复杂地质体建模与可视化新技术 *

张 敏, 杨武年, 罗智勇, 吴学明
(成都理工大学 遥感与 GIS 研究所 国土资源信息技术与应用国土资源部重点实验室, 成都 610059)

摘 要: 基于似三棱柱模型和人工插入虚拟钻孔的方式提出采用虚拟钻孔链控制复杂地质体的新思路,成功设计了一种能够识别褶皱、透镜体、尖灭体、断层和高精度控制边界的推理算法。提出了 TIN 加密新技术——窗口加密法,发现 Delaunay 三角形存在"隔离带"现象而实现 Delaunay 三角网局部重构技术——移动窗口 ROI,设计并实现了三种加速算法方案。最后利用 C# + Open Inventor 实现真三维可视化和地质体高效率切割、挖掘等。

关键词: 地质体三维可视化; 似三棱柱体; 虚拟钻孔链; 复杂地质体; 窗口加密法; 隔离带; 局部重构技术
中图分类号: TP391.9 **文献标志码**: A **文章编号**: 1001-3695(2009)06-2390-03
doi:10.3969/j.issn.1001-3695.2009.06.118

New technique of modeling and 3D visualization for complicated geologic body

ZHANG Min, YANG Wu-nian, LUO Zhi-yong, WU Xue-ming
(*Institute of RS & GIS, Chengdu University of Technology, Chengdu* 610059, *China*)

Abstract: This paper proposed a new method of dummy borehole chain to control the complicated geo-body based on the similar tri-prism model. Designed a smart arithmetic which could self-identify fold, lens body, sharpen body, fault etc. Window densification was an new technology for TIN densification. Realized the Delaunay triangle network's part-reconstruction-technology based on the discovering of Delaunay's new character isolation belt. In order to accelerate arithmetic, proposed three efficient solutions. Finally the complicated geo-body was 3D-visualized by C# + Open Inventor, which could operate well with geo-body cutting, digging, probe and layer uncovering.

Key words: geo-body 3D visualization; similar tri-prism; dummy borehole chain; complicated geo-body; window densification; isolation belt; part-reconstruction-technology

地质体三维建模与可视化的概念最早是由 Simon W. Houlding 于 1993 年提出的,随着计算机技术、地球空间信息技术的飞速发展,它已成为当前数学地质、石油勘探、水电勘察、岩土工程与科学计算可视化等众多领域的研究与应用热点。至今为止也有很多这方面的参考文献,但能够实现复杂地质体包括褶皱、透镜体、尖灭体、正断层、逆断层的自动推理识别、高精度反演和三维高效率交互操作的先例并不多见,市面上流行的商业软件也还不成熟。本文构造复杂地质体最基本的模型单元是借鉴前人似三棱柱方法,因为该模型单元具有灵活性与复杂性的特点,如何利用它来成功构建复杂地质体成为一个难点,本文改进了前人的方法,解决了关键性技术问题。

1 前人工作

国内外在地质体三维可视化方面的研究十分广泛,主要集中在数据模型、可视化处理、三维拓扑关系等方面,其中数据模型研究是地质体信息三维可视化的基础和核心。目前应用到的数据模型有二三十种,大致可以分为基于面表示的模型、基于体表示的模型、基于混合表示的模型以及其他类型。基于面表示的模型是通过精确地表示地质体外表面来表示均质地质体的建模方法,是目前最广泛使用的建模方法,其中以不规则三角形(TIN)的应用最为广泛;基于体表示的模型使用大量足够小的体元组合表达地质体,其优点是可以用来表达非均质的地质体,但缺陷是数据量巨大,较有代表性的体模型有不规则四面体模型(TEN)、广义三棱柱模型(GTP)、3D 栅格模型(Arrays)、八叉树模型(Octree)、CSG 模型等;基于混合表示的模型是上述多种模型的综合利用,有松散集成和无缝集成模型之分。

总体来说,尽管研究人员提出了大量的建模思路和具体算法,并通过软件研发投入实践使用,但由于地质体三维建模的时空不确定性、模糊性、信息源的稀少性以及模型本身的复杂性,使得地质体信息三维可视化的理论与技术方法还处于一个不断探索和发展的阶段。相比之下,文献[1]提出的似三棱柱法具有广阔的应用前景,但由于构模方式上存在难度,现有资料基本只能处理简单地层或部分复杂地层,具有人工干预多、自动化程度不高、无法自动识别各类复杂地质体现象的缺点。

似三棱柱基本体元模型如图 1[2] 所示。其中(a)中上下三角形三个点分别对应同一地层上下面的钻孔穿出点,侧面四边形棱边对应层间钻孔。由于存在地层面起伏和钻孔偏斜等问题,此空间单元的上下两个三角形不一定平行。图 1(b)和(c)是为了模拟断层及尖灭等复杂地质构造的两个变异三棱柱,在数据结构中仍然记录六个顶点。

收稿日期: 2008-08-19; **修回日期**: 2008-10-12 **基金项目**: 国家科技部科技型中小企业技术创新基金资助项目(05MLDZ035);地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室开放研究基金资助项目

作者简介:张敏(1984-),男,浙江嘉兴人,硕士,主要研究方向为数学建模、GIS 应用和遥感技术(upzhangmin@hotmail.com);杨武年(1954-),男,教授,博导,遥感地质专家;罗智勇,男,助教,博士,主要研究方向为软件工程;吴学明,男,博士,主要研究方向为数学地质.

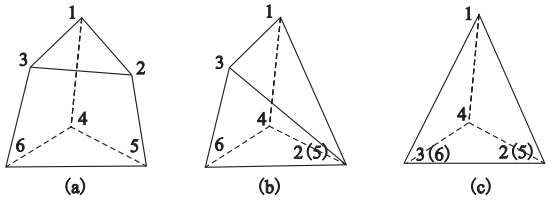

图1　似三棱柱体体元

Delaunay 三角形法是地学领域构建 DTM(数字地面模型)的常用方法,以下简称 D-三角形。D-三角形剖分算法是基于三角网生长法[3]改进的。它具有以下三大特征[4]:a)空外接圆性质,由点集 V 所形成的 D-三角形中每个三角形外接圆均不包含点集 V 中的其他任意点;b)最大的最小角度性质;c)D-三角网的外边界是一个凸多边形。经过反复研究论证,笔者还发现了第四个特征:每个三角形周围都存在一圈隔离带三角形,即与该三角形三个角点连接的所有三角形的集合。在 D-三角形结构前两大特征约束下,某一三角形中心增加一个插入点后,D-三角形的重构现象将只发生在该三角形和其隔离带三角形所组成的窗口中,而窗口外区域的三角形构造状况绝对不会改变。其原因是:只有窗口内的三角形外接圆才有可能包含新插入的点,形成局部不稳定的 D-三角形结构。研究 D-三角形这些性质对模型建立和算法优化很有用。

2　本文改进技术

为适应复杂地质体的构建,本文改进了多层 DEM 建模算法,该算法的本质是每个地层面分别构造 D-三角网,然后再将上下三角面连线构造似三棱柱体。多层 DEM 建模算法很有局限性,因为对于复杂地质体无法做到上下三角网的三角形个数对应相等。本文基于倾斜钻孔实现复杂地质体构造,其构体机制是用地表钻孔点构造 D-三角网,似三棱柱体从每个地表三角形沿钻孔节点从上向下生长。

2.1　复杂地质体控制新方法

本文采用虚拟钻孔链控制复杂地质体,在所有复杂地质现象的边界采用人工交互式的方法插入必要的控制性钻孔以辅助真实钻孔,实现地质体精确反演。同属于控制一个复杂地质现象的多个人工交互式钻孔组成一条虚拟钻孔链,采用虚拟钻孔链的目的是保证沿链延伸方向将地质体分割成左右两个区域,利用 D-三角形构网特点自动实现地质体区域分割,降低了人工分割地质体的复杂度。

如图 2 所示,透镜体的虚拟钻孔链通常为封闭环状,尖灭体的虚拟钻孔链为开放弧状。人工交互式钻孔插于尖灭线转折点上效果最佳,断层的虚拟钻孔链为平行状虚拟钻孔链组,人工交互式钻孔位于断层面和地层面交线上。本文成功实现复杂地质体建模的一大创新是采用虚拟钻孔链控制复杂地形,改进了前人采用虚拟钻孔的方法[5]。因为离散的虚拟钻孔无法起到自动分割地质体的作用。

2.2　三角网插值加密新技术

常见的 TIN 加密有 4 倍加密 TIN、16 倍加密 TIN[6],属于平面加密,只是为了加密而加密,无法真实模拟地貌;格网插值[7]在一定程度上可以逼近地貌,但没有充分利用 D-三角形特点。本文采用窗口加密法插值出新钻孔,充分利用了 D-三角形存在窗口的构造特点。X,Y 值取被插三角形中心点,从概率论意义上是最优的,新插一个点后窗口内的三角形必将参与 D-三角形重构,而窗口外的三角形构造状况将没有任何改变,因此提取窗口内的点参与 Z 值内插。Z 值内插方法采用 Shepard 法,通常称为距离幂次反比加权法,是地矿工程领域中经常采用的插值方法之一,具体请参见文献[8]。这种方法充分利用了 D-三角形惟一性[9]、最优性[10]和存在窗口的特点,用最简单的方法、最少的数据量、最大限度地逼近地貌真实形状;而且 Sibson[11]认为,只有 D-三角网是局部等角的三角网,采用窗口加密法插值之后效果将更加明显。

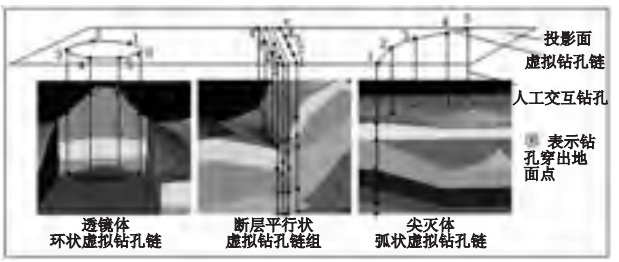

图2　虚拟钻孔链控制复杂地质体的组织方式

2.3　三种算法加速方案

鉴于本次地质体建模计算量大(对 215 条钻孔插值后形成 9 969 条插值钻孔,19 867 个地表 D-三角形,最终构造出 80 800 个似三棱柱体),而 60% ~95% 的计算时间是消耗在插入新钻孔引起的 D-三角形重构上(由三角网加密和维护虚拟钻孔链引起),对此本文设计了三种加速算法方案,而且完全不影响建模精度,不破坏 D-三角形结构。

1)D-三角网加密采用移动窗口 ROI 局部重构技术,缩小重构范围

首先引入两个定义:a)面积阈值 ΔS,是指用户指定需要作插值加密的三角形面积门槛值;b)D-三角网分裂比 Γ,是指搜索 D-三角网中所有面积大于 ΔS 的三角形加密一次且重构后三角形个数与插值重构前三角形个数之比,$1 \leqslant \Gamma < 3$。

在头几道加密过程中几乎所有的三角形面积都会大于 ΔS,因此大于阈值的三角形都需要作三角网加密,分裂比 Γ 很大接近 3,此时需要对整个建模区作插值加密和 D-三角形重构。随着加密过程的继续,分裂比 Γ 将迅速减小,此时大多数三角形面积都已小于面积阈值,不再参与三角网加密插值,只有少数几个三角形面积仍然很大,需要插值,此时将转入移动窗口 ROI 作局部重构。将被插值三角形和其周围的隔离带三角形构成一个移动窗口,只对窗口内的钻孔点作 D-三角形重构,这将极大地加速算法。Γ 取 1.25,ΔS 取未作插值时 D-三角网中最小三角形的面积。当地表有 100 个三角形,加速率约为 10% ~20%;1 000 个三角形加速率约为 40% ~55%;10 000 个三角形加速率约为 70% ~85%。

2)虚拟钻孔链加密采用加快收敛速度的方法

建模地区复杂地质现象越多,控制复杂地形所需的虚拟钻孔链条数也越多。随着 D-三角网加密,窜点问题肯定会随之发生,破坏虚拟钻孔链内首尾相连的状态。而每次对虚拟钻孔链的维护即在断链间插入一条过渡钻孔,只有在整个区域 D-三角形重构之后才会知道虚拟钻孔链是否已相连,若没有相连将继续插入过渡钻孔,再重构 D-三角形,这将占用大量系统资源。如果发现断链,一次性插入数条过渡钻孔,将以指数次方加快收敛速度,保证虚拟钻孔链处于连接状态,减少 D-三角形重构次数,且不影响复杂地质体建模精度。

3)跳过构体算法,直接实现地质体可视化

针对本次可视化建模采用面向对象的.NET 开发特点,本文专门设计了将对象(类)序列化 classToSerialize( )方法实现模型计算结果持久化保存。将成千上万个计算所得的似三棱柱从内存数据结构中拷贝出来,以二进制形式进行串行化保存,以便直接作为可视化数据源。即一套钻孔数据只需首次运算时进行构体运算,以后采用反序列化 deserialize( )方法读文件,跳过构体算法,在配置很差的计算机上都能快速实现模型可视化(配置为 Core(TM)2 Duo CPU 2.33 GHz、2 GB 内存计算机不采用任何加速方案的运算时间需 86 s,而采用本节加速方案后只需 5 s 就能实现地质体可视化)。

3　复杂地质体似三棱柱构体原理和推理过程

3.1　复杂地质现象构体推理原理

复杂地质现象主要是指地层中同时存在透镜体、尖灭体和断层等不连续现象,而对于水平地层和褶皱等连续地层的似三棱柱建模已经比较成熟了。

地层出现一般都具有先后次序和分布走向,它反映了地层构造的连续性和规律性,同时复杂地质现象的存在会对地层产生错断作用和终止现象。因此三角形沿着三条钻孔向下扩展构造似三棱柱体过程中应能体现出这种地质构造规律,自动识别各种复杂地质现象,实现智能推理,如图 3 所示。

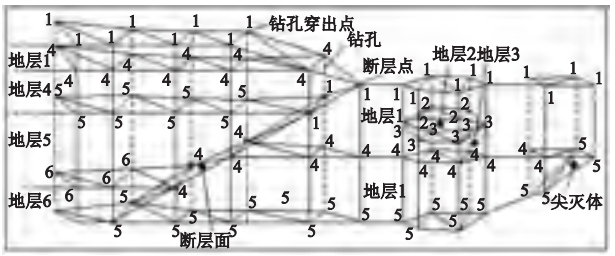

图3　三类复杂地质现象似三棱柱构体方式

断层是地质体建模的难点之一,有正断层和逆断层、错断一层和错断多层之分。图 3 中的断层为逆断层错断多层且未断透,属于所有断层建模中最难的情况,用 3.2 节中的构体算法仍旧能够很好地实现推理。

3.2　复杂地质体构体推理算法

似三棱柱横向生长的"发动机"是 D-三角网,纵向沿着钻孔节点向下生长,现有的复杂地质体建模算法中鲜有同时能处理透镜体、尖灭体、断层的算法,本文提出的似三棱柱构体算法经反复论证完全可行,已用 C#编程实现而且具有相当的容错能力。具体描述如下:

a)当前待扩展三角形的三个顶点均无断层点标志时,检查其地层编号。

(a)若三个顶点编号相同,则沿钻孔向下扩展的新三角形顶点均为当前三个顶点所在相应钻孔上的下一个点,形成三棱柱,属性值为上三角形顶点所在地层编号。

(b)若三个顶点编号不同,则编号小的顶点沿相应钻孔向下扩展一点为新三角形顶点,而编号大的顶点保持不变,形成三棱柱,属性值为扩展点所在钻孔的上点地层编号。

b)当前待扩展三角形的三个顶点都具有断层点标志时:

(a)如果三个点的地层编号不同且编号小的断层点向下扩展一点的地层编号和编号大的断层点地层编号相同,则编号大的断层点保持不动而编号小的断层点向下扩展一点形成三棱柱,属性值为编号小的断层点地层编号。

(b)如果三个点的地层编号相同,则三个点都直接向下扩展形成三棱柱,属性值为断层点的地层编号。

c)当前待扩展三角形的三个顶点中有一个或两个断层点时,检查其余顶点所在相应钻孔中自该点向下点的属性。

(a)若含有与上述一个或两个断层点属于同一断层面的点,则该一个或两个断层点无论地层编号大小均不向下扩展,直到其余顶点按编号大小向下扩展到与该一个或两个断层点属性相同为止,形成三棱柱,属性值为扩展点所在钻孔的上点地层编号。

(b)若没有与上述一个或两个断层点属于同一断层面的点,则该一个或两个断层点和其余顶点可按规则 a)检查各自地层编号,然后根据编号大小向下扩展。

3.3　算法流程简略图

运行程序后首先检查似三棱柱序列化文件是否存在,若已存在则直接作反序列和地质体化可视化;若不存在则先做构体操作。具体流程如图 4 所示。

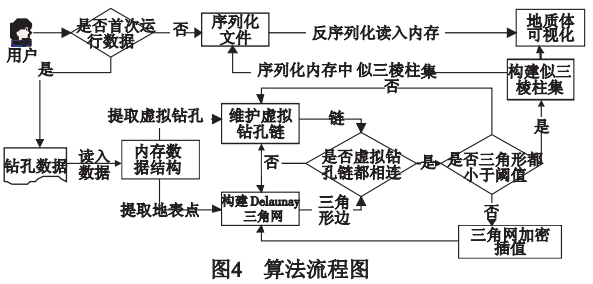

图4　算法流程图

4　Open Inventor 地质体三维可视化技术

本次地质体三维可视化采用面向对象和节点的编程方式。可视化工具采用 Open Inventor,它是 OpenGL 的延伸物,是目前世界上被广泛使用的对象导向绘图软件开发接口(API),优于开源软件 VTK。利用 Open Inventor 进行开发最大的好处是其对三维图形强大的操作功能,不进行繁琐的三棱柱自分解[12],照样能够实现地质体任意角度的切割和挖掘,而且不会破坏似三棱柱原来的数据结构,允许多次切割,执行效率极高。

本文主要采用了 Open Inventor 中的 MeshViz 节点中的 PoIndexedMesh3D 实现数据模型的可视化,同时实现了地质体任意角度旋转、拖拽、缩放、切割、挖掘、三维探针、地层揭层、"栅栏图"显示、"线框模式"显示、调整地质体透明度、钻孔管理等操作。地质体三维可视化部分功能截图如图 5 所示。

图5　地质体三维可视化部分功能截图

5　结束语

基于面模型的建模方法是通过精确地表示出地质体的外表面来表示均质地质体及构造,是目前最广泛使用的建模方法。该方法的优点是建模过程相对简单,且在地质体的外部形态建模与可视化方面具有优势,但不具备对地质体内部属性进行建模的能力,不利于空间分析。

(下转第 2395 页)

加 1,依照累加值可以测算出竖直方向上粮袋的数量。充分考虑到算法的实时性,对竖直方向线段位置的选取上采用累积均分法,避免对二值图像所有的竖直方向进行统计。为了提高识别计数的精度,选取多个竖直方向进行测量,引入众数的频率和方差分析,设定相应的判断阈值,并得出最终的粮袋计数结果。计算过程如下:

a)选取竖直方向 $n \geqslant 9$ 且 $n \in Z$, $x = [(1/n)M]$, $[(2/n)M]$,…,$[((n-1)/n)M]$,所在线段从上至下依次遍历各个像素点的值,并记下各计数器相应的累加结果 $k_1, k_2, k_3, \cdots, k_{n-1}$。

b)统计步骤 a)累加结果的个数,提取该组数据的众数 k 及相应的个数 n_0,计算频率 $p = n_0/(n-1)$。

c)若 $p \geqslant 0.8$,则计算方差 $\mathrm{var}(k) = E\{[k_i - k]^2\}$, $i = 1, 2, \cdots, n-1$;否则,$n = n+1$,并返回步骤 a)的计算过程。

d)进一步判断方差,如 $\mathrm{var}(k) < T$,则计算结束,获得最终的计数结果;否则,$n = n+1$,并返回步骤 a),直至运算结束。

2　实验结果及分析

本文的识别计数方法在 MATLAB 平台上已实现。在实际的数量测算中,需要分别针对立体仓三个相邻面的场景采用轮廓边界的提取并计数的关键技术处理。考虑到系统实现的时效性和准确性,选取竖直计数起始方向过多,容易影响系统的工作效率;选得太少,达不到高标准的计数精度。以仓库实景图像为实验样本,根据目测和智能计数方法进行统计,检测的准确率可达 99% 以上。实验结果表明,该方法用来实现袋装粮仓储备数量的测算是可行的。

采用本文袋装粮识别计数方法的关键技术主要体现在以下三个方面:

a)基于实际采集的 RGB 格式的彩色图像,利用灰度空间的转换实现图像处理信息量的压缩,使得识别计数的效率有了一定的提高。

b)针对粮袋反光带的特征边缘,运用 ROI 的概念,并采用双阈值 Canny 边缘检测算子提取目标区域的边界和形态学增强,达到高质量的识别效果。

c)提出基于像素点统计计数的方法完成轮廓数量的测算,具有较好的计数精度,使得图像智能识别技术手段在储备数量的测算上具有一定的使用价值。

3　结束语

本文针对储备粮数量的监管及稽核存在的问题,提出了一种简单实用的袋装粮仓图像自动检测计数技术。根据粮袋反光带的特征,采用双阈值 Canny 边缘检测算子方法及形态学增强相结合的方法来完成 ROI 边界的提取;然后提出了一种基于像素点统计计数的方法,选择合适的阈值对统计的结果进行判断,算法简单、运算量不大,实现了数量的可靠测算。由于实际场景光线条件的限制和各粮袋特征的随机性,造成处理后图像的某些边界线轮廓存在一定的缺陷,影响高精度的统计测算,所以在对特征轮廓边界的提取细化方面仍需要进一步的研究。

参考文献:

[1] 唐为民. 中央粮库储粮技术现状及对策研究[J]. 粮食流通技术, 2003(1):4-7.

[2] 林鹰,付洋. 散装仓粮食数量识别关键——矩形标尺图像识别[J]. 浙江大学学报,2007, 41(10):1643-1646.

[3] 栾新,朱铁一. 不规则类圆形目标图像识别新策略[J]. 中国图象图形学报,1999, 4(3):202-206.

[4] 陈孝春,叶懋冬,倪臣敏. 一种形状识别的方法[J]. 模式识别与人工智能,2006, 19(6):758-763.

[5] HADDON J F, BOYCE J F. Image segmentation by unifying region and boundary information[J]. IEEE Trans on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1990, 12(10):929-948.

[6] 汤金宽,曹丹华,吴裕斌,等. 基于组合模板的人体头部精确定位算法[J]. 中国图象图形学报,2007, 12(8):1389-1394.

[7] 周群,胡光锐. 基于模板覆盖法的钢筋在线计数方法[J]. 上海交通大学学报,1999, 33(11):1462-1464.

[8] 冉海潮. 火灾图像的模糊识别探测方法[J]. 模糊系统与数学, 2001, 15(3):102-104.

[9] 陈松灿,伍艳莲. 图像的模糊识别方法研究与实现[J]. 电子学报, 2000, 28(11):50-54.

(上接第 2392 页)

实体模型法采用的实际是一种复合的数据模型,它采用多边形网格来精确描述地质体边界,同时采用传统的块体模型来描述地质体内部的属性信息,从而实现了地质体形态的完美表达与内部属性的分析计算。实体模型法适合对具有复杂内部结构的物体建模,但缺点是人工交互多、存储数据冗余大、构模速度慢,对空间对象内部及其之间的拓扑关系的表达不够完善。

传统的多层 DEM 建模算法都是以钻孔资料为主要数据源,难以将除钻孔数据之外的其他信息融入建模的工作流程中,导致建模结果与实际差别较大,且难以修正。本文针对此种情况,对多层 DEM 建模算法进行了改进,提出了新的能识别不同复杂地质现象的算法,同时改进了加密算法和算法加速方案,实现了地质体三维可视化。虽然本地质体建模方法对原始钻孔数据要求严格,但凭借数百个钻孔实现大范围复杂地质体精确反演,严格规范的原始数据是必需的。针对此方法的弊端,笔者正通过设计一个用户交互界面的方式简化人工交互式钻孔的录入过程。最终实现的地质体三维显示效果理想。

参考文献:

[1] 齐安文,吴立新,李冰,等. 一种新的三维地学空间构模方法——类三棱柱法[J]. 煤炭学报,2002,27(2):158-163.

[2] 王占刚,曹代勇. 基于改进三棱柱模型的复杂地质体 3D 建模方法[J]. 中国煤田地质,2004,16(1):4-6.

[3] GREEN P J, SILBSON R. Computing, Dirichlet Tesselations in the plane[J]. Computer Journal, 1978, 21(2):168-173

[4] DELAUNAY B. Sur la sphere vide[J]. Bulletin, Classe des Sciences Mathematiques et Naturelles, 1934(8):793-800.

[5] 刘少华,吴东胜,罗小龙,等. 复杂地质体的三维建模与可视化方法的研究[J]. 矿业研究与开发,2007,27(2):56-75.

[6] 张恒. 复杂地质界面三维建模方法研究[D]. 西安:西安科技大学,2005.

[7] 曾新平. 地质体三维可视化建模系统 GeoModel 的总体设计与实现技术[D]. 北京:中国地质大学(北京),2005.

[8] RENKA R J. Algorithm 660:QSHEP2D:quadratic Shepard method for bivariate interpolation of scattered data[J]. ACM Trans on Mathematical Software, 1988, 14(2):149-150.

[9] MILES R E. Solution to problem 67-15 (probability distribution of a network of triangles)[J]. SIAM, 1969 (11): 399-402.

[10] LINGUS A. The greedy and Delaunay triangulations are not bad in the average case[J]. Information Processing Letters, 1986, 22(1): 25-31.

[11] SIBSON R. Locally equiangular trianaulations[J]. Computer Journal, 1978, 21(3): 243-245.

[12] 张渭军,王文科,翁晓鹏. 基于三棱柱体的三维地质体可视化研究[J]. 工程地质学报,2006, 14(5):716-720.

[13] HOULDING S W. 3D geoscience modeling-computer techniques for geological characterization [M]. New York: Springer-Verlag, 1994.