

3 维地质体模型中闭合结构的提取

朱 炼 唐 杰 袁春风

(南京大学计算机科学与技术系, 南京 210093)

摘 要 在地质体建模中, 曲面间的拓扑结构分析是一个非常重要的步骤。为了得到块体结构的模型, 需要对层面模型内所有的曲面进行全局性的拓扑分析。当层面模型的数据规模极其庞大的时候, 这种全局性的分析势必要受到内存容量的限制。为了提高运算速度, 提出了一种基于简化面片的闭合块体构造算法, 该算法可将模型内所有的曲面数据尽可能地简化, 仅仅保留交线附近的关键数据。这种简化后的层面模型既包含了全局的拓扑信息, 又可以完全载入内存。实验结果表明, 该算法不仅具有较快的拓扑分析速度, 并能适用于大规模的地质体模型的构建。

关键词 三角网格曲面 闭合体 面片 地质建模

中图法分类号: TP391.41

文献标识码: A

文章编号: 1006-8961(2009)12-2582-06

Construction of Coherent Structure from 3D Geological Model

ZHU Lian, TANG Jie, YUAN Chun-feng

(Department of Computer Science and Technology, Nanjing University, Nanjing 210093)

Abstract Topology analysis of spatial data model is a very important step in geological modeling. To construct coherent geological blocks, we should analyze the topology of all elements in the surface model. When the scale of surface model is very large, this global analysis must be limited by memory capacity. In order to improve the speed of computation, this paper presents an algorithm of constructing geological blocks which is based on the simplified surface pieces. This algorithm simplifies the data of surface model as much as possible and only preserves crucial data which have relation with the intersection lines. Such simplified surface model has global topology information and can be read wholly into memory. Experimental results show that, this algorithm can effectively speed up the process of topology analysis, and can be applied to geological model with large-scale data.

Keywords triangle mesh, coherent blocks, surface piece, geological modeling

1 引 言

油气藏地质建模技术是油气藏勘探开发过程中的关键技术, 也是地质体建模技术在油气勘探领域的应用。该技术的应用面涵盖了从地震数据处理、地震数据解释、储层建模到油藏模拟等多个学科领域。油气藏地质建模的核心任务是建立油气藏地质

模型, 即使用合适的数学模型以及数据结构, 对地震勘探数据进行描述和组织, 在计算机中构建能精确反映地质体形态、地层规律的地质模型, 再以 3 维图形形式显示。这一方面可以将地质模型以逼真的 3 维形态显示出来, 使得非专业人士也能获得直观的认识; 另一方面, 通过提供强大的交互式编辑功能, 可使得专业人员能更好地理解和分析勘探数据, 以便做出科学合理的决策。

基金项目:江苏省高技术研究(工业部分)项目(BG2007037);江苏省自然科学基金项目(BK2008262)

收稿日期:2008-07-21; **改回日期:**2008-10-29

第一作者简介:朱 炼(1982 ~), 男。南京大学计算机科学与技术系硕士研究生。主要研究领域为计算机辅助几何设计。
E-mail: zhulian@graphics.nju.edu.cn

目前比较流行的地质体建模方法可以归为构造建模和属性建模两类。其中构造建模侧重于对地质体的空间位置、几何形态和空间关系进行表达,而对地质体的内部则不作考虑或认为是属性均匀的,笔者将这样的模型称为框架模型;属性建模则通过地质统计学等方法来实现地质体内部属性非均匀性的表达,笔者将这种模型称为实体模型。实际上,这两种方法并非是对立的,完全可以在构造建模的基础上进行属性建模^[1]。实现由框架模型向实体模型过渡的关键是要做好地质层面之间拓扑关系的分析,拓扑分析的最终目标是输出具有块体结构描述的地质模型。在拓扑分析完毕后,实体建模和属性分析就可以在块体结构模型的基础上进行。此外,块体结构模型也可用于地震速度模型、地震正演模拟计算、射线追踪、深度偏移、地震数据解释、成图、构造分析等方面^[2-4]。本文以油气藏地质建模为应用背景,详细研究地质曲面拓扑分析中的关键技术——闭合结构的提取。

1.1 3 维网格模型的闭合体提取

由于地质闭合块体在地质体建模中的重要地位,因此国内外许多研究者对此进行了深入的研究。Heilot 于 1988 年设计了一种利用描述块体生成的语言 BGL(block generation language)来进行地质块体的检测^[5],这种方法只适合于简单地质体的识别,对于实际地质体建模中的复杂多变的地质体的识别能力一般。后来,Stephansson 等人将拓扑概念引入到块体的识别中^[6]。2002 年蒋先艺等人提出了一种封闭模型描述方法^[3],该方法以地质属性为基础构建区块。与传统的地质模型描述方法不同的是,该方法首先定义好块体,再定义地层,但并未给出具体的块体识别方法。2005 年孟宪海等人提出了一种基于层面结构的 3 维闭合地质区块的构造算法^[4],该算法针对传统的半边结构不能有效表示非流形特征的缺点,先提出了一种改进的半边数据结构,然后依据三角形间的拓扑关系进行构造。由于这种方法在构造闭合区块的时候需要遍历所有的三角形,因此在三角形数目急增的时候,算法效率很低,此外,该算法要求将模型内所有的三角形以半边数据结构的形式完全存储于内存中,这势必受到内存容量的限制。侯卫生等人在 2007 年提出了一种基于线框单元体的 3 维闭合地质块体的构建方法^[7],即通过引入表示简单块体轮廓的线框单元体概念来组织 3 维模型间各要素之间的拓扑关系,并

以此为基础给出了以方向边和方向三角形为基本识别单元的对 3 维简单形体进行自动识别的方法。这种方法只能对曲面规则变化的块体进行描述,而对于由变化不一致的曲面构成的闭合块体,则不能精确描述。

1.2 本文的工作

本文针对块体结构的提取算法难以适应大规模数据的问题,提出了一种基于面片划分的地质闭合块体的构造算法。该算法无需依赖于半边结构,不仅对输入的网格曲面数据结构没有特别要求,而且能有效处理海量数据的地质模型。本文算法基于面片划分的思想,首先将框架模型中的每个曲面按照与其关联的交线划分成曲面片,再根据面片、交线的拓扑关系进行闭合块体的构造。考虑到仅在面片的边缘部位才与其他面片及交线存在拓扑关系,因此在进行闭合体构造时只需载入位于面片边缘的关键部位的数据信息,如此就最大程度地压缩了输入数据。事实上,在框架模型中,由于断层的切割,层位面是以层面片的形式存在的,而地质闭合块体的上下边界面也正是层面片,因此基于面片的地质闭合块体的构造符合地质上的块体生成规律。

2 面片划分算法

曲面上纵横交错的交线与曲面的边界(外边界、内边界)共同作用,可将曲面划分成若干个相邻的区域,这些区域即为面片。

这里先给出几个概念:

定义 1 三角片的连通

在三角网格曲面上,如果两个三角形之间存在一条未跨越交线的通路,则定义这两个三角形是连通的(如图 1 所示)。

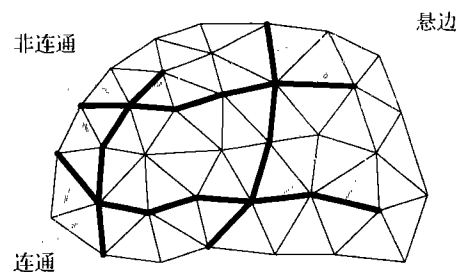


图 1 具有 6 个面片的曲面

Fig. 1 A surface that has six pieces

定义 2 悬边

在三角网格曲面上,如果某条边是交线上的一条边,并且与该边关联的两个三角形是连通的,则定义该边为悬边。

定义 3 面片

面片是连通三角形集合的闭包。

由上述的定义可知,每个面片都是没有内边界的一个最大连通区域。因此,本文采用“蔓延”的思想,具体地说,就是从某一个三角形开始,通过其三边往周围“蔓延”,直到碰到交线或边界为止。

曲面分片算法的步骤如下:

输入:曲面 S、所有交线;

输出:曲面的分片信息;

(1) 设定一个三角形队列 $L_{triangle}$,用于存放当前面片内的三角形的索引信息, $L_{triangle}$ 初始为空;设定一个边界队列 L_{edge} ,用于存放当前面片的边界线;

(2) 如果曲面 S 中的三角片已经全部访问过,则转步骤 6;

(3) 任取曲面 S 中的一个未被访问过的三角形,将该三角形放入 $L_{triangle}$ 中,设置一个游标 p,指向三角形数组 $A_{triangle}$ 的第 1 个位置;

(4) 对于游标 p 指向的三角形 t,标记 t 为已访问,并针对三角形 t 的每条边 e 的类型,做以下处理:

① 边 e 是普通线段:取出曲面 S 中与边 e 共边的三角形,如果该三角形未被访问过,则将其放入 $L_{triangle}$;

② 边 e 属于交线或者是 S 的边界:如果边界队列 L_{edge} 中已存在边 e,则从 L_{edge} 中删除边 e(说明边 e 为悬边),否则在 L_{edge} 中加入边 e;

(5) 游标 p 前进一步,如果游标 p 所指为空,则将 $L_{triangle}$ 和 L_{edge} 中的信息做整理,并将得到的一个面片送到输出结果中,清空两个队列后转步骤(2);

(6) 算法结束。

该算法所得到的曲面分片信息将被用于下文中的闭合块体构造。

3 闭合体构造算法

地质闭合块体,是指地质模型中没有内边界的最小的闭合块。本文的地质闭合块体由框架模型中的网格曲面生成,其实质就是一种闭合的空间曲面,其可由完整地包围一块空间的若干个面片来描述。

由于块体内部没有内边界,因此每个块体不可再分,它是模型内最小的闭合单元。在已经得到了整个地质模型的所有面片后,就可以基于面片进行闭合块体构造。

3.1 基本方法

为描述方便,这里先给出面片边界线段的度和悬挂面片的概念:

定义 4 面片边界线段的度

面片的边界是由若干线段所组成的封闭折线,每个线段都是某个边界三角形的边,在整个模型内,这条线段可能同时也属于其他面片的边界。这条边所关联的面片数目称为该边的度。

定义 5 悬挂面片

如果某个面片存在度为 1 的边,则定义该面片为悬片。

在整个框架模型中,只是在曲面相交处的边的度会大于 2,比如两张网格曲面相交后,交线处的边界线段的度可以为 4。根据悬挂面片的定义,如果一个面片是悬片,则该面片的边界存在某处度为 1 的边,也就是说,该处的边不与任何其他面片相连。

基于面片的闭合块体构造方法类似于曲面分片,前文所述的曲面分片是指根据交线和曲面边界将曲面分割成若干个内部连通的曲面区域,而基于面片的闭合块体构造则是指根据面片(可以认为面片是块体的边界)将整个地质体空间分割成若干个内部连通的空间区域,每个区域即为一个块体。因此,可以采用类似于曲面分片的“蔓延”思想,根据面片边界找到其相邻的面片,直至最后面片集合构成一个闭合块体为止。在选择相邻面片的时候,会遇到一个问题:如果有多个面片共享一个边界,则对下一个面片的选择将关系到算法的正确性。这里以图 2 为例来说明面片的选择问题。

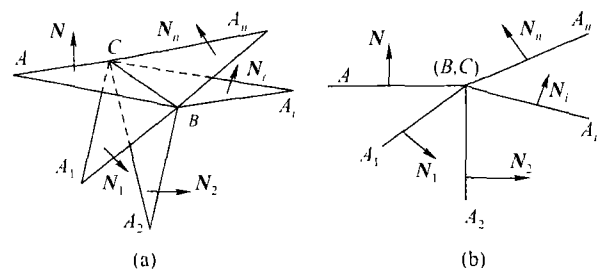


图 2 多个面片的选择 Fig. 2 Choose the right surface piece

如图 2 所示,假设当前面片边界处的一个三角形为 ABC ,其外法向如图 2(a)中的 N 所示,设边 BC 关联了另外 n 个三角形,分别为 $A_1BC, A_2BC, \dots, A_nBC$,此时,需要在这些候选三角形中选取一个,以完成本面片到下一面片的跨越。在这里,可将这些三角形投影到垂直于 BC 的平面上(如图 2(b)所示),如果三角形 A_1BC 所在的面片不是悬片,则可以证明,下一个面片必须选择 A_1BC 所在的面片。

证明 假设不选择 A_1BC 所在的面片 P ,则必定选择其他某个面片,以构成一个最小闭合块体 B ;另一方面,由于 A_1BC 所在的面片 P 不是悬片,并且 P 显然在闭合块体 B 内部,因此, P 必定可以将块体 B 分割成两个更小的块体,也就是说, B 不是最小的,这不符合闭合块体的定义,因此假设不成立。

因此,遇到多个面片可供选择时,在投影图中绕着公共边,向当前面片的外法向相反的方向旋转,碰到第 1 个三角片,即可将其所在的面片作为下一个面片。

3.2 曲面及面片的简化

考虑到面片的内部三角形对于面片的“蔓延”过程不起任何作用,因此,本文设计了一种简化的曲面和简化的面片结构,这种简化结构只用于存放面片边缘部位的三角形数据。此外,针对每个保留的边缘三角形,还存有指向其他面片边缘三角形的指针。

实际上,并不是面片边缘所有的三角形都需要保留,在相邻面片之间进行跨越时,只需使用共同边界上任意处的一组三角形进行计算即可。

因此,在每个曲面上,只需保留多条交线相汇处的三角形,就可以完成后续的闭合体的构建过程,而面片的内部以及面片边缘的大部分三角形都无需存储。图 3 展示了曲面及面片的简化情况,其中,

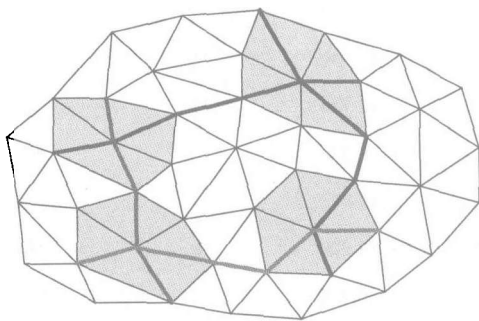


图 3 简化曲面示意图

Fig. 3 Surface that has been simplified

深色的三角形为需要保留的三角形。由图 3 可见,经过简化后的曲面片仅保留极少的三角形数据,尤其在面片较大的情况下,这种简化效果更加明显。最终保留的三角形个数仅仅与模型内的面片总数相关,而与整个地质体模型的规模没有太大关系。

简化曲面和简化面片的结构如图 4 所示。

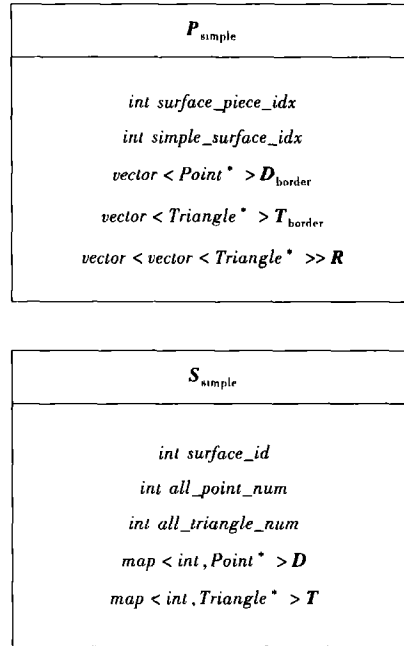


图 4 简化曲面和简化面片的数据结构

Fig. 4 Data structure of simplified surface and surface piece

简化曲面 S_{simple} 的结构内只存放该曲面中各个面片的边缘点和边缘三角形的数据,这些点和三角形以〈索引,数据〉对的形式分别存放在成员 D 和 T 中。

在简化面片 P_{simple} 的结构内不再存放任何点或者三角形的数据实体,简化面片内的边界点和三角形的指针均指向简化曲面内的数据实体;此外,成员 R 体现了面片之间的拓扑关系,它是一个 2 维向量:此向量的第 i 个成员 $R(i)$ 是一个容器,该容器里的每个成员都是指针,指向与第 i 个边界三角形 $T_{border}(i)$ 共边的,并且属于其他面片的边界三角形。

曲面和面片的数据经过简化后,将极大地缩减内存空间的占用量。由于在简化的面片内不存放数据实体,因此,这样的结构仅占用很小的内存空间;

即使是简化的曲面,可是由于只保留曲面内各个面片边缘关键部位的点和三角形数据,因此这样也极大地节省了空间。

3.3 闭合体构造算法

闭合块体的构造算法步骤如下:

算法输入:地质体模型内所有的曲面和交线;

算法输出:闭合块体的集合;

(1)依次读入各曲面数据,对于读入的每个曲面,先使用曲面分片算法得到面片信息,然后依据交线提取该曲面及相关面片的简化信息,建立简化曲面和简化面片的结构;

(2)依据交线建立面片之间的拓扑关系;

(3)删除悬挂面片;

(4)设定一个面片数组 A ,用于存放当前块体的所有面片的索引;

(5)如果模型内的所有面片的两侧都已使用过,则转步骤(9);

(6)任取一个未使用过的面片 P ,选定 P 的一侧作为当前块体的外法向。将带方向的 P 放入数组 A 中,并设置一个游标 p ,指向 A 的第 1 个位置;

(7)取出游标 p 所指的面片 X (这里的 X 实际是指所在面片的一个外侧面,下文的 Y 也是如此),标记 X 为已访问,并在 X 中选择一个未被访问过的边界三角形,然后根据拓扑关系的信息找到与该三角形共边界的所有其他三角形,再使用投影法找到下一个面片 Y ,如果 Y 未被使用过,则将 Y 放入数组 A ;

(8)游标 p 前进一步。如果游标 p 所指为空,则将数组 A 中的面片合并,作为一个块体送到输出结果中,清空数组 A 后,转步骤(5);否则转步骤(7);

(9)算法结束。

依据此算法就可以找出地质模型内所有的闭合块体,算法的主要时间耗费在步骤(1)和步骤(8),因为这两个步骤需要进行一定的数据库读入和写出操作。算法的步骤 1 需要依次读入地质模型内各个曲面,一旦得到该曲面的简化结构,就释放该曲面所占的内存空间;而在步骤(8),一旦获得了一个闭合体,就需要从数据库中再次读入相关曲面的数据实体,才能完成闭合结构实体的构建。本文算法中闭合结构的分析过程仅仅与面片总数有关,其占用的时间是极少的。

4 实验结果与分析

4.1 数据准备

本文实验采用的数据是地震测网采集的点云数据经重构后所得到的层位面、断层面数据,这些数据以三角网格的形式存放;此外,交线数据存放的是其上的点位于两个相关曲面内的点索引值。

4.2 性能分析及评价

本文采用 C++ 实现了曲面分片和闭合体构造的算法。测试数据为 5 个层位、两个断层以及地质边界,曲面间的相交线共 27 条。程序的运行环境为 Linux 工作站,CPU 为 Intel Xeon E5335 2.0 G,内存为 1 G。为了评估该算法能否适应海量数据的情形,还对这些曲面经简化后的三角形个数进行了记录。

由表 1 可以看出,曲面和面片的简化效果非常理想。三角形数据量达到 10^5 规模的一个模型,经过简化后,内存中仅保留了 476 个三角形。由此可见,本文算法可有效应用在海量数据规模的地质体建模中。另外,从算法的时间消耗上来看,主要时间消耗在数据读入和写出上面,而闭合结构的拓扑分析速度很快。图 5 和图 6 分别为闭合结构拓扑分析之前的框架模型和闭合体提取完成后的块体模型。

表 1 闭合体构造的实验结果

Tab. 1 Results of geological blocks construction

曲面	三角形数	面片数	简化后三角形数
层位 1	11 034	4	20
层位 2	13 795	10	32
层位 3	12 879	10	36
层位 4	12 746	11	44
层位 5	12 739	11	44
断层 1	6 762	13	40
断层 2	16 643	11	108
地质边界	14 900	16	152
总计	101 498	86	476

时间:曲面分片(715 ms);面片简化及闭合体构建(516 ms);
10(1780 ms)

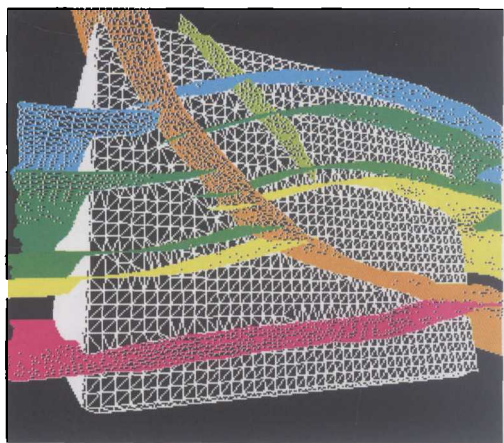


图 5 框架模型
Fig. 5 Frame surface model

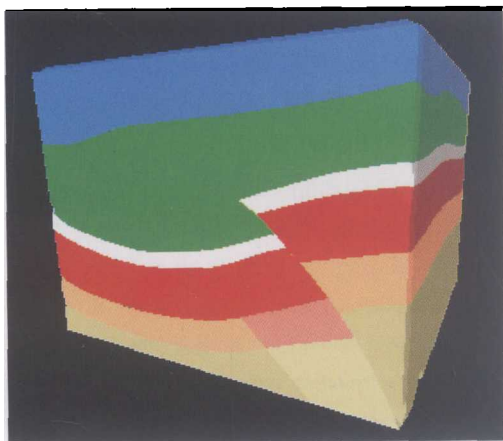


图 6 3 维块体模型
Fig. 6 3D coherent-block model

本文提出的闭合体构建算法在保证正确性的同时,还提升了运算速度,重要的是,该算法能够对各种数据规模的地质模型进行有效的拓扑分析。本文的建模结果已成功地应用到后续的实体模型的构造中。

参考文献 (References)

- 1 Wei Jia. Review of geologic model building techniques [J]. *Progress in Exploration Geophysics*, 2007, **30**(1): 1-6. [魏嘉. 地质建模技术[J]. *勘探地球物理进展*, 2007, **30**(1): 1-6.]
- 2 Meng Xiao-hong, Wang Wei-min, Yao Chang-li, et al. Principle and Application of Computer-Aided Design for Geological Model [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2001. [孟小红, 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.]
- 3 Jiang Xian-yi, He Zhen-hua, Huang De-ji. A method for building a model in closed structure [J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 2002, **37**(4): 339-342. [蒋先艺, 贺振华, 黄德济. 封闭结构模型建立方法[J]. *石油地球物理勘探*, 2002, **37**(4): 339-342.]
- 4 Meng Xian-hai, Yang Qin, Li Ji-gang. Construction of coherent 3D geological blocks from stratified geological structure [J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2005, **31**(2): 182-186. [孟宪海, 杨钦, 李吉刚. 基于层面结构的三维闭合地质区块构造算法[J]. *北京航空航天大学学报*, 2005, **31**(2): 182-186.]
- 5 Heliot D. Generating a blocky rock mass [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science and Geomech Abstracts*, 1988, **25**(3): 127-138.
- 6 Stephansson J L. Topological identification of blocky assemblages for jointed rock masses [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science and Geomech Abstracts*, 1994, **31**(2): 163-172.
- 7 Hou Wei-sheng, Wu Xin-cai, Liu Xiu-guo. 3D sealed geological block modeling with wire frame component [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2007, **37**(5): 1047-1051. [侯卫生, 吴信才, 刘修国. 基于线框单元体的三维闭合地质块体构建方法[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2007, **37**(5): 1047-1051.]

5 结 论

闭合体的构建是地质体建模的一个重要过程。