ISSN 1000-9825, CODEN RUXUEW
Journal of Software, Vol.19, No.8, August 2008, pp.2004−2017
DOI: 10.3724/SP.J.1001.2008.02004
© 2008 by *Journal of Software*. All rights reserved.
E-mail: jos@iscas.ac.cn
http://www.jos.org.cn
Tel/Fax: +86-10-62562563

地质断层三维可视化模型的构建方法与实现技术*

朱良峰[1+], 潘 信[1], 吴信才[2], 刘修国[2]

[1](华东师范大学 地理信息科学教育部重点实验室,上海 200062)
[2](中国地质大学 信息工程学院,湖北 武汉 430074)

Construction Method and Actualizing Techniques of 3D Visual Model for Geological Faults

ZHU Liang-Feng[1+], PAN Xin[1], WU Xin-Cai[2], LIU Xiu-Guo[2]

[1](Key Laboratory of GISciences for the Ministry of Education, East China Normal University, Shanghai 200062, China)
[2](Faculty of Information Engineering, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China)
+ Corresponding author: E-mail: zhuliangfeng@163.com

Zhu LF, Pan X, Wu XC, Liu XG. Construction method and actualizing techniques of 3D visual model for geological faults. *Journal of Software*, 2008,19(8):2004−2017. http://www.jos.org.cn/1000-9825/19/2004.htm

Abstract: A general principle, a practical method and a modeling process of 3D visual model for complex geological entities contained faults are discussed. A kind of 3D vector data model, which is based on boundary representation, suited to geological objects and their topological relationships, is developed in order to organize and describe the 3D structure model of complex geologic body. A modeling approach called the unified modeling technique for stratum and fault is presented, and some actualizing techniques are discussed. To deduce and simulate the fault plane, three methods are presented based on the basic properties, characters and qualities of geological faults reflect on fault data. For the construction of stratum surface, the restriction and the shielding action of fault plane to the interpolation process of stratum surface are considered, and the mesh generation method for multivalued surface of reverse fault is developed. TRICUT, a method to clip triangle meshes, is used to process surface cutting on stratum surface and fault plane. A concrete example of using those methods to 3D bedrock model in the Beijing Olympic Green District is presented and confirms the practical result of those techniques.

Key words: 3D visualization; 3D geological modeling; complex geologic body; geological fault; stratum; fault data

摘 要: 全面而系统地研究了地质断层三维可视化构模的原理、方法及实施过程.针对地质断层三维构模的特点与要求,设计了一种基于边界表示、面向地质实体并兼顾拓扑关系的三维矢量数据模型,以有效地组织和描述包含断层的复杂地质体几何结构模型.提出了断层与地层的统一构模技术,给出了在其实现过程中所遇到的关

* Supported by the National High-Tech Research and Development Plan of China under Grant No.2001AA135170 (国家高技术研究发展计划(863)); the National Natural Science Talent Training Foundation of China under Grant No.J0730534 (国家自然科学基金委员会国家基础科学人才培养基金); the Natural Science Foundation of Shanghai of China under Grant No.06ZR14031 (上海市自然科学基金); the Morning Light Plan of Shanghai Educational Development Foundation of China under Grant No.2007CG34 (上海市教育发展基金会晨光计划); the Wiser Foundation of IDC-Peking University under Grant No.W08SI03 (北京大学数字中国研究院为新研究基金)
Received 2007-10-11; Accepted 2008-04-18

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

键问题(如断层面的推演拟合、地层层面重构、断层与地层的交切处理与局部重构)的解决方案.基于断层的属性、断层数据所反映的断层面的特征和质量,应用 3 种方法来拟合断层面.在地层层面重构时,考虑到了断层面在地层面网格加密、插值时的约束和屏蔽作用,实现了具有多值面的逆断层网格生成技术.应用三角网切割算法 TRICUT 来实现断层与地层的交切处理.通过北京奥运公园场区基岩地质模型中的断层构模实例验证了这些技术方法的有效性.

关键词: 三维可视化;三维地质建模;复杂地质体;地质断层;地层;断层数据

中图法分类号: TP391 **文献标识码**: A

随着科学计算可视化技术和地质信息计算机模拟技术的发展,三维地学模拟在 20 世纪 90 年代初期开始为人类所重视,并逐渐成为数学地质、石油勘探、岩土工程、GIS 和科学计算可视化领域的研究与应用热点[1−7].三维地学模拟包括两大部分的内容,即三维地质建模和模型的可视化表达与分析,其中三维地质建模是地质模型可视化的前提和基础,其核心任务是建立三维地质模型.三维地质模型可分为两类,一类是地质体结构构造模型(简称为地质结构模型),另一类是地质体内部的物理、化学属性参数模型(简称为地质属性模型).三维地质结构模型不仅反映了地质体的空间展布特征和地质实体之间的拓扑关系,而且它还是构建地质属性模型的基础,并可在其基础上直接进行地震反演与各类工程实验、设计.因此,建立地质体结构构造模型在三维地学模拟中显得至关重要.目前,国内外在三维地质体结构建模方面的研究进展主要体现在两个方面:① 适合于地质体三维模拟的空间数据模型研究,主要成果有:TIN(triangulated irregular network)模型、三棱柱模型(triangular prism,简称 TP)、类三棱柱模型(analogical triangular prism,简称 ATP)、广义三棱柱模型(generalized triangular prism,简称 GTP)[8]、似直三棱柱模型(analogical right triangular prism,简称 ARTP)、四面体模型(tetrahedral network,简称 TEN)、超体元实体模型[5,9],以及以上两种或两种以上模型的混合.② 三维地质结构建模的具体实现方法,如:基于多层 DEM(digital elevation model)概念的三维地层骨架构模方法[3,10]、基于三棱柱[11]或四面体的体元构模方法、基于空间插值技术(如 DSI(discrete smooth interpolation)[12])的三维地层模拟技术、基于钻孔数据的“地层-实体模型算法”[13]、基于地质剖面数据的三维矢量数据生成算法[14,15]、基于支持向量机(support vector machine,简称 SVM)的三维地质模型自动构建技术[16]等.综合考察现有的研究成果,不难发现,现有的建模技术大多集中于简单层状地质体的三维重构与表达分析,而对结构复杂、物性分布不均匀的复杂地质体(如断层、褶皱、透镜体、丘状构造、岩脉和岩矿构造等)的构模技术则研究得不够深入.简单层状地质体在多数情况下反映的仅仅是地层形成的初始形态,由于地质条件的复杂性和后期构造运动的改造、破坏以及其他因素的影响,现实世界中的地质体及地质界面往往具有不连续性和突变性[10,17−20],因此,需要在简单层状地质体构模技术的基础上进一步研究复杂地质体的三维构模技术.目前,复杂地质体构模技术研究的瓶颈主要集中在地质断层构造的模拟和表达上.

断层是指在地质构造运动的过程中,地层在构造应力的作用下发生破裂且破裂面两侧岩块沿着破裂面发生明显位移的现象.断层在地壳中广泛发育且极为重要:大型断层构成不同大地构造单元的边界,控制区域地质结构和构造演化,控制和影响成矿作用;中小断层控制矿床、矿体的产状,有些还是矿液和地下水循环的通道;活动断层则直接影响工程施工和建筑物的稳定性.因此,在三维空间中研究断层及其构模技术具有重要的理论意义和实用价值.

地质断层三维构模的难点主要体现在 3 个方面.一是从断层构模的初始数据上来看,地质断层的原始数据具有类型多样、数量稀疏、分布零散和获取艰难的特性.因此,断层模拟所涉及的地质数据的分类、解释和处理工作都极为复杂,只有在整合既有的原始数据的基础上建立起具有统一的数据标准和代码体系的地质断层信息综合数据库,才能有效地实现地质断层的三维可视化展示与分析.二是从地质断层自身的三维空间几何特征上来看,复杂断层系统,特别是包含逆断层的地质体形态多变,用现有的三维空间数据模型很难进行完整的描述与表达.三是从三维构模时具体的实现技术和算法设计上来看,断层构造引起的地质界面的不连续会导致地层面重构时的插值困境.虽然有研究者提出可以通过构造虚拟界面的方法将包含断层的复杂地质体转化为简

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

单层状地质体[6,21],但在具体实现的过程中,手工添加虚拟界面和划分地层层面是一项极为繁琐的工作,不适合于用计算机进行自动或半自动的建模.

为了解决这些难题,本文将对包含断层的复杂地质体三维可视化模型构建技术展开讨论,并提出相应的解决方案.首先,在断层构模初始数据处理上,基于实际勘察所获取的具体断层数据,设计标准的断层数据库格式;接着,针对地质断层三维构模的特征与要求,设计相应的数据模型来组织和描述包含断层的复杂地质体几何结构模型;然后,在两类已有的断层构模方法的基础上,提出断层与地层的统一构模技术,并给出在其实现过程中所遇到的关键问题的解决方案;最后,通过北京奥运公园场区的断层构模实例来验证该方法的有效性.

本文第 1 节介绍地质断层数据的类型及其标准化处理的方法.第 2 节介绍面向地质断层构模的三维矢量数据模型设计.第 3 节介绍地质断层三维可视化模型的构建方法与基本流程.第 4 节介绍地质断层三维可视化构模中的关键技术,分别对断层面的推演拟合、地层层面重构、断层面与地层面的切割、调整、约束处理等技术进行阐述.第 5 节以一个研究实例来验证本文所提出的技术方法的可行性和有效性.第 6 节是全文总结与未来工作展望.

1 地质断层数据及其标准化处理

根据数据来源和表现形式的不同,断层数据可分为 4 类[19]:野外地质勘察获取的断层参数数据;从钻孔、测井中获取的断点数据;纵向的地质剖面数据;平面地质图、地形图数据.这些数据可能单独存在,也可能相互补充,共同描述断层的几何形态和空间属性.不同的数据不仅表现形式、存在方式、数据精度不同,而且其反映的断层信息和后续的建模方法也有差异.为了充分利用既有的断层资料进行后续的构模工作,首先需要进行断层数据的标准化工作,设计标准的断层数据格式以组织、存储实际的地质断层数据.经过分类归并,本文将与地质断层三维可视化构模相关的断层数据标准化为 3 类,包括平面图形数据、剖面图形数据和表格数据,其中表格数据和地质剖面图中蕴涵的断点数据是断层构模的主要数据.

平面图形数据是指在地质图、地形图或地质构造图等平面图件上所标示出来的断层线.这是传统地质学对断层最常用、最直观的表示方法.它既有可能是精确度较高的实测记录,也有可能仅仅是地质工作者的推测、经验甚至假定.在三维断层建模过程中,应将平面图件中的断层线标识为一类特殊的数据,以方便地提取出来并应用于建模流程.

根据物探资料或其他勘察手段获取的资料进行解释得到的地质剖面数据(如地震剖面、电测深剖面等)同样能够反映断层的几何特征,这可以弥补实际野外勘察方法的不足,获取深部断层特征信息.地质剖面图能够较为精确、直观地表达断层面上的断点坐标,也是一类重要的断层数据.但地质剖面图一般是二维图件,为了在三维建模时利用其中蕴涵的断层信息,需要记录一些附加信息以便将其映射到三维空间中,这些附加信息主要有水平比例尺、垂直比例尺、控制点(如剖面起始点、终止点、拐点)的三维坐标.地质剖面图上的断层、地层、断点的信息都需要完整地记录下来,以便于在建模时能够被快速地识别、提取出来.

表格数据主要用来记录野外地质勘察所获取的断层属性参数信息.可用以下 4 种表格来描述断层的属性:

① 断层整体描述表.主要字段有:断层编号、断层名称、断层位置、断层级别、断层类型、断层分段数目、整体断距、整体水平断距、整体垂直断距、断层描述.

② 断层分段描述表.主要字段有:断层编号、分段序号、分段名称、分段位置、断层级别、断层类型、起始位置(x,y,z)、终止位置(x,y,z)、走向、倾向、倾角、方向描述、性质描述、总断距、水平断距、垂直断距、断层宽度、描述、时间期次、物探特征、遥感标志、新构造特征、显著活动时代、结论.

③ 断点数据表.主要字段有:断点编号、所属断层编号、所属分段序号、断点坐标(x,y,z)、所属地层编号、断点类型、该断点处的水平断距、垂直断距、走向、倾向、倾角、数据来源.

④ 断层错切关系表.主要字段有:关系编号、断层编号 1、断层编号 2、断层错切关系(主辅关系、辅主关系、十字型关系、不相交、未知).

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

2 面向地质断层构模的三维矢量数据模型

三维地质构模方法与所采用的三维空间数据模型密切相关.地质体的基本特征可归结为空间特征、属性特征和空间关系特征这 3 个方面,三维空间数据模型应是对研究范围内各种复杂地质体的几何、属性和拓扑信息的完整表达.近年来,地质、矿山、计算机等领域的专家和学者,围绕着矿床地质、工程地质和矿山工程等问题对三维空间数据模型进行了研究,已卓有成效,有些还在此基础上构建出相应的三维地质模拟软件系统.如:Lynx 软件系统采用实体元件构模技术,可以对钻孔、测井记录、TIN 模型、三维格网结构等进行综合管理,广泛应用于矿山、地质的三维建模及可视化等方面;gOcad 系统采用 G-Map 图作为表达三维空间地质对象拓扑关系的基本数据模型[20],可满足地质、地球物理和油藏工程的三维模拟与辅助设计需要;何满潮等人采用柱体模型、TIN 面模型和断面模型构建包含断层、褶皱的层状岩体三维模型[22];武强等人提出以超体元实体模型来描述复杂地质体的几何形态,并构建出相应的建模系统[5];吴立新等人基于 GTP 模型进行偏斜钻孔数据的建模[8];钟登华等人基于 NURBS-TIN-BRep 混合数据结构进行水利水电工程所涉及的地形、地层、断层、地质边界四类地质对象的统一构模[23].这些数据模型在其所面向的具体应用领域都取得了一定的成功,为推动相关行业的发展发挥了一定的作用.因此,为三维断层构模服务的三维空间数据模型设计,应当针对三维断层数据的获取方式、断裂地质体对象本身的形态特征以及主要的应用目的设计专用的数据模型.基于这一指导思想,结合自身的研究实践,本文提出了一种基于边界表示、面向地质实体并兼顾拓扑关系的三维矢量数据模型,并将其应用于包含断层的复杂地质体几何结构建模之中.

三维矢量数据模型侧重于三维空间实体的表面表示(如地层面、地形表面等),通过表面来表示三维目标的空间轮廓.层状地质体(包括地层、断裂、矿体等)具有明显的层面特征,可用 DEM 的方法来建立描述这些层面的数字表面模型[10].传统的地质结构建模大多采用基于 TIN 面的多层 DEM 构模技术,这在描述简单层状地质体时极为简单、有效,但在表达断层、褶皱作用后的复杂地质模型时却无能为力.因此,本文在综合考察现有数据模型的基础上,设计了一种面向地质断层构模的三维矢量数据模型,并将多层 DEM 模型作为其特例.

面向地质断层构模的三维矢量数据模型所应用的拓扑元素有点(vertex)、结点(node)、边(edge)、线(line)、三角形(triangle)、三角网(TIN)、环(loop)和多面体(polyhedron)八种,具体的拓扑层次关系如图 1 所示.另外,还将三维地质模型中的地质元素划分为位置(position)、地质边界(geological boundary)、层块(layer-piece)、层(layer)、块(block)和地质模型(geological model)六个层次[24],它们与拓扑元素的对应关系如图 2 所示.这种对应关系实现了三维地质对象的拓扑表示和现实世界中的地质空间实体特征之间的无缝融合.这一数据模型结合了地质断层数据的自身特征,是一种典型的面向地质实体并兼顾拓扑关系的数据模型,可用来有效地组织和描述包含断层的复杂地质体几何结构模型.

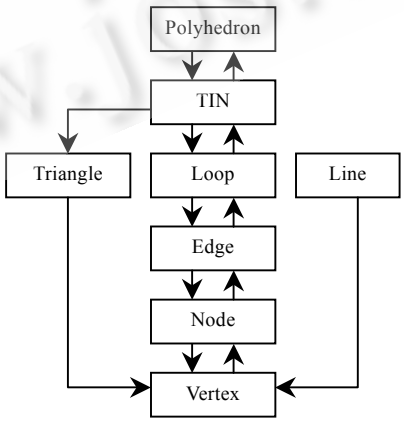


Fig.1 The topological relational hierarchy of 3D vector data model for geological faults modeling

图 1 面向地质断层构模的三维矢量数据模型的拓扑层次关系

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

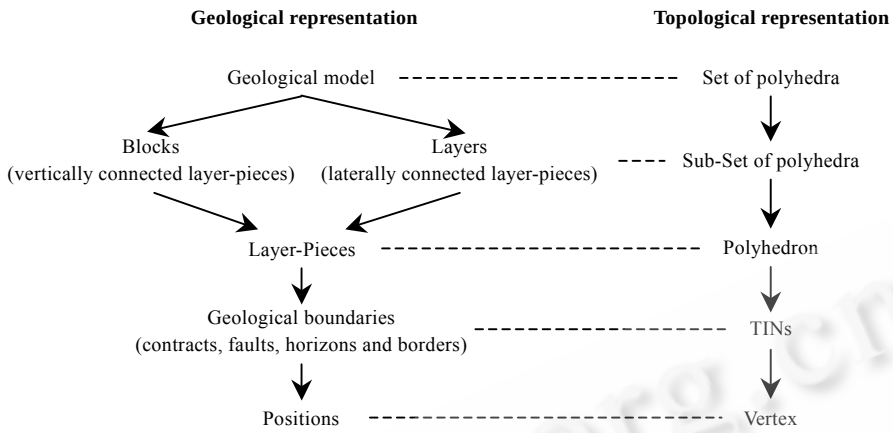


Fig.2 The coincidence relation between geological elements and topological elements in 3D geological model

图 2 三维地质模型中地质元素与拓扑元素的对应关系

3 地质断层三维可视化模型的构建方法与基本流程

3.1 两类基本的断层构模方法

地质断层的主要影响在于其破坏了地质体的连续性,改变了地层数据的原始分布格局,形成了具有不连续性和突变性特征的复杂地质界面,导致在计算机建模时无法对整个构模区域进行连续插值[10,17−21].目前,国内外对于地质断层的三维表示与模拟技术尚处于研究和探索阶段,主流的断层构模方法可分为两类:一类是基于地层恢复的断层构模技术,可称为整体法;另一类是基于分区插值的断层构模技术,可称为局部法.

断层面既是地层的不连续,又可以看作是断层两侧地层的“超连接”[18,20].基于这种考虑,整体法先将地层恢复到未发生断层时的状态,将原断层两侧的地层层面看作一个连续的整体进行统一处理,进行插值及层面的拟合,然后计算出地层层面与断层面的交线,以此交线为断层两侧地层层面的共同边缘线,以这个边缘线为基础,根据断层的位移(断距)对两侧地层层面的边缘线进行调整,最终将地层复原至有断层时的状态.整体法构模的基本流程是:① 地层层位恢复;② 地层层面插值拟合;③ 断层面的拟合;④ 地层层面和断层面切割、调整处理;⑤ 生成最终的完整模型.

整体法建模适合于断距不大、断层两侧地层的形态及厚度存在一定相似性的断层系统(主要是非同沉积地层系统).整体法建模可以看作是一种地质成因法[25],它通过对地层的构造发育历史进行反演,得出正确的三维地质模型,然后再根据正演来计算断层构造运动对地层产生的位移或应变. 因此, 整体法建模是一种对地质背景专业知识要求较高的方法,建模过程比较复杂、专业,主要应用于地质学家的专业分析,不适宜推广到其他专业或应用部门进行复杂地质断层系统的构模.

局部法构模的基本原理是:基于断层面将地层分隔为两个相对独立的地层单元,可将断层两侧的地层层面分别进行插值处理,而不考虑另一侧地层数据的影响;由于地层的边缘控制点并非恰好落在断层面上,所以地层层面需向外拓展,使之与断层面相交,求出地层面与断层面的交线(即地层边缘线);最后根据地层边缘线、地层层面、断层面构造出封闭的实体模型.局部法构模的基本流程是:① 研究区域分块.通过研究区域断层网络关系以及地质边界,将研究区域划分成单一的地质构造单元,每一地质构造单元的内部不含其他断层,不受其他断裂构造的影响.② 对每一地质构造单元内部的层位进行拟合.在地层插值时,只考虑落在本构造单元内部的钻孔和地质剖面数据,而不考虑相邻单元地层的影响.③ 将每一地质构造单元内部的地层层面都向外延展,使之与断层面相交,求出交线,并根据断层落差对交线附近的地层层位高程进行调整.④ 合并相邻单元的连续地层层面.由于断层可能会没有完全切透其上覆或下伏的地层,而划分地质构造单元时是将其当作完全切透来处理的,某些原本应是连续的地层却出现了不连续,所以应该合并这些地层层面使之连续.⑤ 生成最终的实体模型.

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

局部法适用于同沉积断层和部分大型走滑、倾滑断层,因为这些断层两侧地层的厚度相差较大,两侧数据的关联性不大.局部法构模的优势在于其较少的用户干预,其缺陷有二:一是对于一些相对复杂的断层系统,由于断层之间的交切关系错综复杂,划分单一的地质构造单元相当困难,更难以保证每一单元内部的地层不受其他断裂构造的影响;二是该方法在处理断层终止于某一地层(即没有切透)时没有顾及到该地层事实上并没有完全错开,应该是连续的,因而此时采用分区插值的结果并不合理.

3.2 断层与地层的统一构模技术

如前所述,整体法建模概念简单、过程复杂,而局部法建模则流程简单,但适应性差、局限性大,因此,需要在这两类方法的基础上设计、开发出一种统一的构模技术,以综合利用既有方法的优势,并避免各自的局限性.基于这种考虑,我们提出了一种断层与地层的统一构模技术,有效地解决了这一难题.

断层与地层统一构模的基本原则是:根据既有断层数据的特点,对研究区内的每一地层层面都进行整体拟合,但在地层层面插值时考虑到断层线的屏蔽作用,在地层面构网时顾及断层线的约束作用,从而生成形态合理的地层层面;然后将断层面与地层面进行切割,调整其交线上的点并将其约束到断层面上,最后根据上、下层面以及侧面来形成完整的实体模型.这种构模方法既适合于同沉积断层(断层两侧地层的厚度与形态差别较大),也适用于非同沉积地层系统(断距不大、断层两侧地层的形态及厚度存在一定的相似性),还可应用于断层终止于地层内部的情况,能够处理具有多值面的逆断层层面拟合问题.该方法具有较强的柔韧性,只要有足够多的控制数据,在理论上就能构造任意复杂的断层系统.断层与地层统一构模技术的基本流程如图 3 所示.

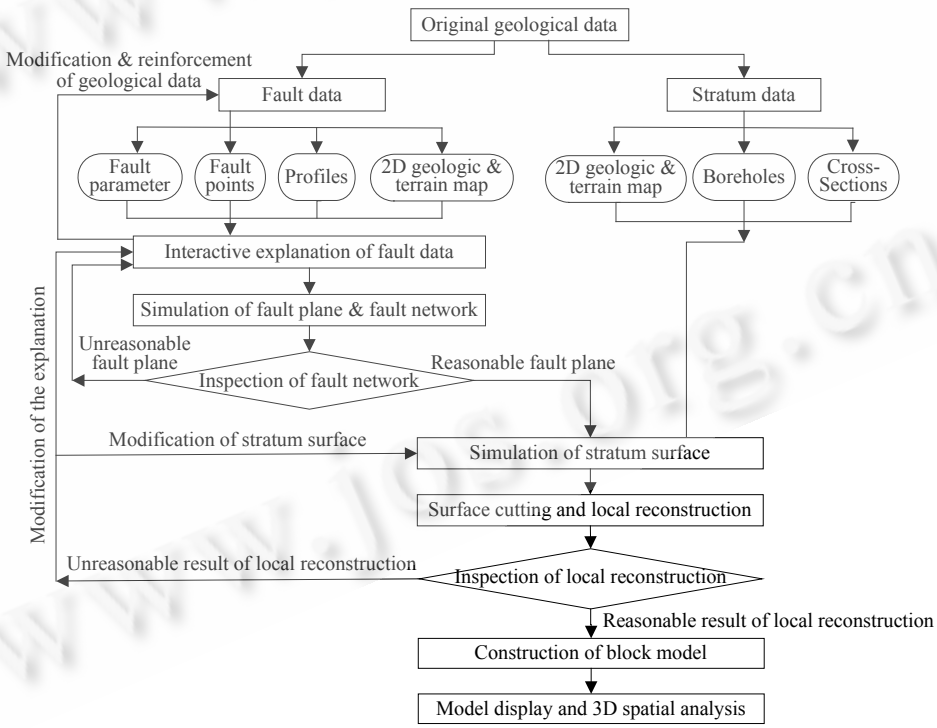


Fig.3 Modeling flow chart of geological faults in 3D based on the unified modeling technique for stratum and fault

图 3 基于统一构模技术的地质断层三维建模流程图

断层与地层统一构模技术的基本流程一般包括 7 个步骤:

(1) 原始地质数据处理.将不同类型和精度的原始地质数据整理成系统能够读取的标准格式.

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

(2) 断层数据的人工交互解释及补充、修正.补充的数据主要源自地质工作者的经验、推断、解释、假定.

(3) 断层面的推演拟合及断层网络的形成.根据地质数据,拟合出合理的断层面;当存在多条断层时,需要按照断层的切错关系排出相应的优先级,进行切割处理,重构切割后的断层面,生成互不穿越的断层网络.

(4) 地层层面的拟合重构.对研究区内的每一地层层面都进行整体拟合.

(5) 断层面与地层面的交切处理与局部重构.构造出断层面和各个地层层面后,需进行地层层面间的切割调整、地层与断层的切割调整;然后根据断距对交线附近的地层层位高程进行调整,并将调整后的交线约束到断层面上.

(6) 地质结构体块体模型的构建.将以层面拓扑关系组织的地质界面三角网集合根据其相交而形成的拓扑关系转变为封闭的、具有整体流形特征的、以块体拓扑形式组织的三角网集合[26],根据三角形之间的表面拓扑关系生成封闭实体拓扑关系,从而生成封闭、一致的块体模型,实现由表面表达的模型到实体模型的转换.

(7) 模型的可视化显示与三维分析.对模型进行常规的可视化展示与三维分析.

4 地质断层三维可视化构模中的关键技术

地质断层的三维可视化构模是一个复杂的交互过程,其中涉及到许多重要技术,如断层面的推演拟合技术、顾及断层线约束和多值面的地层层面重构技术、断层与地层的切割调整约束技术、建模过程中的真三维交互编辑处理技术等.本文在综合前人研究成果的基础上,详细探讨这些技术的实现方案,为三维断层可视化构模系统的开发奠定基础.

4.1 断层面的推演拟合技术

一般情况下,断层面可视为厚度为 0 的空间几何曲面,可用三角网(TIN)来表征其空间展布形态.根据断层数据的来源和表现形式,通常可采用 3 种方法来构造断层面:① 如果反映断层面的断点数据足够多,能够控制和直接勾绘出断层面的轮廓,则可根据这些离散的断点数据进行约束 Delaunay 三角化,从而生成断层面三角网;② 利用断层面上的断点数据及产状等断层参数数据建立断层面的数学模型;③ 根据一系列地质剖面上的断层线数据,采用特定的轮廓线重构曲面算法来生成相应的断层面.

基于断层数学模型的断层面推演技术[5,17]将断层面看作是多个平面的组合,用多个平面近似地模拟逼近实际的断层面.每一个平面的空间方位都可以用实测的走向、倾向和倾角来表示,再加上一系列的断点数据,就可以构建出精确刻画断层面的空间展布特征的数学模型.虽然实际的断层面往往是一个复杂的几何曲面,但由于实际断层数据获取的艰难性和断点分布的稀疏性,采用此种方法进行拟合的结果是可以被接受的.

根据一系列地质剖面上的断层轨迹线,同样可以构造出断层面.采用这种方法的主要难点在于连接相邻剖面之间断层轨迹的多解性,以及缺乏对断层变形和对断层进行三维外推的信息[18].由地质剖面构造一个断层面可分两步来完成:① 剖面到剖面选择被连接的断层线.这一步的主要问题是断层轨迹相关性问题.② 通过调整断层线构建一个曲面网格,即断层面网格.这一步涉及的主要问题是断层轮廓线重构问题,这可以采用特定的轮廓线重构算法来解决.断层轨迹相关性问题主要来自连接各断层轨迹的不同方法.从一个剖面的断层轨迹到另一个剖面的断层轨迹大多具有不相似性,因此很难自动确定哪一个轨迹线属于哪一个断层的优先次序.显然,在只考虑剖面上的断层轨迹时,无法判断出哪种连接更为合理.因此,要基于断层轨迹的几何形状和地质判断标准,对断层轨迹的相关性进行合理的解释、判断和指定.

在复杂断层系统中,往往存在着多条断层,这必然会对断层面网络的拟合以及后续的地层层位模拟产生影响,因此必须考虑多个断层面的错切关系.两个断层之间的错切关系可分为 3 类,即主辅关系、辅主关系和十字型关系.主辅关系和辅主关系合称 T 型相交关系,是指一个断层面在相交处被另一个断层面切割.十字型关系又称辅辅关系,是指两个相交断层面相互没有切割.断层面之间的错切关系表现了断层形成的时间递进序列关系[10].在构建断层面网络时,应按多条断层的错切关系排出相应的优先级,理顺其相互关系,构造出合理的断层交线.另外,在生成断层面网格时,由于获取的断层数据存在误差,两个断层面未必能够精确地相交,这时需要根据确定的错切关系,适当地延展或裁剪断层面,使两个断层面在交线处的形态与其相互关系一致起来.为了正确

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

地显示多个断层面之间的相交关系,它们的网格在交线处必须满足几何匹配;为了在后续处理时能够正确地提取区块,形成封闭、一致的实体模型,要求断层面网格在交线处必须满足拓扑匹配.

对于一个复杂的断层系统,如果存在多条断层,则首先要根据已有的断层数据构造各个断层面,然后利用各个断层面构造断层面网络[9].断层面网络推演拟合的具体步骤如下:

(1) 对于单条断层,如果获取的断点数据足够描述该断层的空间几何形态,则转入(4).

(2) 如果断层数据是以断层参数数据、断点数据(包括钻孔和地质剖面图上的断点数据)为主,则采用基于断层数学模型的断层面推演技术重构断层面.

(3) 如果断层数据是以地质剖面图上的断层轨迹为主,则采用基于轮廓线重构的断层面生成技术重构断层面.

(4) 对各个断层面采用约束 Delaunay 三角化方法生成断层面网格.

(5) 检验构造出来的断层面几何形态,如果不符合要求,则需要补充新的断点数据,然后返回(4),重新生成断层面网格.

(6) 构造出所有断层面之后,对存在错切关系的断层面进行交切处理,根据其错切关系类型构造出合理的交线,并重构各个断层面的三角网.

4.2 地层层面重构技术

断层改变了地层数据的原始分布格局,通过各种方法获取的地层层位信息(包括钻孔、地质剖面图上的地层分层信息等)都是断层发生后的数据,要利用这些稀疏的原始数据并结合断层面信息重构各个地层层面,需要解决以下难题:地层面与断层面的交线以及交线上的点(即插值断点)的计算;地层层面网格加密插值时如何考虑断层线的屏蔽作用;地层层面构网时如何使用断层线进行约束;具有多值面的逆断层层面网格的生成;地层与地层相交关系的处理.

4.2.1 地层面与断层面交线的求取

地层被断层切断后,上、下盘块沿着断层面发生相对位移.对每一个地层层面而言,采用直接测量或勘察的方法获取其与断层面的交点坐标(即断点坐标)是相当困难的,这需要利用现有的钻孔和剖面数据中蕴涵的层位信息,结合断层的落差(或断距),采用适当的方法求出断层面与地层面的交线,从而推算出各个插值断点的坐标.

传统的求断层交线的方法是,先对原始的地层层位数据进行加密,然后根据断层的影响范围和落差对上、下盘断块进行调值,从而求得断层与地层层面的交线.这类方法可称为断层整体插值法,它需要建模人员特别指定断层的影响范围和落差,算法繁琐、复杂且适应性差,只适合于非同沉积地层系统.

本文提出一种称作“扩展初始地层法”的算法来求取地层面与断层面的交线,其原理是:先直接利用原始的地层层位数据拟合出一个初始的地层面,然后用断层面切割地层面,将初始地层面网格一分为二,找到两边地层面相对于断层面的外围三角形,然后按照一定的规则延伸外围三角形的边,使之与断层面相交并求出交线,从而得到合理的插值断点坐标.在具体实现时,需要考虑断层不切割地层、地层面不跨越断层以及地层面跨越断层三种情况,从而采用不同的处理方法.

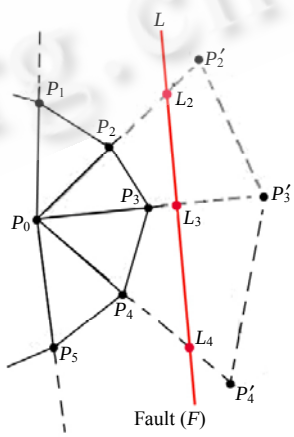


Fig.4 Schematic drawing for the principle of initial stratum extending method

图 4 扩展初始地层法原理示意图

如图 4 所示,图中实线所围成的三角网是初始地层面的外围三角形,虚线所构成的边线是将外围三角形按照一定的规则向断层 F 方向延伸后的三角网,交线 L 及其上的顶点则是根据延伸后的外围三角形与断层面相交而求得的.扩展初始地层法是先求出位于断层一侧的地层面相对于断层的外围三角形,然后向断层方向延伸这些三角形并计算交线.延伸方向可取为地层面的带权平均倾角,这样能使地层的起伏对断层交线

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

的位置产生一定的影响.另外,该方法只需要用到原始的地层层位控制数据,每个地层层面的断距(或落差)都可由程序自动推演出来(特殊情况下也可进行指定),这对自动或半自动的进行复杂断层系统的构模极为有用.

4.2.2 地层层面网格的加密与插值

由于原始的地层控制点非常稀疏,直接利用这些点生成的地层面网格在形态上并不合理,因此,需要采用特定的算法对原始地层面网格进行加密,并对加密后的点进行插值.具体实现时可采用基于矩形网格的地层层面加密方法,插值时需要考虑断层面的屏蔽作用对原始数据点选取的影响.

传统的插值算法(如距离反比加权法、Kriging 法等)中的插值函数多是以空间点之间的距离为变量的,但由于断层的存在,会使得断层面两侧的原始数据点即使三维直线距离很近,属性(高程值)差别也很大,这时就需要选取特定的原始数据点,并对待插点和原始数据点之间的距离进行适当的变换处理.

图 5 显示的是待插点位于正断层的情况,断层面 $ABCDA$ 在矩形网格上的投影为断面区投影 $A'B'C'D'A'$,原始数据点 P_{01}(在正断层的下盘上),P_{02}(在正断层的上盘上)在矩形网格(XY 平面)上的投影点分别为 P_{01}',P_{02}',待插点 P_x 在矩形网格上投影点为 P_x'.若 P_x 不在断层面上,即 P_x'位于断面区投影 $A'B'C'D'A'$之外,则:

① 当 P_x 位于上盘时,待插点的参考点(即原始数据点)应从上盘地层中选取,如图 5 所示的 P_{02};

② 当 P_x 位于下盘时,待插点的参考点应从下盘地层中选取,如图 5 所示的 P_{01}.

若 P_x 位于断层面上,即投影点 P_x'位于断面区投影 $A'B'C'D'A'$之内,则待插点的参考点应同时包括两盘上的原始数据点,但待插点与参考点(即原始数据点)之间的距离不应使用传统方法中的欧氏距离(三维空间直线距离),而应使用这两点之间围绕断面区的“环绕距离”[27],即

$$d_{P_x'P_{01}'} = d_{P_x'E_1'} + d_{E_1'D'} + d_{D'E_1'} + d_{E_1'P_{01}'},$$

$$d_{P_x'P_{02}'} = d_{P_x'E_2'} + d_{E_2'B'} + d_{B'E_2'} + d_{E_2'P_{02}'},$$

其中,点 E_1'是点 P_x', P_{01}'的连线与断面区投影 $A'B'C'D'A'$的交点,点 E_2'是点 P_x', P_{02}'的连线与断面区投影 $A'B'C'D'A'$的交点,点 D',B'是断面区投影 $A'B'C'D'A'$边界上的点,它们满足这样的条件:在点 E_1'到断面区投影区域边界上各点的距离中,点 D'到点 E_1'的距离最短;在点 E_2'到断面区投影区域边界上各点的距离中,点 B'到点 E_2'的距离最短.

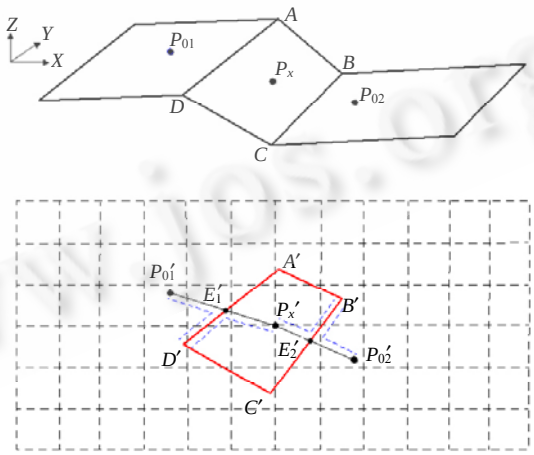


Fig.5 Selection of the reference points when the interpolated point is controlled by the obverse fault

图 5 待插点受控于正断层时参考点的选取

当待插点位于逆断层时(如图 6 所示),若待插点 P_x 在矩形网格上的投影点 P_x'位于断面区投影 $A'B'C'D'A'$之外,则:

① 当 P_x 位于上盘时,待插点的参考点(即原始数据点)应从上盘地层中选取,如图 6 中的 P_{01};

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

② 当 P_x 位于下盘时,待插点的参考点应从下盘地层中选取,如图 6 中的 P_{02}.

若 P_x'落在断面区投影$A'B'C'D'A'$之内,则 P_x'对应的待插点有两个,一个是上盘待插点(记为 P_{x1}),另一个是下盘插值点(记为 P_{x2}).当计算 P_{x1} 时,待插点的参考点(即原始数据点)应从上盘地层中选取,如图 6 中的 P_{01};当计算 P_{x2} 时,待插点的参考点应从下盘地层中选取,如图 6 中的 P_{02}.

找到参考计算点后,可采用特定的内插算法对待插网格结点进行插值.常用的空间插值算法有距离反比加权法、二次趋势面法、Kriging 法等.在实际应用中,具体采用何种算法应根据实际数据的分布情况而定.

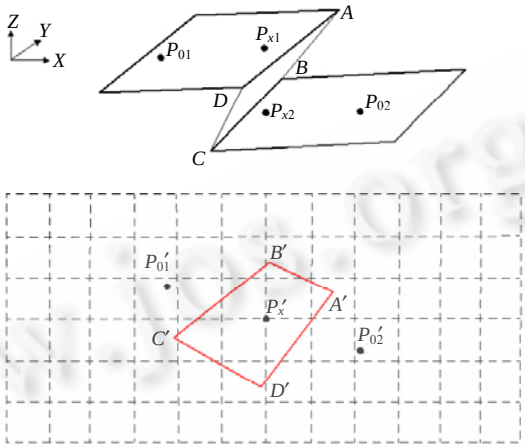


Fig.6 Selection of the reference points when the interpolated point is controlled by the reverse fault

图 6 待插点受控于逆断层时参考点的选取

4.2.3 地层层面网格生成技术

经过加密、插值处理之后,得到用来建立地层层面网格的数据点集 G,它包括两类数据点集:新插入的网格结点点集 G_1(表现为分布均匀的网格结点)和原始的数据点点集 G_2.常规的 Delaunay 三角网剖分算法(如 Ruppert 算法、分割—归并算法等)可基于数据点集 G 生成一个平面三角网,但它仅适用于空间分布形态规则且连续的地层层面网格的生成,无法有效地处理在空间上部分重叠的逆断层[17,28].本文提出一种处理包含逆断层的地层层面网格生成技术,有效地解决了这一难题.具体处理步骤如下:

(1) 首先按照特定的规则对数据点集 G 进行预处理,消除 G_1 中与原始数据点 G_2 中近于重合的插入点.

(2) 将与该地层层面相交切的所有断层面在 XY 平面上进行投影,得到断面区投影线集 L.

(3) 以 L 为约束边,采用分割-归并方法对 G 进行约束 Delaunay 三角化,以生成初始三角形网格.在 Delaunay 三角化时要适当插入辅助顶点,以使约束边集 L 在 Delaunay 三角化时可见.显然,新生成的三角网中的任何一个平面三角形都可视为地层层面 TIN 模型中的 1 个或两个三角面片(在逆断层区内的平面三角形会出现此种情况)在 XY 平面上的投影.下面从这个初始平面三角网推出建立地层层面网格模型所需的全部三角面片.

(4) 设$\Delta P_1P_2P_3$ 为第(3)步所生成的初始三角形网格中的任意一个三角形,则:

- 如果$\Delta P_1P_2P_3$ 的 3 个顶点 P_1,P_2,P_3 都在逆断层断面投影区内,那么该三角形要生成两个三角面片,一个为下盘地层网格中的三角面片(使用下盘数据点),另一个为上盘地层网格中的三角面片(使用上盘数据点);
- 如果$\Delta P_1P_2P_3$ 中至少有 1 条边与逆断层断面投影区轮廓线相交(可将交点集记为 P_x,则 P_x 一定是$\Delta P_1P_2P_3$ 的顶点),而且至少有 1 个顶点在逆断层断面投影区之外(将此顶点记为 P_y),那么,如果 P_y 位于逆断层的上盘地层,则 P_x 对应的原始数据点应从上盘数据中查找;如果 P_y 位于逆断层的下盘地层,则 P_x 对应的原始数据点应从下盘数据中查找;
- 在其他情况下,可直接根据$\Delta P_1P_2P_3$ 的 3 个顶点与原始数据点的投影关系,找到它们所对应的 3 个原始数据点,并利用这 3 个原始数据点形成一个三角面片即可.

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

经过上述处理之后得到的地层层面 TIN 网格即为要求的地层层面网格.

4.2.4 地层与地层相交关系处理

在三维地质模型中,地层与地层之间也会发生相交关系,且地层在相交处有多种不同的切割情形,如尖灭、侵入和透镜体等.相应地,可将地层间的相交关系分为主辅关系、主主关系和混合关系三类,并规定辅地层被主地层切割,则主主关系可形成透镜体,主辅关系可形成尖灭地层或侵入体.在处理地层与地层的相交关系时,应根据预先定义好的各个地层之间的相交关系进行切割处理,从而生成符合实际的地层形态.

4.3 断层面与地层面的切割、调整、约束处理技术

构建出全部断层界面和地层界面之后,需要将断层面与地层面进行切割、调整处理,以生成封闭、一致的实体模型.在切割、调整地层面的过程中,要注意到“断层面切割地层层面并且地层沿着断层面滑动”这一事实.要模拟这一基本地质概念,DSI 中引入了以下两个值得借鉴的约束条件[18,20,23]:① 边界约束(OnTsurf 约束),即相应于断层的上升盘与下降盘的地层边界任何时刻都必须位于该断层面上;② 矢量连接约束(VecLink 约束),即由断层引起的位移可通过在断层的上升盘和下降盘之间设置特定的位移向量来实现.

在断层面与地层面的切割、调整、约束的过程中,三角网切割技术是一项极为关键的技术,目前研究较多的主要有 gOcad 项目组实现的函数 TSURF_Cut_by_Scissors、光线追踪程序 PoVRay[3] 等.本文改进了一种基于 OBB(oriented bounding boxes)树的三角网切割算法 TRICUT[29],并用它来实现断层面与地层面的切割.该算法由 3 个核心部分组成:用于三角形对碰撞检测的 OBB 树结构、用于三角网求交后重新三角化的约束 Delaunay 三角化算法、用于三角网切割后的三角形数据分类算法.

三角网切割算法 TRICUT 为断层面与地层面的切割、调整、约束处理奠定了基础.在断层与地层层面切割后,要根据断距对交线附近的地层层位高程进行调整,并将调整后的交线约束到断层面上;然后将被断层面切割后所形成的每个地层块体内相邻的地层层面进行缝合(根据相邻地层层面外边界轮廓线构造环状网格曲面),形成每个块体外边界面网格,即可形成完整的三维断层结构模型.

5 研究实例

本文提出的地质断层三维可视化模型的构建方法与实现算法已经在微机平台、OpenGL 图形库下采用 Visual C^{++}开发实现,并集成到我们研发的三维地质建模及可视化系统之中.在该系统的支持下,我们开展了北京奥运公园场区基岩地质模型的三维建模工作.图 7 所示为北京奥运公园场区的基岩地质图以及研究区基岩钻孔分布位置(共计有 35 个基岩钻孔,钻孔深度在 1 000m 左右).利用这些钻孔数据,外加一些实测的物探剖面数据和断层参数数据,采用本文提出的断层与地层的统一构模技术,构建出奥运公园场区三维地质模型.图 8 是模型全貌,图 9(a)和图 9(b)分别是对模型进行切割和显示部分地层时的建模效果图.

从三维地质模型中可以看出:该地区发育有两条断裂构造,一条是贯穿整个奥运公园场区的黄庄-高丽营断裂,另一条是一个接近东西向的隐伏断层;在奥运村地区还分布有会引起塌陷的洼里砾岩,发育有地下岩溶和隐伏岩溶.该地区的大型建筑物选址应尽量避开上述断裂带和岩溶发育区.复杂地质体三维结构模型的精度主要受控于地层层面的内插误差和特殊地质界面(主要是断层面)的外推误差[30,31].为了对模型的可靠性进行定量评估,选取 2003~2004 年间的两孔地热钻井数据[32]、近期实际工程所获取的地质钻孔数据、采用反射波法高分辨率浅层地震勘探技术所获取的地震勘探数据[33]等实测数据进行模型的实际验证工作.结果发现,在本文所构建的北京奥运公园场区三维地质模型中,地层层面控制点的误差在 50cm 以内,断层面上控制点与实测数据的误差小于 90cm.总体来看,模型的精度较高,它不仅直观、形象地展现了该地区地层与构造的空间展布特征,精确地界定了黄庄-高丽营断裂带和隐伏断层的空间位置,还可以直接应用于工程实际,为该地区岩溶系统的定量评估、合理开发以及断裂构造的进一步研究提供深层次的支持.

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

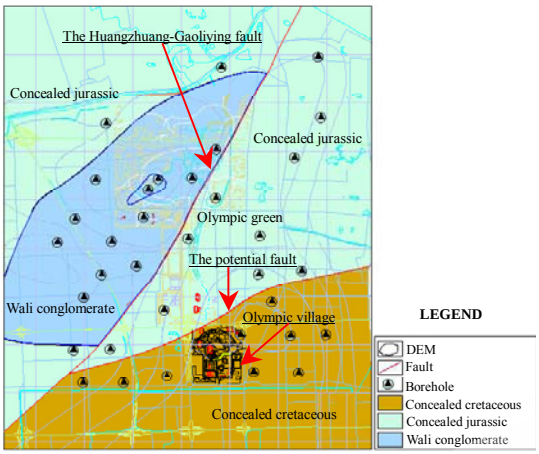


Fig.7 Geologic map of bedrock in the Beijing Olympic Green District

图 7 北京奥运公园场区基岩地质图

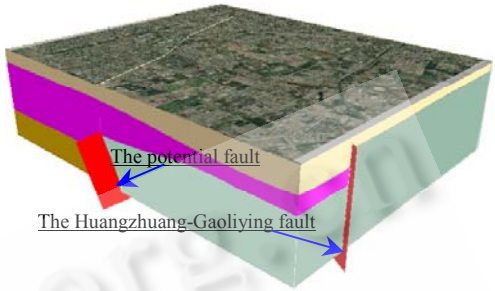
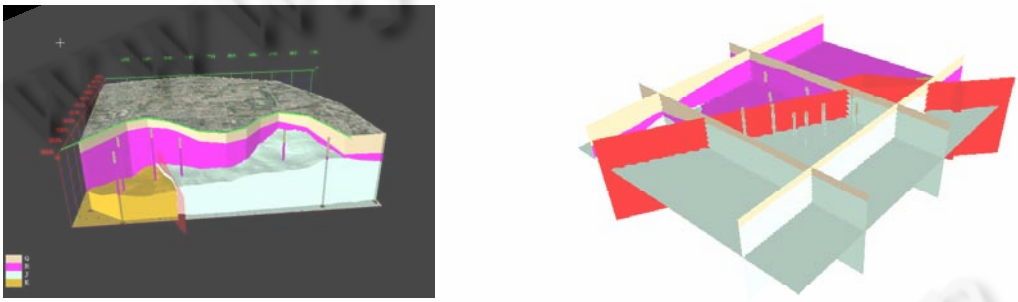


Fig.8 3D geological model of bedrock in the Beijing Olympic Green District

图 8 北京奥运公园场区三维基岩地质模型全貌



(a) (b)

Fig.9 The partial incision view of 3D geological model in the Beijing Olympic Green District

图 9 北京奥运公园场区三维地质模型局部效果图

6 总结与展望

地质问题已成为贯穿于数字城市、减灾防灾、城建工程、地下工程、水电工程、交通工程、环境工程、资源开发的一个基础性问题,三维地学模拟是解决这些领域的地质问题的关键[3−5,34].目前,成熟的三维地质模拟技术集中于简单层状地质体的三维重构与可视化表达分析上,而对结构复杂、物化属性分布不均匀的复杂地质体的三维可视化构模与分析技术则研究得不够深入.本文对包含断层的复杂地质体三维构模技术展开讨论并提出了相应的解决方案,从理论上详细、系统地归纳了地质断层三维可视化构模的基本原理和实施过程,建立了一套完整的地质断层建模与可视化分析的应用技术方案,深化了对三维空间地质实体及其建模方法的认识,为三维地学模拟在地学领域的具体应用奠定了基础.今后,还应进一步研究复杂地质构造(如侵入体、透镜体、复杂断层、褶皱以及多种地质构造的混合)在三维地质模型构建过程中的影响与作用,解决这些复杂地质构造的模拟重构问题,进一步研究三维地质可视化模型构建过程中的人机交互、精度评估、误差修正及其可视化实现技术.

References:

[1] Marschallinger R. A method for three-dimensional reconstruction of macroscopic features in geological materials. Computers & Geosciences, 1998,24(9):875−883.

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

[2] de Rienzo F, Oreste P, Pelizza S. Subsurface geological-geotechnical modelling to sustain underground civil planning. Engineering Geology, 2008,96(1):187−204.

[3] Wang CX, Bai SW. Study on application of 3DSIS to geotechnical engineering. Rock and Soil Mechanics, 2003,24(4):614−617 (in Chinese with English abstract).

[4] Jiao YQ, Zhu PM, Lei XR, Yang SK, Wan JW. Spatial information visualization application in geosciences. Geological Sciences and Technology Information, 2005,24(1):1−6 (in Chinese with English abstract).

[5] Wu Q, Xu H. On three-dimensional geological modeling and visualization. Science in China Series D: Earth Sciences, 2004,47(8): 739−748.

[6] Turner AK. Challenges and trends for geological modelling and visualization. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2006,65(2):109−127.

[7] Kaufmann O, Martin T. 3D geological modelling from boreholes, cross-sections and geological maps, application over former natural gas storages in coal mines. Computers & Geosciences, 2008,34(3):278−290.

[8] Wu LX. Topological relations embodied in a generalizes tri-prism (GTP) model for a 3D geoscience modeling system. Computers & Geosciences, 2004,30(4):405−418.

[9] Wu Q, Xu H, Zou XK. An effective method for 3D geological modeling with multi-source data integration. Computers & Geosciences, 2005,31(1):35−43.

[10] Li PJ. Three dimensional modeling and visualization for stratified geological objects. Earth Science Frontiers, 2000,7(Supp.): 271−277 (in Chinese with English abstract).

[11] Wang ZG, Cao DY. 3D modeling method for complicated geologic body based on the improved triangular prism model. Coal Geology of China, 2004,16(1):4−6 (in Chinese with English abstract).

[12] Mallet JL. Discrete smooth interpolation. ACM Trans. on Graphics, 1989,8(2):121−144.

[13] Lemon AM, Jones NL. Building solid models from boreholes and user-defined cross-sections. Computers & Geosciences, 2003, 29(5):547−555.

[14] Roberto V, Chiaruttini C. Modeling and reasoning techniques in geological interpretation. IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics-Part A: Systems and Humans, 1999,29(5):460−473.

[15] Qu HG, Pan M, Wang Y, Xue S, Ming J. Three-Dimensional geological modeling from topological cross-sections. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2006,42(6):717−723 (in Chinese with English abstract).

[16] Smirnoff A, Boisvert E, Paradis SJ. Support vector machine for 3D modelling from sparse geological information of various origins. Computers & Geosciences, 2008,34(2):127−143.

[17] Wu Q, Xu H. An approach to computer modeling and visualization of geological faults in 3D. Computers & Geosciences, 2003, 29(4):503−509.

[18] Meng XH, Wang WM, Yao CL, Hu CS. Principle and Application of Computer-Aided Design for Geological Model. Beijing: Geological Publishing House, 2001. 53−54 (in Chinese).

[19] Wang RH, Li YS. 3D fault modeling on point sets from different sources. Coal Geology & Exploration, 2007,35(5):11−16 (in Chinese with English abstract).

[20] Mallet JL. Discrete modeling for natural objects. Mathematical Geology, 1997,29(2):199−219.

[21] Xu T, Xu GM, Gao EG, Zhu LB, Jiang XY. Block modeling and shooting ray tracing in complex 3D media. Chinese Journal of Geophysics, 2004,47(6):1118−1126 (in Chinese with English abstract).

[22] He MC, Li XY, Liu B, Xu NX. Study on processing method of drilling data for three-dimensional modeling of engineering rock mass. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005,24(11):1821−1826 (in Chinese with English abstract).

[23] Zhong DH, Li MC, Liu J. 3D integrated modeling approach to geo-engineering objects of hydraulic and hydroelectric projects. Science in China Series E: Technological Sciences, 2007,50(3):329−342.

[24] Mello UT, Henderson ME. Techniques for including large deformations associated with salt and fault motion in basin modeling. Marine and Petroleum Geology, 1997,14(5):551−564.

[25] Wu SG, Wang XL, Ji YX, Liu YZ, Han WG. Application of forecasting structural cracks technique of 3DMove in Chengdao Buried Hill. Science in China Series D: Earth Sciences, 2004,34(9):818−824 (in Chinese with English abstract).

[26] Meng XH, Yang Q, Li JG. Construction of coherent 3D geological blocks from stratified geological structure. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2005,31(2):182−186 (in Chinese with English abstract).

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

[27] Pouzet J. Estimation of a surface with known discontinuities for automatic contouring purposes. Mathematical Geology, 1980, 12(6):559−575.

[28] Cai Q, Yang Q, Chen QM. Conforming delaunay triangulation for geological structure with overlapping domains. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2004,16(6):766−771 (in Chinese with English abstract).

[29] Lindenbeck CH, Ebert HD, Ulmer H, Lavorante LP, Pflug R. TRICUT: A program to clip triangle meshes using the rapid and triangle libraries and the visualization toolkit. Computers & Geosciences, 2002,28(7):841−850.

[30] Tacher L, Pomian-Srzednicki I, Parriaux A. Geological uncertainties associated with 3-D subsurface models. Computers & Geosciences, 2006,32(2):212−221.

[31] Bistacchi A, Massironi M, Piaz GVD, Piaz GD, Monopoli B, Schiavo A, Toffolon G. 3D fold and fault reconstruction with an uncertainty model: An example from an Alpine tunnel case study. Computers & Geosciences, 2008,34(4):351−372.

[32] Ke BL. Discussion on geologic characteristics and age of Wali Conglomerate. Beijing Geology, 2005,17(3):11−15 (in Chinese with English abstract).

[33] Rong LX. An application of shallow seismic exploration for detecting cavity at the Olympic Park in Beijing. Geology and Prospecting, 2004,40(Supp.):136−138 (in Chinese with English abstract).

[34] Zhou CY, Chen H, Liu ZQ, Li YS, Shang W. Characters of underground environment information system in a major project. Rock and Soil Mechanics, 2005,26(2):216−220 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献:

[3] 王纯祥,白世伟.三维地层信息系统在岩土工程中应用研究.岩土力学,2003,24(4):614−617.

[4] 焦养泉,朱培民,雷新荣,杨生科,万军伟.地学空间信息可视化技术应用研究.地质科技情报,2005,24(1):1−6.

[10] 李培军.层状地质体的三维模拟与可视化.地学前缘,2000,7(增刊):271−277.

[11] 王占刚,曹代勇.基于改进三棱柱模型的复杂地质体 3D 建模方法.中国煤田地质,2004,16(1):4−6.

[15] 屈红刚,潘懋,王勇,薛胜,明镜.基于含拓扑剖面的三维地质建模.北京大学学报(自然科学版),2006,42(6):717−723.

[18] 孟小红,王卫民,姚长利,胡朝顺.地质模型计算机辅助设计原理与应用.北京:地质出版社,2001.53−54.

[19] 王润怀,李永树.异源点集下三维断层建模方法.煤田地质与勘探,2007,35(5):11−16.

[21] 徐涛,徐果明,高而根,朱良保,蒋先艺.三维复杂介质的块状建模和试射射线追踪.地球物理学报,2004,47(6):1118−1126.

[22] 何满潮,李学元,刘斌,徐能雄.工程岩体三维构模中钻孔数据处理方法.岩石力学与工程学报,2005,24(11):1821−1826.

[25] 吴时国,王秀铃,季玉新,刘玉珍,韩文功.3DMove 构造裂缝预测技术在古潜山的应用研究.中国科学(D 辑:地球科学),2004,34(9):818−824.

[26] 孟宪海,杨钦,李吉刚.基于层面结构的三维闭合地质区块构造算法.北京航空航天大学学报,2005,31(2):182−186.

[28] 蔡强,杨钦,陈其明.地质结构重叠域的限定 Delaunay 三角剖分研究.计算机辅助设计与图形学学报,2004,16(6):766−771.

[32] 柯柏林.北京“洼里砾岩”地质特征及时代讨论.北京地质,2005,17(3):11−15.

[33] 荣立新.浅层地震勘探在奥运公园探测溶洞的应用研究.地质与勘探,2004,40(增刊):136−138.

[34] 周翠英,陈恒,刘祚秋,李亚生,尚伟.重大工程地下环境信息系统的特点.岩土力学,2005,26(2):216−220.

朱良峰(1978－),男,安徽太和人,博士,讲师,主要研究领域为三维 GIS 软件开发,地学空间信息建模.

吴信才(1952－),男,博士,教授,博士生导师,主要研究领域为 GIS 基础理论与软件开发、应用.

潘信(1981－),女,博士,助理研究员,主要研究领域为三维 GIS.

刘修国(1969－),男,博士,教授,博士生导师,主要研究领域为三维 GIS 技术与应用工程,遥感数据处理与应用.

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn