

三维地质建模技术研究进展综述

李慧颖*, 鲁海峰

安徽理工大学地球与环境学院, 安徽 淮南
Email: *lihyuying5335@163.com

收稿日期: 2021年7月12日; 录用日期: 2021年8月4日; 发布日期: 2021年8月11日

摘要

三维地质建模作为数字矿山建设的重点核心内容之一, 近年来已经成为研究热点。随着计算机技术的不断发展, 三维地质建模技术也在不断更新。文章梳理了目前三维建模技术的研究进展, 包括三维地质建模的空间数据模型、建模方法和目前常用的国内外主流地质建模软件三个方面, 并探讨三维地质建模的未来发展趋势。

关键词

三维地质, 空间数据模型, 三维建模方法, 三维建模软件

Review of 3D Geological Modeling Technology

Huiying Li*, Haifeng Lu

School of Earth and Environment, Anhui University of Science and Technology, Huainan Anhui
Email: *lihyuying5335@163.com

Received: Jul. 12th, 2021; accepted: Aug. 4th, 2021; published: Aug. 11th, 2021

Abstract

As one of the core contents of digital mine construction, 3D geological modeling has become a research hotspot in recent years. With the continuous development of computer technology, 3D geological modeling technology is constantly updated. This paper reviews the research progress of 3D modeling technology, including three aspects: spatial data model of 3D geological modeling, modeling methods and current mainstream geological modeling software at home and abroad, and discusses the future development trend of 3D geological modeling.

*通讯作者。

Keywords

3D Geology, Spatial Data Model, 3D Modeling Method, 3D Modeling Software

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

自 1993 年加拿大 Simon W. Houlding 首次提出三维地质建模的概念以来, 三维地质建模技术的研究、开发与应用已成为计算机科学、岩土工程、地质学等多学科交叉领域的研究热点。所谓三维地质建模, 就是运用计算机技术, 在三维环境下, 将空间信息管理、地质解译、空间分析和预测、地学统计、实体内容分析以及图形可视化等工具结合起来, 用于地质研究的一门新技术。严格地讲, 三维地质建模已经不能算是很新的技术, 在国外, 三维地质建模已经发展了近三十年, 中国自上世纪 80 年代末开始引入 EarthVision 以来, 也已经发展了快二十年。目前, 国内外众多研究者在三维地质建模技术上取得了许多进展和成果, George Panagopoulos 等[1]提出了一种利用井数据和地球物理数据建立三维地质模型的方法; Olierook Hugo K.H.等[2]提出利用地表地质观测与物探数据相结合的方法, 可以得到合理的地表和地下不确定区域较窄的三维地质模型, 对地下矿产勘查和三维地质模型的开发具有重要意义。在国内, 朱瑞等[3]利用物探解译成果结合少量钻孔资料快速实现三维地质 BIM 精细化建模, 为精细三维地质 BIM 建模提供了一种新思路。苏学斌等[4]提出一种地层/岩性混合的三维地质建模方法明显提高建模精度, 可用于刻画含铀砂层非连续发育的砂岩型铀矿床的复杂地质结构。

三维地质建模是二维地质向三维地质的延伸, 与二维地质模型相比, 三维地质模型具有独特的优势。相对于传统平面地质图表达的方式, 三维地质模型拥有真三维的立体场景, 可以直观表达三维地质要素(例如矿层被断层切割)间的复杂关系; 高速、精确计算矿床储量; 进行强大的三维空间分析与模拟[5]。三维地质模型对空间地质体的表达将更加直观、准确和完整, 信息量将更加丰富、真实可靠, 地质分析将更加方便, 同时为地质师、油藏工程师、钻井师提供了一个交流的平台, 提高他们对油藏的认识。三维地质建模首先在油气勘探领域得到应用, 然后扩展到水文地质、工程地质、环境地质等凡是与地下探测、地下工程、地下空间管理有关的行业与领域, 极大提升了各学科领域的科学技术能力。三维地质建模存在若干技术难点和不确定性, 因此, 三维地质建模技术具有较高的研究价值和重要意义[6]。

2. 空间数据模型

空间数据模型是构建三维地质模型的基础, 也是空间设计与分析的基础。常见的空间数据模型大致可分为面模型、体模型和混合模型三类。具体内容见表 1。

2.1. 基于面模型(Facial Model)

面模型主要介绍不规则三角网(TIN)、格网模型(Grid)和边界表示模型(B-Rep)。不规则三角网(TIN)可以根据不同测点或结点的位置和密度形成连续的三角面, 能够充分利用地貌的特征点、线, 较好地表示复杂地形; 格网模型(Grid)适合地形表面及层状矿床建模; 边界表示模型(B-Rep)是形体的位置和形状通过面、环、边、点来定义的一种模型, 是一个用通过分级表示实体的方法的模型。

Table 1. Spatial data model
表 1. 空间数据模型

空间数据模型			
	体模型(volumetric model)		混合模型(mixed model)
面模型(facial model)	规则体元	非规则体元	TIN-CSG 混合
不规则三角网(TIN)	结构实体几何(CSG)	四面体格网(TEN)	TIN-Octree 混合构模(Hybrid 模型)
格网(Grid)	体素(Voxel)	金字塔(Pyramid)	Wire Frame-Block 混合
边界表示模型(B-Rep)	八叉树(Octree)	三棱柱(TP)	Octree-TEN 混合
线框(Wire Frame)或相连切片(Linked slices)	针体(Needle)	地质细胞(Geocellular)	
断面序列 (Series Sections)	规则块体(Regular Block)	非规则块体(Irregular Block)	
断面 - 三角网混合 (Section-TIN mixed)		实体(Solid)	
多层 DEMs		3D Voronoi 图	
		广义三棱柱(GTP)	

多数学者在研究面模型时主要通过利用数据模型对建模方法进行改进或提出新的建模方法。戴程琳等[7]利用三维地质不规则三角形网格(TIN)模型, 改进了挖填方计算方法, 既保证了计算结果的准确度又提高了工作效率。熊祖强等[8]探讨了通过逐点插入法构造 TIN 模型, 先构造规则格网, 再由规则格网模型生成 TIN 模型的方法; 以及利用等高线数据建立 TIN 模型的方法, 并在实际应用中成功建立了龙滩水电工程坝址区域的三维模型。

2.2. 基于体模型(Volumetric Model)

体模型分为规则体元和非规则体元, 其中八叉树(Octree)是一种用于描述三维空间的树状数据结构。该数据结构是将三维空间的 X、Y、Z 三个方向分割成八个立方体; 然后继续进行八等分的划分, 一直划分到每个立方体有一个没有目标。四面体格网(TEN)由点、线、面和体四类基本元素组成, 实质是 2D TIN 结构在 3D 空间上的扩展, 通过紧密排列但不重叠的不规则四面体形成的格网来表示目标空间。广义三棱柱(GTP)是由三个侧面四边形和上、下两个不一定平行的三角形组成。其中侧面四边形用来表示同一层相邻三棱柱之间相邻关系, 上下三角形表示不同的地层表面, GTP 体元可以表达地层表面之间的内部实体。在体模型的研究中, 主要通过对模型进行改进和优化, 提高建模效率和质量。张磊等[9]以线形八叉树模型为基本数据结构, 建立了扩展八叉树模型, 使计算效率大大提高。孙黎明等[10]提出一种用于快速查找 2 个三角曲面交线所在的三角形的非对称的空间八叉树模型。该模型与传统空间八叉树模型区别在于, 该模型在达到一定的边界条件时, 采用结合 OBB 的方法进行求交而不是每层都按照 8n 细分。

2.3. 基于混合模型(Mixed Model)

混合模型是指 2 个或多个体模型或面模型, 以对同一对象进行三维建模的方式。其中 TIN-Octree 混合构模(Hybrid 模型)即以 TIN 表达 3D 空间物体的表面, 以 Octree 表达内部结构。Wire Frame-Block 混合构模是以 Wire Frame 模型来表达目标轮廓、边界, 以 Block 模型进行内部填充。该模型每一次开挖或地质边界的变化都需修改一次模型因此实用效率不高。基于混合模型的三维建模的研究重点在选择合适的模型混合建模以提高建模效率和可视化效果。王永会等[11]在分析了地形和建筑物建模方法的优缺点后采

用基于半边数据结构的 Delaunay 三角剖分建模方法和 CSG 建筑物建模方式分别对地形和建筑物进行建模, 并通过有效合并完成了三维城市模型中地形和建筑物模型构造的可视化。尚福华等[12]结合 TIN 和八叉树(Octree)两种空间数据模型的优点, 利用 TIN-Octree 混合空间数据模型建立横纵向都精确的三维地质模型。

3. 三维地质建模方法

三维地质建模方法可分为离散点源法、剖面框架法和多源数据集合法。

3.1. 离散点源法

在地质找矿、预测等工作中需要了解地质体形状, 地质体形状经常需要根据少量的离散点采样数据(如地质测绘或钻孔资料)来获取, 因此, 实现空间离散点数据场可视化的方法的研究具有十分重要的意义。

对于离散点源法重点在对基于离散点的建模方法的研究以及方法的优化。陈明晶[13]对空间离散点的三维 Delaunay 三角剖分算法进行了研究。在逐点插入算法的基本思想上, 以 Bowyer/Watson 算法(即 Delaunay 空腔算法)为基础, 对算法实现过程中的关键环节进行了优化和改进, 有效地减少了点定位的时间提高了三维 Delaunay 三角剖分的整体效率。吕志强[14]在研究离散点集的凸壳求取中, 结合了四面体剖分算法和快速凸包技术, 并将快速凸包技术应运于三维点集的凸壳算法中, 实现了凸壳地质体的建模和体积计算。刘乐等[15]通过用反距离加权平均法和克里格插值法两种插值方法建立某铜铅锌矿的铜矿体表面模型, 并得出在数据不均匀的情况下克里金插值法形成的表面更合理, 而在数据量大且均匀的情况下反距离加权插值法得到等高线更平滑。

3.2. 剖面框架法

剖面框架法是用收集的地质勘探资料建立分类数据, 在生成大量二维剖面图的基础上应用曲面构造法生成各层位面表达三维地质模型。剖面信息建立的三维模型对复杂地质适应性方面有更好的效果, 该方法具有很大的发展空间, 成为当前地质建模的主要方法之一。

王波等[16]采用基于综合地质剖面构建三维地质模型的方法进行成都市三维地质模型建设。并提出了解决了剖面构建过程中遇到的同时代、同层位的不同地层之间的连接问题的方法, 即断层分隔、相变连接、地层尖灭。王绍等[17]提出了一种基于剖面、适合于局部建模的断层建模方法。此方法的优势在于能够充分利用图形资料中的数据解决了断层数据量少建模困难的问题, 通过对断层模型的局部添加和修改, 降低了断层建模难度。

3.3. 多源数据集合法

随着三维建模技术的发展人们对地质模型要求也在不断提高, 希望能够建立高精度和高复杂度的地质模型, 更好的方法是通过增加约束信息来对初始地质模型进行细化, 这就涉及多源数据融合来建立地质模型的问题。三维地质建模的数据融合包含两方面的内容: 一是数据参照系的融合, 即在同一坐标系下进行数据集成; 二是地质认知的融合, 就是保持不同来源地质数据之间的地质意义上具有一致性[18]。

吴志春等[19]通过介绍江西相山火山盆地三维地质建模过程, 表明了三维地质建模过程中多源数据融合的处理方法。包括数据预处理, 统一数据比例尺和坐标系, 建立原始数据库。不同地表数据、地表数据和地下数据、不同精度数据的融合、主要建模数据与次要建模数据的融合以及数据融合的重点约束建模技术。何紫兰等[20]将多源数据融合的方法应用在相山火山盆地三维地质建模中, 实现了模型成果可任意方向、角度切剖面, 进行细致的观察与分析。李健等[21]在数据融合的基础上提出了一种基于规则体元分裂的三维地质建模方法。此模型的优点在于即能精确表达地质体内部属性又能光滑表示地质体表面。

4. 三维地质建模软件

随着三维建模技术的不断发展, 三维建模软件也不断出现。国内外都研发出了许多用于三维地质建模的商业化软件, 常见的有 GoCAD、3DMine、Vulcan、Surpac、MapGIS、QuanyView 等。三维地质建模软件在国内外在各大矿山企业及地质领域、采矿领域、测量领域都有着广泛的应用。

4.1. GoCAD

GoCAD (Geological Object Computer Aided Design) 是主要应用于地质领域的三维可视化建模软件, 由法国 Nancy 大学开发的。该软件具有强大的三维建模、可视化、地质解译和分析的功能。是国际上公认的主流建模软件。在地质工程、地球物理勘探、矿业开发、水利工程中有广泛的应用。

耿瑞瑞等[22]采用 GoCAD 软件建立了苗儿山矿田豆乍山地区的沙子江铀矿床的三维地质模型, 充分利用了 GoCAD 强大的空间分析功能进行地质体、构造、不同岩性接触界面、地球物理场等三维空间属性的统计分析及成矿信息提取。

4.2. 3DMine

3DMine 三维矿业工程软件是一款国产的三维地质建模软件其主要功能有三维可视化核心、CAD 辅助设计与原始资料处理、勘探和炮孔数据库、矿山地质建模、地质储量估算、等。其将二维模式和三维模式置于同一图形界面窗口, 实现了图形和数字之间的相互转换。在我国地质建模软件中具有较好的应用前景。

张阳等[23]采用 3Dmine 矿业工程软件建立了于河北省滦县东的某尾矿库三维地质模型, 应用此模型在尾矿库筑坝量和尾矿排放量计算、尾矿库库容分析、动态检查等方面进行应用。对利用 3Dmine 软件开展类似矿山尾矿库安全性分析提供了很好的借鉴意义。

4.3. Surpac 软件

Surpac 软件是法国达索公司旗下推出大型数字化三维地质建模软件。Surpac 软件拥有的强大的数据统计能力, 主要用于地质勘探领域、采矿领域和测量领域等。

杨春雨[24]运用 Surpac 软件对乌山铜钼矿露天采场进行有效设计, 应用软件建立地表模型, 设计出一个合理且精确的最终开采境界。郑正华[25]在紫金山露采铜矿资源模型以及空区测量结果的基础上应用 Surpac 软件对紫金山金铜矿资源空区充填后的矿石、废石和矿柱混合体进行品位模拟和三维建模, 实现铜矿资源储量精细化动态管理, 为采剥计划提供可靠资源依据。

4.4. MapGIS

MapGIS 是中国地质大学开发地理信息系统软件, 实现了丰富的三维建模方法, 多样化的模型可视化表达, 2D、3D 一体化的数据处理分析和专业特色的三维分析应用等功能。在地质、煤矿等行业有广泛的应用。

吴茹娟[26]以敦煌磷钒矿为例应用 MapGIS K9 建立三维地质模型。介绍了 MapGIS 地质体建模的基本方法。应用 MapGIS K9 软件建立三维地质模型操作简单灵活, 且易于更新, 取得了较好的效果。林邓伟[27]采用 MapGIS-TDE 平台建立煤矿地下通道的三维模型。采用层次结构的插件实现软件的二次开发。

5. 结语

综上所述, 三维地质建模能够更加直观地表现地质体的复杂结构, 更加明确地表现地质体内部的分布规律。随着我国数字矿山的不断发展, 三维地质建模已经覆盖于工程地质、地质灾害研究预测等众多

领域。然而由于地质体的复杂性, 三维地质模型中的不确定性是固有的, 不可回避的。因此如何结合地质特点, 制定出具有指导性三维地质建模的思想和方法, 需要地质三维建模的研究者进一步研究和改进。

参考文献

- [1] Panagopoulos, G., Soupios, P., Vafidis, A. and Manoutsoglou, E. (2021) Integrated Use of Well and Geophysical Data for Constructing 3D Geological Models in Shallow Aquifers: A Case Study at the Tymbakion Basin, Crete, Greece. *Environmental Earth Sciences*, **80**, 142. <https://doi.org/10.1007/s12665-021-09461-5>
- [2] Olierook Hugo, K.H., Scalzo, R., Kohn, D., Chandra, R., Farahbakhsh, E., Clark, C., Reddy, S.M. and Müller, R.D. (2021) Bayesian Geological and Geophysical Data Fusion for the Construction and Uncertainty Quantification of 3D Geological Models. *Geoscience Frontiers*, **12**, 479-493. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2020.04.015>
- [3] 朱瑞, 闫汝华, 任云峰, 刘海心, 潘纪顺, 张连忠, 郭福钟. 基于三维高密度电法的地质 BIM 模型应用研究[J/OL]. 地球物理学进展, 1-13. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2982.P.20210529.1537.020.html>, 2021-06-29.
- [4] 苏学斌, 祝晓彬, 翁海成, 张宇, 刘正邦, 杨蕴, 原渊, 周根茂, 吴吉春, 李宏星, 刘双民. 混合地质建模方法刻画复杂含铀砂层地质结构[J]. 安全与环境工程, 2021, 28(3): 212-219+227.
- [5] 李青元, 张洛宜, 曹代勇, 董前林, 崔扬, 陈春梅. 三维地质建模的用途、现状、问题、趋势与建议[J]. 地质与勘探, 2016, 52(4): 759-767.
- [6] 刘安强, 王子童. 煤矿三维地质建模相关技术综述[J]. 能源与环保, 2020, 42(8): 136-141.
- [7] 戴程琳, 辜晗光, 刘安, 刘笑娣, 刘新根. 基于 TIN 的三维地质挖填方计算分析研究[J]. 工程勘察, 2019, 47(7): 42-46.
- [8] 熊祖强, 贺怀建, 夏艳华. 基于 TIN 的三维地层建模及可视化技术研究[J]. 岩土力学, 2007(9): 1954-1958.
- [9] 张磊, 唐杰, 武港山. 基于海量地震数据的多分辨率扩展八叉树模型[J]. 计算机工程, 2009, 35(21): 267-269.
- [10] 孙黎明, 魏迎奇, 蔡红, 严俊, 宋建正, 乔芸芸. 基于八叉树和混合搜索树的地质曲面快速求交方法[J]. 计算机辅助工程, 2018, 27(Z1): 42-47.
- [11] 王永会, 王勇勇, 王守金. 基于 TIN 和 CSG 的三维城市建模方法[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2012, 28(3): 563-568.
- [12] 尚福华, 杨彦彬, 杜睿山. 基于 TIN-Octree 的三维地质模型构建方法研究[J]. 计算技术与自动化, 2019, 38(4): 121-125.
- [13] 陈明晶. 基于离散点的空间复杂实体三维建模[D]: [硕士学位论文]. 昆明: 昆明理工大学, 2017.
- [14] 吕志强. 基于空间离散点的三维地质体精细建模[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西安科技大学, 2010.
- [15] 刘乐, 杨智. 基于钻孔数据的三维地质建模空间插值方法的对比研究[J]. 能源技术与管理, 2019, 44(3): 162-164.
- [16] 王波, 雷传扬, 刘兆鑫, 范敏, 王兴强, 叶凡忠, 张堃. 三维地质建模过程中综合地质剖面构建方法研究[J]. 沉积与特提斯地质, 2021, 41(1): 112-120.
- [17] 王诏, 刘展, 安聪荣, 白永良. 基于剖面的三维断层建模方法[J]. 西安石油大学学报(自然科学版), 2015, 30(6): 50-54+61+9.
- [18] 吴志春, 郭福生, 张万良, 应阳根, 周万蓬, 李程. 江西乐安相山火山盆地多源数据融合三维地质建模[J]. 桂林理工大学学报, 2020, 40(2): 310-322.
- [19] 吴志春, 郭福生, 林子瑜, 侯曼青, 罗建群. 三维地质建模中的多源数据融合技术与方法[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2016, 46(6): 1895-1913.
- [20] 何紫兰, 朱鹏飞, 马恒, 王文杰, 白芸, 曹珂. 基于多源数据融合的相山火山盆地三维地质建模[J]. 地质与勘探, 2018, 54(2): 404-414.
- [21] 李健, 刘沛溶, 梁转信, 王心宇, 王广印. 多源数据融合的规则体元分裂三维地质建模方法[J]. 岩土力学, 2021, 42(4): 1170-1177.
- [22] 耿瑞瑞, 范洪海, 孙远强, 夏宗强, 孙雨鑫, 俞嘉嘉, 陈东欢. 基于 GOCAD 软件的沙子江铀矿床三维定量预测[J]. 矿床地质, 2020, 39(6): 1078-1090.
- [23] 张阳, 张端. 某尾矿库 3Dmine 三维建模及应用[J]. 现代矿业, 2020, 36(1): 174-175+188.
- [24] 杨春雨. Surpac 软件在乌努格吐山铜钼矿露天采场最终境界设计中的应用[J]. 世界有色金属, 2021(5): 17-18.

- [25] 郑正华. 紫金山露采铜矿空区处理数字化建模应用研究[J]. 现代矿业, 2021, 37(5): 177-180+185.
- [26] 吴茹娟. 探讨 MAPGIS 的矿山三维建模方法[J]. 甘肃科技, 2013, 29(8): 43-44+97.
- [27] 林邓伟. 基于 MapGIS-TDE 的煤矿地下通道三维模型构建[J]. 煤炭技术, 2018, 37(4): 291-293.