

基于钻孔数据的三维地质空间插值方法对比研究^{*}

刘 娜¹, 谢英情¹, 楚 亮², 毛 燕¹, 闵照旭¹

(1. 云南省地震局, 昆明 650224 2 徐州国测测绘信息服务有限公司, 江苏 徐州 221006)

摘要: 在钻孔分布合理的条件下, 利用钻孔数据对地层进行插值重构是正确认识地质构造的重要手段, 选取合理、有效的插值方法是保证空间地质建模质量的根本。通过对最小二乘法、三角剖分法和克里金法等几种常用插值重构方法的阐述和数值实验, 对云南中部地区地质钻孔数据进行了处理, 在 253 个钻孔中随机抽取 90 余个样本点进行了比较: 三角剖分插值算法及最小二乘距离加权插值算法是全局插值拟和方法, 当增加、修改和删除数据点时均需重新计算权函数或线性方程组的解, 算法的稳定性和效率都明显下降, 可在不追求精度时选用; 而克里金插值法是局部插值方法, 适用于精度要求较高的场合。

关键词: 钻孔; 地层曲面; 空间插值; 适用性

中图分类号: PT301.6 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-0666(2008)增刊-0619-04

0 引言

钻孔资料是工程地质、水文地质、钻井测井和地震勘探等各项地质工作开展的基础。钻孔数据能够提供地质(地层)构造和矿产资源的分布信息, 能完整、准确地表达复杂地质现象的边界条件及地质体内包含的各种地质构造, 直观地再现地质单元的空间展布及相互关系, 最大限度地提高地质分析的直观性和准确性。利用离散的钻孔进行地质曲面可视化重构是地质构造、油气等矿产资源评价和各种数据场分布特征研究最为直观的研究手段, 常用方法是利用已知散乱数据对曲面上的点进行拟合插值(唐泽圣, 1999), 即已知某一点集 $D = \left\{ (P_i, f_i) \in R^3 \right\}_{i=1}^n$, 且 $P_i \in R^3$ 在光滑曲面 Σ 上(定义域曲面), 构造一个连续的光滑函数 $F(P) (P \in \Sigma)$, 使其满足 $F(P_i) = f_i (i = 1, 2, \dots, n)$ 。多年来已有多种算法被提出并应用在多个方面, 陈效奕等(2007)提出了适用于地质建模的基于重采样的样条曲面拟和方法; 李莉等(2008)利用普通克里金插值法对离散的数字高程模型(DEM)进行插值加密, 但都没有对这些主要的空间插值算法的适用条件和插值精度进行对

比和分析。因此, 笔者利用某一地区钻孔数据, 对最为常用的最小二乘距离加权插值算法、三角剖分算法和普通克里金算法的插值效果进行了对比和分析, 以期对地质建模的空间插值方法的合理选择提供一定的参考依据。

1 常用的三维地质空间插值方法介绍

1.1 最小二乘距离加权插值算法

又称为与距离成反比的加权方法。其基本思路是将插值函数 $F(x, y)$ 定义为各实测数据点 f_i 的加权平均, 即点 (x, y) 的值 f 对于 $F(x, y)$ 的影响与点 (x_i, y_i) 至点 (x, y) 的距离 d_i 成反比, 由

$$d_i = \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2} \quad (1)$$

可得到插值函数

$$F(x, y) = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{f_i}{[d_i(x, y)]^2}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{[d_i(x, y)]^2}} = \sum_{i=1}^n f_i \cdot W_i(x, y) \quad (2)$$

其中, $W_i(x, y)$ 为权函数, 有

^{*} 收稿日期: 2008-10-20.

$$W_i(x,y)=\frac{\prod_{j=1}^n[d_j(x,y)]^2}{\sum_{i=1}^n\prod_{j=1}^n[d_j(x,y)]^2} \tag{3}$$

权函数 $W_i(x,y)$ 具有以下性质: ① $W_i(x,y)$ 为非负; ② $W_i(x,y)$ 是 C^0 连续的; ③ $W_i(x,y)=\sigma_{ij}$, 当 $i=j$ 时, $\sigma_{ij}=1$, 否则 $\sigma_{ij}=0$ ④ $\sum W_i(x,y)=1$, 具有加权性质。

最小二乘距离加权插值算法的插值结果只能是 C^0 连续, 当增加、删除或改变一个点时, 权函数 $W_i(x,y)$ 需重新计算, 因此这种方法是一个全局的插值算法。

1.2 三角剖分线性插值方法

三角剖分插值方法是利用散乱数据构造插值曲面的一项基础工作, 在此基础上可以利用线性或有限元方法进行插值来绘制曲面或等值线, 也可直接采用三角网进行等值线或曲面绘制。三角剖分首先需要对空间中的散乱数据点进行 Dirichlet 域分割, 然后将具有公共域边界的散乱点连起来形成 Delaunay 三角形。在任意给定平面点集获得的无限种不同三角剖分中, Delaunay 三角剖分是最优的。二维的 Delaunay 三角剖分满足最小内角最大原则, 三维的 Delaunay 三角剖分满足球面准则。

Delaunay 三角网的算法基本可分为分治算法、逐点插入算法 (Dwyer 1987; Sloan 1987)、三角网生成算法 (Green 1997) 及面扫描法 (WU 2004 吴立新等, 2005)。基于二维点集的三角剖分插值主要分为线性内插和有限元方法, 线性插值法认为插值点 $P(x,y,z)$ 位于某 Delaunay 三角形所决定的平面内, 从而用线性内插求出点 P 的高程值。

1.3 克里金空间插值算法

克里金插值法 (侯景儒, 1998) 也被称为空间局部估计或空间局部插值法, 是地质统计学的主要内容之一。克里金插值法是在空间相关范围分析的基础上, 用相关范围内的采样点来估计待插点属性值, 在有限区域内对区域化变量的取值进行无偏最优估计。该方法是建立在变异函数理论及结构分析基础上的。与其他插值方法相比, 克里金方法的显著特点就是误差的方差最小。根据研究目的和条件的不同, 克里金估值方法有多种。当区域化变量服从对数正态分布时可采用对数正态克里金法; 当区域化变量存在漂移现象时可采用泛克里金法; 当区域化变量客观存在真实

特异值时可采用指示克里金法; 对于一组相关的区域化变量, 需要解决主要变量和其它变量的协同估值问题时可采用协同克里金法。具体使用时需要考察区域化变量的特征, 以选用最为合适的估值方法。其中最基本、最重要、应用最广的仍是普通克里金法 (吴立新等, 2003)。

① 变异函数的确定: 在任一方向上, 把区域化变化量 $Z(x)$ 在 x 和 $(x+h)$ 这两个点处的值之差的方差的一半定义为 $Z(x)$ 在 x 方向上的变异函数, 即 $\gamma(h)$, 当实验数据满足平稳假设和本征假设时, 采用试验变异函数

$$\hat{\gamma}(h)=\frac{1}{2N(h)}\sum_{i=1}^{N(h)}[Z(x_i)-Z(x_i+h)]^2 \tag{4}$$

来替代变异函数。对区域化变量的未知点插值, 需要将试验变异函数拟合成相应的理论变异函数模型, 然后再进行克里金方法计算。

② 假设区域化变量 $Z(x)$ 满足二阶平稳假设和本征假设, 其数学期望为 m , 协方差函数 $C(h)$ 及变异函数 $\gamma(h)$ 存在, 利用变异函数和克里金方程组给出估计值:

$$\hat{Z}(x_0)=\sum_{i=1}^n\lambda_iZ(x_i) \tag{5}$$

其中, λ_i 为权重系数, 表示各空间样本点 x_i 处的观测值 $Z(x_i)$ 对估计值 $\hat{Z}(x_0)$ 的贡献程度。利用变异函数求解权系数的普通克里金方程组

$$\left. \begin{aligned} \sum_{i=1}^n\lambda_i\gamma(x_0-x_i)+\mu &= \gamma(x_0-x_0) \\ \sum_{i=1}^n\lambda_i &= 1 \end{aligned} \right\} (i=1,2,\dots,n) \tag{6}$$

其中, μ 为拉格朗日乘数。

2 基于钻孔数据的昆明盆地地质曲面插值实验

2.1 实验数据分析

基于上述空间数据建模方法, 笔者以昆明盆地钻孔数据作为研究对象, 进行插值方法适用性和误差分析的对比研究。研究区位于云南省中部 ($24^{\circ}35' \sim 25^{\circ}10'N$, $102^{\circ}33' \sim 102^{\circ}53'E$) 是云南高原上最大、发育最全的复式地堑盆地。该盆地被多条断裂控制, 主要以 NS 向构造为主。钻孔资

料来源于昆明市水文地质监测和工程地质勘探、地震地质区划研究、各类建筑物和构筑物工程建设等获得的钻孔柱状剖面图及各类钻孔资料，共 200 余个。其中建筑物和构筑物工程建设钻孔 156 个，钻孔普遍较浅，多数没有达到 Q3 底界。笔者根据研究区断层分布特征，对所有钻孔资料进行了统计分析，并随机选择了 90 余个数据进行数值试验。

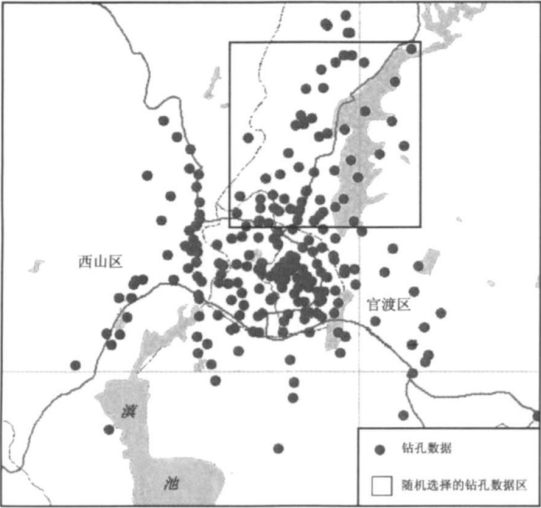


图 1 研究区钻孔数据分布图

2.2 不同插值方法的适用性对比及误差分析

根据图 1 所示试验采样点数据，利用最小二乘插值法得到图 2 所示结果；对实验样本数据在不同方向上分别计算试验变异函数，经分析认为是各向同性；采用球状模型拟合出变异函数后利用克里金插值法得到图 3 所示插值结果；利用逐点插入三角剖分线性算法，经三角剖分后采用线性内插得到图 4 所示结果。

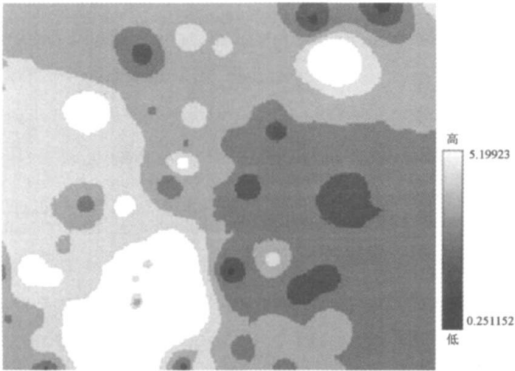


图 2 最小二乘空间插值结果

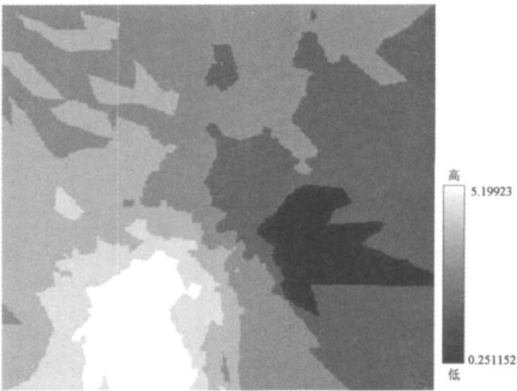


图 3 克里金空间插值结果

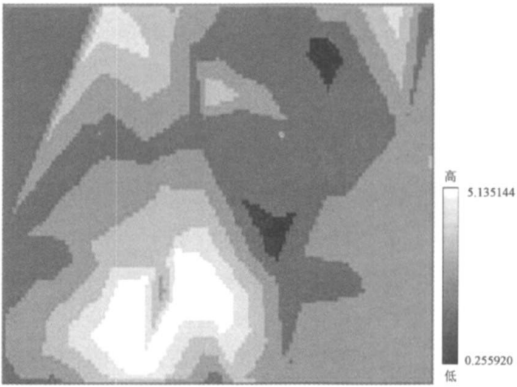


图 4 三角剖分线性插值结果

从图 2、3、4 可以看出，以上各种方法在样本点密集的中心区域基本上能够恢复原始数据模型形态，但是在样本点稀疏区域插值结果差别较大：最小二乘插值法的结果与原始数据模型差别最大，三角剖分法次之，克里金插值结果与原始数据模型的相似程度最大。从图 2 可以看出，最小二乘插值法的结果在样本点稀疏区域出现较多由局部闭合等值线构成的“牛眼”和非平滑“尖角”。三角剖分线性内插得到的结果（图 4）显示，插值结果中虽然有较多的非平滑“尖角”，但“牛眼”大量减少，说明三角剖分线性内插方法比最小二乘插值法空间形态恢复能力强，但平滑能力较差。而由克里金插值得到的结果（图 3）可以看出，插值结果中“牛眼”和“尖角”基本被消除，表明该插值方法具有较好的空间形态恢复能力，插值效果较好。

根据以上插值结果，分别计算上述几种方法插值结果的平均绝对误差、平均相对误差以及相关系数（表 1）。由于个别插值点误差较大，导致表 1 中平均相对误差较大。对比误差和相关系数可

知克里金插值法效果最好，三角剖分线性插值法次之，最小二乘插值法的效果最差。

表 1 各种插值方法的误差对比

插值方法	性质		平均绝	平均相	相关
	适用范围	运算速度	对误差	对误差	
最小二乘插值方法	数据分布均匀	快	0.753	2.019	0.563
三角剖分空间插值	数据密集, 分布均匀	慢	0.952	3.263	0.609
普通克里金插值法	各种情况, 使用广泛	慢	0.428	1.742	0.824

3 结论

在地质曲面建模过程中，所选择的插值方法会直接影响到插值误差的大小，从而影响到后续三维地质建模的精度，因此，需要对拟插值的数据进行仔细地研究和分析，结合断层分布特征和专家的意见，根据数据的特点找到一种误差较小、适用性较高的插值方法。本文中我们利用精确工程勘探获取的钻孔数据，对几种空间插值方法构筑的地质界面的精度和空间形态恢复能力进行了比较分析，认为三角剖分插值算法及最小二乘距离加权插值算法是全局插值拟合方法，当增加、修改和删除数据点时均需重新计算权函数或线性

方程组的解，算法的稳定性和效率都明显下降，可在不追求精度时选用；而克里金插值法是局部插值方法，避开了全局插值方法的缺陷，适用于精度要求较高的场合。

参考文献:

陈效奕, 张彝. 2007. 地质建模中的 B样条曲面拟合 [J]. 宁波大学学报 (理工版), 20 (6): 147—150.
侯景儒. 1998 实用地质统计学 [M]. 北京: 地质出版社.
李莉, 胡建平. 2008. 克里金插值算法在等高线绘制中的应用 [J]. 天津市城市建设学院学报, 14 (1): 68—71.
唐泽圣. 1999 三维数据场可视化 [M]. 北京: 清华大学出版社.
吴立新, 史文中. 2003. 3DGS与 3DGMS中的空间构模技术 [J]. 地理与地理信息科学, 19 (1): 5—11.
吴立新, 史文中. 2005. 论三维地学空间构模 [J]. 地理与地理信息科学, 21 (1): 1—4.
Dwyer R A. 1987. A Faster Divide-and-Conquer Algorithm for Constructing Delaunay Triangulations [J]. Algorithmica 2 (2): 137—151.
Green P J, Sibson R. 1977. Computing Dirichlet Tessellation in the Plane [J]. Comput J 21 (2): 168—173.
Span SW. 1987. A Fast Algorithm for Constructing Delaunay Triangulations in the Plane [J]. Advanced Engineering Software 9 (2): 34—5.
Wu L X. 2004. Topological relations embodied in a generalized tri-prism (GTP) model for a 3D geoscience modeling system [J]. Computers & Geosciences 30 (4): 405—418.

Comparison of Borehole Data based Interpolations
in 3D Spatial Terrain Modeling

LIU Na, XIE Ying-qing, CHU Liang, MAO Yan, MIN Zhao-xu

(1. Earthquake Administration of Yunnan Province, Kunming 650224, Yunnan, China)

(2. Guoce Surveying and Mapping Information Service Co., Ltd, Xuzhou 221006, Jiangsu, China)

Abstract

Under the rational distribution of boreholes, using interpolation method to reconstruct terrain based on borehole data is an important way to correctly understanding geological structure. A reasonable and effective interpolation method is the foundation to ensure the quality of geological modeling. We discuss and test several interpolation methods in common use, including least square method, triangulable interpolation and Kriging interpolation. Through comparing 90 of 253 samples of processed geological drilling data in certain area, we find that as for triangulable interpolation and least square distance-difference method, because they are global interpolating fitting, when a data point is added, edited or deleted, it is necessary to recompute weight functions or the solutions of linear equation group, the stability and efficiency will all drop. So these two methods can only be used in low-precision computation. While triangulable interpolation is a local interpolation method, which avoids the defects of global interpolation methods, so can be used in high-precision computation.

Key words: borehole; geological curved surface; spatial interpolation method; applicability



刘 娜 云南省防灾研究所助理工程师。2006年毕业于西南交通大学地图制图学与地理信息工程专业,获工学硕士学位。现从事3S技术研究、开发及相关科研工作。



闵祥仪 中国地震局兰州地震研究所研究员。1983年5月毕业于兰州地震研究所,获理学硕士学位,1980~1992年主要从事地球物理探测与地壳深部结构反演;1992~1995年主要从事数字地震CDS观测与研究;1995~2000年主持兰州遥测地震台网建设,此后致力于甘肃省强震动台网建设。曾经完成国家自然科学基金“青藏高原北缘地球物理参数研究”以及青藏高原北缘P波时间线性度跟踪,提出地球的物理化学本质假说,并发表利用多手段异常预报大震的模糊聚类方法等论文多篇以及强震动流动观测报告。

注:李志祥、解丽、曹彦波、崔建文、虎雄林、李西、毛燕、冉华、谢英情、杨润海、张彦琪的简介已分别刊登于本刊 Vol31, No2 Vol30 No4 Vol30 No3; Vol29 No4; Vol29 No4 Vol29 supp; Vol29 No2 Vol29 supp; Vol28 No4 Vol29, No4; Vol29 supp