

文章编号: 0253 - 9993 (2006) 05 - 0576 - 05

基于 GTP 修正的 R3DGM 建模与可视化方法

车德福^{1,2}, 吴立新^{1,2}, 陈学习¹, 徐磊¹

(1. 中国矿业大学 3S 与沉陷工程研究所, 北京 100083; 2. 东北大学 3S 与数字矿山研究中心, 辽宁 沈阳 110004)

摘要: 将广义三棱柱 (GTP) 的辅助几何要素——对角线——修正为四面体, 解决了 R3DGM (真三维地学模型) 中数据组织与几何要素的不一致和空间操作中的几何裂缝问题. 修正后的 GTP 模型集成了 TN, GTP 和四面体模型的优点, 构建算法简单且空间操作无缝. R3DGM 过程分 3 步进行: 根据钻孔孔口数据点与断层露头约束, 按约束 Delaunay 法则生成地表不规则三角网 (CD-TN); 按地学推理规则, 将 CD-TN 中三角形沿钻孔迹线向下扩展生成 GTP; 根据最小顶点标识法, 将 GTP 模型转换成四面体. 介绍了基于 GTP 修正构建的三维数字地质模型的任意平面剖切、虚拟开挖、空间查询等可视化方法. 并结合北京 CBD 地下三维集成建模与空间操作, 展示了模型构模及空间操作效果.

关键词: 数字矿山; 广义三棱柱 (GTP); 真三维地学模型 (R3DGM); 可视化; 四面体;

中图分类号: TD178 **文献标识码:** A

Modeling and visualizing methods for real 3D geosciences model based on amended generalized tri-prism (GTP)

CHE De-fu^{1,2}, WU Li-xin^{1,2}, CHEN Xue-xi¹, XU Lei¹

(1. Institute of RS/GPS/GIS and Subsidence Engineering, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China; 2. Center for RS/GPS/GIS and Digital Mine Research, Northeastern University, Shenyang 110004, China)

Abstract: By amending the auxiliary geometric primitive, diagonal, of generalized tri-prism (GTP) into tetrahedron, the inconsistentness of data organization and of geometric primitive in real 3D geosciences modeling as well as the geometric interstice in spatial operation were solved. The amended GTP model synthesized the merits of TN, GTP and tetrahedron, and its constructing algorithm was simple and the spatial operation on it is seamless. The modeling process for R3DGM includes: to generate the constrained delaunay TN (CD-TN) of terrain according to the collar data of borehole and the outcrops of faults; to extend each triangle of the CD-TN downward to generate a GTP along the borehole tracks referring to the geo-inference rules; and to convert the GTP model into tetrahedron model based on the smallest vertex identifier (SVI) method. The visualizing methods for arbitrary planar cutting, virtual excavation designing, virtual wandering and spatial inquiry on so constructed R3DGM were illustrated, and the effects out from the methods are shown with the real 3D integral modeling and 3D spatial operations for the underground geo-technical environment of CBD in Beijing being an example.

Key words: digital mine; generalized tri-prism (GTP); real 3D geosciences modeling (R3DGM); visualization; tetrahedron

收稿日期: 2005-12-12

基金项目: 国家杰出青年基金资助项目 (50525414); 国家自然科学基金资助项目 (40571137); 东北大学长江学者科研启动基金资助项目

作者简介: 车德福 (1970-), 男, 山东烟台人, 博士研究生. Tel: 024-83684873, E-mail: bc2001@163.com

近年来, 采矿、地质、环境和岩土等工程与地质领域对 3D 地学信息数字模拟的迫切需求, 促使真三维地学模型 (real 3D geosciences model, R3DGM) 及其可视化方法的研究发展迅速. 许多学者对此进行了有益的探索和实验, 提出了多种可视化地学模型, 如多层 DEM 模型^[1]、B-reps 模型^[2]、TEN 模型^[3]、三棱柱和广义三棱柱^[4,5] (generalized tri-prism, GTP) 模型等. 其中 GTP 模型因其直接基于钻孔采样数据、易于局部更新、内含拓扑关系、与 TN 模型充分耦合、可以发生退化等优势, 在 R3DGM 中得到了越来越广泛的应用^[6-9]. 尽管如此, 由于 GTP 的侧面不一定是平面, 对所构地学模型进行 3D 可视化操作时不可避免出现几何裂缝问题.

文献 [10] 提出应在 GTP 模型中引入 3 条对角线作为临时构模要素, 将每个侧面分为 2 个三角形, 每个 GTP 分为 3 个四面体解决此问题, 但在数据组织上并没有直接面向对角线元素, 依然未解决数据组织与几何元素构成的一致性问题. 为此, 本文将 GTP 中的对角线几何要素修正为四面体, 并将四面体作为 GTP 的数据组织和空间操作的有机体, 通过最小顶点标识法 (SVD)^[11] 实现 GTP 与四面体间的转换, 从而保证了 GTP-R3DGM 与可视化的无缝性、一致性. 本文基于修正后的 GTP 模型, 研究了 R3DGM 与可视化实现方法, 并以北京 CBD 研究区的地学资料进行了实验应用.

1 GTP 模型几何要素 P_7 的修正

GTP 是针对钻孔偏斜而提出的一种真 3D 体元模型, 它由上、下不一定平行的 2 个三角形和 3 个侧面空间四边形围成, 几何要素包含结点 (P_1)、TN 边 (P_2)、侧边 (P_3)、TN 面 (P_4)、侧面 (P_5) 和 GTP (P_6) 和辅助对角线要素 (P_7). GTP 模型中引入 P_7 , 表面上是将 GTP 的每个侧面分割为 2 个三角形, 而实际上是要通过首尾相连的 3 条对角线两两所构成的平面, 将 GTP 剖分成四面体. 因此, 对 GTP 模型进行空间操作所面对的是 GTP 剖分后的四面体体元, 而不是单纯孤立的对角线, 即四面体是 GTP 的有机组成部分, 在数据组织和空间操作分析与 GTP 是一个整体. 因此, GTP 模型中几何元素 P_7 应从对角线修正为四面体, 即 GTP 模型由结点、TN 边、侧边、TN 面、侧面、四面体和 GTP 体元共 7 个几何元素组成, 如图 1 所示.

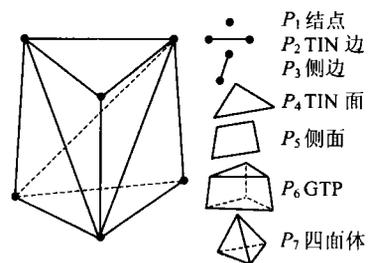


图 1 GTP 修正模型的组成要素

Fig. 1 Primitives of revised-GTP model

GTP 模型中对角线修正为四面体要素后, 由于四面体数据结构简单, 其模型显示和几何变换迅速, 因而利于 R3DGM 的数据组织、可视化操作与空间分析.

2 基于 GTP 修正的 R3DGM 建模方法

2.1 地表面的 CD-TN 生成

地表面 TN 的生成是指以钻孔孔口坐标为数据点, 按 Delaunay 法则^[12] 生成地表面不规则三角网 (D-TN), 进而确立钻孔间的基本拓扑关系, 这是 GTP 建模的基础. 对于出露地表的断层, 构建孔口 Delaunay 三角网时, 断层的存在增加了孔口离散点之间的约束关系. 此时需要以断层线为约束, 采用约束 Delaunay 三角剖分算法, 生产约束 D-TN, 即 CD-TN. 算法主要有约束图法、分割-合并算法、三角网生长法、加密算法和两步法等, 其中两步法中强行嵌入约束边的对角线交换算法简洁明了, 易于实现, 最具有实用性^[13-15]. 本文以两步法实现约束线段的插入与删除, 可以动态地处理地表面断层约束线.

2.2 GTP 的推理构建

生成地表面 CD-TN 后, 即可将 CD-TN 中的三角形沿钻孔迹线逐个向下扩展生成 GTP. 为提高建模推理和算法的效率, 本文约定钻孔中数据点的编号按自地表向下递增的顺序进行, 钻孔点编号与它下邻地层的编号相同, 同时, 模型中相关几何元素和实体元素均采用链表结构存储. 在生成地表面 TN 的基础

上, 构建 GTP的主要步骤如下:

(1) 从地表面 TN中提取 1个三角形, 将这个三角形设置为第 1个 GTP的上三角形.

(2) 根据上三角形 3个顶点的地层编码, 沿对应的 3个钻孔向下扩展新三角形 (称为下三角形), 如图 2所示.

由于地层形成有先后次序且空间发育具有一定的规律性, 但断层的存在会对地层造成错断和约束. 因此, 三角形向下扩展时应能体现出这种地质构造规律, 在钻孔间完成地层上述关系的推理, 并保证推理结果的正确性和惟一性. 为此, 提出三角形向下扩展的地质推理规则: 若当前待扩展三角形的 3个顶点均无断层点, 则编码相同时, 新三角形顶点均为相应钻孔的下一个点, 如图 2 (a) 所示; 编码不同时, 编码小的顶点沿相应钻孔扩展下一点为新三角形顶点, 而编码大的顶点保持不变, 如图 2 (b) 所示.

若当前待扩展三角形的 3个顶点中有 1个或 2个断层点时, 检查其余顶点所在的钻孔中自该顶点以下的点的属性: 含有与上述断层点属性相同的点时, 则上述断层点无论编码大小均不向下扩展, 直到其余顶点按编码大小向下扩展到与其属性相同为止, 如图 2 (c) 中三角形 111向下扩展成三角形 221 (图中黑色圆点为断层点, 黑色三角形为断层面); 没有与上述断层点属性相同的点时, 则所有三角形顶点可按编码大小向下扩展; 如图 2 (c) 中三角形 222向下扩展成 333为新三角形顶点. 若当前待扩展三角形的 3个顶点均为断层点时, 则可按 的处理方式, 按地层编码大小向下扩展新三角形, 如图 2 (c) 中三角形 221向下扩展成三角形 222.

(3) 根据三角形双向链表中上下三角形的对应关系和钻孔点链构建 GTP体, 记录其描述信息, 并将下三角形置为上三角形.

(4) 重复步骤 (2) 和 (3), 直到上三角形顶点均为相应钻孔的底部点为止.

(5) 重复步骤 (1) ~ (4), 直到地表面 TN的所有三角形均遍历完为止.

这种 GTP构建方法的优点是便于动态修改, 当有新的钻孔数据加入时, 只需在地表面局部修改 TN, 然后将局部修改的三角形按照扩展规则沿钻孔迹线向下扩展生成新的 GTP即可.

2.3 GTP的四面体剖分

GTP的四面体剖分可通过其顶点标识编号和侧面四边形的对角线连接依次完成^[11]. 顶点标识编号必须满足两个条件: 标识号为常数, 而且惟一; 标识号可以比较大小. 例如 $P_i < P_j$, 表示顶点 P_i 的标识号小于顶点 P_j 的标识号; $(P_i, P_j) < (P_k, P_l)$ 表示顶点 P_i 和 P_j 中标识号最小者小于顶点 P_k 和 P_l 中标识号最小者.

当需要对 GTP进行四面体剖分时, 通过比较其侧面四边形的顶点标识号, 每个侧面从具有最小标识号的顶点向其对角连对角线, 即可完成剖分操作.

如图 3所示, 以 GTP侧面对角线连接为例, 说明 GTP的四面体剖分方法. 图中 GTP的 3个侧面中, 对于 $P_1P_2P_5P_4$ 侧面, 如果 $(P_1, P_5) < (P_2, P_4)$, 则该侧面被对角线 P_1P_5 所剖分; 反之则被对角线 P_2P_4 剖分. 其它两个侧面对角线的连接方式与此相同.

为保证 GTP对地质体描述的完整性和节省存储空间, 在地质模型中并不直接将 GTP剖分成四面体, 而是在其数据结构中增加 1个四面体剖分编码. GTP的四面体剖分编码可由侧面对角线的连接码依次组成, 每个 GTP单元设 3个标识位, 每个标识位对应 1个侧面对角线的连接方式. 如图 3所示 GTP单元: 假定第 1个标识位对应 $P_1P_2P_5P_4$ 侧面, 若 $(P_1, P_5) < (P_2, P_4)$,

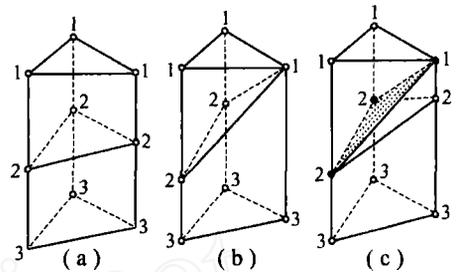


图 2 GTP顶面三角形向下扩展规划
Fig. 2 Downward expanding of GTP triangle

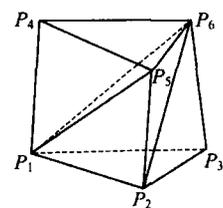


图 3 GTP的四面体剖分方法

Fig. 3 Tetrahedron dividing inside GTP

则连接 P_1P_5 , 连线编码为 0; 若连接 P_2P_4 , 则连线编码为 1; 3 个侧面的对角线的连接码组合为 001 ~ 110. 当 GTP 单元需要剖分成四面体时, 只需检索 GTP 标识码, 即可获得相应的四面体.

3 基于 GTP修正的 R3DGM 可视化方法

由于基于 GTP修正的 R3DGM 可以将所有的体元面统一于三角形, 所有的体元转换成四面体, 从而使基于体元结构的可视化操作, 如任意平面剖切、虚拟开挖和图属查询等易于实现.

3.1 任意平面剖切方法

用鼠标在 3D 数字地学模型中任意选取 3 个空间点, 即可定义一个剖切平面. 由于平面与四面体的切割方式有限, 且易于保持切割分解后数据结构的一致性, 故基于 GTP修正的 R3DGM 剖面生成算法简单. 首先判断四面体相对于剖切面的空间位置关系, 对与剖切面相交的四面体执行相交运算, 求出交点后根据边面之间的关系生成四面体体元中的多边形, 将多边形求并集即可形成剖面. 在 OpenGL 开放环境下, 只要将每次剖切的平面结果用一个对应的显示列表来管理和存储, 当需要显示时就调用相关的显示列表, 就可以同时支持多个任意平面的剖切显示.

3.2 虚拟开挖设计方法

虚拟工程开挖设计是建立 R3DGM 的重要目的之一. 通过工程开挖体与地学模型的求交切割, 不仅可以直观地观察工程体开挖揭露的地质结构分布状况, 而且还可以进行开挖设计、开挖量计算、支护需求分析及成本估算等. 若进一步与有限元分析系统相连接, 还能够对虚拟开挖后的岩层运动、力场演变等地层内部 3D 现象进行力学行为分析、交互及动态可视化.

在 GTP修正模型表示下, R3DGM 的体元面最终可以统一于三角形, 而工程开挖体的外轮廓可以剖分成三角形, 故解决工程开挖体与地学模型求交问题的实质就是解决空间三角形的相交问题. 对于给定的工程开挖体的表面三角形集合, 逐个判断其与地学模型体元面的三角形集合的相交情况. 如果相交, 求出交点, 同时根据交点调整三角形及体元的结构; 再根据点在体内的判断来决定三角形的归属. 利用 OpenGL 填充多边形的形式, 即可完成虚拟开挖可视化.

3.3 图属查询方法

R3DGM 的图属查询可通过 OpenGL 提供的选择与反馈机制实现. 由于 2D 屏幕点和实际的 3D 坐标点不是一一对应的关系, 所以由图形到属性查询时会遇到一些问题, 必须用一定的方法确定屏幕上的 2D 坐标所对应的属性信息. 通过 OpenGL 两个实用函数 $gluProject()$ 和 $gluUnProject()$, 可以惟一确定计算机 2D 屏幕坐标所对应的物体 3D 坐标. 由这两个函数结合 OpenGL 的拾取函数, 便能实现图形到属性的查询操作. 如果鼠标捕捉到的 2D 点对应的属性信息为地质实体的 D 号, 则使用简单的 SQL 语句 $select(*, *, from database, where D = " * * * ")$ 即可获得地物的属性信息. 如果鼠标捕捉到的 2D 点对应的属性信息为 z 坐标, 则该点对应的 3D 坐标为 $(X, Y, Z) = (x, y, z) T^{-1}$ (T 为由 3D 向 2D 投影的变换矩阵), 从而实现 3D 环境下的由图形到属性的查询, 并将查询的信息按照一定方式反馈给用户.

4 实验结果与讨论

根据本文所述方法, 笔者在 VC++6.0 环境下, 以 OpenGL 作为 3D 图形绘制工具, 建立了一个基于 GTP修正的 R3DGM 与可视化系统 GeoMo3D, 并以北京市 CBD 勘探区实际地质资料进行了实验研究. 研究区内共有原始钻孔 46 个, 地层分 10 层, 根据剖面图及其它地质资料内插虚拟钻孔后, 共有钻孔 54 个.

所建立的 3D 地质模型如图 4 (a) 所示, 图 4 (b) 为地质模型多次剖切所形成的栅状图, 图 4 (c) 为地质模型中虚拟开挖设计的地铁, 图 4 (d) 为地铁入口处的虚拟漫游场景, 图 4 (e) 为地铁开挖体内的虚拟漫游, 为增强真实感, 地铁底部粘贴了轨道纹理, 图 4 (f) 为地质实体空间关系查询结果.

目前只是对有限复杂度的 R3DGM 建模与可视化方法进行了研究. 对地质体中存在多种断层、褶皱等复杂现象和面向地学实体的建模方法, 以及基于 3D 地学实体的数据组织、拓扑描述、空间查询、空间分

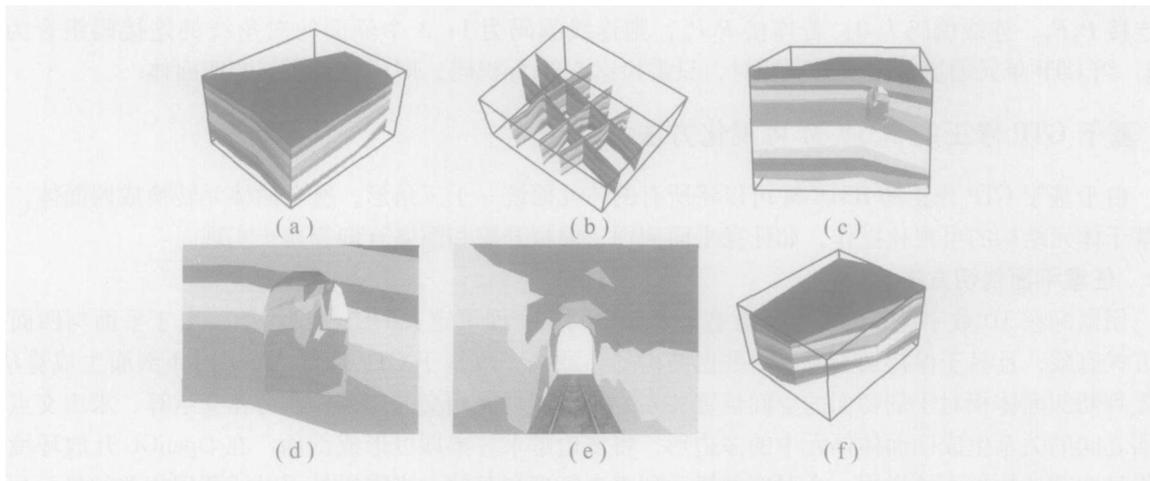


图 4 基于 GTP修正的 R3DGM建模与可视化实例

Fig. 4 Examples of the modeling and visualizing of R3DGM based on amended GTP

析、空间推理、数据更新与维护等功能的完善，仍有待研究和突破。

参考文献：

- [1] 王纯祥, 白世伟, 贺怀建. 三维地层可视化中地质建模研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22 (10): 1 722 ~ 1 726
- [2] Lemon A M, Jones N L. Building solid models from boreholes and user-defined cross-section [J]. Computers and Geosciences, 2003, 29 (3): 547 ~ 555.
- [3] Chen X Y. A workstation for three-dimensional spatial data research [A]. The Fourth International Symposium of L IESMARS [C]. Wuhan, China, 1995. 42 ~ 51.
- [4] 曹代勇, 王占刚. 三维地质模型可视化中直接三维交互的实现 [J]. 中国矿业大学学报, 2004, 33 (4): 384 ~ 387.
- [5] Gong J Y, Cheng P G, Wang Y D. Three-dimensional modeling and application in geological exploration engineering [J]. Computers and Geosciences, 2004, 30 (4): 391 ~ 404.
- [6] 芮小平, 杨永国, 奚砚涛. 一种基于三棱柱的三维地质体可视化方法研究 [J]. 中国矿业大学学报, 2004, 33 (5): 584 ~ 588
- [7] 吴立新. 真三维地学构模的若干问题 [J]. 地理信息世界, 2004 (3): 13 ~ 19.
- [8] 吴立新, 史文中. 论三维地学空间建模 [J]. 地理与地理信息科学, 2005, 21 (1): 1 ~ 4.
- [9] 姜云, 吴立新, 车德福, 等. 基于粗糙集和 GeoMo3D的城市岩土参数重要性评估与可视化 [J]. 地理与地理信息科学, 2005, 21 (6): 19 ~ 21.
- [10] Wu L X. Topological relations embodied in a generalized tri-prism (GTP) model for a 3D geoscience modeling system [J]. Computers and Geosciences, 2004, 30 (4): 405 ~ 418.
- [11] 陈学习, 吴立新, 史文中, 等. GTP模型中对角线引入的最小顶点标识 (SVD) 法 [J]. 地理与地理信息科学, 2004, 20 (3): 17 ~ 21.
- [12] 武晓波, 王世新, 肖春生. Delaunay三角网的生成算法研究 [J]. 测绘学报, 1999, 28 (1): 28 ~ 35.
- [13] 李立新, 谭建荣. 约束 Delaunay三角剖分中强行嵌入约束边的多对角线交换算法 [J]. 计算机学报, 1999, 22 (10): 1 115 ~ 1 118
- [14] 贾晓林, 吴立新, 王彦兵. 二维 Delaunay三角网局部更新: 点插入与点删除 [J]. 地理与地理信息科学, 2004, 20 (5): 28 ~ 31.
- [15] 王彦兵, 吴立新, 史文中, 等. 基于虚点影响域重构的 CD-TN约束线动态删除算法 [J]. 武汉大学学报 (信息科学版), 2005, 30 (10): 862 ~ 865.