基于规则网格的复杂断层网络处理与建模

牛露佳,王双威,曾义文,朱晨媛,王占刚

中国矿业大学(北京)地球科学与测绘工程学院,北京,100083

内容提要:断层建模是三维地质结构建模中的主要过程之一。断层面建模过程中需要根据断层间的空间接触 或者切割关系进行几何曲面的裁剪,目前方法利用三角网求交算法进行曲面裁剪,但是该算法处理复杂断层面切割 关系时往往不稳定。笔者等提出了基于规则网格的复杂断层网络处理与自动化建模的方法和流程,详细讨论了基 于网格化的断层网络模型形式化理论表达、建模流程中的断层网络空间关系构建以及相交裁剪处理算法等核心步 骤。利用测试数据和煤矿三维地震构造解释数据进行了验证,表明该方法可以有效处理多条互相切割、主辅关系复 杂的断层网络,具有较好的算法稳定性;与 SKUA—GOCAD 断层建模方法对比,能够减少交互过程,提高断层建模的 自动化程度。

关键词:断层网络;空间关系;规则网格;曲面裁剪;断层建模

三维地质结构建模(Structural Geological Modeling)用于构建结构模型来表达地下地质对象的几何形态及对象间的空间关系(Myers, 2003; Caumon et al., 2009;Wang Zhangang et al., 2016;Bi Zhengfa et al., 2022)。结构建模需要处理地质构造的接触关系以及切割关系,其中,断层建模主要解决断层面的构建以及切割关系处理问题。复杂断层网络处理切割关系主要涉及X型,Y型、 λ 型、T型、交叉型、4Y型和+ λ 型等断层间的组合方式(朱良峰等,2008;李兆亮等,2015)。

断层建模的一般流程是利用断层控制点或者断 层棱边数据进行空间插值生成断层面,然后根据不 同断层间的空间接触或者切割关系进行几何曲面的 裁剪。断层面采用不规则三角网(TIN, Triangulated Irregular Network)表达,利用三角形求交进行曲面裁 剪。这些算法需要显式处理断层网络中主辅断层的 削截关系来提高断层建模的自动化程度,如基于测 地线的路径切割算法(李兆亮, 2015),断层的错动 和错层处理(刘光伟等, 2018)。在隐式地质建模 (Renaudeau et al., 2019; Irakarama et al., 2021; de Kemp, 2021; Grose et al., 2021)中,断层的处理不 依赖于三角网的求交,比如 GemPy(de la Varga et al.,2019)以及 Grose 等(2021)根据断层两盘的运 动学特征处理断层,这类方法需要断层的几何形态 和运动学的数学描述,相关文献中呈现的断层以及 切割关系相对简单。从以上研究可以看出,基于不 规则三角网的断层面求交裁剪是复杂断层网络间切 割处理与建模的主要手段。不规则三角网求交一般 采用计算几何中的三角形求交算法以及改进算法 (Moller,1997;赵景昌等,2014),但是在实际应用中 三角网求交算法稳定性差,直接影响着断层建模的 自动化处理能力,尤其针对多期构造或者断层网络 的处理(蒋钱平等,2008;Pellerin et al., 2014)。

不采用三角网求交算法进行复杂断层面切割裁 剪处理是断层建模仍需研究和解决的问题。为此, 表达三维地质结构的网格化模型与建模方法被提出 以解决地质对象切割、剖切分析等方面的技术难点, 比如 GTP(吴立新等,2003),规则网格(Graciano et al.,2018),Cut-Cell 网格(Mallison et al.,2014), 角点网格(于瑞涛,2018)和广义棱柱网格(GPG) (Li Xin et al.,2018)。基于网格化模型的切割算 法可以有效实现地质体的剖切处理并取得了较好的 效果,如李长春等(2008)基于 GTP 实现三维地质体 的剖切,Zhou Cuiying 等(2020)提出垂直投影三角



注:本文为国家自然科学基金资助项目"三维地质结构模型的形式化表达及其规范化研究"(编号:41672326)和煤炭科学研究总院创新创业科技专项(编号:2021-JSYF-005)的成果。

收稿日期:2022-11-30;改回日期:2023-04-18;网络首发:2023-05-20;责任编辑:刘志强。Doi: 10.16509/j.georeview.2023.05.011

作者简介:牛露佳,女,1997年生,硕士研究生,地图学与地理信息系统专业;Email:niufuer2020@163.com。通讯作者:王占刚,男,1980年 生,博士,副教授,硕士生导师,主要从事三维地质建模与可视化方面的研究工作;Email:millwzg@163.com。

形网格(VPTN)实现地质体的剖切。这类方法的特 点是根据地质分层特性,地质界面的分片构成单元 (四边形或者三角形)在空间 XY 方向上具有相同的 离散结构,曲面分片单元顶点都在三棱柱或者四棱 柱边上,分片单元的切割裁剪只需要在 Z 方向上进 行求交处理,消除了几何图形求交算法的误差影响, 保证了算法的稳定性(Zhou Cuiying et al., 2020)。 研究人员也在探索利用网格化方法进行断层建模, 比如基于 GTP 的断层交互建模(车德福等,2008), 基于角点网格的局部多级加密(于瑞涛,2018)和六 面体元角点移位(刘少华等,2022)。然而,这些方 法以交互为主,能自动处理的断层比较简单。因此, 自动化处理复杂断层网络的切割裁剪以及断层建模 仍是一个问题。

由于网格化模型在切割算法稳定性方面的优势,笔者等提出基于网格化的断层网络模型形式化理论表达,基于此提出基于规则网格的断层网络建模流程,详细讨论了建模流程中断层空间关系构建以及断层相交裁剪处理方法。

1 方法原理

1.1 形式化理论表达

基于网格化的断层网络模型形式化表达为 FaultModel = { Ω , F, R},其中,定义域 Ω = { Ω _j}表示 模型整体空间 XY方向的网格化离散域, Ω _j是离散 单元,类型可以是三角形、四边形等, j = 1...m, m是 离散单元数量;断层集合 F = {F_i}, i = 1...l, l表示 断层的数量;断层空间关系集合 R = {r_i}, r_{ij} = < F_i, F_j > 表示两个不同断层 F_i和 F_j的空间关系。断层 面 F_i和关系 r_{ij}的定义如下:

(1)断层面 *F_i* 是单值曲面, *F_i* 的分段函数表达为:

$$F_{i} = z(x, y) = \begin{cases} z_{1}(u), & u \in \Omega_{1} \\ z_{2}(u), & u \in \Omega_{2} \\ \\ \dots \\ z_{n}(u), & u \in \Omega_{n} \end{cases} ,$$

 $u = (x, y), F_i$ 的定义域 $\Omega_1 \cup \Omega_2 \cup \cdots \cup \Omega_n \subseteq \Omega_0$ 。显函数 $z_i(x, y)$ 为离散单元上的插值函数,描述 断层 F_i 在(x, y)位置处的z值。

(2)断层空间关系 r_{ij} 定义两个断层面是否相交的拓扑关系以及两个断层面 Z 方向上的方向关系。

$$r_{ij} = \begin{cases} F_i \ \pi F_j \ \text{$\# p} \ \text{$\# p} \ \text{$\# x} \ \text{$$$

可见,由于关系 r_{ij} 定义了空间上下关系,不能 处理 X 型断层组合。根据此关系可以得到如下推 论:

推论 1: F_i 位于 F_j 的上方且 F_j 位于 F_k 的上方, 则 F_i 位于 F_k 的上方。即:

 $z_i(x,y) \ge z_j(x,y) 且 z_j(x,y) \ge z_k(x,y), 则$ $z_i(x,y) \ge z_k(x,y)$

推论 2: F_i 位于 F_j 的下方且 F_j 位于 F_k 的下方, 则 F_i 位于 F_k 的下方。即:

 $\begin{aligned} &z_i(x,y) \leq &z_j(x,y) \ \blacksquare \ z_j(x,y) \leq &z_k(x,y), \ \blacksquare \ z_i(x,y) \end{aligned}$

 $F_i = F_j$ 的关系 r_{ij} 根据实际地质情况,利用 $F_i = F_j$ 的削截主辅关系以及形成先后顺序进行设置。

若 F_i 是主断层, F_i 是辅断层, 则 F_j 切割 F_i , F_i 和 F_i 相交且 F_i 位于 F_i 上方或 F_i 位于 F_i 下方。

如果离散单元采用三角形单元对定义域 Ω 进行网格化离散,地质模型表达和建模类似主 TIN 法 (李元亨等,2010)或者 GTP 建模(吴立新等,2003; 车德福等,2008)。

笔者等采用规则网格对定义域 Ω 进行网格化 离散,主要目的是断层建模可以与隐式地质建模有 限差分方法(Renaudeau et al., 2019; Irakarama et al., 2021; Grose et al., 2021)结合。则基于规则网 格的定义域 $\Omega:m \times n \in R^2$, $f(m + 1) \times (n + 1)$ 个 网格点 $u_{ij} = (x_i, y_j), x \in X, y \in Y, X =$ $\{x_0 \leq x_1 \leq \cdots \leq x_m\}, Y = \{y_0 \leq y_1 \leq \cdots \leq y_n\}, 网格单元$ $\Omega_{ij} = (u_{i,j}, u_{i+1,j+1}) = (x_i: x_{i+1}, y_j: y_{j+1})$ 。 网格单元上 的 插 值 函 数 为 样 条 插 值 函 数 z(x, y) =

 $\sum_{i=0}^{\infty} \sum_{j=0}^{z_{ij}} Z_{ij} N_i(x) N_j(y), 其 中, z_{ij} = z(u_{ij}), N_i(x) 和$ N_i(y) 是基函数, 笔者等采用线性插值函数。

1.2 基于规则网格的断层面数据结构

将定义域 Ω 在 XY 方向上按一定分辨率均匀离 散形成的规则网格称为基网格,基网格单元称为单 元柱。如图 1,断层面在基网格控制下进行网格化, 在单元柱内中形成四边形对象称为 Interface。断层 面 F 由 Interface 拼合而成,即 F = {Interface_{ij}} = { < $z_{i,j}, z_{i+1,j}, z_{i+1,j+1}, z_{i,j+1}, id >$ },Interface 由 5 个属性组 成,包括4 个网格点 z 值和 Interface 所在断层 F 编码 id。

通过基于网格化的断层网络模型形式化表达和 Interface 定义,断层建模实质上将断层面按网格化 生成后进行切割处理,核心过程是在基网格的单元 柱内根据断层空间关系进行 Interface 的求交和裁剪 处理。由于单元柱内不同 Interface 的差异是z值,求 交和裁剪主要根据z值大小关系进行算法设计,有 利于算法稳定性。断层空间上下关系决定了 Interface 间的上下关系,通过空间关系二叉树(见3. 1)管理所有断层关系,达到自动化处理的目的。

2 总体实现流程

复杂断层网络建模处理流程如图 2 所示,主要步骤包括:

(1)基网格设置,根据建模源数据区域范围和 建模网格分辨率将定义域在 XY 方向上均匀离散形成的基网格。

(2)断层网络空间关系构建,根据实际地质情况,利用断层的削截主辅关系构建断层空间关系,包括空间上下关系和相交关系。通过空间关系二叉树序列(见3.1节)记录所有断层空间上下关系,相交关系表记录断层相交关系。

(3) 网格化断层面生成,逐个断层处理,根据当前断层 F 的区域范围,利用薄板样条插值算法或者 有限差分插值算法(Irakarama et al., 2021) 生成 Interface 拼合的网格化断层面,即 $F = \{Interface_{ij}\}$ 。 同时,使用主成分分析法计算断层输入控制点的最 佳投影面,在最佳投影面上提取断层边界的真实最 小凸包并进行调整作为断层真实边界条件。

(4)断层边界延伸预处理,对空间关系二叉树 中存在相交关系的断层将切割主断层面的区域范围 外延至所有被切割辅断层区域范围的最小公共外 包,并对延伸部分进行标记(见3.2节)。

(5)在单元柱内实现 Interface 相交裁剪,在单元 柱内实现两个或者多个 Interface 四边形求交裁剪算 法(见3.3节)。将隶属同一断层的 Interface 处理后



图 1 断层 F 网格化 (a)和单元柱(b) Fig. 1 Fault F in regular grid(a) and Pillar(b)

的有效曲面拼接起来,进行 Delaunay 三角剖分生成 相交裁剪后的三角网化断层面。

(6)后处理,利用断层真实边界条件对相交裁 剪后的三角网化断层面进行边界裁剪,生成最终的 断层面。后处理会消除断层网格化造成的"假相 交"切割关系(见 3.1 节)和断层延伸标记边界(见 3.2 节),保证断层网络模型空间拓扑的合理性。

下文将重点对断层间空间关系构建、断层边界 延伸预处理和 Interface 相交裁剪 3 个核心步骤进行 详细介绍。

3 核心步骤

3.1 断层网络空间关系

根据断层间空间关系 r_{ij} 的定义,使用空间关系 二叉树和相交关系表记录断层空间位置上下和是否 相交的信息。空间关系二叉树的数据结构定义如 下:

FaultRelationBinaryTree {

树结点集合D:每个结点一一关联断层集合F = $\{F_i\}$ 中对应断层;

结点关系集合 H:结点关系为二元关系:

(1) D中存在唯一的根结点 root, 在关系 H 中无 前驱;除根结点, 其他结点必有唯一前驱结点, 即父 结点。

(2)除叶结点,每个结点至多有两个孩子结点, 即左子结点和右子结点。

根据断层空间关系集合 $R = \{r_{ij}\}$ 构建结点关系,规定:父结点断层与左子结点断层和右子结点断 层都相交;左子结点断层位于父结点断层上方;右子 结点断层位于父结点断层下方。从断层主辅关系, 相对于子结点,父结点为主断层结点。

空间关系二叉树描述了有切割联系的断层关

系,当断层数量过多需要降低树 深度,空间关系二叉树应满足平 衡二叉树的结构要求(图3)。 在整个建模工区,相互有切割联 系的断层关系会形成多个空间 关系二叉树,整体构成空间关系 森林。空间关系二叉树按中序 序列进行存储,每个断层记录按 中序遍历的序列位置编号,形成 断层关系存储表(图3c)。根据 存储序列编号,无需遍历二叉 树,通过编号顺序可判断出两个



图 2 复杂断层网络建模流程 Fig. 2 Complex fault network modeling process



图 3 断层模型剖面图(a)、空间关系二叉树(b)和存储表(c) Fig. 3 Fault model section(a)、Space relationship binary tree(b) and Storage table(c)



图 4 断层切割示意图:(a) 断层实际分布、(b) 图框网格内断层网格化后结果 和相交关系表(c)

Fig. 4 Faults cutting: (a) actual faults distribution, (b) faults in regular grid and intersecting relationship table (c)

断层的空间上下关系,如判断断层 F2 与 F4 的空间 上下关系,F2 的中序遍历位置索引号(5)大于 F4 的索引号(1),故 F2 位于 F4 的下方。

相交关系表记录任意两个断层间是否存在切割关系。相交关系表的意义在于处理断层网格化后的

"假相交"关系,保证断层建模的正确性。断层"假相交"切割由规则网格分辨率引起。如图 4(a)中断层 F3 切割 F2,F2 切割 F1,而 F1 和 F3 实际中并没有相交。但是按断 层网格化处理,由于网格分辨率,F3 网格化后与 F1 相交(图 4b)。"假 相交"切割关系需要在相交关系表 中设置 F1 和 F3 不相交,Interface 相 交裁剪步骤不处理 F1 和 F3 的切割 关系,后处理步骤根据断层真实边 界进行裁剪。

3.2 断层边界延伸预处理

由于断层面裁剪在单个单元柱 内进行处理,而裁剪前的断层所覆 盖的单元柱会超出断层实际区域。 如图 5a 所示,断层 F1 与 F2 相交, 断层所覆盖单元柱有重叠域,也有 非重叠域。若 F1 切割 F2 且 F2 在 F1 下方,在非重叠域上 F2 在裁剪 处理后会出现错误(图 5b),其原因 在于 F1 为主断层切割辅断层 F2, 但是 F2 的单元柱超出了 F1 的覆盖 范围。若将断层 F1 延伸到 F1 和 F2 边界的最小公共外包(图 5c),可 以保证断层裁剪的正确处理,得到 如图 5d 所示结果。因此,断层边界 延伸预处理就是对存在相交关系的 主辅断层,将切割主断层的区域范 围外延至所有被切割辅断层区域范 围的最小公共外包,对主断层延伸 部分进行标记。断层面后处理阶段 应舍弃标记部分。

3.3 断层相交裁剪处理

断层相交裁剪只需在单元柱内 实现 Interface 相交裁剪。在单元柱 内,断层面 Interface 的4个顶点都在 单元柱的棱上(图1),相邻顶点构 成的边位于侧柱面上,称为面边。

位于 Interface 内且与单元柱内部有交集的边或线称 为内边,内边的顶点可能在面边上,也可能位于 Interface 内。face 是 Interface 经过相交裁剪后保留 的有效部分。最终 Interface 的有效部分由若干 face



(b) unreasonable case; (c) fault extension; (d) final result

构成。

6

根据交点个数和位置差异,单元柱内两个不全等 *Interface* 的相交可以枚举出 10 种情况(图 6)。

从图 6 可以得到两个 Interface 相交的特点:① 交点一定在单元柱的侧面或者棱上;②交点是两个 Interface 在单元柱同一侧面上的面边交点;③交线 是交点顺次连接而成;④两个顺次连接的交点形成 的边可以是内边或者面边。根据以上特点,单元柱 内 Interface 求交裁剪步骤如下:

(1)根据单元柱内断层的空间关系二叉树中序 遍历,新遍历的 Interface(记为 newInterface)和所有 已经完成遍历处理的 Interface(记为 oldInterface)进 行面边求交(图 7a,b), newInterface 每个面边被 oldInterface 递归打断成多段; (2)判断 newInterface 面边的每个分段与 oldInterface 的空间上下关系是否满足 newInterface 和 oldInterface 的空间上下关系,不满足的面边段被剔 除,满足的段为有效面边段,如图 7b F2 的面边处 理;(3)将 newInterface 与 oldInterface 的面边交点依 次连接形成内边,并剔除与面边重合的内边,如图 7a 内边 L1。内边实际为 newInterface 和 oldInterface 的交线;

(4)将 *oldInterface* 上有效内边与新的内边在 XY 投影面上计算交点,记为 P(图 7c),内边相应被打断为多段;

(5)判断内边的每个分段与 oldInterface 的空间 上下关系是否满足 newInterface 和 oldInterface 的空 间上下关系,不满足的内边段被剔除,满足的段为有



图 6 单元柱内 Interface 间相交示意图 Fig. 6 Intersection between two Interfaces in the cell column 效内边:

5月

(6)使用深度优先遍历将所有有效的面边段和 内边段构成封闭的最小环,即为 newInterface 相交处 理后的有效曲面(图 7d)。

单元柱内所有 Interface 重复以上步骤进行。处理完成后,将隶属同一断层的 Interface 处理后的有效曲面拼接起来,进行 Delaunay 三角剖分生成相交裁剪后的三角网化断层面,进入后处理流程。

4 实验分析

利用 Visual C++2019 实现了本文方法,测试环 境为 CPU R7 5800H, 16G 内存和 64 位微软



图 7 单元柱内 Interface 相交裁剪(F1 切割 F2 和 F3,F2 在 F1 下方,F3 在 F1 上方): (a) F2 为 newInterface, F1 为 oldInterface; (b) F3 为 newInterface,L1 为 F1 和 F2 的有效内边 interiorEdge,L2 为 F2 的有效面边段;(c) L3 为 F3 和 F1 相交的内边,虚线为无效的内边和面边段,P为 L1 和 F3 交点

Fig. 7 Interface cutting in a cell column (F1 cut F2 and F3, F2 below F1, F3 above F1): (A) F2 is the *newinterface*, F1 is *oldinterface*; (b) F3 is *newinterface*, L1 is the valid interior edge of F1 and F2, L2 is the valid face edge segment of F2; (c) L3 is the interior edge of the intersection of F3 and F1, the dashed line is the invalid interior and face edge segments, and P is the intersection of L1 and F3

Windows 10 操作系统。首先利用花状构造断层数 据进行测试,并与 SKUA—GOCAD 19 进行了对比; 然后利用煤矿三维地震断层解释数据进行验证。

4.1 对比测试

花状构造的断层网络测试

数据中有 8 个断层(图 8a),其中,F1 为主断层,4 个 分支断层 F2、F3、F4、F5 与 F1 相交,F2 切割断层 F3、F8,F5 切割其他与之相交断层。基网格分辨率 为 100² 和 2000²,利用二维薄板样条插值算法逐一 构建网格化断层曲面,并根据断层建模总体流程进 行自动化处理。得到建模结果如图 8 所示,断层网 络切割处理结果符合断层组合关系,基网格分辨率

越高,曲面光滑性越好。

以此花状构造数据为测试数据,对 比本文方法与 SKUA—GOCAD 2019 在 建模流程和处理结果上的差异。在 SKUA—GOCAD 19 中利用 Structural Modeling 功能, 输入图 8a 中 8 个断层的 源数据,采用 DSI 空间插值算法生成断 层面,设置断层间的主辅关系,得到建模 结果如图 9a 所示,结果中断层 F1 和 F2 以及 F2 和 F3 的断层关系未能正确处 理。利用 GOCAD 的 Edit Contacts 交互 式对建模结果进行修正,最终得到断层 切割关系正确的模型效果如图 9b 所示。 该测试表明,相比 SKUA—GOCAD 断层 建模方法,本文方法具有较好的算法稳 定性,能够减少交互过程,提高断层建模 的自动化程度。

仍以花状构造数据为测试数据分析 基网格分辨率对建模性能的影响。在相 同测试环境下记录不同分辨率下的断层 建模所需时间,结果如表1所示。从测 试结果可以看出,对于地质模型基网格 分辨率500²,本文方法在180 s内运行, 可以满足一般建模性能需求,但对于高 分辨基网格,建模耗时在分钟和小时数 量级,还需进一步提升建模效率。

4.2 真实数据

根据某煤矿三维地震断层解释数据,选取了具有复杂切割关系的9个断层,断层输入数据如图10a所示,其中,断层DF1切割断层DF0、DF2、断层



图 8 花状构造断层建模:(a) 源数据:断层棱边;(b) 单个断层面生成结果;(c) 基网格分辨率 100² 的结果; (d) 基网格分辨率 2000² 的结果

Fig. 8 Flower structure fault modeling: (a) source data: fault edges; (b) fault surface; (c) results of base grid resolution 100^2 and (d) results of base grid resolution 2000^2

表 1 不同基网格分辨率下的断层建模运行时间 Table 1 Running time of fault cross-cropping

at different base grid resolution

网格规模	运行时间(秒)
100 ²	8
200^{2}	20
500^{2}	180
1000^{2}	799
2000^{2}	2340

DF5 切割断层 DF4、DF6、DF7、DF8。基网格分辨率为 500²,利用二维薄板样条插值算法逐一构建网格 化断层曲面,并根据断层建模总体流程进行自动化 处理。建模结果如图 10c 所示,断层网络切割处理 结果符合断层关系,如图 10d 中断层 DF5 切割断层 DF4、DF6、DF7、DF8 的处理结果正确。

5 结论

针对复杂断层面切割裁剪处理算法稳定性以及



图 9 SKUA—GOCAD2019 花状构造断层建模结果: (a)直接建模结果; (b)交互修正断层边界 Fig. 9 Flower structure fault modeling result in SKUA—GOCAD2019: (a) direct modeling results; (b) interactive corrected fault boundaries

断层建模流程自动化等问题,笔者等提出了基于规则网格的复杂断层网络处理与自动化建模的方法和 流程,详细讨论了基于网格化的断层网络模型形式 化理论表达、建模流程中的断层网络空间关系构建 以及相交裁剪处理算法等核心步骤。通过基于网格 化的断层网络模型形式化表达和 Interface 定义,将 断层面建模转化为在基网格单元柱内根据断层空间 关系进行 Interface 的求交和裁剪处理,该过程具有

9



图 10 某煤矿断层网络建模:(a) 源数据:断层棱边;(b) 单个断层面生成结果;(c) 断层建模结果;(d) 局部放大图 Fig. 10 Fault network modeling in a coalmine : (a) source data: fault edges; (b) fault surface; (c) fault modeling results; (d) local magnification plot

较好的算法稳定性。利用断层的削截主辅关系构建 断层间空间关系,通过空间关系二叉树和相交关系 表管理所有断层的空间关系,按照统一的流程进行 断层切割裁剪和后处理,最终得到符合断层关系的 建模结果。

测试验证表明,本文方法可以有效处理多条互 相切割、主辅关系复杂的断层网络,具有较好的算法 稳定性;通过与 SKUA—GOCAD 断层建模方法对 比,能够减少交互过程,提高断层建模的自动化程 度。

本文方法缺点和不足为:①不能处理多值断层 曲面,如S型断层曲面和和直立或近直立断层;② 断层空间关系需要严格的空间上下关系,故不能处 理X型断层组合;③基于基网格的断层表达是一种 拟合方法,断层面的精度依赖基网格分辨率;④ 由 于采用规则网格,在高分辨率基网格上,建模性能 低;⑤ 最终构建的断层不规则三角形网格质量还比 较差,没有进行网格优化处理。

本文方法的后续研究可以采用自适应基网格和 并行处理提升建模性能,也可以将基网格由规则网 格推广到三角形网格,提高基于 GTP 和主 TIN 等地 质建模方法的自动化水平。

参考文献 / References

(The literature whose publishing year followed by a "&" is in Chinese with English abstract; The literature whose publishing year followed by a "#" is in Chinese without English abstract)

- 车德福,吴立新,殷作如,郭甲腾.2008. 基于 GTP 的断层三维交 互建模方法.东北大学学报(自然科学版),3(4):395~398.
- 李长春, 王宝山, 薛华柱. 2008. 基于 GTP 的煤矿地质体三维建模 及剖切. 煤炭学报, 33(11): 1268~1271.
- 李元亨, 陈国良, 刘修国, 尚建嘎. 2010. 主 TIN 模式下面向拓扑的 三维地质块体构建方法. 岩土力学, 31(6): 1902~1906.
- 李兆亮, 潘懋, 杨洋, 曹凯, 吴耕宇. 2015. 三维复杂断层网建模方 法及应用. 北京大学学报(自然科学版), 51(1): 79~85.
- 刘光伟,成功,宋佳琛,白润才,李鹏. 2018. 非连续煤层实体模型 一体化构建技术研究.煤炭科学技术,46(05);205~211.
- 刘少华,吕瑞龙,伍东. 2022. 基于角点移位的三维地质断层快速 建模算法.长江大学学报(自然科学版),19(02):23~29.
- 蒋钱平, 唐杰, 袁春风. 2008. 基于平均单元格的三角网格曲面快 速求交算法. 计算机工程, 34(21): 172~174.
- 吴立新,陈学习,史文中. 2003. 基于 GTP 的地下工程与围岩一体 化真三维空间构模. 地理与地理信息科学,19(6):1~6.
- 于瑞涛. 2018. 基于角点网格的煤储层裂隙三维可视化研究. 导师: 陈玉华. 徐州:中国矿业大学硕士学位论文: 1~76.
- 赵景昌, 白润才, 刘光伟, 刘威. 2014. 基于空间索引与碰撞检测的 TIN 求交算法. 计算机工程, 40(12): 296~301.
- 朱良峰,潘信,吴信才,刘修国. 2008. 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,19(8):14~20.
- Bi Zhengfa, Wu Xinming, Li Zhaoliang, Chang Dekuan, Yong Xueshan.

2022. DeepISMNet: Three-dimensional implicit structural modeling with convolutional neural network. Geoscientific Model Development, 15(17); 6841~6861. 3(4); 395~398.

- Che Defu, Wu Lixin, Yin Zuoru, Guo Jiateng. 2008 &. On the GTP-Based 3D interactive modeling method for geological faults. Journal of Northeastern University(Natural Science), 3(4): 395~398.
- Caumon G, Collon-Drouaillet P, de Veslud C, Viseur S. 2009. Surfacebased 3D modeling of geological structures. Mathematical Geosciences, 41(8): 927~945.
- Graciano A, Rueda A J, Feito F R. 2018. A formal framework for the representation of stack-based terrains. International Journal of Geographical Information Science, 32(10): 1999~2022.
- Grose L, Ailleres L, Laurent G, Caumon G, Jessell M, Armit R. 2021. Realistic modelling of faults in LoopStructural 1. 0. Geoscientific Model Development, 14(10): 1~26.
- Jiang Qianping, Tang Jie, Yuan Chunfeng. 2008&. Fast triangle mesh surface intersection algorithm based on uniform grid, Computer Engineering, 34(21): 172~174.
- de Kemp E A. 2021. Spatial agents for geological surface modelling. Geoscientific Model Development, 14(11): 6661~6680.
- Irakarama M, Laurent G, Renaudeau J, Caumon G. 2021. Finite difference implicit structural modeling of geological structures. Mathematical Geosciences, 53(5): 785~808.
- Li Changchun, Wang Baoshan, Xue Huazhu. 2008&. Coal geological body three-dimensional modeling and cutting based on GTP. Journal of China Coal Society, 33(11): 1268~1271.
- Li Xin, Li Xiang, Zhang Dongxiao. 2018. Generalized prism grid: a pillar-based unstructured grid for simulation of reservoirs with complicated geological geometries. Computers & Geosciences, 22 (6): 1561~1581.
- Li Yuanheng, Chen Guoliang, Liu Xiuguo, Shang Jianga. 2010&. The topology-oriented method of building 3D geological block model based on primary tin. Rock and Soil Mechanics, 31(6): 1902 ~ 1906.
- Li Zhaoliang, Pan Mao, Yang Yang, Cao Kai, Wu Gengyu. 2015&. Research and application of the three-dimensional complex fault network modeling. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 51(1): 79~85.
- Liu Guangwei, Cheng Gong, Song Jiachen, Bai Runcai, Li Peng. 2018&. Study on integrated construction technology of noncontinuous coal seam solid model. Coal Science and Technology, 46(05): 205~211.
- Liu Shaohua, Lü Ruilong, Wu Dong. 2022&. Fast modeling algorithm of 3D geological fault based on corner shift. Journal of Yangtze University(Natural Science Edition), 19 (2): 23~29.
- Mallet J. 2003. Geomodeling. Computers & Geosciences, 29(6): 811~ 812.
- Mallison B, Sword C, Viard T, Milliken W, Cheng A. 2014. Unstructured cut-cell grids for modeling complex reservoirs, SPE Journal, 19 (02): 340~352.
- Moller T. 1997. A fast triangle—triangle intersection test. Journal of Graphics Tools, 2(2): 25~30.
- Myers D E. 2003. Geomodeling. Computers & Geosciences, 29(6):811 ~812.
- Pellerin J, Lévy B, Caumon G, et al. 2014. Automatic surface remeshing of 3D structural models at specified resolution: a method based on Voronoi diagrams. Computers & Geosciences, 62(1): 103 ~116.

- Renaudeau J, Irakarama M, Laurent G, Maerten F, Caumon G. 2019. Implicit modelling of geological structures: A cartesian grid method handling discontinuities with ghost points, WIT Transactions On Engineering Sciences, 122(9): 189~199.
- de la Varga M, Schaaf A, Wellmann F. 2019. GemPy 1. 0: opensource stochastic geological modeling and inversion. Geoscientific Model Development, 12(1): 1~32.
- Wang Zhangang, Qu Honggang, Wu Zixing, Yang Hongjun, Du Qunle. 2016. Formal representation of 3D structural geological models. Computers & Geosciences, 90(A): 10~23.
- Wu Lixin, Chen Xuexi, Shi Wenzhong. 2003&. GTP-based integral real-3D spatial modeling for subsurface engineering and its surrounding geology bodies. Geography and Geo-Information Science, 19(6): 1~6.

- Yu Ruitao. 2018&. Research on three dimensional visualization of coal reservoir fracture based on corner point grid. Tutor: Chen Yuhua. Xuzhou: China University of Mining & Technology Master thesis: 1 ~76.
- Zhao Jingchang, Bai Runcai, Liu Guangwei, Liu Wei. 2014&. TIN intersection algorithm based on spatial index and collision detection. Computer Engineering, 40(12): 296~301.
- Zhou Cuiying, Du Zichun, Ouyang Jinwu, Zhang Zhilong, Liu Zhen. 2020. A 3D geological model and cutting algorithm based on a vertically projected triangulated network. Computers & Geosciences, 143(8): 1~9.
- Zhu Liangfeng, Pan Xin, Wu Xincai, Liu Xiuguo. 2008&. Construction method and actualizing techniques of 3D visual model for geological faults. Journal of Software, 19(8): 14~20.

Processing and modeling of complex fault networks based on regular grid

NIU Lujia, WANG Shuangwei, ZENG Yiwen, ZHU Chenyuan, WANG Zhangang

School of Geosciences & Surveying Engineering, China University of Mining & Technology-Beijing, Beijing, 100083

Abstract: Fault modeling is the main process in 3D geological structure modeling. In the process of fault modeling, the geometric surfaces should be cut according to the spatial contact or cutting relationship between faults. At present, the most approaches use the TIN intersection for surface cutting, but this algorithm is often unstable when handling the cutting relationship of complex fault surfaces. This paper proposes the method and process of complex fault network processing and automatic modeling based on regular grid, and discusses the core steps such as formal theory expression of fault network model, modeling process, spatial relationship construction of fault network and cutting processing algorithm in detail. Using test data and three-dimensional seismic structure interpretation data of coal mine, this approach can effectively handle multiple fault networks with complex fault relationships, and has good algorithm stability; By comparing with the SKUA—GOCAD fault modeling method, it can reduce the interaction process and improve the automation of fault modeling.

Keywords: fault network; spatial relationship forest; regular grid; surface cutting; fault modeling

Acknowledgements: This research is supported by the National Natural Science Foundation titled "Formal Representation and Standardized Study of Three Dimensional (3D) Geological Model" (No. 41672326) and Innovation and Entrepreneurship Technology Specialty of China Coal Research Institute (No. 2021-JSYF-005)

First author: NIU Lujia, female, born in 1997, postgraduate student, is mainly engaged in the research of 3D geological model; Email: niufuer2020@163.com

Corresponding author: WANG Zhangang, male, born in 1980, associate professor, is engaged in the research of 3D geological model and visualization; Email: millwzg@163.com

Manuscript received on: 2022-11-30; Accepted on: 2023-04-18; Network published on: 2023-05-20 Doi: 10.16509/j.georeview. 2023.05.011 Edited by: LIU Zhiqiang