



一种地质体三维建模与可视化的方法研究

张立强^{①*}, 谭玉敏^②, 康志忠^③, 芮小平^④, 邓浩^①, 刘骝^①, 赵圆圆^①

① 北京师范大学遥感科学国家重点实验室, 北京 100875;

② 北京航空航天大学交通科学与工程学院, 北京 100083;

③ 中国地质大学土地科学技术学院, 北京 100083;

④ 中国科学院研究生院资源与环境科学学院, 北京 100049

* E-mail: zhanglq@bnu.edu.cn

收稿日期: 2008-11-04; 接受日期: 2009-04-08

国家高技术研究发展计划(编号: 2006AA12Z220)、国家自然科学基金(批准号: 60502008, 60972128)和教育部新世纪优秀人才支持计划(编号: NCET-07-0099)资助

摘要 地质结构是在时间维内地质过程演变的产物, 以三维形态存在自然界中, 但是很多地质学家仍然依靠二维或一维的形式来记录和发布地质数据, 丧失了很多空间信息, 原因之一是现存方法在表达地下三维地质体有很大的局限性. 为了分析和解译地质地图模型, 基于现有的建模理论, 提出了结点-层数据模型组织不同实体类型的地质数据, 实现地质观测数据和几何模型的一体化表达与存储. 在此基础上, 通过快速构建多分辨率三维地质模型, 实现大规模地质数据集的可视化方法, 满足地质学家操作、分析和解译三维地质体的需要. 实验证明, 本文的方法能很好的实现大规模三维地质数据建模和自适应可视化, 同时为实现空间数据的集成和共享提供了一条很好的解决途径.

关键词

地质体
地质模型
网络传输
可视化

地质体有各种类型的数据组成: 钻孔数据、地形数据、岩石和土壤数据、地球物理和水文数据等. 地质数据特别是钻孔数据能提供地球表面和地面以下状况的有用信息, 因此地质数据在各种领域得到广泛应用, 例如, 城市建设、自然资源勘探、环境问题以及交通. 随着复杂区域三维地质模型采集技术的不断提高, 为地质数据的分析提供了新机遇. 地质模型是在三维空间中通过内插和解译观测数据对不同的地质条件进行描述和表达. 目前缺少通用的地质数据组织方式和模型, 使得人们在重构数据结构时花费大量时间, 对其分析就更加困难. 地质学家有时凭借测井曲线图或纸质图的手工标绘进行叠加操作识别可视化的相关性, 该过程虽能产生可靠的结果,

但是费时且工作量大, 特别是, 通过浏览表格数据研究不同地质的空间模式时, 人工判读的误差对建模精度产生较大影响.

随着计算机软件的发展, 交互式显示和可视化技术有效地克服了数据表格和平面图的缺陷. 为了实现大规模的地质数据的管理和存储并为空间分析和查询提供服务, 本文提出了结点-层的数据模型 NVDM 组织大规模三维地质数据模型. 根据类三棱柱可视化建模方法的缺点, 本文提出一种基于三棱柱体元的地质体可视化方法, 该方法首先对原始的钻孔数据进行预处理, 插值形成各个地层的规则网格, 然后把上下层对应的网格连接起来形成四棱柱, 将一个四棱柱沿网格对角线剖分为两个三棱柱, 把

这种三棱柱作为基本体元来描述真三维的地质体. 为了满足大规模的地质数据多用户会并发访问和分析, 在 NVDM 基础上, 实现了基于渐进传输的地质数据可视化方法.

1 相关研究

地质空间数据模型是通过一定的数学模型对地质体进行抽象、归类及简化的描述和表达, 分为二维数据模型和三维数据模型, 通过几何约束模型利用地质结构数据可以重建复杂的地质体. 二维数据模型发展比较成熟, 三维数据模型正处在不断发展和完善之中. Losa等^[1]保留了二维对象的拓扑关系, 在扩展方向弧的基础上描述了 3D GIS 对象模型. Gold等^[2]提出用 Voronoi 图和双重 Delaunay 三角网构建地球椭球的拓扑关系, 同时在三维空间中采用方向余弦作为坐标系统基准来构建椭球表面的实体, 该方法能实现对地球椭球及其表面实体连续无缝的表达, 但是建立拓扑关系的数据结构复杂, 计算量大.

地质建模系统一般基于三维离散拓扑数据模型和内插方法, 如离散平滑内插^[3]和结构倒置法^[4]. 但是, 在三维地质建模环境中仍然很不成熟. 张煜等^[5]探讨了用三棱柱方法描述层状地质体的实现过程, 该文把三棱柱的切割分为 5 种不同的构形, 但没有考虑其他复杂的剖分类型, 不能完全表示三棱柱剖分的各种情形, 因此, 该方法不能完整的观察层状体的内部结构. 齐安文和吴立新等^[6]在此基础上提出了三棱柱剖分的 7 种特例, 并将三棱柱的类型推广到了广义三棱柱, 提出了用类三棱柱模型描述地质体的一般方法, 他们认为这些切割模式仍然不能覆盖所有的情况. Wu^[7]对此又进行了进一步扩展, 提出了归一化三棱柱模型(GTP). 武强和徐华^[8]提出了超体元实体模型、断层数学模型及褶皱几何模型构建三维地质构造的空间几何形态. 钟登华等^[9]基于混合数据结构实现了地形类、地层类、断层类、界限类等 4 类地质对象的拟合构造与几何建模. 并在地质三维统一模型的基础上, 可实现针对水电工程地质的分析和应用. Smirnoff等^[10]利用支持矢量机(SVM)对多源稀疏的地质信息进行三维建模, 该方法能有效地克服传统内插方法的局限性, 取得了较好的效果, 但是在构建复杂地质模型的空间精度需要探讨.

在地质数据三维可视化方面, Chang和Park^[11]开发了一个基于网络的GIS系统管理钻孔数据. 在数据库中存储的是标准格式的钻孔数据, 该系统允许客户端搜索钻孔数据库做统计功能. 但是, 对单个用户来说很难增加数据或将不同格式的采样数据存储到该数据库中. Geotouch是勘探数据分析并运行在Unix操作系统下的开源软件^[12], 它能完成带有时态数据, 例如火山爆发或地震数据的分析功能. Geotouch的数据有严格的结构要求, 可以完成一些复杂的工作, 但是限制了用户扩展数据模型的能力. 在ESRI公司的ArcScene软件基础上, James和Graniero实现了对钻井和钻孔数据管理、可视化、查询和分析钻孔数据的系统BoreIS^[13]. 通过交互式的操作, 将表数据与空间的和地质的重要条件进行匹配以此发现重要的地质问题, 但是在处理和可视化大规模地质数据能力不足. 一批基于三维可视技术和地质统计学的大型矿业软件包也得以应用, 例如, SURPAC, MICROMINE, DATAMINE. 这类软件各有特色, 能提供与其他数据库和相关软件接口的功能, 能够实现各种工程和矿体的三维立体显示和成图, 并根据地质统计学的方法和原理提供进行矿体品位和储量估值的各种方法, 同时还可以进行矿山的开采设计以及数字地形模型的建立. 但是这类软件购买费用比较昂贵, 缺少对网络环境的支持.

2 面向可视化的三维地质逻辑模型

三维地质场景的元素包含多个信息以描述不同的地质实体类型(如地形类、地层类、断层类). 地质体是一个形状不规则的多面体或者带有钻孔(球形或者柱形)的多面体, 几个面围成一个体. 一个多面体由一组多边形围成的外表面组成, 对内部有“洞”的多面体也只有内表面, 因而多面体由一个或多个边界, 可以组成多种类型的实体. 但是地质体可能包含球形或柱形补丁, 对地质体作缓冲区操作时会导致一个非多面体的产生, 无法通过多面体造型来表达.

因为缺少三维实体造型对空间实体建模, 真三维地质造型在地质关系数据库(Geo-Database)存储时会遇到一些问题, 造成Geo-Database无法识别这些三维空间实体. 只有第三维被忽略, 即实体被投影以后, Geo-Database的函数才能运行, 因此, 三维实体被作

为一个多边形或一组多边形存储时, 丧失了不同二维多边形之间的空间关系^[14]. 虽然关系数据库不支持三维实体造型, 但空间实体可以通过二维多边形来进行建模. 本文将描述多面体的顶点组织结构, 生成层次边界表达模型, 实现边界在该模型中隐含存储. 具体的, 每个实体的顶点只存储一次, 面通过结点来定义, 结点由面共享. 若干个二维多边形在三维空间中组成一个三维实体, 这些多边形可以组成数据库一条或多条记录.

基于此, 本文提出结点-层的数据模型 NVDM (Node-view data model)组织三维地质场景的空间数据(如图 1).

NVDM 根据地质实体的类型特征, 把空间对象划分成若干类, 每个类依据各自的特征定义数学模型, 形成结点. 任意结点可以是另外结点的子结点, 每个结点都有各自的参考系统、空间信息以及属性特征. 通常, 这些结点之间存在复杂的空间关系, 因此, 引入“层”概念来组织这些结点, 每层的结点与结点视图显示的对象有关(见图 2). 元素之间的可视化特征借助于元素图来描述, 元素图的每一个结点代表着

具体的数据类型, 例如, 顶点数组结点指向元素的顶点, 说明不同的结点类型. 每个元素图组成一层. 每个结点对应于数据库中的一条记录, 层跟数据库的表进行绑定. 通过这种方式, 实现几何对象与其对应的属性之间交互式操作, 例如属性查询或空间地址的查找等.

为了避免三维场景元素间的数据冗余, 数据存储在几个线性表中, NVDM 的结点是这些线性表入口的引用. 根据 NVDM 结点类型, 系统提供合适的线性表类型, 如几何线性表存储顶点或纹理坐标; 拓扑线性表存储拓扑信息. 线性表以紧凑高效的方式存储了三维地质场景的全部可视化信息.

3 几何可视化模型

钻孔数据是三维地质体的主要数据源. 初始状态的钻孔数据在平面上的分布是不规则的, 一个钻孔含有多个地层层位的高程信息. 此外, 地层中经常有断层、尖灭等复杂的地质形态. 为了保证剖分时整个三棱柱的数据结构保持不变, 同时也是为了让模型能够更好的适应复杂的地质形态, 本文采用三棱

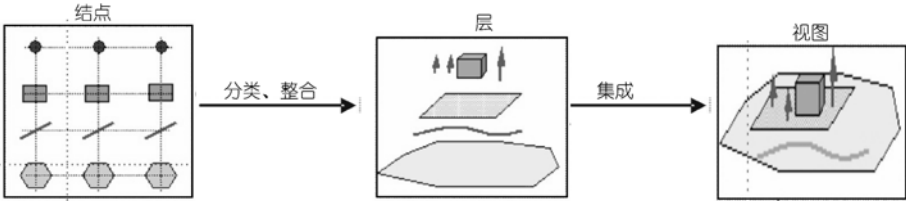


图 1 结点-层数据模型

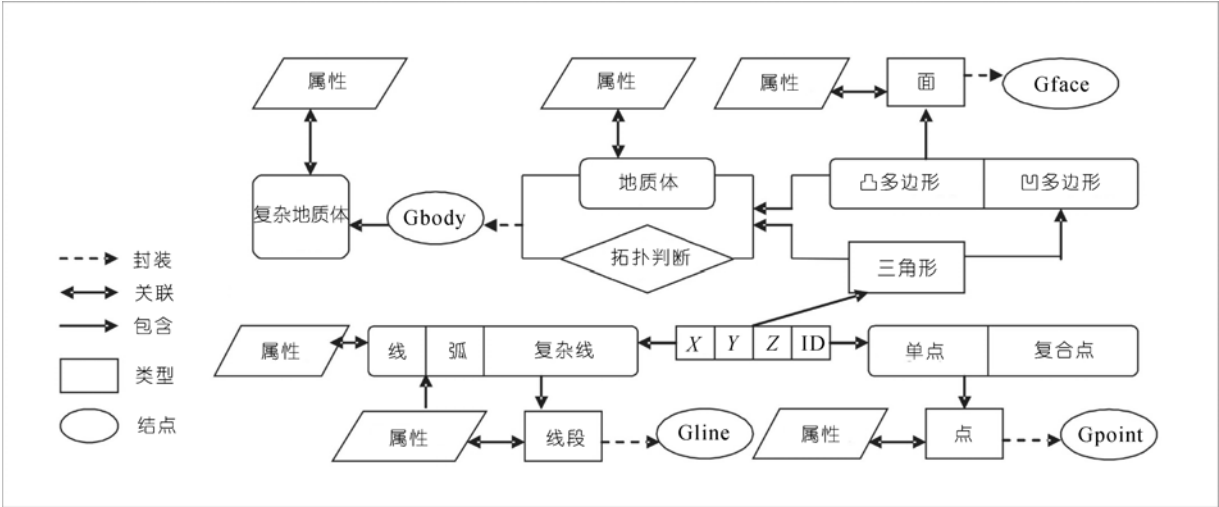


图 2 三维地质数据模型

柱结构构建钻孔数据几何可视化模型. 与Wu^[7]提出的广义三棱柱有类似的特点. 采用如下数据结构描述三棱柱:

```
typedef struct tagTRIPRISM
{
    int layerID;    //定义三棱柱所在层 ID
    bool bCut;      //确定该体元是否被切割
    int locFlag;    //记录切割后体元的相对位置,
```

取 0 或 1

```
    TRIANGLE upTriangle;    //上三角形
    TRIANGLE bottomTriangle; //下三角形
    QUADRANGLE m_quad[3];  //3 个侧面
}TRIPRISM; //定义三棱柱的结构
```

该结构包括属性数据和图形数据两部分, 其中, layerID 是三棱柱所在地层的标识号, 用于连接与该地层相关的属性, bCut 是个布尔型变量, 表示该三棱柱是否为被切割的三棱柱; locFlag 用于记录三棱柱相对于切割面的位置; upTriangle 和 bottomTriangle 分别是三棱柱的上下三角形, 每个三角形由 3 条边组成, 每条边由 2 个点组成; m_quad[3]是三棱柱的 3 个侧面, 每个侧面由 4 条边组成, 每条边由两个顶点组成.

3.1 三棱柱的剖分

三棱柱经过切割以后形成两个新的几何体, 新几何体的形状由切割的方式决定. 为了保证整个地

质体绘制过程中数据结构的一致性, 必须将非三棱柱的新几何体根据特定的方法进一步分解为三棱柱. 采用统一的三棱柱结构能够保证对地质体进行准确的多次切割. 根据本文提出的三棱柱数据结构, 将剖分的种类分为 3 大类, 即完全剖分、特殊剖分和伪剖分, 每种形式又包含若干种剖分类型, 下面分别介绍这几种剖分类型的切割重组方法.

3.1.1 完全剖分

这种剖分的特点是切割面与三棱柱的边相交且交点不是三棱柱边的端点. 根据切割面与三棱柱各边交点的个数(可以取 3, 4 和 5)以及交点的位置(交点可以位于上三角形、棱边以及下三角形上), 这种剖分共有 8 种切割方式. 图 4~8 显示了这 8 种切割方式以及对切割后产生的新几何体进行重组的方法(图中阴影表示切割面).

从图 3 中可以看出, 当切割面与三棱柱各边交点的个数为 5 时, 三棱柱剖分的情况最为复杂, 本文以图 3(h)情况为例, 说明三棱柱剖分的切割重组过程. 在图 3(h)中三棱柱与切割面的交点为 A, B, C, D, E, 其中 A, B 位于上三角形的边上, C, D 位于下三角形的边上, 而 E 位于三棱柱的棱边上, 该切割面将三棱柱剖分成了两个非三棱柱的几何体. 为了将这两个新几何体进一步分解为三棱柱结构, 可以为 A, B 引两

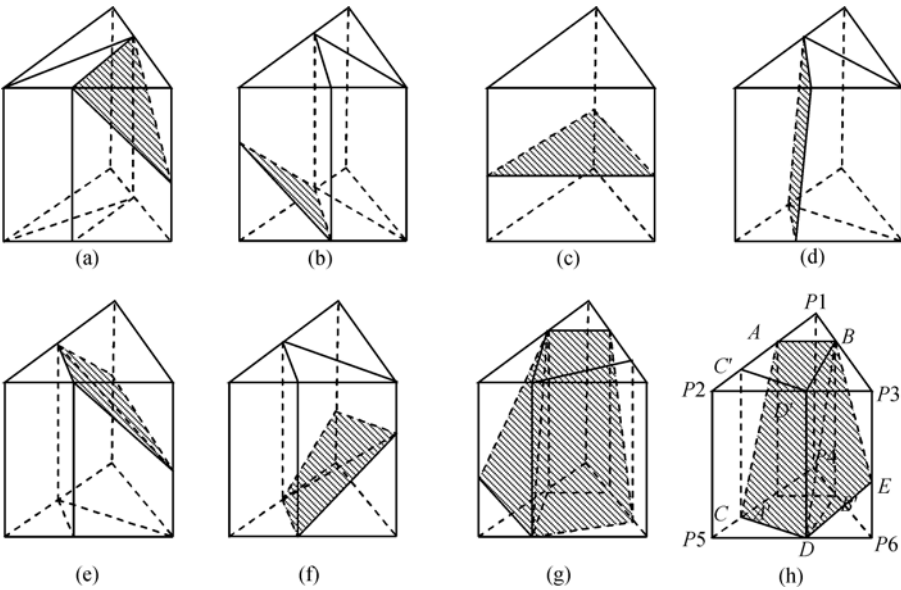


图 3 完全剖分的 8 种切割形态

条与棱边 $P1P4$ 平行的辅助线, 与下三角形的交点分别为 A' , B' , 为 C , D 引两条与棱边 $P2P5$ 平行的辅助线, 与上三角形的交点分别为 C' , D' , 再分别连接 AC , BD , $A'B'$, $C'D'$, DB' , 这样就把原始的形态分解成了 6 个新的三棱柱. 只需要把它们用本文提出的数据结构初始化后, 就可以对其进行绘制或进一步剖分了.

3.1.2 特殊剖分

这种剖分的特点是切割面与三棱柱的边相交且交点中至少有一点是三棱柱边的端点, 即三棱柱有一个点或者一条边与切割面重合. 同样的, 这种类型可分为 7 种情况, 图 4 显示了这 7 种切割方式以及对切割后产生的新几何体进行重组的方法.

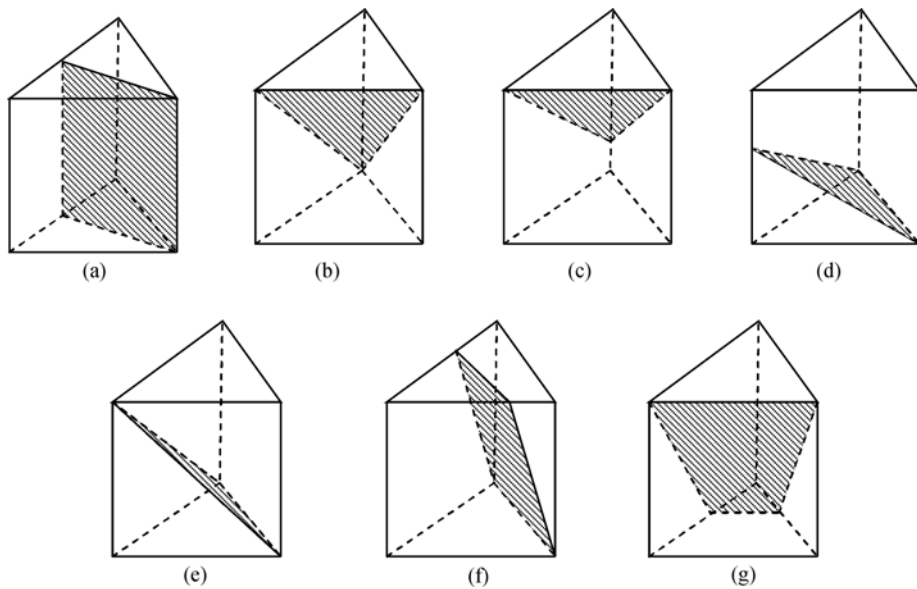


图 4 特殊剖分的 7 种切割形态

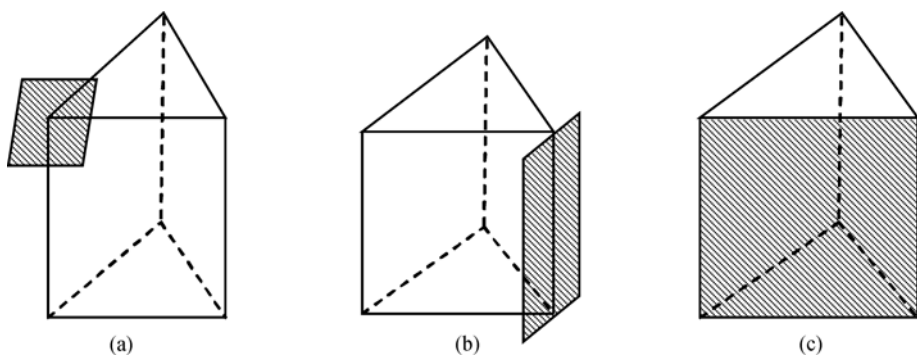


图 5 伪剖分的 3 种切割形态

3.1.3 伪剖分

这种剖分是指三棱柱整体在切割面的一侧, 并且三棱柱的某一个点、某一条边或者某一个面与切割面重合(分别如图 5(a)~(c)所示), 对于这种剖分, 不需要对三棱柱本身进行任何重组, 只需计算三棱柱各点相对于切割面的位置, 如果三棱柱 6 个点代入切割面方程后均大于等于 0, 则将该三棱柱的位置标识 locFlag 设置为 1, 反之设置为 0.

三棱柱在形态上具有一定的对称性, 因此对于完全剖分和特殊剖分还要分别考虑切割点在其他位置上的情况. 如, 对于图 3(a)上三角形有 2 个交点, 棱边上有 1 个交点这种情况, 根据交点所在边的不

同, 实际上共有 3 种方式, 显然, 在切割重组时, 这 3 种剖分采用的方式都是一样的. 在切割三棱柱的时候, 记录切割面与三棱柱相交的多边形, 将这些多边形绘制出来就是地质体在切割面上形成的剖面图.

4 自适应可视化

随着数据获取技术的发展, 大规模、高精度三维地质模型很难在现有的网络带宽和传输速率的网络环境下, 实现快速传输和实时可视化. 为了能有效实现大规模三维地质模型的快速传输和可视化, 满足多用户的数据共享和空间分析服务, 本文提出了渐进传输的三维地质模型的可视化方法. 体系结构如图 6 所示, 在该架构中, 地质数据通过结点-层模型 NVDM 存储在数据库中, 服务器根据客户端的请求通过空间索引获取特定的数据模型后, 通过一系列的结点崩溃方法根据视点的位置对其进行简化, 获得的多分辨率地质模型通过网络渐进传到客户端, 客户端以与服务器简化算法相反的顺序, 对模型进行重建并完成可视化过程.

客户端可视化过程中, 如果地质数据不在客户端, 系统将请求发送到服务器, 要求获取落在视景体中多分辨率地质模型信息. 服务器对请求做出响应, 通过 P-树 [15] 空间索引查找需要的数据. 客户最初接

收到服务器发出的较粗糙数据, 通过跟踪可视化过程, 能够识别当前可视化的部分场景. 如果需要, 用户可以在不超过几何近似值误差(阈值)的前提下, 请求服务器发送更细节的数据, 根据客户端的视点位置和视点方向, 提供可视化区域更高精度的压缩位流, 并传输到客户端. 元素图被第一次传到客户端后, 对该客户端来说就标记为 YES, 相应地, 池入口被标记为 END.

依据空间实体到客户端视点距离, 被选择的元素有一个优先级. 一旦视点改变, 消息优先权也随之改变. 当客户端从服务器上接收到空间数据时, 它做部分简单计算, 拷贝一部分数据模型, 接着发送消息到服务器获取预先没有存储的模型结点. 服务器在结点-层模型 NVDM 基础上, 建立从属图减少冗余数据的传输, 客户端的简化算法修改服务器端的场景描述, 形成元素图形, 该图形包含渐进入口, 依连续的顺序存储数据 [16]. 如果客户端不能存储整个细节层次模型时, 客户端就删除当前不用的数据. 若后续的操作需要这部分数据, 它只简单向服务器发送一个请求. 这样, 服务器非常容易处理大量的客户端连接, 支持多用户并发访问, 因为它不需要记录每个连接点的状态.

5 实验

为了证明本文提出方法的可行性, 进行实验验证. 机器配置为: CPU 为 Intel(R) Pentium(R) 4, 速度为 3993 MHz, 内存大小为 768 MB, 显卡型号为 Intel (R) Graphics controller. 操作系统为 Windows XP, 开发语言为 VC++.NET 和 OpenGL.

实验数据是山西平朔杨家岭井工矿 2#井田钻孔数据、等厚线数据和断层数据, 原始的钻孔数据含有 3 层地层的高程信息(如图 7). 用该地质体相邻地层之间的规则高程数据初始化三棱柱结构, 对于不同地层用以上方法进行绘制, 进而表达三维地质体的空间形态. 为了揭示地质体的内部结构, 对地质体进行切割显示. 首先对三棱柱是否被切割进行判断, 对被切割的三棱柱进行切割重组后, 组成地质体的三棱柱被分为两种类型, 即三棱柱的位置标识 locFlag 为 1 或 0. 将 locFlag 为 1 那部分三棱柱在绘制时平移一段距离, 可以观察到地质体被切割后的内部形态了.

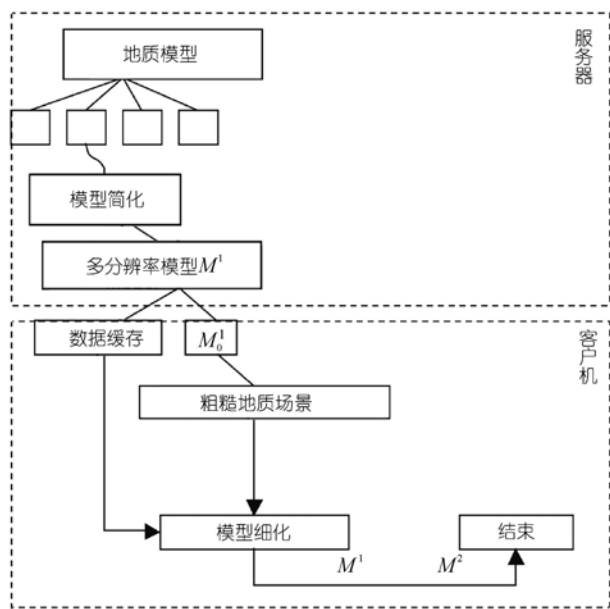


图 6 地质体的网络传输与可视化

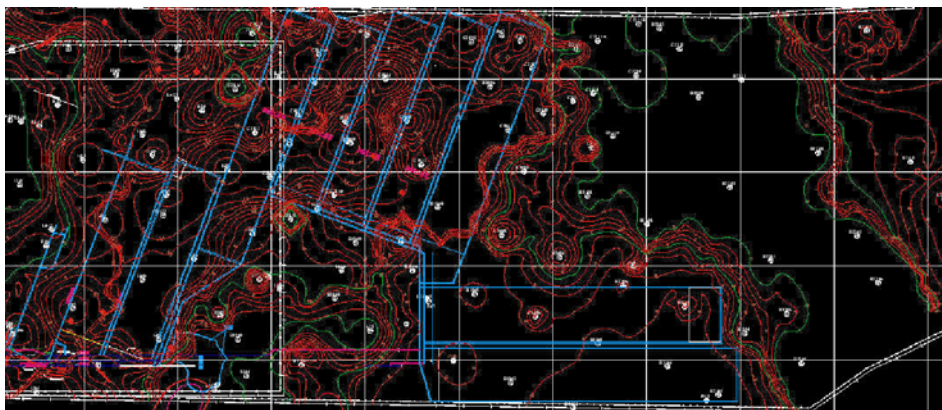


图 7 杨家岭井工矿 2# 的等厚线、钻孔数据平面图

为了能更好的验证本文的结点-层的数据模型 NVDM, 我们利用北京朝阳区地下地质数据和地上三维城市模型进行了实验. 在 NVDM 中, 地下不同的地质构造以及地上建筑模型作为不同的层, 形成各自的结点, 作为视图, 最终地质地层的相关信息集成到地面三维场景中, 解决了地上地下空间几何无缝集成建模形成一个典型大城市地上地下集成建模与可视化的场景.

与齐安文和吴立新等^[6,7]提出的类三棱柱方法相比较, 本文的方法同样能够完整的表达矿山地质体三维空间拓扑关系外, 能够较好地表达地质体之间的上下文查询, 实现不同层次空间模型的无缝表达. 由于 NVDM 是一个结点-层模型, 非常适合用树(如 k-tree 等)状结构来存储, 利于多分辨率地质模型的表达和实现.

为了验证本文提出的网络自适应可视化方法, 我们在网络带宽 512 k 的网络环境里, 对地质数据进行可视化验证. 环境下系统启动时, 客户端通过网络与服务器建立了联系. 服务器上有一个配置文件, 该文件包含数据类型、大小、所在的位置以及空间范围等信息, 它放在一组哈希表中, 用来管理放在每台服务器上待可视化的多源空间数据. 在系统启动时, 配置文件下载到客户端, 通知管理器空间数据分布的具体位置. 表 1 比较了采用渐进传输的方法与直接传输不同地质数据时, 各自需要的传输时间和可视化时间.

由于服务器负责对地质数据建模和预处理, 并采用渐进传输技术实现模型的传输和可视化. 另一

方面, 渐进数据反映了删除顺序, 原始面通过利用简化过程的逆操作在客户端上恢复, 顶点和三角形以服务器相反的删除顺序插入到基本面上, 所以很容易逐顶点或逐三角形的细化每个表面. 基于此, 服务器能够快速而准确的调整数据适应客户端的运行能力. 考虑到客户端的能力, 服务器确定应传到客户端的三角形数目. 因为渐进传输, 服务器不需将所有信息作为数据包传到客户端, 而是分步进行. 为了减少内存的消耗, 构建三维场景的结点采用算术编码压缩, 先传输可见子结点中较粗的模型, 并将其保留在客户机内存中, 渐进可视化更高层次的场景. 如果遍历停止, 就用较粗细节层次模型渲染. 从表 1 中可以看出, 本文的渐进传输方法能够有效地加快大规模地质数据在有限带宽网络上的传输时间. 渐进传输的另一个优点是, 若传输过程中网络中断, 仍能保证当前层次数据和模型的可视化.

6 结论

实现地质体的真三维可视化对于揭示地质体的空间分布规律、模拟矿山开采过程甚至指导矿山生产实践都具有非常重要的现实意义. 本文提出了一种结点-层数据模型表达三维地质空间数据的几何拓扑关系, 该数据模型能够灵活的实现对大规模地质空间数据进行分割. 提出了一种用三棱柱作为基本体元来描述三维地质体内部结构的方法. 本文提出的可视化方法非常容易扩展到其他类型实体的三维可视化. 但是这些算法的部分技术细节还需要进一步完善和提高: 数据模型在构建复杂不规则空间实体时, 由于现有表达和描述复杂空间关系的不足, 会带

表 1 不同地质数据采用两种方法传输和可视化结果比较

细节层次	数据量/MB	顶点数	简化时间/s	传输时间/s	重建时间/s	渲染时间/s
渐进传输等厚线数据						
Level 1	8910	989974	86.75	12.02	83.19	28.12
Level 2	28660	5853275	28.68	31.84	24.24	37.58
Level 3	83192	9342675	21.12	89.12	22.24	58.86
直接传输						
	240578	14092832		483.09		247.86
渐进传输断层数据						
Level 1	1472		10.37	2.91	10.88	4.98
Level 2	2928		8.36	5.64	26.27	9.13
直接传输						
	4833			49.56		28.14
渐进传输钻孔数据						
Level 1	2132	393564	12.45	4.19	18.83	6.03
Level 2	3972	623814	9.72	7.78	32.15	10.89
直接传输						
	7552	955737		61.49		29.38

来较大数据冗余。

事实上, 由于地质现象具有断层、褶皱等复杂现象, 如何全面准确的模拟真三维的地质体, 并在此基础上进一步引入 GIS 的三维交互和空间分析能力是

一项非常复杂的任务, 仍然要进一步的深入研究. 在今后工作中, 我们计划集成树结构模型与结点-层数

据模型, 来更好的表达复杂地质空间实体的拓扑关系和层次多分辨率模型.

致谢 感谢审稿专家提出的宝贵意见.

参考文献

1 Losa A, Cervelle B. 3D Topological modeling and visualization for 3D GIS. *Comp Graph*, 1999, 23: 469—478

2 Gold C, Mostafavi A. Towards the global GIS. *ISPRS J Photogram Remote Sens*, 2000, 55(33): 150—163 [\[doi\]](#)

3 Mallet J L. *Geomodelling*. New York: Oxford University Press, 2002

4 Courrioux G, Nullans S, Guillen A, et al. 3D volumetric modelling of Cadomian terranes (Northern Brittany, France): an automatic method using Voronoi diagrams. *Tectonophysics*, 2001, 331: 181—196 [\[doi\]](#)

5 张煜, 温国强, 王笑海, 等. 三维体绘制技术在工程地质可视化中的应用. *岩石力学与工程学报*, 2002, 21(4): 563—567

6 齐安文, 吴立新, 李冰, 等. 一种新的三维地学空间构模方法: 类三棱柱法. *煤炭学报*, 2002, 27(2): 158—163

7 Wu L X. Topological relations embodied in a generalized tri-prism (GTP) model for a 3D geoscience modeling system. *Comp Geosci*, 2004, 30(4): 405—418 [\[doi\]](#)

8 武强, 徐华. 三维地质建模与可视化方法研究. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2004, 34(1): 54—60

9 钟登华, 李明超, 刘杰. 水利水电工程地质三维统一建模方法研究. *中国科学 E 辑: 技术科学*, 2007, 37(3): 455—466

10 Smirnoff A, Boisvert E, Paradis S J. Support vector machine for 3D modelling from sparse geological information of various origins. *Comp Geosci*, 2008, 34: 127—143 [\[doi\]](#)

11 Chang Y, Park H. Development of a web-based geographic information system for the management of borehole and geological data. *Comp Geosci*, 2004, 30(8): 887—897 [\[doi\]](#)

12 Lees J M. Geotouch: software for three and four dimensional GIS in the earth sciences. *Comp Geosci*, 2000, 26(7): 751—761 [\[doi\]](#)

13 McCarthy J D, Graniero P A, et al. A GIS-based borehole data management and 3D visualization system. *Comp Geosci*, 2006, 32(10): 1699—1708 [\[doi\]](#)

14 Zlatanova S, Rahman A A, Pilouk M. 3D GIS: current status and perspectives. *Proceedings of the Joint International Symposium on Geospatial Theory*, 2002 July 8—12. Processing and Applications, Ottawa, Canada, 2002

15 Zhang L Q, Yang C J, Liu D L, et al. A web-mapping system for real-time visualizing the global terrain. *Comp Geosci*, 2005, 31(3): 445—454

16 Sahm J, Soetebier I, Birlhelmer H. Efficient representation and streaming of 3D scenes. *Comp Graph*, 2004, 28(1): 15—24