

# 三维 GIS 中地层多比例尖灭自动建模技术

董 志

(浙江第一测绘院,杭州 310012)

[摘要] 利用地质勘察数据导入到三维系统中,运用各种三维空间构模方法,自动进行地层推理与连接,生成三维地层模型。以多数据源自动生成模型,可以方便地使地学领域中的地质工作者从繁重的地质信息获取和地质解释手工劳动中解放出来,提高了三维地层建模的速度和构建质量。

[关键词] 地质三维模型;虚拟钻孔;多比例尖灭;自动建模;三角形自分解

[中图分类号] P208 [文献标识码] A [文章编号] 1009-1742(2010)02-0076-07

## 1 前言

随着地质科学、计算机科学、空间信息科学等学科近 20 年令人瞩目的发展速度,地学信息技术作为基于以上多学科的应用,在国土资源信息化进程中发展也极其迅速,且正起着越来越重要的作用。三维 GIS 是许多地学应用领域对 GIS 的基本要求,目前商品化 GIS 软件大多以二维或 2.5 维为主,尤其是在地质模型领域,因其特殊空间对象的不规则性,很难用当前流行的 GIS 软件描述,并且三维 GIS 在地矿中的应用尚处于起步阶段,因此迫切需要对三维 GIS 理论和方法进行研究<sup>[1,2]</sup>。可视化技术是当前地学信息系统的研究热点,三维地质建模是其当前的难点。产生三维图像可视化对于理解和想象地学空间世界及其变化十分重要。近年来,三维地学可视化等问题已成为 GIS 的技术前沿和攻关热点。

笔者认为,a. 对于空间地质数据合理正确的表达是进行数据采集和管理,进行三维可视化建模分析的基础和前提;b. 基于整理好的数据,通过计算机程序对其进行处理,自动生成比较正确的三维地质实体模型;c. 对于已生成三维地质实体模型,进行地质工程上的分析应用,如开挖分析、设计施工分析等。通过以上三方面的研究,可以得出建立灾害

体地质模型的技术方法体系。数据采集和整理是基础,建立三维地质实体模型是手段,进行模型分析是目的。

文章所选取的地质数据是江苏南京地区的数据,这一地区经历了长期的地质构造活动,加上长江、滁河和秦淮河的外动力作用,缔造了南京得天独厚的地质环境,地质地貌单元多样,地质结构复杂,尤其是第四纪沉积类型多样。地质工程的三维信息系统对实际工作中的指导意义尤其重要。

## 2 地质三维空间模型和数据结构

### 2.1 地质三维空间模型的选择

在地质工程中,地质地层体及其围岩大多都成层状或大块状分布,因而采用多层面(多层 DEM (digital elevation model))模型可以建立地层模型。当考虑更精细、更灵活时,应该考虑到三棱柱的建模方法,这样可以使所采集到的地质勘察数据能够更容易地生成紧密实际的地质模型。例如建模方法更容易根据地质钻孔数据进行多比例尖灭方式生成地层体。

文章论述的重点是根据三维地质体(地质构造)的特点,使用广义三棱柱(generalized tri-prism,

[收稿日期] 2008-10-29

[作者简介] 董志(1977-),男,湖北武汉市人,浙江省第一测绘院 GIS 开发人员,高级程序员,研究方向为 GIS 和地学信息三维可视化;  
E-mail: dz2002\_888@sina.com.cn

GTP)<sup>[3]</sup>与边界表示法(B-Rep)混合模型来实现地质模型的建立。

## 2.2 三维地层建模中应用到的数据结构

### 2.2.1 三维钻孔模型

三维钻孔模型是三维地层建模的基础,三维地层建模是依据钻孔模型来进行创建的。因此三维钻孔模型的数据结构也是十分重要的。系统在读取原始数据时,读取钻孔对建模有用的信息,然后据此创建三维空间钻孔模型。为了建模推理和算法效率,这个模型主要包括钻孔信息与地层信息两个数据模型。地层信息是钻孔信息的一部分,把地层信息数据结构单独分出来了,是为了程序运行效率和处理方便。

### 2.2.2 三维地层模型

地质体基本上都是不规则空间三维体,利用计算机图形学中的曲线、曲面、块体,分别通过很多微小直线段、微小三角面和微小规则块体逼近来模拟地层岩性界线和地层曲面,即地层界面(地表曲线、地下水位面等地质层面界线)和地层曲面都分别是许多微小直线段、微小三角面和微小块体的集合。地质体三维空间数据结构是工程地质三维建模和可视化的基础,这就要求必须具备有效的分层的三维数据结构,能够确保人机交互和查询的实现。

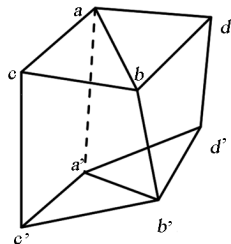


图1 GTP 普通结构  
Fig. 1 GTP common structure

如图1中 $abc$ 为上三角形, $a'b'c'$ 为下三角形。在三维地层模型中,此两个三角面片为相对应的某种地层的上下界面,平面 $abc$ 不一定平行于平面 $a'b'c'$ 。 $aa'$ , $bb'$ , $cc'$ 为不一定平行的三棱柱棱边。此基本三棱柱的6个顶点代表地质三维的空间离散点,整个三棱柱体元则表示空间地质体的一个离散基本组成单元,它不仅描述了地质体的结构,而且还能够存储与表达地质体局部的属性、体积、质量等特征属性。另外,以上基本情况有可能退化为

两种棱体:一点重合的三棱柱和二点重合的三棱柱,具体情况如图2所示。

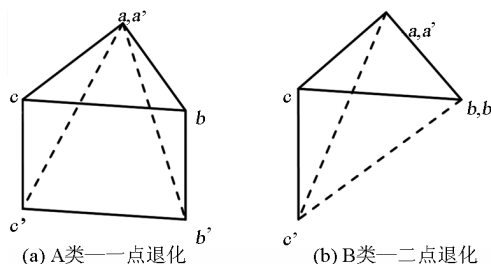


图2 退化的三棱柱

Fig. 2 Degenerated triangular prism

## 3 三维地层的自动建模方法

三维地层模型的建立是进行三维地层可视化分析的基础,提供进行分析的数据基础和数据环境。在三维地层模型的基础上实现统计、挖切等空间分析。

### 3.1 原始数据的获得

三维地层数据的获取是三维地层自动建模的第一步,根据原始钻孔数据建立基本三维钻孔模型。建模数据主要来源于钻孔资料,包括各岩层、土层分界点的 $x$ , $y$ 坐标,高程( $z$ 坐标)、岩性等。这些数据点具有离散、有限、稀疏、不规则等特点,建模前首先要进行预处理,即进行钻孔内地层的划分、排序和统一编号等<sup>[4]</sup>。地层的划分层数可以根据钻孔遇到的岩层分界点综合分析获得,相同的岩性并且垂直方向位置相似的看作同一层;根据钻孔所遇到的岩层竖向 $z$ 坐标的关系和层与层之间压与被压的上下关系可以确定地层的空间顺序关系,进行地层排序。对钻孔中地层采用自地表向下递增的顺序进行统一编号,这将给下一步的构造推理带来极大方便。表1为钻孔基本资料,其完成日期均为2008年7月,表2为钻孔相关地层信息资料。

表1 钻孔基本信息

钻孔编号	横坐标	纵坐标	孔口标高	孔深	m
W37	102 715	119 900	23.3	11.6	
W36	106 842	116 100	24.3	13.7	
W38	107 330	118 040	8.4	20.0	
W25	113 713	120 669	12.1	19.8	
W16	115 812	129 525	16.5	16.5	
W14	116 010	131 475	15.2	7.7	
W13	116 340	118 535	9.3	29.2	
W11	117 745	117 610	22.3	11.7	
W10	118 933	116 600	7.8	32.0	

表 2 钻孔地层信息

Table 2 Stratum information of drill

地层分 层编号	流水号	钻孔 编号	标准 层号	层底埋 深/m	岩石描述
1	1	W36	①	3.7	素填土;黄褐色
2	1	W36	④a1-2	2.7	黏土;黄褐色
3	1	W36	⑦1	11.5	粉质黏土;褐色
4	1	W36	⑧1	11.7	强风化长石斑石
1	2	W37	④a1-2	13.5	黏土;黄褐色
2	2	W37	⑦1	2.7	粉质黏土;褐色
3	2	W37	⑦2	5.2	粉质黏土;黄灰色
1	3	W33	①	0.6	素填土;黄褐色
2	3	W33	③a1-2	18.6	黏土;黄褐色
3	3	W33	⑧1	20	强风化长石斑石

3.2 基于钻孔的三维地质体 GTP 建模

文章所涉及到的基于钻孔的三维地质体建模方法是先以钻孔为单位,从地表开始到地下建立三棱柱体模型。根据对三棱柱体上下三角形进行追踪得到各地层交界面的局部数字高程模型 (DEM)。获得 DEM 的基本思想是搜索正负面属性不同的且正负面属性保持一致的相邻三角形。三棱柱体建模可以采用类似于 Delaunay 三角网的构建方法,但它除了构建不规则三角网 (triangulated irregular network, TIN) 之外还需在相邻的层面之间构建一系列的三棱柱体。三棱柱体的建模以地表面 (或最上层) 钻孔中心点为基础,一旦建模区域内钻孔确定,由它们构成的 Delaunay 三角网也就唯一确定。而相邻层之间的三棱柱体的侧面四边形由 TIN 中三角形三顶点的组合后沿钻孔按一定规则向下扩展而成,这样侧面四边形的侧棱边只能在同一条钻孔上,即使钻孔倾斜也能保证建立唯一的侧面四边形与三棱柱体。钻孔曲线上点的结构为 (坐标, 地层属性编码), 其中地层属性编码为该点向下邻接的地质体 (或岩性) 编码。具体处理如下:

- 1) 根据钻孔孔口坐标按 Delaunay 三角网的构建方法生成一个三角形网。
- 2) 选取三角网中一个未处理的三角形, 将这个三角形设置为第一个三棱柱体的上三角形。
- 3) 根据上三角形点的属性编码沿 3 个钻孔向下扩展新三角形 (称为下三角形), 扩展规则是: 如果三角形 3 个顶点的属性编码都存在, 则新三角形顶点均为相应钻孔的下一个点, 如图 3(a) 所示; 如果编码有部分不存在, 则编码存在的钻孔上新三角

形顶点为相应钻孔的下一个点, 而编码不存在的钻孔上新三角形顶点保持不变, 即与上三角形顶点相同, 并据此进行三角形自分解, 插入虚拟钻孔, 如图 3(b) ~ 3(c) 所示。实际这一步就是进行三维地质构造体的地层连接推理过程。

4) 根据上下三角形对应关系构建棱边、侧面四边形和三棱柱体, 记录三棱柱体的描述信息, 并将分割后新产生的下三角形网置为上三角形网, 并据此产生三棱柱。

5) 重复 3), 4) 步骤, 直到上三角形顶点均为三个钻孔的底部点为止。

6) 重复步骤 2), 直到地表面钻孔孔口的 Delaunay 三角网处理完成为止。

图 4 为基于钻孔资料的 GTP 生成流程图。

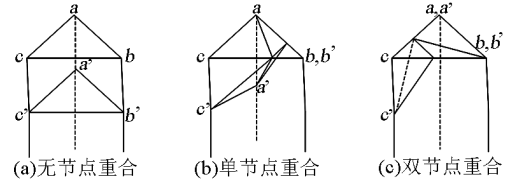


图 3 根据三角形上各顶点坐标剖生成 GTP  
Fig. 3 GTP generated based on vertex coordinate sections of triangle

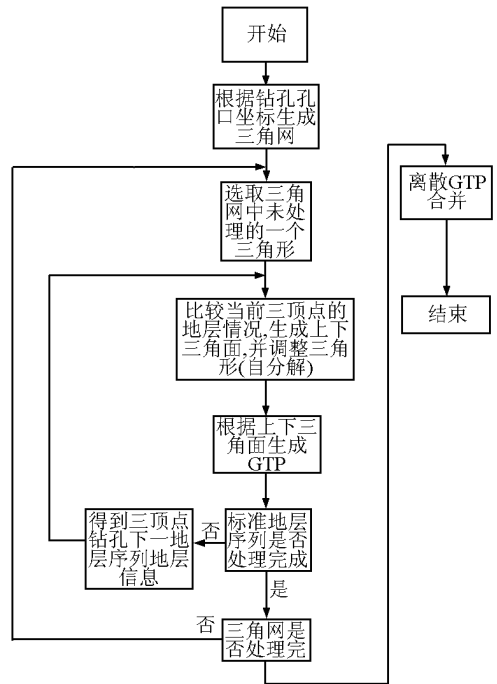


图 4 基于钻孔数据生成 GTP 流程  
Fig. 4 GTP generated based on drill data

## 4 建模的具体现实

### 4.1 根据钻孔的原始勘察数据生成表面 TIN

主 TIN 即主三角网,是指以地质钻孔的勘察数据起始坐标,结合研究区域的边界条件、等高线等,经过三角网加密算法生成的一个三角网。主 TIN 不仅定义了待构建的三维地质模型的外边界,还能够表达建模区域的各个地层界面的拓扑关系,可以看作是建模区域内的每一套地层表面的拓扑关系的模板,按照地层顺序从上到下贯穿于整个研究区域的所有地层界面,是各个地层界面的原始骨架。这样可以保证各个地层层面具有确定的,上下一致的拓扑关系,能够极大地简化后续处理复杂度,简化计算。

### 4.2 根据钻孔地层信息进行三角形自分解

根据 Delaunay 对三角形剖分后,对任意一个未处理的三角形进行地层的自动对比和三棱柱生成。如图 5 所示,系统进行三角形自分解,三角形按比例进行分解。

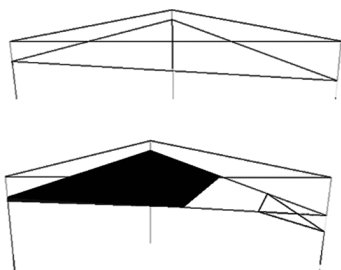


图 5 地层界面上插入的虚拟钻孔,进行三角形分割

Fig. 5 A virtual drilling inserts into stratum interface and splits the triangle

具体算法为:根据钻孔的初始坐标进行剖分后,得到一组三角形集合。为了适合计算机数字化处理,分别以 0,1,2 为三角形顺时针位置编号, $a$ ,  $b$ ,  $c$  为初始三角形三项点钻孔的编号。故最初时 0 处钻孔如当前地层存在记为  $a$ , 1 处钻孔如当前地层存在记为  $b$ , 2 处钻孔如当前地层存在记为  $c$ , 则 3 个钻孔关系记作  $\triangle abc$ , 作为待处理的初始基本单元,如图 6 所示。

在对某层地层界面初始三角形进行尖灭的三角分解处理过后,总可以得到以下任意一种情况。这一点保证了算法是收敛的,即处理后产生的新三角形地层数据必在此集合内。如图 7 所示,在当前三角形处理单位中  $a$  点为当前地层信息存在位置

的所有可能情况, $b$ ,  $c$  点地层信息存在情况类似,以此类推。

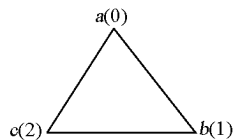


图 6  $\triangle abc$  为待处理的初始基本单元

Fig. 6  $\triangle abc$  is the pending initial basic unit

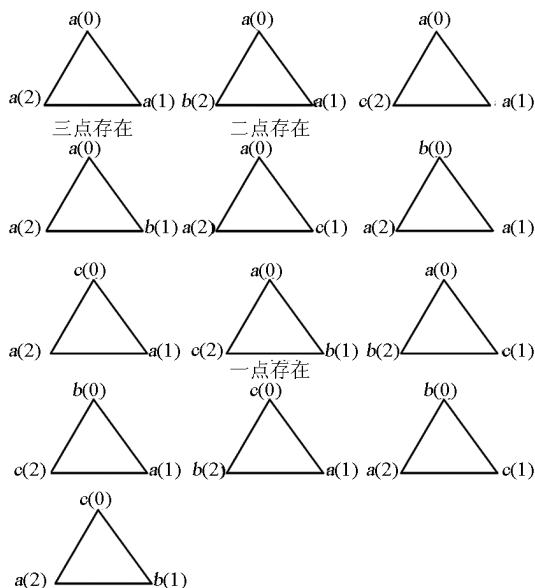


图 7 钻孔的当前地层信息存在位置

Fig. 7 The existed place of the currently drilled strata information

以上各种记录集作为上层三角网的各顶点钻孔集合,每次根据当前钻孔地层信息进行连接推理,调整分解以上各三角形集合,并生成三棱柱。基于以上的集合限定,对当前钻孔地层的信息进行对比,可以把地层对比的地层消失现在归类为以下情况: $a$ ,  $b$  钻孔存在, $c$  钻孔尖灭; $a$ ,  $c$  存在, $b$  尖灭; $b$ ,  $c$  存在, $a$  尖灭; $a$  存在, $b$ ,  $c$  尖灭; $b$  存在, $a$ ,  $c$  尖灭; $c$  存在, $a$ ,  $b$  尖灭。分别对这 6 种情况进行处理。根据所设定的尖灭比例参数,建模程序对上层三角形进行尖灭处理,根据新坐标与上三角形调整分解三角形,并生成三棱柱。

尖灭的比例由建模操作者设定,默认为 1/2 尖灭,也可以设为其他比例,如 1/3, 1/4……程序根据参数,在进行三角形边界计算点时,按此设定参数在

边界上插入点。如果设计为  $1/2$ , 则程序在三角形边长的  $1/2$  位置进行插入虚拟点, 实现  $1/2$  尖灭的效果。在程序设定计算公式时一定要考虑到点坐标的方向问题, 确定某点向另一点计算值的方向。否则在计算中, 会导致 GTP 顶点坐标的错误。将图 8 中各情况作为地层上三角形, 进行  $ab$  点尖灭处理和三角形自分解。

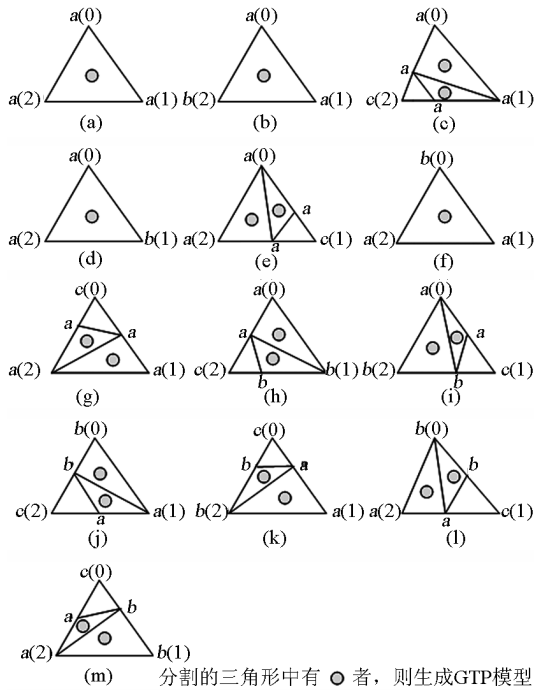


图 8  $a, b$  存在,  $c$  点尖灭时三角形自分解情况  
Fig. 8 The self-decomposition of a triangle when  $a$  point and  $b$  point exist,  $c$  point disappears

在图 8 中, 可以进行归类, 将自分解情况相同的归为同种类型, 简化数据操作。如 1, 2, 4 为同一类即可统一程序处理。同理, 3, 8, 10 归为一类, 5, 12 归为一类, 7, 11, 13 归为一类, 9, 12 归为一类, 以此类推。分解所得到的三角形中, 凡是顶点只为  $a$  或  $b$  则进行上下三角形缝合保存分割结果并生成三棱柱, 否则保存分割结果不生成三棱柱。

程序从一个完整的三角形开始根据地层连接推理自分解, 每次的计算结果都要保存作为下一次运算的上界面。三角形不停进行分解, 在这个大三角形的区域中, 小三角形集合组成元素不停地增加或者保持不变, 直至钻孔地层信息处理完毕。从另一个角度来说, 这个分解过程就是不停地在三角形边界插入虚拟的钻孔点, 也是在不停地进行地层的推

理连接。

### 4.3 三角形自分解后的三棱柱缝合

在分割完一次三角形后, 就对上下三角形面进行处理, 对于节点不重合, 单节点重合, 双节点重合分别进行缝合, 连接上下顶点生成边棱, 在缝合时要去掉重合点。在缝合过程中还要注意保持模型矢量方向的统一, 即法线一致, 图 9 为缝合结果。

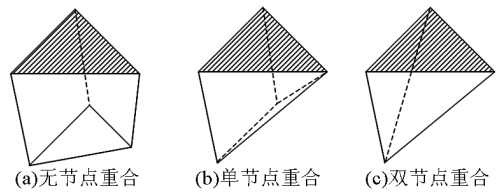


图 9 上下三角形进行缝合

Fig. 9 Stitching the upper and lower triangles

如图 10 所示为试验数据某 3 个钻孔模型的分割过程与缝合结果。其中的三角形自分解分割规律严格遵循 4.2 节中的各种情况。在建立完地质体三维模型之后, 要对模型进行检查, 如果有不符合要求的地方, 则需要对地质勘察数据的重新审核修改, 并且对新的原始地质勘探数据进行重新建模。

### 4.4 区域钻孔任意比例尖灭地质生成的实例

图 11 ~ 图 14 是实现的依据某区域地质钻孔勘察数据所生成的地层效果图, 导入钻孔数据如图 11 所示; 交互式设置半自动建模参数如图 12 所示; 运算后生成的 GTP 地层如图 13 所示; XX 火车站经剪切后合成的混合模型如图 14 所示。

## 5 结语

结合以前的建模方法, 提出了新的基于 GTP 模型结合虚拟钻孔建模方法; 研究了在三角形自分解的基础上进行棱柱剖分, 进行上下三角面缝合生成 GTP 的建模方法; 利用 VC++ 实现了该建模方法。实验证明其建模方法是可行的, 并且能十分方便地利用剪切技术对建立模型进行地质工程上的各种应用, 如隧道设计、开挖分析、截面分析<sup>[5]</sup>等。

但该建模方法有需进一步改进的地方, 如采用的地层建模自动比对方法基本是靠强制自动推断, 没有引入专家系统, 因此还需要更多地进行研究; 同时, 对于钻孔柱状图、平面图、地质剖面图、槽探数据、竖井展布图和平洞展布图等, 这些地质勘察数据在三维空间展布后, 如何进行地层的对比是目前阻碍更好建模工作进行的一个亟待解决的问题; 另外

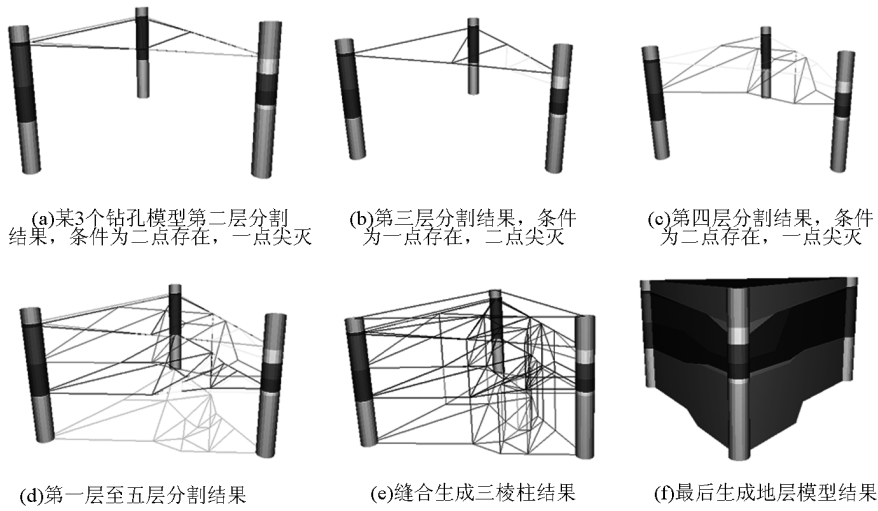


图 10 某三个钻孔模型的分割过程与缝合结果

Fig. 10 The process of splitting a three - drillings and the result of stitching

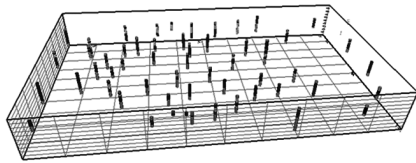


图 11 钻孔模型

Fig. 11 The drilling model



图 14 XX 火车南站地表  
地下剪切混合模型

Fig. 14 Shearing mixed model  
on XX Railway Station surface  
and underground

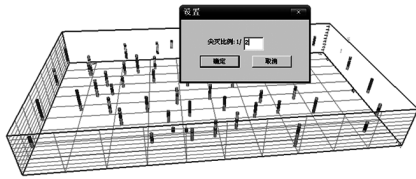


图 12 设置建模参数

Fig. 12 Setting up modeling parameter



图 13 自动建模后所生成的地层

Fig. 13 Strata generated by  
auto - modeling

模型拓扑化方面还没有深入。因此文章中论述的方法还需要进一步的研究,推陈出新,以形成更为成熟的三维地质体建模方法体系。

#### 参考文献

- [1] 吴冲龙. 计算机技术与地矿工作信息化[J]. 地学前缘, 1998, 5(1-2):343-355
- [2] 吴冲龙. 资源信息系统[M]. 武汉:地质出版社,2004
- [3] 程朋根, 龚健雅, 史文中, 等. 基于似三棱柱的地质体三维建模与应用研究[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2004, 29(7):602-607
- [4] 田宜平, 袁艳斌, 李绍虎, 等. 建立盆地三维构造—地层格架的插值方法[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 2000, 25(2):191-194
- [5] 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, 2000, 25(3):306-310

# Modeling technology digital geologic stratum body in the proportion of pinch in 3D GIS

Dong Zhi

(The First Surveying and Mapping Institute of Zhejiang Province, Hangzhou 310012, China)

[**Abstract**] Geological prospecting data into three – dimensional system and various three – dimensional modeling methods were used to reason and connect the formation of stratum automatically to generate three – dimensional model of formation. The modeling methods can easily liberate geological workers in the field of water conservancy and hydropower from the heavy geological information access and geological interpretation of the manual labor, thus enhance the speed of three – dimensional stratum modeling and also the quality of construction.

[**Key words**] three – dimensional digital geologic model; virtual borehole; multi – proportion of pinch; automatic modeling; decomposition of triangular itself

---

(上接 75 页)

## Hydraulic winder safety design based on hazard analysis and risk assessment

Peng Youduo, Gao Guanghui, Guo Yingfu, Wu Lixin, Li Xin

(Hunan Provincial Key Laboratory of Health Maintenance for Mechanical Equipment,  
Hunan University of Science and Technology, Xiangtan, Hunan 411201, China)

[**Abstract**] In this paper, the safety capability was briefly introduced, the hazard analysis and risk assessment through which the hazard value confirmed and the most important subsystems ascertained was carried through, the safety reliability intending and distributing of subsystems were carried out and the safety designing outline was briefly analyzed. All the above work could provide theoretic foundation for safety reliability designing of hydraulic winder.

[**Key words**] mine hydraulic winder; safety design; hazard analysis; risk assessment; safety reliability