第 27 卷 第 1 期 东 华 理 工 学 院 学 报 Vol. 27 No. 1
2004 年 3 月 JOURNAL OF EAST CHINA INSTITUTE OF TECHNOLOGY Mar. 2004

一种基于似三棱柱体元的地质三维建模方法研究

程朋根[1,2] 刘学斌[3] 史文中[4] 王 伟[2]

(1. 东华理工学院测量系,江西 抚州 344000;2. 武汉大学测绘与遥感信息工程国家重点实验室,湖北 武汉 430079;
3. 江西省交通设计院,江西 南昌 330002;4. 香港理工大学土地测量与地理资讯学系,香港 九龙)

摘 要:三维空间建模方法是三维地勘工程 GIS 研究的核心问题之一。提出一种基于似三棱柱体元的三维数据模型,模型包含顶点、线段(棱边、三角形边)、三角形、侧面四边形、三棱柱体元 5 个基本元素,和点对象、线对象、面对象、体对象、复杂对象、空间对象等 6 个对象。设计了 5 个基本元素和 3 种地质对象的数据结构和它们之间的拓扑关系。以岩体和巷道为例,给出了似三棱柱体建模思路和算法。利用内蒙古某矿区实际钻孔资料和模拟巷道数据对所开发的系统原型进行验证。研究表明,基于似三棱柱体元的数据模型的优势在于可以表示空间对象的表面和内部结构,便于建模和节省存储空间,同时便于不规则的自然地质体和规则勘探工程建模。

关键词:似三棱柱体;数据模型;三维建模;算法;地质

中图分类号:P208 **文献标识码**:A **文章编号**:1001 - 2251(2004)01 - 073 - 07

当前,三维 GIS 理论研究与软件开发已成为国际 GIS 领域的热点,三维 GIS 由于能够以真三维的方式描述地理空间,很符合人的视觉效应和思维,在城市景观建模、虚拟战场、旅游、环境、海洋、石油、矿产资源勘探等领域具有广阔的应用前景。尽管众多学者围绕三维 GIS 理论与方法进行了广泛研究,取得了一定的成果,但迄今为止,国际上还未开发出一个可以真正称为三维的 GIS 系统(吴立新等,2003)。三维 GIS 研究还存在一些没有解决或解决不好的问题,理论上主要表现在三维空间数据模型和数据结构、三维数据获取方法、大容量数据的存贮和管理、三维空间对象的处理和分析,以及三维可视化技术。其中三维数据模型与数据结构是三维 GIS 的核心问题。过去的几十来年,国内外学者对三维空间数据模型进行了较为深入的研究,提出了 20 余种空间构模方法。例如 3DFDS(Molenaar,1993)、TEN(Chen,1995)、基于八叉树和四面体格网的混和数据模型(李德仁等,1997)、矢量与栅格集成的面向对象三维空间数据模型(龚健雅等,1997)、基于表面剖分的三维空间数据模型(孙敏,2000)等等。从建模的基本元素和空间建模方法来看,三维空间数据模型可以归纳为基于面表示的模型、基于体表示的模型和基于混合表示的模型;从数据的描述形式来看,又可分为矢量、栅格和矢量与栅格混合。在地质应用领域,许多对象只能用三维体数据表示,基于体元或体素的建模方法得到越来越多的应用。常用的基本体元有六面体、四棱锥、四面体、三棱柱体。由于地质对象的复杂性,采用六面体作为基本体元存在一定的困难,边界区域难以精确表示,加上六面体较规则,难于进行结构上的分解;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,但是使用四面体来表示空间实体会产生大量的冗余,且生成四面体的算法比较复杂。近来,有些学者开始采用三棱柱体元进行体数据的建模*(张煜等,2001;Gong et al.,2002;吴立新等,2002),并取得初步的效果。本文在前人研究的基础上,对一种基于似三棱柱体元的三维建模方法进行了研究;设计了相应的三维模型与数据结构,分析了该三维建模方法的特点;以岩体和巷道为例,研究了似三棱柱体元的建模方法;开发了一个系统原型,并以实际钻孔资料和模拟巷道数据对系统原型进行验证。

收稿日期:2004-02-09

基金项目:测绘遥感信息工程国家重点实验室开放研究基金(WKL(01)0302);香港理工大学战略发展研究基金(1.31.A222);国家 973 资助项目(G2000077904)

作者简介:程朋根(1964—),男,教授,武汉大学在读博士,研究方向为地理信息系统理论与应用、三维空间建模型理论与应用、计算机地图制图。

* Gong Jianya, Cheng Penggen, Wang Yandong. 2004. Three-dimensional modeling and application in geological exploration engineering. Computer & Geosciences (in press).

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

1 基于似三棱柱体的数据模型

1.1 三棱柱体描述

三棱柱体是由一个三角形沿某一方向拉伸一定的距离之后,所形成的体元,如图 1(a),它的特性是上下三角形互相平行,侧棱平行且相等。标准三棱柱体是一种理想的体元。在地质勘探过程中,钻孔由于受岩石压力等各种因素的影响偏离设计位置而倾斜,产生同一钻孔与地层或矿体的切穿点的水平位置不一致。如果直接采用钻孔切穿点来构建三棱柱体,很难得到标准三棱柱体,而是得到一个体元的顶点和它们之间的拓扑关系与标准三棱柱体一致、但不受标准三棱柱体条件限制的似三棱柱体。所谓似三棱柱体是体元的上下三角形不互相平行、侧棱长度不等且不相互平行、侧面四边形的四个顶点不在一个平面内的三棱柱体,如图 1(b)。

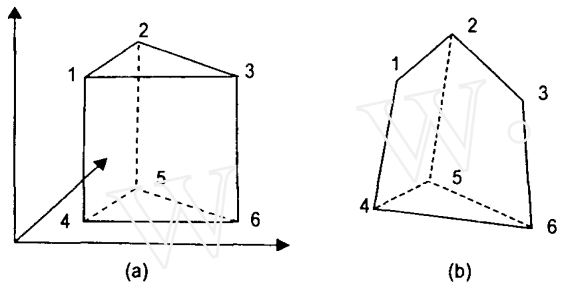


图 1 三棱柱体

Fig. 1 Tri - Prism Volume

(a)标准三棱柱体;(b)似三棱柱

实际应用中,理想的似三棱柱体仍难以描述复杂的地质体,通常是似三棱柱体特例的组合。所谓特例是因似三棱柱体的六个顶点部分重合引起的,考虑图形的旋转与上下对称性后,可以得到如图 2 所示四种特例。从图 2 可以看出,传统的四面体、四棱锥体均为似三棱柱体的特例,其中(a)是四棱锥体、(b)和(d)是四面体在似三棱柱体情形下的不同表示。为统一数据结构重合点仍以两个点或三个点处理。

1.2 基于似三棱柱体数据模型

基于似三棱柱体据模型是以似三棱柱体作为基本体元,一个三棱柱体包含的几何元素有:顶点、线段(棱边、三角形边)、三角形、侧面四边形、三棱柱体,它们可以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,钻孔是由多段棱边组成的线对象;同一层面的相邻三角形构成一个地层界面对象;相互连接在一起的似三棱柱体体元构成一个完整的地质体对象;结点可以用于描述一个点状的地质对象,例如瓦斯集焦点、矿体采样点;在一定空间范围内的不同空间对象可以聚集成一个复杂(地质)对象。面向对象建模技术及其特性在有关文献中有过详细的描述(龚健雅等,1997;边馥苓等,2000;程朋根等,2001),本文不作重复。根据面向对象建模的观点,可以将上述空间对象设计成不同的对象类,并在此基础上概括出更高层次的超类,即空间对象类,以这些类作为模型设计的基础。我们用统一建模语言(UML)设计出一个基于似三棱柱体的面向对象概念数据模型,如图 3 所示,其中栅格对象是描述地质体的表面影像或内部纹理,以属性形式存在。

1.3 数据结构

概念模型表示的只是各几何元素和实体对象之间的关系。实际上为了使模型能够更好地建立具有空间位置、拓扑关系及属性信息的三维地质体模型,必须设计更为详细的数据结构。数据结构包括顶点、三角形边、棱边、三角形、侧面四边形、三棱柱体。此外为了描述三维地质体及其之间的拓扑关系,还需要设计构成地质界面的三角网(TIN)、地层或断层层面(TINs)、地质体以及影像或纹理等对象的数据结构。本文只列出构成似三棱柱体的

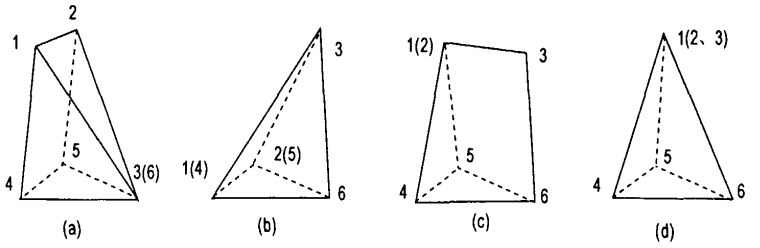


图 2 似三棱柱体特类

Fig. 2 Special cases of Quasi Tri-Prism Volume

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

全部 6 种数据结构和部分地质实体数据结构。所设计的 6 种数据结构不仅描述了构成似三棱柱体的几何元素的空间位置和属性信息,而且显式地表达或隐含了这些几何元素之间的拓扑关系。

1)结点

标识	X	Y	Z	属性	所属对象	类型	切割标志

2)三角形边

标识	起点	终点	左三角形	右三角形	上侧面四边形	下侧面四边形	切割标志	切割点

3) 棱边

标识	起点	终点	邻接侧面四边形	属性	所属对象	切割标志	切割点

注:棱边属性可以是一种结构数据,以反映沿棱边的属性变化;如果所属对象值为 - 1,则棱边长度为零,表示尖灭点。

4) 三角形

标识	三角形顶点	三角形边	邻接三角形	正面属性	正面三棱体	负面属性	负面三棱体	所属对象

5) 侧面四边形

标识	四边形顶点	三角形边	棱边	正面三棱体	负面三棱体	所属对象	三角剖分标志

6) 似三棱柱体

标识	三棱柱体顶点	三角形	侧面四边形	邻接三棱柱体	所属对象	地质体类型	四面体剖分编码	切割标志	邻接三棱柱体切割标志

7) TIN

标识	TIN 的类型	三角形个数	三角形集合	正面地质体标识	负面地质体标识	TIN 上所依附属性	所属对象

8) 地层或断层层面

标识	层面类型	最小边界盒	TIN 的个数	TIN 集合	正面地质体数	正面地质体集合	负面地质体数	负面地质体集合	层面属性描述	所属对象

9)地质体(地层、矿体、断层、褶皱)

标识	地质体类型	最小边界盒	所在地层标识	似三棱柱体集	邻接地质体	边界面	属性

1.4　似三棱柱体的优势

从似三棱柱体的结构特征我们可以看出,与六面体、四面体等其它基本体元相比,三棱柱体是一种具有较大灵活性的体元,特别是建立基于似三棱柱体的数据模型,能够表示具有复杂边界的地质体,它既可以精确表示地质体边界,又可以表示其内部属性。其优势可以概括为:(1)利用一种类型的体元就可以描述复杂的地质体,不必采用混合数据模型,方便数据管理;(2)利用三棱柱体的上顶、下底三角形面可以有效地表示地质体表面,通过一定的算法可以提取地质体的面模型,实现体模型向面模型的转换;(3)通过对三棱柱体(侧面)棱的属性设置能够精确地描述地质体内部属性分布,以便显示地质体的内部属性;(4)与四面体相比,节省存储空间;(5)能够方便地转换成四面体结构;(6)比较适合地质勘探工作中所采集数据的建模。对基于似三棱柱体的数据结构,即可以克服标准矩形格网对数据采样点分布要求严格的约束,又可以克服四面体数据结构中体元数据量大、拓扑关系复杂的现象。

2　岩体和巷道似三棱柱体建模方法

2.1　岩体似三棱柱体建模

根据地层建模数据源的情况不同,地层的三棱柱体建模方法可以分为两种:一是基于地层界面插值点建模方法,二是基于原始采样点(如钻孔与地层界面交点的)的建模方法。

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

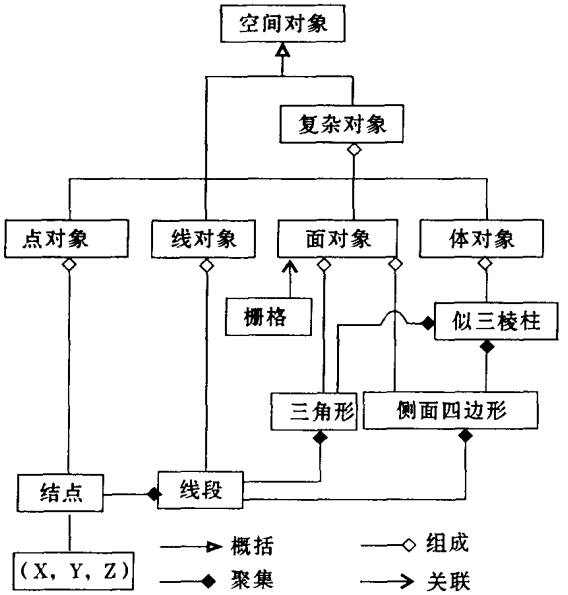


图 3 标准建模语言表示的拟三棱柱体概念模型

Fig. 3 QTPV Concept Model in UML

2.1.1 基于地层界面插值点的建模方法

首先对钻孔与地层界面交点进行分层处理(根据岩性和高程值),得到各地层界面上的采样点;其次采用插值算法(如双三次 B 样条有限元分块内插方法)对各地层层界面进行曲面拟合,生成规则的格网,形成多层 DEM,为方便后续建模,这些多层 DEM 应该具有完全一致的参照系,并能相互准确配准;然后将格网剖分成三角形,根据相邻地层界面上的上下三角形和垂直方向上相互平行的三条棱构成了三棱柱体。对于出现地层界面相交的格网,还要进行界面交线的求解、格网三角化与三棱柱体化特殊处理,如图 4 是两种地层界面相交情况的处理。

2.1.2 基于原始采样点建模方法

当采用原始采样点进行构模时,生成的是似三棱柱体。似三棱柱体建模可以采用类似于 Delaunay 三角网的构建方法(刘少华等,2002)。后者是将同一层面的离散点构建成 TIN,但前者除构件 TIN 之外还需在相邻的层面之间构建一系列的似三棱柱体。似三棱柱体的建模以地表面钻孔中心点为基础,一旦建模区域内钻孔确定,由它们构成的 Delaunnay 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 中三角形三顶点的两两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

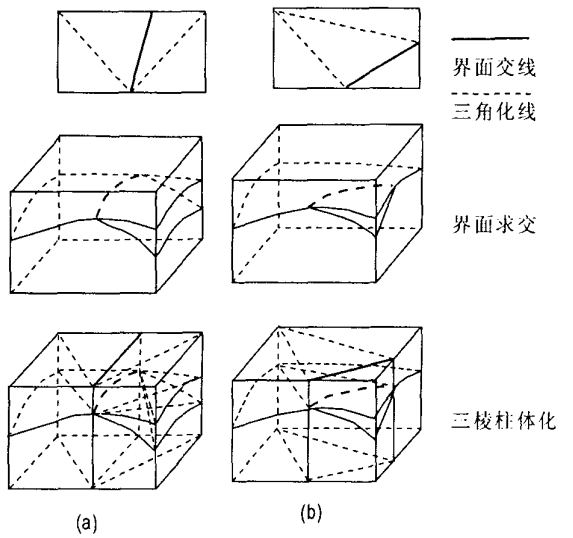


图 4 地层相交格网三棱柱体化示意图

Fig. 4 Stratum Intersection Gird cut into QTPV

钻孔倾斜也能保证建立唯一的侧面四边形与似三棱柱体。假定钻孔曲线上点的数据结构为(坐标,属性编码),其中属性编码为该点向下邻接的地质体(或岩性)编码,地质体编码是由地表向下按递增的顺序编码。建模的主要过程如图 1。

(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,将这个三角形设置为第一个似三棱柱体的上三角形。

(2) 根据上三角形点的属性编码沿三个钻孔向下扩展新三角形(称为下三角形),如图 5 所示。扩展规则是:如果三角形三个顶点的属性编码相同,则新三角形顶点均为相应钻孔的下一个点,如图 5(1);如果编码不相同,则编码小(如 a)的钻孔上新三角形顶点为相应钻孔的下一个点,而编码大(如 b 或 c)的钻孔上新三角形顶点保持不变,即与上三角形顶点相同,如图 5 中(2)～(4)。

(3) 根据上、下三角形对应关系构建棱边、侧面四边形和似三棱柱体,记录并修改似三棱柱体的描述信息,并将下三角形置为上三角形。

(4) 重复(2),(3)步骤,直到上三角形顶点均为三个钻孔的底部点为止。

(5) 根据钻孔孔口坐标按 Delaunay 三角网的构建方法扩展新三角形,并置为上三角形,重复(2)～(4),构建新的似三棱柱体。

(6) 重复步骤(5),直到地表面钻孔孔口的 Delaunay 三角网构建完成为止。

这种建模方法的好处是便于模型修改,当插入

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

新的钻孔时,只需象 TIN 一样对 TIN 进行局部修改,然后对进行了局部修改的三角形沿钻孔(向下)方向进行修改并生成新的似三棱柱体。同时该方法还能处理好地层相交和地层与断层相交的情况,只是需要在二维剖面上先进行内插编辑处理,生成一些内插的虚拟钻孔即可简化建模操作。

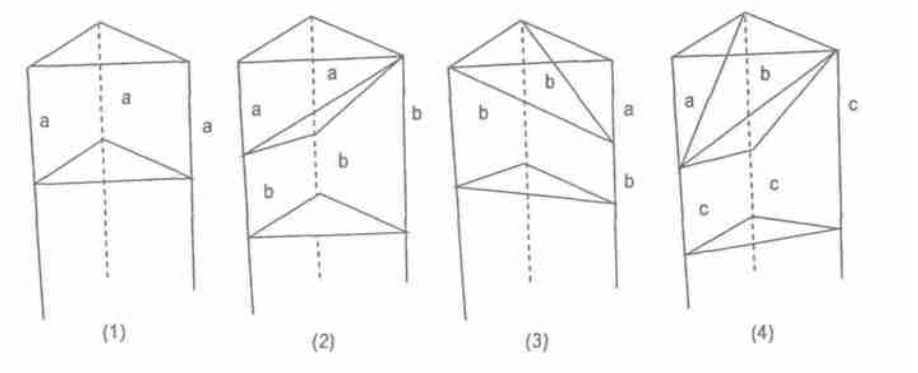


图 5　向下扩展似三棱柱体

Fig. 5　Down Expanding of QTPV

2.2　地下巷道似三棱柱体建模

地下勘探工程主要是指在地质勘探与矿山开采时开挖的各种探矿与采矿工程,如竖井、巷道、采矿区等。开挖工程一般比较规则,为了能够用三棱柱体来描述,一般沿工程的纵轴方向每隔一定的距离选取一特征横断面,所得中间横断面变化在允许范围之内,例如图 6(a),这样就构成了许多柱体,然后对柱体进行三棱柱体化处理。对于不同形状的横断面,三棱柱体化的方法有所不同。如图 6 (b)为圆形巷道,相邻断面形状一致,可以以断面圆心为中心,每隔一定的圆心角构成三角形,然后连接相邻断面的三角形即可构成三棱柱体;(c)为断面形状一致且为矩形或梯形柱体的情况;(d)为断面不一致的情况下的三棱柱体化;(e)为巷道的相交时的处理方法。

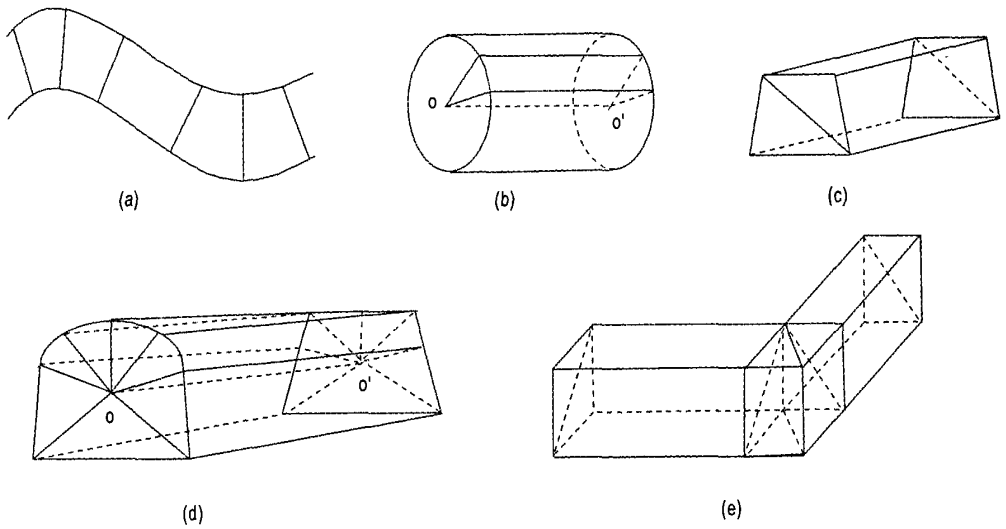


图 6　地下勘探工程似三棱柱体化实例

Fig. 6　Subsurface exploration engineering cut into QTPV

4　应用实例与结论

结合本文的研究,笔者在 Windows 环境下,利用 VC + + 6.0 作为系统开发的集成环境,结合 SQL Server 数据库技术和 OpenGL 图形库,开发了一个基于似三棱柱体体元的三维地质体建模与可视化操作的系统原型。试验数据为内蒙古某地质勘探区的真实钻孔数据,如图 7 所示。原始钻孔 42

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

个,勘探区有 5 层地层,在剖面内进行内插后一共有 212 条虚拟和实际钻孔,所建立的似三棱柱体模型的线框图如图 8 所示,该模型共有 1 880 个似三棱柱体、2 256 个三角形、2 900 个侧面四边形。图 9 地层模型分层切割后的可视化结果,图 10 为该模型的篱栅图。此外模拟了一段巷道数据进行似三棱柱体建模,结果如图 11。

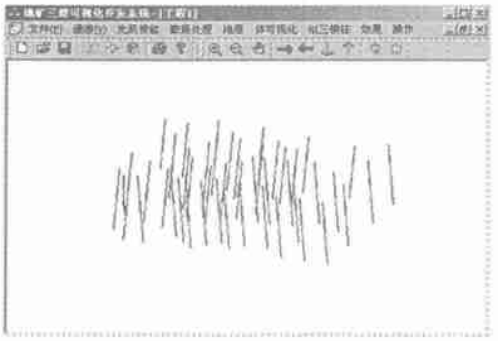


图 7 钻孔分布图

Fig. 7 Borehole distribution of testing area

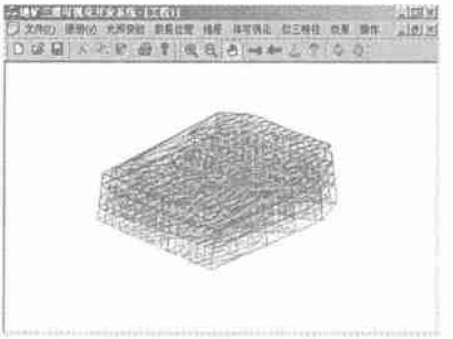


图 8 地层模型线框图

Fig. 8 Stratum model in wire – frame graph



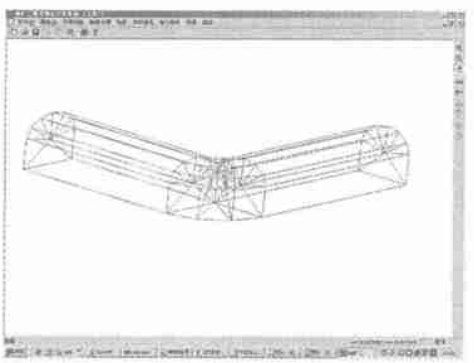
图 9 切割后地层模型可视化

Fig. 9 Visualization of the cutted Stratum model



图 10 模型的篱栅图

Fig. 10 Fence Sections of Stratum Model



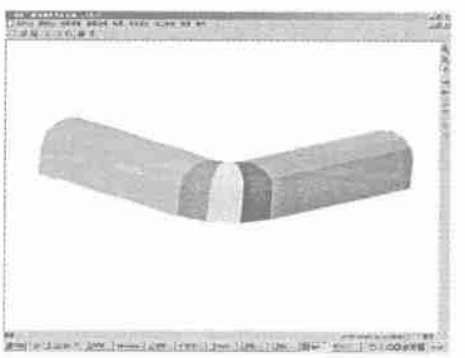


图 11 地下巷道似三棱柱体建模

Fig. 11 QTPV modeling of subsurface laneway

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

从本文的研究可以看出:与六面体和四面体体元相比,基于似三棱柱体元的数据模型既可以克服六面体对数据采样点分布要求严格的约束,又可以克服四面体数据结构中体元数据量大、拓扑关系复杂以及建模算法设计困难的缺点;它不仅能够建立地质体的内部结构,而且可以建立地质实体之间的拓扑关系;它既适合规则地质勘探工程的建模,同时对不规则自然地质体建模也具潜力,可以避免采用混合数据模型建模的麻烦,方便地勘数据的管理。基于似三棱柱体元的数据模型是一种具有潜力的三维空间数据模型。

当然,目前的研究只是初步的的结果,更深入的研究将是如何考虑对诸如断层、褶皱等复杂地质对象的建模,以及对模型的操作与可视化。

参 考 文 献

边馥苓,傅仲良,胡自锋. 2000. 面向对象的栅格矢量一体化的三维数据模型[J]. 武汉测绘科技大学学报, 25(4): 295～297.

程朋根,龚健雅. 2001. 地勘工程三维空间数据模型及其数据结构设计[J]. 测绘学报,30(1): 74～81.

龚健雅, 夏宗国. 1997. 矢量与栅格集成的三维数据模型. 武汉测绘科技大学学报, 22(1): 7～15.

李德仁, 李清泉. 1997. 一种三维 GIS 混合数据结构研究. 测绘学报,26(2): 128～133.

刘少华,程朋根,陈红华. 2002. Delaunay 三角网内插特征点算法研究[J]. 华东地质学院学报, 25(3):254～257.

孙敏,陈军,张学庄. 2000. 基于表面剖分的 3D CM 空间数据模型研究[J]. 测绘学报, 29(3): 257～265.

吴立新,史文中,Cheristepher Gold. 2003. 3DGIS 与 3DGMS 中的空间构模技术[J]. 地理与地理信息科学,10(1):5～11.

吴立新,张瑞新等. 3 维地学模拟与虚拟矿山系统[J]. 测绘学报, 2002, 31(1): 28～33.

张煜,白世伟. 2001. 一种基于三棱柱体体元的三维地层建模方法与应用[J]. 中国图形图象学报,6(1): 285～290.

Chen X Y. 1995. A workstation for three - dimensional spatial data research[A]. The Fourth International Symposium of LIESMARS[C]. Wuhan, China, 42～51.

Gong Jianya, Cheng Penggen. 2002. Study on 3D modeling and Visualization in Geological Exploration Engineering[A]. Proc. of ISPRS Commission II Symposium: Integrated System for Spatial Data Production, Custodian and Decision Support[C]. Xi'an, China, 133～138.

Molanaar M. 1992. A topology for 3D vector maps[J]. ITC Journal, (1): 25～33.

A Method of 3D Modeling Based on QTPV in Subsurface Rock Bedding

CHENG Peng-gen[1,2], LIU Xue-bin[3], SHI Wen-zhong[4], WANG Wei[2]

(1. Department of Survey, East China Institute of Technology, Fuzhou, JX 344000, China; 2. State Key Laboratory for Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing, Wuhan University, Wuhan, HB 430079, China; 3. Communication Design Institute of Jiangxi Province, Nanchang, JX 344000, China; 4. Department of Land Surveying and Geo - Informatics, The Hong Kong Polytechnic University, Kowloon, HK, China)

Abstract: The method of 3D spatial modeling is one of the core problems for construction 3D Geological Exploration Engineering (GEE) GIS. In this paper, A method of 3D modeling based on Quasi Tri-Prism Volume (QTPV) is proposed. The proposed model is composed of five primitives and six objects. The primitives are vertex, segment (edge, triangle side), triangle, side quadrilateral and QTPV), and the objects are point, line, face, solid, complex and spatial object. Data structures and topology relationship of the five primitives and three geological objects are designed in detail. Taking the rock bedding band laneway as research objects, QTPV modelling methods and algorithms are designed. A set of real borehole sample data, which come from Inner Mongolia China, and a set of simulation laneway data are used to verify the prototype system developed in VC++ program language. The research results show that QTPV - based model has some advantages, for instance, it can be used to describe the surface and interior of spatial objects, it is convenient to modeling spatial objects and save memory, and it is suitable for modeling irregular natural geological bodies and regular GEE at the same time.

Key Words: Quasi Tri-Prism Volume; Data model; Modelling; Algorithm; geology

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net