

# 融合断层势场的复杂煤层地质体隐式自动建模方法

钟德云<sup>1,2</sup>, 王李管<sup>1,2</sup>

(1. 长沙迪迈科技股份有限公司, 湖南长沙 410221; 2. 中南大学资源与安全工程学院, 湖南长沙 410083)

**摘要:**在煤炭透明地质系统建设中,对具有复杂交叉断层网络的煤层地质体进行自动建模及模型动态更新是一项极具挑战性的任务。为解决具有复杂断层网络的煤层地质建模问题,在非平稳地质统计理论和隐式建模势场插值理论的基础上,创新性地提出了一种融合外部漂移的径向基函数(RBF)插值理论和融合断层势场的煤层地质体三维自动建模方法。提出的隐式建模方法分为以下步骤:在断层插值约束方面,通过推导融合外部漂移的径向基函数插值式,提出了融合断层势场的径向基函数插值理论与方法。在断层势场表示方面,引入断层线势场来定义断层影响范围,可以插值不同类型断层与煤层间的不连续插值趋势和光滑过渡趋势。在断层网络定义方面,基于图论的思想采用有向图来表示断层网络之间相互影响的拓扑关系,并进而构造断层势场组合关系来定义断层网络之间的截断交叉关系。在模型曲面重构方面,采用保证几何精度的约束 Delaunay 三角剖分(CDT)方法实现断层线的保特征插值和保特征重构,以确保隐式曲面重构得到几何精度可靠的三角不规则网络(TIN)模型,无需进行网格后处理操作。基于以上方法,开发了面向煤炭地质保障系统的三维煤层地质体模型自动建模系统。系统支持复杂断层网络拓扑关系的自动构建,可以极大提高煤层地质体隐式建模的效率。为了测试融合外部漂移的径向基函数插值方法的插值效果和融合断层势场的煤层地质体建模方法的建模效果,以多个矿山真实数据集为基础,验证了融合复杂交叉断层的煤层地质体隐式建模方法的可靠性。所提方法可以对具有大量不同类型交叉断层网络的复杂煤层地质体进行高效自动建模,并满足断层运动特征和断层影响范围等地质规则约束,对煤层地质精准建模具有重要应用价值。

**关键词:**煤层建模;地质保障系统;地质建模;空间插值;隐式建模;径向基函数

**中图分类号:**TD72 **文献标志码:**A **文章编号:**0253-9993(2025)03-1705-12

## Implicit and automatic modeling method for complex coal seam geological bodies integrating fault potential fields

ZHONG Deyun<sup>1,2</sup>, WANG Liguan<sup>1,2</sup>

(1. Changsha DIMINE Co., Ltd., Changsha 410221, China; 2. School of Resources and Safety Engineering, Central South University, Changsha 410083, China)

**Abstract:** In the construction of coal transparent geological systems, automatic modeling of coal seam geological bodies with complex cross-fault networks and dynamic updating of models is a challenging task. To solve the geological modeling problem of coal seams with complex fault networks, based on the non-stationary geostatistical theory and implicit modeling potential field interpolation theory, a Radial Basis Function (RBF) interpolation theory with additional external drift and a three-dimensional automatic modeling method are proposed for coal seam geological body with additional fault

收稿日期: 2024-08-14 策划编辑: 韩晋平 责任编辑: 刘雅清 DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2024.0969

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2024YFC2909500, 2022YFC2904105)

作者简介: 钟德云(1990—),男,福建长汀人,高级工程师,博士。E-mail: deyizhiyun@163.com

引用格式: 钟德云,王李管.融合断层势场的复杂煤层地质体隐式自动建模方法[J].煤炭学报,2025,50(3): 1705-1716.

ZHONG Deyun, WANG Liguan. Implicit and automatic modeling method for complex coal seam geological bodies integrating fault potential fields[J]. Journal of China Coal Society, 2025, 50(3): 1705-1716.



移动阅读

potential field. The proposed implicit modeling method consists of the following steps. In terms of fault interpolation constraints, the theory and method of radial basis function interpolation that integrates fault potential fields are proposed by deriving the formula for radial basis function interpolation that integrates external drift. In terms of fault potential field representation, the fault line potential field is introduced for the first time to define the range of fault influence, which can interpolate the discontinuous interpolation trend and smooth transition trend between different types of faults and coal seams. In terms of defining fault networks, a directed graph is used based on graph theory to represent the topological relationships of mutual influence between fault networks, and then a combination of fault potential fields is constructed to define the truncation intersection relationships between fault networks. In terms of model surface reconstruction, the Constrained Delaunay Triangulation (CDT) method that ensures geometric accuracy is used to achieve feature preserving interpolation and reconstruction of fault lines, ensuring reliable Triangulated Irregular Network (TIN) mesh models with implicit surface reconstruction without the need for mesh post-processing operations. Based on the above methods, an automatic modeling system of three-dimensional coal seam geological body model was developed for the coal geological assurance system. The system supports the automatic construction of complex fault network topology relationships, which can greatly improve the efficiency of implicit modeling of coal seam geological bodies. In order to test the interpolation effect of the radial basis function interpolation method incorporating external drift and the modeling effect of the coal seam geological body modeling method incorporating fault potential field, the reliability of the implicit modeling method incorporating complex cross faults of the coal seam geological body has been verified on the basis of real datasets from several mines. The proposed method can efficiently and automatically model complex coal seam geological bodies with a large number of different types of cross fault networks, and satisfy the geological rule constraints such as the fault motion characteristics and the influence range of the faults, which is an important application value for the accurate modeling of coal seam geology.

**Key words:** coal seam modeling; geological support system; geologic modeling; spatial interpolation; implicit modeling; radial basis functions

## 0 引 言

高精度地质模型的构建是实现自动化和智能化开采以及构建煤炭地质保障系统<sup>[1]</sup>、识别隐蔽地质灾害(如瓦斯突出、水害、顶板冒落等)的重要基础。精细化的地质模型可以更准确地识别和预测煤层的分布、厚度变化及断层的空间分布,可以更好地规划矿井巷道布局、采煤工作面布置等,从而提高煤炭资源的开采效率和安全性。

实现融合复杂地质构造的地质建模是透明地质研究面临的一项重要挑战。从曲面表示方式的角度来看,现有地质建模方法可以分为显式建模方法、参数建模方法和隐式建模方法 3 类。其中,显式建模方法一般基于 Delaunay 细分的方法采用显式多边形网格构建地质体模型<sup>[2]</sup>;参数建模方法则通过 Coons 曲面等参数方程表示地质曲面上任意位置的坐标分量<sup>[3]</sup>。近年来,新兴的隐式建模方法采用空间插值方法<sup>[4-6]</sup>或人工智能与深度学习的方法<sup>[7-8]</sup>来构建表征地质体模型的隐式函数,具有广阔的发展前景。郭甲腾等<sup>[9]</sup>研究了采用 Hermite 径向基函数插值三维矿体模型的方法, JIA 等<sup>[10]</sup>研究了采用普通克里金方法插值具有断

层的地质界面的方法, CALCAGNO 等<sup>[11]</sup>研究了采用泛协克里金插值具有断层的地质界面的方法。地质体隐式建模方法一般采用符号距离场 (SDF) 的方法<sup>[12-13]</sup>来构建表征地质体的空间区域,这种建模方式也称为势场法 (PFM)<sup>[14-15]</sup>。由于缺乏足够的直接观测数据,复杂交叉断层网络在煤层地质中的分布往往具有较大的不确定性<sup>[16-17]</sup>,因此隐式建模方法的关键在于研究满足先验地质知识的地质约束规则<sup>[18-19]</sup>。相关学者<sup>[20-21]</sup>进一步研究了满足断层运动特征的插值方法,邹艳红等<sup>[22]</sup>则对三维断层网络隐式建模的流程与不确定性进行了分析。

尽管已有方法在地质建模方面取得了显著进展,但对于包含大量交叉断层的煤层地质体而言,现有地质体隐式建模方法仍存在以下问题:为了达到最优无偏估计或最佳逼近,传统基于克里金法或径向基函数插值的理论倾向于产生光滑和连续的插值效果,而这并不符合地质建模中很多非光滑插值及非连续插值的地质规则;直接应用插值方法容易导致过度平滑的问题,如去除地质边界或圆滑尖锐特征等;断层构造运动的存在则在断层两侧一定区域范围内形成了明显不同的插值趋势,并在断层面形成了突变落差,传

统连续插值函数并不能直接描述这种非连续性趋势的地质现象; 复杂交叉断层网络建模得到的模型网格质量难以保证, 大量网格后处理操作则会极大地降低整体建模和模型动态更新的自动化程度。总体来看, 如何高效准确地构建具有复杂断层网络的三维地质模型仍然是一项技术瓶颈。

为了克服以上复杂断层网络建模的问题, 笔者在非平稳地质统计理论和隐式建模势场插值理论的基础上, 推导一种融合外部漂移的径向基函数 (RBF) 插值式, 分析插值方程求解的唯一性条件, 并创新性地提出了融合断层势场的煤层地质体三维自动建模方法。该方法的基本思路是将断层势场看作一种外部漂移函数<sup>[23-24]</sup>, 通过添加不连续的外部漂移函数来构造断层插值势场, 并通过推导融合外部漂移的径向基函数插值方法来实现煤层地质体建模。为了实现断层线的保特征插值和保特征重构, 可以采用保证几何精度的约束 Delaunay 三角剖分 (CDT) 方法<sup>[25]</sup>构建几何网格。为了提高效率, 可以进一步采用基于快速多极子方法 (FMM)<sup>[26]</sup>和域分解方法 (DDM)<sup>[27]</sup>实现大规模散乱数据快速插值, 对具有大量不同类型交叉断层网络的复杂煤层地质体进行高效自动建模。在以上技术的基础上开发面向煤炭地质保障系统的三维煤层地质体模型自动建模系统, 并将其应用于真实矿山建模案例中。

## 1 融合外部漂移空间插值理论

### 1.1 非平稳插值理论

一般的普通克里金法要求区域化变量满足平稳性假设条件, 但实际中的区域化变量经常是非平稳的 (区域化变量的数学期望是变化的, 且与空间位置相关)。为了处理这种情况, 泛克里金法将随机变量表示为漂移和残差 2 个部分。更一般的情况下, 还可以进一步分析二级变量对随机变量插值的影响。具有外部漂移的克里金法可以通过外部变量来影响随机变量的插值趋势。

从泛克里金法的角度来看, 具有外部漂移的克里金法将随机变量  $Z(\mathbf{x})$  的数学期望表示为外部变量 (二级变量)  $E(\mathbf{x})$  的非线性趋势函数。以二次外部趋势为例, 随机变量  $Z(\mathbf{x})$  的数学期望可以表示为

$$E[Z(\mathbf{x})] = d_0 + d_1 Ext(\mathbf{x}) + d_2 Ext^2(\mathbf{x}) \quad (1)$$

式中:  $d_0$ 、 $d_1$ 、 $d_2$  为外部变量未知系数;  $Ext(\mathbf{x})$  为外部变量函数;  $\mathbf{x}$  为地质空间中的任意点坐标。

值得注意的是, 具有外部漂移的泛克里金还应考虑内部漂移的影响。随机变量  $Z(\mathbf{x})$  的数学期望由内

部漂移和外部漂移的叠加趋势表示。

### 1.2 插值式推导

为了处理断层非连续性插值的问题, 在外部漂移理论的基础上推导并提出了一种融合外部漂移的 RBF 插值方法。该方法允许在空间插值的过程中构造外部变量来调整随机变量的插值趋势, 在地质建模时可以将断层势场看作一种外部漂移函数。

融合外部漂移的径向基插值函数  $s_{f,\mathbf{x}}(\mathbf{x})$  可以定义为

$$s_{f,\mathbf{x}}(\mathbf{x}) = \sum_{j=1}^N \lambda_j \Phi(\mathbf{x}, \mathbf{x}_j) + p(\mathbf{x}) + g(\mathbf{x}) \quad (2)$$

式中:  $\{\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \dots, \mathbf{x}_N\}$  为一组各不相同的插值点;  $N$  为插值点的个数;  $\{\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_N\}$  为待确定的权重系数;  $\Phi(\mathbf{x}, \mathbf{x}_j)$  为一种径向基核函数;  $p(\mathbf{x})$  为多项式部分;  $g(\mathbf{x})$  为外部漂移。

插值条件应满足

$$\sum_{j=1}^N \lambda_j \Phi(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j) + p(\mathbf{x}_i) + g(\mathbf{x}_i) = f_i, \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (3)$$

式中:  $f_i = f(\mathbf{x}_i)$  为插值点  $\mathbf{x}_i$  处的函数值。

多项式定义为

$$p(\mathbf{x}) = \sum_{l=0}^L c_l p_l(\mathbf{x}_i) \quad (4)$$

式中:  $c_l$  为多项式未知系数;  $p_l(\mathbf{x}_i)$  为单项式函数;  $L$  为多项式的项数。

外部漂移定义为

$$g(\mathbf{x}) = \sum_{k=0}^K d_k g_k(\mathbf{x}_i) \quad (5)$$

式中:  $d_k$  为外部漂移未知系数;  $g_k(\mathbf{x}_i)$  为外部漂移项函数;  $K$  为外部漂移的项数。

为了保证满足能量最小化条件, 多项式条件和外部漂移条件还应满足

$$\begin{cases} \mathbf{P}^T \boldsymbol{\lambda} = 0 \\ \mathbf{G}^T \boldsymbol{\lambda} = 0 \end{cases} \quad (6)$$

类似于融合外部漂移的对偶形式泛克里金插值矩阵, 通过推导可以得到融合外部漂移的径向基函数插值矩阵形式为

$$\begin{bmatrix} \mathbf{A} & \mathbf{P} & \mathbf{G} \\ \mathbf{P}^T & 0 & 0 \\ \mathbf{G}^T & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \boldsymbol{\lambda} \\ \mathbf{c} \\ \mathbf{d} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{f} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (7)$$

其中, 各矩阵块定义为

$$\begin{cases} \mathbf{A} = [\Phi(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j)] \\ \mathbf{P}^T = [p_l(\mathbf{x}_i)] \\ \mathbf{G}^T = [g_k(\mathbf{x}_i)] \\ \mathbf{c} = [c_l]^T \\ \mathbf{d} = [d_k]^T \\ \boldsymbol{\lambda} = [\lambda_i]^T \\ \mathbf{f} = [f_i]^T \end{cases} \quad (8)$$

矩阵块  $\mathbf{P}^T$  的具体表达式为

$$\mathbf{P}^T = \begin{bmatrix} p_0(\mathbf{x}_1) & p_0(\mathbf{x}_2) & \cdots & p_0(\mathbf{x}_N) \\ p_1(\mathbf{x}_1) & p_1(\mathbf{x}_2) & \cdots & p_1(\mathbf{x}_N) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ p_L(\mathbf{x}_1) & p_L(\mathbf{x}_2) & \cdots & p_L(\mathbf{x}_N) \end{bmatrix} \quad (9)$$

矩阵块  $\mathbf{G}^T$  的具体表达式为

$$\mathbf{G}^T = \begin{bmatrix} g_0(\mathbf{x}_1) & g_0(\mathbf{x}_2) & \cdots & g_0(\mathbf{x}_N) \\ g_1(\mathbf{x}_1) & g_1(\mathbf{x}_2) & \cdots & g_1(\mathbf{x}_N) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ g_K(\mathbf{x}_1) & g_K(\mathbf{x}_2) & \cdots & g_K(\mathbf{x}_N) \end{bmatrix} \quad (10)$$

### 1.3 方程求解分析

在融合外部漂移的情况下,需要进一步分析插值方法所构造线性方程求解的唯一性问题。根据理论推导,外部漂移插值线性方程一般要求任意断层两侧均至少存在一个采样数据点,否则可能导致径向基函数插值线性方程组无法计算唯一解的问题。

对于融合外部漂移的径向基插值函数

$$s_{f,x}(\mathbf{x}) = \sum_{j=1}^N \lambda_j \Phi(\mathbf{x}, \mathbf{x}_j) + p(\mathbf{x}) + g(\mathbf{x}) \quad (11)$$

在不存在外部漂移的情况下,假设  $\Phi$  是  $m$  阶条件正定核,根据径向基函数条件正定核理论,插值方程可唯一解的前提是采样数据集  $\mathbf{X} = \{\mathbf{x}_i\}$  相对于  $m-1$  阶多项式空间  $\pi_{m-1}(\mathbb{R}^d)$  是可唯一解的。即采样数据集  $\mathbf{X}$  中存在一个子集  $\Xi = \{\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_{L+1}\}$ , 使得如下多项式方阵可逆:

$$\mathbf{P}_{\Xi} = \begin{bmatrix} p_0(\xi_1) & p_0(\xi_2) & \cdots & p_0(\xi_{L+1}) \\ p_1(\xi_1) & p_1(\xi_2) & \cdots & p_1(\xi_{L+1}) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ p_L(\xi_1) & p_L(\xi_2) & \cdots & p_L(\xi_{L+1}) \end{bmatrix} \quad (12)$$

在存在外部漂移的情况下,插值方程可唯一解的前提是采样数据集  $\mathbf{X} = \{\mathbf{x}_i\}$  相对于多项式空间和外部变量所构成的函数空间是可唯一解的。对于融合断层势场的径向基函数插值方法,插值方程可唯一解的前提是采样数据集  $\mathbf{X}$  中存在一个子集  $\Xi = \{\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_{L+K+2}\}$ , 使得以下方阵可逆:

$$\mathbf{G}_{\Xi} = \begin{bmatrix} p_0(\xi_1) & p_0(\xi_2) & \cdots & p_0(\xi_{L+K+2}) \\ p_1(\xi_1) & p_1(\xi_2) & \cdots & p_1(\xi_{L+K+2}) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ p_L(\xi_1) & p_L(\xi_2) & \cdots & p_L(\xi_{L+K+2}) \\ g_0(\xi_1) & g_0(\xi_2) & \cdots & g_1(\xi_{L+K+2}) \\ g_1(\xi_1) & g_1(\xi_2) & \cdots & g_1(\xi_{L+K+2}) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ g_K(\xi_1) & g_K(\xi_2) & \cdots & g_L(\xi_{L+K+2}) \end{bmatrix} \quad (13)$$

为确保方阵  $\mathbf{G}_{\Xi}$  可逆,对于每个由断层势场表示的外部漂移函数,首先必须确保任意行向量  $\mathbf{g}_k = (g_k(\xi_1), g_k(\xi_2), \dots, g_k(\xi_{L+K+2}))$  是非平凡的。2 组向量线性无关的条件等价于这 2 组向量只有系数均为零的线性组合才构成零向量。

对于任意 2 个断层,如果子集  $\Xi$  中均至少存在 2 个分别位于断层两侧的点,其中一个点位于相应断层势场的非零值位置且相对于各个断层不为同一个点,则可以保证代表任意 2 个断层势场的非零向量  $\mathbf{g}_{k_1}$  和  $\mathbf{g}_{k_2}$  是线性无关的。

## 2 复杂断层势场隐式建模方法

### 2.1 断层隐式曲面定义

可以通过构造断层势场来表示断层构造运动特征及断层影响趋势。从二维投影平面的视角来看,断层面相对于某个地层或煤层面表现为 2 条断层交线及其组合的断层闭合区域(断层闭合多边形)。为了确保断层插值地质规律,断层交线的构造应满足断层构造运动特征。

在高程投影平面上,断层曲面与任意地层面的交面可以采用断层闭合多边形来表示,如图 1 所示。断层闭合多边形将地层面分离为 2 部分区域。断层闭合多边形内部区域几何模型采用实际断层面隐式函数来表示,不参与插值计算;断层闭合多边形外部区域几何模型采用融合断层的地层面隐式函数来插值计算。

断层闭合多边形可以分离为 2 条多段线,其中一条多段线表示断层某一侧与地层面的交线,另一条多段线表示断层另一侧与地层面的交线。

采用有符号距离场函数表示包括有限断层和无限断层在内的所有断层类型。不失一般性地,可以约定表示断层的断层闭合多边形为  $P_L$ , 断层的 2 条多段线为左侧断层线  $L_l$  和右侧断层线  $L_r$ ,  $L_l$  的左侧区域代表断层上盘(函数值为负),  $L_r$  的右侧区域代表断层下盘(函数值为正)。在高程投影平面上,有符号距离场函数  $g(x)$  与断层曲面  $S$  之间的关系可以表示为

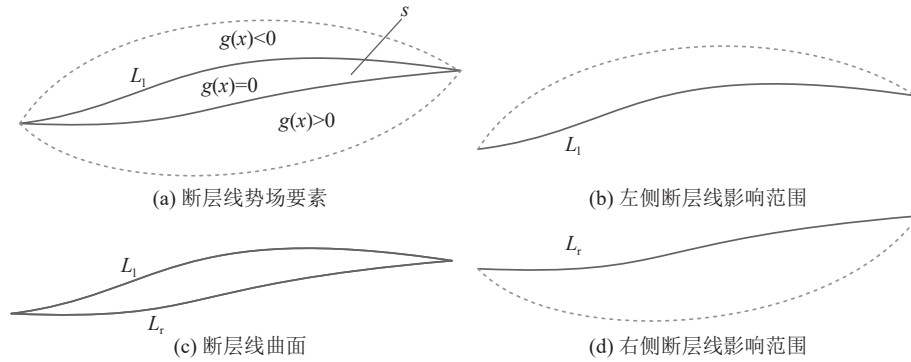


图 1 断层曲面势场示意图

Fig.1 Schematic diagram of fault surface field

$$g(\mathbf{x}) = \begin{cases} = 0, & \mathbf{x} \text{ 位于断层闭合多边形内} \\ > 0, & \mathbf{x} \text{ 位于 } L_r \text{ 的右侧区域} \\ < 0, & \mathbf{x} \text{ 位于 } L_l \text{ 的左侧区域} \end{cases} \quad (14)$$

式中:  $\mathbf{x} = (x, y)$  为高程投影平面上的二维坐标。

2.2 断层势场趋势函数

为实现断层两侧的不同插值趋势, 断层势场应定义正反侧边界范围及影响方式。根据断层影响的变化趋势特征, 可以采用阶跃趋势函数表示无限断层, 采用光滑趋势函数表示有限断层<sup>[11]</sup>。断层势场应特别关注考虑断层面的屏蔽作用, 以构造断层两侧地层的错动趋势。

2.2.1 阶跃趋势函数

从垂直于断层走向方向的横断面来看, 对于无限断层, 可以采用阶跃趋势函数  $g_{T,inf}(\mathbf{x})$  来表示断层两侧断盘的台阶状影响趋势。假设  $\mathbf{x}$  位于断层影响范围之内, 则  $g_{T,inf}(\mathbf{x})$  定义为

$$g_{T,inf}(\mathbf{x}) = \begin{cases} 1, & g(\mathbf{x}) > 0 \\ 0, & g(\mathbf{x}) < 0 \end{cases} \quad (15)$$

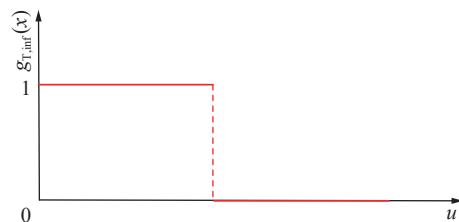
从沿着断层走向方向的纵断面来看, 对于无限断层, 可以采用简单的常量函数  $g_{L,inf}(\mathbf{x})$  来表示纵断面方向不变的断层影响趋势。假设  $\mathbf{x}$  位于断层影响范围之内, 则  $g_{L,inf}(\mathbf{x})$  定义为

$$g_{L,inf}(\mathbf{x}) = 1 \quad (16)$$

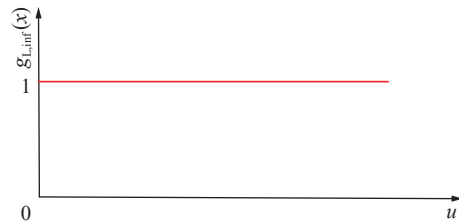
无限断层横断面和纵断面的影响趋势如图 2 所示。横断面上, 断层一侧外部漂移函数值为 1, 断层另一侧外部漂移函数值为 0; 纵断面上, 断层外部漂移函数值恒为 1(表示在一定区域范围内近似无限的影响趋势)。

2.2.2 光滑趋势函数

从垂直于断层走向方向的横断面来看, 对于有限断层, 可以采用分段光滑趋势函数  $g_{T,fin}(\mathbf{x})$  来表示断层两侧断盘分段光滑变化的影响趋势。假设  $\mathbf{x}$  位于断层影响范围之内, 则  $g_{T,fin}(\mathbf{x})$  定义为



(a) 横断面



(b) 纵断面

图 2 无限断层势场趋势

Fig.2 Field trend of infinite fault

$$g_{T,fin}(\mathbf{x}) = \begin{cases} P(-u), & u \in [-1, 0]; g(\mathbf{x}) > 0 \\ -P(u), & u \in [0, 1]; g(\mathbf{x}) < 0 \end{cases} \quad (17)$$

式中:  $P(u)$  为断层光滑趋势函数, 满足  $P(0) = 0, P(1) = 1; u$  为单位化断层横向影响半径  $r_T$  后的断层影响参数(有向), 在断层影响范围内满足  $-1 \leq u \leq 1$ 。

从沿着断层走向方向的纵断面来看, 对于有限断层, 可以采用连续光滑趋势函数  $g_{L,fin}(\mathbf{x})$  来表示纵断面方向光滑变化的影响趋势。假设  $\mathbf{x}$  位于断层影响范围之内, 则  $g_{L,fin}(\mathbf{x})$  定义如下

$$g_{L,fin}(\mathbf{x}) = P(u), u \in [0, 1] \quad (18)$$

有限断层横断面和纵断面的影响趋势如图 3 所示。横断面上, 断层一层外部漂移函数值从 +1 逐渐减小为 0, 断层另一侧外部漂移函数值从 -1 逐渐减小为 0; 纵断面上, 断层中心区域外部漂移函数值从 1 逐渐趋于 0(表示断层影响逐渐趋于 0)。

2.3 断层势场影响范围

为了光滑地表示不同位置断层势场影响大小, 可以采用 Hermite 样条曲线插值方法构造有限断层的光

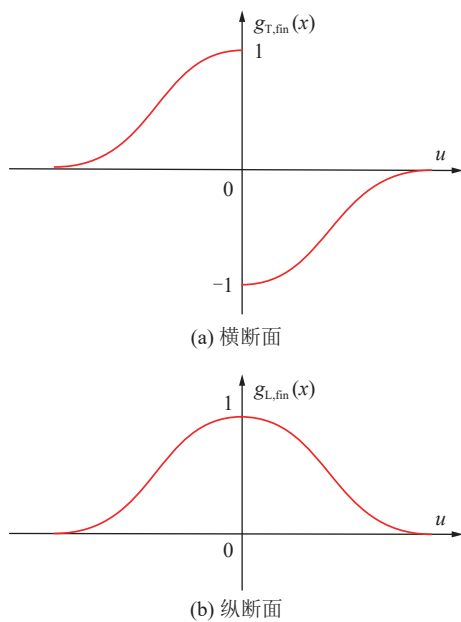


图3 有限断层势场趋势  
Fig.3 Field trend of finite fault

滑趋势函数 $P(u)$ 。Hermite 样条插值是一种三次样条曲线插值方法,通过调整 Hermite 样条边界条件(如端点处导数值)或增加中间控制点,可以得到融合断层的不同插值趋势。

对于有限断层,三维断层面各项异性的断层影响范围在高程投影平面上可以采用椭圆形表示。如图4所示,2条断层线分别构造2个不同的半椭圆表示断层上盘和断层下盘影响范围。其中,椭圆主轴沿断层走向布置,主轴长度等于断层线沿断层走向方向的投影长度;而椭圆短轴沿垂直于断层走向方向布置,短轴长度可以根据实际需要调整。椭圆中心定义为断层影响中心,用于表示断层初始断裂位置。椭圆中心一般选定为断层线沿断层走向方向的中心位置或断层线起始/末尾位置。不失一般性地,可以约定被截断断层的椭圆中心为断层线起始位置,其余断层的椭圆

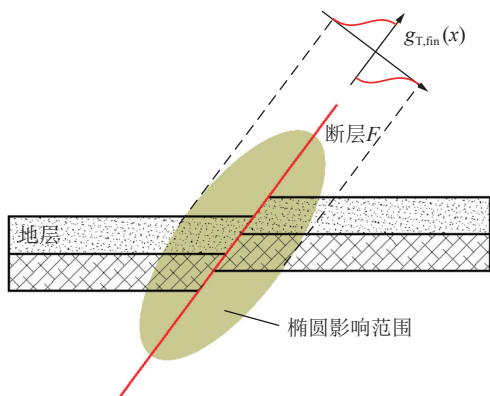


图4 有限断层椭圆影响范围示意  
Fig.4 Schematic diagram of ellipse influence range of finite fault

中心为断层线沿断层走向方向的中心位置。

值得注意的是,在构造断层势场和断层影响范围时应注意断层影响范围边界位置的平滑过渡关系,否则插值得到的隐式模型可能在非断层面位置产生非期望的断层落差。总体来看,由于断层面断裂的影响,2条断层线应实现分区插值的效果,以便实现断层面两侧地层面的非连续性插值效果;而断层影响边界位置则应实现平滑过渡,以保持断层影响区域内的平滑变化趋势。

## 2.4 断层网络势场建模

融合复杂断层网络的地质体建模方法更为复杂,以无限断层为例,被断层面切割的各个断层块可能由多个截断或交叉关系的断层面组合而成。当断层数量较多且断层之间相互截断或交叉时,断层分区的思路将变得异常困难。断层网络建模需要在考虑断层与地质体相互作用关系的基础上,进一步考虑断层与断层之间的相互作用关系。

### 2.4.1 断层网络拓扑

断层网络关系分为断层之间的运动顺序关系(断层构造运动的地质年代)和断层之间的截断交叉关系(断层构造运动的断裂关系)。断层分区插值方法要求确定断层之间的截断交叉关系,而融合断层势场插值方法和融合断层运动插值方法则还要求确定断层之间的运动顺序关系。

交叉断层不必考虑断层间的网络拓扑关系,因为断层交叉区域势场优先级可以根据断层之间的运动顺序关系直接确定。而截断断层必须考虑断层间的网络拓扑关系,以便确定被截断断层的延伸范围,因为被截断断层的边界需要由截断断层来确定。

可以通过断层网络来定义所有断层之间的截断关系<sup>[11]</sup>。如图5所示,对于任意一组断层 $F_k, 1 \leq k \leq n$ ,可以采用行列关系来描述断层与断层之间的拓扑关系( $F_{(i',j)}, 1 \leq i', j' \leq n$ )。当断层 $F_i$ 终止于断层 $F_j$ 时, $F_{(i',j)} = 1$ ;否则, $F_{(i',j)} = 0$ 。

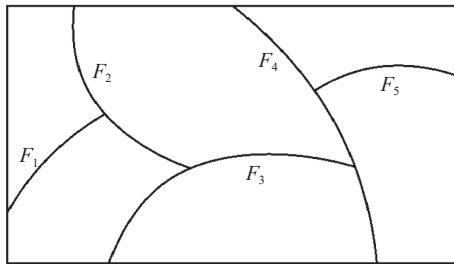
为了更清晰地表示断层网络之间的拓扑关系,一般采用网络图来表示用户描述的断层间截断关系。如图6所示,从图论的角度来看,断层之间相互截断的关系可以形成一个有向图。有向图的节点集合由所有断层 $F_k, 1 \leq k \leq n$ 组成;有向图的分支集合由所有满足 $F_{(i',j)} = 1, 1 \leq i', j' \leq n$ 的约束关系组成,且分支方向由断层节点 $F_j$ 指向断层节点 $F_i$ 。该有向图可以是连通图或非连通图。

### 2.4.2 断层势场组合

对于具有复杂断层网络的地质模型,应分析断层

断层B \ 断层A	$F_1$	$F_2$	$F_3$	$F_4$	$F_5$
$F_1$		×			
$F_2$			×		
$F_3$				×	
$F_4$					
$F_5$					

(a) 断层A是否截断于断层B



(b) 断层网络关系示意

图 5 断层网络截断关系

Fig.5 Truncation relationship of a fault network

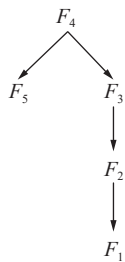


图 6 有向图表示的断层网络

Fig.6 Fault network represented by directed graph

之间的截断交叉关系, 以便确定断层势场组合关系。对于相互交叉的断层, 由于断层势场之间相互独立, 可以直接根据断层地质年代关系对所有交叉断层整体建模而不需要对断层势场进行特殊处理。然而对于相互截断的断层, 被截断断层的断层势场将受到截断断层的约束, 因此需要重新定义被截断断层的隐式曲面和断层势场。

断层势场组合的基本规则为将断层影响范围之外的外部漂移值设置为 0。如图 7 所示, 当被截断断层的影响范围跨越截断断层时, 其断层影响范围应被

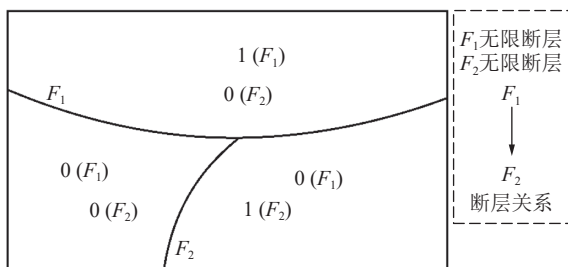


图 7 组合断层势场分布

Fig.7 Distribution of combined fault potential fields

相应裁减; 在断层影响范围之外的外部漂移值也设置为 0。值得注意的是, 以上断层势场组合过程应根据断层网络拓扑关系递归地进行处理。

当断层网络图中存在单向回路 (闭环) 时, 势场组合的递归处理过程将形成一种无限循环的异常问题。然而, 实际断层构造运动的截断关系通常表现为有向无环图。为了避免这种问题, 可以采用有向图闭环检查方法来判断断层网络拓扑关系是否满足要求。

### 3 煤层地质体隐式建模方法

#### 3.1 隐式建模基本流程

在给定煤层地质建模原始数据 (包括地质钻孔数据和断层线数据) 并指定地层和断层关系的基础上, 该方法可以对无限断层、有限断层及其组合类型的断层网络进行自动整体建模。图 8 展示了融合断层的煤层地质体隐式建模方法的总体流程。

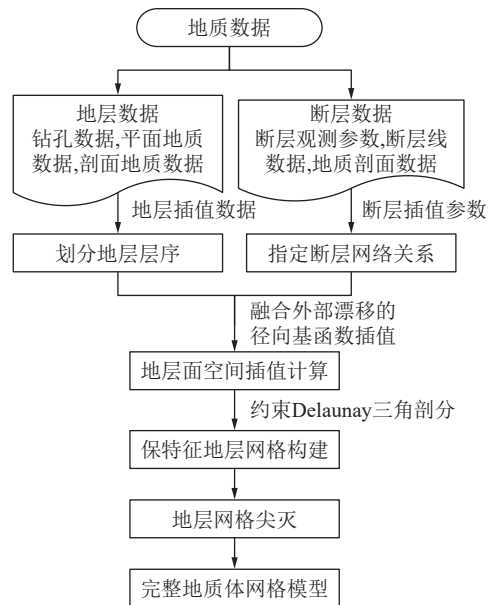


图 8 煤层地质体隐式建模流程

Fig.8 Implicit modeling process of coal seam geological bodies

该方法主要步骤包括: ① 划分地层层序, 确定各个地层面的边界点及对应断层线数据, 用于空间插值计算; ② 指定断层网络关系, 确定各个断层的类型、断层中心及断层影响半径, 用于定义断层线曲面、构造断层线势场和断层网络; ③ 空间插值计算, 采用融合外部漂移的径向基函数插值方法对各个地层面 (包括煤层面) 进行空间插值, 得到表征各个地层面的隐式函数; ④ 断层线精确插值。采用 CDT 方法构造含断层线约束的初始规则网格并估计各个顶点高程, 得到具有高程信息的各地层网格; ⑤ 煤层顶底板三角不规则网络 (TIN) 模型拼接。通过广义三棱柱 (GTP) 单

元对各个地层面网格进行尖灭后生成完整地质体网格模型。

### 3.2 精确空间插值方法

为了实现断层线的精确插值,还需要同时从隐式函数保持特征插值和隐式曲面保持特征重构 2 个方面来处理传统隐式建模方法存在的平滑插值问题。

#### 3.2.1 保持特征空间插值

在空间插值方面,采用断层面隐式插值和加密断层线融合插值的方法来实现隐式函数保持特征插值。由于断层线必然位于断层面上,断层线高程可直接由表征断层面的隐式函数来精确插值。为了使地层面的插值趋势在断层线附近区域基本保持一致,还应使 2 条断层线分别参与断层两侧的地层趋势插值,并将断层线上离散化加密采样后的点作为约束条件加入隐式函数插值方程中。

加密断层线采样点,可以使插值得到的隐式曲面在一定精度范围内最大限度地与断层线趋势保持一致。而如果只将断层线控制点参与空间插值,当断层线控制点较为稀疏时,插值得到的隐式曲面可能在断层线附近位置出现凹陷等异常问题。在以上保持特征插值的前提下,加密断层线上的所有采样点是满足精确插值条件的。曲面重构时,断层线上相邻采样点之间的连线特征则采用保持特征重构方法来实现。

#### 3.2.2 保持特征曲面重构

在曲面重构方面,采用增量式的 CDT 方法来实现隐式曲面保持特征重构。在由原始规则四边形网格三角化为三角网格的基础上,将所有断层线作为线约束重新构建三角网格。利用约束 Delaunay 三角网格替换原始规则三角网格对地质界面进行曲面重构。断层界面与地层界面是否合并可以根据实际建模需要来确定。

在三角网格顶点估计的过程中,约束 Delaunay 三角网格将被划分为 2 种类型:断层闭合多边形外部区域和断层闭合多边形内部区域。其中,断层闭合多边形内部区域(包括断层线)网格顶点高程根据断层面隐式函数计算得到;而断层闭合多边形外部区域(不包括断层线)网格顶点高程根据融合断层势场的地层面隐式函数插值计算得到。对于含截断或交叉关系的断层网络,断层闭合多边形重叠区域网格顶点高程则应根据断层地质年代关系确定的占优断层面隐式函数计算得到。

## 4 煤层建模实例分析

为了对真实矿山的煤层建模实例进行分析,采用 C++ 编程语言实现了融合外部漂移的 RBF 插值算法,

实现了融合复杂断层的煤层地质建模算法,并在三维可视化平台上开发了面向煤炭地质保障系统的三维煤层地质体模型自动建模系统。

为了测试不同断层网络约束下的建模效果,构造了多个建模实例来验证融合断层势场的煤层地质体隐式建模方法的可靠性。建模实例中,未考虑断层约束建模实例采用的是传统 RBF 插值方法,融合断层约束建模实例采用的是改进的 RBF 插值方法。

图 9、图 10 对比了简单断层网络中不同断层势场趋势函数的建模效果。其中,图 9 通过构造阶跃趋势函数比较了简单交叉断层网络融合断层约束前后的建模效果;图 10 通过构造光滑趋势函数比较了简单截断断层网络融合断层约束前后的建模效果。建模实例展示了所提方法可以很好地自动处理断层网络间不同断盘区域的不连续性插值和光滑插值问题。

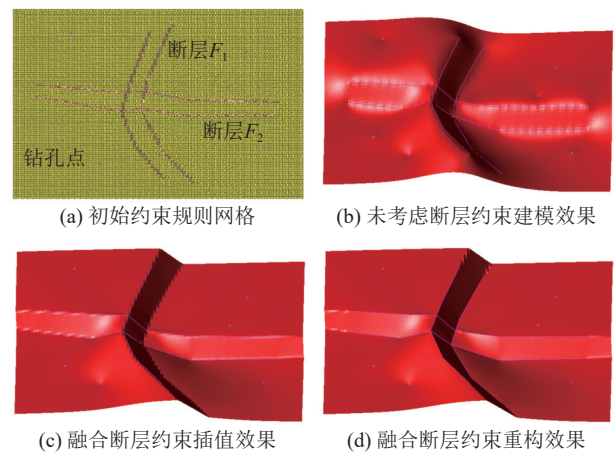


图 9 简单交叉断层网络建模实例

Fig.9 Modeling example of a simple cross fault network

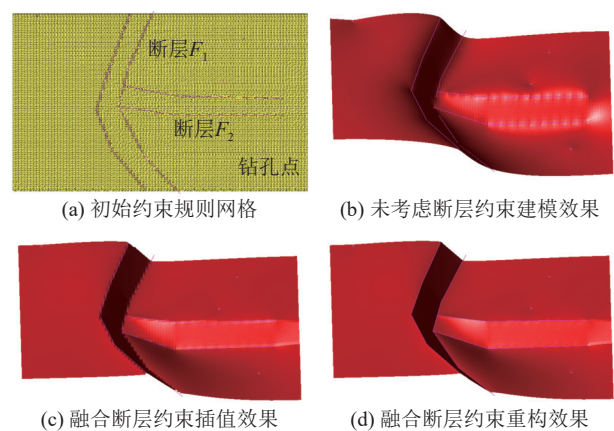


图 10 简单截断断层网络建模实例

Fig.10 Modeling example of a simple truncated fault network

图 11 对比某煤矿复杂断层网络融合断层约束前后的建模效果。每个地层面(包括煤层面)都通过对应分层的钻孔边界点和断层线数据插值得到。为了

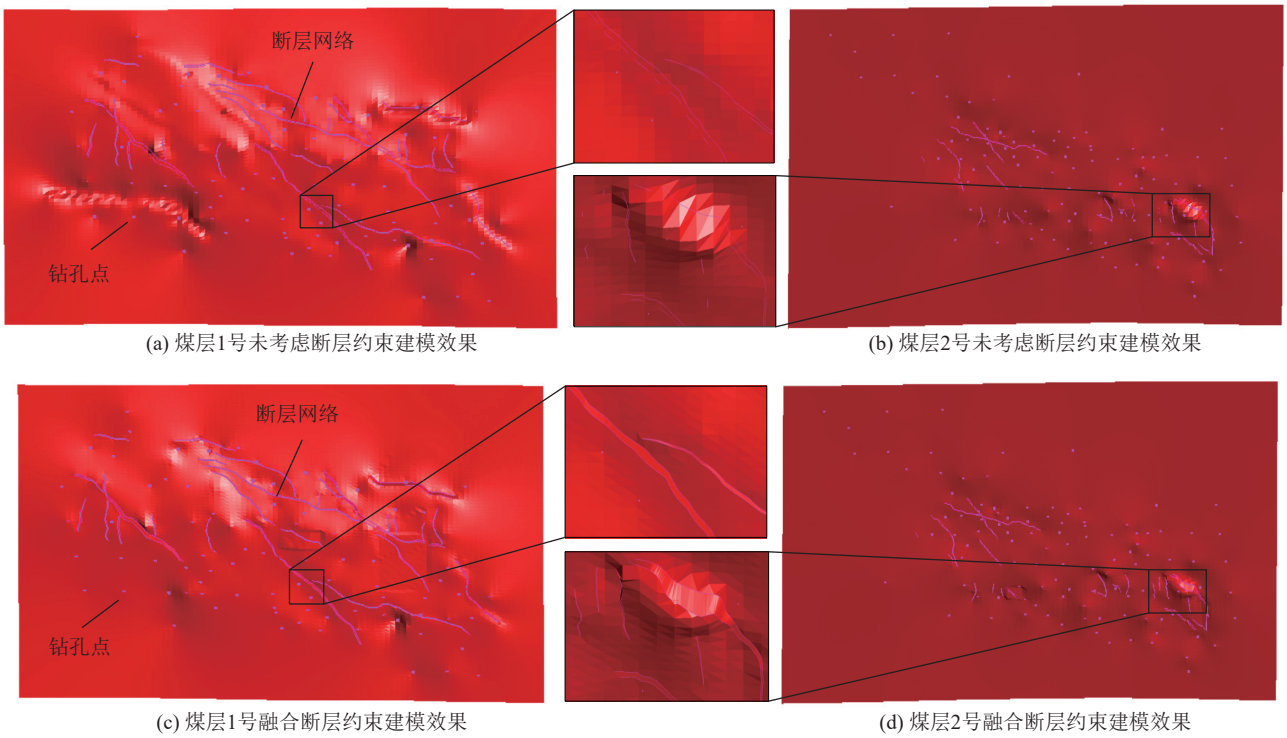


图 11 某煤矿复杂断层网络建模实例

Fig.11 Modeling example of complex fault network in a coal mine

精确控制断层面两侧煤层的断距, 将断层线上的离散采样点作为附加约束条件添加到融合断层的地层面空间插值中, 以提高煤层模型建模的精度。

为了进一步测试融合断层势场的煤层地质体建模方法的建模效果, 以多个矿山真实数据集为基础来融合复杂交叉断层的煤层地质体隐式建模方法的可

靠性。图 12 展示了一个较为复杂的断层网络建模实例, 图 12b 为煤层插值的势场分布情况, 图 12d 为煤层插值后曲面重构的三角网格。图 13 进一步展示了一个较为复杂的断层网络建模实例, 图 13b 展示了煤层插值的势场分布情况, 图 13d 展示了多个相互关联的复杂断层网络局部建模效果。

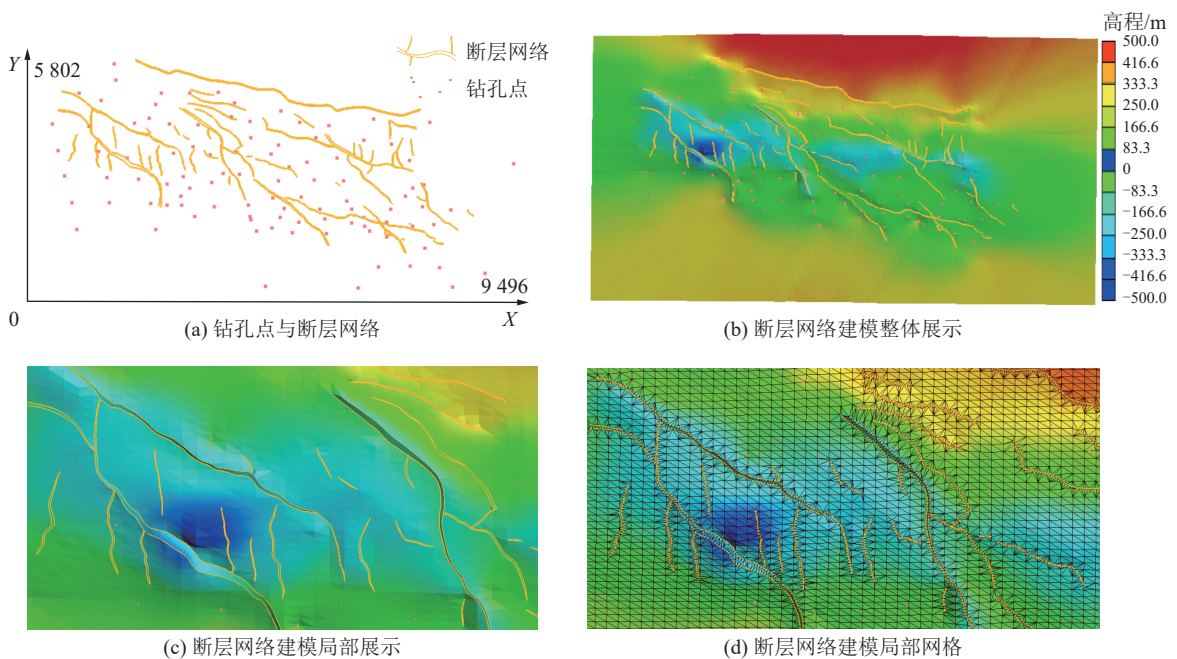


图 12 某煤矿复杂断层网络建模实例

Fig.12 Modeling example of complex fault network in a coal mine

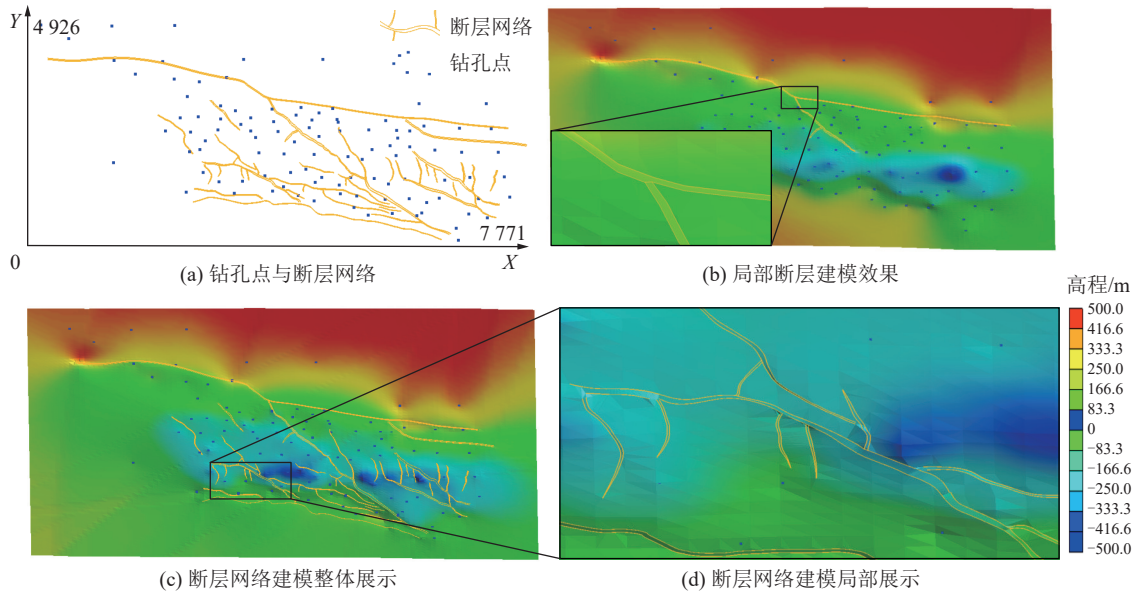


图 13 某煤矿复杂断层网络建模实例

Fig.13 Modeling example of complex fault network in a coal mine

断层影响参数与有限断层势场的椭圆分布相关,通过设置不同的断层影响参数可以调整断层周围模型趋势,实现断层与煤层之间不同光滑过渡趋势的插值。通过设置有限断层势场不同的椭圆影响半径。图 14 展示了不同断层势场影响范围的插值效果。

表 1、表 2 进一步对比了改进隐式建模方法的建模参数和计算效率。其中,表 1 展示了所有煤层建模

实例数值实验的参数统计。去重精度为插值约束间的最小几何间距,可以直接定义为 0.001。断层影响参数  $\varepsilon$  为断层影响直径与断层线走向长度的比值,用于定义断层势场影响范围。 $\varepsilon$  值大小与断层相关,用户可以根据不同断层影响方式调整该参数。表 2 展示了所有煤层建模实例数值实验的结果统计。 $T_1$  为不考虑断层势场影响时插值方程的求解时间, $T_2$  为考

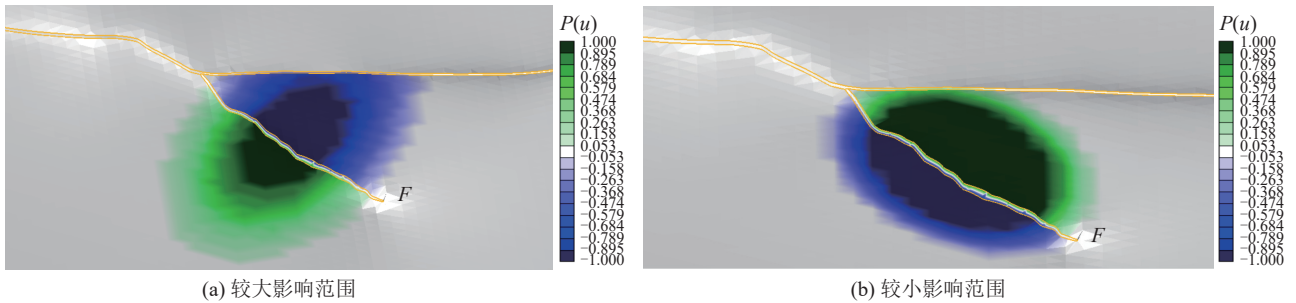


图 14 不同断层势场影响范围效果对比

Fig.14 Comparison of the effects of different fault potential field influence ranges

表 1 断层建模类型及建模参数统计

Table 1 Parameter statistics of fault modeling types and modeling

实例	断层类型	断层线数	区域大小/m <sup>2</sup>	去重精度/m	断层影响 $\varepsilon$
图9	简单交叉型	4	30×19	0.001	3.0
图10	简单截断型	4	25×19	0.001	3.0
图11 1号煤层	复杂网络型	44	9 147×5 725	0.001	0.5~3.0
图11 2号煤层	复杂网络型	54	6 891×4 396	0.001	0.5~3.0
图12	复杂网络型	106	9 496×5 802	0.001	0.5~3.0
图13	复杂网络型	76	7 771×4 926	0.001	0.5~3.0

表 2 断层建模数值实验结果统计

Table 2 Result statistics of fault modeling numerical experimental results

实例	钻孔点	网格大小	插值点	径向基核函数类型	求解时间	
					$T_1$ /s	$T_2$ /s
图9	6	100×100	385	三次样条	0.03	0.04
图10	4	100×100	357	三次样条	0.03	0.03
图11 1号煤层	106	100×100	2 742	三次样条	2.42	2.54
图11 2号煤层	94	100×100	1 573	三次样条	0.55	0.64
图12	100	100×100	3 912	三次样条	5.94	6.53
图13	104	100×100	8 354	三次样条	49.85	52.09

虑断层势场影响时插值方程的求解时间。插值算法采用的径向基核函数类型均为三次样条, 插值方程求解时间与插值点个数相关。在相同条件下,  $T_1$  与  $T_2$  时间差异较小, 表明改进的径向基函数外部漂移计算过程对插值方程的求解效率影响较小。

## 5 结 论

1) 为有效解决传统空间插值理论难以处理复杂断层网络地质建模中的非光滑插值及非连续插值的问题, 提出了一种融合断层势场的复杂煤层地质体建模方法。该方法可以对具有大量不同类型交叉断层网络的复杂煤层地质体进行高效自动建模, 并满足断层运动特征和断层影响范围等地质规则约束, 这对煤层地质精准建模具有重要应用价值。

2) 以非平稳地质统计理论为基础, 推导了融合外部漂移的径向基函数插值式, 提出了融合断层势场的径向基函数插值理论与方法, 分析了插值方程求解唯一性的数学条件。多个真实矿山建模实例验证了所提出空间插值方法的可靠性, 建模结果可以较好地恢复断层地质构造运动规律。通过修改断层影响范围参数, 可以灵活地调整断层对地质体的影响方式。

3) 数值试验实例表明, 相比于传统的径向基函数插值方法, 在计算结果可靠性方面, 融合外部漂移的径向基函数插值方法可以生成更加符合断层构造运动规律的地质模型; 在插值计算效率方面, 尽管引入外部漂移项在一定程度上增加量额外的计算量, 但在相同条件下改进的径向基函数外部漂移计算过程对插值方程的求解效率影响较小, 计算性能差异控制在 10%~20%。

4) 通过对比多个真实矿山复杂断层网络建模实例, 验证了融合复杂交叉断层的煤层地质体隐式建模方法的可靠性。该方法可以用于自动高效处理具有大量复杂交叉断层网络的煤层建模问题, 对于透明地质系统进行精准建模具有重要的实际应用价值, 为煤炭资源的勘探、开发与安全生产提供关键的技术支撑。

## 参考文献(References):

- [1] 王双明, 孙强, 乔军伟, 等. 论煤炭绿色开采的地质保障[J]. 煤炭学报, 2020, 45(1): 8-15.  
WANG Shuangming, SUN Qiang, QIAO Junwei, et al. Geological guarantee of coal green mining[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(1): 8-15.
- [2] XUE Y, SUN M, MA A N. On the reconstruction of three-dimensional complex geological objects using Delaunay triangulation[J]. *Future Generation Computer Systems*, 2004, 20(7): 1227-1234.
- [3] WU Z H, BI L, ZHONG D Y, et al. Orebody modeling method based on the coons surface interpolation[J]. *Minerals*, 2022, 12(8): 997.
- [4] HILLIER M J, SCHETSELAAR E M, DE KEMP E A, et al. Three-dimensional modelling of geological surfaces using generalized interpolation with radial basis functions[J]. *Mathematical Geosciences*, 2014, 46(8): 931-953.
- [5] IRAKARAMA M, LAURENT G, RENAUDEAU J, et al. Finite difference implicit structural modeling of geological structures[J]. *Mathematical Geosciences*, 2021, 53(5): 785-808.
- [6] GROSE L, LAURENT G, AILLÈRES L, et al. Structural data constraints for implicit modeling of folds[J]. *Journal of Structural Geology*, 2017, 104: 80-92.
- [7] GONÇALVES Í G, KUMAIRA S, GUADAGNIN F. A machine learning approach to the potential-field method for implicit modeling of geological structures[J]. *Computers & Geosciences*, 2017, 103: 173-182.
- [8] YANG Z X, CHEN Q Y, CUI Z S, et al. Automatic reconstruction method of 3D geological models based on deep convolutional generative adversarial networks[J]. *Computational Geosciences*, 2022, 26(5): 1135-1150.
- [9] 郭甲腾, 吴立新, 周文辉. 基于径向基函数曲面的矿体隐式自动三维建模方法[J]. 煤炭学报, 2016, 41(8): 2130-2135.  
GUO Jiateng, WU Lixin, ZHOU Wenhui. Automatic ore body implicit 3D modeling based on radial basis function surface[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(8): 2130-2135.
- [10] JIA Q R, LI W W, CHE D F. A triangulated irregular network constrained ordinary Kriging method for three-dimensional modeling of faulted geological surfaces[J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 85179-85189.
- [11] CALCAGNO P, CHILÈS J P, COURRIOUX G, et al. Geological modelling from field data and geological knowledge Part I. Modelling method coupling 3D potential-field interpolation and geological rules[J]. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 2008, 171(1-4): 147-157.
- [12] XU H Y, BARBIĆ J, XU H Y, et al. Signed distance fields for polygon soup meshes[C]//Proceedings of Graphics Interface 2014. New York: ACM, 2014: 35-41.
- [13] DEUTSCH C V, WILDE B J. Modeling multiple coal seams using signed distance functions and global Kriging[J]. *International Journal of Coal Geology*, 2013, 112: 87-93.
- [14] AUG C, CHILÈS J P, COURRIOUX G, et al. 3D geological modelling and uncertainty: The potential-field method[M]. Geostatistics Banff 2004. Dordrecht: Springer Netherlands, 2005: 145-154.
- [15] LAJAUNIE C, COURRIOUX G, MANUEL L. Foliation fields and 3D cartography in geology: Principles of a method based on potential interpolation[J]. *Mathematical Geology*, 1997, 29(4): 571-584.
- [16] GROSE L, AILLÈRES L, LAURENT G, et al. Modelling of faults in LoopStructural 1.0[J]. *Geoscientific Model Development*, 2021, 14(10): 6197-6213.
- [17] KRAJNOVICH A, ZHOU W, GUTIERREZ M. Uncertainty assessment for 3D geologic modeling of fault zones based on geologic in-

- puts and prior knowledge[J]. *Solid Earth*, 2020, 11(4): 1457–1474.
- [18] ZHONG D Y, WANG L G, BI L, et al. Implicit modeling of complex orebody with constraints of geological rules[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2019, 29(11): 2392–2399.
- [19] LAURENT G, AILLERES L, GROSE L, et al. Implicit modeling of folds and overprinting deformation[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2016, 456: 26–38.
- [20] GODEFROY G, CAUMON G, FORD M, et al. A parametric fault displacement model to introduce kinematic control into modeling faults from sparse data[J]. *Interpretation*, 2018, 6(2): B1–B13.
- [21] LAURENT G, CAUMON G, BOUZIAT A, et al. A parametric method to model 3D displacements around faults with volumetric vector fields[J]. *Tectonophysics*, 2013, 590: 83–93.
- [22] 邹艳红, 李高智, 毛先成, 等. 基于隐函数曲面的三维断层网络建模与不确定性分析[J]. *地质论评*, 2020, 66(5): 1349–1360.
- ZOU Yanhong, LI Gaozhi, MAO Xiancheng, et al. Three-dimensional fault-network modeling and uncertainty analysis based on implicit function surface[J]. *Geological Review*, 2020, 66(5): 1349–1360.
- [23] MARECHAL A. Kriging seismic data in presence of faults[M]. *Geostatistics for natural resources characterization*. Dordrecht: Springer Netherlands, 1984: 271–294.
- [24] HENGL T, HEUVELINK G B, STEIN A. Comparison of kriging with external drift and regression kriging[R]. Ensched: ITC, 2003.
- [25] SLOAN S W. A fast algorithm for generating constrained delaunay triangulations[J]. *Computers & Structures*, 1993, 47(3): 441–450.
- [26] FONG W, DARVE E. The black-box fast multipole method[J]. *Journal of Computational Physics*, 2009, 228(23): 8712–8725.
- [27] BEATSON R K, LIGHT W A, BILLINGS S. Fast solution of the radial basis function interpolation equations: Domain decomposition methods[J]. *SIAM Journal on Scientific Computing*, 2001, 22(5): 1717–1740.