

虚拟钻孔控制的三维地质体模型构建方法

林冰仙,周良辰*,闫国年

(南京师范大学虚拟地理环境教育部重点实验室,南京 210023)

摘要:在三维地质体模型构建过程中所采用的数据多为钻孔数据,而研究区域内原始钻孔数据通常数量有限且分布不均,难以构建出既能够准确地反映研究区域地质构造,又具有良好可视化效果的三维地质体模型。针对此问题,本文对虚拟钻孔概念进行延伸,提出了用于三维地质体建模不同阶段的三种虚拟钻孔概念,并基于此设计了一种虚拟钻孔控制的三维地质体模型构建方法。首先,根据原始钻孔数据空间分布特征,自适应地确定插值点位,并采用克里金插值算法构建插值加密虚拟钻孔;其次,根据尖灭规则构建尖灭处理虚拟钻孔,采用改进的自适应蝴蝶细分算法构建细分光滑虚拟钻孔;最后,利用原始钻孔、插值加密虚拟钻孔、尖灭处理虚拟钻孔,以及细分光滑虚拟钻孔构建研究区域内符合地统计学规律且具有C¹几何连续性,可视化效果良好的三维地质体模型。与将虚拟钻孔作为专家知识补充手段的传统建模方法不同,该建模方法将虚拟钻孔引入三维地质体构建的各个环节中作为核心的算法中间单元,有效简化了建模算法的实现过程,确保了算法的稳定性与高效性。

关键词:三维地质体建模;虚拟钻孔;空间插值;地层尖灭;细分算法

DOI: 10.3724/SP.J.1047.2013.00672

1 引言

自然界地质现象极其复杂,经过三维地学可视化建模,地质体的显示会更真实、更直观、更清晰、更有立体感,有助于为矿产资源调查、地质灾害预测、国土资源调查、大型工程项目选址等提供科学依据。在三维地质体模型构建过程中,采用的数据源多为钻孔数据,而研究区域内原始钻孔数据通常数量有限且分布不均,有的区域相对密集,有的区域则非常稀疏甚至没有任何数据,直接利用原始钻孔数据难以构建出既能够准确地反映研究区域地质构造又具有良好的可视化效果的三维地质体模型。因此,人工干预和专家经验在建模的各个阶段显得尤为重要,甚至是必须的。建模者往往需要根据经验和其他勘察手段获取的结果推断出虚拟钻孔,通过调整虚拟钻孔基本信息(孔口坐标、高程)与地层分层信息,将虚拟孔约束到整个三维地质体模型中,从而实现对模型的修正,使建模的结果更为精细与合理^[1-2]。

相对于由建模者手工添加虚拟钻孔或通过地质剖面转化为虚拟钻孔而言,采用空间插值算法对地层参数进行适当的内插和外推进而估计地层的空间展布规律在效率上具有明显的优势^[3-4],其关键在于选择合适的空间插值方法及确定插值点的分布,目前较多采用的是地统计学中的克里金插值算法及其扩展算法。Nicolas Remy开发了C++模板的地统计学算法库GSTL,其中,包括了各类克里金插值算法^[5]。颜辉武等采用克里金插值方法建立了苏锡常地区的水文地质层三维几何及物理化学属性模型^[3,6-7]。周良辰等采用克里格插值算法建立了南京仙林大学城地区的三维地质体模型^[4]。

直接采用上述方法生成的初始三维地质体模型往往表面粗糙,存在大量的棱角,难以满足实际应用需要,因此必须对初始三维地质体模型进行光滑处理。近年来,曲面细分技术受到越来越多的关注,细分技术可基于任意拓扑、任意形状网格构造光滑曲面,而无需考虑几何连通性问题,且算法数值稳定性较好,易于实现,因此,更加适合于地质体

收稿日期:2013-03-28;修回日期:2013-04-25.

基金项目:国家自然科学基金青年基金项目(41001224、41301415);教育部博士点基金(20103207120014、20113207120013);江苏省高校优势学科建设工程资助项目。

作者简介:林冰仙(1984-),女,江苏南通人,博士,讲师,研究方向为GIS应用与虚拟地理环境。E-mail: lbx1984@hotmail.com

*通讯作者:周良辰(1979-),男,江苏南京人,博士,讲师,研究方向为虚拟地理环境与三维GIS。E-mail: zhoulch@hotmail.com

模型的光滑处理^[8-9]。曲面细分光滑算法可以分为插值型细分算法和逼近型细分算法,经插值型细分算法计算出的细分结果曲面经过已知控制点,如蝴蝶细分算法、改进蝴蝶细分算法等;经逼近型细分算法计算出的细分结果曲面不经过已知控制点,光滑后可视化效果较好。考虑到地质勘查数据的珍贵性及其在建模中的重要控制作用,因此,一般多采用插值型细分光滑算法^[9]。各类曲面细分算法所产生的细分结果曲面的网格数都呈指数增长,自适应细分算法能根据原始曲面形态特征,在较平坦区域较少细分,在变化复杂区域多次细分,在保证光滑效果的前提下减少最终细分结果的数据量^[10]。值得注意的是,三维地质体建模分为单体建模和多体建模。单体建模关注单个地质体的特征,如某砂体、矿体等;而多体建模还需关注多个地质体之间的关系,如相互接触的多种岩性地层^[8]。单体建模可以直接利用现有光滑算法;而在多体建模中,如对多个地质体中的每个单体直接利用现有光滑算法,难以保证地质体之间公共面数据的一致性,且光滑后的公共界面可能相交,若对已有的细分策略进行修改,则势必会影响细分方法的收敛性和光滑性。

针对以上问题,本文尝试扩展虚拟钻孔在地质体建模中的应用,将其应用于地层尖灭处理与地质体模型的光滑等步骤,有效地简化了建模算法的实现过程,确保了算法的稳定性与高效性,提高了建模的可控性和质量,为三维地质体建模提供了一种新的技术方法。

2 钻孔地层数据模型构建

地质体三维建模主要数据源是钻孔资料,主要包括空间基本信息(即钻孔在三维空间的(X, Y, Z)坐标及完井深度)和地层分层信息(即各岩层岩性描述、地层厚度、埋深等)。原始钻孔资料数据相互关联性差且不规则,难以满足三维地质体模型构建算法设计的需要。因此,本文建立了基于语义的钻孔地层信息数据模型(图1),实现对钻孔资料的统一管理。

为了方便后续算法设计,在构建钻孔地层信息模型时,对于每个钻孔的地层描述信息,按照地层标准分级表进行补全,将相同的岩性并且垂直方向位置相似的看作同一层;根据钻孔孔口高程和所

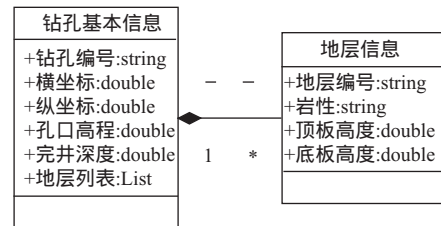


图1 基于语义描述的钻孔地层数据模型

Fig.1 The drilled stratigraphic model based on semantic description

穿过岩层的厚度,计算出该岩层的顶底板绝对高程,对于缺失的地层,则将其顶板值与底板值都设为上一层的底板,即为假想的零厚度地层;最后,根据钻孔垂直方向上顶底板绝对高程的关系和地层层序律可以确定地层的空间顺序关系,进而可以对地层进行排序。该模型可以清晰地表达复杂多变的地层信息,将有不同地层层序的各个钻探点统一成相同的结构,解决了在三维地质体模型中难以表达地层倒转、缺失信息的问题,为下一步的构造推理和自动建模奠定了基础。

3 虚拟钻孔控制的三维地质体模型构建算法

本文算法实现流程如下:(1)根据研究区域内原始钻孔数据空间分布特征,采用自适应插值加密策略构建插值加密虚拟钻孔;(2)将原始钻孔与插值加密虚拟钻孔合并,构建初始地表三角网模型 T_0 ;(3)根据地层尖灭处理策略,构建尖灭处理虚拟钻孔,并添加至地表三角网 T_0 ,得到地表三角网 T_1 ;(4)根据细分光滑策略,构建细分光滑虚拟钻孔,并添加至地表三角网 T_1 ,得到地表三角网 T_2 ;(5)根据地表三角网 T_2 及其中各顶点对应的原始钻孔、插值加密虚拟钻孔、尖灭处理虚拟钻孔、细分光滑虚拟钻孔,以广义三棱柱(GTP)为中间单元,构建研究区域三维地质体模型,完成建模算法流程(图2)。

(1) 自适应插值加密

空间插值常用于将离散点的测量数据转换为连续的数据曲面。常见的空间插值可以分为两类:一类是确定性方法;另一类是地质统计学方法。确定性插值方法是基于信息点之间的相似程度或者整个曲面的光滑性来创建一个拟合曲面,例如,反距离加权平均插值法、趋势面法、样条函数法等;地质

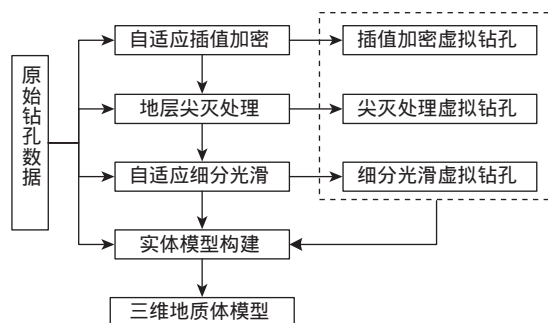


图2 建模算法流程

Fig.2 The modeling process

统计学插值方法是利用样本点的统计规律,使样本点之间的空间自相关性定量化,从而在待插值的点周围构建样本点的空间结构模型,例如,克里格插值算法。

针对建模过程中,研究区域内原始钻孔数据稀疏且分布不均的特点,本文根据原始钻孔数据空间分布特点,自适应地添加插值加密虚拟钻孔,即对钻孔数据相对密集的区域不添加虚拟钻孔,而对钻孔数据相对稀疏的区域添加虚拟钻孔,并采用克里格插值算法拟合虚拟钻孔的地层信息。在插值加密处理过程中,利用各类空间插值方法来拟合地层信息的虚拟钻孔,称之为插值加密虚拟钻孔。具体构建过程如下:

- ①用户指定插值点间距;
- ②离散研究区域边界,添加边界插值点;
- ③规则离散研究区域内部,添加内部插值点;
- ④根据原始钻孔分布情况,将过于靠近(距离小于用户指定的间距阈值)原始钻点的插值点移除;
- ⑤在边界插值点和内部插值点处构建插值加密虚拟钻孔,采用空间插值算法,利用原始钻孔数据拟合虚拟钻孔中的地层信息。

(2)初始地表三角网模型构建

Delaunay 三角网(D-TIN)作为一种基本的网格,既适于规则分布的数据,也适于不规则分布的数据。在模拟空间对象时,它能够以同层次的分辨率来表达对象表面形态。利用D-TIN建立三维地质体的边界表示模型,是一个重要的研究方向^[14-15]。

初始地表三角网模型是将研究区域范围作为待构建三维地层模型的外边界约束条件,以原始钻孔和插值加密虚拟钻孔的孔口坐标为基准点,采用标准的D-TIN构建算法,建立的能够表达研究区域各个地层层面拓扑关系的初始地表三角网模型

T_0 。初始地表三角网模型可以看作是确定研究区域内地层拓扑关系的一个“模板”,它可以沿着钻孔延伸方向自上而下推延出研究区域的全部地层信息。这样的操作可以保证各个地层层面具有确定的、上下一致的拓扑关系。此外,通过对工程地质钻孔点构建D-TIN,建立了各个钻孔的拓扑关联,使得研究区域地表形成了一个连续的整体。在此基础上,建立工程地质钻孔点与工程地质钻孔对象之间的映射表,为后文尖灭处理虚拟钻孔、细分光滑虚拟钻孔的生成作预处理,能够极大地简化后续算法的复杂度,增强其稳健性。

(3)地层尖灭处理

地层尖灭指的是岩层的厚度在沉积盆地边缘变薄以至消失的现象。当相邻钻孔柱之间出现地层缺失时,缺失地层在钻孔柱之间必然形成尖灭。一般来说,更早年代的地层一定在更晚地层的底下,地层分布具有较强的年代顺序规律。所以,在判断地层尖灭走向时按照新地层向上尖灭,老地层向下尖灭原则,连接顺序也就是按地层的新老年代排列顺序,而当该地区出现褶皱或倒转的特殊地质构造时,应该由建模者利用地质学专业知识,以及研究区域的具体情况确定地层相连接的优先级。

尖灭点的选择对于模型的构建有着很大的影响,但目前并没有一种具有明显优势的尖灭处理规则。本文在建模过程中根据尖灭地层厚度确定处理规则^[11],在规则所确定的尖灭位置添加虚拟钻孔用于描述地层尖灭处的地层变化。将建模过程中,根据地层尖灭处理原则确定钻孔基本信息和地层信息的虚拟钻孔称为尖灭处理虚拟钻孔。尖灭位置确定规则如下:

- ①相邻钻孔间,若存在厚度小于2m的夹层,则该层忽略不计,将该层与相邻地层进行合并;
- ②若存在尖灭的地层厚度为2~5m,则尖灭位置距离该钻孔 $1/3d$ (d 为相邻钻孔之间的距离,下同);
- ③若存在尖灭的地层厚度为5~8m,则尖灭位置距离钻孔 $1/2d$;
- ④若存在尖灭的地层厚度大于8m,则尖灭位置距离钻孔 $2/3d$ 。若存在间断缺失现象,则新地层尖灭位置与钻孔的距离也依此原则确定。

根据地层尖灭处理策略,在初始地表三角网模型 T_0 基础上添加尖灭处理虚拟钻孔,按照新地层向上尖灭、老地层向下尖灭的原则计算出尖灭处理虚

拟钻孔中的地层参数。具体步骤如下:

①遍历 T_0 中所有三角形棱边, 在根据尖灭规则添加尖灭点及对应的尖灭处理虚拟钻孔;

②根据 T_0 中三角形棱边两端钻孔的地层参数计算尖灭处理虚拟钻孔的地层参数。此时分为 2 种情况:

一是若两端的钻孔间不存在地层缺失情况, 则尖灭处理虚拟钻孔中各地层的底板埋深等于两端地层底板埋深的均值。

二是若两端的钻孔间存在地层缺失情况, 则按照地层尖灭规则计算尖灭处理虚拟钻孔中各地层参数。

将添加了尖灭处理虚拟钻孔点后的三角网, 标示为 T_1 。

(4) 自适应细分光滑

插值型细分算法多采用三角形网格分裂模型, 如蝶形细分算法采用一分四的三角形网格分裂模式, 在细分过程中只在三角形边上生成新的细分顶点。本文将由钻孔点构建的三角网定义为控制网格, 如图 3(a) 所示; 顶点的价是指与该顶点通过公共边相连的顶点个数, 用字母 k 表示; 当价为 6 的内部顶点和价为 4 的边界顶点称为规则点, 否则称为非规则点。利用该细分方法, 在规则点处可以生成 C^1 连续的光滑曲面, 而对于价为 3 和 7 的非规则点处只能达到 C^0 连续。为了提高蝶形细分策略的光

滑效果, Zorin 等提出了一种对蝶形细分算法的改进策略, 称为改进蝶形细分 (Modified Butterfly Subdivision, MBS) 算法。由于 MBS 方法增加了对非规则点处的处理, 可以使整个曲面达到 C^1 连续^[12-13]。

为了将细分光滑算法和三维地质体模型构建相结合, 将细分过程中所添加的细分顶点处添加虚拟钻孔, 以细分顶点为虚拟钻孔点位, 以插值型改进蝴蝶细分算法拟合虚拟钻孔中的地层参数 (图 3)。将此类根据所采用的细分算法策略确定钻孔基本信息和地层信息的虚拟钻孔称为细分光滑虚拟钻孔。

①网格顶点为规则点时, 如图 3(a)、(b) 所示。

当 $p_1 p_2$ 边为内部边时,

$$q = \frac{1}{2}(p_1 + p_2) + 2w(p_3 + p_4) - w(p_5 + p_6 + p_7 + p_8) \quad (1)$$

当 $p_1 p_2$ 边为边界边时,

$$q = 9w(p_1 + p_2) - w(p_3 + p_4) \quad (2)$$

其中, q 表示细分顶点与细分虚拟钻孔相关联, $p_1, p_2, p_3, p_4, p_5, p_6, p_7, p_8$ 表示网格顶点与工程地质钻孔相关联; w 参数一般取值为 $w = \frac{1}{16}$ 。

②网格顶点为非规则点时, 如图 3(c)、(d) 所示。

当网格顶点为内部点时, 各顶点的权重系数 S_i 的取值由以下公式确定:

$$S_i = \frac{1}{k} \left(\frac{1}{4} + \cos \frac{2i\pi}{k} + \frac{1}{2} \cos \frac{4i\pi}{k} \right), \quad k \geq 5 \quad (3)$$

$$S_0 = \frac{5}{12}, \quad S_{1,2} = -\frac{1}{12}, \quad k = 3 \quad (4)$$

$$S_0 = \frac{3}{8}, \quad S_2 = -\frac{1}{8}, \quad S_{1,3} = 0, \quad k = 4 \quad (5)$$

当网格顶点为边界点时, 各顶点的权重系数 C_{ij} 的取值由以下公式确定:

$$C_0 = 1 - \left(\frac{1}{k-1} \right) \frac{\sin \theta_k \sin i\theta_k}{1 - \cos \theta_k} \quad (6)$$

$$C_{i0} = C_{ik} = \frac{1}{4} \cos i\theta_k - \frac{1}{4(k-1)} \frac{\sin \theta_k \sin 2i\theta_k}{\cos \theta_k - \cos 2\theta_k} \quad (7)$$

$$C_{ij} = \frac{1}{k} (\sin i\theta_k \sin j\theta_k + \sin 2i\theta_k \sin 2j\theta_k) \quad (8)$$

其中, i, j 为网格顶点索引号; k 为顶点的价。

各类曲面细分算法所产生的细分结果, 其曲面的网格数都呈指数增长。因此, 考虑根据研究区域地表形态特征, 在较平坦区域进行较少细分, 而在变化复杂区域多次细分, 以此在保证光滑效果的前提下, 减少最终细分结果的数据量, 即自适应细分算法。自适应细分算法中的细分准则包括几何与

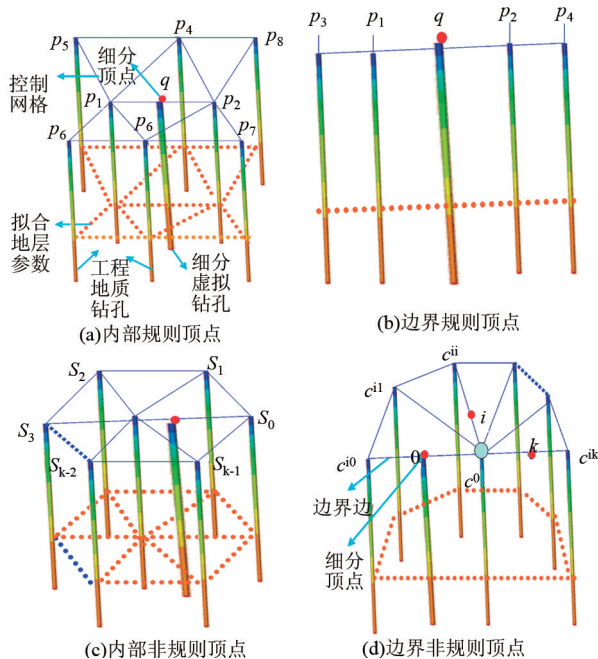


图 3 细分虚拟钻孔实现原理图

Fig.3 Schematic diagram of subdivided virtual boreholes

非几何准则两类,其中,以几何准则中的网格面间夹角度量或网格面法向间的夹角应用最广,该准则也被称为二面角准则。

本文采用二面角准则对改进蝶形细分算法,进行了自适应改进,提出自适应改进蝶形细分(Adaptive Modified Subdivision, AMS)。算法步骤如下:

①遍历初始控制网格,计算每个三角形面片的法向量;

②对于每个三角形,计算与其相邻三角形之间的二面角集合,并将其中最大的作为该三角形的平坦度;

③再次遍历三角网,将每个三角形的平坦度与给定的阈值比较,如果小于阈值,将该三角形面片标记为“平坦”;

④对于标记为平坦的三角形面片,根据改进蝶形细分策略,进行细分处理,求出细分顶点;

⑤重新构建三角网,消除裂缝。

为了建立区域光滑的三维地质体模型,同时又减少模型数据量,对前文生成的三角网模型 T_1 ,利用自适应改进蝴蝶细分算法计算出细分点,在细分点处构建细分处理虚拟钻孔。具体的实现步骤如下:

①将三角网模型 T_1 作为插值细分的初始控制网格,调用自适应改进蝶形细分算法,计算细分顶点。获取每个三角形各个顶点对应钻孔信息。并

计算每两个相邻三角形对应的两组钻孔中各地层面三角形建的二面角;

②根据细分顶点的空间信息,创建细分虚拟钻孔点的基本信息(设置钻孔的ID、几何信息),并初始化地层信息;

③创建细分虚拟钻孔点与细分顶点的映射;

④调用改进蝶形细分策略,补全钻孔的几何信息,修改钻孔的地层信息。根据控制网格点对应工程地质钻孔的地层信息,计算细分虚拟钻孔的地层顶板和底板标高;

⑤对细分虚拟钻孔的后处理。处理可能出现的拓扑错误。例如,地层底板埋深值高于其顶板埋深值,则将其底板埋深值设为其顶板埋深值,将其视为零厚度地层;

在完成细分虚拟钻孔生成的同时,对尖灭处理后的三角网模型 T_1 也同步进行了加密光滑处理,接下来的建模操作是以加密后的地表三角网 T_2 模型进行的。

(5) 实体模型的构建

在构建三维地质体模型前,必须先确定所采用的三维空间数据模型。广义三棱柱模型(GTP)是针对钻孔数据建模而提出的一种真三维体元模型,可有效地表达三维空间的几何、拓扑与属性信息^[17]。因此,本文以GTP模型作为建模过程中所采用的三维空间数据模型。

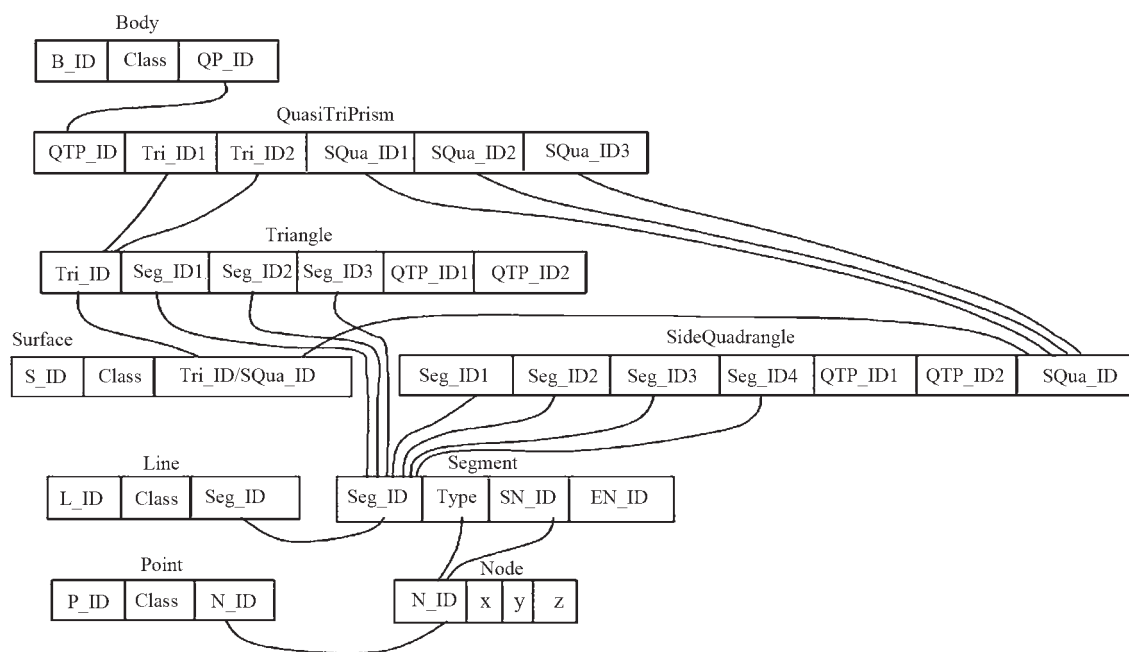


图4 广义三棱柱数据模型^[18]

Fig. 4 GTP logical model

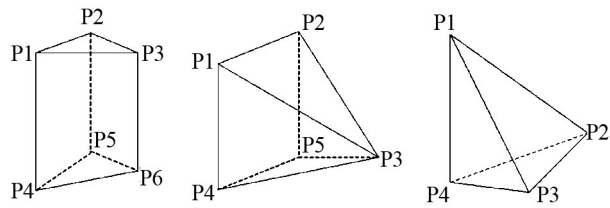


图5 3种情况的GTP模型

Fig.5 Three kinds of GTP models

按照参考文献[16]中提出的钻孔GTP模型构建方法,遍历细分处理后的三角网 T_2 中的所有三角

形,获得位于三角形端点的三根钻孔;再按照标准地层序列,遍历三根钻孔中的所有地层,以每层的顶板标高为GTP上三角形的顶点坐标、每层底板标高为下三角形顶点坐标、以地层岩性编号为GTP的属性构建GTP。当处理完所有三角形后,就完成了研究区域三维地质体的GTP模型构建。需要注意的是,构建GTP的三根钻孔的地层厚度可能存在3种情况,如图5所示。此外,若出现建立GTP模型的三根钻孔相应地层厚度均为0的情况,则为无效GTP,可直接忽略。

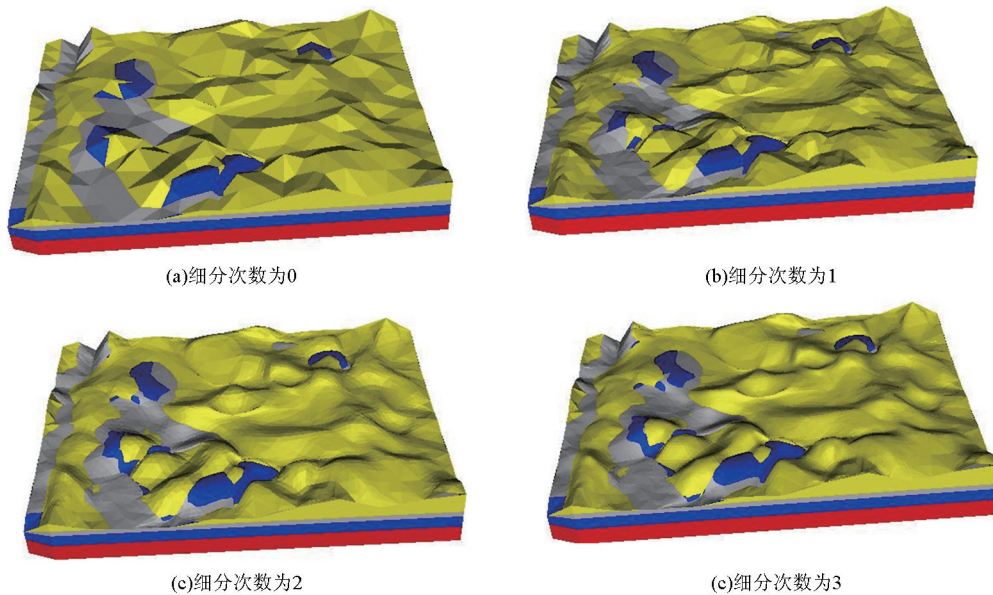


图6 不同细分光滑次数的建模效果对比

Fig. 6 Modeling effect contrast of different subdivision times

4 三维地质体模型构建实例与分析

为了验证本文所提出的相关理论与方法的有效性,基于Visual C++ 10与三维可视化开发包VTK 5.0开发了原型验证系统。在PC平台下(CPU: Inter Core2 Duo 2.53GHz; 内存: 2GB; 操作系统: Windows 7专业版),以南京火车南站周边约10km²范围为研究区,采用52根工程地质钻孔数据,建立了该区域三维地质体模型。实验结果表明,本文所提出的插值加密方法可自适应地在钻孔数据相对稀疏区域添加必要的插值加密虚拟钻孔;地层尖灭处理虚拟钻孔可有效地处理地层尖灭情况;根据所设置细分级别添加细分光滑虚拟钻孔,可有效地提高模型的光滑程度(图6)。基于3种虚拟钻孔控制,可构建出满足地学规律并具有良好的可

视化效果的三维地质体模型。

5 结论与展望

针对原始钻孔数据稀疏且分布不均的问题,本文提出了虚拟钻孔的三维地质体模型构建算法,采用地统计学空间插值算法进行合理的内插与外推;根据尖灭规则进行地层尖灭处理,并采用自适应插值型曲面细分算法对模型进行光滑处理,从而构建出符合地质规律且可视化效果良好的三维地质体模型。与传统的将虚拟钻孔作为专家知识补充手段的建模方法不同,本文所提出的建模方法将虚拟钻孔引入三维地质体构建的各个环节中作为核心的算法中间单元,有效简化了建模算法的实现过程,确保了算法的稳定性与高效性。本算法的不足

之处在于尚不能支持具有地层倒转等特殊地质现象的地质体三维模型自动化构建,仍需通过人工干预方式对这类复杂地质体模型进行构建。今后将考虑多源数据的使用,充分利用钻孔资料、平面地质图、地质剖面图、地形图、DEM、遥感数据、物化探数据和资料进行综合建模,以提高三维地质体建模的准确度。

参考文献:

- [1] 朱良峰,吴信才,刘修国,等.城市三维地层建模中虚拟孔的引入与实现[J].地理与地理信息科学,2004,20(6):26-30.
- [2] 杨林,闫国年,毕硕本,等.基于GIS数据库的田野考古地层剖面空间数据挖掘——以陕西临潼姜寨遗址为例[J].地理与地理信息科学,2005,21(2):28-31.
- [3] 颜辉武,祝国瑞,徐智勇,等.基于Kriging水文地质层的三维建模与可视化[J].武汉大学学报(信息科学版),2004,29(7):611-614.
- [4] 周良辰,陈锁忠,朱莹.地质结构三维建模及其可视化方法研究[J].计算机应用研究,2007,24(6):150-151.
- [5] Remy N, Shtuka A, Levy B, *et al.* GSTL: The geostatistical template library in C++[J]. Computers & Geosciences, 2002,28(8): 971-979.
- [6] 颜辉武,祝国瑞,徐智勇,等.地下水资源的三维可视化研究[J].水利学报,2004(7):114-118.
- [7] 颜辉武,吴涛,马晨燕.水文地质层及内部物理化学属性的体视化[J].辽宁工程技术大学学报,2004,23(6):747-750.
- [8] 屈红刚,潘懋,董攀,等.基于网格细分技术的三维地质模型光滑方法研究[J].地理与地理信息科学,2007,23(6):14-17.
- [9] 董攀,潘懋,吴自兴.一种改进的自适应蝴蝶细分算法及其在三维地质建模中的应用[J].地理与地理信息科学,2008,24(6):34-38.
- [10] 李桂清,吴壮志,马维银.自适应细分技术研究进展[J].计算机辅助设计与图形学学报,2006,18(12):1789-1798.
- [11] 朱莹,刘学军,陈锁忠.地质剖面自动绘制的数据模型研究[J].湖南科技大学学报(自然科学版),2007(3):96-100.
- [12] Zorin D N. Stationary subdivision and multiresolution surface representations[R]. California Institute of Technology, 1997.
- [13] Zorin D N. Subdivision for modeling and animation[C]. SIGGRAPH, 2000.
- [14] 夏艳华,熊祖强,贺怀建.基于TIN的三维地层建模及可视化技术研究[J].岩土力学,2007(9):1954-1958.
- [15] 李元亨,陈国良,刘修国,等.主TIN模式下面向拓扑的三维地质块体构建方法[J].岩土力学,201031(6):1902-1906.
- [16] 车德福,陈学习,吴立新,等.基于广义三棱柱体元的三维地层建模方法[J].辽宁工程技术大学学报,2006,25(1):36-38.
- [17] Gong J, Cheng P, Wang Y. Three-dimensional modeling and application in geological exploration engineering[J]. Computers & Geosciences, 2004,30(6):391-404.

A 3D Geological Model Construction Approach Based on Virtual Boreholes

LIN Bingxian, ZHOU Liangchen* and LV Guonian

(Key Laboratory of Virtual Geographical Environment, Ministry of Education, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China)

Abstract: Construction of 3D geological models is a very efficient way to create a good understanding of geological features. It is a comprehensive method to geologists, geophysics engineers and GIS experts who sometimes need to visualize an area to accomplish their researches. Geological drill hole records have been widely used as the main data sources in 3D geological model construction approaches. However, since the original drill hole sampling points are limited and maldistributed, it is difficult to construct 3D geological models that not only show favorable visual effect but also reflect accurately the geological structure of surveying regions. To solve this problem, this paper proposes a 3D geological model construction approach based on virtual boreholes. Firstly, according to the spatial distribution of original drill holes, positions of interpolated points are determined self-adaptively and Kriging interpolation algorithm is applied to the construction of interpolated virtual boreholes. Secondly, according to the pinch-out rules, the pinch-out virtual boreholes are constructed, and the improved self-adaptive butterfly subdivision algorithm is applied to the construction of subdivided smooth virtual boreholes. Finally, with the original drill holes, the interpolated virtual boreholes, the pinch-out virtual boreholes

and the subdivided smooth virtual boreholes, 3D geological models of survey regions can be constructed, matching geostatistics patterns, being C^1 geometric continued, and showing favorable visual effect. Differing from the traditional modeling methods that regard virtual boreholes as complements to expert knowledge, the proposed method introduces virtual boreholes into each step of the construction of three-dimensional geologic models as the intermediate elements of the core algorithm, simplifying the realization process of the modeling algorithm effectively, and ensuring the stability and efficiency of the algorithm.

Key words: 3D geological modeling; virtual boreholes; spatial interpolation; pinch-out; subdivision algorithm

***Corresponding author:** ZHOU Liangchen, E-mail: zhoulch@hotmail.com

(上接第 648 页)

cessing method in traditional distributed database cannot satisfy the demands of query in distributed geospatial database. Therefore, new query methods in distributed geospatial database need to be studied. In this paper, the distributed spatial join query processing is deeply studied based on the existing optimizing methods of the conventional query processing in traditional distributed database, and a series of transformation rules of relational algebra expression based on cross-border topological join optimization rules are proposed. The processed query tree is optimized by equivalent transformation after data localization. The global optimized method of distributed spatial join query for different fragments is studied. The global spatial query can be transformed into some local fragments joins effectively. The spatial join query is processed in the local area, avoiding the data transmission of spatial data among data nodes during the processing of query, so that the query performance can be improved. To improve the efficiency of the method, some new concepts were put forward, including query merged tree and execution plan tree, which can optimize the executing path of query plan. For example, by adjusting the executing order, some processes with low cost execute first, and the time-consuming processes execute based on the result set generated by the previous processes so as to reduce the process of time-consuming parts and resolve the problem of high cost of query processing to improve the performance of distributed spatial query. The experiment based on the vector data of China shows our methods can reduce the cost of the spatial join and data transmission among the nodes, and the performance improve 28.5%, which demonstrates that our methods outperform the traditional methods in terms of both algorithm complexity and the running time.

Key words: distributed spatial database; query optimization; spatial data query; spatial topological join

***Corresponding author:** YANG Dianhua, E-mail: yangdh@lreis.ac.cn