

改进约束三角网在沉积相带图中的应用研究

尚福华,冀宇,曹茂俊

(东北石油大学 计算机与信息技术学院,黑龙江 大庆 163318)

摘要:针对在沉积相带追踪中,常规三角剖分算法构造的三角网无法自动解决河道砂体跨井排不连通问题,提出了一种相带边界线自动识别方法。该方法的关键步骤是采用逐点插入法先生成无约束三角网;再根据河道砂体连通情况插入虚拟井,并通过该虚拟井建立跨井排井的连通线,将这两条线作为约束边插入第一步生成的三角网中,将三角网部分重构,形成最终约束三角网,对该三角网进行相带边界追踪。系统前端采用.NET网页框架和Applet网页嵌入技术,核心绘图功能采用Java 2D绘图技术,效果良好。

关键词:约束三角网;两步法;虚拟井;沉积相带边界线

中图分类号:TP391

文献标识码:A

文章编号:1673-629X(2014)11-0242-04

doi:10.3969/j.issn.1673-629X.2014.11.061

Application Research on Improved Constrained Triangular Irregular Network for Sedimentary Facies Maps

SHANG Fu-hua,JI Yu,CAO Mao-jun

(School of Computer & Information Technology,Northeast Petroleum University,
Daqing 163318,China)

Abstract:In sedimentary facies tracing,the triangular irregular network constructed by the conventional triangulation algorithm cannot automatically solve the problem of unconnected the channel sand on different well array,put forward an automatic identification method of the sedimentary facies border curve. First of all,the method adopts the incremental inserting algorithm to generate unconstrained triangular irregular network. Secondly,insert virtual wells according to the channel sand body connectivity,and establish connected line of wells which are on the different well array through the virtual well,then insert the two lines as constraint boundary to the constrained triangular irregular network that generated in the first step,reconstructing a part of the triangular network,forming the final constraint triangulation,and tracing the triangular network facies boundary. Front-end systems uses .NET framework and Applet Web pages embedded technology,the core graphics function uses Java 2D graphics technology. The result of actual application is good.

Key words:constrained triangular irregular network;two-step method;virtual well;sedimentary facies border curve

0 引言

近年来我国的油田开发正面临着从易开发区到难开发区、从部分油藏的高含水、高采出程度,到储采基本平衡向严重不平衡过渡的严峻形势。这使得剩余油分布及地下流体流动规律的精确研究显得更加重要。

1838年瑞士地质学家克雷斯莱(Gressly)在研究法国东部侏罗纪地层时首先使用了“沉积相”这个术语,说明地层在岩石成分上和化石特征上的侧向变化性质^[1-2]。此后,“相”就广泛地应用于沉积岩石学、地质学等学科中。然而对地下砂体空间分布情况的描述(即沉积相的研究)是剩余油分布情况和地下流体流

动的规律研究的前提。沉积相研究成果重要的可视化表现形式是沉积相带图。作为沉积相带图的主要组成部分,沉积相带线可以从平面上的角度来反映当前区域具有的沉积规律。

根据沉积水动力学原理,通过沉积过程模拟可以预测沉积微相的分布^[3]。如果要准确地追踪相带线,则应从相的沉积成因入手,抓住相的沉积规律,从而合理地绘制沉积相带线。

20世纪50-60年代,有限元分析发展出网格剖分(mesh generation tessellation),主要是对离散数据在给定空间中的组织方法的研究,以简单的几何形状(单

收稿日期:2013-12-24

修回日期:2014-03-28

网络出版时间:2014-09-11

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61170132);国家重大专项(2011ZX05020-007)

作者简介:尚福华(1962-),男,吉林延吉人,教授,博士(后),研究方向为人工智能、机器学习、数据挖掘、图像处理等。

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1450.TP.20140911.1005.034.html>

纯形, simplex) 为标准对给定空间进行划分,形成集合。在 20 世纪 70 年代末、80 年代初,更灵活、精度更高的三角形/四面体简单几何对象用于剖分复杂形体的研究开始进行^[4-7]。三角剖分问题一直是近年来网格剖分技术中的一个热点研究问题^[8-10],也是计算几何及其相关领域中的一个重要研究课题。目前,最通用的全自动网格生成方法之一是 Delaunay 三角剖分。Delaunay 三角剖分方法中,大多数基于 Bowyer-Watson 法^[11-12],属于逐点插入法。

在需要高精度的 DTM 分析中,必须使用能够表示地形结构线(山脊线、谷地线)的约束三角网^[13-14]。文中采用更灵活、精度更高、能够更好地展示区块形态的约束 Delaunay 三角剖分方法。针对在沉积相带追踪过程中,普通三角剖分构造的三角网无法自动解决河道砂体跨井排不连通问题,提出了一种基于改进约束三角网的沉积相带线的自动识别方法。从地质的角度出发,在揭示沉积规律的基础上,通过改进的约束三角网方法来识别沉积相带线,展现沉积相带形成规律。

1 三角网生成算法的选择

1.1 非约束三角网生成算法

根据三角网生成算法的实现过程的不同,可以大致将算法划分为以下几类:逐点插入算法、三角网生长算法及分治算法。

Tsai 为比较算法性能,给出了一张各种算法的时间复杂度对照表^[15],如表 1 所示。

表 1 几种 Delaunay 三角网生成算法的时间复杂度

算法	一般情况	最坏情况
Lawson(1977) ²	$O(N^{4/3})$	$O(N^2)$
Green 和 Sibson(1978) ³	$O(N^{3/2})$	$O(N^2)$
Lewis 和 and Robinson(1978) ¹	$O(N \ln N)$	$O(N^2)$
Lee 和 Schachter(1980) ¹	$O(N \ln N)$	$O(N \ln N)$
Bowyer(1981) ²	$O(N^{3/2})$	$O(N^2)$
Watson(1981) ²	$O(N^{3/2})$	$O(N^2)$
Mirante 和 Weigarten(1982) ³	$O(N^{3/2})$	$O(N^2)$
Sloan(1987) ²	$O(N^{5/4})$	$O(N^2)$
Chew(1989) ¹	$O(N \ln N)$	$O(N \ln N)$
Macedonio 和 Pareschi(1991) ²	$O(N^{3/2})$	$O(N^2)$

上标种类的说明:1 表示属于分割-归并法;2 表示属于逐点插入法;3 表示属于三角网生长法。表中的 N 代表离散数据的点数; $f(N)$ 为算法最大语句频度;用 $O(f(N))$ 代表算法的时间复杂度。

经过对比和分析上述算法,逐点插入法的时间复杂度一般为 $O(n^2)$,分治法的时间复杂度一般为 $O(n)$,生长算法的时间复杂度大概为 $O(n^2)$,上述中

的 N 则表示生成的单元数。在时间复杂度方面考虑,沿用分治思想的算法最理想。然而分治算法的不足也是非常明显的,不仅合并子块的算法较为复杂,而且划分的过程中大量进行了递归运算,会极大地耗费系统内存,同时,算法优化及数据预处理的工作量较大,不符合本系统 B/S 架构的需求。三角网生长算法的搜索效率很低,时间复杂度最高,所以研究的人很少。逐点插入算法的实现难度较低,内存空间要求不大,经过对算法进行测试,逐点插入法的效率比三角网扩张法大约高三分之一。经过综合考虑,文中采用逐点插入算法构建非约束三角网。

1.2 约束 Delaunay 三角网剖分算法的选择

以约束边嵌入时机的区别对约束三角剖分算法进行分类,可分为两类:第 1 种是在构造三角网的同时考虑约束边的影响,一次性构建约束三角网,例如 shell 三角化算法;第 2 种是两步法,即先不考虑约束边,直接根据离散数据构造出非约束三角网,然后,在构造出的非约束三角网中强行嵌入约束边,最终构建出约束三角网。两步法可以同时生成约束三角网和非约束三角网,而且可以根据不同的需求嵌入各种不同的约束边以构成相应的三角网,算法实现比较灵活。

采用逐点插入法建立非约束 Delaunay 三角网,根据规则插入虚拟井,并以虚拟井为纽带,形成约束边,嵌入已得到的三角网中,构成最终的约束三角网。

2 改进约束 Delaunay 三角网的构建

2.1 区块形态变换

在一定程度上,井的排列方式决定了跟踪沉积相分布的方法。正确的转换井网坐标系对于简化沉积微相分布的跟踪过程有很大帮助。大庆地区的井网排列有一定程度的倾角,不利于地质分析。由于井网的坐标系可以由一种形式转化成另一种形式,为了将原始井网的区块形态变换为规则形态,可对井网进行旋转等操作。井网可以通过多种角度和方向的组合变换达到预期结果,文中采用逆时针旋转一定度数对区块进行旋转,使得最小变换幅度达到较好效果。

2.2 逐点插入法建立非约束三角网

该算法的基本思路是:首先针对数据点进行扫描绘制凸包,其次采用逐点插入法构建初始三角网,最后根据插入的离散点局部重构三角网。

2.2.1 扫描离散点构建凸包

(1) 求出离散数据集中 $x+y$ 和 $x-y$ 的极大极小值,沿着逆时针方向,将求出的 4 个点构造成链表从而形成初始凸包。

(2) 沿着逆时针方向,将形成的初始凸包上的点和后续点组合为有向线段,在该线段右侧进行搜索,如

能找到与线段距离最大的点 P , 则将 P 插入, 否则不做任何操作 (当 P 点与线段的距离为零时, 也需要将 P 点插入)。

(3) 重复上一步骤, 并统计连续不满足插入条件的点的个数, 如统计结果等于链表中点的个数, 则建立初始凸包过程结束。

2.2.2 建立初始非约束三角网

(1) 搜索凸包链表, 当存在相邻的两个凸包时, 将其组成三角形; 如果凸包中的其他点不在三角形的外接圆中, 则将凸包的公共点从链表中删除, 并记录该三角形。

(2) 重复上一步骤, 当链表中最后剩余三个顶点时, 连接这三个顶点, 至此, 初始的非约束三角网建立完成。

2.2.3 离散点插入

离散点插入如图 1 所示。

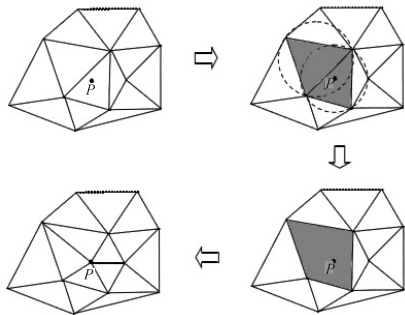


图 1 离散点插入示意图

(1) 搜索非约束三角网, 找出含有点 P 的三角形。

(2) 找出外接圆中包含 P 点的三角形, 与上一步骤中的三角形共同形成初始影响区域。

(3) 删除初始影响区域中所有三角形的公共边, 形成一个多边形, 并将多边形的顶点依次与插入点进行连接, 构成 Delaunay 三角形, 同时记录三角形。

(4) 优化三角网。采用 LOP 局部优化算法, 搜索三角网, 找到存在公共边的两个三角形, 在这两个三角形组成的四边形的外接圆中, 如果包含了对方三角形中除公顶点以外的其他点, 则交换共边, 如图 2、图 3 所示。使三角网符合 Delaunay 三角网的两个基本特性: 空外接圆和最大最小角特性。

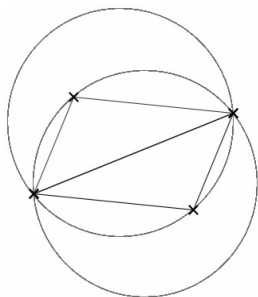


图 2 LOP 局部优化 (交换前)

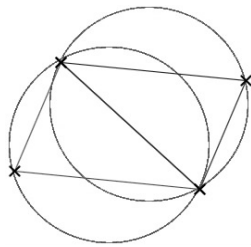


图 3 LOP 局部优化 (交换后)

(5) 重复步骤 1 到步骤 4, 直到全部点都完成插入, 就形成了 Delaunay 三角网。

2.3 插入虚拟井, 构建约束三角网

2.3.1 确定构建区域河流流向

河道是控制沉积区域的主要参数, 河道的沉积在整体上遵循一定方向。河道的确定主要以沉积水动力学原理为依据, 将河道的形成因素作为参考。

河道相带线的追踪需结合河流发育特点, 针对约束三角网剖分进行改进, 有效地确定约束边, 模拟人工经验对其进行追踪。

确定河流大致走向的具体步骤如下:

(1) 搜索相别为河道砂微相的井位, 提取井位的参数: 横坐标、纵坐标、砂岩厚度值以及有效厚度值。

(2) 在相别为河道相的井位中找出具有最大有效厚度的井位, 将该井点作为起始点, 以一定距离 (1 500 m) 为半径, 搜索距离该点最近的下一点, 以此类推, 直到找不到为止。

(3) 如果符合条件的井位数小于 3, 则降低起始有效厚度, 并重复上一步。

(4) 如果符合条件的井位数小于 2, 说明当前沉积区域整体趋势弱, 如要得到河流整体趋势角度 θ , 需要采用直线拟合方法实现。例如直线方程为 $y = kx + b$, 则 $\theta = \arctan(k)$ 。

2.3.2 插入虚拟井, 构建约束边

追踪河道微相分布的关键步骤是约束边的确定, 根据水动力学原理插入虚拟井建立约束边。在人工追踪河道微相时, 需要准确判断河道的延伸方向, 相邻井的微相类型是重要依据, 而沉积相分布的地质规律是延伸的约束条件。对于指定井可能存在多种组合的连接, 合理的连接组合应该符合以下原则:

(1) 纵向优先原则: 如在待分析区域中, 河道微相带在主体上具有沿东北方向的分布趋势, 则对井位图进行旋转操作后, 微相带表现为纵向分布。此时, 对微相带的追踪, 应优先选择纵向的连接组合;

(2) 先后近后远原则: 应优先连接相互邻近的井;

(3) 距离限度原则: 符合连接规则的井必须满足一定的距离要求;

(4) 避免交叉原则: 根据地质分布规律, 相带不存在交叉的情况;

(5)同相优先原则:在满足其他条件的情况下,进行河道微相连接时,具有相同微相类型的井应该优先被考虑。

因为井距通常大于河道宽度,所以在邻近的一排井中即便不存在河道控制点,也可在当前井与该井所在三角形相邻三角形中的井之间建立连接关系。但是要想把不在一个三角形中的井位建立连接,需要在公共边上插入虚拟井;再将虚拟井分别与起始井和目标井连接,将这两条边定义为约束边。

要尽可能多地考虑待相邻井的属性,这样才能获得较佳的微相分布结果。因此在追踪算法中,将目标井位的上下两个井排也加入判别队列。当河道的总体走向作为已知条件时,追踪方向要参考河道走向因素,尽量与之保持一致,也就是遵守纵向优先的原则。

3 应用实例

该软件平台基于油田开发数据库,以 Java 编程语言为主,前端采用 .NET 网页框架和 Applet 网页嵌入技术,核心绘图部分采用 Java 2D 绘图技术,实现了针对沉积相带图应用环境的改进两步法构造约束三角网,其中先通过逐点插入法构造无约束三角网,再插入虚拟井构建约束三角网,通过这种方法解决跨井排不连续问题。

从图 4 中可以看出,算法改进后,明显地提高了河道砂体的方向性和连续性,同时,改进后的沉积相带图也更加符合河流相储层沉积规律。

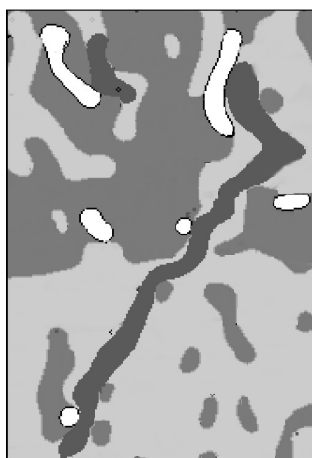


图 4 效果图

4 结束语

该软件平台不仅实现了沉积相带图的在线绘制,

而且增加图幅的鼠标实时平移拖拽、无极缩放等便捷操作功能和数据的穿透式查询。实现了地质综合分析成果的厂内共享,提升研究能力,提高工作效率,既能够为开发分析与调整工作提供支撑,又可以推进油田数字化进程,具有较大现实意义。

参考文献:

- [1] 张瑞锡. 关于“沉积相”的概念[J]. 北京地质勘探学院学报, 1957(2): 103-110.
- [2] Reading H G. 沉积环境和相[M]. 周叨鉴, 译. 北京: 科学出版社, 1985.
- [3] Tetzlaff D M, Harbaugh J W. Simulating elastic sedimentary basins[M]. New York: Van Nostrand Reinhold, 1989.
- [4] 杨 钦. 限定 Delaunay 三角网格剖分技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2005.
- [5] 李守平, 潘雨青, 陈天滋. 三维 GIS 建模方法的研究与实现[J]. 计算机应用与软件, 2006, 23(11): 29-31.
- [6] 汤井田, 任政勇, 化希瑞. 任意地球物理模型的三角形和四面体有限单元剖分[J]. 地球物理学进展, 2006, 21(4): 1272-1280.
- [7] 付 哲, 周云轩, 刘殿伟. 基于特征的面向对象虚拟 GIS 数据模型分析及其数据库实现[J]. 计算机应用研究, 2006, 23(6): 219-222.
- [8] 徐永安, 杨 钦, 吴壮志, 等. 三维约束 Delaunay 三角化的实现[J]. 软件学报, 2001, 12(1): 103-110.
- [9] 蔡 强, 杨 钦, 陈其明. 地质结构重叠域的限定 Delaunay 三角剖分研究[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2004, 16(6): 766-771.
- [10] 关振群, 宋 超, 顾元宪, 等. 有限元网格生成方法研究的新进展[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2003, 15(1): 1-14.
- [11] Watson D F. Computing the n-dimensional Delaunay tessellation with application to Voronoi polytopes[J]. Computer Journal, 1981, 24(2): 167-172.
- [12] Bowyer A. Computing Dirichlet tessellations[J]. The Computer Journal, 1981, 24(2): 162-166.
- [13] Chew L P. Constrained Delaunay triangulations[J]. Algorithmica, 1989, 4: 97-108.
- [14] Wu Xiaobo, Wang Shixing, Xiao Chunsheng. A new study of Delaunay triangulation creation[J]. ACTA Geodaetica Et Aertographic Sinica, 1999, 28(1): 990106.
- [15] Tsai V J D. Delaunay triangulations in TIN creation: an overview and a linear-time algorithm[J]. International Journal of Geographical Information Science, 1993, 7(6): 501-524.

改进约束三角网在沉积相带图中的应用研究

作者：[尚福华](#)，[冀宇](#)，[曹茂俊](#)，[SHANG Fu-hua](#)，[JI Yu](#)，[CAO Mao-jun](#)
作者单位：[东北石油大学 计算机与信息技术学院, 黑龙江 大庆, 163318](#)
刊名：[计算机技术与发展](#)[ISTIC](#)
英文刊名：[Computer Technology and Development](#)
年，卷(期)：2014(11)

引用本文格式：[尚福华](#). [冀宇](#). [曹茂俊](#). [SHANG Fu-hua](#). [JI Yu](#). [CAO Mao-jun](#) [改进约束三角网在沉积相带图中的应用研究](#)[期刊论文]-[计算机技术与发展](#) 2014(11)