

# 约束剖分的含断层地质体三维构模方法

王 威,徐亚杏,汪振东,张 炯,高一鸣

武汉工程大学资源与土木工程学院,湖北 武汉 430074

**摘 要:**针对地下空间三维地质构模技术发展慢的问题,提出一种快速三维构模的方法.首先利用径向扫描法将无约束的点集构建成无约束初始的三角网,再将多源数据中的约束线(包括剖面线、地表地质线、基岩地质线等)依次嵌入到无约束的初始三角网中重新生成带约束的德劳内三角剖分,生成了地层面、断层面等,然后通过人工拼接这些地层面,最终形成完整的三维地质体模型.运用 Visual C++ 6.0 生成的各种不规则三角网模型,建立了武汉市汉阳区城市三维地质模型.实践结果表明,建立的三角网范围广且包含了大部分的约束点,增加了构模的精度、速度.

**关键词:**三维构模技术;断层;带约束的 Delaunay 三角剖分

**中图分类号:**P231.5 **文献标识码:**A **doi:**10.3969/j.issn.1674-2869.2014.07.002

## 0 引 言

三维地质建模与可视化技术<sup>[1]</sup>是通过获取原始地质勘探数据如地质图、地形线、剖面、钻孔等,解译地质对象,利用各种信息形成一个复杂三维模型的过程,从而实现可视化.我国对于研究简单地质体的建模技术还是比较成熟的,但对于复杂地质现象(如断层、透镜体、岩石破碎带、地层倒转等)研究得还不特别深入<sup>[2]</sup>.

目前,国内使用的断层建模方式主要有基于地层恢复的建模技术(整体法)、基于分区插值的建模技术(局部法)、断层与地层的统一建模技术三类.本文基于统一建模技术方法,分析城市地质断层数据的特点,将断层线等各种边界线作为约束边插入,重新进行三角剖分,生成 Tin(Triangulated Irregular Network)模型.当勘察数据更新或地质认识改变时,只需重新调整断层特征线,便可在调整部分生成新的断层模型来进行实时更新.通过实际应用,相较于其它方法,此法更尊重原始地质勘察数据,特别是在建造大型三维地质体模型时,大大节省了时间,同时保证了模型的准确性,使模型更加符合真实地质情况.本文最后以武汉市汉阳区为研究对象建立了三维地质模型,分析其中某一小块断层模型的生成过程,验证了此构模方法的有效性.

## 1 含断层地质体的生成原理

含断层地质体的生成主要采用多源数据耦合的建模方法(如图 1),通过勘探数据,如收集的钻孔资料、地表地质图、基岩地质图、地质剖面(利用钻孔人工生成剖面并通过实地考察检验和地质专家的分析来确定是否合理,如合理,即采用)等信息作为参考,利用带约束 Delaunay 三角网建立断层面、第四系地层面和基岩面等的 TIN 模型,再通过手动拼接轮廓线对某一地层的顶面与底面缝合,形成一个完整的地质体模型.

## 2 带约束边的 Delaunay 三角剖分法

约束三角剖分就是利用约束条件,影响三角剖分的过程,或者在三角剖分之后根据这些约束条件去调整三角网.在地质曲面重构的过程中地表模型的断裂线、地质剖面的断层线和地层边界、地质图上的地形线等都可作为重要的约束条件.此方法的基本思路是:首先,利用无约束的点集生成初始 Delaunay 三角网,再将较复杂的地质中的特征线作为约束线依次插入到初始三角网中来重新调整初始三角网,使之符合 Delaunay 三角网的基本特性,最后就形成了带约束的 Delaunay 三角网.

收稿日期:2014-04-19

基金项目:武汉工程大学研究生教育创新基金项目(CX2013121)

作者简介:王 威(1975-),男,湖北武汉市人,副教授,博士,硕士生导师.研究方向:3S 与岩土工程.

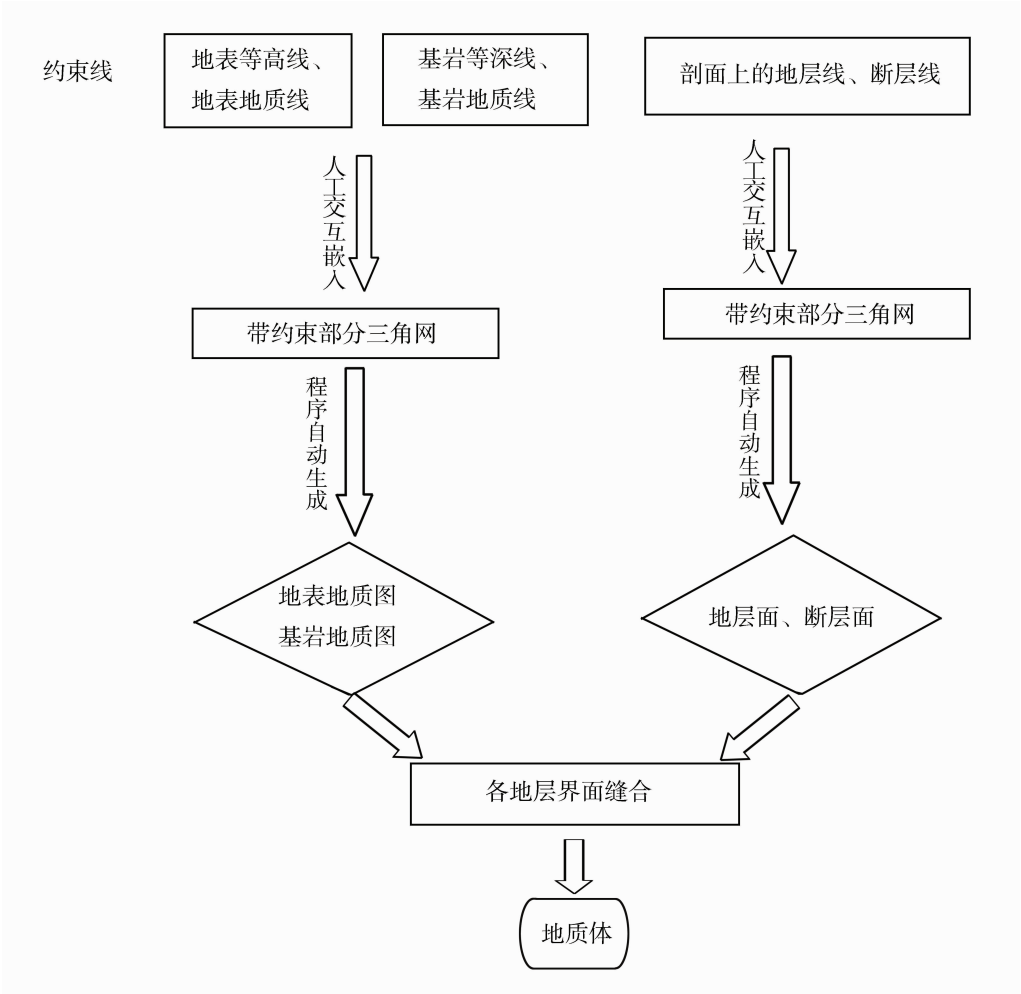


图 1  城市三维建模流程图  
Fig. 1  City 3d modeling flowchart

2.1  无约束点集生成 Delaunay 三角网过程

设点集  $S$  里有  $n$  个离散点。

①寻找点集周围离质心最近的点作为起始点,假设为点  $O$ ;②计算出中心点和点集内其余  $n-1$  个点的方向角、距离,升序排列其他所有点的倾斜度、方向角和距离的大小;③将  $O$  点和其他  $n-1$  个点连接成扇形依次进行径向扫描;再连接扇形的两个角点,形成初始三角网(图 2-A);④从扇形边的任一点开始,按顺时针或逆时针方向凹侧连接,如图 2-B 所示.假如以  $a$  为起点,规定按沿逆时针方向逐一查找, $a$  和  $b$  的下一个点分别是  $b$  和  $c$ ,如果  $c$  点出现在线段  $ab$  方向的左侧,则  $b$  点选为当前点,从  $b$  点继续向前查找;如果  $c$  点出现在

线段  $ab$  的右侧,就连接  $ac$ ,形成新三角形  $\triangle abc$  (如图 2-B),继续向下搜索.同理, $d$  点在  $ac$  的右侧,连接  $ad$ ,又生成新的三角形  $\triangle acd$ ,继续查找  $d$  的下一个点  $e$ ,发现点  $e$  在  $ad$  的左侧,则  $d$  仍为当前点,继续以  $d$  点向前查找,直到将凹多边形全变成凸多边形为止(如图 2-C).当径向三角形极点被连接并第一次扫描径向三角形外边时,需要用一个数组记录外包边上的相邻边,则下一次扫描时就可以直接定位到下条边<sup>[3]</sup>.⑤以边界内某一三角形为起始三角形,开始对凸四边形的对角线依次检查,这些对角线是由两个相邻三角构成的,最终成功的最优三角剖分(如图 2-D).

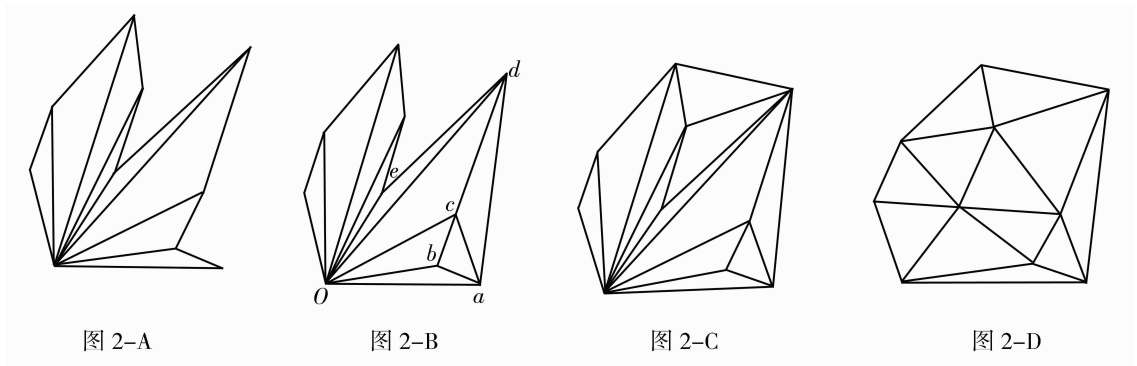


图 2 径向扫描算法图解

Fig. 2 Diagram of the radial scan algorithm

以上过程表明:径向扫描算法的基本思想是先径向扫描离散点,构建初始扇形三角网,然后从扇形的任一点开始按一定方向进行凹侧连接,直到把外边界变成凸多边形为止.用局部优化算法调整到最优.

2.2 在 Delaunay 三角网中嵌入约束边

本文的初始三角网是通过 Delaunay 三角剖分算法中的径向扫描算法获得的,与带约束关系的离散点相关,下面介绍将带约束关系的约束边嵌入到初始三角网的具体方法.

建立一个存在的三角形集合  $T(V;L), MT \subseteq T(V;L)$ ,由  $MT$  中三角形的外边构成的多边形称为影响多边形  $Q = \{p_i, V_1, V_2, \dots, V_K, p_j, \dots, p_i\}$ ;设要插入的约束边为  $l, l = p_i p_j, p_i p_j \in V$ ,与约束边  $l$  相交的三角形所组成的区域即为约束边  $l$  的影响域;

对于影响多边形  $Q$ , Floria<sup>[4]</sup>给出了如下的性质:

- ①简单多边形  $Q$  被对角线  $p_i p_j$  分成  $Q_u$  和  $Q_d$  两部分,且  $Q_u$  和  $Q_d$  也为简单多边形,如图 3 所示.
- ② $Q_u$  和  $Q_d$  能被三角剖分.
- ③ $V_K \in Q$ ,若  $V_K$  为到  $p_i p_j$  的最近点,且  $(V_K \neq p_i, V_K \neq p_j)$ ,则一定有  $p_i V_K \in Q, V_K p_j \in Q$

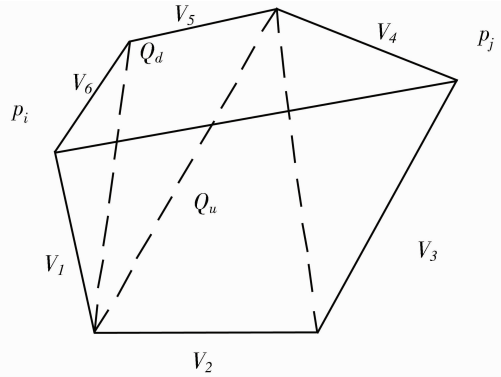


图 3  $p_i p_j$  作为约束边的影响域

Fig. 3 The influence domain of  $p_i p_j$  as constraint boundary

在 Delaunay 三角网内插入约束边  $p_i p_j$  的算法如下<sup>[5]</sup>:

- ①从三角网中找到以  $p_i$  为顶点的三角形  $t_1$ ,且  $t_1$  与  $p_i p_j$  相交.如图 4 所示.

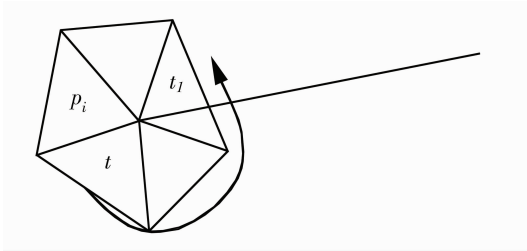


图 4 首三角形的确定

Fig. 4 The determination of the first triangle

- ②从  $t_1$  开始通过三角形的拓扑信息的搜索,发现影响域内三角形  $t_1, t_2, \dots, t_k$ ,将这些三角形保存在影响域三角形阵列中,同时生成  $Q_u$  和  $Q_d$  影响域的边界阵列,见图 5.

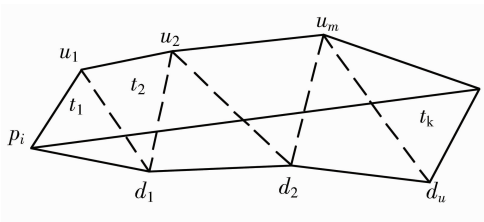


图 5  $p_i p_j$  边的影响域的确定

Fig. 5 The determination of the influence domain of  $p_i p_j$  boundary

$$Q_u = \{p_i, u_1, u_2, \dots, u_m, p_j\}, Q_d = \{p_i, d_1, d_2, \dots, d_n, p_j\}$$

- ③为了在影响域内生成一个新的三角形,从一开始就  $p_i p_j$  使用递归算法,同时将三角形的新一代信息保存在影响域三角形阵列的三角形空间中.

3 汉阳区含断层地质体模型的建立

3.1 工程背景

武汉市汉阳图幅位于经度  $114^\circ \sim 114^\circ 15'$ ,纬度  $30^\circ 30' \sim 30^\circ 40'$ .区内(如图 6)第四系分布十分广泛(图中地表区域即为第四系地质),占图幅总

面积的 90% 以上,发育齐全,成因类型多样,通常按照时代四分法进行划分,即早更新世、中更新世、晚更新世和全新世。

3.2 汉阳区建模过程及成果展示

通过以上算法的介绍,可利用 Visual C++ 6.0 编程完成。

汉阳区含断层地质体三维模型(图 6)主要是由带约束的 Delaunay 三角剖分得到的三角面构建的。此次模型的构建数据(如图 1)主要来自于:①地表地质图;②基岩地质图;③钻孔;④含断层线的剖面;⑤地表等高线和地表以下各地层等深线等。

根据汉阳城市地质的数据特点,此次建模分 3 个步骤:**a.** 首先对建模区数据进行预处理(包括钻孔数据的整理、确定钻孔标准分层、进行剖面交叉处一致性检查、建模区域单元格的划分等),生成初始数据点(如图 7);**b.** 对数据点进行 Delaunay 三角剖分,形成 DT 剖分三角形(如图 8);**c.** 将地表等高线、地形线、剖面线(含断层线)等线形数据插入到第 2 步生成的三角网中,通过这些步骤完成对汉阳区数据的约束三角剖分(如图 9),最终生成汉阳区含断层地质体的三维地质模型(如图 6)。

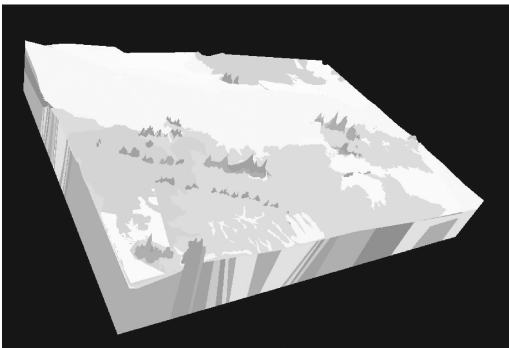


图 6 汉阳区三维地质体  
Fig. 6 3D geological body in Hanyang District



图 7 地表离散点  
Fig. 7 The surface of the discrete points

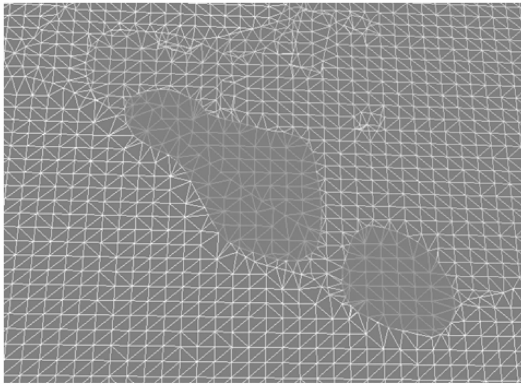


图 8 地表无约束的三角网  
Fig. 8 Unconstrained surface triangulation

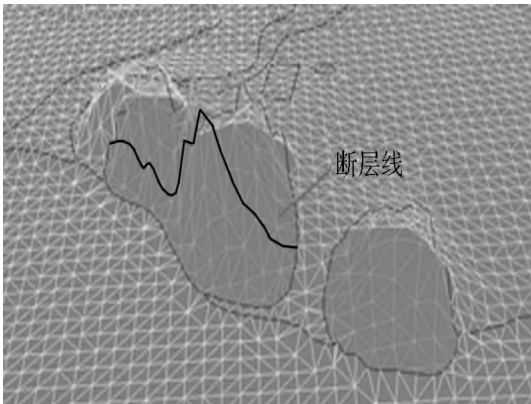


图 9 地表嵌入约束边的三角网  
Fig. 9 Constraint edge embedded in the surface triangulation

图 7~图 9 都是以地表嵌入约束边三角剖分为例,下面以剖面上的约束线为例,详细阐述汉阳区地质体三维建模过程:

- a. 观察剖面上有各种约束线,通过剖面可推断此处有一个正断层,如图 10 加粗线即为断层线。
- b. 观察基岩地质图和剖面图相交部分(如图 11),发现此处单元格①中断层位于基岩面以下。



图 10 汉阳区部分剖面形成的单元格①  
Fig. 10 Part profile forming cell ① in Hanyang



图 11 基岩面与剖面对照图

Fig. 11 The comparison chart of bedrock surface and profile

将剖面上的约束线插入到初始三角网中,在剖面上人工交互建模,可先构造断层的下盘(如图 12),构建下盘时通过由外向内或由内向外层层构建,最终整个断层体构建完毕,(如图 13). 通过以上方法,可以对每个地层面逐一构建,再通过手动拼接轮廓线对每一地层的顶面与底面缝合,形成一个完整的地质体模型(如图 14). 如果想添加剖面分层数据或是更改对地层的认识,即可将新的特征约束线插入新的初始三角网,重新构建此单元格地质体.

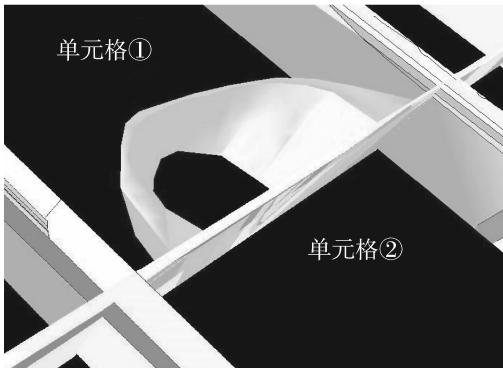


图 12 断层下盘最外圈地质体

Fig. 12 The outer ring geological body in the footwall



图 13 断层地质体三维图

Fig. 13 3d geological fault

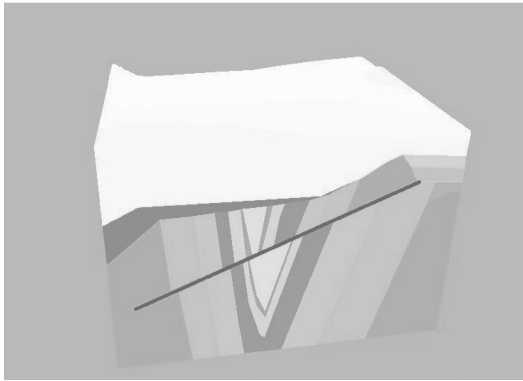


图 14 单元格①中完整地质体

Fig. 14 Complete geological body in cell ①

4 结 语

通过对汉阳区城市地质数据信息的分析,建议选用带约束的三角剖分先生成 TIN(不规则三角网)面,最终生成复杂三维城市地质体的方法. 采用这种方法,集合了各种点集和特征线(地表等高线、地表地质图上的地形线、剖面上的地层线和断层线、基岩地质图上的基岩分界线和断层线、各地层的等深线等),并将这些数据作为约束点和约束线插入进行带约束的三角剖分. 因为耦合了多源数据,所以模型的精度更高. 本文算法已在 Visual C++ 6.0 中得以编程实现,并在武汉市汉阳区城市地质三维模型建立中得以应用. 为城市三维地质的发展奠定了基础.

致 谢

本论文选题及研究过程中得到本项目研究小组成员,也是我的学生的帮助. 同时感谢武汉地调中心、湖北地质调查院、湖北省地质环境总站提供的数据来源!

参考文献:

[1] ZHONG D H, LI M C, SONG L G, et al. Enhanced NURBS modeling and visualization for large 3D geo-engineering applications;an example from the Jinping first level hydropower engineering project, China [J]. Computer and Geosciences, 2006, 32(9):1270-1282.

[2] 何赵云,李章林,张夏林. 含断层地质体三维建模技术[J]. 软件导刊, 2010, 9(8):175-177.

HE Zhao-yun, LI Zhang-lin, ZHANG Xia-lin. 3d geological faults modeling technology [J]. Software Guide, 2010, 9(8):175-177. (in Chinese)

[3] 林报嘉,叶燕林,赵建伟. 三角网的生成与简化算法[J]. 地理学与国土研究, 2001, 17(1):69-72.

- LIN Bao-jia, YE Yan-lin, ZHAO Jian-wei. The establishment and simplification algorithm of TIN [J]. Geography and Territorial Research. 2001, 17 (1):69-72. (in Chinese)
- [4] Floriai LD. An on-line algorithm for constrained delaunay triangulation [J]. CAGIP: Graphical Models and Image Processing, 1992, 54(3): 290-300.
- [5] 宋占峰, 詹振炎, 蒲浩. Delaunay 三角网剖分中嵌入约束边的局部调整算法[J]. 西南交通大学学报, 2002, 37(4): 399-403.
- SONG Zhan-feng, ZHAN Zhen-yan, PU Hao. A local adjustment algorithm for inserting constrained segments in delaunay triangulation[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2002, 37(4): 399-403. (in Chinese)

## Modeling of three-dimensional geological faults based on constrained Delaunay triangulation

WANG Wei, XU Ya-xing, WANG Zhen-dong, ZHANG Jiong, GAO Yi-ming

School of Resources and Civil Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430074, China

**Abstract:** Considering that the development of modeling technology for three-dimensional (3D) geological underground space is slow, an approach to quick 3D modeling was proposed. First, by using radial scanning method, the unconstrained points were used to construct a triangle mesh with unconstrained initial conditions. Then, the constrained line, including cross-section line, surface geological line, bed-rock geology line, etc., in the multisource data were orderly embedded into the triangle mesh to regenerate constrained Delaunay triangle subdivision, and accordingly, the ground surface, the fault plane, etc., were generated. Afterwards, these ground surfaces were artificially assembled to generate an integrated three-dimensional geological model. Finally, as a case study, a three-dimensional geological model of Hanyang District was established by generating a variety of irregular triangle mesh models. The results show that the generated triangle mesh has a broad scope which includes the majority of the constrained points, and increases the accuracy and speed of modeling.

**Key words:** three-dimensional modeling technology; fault; constraint Delaunay triangulation

本文编辑: 龚晓宁