DOI：10.16285/j.rsm.2017.04.037

一种基于 TIN-CPG 混合空间数据模型的精细三维地质模型构建方法

唐丙寅[1,2]，吴冲龙[3,4]，李新川[3]

（1. 南阳理工学院 软件学院，河南 南阳 473004；2. 中国地质大学（武汉）资源学院，湖北 武汉 430074；
3. 中国地质大学（武汉）计算机学院，湖北 武汉 430074；4. 中国地质大学（武汉）教育部长江三峡库区地质灾害研究中心，湖北 武汉 430074）

摘 要：精细三维地质模型的构建是实现地质体真三维可视化分析的难题之一。提出一种基于不规则三角网（TIN）和角点网格（CPG）的混合空间数据模型来构建三维精细地质模型的方法。首先建立基于 TIN 的构造-地层格架三维地质模型，然后进行 TIN 面元模型到 CPG 体元模型的转换，将基于 TIN 的构造-地层格架模型转换为基于 CPG 的精细网格体元地质模型，从而实现“表达上”精细三维地质模型的构建。在转换过程中首先要进行地层序列的定义，然后对空间格网进行划分，在此基础上计算格网中各个单元格的空间坐标和各个网格的有效性，并将计算结果存储为 GRDECL 格式文件，最后通过 QuantyView3D 系统读取该文件实现精细地质属性模型的展示。利用该方法对沿海某城市一个重点区域进行精细水文地质模型的构建，验证了其方法的可行性。

关 键 词：不规则三角网(TIN)；角点网格(CPG)；TIN-CPG 混合空间数据模型；精细三维地质建模

中图分类号：P 642 **文献识别码：**A **文章编号：**1000－7598 (2017)04－1218－08

A fine 3D geological modeling method based on TIN-CPG hybrid spatial data model

TANG Bing-yin[1,2], WU Chong-long[3,4], LI Xin-chuan[3]

（1. School of Software, Nanyang Institute of Technology, Nanyang, Henan 473004, China; 2. Faculty of Earth Resources, China University of Geosciences(Wuhan), Wuhan, Hubei 430074, China; 3. College of Computer Science, China University of Geosciences(Wuhan), Wuhan, Hubei 430074, China; 4. Three Gorges Research Center for Geo-hazard of Ministry of Education, China University of Geosciences(Wuhan), Wuhan, Hubei 430074, China）

Abstract: The construction of fine 3D geological modeling is one of challenges in realizing true 3D visualization of geological body. Based on Triangulate Irregular Network (TIN) and Corner Point Grid (CPG) spatial data model, we propose a hybrid spatial data model for constructing fine 3D geological model. Firstly, a tectonic-stratigraphic framework model is set up based on TIN. Then, the framework model is converted into fine volumetric 3D geological model based on CPG voxel data model, and thus the fine expression of inner space of 3D geological body is achieved. During the converting process, it is necessary to define the order of strata. The mesh of the geological body is further realized by calculating the spatial coordinate of each grid cell and validating and saving data file in GRDECL format. Finally, the fine geological model is displayed by inputting the file into QuantyView3D system. A fine 3D hydrogeological model of the key area of a coastal city is constructed successfully by using the proposed method, and the feasibility of this method is verified.

Keywords: triangulate irregular network (TIN); corner point grid (CPG); TIN-CPG hybrid spatial data model; fine 3D geological modeling

1 引 言

三维地质建模（3D geoscience modeling）是由加拿大学者 Houlding[1]于 1994 年首先提出来的。经过 20 多年的发展，在地质工程、水利水电工程、城市地下空间开发等方面得到广泛的应用。

收稿日期：2015-05-25
基金项目：国家高技术研究发展计划(863 计划)(No. 2008AA121602)。
This work was supported by the National High Technology Research and Development Program of China (863 Program) (2008AA121602).
第一作者简介：唐丙寅，男，1986 年生，博士，讲师，主要从事地学信息三维可视化和地理信息系统相关的研究工作。E-mail: angin513@163.com
通讯作者：吴冲龙，男，1945 年生，硕士，教授，博士生导师，主要从事地学信息工程的研究与教学工作。E-mail: wucl@cug.edu.cn

空间数据模型是三维地质模型的核心问题，它的选取对三维地质模型的构建有着至关重要的作用。空间数据模型大致可以分为 3 类：面元模型、体元模型和混合模型[2]。其中面元模型主要是用于表示三维空间物体的表面，例如地形表面、地层面等，通过构建三维物体的表面，从而达到构建整个物体的空间三维立体效果的目的。其优点在于有利于数据的显示和更新，且占用的存储空间小；缺点是难以进行空间分析，并且不能表达出内部非均质的地质现象。体元模型数据结构主要是对三维空间体的表示。它是从栅格数据结构演变而来，即二维栅格数据结构在三维空间中的扩展，它是把三维空间看成是不重叠且互相联通的几何体素，通过对三维体元的描述来达到对三维空间目标的表示。这种数据结构的优点是空间操作和分析方便，对体单元的多属性信息表达较好;缺点是存储空间占用较大，计算速度比较慢。混合模型数据结构是一种将两种或两种以上的数据结构结合来表示三维空间实体的一种数据结构。根据单一数据模型所建立的三维地质模型较为粗糙，精度不高，不能很好地支持工程地质分析等方面应用，难以实现对地质体和地质结构的精确描述。根据已有的研究和比较[3−4]，混合数据模型可以充分利用不同的数据模型在描述不同空间实体所具有的优点，增加了数据结构的灵活性，有益于提高模型的精度。因此，混合数据模型越来越受到专家和学者的关注[3−5]。

李清泉等[3]指出了混合数据结构模型有两种形式，其中一种就是在同一个系统中集成多种数据结构模型，通过数据转换达到数据融合，并且针对不同的分析和处理采用不同的数据结构模型，或是针对不同的现象来确定模型的使用。针对这种混合构模方式，朱良峰等[6]提出了地质空间多场耦合构模技术，并设计了基于边界表示（B-Rep）和地质晶胞（Geocellular）的混合数据模型；Watson 等[7]开发了一种可以将地质层面模型转化成三维体元属性模型工具—SurfGrid，并采用 GVS 格式存储规则体元数据，但转化后的体元是规则体元，不能很好地表示地质体的地质形态。

本文从精细建模角度出发，模型精细程度越高越有利于地质人员对模型的理解和分析，但精细模型的构建需要有精细空间数据模型的支持。据此，本文提出一种基于不规则三角网(TIN)数据模型和角点网格(CPG)数据模型的混合空间数据模型来实现三维精细地质模型的构建。

2　TIN-CPG 空间数据模型构建原理

2.1　TIN

不规则三角网（triangulate irregular network, TIN）是目前三维地质建模中较常用的空间数据模型。最初由俄国数学家 Delaunay[8]在 1934 年由 Voronoi 图推演而来，并由 Peuker 等在 1978 年设计出来。

TIN 是按照一定的原则将空间离散点数据进行三角剖分，连接成相互连续、互不交叉、互不重叠的三角面格网，且区域内的任意点都要落在三角面片的顶点、边或三角形内，从而生成相应的地形面或地质层面。TIN 的优点是在建立模型时可以根据表面的复杂程度变化三角形面片的大小和数量，消除可视化时的数据冗余，并保持较高的拟合精度。采用 TIN 模型构建地层面比格网模型表达的地层面具备更多的优势[9]，但 TIN 模型只能用来建立较为粗糙的三维地层格架模型，对三维地质模型层面之间内容的表达较为粗略。

2.2　CPG

角点网格（CPG）是一种非结构化网格，其本质上是一系列不规则六面体格网单元，在逻辑结构上是 $I\times J\times K$ 的规则拓朴结构模型。这种结构在 X 方向上有 $I+1$ 条线段，将格网划分为 I 个单元格；在 Y 方向上有 $J+1$ 条线，将格网划分为 J 个单元格；在 Z 方向上有 $K+1$ 条线，将格网划分为 K 个单元格，单元格的总数目为 $I\times J\times K$ 个。每个单元网格属于一个角点网格单元，如图 1 所示。与矩形网格相比，角点网格模型单元格网的长、宽大小均可变，垂向连接顶底网格点的网格面也可以是倾斜的，因此，可以很好地表达出复杂地质构造的形态[10−11]。

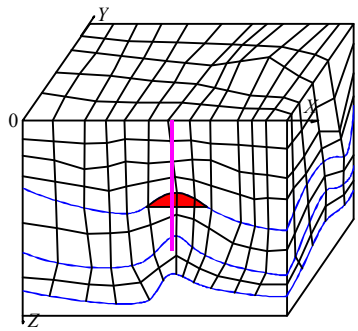


图 1　角点网格模型示意图

Fig.1　Schematic of the corner point grid model

角点网格剖分的最终结果是垂向不规则六面体网格（如图 2 所示），它与常规的规则六面体网格的不同之处是：组成角点网格中的不规则六面体单元格的 8 个点的坐标不是一成不变的，即它可以根

据地质体的形态变化来任意改变其 8 个顶点的坐标值。通过对任意顶点坐标的退化改变，可以形成不同形状的地质体单元网格，直至其退化为体积为 0 的无效网格。如图 3 所示，对图 3(a)中的顶点 C 来说，通过调整顶点 C 的坐标为顶点 C' 的坐标，可以实现两个点的重合，这对单元格来说是顶点 C 退化到顶点 C' 。以此类推，对顶点 A 和顶点 D 的坐标进行相应的处理，从而可以使整个不规则六面体格网面形态上得到改变，这就是不规则六面体的退化。通过退化处理，地层面可以依附在不规则六面体的各个面上，通过面之间的拓扑关系得到地层面信息。

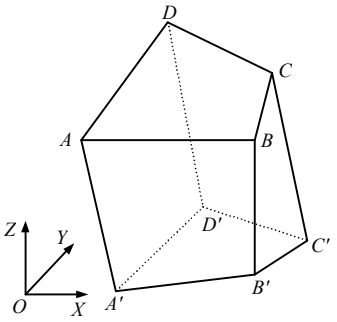


图 2 不规则六面体空间形态示意图[12]
Fig.2 Schematic of an irregular hexahedral space form

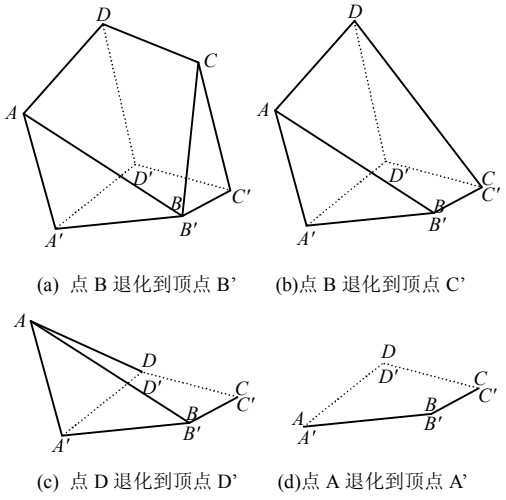


图 3 不规则六面体退化示意图[11]
Fig.3 Schematics of the irregular hexahedral degradation

此外，这种数据结构还能够根据需要来增加单元格的数量，从而提高模型所表达的地质单元在空间上的精细程度；并对单元格进行属性赋值，构建相应的属性模型，达到地质体非均质性的精细表达。

2.3 TIN-CPG 混合数据模型

基于 TIN 的面元模型利用 TIN 的特点，能很好地模拟出地层的走势，相对于其他空间数据模型来说，其对地质层面的模拟结果较为准确，但不能很好地表达出层面之间的地质情况，即横向准确，纵向粗略；基于 CPG 的体元模型可以根据三维地质模型精度的要求，将地质区域划分为一个个小的地质块体，所划分的块体越多，建立的模型表达上越精细，但对地质层面的表达上却不如 TIN 精确，即纵向准确，横向粗略。基于 TIN-CPG 混合空间数据模型可以利用以上两种空间数据模型的优点，实现优势互补，从而建立横纵向都精确的三维地质模型。

基于 TIN-CPG 混合空间数据模型的构建原理是：首先通过 TIN 算法构建出基于 TIN 的构造–地层格架三维地质模型；然后根据 CPG 的数据结构特点，建立 TIN 模型向 CPG 模型转换的算法，即将 TIN 模型结构的地层格架模型转换为 CPG 结构的精细地质模型，实现 TIN 三维地质模型向 CPG 精细三维地质模型的转换。模型转换示意如图 4 所示。

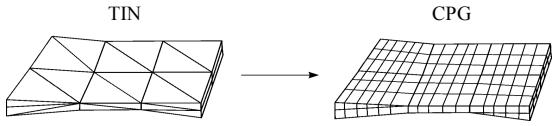


图 4 TIN 数据模型转到 CPG 数据模型示意图
Fig.4 Schematics of TIN transform to CPG

该混合模型优点在于：①充分考虑了 TIN 模型对三维形态的描述方面具有高精度、数据量小和计算时间短的特点，同时能够对各种特殊的地形形态进行较合理的描述；②CPG 模型本中每个单元格（六面体）的 8 个顶点坐标都是可变的，即可以根据地质体的形态变化来改变任一点的坐标，对单元格做相应的退化处理，从而可以更好地表达出实际的地质现象（例如：尖灭、透镜体）；③CPG 模型通过对单元格的剖分，可以实现高精度的三维地质属性模型的构建。CPG 模型构建的精度是根据地质人员研究需求、计算机运算速度以及计算机存储能力来决定的，即在对研究区进行精细建模时，所提供的计算机计算速度越快，存储空间越大，对单元格划分得越小，所建立的三维模型就越精细。这就从模型表达上为构建高精细模型提供了可能。

3 TIN-CPG 空间数据模型构建

对于 TIN-CPG 空间数据模型的构建，关键是 TIN 空间数据模型向 CPG 空间数据模型的转换，其转换流程如图 5 所示。

3.1 基于 TIN 数据模型的构造–地层格架模型建立

在进行 TIN 转换到 CPG 之前，首先要建立基

于 TIN 的构造-地层格架模型。

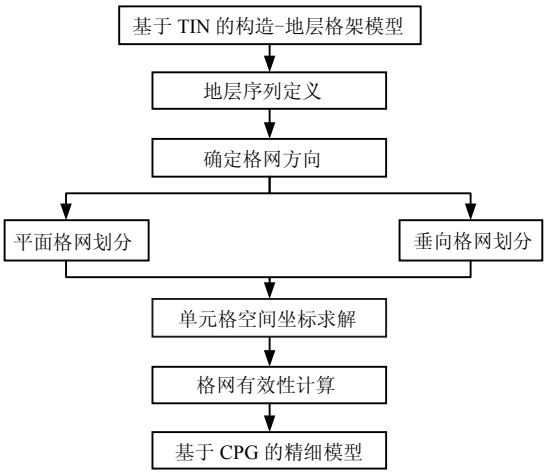


图 5　精细三维地质模型构建流程

Fig.5　Construction process of the fine 3D geological model

基于 TIN 的构造-地层格架模型主要是通过对剖面中不同地层的地层线进行插值，生成基于 TIN 的三维地质面模型，再通过面成体算法，实现基于 TIN 的构造-地层格架三维地质体模型。使用的数据主要是钻孔数据和地表等高线数据。其建模流程如图 6 所示，具体建模步骤为[12−13]：

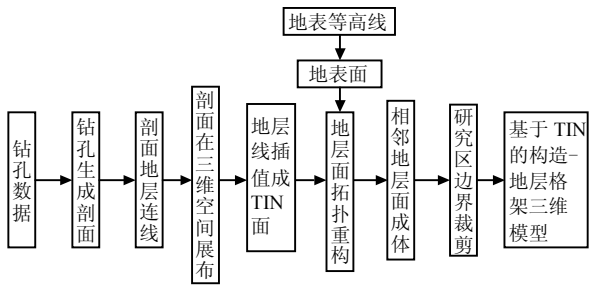


图 6　基于 TIN 的构造-地层格架模型建模流程

Fig.6　Modeling process of tectonic-stratigraphic framework based on TIN

（1）根据钻孔数据按照一定间距的勘探线，投影生成钻孔剖面。

（2）在钻孔剖面中按照地层划分规则进行地层连线。这个连线规则可以是按照岩土体划分来连接，也可以按照地层时代划分来连接。

（3）利用钻孔孔口坐标和每个钻孔深度数据，通过校正，将二维地层连线三维化，同时将地表等高线数据也校正到三维空间中。

（4）利用插值算法，对上一步中展布在三维空间的地层连线插值成 TIN 面。在进行插值时，需要注意各个剖面中地层连线的对应要一致，要保证将同一岩土体或同一时代的地层连线进行插值。与此同时，还要根据地表等高线的数据插值出地表面，这样才能保证地表地形的准确性。

（5）由于插值算法的缺陷，不可避免地会出现不同地层的交叉情况，同时为了保证后一步的实现（相邻地层面成体），需要对各个地层面进行拓扑重构。

（6）将相邻的上下地层面进行面围合成体。

（7）上一步成体后的模型范围是通过插值后的面生成的，其模型范围肯定要比研究区范围大，因此，需要通过剪切算法，用研究区边界对模型进行边界裁剪。

通过以上步骤就可以实现基于 TIN 的构造-地层格架模型的生成。

3.2　TIN 空间数据模型向 CPG 间数据模型的转化

3.2.1　地层序列定义

基于 TIN 的面元模型在 *X*、*Y*、*Z* 方向上是不规则三角网，而 CPG 模型在 *X*、*Y*、*Z* 方向上是排列的单元格，因此，首先要确定转换后每一层需要划分成多少个网格单元。

地层序列定义的内容包括：地层层数、编号、名称、加密层数、颜色和纹理。地层数：表示在 TIN 面元模型中，有多少个地层；地层编号：表示每一个地层的编号值；地层名称：表示每一个地层的名称；地层加密层数：表示单个地层转换成 CPG 模型的单元格层数；地层颜色：表示单个地层转换成 CPG 模型之后的颜色。

3.2.2　格网划分

定义好地层序列之后，需要对格网进行划分。格网划分包括：确定格网的边界、方向并对格网在平面和垂向上的划分。

（1）格网边界

顶底格网是根据地层格架模型中某一地层的顶面和底面水平方向上最大包围盒来计算的。计算时，将一套地层的顶面和底面分别投影到 *XOY* 平面上，计算出投影平面的最大矩形边界，就是该地层的顶底面边界。以此类推，可以分别求出每一套地层的格网边界。在投影时，由于顶、底面控格网的单元格个数是确定的，所以保证了每套地层顶、底面投影之后的网格数目相同。

（2）格网方向

格网方向是格网在平面上的走向（*I*，*J* 方向）。格网方向与坐标轴方向不同，它是代表每一层格网排列的方向，如图 7 所示。格网方向的确定对整个 CPG 模型十分重要，它能够影响到整个模型的走

向。一般来说，CPG 格网的方向是根据趋势线的走向来确定的，即格网方向是沿着趋势线的走向，如有断层，也要将断层的走向考虑进去，如图 7 所示，图中蓝色线代表趋势线，红色的线代表断层。

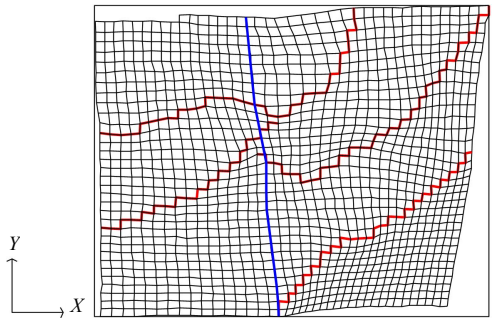


图 7 平面格网的剖分
Fig.7 Planar grid partition

考虑到断层分为正断层和逆断层，但它们投影到 *XOY* 平面上之后都是呈线状，因此，对两种断层来说，确定其格网方向的方法是一样的。

（3）平面格网划分

在对地层格架模型进行平面格网划分时，首先要根据格网边界，确定单元格排列方向（*I*，*J* 方向）的单元格行列数目 *N*=*I*×*J*，然后对模型进行 *XOY* 平面的等间距划分，生成模型的平面顶、底控制格网。

（4）垂向格网划分

地层格架模型中每一套地层的构建是由相邻两个地层面围合而成的，因此，层面数要比地层数目多 1。对 TIN 模型转向 CPG 模型来说，在划分好所有层面的顶、底格网之后，每套地层对应的 *XOY* 平面上的格网数目都是 *I*×*J* 个。同理，每一套地层在垂向（*Z* 方向）上也可以进一步地划分成 *K* 个层，这样使得每一套地层的格网数达到 *M* =*I*×*J*×*K*。该过程可以通过设置垂向上单元格的厚度、单元格的个数来进行。

通过以上对格网边界、方向的确定和格网在 *X*、*Y*、*Z* 方向上的划分，可以生成模型的整个控制格网。

3.2.3 单元格空间坐标计算

控制网格点的投影计算就是计算顶面或底面控制网格中的点在每一套地层中细分的小层上的投影点。由于 CPG 模型数据文件组织方式的特点，存储的单元格的坐标包括模型顶面和底面每一个网格点的 *x*、*y* 坐标以及模型每个单元格中每个点的 *z* 坐标，而对于模型中间层的单元格的 *x*、*y* 坐标的获得需要通过顶底面网格点的 *x*、*y* 值和每个单元格中每个点的 *z* 值来计算的，如图 8 所示。

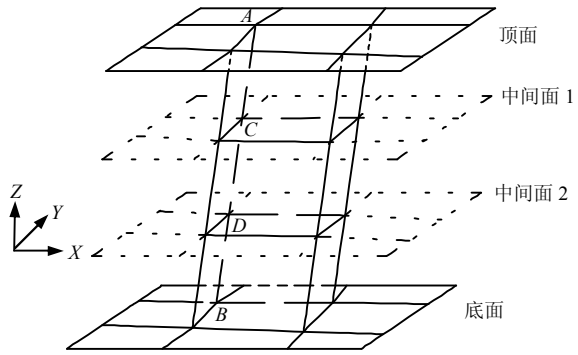


图 8 CPG 模型中单元格坐标计算
Fig.8 The calculation of cell coordinates in CPG model

图中，*CD* 为某一单元格网的一条侧边，该边上的两点 *C*、*D* 与顶面 *A* 点和底面 *B* 点相对应，*C*、*D* 两点的横、纵坐标 (x_C, y_C)、(x_D, y_D) 可以通过 *A*、*B* 两点的坐标 (x_A, y_A, z_A)、(x_B, y_B, z_B) 及 *C*、*D* 两点的 *z* 值求出，求解公式为

$$\left.\begin{aligned} x_C &= x_A + (z_C - z_A)\times(x_B - x_A)/(z_B - z_A) \\ y_C &= y_A + (z_C - z_A)\times(y_B - y_A)/(z_B - z_A) \\ x_D &= x_A + (z_D - z_A)\times(x_B - x_A)/(z_B - z_A) \\ y_D &= y_A + (z_D - z_A)\times(y_B - y_A)/(z_B - z_A) \end{aligned}\right\} \quad (1)$$

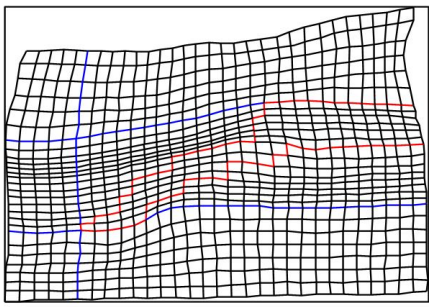
根据以上算法依次可以求出该单元格其他 6 个点的 *x*，*y* 坐标。

与此同时，还需要根据趋势线和断层的走向对每套地层中的网格坐标进行调整，使网格能够依附于趋势线和断层，此时会使网格产生一定的形变，为保证网格的正交，采用求解 Laplace 偏微分方程的数值解来构建二维格架网格[9]。

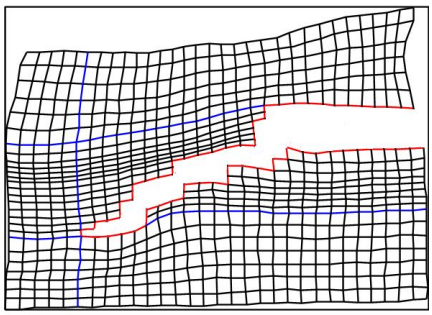
3.2.4 格网有效性计算

CPG 模型中单元格的有效性是指该单元格在理论上是否存在，亦即在进行计算时该单元格是否需要构建出来，参数名称为 ACTNUM。有效性以“0”和“1”来表示，“0”表示该单元格无效，“1”表示该单元格有效。通常情况下模型边界以外、模型中间的断层区域以及地层边界位置缺失的地层有效性为 0。如图 9(a)所示，图中红色线框内表示的是边界（或断层）区域，对该区域内的网格有效性赋值为 0，在进行模型显示时，效果如图 9(b)所示。

在进行网格有效性计算时，只需要计算每个单元格的体积。若单元格的体积为 0，则该单元格有效性设置为 0；反之，该单元格有效性设置为 1。



(a) 红色线内部网格有效性设置为 1 显示效果



(b) 红色线内部网格有效性设置为 0 显示效果

图 9　边界网格有效性设置与显示效果
Fig.9　The effectiveness of boundary mesh setting and display

3.2.5 精细模型表达

读取 CPG 体数据*.GRDECL 文件，可获得模型顶、底格网的坐标值、各单元格 8 个顶点的 z 值及单元格的有效性，模型数据结构设计如下：

```
class GV3dCPGMEclipseMesh
{//格网信息
public:
 std::vector<string> m_headerInfo; //体模型文件头信息
 int * GridNums[3]; //网格个数
 int nColNums;    //列数
 int nRowNums;   //行数
 int nLayerNums; //层数
 vector< vector < vector < Vertex3d >> >
vecArGridTopValue; //所有地层顶面单元格格网坐标
 vector< vector < vector <
Vertex3d >> >vecArGridBotValue; //所有地层底面所有单元格格网坐标
float lfXMin; //模型数据里面最小的 X 坐标，一般以取整为准
 float lfYMin; //模型数据里面最小的 Y 坐标，一般以取整为准
 float lfXMax;//模型数据里面最大的 X 坐标，一般以取整为准
 float lfYMax;//模型数据里面最大的 Y 坐标，一般以取整为准
 vector <vector<vector<int> > > m_Actnum;//整个区域内所有网格有效性数组
 vector<vector<vector<Vec8f> > > VecZValues;//记录所有格网顶点 Z 值
 int PropNums;//属性个数
 vector <PropertyValueInfo *> SPropertyInfo;  //记录属性信息
 SingleVolumeInfo SingleVoluInfo; //单体信息结构体
//断层信息
public:
 vector < SFaultInfo *> AllFaultInfo; //所有断层信息
 vector < string > m_FaultheaderInfo; //断层文件头信息
 vector < string > m_FaultEndInfo; //断层文件尾信息
 int nFaultNums; //断层个数
 vector <UnitFaultInfo *> arUnitFaultInfo; //全区的断层信息
 vector <Vertex3d> pAllData; //用于构建面的所有点的数组
 vector <nPGonps> nDataGonps; //构建的拓扑结构
};
```

通过以上步骤的计算，能够实现将三维 TIN 面元模型转化成 CPG 体元模型，并生成模型数据文件（GRDECL 文件）。将该文件加载到 QuantyView3D 三维地质可视化信息平台中，可以实现 CPG 精细模型的显示。

4　应用实例

运用上述 TIN-CPG 空间数据模型的三维地质建模方法，基于 QuantyView3D 三维可视化地质建模平台，对沿海某城市中一个重点研究区域进行精细三维属性模型的构建。

根据该区域水文钻孔中的含水层、隔水层分布情况，各岩性层的含水特征，将属性模型中的地层划分为含水层、隔水层，含水层又分为潜水层和承压水层，形成的三维水文地质构造-格架模型如图 10(a)所示；通过 TIN 转 CPG 模型算法，格网数目在 I、J、K 方向上设置为 100×100×80 个，将其转化为 CPG 精细体元模型，转换结果如图 10(b)所示。

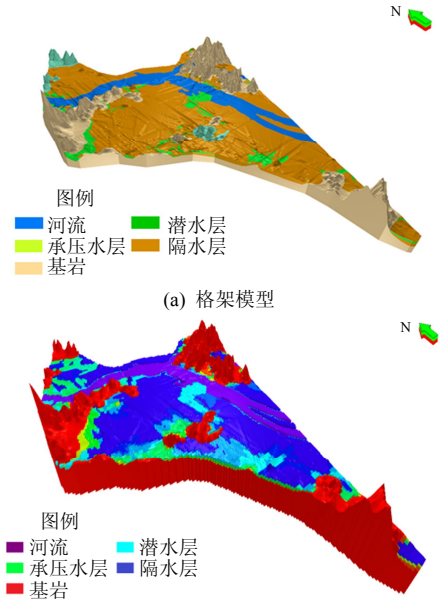


图 10 三维水文地质地层格架模型和转换后的精细三维地质模型

Fig.10 3D hydrogeological framework model and a fine 3D hydrogeological model

将区域内水文钻孔中的富水性数据作为样本点数据，采用地质统计学方法，进行格网单元的富水性属性插值，并根据插值结果建立三维精细属性模型——富水性属性体元模型（如图 11(a)所示），图 11(b)显示的是提取模型中富水性贫乏的单元格。

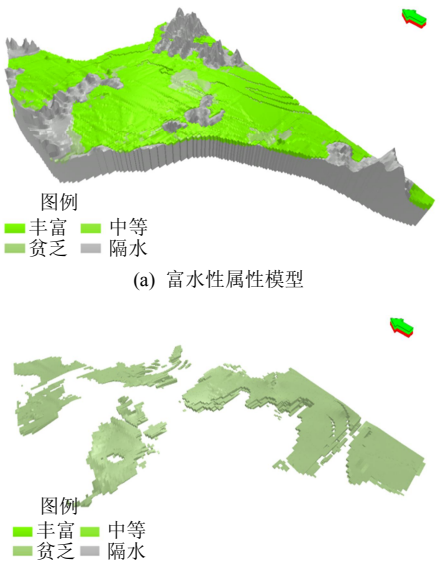


图 11 三维精细水文地质属性模型——富水性属性体元模型

Fig.11 3D fine hydrogeological attribute model—water abundance attribute voxel model

5 结 语

针对目前大多数三维地质模型精度低的缺点，本文提出了一种基于 TIN-CPG 混合空间数据模型的精细三维地质模型构建的方法。其优点在于：①既利用了 TIN 对三维地质模型“横向上”（地质层面）模拟较为精确的优点，又结合了 CPG 对“纵向上”（地质块体）精细化表达的优势，不仅能够实现地质体的精细化表达，还可以对地质块体进行属性赋值，表达出地下地质体的非均质性。②理论上来讲，利用本方法构建的模型精细程度取决于网格划分的数量和计算机硬件性能，即计算机性能越高，网格划分的越精细，所表达的三维地质模型的精细程度越高。

本文仅仅是从空间数据结构入手来研究精细三维地质模型的构建，实现三维地质模型“表达上”精度的提高，但高精度的地质模型还需要实现“内容上”的准确描述，即模型所表达的内容要符合真实的地质情况。这就要考虑如何将真实地质情况以及专家的地质认识融入建模过程中去，从而使建立的模型更加符合实际情况，这也是精细地质建模的重要研究方向。

参 考 文 献

[1] HOULDING S W. 3D geoscience modeling: Computer techniques for geological characterization[M]. Berlin: Springer-Verlga, 1994.

[2] 王威, 肖云, 葛修润, 等. 基于网格的三维地质体建模方法研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(4): 1275－1280.
WANG Wei, XIAO Yun, GE Xiu-run, et al. Grid-based method of three-dimensional geological modeling[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2012, 33(4): 1275－1280.

[3] 李清泉, 李德仁. 三维空间数据模型集成的概念框架研究[J]. 测绘学报, 1998, 27(4): 325－330.
LI Qing-quan, LI De-ren. Research on the conceptual frame of the integration of 3D spatial data model[J]. **Acta Geodaetica et Cartographica Sinica**, 1998, 27(4): 325－330.

[4] 李德仁, 李清泉. 一种三维 GIS 混合数据结构研究[J]. 测绘学报, 1997, 26(2): 36－41.
LI De-ren, LI Qing-quan. Study on a hybrid data structure in 3D GIS[J]. **Acta Geodaetica et Cartographica Sinica**, 1997, 26(2): 36－41.

[5] SHI W Z. A Hybird model for 3D GIS[J]. **Geoinformatics**, 1996, (1): 400－409.

[6] 朱良峰, 李明江, 孙建中. 工程地质空间多场耦合构模技术研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(8): 2500－2506.

ZHU Liang-feng, LI Ming-jiang, SUN Jian-zhong. Multifield coupled modeling techniques in engineering geological space[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2012, 33(8): 2500－2506.

[7] WATSON CARL, RICHARDSON JENNIFER, WOOD BEN, et al. Improving geological and process model integration through TIN to 3D grid conversion[J]. **Computers & Geosciences**, 2015, 82: 45－54.

[8] DELAUNAY B. Surla sphere vide bulletin of the academy of dcience of the USSR[J]. **Classe des Sciences Mathematiqueset Naturelles**, 1934, (8): 793－800.

[9] 熊祖强, 贺怀建, 夏艳华. 基于 TIN 的三维地层建模及可视化技术研究[J]. 岩土力学, 2007, 29(9): 1954－1958.
XIONG Zu-qiang, HE Huai-jian, XIA Yan-hua. Study of technology of 3D stratum modeling and visualization based on TIN[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2007, 29(9): 1954－1958.

[10] 韩峻, 施法中, 吴胜和, 等. 基于格架模型的角点网格生成算法[J]. 计算机工程, 2008, 34(4): 90－92, 95.
HAN Jun, SHI Fa-zhong, WU Sheng-he, et al. Generation algorithm of corner-point grids based on skeleton model[J]. **Computer Engineering**, 2008, 34(4): 90－92, 95.

[11] 张志庭. 盆地断块构造三维建模与过程可视化技术研究[D]. 武汉: 中国地质大学(武汉), 2010.
ZHANG Zhi-ting. Research on 3D geological modeling and three-dimensional process visualization technology of basin fault block structure[D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2010.

[12] 吴冲龙, 毛小平, 田宜平, 等. 三维数字盆地构造-地层格架模拟技术[J]. 地质科技情报, 2006, 25(4): 1－8.
WU Chong-long, MAO Xiao-ping, TIAN Yi-ping, et al. Digital basins and their 3D visualization modeling[J]. **Geological Science and Technology Information**, 2006, 25(4): 1－8.

[13] 唐丙寅, 吴冲龙, 李新川, 等. 一种基于钻孔地质数据的快速递进三维地质建模方法[J]. 岩土力学, 2015, 36(12): 3633－3638.
TANG Bing-yin, WU Chong-long, LI Xin-chuan, et al. A fast progressive 3D geological modeling method based on borehole data[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2015, 36(12): 3633－3638.

上接第 1217 页

[17] 王书法, 朱维申, 李术才, 等. 岩体弹塑性分析的数值流形方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(6): 900－904.
WANG Shu-fa, ZHU Wei-shen, LI Shu-cai, et al. Numerical manifold method of elastoplastic analysis for rockmass [J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2002, 21(6): 900－904.

[18] 王水林, 葛修润. 流形元方法在模拟裂纹扩展中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 1997, 16(5): 7－12.
WANG Shui-lin, GE Xiu-run. Applications of manifold method in simulating crack propagation [J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 1997, 16(5): 7－12.

[19] 苏海东, 祁勇峰. 部分重叠覆盖流形法的覆盖加密方法[J]. 长江科学院院报, 2013, 30(7): 95－100.
SU Hai-dong, QI Yong-feng. Cover refinement for numerical manifold method with partially overlapping covers [J]. **Journal of Yangtze River Scientific Research Institute**, 2013, 30(7): 95－100.

[20] ZHENG H, XU D D. New strategies for some issues of numerical manifold method in simulation of crack propagation[J]. **International Journal for Numerical Methods in Engineering**, 2014, 97(13): 986－1010.

[21] ZHENG H, LIU Z. Numerical manifold method with multilayer covers[J]. **Science China Technological Sciences**, 2015, 58(1): 1－16.