

文章编号: 1000-7598-(2008) 01-0274-05

地质断层三维构模技术研究

朱良峰¹, 潘 信^{1,2}

(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. 华东师范大学 保卫处, 上海 200062)

摘 要: 对包含断层的复杂地质体三维构模技术展开讨论并提出相应的解决方案。分析了实际勘察所获取的断层数据类型, 设计了标准的断层数据库格式; 系统地评价了两类基本的断层构模方法(即基于地层恢复的断层构模技术和基于分区插值的断层构模技术), 分析了各自的特点和不足, 在此基础上提出了断层与地层的统一构模技术; 该技术既能应用于同沉积断层, 又能适应断层终止于地层内部的情况, 还能处理具有多值面的逆断层构造的拟合问题, 在理论上能够构造任意复杂的断层系统。通过北京奥运公园场址的断层构模实例验证了该方法的有效性。

关 键 词: 三维地质建模; 断层; 地层; 断层数据; 可视化

中图分类号: P 208; TU 17

文献标识码: A

Study on computer modeling of geological faults in 3D

ZHU Liang-feng¹, PAN Xin^{1,2}

(1. Key Laboratory of Geographical Information Science for Ministry of Education, East China Normal University, Shanghai 200062, China;

2. Security Department, East China Normal University, Shanghai 200062, China)

Abstract: The simulation and expression of geological faults is an essential technique of the modeling approaches for the complex geologic bodies. The research domains of this paper are the basic theories and essential techniques of the structural modeling techniques of complex geological entities contained faults. The structural modeling techniques of complex geological entities contained reverse faults are discussed; and a series of approaches are proposed. Based on the practical geological exploration, data types that expressed geological faults in 3D are analyzed and a normative database format for geological faults is designed. Two kinds of modeling approaches for faults, such as modeling technique of fault based on stratum recover and based on interpolation in subareas, are compared. The Unified Modeling Technique for stratum and fault, a novel approach, is presented to solve the puzzled problems of reverse faults with multivalued surfaces, syn-sedimentary faults and faults terminated within geological models. In order to confirm the practical result of this method, a case study of fault model of bed rock in the Beijing Olympic Green District is presented.

Key words: 3D geological modeling; geological faults; stratum; fault data; visualization

1 引 言

断层是地壳中发育广泛且极为重要的一类地质构造, 在三维空间中研究断层及其构模技术具有极为重要的理论意义和实用价值^[1-4]。目前, 地质断层三维构模的难点主要体现在 3 个方面: 一是地质断层数据类型的多样性、数量的稀疏性、分布的零散性和获取的艰难性, 这导致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, 只有在整合现有的地质数据的基础上, 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地描述与表达; 三是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单层状地质体, 但在建模的过程中手工添加虚拟界面和划分地层面都极为繁琐, 不适合于用计算机进行自动或半自动的建模。

收稿日期: 2006-07-05

基金项目: 上海市科委资助计划项目(自然科学基金)(No. 06ZR14031); 上海市教育发展基金会“晨光计划”资助项目(No. 2007CG34)。

作者简介: 朱良峰, 男, 1978 年生, 博士, 副教授, 主要从事三维 GIS 软件的开发与应用工作。E-mail: zhuliangfeng@163.com

为解决这些难题,笔者将对包含断层在内的复杂地质体三维构模技术展开讨论,并提出相应的解决方案。首先基于实际勘察所获取的断层数据,设计标准的断层数据库格式;然后系统地总结评价两类既有的断层构模方法(即基于地层恢复的断层构模技术和基于分区插值的断层构模技术),分析各自的特点和不足,并在此基础上提出断层与地层的统一构模技术,以综合利用现有方法的优点,并避免各自的缺陷;最后通过北京奥运公园场址的断层构模实例来验证该方法的有效性。

2 断层数据及其标准化处理

原始的地质数据是地质断层三维构模的前提和基础。根据数据来源和表现形式的差异,断层数据可分为3类,即野外地质勘察获取的断层参数数据、从钻孔(测井)中获取的断点数据和地质剖面数据。这些数据可能单独存在,也可能相互补充,共同描述断层的空间属性。不同的数据不但表现形式不同,而且所反映的断层信息和后续的建模方法也有差异。

由于断层构造的复杂性和研究手段的局限性,现有的断层数据的存在形式有着很大的差异:既有文字描述,又有剖面图形、表格记录;有些是精确性较高的实测记录,有些则仅仅是地质工作者的推测、经验甚至假定^[5]。为了充分利用既有的断层资料进行后续的构模工作,首先必须进行断层数据的标准化工作,设计断层数据格式并组织、准备断层数据。经过分类和归并整理,本文将与断层构模相关的地质断层数据标准化为以下3类,即平面图形数据、表格数据和剖面图形数据。其中表格数据和剖面图形中蕴涵的断点数据是断层构模的主要数据。

(1) 平面图形数据。在地质图、地形图或地质构造图等平面图件上,一般标示出断层线,这类数据是传统地质学中对断层最常用、最直观表示,在断层构模时应给予足够的重视。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,能够方便地提取出来。

(2) 表格数据。与断层相关的属性数据可用以下4个表格来描述,即断层整体描述表、断层分段描述表、断点数据表和断层错切关系表。需要指出的是,在描述具体的断层时,并不是所有的表格项描述数据;如果没有相关的数据,相应的属性项部分可以为空。各个表格的具体项目如下:

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(正断层、逆断层、平移断层、枢纽断层、未知、其他)、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(上断点、下断点、普通断点、未知类型)、该断点处的水平断距、垂直断距、走向、倾向、倾角、数据来源(钻孔、推测、其他)。

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、未知、无相交关系)。

(3) 剖面图形数据。地质剖面图是二维图件,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,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、断点的信息都应该完整地记录下来并能被快速地识别、提取出来。

3 三维断层构模方法与基本流程

3.1 两类基本的断层构模方法

断层不但破坏了地质体的连续性,还改变了地层数据的原始分布格局。由于断层等地质构造的作用,最初呈连续分布的层状地质体往往会被纵横交错的断裂构造或其他活动地质构造切割的支离破碎,组成地质体的地质界面也具有不连续性和突变性的典型特征,在进行复杂断层系统构模时很难对整个构模区域进行连续插值^[2,4,6]。目前,国内外对于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,又称为整体法;另一类是基于分区插值的断层构模技术,可称为局部法。

采用整体法建模的代表性系统是3D Move建模软件。整体法建模可以看作是一种地质成因法,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,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,实际建模时应用得并不多。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的相似性的断层系统(主要是非同沉积地层系统)。对于同沉积断层似乎并无必要,再加上建模过程中要求建模者使用较多的正、反演知识,故该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断层系统的构模。

局部法适用于同沉积断层,因为同沉积断层系统中断层两侧地层的厚度相差较大,两侧数据的关联性不大;对于一些走滑断层、大型的倾滑断层,也可采用这种构模方法。局部法构模的优势在于其较少的用户干预,但其缺陷也是显而易见的。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;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,而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

整体法建模的概念简单,但操作过程比较复杂,而局部法相对简单,但其对复杂断层系统的适应性较差,而且无法顾及连续地层层面的关系,局限性较大。能否采用一种统一的断层构模技术,既能综合利用两类方法的优势,而又能避免各自的缺陷呢?基于这种考虑,本文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。

断层与地层的统一构模的基本原则是:根据现有断层数据的特点,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、下层面以及侧面形成完整的实体模型。

断层与地层的统一构模技术既能应用于断层两侧地层的厚度与形态差别较大的情况(同沉积断层),又能适应断层终止于地层内部的情况,还能处理具有多值面的逆断层面拟合问题。只要有足够多的控制数据,该方法在理论上能够构造任意复杂的断层系统,具有较强的柔韧性。

断层与地层统一构模技术的基本流程如图1所示,具体建模时有7个关键点:

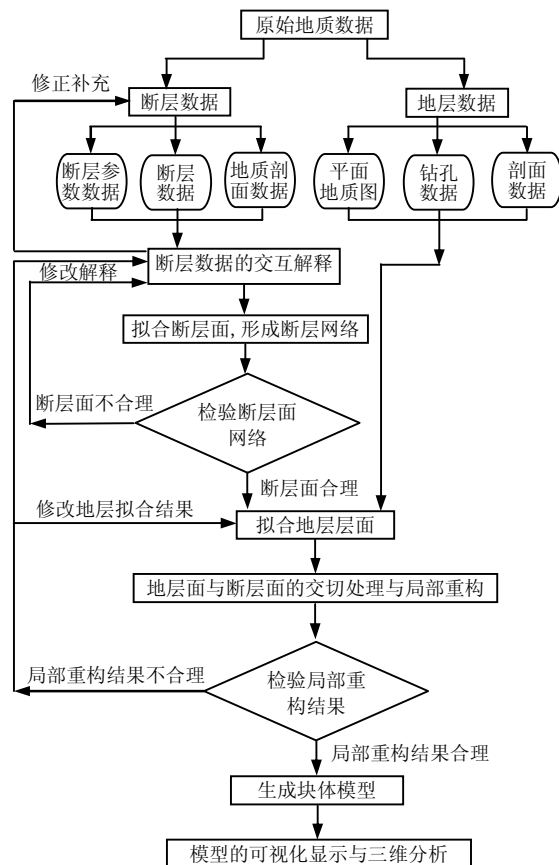


图1 基于统一构模技术的地质断层三维建模流程
Fig.1 Flow chart of computer modeling of geological faults in 3D based on unified modeling technique

(1) 地质数据处理。地质数据来源广泛,类型众多。对这些不同类型和精度的数据需要按照预定的格式进行处理,整理成系统能够读写的标准形式,如钻孔分层数据、地质剖面数据、断层表格数据、平面图件数据等。

(2) 断层数据的交互解释及其补充、修正。对于一个包含断层的地质构造系统来说,可直接利用的数据往往是不充足的,根据这些信息往往不能足够精确地描述断层系统,因此,需要适当的补充、修正一些断层数据(特别是断点数据)。补充的数据主要源自地质工作者的工作经验,主要的表现形式是地质剖面图。剖面图能够精确地表达各个地层与断层的交切关系以及各个断点的准确坐标,而这些信息对断层面和地层层面的拟合有着至关重要的意义。因此,构模系统应该具有一个完善的地质剖面图生成和编辑工具,能够在一个友好的可视化环境中,半自动的生成并修改地质剖面,然后将剖面图反映的信息加入到模型之中。

(3) 拟合断层面,形成断层网络。根据地质剖面图中的断点数据、数据库中的断层参数数据,拟合出合理的断层面。在存在多条断层的情况下,断

层之间可能会存在切错关系。这需要先按多条断层的切错关系排出相应的优先级(在数据库的相应表格中已经作了记录),然后进行切割处理,重构切割后的断层面,生成互不穿越的断层网络。

(4) 拟合地层层面。对研究区内的每一地层层面都进行整体拟合。在拟合地层时,要解决4个技术问题:地层层面与断层面的交线及交线上的点(插值断点)的求取;地层层面插值时要考虑到断层线的屏蔽作用;地层层面构网时要顾及断层线的约束作用;包含多值面的逆断层网格的生成技术。

(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,还要进行地层层面间的切割调整、地层与断层的切割调整;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。

(6) 生成块体模型。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^[7-9],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,最终实现由表面表达的模型到实体建模的转换。

(7) 模型的可视化显示与三维分析。可对模型进行常规的三维分析,如模型观察、模型切割、隧洞开挖、体积量算等。另外,根据其他专业分析的需要,可能还需要将实体模型转变为体元模型,如四面体模型(TEN)、三维栅格模型(3D Grid)等。

需要指出的是,由于断层系统的复杂性和获取数据的局限性,三维断层构模应是一个反复迭代的过程,上述流程中的任一建模阶段都应允许返回到其上面的阶段。建模者可以随时监控建模流程输出的中间结果,如果发现有不合适的地方,可随时返回到前面的步骤进行相应的修正。

4 建模实例

2008年北京奥运会举世期待。目前,奥运场馆规划与建设工程正在如火如荼的展开,但人们对奥运场馆区域的地质情况却知之甚少,特别是北京奥运公园场址位于黄庄—高丽营断裂带附近,而该断裂带属于活动断裂带,重大建筑物如果跨越断裂带,安全将会受到严重威胁。为满足奥运主场馆规划建设的需要,本文进行了北京奥运公园场区基岩地质模型的三维建模工作。

图2所展示的是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情况(共计有35个基岩钻孔,钻孔深度在1000 m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3是模型全貌,图4(a)和图4(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。

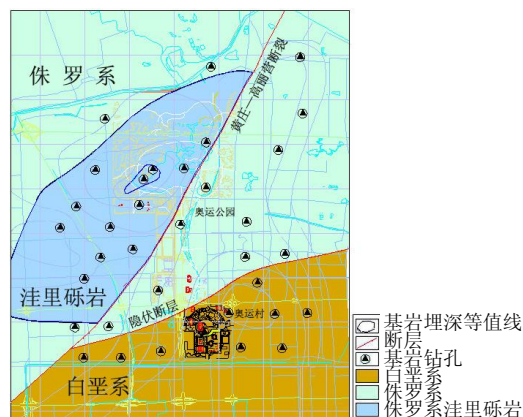


图2 北京奥运公园场区基岩地质图以及钻孔分布情况

Fig.2 Geologic map of bed rock and distribution of boreholes in Beijing Olympic Green District

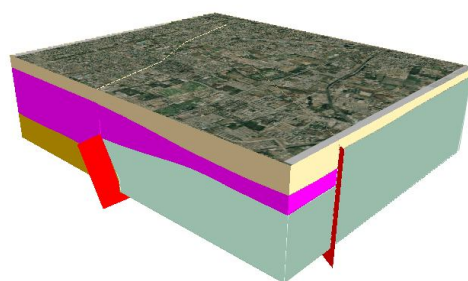


图3 北京奥运公园场区三维地质模型全貌

Fig.3 3D model in Beijing Olympic Green District

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;另一条是个近东西向的隐伏断层。三维地质模型直观、形象地展示了该地区地层与构造展布情况,精确地界定了黄庄—高丽营断裂带和隐伏断层的空间位置。另外,除了两条断层外,在奥运村地区还分布有引起塌陷的洼里砾岩,发育有地下岩溶和隐伏岩溶,这也是一个潜在的重大安全隐患。该地区的大型建筑物选址应尽量避免开上述断裂带和岩溶发育区。本文构建的三维地质模型还能该地区岩溶系统、定量地评估与合理开发以及断裂构造的进一步研究提供更深层次的支持。

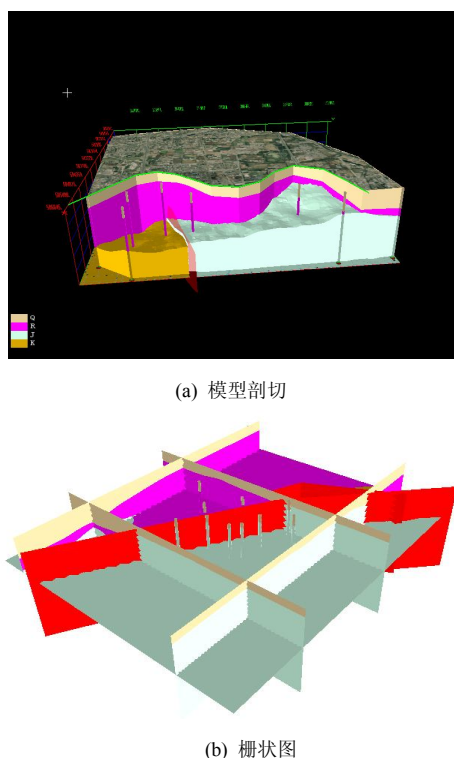


图4 北京奥运公园场区三维地质模型局部效果图
Fig.4 The incision view of partial model

5 结 语

目前,成熟的三维地质建模技术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的构模技术则研究得不够深入。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。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基础。今后需要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)对三维地质模型的影响与作用,解决这些复杂地质构造的模拟问题,进一步研究顾及到各向异性及地质体的不连续性的地质数据的空间光滑插值技术,这样才能为三维地质建模技术面向更为广大范围内的社会人群、专业技术人员和地质科学家提供更加普遍的支持与服务奠定技术基础。

参 考 文 献

- [1] MALLETT J L. Geomodeling[M]. New York: Oxford University Press, 2002.
- [2] 李培军. 层状地质体的三维模拟与可视化[J]. 地学前缘, 2000, 7(增刊): 271—277.
LI Pei-jun. Three dimensional modeling and visualization for stratified geological objects[J]. **Earth Science Frontiers**, 2000, 7(Supp.): 271—277.
- [3] 钟登华, 李明超, 杨建敏. 复杂工程岩体结构三维可视化构造及其应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(4): 575—580.
ZHONG Deng-hua, LI Ming-chao, YANG Jian-min. 3D visual construction of complex engineering rock mass structure and its application[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2005, 24(4): 575—580.
- [4] QIANG Wu, HUA Xu. An approach to computer modeling and visualization of geological faults in 3D[J]. **Computers & Geosciences**, 2003, 29(3): 503—509.
- [5] 何满潮, 李学元, 刘斌, 等. 工程岩体三维构模中钻孔数据处理方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(11): 1 821—1 826.
HE Man-chao, LI Xue-yuan, LIU Bin, et al. Study on processing method of drilling data for three-dimensional modeling of engineering rock mass[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2005, 24(11): 1 821—1 826.
- [6] WU Q, XU H. An effective method for 3D geological modeling with multi-source data integration[J]. **Computers & Geosciences**, 2005, 31(1): 35—43.
- [7] 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[J]. 北京航空航天大学学报, 2005, 31(2): 182—186.
MENG Xian-hai, YANG Qin, LI Ji-gang. Construction of coherent 3D geological blocks from stratified geological structure[J]. **Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics**, 2005, 31(2): 182—186.
- [8] 王纯祥, 白世伟. 三维地层信息系统在岩土工程中应用研究[J]. 岩土力学, 2003, 24(4): 614—617.
WANG Chun-xiang, BAI Shi-wei. Study on application of 3DSIS to geotechnical engineering[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2003, 24(4): 614—617.
- [9] 周翠英, 陈恒, 刘祚秋, 等. 重大工程地下环境信息系统的特点[J]. 岩土力学, 2005, 26(2): 216—220.
ZHOU Cui-ying, CHEN Heng, LIU Zuo-qiu, et al. Characters of underground environment information system in a major project[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2005, 26(2): 216—220.