

矢量剪切技术在地质三维建模中的应用

杨成杰¹ 吴冲龙¹ 翁正平¹ 张夏林¹

(1 中国地质大学国土资源与信息系统研究所,武汉市鲁磨路 388 号,430074)

摘 要:三维地质建模方法是地学三维模拟与可视化系统的核心和难点。基于 BSP 树的矢量剪切的原理及算法,提出了利用矢量剪切技术快速构建复杂的地质体开挖模型,可视化表达地质体内部信息的方法,并以地质开挖工程及三维地层分析为例,验证了算法的高效性和实用性。
关键词:矢量剪切; 实体模型; 三维建模; BSP 树; 地质分析
中图法分类号: P208

三维地质模型是研制地质体三维模拟与可视化软件的核心与基础^[1]。实体建模法是 20 世纪 80 年代发展起来的一种建模方法,采用多边形网格(线框模型)描述地质体的几何边界。实体建模技术易学易用,表达复杂地质模型方便,已经发展成为当前三维地质模型的主要表达方式之一,广泛应用在地层带、矿体、煤层、采场设计中。实体模型可以由一系列的剖面自动或者手动创建,单个体或者多个分支体亦可以很容易地连接成实体,可以根据需要用实体或者数字化表面模型(DTM)去切割某一个实体,还可以通过闭合的实体快速计算出其精确的体积值。

矢量剪切技术作为三维 GIS 重要的建模及空间分析工具,主要包括面剪面、面剪体、体分解面等功能。利用矢量剪切技术对地质实体模型进行切割操作,可以快速构建复杂的地质体开挖模型,并将结果准确快速地显示出来,不同领域的研究和分析人员可以观察分析地质体内部的特征和属性。矢量剪切优于位图剪切的地方,是所生成的图形仍然是矢量图形,保存了原有的几何拓扑关系,且效率高。矢量剪切技术是空间分析技术的难点和关键所在^[2]。

1 三维实体模型表达

地下空间形态复杂多变,很难用规则的几何体来描述,它需要一种灵活、简便、快速的方法来

建立不规则地质对象模型。目前,比较通用的方法是采用实体模型来描述地质体的几何形态。利用实体模型不仅可以比较精确地描述形态或形状复杂多变的地质体,而且可以对其进行体积计算、表面积计算、切制剖面、快速三维显示等操作,能满足地质工程规划、设计、矿山生产中地质制图的基本要求。实体模型数据结构如图 1 所示^[3,4]。

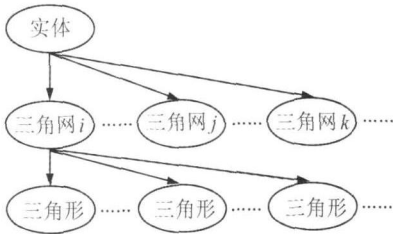


图 1 实体模型数据结构

Fig. 1 Structure of Solid Model

实体模型由一系列三角形面片所围成的一个单独的、闭合的地质单元构成。三维实体模型定义如下。

1) 实体上所有三角形顶点称为节点。节点是地质人员进行剖面定义和解释过程中圈定地质体边界时所定义的弧段的端点。包括控制节点、内插节点、地质特征点、地质尖灭点、分叉点、断层断点、褶皱断点等^[5]。

2) 实体上任意两个节点之间的线段称为弧段,每个弧段上两个节点的位置不能重合(考虑浮点舍入误差),且每个弧段必须也只能被模型中的

收稿日期:2010-01-12。
项目来源:国家 863 计划资助项目(2008AA121602)。

两个三角形共用。

3) 构成实体的任何两个三角面之间不交叉、重叠;任何一个三角形的边必须有相邻的三角形;任何三角形的3个顶点,必须依附在有效的点上,否则实体是开放的或无效的。

4) 实体中不存在退化三角形且所有三角形的法线方向必须一致。在计算机图形学中,空间的相对位置是以图形对象的法线来判定的,根据法线方向将实体对象划分为法线正向(外侧)和负向(内部)两部分。

图2显示了用实体表达的三维地质体模型及其网格模式的形态。

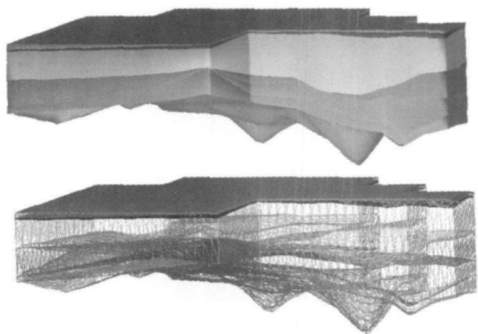


图2 实体模型数据结构

Fig.2 Solid Model

2 实体模型剪切

2.1 剪切原理

矢量剪切的基本思路就是:以剪切对象的空间位置为基准来划分被剪对象,所有构成被剪对象且与剪切对象不相交的三角形被区分为“内部”和“外部”两部分,与剪切对象空间相交的三角形在交线处被分解后再区分,然后对“内部”和“外部”的三角形重建拓扑关系,形成剪切后的两个对象(其中一个对象可能不存在)。剪切算法的关键步骤是判定空间中的点与三维地质体、地形及地质边界等约束面的空间关系。采用传统的求交及平面分割三角形的算法,需要遍历构成模型的所有结构面,且对分割后的三角形必须通过保留原拓扑关系才能重构为剪切后的对象。对于复杂的地质体模型,这种方法不仅计算量大,还需考虑各种特殊情况,极易产生判断失败的情况。鉴于此,本文提出了利用空间分区二叉树来判断点与多面体的位置关系的算法,实现任意复杂地质体的矢量剪切运算。

2.2 空间分区二叉树

空间分区二叉树(binary space partitioning

tree, BSP树),是一种非常高效的排序和分类数据结构,从隐藏面消除和光线跟踪层次结构到实体造型和机器人运动策划等应用都使用了BSP树结构^[6]。BSP树算法最早由Fuchs、Kedem和Naylor在Schumacker的基础上提出来,通过递归地对 n 维空间用超平面进行分割从而获得不同物体之间的空间相对位置关系^[7]。这种方法在计算机图形学的许多应用中都非常有效。

BSP树分割空间的基本思想是:空间中任何平面都可以将空间分割成两个互不相交的半空间,位于平面法线所指向一侧的半空间叫作平面的正侧,另一侧叫作平面的负侧。如果在任何半空间中有另一个平面,它会进一步将此半空间分割为更小的两个子空间。可以使用多边形列表将这一过程进行下去,当子空间中仅存在单个平面时,即可构造出一个描述三维实体对象层次结构的二叉树。二叉树的每一个节点都表示一个分区平面。节点的左子树表示该节点所表示的分区平面的正侧,节点的右子树表示该节点所表示的分区平面的负侧,二叉树的叶子节点表示分区得到的凸区域。

空间分区二叉树节点结构如下:

```
struct BSPNode { // 空间分区二叉树结构体
    Plane partition; // 分区平面
    BSPNode * posChild; // 正子树节点
    BSPNode * negChild; // 负子树节点
    FaceList coincident; // 与分区平面共面的多边形
};
```

2.3 BSP树空间分区流程

构建三维BSP树是一个递归过程,其流程如下。

1) 遍历当前节点的所有备选平面,寻找一个合适的分割平面,如果有分割平面,则新建两个子节点,一个为正节点,一个为负节点,挂接到本节点下。如果没有分割平面,这个节点是一个叶子,则返回。

2) 遍历模型所有结构化面,如果面在分割平面的正向,将这个结构化面放入到正节点。若在负向则放入到负向节点。如果结构化面被分割平面分割,则分割此三角形,并将分割后的结果放入相应的子节点。如果在同一个平面,则放到节点下的面表中,作为特殊情况处理。

3) 对两个子节点,分别从第一步开始递归执行。

构造BSP树的关键是如何在三维空间中快速确定分割平面,以使生成的BSP树尽量趋于平

衡。因为平衡二叉树的操作比不平衡二叉树要快,冗余度要小很多。构造最优 BSP 树是一件非常困难的任务。在每一级都选取最优节点并不能保证最终得到最优 BSP,因为每次选择都会对下级分割产生影响。为了得到绝对最优的 BSP 树,我们必须在每一级尝试每个三角形,即使对于很小的 BSP 树这种指数复杂度也是不能忍受的。但在实践中,只要取局部各层的最优节点即可。实际上,随机选取节点可以更快地构造可接受的 BSP。因为三角形是按顺序传递给硬件的,且伴随着大量结构,所以实践中经常出现性能最坏的情况,而随机方法可以避免这个问题,因为随机结果往往比较中庸^[8]。

2.4 基于 BSP 树的剪切运算

利用空间分区二叉树可以非常有效地实现多面体的剪切运算。从剪切对象中提取的三角形构建空间分区二叉树结构,对被剪对象作剪切运算。原理如下:在给定空间一个凸多边形后,自然可以用空间分区二叉树来将多边形分解为一系列子凸多边形,它们可包含于一个外部区域、包含于一个内部区域或者与分区平面重合。如果这个多边形位于这个平面的正侧,或者其中有一个点位于分区平面上,就将它送往正子树,以进行进一步的处理。如果这个节点没有正子树,那么这个多边形就位于一个外部区域,类似地,如果这个多边形位于分区平面的负侧,就由负子树来对它作进一步处理,除非这个节点没有负子树,此时这个多边形就位于一个内部区域内。如果分区平面通过这个多边形,那么它将被分解为两个多边形,一个位于分区平面的正侧,另一个位于分区平面的负侧。位于正侧的由正子树进一步的处理,位于负侧的由负子树进一步处理。重复这个过程,直至处理完所有凸多边形为止^[9]。基于 BSP 结构的地质体矢量剪切处理流程如图 3 所示。

3 剪切技术在地质三维建模中应用

在地质三维建模过程中,经常要对地质体模型进行刻槽、挖洞、切剖面、钻孔等操作,以构建复杂的应用模型。基于实体模型的矢量剪切技术按功能不同分为面剪体、体分解面两种类型。面剪切体运算根据面对象的法线方向在空间中把被剪体对象分解为上下两部分,形成剪切后的两个体对象。面剪体主要应用于地形、巷道、采区等面对象对矿体、地质体对象的剪切操作,以及地质工程中的洞室开挖、虚拟钻孔取样、隧道规划设计等。

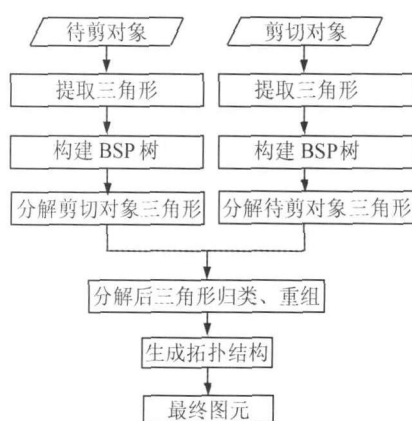


图 3 实体模型矢量剪切流程图

Fig. 3 Flowchart of Solid Model

体分解面操作与面剪体不同的是根据体对象的法线方向在空间中把被剪面对象分解为相对于体对象的“内部”和“外部”两个对象。体分解面主要应用于地质切片、品位剖面等操作。

3.1 面剪体应用

地质工程设计中涉及到大量开挖工程量的计算,传统的做法是:对于带状的开挖,采用剖面法,对于封闭区域的开挖采用网格法,进行计算。这种方法在复杂的工程中,不仅计算复杂,且计算精度不高。通过三维数字地质体的矢量剪切分析,可直接观察开挖结果,并计算体积。图 4 为面剪体运算在隧道开挖中的应用。

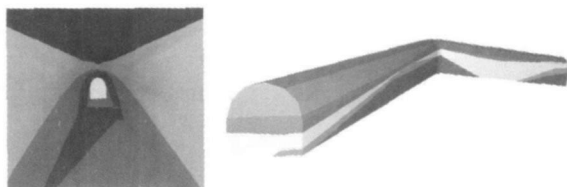


图 4 隧道开挖模拟

Fig. 4 Simulation of Tunnel Excavation

3.2 体分解面应用

地质分析中,地质人员想要深入地层内部,了解特定剖面的地质构造,分析地质体内部的特征和属性,了解和掌握地质体的组成、结构、稳定性、活动规律和运动机制。利用矢量剪切中的体分解面运算,对地质体进行切割分析,建立地质体篱笆图(图 5),可明显看到不同位置的地层信息,为地质灾害的预测、预报和防治服务,为资源开采和综合利用等重大问题的研究和决策提供决策工具。

4 结 语

矢量剪切是地质三维空间分析的重要功能之一,由于曲面与曲面之间的运算关系非常复杂,加

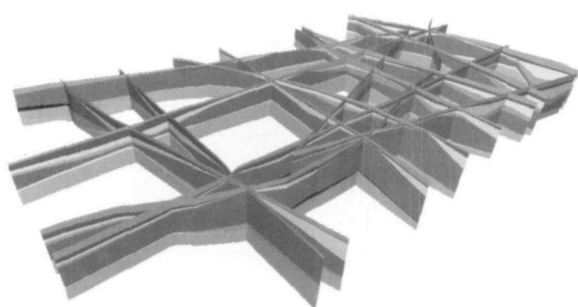


图5 地层组合剖面图(篱笆图)

Fig.5 Stratigraphic Combination of Profiles

上地质问题的复杂性,这个问题一直是地矿信息系统开发中的一个难点。基于BSP树结构的矢量剪切算法具有高效、准确、健壮等特点,适用于任意复杂的地质体和地形约束下的剪切运算。这种算法不仅可以剪切实体模型,还可对点、线、面等多种对象进行剪切运算,以及进行体与体之间的布尔运算,可作为一种通用的计算几何算法应用于CAD或GIS计算分析中。如何从复杂的模型中找到最优的分区面构建平衡树以及对剪切后三角形面片的快速、无损合并还需要进一步的研究。

参 考 文 献

[1] 杨东来,张永波,王新春,等.地质体三维建模方法

与技术指南[M].北京:地质出版社,2007

[2] 田宜平,刘海滨,刘刚,等.盆地三维构造——地层格架的矢量剪切原理及方法[J].地球科学——中国地质大学学报,2000,25(3):306-309

[3] 侯恩科,吴立新.面向地质建模的三维拓扑数据模型[J].武汉大学学报·信息科学版,2002,27(5):467-472

[4] 李建华,边馥苓.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,2003,28(1):25-30

[5] 郭甲腾.基于剖面的三维地质建模与可视化研究[D].沈阳:东北大学,2006

[6] Fuchs C Y, Slater M. Computing Dynamic Changes to BSP Trees[J]. Computer Graphics Forum,1992,11(3):321-332

[7] 杨戩,张应中,罗晓芳.基于BSP算法和模板缓存的阴影实现方法[J].计算机工程与设计,2003,24(9):35-37

[8] Dunn F, Parberry I. 3D数学基础:图形与游戏开发[M].北京:清华大学出版社,2005

[9] Schneider P J, Eberly D H. 计算机图形学几何工具算法详解[M].北京:电子工业出版社,2005

第一作者简介:杨成杰,博士生,主要从事三维可视化及信息系统的应用和开发研究。

E-mail: Waterycj@tom.com

Application of Vector Shear Technology in 3D Geological Modeling

YANG Chengjie¹ WU Chonglong¹ WENG Zhengping¹ ZHANG Xialin¹

(1 Institute of Land and Resources Information System, China University of Geosciences, 388 Lumo Road, Wuhan 430074, China)

Abstract: 3D geological modeling is the key to 3D geological simulation and visualization software system. This paper studies the theory and algorithm of BSP tree - based Vector Shear, and raises a method which uses Vector shear to quickly build complex geological modeling and visually displays the inner information of geological bodies. In the end, it takes the example of geological digital engineering and 3D stratum analysis, and draws a conclusion that the algorithm is efficient and practical.

Key words: vector shear; solid model; 3D geological modeling; BSP tree; geology analysis

About the first author: YANG Chengjie, Ph.D candidate, majors in spatial information visualization and the application of 3D GIS.

E-mail: Waterycj@tom.com