

重大工程三维地层分析的功能设计与实现^{*}

周翠英¹, 董立国¹, 陈 恒¹, 尚 伟²

(1 中山大学应用力学与工程系 / 地下工程与信息技术研究中心, 广东 广州 510275
2 广东省东深供水改造工程建设总指挥部, 广东 东莞 510800)

摘 要: 三维地层分析在地下工程隐蔽环境研究和 GIS 系统中具有特殊重要的意义。探讨了利用开放图形库 OpenGL 实现三维地层分析的一种普遍适用的功能结构和设计, 使之能在大多数地理信息系统中得到普遍应用, 包括数据编辑、数据查询、地层构造、地层显示、移动控制、任意切割、场景渲染以及帮助等。在三维地层的构造中, 首先建立数据库; 然后采用 OpenGL 作为三维地层分析的图形开发工具, 通过三角形、四边形或其它多边形构造二维或三维几何外表面, 并将这些数据转换处理为像素, 从而构成帧缓存中最终所期望的图像; 最后在设定的屏幕区域内显示。在地层构造过程中, 利用网格法与交线分割法实现了非组合切割、组合切割和任意开挖功能。因此, 该设计提供三维地层建模、分析、切割等核心功能, 并实现地层的平移、旋转、缩放等多种控制操作, 从而以多方式、多角度地观察和了解地层范围内每一处的详细信息, 并尽可能模拟现实世界, 增强三维地层的真实感。最后, 将该设计应用于东深供水改造工程的地下环境信息系统中, 验证了其合理性和实用性。

关键词: 重大工程; 三维地层; 功能设计与实现; 工程应用

中图分类号: TU 91 **文献标识码:** A **文章编号:** 0529 6579 (2006) 04 0039 05

三维地层显示和分析是综合采用数学、力学、岩土工程和计算机图形学知识的一项新技术, 是地下空间信息化开发的基础。它不仅能模拟场地的地层分布情况, 而且能够以直观的图形方式表现复杂地质现象, 如: 透镜体、尖灭、孤石、地层错乱等, 实现地下隐蔽环境的可视化, 为地下空间开发和工程规划与建设提供参考和指导。三维地层分析显示的功能设计, 将关系到三维地层系统的友好程度及其对工程建设指导作用。该方面的研究目前已有部分工作^[1-4], 主要侧重于实现方法和技巧等方面, 而对功能设计和实现的主要问题尚缺乏较深入的阐述, 尤其是功能设计的工程需求方面研究不足。因此, 本文针对三维地层的显示与分析, 设计并实现了一个较通用的功能结构, 使之能够在大多数地理信息系统中得到普遍应用。采用该功能设计, 开发了三维地层管理系统, 并将之应用于广东省东深供水改造工程中, 验证了其合理性和实用性。

1 三维地层分析功能设计

1.1 设计目标

(1) 构造一种普遍适用的功能结构, 使之能在大多数地理信息系统中普遍应用。该功能的实现能方便用户编辑和查询资料数据;

(2) 提供三维地层建模、分析、切割等核心功能, 实现地层的平移、旋转、缩放等多种控制操作, 从而, 从多角度观察和分析一定范围内的地层分布、分层、倒转、缺失和尖灭等详细信息, 并尽可能接近实际地层, 增强三维地层的真实感。

1.2 设计内容

根据功能设计的目标和思路, 应该实现以下几个功能模块: 数据编辑、数据查询、地层构造、地层显示、移动控制、任意切割、场景渲染以及帮助。其中地层构造和任意切割是核心, 其它功能如地层显示、移动控制和场景渲染等都是在它们的基础上扩展开来的。各模块的内容和功能设计见表 1。

^{*} 收稿日期: 2006 02 22
基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (59809008), 广东省科技攻关十五专项资助项目 (2001B30903), 广东省科技计划资助项目 (2004B10101002); 广东省东深供水改造工程建设总指挥部基金资助项目 (DSGZ - KJ - 042 DSGZ - KJ - 043)

表 1 模块功能设计表
Tab. 1 Function design of modules

模块名称	内容和功能
数据编辑	输入和编辑数据，包括钻孔数据和地层信息等，结果存入数据库
数据查询	查询数据库中信息、中间计算结果或需经计算分析的空间三维信息
地层构造	根据钻孔数据和地层信息构造三维地层
地层显示	选择下列一种或多种显示方式：实体或线框显示、整体显示、分层显示、局部显示等，并且可以控制钻孔、标尺的显示与否，以及其它控制面板的隐藏与显示
移动控制	实现三维地层的任意方向平移、任意角度旋转，以及在一定范围内的放大和缩小
任意切割	实现三维地层的任意方向（水平、竖直、倾斜）的切割，并通过组合切割和非组合切割实现一些特殊效果如基坑和隧洞的挖掘等
场景渲染	光照强度、颜色、地层的反光特性设置和背景颜色改变以及地层颜色的改变等
帮助	指导用户如何正确使用各种功能

表 2 钻孔基本信息表
Tab. 2 Basic information of drill holes

项目	类型	说明
Hole_No	字符型	钻孔编号
Hole_X	浮点型	孔口 X 坐标
Hole_Y	浮点型	孔口 Y 坐标
Hole_Level	浮点型	孔口海拔
Hole_Depth	浮点型	钻孔深度

表 3 钻孔地层信息表
Tab. 3 Stratum information of drill holes

项目	类型	说明
Hole_No	字符型	钻孔编号
lLayer_No	整型	主层号
sLayer_No	整型	亚层号
Layer_Depth	浮点型	层顶埋深
Layer_Descrp	文本	描述信息

当三维地层分析中还需要存储其它数据信息时，可根据实际存储需求设计增加相应数据表。

2.2 三维地层构造

三维地层构造的基本思路是将钻孔作为控制点，以此确定地层范围与地层数目，然后进行网格划分，用经过插值计算的离散网格来模拟所有地层的空间状况和分布规律。其实现过程基本如下：

首先，遍历数据库中钻孔基本信息，确定孔口坐标的 XY 最大最小值，从而在 XY 平面上确定一矩形区域，使所有钻孔都位于该区域内部；然后，根据尺寸要求将矩形区域划分为三角形或四边形网格，并通过每个网格节点向下作垂线，则每条垂线都与地层上下表面交于一点^[7]；最后，插值计算所有网格的节点坐标，并通过它们模拟地层的上下表面和侧面，从而完成三维地层构造。

由于网格节点的 X、Y 坐标值都为已知，因此，Z 坐标值可通过多重二次径向基函数插值法 MultQuadric 进行计算，其插值原理如下：

设平面上有 n 个散乱节点 $(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_n, y_n)$ ，对应节点值为 $f_1, f_2, \dots, f_n$ ，则对任意某点 (x, y) ，其节点值为：

$$F(x, y) = \sum_{j=1}^n \alpha_j [(x - x_j)^2 + (y - y_j)^2 + c^2]^{1/2} \tag{1}$$

其中， α_j 可由下列 n 个联立方程求出

$$f_i = \sum_{j=1}^n \alpha_j [(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2 + c^2]^{1/2}, \tag{2}$$

$i = 1, 2, \dots, n$

2 三维地层分析功能的实现

采用三维图形标准—OpenGL 作为三维地层分析的图形开发工具，它通过许多小三角形、四边形或其它多边形在帧缓存中构造二维或三维几何物体的外表面，然后，对这些数据进行处理，将它们转换为像素，从而构成帧缓存中最终所希望的图像，最后，在设定的屏幕区域内显示。其中，尤以三角形的构造速度最快，因此，在本研究中将采用三角形构造各地层面^[5-9]。

2.1 数据库

数据库是三维地层显示分析的基础，主要用来存储钻孔数据和其它信息。钻孔数据分两个层次进行存储：基本信息和地层信息；基本信息包括钻孔号、孔口 X 坐标、孔口 Y 坐标、孔口海拔以及钻孔深度；地层信息包括钻孔的地层主层号、地层亚层号、地层厚度以及地层描述。对应这两个层次，在 SQL Server（或 Access、FoxPro 等）中设计数据库表（表 2 和表 3），用户在数据编辑模块中编辑的数据直接存储到这两张表中，供其它相关功能模块调用。

上述两表通过钻孔编号 Hole_No 进行关联，表 2 单独以 Hole_No 作主键，表 3 以 Hole_No、lLayer_No、sLayer_No 联合作主键，因为一个钻孔拥有一个固定的孔口坐标，却拥有多个不同的地层，从而具有多个主层号和亚层号。

c 为任意常数。

2.3 地层任意切割

利用空间平面 $Ax + By + Cz + D = 0$ 对三维地层进行切割时, 可将该平面定义为 OpenGL 中的附加裁剪面, 从而直接调用 OpenGL 的裁剪功能, 使位于平面负法线方向部分的地层自动被屏蔽掉。但由于三维地层构造时只绘制了其外表面, 所以屏蔽后的地层在切割截面处为一空洞。为此, 还需将切割截面按所处的地层离散为一定数目的三角形或四边形, 从而完整显示切割后的三维地层。

地层的任意切割可以分为水平切割、垂直切割和斜切共三种形式, 通过它们的组合应用可以实现简单切割、局部显示以及基坑开挖等特殊切割效果。在离散这三种形式的切割截面时, 可根据其平面方程 $Ax + By + Cz + D = 0$ 中 C 值是否为 0 而分别采用下列两种方法:

(1) 当 $C \neq 0$ 时, 切割截面为倾斜或水平, 利用网格分割法进行离散;

(2) 当 $C = 0$ 时, 切割面竖直, 利用交线分割法进行离散;

网格分割法: 首先将 XY 平面上的三角形网格沿竖直方向投影到切割面上, 由于切割面方程 $Ax + By + Cz + D = 0$ 中 C 不为 0 从而只须做变换:

$$(x, y) \rightarrow (x, y, z)$$

即可, 其中

$$z = -\frac{A}{C}x - \frac{B}{C}y - \frac{D}{C} \quad (3)$$

然后, 用边界追踪法计算出每个三角形夹在层顶曲面和层底曲面中的凸多边形, 最后用割耳法将此凸多边形分割成几个三角形就完成了切割面的三角形划分。

交线分割法: 根据插值网格的特点, 可以将竖直截面分成行截面、列截面和普通竖直截面三大类。行截面和列截面是指截面在网格某一行或某一列上的竖直截面, 它们都可以很方便地转化为三角片, 因为它们在每层的层顶、层底和相邻的两列之内部分的只可能是凸四边形、三角形或没有面积。普通竖直截面分割成三角形时, 首先计算切割面同每层网格的交点, 根据这些交点将其划分成三角片; 然后处理每一个地层的上下表面与切割面相交的部分, 使之都变成合理三角片。

此外, 地层在任意切割时又存在非组合切割和组合切割两种方式, 当存在多个切割面时, 这两种方式在切割效果上具有截然不同的差异性。

2.3.1 非组合切割功能实现 在非组合切割形式下, 每次切割都会将上次切割后剩余的地层中位于

当前切割面负法线方向的部分切割掉。因此, 每次切割后地层都会减少一部分或保持不变。其实现方法如下:

在 OpenGL 中预先定义 n ($n \geq 1$) 个裁剪面, 然后在图像绘制时逐个调用。每个裁剪面在被调用后都处于“开启”状态。因此, 其在程序的后续执行过程中都会起作用, 所有后续裁剪操作都是在先前的裁剪结果上进行的。

2.3.2 组合切割和任意开挖功能实现 在组合切割形式下, 每次切割都会和以前进行的所有切割共同作用, 只有位于所有这些切割面负法线方向部分的地层才会被切割掉。因此, 每次切割后, 剩余地层的形态一般都会发生较大的改变和调整。其实现方法如下:

在 OpenGL 中预先定义 n ($n \geq 1$) 个裁剪面, 然后在图像绘制时逐个调用。在调用某个裁剪面时, 需要关闭其它所有的裁剪面, 从而确保本次裁剪操作是对原始状态的三维地层进行的。调用完成后, 由于每个裁剪面都是对原始的三维地层进行的裁剪, 因此, 地层的最后形态为被这 n 个裁剪面单独裁剪后的组合形式。

2.4 移动控制

平移: 利用函数 `glTranslatef (GLfloat X, GLfloat Y, GLfloat Z)` 实现三维物体沿坐标 x 轴移动距离 X , 沿 y 轴移动距离 Y , 沿 z 轴移动距离 Z , 然后重绘地层。

旋转: 利用函数 `glRotatef (GLfloat X, GLfloat Y, GLfloat Z)` 实现视图绕 x 轴逆时针旋转角度 X , 绕 y 轴逆时针旋转角度 Y , 绕 z 轴逆时针旋转角度 Z , 然后, 重绘地层。

缩放: 缩放操作可通过两种方法来实现。一是通过函数 `glScalef (GLfloat X, GLfloat Y, GLfloat Z)` 来实现, 其中, X , Y , Z 分别是 x 轴、 y 轴和 z 轴的缩放因子。另一种方法是改变 OpenGL 图形显示的视见区, 当视见区很大时, 图形就会“显得”很小, 反之, 则很大。

2.5 渲染设置

OpenGL 通过函数 `glColor3f (GLfloat red, GLfloat green, GLfloat blue, GLfloat alpha)` 来设置颜色, 当存在参数 α 时, 函数形式为 `Color4f` 另外还可通过类似函数设置双精度型、整型、短整型、无符号整型等其它形式的颜色。

光照效果主要是通过设置光源的位置和三种光—环境光、镜面光、漫反射光以及材料对光的反射指数来获得的。通过调整上述几种参数值和材料的光学性质, 几乎可以模拟自然界中的所有光照效

果。

2.6 其它功能

查询功能可通过在程序中嵌入 SQL 语句以对数据库进行相应操作来实现。对中间计算结果进行查询时, 只需输出相应变量的值即可。

地层显示选择等功能, 只需将数据库数据与合理的 OpenGL 函数相结合, 就能较容易地实现, 因此不再赘述。

3 工程应用

东深供水改造工程是广东省的大型水利枢纽之一, 其地质环境条件十分复杂, 本文结合该工程的实际钻孔资料, 运用上述设计方法与思路, 开发实现了地层的三维构造与分析功能^[7], 图 1 为根据该工程中莲湖泵站钻孔数据生成的三维地层, 图 2 为该地层的基坑开挖结果。通过与工程勘查资料进行对比分析, 证实了本文构造的三维地层与该区域真实地层在空间分布和形态上都是相符的。

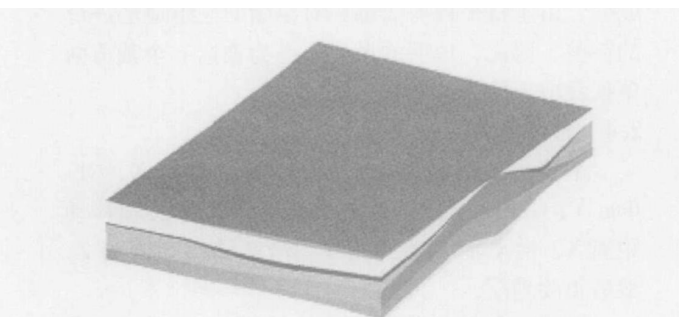


图 1 基坑示意图

Fig 1 Sketch map of Foundation pit

4 结 论

(1) 针对工程需要和特点设计了三维地层分析的功能结构, 其具有数据编辑、数据查询、地层构造、地层显示选择、移动控制、任意切割、场景渲染以及帮助等预期功能;

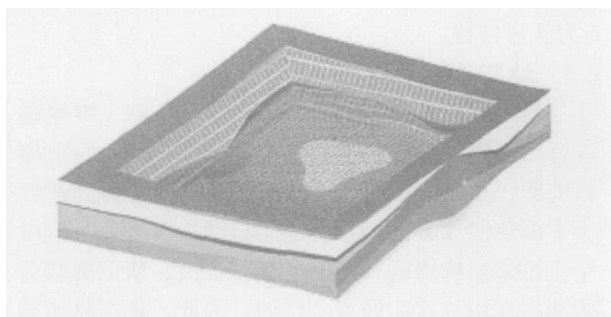


图 2 地层的任意开挖示意图

Fig 2 Sketch map of an excavation

(2) 根据东深供水改造工程的钻孔资料, 以 OpenGL 为图形工具, 开发实现了地层的三维构造与分析功能, 并通过与实际勘查资料的对比分析, 证明了本文相关地层构造与任意切割等功能设计与实现的合理性与可行性。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 胡金星, 吴立新, 高卫贞, 等. 三维地质模拟体可视化技术的应用研究[J]. 煤炭学报, 1999 24(4): 345-349.
- [3] 贾永刚, 方鸿琪. 青岛城市地质环境信息系统 (QUGIS) 的设计与实现[J]. 中国地质灾害与防治学报, 1999 10(2): 45-52.
- [4] 方海东, 刘义怀, 施斌, 等. 三维地质建模及其工程应用[J]. 水文地质工程地质, 2002 (4): 52-55.
- [5] 孙波. OpenGL 编程实例学习教程[M]. 北京: 北京大学出版社, 2000.
- [6] RICHARD SW, SW EET JRM. OpenGL 超级宝典[M]. 潇湘工作室, 译. 2 版. 北京: 人民邮电出版社, 2001.
- [7] 刘祚秋, 周翠英, 赵旭升, 等. 三维地层模型及可视化技术研究[J]. 中山大学学报: 自然科学版, 2003 42(4): 21-23.

Function Design and Realization of 3D Stratum in the
Development of Underground Space

ZHOU Cuiying¹, DONG Liguo¹, CHEN Hong¹, SHANG Wei²

(1. Department of Applied Mechanics and Engineering // Research Center of Underground and
Information Technology, Sun Yat sen University, Guangzhou 510275, China
2. General headquarters of Water Supply Reconstruction Project from Dongjiang to Shenzhen
Dongguan 510800, China)

Abstract 3D analysis of stratum has a special significance in the research of covered underground engineering environment and geography information system. A kind of universal functional structure and design in the realization of 3D-Stratum analysis is discussed with the help of OpenGL including data edit, data check, stratum construction, stratum showing, remove control, scene exaggerate and help module et al., so as to apply in most of GIS systems. In the construction of 3D-stratum, firstly, the database is constructed, and then, the 3D graphic standard OpenGL is adapted as a developing tool of 3D-Stratum analysis that formed the outer surface of 2D or 3D graph or geometry body in the frame buffer memory by amount of small triangles or quadrangles or other polygons. They are transited into picture element through data processing. Finally, the expected image in frame buffer memory is displayed on a certain area of screen. Thus, realize the arbitrary cutting and excavation function, even more provide the modeling analysis and cutting function, and removing, rotation, lessen or magnify et al. controlling operation, so as to find out the details of every location in the certain area of the stratum through multiway and simulate the practical world as actual as possible and increase the authenticity of 3D-Stratum. At last, by applying to the Water Supply Reconstruction Project from Dongjiang to Shenzhen, Guangdong Province, this design improves the reasonableness and practicability of the results.

Key words momentous project; 3D stratum; function design and realization; application to engineering