

三维复杂断层网建模方法及应用

李兆亮 潘懋[†] 杨洋 曹凯 吴耕宇

北京大学地球与空间科学学院, 造山带与地壳演化教育部重点实验室, 北京 100871;

[†] 通信作者, E-mail: panmao@pku.edu.cn

摘要 针对复杂断层网, 提出一种新的路径切割算法, 能够处理各种复杂的断层相交情况, 如 Y 型、 λ 型、X 型、半 Y 型、半 λ 型等截断关系; 避免了 Pillar 方法和二叉树等传统方法的限制, 提高了断层建模的灵活性和精确度。该方法提高了断面之间接触关系的半自动处理程度, 方便断层网的快速更新。通过实际模型的验证, 解决了复杂断层网的快速构建问题, 提高了建模效率。

关键词 断层网; 接触关系; 路径切割; 二叉树; Pillar 方法

中图分类号 TP391

Research and Application of the Three-Dimensional Complex Fault Network Modeling

LI Zhaoliang, PAN Mao[†], YANG Yang, CAO Kai, WU Gengyu

The Key Laboratory of Orogenic Belts and Crustal Evolution (MOE), School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871; [†] Corresponding author, E-mail: panmao@pku.edu.cn

Abstract For complex fault network, a new path cut algorithm was proposed, by which all types of complicated fault intersection can be dealt with, such as Y, λ , X, half-Y, half- λ contact relations. This fault modeling method not only avoids the limitation of the Pillar method and binary tree method, but also greatly improves the flexibility and accuracy of fault modeling. The method improves semi-automatic processing of the contact relationship between faults and quick updating of fault models. Through the validation of practical model, the modeling of complex fault network can be successfully and quickly solved, and the efficiency of modeling was also greatly improved.

Key words fault networks; contact relationship; path-cut algorithm; binary tree; Pillar method

断层是地壳中发育广泛且极为重要的一类地质构造现象, 它破坏了地质体的连续性, 改变了地层的原始分布格局。断层的规模大小不一, 其作用也各不相同。大型断层可构成不同大地构造单元的边界, 控制区域地质结构和构造演化, 控制和影响成矿作用; 中小型断层控制矿床、矿体的产状, 有些还是矿液和地下水循环的通道; 活动断层则直接影响工程施工和建筑物的稳定性。因此, 研究断层及其三维结构建模技术具有重要的理论意义和实际意义^[1]。

断层模型描述断层的构造几何形态以及相互之

间的接触关系。断层模型的构建是建立地质模型的基础, 为地层面的生成提供约束条件^[2-3]。断层模型的准确性直接影响构造模型和属性模型的可靠性和实用性^[4]。断层建模的内容主要包括断面生成和断层之间的截断。

Morley 等^[5]将伸展区内的转换带类型进行分类, 并指出在构造建模过程中, 大多数断层建模方法都可以模拟断层倾向相同的转换带类型, 因此比较容易建立深度在断层限制范围内的模型。但是, 如果出现断层倾向不同的情况, 尤其当断层发生交叉、截断以及重叠的时候, 模拟过程就会比较复

杂^[6-7]。当断层发生交叉、削截以及重叠等情况的时候,会形成所谓半 Y 型或者半 λ 型断层,即 Y 型或者 λ 型断层的一部分被削截,另一部分则继续延伸。在挤压背景下,当断层倾向相对时,就会形成半 Y 型断层;在伸展背景下,如果断层倾向相背时,就会形成半 λ 型断层。复杂的断层形态和相交关系及其数据获取的艰难性使得断层建模成为三维构造建模的难点。

1 研究现状

众多学者对复杂断层网建模方法进行研究,取得一定的成果^[7-15],如多边形拟合方法、Pillar 方法和二叉树方法。但是自然界断层网是极其复杂的,绝大多数建模方法未能彻底解决复杂的断层网(尤其是具有复杂接触关系的断层网)的模型构建。

由于实际断层数据获取的艰难性和断点分布的稀疏性,武强等^[9-11]利用一个或者多个平面组合的方式来模拟断层面,其中每一个平面的空间方位都可以用实测的走向、倾向和倾角来表示,再加上一系列的断点数据,就可以构建局部断层面的平面方程 $Ax + By + Cz + D = 0$ (图 1)。但是断面的这种表达方式会严重影响断面之间的削截,所以该方法很难发挥应用。

传统的断层建模软件采用 Pillar 方法,利用 2~5 个形状控制点描述断层的纵向产状(图 2)。对于断裂深度较大的断层(如基底大型犁状断层),5 个控制点也很难准确描述断层的产状,有时要进行适当的

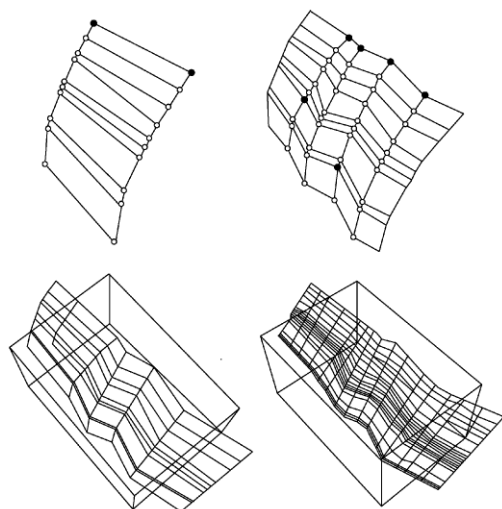
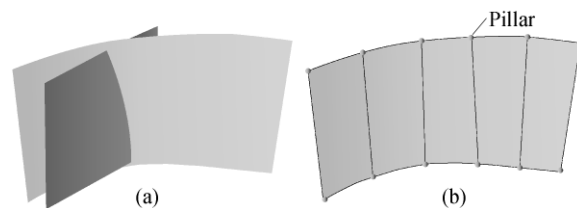


图 1 多个平面模拟断层面^[9]

Fig. 1 Faults approximated by many planes^[9]



(a) 两个相交断层; (b) 一个断层的 Pillar 表示方法

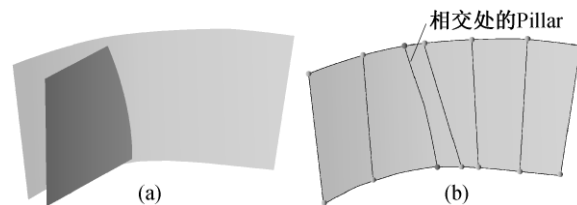
图 2 两个相交断层削截前的示意图^[7]

Fig. 2 Two intersecting faults before truncation^[7]

取舍。所以 Pillar 方法不能准确表达断层产状。此外, Pillar 方法限制了断层之间相交的类型,即对于倾角较小的断层与倾角较大的(基本上竖直)断层之间的交切, Pillar 方法可能会造成相交处竖直断面扭曲甚至是相交(图 3)。另外由于受 Pillar Gridding 算法的限制, Pillar 方法不能表达纵向交叉(如多级 Y 型、λ 型和 X 型等)的断层。并且, Pillar 方法需对网格从顶到底逐级计算,对于具有复杂削截关系的断层,为了保障模型网格的质量,往往采用必要的变通方法来建立断层模型,大大降低了模型的精度,对后续的模拟产生不可避免的误差。

断层二叉树方法采用一棵二叉树表示断层对空间的划分,既反映断裂处的空间位置关系,又反映断裂处的时代关系^[12-13](图 4)。二叉树的一个节点(非叶子节点)对应一个断层,叶子节点表示经过划分的空间区域。该方法必须始终选择一个断层作为主断层,因此该主断层不能被其二叉树上的辅断层孩子节点的断层截断。因此,3 条依次为主辅关系断层的情况是不可能使用二叉树模型的(图 5)。此外,二叉树方法使得断层网模型的更新更加繁琐。

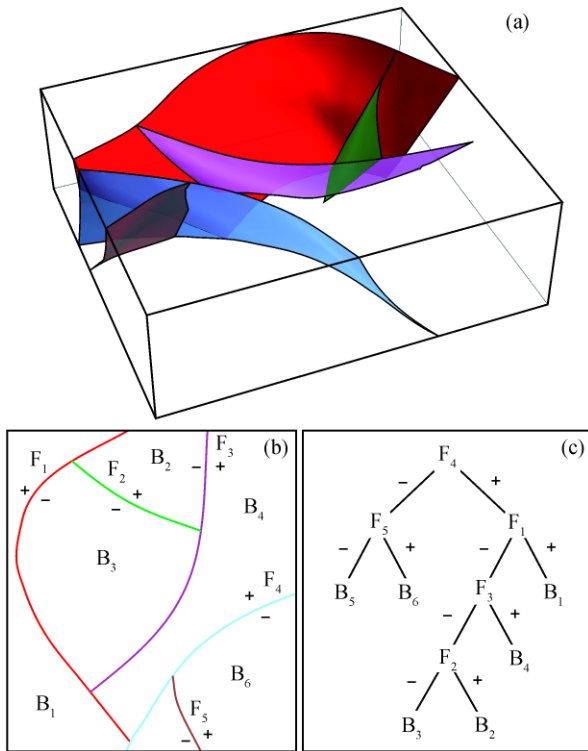
在对以上方法的断面表达和接触关系组织进行比较的基础上,本研究采用最常见,也易于编辑的离散曲面表达方式——不规则三角网(triangulated irregular net, TIN),提出一种基于三角网的路径切



(a) 削截之后的效果; (b) 断层削截之后,主断层上的 Pillar 表达变化

图 3 两个相交断层削截后的示意图^[7]

Fig. 3 Two intersecting faults after truncation^[7]



(a) 3D 断层网络; (b) 更清楚的顶视拓扑结构, 每个断层(F_i)将空间分为两个区域(B_i); (c) 断层关系的二叉树表达, 断层 F_4 即主断层和最老的断层(二叉树的根节点), 其他为辅断层

图 4 断层关系的二叉树拓扑表达^[13]
Fig. 4 A fault network and its topological representation as a binary tree^[13]

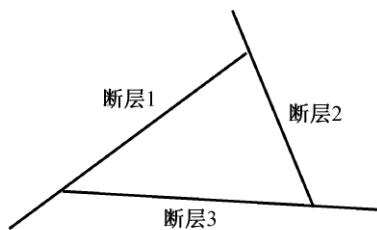


图 5 3 条循环为主辅关系的断层
Fig. 5 Map view of a series of self-truncating faults

割算法, 通过定义切割路径实现断层之间复杂的削截, 解决了各种复杂的断层削截关系。此外, 断层之间的接触关系组织采取分层次处理, 即首先处理相交的断层面之间的接触关系, 然后交互处理其他断层之间的关系, 既实现了复杂断面接触关系的处理, 提高了断面之间接触关系的半自动处理程度, 又方便了断层网的快速更新。通过北京市平原区断层模型的验证, 成功地解决了复杂断层网的快速构建问题, 提高了建模效率。

2 断面的生成

断层网建模的数据来源主要包括: 地震解释数据; 断层多边形; 断层线、倾向、倾角和断点数据。这些数据来源于不同的勘探手段, 从不同角度反映断层的构造形态, 在断层建模方法和建模步骤上也有所差异^[14-15]。根据数据来源, 主要采用以下几种方法来构建断层曲面。

1) 如果断层面的断点数据足够多, 再结合人工解译的断层曲面边界, 那么可以根据这些数据首先寻找最佳参考面(可以是小二乘平面), 然后在参考面进行约束 Delaunay 三角化^[16], 再三维插值, 生成质量非常好的三角网。

2) 根据断层线以及倾向、倾角等断层参数外推, 再利用轮廓线重构曲面算法^[17]建立断层面的三角网。

3) 根据一系列地质剖面或地震解释的断层线数据, 采用特定的轮廓线重构曲面算法, 生成相应的断层面。

4) 对于地震解释出的断层多边形, 将其赋予高程值之后, 通过在这些数据的最佳参考面上限定三角剖分就可以拟合形成三角网。

在方法 1 和 4 中, 最佳参考面指所用数据的最小二乘平面, 坐标转换方法如下: 实际坐标为全局坐标(X, Y, Z), 参数坐标为(x, y, z), 参考平面上一个原始点为(X_0, Y_0, Z_0), 断层走向的方位角为 θ , 断层倾角为 φ , 则

$$\begin{pmatrix} \hat{e}_x \\ \hat{e}_y \\ \hat{e}_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sin \varphi & \cos \varphi & 0 \\ \cos \varphi \cos \theta & -\sin \varphi \cos \theta & \sin \theta \\ \cos \varphi \sin \theta & \sin \varphi \sin \theta & -\cos \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \hat{u} \\ \hat{v} \\ \hat{w} \end{pmatrix} \quad (1)$$

通过式(1)可以实现参数坐标系统和全局坐标系统的相互转化, 方便断层面的生成和修改。

由于测井数据的精度和可信度比其他数据高, 可以利用测井的断点数据修正断面, 以期更逼近真实的断层曲面。校正后的三维断面完全由钻井资料在三维空间内控制, 较之以前的构造解释更可靠, 断层位置更准确, 有利于地质构造认识的进一步深化^[2-4]。

3 断面之间削截关系

在复杂断层系统中, 往往存在着多条断层, 必然会对断层网建模以及后续的地层模型产生影响, 因此必须考虑多个断层面的错切关系。断层接触关

系非常复杂,有 Y 型、λ 型、T 型、交叉型、半 Y 型和半 λ 型等。根据断面之间削截关系的定义切割路径,利用路径切割算法即可实现各种相交关系的处理,同时也可避免正常切割只将相交位置做拓扑分离造成没有切透的断层无法裁剪的情况^[18]。

3.1 路径切割算法

输入曲面 三角网曲面 $S=\{V, T\}$, 其中 V 为三角网的顶点集合, $V=\{v_i \mid i=1, \dots, m\}$, m 为三角网的顶点个数; T 为三角形集合, $T=\{t_j \mid j=1, \dots, n\}$, $t_j=(v_a, v_b, v_g)$, $v_a \in V$, $v_b \in V$, $v_g \in V$, 且 $a, b, g \in \{1, \dots, m\}$, $a \neq b$, $a \neq g$, $b \neq g$, 其中 n 为三角形网格的三角形个数。

输入曲线 对于输入离散的空间曲线, 记为 $C=\{p_i \mid i=1, \dots, l\}$, l 为曲线上点的个数, 且对于 " $p_i \in C$ ", 满足 " $t_j \in T$ ", 使得 " p_i 在三角形上。

路径切割算法的流程(图 6)如下。

1) 输入待切割的曲面和切割路径。对于不同的路径, 切割的效果会大相径庭, 所以应选择最符合地质规律和认识的路径, 即两点之间取其测地线的路径。

2) 曲面上两点之间的测地线计算。计算离散三角网上任意两点之间的测地线的算法非常多^[19], 本文选用迭代细分算法。计算完成之后, 曲线上的点和线段均在三角面网上, 即对于 " $p_i \in C$ ", " $t_j \in T$ ", 使得 " p_i 在 t_j 上, 且曲线上的任意线段也完全在一个三角形上。

3) 判断测地线上每个点相对于三角形的位置。点相对于三角形的定位可以使用有向面积法, 记三角形为 $\triangle ABC$, 那么对于 $\triangle ABC$ 所在平面上的任意点 p , 可以得到如下表达式:

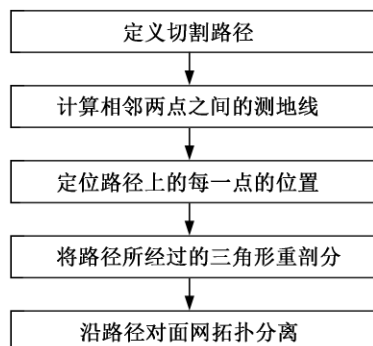


图 6 路径切割算法流程

Fig. 6 Workflow chart of path-cut algorithm

$$\begin{aligned} \vec{OP} &= a\vec{OA} + b\vec{OB} + g\vec{OC}, \\ a + b + g &= 1, \end{aligned} \quad (2)$$

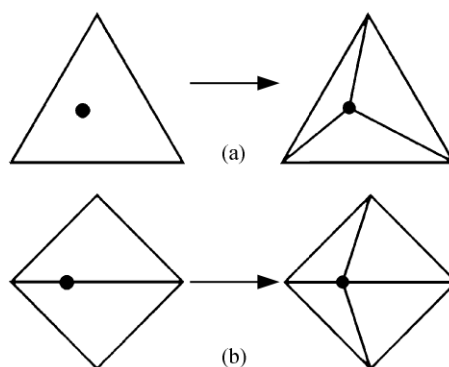
其中 a, b, g 分别表示三角形对于 p 点的有向面积比率。通过式(2)可以求得 a, b, g , 然后通过其正、负、零的情况, 可以判断 p 点对于三角形的位置, 判断方法如下: a, b, g 其中一个为负, 则 p 在三角形外; a, b, g 均为正, 且不为零, 则 p 在三角形内; a, b, g 两者均为正, 其中有一个值为零, 则 p 在三角形的一条边上; a, b, g 有一个值为 1, 其中有两个值均为零, 则 p 在三角形某顶点上。

4) 三角面的重剖分。根据点相对于三角形的位置, 利用基本的操作插入点和交换边(图 7)来实现三角形的重剖分, 从而避免因计算误差带来的问题, 大大增强了算法的健壮性。

5) 三角网的拓扑分离。重剖分后的三角面网被曲线上的曲线分成两部分, 断面削截要将其的一部分去掉, 所以要沿曲线上的曲线进行拓扑分离(图 8)。

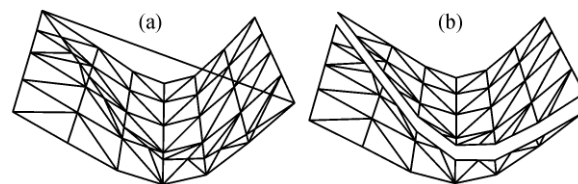
3.2 断面之间接触关系的处理

断层接触关系非常复杂, 常见的断层之间的接



(a) 插入点在三角形内部的情况; (b) 插入点在三角形边上的情况

图 7 点插入操作示意图
Fig. 7 Insert point in triangle



(a) 拓扑分离之前; (b) 拓扑分离之后移动的效果

图 8 拓扑分离示意图

Fig. 8 Sketch map of topological separation

触关系是沿断层的伸展方向或产状方向,比如沿产状方向的削截关系 Y 型、 λ 型、X 型等。当断层发生交叉、削截以及重叠等情况的时候,会形成所谓的半 Y 型或者半 λ 型断层,断层之间的削截关系出现 L 型的相交。目前,绝大多数的断层建模方法均很难解决此类问题。本文提出根据断层面之间的削截关系定义切割路径,利用路径切割算法实现各种相交关系的处理(图 9)。对于判断断面之间是否相交,本文采用 OBB 碰撞检测的方法^[20]。

对于沿断层伸展方向和产状方向的断层之间的削截(可以称为“一”型相交),通过延长两断层初始的相交线至断层的边界即可实现 Y 型、 λ 型、X 型削截(图 10 和 11)。

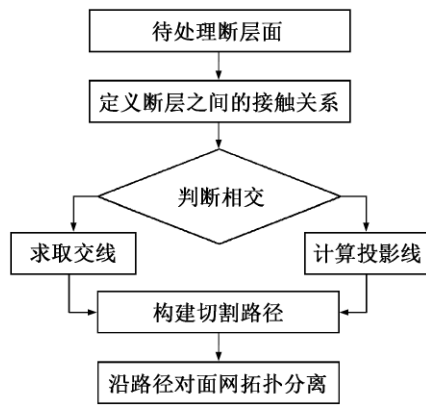


图 9 断层接触关系流程

Fig. 9 Workflow chart of handling the contact relationship between faults

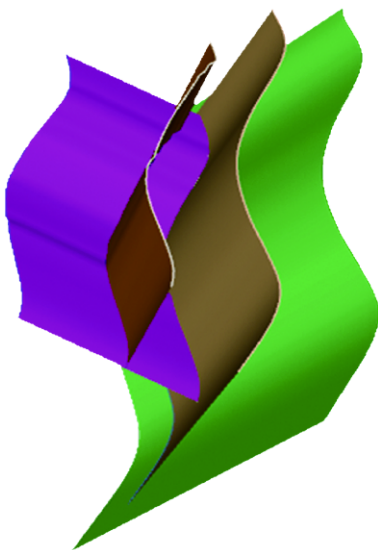


图 10 多 Y 型断层的削截

Fig. 10 Multiple nested Y-faults

对复杂半 Y 型或半 λ 型削截关系的 L 型路径,将初始相交线的一端或两端沿断层的产状方向或延展方向延展至断层边界即可实现(图 12)。对于相交的两端层面的削截,初始的交线通过两断层三角网的求交实现^[18,21]。

由于通过切割路径实现断层面之间的交切关系,不涉及断面上盘和下盘这样的曲面定侧,因此也非常容易实现断层二叉树所不能实现的情形(图 13)。

对于不相交的断层,可以通过沿断层伸展方向或断层产状方向投影到相应断层即可得到切割路径,实现断层的延展(图 14)。

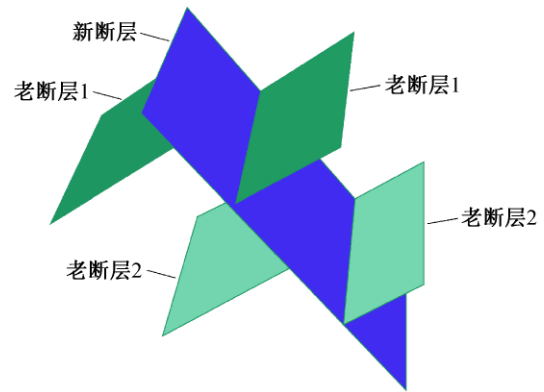
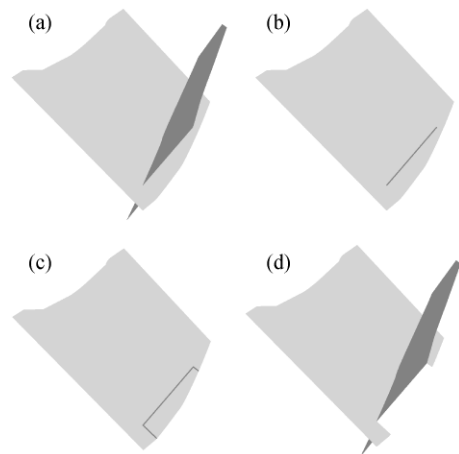


图 11 两个较老的断层被一新断层错断后,产生多 X 型和多 λ 型断层

Fig. 11 Two older faults offset by a younger fault, creating multiple X and λ intersection



(a) 两个断层相交情况; (b) 求取两断层交线; (c) 根据断层的关系定义切割路径(既可以手动也可自动); (d) 根据切割路径实现断面的削截

图 12 对于半 Y 型断层的削截

Fig. 12 For half Y-faults truncation

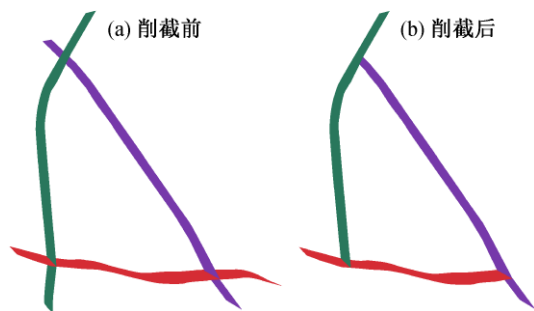
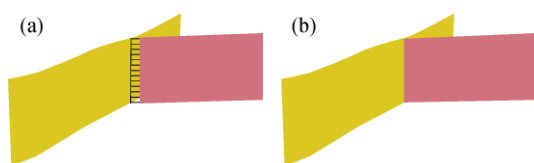


图 13 3 条循环为主辅关系的断层
Fig. 13 A series of self-truncating faults



(a) 辅断层沿其伸展方向投影到主断层, 得到切割路径;
(b) 辅断层延展到主断层

图 14 断层延展
Fig. 14 Fault extension

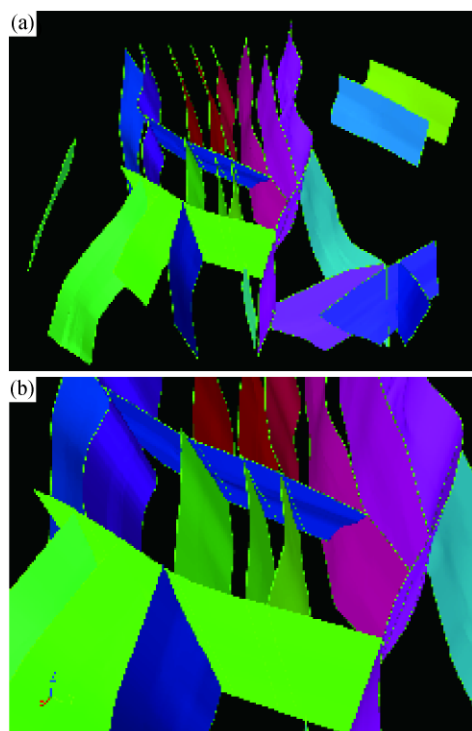


图 15 北京平原区断层网(a)以及断层之间切割关系局部放大(b)

Fig. 15 Fault network model of Beijing in the plain area (a) and the enlarged view of the relationship between the faults (b)

4 讨论与结论

本文提出一种新的路径切割算法, 成功解决了各种复杂的断层相交情况, 避免多边形拟合方法、Pillar 方法和二叉树方法等的限制, 大大提高了断层建模的灵活性, 在北京市平原区三维构造建模中取得良好的效果(图 15)。

断层之间削截关系的自动化识别是非常困难的, 也是目前绝大部分软件未能实现断层网建模完全自动化处理的原因。因此, 断层之间削截关系的自动化识别是我们后续研究的重点。断层网模型在整个构造建模的过程中, 是一个局部最优而非全局最优的过程。当断层网建模之后的过程出现问题时, 不得不修改断面、断层接触关系等, 因此需要断层网建模的整个过程能够方便快速地更新。

此外, 无论是断面的几何形态还是断层面之间的关系, 使断层网建模具有很大的不确定性^[2,13]。断层网建模的不确定性分析及随机断层网建模是未来研究的热点, 将会大大推进三维地质建模的实际应用。

参考文献

- [1] 朱志澄, 曾佐勋, 樊光明. 构造地质学. 3 版. 武汉: 中国地质大学出版社, 2008: 148-171
- [2] Pan Mao, Li Zhaoliang, Gao Zhongbo, et al. 3-D geological modeling-concepts, methods and key techniques. *Acta Geologica Sinica*, 2012, 86(4): 1031-1036
- [3] Caumon G, Collon-Drouaillet P, Le Carlier de Veslud C, et al. Surface-based 3D modeling of geological structures. *Mathematical Geosciences*, 2009, 41(8): 927-945
- [4] 曲良超, 卞昌蓉. 井震结合断层建模技术在复杂断块中的应用. *断块油气田*, 2012, 19(4): 426-429
- [5] Morley C K, Melson R A, Patton T L, et al. Transfer zones in the East African rift system and their relevance to hydrocarbon exploration in rifts. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 1990, 74: 1234-1253
- [6] Ferrill D A, Morris A P, Stamatakis J A, et al. Crossing conjugate normal faults. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 2000, 84:

- 1543–1559
- [7] Hoffman K S, Neave J W. The fused fault block approach to fault network modelling // Structurally complex reservoirs. Geological Society London, Special Publication, 2007, 292: 75–87
- [8] 张海娜, 杜玉山, 常润峰, 等. 应用 Petrel 软件建立复杂断裂系统断层模型. 断块油气田, 2009, 16(5): 46–47
- [9] Wu Qiang, Xu Hua. An approach to computer modeling and visualization of geological faults in 3D. Computers & Geosciences, 2003, 29(3): 503–509
- [10] 武强, 徐华. 虚拟矿山系统中三维断层模拟技术. 辽宁工程技术大学学报, 2005, 24(3): 316–319
- [11] 武强, 徐华. 三维地质建模与可视化方法研究. 中国科学: D 辑, 2004, 34(1): 54–60
- [12] 张俊安, 刘瑞刚, 杨钦, 等. 复杂地质结构的四维地质层面自动生成算法. 北京航空航天大学学报, 2007, 33(9): 1094–1098
- [13] Cherpeau N, Caumon G, Lévy B. Stochastic simulations of fault networks in 3D structural modeling. Comptes Rendus Geoscience, 2010, 342(9): 687–694
- [14] 朱良峰, 潘信, 吴信才, 等. 地质断层三维可视化模型的构建方法与实现技术. 软件学报, 2008(8): 2004–2017
- [15] 王润怀, 李永树. 异源点集下三维断层建模方法. 煤田地质与勘探, 2007, 35(5): 11–16
- [16] Shewchuk J R. Delaunay refinement algorithms for triangular mesh generation. Computational Geometry, 2002, 22(1): 21–74
- [17] 卞永祖. 基于约束的 Morphing 技术在三维矢量数据生成中的应用研究与实现[D]. 北京: 北京大学, 2005
- [18] Lindenbeck C H. TRICUT: a program to clip triangle meshes using the rapid and triangle libraries and the visualization toolkit. Computers & geosciences, 2002, 28(7): 841–850
- [19] 童晶, 陈正鸣. 三角网格表面近似测地线的计算. 计算机辅助设计与图形学学报, 2008, 20(2): 180–185
- [20] Gottschalk S, Lin M, Manocha D. OBBTree: a hierarchical structure for rapid interference detection // The Proceeding of ACM SIGGRAPH'96. New York: 1996: 171–180
- [21] Moller T. A fast triangle-triangle intersection test. Journal of Graphics Tools, 1997, 2(2): 25–30