

一种基于三棱柱体体元的三维地层建模方法及应用

张煜 白世伟

(中国科学院武汉岩土力学研究所, 武汉 430071)

摘要 传统的基于表面的数字模型在构建地层时会导致地层模型显示和分析的复杂化, 例如在基于剖面的地层轮廓重建时, 不同剖面之间轮廓线的分叉问题以及对应和拼接问题等。为了有效地显示三维层状地层的结构, 建立了一种基于三棱柱体体元的数字地层模型, 同时给出了相关的剖分算法。由于体元的引入, 致使相应的剖面和切割算法得到了简化, 并解决了工程地质中常见的层状地层模型任意剖面和任意切割的显示问题, 也使工程中的多种操作可以在计算机上得到模拟。同时, 还列举了基于该模型的相关应用。

关键词 数字地层模型 三棱柱 体元 数字建模

中图法分类号: P623.6-39 P285.1-39 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-8961(2001)03-0285-06

An Approach of 3D Stratum Modeling Based on Tri-Prism Volume Elements

ZHANG Yu, BAI Shiwei

(Institute of Rock and Soil Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071)

Abstract It's difficult to build a 3D stratum model based on surface model because the stratum is multi-layer structure. For example, Shape from planar contours is often used in stratum modeling but correspondence problems, tiling problems and branching problems are difficult to be solved. Volume elements can describe both surface and interior of the model. In this paper, a method based on tri-prism is used to build a stratum model. The algorithms of sections and incisions of model are presented here in detail. This method is perfect to model the stratum of layer-structured. Some virtual operations of stratum can be easily realized in computer. The results of application show that the approach introduced here is practical and effective in 3D stratum modeling.

Keywords Digital stratum model, Tri-prism, Volume element, Modeling

0 引言

科学计算可视化是当前计算机学科的一个重要研究方向, 它的出现有效地解决了目前海量科学数据高效处理和解释这一难题。现代科学提供数据的手段多种多样, 且所获得的信息也无法用常规方法进行交流和, 其典型的例子有医学扫描图象、人脑图谱、流体流动仿真和飞行器地表飞行仿真等等^[1], 另外在地质领域, 由于大量珍贵的地层钻探数据需要用有效的方式进行直观地表达, 因而致使可视化技术成为地质研究和工程勘察领域必不可少的手段。

在三维可视化系统中, 首先要解决的是寻找一种合适的数据结构和数学模型。由于数字表面模型常采用格网或三角网表示, 它是一种基于面片的模型, 其基本结构是面结构的三角形, 由于人们只关心地表的信息, 故三角形即成为数字地面模型的基本元素^[2]。而在地层模型的三维可视化研究中, 也存在较多的以使用面结构为主的方法^[3~5], 它们尽管也可处理非常复杂的地质结构, 但是利用传统的表面数据结构难以解决剖面之间的轮廓线分叉、对应和拼接及内部属性显示等问题, 另外, 由于在自然环境和计算模型中, 许多对象和现象只能用三维体数据表示, 因此, 基于体元或体素的建模方法得到越来越

多的应用。建模时,常用的基于体结构的数据多采用四面体或六面体结构。虽然六面体结构多用于显示等值面或断层,在医学中应用也较广,但是在用钻孔获取的地层数据建立模型时,却有一定困难,而且由于六面体较规则,难于进行结构上的分解,因而在对模型进行切割操作时,将会导致数据结构的复杂变化;而四面体结构在表达复杂结构上则较灵活,因此它是三维模型的基本体元,虽然它能够分解,也易于切割处理,又能够显示模型的内部属性变化,但使用四面体来表示地层也会导致大量的冗余数据。本文针对地层结构的上下对应关系和地层层面的表达方式,提出了一种行之有效的体元数据结构表示方法,该方法简化了对于由复合地质层构成的数字地层模型进行任意剖面显示和任意切割的算法,因而便于对地层模型进行虚拟的操作,同时也能方便地转换成四面体结构,以便显示模型的内部属性。

1 基本体元——三棱柱的结构及其剖分

1.1 三棱柱体元的定义

在三维地层模型中,地层面由钻孔数据插值拟合而成,其上下对应的不同层之间则是由规则格网分解而成的三角网,由于它们在水平面上的投影是相同的,因此,上下对应三角形和竖直方向的三条棱即构成了三棱柱体结构,只要上下表面是三角形,而三条棱相互平行即可,对于棱边有一或两条长度为零的特殊结构也是三棱柱基本体元结构。如图1所示, $p_0, p_1, p_2, p_3, p_4, p_5$ 即构成通常意义上的三棱柱,而 p_2, p_3, p_4, p_5 和 p_0, p_1, p_2, p_3, p_4 也构成三棱柱体,但在结构上,仍保留6个顶点,这样,在 p_0 到 p_5 中可能存在三维坐标值完全相等的情况。另外,每个三棱柱体元可以有各自的属性,如所属地层层号、所属切割块的块号、每一面的法线向量等等。

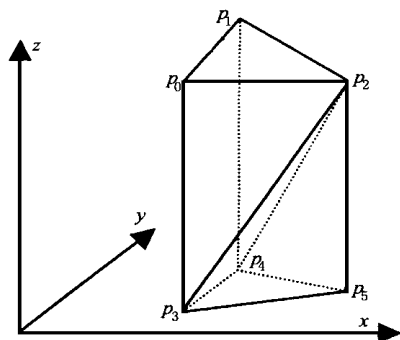


图1 三棱柱体结构

1.2 三棱柱体元的切割和剖分

由于地层模型是以三棱柱体为基本体元,为了能在数据结构上对地层模型的“切割”或“挖掘”进行表达,要求基本体元能够进行分解,且分解后仍能由基本体元构成,以形成数据结构上的一致性。其中,对于三棱柱体的分割一共存在5种不同的构形,如图2所示。

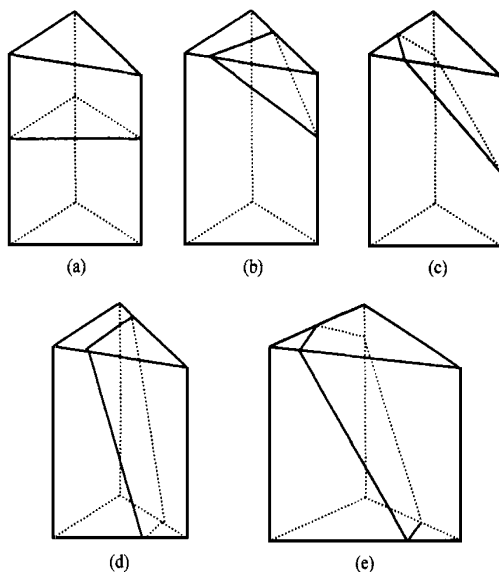


图2 三棱柱体的切割方式

这5种切割组成了对三棱柱的基本切割方式,它类似于三维体素级重建中的移动立方体法(Marching Cube)^[1,6,7],而且对棱柱体,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,这样,即将三棱柱体元一分为二,并形成两个多面体。虽然这两个多面体不是基本体元,但却是棱边垂直于水平面的棱柱体,它可以再次进行剖分,以形成一个或多个三棱柱体。

图2(a)被剖分为2个三棱柱体元,图2(b)被剖分为4个体元,图2(c)被剖分为5个体元,图2(d)被剖分为7个体元,图2(e)被剖分为8个体元。在进行剖分时,尽管被剖分的体元数量会成倍增加,但实际被一次切割的体元总数并不多,因此总的体元数只会稍有增加。现以图2(e)为例来进行讨论,由于它是剖分中最复杂的一种情况,因此也最具有代表性。图3即是对图2(e)进行剖分的示意图,其中 $abcde$ 是对体元的切割平面,它穿过上下平面和一条棱,为了满足棱柱体上下一一对应的关系,必需对上下三角形补充两条连线 ae 和 cd ; 于是在棱柱中即形成了由

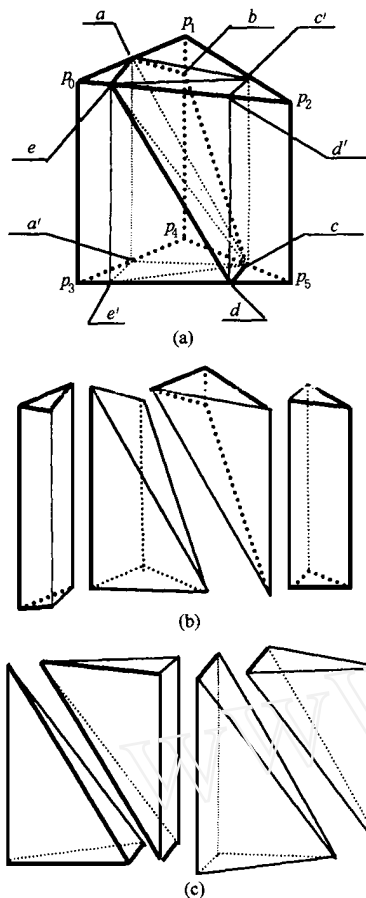


图3 三棱柱的剖分

eac $d'e'a'$ cd 构成的四棱柱, 将上述四棱柱分解成如图 3(c) 部分, 其余的部分分解为如图 3(b) 部分, 这样一共形成 8 个新的棱柱体, 其中有 6 个是特殊的棱柱体, 但仍满足上述对基本三棱柱体元的定义。以图 3(c) 中左数第 1 个三棱柱为例, 它是由图 3(a) 中 $ecde'$ 的四面体构成, 该三棱柱各点坐标值为 $p_0 = e, p_1 = e, p_2 = e, p_3 = c, p_4 = e, p_5 = e'$; 并且在得到各点坐标值后, 还要同时计算各三棱柱体每个平面的法线向量, 以便于在显示时进行光照处理。由于基本体元被切割, 因此必需对新的体元重新编号, 并建立新的拓扑关系, 这样在数据结构没有发生变化的情况下, 模型即对切割操作进行了重新调整。

2 地层三维模型的建立和显示

2.1 建模

地层模型是根据钻孔探测到的地层岩性数据通过插值计算而得到的, 这里针对的地层主要指沉积岩层, 而对于变质岩、火成岩等复杂岩层, 由于通过钻孔得到的数据已经不可靠, 层面也无法通过插值获得,

必需另寻途径。即使是沉积岩, 由于层与层之间存在交叉, 有的层甚至只出现在某一局部(如透镜体), 因此, 在得到各层的插值平面后, 在层与层之间的交叉处还要求出交线, 交线两边的层面需依照规定进行人工或自动取舍。若遇到断层, 则必需人工另行处理。

地层层面的插值算法采用了双三次 B 样条有限元分块内插方法, 即首先生成规则的格网, 然后将格网剖分成三角形, 它是建立三棱柱体元的基础, 但不同层之间的交线并非在格网生成时产生, 而是在三棱柱体元生成时自动生成。在进行格网剖分时, 首先判断本层网格与下一层(本层以下任意一层) 网格是否相交, 若相交, 则求出交点(如图 4 所示) 点 4、5 即为交点, 点 0、1、2、3 为格网, 连接点 0、4、5 即将格网剖分为 4 个三角形, 而且这些三角形必有一些位于交线另一侧, 然后检测位于交线不同边的格网点高程, 假设图 4 中点 2 的高程小于当前层下一层对应点的高程, 依照地层层号的规定, 则将点 2、4、5 构成的三角形舍去, 即它不属于当前层。而对于上一层的对应网格, 尽管没有相交, 也必须依同样水平坐标划分三角形, 这样才能形成三棱柱体。在形成三棱柱体时, 由于当前层点 2 已经舍去, 因此, 当前层上一层的点 2 必须与当前层下一层的点 2 共同构建棱柱体。图 5 所示为地层剖面, 第 2 层与第 3 层相交, 细的垂直实线为该处格网, 虚线表示该格网内由 2、3 层交线所形成的上下对应的面。图 6 为建立在棱柱体体元上的格网示意图, 其中, a 表示当前层, b 表示上一层, 同时, a 所指的位置表示当前层与下一层存在交线, 说明当前层在此处逐渐消失。c 表示上一层所生成的对应于当前层的交线, 当前层的下一层并未在图中画出。这样每一层都采用以上算法进行运算, 最后即形成基于三棱柱体元的实体三维地层模型。

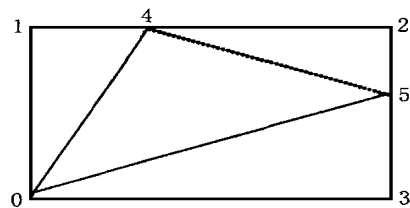


图4 格网单元剖分

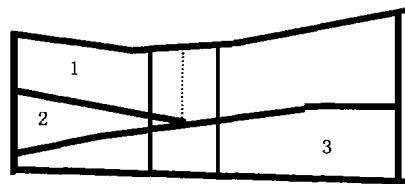


图5 地层相交的剖面示意

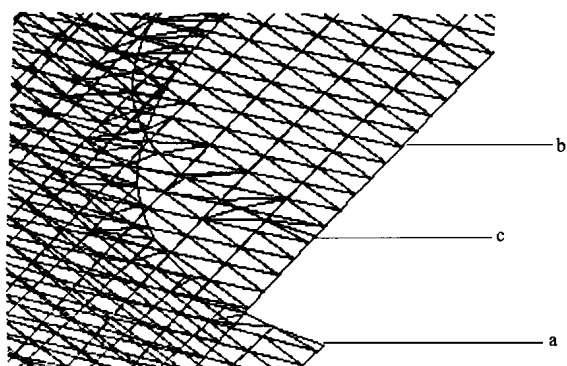


图6 格网示意图

2.2 模型显示

由于模型是建立在体元基础上的,而且地层模型一般都是多层,因而将导致产生巨大数量的体元,以一个简单的应用为例来说明体元数量,如某处地层,采用 50×50 格网,地层为9层,这样产生的三棱柱体为50 000个左右,若在此基础上再进行反复多次切割,还会导致体元数大量增加(除非将被切割体元抛弃),因此这将影响模型显示的操作。实际上,在体元模型建立或剖分时,首先要判断三棱柱体体元的3个侧面是否是地层模型的侧面或切割面,若是,则设置该侧面显示,这样,由于大量的位于同一层中央的三棱柱只显示了上下平面(在多层同时显示时,还可以不显示下平面),故显示平面数量将大大减少,因而也加快了显示速度。实际上,被处理的数据结构采用的是体元,而显示时却转化为面结构。

3 地层剖面

工程地质人员在了解地层结构时,多采用观察

二维的地质剖面图的方法,因此,数字地层模型的剖面图对工程地质人员来说,是非常重要的。由于本文地层模型是采用体元表示,因此模型的任意剖面也是基于体元计算出来的。尽管切割也能形成剖面,但是计算和存储代价太大,所以将采用另外一种算法:

图7为一剖面穿过三棱柱体元的示意,该三棱柱共有9条边,所以该剖面算法首先求出每条边是否与剖面有交点,且求剖面的关键是如何按顺序将这些交点排序。图7中假设将三棱柱的9条边分别定义为: p_0p_1 为1, p_1p_2 为2, p_2p_0 为3, p_3p_4 为4, p_4p_5 为5, p_5p_3 为6, p_0p_3 为7, p_1p_4 为8, p_2p_5 为9,然后可以依此建立一个查找表,例如,边1若存在交点,则边2、3、4、7、8中必然存在两个交点,它们和边1的交点相邻,若找到其中一个,并设置标识,依此反复进行,即可以按顺序找到所有交点,这样即形成一个多边形的面。若剖面的交点正好在顶点上(尽管可能性非常小),则存在相邻点的边将增多,例如若交点位于 p_0 点,则边1、2、3、4、6、7、8、9都有可能存在邻点,按以上方法同样可以求出剖面。图8是剖面的显示结果,该地层模型包含了11种不同性质的土层,且形成的层面数多达20个左右,图中显示了4个纵剖面,1个

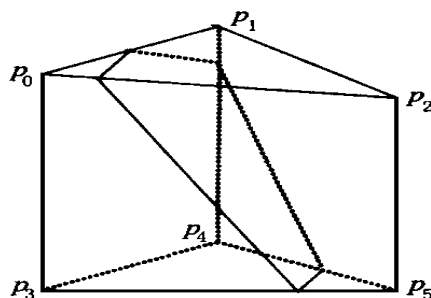


图7 剖面

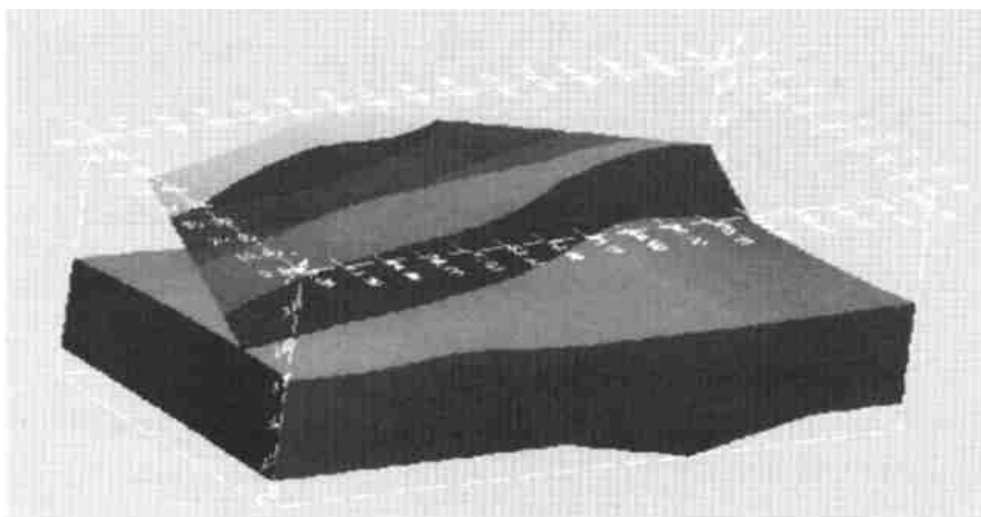


图8 任意剖面

横剖面 and 2 个任意剖面

4 基于三棱柱体元的数字地层模型的应用

由于地层模型是基于体元结构的,因而使得地下不同层之间的变化能得到反应,除了能对模型进行常规的绘制等值线、任意剖面、坡度和坡向等基于面模型的分析外,还具备有一些特有的基于体元结构的操作特征,如对模型的任意切割、开挖、钻探和基于体结构的漫游等等,这样就使对地层模型的虚拟化操作成为可能

4.1 虚拟钻探

在获得地层实体模型后,即可知道地表任一点下的地层结构和分布,假设在该点处钻孔,若给出孔深,即可以获取像钻探一样得到的岩芯结构,这些数据实际上是由已知的钻孔数据插值拟合求出的。首先给出钻探数据在水平方向的 x, y 坐标,因为本文所定义了三棱柱体在水平面投影为一个三角形。这样即可使问题简化为平面内一点是否位于某一三角形内的问题,若是,则求出该三棱柱与钻孔的交点,于是便获得钻孔中岩层的分布

4.2 基坑开挖

基坑开挖是建筑施工中重要的一步,施工单位除了关心被挖后基坑壁的应力分布外,地下地质结构、含水层的分布、开挖体积和开挖量的大小等等也都是需要考虑的重要因素。通常,在地表平面给出开挖深度和每一平面的坡向角后,即可通过这些已知条件来确定基坑合围平面,然后再将这些平面与地层模型进行切割,这样位于基坑合围平面内的部分

就被切掉。由于模型是基于体元的,因此在开挖部分就可以根据不同体元性质来计算开挖量,且开挖后基坑内的地质分布也将容易求出。在实现切割时,要求出每个体元是否与基坑合围体相交,最后只剖分那些相交的三棱柱体元,以便加快切割速度,进而减少体元数量

4.3 漫游

大家知道,对三维地层模型进行漫游是一种有效的虚拟观测手段,因此在计算机硬件速度允许的情况下,通过连续地调整视点和方向,即可以选择最佳角度来观察感兴趣地层的分布,例如在隧道开挖的模拟过程中,若隧道在某一地层下可用少数简单平面拟合,则可将该隧道在模型上挖出,然后将视点和光源移入隧道内便可清楚地观察隧道壁的岩层分布,这对在该地层下进行工程开挖具有重要的参考价值

5 实验结果与讨论

基于三棱柱体体元结构的数字地层建模是三维地层可视化系统的一部分。该系统的开发是基于 Windows 平台,用 C++ 和 OpenGL 来实现的,它要求对三维地层能够提供多种观察手段,如旋转、正射和透视以及漫游进行“实地考察”,且能够分层显示,还可显示任意剖面,并能够对地层进行随意切割,此外还能研究和计算开挖体的岩石性质分布、体积和能在三维状态下进行拾取和查询等等。图 9(a) 即为一地层模型,图中透明层为含水层;图 9(b) 显示了该模型中的 3 层;图 10(a) 为任意切割和开挖结果显示;图 10(b) 为横剖面 and 纵向切割结果显示;图 10(c) 显示的为模拟开挖的隧道;图 10(d) 显示隧

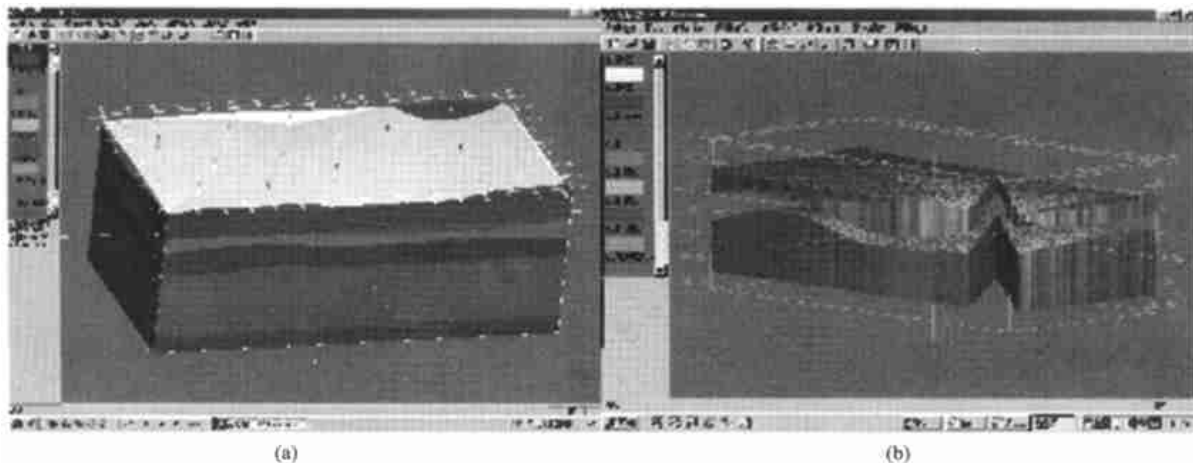


图9 地层模型显示结果

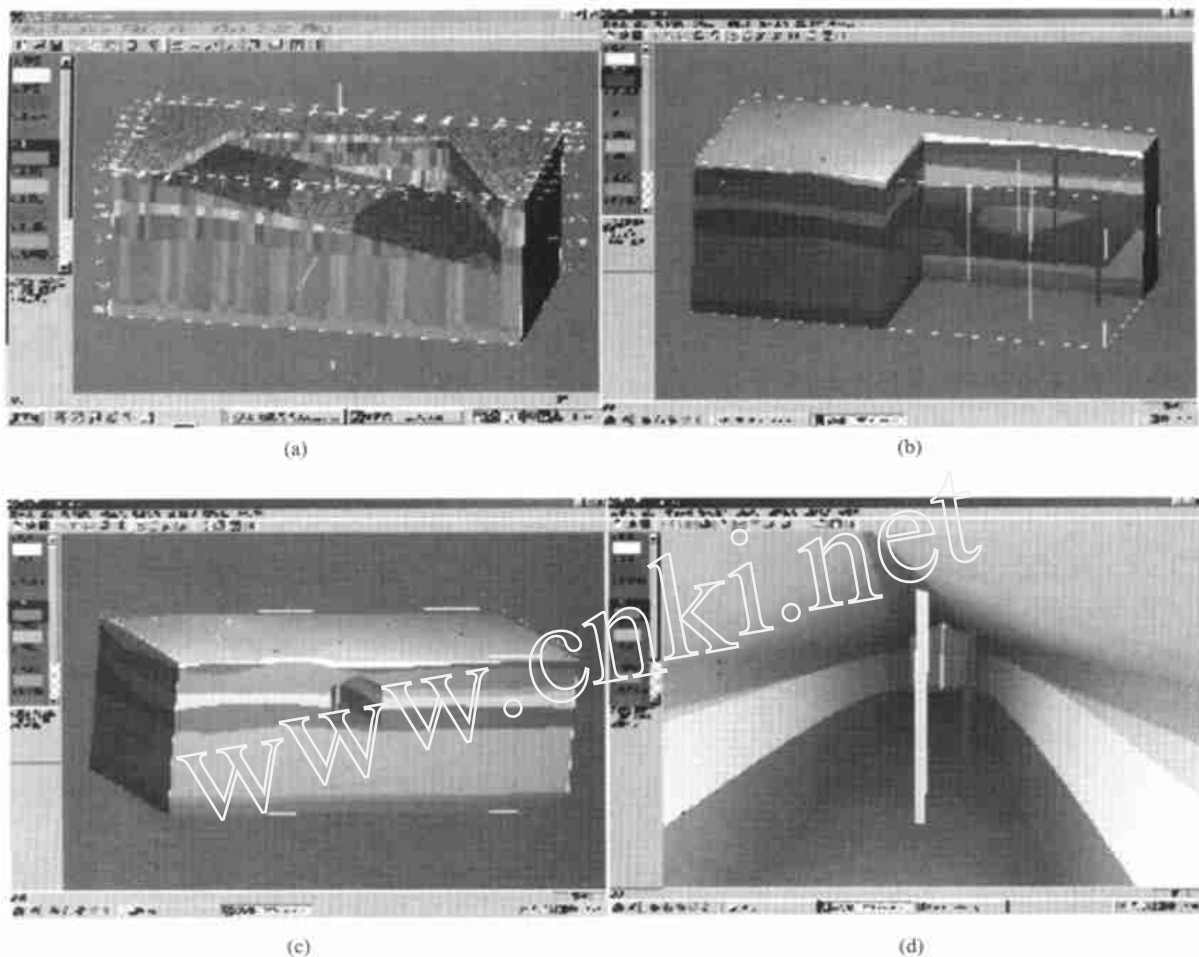


图9 实验结果

道内部地层分布情况 对于地层应力和层内各种属性值的显示, 由于要考虑同一层中应力的不同分布, 而本文侧重的是地层显示, 因此, 三棱柱体的结构已不能满足要求, 故要另行划分格网, 其可行的做法是对三棱柱体再次进行剖分, 将其分解成四面体结构, 再将四面体各顶点属性值通过有限元格网插值出来, 而地层内属性值可通过四面体插值得到 在将三棱柱剖分成四面体过程中, 为了避免出现狭长的四面体, 可在较长的三棱柱体内采用一个或多个中心点进行剖分^[8]的方法 对于由不同插值层面在某一层同一格网内相交的问题以及建模和切割时畸形碎块(体元)的处理等问题, 还需进一步研究

参考文献

- 1 管伟光编著 体视化技术及其应用 北京: 电子工业出版社, 1998
- 2 Paul Bourke Modelling the Surface of the Human Cortex <http://www.swin.edu.au/astronomy/pbourke/modelling/cortex>, 1997.
- 3 张剑秋 三维地质建模与可视化系统开发研究[博士学位] 南京: 南京大学, 1998

- 4 李青元 三维矢量结构GIS拓扑关系研究[博士学位] 北京: 中国矿业大学, 1996
- 5 柯正谊, 何建邦, 池天河编著 数字地面模型 北京: 中国科学技术出版社, 1993
- 6 石教英, 蔡立文编著 科学可视化算法与系统 北京: 科学出版社, 1996
- 7 唐泽圣等著 三维数据厂可视化 北京: 清华大学出版社, 1999
- 8 Eric Carlson Three dimensional conceptual modeling of subsurface structures ASPRS-ACSM, Annual Convention, 1987, 4(1): 188~ 200



张 煜 1999年获武汉测绘科技大学摄影测量和遥感专业硕士学位, 现在中国科学院武汉岩土力学研究所工作 主要研究领域是图象处理和分析、科学计算可视化



白世伟 研究员, 博士生导师, 中国科学院武汉岩土力学研究所所长 主要研究领域是岩土工程与岩土力学