

基于线框架模型的三维复杂地质体建模方法

刘修国,陈国良,候卫生,尚建嘎

中国地质大学信息工程学院,湖北武汉 430074

摘要:提出了一种基于线框架模型的复杂地质体三维建模方法,在准确表达复杂地质体各要素空间几何形态与相互关系的基础上,实现地层交错情况下断面、地层面模型及复杂地质体模型的准确快速构建.建模实践表明:基于线框架模型的复杂地质体三维建模方法是准确高效的,能适应常见复杂地质条件下三维复杂地质体模型的构建.

关键词:线框架模型;复杂地质体;三维地质体建模.

中图分类号:P311

文章编号:1000-2383(2006)05-0668-05

收稿日期:2006-05-30

3D Complex Geological Entity Modeling Method Based on Line-Frame Model

LIU Xiu-guo, CHEN Guo-liang, HOU Wei-sheng, SHANG Jian-ga

Faculty of Information Engineering, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

Abstract: This paper presents a 3D complex geological entity modeling method based on line-frame model, designed to accurately express the spatial geometrical shape of every element of a complex geological entity and their mutual relationship. This method enables the fast construction of a fault model, stratum model, or complex geological entity model in the case of fault interleaving. Proved in modeling practice, this method is an accurate and effective method for constructing a 3D complex geological entity and it can adapt to constructing 3D geological entity model in the case of familiar complex geological conditions.

Key words: line-frame model; complex geological entity; 3D geological modeling.

0 引言

复杂地质体模型的构建,一直都是三维地学模拟的研究热点和难题.现有的复杂地质体模型构建方法归纳起来主要由以下3个步骤组成:(1)根据稀疏的钻孔数据和剖面数据(Alan and Norman, 2003)、地震数据(Zehnder and Allmendinger, 2000; Sirakov and Muge, 2001)构造空间中的地质面(包括地层面、断面、工区界面)三角网.在这方面,Wu and Xu(2005)则提出了基于多源地质数据的建模思想,充分发掘各类数据中各种地质面之间的关联关系,弥补了单一数据建模中信息不足的缺陷.(2)基于这些离散的地质特征数据,下一步重要而又繁琐的工作便是构建几何、拓扑一致的面模型(Nicolas, 1998; 宫法明, 2002);这一步工作的成败直接影

响到最终的块体模型是否能够成功构建.(3)基于几何、拓扑一致的面模型构建三维地质体模型.

论文提出一种基于线框架模型的复杂地质体三维模型构建方法,该方法将地质面之间的几何、拓扑关系纳入到线框架模型的定义之中,在准确表达复杂地质体各要素空间几何形态与相互关系的基础上,实现地层交错情况下断面、地层面模型及复杂地质体三维模型的准确、快速构建.该方法可有效地避免在地质特征面三角网层面上的复杂交互修编操作,而只需要对地质特征线及地质特征点进行简单的交互修编,较大程度地减少交互修编难度,提高建模效率.

1 线框架模型

根据空间分割原理,一个几何形状任意复杂的

空间实体都可以由有限个简单形状的实体组合形成. 对于复杂地质体而言,它同样可细分成多个简单地质体. 从表面形状来看,每一个简单地质体都是由多个面封闭而成;从其构成的基本要素来看,它是以前断层线、地层边界线等线状要素作为骨架支撑起来并由骨架所约束的各种面的集合体. 鉴于这个思想,一个简单地质体的拓扑关系可以用其骨架来描述,通过骨架的关系描述面与面之间的复杂关联关系,线框架模型就是基于以上思想而提出的.

1.1 线框架模型的 2 类组成要素

(1)单个面的线框架模型:假设单个地质面用 S 表示,那么 S 可由有限条(设为 n)闭合的空间曲线 L 构成. 这 n 条空间曲线就构成了 S 的轮廓,即为

$$\partial S = \bigcup_{i=1}^n L_i.$$

(2)地质体的线框架模型(线框架单元体):假定每个简单地质实体都是由边界的边组成的骨架所支撑,由边界的边组成的封闭区域为简单实体的外表面,那么线框架模型就是这些边界的边的空间聚类,一个复杂地质实体的线框架模型就是由这些若干个简单的线框架单元实体单元组成.

定义简单地质体线框架单元体为 $\partial V = \bigcup_{i=1}^n \partial S_i$, 其中: ∂S_i 为组成单元体的单个面的线框架模型. 复杂地质体线框架模型就可以表示成 $M = \bigcup_{i=1}^n \partial V_i$. 也就是说,整个线框架模型可以由若干个简单线框架实体单元的并集来描述.

1.2 基于线框架模型思想的地质体数据模型

三维空间数据模型是三维地质建模及可视化系统的基础,它为描述三维地质空间数据的组织、设计地质空间数据库模式、进行三维地质建模以及三维地质数据的可视化表达与分析提供了最基础的支撑(朱良峰,2005). 基于线框架模型思想的地质体数据模型所采用的几何拓扑元素有点、结点、线、三角形、面和线框架模型等 6 种,具体的层次关系如图 1 所示. 在线框架模型中,具有相交关系的 2 个地质面中同时引用同一条线,在构建地质面三角网时该交线同时参与 2 个地质面的构建,由此构建的 2 个三角网在该交线处自动保证几何、拓扑的一致性.

2 基于线框架模型的地质体三维建模流程

该方法的主要步骤为:(1)整合多源地质数据;(2)提取模型边界线、地层尖灭线、断层线等构建初始的线框架模型;(3)交互式修编完善线框架模型以形成三维地质模型的完整骨架;(4)在线框架模型约束下,结合断点数据、地层等值线等数据重构断面、地层面及模型边界面,构建三维地质面模型;(5)基于三维地质面模型构建地质体的三维体模型(图 2). 其中步骤(3)、(4)、(5)中线框架模型的构建是整个流程的核心部分,它是整个模型的几何及拓扑关系的建立关键部分.

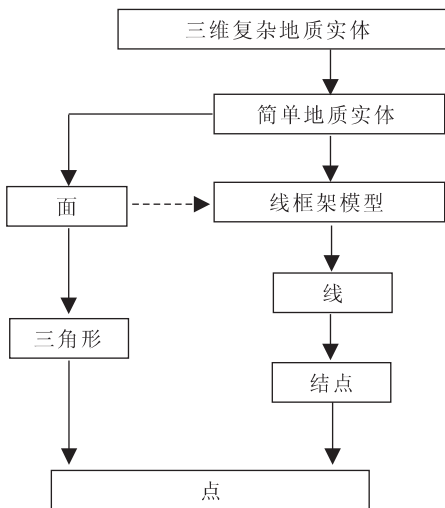


图 1 数据模型

Fig. 1 Data model

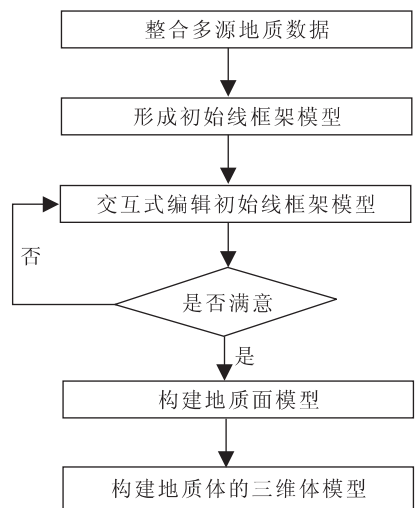


图 2 建模流程

Fig. 2 Modeling flow

由于地质数据采样的稀疏性和分布的零散性,单纯利用某一类数据去构建准确的地质模型是不现实的;同时地质数据具有不确定性、多样性、复杂性等特点,很多原始的地质数据不能直接参与三维地质建模,为此整合多源地质数据的目的是将通过地质勘探获取的地质钻孔数据、勘探剖面数据、二维地质和地形图件、物探和化探资料、遥感数据等通过数据转换接口进行预处理,使之形成具有统一的数据格式和标准的能够直接为建模服务的数据(朱良峰,2005)。

在形成初始线框架模型的过程中,需要对初始的线框架模型上的点进行高程赋值,此时可利用地层等值线采用相关的插值算法进行处理,但是插值的结果可能不够合理,为此需要在后续的过程中进行交互式调整;另外,由于整合后的地质数据基本上是二维的,不能完全反映三维空间中的地质面的关系(如断层面间的交错关系等),为此这些信息必须在后续过程中进行完善。

由于初始形成的线框架模型存在许多不合理或者缺失的信息,为此第三步就是提供完善这些信息的一个机会,交互式调整线框架模型主要有以下 4 个方面的工作要做:

(1)交互调整高程:由于插值的精度和方法,可能导致线上的高程数据不够合理的情形,需要在三维空间中进行调整。

(2)交互构建 2 个断层面之间的交线:交线是 2 个相交断层面之间几何、拓扑一致性的唯一保证,

为了构建合理、正确的交线,其步骤如下:①根据高程位置上到下选取 2 个断层面的 2 条盘线的共同交点形成一条初始交线。②用这条初始交线和 2 个断层面的其他所有盘线进行交错处理,如果该交线和某条盘线交错,则从该盘线上选取一个合适点加入到初始交线中形成新的交线。

(3)处理同一断层面上线的相交:对于一些由于数据稀疏和精度限制所造成的地质意义上本该相交但在三维空间中却没有相交的断层盘线,应通过交互方式处理断层线之间的交线。

(4)交互构建仅属于每个断层面的边界线:通过交互方式连接仅属于每个断层面的边界,使之形成三维空间中闭合的框架。

以上各个步骤可以以任何次序进行。图 3 给出了 2 个断层面的线框架模型。

3 基于线框架模型的地质面模型重构

由于线框架模型中包含了所有地质面的几何及拓扑信息,为此构建地质面模型时只需从线框架模型中提取相关的线信息,然后采用特定的算法进行重构。在这个过程中,可能需要引入其他点状地质数据(如断点数据、等高线上的点等),以保证模型的精度。

针对每一个地质面模型可采用 4 个步骤进行构建:(1)从线框架模型中提取该地质面的所有线。(2)将所有的线及其他引入的地质数据点采用投影

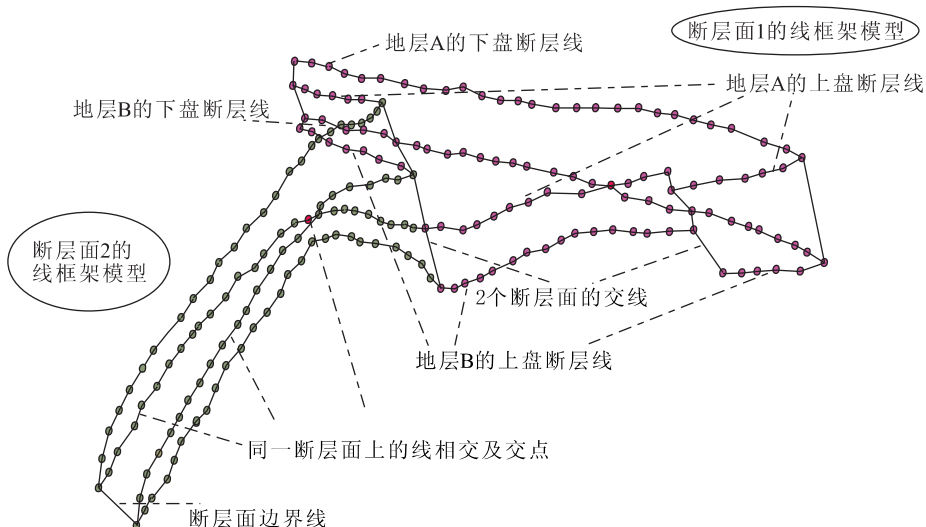


图 3 2 个断层面的线框架模型

Fig. 3 Line frame model of two faults

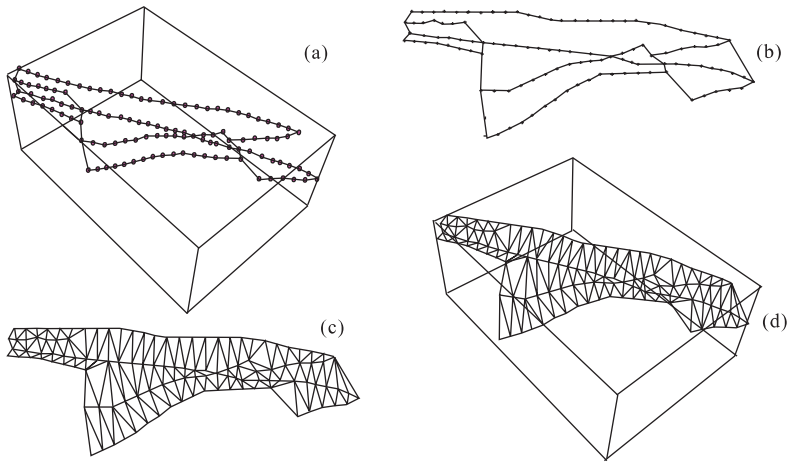


图 4 面模型构建示意

Fig. 4 Sketch map of constructing face model

a. 断层面的线框架模型; b. 参数化后的二维线框架模型; c. 二维三角网; d. 三维断层面三角网

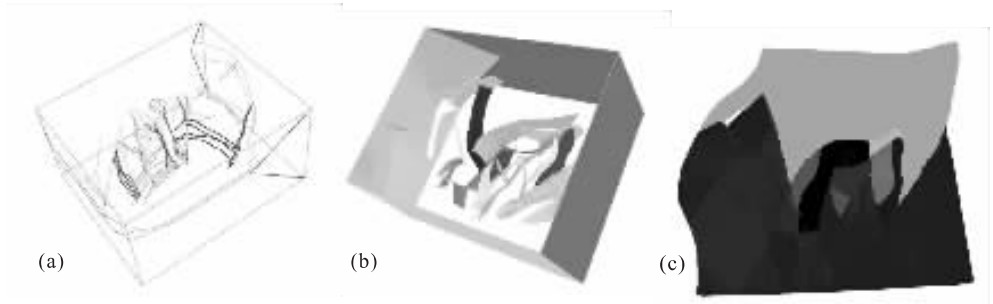


图 5 块体模型构建示意

Fig. 5 Sketch map of constructing block model

a. 地质实体的线框架模型; b. 基于线框架模型构建的所有断层面模型; c. 一个地层面所有块体模型

或参数化的方法映射到二维空间。(3) 在二维空间中约束所有线和点进行 Delaunay 三角化形成二维三角面。(4) 将二维三角面反算到三维空间,形成三维空间的断层面。

在上述第二步中对简单地质面可采用投影方式;即对当前地质面的所有线采用最小二乘法构造一个趋势平面 P (陈鹰,2003),然后将断层线投影到该平面上,然后再进行三角化;对于复杂的面,所有线投影后可能存在重点,反算到三维空间时就会出现数据丢失,可采用参数化的方法进行映射,参数化方法可以将三维图形一一映射到二维,并可保证图形的拓扑不变(Michael,1997),图 4 给出了上述过程的示意。

4 复杂地质体的三维体模型构建

当地层面、断层面、工区面等地质面形成后,就

可以利用三角面搜索算法寻找地质体的三角面信息, Lu(2002)基于岩块建模的需要,基于平面多边形提出了采用右手最大角法则构建三维地质岩块模型的方法,本文在研究该方法的基础上并结合地质模型及其线框架表达的特点,采用基于三角形的右手最大角法则构建体模型的方法,构建步骤如下:

- (1) 将所有离散的单个面(地层面、断层面、工区面)组织成一个整体面 S ;
- (2) 从整体面 S 中提取方向边和方向三角形;
- (3) 根据方向边和方向三角形采用右手最大角法则进行三维体模型的构建。

5 实例验证与结论

本文所提基于线框架模型的三维复杂地质体建模方法,已在 PC 机 Windows 操作系统、VC++ 6.0 及 Open GL 三维引擎的环境下得以实现。图 5 为利用华北某研究区域的地质构造数据构建的三维

复杂地质体模型的效果图,该研究区域包含 27 条断层及大量地层尖灭等地质现象。

验证表明,本文方法是有效的,能适应常见复杂地质条件下的三维地质体模型的构建。不同于先构建地质界面而后构建其交线网络的传统地质模型构建方法,本文方法恰好相反,先构建地质界面的交线框架,而后利用交线框架的约束作用自动构建拓扑一致的地质界面三角网,有效地避免了地质界面间的切割重构,简化了地质模型的构建过程。

References

- Alan, M. L., Norman, L. J., 2003. Building solid models from boreholes and user-defined cross-sections. *Computers & Geosciences*, 29(3): 547—555.
- Chen, Y., 2003. Digital photogrammetry of remote sensing image. Tongji University Press, Shanghai (in Chinese).
- Gong, F. M., 2002. 3D geological modeling. Beijing University of Aeronautics and Astronautics [Dissertation], Beijing (in Chinese).
- Lu, J., 2002. Systematic identification of polyhedral rock blocks with arbitrary joints and faults. *Computers & Geotechnics*, 28(1): 49—72.
- Michael, S. F., 1997. Parametrization and smooth approximation of surface triangulations. *Computer Aided Geometric Design*, 14(3): 231—250.
- Nicolos, E., 1998. A new tool to seal a 3D earth model: A cut with constraints. Gocad meeting, [s. n.].
- Sirakov, N. M., Muge, F. H., 2001. A system for reconstructing and visualising 3D objects. *Computers & Geosciences*, 27(1): 59—69.
- Wu, Q., Xu, H., 2005. An effective method for 3D geological modeling with multi-source data integration. *Computers & Geosciences*, 31(1): 35—43.
- Zehnder, A. T., Allmendinger, R. W., 2000. Velocity field for the trishear model. *Journal of Structural Geology*, 22(8): 1009—1014.
- Zhu, L. F., 2005. Research on key technologies of 3D geological modeling basing on GIS [Dissertation]. China University of Geosciences, Wuhan (in Chinese).

附中文参考文献

- 陈鹰, 2003. 遥感影像的数字摄影测量. 上海: 同济大学出版社.
- 宫法明, 2002. 三维地质建模 [学位论文]. 北京: 北京航空航天大学.
- 朱良峰, 2005. 基于 GIS 的三维地质建模及可视化系统关键技术研究 [学位论文]. 武汉: 中国地质大学.