

基于广义三棱柱体元的三维地层建模方法

车德福¹, 陈学习¹, 吴立新^{1,2}, 徐磊¹

(1. 中国矿业大学 北京校区 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: 为了解决基于广义三棱柱 (GTP) 的三维地层模型自动建模问题, 提出了一种三维地层构造知识推理规则和建模方法。该方法结合钻孔数据特点和地层分布规律, 首先以孔口数据生成地表不规则三角网 (TIN), 然后根据地层构造知识推理规则, 将 TIN 中的三角形逐个沿钻孔向下扩展生成 GTP, 建立三维地层模型, 能够解决包括尖灭、分叉和断层等在内的复杂地层构造推理和自动建模。该方法对基于 GTP 的三维地层建模具有一定的参考价值和指导意义。

关键词: 三维地层建模; 不规则三角网; 广义三棱柱; 知识推理规则; 断层建模

中图分类号: P 642

文献标识码: A

3D stratum modeling method based on generalized tri-prism volume element

CHE De-fu¹, CHEN Xue-xi¹, WU Li-xin^{1,2}, XU Lei¹

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

Abstract: In order to solve the 3D automatic modeling problem of strata based on Generalized Tri-prism (GTP), a kind of 3D stratum structure knowledge inference rule and modeling method is put forward. This method can consider borehole data characteristics and the stratum distributing laws, firstly takes borehole collar data to generate triangle irregular network (TIN), then with the proposed stratum knowledge inference rule, expands each triangle of TIN down into generalized tri-prism along borehole trace, and 3D stratum model is built. This method can be used to solve automatic modeling and deducing problems of complex geological structures such as pinch-out, bifurcation, fault and so on, and it has reference value and instructional meaning for 3D modeling of stratum based on GTP model.

Key words: 3D stratum modeling ;triangle irregular network ;Generalized Tri-Prism (GTP) ;knowledge inference rule ; fault modeling

0 引言

三维地层建模是目前采矿、地质和岩土工程等领域广泛关注的问题之一, 国内外学者在这方面做了大量的研究, 提出的建模方法有“多层 DEM”法, 四面体格网法, “地层水平法”和三棱柱法等^[1-4]。“多层 DEM”可以精确地表达地层界面, 但难以表达内部属性; 四面体格网法适于复杂地层建模, 但数据大, 算法繁琐; “地层水平法”和三棱柱模型主要基于垂直钻孔数据建模, 无法直接利用实际钻孔数据。同时, 目前各种建模方法大都忽略了构建地层的“知识推理规则”, 没有考虑断层等复杂地质构造对建模的影响, 适用范围有限。基于上述考虑, 以广义三棱柱 (Generalized Tri-Prism, GTP) 作为基本体元,

提出了三维地层模型的构建方法。该方法能够结合钻孔数据特点和地层分布规律, 根据提出的地层构造知识推理规则, 解决包括尖灭、分叉和断层等在内的地层构造推理和自动建模, 并较好地应用于平顶山某勘探区三维地层建模工作中。

1 GTP 体元建模原理与特点

GTP 由上、下不一定平行的两个三角形和三个侧面四边形所组成的空间单元, 如图 1(a)。利用 GTP 进行地层建模时, 其上下底面的三角形集合可以表达不同的地层面, 侧面四边形可以描述层面间的相邻关系, 而 GTP 体元则可表达层面间的内部实体。

收稿日期: 2004-09-12

基金项目: 北京市自然科学基金资助重点项目 (4041005); 教育部“高校青年教师奖”专项基金资助项目

作者简介: 车德福 (1970-), 男, 山东烟台人, 博士研究生, 主要从事三维地质建模方面的研究, E-mail: bc2001@163.com。本文编辑: 焦丽

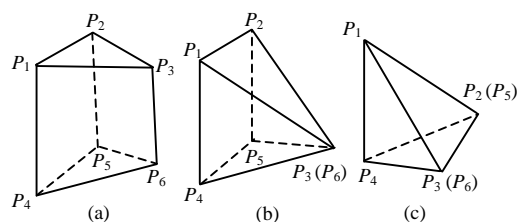


图 1 GTP 体元

Fig.1 GTP component

针对地层尖灭、分叉和错断等复杂地质构造，GTP 体元可以发生退化，图 1(b) 为一条棱边 P_3P_6 退化为一点的情况，图 1(c) 为两条棱边 P_2P_5 和 P_3P_6 分别退化为一点的情况。为便于建模处理，上述两种特殊的 GTP 体元在数据结构中仍然记录其 6 个顶点，即退化棱边的两个顶点是相同的。

2 基于 GTP 体元的三维地层建模

2.1 建模数据预处理

建模数据的预处理包括钻孔内地层的划分、排序和统一编号。地层的层数可以根据钻孔内岩层分界点综合分析获得；根据孔内所遇岩层 Z 坐标的关系可以确定地层的排序；地层统一编号采用自地表向下递增的顺序进行，约定钻孔上分界点的编号为该点向下邻接的地（岩）层编号。为便于构造推理和自动建模，钻孔数据采用双向链表结构存贮。钻孔点双向链表一方面可以方便检索钻孔逻辑上下点，用于沿钻孔点的扩展；另一方面则可以保证在 OpenGL 驱动下绘图时，同一钻孔的上下点相连，从而自动解决实际钻孔的偏斜问题。

2.2 地表面建模

地表面建模是将孔口数据点按 Delaunay 法则生成地表面不规则三角网 (TIN)，确立钻孔间的基本拓扑关系，这是 GTP 体元建模的基础。目前 Delaunay 三角网有多种生成算法，其中逐点插入法算法思想简单且便于扩展，因此非常适合基于钻孔数据的地表面建模。但该方法在数据量较大时，时间效率较低，而数据库在管理大量数据上又有独到优势。因此在生成 TIN 时，充分利用数据库进行数据提取和存贮，大大加快了生成速度。地表面 TIN 形成以后，利用 OpenGL 中多组独立充填三角形的几何图元组织方式，就可显示地表面。

2.3 三维地层建模

三维地层建模是在已生成的地表面 TIN 的基

础上，逐个将三角形沿钻孔向下扩展生成 GTP，建立地层的整体描述模型。由于地层出现一般都有先后规律和尖灭顺序，因此三角形向下扩展时应能体现出这种地质构造知识，在钻孔间完成上述关系的推理，并保证推理结果的唯一性。为此提出三角形相连的钻孔间地层三维构造知识推理规则，其基本原理为：

(1) 若当前三角形三个顶点地层编号相同，则向下扩展的新三角形顶点均为相应钻孔上的下一个点；

(2) 若当前三角形三个顶点地层编号不同，则编号小的顶点沿相应钻孔扩展下一点为新三角形顶点；而编号大的顶点保持不变，即新三角形该顶点与上三角形顶点相同。

由于钻孔中地层是经过统一编号并按自上而下递增排序的，因此上述规则不仅能够增加地层自动构建程度，而且也可以避免构造错误和歧义。

基于上述知识推理规则，三维地层建模主要算法如下：

(1) 从地表面 TIN 中提取一个三角形，将这个三角形设置为第一个 GTP 的上三角形；

(2) 根据上三角形顶点地层编号，按知识推理规则向下扩展新三角形（称为下三角形）；

(3) 根据上下三角对应关系和钻孔点链构建 GTP 体，记录 GTP 描述信息，并将下三角形置为上三角形；

(4) 重复步骤 (2) (3)，直到上三角形顶点均为各自钻孔底部点为止；

(5) 重复步骤 (1) 到 (4)，直到地表面 TIN 中的三角形遍历完为止；

该建模方法易于地层模型的修改，当有新的钻孔点插入时，只需在地表面局部修改 TIN，然后将局部修改的三角形沿钻孔向下扩展生成新的 GTP 即可。

2.4 断层建模处理

对地表面建模，断层的出现增加了离散钻孔点之间的约束关系，需要以断层线为约束，采用约束 Delaunay 三角剖分算法^[5]。上述三维地层建模时，其知识推理规则没有考虑断层的影响，需结合断层数据作进一步修正。断层数据来源各有不同，但都可以转换成剖面数据形式提取断层点，然后赋以适当的虚拟钻孔号和地层分界面号，与一般钻孔加入数据库中参与建模^[6]。图 2(a) 断层剖面投影中，

白色圆点即为需要提取的地层面分界点数据 (如 b, c, d), 黑色圆点为断层点数据 (如 a, e, f), 竖直虚线表示虚拟钻孔, 数字为相应地层编号。

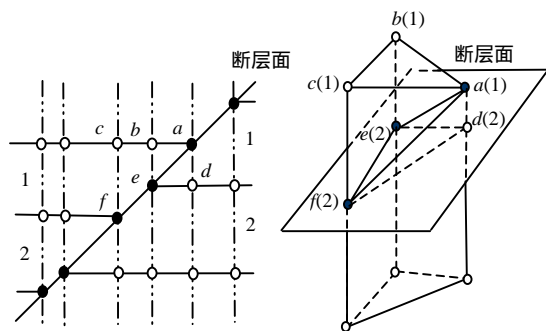
经过断层数据的处理后, 即可对三角形相连的钻孔间地层构造知识推理规则进行修正, 即

(1) 若当前三角形 3 个顶点地层编号相同且无断层点, 则向下扩展的新三角形顶点均为相应钻孔上的下一个点;

(2) 若当前三角形顶点中含有断层点 (如图 2(b)中 abc 的 a 顶点, 括号内数字为该点地层编号), 且其它顶点所在钻孔的向下点中, 含有与该断层点属于同一断层面的点 (如 e, f 点), 则无论该断层编号大小均不向下扩展, 直到其它顶点向下扩展为断层点为止;

(3) 若当前三角形三个顶点全为断层点 (如 aef 的顶点 a, e, f), 则编号小的顶点 (如 a) 沿相应钻孔向下扩展, 而编号大的顶点 (如 e, f) 保持不变;

(4) 若当前三角形顶点中虽有断层点 (如 def 的顶点 e, f), 但其它顶点 (如 d 点) 所在钻孔的向下点中, 没有与该断层点属于同一断层面的点, 则该断层点可与一般钻孔点同样处理, 即编号小的顶点向下扩展, 编号大的顶点保持不变。



(a) 剖面投影图

(b) 立体示意图

图 2 断层建模处理

Fig.2 treatment with fault modeling

从图 2(b) 的立体建模示意中可以看出, 按照修正后的知识推理规则, 可以充分保证含断层地层的构造推理和自动建模。将此规则替换 2.3 节中三维地层建模算法第 (2) 步的规则, 则可实现基于 GTP 体元的含断层地层三维自动建模。

3 应用实例与结论

基于上述建模方法, 对平顶山某地质勘探区进行了实验研究。区内共有原始钻孔 28 个, 结合工程地质剖面图, 发现研究区内有一条贯穿全区的大断层, 上部是火成岩覆盖层。经过在剖面内插 16 个虚拟钻孔, 全区共有钻孔 44 个。图 3 为根据钻孔数据建立的三维地层实体模型效果图。经过验证, 生成的三维地层模型基本反映了研究区地层分布状况。

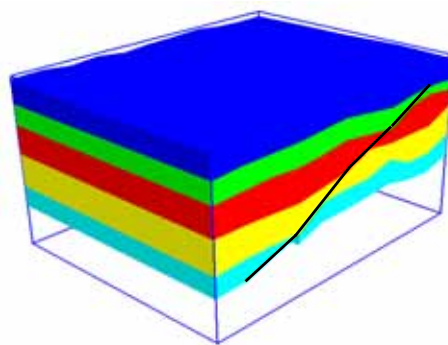


图 3 研究区三维地层模型

Fig.3 3D stratum model of the studied area

目前, 只是对明显层状地层和有限复杂度的断层建模进行了初步研究, 表明该方法是切实可行的。今后还要进一步完善存在复杂褶皱及多种构造混合时地层建模方法, 并尽可能增强建模过程中的人机交互能力。

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): 1722-1726.
- [2] Chen X Y. A workstation for three-dimensional spatial data research[A]. The Fourth International Symposium of LIESMARS[C]. Wuhan: LIESMARS of Wuhan Technical University of Surveying and Mapping, 1995, 42-51.
- [3] 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.
- [4] Houlding. S W. 3D geoscience modeling—computer techniques for geological characterization[M]. New York: Springer-Verlag, 1994.
- [5] 武 强, 徐 华. 虚拟矿山系统中三维断层模拟技术[J]. 辽宁工程技术大学学报, 2005, 24(3): 316-319.
- [6] 陈学习, 吴立新, 车德福, 等. 基于钻孔数据的含断层地质体三维建模方法[J]. 煤田地质与勘探, 2005, 33(5): 5-8.