

文章编号: 1000-7598 (2009) 08-2385-07

三维无缝工程地质建模系统的研制

徐能雄, 田 红

(中国地质大学 工程技术学院, 北京 100083)

摘 要: 在边界表示法的基础上, 提出了无缝工程地质模型的概念, 实现了基于模型线框架的无缝工程地质建模方法, 研制了无缝建模系统 (ROCKModel)。该系统包括 3 个部分: 原始数据转换工具、实体建模工具与辅助工具, 涉及剖分、插值、曲面求交等 8 个基本功能模块。在基本功能模块的基础上, 提出并实现了形态复杂曲面的创建、构建模型线框架、界面编辑与重构、块体搜索、岩体质量三维分级等关键技术。该系统能够实现复杂地质对象与工程对象的无缝建模与可视化, 并为数值模拟软件直接提供几何模型。

关 键 词: 三维地质建模; 无缝工程地质模型; 系统设计与研制; 线框架; 边界表示法

中图分类号: TU 454; TP 311

文献标识码: A

Development of 3D seamless engineering geological modeling system

XU Neng-xiong, TIAN Hong

(School of Engineering and Technology, China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

Abstract: On the basis of boundary representation, the notion of sealed engineering geological model is proposed; and an approach for building a seamless engineering geological model based on wire frame is presented. And a sealed modeling software system, ROCKModel, is developed. This system includes three main components: original data transforming tools, solid modeling tools and auxiliary tools. And it includes eight basic functional modules, such as: mesh generation for surface and solid, surface interpolation, surface intersection searching, etc. Based on these basic modules, five key algorithms, creating complex surfaces, creating wire frame, interfaces modification and reconstruction, blocks searching, and 3D rock quality classification are proposed and realized. This system can build and visualized seamless models for complex geological and engineering objects, and provide geometrical models for numerical simulation software directly.

Key words: 3D geological modeling; seamless engineering geological model; design and development of modeling system; wire frame; boundary representation

1 引 言

数十年来, 有关建模理论与方法的研究一直是一个具有挑战性的课题, 研究工作十分活跃。在三维地质建模的基础理论^[1]、多源数据的处理方法^[2-4]、复杂地质界面与地质特征的模拟^[5-9]、空间数据模型与拓扑表示方法^[10]、地质建模的应用^[11-15]等方面取得了长足的进展。

有关建模系统的研制工作也十分活跃。美国、加拿大、英国、澳大利亚等国家已经推出很多成熟的商业软件, 如 gOCAD、LYNX、CTech、EarthVision、SURPAC、GeoFrance 3D、MineSOFT 等^[16-17], 这些软件已被广泛应用到地质建模与可视

化、矿床模拟、矿山设计与规划、生产管理等方面。国内在地质建模系统研制方面也做了大量工作, 初步形成了一些软件系统^[17-22], 如 Geomodel、RDMS、GeoView、TrapDEM、SL GRAPH、GMS 等。但由于起步较晚, 研发力量分散, 使得国内的建模软件大多数只能服务于特定领域, 而且这些软件多见于文献中, 成熟的商业软件尚不多见。

笔者研制建模系统的目标是实现复杂地质对象及工程对象的无缝建模与可视化, 并为数值模拟软件直接提供计算模型。尽管有关地质建模方面的研究已取得了长足的进展, 建模软件的功能得到较大提高。但要实现上述目标还存在一定的困难, 例如: ①地质对象与工程对象的几何形态种类繁多, 尺度

收稿日期: 2008-09-08

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No. 40602037, No. 40872183)。

第一作者简介: 徐能雄, 男, 1971 年生, 博士, 副教授, 主要从事岩体结构三维建模与数值模拟研究。E-mail: xunengxiong@yahoo.com.cn

差别大,难以用统一的建模方法进行模拟;②必须保证模型中所有几何元素满足几何连续、拓扑相容,从而保证能够被剖分成适于数值模拟的计算网格。为此,笔者提出一种基于模型线框架的无缝建模方法,该方法的核心思想是先构建统一的模型线框架,保证不同界面之间的无缝连接,然后以线框架为约束重构各种界面,再用块体搜索方法重构实体。该方法结合了传统的线框建模与边界表示法的特点,线框架的作用是保证所有界面之间的无缝连接,而采用边界表示法能够保证几何元素连续与拓扑相容。与传统线框建模不同,本文的线框架是通过界面求交与界线求交运算得到的,能够尽可能地提高模型与实际的符合度,同时也能够适应复杂线框架的构建。在此基础上,作者自主研制了三维无缝建模系统 ROCKModel。文中介绍了该系统的总体设计、功能模块以及关键功能的开发。

2 无缝工程地质建模方法

2.1 无缝工程地质模型

Caumon 等^[23]最先提出了无缝地质模型的概念,将用边界表示法(B-Rep)表示的、满足地质相容条件的地质模型^[23]称为无缝地质模型。在此基础上,笔者提出如下概念:无缝工程地质模型是一个用 B-Rep 表示的,包含节点、有向边、三角形、简单块体 4 个基本几何元素,由统一线框架缝合简单曲面组成,满足几何连续、拓扑相容与地质相容条件,能够综合模拟复杂地质对象与工程对象的封闭有界的地质模型。

2.2 主要几何元素与相关关系

系统各功能模块所采用的主要几何元素及其数据结构如下:

- (1) 节点 用坐标 (x, y, z) 定义的空间点。
- (2) 有向边 两个不重合节点之间的有向线段。
- (3) 三角形面片 构成界面的最小元素,由三角形围成的有向面片。
- (4) 简单弧 由若干条有向边顺序连接而成,分为闭合弧与非闭合弧;除弧的起点与终点外,弧上的其他节点有且只有两条有向边与其相连。
- (5) 界线 由若干条简单弧顺序连接而成,构成界面的内部与外部边界线。
- (6) 线框架 由若干条不重叠的简单弧连接而成,是模型中所有地层界面、断层面、边界面、开挖面等界面的交线以及边界线经过处理后形成的空间简单弧的集合。

(7) 简单曲面 由若干个面元组成的空间有界、连续曲面,有一个外边界环与若干个相互独立的内边界环。任意简单曲面内部不存在一条界线可以将外边界环划分成两个部分。

(8) 界面 由若干个简单曲面组成的有界曲面,包括地层界面、断层面、边界面、开挖面等。

(9) 简单块体 由若干个简单曲面围成的连通的封闭区域,只有一个外边界,但可以有若干个相互独立的内边界。

(10) 实体 由若干相关简单块体组成,可以表示地层、夹层、断层带以及模型整体。

各几何元素之间的关系见图 1。

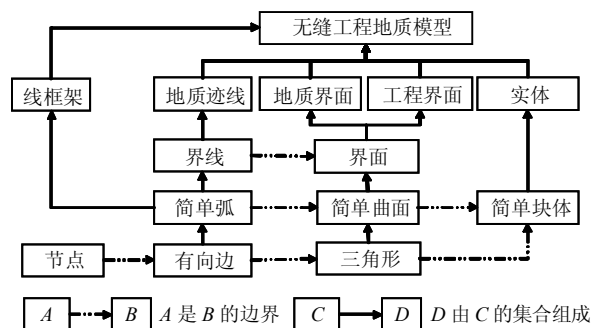


图 1 几何元素的关系

Fig.1 Relationships of geometrical components

2.3 建模方法

按照上述定义,建立无缝工程地质模型的关键是要保证不同界面之间的无缝连接,即要求不同界面在相交处几何连续、拓扑相容。为此,笔者提出了一种基于模型线框架的无缝建模方法,其总体思路为:先构建模型线框架,然后以线框架为约束重构各种界面,再用块体搜索方法重构实体。具体步骤如下:

- (1) 模拟模型中的各类界面形成原始界面集;
- (2) 采用界面求交与界线求交方法构建模型的线框架,并形成所有原始界面的界线轮廓;
- (3) 根据界面的交切状况,编辑所有原始界面的界线轮廓,删除多余部分;
- (4) 以编辑后的界线轮廓为约束,重新剖分与插值所有界面;
- (5) 利用块体搜索技术搜索块体,并根据属性将块体进行归类,形成三维无缝地质模型。

3 系统的总体设计

3.1 系统结构设计

本文中的三维无缝工程地质建模系统包括 3 个

部分: 原始数据处理、实体建模工具与辅助工具。

原始数据处理是将钻孔数据、地质平面与剖面图、物探数据与遥感数据等信息转换为模型所需的数据格式。由于 CAD、GIS 以及其他解译工具能够很好地处理上述格式的数据, 因而本系统只提供数据校核功能与输入数据的标准格式。实体建模工具部分是系统的核心, 主要实现以下功能: 曲面与实体剖分、曲面插值、界面求交、构建模型线框架、曲面编辑与重构与空间块体搜索等。辅助工具包括: 数据存储、图形转换、图形可视化与模型的应用等。图 2 按照建模流程给出了系统的结构设计图。

系统的开发环境为 VC++, 主要功能模块被开发成 COM 组件。另外, 由于三角剖分方法成熟稳定, 便于曲面求交、块体搜索等计算, 因而本文采用三角曲面模拟各种界面。

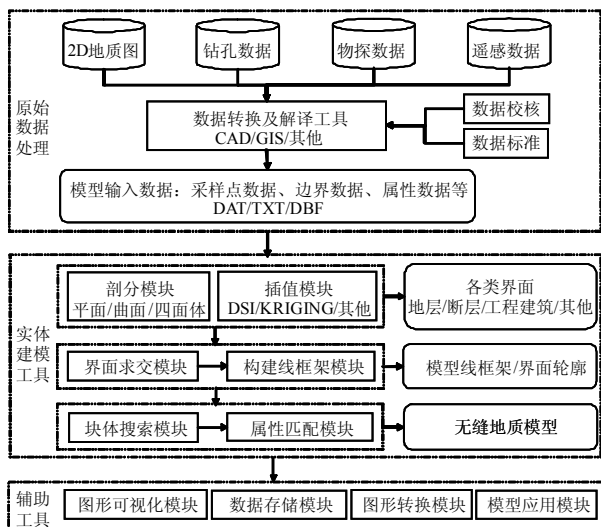


图2 无缝工程地质建模系统的总体结构

Fig.2 Frame of seamless engineering geological modeling system

3.2 系统的主要功能模块

(1) 剖分模块 剖分是地质建模的重要内容, 是创建界面与体剖分的必备工具。本系统实现了空间曲面的三角剖分、平面有界区域的三角剖分与空间区域四面体剖分。

(2) 插值模块 系统提供了多种插值方法, 包括: 离散光滑插值 (DSI)、泛克里金插值 (KRIGING)、距离权插值 (IDW) 等。

(3) 曲面求交模块 曲面求交模块主要用于计算不同曲面之间的交线, 是保证界面之间无缝连接的关键步骤。本系统中的曲面求交涉及两种类型: ①不考虑断层影响的求交问题, 如地层界面之间的交线, 这种交线可以直接利用常规的三角曲面求交

算法得到。②断层轨迹线的求取问题, 即考虑断层切割与错动影响的求交问题。本系统采用局部迭代求交算法^[24]将原始断层面与地层面之间的一条交线分解成分别位于上下盘的两条断层轨迹线。

(4) 创建线框架模块 线框构建模块的功能是将所有界面的边界线、界面之间的交线进行归一化处理, 将这些界线离散成简单弧的组合, 并保证每条简单弧的唯一性, 从而为模型建立一个统一的线框架。构建模型线框架的同时也为每张界面创建一个与其他界面相协调的界面轮廓, 保证了不同界面之间交线的一致性。

(5) 块体搜索模块 经过界面编辑与重构, 模型中的所有原始界面已转化成实际界面。这些界面将模型划分成若干封闭区域, 而且界面之间已经实现了无缝连接, 块体搜索的任务就是为每个封闭区域寻找边界, 进而形成封闭块体。

(6) 数据存储模块 系统提供了一个关系型数据库进行模型数据的存储, 该数据库由节点表、有向边表、简单弧表、界线表、三角形表、简单曲面表、界面表、简单块体表、实体表等组成。

(7) 数据转换模块 本系统可以将模型数据转换成 DXF 格式, 与 CAD 软件共享, 还可以将模型转换成 ANSYS、FLAC 等数值模拟软件的几何模型。

(8) 图形可视化模块 系统基于 OpenGL 开发了图形可视化模块, 负责图形绘制、图形移动与旋转、对象捕捉、材质光照设置、反走样等。

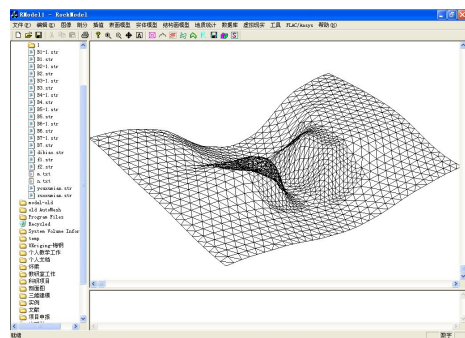
4 系统关键功能的开发

4.1 创建形态复杂的地质界面

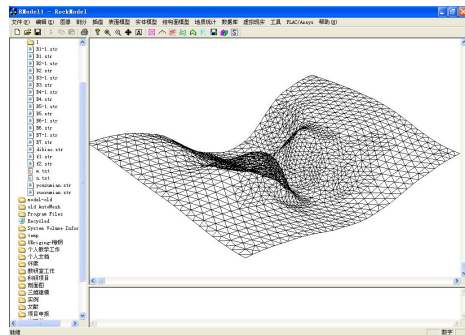
在创建地质界面时, 可以先将该界面在某个平面的投影区域剖分成平面网格, 然后对网格节点进行空间插值, 得到地质界面。但用这种方法模拟形态复杂的地质界面时 (如多值曲面、有垂直陡坎的地形面等), 网格质量很差, 妨碍进一步的建模工作, 甚至导致建模失败。为此, 笔者提出一种创建形态复杂地质界面的方法, 该方法先利用常规方法创建初始界面, 然后在初始界面上布置加密点, 并进行三维曲面剖分, 再用离散光滑插值方法 (DSI) 进行空间动态插值, 生成形态复杂的地质界面。下面以创建某个有近垂直陡坎的地形面为例介绍该方法。

(1) 创建初始界面

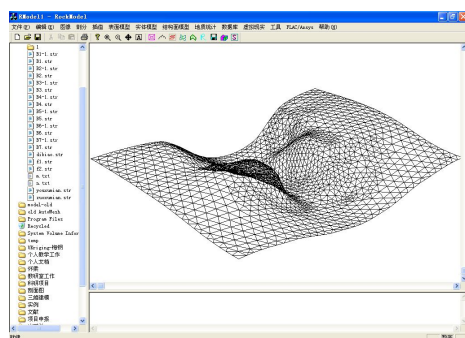
将该地形面在水平面上的投影区域剖分成三角形网格, 然后利用 KRIGING 或 DSI 方法进行插值, 得到初始曲面 S , 如图 3 (a)。



(a)



(b)



(c)

图 3 创建形态复杂的插值曲面实例

Fig.3 Example for creating interpolation surface with complex shape

(2) 加密点布置

由于插值的影响,位于 S 上坡度较大的区域上的网格将被拉长,质量显著降低,需要重新布置节点。本文采用二分法进行节点加密,即将三角形网格中长度大于设定阈值的边的中点作为新节点,再按照图 4 所列 3 种情况重新连接三角形网格,并将新三角形投入下一循环进行边长判断,直到所有边长均小于或等于相应的阈值为止。图 4(a)、(b)与图 4(c)分别为一个三角形有 3 条、2 条与 1 条边大于设定阈值时,加设节点与三角形重划分方法。边长阈值可以按照加密区的划分来设定,本文采用多级加密的办法将曲面划分成多个加密区,不同加密区采用不同的边长阈值。

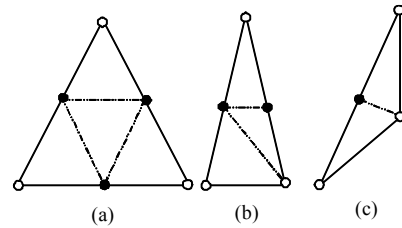


图 4 加密结点与单元重划分

Fig.4 Means of adding nodes and re-meshing

(3) 插值曲面的三维剖分

在布置加密节点后,采用推进波前法(AFT)进行网格剖分。在网格推进过程中,要求每个新生成三角形满足如下规则:

①钝角规则 从某个前沿三角形的一条边进行扩展生成新三角形时,应保证这两个三角形的夹角为钝角。这个条件在后面所有条件均不满足时可以放宽,以便生成与前沿三角形成锐角的新三角形。

②顶角最大规则 保证新三角形中与扩展边相对的顶角是所有可能构成的三角形的相应顶角中的最大。

③无交叉规则 保证新生成三角形与原有三角形只存在相离、共享 1 个节点、共享 1 条边 3 种关系,不存在交叉与重叠关系。

④同向邻域三角形投影无重叠规则 当某个邻域三角形的法向与新三角形的法向之间的夹角为锐角时,如果将该邻域三角形投影到新三角形所在的平面,则投影与新三角形无重叠。这里将与新生成三角形共享节点的所有三角形称为邻域三角形。

在上述规则的基础上,可以按照 AFT 进行网格剖分,剖分过程与平面三角网格剖分相同,这里不再赘述。图 3(b)是在 S 上重新布置节点,再进行曲面剖分得到的曲面。从图上可以看出,陡坎处被拉长的三角形网格得到明显改善。

(4) 曲面的空间动态插值

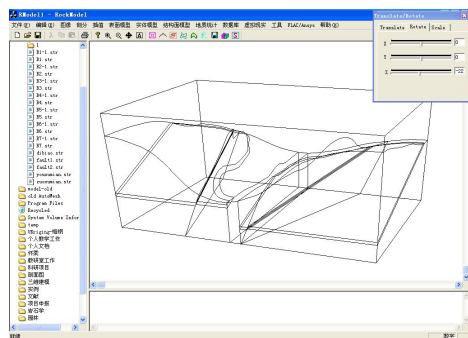
用 KRIGING 等方法插值生成曲面时,往往需要一个参考平面,未知点处某个物理量(如高程)的估计值与该点在参考面上的坐标有关,而且所有未知点的估计值均由样本点一次插值得到。这种插值方法一般不能用于模拟多值曲面以及有陡坎的曲面。DSI 方法是一种无维数的插值方法^[8],未知点的插值计算只依赖于拓扑网格而不依赖于平面或空间坐标,而且计算过程一般采用迭代方式,有利于动态逼近采样点。这些特点使得 DSI 在模拟多值曲面时有明显优势。本文采用 DSI 进行曲面的动态插值,相关内容请参见相关文献。图 3(c)是在图 3(b)的基础上进行动态插值,得到的曲面。

4.2 创建模型的线框架

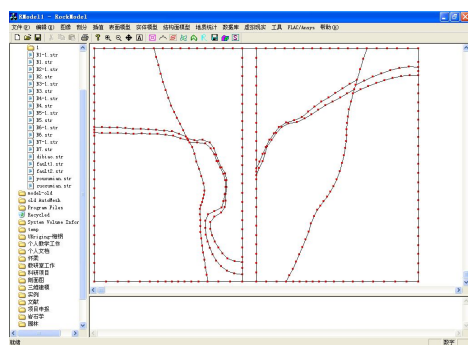
构建模型线框架包括以下3个步骤:

(1) 创建初始线框架

进行界面求交运算得到任意两张界面之间的交线,再集合各界面的边界组成界线集合,生成初始线框架。



(a)



(b)

图5 创建模型线框架实例

Fig.5 Example for creating wire frame of model

(2) 界线求交

求初始线框架中任意2条界线之间的交点,并将每个交点作为唯一对象插入到对应的界线中。

(3) 离散界线生成简单弧

按照简单弧的定义,将初始线框架上的界线离散成简单弧的集合,并保证每条简单弧的唯一性;然后在每条简单弧上按弧长等距离布置新节点,并删掉除端点以外的旧节点。

经过上述过程即可得到由简单弧组成的模型线框架。图5(a)为模型的线框架,图5(b)为模型地表面的线轮廓。

4.3 界面编辑与重构

生成模型线框架的过程实际上也是生成所有界面的线轮廓过程,任意界面的线轮廓均为线框架的一部分。界面编辑与重构就是在这种界面线轮廓的基础上删除多余部分,再生成空间曲面。具体过程如下:

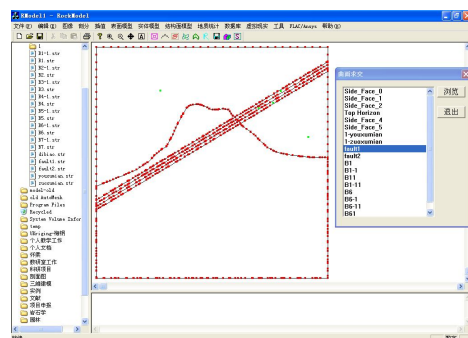
(1) 绘制界面线轮廓 按顺序选取每一张需要编辑的界面,绘制出相应的界面线轮廓。

(2) 搜索闭合环 由于无缝模型是有界的,所有界面也一定是有界的,因此,可以利用闭合环搜索方法,将每一张界面划分成若干封闭区域。

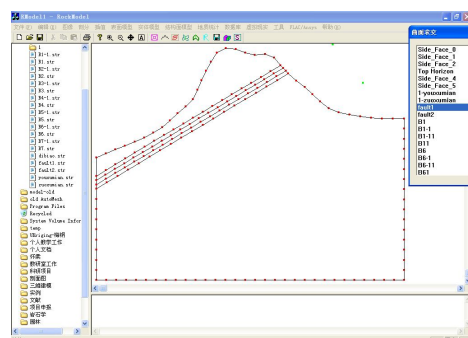
(3) 进行人机交互操作,删除多余的封闭区域。一般情况下,可以根据界面之间的交切关系,判断哪些区域应该删除,用鼠标直接选择这些区域。

(4) 重构界面 对每一个闭合环进行空间曲面剖分与动态三维动态插值生成空间曲面。

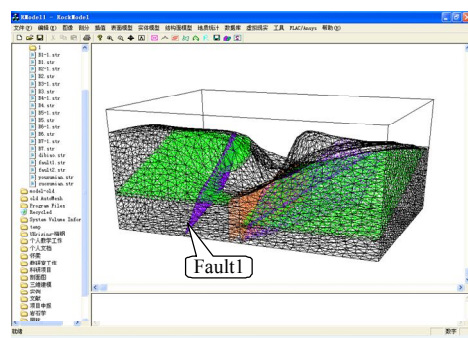
图6给出了界面 Fault1 的编辑与重构过程,图6(a)为该界面的线轮廓,由多个闭合环组成,图6(b)为删掉多余部分后得到的界面轮廓,图6(c)重构后的界面。



(a)



(b)



(c)

图6 界面编辑与重构过程

Fig.6 Processes of interface modification and reconstruction

4.4 块体搜索模块

经过界面编辑与重构,模型中的所有原始界面已转化成实际界面。这些界面将模型划分成若干封闭区域,而且界面之间已经实现了无缝连接。但每个区域由哪些界面或界面的部分封闭而成还没有确定。块体搜索的任务就是为每个封闭区域寻找边界。本文将这种封闭区域称为简单块体,每个简单块体均有一个封闭的外边界与 0 到若干个封闭内边界。由于界面均为三角曲面,而简单块体的边界来自于模型的界面,因此,所有简单块体就由一系列三角形单元围成。块体搜索就是为每个简单块体搜索由三角形单元组成的边界。

块体搜索的主要过程简述如下:

Step1: 将模型界面中的所有三角形存储到一个数组 T 中,并创建一个存储简单块体的数组 B ;

Step2: 设置三角形-简单块体关系属性,每个位于模型外边界的三角形设置 $\text{isBelongBlk}[0]=1$ 和 $\text{isBelongBlk}[1]=0$;位于其他界面上的三角形设置 $\text{isBelongBlk}[0]=0$ 和 $\text{isBelongBlk}[1]=0$;

Step3: 从 T 中按顺序选择一个起始三角形 ε ,并使其 $\text{isBelongBlk}[0]=1$ 或 $\text{isBelongBlk}[1]=1$;创建一个简单块体 b 存入到数组 B 中,并将 ε 作为 b 的一个边界三角形存入到 b 的边界三角形集 t 中;当 ε 的 2 个三角形-简单块体关系属性均为 1 时,则从数组 T 中将其删除;

Step4: 按顺序选取 ε 的一条边,从过该边的所有三角形中找出与 ε 夹角最小的三角形 ε' 作为 b 的另一个边界三角形,并存入 t 中,令 ε' 的属性 $\text{isBelongBlk}[0]=1$ 或 $\text{isBelongBlk}[1]=1$;

Step5: 重复过程 Step4 直到 ε 的所有相邻三角形均找到为止;

Step6: 从 t 中选择另一个三角形作为起始单元,重复进行 Step4 与 Step5 指导 b 闭合为止;

Step7: 重复进行 Step3~6 直到 T 中的三角形全部被删除。

图 7 为经过块体搜索后得到的实体模型。

4.5 三维岩体质量分级

一般情况下,地质工程师在一组不同高程的平面地质图上进行岩级分区,勾画出不同级别岩体的分界线。将不同高程地质图上相应的岩级分界线组合起来,就构成了岩级分界面的轮廓,进而利用剖分与插值技术形成岩级分界面。

在无缝工程地质模型上进行三维岩体质量分区有两种方法:一是将岩级分界面作为一种界面直接加入到原始界面集中,将岩体质量分区与建模融为

一体,在建模过程中直接完成质量分区;二是在建模完成后,将模型剖分成四面体网格,直接对每个四面体单元进行布尔运算,判别是否落在某个岩级质量分区内,从而实现岩体质量分区。图 8 为按照岩体质量分级显示的三维模型,图 8(a)、(b)分别为水平切面与垂直切面模型。

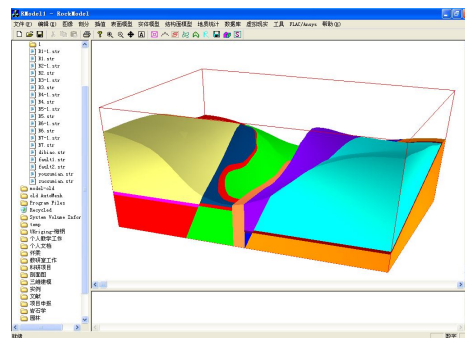


图 7 搜索后得到的模型块体

Fig.7 Blocks of model after blocks searching

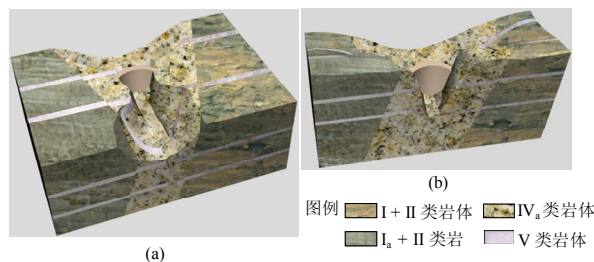


图 8 三维岩体质量分级模型

Fig.8 Model of rock quality classification

5 结 论

(1) 以边界表示法为基础,提出一种基于模型线框架的无缝建模方法,其总体思路为:先构建模型线框架,然后以线框架为约束重构各种界面,再用块体搜索方法重构实体。

(2) 进行了系统结构设计,将系统划分成 3 个部分:原始数据转换工具、实体建模工具与辅助工具,包括剖分、插值、曲面求交等 8 个功能模块,提出并实现了复杂形态界面创建、模型线框架构建、曲面编辑与重构、块体搜索、岩体质量三维分级等关键算法。

(3) 系统可以实现复杂地质体的无缝建模与可视化,并可以为数值模拟软件直接提供计算模型。

参 考 文 献

- [1] MALLETT J L. Geomodeling[M]. New York: Oxford University Press, 2002, 624pp.
- [2] BREUNIG M. An approach to the integration of spatial

- data and systems for a 3D geo-information system[J]. **Computers & Geosciences**, 1999, 25 (1): 39—48.
- [3] SHUMILOV S, BREUNIG M. Integration of 3D geoscientific visualization tools with help of a geo-database kernel[C]//6th EC-GI & GIS Workshop. Lyon: The Spatial Information Society-Shaping the Future, 2000: 66—76.
- [4] WU Q, XU H, ZOU X K. An effective method for 3D geological modeling with multi-source data integration[J]. **Computers and Geosciences**, 2005, 31(1): 35—43.
- [5] GJOYSTDAL H, REINHARDSEN J E, ASTEBOL K. Computer representation of complex 3-D geological structures using a new solid modeling technique[J]. **Geophysical Prospecting**, 1985, 33: 1195—1211.
- [6] YFANTIS E A. Simulation of geological surfaces using fractals[J]. **Mathematical Geology**, 1988, 20(6): 667—672.
- [7] FISHER T R, WALES R Q. 3D solid modeling of sandstone reservoirs using NURBS[J]. **Geobyte**, 1990, 5 (1): 39—41.
- [8] MALLET J L. Discrete smooth interpolation[J]. **Computer-Aided Design**, 1992, 24 (4): 263—270.
- [9] MALLET J L. Discrete modelling for natural objects[J]. **Mathematical Geology**, 1997, 29 (2): 199—219.
- [10] WU LIXIN. Topological relations embodied in a generalized tri-prism (GTP) model for a 3D geoscience modeling system[J]. **Computers & Geosciences**, 2004, 30: 405—418.
- [11] DE KEMP E A. 3-D visualization of structural field data: examples from the Archean Caopatina formation, Abitibi greenstone belt, Quebec, Canada[J]. **Computers & Geosciences**, 2000, 26(5): 509—530.
- [12] ZHONG DENG-HUA, LI MING-CHAO, SONG LING-GUANG, et al. Enhanced NURBS modeling and visualization for large 3D geoengineering applications: An example from the Jinping first-level hydropower engineering project, China[J]. **Computers & Geosciences**, 2006, 32: 1270—1282.
- [13] 罗周全, 吴亚斌, 刘晓明, 等. 基于 SURPAC 的复杂地质体 FLAC^{3D} 模型生成技术[J]. **岩土力学**, 2008, 29(5): 1334—1338.
- LUO Zhou-quan, WU Ya-bin, LIU Xiao-ming, et al. FLAC^{3D} modeling for complex geologic body based on SURPAC[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2008, 29(5): 1334—1338.
- [14] 李明超, 胡兴娥, 安娜, 等. 滑坡体三维地质建模与可视化分析[J]. **岩土力学**, 2008, 29(5): 1355—1360.
- LI Ming-chao, HU Xing-e, AN Na, et al. 3-D geological modeling and visual analysis of landslide mass[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2008, 29(5): 1355—1360.
- [15] 徐能雄, 段庆伟, 田红, 等. 岩体结构三维无缝建模与四面体优化剖分[J]. **岩土力学**, 2008, 29(10): 2811—2816.
- XU Neng-xiong, DUAN Qing-wei, TIAN Hong, et al. 3D seamless modeling of rock-mass structure and its optimizing tetrahedral mesh generation[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2008, 29(10): 2811—2816.
- [16] AMINZADEH F, BURKHARD N, NICOLETIS L. et al. SEG/EAEG 3-D modeling project 2nd progress report[J]. **First Break**, 1994, 12(10): 489—496.
- [17] 朱良峰, 潘信, 吴信才. 三维地质建模及可视化系统的设计与开发[J]. **岩土力学**, 2006, 27(5): 828—832.
- ZHU Liang-feng, PAN Xin, WU Xin-cai. Design and development of 3D geological modeling and visualization system[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2006, 27(5): 828—832.
- [18] 郑贵洲, 申永利. 地质特征三维分析及三维地质模拟研究现状[J]. **地球科学进展**, 2004, 19(2): 218—223.
- ZHENG Gui-zhou, SHEN Yong-li. 3D analysis of geological characteristics and status research of 3D geology modeling[J]. **Advance in Earth Sciences**, 2004, 19(2): 218—223.
- [19] 汤华, 葛修润, 王浩, 等. 地下厂房工程中三维地质建模技术研究[J]. **岩石力学与工程学报**, 2007, 26(Supp.1): 217—220.
- TANG Hua, GE Xiu-run, WANG Hao, et al. Study on 3D geological modeling in underground powerhouse engineering[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2007, 26(Supp.1): 217—220.
- [20] 柴贺军, 黄地龙. 大型矿山岩土工程可视化模型与应用[J]. **岩石力学与工程学报**, 2005, 24(14): 2526—2530.
- CHAI He-jun, HUANG Di-long. 3D visualization model of mining geotechnique and its application[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2005, 24(14): 2526—2530.
- [21] 白世伟, 贺怀建, 王纯祥. 三维地层信息系统和岩土工程信息化[J]. **华中科技大学学报(城市科学版)**, 2002, 19(1): 23—26.
- BAI Shi-wei, HE Huai-jian, WANG Chun-xiang. 3-Dimension strata information system and information of geotechnical engineering[J]. **Journal of Huazhong University of Science & Technology (Urban Science Edition)**, 2002, 19(1): 23—26.
- [22] 宁书年, 李育芳. 三维地质体可视化软件理论探讨[J]. **矿产与地质**, 2002, 16(4): 254—255.
- NING Shu-nian, LI Yu-fang. Discussion of the software theory for the visualization of 3D geological bodies[J]. **Mineral Resources and Geology**, 2002, 16(4): 254—255.
- [23] CAUMON G, LEPAGE F, SWORD C, et al. Building and editing a sealed geological model[J]. **Mathematical Geology**, 2004, 36 (4): 405—424.
- [24] 徐能雄, 田红, 于沐. 适于岩体结构三维建模的非连续地层界面整体重构[J]. **岩土工程学报**, 2007, 29(9): 1360—1366.
- XU Neng-xiong, TIAN Hong, YU Shu. Integrative reconstruction method of non-continuous stratum surface suitable for 3D rock-mass structure modeling[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2007, 29(9): 1360—1366.