

# 约束 Delaunay 三角网格生成地质构造模型

徐永安, 赵 静, 沈玲玲

(扬州大学 信息工程学院, 江苏 扬州 225009)

[摘要] 建立数字化地质模型, 能够提供多角度、多细节的观察手段, 提高油气资源评估的准确性, 方便不同领域的专家的交流和协作. 采用逐点添加、局部优化的 Watson 算法, 能够生成包含边界、断层、离散数据点的约束 Delaunay 三角网格, 用约束 Delaunay 三角网格生成地质区块的多个地质层面模型, 并组合成闭合的三维地质构造模型, 为地质勘探数据的分析和数据场的可视化提供了重要的基础.

[关键词] 三角化, 网格, 地质模型, 断层

[中图分类号] TP 391.9 [文献标识码] A [文章编号] 1672-1292(2008)04-0155-04

## On Geological Construction Model Created by Constrained Delaunay Triangular Mesh

Xu Yongan, Zhao Jing, Shen Lingling

(College of Information Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225009, China)

**Abstract** The digital geological model can provide the multi-views and multi-resolution of the underground structure and improves the accuracy of evaluating oil and gas resources, and thus it is convenient to communicating and cooperating of different fields experts. Using Watson method of adding point by point and local optimization can create constrained Delaunay triangular mesh containing boundary, fault and scattered data. Constrained Delaunay triangular mesh creates a series of geological surface models. These models are combined to form closed three-dimensional geological model that provides important basis for the analysis of geological exploration data and the visualization of data field.

**Key words** triangulation, mesh, geological model, fault

石油勘探开发数据的处理是制定油气开发方案、预测油气资源的基础. 石油勘探技术利用各种先进方法获得大量地质数据, 通过勘探数据的处理推断地下的地质构造及各种地质属性的分布状况, 从而确定石油富集区的位置、形态及石油的储量. 石油勘探开发数据量大, 分布不平衡, 数据处理复杂度高、运算量大. 将计算机的数值计算和图形显示技术应用于石油勘探领域, 通过共享的数字化地质模型, 不同领域的专家们能更容易地实现学科间的交叉, 能够提高分析和判断的准确性.

### 1 地质构造模型

油气资源是指富集在地壳中的气态、液态和固态烃类(如图 1 所示). 利用计算机建立三维地质模型, 能够极大地提高油气资源勘探的效率和准确性, 降低生产成本<sup>[1-3]</sup>. 三维地质模型使用适当的数据结构在计算机中建立起能反映地质构造的形态、各构造要素之间的关系以及地质体空间物性分布等地质特征的数学模型, 图 2 显示了一个简单的三维地质模型. 地质体构造模型的核心是各个地质面的形态及其相互之间的关系.

收稿日期: 2008-06-18  
基金项目: 国家自然科学基金 (60673060) 资助项目.  
通讯联系人: 徐永安, 副教授, 博士后, 研究方向: 计算机图形学和科学计算可视化等. E-mail: xuyongan@yzu.edu.cn

## 2 由离散点构造地质面模型

建立地质模型的初始数据在计算机内都表示为离散点的集合,如图 3 所示,构建地质体构造模型的过程是:点→面→体,由离散点重构地质面、由地质面重构地质体是地质构造建模的两个关键步骤.地质体模型描述各个地质面之间、地质面与地质体之间的拓扑关系.

根据离散点建立地质面有多种方法:自由曲面表示法、矩形网格曲面表示法、三角网络 (Triangular Irregular Networks 简称 TIN) 表示法. TIN 能够准确地描述边界,并且空间效率高,是目前最常用的地质面描述方法,其缺点是算法的数据结构复杂. TIN 法利用不规则三角形面片建立地质面模型.生成三角网格的方法很多<sup>[4-8]</sup>,最流行的是逐点添加、局部优化的 Delaunay 三角剖分. Delaunay 三角网格是离散点集的优化构型.而地质层面的勘探数据一般由边界、断层、离散数据点组成 (图 4 所示),要生成包含断层、边界在内的离散点集三角网格称为约束 Delaunay 三角剖分.

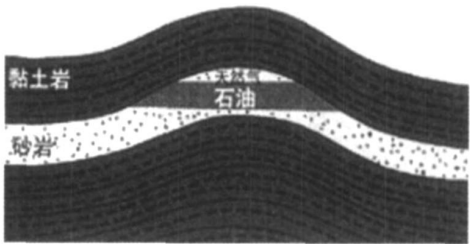


图 1 油气聚集  
Fig.1 Hydrocarbon accumulation

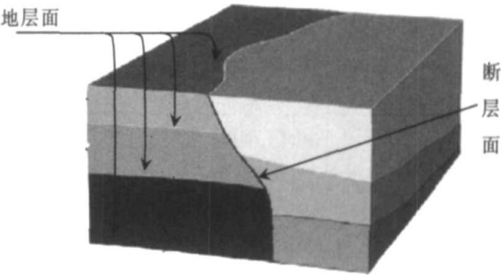


图 2 简单的三维地质模型  
Fig.2 Simple 3D geological model

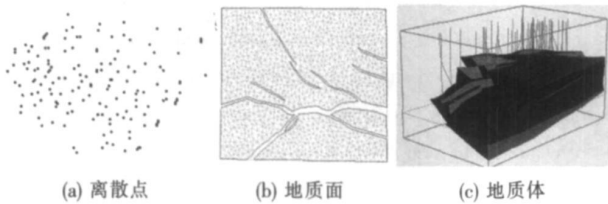


图 3 三维地质体构造模型基本建模过程  
Fig.3 Basic modeling process of 3D geological model

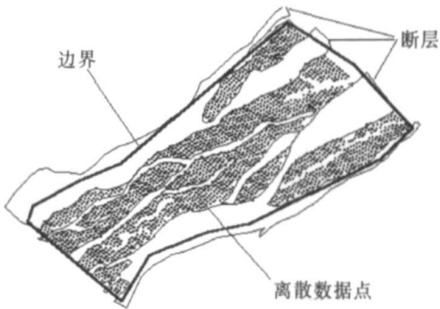


图 4 石油地质勘探数据  
Fig.4 Petroleum geology detection data

约束 Delaunay 三角剖分的 Watson 算法过程如下:

- (1) 计算给定点集的包容盒,生成一个包含所有数据点、边界、断层在内的初始三角形.
- (2) 从边界节点、断层节点、离散数据点中取出一一点  $P(x, y)$ , 在已建立的三角网中找到包含该点的三角形,如图 5(a) 所示.
- (3) 确定影响域:从包含该点的三角形开始,依据三角形记录的相邻信息,用式 (1) 进行外接圆检测,找出外接圆包含  $P$  点的三角形集,三角形集的外边界即是要寻找的影响域,如图 5(a) 所示.设  $P_1(x_1, y_1)$ 、 $P_2(x_2, y_2)$ 、 $P_3(x_3, y_3)$  为包含  $P$  点的三角形的三个顶点,  $\triangle P_1P_2P_3$  三顶点按逆时针方向排列,式 (1) 计算结果小于 0  $P$  在  $\triangle P_1P_2P_3$  外接圆内;

$$\text{Test}(p, p_1, p_2, p_3) = \begin{vmatrix} x_1 & y_1 & x_1^2 + y_1^2 & 1 \\ x_2 & y_2 & x_2^2 + y_2^2 & 1 \\ x_3 & y_3 & x_3^2 + y_3^2 & 1 \\ x & y & x^2 + y^2 & 1 \end{vmatrix} \quad (1)$$

删除所有外接圆包含  $P$  点的三角形,得到如图 5(b) 所示的 Delaunay 空洞.

- (4) Delaunay 空洞重连:如图 5(c),  $P$  点与 Delaunay 空洞的顶点依次重新连接,新产生的三角网格符合 Delaunay 准则,即任一三角形的外接圆不包含其它网格顶点.重复步骤 (2) ~ (4),直至加入所有点.
- (5) 追踪恢复边界和断层,删除多余三角形.若边界和断层的某一线段不是三角形的边,则在该线段

的中点添加一点, 重复步骤 (2) ~ (4), 直至边界和断层的所有线段是网格中三角形的边, 如图 6 所示.

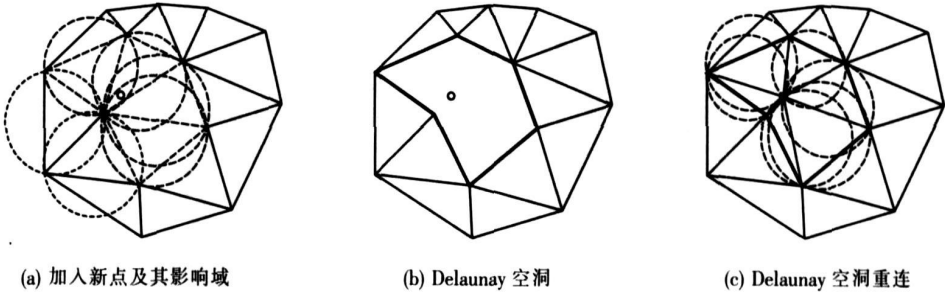


图 5 逐点插入过程

Fig.5 Process of inserting points one by one

对于如图 7 所示的逆断层, 采用桥边算法解决区域重叠现象. 处理的过程是从点  $C$  向外引出一条辅助边  $CD$ , 即桥边, 桥边  $CD$  将地层面分成两个单独的、不再包含逆断层的两部分, 即  $BCDEF$  和  $CAGHD$ . 若分解之后某一部分仍然存在逆断层的重叠区域, 则继续进行这种分解, 直到每一部分都不再包含重叠区域.

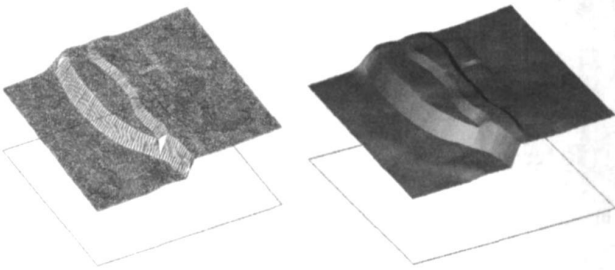


图 6 约束 Delaunay 三角网格生成的地质层面

Fig.6 Geological stratum of constrained Delaunay triangulation

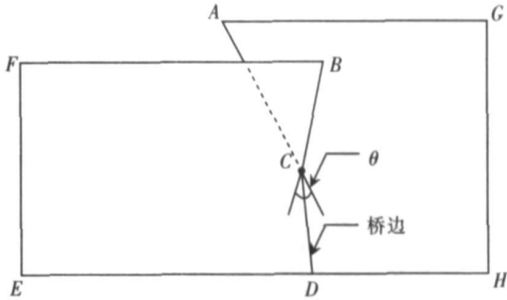


图 7 引入桥边对地层进行区域子分

Fig.7 Partitioning strata by joining edge

3 由地质面构造三维地质构造模型

根据离散点数据建立各个地质面, 然后根据这些地质面建立地质体模型. 在二维地质面模型的基础上建立三维地质模型的主要问题是地质面之间的相交线的几何一致性问题. 所谓几何一致性是指地质面之间在交线处没有缝隙, 也无交错. 如图 8 所示是一个不满足几何一致性的地质面的例子, 这种几何不一致的三维地质模型对后续工作的影响很大. 实际建模过程中采用三角网格面之间求交的方法计算地层面与断层面之间的交线, 如图 9 是两个断面和一个地质面的相交情形, 共交线的断层面和地质面采用联动三角剖分保证各个面在交线处网格一致. 联动剖分的思路就是共交线的网格面在三角剖分过程中, 交线上的点同时插入共交线的网格面中, 从而保证地质构造模型中各个层面的网格拓扑的一致性. 图 10 是一个三角网格生成的地质构造模型实例, 图 11 是带井迹线的三维地质构造模型.

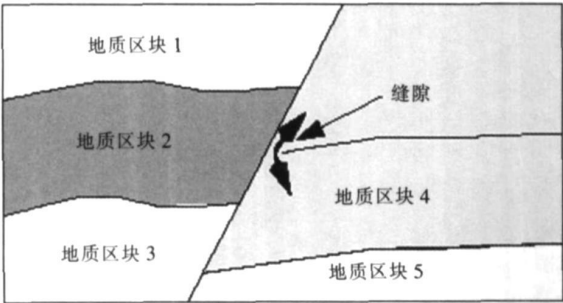


图 8 地质面之间几何不一致

Fig.8 Non-uniformity of geological strata

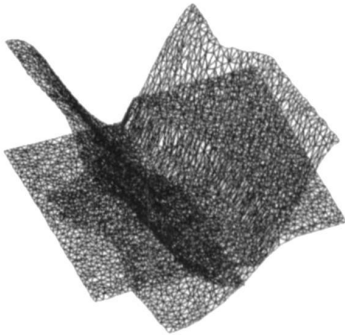


图 9 两个断面和一个地质面的相交

Fig.9 Intersection figure of two sections and a geological strata

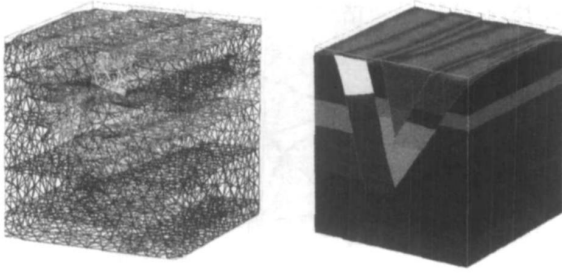


图 10 三维地质网格模型和真实感显示

Fig.10 The 3D geological mesh model and 3D effects

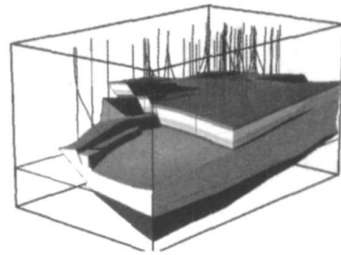


图 11 带井迹线的三维地质构造模型

Fig.11 The 3D geological model including well trajectory lines

## 4 结论

石油勘探开发数据量大,且地下的地质构造极为复杂,利用计算几何和图形显示技术建立数字化地质模型,能够直观地观察和分析地下的地质构造,提高油气资源评估的准确性.采用逐点添加、局部优化的 Watson 算法生成包含边界、断层、离散数据点的约束 Delaunay 三角网格,结合桥边区域子分、三角网格求交、联动剖分,可以用约束 Delaunay 三角网格生成的多个地质层面模型构建地质区块的三维地质构造模型,为地质勘探数据的分析提供了必要的几何模型.

## [参考文献] (References)

- [1] Watts J.W. Reservoir simulation: past, present and future[C] // SPE38441, SPE Symposium on Reservoir Simulation Monograph: SPIE, 1997: 333-342.
- [2] Alexandre Castellini Flow based grids for reservoir simulation[D]. Stanford: Stanford University, 2001.
- [3] 易发新. 油藏数值模拟的集成化建模新方法 with 软件研制 [D]. 北京: 石油勘探开发科学研究院, 1997.  
Yi Faxin. A new integrated reservoir simulation modeling method and software development[D]. Beijing: Scientific Research Institute of Petroleum Exploration and Development Doctoral Dissertation, 1997. (in Chinese)
- [4] Watson D. E. Computing the  $n$ -dimensional delaunay tessellation with application to voronoi polytopes[J]. The Computer Journal, 1981, 24(2): 167-172.
- [5] Rebay S. Efficient unstructured mesh generation by means of delaunay triangulation and bowyer-watson algorithm[J]. Journal of Computational Physics, 1993, 106(1): 125-138.
- [6] 何俊, 戴浩, 谢永强, 等. 一种改进的快速 Delaunay 三角剖分算法 [J]. 系统仿真学报, 2006, 18(11): 3 055-3 057.  
He Jun, Dai Hao, Xie Yongqiang et al. Fast improved delaunay triangulation algorithm [J]. Journal of System Simulation, 2006, 18(11): 3 055-3 057. (in Chinese)
- [7] 李刚, 赵玉新. 基于边界特征点提取的约束 Delaunay 三角剖分算法 [J]. 系统仿真学报, 2007, 19(16): 3 734-3 738.  
Li Gang, Zhao Yuxin. A algorithm for constrained delaunay triangulation based on boundary characteristic points acquiring [J]. Journal of System Simulation, 2007, 19(16): 3 734-3 738. (in Chinese)

[责任编辑: 严海琳]