

(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 102254349 B

(45) 授权公告日 2012. 11. 28

(21) 申请号 201110181635. 2

(22) 申请日 2011. 06. 30

(73) 专利权人 华东师范大学

地址 200241 上海市闵行区东川路 500 号

(72) 发明人 朱良峰 孙建中 李明江 张成娟  
潘信

(74) 专利代理机构 上海蓝迪专利事务所 31215  
代理人 徐筱梅 张翔

(51) Int. Cl.

G06T 17/05 (2011. 01)

审查员 苏菲

权利要求书 3 页 说明书 10 页 附图 18 页

(54) 发明名称

一种使用钻孔数据构建沉积地层系统三维实体模型的方法

(57) 摘要

本发明公开了一种使用钻孔数据构建沉积地层系统三维实体模型的方法,针对地质钻探所探测到的地层层面数据进行处理,可以解决沉积地层系统中不连续的地层层面数据加密插值重构时的所遇到的各种难题,属于工程科学技术中的三维地学模拟技术应用领域。该方法包括以下步骤:界定建模场区,提取相关钻孔信息;建模场区总体地层排序与完整性判定;钻孔数据离散化;定义骨架三角网;插值拟合地层顶、底界面;判定缺失地层类别;生成缺失地层处理次序;缺失地层控制界面交切处理与高程调整;缺失地层与邻接地层界面一致性处理;生成三维实体模型;三维可视化分析。与已有方法相比,本发明能够自动判断缺失地层的地质成因并界定缺失边界,具有自动性高、适应性强的优点。本发明的建模结果合理,模型精度高,生成的地层缺失边界自然、合理,非常接近于实际地层分布情况。



1. 一种使用钻孔数据构建沉积地层系统三维实体模型的方法,其特征在于:使用二分拓扑结构,将钻孔数据离散化为一系列散点,基于这些散点插值拟合出各个地层顶、底界面的初始高程;根据插值拟合出的地层顶、底界面在各个钻孔位置处的初始高程来自动推算缺失地层的地质成因和所属类别;按照缺失地层的形成顺序和切错关系自动生成缺失地层的处理次序;按照缺失地层的类别和地质成因自动进行缺失地层控制界面的交切处理与高程调整;其具体步骤是:

步骤 1、界定建模场区,提取相关钻孔信息

从钻孔数据库中读取待建模场区的钻孔信息,作为输入数据,其钻孔信息包括钻孔类型、平面位置以及具体的地层分层信息;

步骤 2、建模场区总体地层排序与完整性判定

(a) 总体地层排序

将钻孔所揭示的地层按照沉积顺序进行编号,生成一个涵盖建模场区全部地层的“地层层序表”,进行地层编号的规则是“从老到新,逐层递增”,即:最老的地层编号为 1,记为  $S_1$ ;其它地层按照沉积顺序或形成时代逐层加 1,递增编号,记为  $S_2$ 、 $S_3$ ... $S_n$ ;

(b) 地层完整性判定

根据钻孔对地层的揭示程度,将钻孔分为两类:完全钻孔和不完全钻孔;将建模场区最新地层即位于最顶部的地层和最老地层即位于最底部的地层都探测到的钻孔为完全钻孔;否则为不完全钻孔;接着,根据钻孔所揭示的地层信息,将建模场区的地层分为两类:完整地层和缺失地层;在建模场区内,全部完全钻孔和可能探及此层的不完全钻孔都揭示到的地层为完整地层,否则为缺失地层;

步骤 3、钻孔数据离散化

将钻孔所揭示的地层分界面离散为三维空间中的一系列散点,并使用二分拓扑结构来记录钻孔所蕴含的地层分层信息;每一个散点都是两个地层的分界点,使用该散点的上层和下层地层编号来描述该点的二分拓扑属性;

经过钻孔数据离散化操作,得到一个散点数据集  $P$ ,集合了地层顶、底界面高程插值拟合的样本数据;

步骤 4、定义骨架三角网

以钻孔孔口平面坐标  $X$ 、 $Y$  为基准,在建模场区外边界的约束下,采用标准的三角化算法构网并加密生成一个不规则三角网,称作骨架三角网;

步骤 5、插值拟合地层顶、底界面

从散点数据集  $P$  中提取各个地层顶、底界面的样本点坐标,利用这些散点插值拟合相应界面骨架三角网顶点的初始高程;在拟合编号为  $i$  的地层  $S_i$  的顶面三角网  $F_{i\_Top}$  时,从散点数据集  $P$  中提取下层地层编号为  $i$  的散点作为插值拟合的样本点;在拟合  $S_i$  的底面三角网  $F_{i\_Bottom}$  时,使用上层地层编号为  $i$  的散点作为插值拟合的样本点;在进行插值时,使用距离反比加权法、或最邻近点法、或自然邻近点法、或径向基函数法或 Kriging 法;

步骤 6、判定缺失地层类别

对于任一缺失地层  $S_i$ ,其顶面三角网记为  $F_{i\_Top}$ ,底面三角网记为  $F_{i\_Bottom}$ ;如果  $S_i$  在钻孔  $B_j$  处缺失,缺失地层的上覆地层  $S_{i+1}$  与下伏地层  $S_{i-1}$  的分界点简称为缺失点记为  $P_0$ ,  $P_0$  的高程记为  $Z_0$ ;  $S_i$  的顶面三角网  $F_{i\_Top}$  在钻孔  $B_j$  处的顶点记为  $P_{Top}$ ,底面三角网  $F_{i\_Bottom}$  在钻孔

$B_j$  处的顶点记为  $P_{\text{Bottom}}$  ; 经过前一步插值拟合, 求得  $P_{\text{Top}}$ 、 $P_{\text{Bottom}}$  的初始高程, 分别记为  $Z_{\text{Top}}$ 、 $Z_{\text{Bottom}}$  ; 使用下面的公式计算  $P_{\text{Top}}$ 、 $P_{\text{Bottom}}$  与  $P_0$  之间的距离  $d_1$ 、 $d_2$  :

$$d_1 = Z_{\text{Top}} - Z_0$$

$$d_2 = Z_{\text{Bottom}} - Z_0$$

由于  $Z_{\text{Top}} \geq Z_{\text{Bottom}}$ , 所以  $d_1 \geq d_2$  ; 如果  $d_1 = 0$ ,  $d_2 = 0$ , 即  $P_{\text{Top}}$ 、 $P_{\text{Bottom}}$  与缺失点  $P_0$  重合, 则认为地层  $S_i$  恰巧在钻孔  $B_j$  位置处尖灭, 作为 0 厚度的完整地层来对待 ; 如果  $d_1 \leq 0$ ,  $d_2 < 0$ , 则地层  $S_i$  在钻孔  $B_j$  处非沉积缺失 ; 如果  $d_1 > 0$ ,  $d_2 \geq 0$ , 则地层  $S_i$  在钻孔  $B_j$  处侵蚀缺失 ; 如果  $d_1 > 0$ ,  $d_2 < 0$ , 则地层  $S_i$  在钻孔  $B_j$  处复合缺失 ;

如果地层  $S_i$  在全部钻孔位置处均为非沉积缺失, 则将该地层记为第一类缺失地层即完全是由非沉积作用引起的缺失地层 ; 如果地层  $S_i$  在全部钻孔位置处均为侵蚀缺失, 则将该地层记为第二类缺失地层即完全是由侵蚀作用引起的缺失地层 ; 如果地层  $S_i$  在某些钻孔位置处为复合缺失, 或者在部分钻孔位置处非沉积缺失、在部分钻孔位置处侵蚀缺失, 则将该地层记为第三类缺失地层即该缺失地层在部分区域是由非沉积作用引起缺失, 在部分区域是由侵蚀作用引起缺失 ;

#### 步骤 7、生成缺失地层处理次序

如果一个地层系统中存在多个缺失地层, 需按照下面的规则进行缺失地层的自动排序 :

①如果有第三类缺失地层, 则将该缺失地层重复记录, 它既属于第一类缺失地层, 又属于第二类缺失地层 ;

②第一类缺失地层的优先级高于第二类缺失地层 ;

③如果有多个第一类缺失地层, 按照“从老到新, 逐个处理”的规则, 先处理下层的缺失地层, 再处理其上的缺失地层 ;

④如果有多个第二类缺失地层, 按照“从新到老, 逐个处理”的规则, 先处理上层的缺失地层, 再处理其下的缺失地层 ;

经过排序, 生成一个只含第一类缺失地层和第二类缺失地层的缺失地层处理次序 ;

#### 步骤 8、缺失地层控制界面交切处理与高程调整

按照前一步生成的缺失地层处理次序, 逐个对缺失地层控制界面交切处理与高程调整 ; 对第一类缺失地层和第二类缺失地层分别采用不同的处理方法 ; 对于第一类缺失地层, 先将缺失地层的顶面三角网与其下伏地层的顶面三角网进行相交运算并调整高程, 再将缺失地层的底面三角网与其下伏地层的顶面三角网进行相交运算并调整高程 ; 对于第二类缺失地层, 先将缺失地层的底面三角网与其上覆地层的底面三角网进行相交运算并调整高程, 再将缺失地层的顶面三角网与其上覆地层的底面三角网进行相交运算并调整高程 ; 具体如下 :

##### (a) 第一类缺失地层

如果地层  $S_i$  属于第一类缺失地层, 则  $S_i$  的缺失边界受控于下伏地层  $S_{i-1}$  的顶面 ; 经过步骤 5 的插值, 拟合出  $S_i$  的顶、底界面及其下伏地层  $S_{i-1}$  的顶面、上覆地层  $S_{i+1}$  的底面的初始形态 ; 其中,  $S_i$  的顶面三角网记为  $F_{i\_Top}$ , 底面三角网记为  $F_{i\_Bottom}$ ,  $S_{i-1}$  的顶面三角网记为  $F_{(i-1)\_Top}$ ,  $S_{i+1}$  的底面三角网记为  $F_{(i+1)\_Bottom}$  ;

首先, 处理  $S_i$  的顶面三角网  $F_{i\_Top}$  ; 将  $F_{i\_Top}$  与  $F_{(i-1)\_Top}$  进行相交运算, 求出这两个三角网

的所有交点,作为新顶点插入到骨架三角网中,同时修改 $F_{i\_Top}$ 、 $F_{(i-1)\_Top}$  以及其它全部地层顶、底界面三角网的顶点和拓扑关系;在 $S_i$  缺失的区域出现 $F_{i\_Top}$  顶点的高程低于 $F_{(i-1)\_Top}$  上对应顶点的高程时,逐个抬高 $F_{i\_Top}$  顶点的高程值,将其设定为与 $F_{(i-1)\_Top}$  上对应顶点的高程值相等;修改后的 $F_{i\_Top}$  记为 $F'_{i\_Top}$ ;

然后,处理 $S_i$  的底面三角网 $F_{i\_Bottom}$ ;将 $F_{i\_Bottom}$  与 $F_{(i-1)\_Top}$  进行相交运算,求出这两个三角网的所有交点,作为新顶点插入到骨架三角网中,同时修改 $F_{i\_Bottom}$ 、 $F_{(i-1)\_Top}$  以及其它全部地层顶、底界面三角网的顶点和拓扑关系;接着,逐个比较 $F_{i\_Bottom}$  与 $F_{(i-1)\_Top}$  的对应顶点高程是否相同;如果 $F_{i\_Bottom}$  顶点的高程低于或高于 $F_{(i-1)\_Top}$  上对应顶点的高程,则抬高或压低 $F_{i\_Bottom}$  顶点的高程值,将其设定为与 $F_{(i-1)\_Top}$  对应顶点的高程值相等;修改后的 $F_{i\_Bottom}$  记为 $F'_{i\_Bottom}$ ;

#### (b) 第二类缺失地层

如果地层 $S_i$  属于第二类缺失地层,则 $S_i$  的缺失边界受控于上覆地层 $S_{i+1}$  的底面;经过步骤 5 的插值,拟合出 $S_i$  的顶、底界面及其下伏地层 $S_{i-1}$  的顶面、上覆地层 $S_{i+1}$  的底面的初始形态;其中, $S_i$  的顶面三角网记为 $F_{i\_Top}$ ,底面三角网记为 $F_{i\_Bottom}$ , $S_{i-1}$  的顶面三角网记为 $F_{(i-1)\_Top}$ , $S_{i+1}$  的底面三角网记为 $F_{(i+1)\_Bottom}$ ;

首先,处理 $S_i$  的底面三角网 $F_{i\_Bottom}$ ;将 $F_{i\_Bottom}$  与 $F_{(i+1)\_Bottom}$  进行相交运算,求出这两个三角网的所有交点,作为新顶点插入到骨架三角网中,同时修改 $F_{i\_Bottom}$ 、 $F_{(i+1)\_Bottom}$  以及其它全部地层顶、底界面三角网的顶点和拓扑关系;当 $S_i$  缺失的区域出现 $F_{i\_Bottom}$  顶点的高程高于 $F_{(i+1)\_Bottom}$  上对应顶点的高程时,逐个压低 $F_{i\_Bottom}$  顶点的高程值,将其设定为与 $F_{(i+1)\_Bottom}$  上对应顶点的高程值相等;修改后的 $F_{i\_Bottom}$  记为 $F'_{i\_Bottom}$ ;

然后,处理 $S_i$  的顶面三角网 $F_{i\_Top}$ ,将 $F_{i\_Top}$  与 $F_{(i+1)\_Bottom}$  进行相交运算,求出这两个三角网的所有交点,作为新顶点插入到骨架三角网中,同时修改 $F_{i\_Top}$ 、 $F_{(i+1)\_Bottom}$  以及其它全部地层顶、底界面三角网的顶点和拓扑关系;接着,逐个比较 $F_{i\_Top}$  与 $F_{(i+1)\_Bottom}$  的顶点高程是否相同;如果 $F_{i\_Top}$  顶点的高程低于或高于 $F_{(i+1)\_Bottom}$  上对应顶点的高程,则抬高或压低 $F_{i\_Top}$  顶点的高程值,将其设定为与 $F_{(i+1)\_Bottom}$  对应顶点的高程值相等;修改后的 $F_{i\_Top}$  记为 $F'_{i\_Top}$ ;

#### 步骤 9、缺失地层与邻接地层界面一致性处理

如果地层 $S_i$  属于第一类缺失地层,则逐个修改上覆地层 $S_{i+1}$  底面三角网 $F_{(i+1)\_Bottom}$  的顶点高程,使其与 $F'_{i\_Top}$  完全相同;如果地层 $S_i$  属于第二类缺失地层,则逐个修改下伏地层 $S_{i-1}$  顶面三角网 $F_{(i-1)\_Top}$  的顶点高程,使其与 $F'_{i\_Bottom}$  完全相同;经过上述处理,保证了所有邻接地层公共界面的一致性,即:所有地层的顶面三角网与其上覆地层的底面三角网完全一致,所有地层的底面三角网与其下伏地层的顶面三角网完全一致;

#### 步骤 10、生成三维实体模型

从下到上逐个处理各个地层,以其顶面三角网和底面三角网为空间基准,应用三维空间离散化方法对顶面三角网和底面三角网围成的空间进行剖分,生成用三棱柱体元充填的三维实体模型;

#### 步骤 11、三维可视化分析

在计算机显示器上绘制出最终的沉积地层系统三维实体模型,以不同的颜色和亮度代表不同的地层和地质界面;对生成的地层实体模型进行可视化展示与三维分析,包括三维观察、交互定位、模型剖切、隧洞开挖及体积量算。

## 一种使用钻孔数据构建沉积地层系统三维实体模型的方法

### 技术领域

[0001] 本发明涉及工程科学技术中的三维地学模拟技术应用领域,具体地说是一种使用工程钻孔数据自动构建沉积地层系统三维实体模型的方法,该方法针对地质钻探所探测到的地层层面数据进行处理,可以解决沉积地层系统中不连续的地层层面数据加密插值重构时的所遇到的各种难题。

### 背景技术

[0002] 地质体的三维建模与可视化是当前地球信息科学领域的研究与应用热点。基于三维地学模拟技术构建的三维地质实体模型能够直观形象的展现复杂地质现象的边界条件以及地质体内部的各种地质构造,增强地质分析的直观性和准确性。三维地质实体模型已广泛应用于地质体的几何表示、地质属性参数空间不均一性的可视化分析、数值模拟模型的前处理和后处理等众多研究领域。

[0003] 三维地学模拟研究的对象是地质实体。按照形态特征的差异,地质实体可分为层状实体和非层状实体两类。沉积地层是一种常见的层状地质实体,它不仅内部赋存有丰富的能源、矿产和地下水资源,而且还为人类塑造了大片的良田沃土和广阔的建设场地,许多大型城市和工程设施都是构筑在由沉积地层覆盖的三角洲上。因此,构建沉积地层环境下的三维地质模型对实际的地质分析与工程设计具有很大的应用价值。另外,研究沉积地层系统三维模拟技术也具有重要的理论意义,它是进一步研究复杂地质体三维构模技术的基础。

[0004] 目前,国内外在沉积地层系统三维模拟技术方面的研究主要集中于基于钻孔数据的三维实体模型生成技术,并提出了一些建模方法,如三维地层骨架构模法、地层层位法、钻孔-层面模型法、地层纵向分块处理法等。但目前尚缺乏针对复杂沉积地层系统的简单通用、高效自动的建模方法。现有的建模方法都存在或多或少的缺陷,其中一个最突出的问题就是这些方法缺乏合理完善的缺失地层处理机制,导致计算机建模结果与实际地层分布情况差别较大,无法真实的反映缺失地层的空间展布特征。缺失地层引起的地质界面不连续会增加地层层面插值拟合的复杂度。虽然可以通过添加虚拟钻孔或地质剖面的方法将缺失地层界面控制信息追加到建模流程之中,但在具体实现的过程中,手工添加虚拟钻孔或地质剖面具有很大的主观性,同时也是一项极为繁琐的工作,不适合于用计算机进行自动或半自动的建模。

### 发明内容

[0005] 本发明的目的是针对现有技术的不足而提供的一种使用钻孔数据自动构建沉积地层系统三维实体模型的方法,该方法能够快速、准确、自动的将包含多个缺失地层的复杂沉积地层系统中的具有不连续性、突变性特征的地层层面模型与实体模型在三维空间中重构出来,然后在计算机显示屏上展现出来。其要解决的技术问题可分解为四个方面:要解决地层顶、底界面初始高程的插值拟合问题;要解决缺失地层地质成因的自动判定问题;要

解决缺失地层处理次序的自动排列问题；要解决缺失地层控制界面交切处理与高程调整问题。

[0006] 本发明所采用的具体技术方案是：

[0007] 一种使用钻孔数据构建沉积地层系统三维实体模型的方法，该方法通过使用二分拓扑结构，将钻孔数据离散化为一系列散点，基于这些散点插值拟合出各个地层顶、底界面的初始高程；根据插值拟合出的缺失地层顶、底界面在各个钻孔位置处的初始高程来自动推算缺失地层的地质成因和所属类别；按照缺失地层的形成顺序和切错关系自动生成缺失地层的处理次序；按照缺失地层的类别和地质成因自动进行缺失地层控制界面的交切处理与高程调整；具体工作步骤：

[0008] 第一步 界定建模场区，提取相关钻孔信息

[0009] 钻孔数据按照规范的钻孔数据库格式存储在关系数据库中，建模过程的第一步，就是从钻孔数据库中提取待建模场区的钻孔信息作为本发明的输入数据，包括钻孔类型、平面位置以及具体的地层分层信息。

[0010] 第二步 建模场区总体地层排序与完整性判定

[0011] 首先，将钻孔所揭示的地层按照沉积顺序进行编号，生成一个涵盖建模场区全部地层的“地层层序表”；然后，根据钻孔对地层的揭示程度，将钻孔分为两类（完全钻孔和不完全钻孔）；接着，根据钻孔所揭示的地层信息，将建模场区的地层分为两类（完整地层和缺失地层）。

[0012] 第三步 钻孔数据离散化

[0013] 将钻孔所揭示的地层分界面离散为三维空间中的一系列散点，并使用二分拓扑结构来记录钻孔所蕴含的地层分层信息。每一个散点的数据结构如下：

[0014] Struct BoreholeContactPoint

[0015] {

[0016] long m\_lBoreholeID; // 钻孔编号

[0017] double m\_dX; //X 坐标

[0018] double m\_dY; //Y 坐标

[0019] double m\_dZ; //Z 坐标

[0020] int m\_iAboveID; // 上层地层编号

[0021] int m\_iBelowID; // 下层地层编号

[0022] }

[0023] 经过钻孔数据离散化操作，得到一个散点数据集 $P$ ，集合了地层顶、底界面高程插值拟合的样本数据。

[0024] 第四步 定义骨架三角网

[0025] 以钻孔孔口平面坐标 $X$ 、 $Y$ 为基准，在建模场区外边界的约束下，采用标准的三角化算法构网并加密生成一个不规则三角网，作为拟合各个地层顶、底界面空间几何形态的基准三角网，简称为骨架三角网。

[0026] 第五步 插值拟合地层顶、底界面

[0027] 从散点数据集 $P$ 中提取各个地层顶、底界面的样本点坐标，利用这些散点插值拟合相应界面骨架三角网顶点的初始高程。在拟合编号为 $i$ 的地层 $S_i$ 的顶面三角网 $F_{i\_Top}$ 时，

从散点数据集  $P$  中提取  $m\_iBelowID$  为  $i$  的散点作为插值拟合的样本点；在拟合  $S_i$  的底面三角网  $F_{i\_Bottom}$  时，使用  $m\_iAboveID$  为  $i$  的散点作为插值拟合的样本点。在进行插值时，可使用距离反比加权法、最邻近点法、自然邻近点法、径向基函数法、Kriging 法等常用的插值算法。

#### [0028] 第六步 判定缺失地层类别

[0029] 根据插值拟合出的缺失地层顶、底界面初始高程来自动推算缺失地层的类别。对于任一缺失地层  $S_i$ ，其顶面三角网记为  $F_{i\_Top}$ ，底面三角网记为  $F_{i\_Bottom}$ 。如果  $S_i$  在钻孔  $B_j$  处缺失，缺失地层的上覆地层  $S_{i+1}$  与下伏地层  $S_{i-1}$  的分界点（简称为缺失点）记为  $P_0$ ， $P_0$  的高程记为  $Z_0$ 。 $S_i$  的顶面三角网  $F_{i\_Top}$  在钻孔  $B_j$  处的顶点记为  $P_{Top}$ ，底面三角网  $F_{i\_Bottom}$  在钻孔  $B_j$  处的顶点记为  $P_{Bottom}$ 。经过前一步插值拟合，可求得  $P_{Top}$ 、 $P_{Bottom}$  的初始高程，分别记为  $Z_{Top}$ 、 $Z_{Bottom}$ 。使用下面的公式计算  $P_{Top}$ 、 $P_{Bottom}$  与  $P_0$  之间的距离  $d_1$ 、 $d_2$ ：

$$[0030] \quad d_1 = Z_{Top} - Z_0$$

$$[0031] \quad d_2 = Z_{Bottom} - Z_0$$

[0032] 由于  $Z_{Top} \geq Z_{Bottom}$ ，所以  $d_1 \geq d_2$ 。如果  $d_1=0$ ， $d_2=0$ ，即  $P_{Top}$ 、 $P_{Bottom}$  与缺失点  $P_0$  重合，本发明认为地层  $S_i$  恰巧在钻孔  $B_j$  位置处尖灭，可作为 0 厚度的完整地层来对待；如果  $d_1 \leq 0$ ， $d_2 < 0$ ，则地层  $S_i$  在钻孔  $B_j$  处非沉积缺失；如果  $d_1 > 0$ ， $d_2 \geq 0$ ，则地层  $S_i$  在钻孔  $B_j$  处侵蚀缺失；如果  $d_1 > 0$ ， $d_2 < 0$ ，则地层  $S_i$  在钻孔  $B_j$  处复合缺失。

[0033] 如果地层  $S_i$  在全部钻孔位置处均为非沉积缺失，本发明认为该地层属于第一类缺失地层；如果地层  $S_i$  在全部钻孔位置处均为侵蚀缺失，本发明认为该地层属于第二类缺失地层；如果地层  $S_i$  在某些钻孔位置处为复合缺失，或者在部分钻孔位置处非沉积缺失、在部分钻孔位置处侵蚀缺失，本发明认为该地层属于第三类缺失地层。

#### [0034] 第七步 生成缺失地层处理次序

[0035] 如果一个地层系统中存在多个缺失地层，在进行地层界面交切处理与高程调整前，需要按照地层的切错关系排出相应的优先级，生成缺失地层的处理次序。本发明按照下面的规则自动进行缺失地层排序工作：

[0036] ①第三类缺失地层可视为第一类缺失地层与第二类缺失地层叠加合成的结果。因此，在一个地层系统中，如果有第三类缺失地层，需要将第三类缺失地层分解为“第一类缺失地层 + 第二类缺失地层”，即将第三类缺失地层重复记录，它既属于第一类缺失地层，又属于第二类缺失地层。

[0037] ②第一类缺失地层的优先级高于第二类缺失地层。在进行缺失地层交切处理与高程调整时，先处理第一类缺失地层，再处理第二类缺失地层。

[0038] ③如果有多个第一类缺失地层，按照“从老到新，逐个处理”的规则，先处理下层的缺失地层，再处理其上的缺失地层。

[0039] ④如果有多个第二类缺失地层，按照“从新到老，逐个处理”的规则，先处理上层的缺失地层，再处理其下的缺失地层。

[0040] 经过排序，生成一个只含第一类缺失地层和第二类缺失地层的缺失地层处理队列。

#### [0041] 第八步 缺失地层控制界面交切处理与高程调整

[0042] 按照前一步生成的缺失地层处理次序，逐个对缺失地层控制界面进行交切处理与

高程调整。由于第一类缺失地层和第二类缺失地层分别受控于不同的地质界面,需要采用不同的处理方法。

[0043] 如果地层  $S_i$  属于第一类缺失地层,则  $S_i$  的缺失边界受控于下伏地层  $S_{i-1}$  的顶面。需要先将  $S_i$  的顶面三角网  $F_{i\_Top}$  与下伏地层的顶面三角网  $F_{(i-1)\_Top}$  进行相交运算并调整高程,再将  $S_i$  的底面三角网  $F_{i\_Bottom}$  与下伏地层的顶面三角网  $F_{(i-1)\_Top}$  进行相交运算并调整高程。

[0044] 如果地层  $S_i$  属于第 2 类缺失地层,则  $S_i$  的缺失边界受控于上覆地层  $S_{i+1}$  的底面。需要先将  $S_i$  的底面三角网  $F_{i\_Bottom}$  与上覆地层的底面三角网  $F_{(i+1)\_Bottom}$  进行相交运算并调整高程,再将  $S_i$  的顶面三角网  $F_{i\_Top}$  与上覆地层的底面三角网  $F_{(i+1)\_Bottom}$  进行相交运算并调整高程。

[0045] 第九步 缺失地层与邻接地层界面一致性处理

[0046] 按照第七步生成的缺失地层处理次序,逐个处理缺失地层与邻接地层的公共界面,以保证上下邻接地层公共界面的一致性。如果缺失地层属于第一类缺失地层,则逐个修改缺失地层的上覆地层的底面三角网的顶点高程,使其与缺失地层的顶面三角网完全相同。如果缺失地层属于第二类缺失地层,则逐个修改缺失地层的下伏地层的顶面三角网的顶点高程,使其与缺失地层的底面三角网完全相同。

[0047] 第十步 生成三维实体模型

[0048] 从下到上逐个处理各个地层,以其顶面三角网和底面三角网为空间基准,应用三维空间离散化方法对顶面三角网和底面三角网围成的空间进行剖分,生成用三棱柱体元充填的三维实体模型。

[0049] 第十一步 三维可视化分析

[0050] 在计算机显示器上绘制出最终的沉积地层系统三维实体模型,以不同的颜色和亮度代表不同的地层和地质界面;然后对生成的地层实体模型进行常规的可视化展示与专业的三维分析,包括三维观察、交互定位、模型剖切、隧洞开挖、体积量算等。

[0051] 本发明能够自动判断缺失地层的地质成因并界定缺失边界,真实的反映缺失地层的空间展布特征与控制界面的实际交切关系。与背景技术相比,本发明的有益效果是:自动性高,能充分挖掘钻孔数据所揭示、隐含的地质信息,自动推算缺失地层的地质成因,自动将缺失地层的顶、底界面与其控制界面进行交切处理与高程调整,从而达到自动提取缺失边界的目的;本发明的适应性强,能够重构包含任意数目缺失地层的复杂沉积地层系统,具有较强的柔韧性;本发明的建模结果合理,模型精度高,生成的地层缺失边界自然、合理,建模结果非常接近于实际地层分布情况。

## 附图说明

[0052] 图 1 是本发明流程示意图;

[0053] 图 2 是本发明根据地层顶、底界面初始高程判定地层  $S_i$  在钻孔  $B_j$  处非沉积缺失示意图;

[0054] 图 3 是本发明根据地层顶、底界面初始高程判定地层  $S_i$  在钻孔  $B_j$  处侵蚀缺失示意图;

[0055] 图 4 是本发明根据地层顶、底界面初始高程判定地层  $S_i$  在钻孔  $B_j$  处复合缺失示意图;



图；

- [0056] 图 5 是本发明插值拟合出的第一类缺失地层控制界面的初始形态示意图；
- [0057] 图 6 是本发明进行高程调整后的第一类缺失地层控制界面形态示意图；
- [0058] 图 7 是本发明进行一致性处理后的第一类缺失地层控制界面形态示意图；
- [0059] 图 8 是本发明插值拟合出的第二类缺失地层控制界面的初始形态示意图；
- [0060] 图 9 是本发明进行高程调整后的第二类缺失地层控制界面形态示意图；
- [0061] 图 10 是本发明进行一致性处理后的第二类缺失地层控制界面形态示意图；
- [0062] 图 11 是第一个实例研究场区的钻孔分布图；
- [0063] 图 12 是本发明构建的第一个实例研究场区的地层分界面的空间分布图；
- [0064] 图 13 是以三棱柱体元形式显示的第一个实例研究场区的三维实体模型；
- [0065] 图 14 是以块体形式显示的第一个实例研究场区的三维实体模型；
- [0066] 图 15 是在第一个实例研究场区中过钻孔 B2、B5、B4 生成的剖面图；
- [0067] 图 16 是对第一个实例研究场区三维实体模型进行剖切操作后生成的栅状图；
- [0068] 图 17 是第二个实例研究场区的钻孔分布图；
- [0069] 图 18 是本发明构建的第二个实例研究场区的地层分界面的空间分布图；
- [0070] 图 19 是以三棱柱体元形式显示的第二个实例研究场区的三维实体模型；
- [0071] 图 20 是以块体形式显示的第二个实例研究场区的三维实体模型；
- [0072] 图 21 是在第二个实例研究场区中过钻孔 C2、C6、C5、C4 生成的剖面图；
- [0073] 图 22 是对第二个实例研究场区三维实体模型进行剖切操作后生成的栅状图。

## 具体实施方式

[0074] 下面结合附图和具体实施方式对本发明作进一步详细的说明：

[0075] 参阅图 1 所示，本发明通过使用二分拓扑结构，将钻孔数据离散化为一系列散点，基于这些散点插值拟合出各个地层顶、底界面的初始高程；根据插值拟合出的缺失地层顶、底界面在各个钻孔位置处的初始高程来自动推算缺失地层的地质成因和所属类别；按照缺失地层的形成顺序和切错关系自动生成缺失地层的处理次序；按照缺失地层的类别和地质成因自动进行缺失地层控制界面的交切处理与高程调整。本发明可在微机平台、OpenGL 图形库下采用 Microsoft Visual C++ 语言开发实现，具体实施方式如下：

[0076] 第一步 界定建模场区，提取相关钻孔信息

[0077] 对于一个特定的研究场区，可能会有数目众多的钻孔。建模前，需要基于规范的钻孔数据库格式，将全部钻孔信息存储到关系数据库中。建模过程的第一步，就是从钻孔数据库中提取待建模场区的钻孔信息作为本发明的输入数据，包括钻孔类型、平面位置以及具体的地层分层信息。

[0078] 第二步 建模场区总体地层排序与完整性判定

[0079] 首先，将钻孔所揭示的地层按照沉积顺序进行编号，生成一个涵盖建模场区全部地层的“地层层序表”。进行地层编号的规则是“从老到新，逐层递增”，即：最老的地层编号为 1，记为  $S_1$ ；其它地层按照沉积顺序（或形成时代）逐层加 1，递增编号，记为  $S_2、S_3 \cdots S_n$ 。

[0080] 然后，根据钻孔对地层的揭示程度，将钻孔分为两类：完全钻孔和不完全钻孔。将建模场区最新地层（即位于最顶部的地层）和最老地层（即位于最底部的地层）都探测到的

钻孔为完全钻孔；否则为不完全钻孔。

[0081] 接着,根据钻孔所揭示的地层信息,将建模场区的地层分为两类:完整地层和缺失地层。在建模场区内,全部完全钻孔和可能探及此层的不完全钻孔都揭示到的地层为完整地层;否则为缺失地层。

[0082] 需要指出的是,为了处理方便,本发明假定整个建模场区的最顶层和最底层地层一定是完整地层。如果建模场区地层不满足这一条件,本发明将在最顶层上方或最底层下方自动添加虚拟的完整地层,然后在完成“第十步 生成三维实体模型”操作后,自动剥除添加的虚拟地层。

[0083] 第三步 钻孔数据离散化

[0084] 这一步的主要工作是将钻孔所揭示的地层分界面离散为三维空间中的一系列散点,并使用二分拓扑结构来记录钻孔所蕴含的地层分层信息。每一个散点都是两个地层的分界点,可使用该散点的上层和下层地层编号来描述该点的二分拓扑属性。每一个散点的数据结构如下:

```
[0085] Struct BoreholeContactPoint
[0086] {
[0087] long      m_lBoreholeID; // 钻孔编号
[0088] double   m_dX; //X 坐标
[0089] double   m_dY; //Y 坐标
[0090] double   m_dZ; //Z 坐标
[0091] int      m_iAboveID; // 上层地层编号
[0092] int      m_iBelowID; // 下层地层编号
[0093] }
```

[0094] 经过钻孔数据离散化操作,得到一个散点数据集 $P$ ,集合了地层顶、底界面高程插值拟合的样本数据。

[0095] 第四步 定义骨架三角网

[0096] 沉积地层系统中各个地层的顶、底界面在水平面上的投影完全重合,因此,可定义一个骨架三角网作为拟合各个地层顶、底界面空间几何形态的基准三角网。所谓骨架三角网,是指以钻孔孔口平面坐标 $X$ 、 $Y$ 为基准,在建模场区外边界的约束下,采用标准的三角化算法构网并加密的一个不规则三角网。骨架三角网不仅明确界定了待构建的三维地层模型的外边界,还隐式定义了各个地层顶、底界面上下严格一致的几何关系和拓扑关系。

[0097] 第五步 插值拟合地层顶、底界面

[0098] 沉积地层系统中的每一个地层都由顶面三角网和底面三角网封闭而成(侧面可自动生成),这两个三角网都是基于骨架三角网生成的,因此所有地层的顶、底界面都具有上下严格一致的几何关系和拓扑关系。本发明从散点数据集 $P$ 中提取各个地层顶、底界面的样本点坐标,利用这些散点插值拟合相应界面骨架三角网顶点的初始高程。

[0099] 在拟合编号为 $i$ 的地层 $S_i$ 的顶面三角网 $F_{i\_Top}$ 时,本发明从散点数据集 $P$ 中提取 $m\_iBelowID$ 为 $i$ 的散点作为插值拟合的样本点;在拟合 $S_i$ 的底面三角网 $F_{i\_Bottom}$ 时,本发明使用 $m\_iAboveID$ 为 $i$ 的散点作为插值拟合的样本点。在进行插值时,可使用距离反比加权法、最邻近点法、自然邻近点法、径向基函数法、Kriging法等常用的插值算法。

### [0100] 第六步 判定缺失地层类别

[0101] 这一步的工作是根据插值拟合出的缺失地层顶、底界面初始高程来自动推算缺失地层的类别。对于任一缺失地层  $S_i$ ，其顶面三角网记为  $F_{i\_Top}$ ，底面三角网记为  $F_{i\_Bottom}$ 。如果  $S_i$  在钻孔  $B_j$  处缺失，缺失地层的上覆地层  $S_{i+1}$  与下伏地层  $S_{i-1}$  的分界点（简称为缺失点）记为  $P_0$ ， $P_0$  的高程记为  $Z_0$ 。 $S_i$  的顶面三角网  $F_{i\_Top}$  在钻孔  $B_j$  处的顶点记为  $P_{Top}$ ，底面三角网  $F_{i\_Bottom}$  在钻孔  $B_j$  处的顶点记为  $P_{Bottom}$ 。经过前一步插值拟合，可求得  $P_{Top}$ 、 $P_{Bottom}$  的初始高程，分别记为  $Z_{Top}$ 、 $Z_{Bottom}$ 。使用下面的公式计算  $P_{Top}$ 、 $P_{Bottom}$  与  $P_0$  之间的距离  $d_1$ 、 $d_2$ ：

$$[0102] \quad d_1 = Z_{Top} - Z_0$$

$$[0103] \quad d_2 = Z_{Bottom} - Z_0$$

[0104] 由于  $Z_{Top} \geq Z_{Bottom}$ ，所以  $d_1 \geq d_2$ 。如果  $d_1=0$ ， $d_2=0$ ，即  $P_{Top}$ 、 $P_{Bottom}$  与缺失点  $P_0$  重合，本发明认为地层  $S_i$  恰巧在钻孔  $B_j$  位置处尖灭，可作为 0 厚度的完整地层来对待；如果  $d_1 \leq 0$ ， $d_2 < 0$ ，则地层  $S_i$  在钻孔  $B_j$  处非沉积缺失（图 2）；如果  $d_1 > 0$ ， $d_2 \geq 0$ ，则地层  $S_i$  在钻孔  $B_j$  处侵蚀缺失（图 3）；如果  $d_1 > 0$ ， $d_2 < 0$ ，则地层  $S_i$  在钻孔  $B_j$  处复合缺失（图 4）。

[0105] 如果地层  $S_i$  在全部钻孔位置处均为非沉积缺失，本发明认为该地层属于第一类缺失地层；如果地层  $S_i$  在全部钻孔位置处均为侵蚀缺失，本发明认为该地层属于第二类缺失地层；如果地层  $S_i$  在某些钻孔位置处为复合缺失，或者在部分钻孔位置处非沉积缺失、在部分钻孔位置处侵蚀缺失，本发明认为该地层属于第三类缺失地层。

### [0106] 第七步 生成缺失地层处理次序

[0107] 经过地层顶、底界面插值拟合，生成了各地层顶、底界面三角网顶点的初始高程。对于完整地层，其顶面三角网和底面三角网不会交叉，也不会与其它完整地层的顶、底界面三角网相交叉。但对于缺失地层，其顶面或底面三角网则可能会与其上覆地层或下伏地层的顶、底界面三角网交叉。本发明需要根据缺失地层的类别，分别对缺失地层及其控制地层的顶、底界面进行交切处理与高程调整。

[0108] 如果一个地层系统中存在多个缺失地层，在进行地层界面交切处理与高程调整前，需要按照地层的切错关系排出相应的优先级，生成缺失地层的处理次序。本发明按照下面的规则自动进行缺失地层排序工作：

[0109] ① 第三类缺失地层可视为第一类缺失地层与第二类缺失地层叠加合成的结果。因此，在一个地层系统中，如果有第三类缺失地层，需要将第三类缺失地层分解为“第一类缺失地层 + 第二类缺失地层”，即将第三类缺失地层重复记录，它既属于第一类缺失地层，又属于第二类缺失地层。

[0110] ② 第一类缺失地层的优先级高于第二类缺失地层。在进行缺失地层交切处理与高程调整时，先处理第一类缺失地层，再处理第二类缺失地层。

[0111] ③ 如果有多个第一类缺失地层，按照“从老到新，逐个处理”的规则，先处理下层的缺失地层，再处理其上的缺失地层。

[0112] ④ 如果有多个第二类缺失地层，按照“从新到老，逐个处理”的规则，先处理上层的缺失地层，再处理其下的缺失地层。

[0113] 经过排序，生成一个只含第一类缺失地层和第二类缺失地层的缺失地层处理队列。

### [0114] 第八步 缺失地层控制界面交切处理与高程调整

[0115] 这一步的主要工作是按照前一步生成的缺失地层处理次序,逐个对缺失地层控制界面进行交切处理与高程调整。对于不同类别的缺失地层,因其受控于不同的地质界面,使用的处理算法也有差异,下面分别描述。

#### [0116] (1) 第一类缺失地层

[0117] 如果地层  $S_i$  属于第一类缺失地层,则  $S_i$  的缺失边界受控于下伏地层  $S_{i-1}$  的顶面。如图 5 所示,经过第五步的插值,拟合出  $S_i$  的顶、底界面及其下伏地层  $S_{i-1}$  的顶面、上覆地层  $S_{i+1}$  的底面的初始形态。其中,  $S_i$  的顶面三角网记为  $F_{i\_Top}$ ,底面三角网记为  $F_{i\_Bottom}$ ,  $S_{i-1}$  的顶面三角网记为  $F_{(i-1)\_Top}$ ,  $S_{i+1}$  的底面三角网记为  $F_{(i+1)\_Bottom}$ 。

[0118] 首先,处理  $S_i$  的顶面三角网  $F_{i\_Top}$ 。将  $F_{i\_Top}$  与  $F_{(i-1)\_Top}$  进行相交运算,求出这两个三角网的所有交点,作为新顶点插入到骨架三角网中,同时修改  $F_{i\_Top}$ 、 $F_{(i-1)\_Top}$  以及其它全部地层顶、底界面三角网的顶点和拓扑关系。正常情况下,  $F_{i\_Top}$  中顶点的高程应不低于  $F_{(i-1)\_Top}$  上对应的顶点。但在  $S_i$  缺失的区域,会出现  $F_{i\_Top}$  顶点的高程低于  $F_{(i-1)\_Top}$  上对应顶点的高程的情况。这时,需要逐个抬高  $F_{i\_Top}$  顶点的高程值,将其设定为与  $F_{(i-1)\_Top}$  上对应顶点的高程值相等(如图 5 中黑色实线箭头所示)。修改后的  $F_{i\_Top}$  记为  $F'_{i\_Top}$ 。

[0119] 然后,处理  $S_i$  的底面三角网  $F_{i\_Bottom}$ 。从概念上来讲,  $F_{i\_Bottom}$  与  $F_{(i-1)\_Top}$  的相应顶点高程理应完全一致。但由于  $S_i$  是缺失地层,在第五步分别插值求取这两个三角网顶点高程时,使用的样本点并不一致,这导致插值拟合出的对应顶点高程也不完全相同。这需要通过界面交切处理与高程调整来实现两个界面的一致。本发明将  $F_{i\_Bottom}$  与  $F_{(i-1)\_Top}$  进行相交运算,求出这两个三角网的所有交点,作为新顶点插入到骨架三角网中,同时修改  $F_{i\_Bottom}$ 、 $F_{(i-1)\_Top}$  以及其它全部地层顶、底界面三角网的顶点和拓扑关系;接着,逐个比较  $F_{i\_Bottom}$  与  $F_{(i-1)\_Top}$  的对应顶点高程是否相同:如果  $F_{i\_Bottom}$  顶点的高程低于(或高于)  $F_{(i-1)\_Top}$  上对应顶点的高程,则抬高(或压低)  $F_{i\_Bottom}$  顶点的高程值(如图 5 中黑色虚线箭头所示),将其设定为与  $F_{(i-1)\_Top}$  对应顶点的高程值相等。修改后的  $F_{i\_Bottom}$  记为  $F'_{i\_Bottom}$ 。

[0120] 交切处理与高程调整后的缺失地层  $S_i$  的顶、底界面如图 6 所示。

#### [0121] (2) 第二类缺失地层

[0122] 如果地层  $S_i$  属于第二类缺失地层,则  $S_i$  的缺失边界受控于上覆地层  $S_{i+1}$  的底面。如图 8 所示,经过第五步的插值,拟合出  $S_i$  的顶、底界面及其下伏地层  $S_{i-1}$  的顶面、上覆地层  $S_{i+1}$  的底面的初始形态。其中,  $S_i$  的顶面三角网记为  $F_{i\_Top}$ ,底面三角网记为  $F_{i\_Bottom}$ ,  $S_{i-1}$  的顶面三角网记为  $F_{(i-1)\_Top}$ ,  $S_{i+1}$  的底面三角网记为  $F_{(i+1)\_Bottom}$ 。

[0123] 首先,处理  $S_i$  的底面三角网  $F_{i\_Bottom}$ 。将  $F_{i\_Bottom}$  与  $F_{(i+1)\_Bottom}$  进行相交运算,求出这两个三角网的所有交点,作为新顶点插入到骨架三角网中,同时修改  $F_{i\_Bottom}$ 、 $F_{(i+1)\_Bottom}$  以及其它全部地层顶、底界面三角网的顶点和拓扑关系。正常情况下,  $F_{i\_Bottom}$  中顶点的高程应不高于  $F_{(i+1)\_Bottom}$  上对应的顶点。但在  $S_i$  缺失的区域,会出现  $F_{i\_Bottom}$  顶点的高程高于  $F_{(i+1)\_Bottom}$  上对应顶点的高程的情况。这时,本发明需要逐个压低  $F_{i\_Bottom}$  顶点的高程值,将其设定为与  $F_{(i+1)\_Bottom}$  上对应顶点的高程值相等(如图 8 中黑色实线箭头所示)。修改后的  $F_{i\_Bottom}$  记为  $F'_{i\_Bottom}$ 。

[0124] 然后,处理  $S_i$  的顶面三角网  $F_{i\_Top}$ 。从概念上来讲,  $F_{i\_Top}$  与  $F_{(i+1)\_Bottom}$  的相应顶点高程理应完全一致,但由于  $S_i$  是缺失地层,在第五步分别插值求取这两个三角网顶点高程时,使用的样本点并不一致,这导致插值拟合出的对应顶点高程也不完全相同。这需要通过

界面交切处理与高程调整来实现两个界面的一致。本发明将  $F_{i\_Top}$  与  $F_{(i+1)\_Bottom}$  进行相交运算, 求出这两个三角网的所有交点, 作为新顶点插入到骨架三角网中, 同时修改  $F_{i\_Top}$ 、 $F_{(i+1)\_Bottom}$  以及其它全部地层顶、底界面三角网的顶点和拓扑关系; 接着, 逐个比较  $F_{i\_Top}$  与  $F_{(i+1)\_Bottom}$  的顶点高程是否相同: 如果  $F_{i\_Top}$  顶点的高程低于(或高于)  $F_{(i+1)\_Bottom}$  上对应顶点的高程, 则抬高(或压低)  $F_{i\_Top}$  顶点的高程值(如图 8 中黑色虚线箭头所示), 将其设定为与  $F_{(i+1)\_Bottom}$  对应顶点的高程值相等。修改后的  $F_{i\_Top}$  记为  $F'_{i\_Top}$ 。

[0125] 交切处理与高程调整后的地层  $S_i$  的顶、底界面如图 9 所示。

[0126] 第九步 缺失地层与邻接地层界面一致性处理

[0127] 这一步的工作是按照第七步生成的缺失地层处理次序, 逐个处理缺失地层与邻接地层的公共界面, 以保证上下邻接地层公共界面的一致性。

[0128] 如果地层  $S_i$  属于第一类缺失地层, 则逐个修改上覆地层  $S_{i+1}$  底面三角网  $F_{(i+1)\_Bottom}$  的顶点高程, 使其与  $F'_{i\_Top}$  完全相同。修改后的  $F_{(i+1)\_Bottom}$  记为  $F'_{(i+1)\_Bottom}$ 。如果地层  $S_i$  属于第二类缺失地层, 则逐个修改下伏地层  $S_{i-1}$  顶面三角网  $F_{(i-1)\_Top}$  的顶点高程, 使其与  $F'_{i\_Bottom}$  完全相同。修改后的  $F_{(i-1)\_Top}$  记为  $F'_{(i-1)\_Top}$ 。一致性处理后的地层顶、底界面分别如图 7 (第一类缺失地层)、图 10 (第二类缺失地层) 所示。

[0129] 经过上述处理, 保证了所有邻接地层公共界面的一致性, 即: 所有地层(不论是完整地层, 还是缺失地层)的顶面三角网与其上覆地层的底面三角网完全一致, 所有地层的底面三角网与其下伏地层的顶面三角网完全一致。

[0130] 第十步 生成三维实体模型

[0131] 经过前面各步的处理, 完成了各个地层顶、底界面三角网的重构工作, 生成了由三角面片组成的地层顶、底界面。这一步的工作是: 从下到上逐个处理各个地层, 以其顶面三角网和底面三角网为空间基准, 应用三维空间离散化方法对顶面三角网和底面三角网围成的空间进行剖分, 生成用三棱柱体元充填的三维实体模型。

[0132] 第十一步 三维可视化分析

[0133] 在计算机显示器上绘制出最终的沉积地层系统三维实体模型, 以不同的颜色和亮度代表不同的地层和地质界面; 然后, 对生成的地层实体模型进行常规的可视化展示与专业的三维分析, 包括三维观察、交互定位、模型剖切、隧洞开挖、体积量算等。基于三棱柱体元表示的三维实体模型非常适合于空间操作与空间分析, 能够直观、准确、全面的展示三维地层模型的内部信息。

[0134] 下面介绍本发明在两个具有典型研究场区的实施结果。

[0135] (1) 研究场区一: 受控于侵蚀作用的沉积地层系统

[0136] 第 1 个研究场区位于我国长江下游某城市中心城区, 面积约  $500 \times 500 \text{m}^2$ 。如图 11 所示, 研究区内 7 个控制性钻孔揭示了 6 个地层(从下到上依次简记为①~⑥), 其中地层①、④~⑥是完整地层, ②、③是缺失地层。研究区内的缺失地层属第二类缺失地层, 主要受河流侵蚀和淤积作用控制。图 12- 图 16 展示了基于钻孔数据、使用本发明自动生成的各个地层的控制界面和三维实体模型。其中, 图 12 展示了地层分界面的空间分布, 图 13、图 14 是从不同视角查看的三维实体模型, 图 15 是过钻孔 B2、B5、B4 生成的剖面图, 图 16 是对三维实体模型进行剖切操作后生成的栅状图。

[0137] 从图 11- 图 16 可以看出, 使用本发明自动重构出来的地层顶、底界面形态自然, 缺

失地层的控制边界也很合理。为了定量评估这个模型的精度,使用实际工程建设过程中新增的钻孔和基坑开挖数据进行验证工作。结果发现,在本发明所构建的三维地层模型中,完整地层顶、底界面高程与实测数据的误差在 5cm 以内,缺失地层顶、底界面高程与实测数据的误差小于 8cm。总体来看,模型的精度较高,可直接应用于工程实际。

[0138] (2) 研究场区二:非沉积和侵蚀复合叠加下的沉积地层系统

[0139] 第二个研究场区位于我国长江下游某城市中心城区,面积约  $800 \times 600\text{m}^2$ 。如图 17 所示,研究区内 6 个钻孔揭示了 4 个地层(从下到上依次简记为①~④),其中地层①、④是完整地层,②、③是缺失地层。图 18- 图 22 是使用这 6 个钻孔数据自动生成的各地层的控制界面以及三维实体模型。其中,图 18 展示了地层分界面的空间分布,图 19、图 20 是从不同视角查看的三维实体模型,图 21 是过钻孔 C2、C6、C5、C4 生成的剖面,图 22 是对三维实体模型进行剖切操作后生成的栅状图。从图 18- 图 22 中可以看出,地层②、③在某些钻孔位置处(如 C2)为非沉积缺失,在某些钻孔位置处(如 C4)为侵蚀缺失,地层的顶、底界面受非沉积作用和侵蚀作用共同控制,因此属第三类缺失地层。实际工程也验证了这个模型的准确性。这个实例直观的展示了本发明处理复合缺失地层的有效性和合理性,说明其具有自动重构复杂地质条件下形成的沉积地层系统的能力。

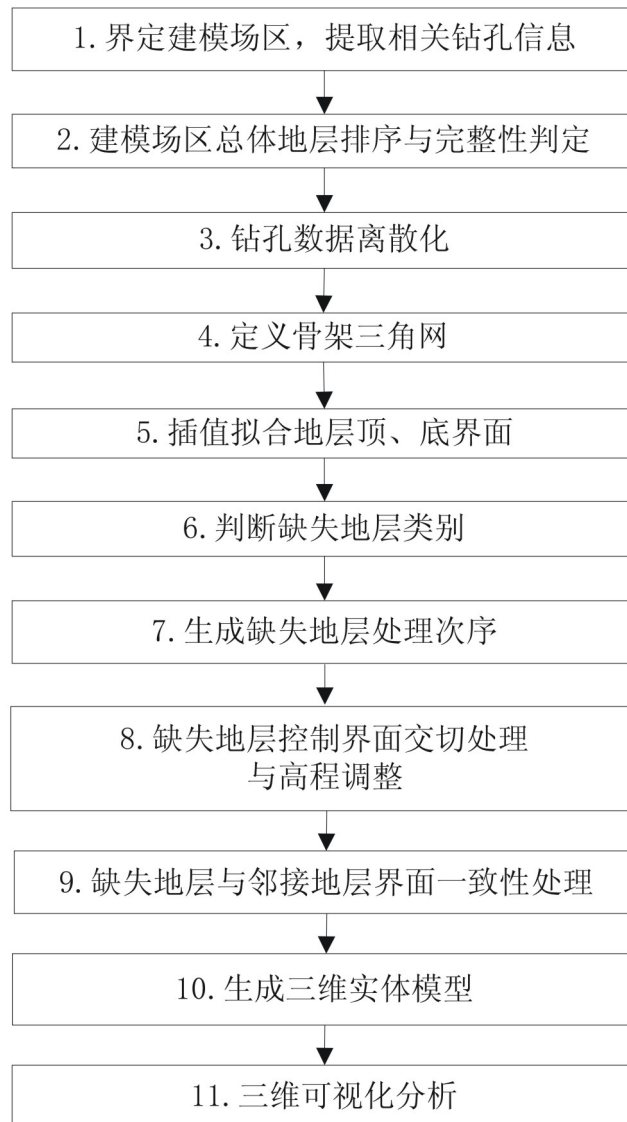


图 1

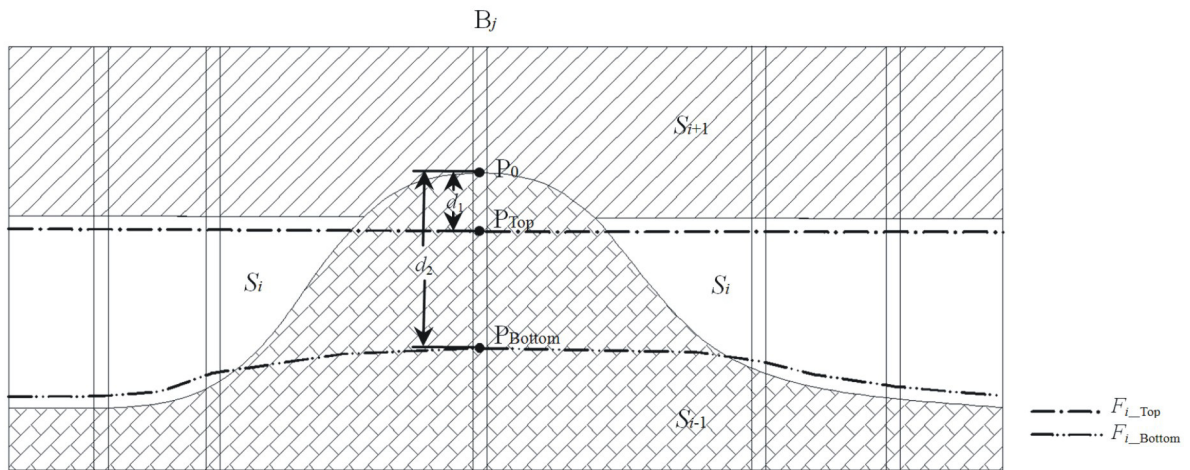


图 2

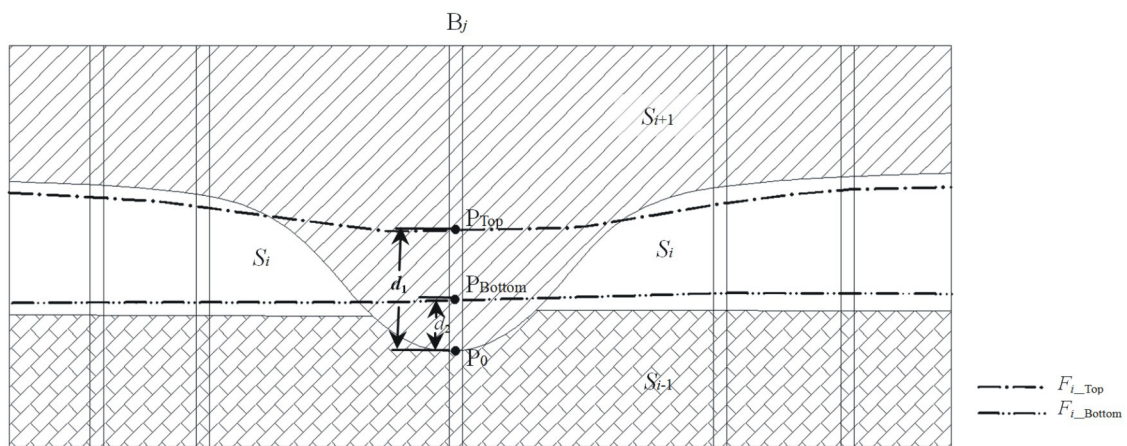


图 3



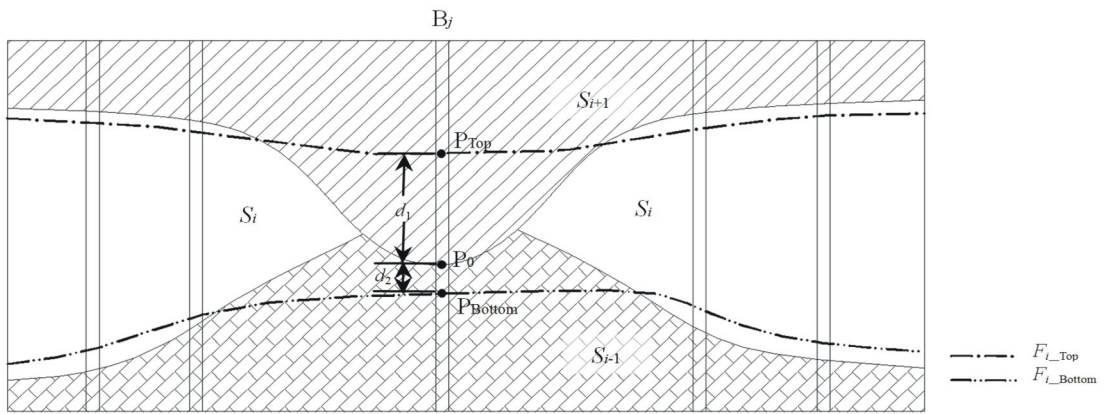


图 4

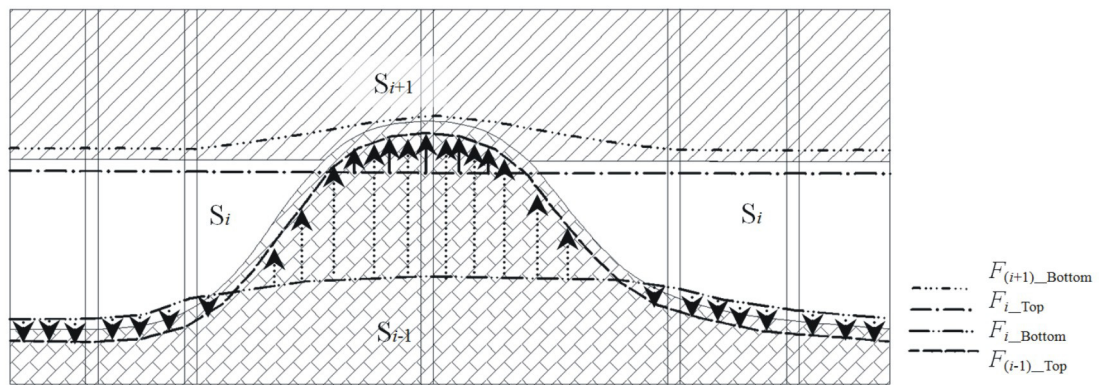


图 5

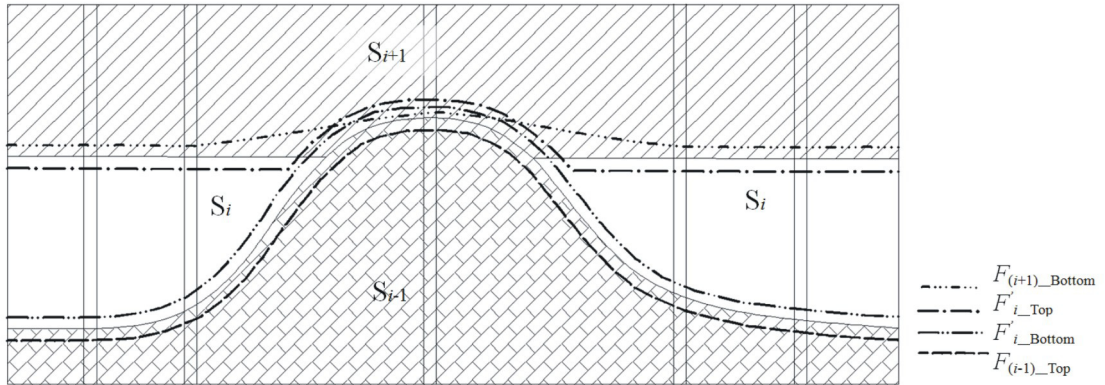


图 6

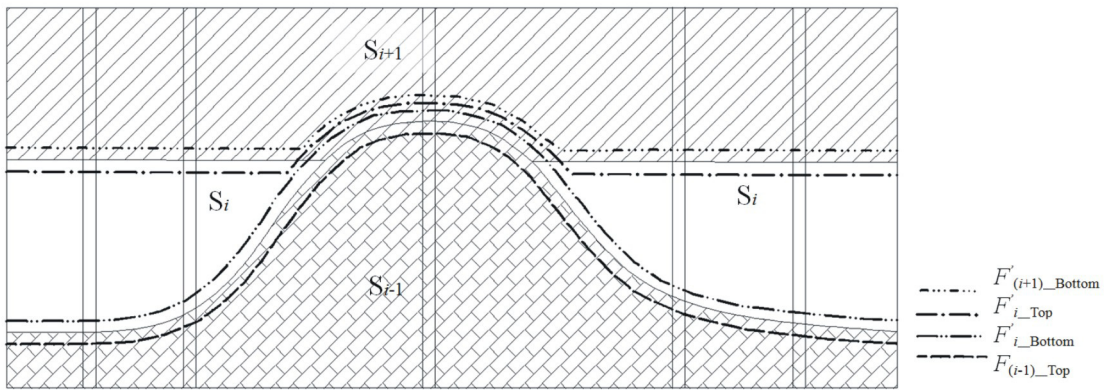


图 7

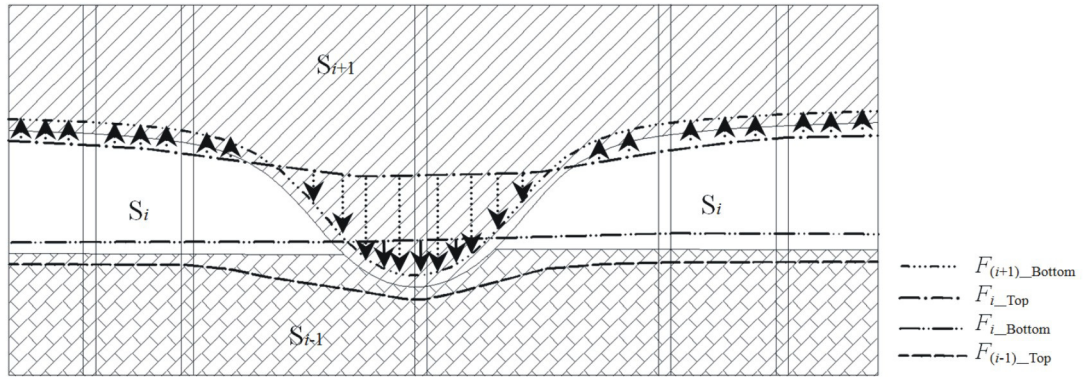


图 8

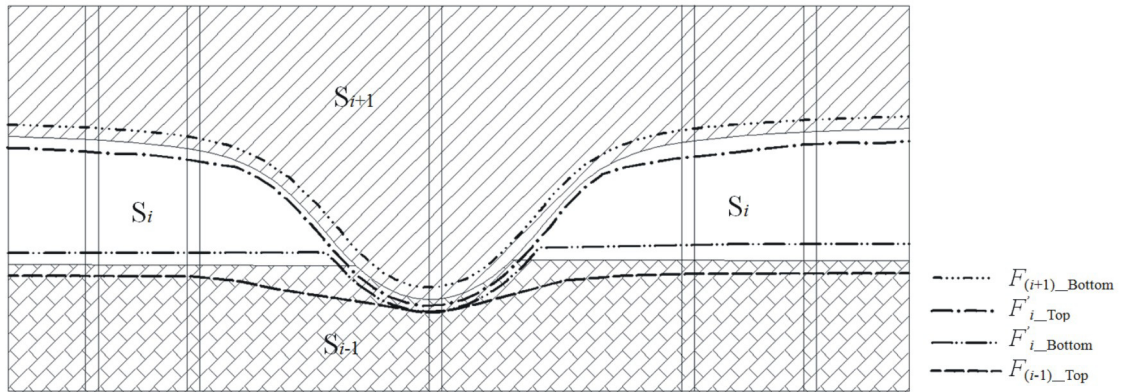


图 9

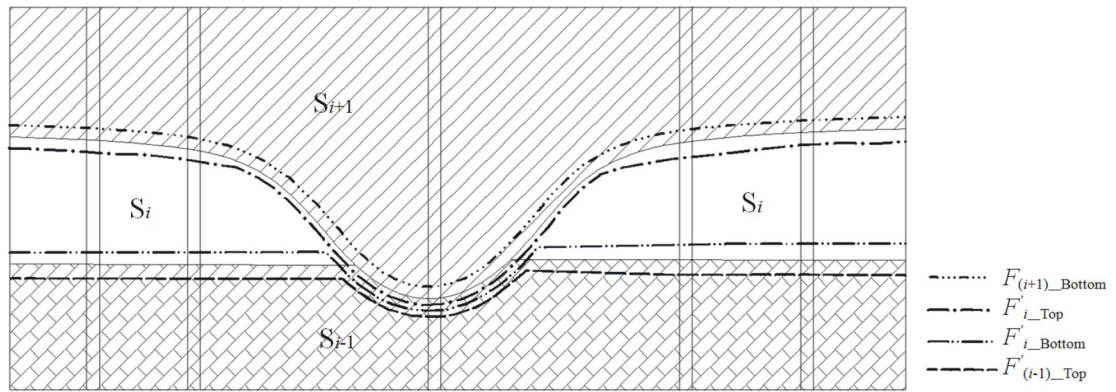


图 10



图 11

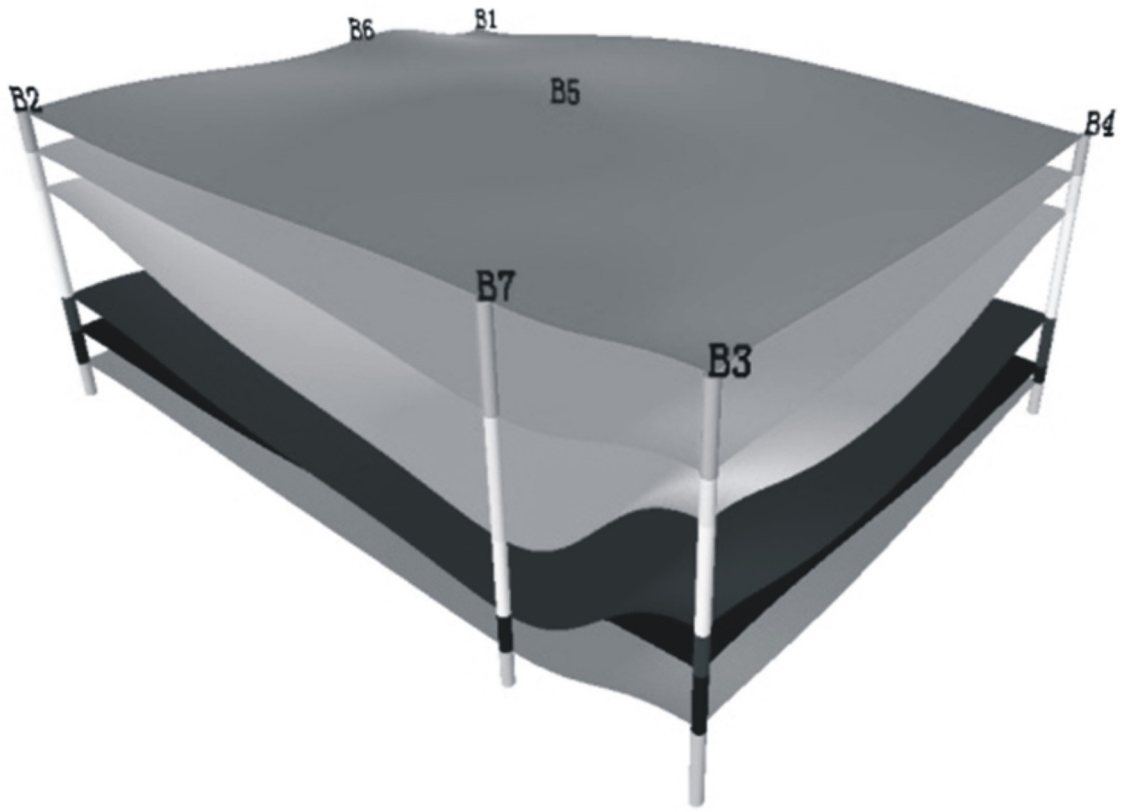


图 12

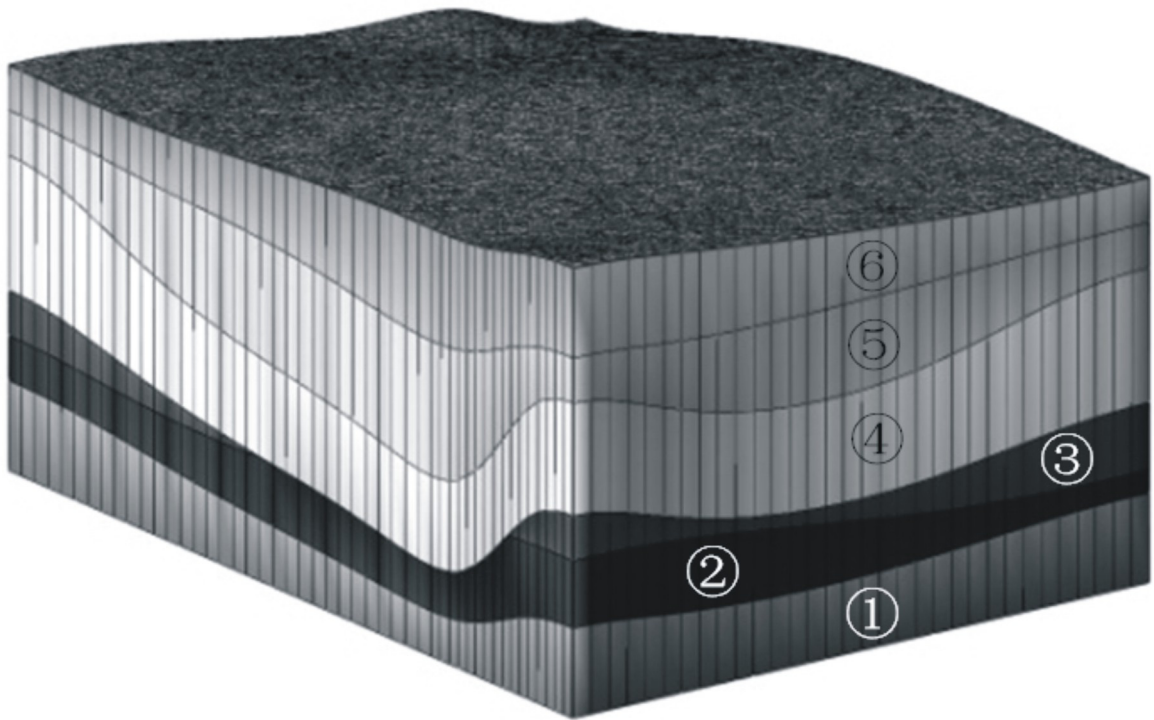


图 13

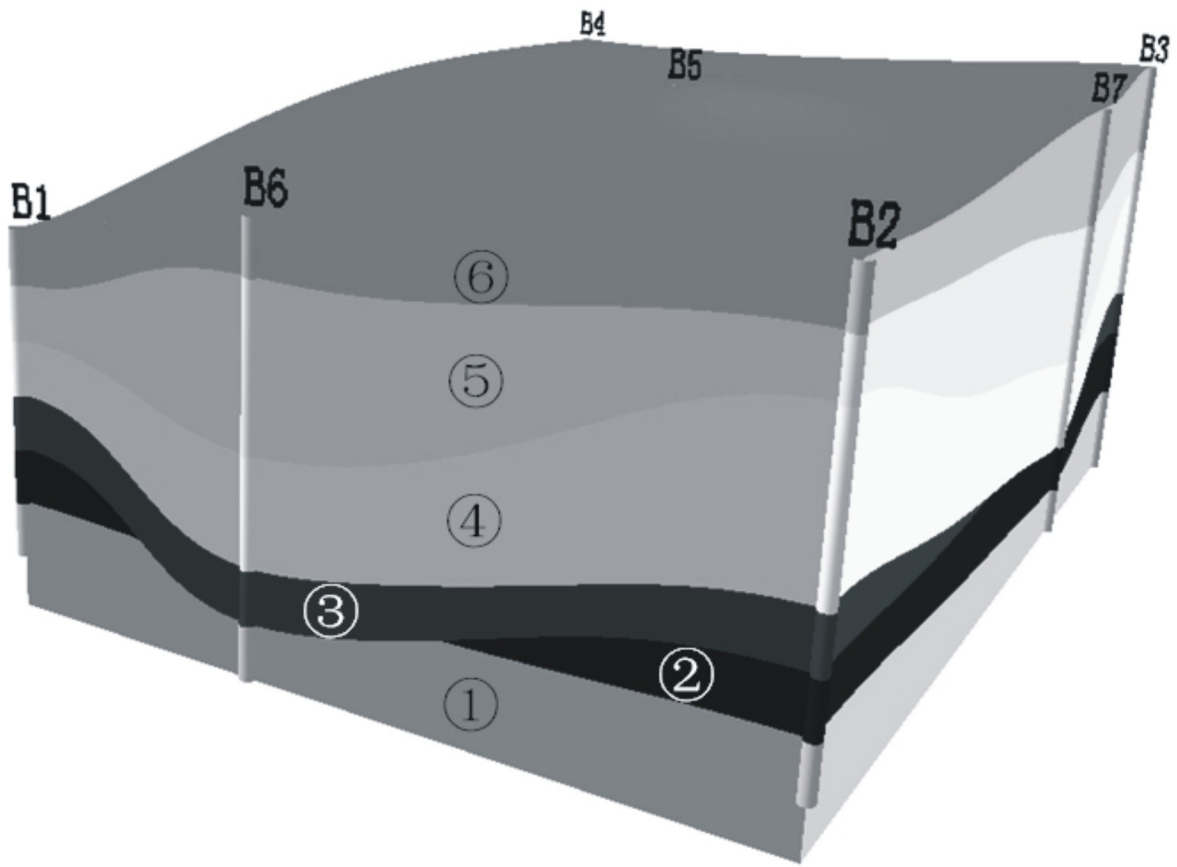


图 14



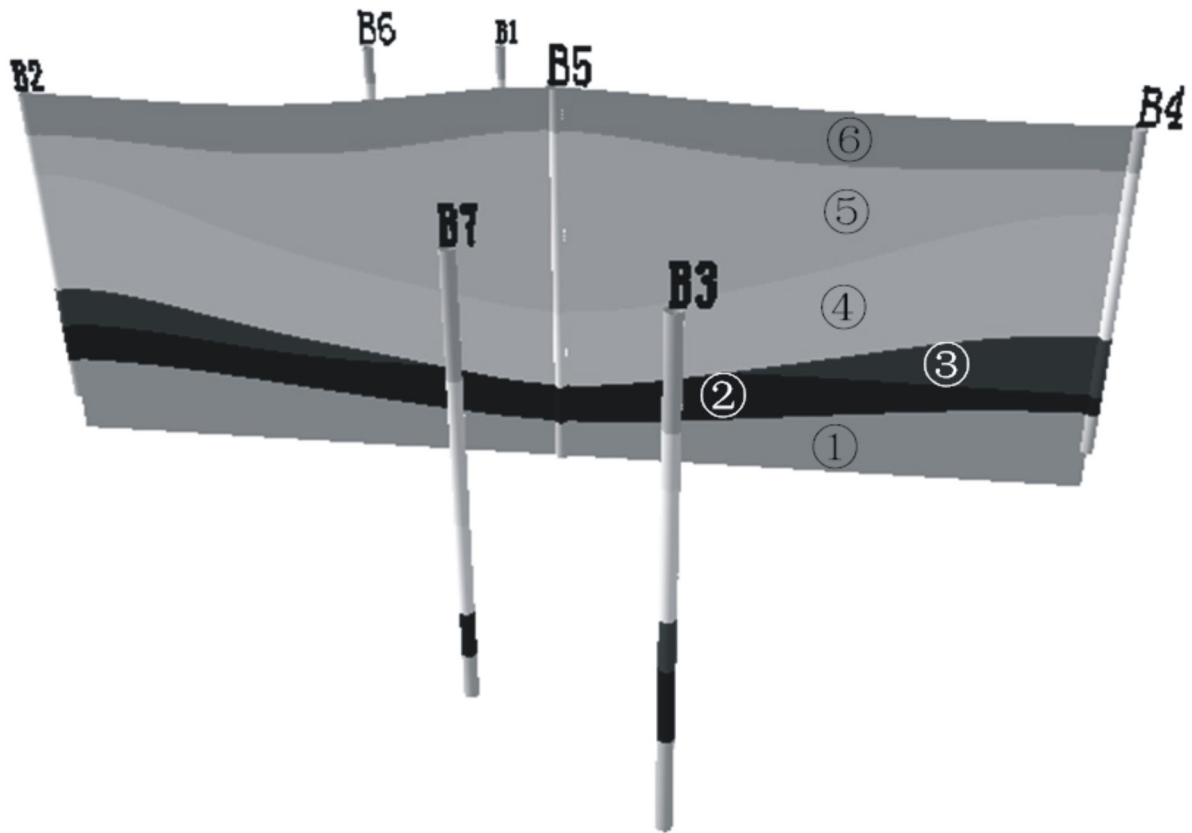


图 15

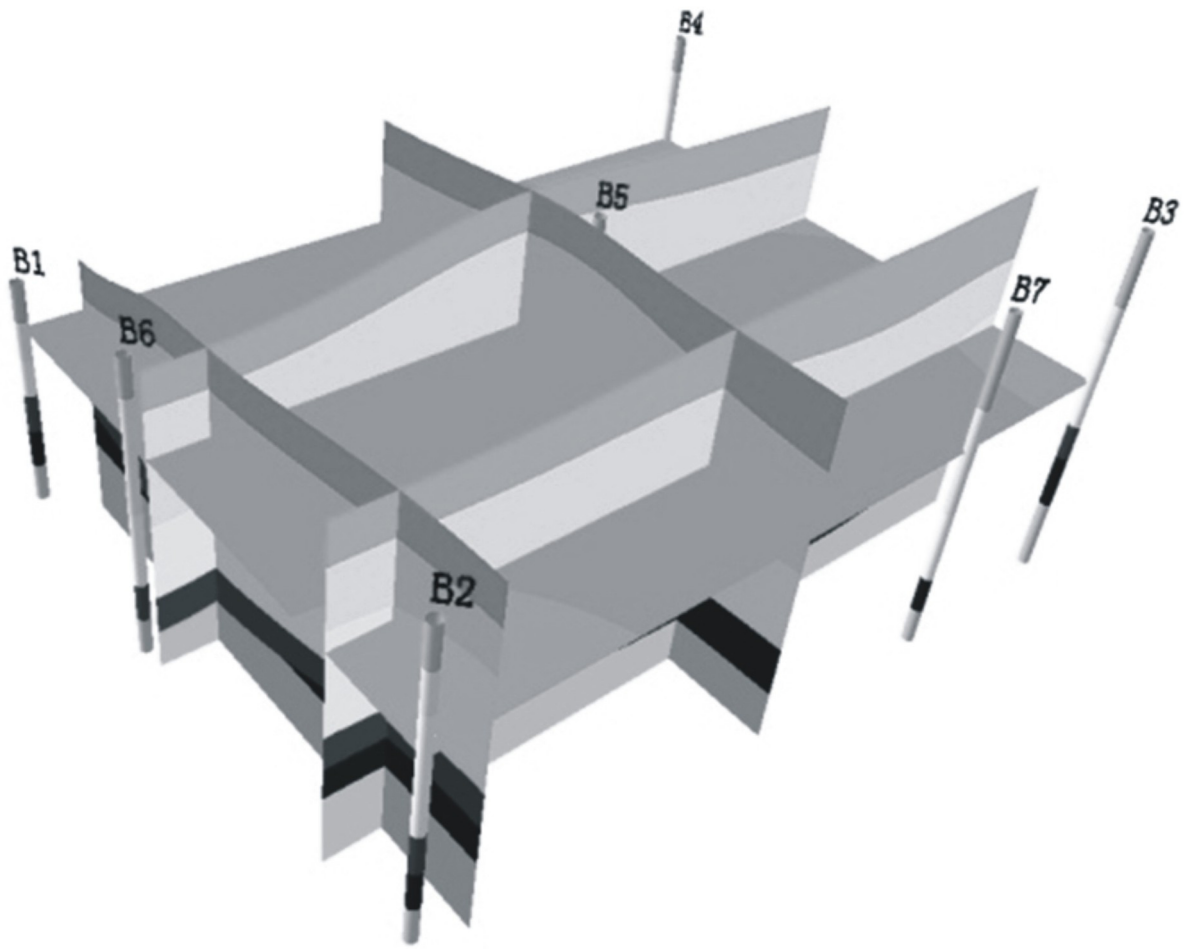


图 16

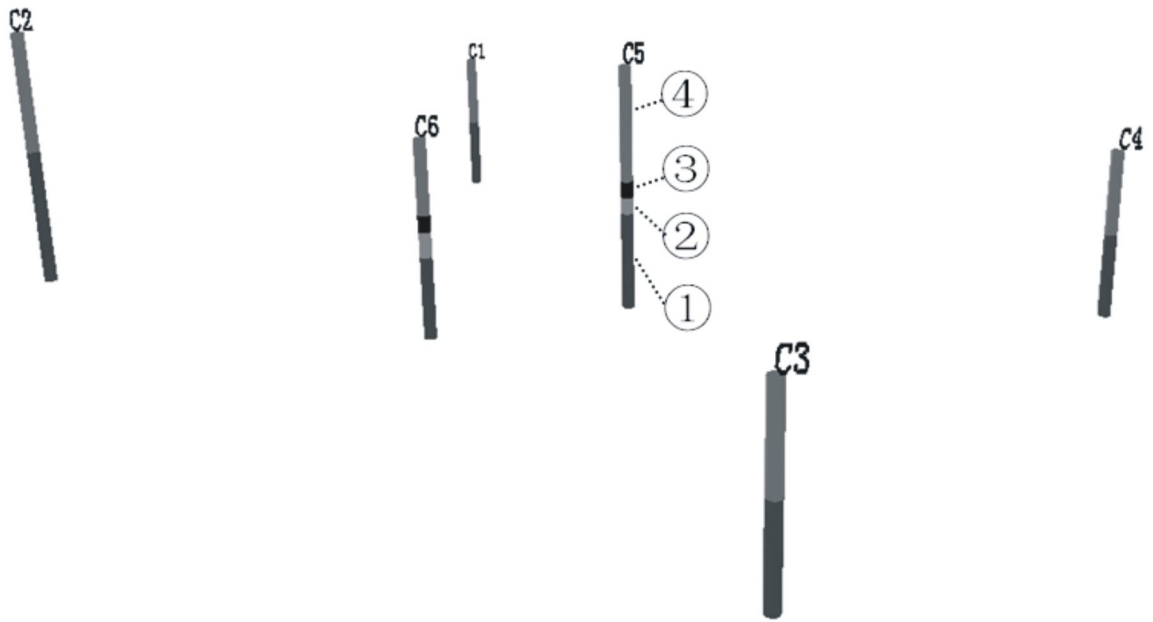


图 17

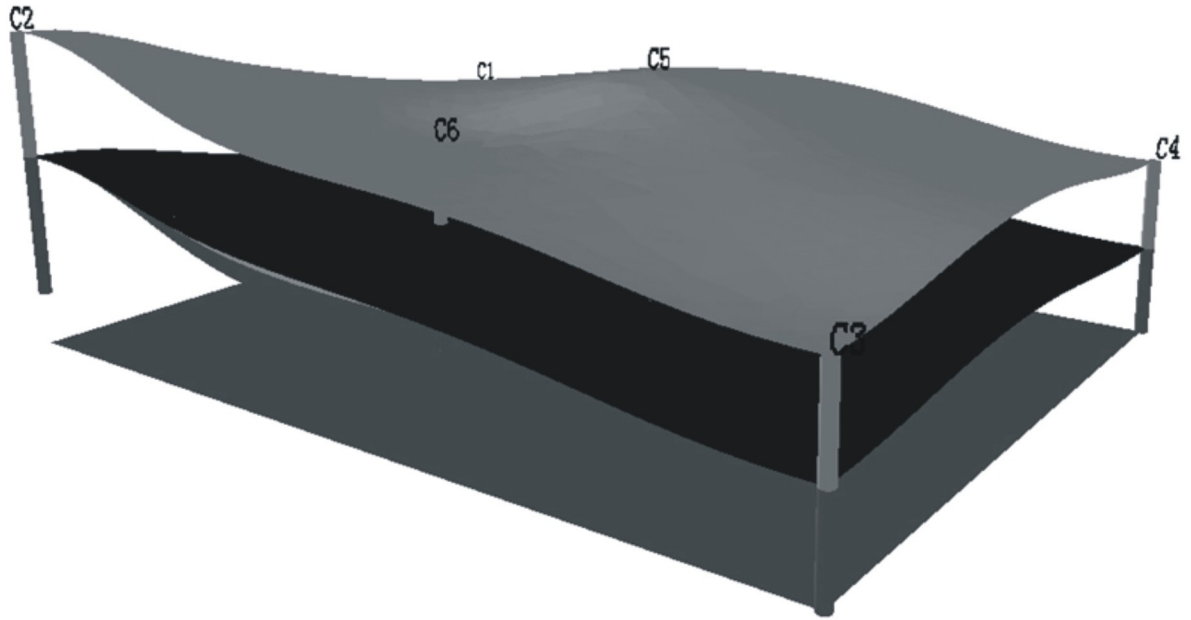


图 18

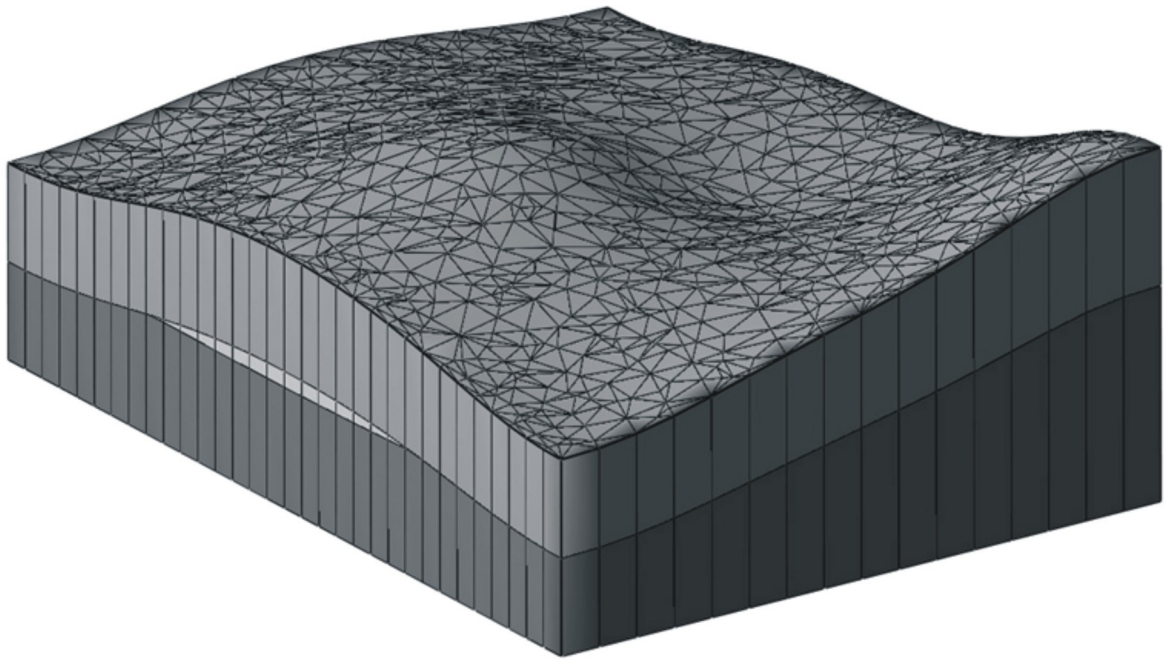


图 19

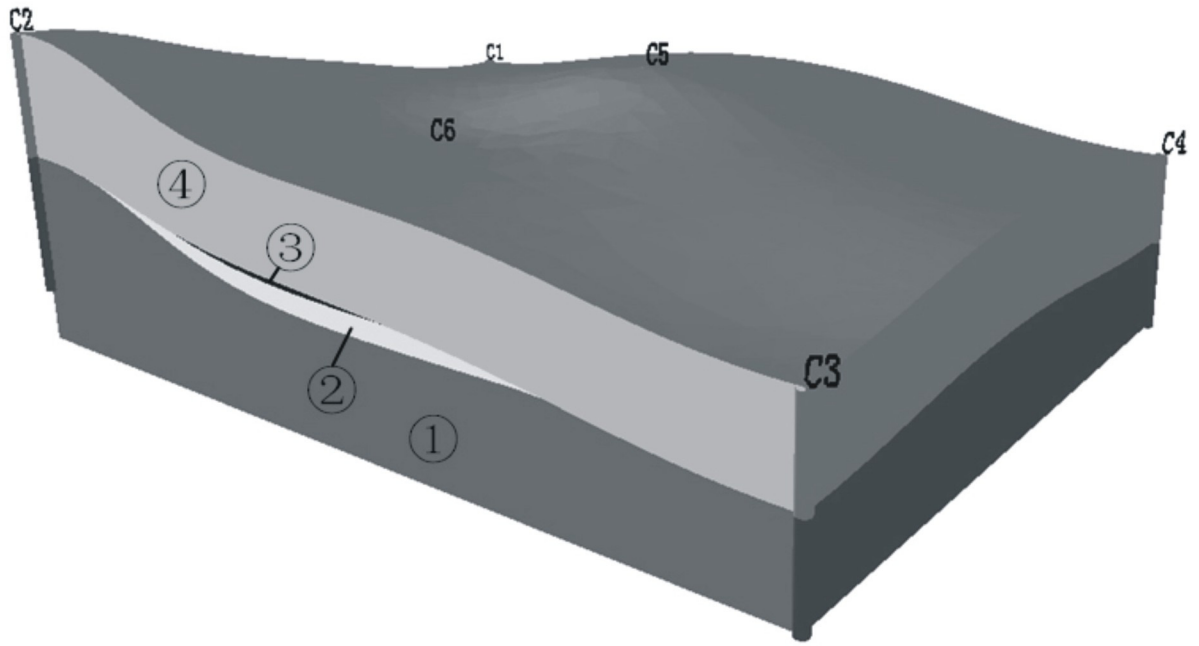


图 20

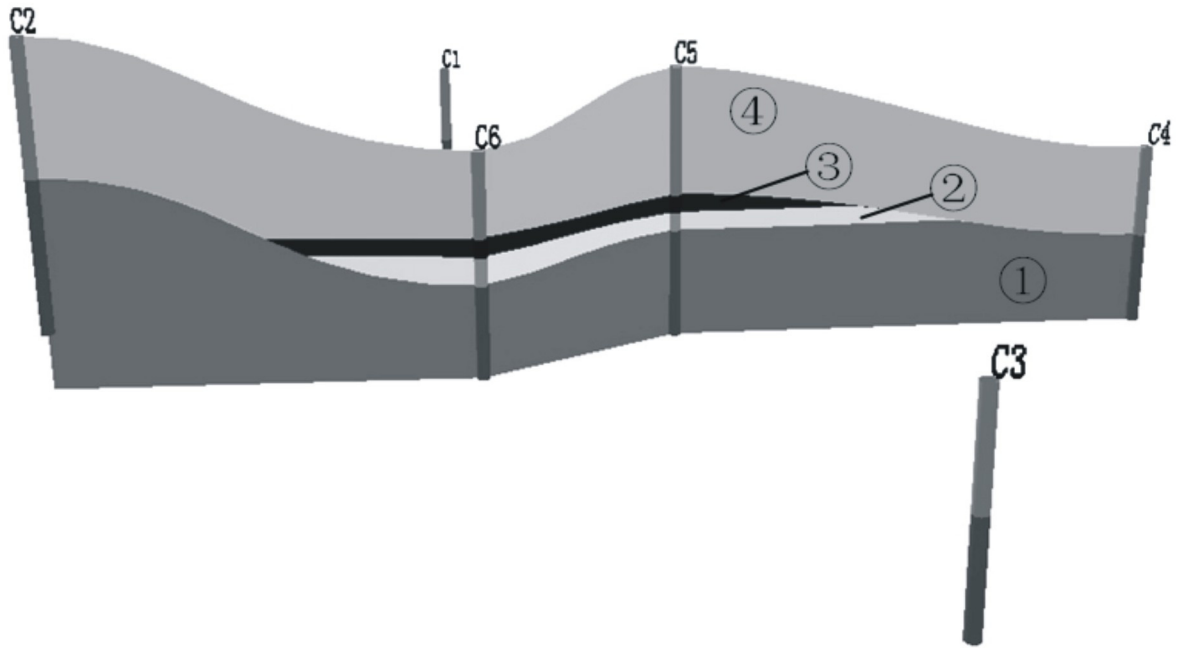


图 21

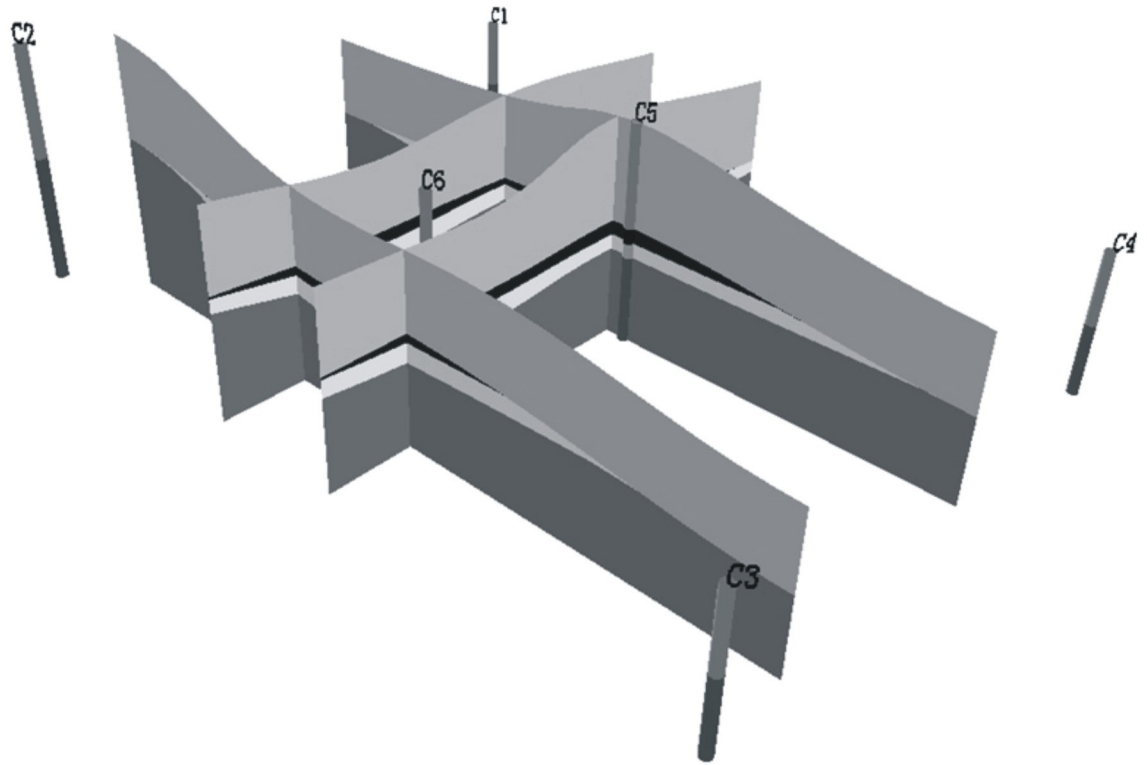


图 22