

文章编号: 1673-3363(2010)02-0259-05

煤矿三维地质建模及应用研究

章 冲^{1,2,3}, 吴观茂³, 黄 明³

(1. 信息工程大学 测绘学院, 河南 郑州 450052; 2. 河南科技大学 经济与管理学院,
河南 洛阳 471003; 3. 中国矿业大学 煤炭资源与安全开采国家重点实验室, 北京 100083)

摘要: 为表达复杂的煤矿地质构造形态, 更准确地反映地质构造要素之间的空间关系, 对煤矿三维地质建模及可视化应用进行了研究. 按断层分块建模, 用断层模型修正块段边界并合成完整的煤矿地质体模型, 最终建立基于面模型的多层三维地质模型. 在此基础上, 应用 OpenGL 技术建立了实际应用的系统. 应用结果表明, 该系统可以有效地提高地质分析工作的直观性与准确性, 对瓦斯灾害的预测及定位事故发生点具有较大的指导意义.

关键词: 三维地质模型; 三维可视化; OpenGL

中图分类号: TD 163 **文献标识码:** A

3-D Geological Modeling for and Its Application in Coal Mines

ZHANG Chong^{1,2,3}, WU Guan-mao³, HUANG Ming³

(1. Institute of Surveying and Mapping, Information Engineering University, Zhengzhou, Henan 450052, China; 2. School of Economics and Management, Henan University of Science and Technology, Luoyang, Henan 471003, China; 3. State Key Laboratory of Coal Resources and Safe Mining, China University of Mining & Technology, Beijing 100083, China)

Abstract: In order to express the complex geological structural shape and the spatial relationship between various elements, we study the 3D geological modeling of the mining area and the visualization techniques. For our modeling method, the 3D geologic body is divided into blocks according to faults and the models of each block and each fault are established. And then, the boundaries of blocks are modified with the fault models. By doing so, the complete model of the multilayer 3D geologic body based on surface model is finally built. On this basis, a visualized application system is built up using the OpenGL technology. The application results indicate that the system can effectively increase the degree of visualization and accuracy of the geological analysis and can play an important role in accurately determining the accident location and rescue route.

Key words: 3-D geological model; 3-D Visualization; OpenGL

能源是一个国家赖以生存的物质基础, 与社会和经济发展息息相关, 涉及到国家安全. 我国的能源消费结构长期以来以煤炭为主, 对煤炭能源的需求量越来越大, 浅层煤炭资源已远远不能满足国民经济迅速发展的需要. 对于隐藏在地下深处的地

层、煤层等地质对象, 长期的地质作用使得它们发生了不同程度的变形、断裂和位移, 情况异常复杂. 在褶皱构造的同一褶曲中, 由于褶曲转折端的向斜轴部的残存应力比背斜轴部大, 导致应力集中引发煤(岩)与瓦斯突出; 断层构造中断层破碎带是瓦斯

收稿日期: 2010-04-10

基金项目: 国家“十一五”科技支撑计划项目(2006BAK01A02-07)

作者简介: 章 冲(1970-), 男, 江苏省无锡市人, 讲师, 博士, 从事三维可视化方面的研究.

E-mail: zhangchong1970@163.com Tel: 13633827011

的良好通道,常于此聚集更多的瓦斯,当掘进工作面通过断层时,易发生瓦斯灾害.因此,建立复杂地质体的三维地质模型并构建逼真的三维动态显示效果,不仅能够完整地表达复杂的地质现象的几何外形,同时也能表达地质体内部的各种地质构造特性,从而提高地质分析工作的直观性与准确性,对瓦斯灾害的预测及定位事故发生点具有一定的指导意义.

过去十余年中,三维地层模型研究共发展了 20 多种空间建模理论,这些理论可分为表面模型、体元模型和混合模型^[1-4].基于体元的三维地层模型主要有基于三棱柱体体元的三维地层建模^[5]、基于钻孔信息的地层数据模型^[6]等.这些方法具有同时对地质体外形和内部属性进行建模的能力,便于矿产储量计算,但建模过程比较复杂.基于表面建模的三维地层模型,例如基于多层 TIN 表示的 DEM 的地层模型^[7-9],主要应用于均质层状矿床(如煤层)和地层建模方面,在地质体的外部形态建模与可视化方面具有优势,并且建模过程相对简单.在考虑各种建模方法的优缺点和煤矿地质体特点的基础上,本文的建模思路是:在对建模区域进行地质构造和地层岩性综合分析的基础上,抽取主要的断层作为边界在横向上进行构模块段划分;再对各块段分别进行块段地层建模、块段的边界断层建模,最后用断层模型对块段地层模型进行修正、集成,形成整个区域完整的地质体模型.

1 三维地质建模

三维地质建模作为瓦斯灾害救援系统的底层支撑部分,它要求模型尽可能准确.在数据体方面涉及多源数据的整合、地层离散数据插值拟合、建立复杂地质体模型等关键技术.

1.1 地质建模的关键技术

1) 多源数据的整合

由于地质体数据的不确定性和难于精确获取,系统可结合多种数据源进行三维模型的构建.数据包括钻孔数据、三维地震解析数据、顶底板等高线数据,需要对这些数据进行综合运用及有效融合以使地质模型尽可能精确构建.

2) 地层数据插值

空间插值分为几何方法、统计方法、空间统计方法、函数方法和随机模拟法等其中空间统计方法以空间统计学作为坚实的理论基础,可以克服内插中误差难以分析的问题,空间统计方法以 Kriging 为代表.本文采用 Kriging,在各地层中以底板

已知 DEM 数据通过 Kriging 方法内插顶板的 DEM 表面数值.

3) 复杂地质体模型

复杂地质构造三维建模即断层、褶皱地质模型构建.断层作为最常见的地质构造现象,它破坏了地层的连续性,改变了地层数据的原始分布格局.其难点在于断层建模数据获取的困难性以及断层空间形态的复杂性.目前处理断层的方法有:切割-位移法、断层两侧地层局部法、平面拟合断层面等方法.三维地质模型由于地层空间分布的不连续性、复杂性及不确定性,如何准确表达、数字化地质体是建模的关键技术.系统采用混合 3D 构模,即运用 TIN 与 TEN 进行模型构建,从而兼顾了 TIN 模型的简单和 TEN 模型的拓扑关系有效表达的各自优点.利用 R2Delaunay 和 R3Delaunay 可以完成 TIN 和 TEN 的有效剖分.

1.2 煤矿井田三维建模过程

研究区井田为一宽缓背斜构造的一翼,地层走向自东向西为 N30°E 至 N60°W,倾向 SE~SW,地层倾角较平缓(20°~7°).井田内以斜切张扭性断层为主,按走向可分为二组:一组为 NEE 及 EW 向,倾向 SE 及 S,倾角 50°~75°,落差大小不一,为本井田主要断层,是影响矿井开拓、生产的主要地质因素.另一组走向为 NW 及 NWW 向,倾向 SW 及 NE,倾角 50°~75°,落差较小;主要压扭性断层为走向和背斜轴轴向基本一致或两者交角 20°~30°的逆断层,其落差较大,是确定井田边界及采区边界的地质依据.井田内断层落差大于 20 m 的断层 14 条,落差 10~20 m 的断层 19 条.建模的主要地层对象是井田范围内的煤系地层.

表面模型可以反映三维地质中地层结构分布情况.表面构模技术是基于表面模型,采用实际采样点构造 TIN,来反映三维地层结构分布情况的一种技术.TIN 方法则是将无重复点的散乱数据点集按某种规则(如 Delaunay 规则)进行三角剖分,使这些散乱点形成连续但不重叠的不规则三角面片网,并以此来描述 3D 物体的表面^[10].这种方法的建模过程如下:

1) 地层划分

确定地层的划分.依据钻孔资料或对钻孔遇到的岩层分解点进行综合分析,相同的岩性并且垂直方向位置相似的看作同一层^[11].研究区内地质数据包括 165 个钻孔和 300 多个井下观察点所揭露的地层信息,以及断层的位置、产状等数据和勘探成果的 CAD 图件.通过综合分析,抽取其中 18 条

主要断层作为本次研究的建模块段分界断层. 通过分析提取钻孔的位置 (坐标)、地层的层序、岩石组成、深度、厚度等资料, 考虑到建模实际需要, 对建模区的煤系地层进行适当归并, 并提取其中 24 套地层 (包括 12 个主采煤层) 作为应用研究对象.

2) 地层块段构建 TIN

对研究区按照局部建模的方法, 首先按断层边界划分若干个块段, 然后对各个块段分别构建 Delaunay 三角网, 如图 1. 这里的约束条件是断层的边界, 用边界线约束建模方法实现约束 TIN 的构建. 图 1b 为其中一块段的地层层面的约束三角网, 约束线段处为断层错开.

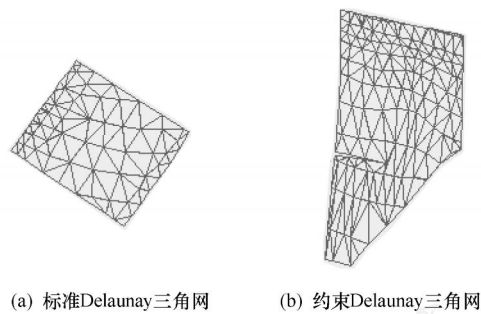


图 1 地层层面三角网剖分
Fig. 1 Delaunay triangulations of strata layer

3) 多层 TIN 生成

由基础层面根据钻孔数据及层位的划分, 采用反距离插值方法, 构建其余地层. 在块段中各地层层面生成后, 采用最短对角线算法实现层间边界轮廓线的三角形化^[12], 并对上下层面三角网进行缝合, 即可生成单层的地层体模型, 如图 2a 所示. 对块段内所有分层进行缝合, 就得到了单个块段的体模型, 如图 2b 所示, 图中右方侧面为块段边界断层面 TIN.

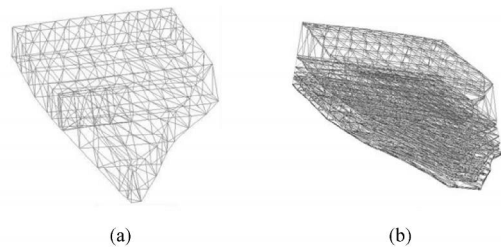


图 2 层面 TIN 缝合生成块段体模型
Fig. 2 Body model generated by sewing strata layer TINs

4) 断层面两侧的块段的合成

依据断层号提取块块边界断层的断面 TIN 数据, 再把两盘的 TIN 面数据重新缝合成断层的双 TIN 结构模型, 就完成了断层面两侧的块段的合

成, 建立了整个建模区域的地质体三维模型, 结果如图 3 所示.

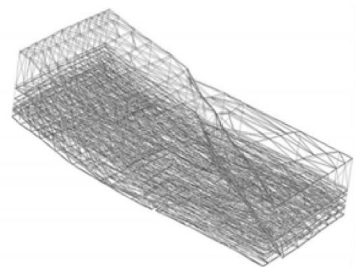


图 3 断层模型集成地层块段
Fig. 3 Fault model integrated two strata segments

2 煤矿三维地质模型应用实例

2.1 三维地质模型的可视化

OpenGL (Open Graphics Library) 是开放式图形工业标准, 是绘制高真实感三维图形、实现交互式视景仿真和虚拟现实的高性能开发软件包. 由于 OpenGL 在三维几何建模、模型变换、纹理映射以及双缓存动画等方面具有独特的优势, 再加上其具有性能优越的图形应用程序设计界面 (API), 广泛的移植性和独立于硬件系统、操作系统. 本文采用 OpenGL 作为煤矿地质体模型的可视化处理工具.

地质体的线框模型根据各分层层位的岩性特征, 附上不同的显示属性 (颜色、光照、不透明度等), 就可以达到期望的显示效果, 同时, 在系统中还可以进行平移、旋转和缩放以及揭层显示等操作, 图 4 为线框模型在贴上不同的岩性纹理后的块段集成的地质体的三维可视化效果图.

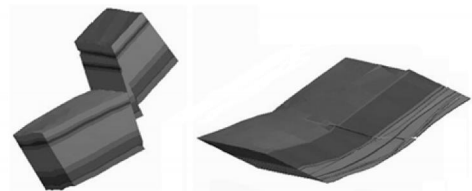


图 4 地质体的三维可视化
Fig. 4 Three-dimensional visualization of geologic model

2.2 三维地质模型的剖切

在三维地质体模型的基础上, 通过各种剖切生成指定位置的地质剖面, 可以清楚的了解地质模型内部的各个细节. 剖切面的建立分为以下 2 个步骤:

- 1) 剖切平面与各地层层面及其断面求交, 生成层面剖面线;
- 2) 利用最短对角线方法对相邻地层剖面线进行缝合处理生成剖面三角网 (如果剖面线呈上下分

布),或利用多边形三角化的方法对剖切面内的剖面线之间进行三角化。

剖面线的生成方法是:依地层网格区域生成剖切平面,将其分成两个三角形;根据三角网格求交线的算法,分别求出剖平面与层面三角网格、断面三角网格的交线,将层面和断面交线线段重连得到剖平面在该地层的剖面线。如图 5 所示。

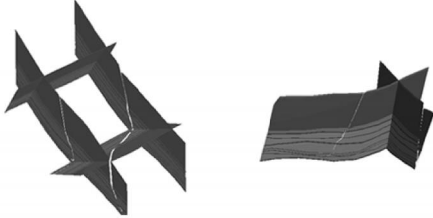


图 5 地质模型任意方向剖切
Fig. 5 Cutting the geological model
by arbitrary direction

2.3 断层与煤层变化查询

地质工作者在研究区域地质规律时涉及断层的常用操作包括断层空间分布及相互关系显示、空间查询、空间分析以及断层两侧的地层跟踪等。

1) 空间查询

如果没有独立的三维断层模型,就不可能表达独立的三维断层对象,这样就难以实现对与断层相关的空间查询。基于本文提出的断层模型,可以实现断层的空间定位查询、断层的空间关系(邻接、包含、穿越、缓冲区)查询、SQL 查询等功能。

2) 三维空间分析

缓冲区分析:以双 TIN 面断层模型为中央面,向断层上盘 TIN 面、下盘 TIN 面方向一定距离范围确定一个空间区域作为缓冲区,以确定缓冲区内地质对象的功能。如对于导水性断层,可以通过缓冲区设计防水措施,落在缓冲区的煤层可作为防水煤柱,以保证煤矿生产安全。

断层走向、倾向、倾角计算。可以根据断层面上每个三角形子面计算出断层走向、倾向、倾角,以反映子面的产状。所有子面的产状变化反映了断层面的形态变化,同时可以获得断层面的平均产状。

3) 断层两侧的地层查找与跟踪

断层的存在破坏了地层的连续性,对于集成了断块地层模型的断层模型,可以方便的实现含断层地层的空间追踪。当由一盘某一地层体模型跟踪到断层 TIN 面时,通过该层在当前断层面上的单层 TIN 指针可以迅速检索到相当层在另一 TIN 面上的相应单层 TIN,由此可以追踪本层在另一盘上

地层体模型,这样就实现了断层两侧的地层跟踪和显示。

4) 煤层空间形态和变化情况

煤层厚度变化直接影响到矿井生产,通过模型可以跟踪煤层的厚度变化情况,主要通过对地质模型的单层揭层显示来完成,单层揭层显示后通过缩放、旋转等操作首先在直观上可以观察煤层形态、厚度的变化以及断层对煤层的破坏情况,如图 6。



图 6 地质模型的揭层显示
Fig. 6 Uncover visualization of geologic model

3 结 论

1) 分析讨论了现有三维地层模型和断层模型的建模方法,提出“按断层分块建模,用断层模型修正块段边界、集成煤矿地质体模型”的煤矿地质体建模思路。

2) 以建模区域内主要断层作为建模块段的边界断层,针对断层数据、地层模型边界缝合数据以及复杂矿体的采样数据等表现为在垂直方向出现重叠压盖等特征,采用基于最短对角线方法表面建模算法,来缝合地层层面,建立块段地层模型。

3) 以淮南某井田实际地质资料为例,实现了该研究区域地质模型的三维可视化、模型的剖切、揭层显示等操作;断层与煤层的空间分析查询;以及地质模型的部分实际应用分析。

参考文献:

- [1] 曹代勇,李青元,朱小弟,等. 地质构造三维可视化模型探讨[J]. 地质与勘探, 2001, 37(4): 60-62.
CAO Dai-yong, LI Qing-yuan, ZHU Xiao-di, et al. Study on the 3D visual model of geological structure [J]. Geology and Prospecting, 2001, 37(4): 60-62.
- [2] 程朋根,龚健雅,史文中,等. 基于似三棱柱体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, 7(7): 602-607.
CHENG Peng-gen, GONG Jian-ya, SHI Wen-zhong, et al. Geological object modeling based on quasi tri-prism volume and its application [J]. Geomatics and Information Science of Wunan University, 2004, 7(7): 602-607.
- [3] 齐安文,吴立新,李冰,等. 一种新的三维地学空间构模方法—类三棱柱法[J]. 煤炭学报, 2002, 27(2):

- 155-163.
- QI An-wen, WU Li-xin, LI Bing, et al. Analogict tri-prism: a new 3D geo-spatial modeling methodology [J]. Journal of China Coal Society, 2002, 27(2): 155-163.
- [4] 吴立新, 沙从术. 两种真三维地学模拟系统与水利工程应用[J]. 南水北调与水利科技, 2003, 1(2): 20-25.
- WU Li-xin, SHA Cong-shu. Real 3D geosciences modeling system and its applications in hydraulic engineering [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2003, 1(2): 20-25.
- [5] 张煜, 白世伟. 一种基于三棱柱体体元的三维地层建模方法及应用[J]. 中国图形图象学报, 2001, 6(3): 285-290.
- ZHANG Yu, BAI Shi-wei. An approach of 3d stratum modeling based on tri-prism volume elements [J]. Journal of Image and Graphics, 2001, 6(3): 285-290.
- [6] 朱合华, 张芳, 叶勇庚, 等. 基于钻孔数据重构地层周围表面模型算法[J]. 计算机工程与应用, 2006, 42(25): 213-216.
- ZHU He-hua, ZHANG Fang, YE Yong-geng, et al. An algorithm of reconstruct strata surface based on borehole data [J]. Computer Engineering and Applications, 2006, 42(25): 213-216.
- [7] 魏春启, 赵树贤. 煤矿床地质界面构模[J]. 辽宁工程技术大学学报, 1994, 13(1): 44-46.
- WEI Chun-qi, ZHAO Shu-xian. The modelling of geologic face of coal beds [J]. Journal of Liaoning Technical University, 1994, 13(1): 44-46.
- [8] 程朋根, 刘少华, 王伟, 等. 三维地质模型构建方法的研究及应用[J]. 吉林大学学报, 2004, 34(2): 309-313.
- CHENG Peng-gen, LIU Shao-hua, WANG Wei, et al. Study and application of a new 3D geological model construction method [J]. Journal of Jilin University, 2004, 34(2): 309-313.
- [9] ALAN M L, NORMAN L J. Building solid models from boreholes and user-defined cross-sections [J]. Computers & Geosciences, 2003, 29: 547-555.
- [10] 吴立新, 史文中. 3D GIS 与 3D GMS 中的空间构模技术[J]. 地理与地理信息科学, 2003, 19(1): 5-11.
- WU Li-xin, SHI Wen-zhong. Spatial modeling technologies for 3D GIS and 3D GMS [J]. Geography and Geo-Information Science, 2003, 19(1): 5-11.
- [11] 魏占营, 王宝山, 李青元. 地下巷道的三维建模及 C++ 实现[J]. 武汉大学学报信息科学版, 2005, 30(7): 650-653.
- WEI Zhan-ying, WANG Bao-shan, LI Qing-yuan. Underground laneway modeling and realization by C++ [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2005, 30(7): 650-653.
- [12] 王纯祥, 白世伟, 贺怀建. 三维地层可视化中地质建模研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(10): 1722-1726.
- WANG Chun-xiang, BAI Shi-wei, HE huai-jian. Study on geological modeling in 3D strata visualization [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(10): 1722-1726.