

三维拓扑数据的生成算法与交互修改方法研究

邹 伟¹, 王燕妮², 杨 萌³

(1. 中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100037; 2. 中国专利信息中心, 北京 100087; 3. 中州大学信息管理中心, 河南 郑州 450044)

摘要:在分析现有三维矢量拓扑关系的基础上, 提出了三维矢量数据结构的要素拓扑模型 (Feature Topological Model, FTM)。FTM 三维拓扑模型比传统三维模型的优势有 3 点: (1) 直接引入三角形对象, 更加有利于表示任意形状的三维体数据。 (2) 简化基本拓扑关系的定义, 使用相对简单的三角形和边的拓扑关系, 表达相对复杂的实体和曲线的拓扑关系; 使用带拓扑关系的边的集合表示三维曲线, 既表达了曲线对象, 又不影响基本拓扑关系的维护。 (3) 使用实体之间的包含模型, 解决环 (洞) 的拓扑关系。同时, 使用 FTM 对三维离散三角形数据进行拓扑化处理, 对其中存在的拓扑错误提出具体的解决方案。该拓扑模型成功应用于自主研发的三维勘查软件“探矿者”中。

关键词:三维矢量数据; 三维拓扑; 三维编辑; 要素拓扑模型 (FTM)

中图分类号: TP319

文献标识码: A

文章编号: 1674-3636(2013)04-0606-05

0 引 言

GIS 的核心是空间数据库、空间查询和空间分析。一般来说, 三维空间对象是由空间表面和体元素组成的, 其具体形态和结构复杂多样, 从而使它们的空间拓扑关系更为复杂和多样。有学者 (程朋根等, 2004; 韩李涛, 2005) 在三维数据模型和拓扑关系方面做了大量的研究, 取得了一定的成果。但总体而言, 该领域的进展尚未进入实用化阶段, 尤其是“三维拓扑”的使用存在很多技术难点。在此基础上, 本研究探索了能够完整解决三维环 (洞) 问题的三维矢量拓扑数据模型 FTM, 并且完成了此模型的数据建模和三维编辑, 最后完成了从无拓扑的三维数据模型转换成带拓扑的 FTM 数据模型的工作。

1 引入三维拓扑信息的意义

三维拓扑关系可以用于三维空间的快速查找。例如, “判断某三维曲线是否在三维体的边界上”这一问题, 在没有三维拓扑信息的情况下, 只能计算三维曲线是否在三维体的内外进行判断, 算法必然要

对三维曲线和三维体进行循环遍历, 效率低下。如存在三维拓扑, 可以直接通过三维曲线索引到三角形的边, 检查这些边是否邻接了三维体的三角形即可, 算法几乎是一次定位的, 只需要做几次拓扑关系的检查即可完成该判断。

相对于无拓扑数据模型, 存在三维拓扑关系的数据在空间分析上有明显的算法优势。例如: 在计算 2 个三维体求交线的算法实现中, 算法可以首先计算所有边和三角形的交点, 使用三角形和边的拓扑关系, 将交点连接成曲线, 从而得到三维体的交线。如果没有拓扑信息, 比如要求三角形两两之间求交线, 由于 1 条边通常邻接 2 个三角形, 从而使得无拓扑数据求交线要带来多 1 倍的求交点运算。

2 三维矢量数据拓扑模型

国内外学者提出了数十种三维空间数据模型, 其中具代表性的有 30 余种。从数据描述格式来看, 三维空间数据模型可分为矢量 (Vector)、栅格 (Raster) 和矢量与栅格集成 (Raster-Vector Integration) 3 种。对这些典型的三维空间数据模型的总结分类见表 1。

收稿日期: 2013-06-25; 编辑: 侯鹏飞

基金项目: 中国地质调查局项目“全国重要矿产总量预测” (1212011121040)

作者简介: 邹伟 (1981—), 男, 助理研究员, 博士, 主要从事三维 GIS 算法设计和软件架构设计, E-mail: visio@163.com

表 1 三维空间数据模型的分类

面元模型	体元模型	
	规则体元	不规则体元
不规则三角网 (TIN)	构造实体几何 (CSG)	四面体格网 (TEN)
格网模型 (Grid)	体素 (Voxel)	金字塔 (Pyramid)
边界表示 (B-Rep)	针体 (Needle)	三棱柱 (TP)/广义三棱柱 (GTP)
线框模型 (Wire Frame)	八叉树 (Octree)	地质细胞 (Geocellular)
断面模型 (Section)	规则块体 (Regular Block)	不规则块体 (Irregular Block)
多层 DEMs		3D Voronio 图

空间数据模型是对现实世界的一种抽象、归类及简化的描述。三维空间数据模型是三维空间的几何对象的数据组织、操作方法以及规则约束条件等内容的集合。定义和开发一个新的三维数据模型需要考虑 3 方面的问题:(1)确定需要描述的对象,三维数据的存储以及逻辑关系的表达,如何显示模型。(2)三维空间数据模型是人们对客观世界的理解和抽象,是建立三维空间数据库的理论基础。(3)三维空间数据结构是三维空间数据模型的具体实现,是客观对象在计算机中的底层表达,是对客观对象进行可视表现的基础。

通过以上分析可以看出,对于表达复杂体模型,尤其是对三维可视化、拓扑分析、空间查询、空间分析、网络分析等要求严格的领域,适用基于矢量或边界面的模型比较方便。它是用一些基元及其组合来表示三维空间对象,是二维中点、线、面矢量模型在三维中的推广。同时,面向空间基本对象的矢量数据模型,数据存储格式紧凑、数据量小,图形输出简洁美观。

在研究了矢量数据模型,尤其是 Molennar 三维数据模型和 B-Rep 数据模型的基础上,发现这些数据模型没有将三角形作为基础数据对象,这往往导致在三维可视化和空间分析时算法不简洁,对曲面法线方向需要另外设置等问题。

同时,一个完整的实用化的三维矢量数据模型,难点是对环(洞)的设计。在分析了环(洞)的特点,尤其是环(洞)嵌套或者多个环(洞)的情况后发现,如果一个实体 A 包含另外一个实体 B,那么,B 只可能隶属于 A;B 的表面,内侧与 B 相邻,外侧与 A 相邻。根据这个事实,在设计数据结构时,使用实体之间的包含模型,完全解决了环(洞)的拓扑关系问题。

综合以上分析,得到了三维矢量数据结构拓扑模型,其基本三维矢量数据类型包括点、边、三角形、曲面、实体,这些基本三维数据类型统称要素。因此,这一拓扑模型称为要素拓扑模型 (FTM)。相对于 Molennar、B-Rep 等以往的三维数据模型,增加了三角形对象,删除了环对象(因为使用拓扑关系可以在 $O(1)$ 的时间复杂度得到环关系)。同时,曲线对象仍然予以保留,在 FTM 中,曲线被认为是若干条边首尾相连的集合。

FTM 三维模型的具体结构描述如下。

(1)三维点仅仅记录在三维空间的坐标,不记录拓扑关系。

```
class C Point
{
    float x;
    float y;
    float z;
};
```

(2)边是指三维空间中的 1 条三维线段,它由起点和终点确定,并且邻接左三角形、右三角形。

```
class C Edge
{
    int m_nStartPoint;    //起点
    int m_nEndPoint;      //终点
    int m_nLeftTriangle;  //左三角形
    int m_nRightTriangle; //右三角形
};
```

(3)三角形由首尾互相连接的 3 条边组成,同时,可以通过这 3 条边,计算出三角形的 3 个点,也将它们记录在三角形的结构中;此外,一个三角形一定隶属于某个曲面。

```
class C Triangle
```

```
{
```

```
    int m_nEdge1;    //第一条边
```

```
    int m_nEdge2;    //第二条边
```

```
    int m_nEdge3;    //第三条边
```

```
    int m_nPoint1;   //第一个点
```

```
    int m_nPoint2;   //第二个点
```

```
    int m_nPoint3;   //第三个点
```

```
    int m_nSurface;  //三角形所在的曲面
```

```
};
```

(4) 若干个三角形的集合, 形成了曲面; 同时, 1 个曲面邻接 1 个左实体, 1 个右实体。

```
class C Surface
```

```
{
```

```
    int * m_pTriangle; //曲面包含的三角形
```

列表

```
    int m_nTriangleSize; //三角形数目
```

```
    int m_nLeftSolid;    //曲面左侧实体
```

```
    int m_nRightSolid;   //曲面右侧实体
```

```
};
```

(5) 若干个三角形的集合, 形成了实体; 同时, 实体内部若包含环(洞), 则实体内部可能还有若干实体。

```
class C Solid
```

```
{
```

```
    int * m_pSurface;    //实体包含的曲面
```

列表

```
    int m_nSurfaceSize;  //曲面数目
```

```
    int m_nFatherSolid;  //实体被包含在哪个
```

实体中

```
    int * m_pInnerSolid; //实体内部包含的
```

实体列表

```
    int m_nInnerSolidSize; //内部实体的数目
```

```
};
```

如果某实体 A 包含了实体 B 和实体 C, 它们的 ID 分别记为 IDa, IDb, IDc, 那么 A 的 m_nInnerSolidSize = 2, m_pInnerSolid[0] = IDb, m_pInnerSolid[1] = IDc; 同时, B. m_nFatherSolid = IDa, C. m_nFatherSolid = IDa。使用这样的双向索引, 能够使得在 $O(n)$ 线性时间内查找到实体包含的所有子实体, 也能在 $O(1)$ 常数时间内查找到实体被哪个父实体包含。

3 三维拓扑数据的生成

FTM 能够通过拓扑索引快速定位, 在某些应用中, 能够利用拓扑关系设计更快的算法。在“探矿者”软件的实际应用中, 使用 FTM 数据模型, 设计完成了三维拓扑数据的生成算法, 并在实际中编码实现。

3.1 离散三角形模型数据

在实际的处理过程中, 得到以三维边界存储的三角形集合, 这些三角形离散存储, 每个三角形都存储它们的 3 个顶点, 为表述方便, 称这种模型为“离散三角形模型”。这样的离散体模型, 简单实用, 易于修改, 已经在“探矿者”软件中大量使用。另一方面, AutoCAD、Micromine 等软件形成的三维体, 可以方便地转换成离散三角形模型。因此, 实践中以离散三角形模型为数据基础, 形成带拓扑的三维数据模型。

离散三角形模型在三维显示简单的同时, 因为三角形之间没有直接的索引关系, 使得三维空间分析算法难以提高; 因为三角形之间无法直接访问, 使得计算三维拓扑完整性、是否有三角形相交等问题无法设计精巧的算法。因此, 使用上述 FTM 数据模型, 将离散三角形模型快速转换成拓扑模型, 是非常有意义的。

3.2 从非拓扑数据转换成拓扑数据的步骤

在将非拓扑数据转换为拓扑数据的过程中, 关键是对离散三角形模型中拓扑不正确的点、线、三角形进行处理, 其主要的三维拓扑错误及处理方法如下。

(1) 重复三角形的查找和处理。如果 2 个三角形的 3 个顶点分别相等, 那么这 2 个三角形是重复三角形。对重复三角形, 只需要算法强制删除其中 1 个三角形即可。处理后的结果, 不影响三维体的表面和拓扑关系。重复边的处理, 是 4 种拓扑错误中最简单的 1 种。

(2) 重复的公共边的查找与删除。如果 1 条边和 2 个三角形相邻接, 那么, 这条边为公共边。如图 1 所示, 三角形 α 、 β 的公共边为线段 AB。如图 2 所示, 三角形 α 、 β 、 γ 都具有边线段 AB, 这时的 AB 为三角形 α 、 β 、 γ 的重复公共边。重复公共边的存在, 使得三维体有自相交, 是需要删除的状态。可以采

用以下2种做法:删除三角形 α 、 β 、 γ 的其中之一,使得 AB 成为普通公共边;移动三角形 α 、 β 、 γ 的其中之一,使得某一个三角形不以线段 AB 为边。

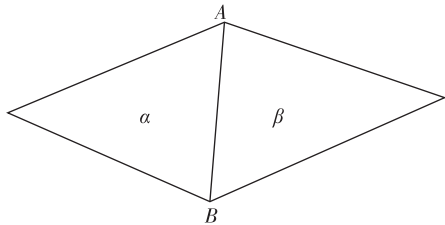


图1 相邻三角形 α 、 β 形成公共边 AB

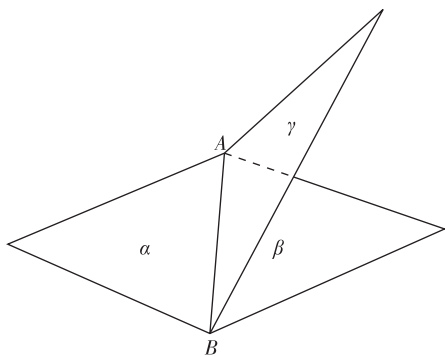


图2 三角形 α 、 β 、 γ 形成的公共边 AB

(3)边界边的查找算法和处理。如果1个边只与1个三角形邻接,这样的边叫做边界边。边界边的产生,是由于在三维体建模的过程中的某些错误,使得三维体没有封闭。在三维空间中,如果存在边界边,将这些边界边相互连接,能够形成若干封闭的空间多边形。拓扑重建工作,需要以这些空间多边形为外轮廓,形成封闭曲面。从图形上讲,就是将“漏洞”的三维体,使用某种方法“补”上一个封闭曲面,使得形成拓扑完整的三维体。从数据处理的角度,这个过程即为空间多边形三角化。

空间多边形的三角化可使用2种方式进行:空间多边形的自动三角化;交互式增加辅助线,分别形成封闭曲面。

在实际工作中遇到的空间多边形往往是平面的;或者通过投影到某个平面上,可以等价为1个平面多边形。这时,可以使用平面多边形的三角化方法,在 $O(N \cdot \lg N)$ 的时间复杂度内完成三角化。对于无法与平面多边形等价的空间多边形,需要交互式地通过增加辅助线,使之与平面多边形相对应,然后使用平面多边形的方法,完成三角化工作。

在具体操作中,计算空间多边形的投影平面,可以使用“多边形平均向量”的方法。其操作是:计算多边形每个顶点的法向量,按照顶点的2条边长为权重,计算多边形的平均向量;以该向量为投影平面,计算空间多边形到该平面的投影,如果投影后的多边形没有自相交,则投影后的多边形即为空间多边形的等价平面多边形;然后,使用平面多边形三角化的方法,即可完成空间多边形的三角化。

(4)相交三角形的查找和处理。使用三维建模的方法,由于地质剖面上的地质界线扭曲分叉,形成的三角形往往是自相交的。对于自相交的三角形的处理,需要一定的三维编辑工作。处理过程如下:通过程序计算三角形交线;以交线为约束边,对三角形重新三角化;对新生成的小三角形按照交线分为左右两部分;相交的三角形转换成了“重复公共边”的问题,使用上述(2)中提到的处理方法进行三维处理。

4 结 论

笔者首先提出了FTM三维数据模型,用来存储包括空间拓扑信息在内的三维数据;同时,使用FTR对三维离散三角形数据进行拓扑化处理,对其中存在的拓扑错误提出了具体的解决方案,重点解决了重复的公共边、边界边、相交三角形的拓扑错误,处理方法简便,高效实用。处理后的拓扑数据,以点、边、三角形、曲面、实体5个列表的形式存储,通过边可以直接查找与之相邻的三角形,使得通过三角形可以快速查找邻接三角形,为三维空间分析、缓冲区分析、栅格化等算法提供了数据结构基础。

在进一步研究和实践中,将使用该三维拓扑数据模型完成空间分析的各个算法,在算法的设计与优化中,可能需要对现有模型进行进一步调整和扩展,以应对具体实践中遇到的各种实际问题。

参考文献:

- 程朋根,刘少华,王伟,等. 2004. 三维地质模型构建方法的研究及应用[J]. 吉林大学学报:地球科学版,34(2):309-313.
- 韩李涛. 2005. 地下空间三维数据模型分析与设计[J]. 计算机工程与应用,(32):1-3.
- 蒋丽丽,孙建国. 2007. 起伏地表三维建模研究进展与前景

- [J]. 勘探地球物理进展, 30(5): 340-347.
- 李建华, 边馥苓. 2003. 工程地质三维空间建模技术及其应用研究[J]. 武汉大学学报: 信息科学版, 28(1): 25-30.
- 刘修国, 陈国良, 侯卫生, 等. 2006. 基于线框架模型的三维复杂地质体建模方法[J]. 地球科学: 中国地质大学学报, 31(5): 668-672.
- 刘星. 2012. 基于真三维 GIS 的地质构造模型与空间分析[J]. 地质学刊, 36(3): 274-279.
- 蒲浩, 詹振炎. 2005. 现代路线 CAD 系统关键技术研究[J]. 中国铁道科学, 26(4): 136-138.
- 潘懋, 方裕, 屈红刚. 2007. 三维地质建模若干基本问题探讨[J]. 地理与地理信息科学, 23(3): 1-5.
- 邵昊. 2008. 地质体的三维建模与可视化研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京).
- 谭仁春. 2005. GIS 中三维空间数据模型的集成与应用[J]. 测绘工程, 14(1): 63-66.
- 覃荣高, 高建国, 臧小豹, 等. 2009. 基于 GMS 基岩矿区地下水三维实体模型的构建[J]. 地下水, 31(6): 15-17.
- 田宜平. 2012. 水电三维地质模型中各地质要素的建模方法[J]. 地质学刊, 36(3): 320-325.
- 危拥军. 2006. 三维 GIS 数据组织管理及符号化表示研究[D]. 郑州: 中国人民解放军信息工程大学.
- 王润怀. 2007. 矿山地质对象三维数据模型研究[D]. 成都: 西南交通大学.
- 王彦兵, 吴立新, 李小娟. 2007. 3 维 GIS 空间建模方法评述[J]. 中国图象图形学报, 12(8): 1430-1434.
- 吴慧欣. 2007. 三维 GIS 空间数据模型及可视化技术研究[D]. 西安: 西北工业大学.
- 熊伟, 毛善君, 马蔼乃, 等. 2002. 面向地质应用的三维数据模型研究[J]. 煤田地质与勘探, 30(6): 11-15.
- 夏艳华, 白世伟. 2012. 基于水平集的复杂三维地层模型建模及在地下工程中的应用研究[J]. 岩土力学, 33(5): 1445-1450.
- 赵永军, 李汉林, 王海起. 2001. GIS 三维空间数据模型的发展与集成[J]. 石油大学学报: 自然科学版, 25(5): 24-28.
- 郑贵洲, 申永利. 2004. 地质特征三维分析及三维地质模拟现状研究[J]. 地球科学进展, 19(2): 218-223.
- 张芳. 2006. 场框架下的城市地下空间三维数据模型及相关算法研究[D]. 上海: 同济大学.
- 邹伟. 2010. 三维地质勘查软件核心技术研究[实现][D]. 北京: 中国地质科学院矿产资源研究所.
- 赵强. 2011. 矿山多尺度三维地层数据模型研究[D]. 河南焦作: 河南理工大学.

Study on generating algorithm and interactive modification methods of 3D topological data

ZOU Wei¹, WANG Yan-ni², YANG Meng³

(1. Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 2. China Patent Information Center, Beijing 100087, China; 3. Information Management Center, Zhongzhou University, Zhengzhou 450044, China)

Abstract: Based on the analysis of available 3D vector topological relationship, the authors proposed 3D Feature Topological Model (FTM). There were three advantages for FTM: (1) A direct introduction of triangular object which was good for the expression of the 3D data of arbitrary shape. (2) Simplified the definition basic topological relation, expressed the relative complicated topological relations for the entities and curves by the use of edge with topological relations. (3) Used inclusion model among the entities, solved the topological relations for the ring (hole). Meanwhile, the authors conducted topological treatment for 3D discrete triangle data with FTM and put forward solutions for the topological errors existed. The model was successfully used in Minexplorer software.

Keywords: 3D vector data; 3D topology; 3D editing; Feature Topological Model (FTM)