

基于边界约束的空间复杂曲面重构算法^{*}

聂小燕¹, 鲁才², 陈凯云²

(1. 电子科技大学成都学院 电子信息工程系, 成都 611731; 2. 电子科技大学 通信与信息工程学院, 成都 611731)

摘要: 针对克里金(Kriging)算法在复杂地质构造应用中的局限性,提出了一种基于边界约束的复杂曲面插值方法。其基本思想是将断层多边形作为层面边界的约束条件,根据种子点与待插值点穿越多边形的关系为依据,判断待插值点与控制点之间的空间拓扑关系,并将满足条件的种子点利用克里金算法进行插值计算。通过实际数据的测试,解决了传统的网格化插值方案层位与断层无法严格相交以及多重逆掩断层构造的层面拟合等难题,为等值线绘制、地质块状模型构建等提供了新的思路。

关键词: 克里金; 层面重构; 断层多边形

中图分类号: TP391.41

文献标志码: A

文章编号: 1001-3695(2013)02-0588-03

doi:10.3969/j.issn.1001-3695.2013.02.075

Reconstruction algorithm of spatial complexity of surface based on constraints of boundary

NIE Xiao-yan¹, LU Cai², CHEN Kai-yun²

(1. Dept. of Electronic & Information Engineering, Chengdu College of University of Electronic Science & Technology of China, Chengdu 611731, China; 2. College of Communication & Information Engineering, University of Electronic Science & Technology of China, Chengdu 611731, China)

Abstract: According to the limitation of the Kriging algorithm, this paper proposed a new complex surface interpolation algorithm based on the boundary constraints of space. The basic idea was the fault polygon as the boundary constraints of the horizon, and according to the seed points and the relationship between the interpolation points across the polygon to determine the spatial topological relations between the interpolation points and control points, and would meet the conditions of the seed point be interpolated using the Kriging algorithm. Through the test of actual data to solve the problem of the traditional grid interpolation scheme layer and the fault can not be strictly intersect, as well as the horizon of the multi-level inverse fault structure. This paper provided a new way of contour mapping, geological block model.

Key words: Kriging; reconstruction of geological horizon; fault polygon

空间曲面重构在地质建模、计算机图形学、气象和勘探等各类科学研究和工程设计中有着广泛应用。由于曲面的不规则性以及散乱数据的无明确规律和有序性,很难用单一的数学形式把曲面表达出来,因此一般用插值的方法来重构曲面。空间曲面插值运用计算机技术进行曲面重构,从而近似还原出真实曲面,其本质是利用三维离散点拟合成曲面的问题。

在地质勘探领域,目前常用的空间曲面插值方法有最近邻点法^[1]、距离反比加权法以及克里金(Kriging)算法^[2]等。以上插值方法都局限于解决二维平面的层面拟合,并不能解决三维空间的层面拟合问题。对于三维空间层面拟合,需要将三维空间问题转换为二维空间问题,再利用以上的插值方法进行层面拟合。近几十年来,已经有多种空间曲面插值算法被提出,在层位插值的问题上,目前使用最多的是克里金插值算法。该算法对无断层构造的层位插值具有很好的重构及平滑效果^[3,4],但在一些复杂的地质构造中,却不能直接对层位进行插值。在多重逆掩断层复杂构造情况下,一个层位往往具有多

个断层,这些断层的方向、类型、相互重叠情况各不相同,使得空间层位插值变得非常困难^[5]。另一方面,传统的层位网格化插值方案,虽然能够较好地拟合层面,但是却不能解决层位与断层无法相交的问题^[6,7]。对于某些地质建模应用如三维闭合块提取来说,需要层位与断层完全相交。

针对这些问题,本文提出了一种基于多边形约束的空间克里金方法,解决复杂地质构造层面重构问题,主要有三个过程:a)对原始数据进行预处理,包括断层数据预处理和层位数据预处理;b)进行基于边界约束的层位插值;c)对插值后的数据进行拟合,得到层位空间曲面。

1 问题分析

通过地质构造解释和测井数据,获得地质构造层面的离散控制点数据。层面重构的目标就是利用空间离散的控制点,拟合成空间曲面。如果在没有逆掩断层构造的情况下,空间层面

收稿日期: 2012-06-28; **修回日期:** 2012-07-31 **基金项目:** 国家自然科学基金重点项目(40839905);国家自然科学基金青年基金资助项目(41104067);电子科技大学中央高校基本科研业务费项目(103.1.2E022050205)

作者简介: 聂小燕(1981-),女,湖北襄阳人,讲师,硕士,主要研究方向为信息探测与处理、网络行为学等(niexiaoyan@126.com);鲁才(1975-),男,重庆人,副教授,博士,主要研究方向为计算机图形学、网络安全、网络优化等;陈凯云(1987-),男,湖南人,硕士研究生,主要研究方向为计算机图形学、网络安全。

的重构问题可以采用反比距离加权、空间克里金等方法很好地解决^[2,3];但在有逆掩断层构造特别是多重逆掩断层的情况下,现有方法就很难奏效。

如图1所示,层面拟合的关键问题是首先需要确定待插值点的平面坐标 x, y ,其次是搜索有效的种子点进行插值。对于第一个问题,根据待插值点 x, y 对应的断层情况来确定需要插值的点数及空间拓扑关系。如图2所示,如果对应有 i 重断层,且 m 个为正断层, n 个为逆断层,则 x, y 对应需要插值的点数 $K = n + 1 - m$,并且可以确定每一个待插值点在空间上与断层之间的拓扑关系。

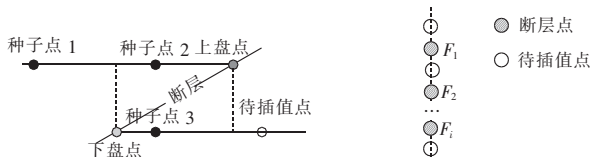


图1 逆掩断层构造插值示意图

图2 断层点和待插值点的空间拓扑关系

对于第二个问题,如图1所示,可以直观看出,种子点1和2不能参与待插值点的插值计算,而种子点3为有效的控制点。为了解决上述两个问题,引入了多边形边界的概念。将层位与断层的交线作为层位的边界控制点数据,并以此约束种子点的有效性。具体算法实现主要分为三个步骤,首先对种子点和断层多边形进行数据预处理;其次是进行多边形边界约束的层位插值;再次是进行层面三角网的构建。

2 数据预处理

在进行层位插值之前,首先要对原始数据进行预处理,包括断层数据预处理和层位数据预处理。

2.1 原始断层数据预处理

原始断层数据预处理包括三个方面:断层插值、拟合断层层面和根据层位原始三维数据生成关联层位的断层多边形。断层由于在深度域(或者时间域)上没有重值,所以断层插值是比较简单的,只需要确定一个断层包络范围,便可利用克里金算法直接插值,然后根据插值数据拟合成断面。垂直断层由于其特殊的构造,不需要拟合断面。断层多边形是断层与层位在空间上相交而成的一个多边形结构,其边界由断层线组成,断层线分为上盘线和下盘线,上下盘线组成一个三维空间中的闭合多边形,如图3所示。

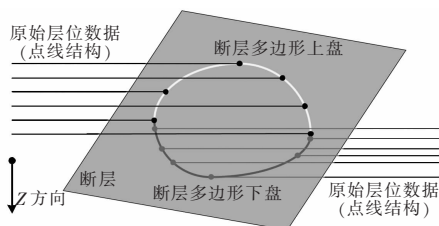


图3 断层多边形示意图

一个断层可能有多个断层多边形,但是每个断层多边形都跟唯一的层位关联。断层多边形和层位的关系如图4所示。

在此定义断层集合 F ,第 i 个断层的多边形集合 F_i ,层位集合 L ,有:

$$\begin{aligned} F &= \{F_1, F_2, \dots, F_m\} \\ F_i &= \{P_1, P_2, \dots, P_{k_i}\} \quad 0 \leq k_i \leq n \\ L &= \{L_1, L_2, \dots, L_n\} \end{aligned} \quad (1)$$

每个断层多边形由上盘点集和下盘点集组成(对于垂直断层,上盘点和下盘点完全重合):

$$P_i = \{up_i, lp_i\} \quad (2)$$

用 $F_i P_j$ 表示第 i 个断层的第 j 个多边形,则与层位关联的断层多边形集合表示如下:

$$L_i = \{F_{i_1} P_{j_1}, F_{i_2} P_{j_2}, \dots, F_{i_a} P_{j_a}\} \quad 0 \leq a \leq m \quad (3)$$

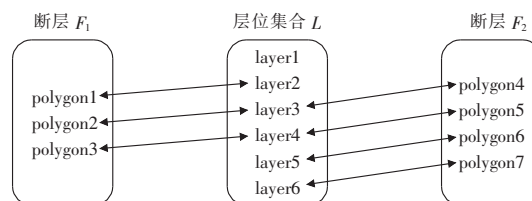


图4 断层和层位关系

2.2 原始层位数据预处理

对于某些层位数据来说,可能其原始数据有部分违反实际的地质构造,如图5所示。图5中,在断层的上盘或者下盘有且只能有一个层位面,而原始的层位数据可能并不满足这个条件,这就需要对原始的层位数据进行预处理,以去除违规的点数据。数据处理之后如图6所示。

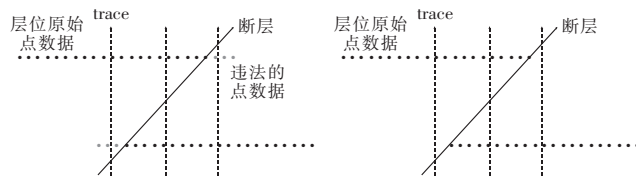


图5 原始层位数据处理之前

图6 原始层位数据处理之后

原始层位数据预处理是保证层位插值正确性的必要过程。

3 层位插值

层位插值是将层位离散点拟合成层面的必要过程,该方案中,通过指定的插值精度预先计算出一个层位网格(row × col),层位插值就是计算出每个网格点处的层位点值。总的来说,层位插值就是利用已知点计算未知点的过程。如图7所示。

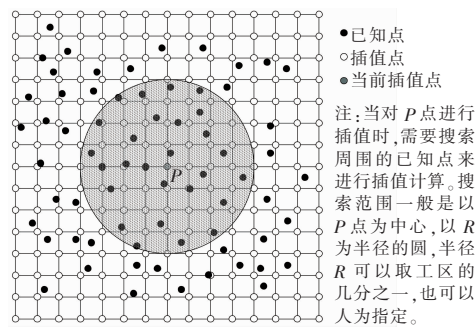


图7 网格化插值

由于存在各类断层,层位插值受到断层约束,在搜索范围内找到的种子点并非都能用来计算。在这种情况下,传统的找点方案不适用于这类复杂条件约束下的层位插值^[8]。如图8所示,定义需要插值点集合 $I = \{I_1, I_2, \dots, I_k, \dots, I_{\max}\}$,并将已知点称之为种子点,定义种子点集合 $S = \{S_1, S_2, \dots, S_k, \dots, S_N\}$ 。如果设定搜索半径 $R = 8$ (即搜索附近八个网格),则在插值 I_1 时,找到的种子点集为 $\{S_1, S_2, S_3, S_4, S_5, S_7\}$,而只有种

子点 $\{S_1, S_2, S_3\}$ 才能用来计算 I_1 的 Z 值。可以用来计算某个插值点的种子点称为该插值点的合法点。

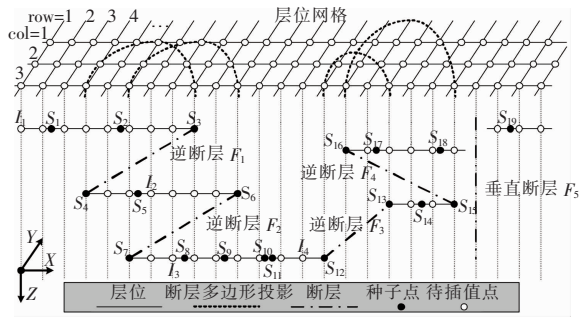


图8 复杂断层边界约束下的层位插值

本文将层位插值分为如图9所示的几个流程。

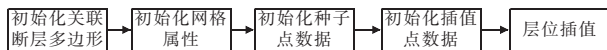


图9 层位插值流程

在层位插值算法中,在允许的搜索范围内搜寻合法的种子点是最重要的部分之一。设待插值点为 I_i ,关联的断层集合为 uF_i 和 lF_i ;搜索到的种子点为 S_j ,关联的断层集合为 uF_j 和 lF_j 。定义与插值点和种子点的水平连线 $I_i S_j$ 相交的断层多边形边界集合为 $boundary$ (其中 uP 为断层上盘边界集合, lP 为断层下盘边界集合, up_k 为断层 F_k 关联插值层位的多边形上盘边界, lp_k 为断层 F_k 关联插值层位的多边形下盘边界, m 为插值层位关联的断层多边形总数):

$$\begin{aligned} boundary &= \{uP, lP\} \\ uP &= \{up_1, up_2, \dots, up_m\} \quad 0 \leq m \leq M \\ lP &= \{lp_1, lp_2, \dots, lp_N\} \quad 0 \leq N \leq N \end{aligned} \quad (4)$$

为了得到正确的种子点来进行插值计算,定义以下几条基本判断规则:

- 若 $uP = \emptyset$ 且 $lP = \emptyset$,则种子点 S_j 有效(或者合法)。
- 若存在断层 $F_k \in uF_i$ 且 $F_k \in lF_j$ (或者 $F_k \in lF_i$ 且 $F_k \in uF_j$),则种子点 S_j 无效(或者不合法)。
- 若 $boundary$ 中存在垂直断层边界,则种子点 S_j 无效。
- 若 $boundary$ 中同时存在某个断层的上盘边界和下盘边界,则种子点 S_j 无效。
- 若 uF_j 中最后一个断层或者 lF_j 中第一个断层为正断层,且 $boundary$ 中包含该正断层的边界,则种子点 S_j 无效。
- 若 $boundary$ 集合不满足D和E中的条件,同时有 $uF_i = uF_j$ 且 $lF_i = lF_j$,则种子点 S_j 有效。
- 若存在断层 $F_k \in uF_i$,且有 $lp_k \in F_k, lp_k \in lP$ (或者 $F_k \in lF_i$,且有 $up_k \in F_k, up_k \in uP$),则种子点 S_j 无效。
- 若存在断层 $F_k \in uF_j$,且有 $lp_k \in F_k, lp_k \in lP$ (或者 $F_k \in lF_j$,且有 $up_k \in F_k, up_k \in uP$),则种子点 S_j 无效。
- 其他情况,判定为种子点 S_j 有效。

对于任意复杂多边形边界约束下的层位插值,其种子点合法性的判断都可依据以上基本判断准则。如图10所示,根据以上判断准则,有

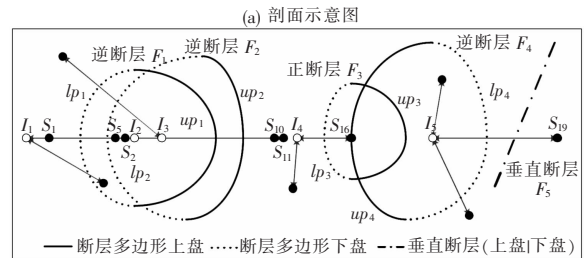
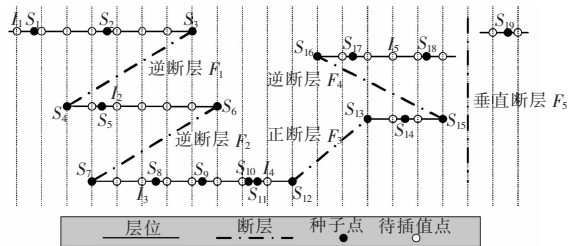
- 如果插值 I_1, S_1 满足准则A,有效;对于 S_5 ,有 $S_5 = \{uF = \{F_1\}, lF = \{F_2\}\}, uP = \{\text{null}\}, lP = \{lp_1, lp_2\}, lp_1 \in F_1, lp_2 \in lP$ 满足准则H,无效;对于 S_2 ,符合准则I,有效;对于 S_{10} 和 S_{11} ,根据准则D,为无效种子点。

- 如果插值 I_2 ,根据准则F, S_5 有效;根据准则B, S_2 无效;

对于种子点 S_1 ,有 $I_2 = \{uF = \{F_1\}, lF = \{F_2\}\}, uP = \{\text{null}\}, lP = \{lp_1, lp_2\}, lp_1 \in F_1, lp_2 \in lP$ 满足准则G,无效。

- 如果插值 I_4 ,根据准则E,线段 $I_4 S_{16}$ 穿越正断层 F_3 的下盘,故种子点 S_{16} 无效。

- 如果插值 I_5 ,根据准则C, S_{19} 无效。



(b)投影水平面示意图

图10 层位插值示意图

对于某个插值点 I_x 来说,若找到的合法种子点集为 $S' = \{S_1, S_2, \dots, S_k\}$,且满足 $k \geq 2$,则可利用克里金进行插值。 S' 对应的点集坐标为 $SP = \{p_1, p_2, \dots, p_k\}$,其中 $p_i (1 \leq i \leq k)$ 为三维坐标点 (x_i, y_i, z_i) , I_x 的坐标为 (x_0, y_0, z) , z 未知。克里金层位插值就是利用已知点集 SP 和插值点的 xy 坐标 (x_0, y_0) 来计算插值点 z 值的过程。

4 层位拟合

当层位插值完成后,得到的数据仍然是一堆离散的三维点,要得到层位曲面,还需要对插值后的数据进行拟合,即根据确定的规则将插值后的网格点数据连接成三角形面,若干个三角形面无缝连接起来,就成为了一个地质层曲面。在本方案中,由于事先确定了边界约束条件,在连接三角形的过程中,只要将层位与断层相邻的边界插值点与断层多边形的上下盘线段连接起来,就可以得到一个层面和断层完全无缝连接的面结构,解决了传统网格化层位拟合方法中层位与断层无法完全相交的难题^[9,10]。层位拟合效果如图11所示。

5 实验结果

本方法支持不同的工程应用,如等值线生成、成块、射线追踪等,而这些应用的前提都是层面插值和拟合。图12和13是本算法在实际应用中生成的等值线和三维块状地质模型效果图。

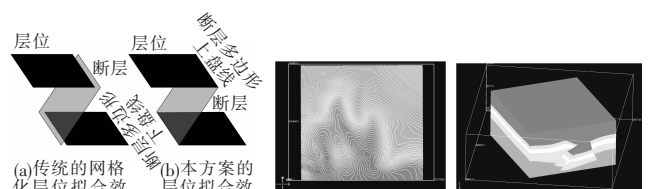


图11 层位拟合面示意图

图12 层位曲面等值线绘制

图13 地层块生成

通过实际数据的应用测试,该算法解决了多重逆掩断层的层面重构及地质块状模型生成问题。

(下转第600页)

从图3~5可以看出,二维 Otsu 算法、二维 Otsu 快速算法、二维 Otsu 分解算法、加权三维 Otsu 算法的分割结果中明显含有大量的噪声,影响了分割的准确度。本文充分结合了自适应加权中值滤波对噪声所具备的良好过滤功能,以此弥补了二维 Otsu 算法去噪效果的不足。本文算法对以上的三幅噪声图像的分割,都能达到较好的去噪效果,并且分割效果较为理想。此外,在计算复杂度方面,本文提出了将二维直方图的四分法改为了二分法,使计算复杂度从 $O(L^4)$ 降为 $O(L)$,提高了算法的实用性。表1给出的是上述各个算法的时间对比。

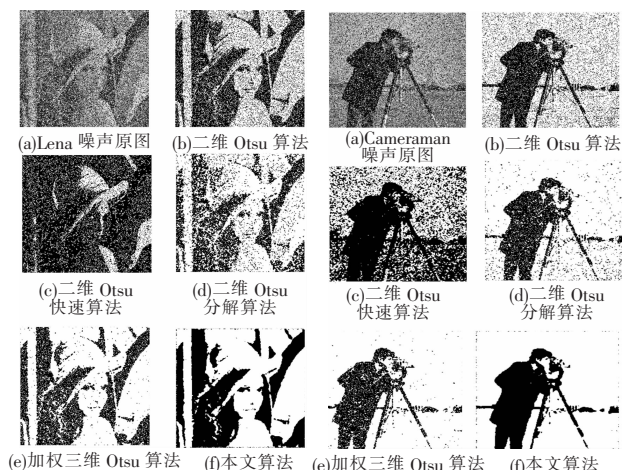


图3 Lena 椒盐噪声图像的分割效果

图4 Cameraman 噪声图像的分割效果



图5 车牌噪声图像的分割效果

表1 各个算法的时间对比

/s

图例	Lena 图像	Cameraman 图像	车牌图像
二维 Otsu 算法	26.5941	26.6001	26.5953
二维 Otsu 快速算法	0.4424	0.4290	0.5461
二维 Otsu 分解算法	0.0084	0.0206	0.0225
本文算法	0.0750	0.0782	0.1153

4 结束语

为解决二维 Otsu 算法在含有噪声较多的图像应用中分割效果较差这一问题,本文提出了一种基于自适应加权中值滤波的二维 Otsu 图像分割算法。该算法结合了自适应加权中值滤波滤除噪声的优良性能,并且将二维直方图进行了改进,利用二维 Otsu 准则求取最佳阈值进行分割。本文算法对含噪声较多的图像具有较为理想的分割效果。需要说明的是,本文算法在滤除噪声和细节保持上还有待改善,如何保持图像的细节并达到良好的去噪效果将是笔者进一步研究的方向。

参考文献:

- [1] OTSU N. A threshold selection method from gray-level histograms [J]. IEEE Trans on Systems, Man and Cybernetics, 1979, 9 (1):62-66.
- [2] MOGHADDAM R F, CHERIET M. A multi-scale framework for adaptive binarization of degraded document images [J]. Pattern Recognition, 2010, 43 (6):2186-2198.
- [3] YANG Wen-zhu, LI Dao-liang, ZHU Liang, et al. A new approach for image processing in foreign fiber detection [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2009, 68 (1):68-77.
- [4] 刘健庄, 栗文青. 灰度图像的二维 Otsu 自动阈值分割法[J]. 自动化学报, 1993, 19 (1):101-105.
- [5] 岳峰, 左旺孟, 王宽全. 基于分解的灰度图像二维阈值选取算法[J]. 自动化学报, 2009, 35 (7):1022-1027.
- [6] 景晓军, 李剑峰, 刘郁林. 一种基于三维最大类间方差的图像分割算法[J]. 电子学报, 2003, 31 (9):1281-1285.
- [7] 范九伦, 赵凤, 张雪峰. 三维 Otsu 阈值分割方法的递推算法[J]. 电子学报, 2007, 35 (7):1398-1402.
- [8] 吕燕, 龚劬. 加权三维 Otsu 方法在图像分割中的应用[J]. 计算机应用研究, 2011, 28 (4):1576-1579.
- [9] ZHANG Xu-ming, XU Bin-shi, DONG Shi-yun. Adaptive median filtering for image processing [J]. Journal of Computer Design & Computer Graphics, 2005, 17 (2):295-299.
- [10] 魏巍, 申炫京, 千庆姬, 等. 三维最大 Renyi 熵的灰度图像阈值分割算法[J]. 吉林大学学报:工学版, 2011, 41 (4):1083-1088.

(上接第590页)

6 结束语

本文提出了一种复杂空间曲面重构方法,解决了三维地质建模中复杂地质构造下的层位曲面重构问题,为等值线绘制、地质成块等提供了新的思路。该方法解决了复杂地质构造下的层位插值问题,解决了传统的网格化插值方案层位与断层无法严格相交的难题,同时本方案采用混合网格化的层位插值方法,既保证了数据的快速处理,又保证了拟合的精度。

参考文献:

- [1] 徐建华. 现代地理学中的数学方法[M]. 北京:高等教育出版社, 2002.
- [2] ISAAKS E H, SRIVASTAVA R M. An introduction to applied geostatistics [M]. New York: Oxford University Press, 1989:278-322.

- [3] 李明超, 廖正建, 刘菲, 等. 复杂地质曲面三维插值—逼近拟合构造方法[J]. 中国工程科学, 2011, 13 (12):103-107.
- [4] 郭良辉, 孟小红, 郭志宏, 等. 地球物理不规则分布数据的空间网格化法[J]. 物探与化探, 2005, 29 (5):125-129.
- [5] 李晓军, 王长虹, 朱合华. Kriging 插值方法在地层模型生成中的应用[J]. 岩土力学, 2009, 34 (1):51-55.
- [6] 刘传志, 张华, 张亚男, 等. 等高线自动绘制中断层处理的新方法[J]. 海洋测绘, 2005, 25 (3):79-83.
- [7] 陈永辉, 卢德唐, 黄丰. 地质构造等值线原理及实现技术[J]. 计算机应用与软件, 2006, 23 (4):92-95.
- [8] 陈学工, 张坤. 带断层线的等值线生成方法[J]. 计算机应用研究, 2010, 27 (8):3144-3146.
- [9] 孟宪海, 杨钦, 李吉刚. 基于层面结构的三维闭合地质区块构造算法[J]. 北京航空航天大学学报, 2005, 31 (2):45-48.
- [10] 侯卫生, 吴信才, 刘修国. 基于线框单元体的三维闭合地质块体构建方法[J]. 吉林大学学报:地球科学版, 2007, 37 (5):65-68.