

文章编号: 1000-7598-(2007) 01-0169-04

一种基于平面地质图的复杂断层三维构建方法

侯卫生, 吴信才, 刘修国, 陈国良

(中国地质大学 信息工程学院, 武汉 430074)

摘 要: 在分析平面地质图数据特点的基础上, 为准确表达复杂断层的空间几何形态和相互之间的关系, 引入了由地质形体的轮廓线构建而成的线框架模型概念; 修正了边界表示法模型有效构建的基本条件; 从地层与断层之间的关系角度详细阐述了有效构建线框架模型的方法; 提出了以线框架模型为基础的断层面整体构建技术思路, 解决了复杂断层面三维构建问题。

关 键 词: 平面地质图; 线框架模型; 复杂断层三维构建

中图分类号: P 642.3

文献标识码: A

A complex fault modeling method based on geological plane map

HOU Wei-sheng, WU Xin-cai, LIU Xiu-guo, CHEN Guo-liang

(China University of Geosciences, Wuhan 430074, China)

Abstract: On the basis of analyzing the characteristics of geological plane maps, the notion of the wire frame model illustrated by outline of geological blocks is proposed to describe the geometrical form of complex faults and the relationships among them. The boundary representational validity conditions are modified to fit the wire frame model. The approach how to construct the wire frame available is illustrated in detail from the viewpoint of the relationships among strata and faults. With the help of the notion of the wire frame model, a new approach that modeling fault integrally in 3-dimension is proposed, in which the complex fault surface and intersected strata controlled by faults can be simulated.

Key words: geological plane maps; wire frame model; 3D modeling on complex fault

1 引 言

包含断层、褶皱等地质现象的复杂地质体三维数学模拟是三维地质建模中的难点。无论是根据地震剖面解释数据^[1], 还是以钻孔岩芯数据^[2, 3]或者以钻孔形成的剖面数据^[4], 或采用多源地质数据进行三维地质建模^[5], 都需要构建合理的断层面、地层面, 建立地质体各要素间准确的空间拓扑关系, 形成地质体的网络模型, 从而实现三维计算机模拟。其中, 复杂断层面的构建和构成地质体的各要素的拓扑关系, 即断层面和地层面、地层面之间、断层面之间拓扑关系的建立, 是整个建模的核心部分。

一般情况下, 在进行断层面模拟时, 将其视为厚度为零的空间几何曲面, 可用三角面片来表征其空间展布。通常构造断层面的方法有两种: ①基于断层数学模型的推演技术。既以断点数据及断层产

状等断层参数数据为基础建立断层面方程, 又通过多个断层面的组合形成复杂断层面^[6]; ②基于轮廓线重构的断层面生成技术。利用一系列地质剖面上的断层线数据, 采用轮廓线重构曲面算法来生成相应的断层面^[7]。两种方法都可以很好地拟合出断层面的基本形态。第 1 种方法还可以预测断层的延展趋势, 但是, 断层面、地层面之间的拓扑需要综合其他信息用特定的算法确定。第 2 种方法的难点在于连接相邻剖面之间断层轨迹存在多解性, 且缺乏对断层变形和对断层进行三维外推的信息。

平面地质图是一种常用的地质构造表现形式, 它不仅包含地层埋深、地质构造走向、规模等地质要素的空间几何信息, 还能从平面上综合反映地层与地层、地层与地质构造、构造与构造之间的关系以及地层面的延伸趋势。这是钻孔和剖面图数据所不能比拟的。在三维地质建模过程中, 尤其是在深

收稿日期: 2005-12-05

基金项目: 国家高技术研究发展计划 (863 计划) 项目 (No. 2001AA135170)。

作者简介: 侯卫生, 男, 1976 年生, 博士研究生, 主要从事三维 GIS 工程应用, 三维建模与可视化方面的研究。E-mail: wshou_2005@sohu.com

部地质构造重构过程中, 平面地质图成为了一种重要的数据来源。按照多层 DEM 建模的思想, 结合平面地质图数据的特点, 本文提出了以线框架模型来表达地质体各要素的空间几何形态和拓扑关系, 并以此为基础提出了断层面整体构建技术思路, 解决了地层交错情况下断层面的模拟和地层面的模拟, 实现了复杂断层的三维建模。

2 线框架模型及其构建

断层通常用其产状来表征, 也可以用断层线、断层面、断盘、断距和滑距等要素来进行描述。在平面地质图上, 断层通常使用断层线、交面线来表示, 其走向由断层线、交面线来表示, 其他要素可以通过多个平面地质图上同一断层的交面线来求取。断层与地层之间的关系也是由交面线来体现, 而同一地层上的断层与断层之间错切关系可以从平面地质图直接获取。因此, 根据断层在平面地质图上的表现形式, 笔者提出线框架模型来表征断层之间、断层与地层之间的拓扑关系。

2.1 线框架模型

假设一个地质面用 S 表示, 其边界用 ∂S 表示。地质面边界上的第 i 条边是由顶点集 H_i 所组成, 其中 $H_i = \{p | p \in R^3\}$, 如果该面有 l 条边界边, 那么, 这个面的边界就可以用这些点集来表示: $\partial S_l = \bigcup_{i=1}^l H_i$, 其中, H_i 为第 i 条边上的顶点集, $l \in N$ 。

定义线框架模型为一个简单地质形体的边界边的集合, 那么, 线框架模型就可以表示成:

$$\partial S_{ik} = \partial S_u \cup \partial S_b \cup \partial S_c$$

其中 ∂S_u 、 ∂S_b 、 ∂S_c 为组成单元体上、下层面边界边和闭合边界的边集合。 ∂S_c 中与 ∂S_u 、 ∂S_b 中公共边采用引用技术。这样既保证数据的一致性, 又减少了数据的冗余。因此, 整个模型的外轮廓就可以表示成 $\Omega = \bigcup \partial S_{ik}$ 。也就是说, 地质体模型的线框架模型可以由若干个线框架模型的并集来描述。那么, 复杂体的空间几何形态也就由线框架模型来描述。

线框架模型还可以进一步细分成两类: 一是描述面的线框架模型; 二是描述简单地质形体的线框架模型。前者是后者的基础, 后者是前者的子集。

2.2 线框架模型的有效构建

一个模型的有效性就是看它能否在三维空间中生成一个物理实体^[8]。因此, 在构建线框架模型时, 需要时刻满足两个基本条件:

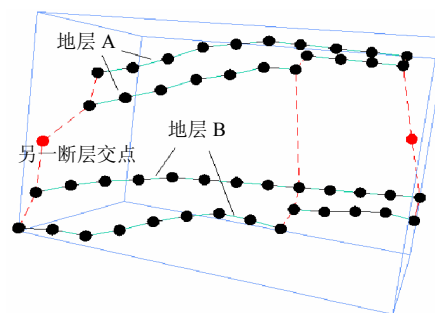
(1) 模型边界的有限性。任意一个三维的线框架模型, 都必须具有有限的体积, 即存在一个外包

围盒。

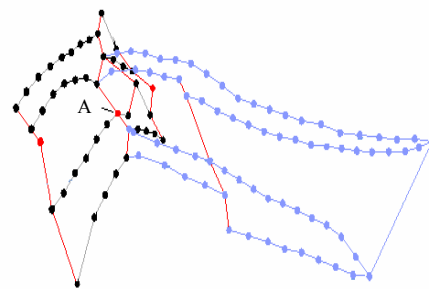
(2) 模型的自封闭性。任何一个线框架模型, 无论是描述面的, 还是描述一个地质形体的线框架模型, 都必须自封闭的。描述面的线框架模型是由环组成的, 环与环之间可以不相连。组成线框架模型的线可以被其他线框架模型所共用, 但不能存在独立点或射线边。

在构建线框架模型时, 这两个约束条件具体表现在以下几个方面:

(1) 断层内各边界线的约束。一个断层的基本边界是由断层的交面线所构成的。但仅用这些并不能从三维的角度来准确表达断层的边界。不同地层的同一断层边界线之间是不相连的, 要想构成一个封闭曲面的边界, 需要添加边界之间的连接线。如图 1(a)所示的断层中, 该断层共切过了两个地层面, 而且另有两个断层的盘线与之相交, 虚线为断层面的边界线。



(a) 单一断层面内线框架模型的约束



(b) 断层与断层之间的约束

图 1 线框架模型约束条件示意图

Fig.1 The constraints of wire frame model

(2) 断层之间的约束。断层之间的错切关系是可以由断层边界线之间的关系来描述的。不论是何种错切关系, 在边界线上所体现出来的就是点与线的共用问题。因此, 在处理一条断层的边界时, 需要充分利用断层之间的错切关系, 保证与之相连断层的点与线各种属性的同步更新。图 1(b)所示的断层关系中, A 点为左断层交面线与右断层面的交点。在构建右侧断层面的线框架模型时, 需要将 A 点作

为线框架模型的一个约束点。这样才能保证左右两个断层面之间的拓扑关系的一致。

(3)断层与地层之间的约束。地层本是完整的,正是由于地质构造运动所产生的断层使地层的边界等发生了物理上的变化。因此,地层的边界有很大一部分是由断层所决定(还有一部分是由工区边界和地层尖灭线所决定)。但是,地层与断层之间的切割关系需要遵守一定规则:第1,同一地层上断层的上下断盘线之间除端点外,是不能相交的;第2,同一断盘的上下两个地层之间是不能相交的;第3,同一断层上下断盘的不同地层之间在空间上存在交错时,需要进行特殊处理,文后将介绍处理方法。

(4)地层之间的约束。同一地层的不同区块之间是不相通的,不同地层之间的区块之间只能通过工区边界或断层面进行关联。

2.3 线框架模型构建流程

由于平面地质图的断层交面线本身并不具有高程值、采样点稀疏、各个断层区也缺少相应的描述信息等原因,在构建线框架模型之前需要对平面地质图进行一定的预处理,如采样点加密等,以确保断层面基本形态的正确性。构建线框架模型的主要步骤为:(1)从平面地质图中获取每一个地层上的断层与地层边界以及相应的拓扑关系;(2)交互调整高程。由于地质图数字化等原因,可能导致高程数据错误情形,需要在三维空间中进行调整;(3)自动处理断层线之间的边界关系。单一层面内的各断层与地层之间的关系可以从地质图中获取,而层与层之间的各断层与地层之间的关系可以通过断层的上、下盘关系利用特定的算法自动建立。(4)在自动建立的关系基础上,对断层边界交错的情况进行人机交互调整。图2(a)所示为通过自动处理和交互调整后的单个地层面的线框架模型(图中圆点表示原始采样点位,圆点间连线为断层交面线),它既包含该断层本身的边界(虚线),还包含与其他断层面公共边界(实线)。以上各步骤虽然具有很强的流程性,但都可以回到任意一步进行重新调整。

3 基于线框架模型的复杂断层构建

复杂断层面的构建一般采用多个平面拟合的方法^[6],其基本思想为:利用断层在同一地层上、下盘的断点坐标确定一个平面方程,利用该平面来拟合断层在该地层上的形态,整个断层面可以由多个平面拟合而成。该方法能准确地模拟出断层面的基本形态。对于如图2(a)所示的复杂断层面而言,地层B下断盘和地层C的上断盘在空间上没有直接的

交点,当它们投影在同一个平面上形成平面方程时,就会出现如图2(b)所示的相交情形。多平面拟合的方法不能处理同一断层不同上下盘交错情况。针对这种复杂的断层模拟,笔者提出了基于线框架模型的断层面整体构建思想。

基于线框架模型的断层面整体构建方法的基本思想是:在线框架模型约束的条件下,将断层面看成是一个整体的面,面中所包含的所有信息都纳入到断层面的构建中,直接对面进行三维插值模拟。其基本步骤为:(1)处理地层相交情形。处理地层交错的情形有两种方案,一是将地层强行交错成一个点;二是在地层线上各增加一个点^[8]。前一种方案将改变地层的空间位置,但是在进行三角化处理时比较简单;后一种方案可以保留空间上的基本形态,但增加了空间拓扑关系的难度。本文采用了第1种方案;(2)以断层面为基准,选择最近似平面作为参数平面;(3)进行强约束Delaunay三角化;(4)还原成三维TIN,生成断层面。图2(c)显示了利用本方法模拟结果。

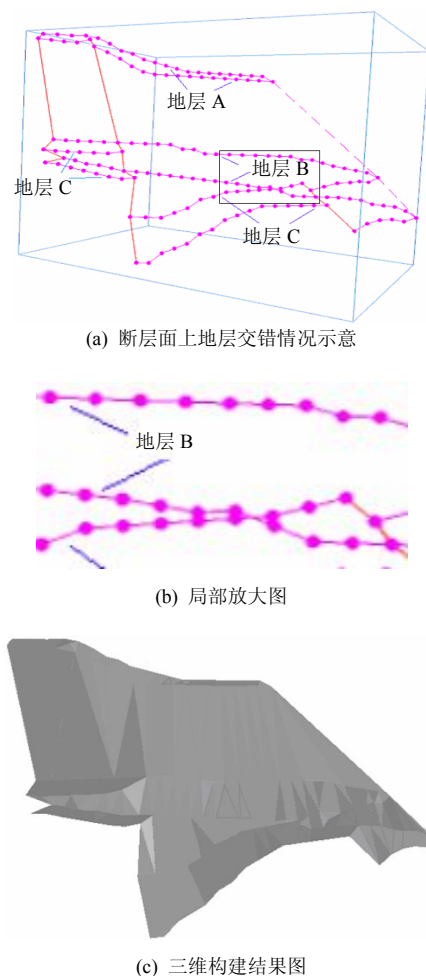


图2 复杂断层面整体构建示意图.
Fig.2 Complex fault face modeling

4 应用实例

利用 VC++6.0 作为开发工具,以 MAPGIS 三维平台 (MAPGIS TDE) 作为开发平台,在 PC 机平台环境下实现了本文所提出的方法。并利用华北某地区作为研究区域进行了模拟。研究区包含上第三系、中生界、下第三系 3 个地层,每个地层上都包含若干条相互交错断层,断层内存在如图 2 所示的地层交错情况。图 3 再现了研究区的断层模拟结果。图 3(a)为研究区内所有断层面模型。要描述这些犬牙交错的断层及其之间的交错关系,利用普通的方法显然是不现实的。本文所提出的方法不仅从形态上准确刻画断层,而且从关联关系的角度将这些断层关联起来,使之成为一个整体。图 3(b)为断层与地层混合模型,它清晰再现了断层与地层之间的拼接关系及二者的无缝融合。

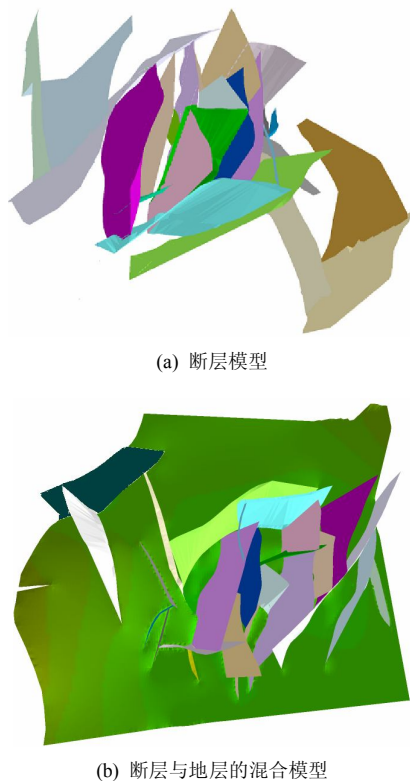


图 3 基于线框架模型的复杂断层构建结果
Fig.3 The complex faults model based on the line frame

5 结 语

以平面地质图作为建模数据源,可以充分发挥地质图所蕴涵的各地质构造几何信息及其相互的关

系,减少了模型构建过程中构造关系之间的拓扑计算,并在模型中充分融合了专家的思想。以构成地质体的各地质面轮廓线为基础构建的线框架模型,将地质体的几何形态,各地质面之间的拓扑关系融为一体,为复杂断层的构建奠定了数据基础,而经过修正后的模型构建有效条件则保证了线框架模型物理上的实在性。线框架约束下的断层整体构建思路则能很好地处理断层控制下地层交错的复杂问题,为后续三维地质体的构建奠定了基础。

参 考 文 献

- [1] Sirakov N M, Muge F H. A system for reconstructing and visualizing 3D objects[J]. **Computers & Geosciences**, 2001, 27(1): 59—69.
- [2] 贺怀建, 白世伟, 赵新华, 等. 三维地层模型中地层划分的探讨[J]. **岩土力学**, 2002, 23(5): 637—639.
HE Huai-jian, BAI Shi-wei, ZHAO Xi-hua, et al. Discussion on strata partition in three dimension strata model [J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2002, 23(5): 637—639.
- [3] 朱良峰, 吴信才, 刘修国, 等. 基于钻孔数据的三维地层模型的构建[J]. **地理与地理信息科学**, 2004, 20(3): 26—30.
ZHU Liang-feng, WU Xin-cai, LIU Xiu-guo, et al. Reconstruction of 3D strata model based on borehole data[J]. **Geography and Geo-Information Science**, 2004, 20(3): 26—30.
- [4] Lemon A M, Jones N L. Building solid models from boreholes and user-defined cross-sections[J]. **Computers & Geosciences**, 2003, 29(5): 547—555.
- [5] WU Qiang, XU Hua, ZOU Xu-kai. An effective method for 3D geological modeling with multi-source data integration[J]. **Computers & Geosciences**, 2005, 31(1): 35—43.
- [6] WU Qiang, XU Hua. An approach to computer modeling and visualization of geological faults in 3D[J]. **Computers & Geosciences**, 2003, 29(4): 507—513.
- [7] 孟晓红, 王卫民, 姚长利, 等. 地质模型计算机辅助设计原理与应用[M]. 北京: 地质出版社, 2001.
- [8] Guillaume Caumon, Francois Lepage, Charles H Sword, et al. Building and editing a sealed geological model[J]. **Mathematical Geology**, 2004, 36(4): 405—424.