

基于离散曲面相交运算的三维断层建模方法

孙志东, 屈红刚, 明镜

北京大学地球与空间科学学院, 北京 (100871)

E-mail: Everestsun@gmail.com

摘要: 断层是一种重要的地质构造, 其演化过程及形态都十分复杂, 是地学研究的一个重点对象, 为了反应真实的地质构造情况, 对断层等复杂地质体进行三维建模是进行空间分析和可视化的基础, 对于提高人们对地质构造的认知具有重要的意义。本文提出并实现了一种基于离散曲面TIN的相交运算对断层进行高效建模的方法。

关键词: Delaunay 三角剖分, 曲面相交布尔运算, 三维地学建模, 断层模型

1. 引言

三维地学建模是 GIS 在地质学研究中的应用和扩展, 它由加拿大 Simon W. Houlding 于 1993 年首先提出。它是指运用现代空间信息理论在真三维环境下将空间数据管理、地质现象解译、空间分析、地学统计工具等相结合, 从而预测地质变量和地质特性的空间变化的技术, 它是实现地质数据可视化的前提和基础^[1]。断层作为一种重要的地质构造现象, 在科研和地质工程应用中均具有十分重要的意义, 对复杂地质体建模过程中需要处理存在断层的情况。

断层建模是指根据各种物、化探资料并结合地质专家的解译结果, 对复杂地质体中的断层进行三维模拟^[2]。目前存在两种方法: 一种是局部法, 一种是整体法。所谓的局部法是指将断层分割所形成的两部分地质体分别单独建模, 通过断层面来进行最后的整合, 即先分离后整合的方法, 这是一种从现象和地质体所呈现的最终结果出发的建模思路; 整体法是指将地质体视为一个整体, 通过断层面的切割、切割后两侧地层面的位移来建模^[3], 即先整合后分离的方法, 与局部法相反, 整体法是从地质构造现象形成的过程出发的建模思路。局部法的优点是可以部分简化建模过程, 缺点是不符合事物的形成过程, 同时容易产生数据的不一致性, 导致模型的不精确; 整体法可以弥补局部法的缺点, 但是其中的计算量、难度较大, 更适合用计算机技术来实现。

2. 曲面相交

不规则三角网(TIN) 是通过从不规则分布的数据点生成连续三角面来逼近真实实体的表面。在复杂的地质模型中, 断层与断层、断层与地层之间经常会发生相交关系, 断层面将地层面分割成不同的三维曲面。为了更为真实地反映出地下空间的地层和断层的分布情况, 建立准确的地下三维地质结构模型, 利用不规则三角网(TIN) 来模拟断层面和地层面, 采用 TIN 曲面之间的切割算法来计算切割后新的曲面模型。

为了保证模拟的准确性和真实性, 两个曲面相交后要保持数据的一致性, 完整性以及最小变形。

假定曲面 A (代表地层面) 被曲面 B(代表断层面)切分为两部分 C、D, 数据一致性是指, 曲面 C 和 D 在交线处要保持数据一致, 都是以交线为曲面的边缘的一部分。完整性是指, 曲面 C 和 D 的并集等于未被切割的 B, 即不能出现切割后的面数据出现空洞或者多余。最小变形是指尽量保持曲面的原始形态, 即 C 和 D 要保持 B 三角网的形态, 不会因为相交而发生三角网的形状、位置的变化。

2.1 算法基本思想

曲面相交算法主要包括 3 个方面：切割前的曲面碰撞检测、相交三角形的求交运算和切割后的进一步处理。(1)碰撞检测即快速判断被切割面与切割面中的哪些三角形发生相交，不需要精确的计算出交点的坐标位置，其目的是为了减少以后有关计算的复杂度，可以大大减少参与计算的数据量；(2) 相交三角形的精确求交反映到单个图元上，就是计算三角形与三角形的交点位置信息；(3) 切割后的处理包括：一是完成切割后的三角网重构,包括切割面以及被切割面的三角网的重构；二是根据曲面切割后的形态，需要对两个曲面网格进行重新划分，即分辨出分割后可能形成的新的曲面，如图 1 所示。三是保证新的曲面拓扑信息的正确。

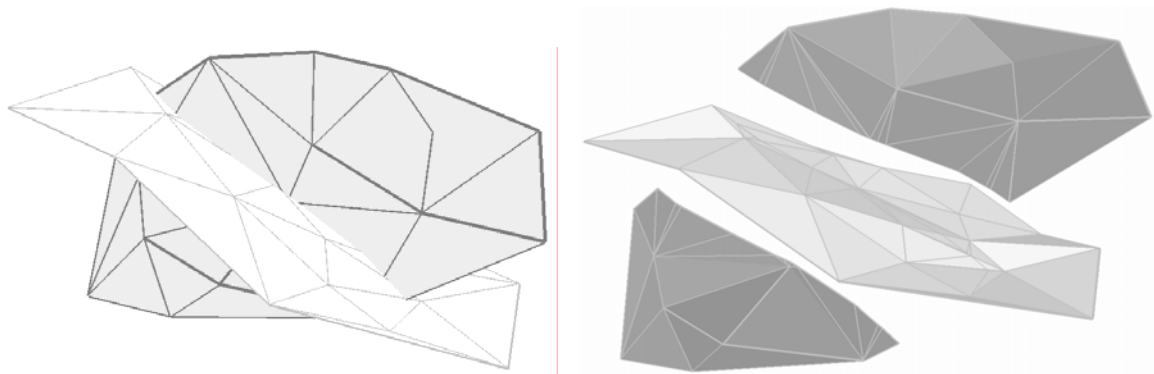


图 1 TIN 相交示意

Fig.1 Schematic diagram of cutting TIN

不规则三角网的切割示意如图 1 所示，其中垂直方向上的面表示被切割面，水平方向上的面表示切割面，其中被切割面被一分为二。

2.2 算法描述

2.2.1 基本数据结构

离散曲面以不规则三角网(TIN)来表达，每个面元是三角形，其点信息及与其他三角形的拓扑邻接信息数据结构如下：

```
Struct Point3D
{
    Long id;                //三维结点编号
    Double x,y,z;           //三维坐标
}
Struct Triangle
{
    Point3D PtAry[3];        //组成三角形的三个点
    Triangle *AdjacentTri[3]; //三条边的相邻三角形信息
}
Struct TIN
{
    Long id;                //TIN 的编号
    CArray<Point3D,Point3D> PtAry; //组成 TIN 的所有点
```

```
CArray<Triangle*, Triangle*>TriAry; //组成 TIN 的所有三角形  
}
```

2.2.2 算法步骤

算法分为以下几个步骤,包括曲面碰撞检测、三角形相交计算、交线追踪、三角网重构、三角形分类、曲面的分裂。

(1) 首先是曲面的碰撞检测,确定两个 TIN 中相交的三角形对。如果直接通过对两个曲面中的每个三角形分别求交来判断是否发生碰撞,计算复杂度为 $O(N^2)$,速度慢,而通过碰撞检测算法则可以大大提高算法效率。常见的碰撞检测算法有很多^[4],如轴向方向包围盒法(AABB)、包围球法(sphere)、二叉树 BSP 法、固定方向凸包的包围盒(FDH)法和方向包围盒法(OBB)等。本文采用在 CAD 领域著名的方向包围盒法(OBB)^[5,6],对三角网曲面建立方向包围盒来判断三角形之间的关系。

方向包围盒(oriented bounding box, OBB)的基本描述参数包括:原点 ori (ori X, ori Y, ori Z)、方向 dir (dir X, dir Y, dir Z) 和大小 size (size X, sizeY, size Z)。OBB 树(OBB tree, OBB T)是利用 OBB 建立的树结构。OBB 树的建立过程:首先建立整个曲面的 OBB,然后将其分解成 2 个 OBB,并将这 2 个节点作为该节点的孩子节点,以此类推,直到它的最小单元是不可再分割的 OBB,即只含有一个三角形的 OBB,如图 2 所示。

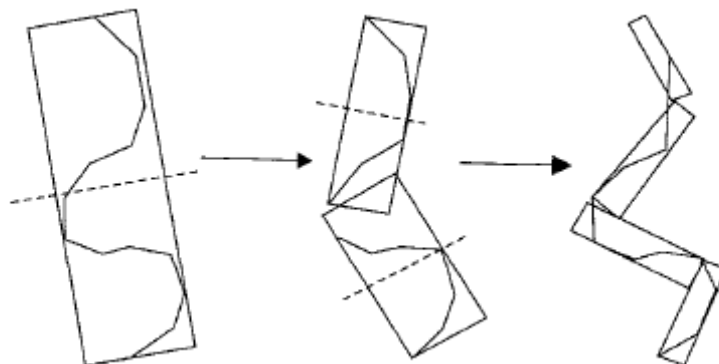


图 2 OBB 建立过程[5]
Fig.2 The procedure of building OBB Tree

(2) 相交计算.三角网格离散曲面相交的最小计算单位是三角形与三角形之间的位置关系计算。根据 OBB 树确定的三角形对 (TA1, TB2), (TA1, TB3)...(TAm, TBn) (曲面 A、B 相交, TAi 表示面 A 上的第 i 个三角形, TBi 表示面 B 上的第 i 个三角形, i 代表此三角形在曲面结构中的序列号), 然后分别计算出每个三角形对的交点^[7,8]。

(3) 交线追踪.两个曲面相交,可能会存在一条或者多条交线,此外对于每个相交的三角形可能与多个三角形相交,因此在一个三角形内部产生多条交线(有两个点组成的交线)。在形成交线之前需要去除重复点,通过消除假弧段即可追踪出连续的交线。首先是三角形内部交线的追踪,然后是整个曲面上交线的追踪,由于两个曲面相交的交线是相同的,追踪一次即可,如图 3 所示。

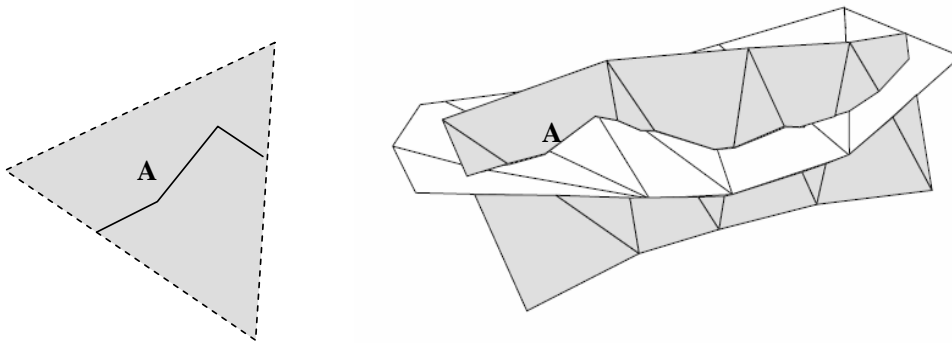


图 3 (1)三角形内部交线追踪 (2)曲面交线追踪
Fig.3 (1)Intersection Line in a Triangle (2)Intersection Line of Two Tin

(4) 三角网重构。切割后的曲面，由于内部增加了许多交点，需要重新进行约束三角剖分，才能满足 TIN 网格的要求，同时保证数据的最小变形。可以对每个相交的三角形为单元，以三角形内部追踪出的交线为约束进行剖分，也可以以曲面的交线 L 为约束，对整个曲面重构，如图 4 所示。

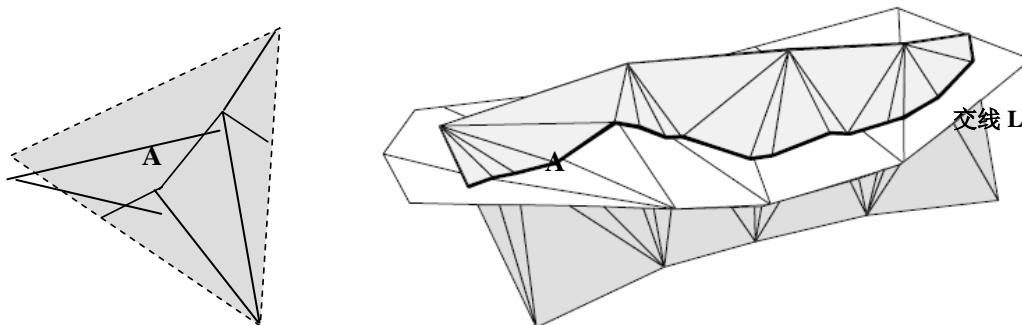


图 4 约束三角剖分重构 TIN 网
Fig.4 Delaunay Triangulation the new TIN

(5) 三角形分类，是为了分离切割所形成的新的三角网，根据通过三角剖分所形成的新的三角网与交线的位置关系，将所有三角形划分为三类^[6]。一类是不参与相交的三角形，一类是三角形的一点位于交线 L 上，还有一类是存在两个（三角形一条边）或者三个点（三角形的两条边）位于交线 L 上。

(6) 曲面分裂，图 4 中的曲面被分割为两部分，需要将两部分分开形成单独的 TIN，同时要保证两个曲面在交线处的一致性和新曲面的完整性。通过 TIN 的对偶图——Vorinoi 图，根据图论广度遍历 V 图中的每个点，即可以遍历 TIN 中的所有三角形，同时根据三角形的被访问标记以及分类标记来确定访问走向，如果三角形属于第三类，即三角形的某边位于交线上，则不向此边方向访问，否则将相邻的三角形作为扩展加入待遍历对列（Queue）中。如此直到队列中没有扩展的三角形可以访问则找到一个新的 TIN，如果还存在未被访问的点，则表示还存在三角形位于另一个 TIN 中，同上即可搜索出所有的 TIN，保证了数据的完整性。为了简化计算复杂度，以三角形重心作为三角形的索引将 TIN 组织成了一个“类 Vorinoi 图”，作为待遍历访问的图，如图 5 所示。

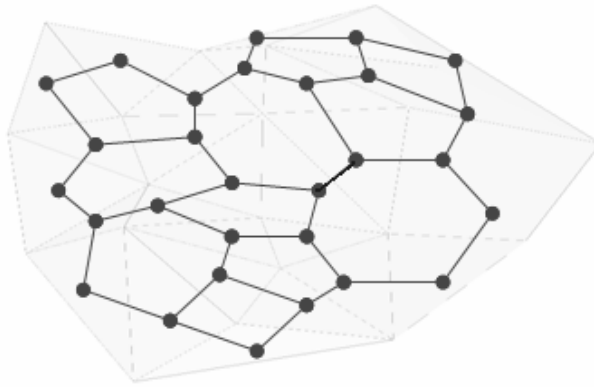


图 5 TIN 的类 Voronoi 图
Fig.5 Voronoi graphic for Triangle traversal

图 6 为两个 TIN 相互切割后的结果，其中一个曲面被分成了三部分，即形成了三个新的曲面。

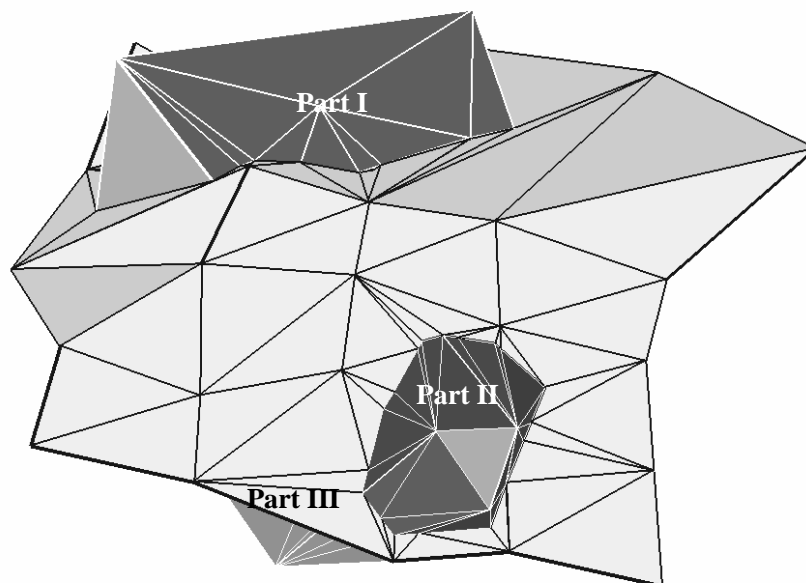


图 6 两个离散曲面相交示意图
Fig.6 The TIN was divided into three parts after intersection

3. 断层建模

基于离散曲面相交方法对断层建模，包括三方面，首先要根据钻孔、剖面等数据构造两个 TIN 面，即地层面和断层面。最后根据上面的算法，精确计算出相交后的结果，并根据实测数据，推测断层两侧地质体即断层上下盘的错动情况，通过简单的编辑调整，得到断层的最终矢量模型。

3.1 地层面插值拟合

地质体按照岩性等可以划分为多个地层面，地层面一般通过钻孔数据，通过钻孔的分层点信息可以划分属于各个地层的点集合，然后根据数学插值模拟出各个地层面，常用的插值方法包括双线性、克里格、距离反比、距离加权插值等^[4]。

3.2 断层面的拟合

断层面是一个将地层分成两部分并沿着该面发生滑动的破裂面。断层面是一种面状构造,其空间方向可用走向、倾向、倾角来表示,但现实中断层面往往是一个曲面,是由一系列破裂面和次级断所构成的断层带。断层面的模拟是一个复杂的交互过程。由于地质构造的影响,矿床中一般都有多条断层存在,而且各断层相互交切,位置错综复杂,因而难以判断各断层的物理属性数据。这就需要有较强的人-机交互性,在利用已知断层数据的基础上,加上专家经验知识,才能模拟出较为符合现实的断层面^[2,9]。

3.3 整体法断层建模

拟合后的地层面和断层面都是以离散曲面(TIN)表达,可以运用曲面相交运算,得到相交后的结果,分割后的 TIN 面通常发生位置的移动,形成正、逆、走滑等不同形态的断层,通过简单的编辑调整,并形成最终的三维断层模型。

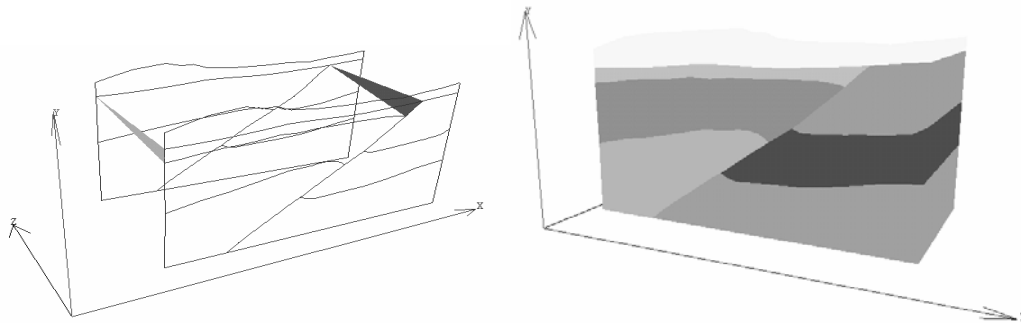


图 9 (1) 地层面和断层面 (2) 最终的断层模型
Fig.9 (1)The model of Stratum and Fault (2)3D Fault Modeling

4. 总结

在三维地学建模中,断层的建模是一个复杂的过程,由于地学领域数据的有限性以及地质资料的解译依赖于专家意见等原因,导致对断层的建模不可能一蹴而就,随着地质资料各种数据的补充以及地质学家对地质构造情况认识的深入,模型需要进行及时更新。基于离散曲面相交,运用整体断层建模方法,充分利用计算机技术,提高了建模的效率和精确性,可以满足类似复杂地质体的三维建模需要。

参考文献

- [1] Renard P, Courrioux G. Three dimensional geometry modeling of a faulted domain: the South Horst example(Alsace , France) [J] .Computers and Geosciences , 1994(9) : 1379~1390.
- [2] 朱良峰, 基于 GIS 的三维地质建模及可视化系统关键技术研究[J].2005(5): 53~63
- [3] 石勇,杨鹏,吕文生;一种新的断层构造三维建模技术[J].矿业工程, 2006(4): 53~55
- [4] 花卫华,邓伟萍,刘修国,一种改进的不规则三角网格曲面切割算法[J]. Earth Science —Journal of China University of Geosciences,2006(9): 619~623
- [5] S.Gottschalk, M.C. Lin, D. Manocha, OBBTree: A Hierarchical Structure for Rapid Interference Detection.[J] In Proc. SIGGRAPH '96, 1996:171-180
- [6] C.H. Lindenbecka, H.D.Ebertb, H.Ulmera. TRICUT: a program to clip triangle meshes using the rapid and triangle libraries and the visualization toolkit[J]. Computers & Geosciences, 2002,28(6):841~850
- [7] Chaman L. Sabharwal, A fast implementation of surface/surface intersection algorithm[J], Proceedings of the 1994 ACM symposium on Applied computing:333-337
- [8] Chaman L.Sabharwal,Thomas G. Melson, Implementation of cross intersection between Triangular surfaces[J], Proceedings of the 1988 ACM sixteenth annual conference on Computer science:92 - 101
- [9] 朱良峰,吴信才,刘修国,基于钻孔数据的三维地层模型的构建[J].地理与地理信息科学, 2004 (3) : 28~29.

The 3D Geological Fault Modeling Method Based on Discrete Surface Intersection

Sun Zhidong, Qu Honggang, Ming Jing

School of Earth and Space Science, Peking University, Beijing (100871)

Abstract

Geological fault is an important geological structure; its morphology and evolution are very complicated. 3D Modeling the complex geological fault is the basis for spatial analysis and visualization, and it has great significance for raising people's awareness of geological structures. In this paper, an effective fault modeling method based on the discrete surface intersection is introduced.

Keywords: Delaunay Triangulation, TIN Intersection, 3D Geosciences Modeling, Fault Modeling