采用规则格网法对地层进行几何建模，该方法符合油田地质工程中区块划分较为规则的特点，且具有存储数据量小、检索查询较为方便等优点；并提出了根据网格点处属性值对空间任意点处的属性进行插值的形函数方法。在此基础上开发了油田地质建模软件GeoPetrel，以实现三维地层的可视化、地质柱状图的绘制、地质剖面图的绘制等功能。

参考文献

- [1] Hoelzel M. StratDraw: Automatic Generation of Stratigraphic Sections from Tabulated Field Data[J]. Computers and Geosciences, 2004, 30(7): 785-789.
- [2] 儒尔奈耳, 尤布雷格茨. 矿业地质统计学[M]. 侯竞儒, 黄竞先, 译. 北京: 冶金工业出版社, 1982.
- [3] 王仁铎, 胡光道. 线性地质统计学[M]. 北京: 北京地质出版社, 1988.
- [4] 孙洪泉. 地质统计学及其应用[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1990.
- [5] 徐超, 杨林德. 岩土参数的空间变异性分析[J]. 上海地质, 1996, 15(4): 16-19.
- [6] 解华明, 陈守余. 基于MA PGIS的钻孔柱状图绘制软件的编制[J]. 物探化探计算技术, 2004, 26(1): 85-90.
- [7] 蔡星, 刘斌, 刘敏燕. 数字制图技术在各类地质报告图件出版中的应用[J]. 西部探矿工程, 2000, (3): 78-83.

时间。

表3 运行时间比较

DataSet	SVDD	LS-SVM	Ant-Miner
Iris	3.52	9.38	12.46
Pima	18.26	36.78	78.73
Breast	11.45	23.53	85.25
Cleveland	13.38	35.72	68.74
TicTacToe	16.57	29.36	84.59

4 结束语

本文在SVDD的基础上提出一种高效的分类方法，利用可行方向法对其中的二次规划问题进行优化。仿真实验结果证明了该算法的可行性，且运行时间较低，具有一定的应用价值。

参考文献

- [1] 宋杰. 一种新的无参数支持向量机分类器[J]. 计算机工程, 2007, 33(23): 213-215.
- [2] 衣治安, 吕曼. 基于多分类支持向量机的入侵检测方法[J]. 计算机工程, 2007, 33(15): 168-170.
- [3] Laskov P. Feasible Direction Decomposition Algorithms for Training Support Vector Machine[J]. Machine Learning, 2002, 46(1-3): 315-349.
- [4] Parpinelli R S, Lopes H S, Freitas A A. Data Mining with an Ant Colony Optimization Algorithm[J]. IEEE Trans. on Evolutionary Computing, 2002, 6(4): 321-332.