

# 3D-GIS 的高切坡一体化模型设计与实现

唐中实, 王彦佐, 辛宇, 吴奋陟, 周伟强, 周斌

(清华大学 3S 中心, 北京 100084)

**摘要:** 现有的 3D-GIS 空间数据结构在构建地下数据及地上一地表—地下三维空间对象一体化表达方面存在不足。本研究扩展了传统 GIS 三维空间数据结构, 提出了地上一地表—地下三维空间对象一体化表达模型, 并在关键技术研究基础上, 用 C# + OpenGL 实现了模型可视化, 并实现了地上一地表—地下三维空间对象浏览、查询、剖面分析等功能。此研究成果应用到了三峡库区高切坡监测预警信息系统中, 突破了传统三维空间可视化表达和空间数据结构的局限, 具有重要的理论和实践意义。

**关键词:** 三维 GIS; 一体化建模; 高切坡; 可视化; 空间分析

**DOI:** 10.3724/SP.J.1047.2011.00102

## 1 引言

高切坡是指三峡库区由于工程活动对自然斜坡的改造而形成、且高度超过一定值的人工边坡。由于大规模的移民迁建工程建设, 三峡库区形成了大量的高切坡。近年来, 三峡库区高切坡险情/灾情时有发生, 损失惨重, 教训深刻。因此, 引入信息化技术与方法对高切坡的监测以及预警分析工作的意义十分重大。

高切坡是一类特殊的地质体, 它有着地质体共同的特性: 稳定性分析非常重要; 与其他地质体不同, 高切坡规模较小, 分布密集, 构造复杂, 大部分是由于人工开挖形成的, 人类活动对其影响非常大。同时, 高切坡与各种生产生活设施的距离非常近, 一旦发生灾害造成的可能损失巨大。

对高切坡进行建模分析时, 既需表达坡面及周边的地质构造以分析其稳定性; 还需关注其周边可能的影响高切坡, 以及被其影响的建筑、道路等设施调查。

3D-GIS 能将坡体以及周边的各种空间对象进行三维展示; 能结合对象的空间信息与属性信息开展分析、能对各空间对象的相互位置及拓扑关系作显示和分析; 以及挖掘对象隐含的信息。所以, 使用 3D-GIS 技术来进行高切坡的可视化建模及辅助

分析是必要和有意义的<sup>[1-3]</sup>。

3D-GIS 自上世纪 80 年代出现以来, 得以较多应用。但其领域仍较有限, 而且, 在数据结构和算法方面还有一些难题未能解决<sup>[4-6]</sup>。

鉴此, 本文提出了“地上一地表—地下空间三维一体可视化建模”的概念。主要研究内容: (1) 在三维空间中直观地表现高切坡及其周边的地形、生产生活设施等; (2) 表达高切坡坡体范围内的地质地层, 为稳定性分析提供信息; (3) 通过相关分析统计, 实现高切坡的致灾评价的目的。

## 2 3D-GIS 的高切坡一体化设计

### 2.1 模型概念与具体内容

“地上一地表—地下空间三维一体可视化建模”概念的核心内容包括: (1) 在选取合适数据模型的基础上, 扩展现有 3D-GIS 空间数据结构, 使其能够同时表达地上、地表、地下多种空间对象; (2) 基于同一视口对地上、地表、地下多种空间对象实现可视化, 以及相关的浏览、分析等功能, 对多种空间对象进行一体化三维展示及分析。

### 2.2 数据模型选择及空间分析实现思路

数据模型是指将三维对象进行分解或拆分以

收稿日期: 2010-06-03; 修回日期: 2010-12-02。

基金项目: 国家自然科学基金项目(41071239)。

作者简介: 唐中实(1962-), 男, 博士, 副教授, 清华大学 3S 中心主任, 主要研究方向为地理信息系统与遥感。

E-mail: Tzs@Tsinghua.edu.cn

方便存储、编辑、可视化表达等操作的算法,是构建图层数据结构,并实现三维建模及可视化的前提和基础<sup>[6]</sup>。

研究中采用图层作为空间对象数据管理、显示、处理和存储等相关操作的载体。与二维 GIS 相同,程序能同时处理和显示多个图层,但每个图层只包含一种类型的数据(文中将高切坡相关空间对象分为地上、地表,地下三个主要类型)。

空间对象三维数据模型的特点如下<sup>[6-8]</sup>:

(1)面表示的模型:使用一系列空间面单元来组合成空间对象的表面以表达空间对象。其数据量小,便于模型构建及数据更新,表达效果好,显示效率高,但难以表达复杂对象,以及进行复杂的空间分析。

(2)体表示的模型:使用一系列小体元组合成空间对象的实体。适于空间操作与空间分析,能够表达复杂的空间对象,以及拓扑关系,但数据量大,模型构建与更新复杂,模型表达效果较差。

(3)混合表示的模型:系上述模型(两种或多种)的综合应用,能够充分发挥各种模型的优点,针对性强,但实现难度大,通用性差。

本文研究中需要从中选择一种模型作为基础构建图层数据结构,应当结合高切坡的具体情况,考虑以下因素进行模型选择:模型生成及格式转换难度、模型显示效果、模型处理效率、空间浏览及分析功能实现难度等。

如上文提到,由于高切坡的特殊性,需要对坡体周边的地形、地层、钻孔、坡面、建筑物等多种空间对象进行表达。地表面以上的空间对象(如地形、坡面、建筑物等)主要用于直观展示,以及影响分析,特点是模型精细、数据量大。以高切坡坡面为例,在实际项目应用中,一个长宽均 100m 左右的坡面在模型优化抽稀前包含大约十万个左右的三维点。而地表面以下的空间对象(如地层、钻孔等)主要用于展示,以及稳定分析,特点是需要根据少量的已经数据生成未知地层的模型,拓扑严密,需进行空间分析等。

在上述三种数据模型中,混合模型在需要表达的空间对象类型较多时,算法实现难度加大,效率变低,而且各类数据的边界处理和集成的实现也更困难,所以,本文研究中不适宜采用混合模型。但是混合模型的综合应用,取长补短的思想非常值得本文借鉴。

鉴于面和体模型的优劣<sup>[9-10]</sup>,如表 1,本文研究中地表面以上的对象由于需要进行海量的数据显示、处理以及大量的用户交互,首先应考虑模型的处理和显示效率,对此,面模型较优。但面模型在地下对象表达及空间分析上较弱,导致了大数据量复杂模型的处理效率与空间分析功能实现的矛盾。综合考虑系统功能需求,以及实现难度,本文中采用如下方法:

(1)所有空间对象均选择面模型为基础构建数据结构,以保证模型的显示和处理效率。

(2)在对象模型构建和空间拆分的过程中,保证其空间拓扑的完整性,即:在将空间对象拆分成面片的过程中,保证这些面片能够构成闭合且不重叠的空间表面,且不同空间对象表面的拓扑关系能如实反映对象在真实空间中的邻接关系。

(3)可依据空间对象的表面围成的范围来反算出空间对象的实体,进而实现相关的空间分析功能。

表 1 数据模型比较  
Tab. 1 Comparison of two models

| 因素     | 面表示的模型 | 体表示的模型 |
|--------|--------|--------|
| 地表数据生成 | ✓      |        |
| 地上数据生成 | ✓      |        |
| 地下数据生成 |        | ✓      |
| 显示效果   | ✓      |        |
| 显示效率   | ✓      |        |
| 空间分析实现 |        | ✓      |

### 2.3 数据结构的设计

选定了数据模型后即可根据模型构建图层数据结构。数据结构是指数据间的相互关系和逻辑结构,进行数据结构设计时主要考虑的因素:(1)数据元素本身的结构;(2)数据元素之间的关系及其复杂程度;(3)需要对数据元素进行的操作;(4)具体的功能需求等。

数据结构应具有完备性,能包含空间对象尽可能全面的信息,具体包括:对象坐标范围、对象表面划分和相应坐标、表面纹理信息等空间信息,以及地质地层信息、建筑物信息等属性数据。这些元素之间为一对多逐层包含关系。

数据元素间操作包括:数据生成、读取及查询、修改及局部删除等。这些操作均为父结点与子结点之间的互操作,并不涉及复杂的多对多结点间操

作与运算。

故此,本文中选用树状数据结构,图层为根结点,包括图层类型、空间对象、空间信息、属性信息等各级子结点,各子结点再进一步细分,包含对应的详细数据。在构建数据结构完成后,还需要以数据结构实现父结点与子结点之间的添加、查询、删除等功能。

数据结构树状结构如图 1 所示:

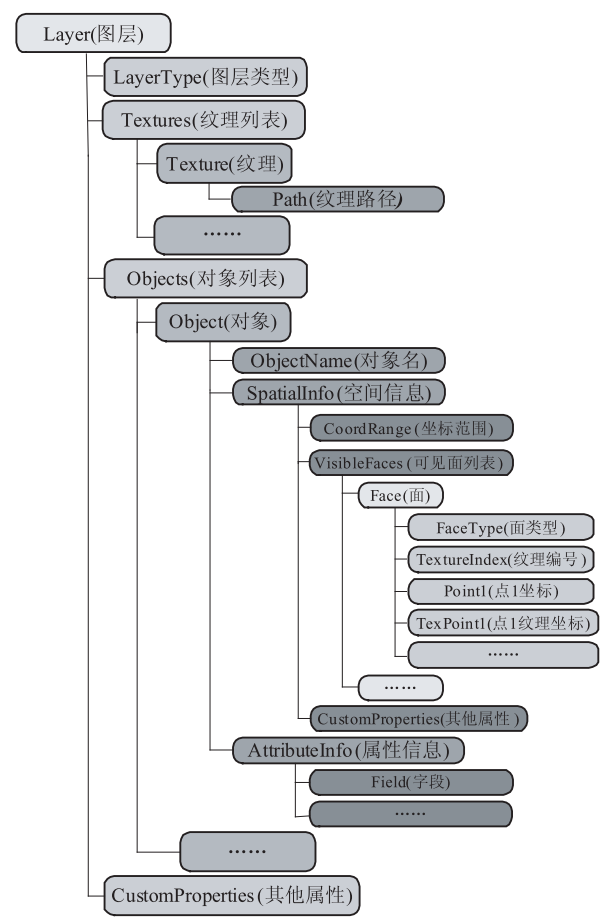


图 1 图层数据结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of layer data structure

图层主要信息保存在纹理列表(Textures)及对象列表(Objects)中。纹理列表包含图层对应所有纹理贴图的编号及路径。对象列表包含图层所有对象的空间信息与属性信息。对象的空间信息主要包含构成对象的外表面的三角形面片,每一个面(Face)对象对应一个三角形,包含各顶点的坐标及纹理坐标等信息。

空间对象的属性信息按“字段(Field)一值(Value)”的对应关系保存在数据结构中并与空间信息相关联。这些数据反映了空间对象的基本情

况,并且是空间分析功能必需的数据源。

图层选用 XML 文件格式储存,该格式使用文本信息来保存结构化的数据,易于读取和修改,且 XML 格式能够嵌入丰富的其他信息。该格式可扩展性好,允许开发者根据自己的需要定义自己的元素,而且其相互嵌套的标签式存储方式能完美地表达图层的树状数据结构。

2.4 一体化模型实现的技术流程

一体可视化建模的主要技术流程为:(1)将选定多种格式的源数据按照上述定义的数据结构进行格式转换,(2)该数据结构使用 OpenGL 对空间对象实现三维可视化,(3)在实现空间浏览、查询和剖切分析等功能的基础上,实现一体可视化建模的应用,技术流程图如图 2 所示:

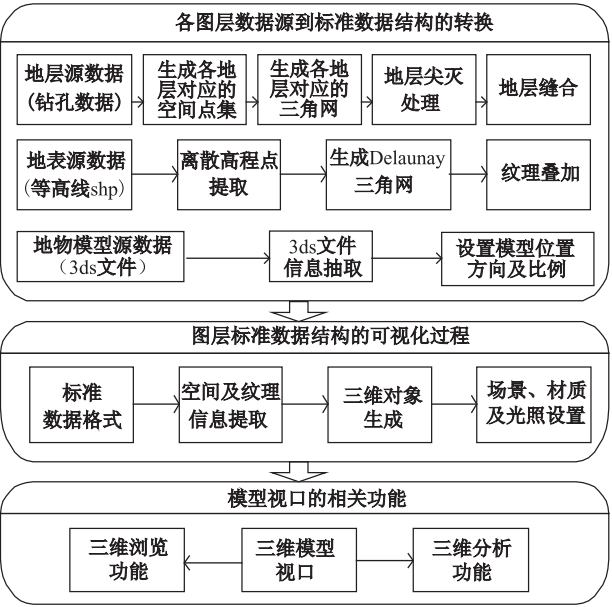


图 2 一体化模型实现主要技术流程

Fig. 2 Technical process of the integrated model

3 3D-GIS 的高切坡一体化模型实现与应用

3.1 模型数据生成

一体化模型数据包括地上、地表、地下 3 类。本文研究中为这 3 类数据分别选择了一种有代表性的源数据,实现了这几类源数据到标准图层数据结构(见第 2.3 节)的格式转换过程。其中,地下数据选用钻孔数据作为源数据,地表数据选用 shapefile 格式等高线作为源数据,地上数据选用 3ds 格

式模型作为源数据。

3.1.1 地下数据的生成及格式转换

地下数据主要指地质地层信息,以地质钻孔数据为源数据,将源数据中孔口的坐标、标高及各地层厚度等信息提取出来,作为空间信息生成地层对象,其他信息作为地层的属性信息存入图层。

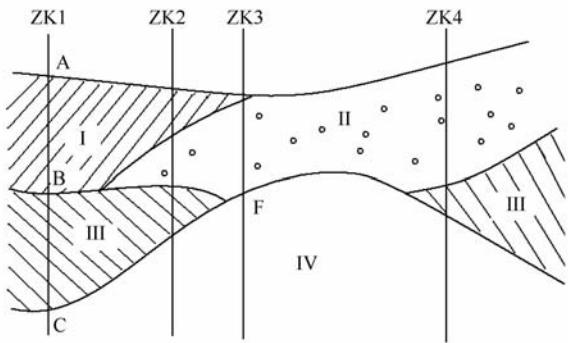


图 3 地层分布及处理示意图

Fig. 3 Schematic diagram of stratum distribution

生成过程中,先获取目标范围内地层的总体分布顺序:由于地层的形成过程,以及地质构造等因素,各地层的分布不可能是全部是水平且均匀的,还可能在某些区域出现地层尖灭现象(即某一地层在一定范围内缺失,可参考图 3 中的地层 III 在中部的缺失)。所以,需综合考虑所有钻孔内的地层分布情况,得到该区域内地层的总体分布顺序,例如如图 3 中地层总体分布顺序为 I - II - III - IV<sup>[11-12]</sup>。

之后计算各地层分界面的空间点集,每个地层包括上下两个表面,分别对应一个点集。根据地层总体分布顺序及各钻孔中地层分界点的坐标,得到各分界面点集。例如图 3 中,钻孔 ZK1 中,点 A 归入地层 I 上表面,点 B 归入地层 I 下表面,点 B 归入地层 II 上表面及下表面,点 B 归入地层 III 上表面,点 C 归入地层 III 下表面。

根据各地层面对应点集,使用三角剖分算法生成地层的上、下表面,后对两个表面的外边界进行缝合,地层数据生成完毕。图 4 为缝合后效果示意图。

经过该方法生成的地层数据中,每个地层均有各自的上、下、侧三个表面,这 3 个表面构成了该地层的封闭且不重叠的外表面,且保证了与其他地层表面严密的拓扑关系。在需要空间分析时,即可以按照该表面,反算出空间实体,并对其进行格网、四面体或棱柱剖分,进而实现相应的空间分析功能。

地层生成过程中,面模型在表达复杂地质构造的处理上较弱,针对这一情况,本文还研究并实现

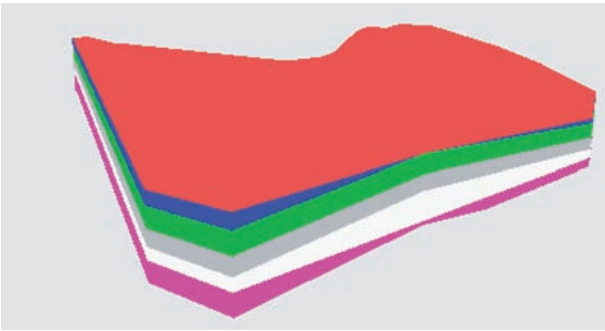


图 4 地层数据生成示意图

Fig. 4 Schematic diagram of stratum data generation

了面模型的尖灭地层处理方法,具体方法为:在计算各地层面空间点集时,若某钻孔中缺失了某个地层,在点集生成时将上一地层的下分界点作为该地层的上下分界点归入点集。例如,图 3 中钻孔 ZK1 缺失了地层 II,在点集生成时将 B 点归入地层 II 的上表面及下表面点集中。三角剖分生成地层面后,由于将相同的点存入了上下表面,所以,地层尖灭部分的上下表面将出现重合现象,检测重合的部分,将其从地层中删除即完成了尖灭处理。

3.1.2 地表数据的生成及格式转换

地表数据是指地形及用遥感数据表示的地表信息,源数据使用 shapefile 格式的等高线数据,以及高空间分辨率遥感数据。地表数据的生成算法采用成熟的 Delaunay 三角网方法,基本流程为:从等高线中提取出离散的高程点,使用三角剖分算法处理这些高程点,生成地面对应的三角网。

三角网生成后,将对应区域经过纠正、裁剪等处理的高空间分辨率遥感图像或经纠正处理的实际照片作为纹理叠加到三角网上,并计算三角网中每一个顶点的纹理坐标,完成地表数据的生成。地表数据生成结果见图 5。

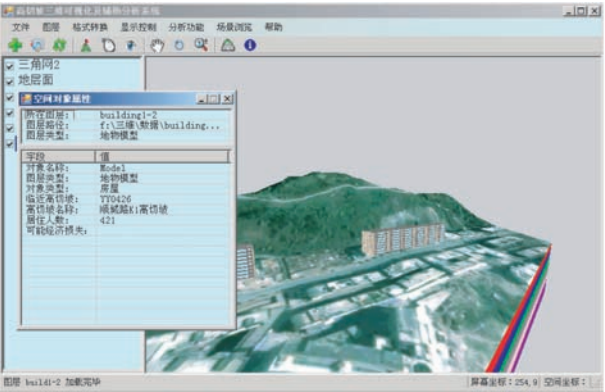


图 5 系统界面及空间查询示意图

Fig. 5 System interface and spatial query function

高切坡坡面是地表数据的一部分,相比其他地质灾害类型,高切坡具有规模较小,分布密集,地形变化大等特点,需要进行较为精细的建模,实际项目中采用地面三维激光扫描的方式进行空间对象信息采集,数据量非常大,Delaunay 三角网叠加遥感影像的表达方法能够非常有效地保证显示效率及显示效果。

### 3.1.3 地上数据的格式转换

地上数据(地物模型)是指地面以上建筑、道路等设施的模型,这类模型的建立较复杂,编程实现的难度较大。所以,本文研究中生成地物模型时采用的方法为:在通用建模软件(例如,3ds max、Google SketchUp 等)中构建模型,再将其模型读取并转换成本文中标准的数据结构进行显示和处理。

在多种三维模型格式中,本文选用 3DS 文件格式作为标准的模型输入格式<sup>[13]</sup>。该格式的通用性强,大部分三维建模软件均支持该格式的导入和导出,且 3DS 格式同样采用三角网组合并叠加纹理的方式表达模型,能够较好地与文中标准数据结构进行格式转换。

系统中使用的 3DS 格式模型要求使用实地测量数据构建,模型构建过程中,需要严格按照其实地的坐标及方向,经过适当的平移和缩放完成模型构建。系统在读取 3DS 文件时,从其中提取出模型的三角网顶点坐标和纹理坐标等位置信息,以及相对应的纹理信息,按照前述图层标准数据格式进行组织,保存为标准的 XML 图层格式,以保证能够与其他类型的数据共同显示。为保证与地表及地下图层的无缝拼接,还需根据模型的实际坐标与方向为其指定插入点、方向,以及缩放比例。

将各地物所对应的属性信息按“字段-属性”的对应关系添加到图层中,完成地物模型数据的格式转换。

## 3.2 OpenGL 模型的可视化实现

各种类型数据生成完毕后,选用 OpenGL 实现三维可视化。可视化主要流程为:根据 2.3 节中的图层数据结构,提取出空间信息;根据空间对象的三角划分生成基本图元(主要为三角形),组合成空间对象表面;设置投影方式,视点及中心点,使得空间对象显示在三维视图中适当的位置和方向;设置光照和纹理,计算得到对象的最终可视结果;将三维对象转换为观察者的平面坐标,输出到平面视

口。可视化结果如图 5 所示。

### 3.3 核心功能的实现

实现模型可视化之后,本文还以 C# 及 OpenGL 实现了一系列核心应用功能,并在此基础上构建了原型系统。实际项目应用中,系统的主要功能在于三维空间及相关对象的直观展示、致灾影响对象及相关信息的查询统计、高切坡坡体信息的提取及稳定性计算等。这几项应用的基础功能的实现如下:

#### (1) 三维浏览

三维浏览是空间对象展示的基础,该功能在空间对象可视化的基础上,使用户能够在不同的角度和比例下观察空间对象。本文在透视投影的三维投影模式下,基于视点和中心点变换的原理实现了平移、缩放、旋转等三维浏览功能。

#### (2) 空间查询

致灾影响对象及其信息的查询及统计是高切坡实际项目应用,以及本文原型系统的重要功能,而单个空间对象的属性查询是其基础,该功能支持用户根据对象的空间位置及屏幕显示位置选取该对象并查询其属性信息。功能基于 OpenGL 的坐标变换,以及拾取机制,流程为:对象载入时为每个空间对象分配全局唯一的 ID;获取鼠标单击处的屏幕坐标,使用深度检测工具得到该坐标对应空间点与视点间的距离;通过视点变换及投影变换的反变换得到对应的空间坐标,以及所在的空间对象拾取 ID;通过该 ID 查询到空间对象及其对应的属性信息。功能示意如图 5。

#### (3) 平面剖切分析

高切坡稳定性计算过程中,需要通过平面剖切、滑面分析、虚拟钻孔分析,以及容重计算等子过程为稳定性分析模型提供数据,平面剖切分析在其中非常有代表性。它需要依据地层表面信息,对地层实体进行一定程度的重构,再实现剖切分析功能。本文对该功能进行了实现和开发。

地层平面剖切功能实现的基本流程为:根据地层的表面划分,生成完整的地层实体表面,使用剖切平面与各地层面进行相交运算,得到各地层面对应的交线后,使用带边界约束的 Delaunay 三角剖分算法<sup>[14-15]</sup>生成三角网。功能示意如图 7 所示。

带边界约束的 Delaunay 三角剖分算法能够根据有向约束线段集,以及散点集构建符合约束条件



的三角网,非常符合平面剖切分析功能中三角网的生成需求,而且其能够很好地处理带孔洞,以及离

散的数据,提高三角网的生成速率,算法示意图如图 6。

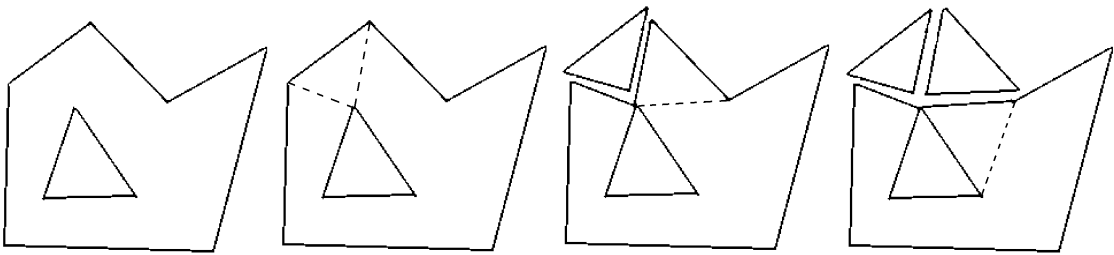


图 6 带边界约束的 Delaunay 三角剖分算法示意图  
Fig. 6 Delaunay Triangulation Algorithm with boundary constraints

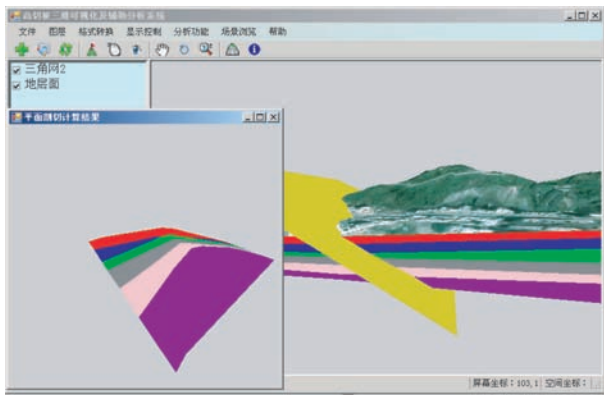


图 7 系统界面及地层剖切图

Fig. 7 System interface and stratum cutting function

3.4 应用实例

在三峡库区高切坡项目实施过程中,为获取监测预警及应急救援所需的基础数据,项目组近期对重庆市涪陵区市区进行了地面三维激光扫描,以及实地建筑物属性调查。从所得数据中选取了代表性较强的涪陵五中区域,拟结合二维 GIS 平台对区域进行展示,所建立的三维模型如图 8 及图 9 所示。

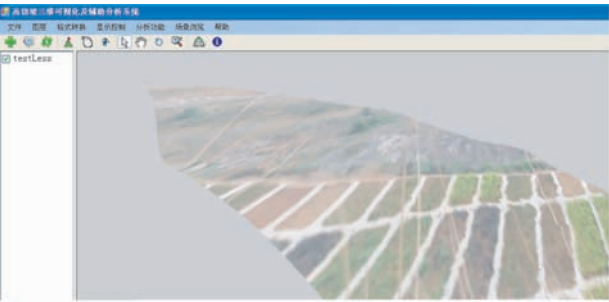


图 8 激光扫描坡面建模

Fig. 8 Slope model using laser scanning data



图 9 激光扫描建筑模型

Fig. 9 Building model using laser scanning data

4 结论与展望

在理论上,“地上-地表-地下空间三维一体可视化建模”概念是现有三维 GIS 数据结构和算法的重要扩展。该概念使三维 GIS 能够更好地处理地下对象,为地上、地表及地下数据建立了统一的数据结构,实现了一体可视化显示和处理。

本文的研究主要集中于基础数据结构的扩展,以及相应关键技术的实现,其具体功能还有待进一步丰富和完善:

- (1)在不断的应用过程中,完善基础数据结构,能对更多种数据源进行支持,并完善相应格式转换算法;
- (2)空间缓冲区分析、三维网络分析、三维表面叠置分析等更丰富的空间分析功能的研究和开发;
- (3)提高模型显示和处理的效率。

参考文献:

[1] Bak P and Mill A. Three Dimensional Representation in

- a Geoscientific Resource Management System for the Minerals Industry. // Three Dimensional Applications in Geographic Information Systems[M]. Taylor & Francis, 1989, 155 - 182.
- [2] Reinhard K. Multiresolution Representations for Surface Meshes Based on the Vertex Decimation Method [J]. Computer & Graphics, 1998, 22(I):13 - 26.
- [3] 朱庆. 3 维地理信息系统技术综述[J]. 地理信息世界, 2004, 2(3):8 - 12.
- [4] 李成名, 王继周, 马照亭, 等. 数字城市三维地理空间框架原理与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2008.
- [5] 唐中实, 王越国, 黄俊峰, 等. 基于 X3D 的网络 3 维 GIS 研究[J]. 测绘通报, 2003(3):30 - 33.
- [6] 李清泉, 李德仁. 三维地理信息系统中的数据结构[J]. 武汉测绘科技大学学报, 1996(2):128 - 133.
- [7] 吴慧欣. 三维 GIS 空间数据模型及可视化技术研究[D]. 西北工业大学, 2007.
- [8] Breuning M, Bode T, Cremers A B. Implementation of Elementary Geometric Database Operation of A 3D - GIS[C]. Advances in GIS Research: Proceedings of the 6th International Symposium on Spatial Data Handling, 1994, 604 - 617.
- [9] 刘雪萍, 王玲玲, 华秀菁, 等. 矿山环境侵蚀与堆积变化的 3D - GIS 分析——以大连市周边矿区为例[J]. 地球信息科学, 2009, 11(6):854 - 859.
- [10] Scott M. S. The Extension of Cartographic Modeling for Volumetric Geographic Analysis. <http://www.cla.sc.edu/geogdocs/departdocs/std/docs/mscott.html>.
- [11] 贺怀建, 白世伟, 赵新华, 等. 三维地层模型中地层划分的探讨[J]. 岩土力学, 2002, 23(5): 637 - 639.
- [12] 朱良峰, 吴信才, 刘修国, 等. 基于钻孔数据的三维地层模型的构建[J]. 地理与地理信息科学, 2004, 20(3): 2629.
- [13] van Velsen M, Fercoq R. 3D Studio File Format (3ds) [M/OL]. [2009 - 7 - 20] <http://www.martinreddy.net/gfx/3d/3DS.spec>.
- [14] 曾薇, 孟祥旭, 杨承磊, 等. 平面多边形域的快速约束 Delaunay 三角化[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2005, 17(9):1933 - 1940.
- [15] 简宪华, 崔汉国, 曾茂春, 等. 带内边界约束散乱数据的 Delaunay 三角剖分算法研究[J]. 计算机工程, 2001, 27(5):105 - 106.

## Design and Implement of the High-Cutting Slope's Integrated Model Based on 3D GIS

TANG Zhongshi, WANG Yanzuo, XIN Yu, WU Fenzhi, ZHOU Weiqiang, ZHOU Bin  
(3S Research Center, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** Three-dimensional GIS is more and more extensively used in the modeling and analyzing of geological bodies. It has the advantages of intuition, real and powerful analysis functions. The High-Cutting Slope is a special kind of geological body, which has its own characteristics and is necessary to be modeled in an integrated way. It is appropriate and efficient to develop a visualized and aided analysis system of the high-cutting slopes using the 3D GIS. By studying the 3D visualized modeling algorithms, we noticed that there isn't an algorithm which can effectively model underground objects, ground objects and ground surface from the same viewpoint and at the same time, but it is needed in the modeling of the high-cutting slopes because of their characteristics and potential hazards. As a result of this, we proposed a new concept of underground ground surface-ground objects integrated visualization which points out the way to solve the problem of integrated model. Based on this new concept, we extended the data structure and modeling algorithm of 3D GIS, and implemented some relative functions such as: three-dimensional navigation, format converting from common GIS data formats, visualization of the integrated models and so on by using OpenGL and C#. We also implemented some spatial analysis functions such as spatial query and spatial plane slice based on the new data structure, and developed an information system which is currently used in the monitoring and early-warning information system for the high-cutting slopes in the Three Gorges Area.

**Key words:** 3D GIS; integrated model; high-cutting slope; visualization; spatial analysis