

基于三棱柱体的三维地质体可视化研究^{*}

张渭军 王文科 翁晓鹏

(长安大学地球科学与国土资源学院 西安 710054)

(长安大学环境科学与工程学院 西安 710054)

摘 要 三维可视化技术能形象表达地层信息的真实形态及构造要素的空间关系而应用广泛,建立了一种以三棱柱体作为基本体元来实现三维地质体可视化的方法,该方法通过对三角形的自分解并且充分考虑地质体内所存在的断层等地质现象,在引入虚拟钻孔的基础上,建立三维模型,该模型通过自分解而实现地质体内部信息的显示,最后用实际资料进行了验证。

关键词 三维可视化 三棱柱体 地质体 虚拟钻孔 三维建模

中图分类号: P282 文献标识码: A

USE OF TRIANGULAR PRISMS FOR VISUALIZATION OF THREE - DIMENSIONAL GEOLOGICAL GROUND MODELS

ZHANG Weijun WANG Wenke WENG Xiaopeng

(School of Earth Science and Resources Management, Chang'an University, Xi'an 710054)

(School of Environment Science and Engineering, Chang'an University, Xi'an 710054)

Abstract The three - dimensional visualization technology is widely used for its vivid regeneration of the real ground configuration from the investigated ground information and its proper description of the spatial relationships of structural elements. In this paper a 3D geo - body visualization method with the basic body elements of triangular prisms is introduced. The model is constructed with virtual drilling information through the self - decomposition of triangles and sufficiently considering the geological structures like faults in the geological body. The internal information of the geological body is displayed through the technique of self - decomposition. Finally, real drilling data is input to verify the model and the result indicates it is feasible.

Key words 3D Visualization, Triangular Prism, Geo - body, Dummy borehole, 3D modeling

1 引 言

计算可视化是当前计算机科学的一个重要研究方向^[1],在各个领域有着越来越广泛的应用,在地质领域结合三维 GIS 的信息处理和空间分析功能,

可使地质构造分析更为直观、准确地展现在地质工作者面前,并能形象表达地层信息的真实形态特征及构造要素的空间关系,这就是地学可视化,随着可视化及三维 GIS 的发展,建立地下各地层的实体几何模型显得尤为重要,因为一旦建立起实体数据模型,许多地质信息的可视化与分析问题就会迎刃而

^{*} 收稿日期: 2005 - 12 - 16;收到修改稿日期: 2006 - 01 - 15.

基金项目:国家自然科学基金资助项目: (40472131).

第一作者简介:张渭军 (1975 -),男,博士,研究方向为地质空间分析与地理信息系统, Email: wjzh1975@sohu.com

解^[2],数据模型是对地理空间中实体与现象的抽象集与语义解释,它是 GIS数据组织和进行空间数据库设计的理论基础,由于地理空间的复杂性,目前还无法建立一个统一、标准的 GIS数据模型^[3,4],数据模型应满足以下要求:体现地层在地理空间研究对象中的主体地位;能反映地层的特性及其之间的拓扑关系并且有效使用钻孔资料;能快速实现三维地层的显示及相关分析并且便于地层与其他地物相集成。

三维 GIS数据模型可分为基于面和基于体的数据模型。由于基于面模型的数据结构侧重于三维实体的边界表示,很难表达实体内部情况而使空间分析难以进行^[5],因此真正意义上的三维可视化采用体模型来实现,因为体模型侧重于三维空间实体的表示,适于空间操作与分析,具有体元特征的数据结构有:结构实体几何模型(CSG)、八叉树模型(Octree)、实体构模法、块段构模法以及 3D 栅格数据模型^[6]。

(1) CSG模型主要通过一些体元的几何变换和正则布尔操作来组装实体,这种模型在描述结构简单的三维实体时很有意义,但对地质体这种复杂地物很不方便,并且该结构不具备拓扑关系,在图形显示方面也不方便;

(2)八叉树结构是二维四叉树在三维上的扩展,其实质是如果一个立方体元内部属于同一属性就不再细分,否则将该立方体按上下、左右、前后分为几个相同的小立方体,直到这个立方体内属性一致为止,这种方式适合于规则体的可视化表示,对形状复杂的地质体也无能为力;

(3)实体构模法采用多边形格网来描述地质体和开采过程中形成的形体边界,并用块段来描述实体内部,能较好的表达复杂地质体的可视化现象,但存储数据冗余大,构模速度慢;

(4) 3D 栅格数据模型的算法、叠加及缓冲等空间分析较易实现,但数据存储没有压缩,数据量大,浪费空间。近几年也出现了其他一些三维建模方法,如文献[7,8]采用 TEN 作为基本体元进行地层的三维建模,其特点是能够根据三维空间采样点的坐标有效地实现插值运算、几何和逻辑变换也易于切割处理及能够显示模型内部属性变化,但如果对每一地质体都进行四面体重构,不仅算法复杂而且所生成体模型的数据量巨大。文献[9]提出基于类三棱柱(ATP)概念,在用 ATP模型描述地质体时,首先要为各层的高程数据建立 TN,然后通过连接

上下层之间对应三角形来构建类三棱柱,但是地质体中肯定有断层等现象存在,在 ATP中没有考虑这种情况。针对以上构模方法,提出一种基于三棱柱体元的地质体可视方法,该方法以钻孔及已有剖面图为基础,通过上下三角形的自分解来解决断层等地质现象,再形成各层的三角形,连接具有相同标识的三角形,形成三棱柱来描述地质体。

2 三棱柱体的数据模型和数据结构

2.1 三棱柱体的数据模型

基于三棱柱的数据模型是以三棱柱体作为基本体元,三棱柱体包含的几何元素有:点、三角形边、三角形面、四边形面。它们可看成是数据模型的基本元素,在地质勘探领域,从空间对象的角度来看,钻孔是由多段线段组成的线对象,同一层面上相邻三角形构成了一个地层界面对象,相互连接在一起的三棱柱体构成一个完整的地质体对象,钻孔中层与层之间的交界可用点描述,按面向对象的观点,可将上述对象设计成不同的对象类,并以此类作为模型设计的基础。

2.2 三棱柱体的数据结构

为了使数据模型更好的建立具有空间位置、拓扑关系以及属性信息的三维地质体模型,必须设计更为详尽的数据结构^[9],为了保证剖分时整个三棱柱的数据结构保持不变,三棱柱中对于棱边有一条或两条长度为零的结构,认为是一种特殊的三棱柱。数据结构不仅要描述构成三棱柱体的几何元素空间位置和属性信息,而且要表达几何元素之间的拓扑关系以及三棱柱体与三棱柱体之间的关系,根据以上要求,下面列出了点及三棱柱体的数据结构(边、三角形以及侧面四边形数据结构略)如下:

2.2.1 点数据结构

```
Struct Tripoint {
    Int pointID           //点标识
    Int pointtype         //点类型
    Float x, y, z         //点坐标
    Int boreID            //钻孔号
    Int LayID             //层号
    Int SectionID         //点所在剖面号
    TetreVer[n]           //点所属的体
    Struct point * next    //点的指针向
```

```
Edgever[p] //点所在边
Int SectionMark //切割标志
}
2 2 2 三棱柱体数据结构
Struct Triprism {
    Int prism D //三棱柱体号
    Prism uptri //上三角形
    Prism downtri //下三角形
    quad[3] //3个侧面
    prism[5] //邻接三棱柱体
    Int Sectionprism //三棱柱体切割标志
}
```

该数据结构简单,大大减少了数据冗余,提高模型的建模速度,同时很好地维护了三维空间实体的拓扑关系,主要有点边、点与三角形、点与四边形、线与三角形、线与四边形、线与三棱柱体、三角形与四边形、三角形与三棱柱、四边形与三棱柱以及三棱柱与三棱柱的拓扑关系,这些关系都体现在数据结构中,在此不再赘述。

3 基于三角形自分解的层面 TN 建立

本文采用 Delaunay法则生成各层面的 TN,如果研究区域钻孔稀少而不能满足精度要求,可通过虚拟钻孔的增设来解决这一问题,增设后的虚拟钻孔和实际钻孔的作用一样,增设原则在文献 [10]有详述,直到钻孔数满足精度要求,钻孔经过这样的预处理后,用 Delaunay法则来构建 TN,由于有断层等现象的存在,结合已有剖面图及资料,如果在 TN生成过程中发现某些三角形边中间有断边现象,从数学上讲,这类现象类似与线段与 TN相交问题的处理,如果三角形足够小,可以防止这种现象,但这是以数据量的剧增为代价的,在此采用三角形自分解来解决这类问题,所谓三角形自分解是指将三角形分解为多个三角形的组合体,自分解在处理三角形与其他几何体相交时保持几何匹配与拓扑匹配有很大用处,如果由于断层而使三角形产生自分解,则在分解过程中断层和三角形相交的点要和三角形顶点区别对待,这样以便在后面剖面图的绘制时有所区别,自分解在后面三棱柱剖分时也要用到,一条线段与三角形相交,根据其余三角形的顶点和边相交点的个数共有 5种情况,不考虑线段与三角形某一条边重合的情况(表 1),自分解只需对第 3、第 4、第 5种相交方式进行自分解处理(图 1)。

为了保证上下三角形的对应性,如果对某一层的三角形进行了自分解操作,则对相应层的三角形也要进行这样的操作,对每一层进行 TN构建后,连接相应三角形的对应顶点形成对整个地质体的三棱柱剖分,而相邻层之间三棱柱体的侧面四边形由上下三角形三个顶点两两组合后沿钻孔按一定规则向下扩展而成,因此四边形的竖边就只能在各自的钻孔上,该建模便于模型的修改,当插入新的钻孔时,只需对 TN进行局部修改,然后对进行了局部修改的三角形沿钻孔方向修改成新的三棱柱体。

表 1 线段与 TN相交方式

Table 1 Intersecting mode of line and TN

	1	2	3	4	5
与顶点相交数	1	2	1	0	0
与边相交数	0	0	1	1	2



图 1 三角形自分解
Fig 1 Self-decomposition of triangle

4 三棱柱体的剖分与切割

4.1 三棱柱的剖分

绘制地质剖面图或篱栅图是地质勘探人员了解地质结构最常规的手段,在地质工程十分重要,在三维地质模型中,通常采用任意剖面来剖分模型,由于模型由三棱柱体组成,任意剖面实际上就是求三棱柱体与剖面的交点,由于采用体元建模方法,使复杂和内部属性丰富的模型的任意剖分算法得到简化,在此可利用平面方程判断三棱柱的各条边是否被剖面剖分,具体过程如下:

(1)判断每一个三棱柱体元与剖面是否相交,根据剖面的方程以及组成三棱柱体元边的两顶点到剖面的距离(有方向),如果距离为同号,则三棱柱体元与剖面不相交,否则相交,相交时可利用边方程和剖面方程计算其交点,如果剖面与三棱柱一个顶点、一条边或一个面完全相切,文献 [11]把这种剖分称为伪剖分,由于此时剖面与三棱柱体相交剖面面积为零,在剖面图或篱栅图上显示不出来,因此不考虑这种情况。

(2)由各交点依次相连,形成三棱柱体与剖面的交面,并依据体元各面之间的关系来排列交点,求各交点的属性值,可用顶点线性插值计算出来,所有交面取并就形成剖面图或篱栅图。

4.2 三棱柱的切割

三维模型的切割与求剖面是不同的,切割实质是对三维物体进行裁剪,在三维模型的切割处理上,一种是直接去除被切割的基元^[12],该方法容易实现,由于去除了被切割基元,切割边界很不平滑,适

合在基元形体小,数目多的模型上进行快速剖切,另一种方法是对基元进行分割与分裂操作,通过增加基元的数目将切割面从基元体内游离出来^[13~15],该方法给出了光滑的切割边界,并且通过棱柱体的自分解而保持基元数据结构的一致性,为了能在数据结构上对地层面模型的切割或挖掘进行表达,必须对基元进行分裂操作,且切割后非三棱柱的新几何体根据特定方法进一步分解为三棱柱,采用统一的数据结构能够保证切割的准确进行,在此考虑了分割的5种常见方式(图2)。

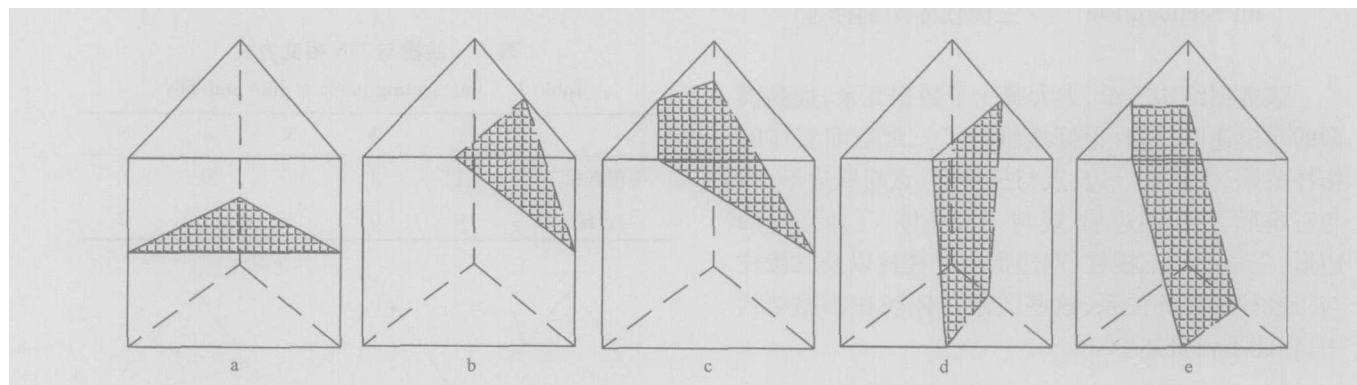


图2 三棱柱被分割的几种常见方式

Fig. 2 Common decomposition types of Triangular Prism

- a 图三棱柱被分为 2 个三棱柱; b 为 4 个三棱柱 (通过自分解产生 3 个);
c 为 5 个三棱柱 (通过自分解产生 4 个); d 为 7 个三棱柱 (通过自分解产生 6 个);
e 最复杂共有 8 个三棱柱 (通过自分解产生 6 个)

对三棱柱而言,以上5种情况的任何切割都可以利用数据结构的互补对称性和旋转对称性,在切割时规定每一条边与切割面最多只能有一个交点,可以将三棱柱体元一分为二,形成两个多面体,显然这两个多面体不是基本体元,必须对其进行自分解以便形成结构统一的三棱柱体,三棱柱的自分解就是当切割面与每一个三棱柱切割时,要求该三棱柱依照切割面分解成多个三棱柱。

三棱柱体在切割下的自分解有2种不同的方法:整体法和局部法,整体法将切割的不同情形归为几种拓扑几何类,针对每一类都有相应的自分解方法,而后根据每一种切割类型进行对号入座式处理。局部法则不对切割进行整体的分类,而只对切割面与三棱柱形成的交点进行处理,将被切割三棱柱体上所有交点按类分别处理后,最终得到三棱柱的自分解。整体法层次清晰,易于实现,但是为了分别处理切割拓扑类型需要一个较大的动作表,且难以对边界特殊情况的处理,而局部法则能灵活应对各种切割情况,且概念清晰,本文采用局部法,在具体实

现时并非按每个三棱柱与切割面的相交关系来处理,而是按体交点、面交点、线交点的层次进行处理,这样处理使得思路变得简洁,程序易于实现,根据点类对三棱柱体进行分解应注意一下两点:

(1)切割点自身类型的改变:对当前切割点处理后,切割点的类型(体交点、面交点、线交点)会发生改变,但总是由自由度高的点向自由度低的点转化(体交到面交到线交点),因此,当切割面与三棱柱体有多个交点时,也应按点类的自由度由高到低的顺序进行处理。

(2)其他点的影响:每处理一个点后,该三棱柱被分为多个三棱柱体,则会改变三棱柱上其他点的从属属性,可能会从属于分解后产生的新三棱柱体。

5 实验结果

根据本文所述方法,在VB环境下,利用OpenGL对某矿区进行基于三棱柱的建模,原始钻孔132个,再根据已有的剖面信息用文献[10]增设虚拟钻

孔的原则,内插后建模区共有 512 虚拟钻孔及实际钻孔,在此取 2 层地层作为演示,建立三维模型线框图(图 3),为了增设立体效果,对该线框图进行渲染,生成真三维地质体(图 4),以及篱栅图(图 5)。

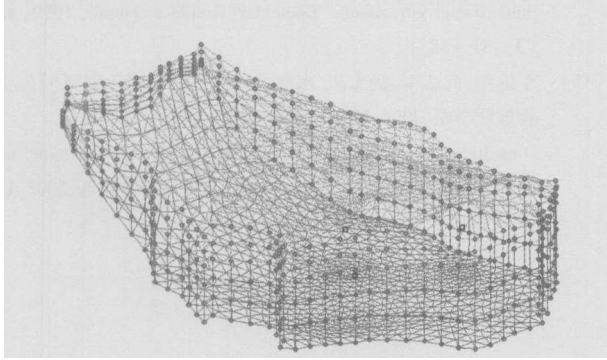


图 3 三维模型线框图

Fig 3 Wire - frame of 3D model

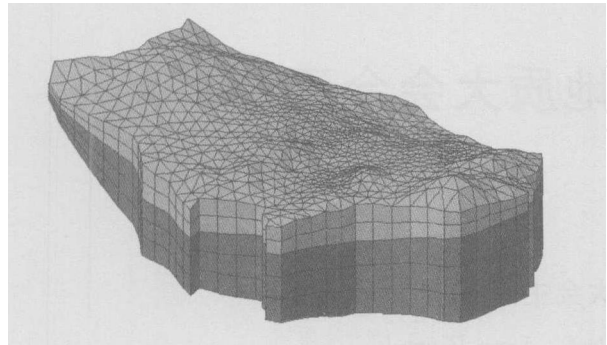


图 4 真三维地质体

Fig 4 Real 3D geo - body

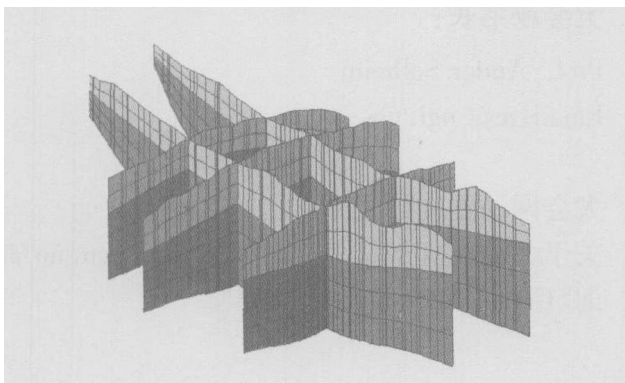


图 5 篱栅图

Fig 5 Trellis graph

6 结 论

三维可视化技术已成为 GIS 得以发展的重要组成部分,同时也提出了新的研究课题和发展方向,本文考虑断层的存在的情况下提出基于三棱柱体的建

模方法,并通过对三棱柱自分解来描述地质体元内部结构,结果表明是可行的。但由于地质现象本身的复杂性,如何准确全面进行地质体真三维构模,仍需进一步研究。

参 考 文 献

- [1] 张煜,白世伟.一种基于三棱柱体元的三维地层建模方法与应用[J].中国图象图形学报(A),2001,6(3):285~290.
Zhang Yu, Bai Shiwei An Application of 3D Stratum Modeling Based on Tri - Prism Volume Elements Journal of Image and Graphics(A), 2001, 6(3): 285~290.
- [2] 刘金义,程小苗.一种多层地层实体造型方案及其实现[J].工程图学学报,2002,23(3):51~57.
Liu Jingyi, Cheng Xiaozhou An Approach to Solid Modeling of Multi - Strata and Its Implementations Journal of Engineering Graphics, 2002, 23(3): 51~57.
- [3] Siyka Zlatanova, Klaus Tempfli Modelling for 3D GIS: Spatial Analysis and Visualisation through the Web[A]. Proceedings of the XIXth ISPRS congress[C]. Amsterdam, 2000, 1257~1264.
- [4] 张煜,温国强,王笑海,陈健.三维绘制技术在工程地质可视化中的应用[J].岩土力学与工程学报,2002,21(4):563~567.
Zhang Yu, Weng Guoqiang, Wang Xiaohai, Chen Jian Application of 3D Volume Visualization in Geology of Civil Engineering Chinese Journal of Rock Mechanics Engineering, 2002, 21(4): 563~567.
- [5] 武强,徐华.三维地质建模与可视化方法研究[J].中国科学(D辑,地球科学),2004,34(1):54~60.
Wu Qiang, Xu Hua Study of 3D Geology and Visualization[J], Science in China ser, Earth Sciences, 2004, 34(1): 54~60.
- [6] 程朋根,刘少华,王伟,陈红华.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),2004,34(2):309~313.
Cheng Penggen, Liu Shaohua, Wang wei, Chen Honghua Study and application of a 3D geological model construction method, Journal of jilin University(Earth Science Edition), 2004, 34(2): 309~313.
- [7] Dinesh Shikhave, S Gapalsamy, et al. Zeus: Surface modeling, Surface grid generation, tetrahedron volume discretization[J]. Computer & Graphics, 1999, 23(1): 54~72.
- [8] 刘衍聪,宋哲,牛文杰.基于 TEN 的 3D GIS 数据模型及其生成算法[J].计算机应用,2004,24(7):153~158.
Liu Yancong, Song Zhe, Niu Wenjie 3D GIS Data Model Based on TEN and Its Generation Algorithm. Computer Application, 2004, 24(7): 153~158.
- [9] 贺怀建,白世伟,刘新华,陈健.三维地质模型中地层划分的探讨[J].岩土力学,2002,23(5):637~639.
He Huajian, Bai Shiwei, Liu Xinhua, et al. Discussion on strata partition in three dimension strata model Rock and Soil Mechan-

- ics, 2002, **23** (5): 637 ~ 639.
- [10] 侯景儒, 黄竞先. 地质统计学及其在矿产储量计算中的应用 [M]. 北京: 地质出版社, 1982, 79 ~ 93.
Hou Jiru, Huang Jingsheng, . Geostatistics and its application in ore reserve calculation, Beijing: Geology Press, 1982, 79 ~ 93.
- [11] 芮小平, 杨永国, 奚砚涛. 一种基于三棱柱的三维地质可视化方法研究 [J]. 中国矿业大学学报, 2004, **33** (5): 584 ~ 588.
Rui Xiaoping, Yang Yongguo, Xi Yantao. Study into Visualization of 3D Stratum Based on Triangular Prism. Journal of China University of Mining & Technology, 2004, **33** (5): 584 ~ 588.
- [12] Stephane Cotin, Herve Delingette, Nicholas Ayache. Efficient linear elastic models of soft tissue for real-time surgery simulation. NRA, 1998.
- [13] Ganovelli F, Cignoni P, Montani C, et al. A multiresolution model for soft objects supporting interactive cuts and lacerations. Computer Graphics Forum, 2000, **19** (3): 271 ~ 281.
- [14] Bielser D, Maiwald V A, Gross M H. Interactive cuts through 3-dimensional soft tissue. Computer Graphics Forum, 1999, **18** (3): 31 ~ 38.
- [15] 丁继新, 尚彦军, 杨志法. 水库设计的三维可视化研究 [J]. 工程地质学报, 2005, **13** (4): 508 ~ 515.
Ding Jixin, et al. Three dimensional visualization technique for the design of reservoirs. Journal of Engineering Geology, 2005, **13** (4): 508 ~ 515.

第三十三届国际地质大会会讯

会议时间:

2008年 8月 5 ~ 14日

会议地点:

挪威奥斯陆

注册费用:

	2008年 1月 1日前	2008年 1月 1日后
全部会议:	600欧元	750欧元
部分会议:	450欧元	600欧元

现在交费及学生、陪同人员等费用将在
二号通知中确定。

大会主席:

Prof A me Bjørlykke

Email: bjoerlykke@ngu.no

大会秘书长:

Prof Ander Solheim

Email: as@ngi.no

大会网站正在建设中。

关于大会的详细信息, 可点击 [www. ngu. no](http://www.ngu.no) 查询 "Geological congress 2008"