



煤矿地质井巷 三维建模及 Web 3D 发布

黄明 张建广 章冲 著



科学出版社

煤矿地质井巷三维建模 及 Web 3D 发布

黄 明 张建广 章 冲 著

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

矿井三维地质巷道建模技术是矿产勘探与开发领域的一个关键技术,它将不可见的地下情况通过计算机模拟出来,是地质体可视化、矿产资源分布、井位及巷道设计等工作的基础。本书首先概述了矿山数字化的研究意义,三维地质巷道建模、矿山三维交互可视化、Web 平台的实现的研究现状;其次详细阐述了三维地质和巷道集成建模算法、可视化技术实现集成模型的一体化可视化的关键技术;最后,针对 Web 应用以 Java 3D 作为三维图形引擎,利用基于 Ajax 异步通信机制的 GWT-Ext API 技术实现了 B/S 结构的 Web 3D 交互发布系统。

本书既可供地质、测绘、GIS、采矿、安全及计算机等行业技术人员参考,也可作为计算机图形学领域开发人员、矿井开发人员及其相关专业的教师、研究生的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

煤矿地质井巷三维建模及 Web 3D 发布/黄明,张建广,章冲著. —北京:科学出版社, 2016

ISBN 978-7-03-049858-8

I. ①煤… II. ①黄… ②张… ③章… III. ①煤田地质-地质模型-计算机辅助设计-软件开发②井巷工程-地质模型-计算机辅助设计-软件开发 IV. ①P618.110.2-39②TD26-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 208056 号

责任编辑:任加林 / 责任校对:刘玉靖
责任印制:吕春珉 / 封面设计:耕者设计工作室

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

三河市骏杰印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016 年 8 月第 一 版 开本: B5 (720×1000)

2016 年 8 月第一次印刷 印张: 10 1/4

字数: 196 000

定价: 60.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈骏杰〉)

销售部电话 010-62136230 编辑部电话 010-62137026 (BA08)

版权所有,侵权必究

举报电话: 010-64030229; 010-64034315; 13501151303

前 言

21 世纪以来,随着地球信息科学的发展,采矿逐渐向数字化方向发展,数字矿山是矿业发展的必然趋势。数字矿山可以合理调节矿山资源的稳定供应,最大限度地减少和避免矿山安全事故,实现矿产资源开发与环境的协调发展,在保证国民经济可持续发展,促进矿产资源的合理利用方面发挥着巨大的作用。而矿井的三维地质模型是进行数字矿山的数据基础,数字矿山是架构于 Internet 进行发布的。因此,研究矿井三维地质巷道模型的构建及 Web 3D 的信息发布,对于提高矿山安全生产能力和科学管理水平具有重要的理论意义和广泛的应用前景。

矿井三维地质巷道模型是把不可见的地下情况在计算机中表示出来,是地质体可视化、矿产资源分布、井位及巷道设计的工作基础,使决策者直接从三维去理解和表达地质体与矿井巷道系统,并利用三维交互可视化手段实现对地质巷道三维体进行多角度、多方位的浏览。目前,尽管对于矿井三维地质巷道模型的研究已经取得了一些进展,但总体来说,三维地质建模的理论、方法和技术尚处于研究阶段,还有许多问题有待解决。其主要问题包括:现有的建模方法仅局限于彼此独立的三维模型构建,针对矿井三维系统而言,需要考虑两者的一体化集成模型、彼此耦合相关性的处理;对交叉巷道的贯通处理还没有切实可行的解决方法;针对集成模型的可视化,没有考虑集成模型的一体化显示及利用可视化技术直观展示两者的空间位置关系等关键问题。

为推动数字矿山建设的发展,本书重点在三维地质模型的构建、巷道体三维建模、三维实体的交互可视化、基于 Web 平台的实现等方面开展关键技术和理论方面的研究。全书共 7 章,第 1 章简要介绍矿山数字化的研究意义,三维地质建模、三维巷道建模、矿山三维交互可视化、Web 平台的实现的研究现状和不足;第 2 章简要介绍 TIN 与 TEN 集成的三维地质建模;第 3 章介绍巷道三维模型构建以及巷道模型的三维拓扑关系研究;第 4 章介绍三维地质巷道的交互可视化;第 5 章介绍三维地质巷道的 Web 3D 信息发布;第 6 章介绍系统的实现与主要的工程应用。本书第 1~4 章、第 6 章 6.1~6.3 节、第 7 章由黄明撰写,第 5 章由章冲撰写,第 6 章 6.4、6.5 节由张建广撰写。全书由黄明统稿。

本书根据作者近年来主持或参与的科研项目所取得的研究成果编

著而成，在完成这些科研项目过程中，代表性建筑与古建筑数据库教育部工程中心、北京建筑大学测绘与城市空间信息学院遗产数字化研究所的许多老师和硕士研究生做出了贡献，值本书出版之际，谨向他们表示衷心的感谢。感谢科学出版社在本书出版过程中提供的帮助，并对引用文献的作者表示感谢。

本书研究成果受以下项目资助：国家行业公益性科研专项“多源遥感数据精细三维全景建模技术与系统——LiDAR 点云数据自动处理技术与多源数据联合精细建模关键技术研究”（201512009）；“973”项目“文化遗产数字化保护的理论与方法——复杂几何对象高精度数字化重建理论与方法”（2012CB725300）；国家测绘局科技司科技发展项目“基于深度图像二三维集成空间数据模型的研究”（2013-CH19）；北京市自然科学基金项目“古建筑精细化测绘关键技术研究”（8142014）；北京市教育委员会科技计划一般项目“三维精细 CSG-Brep 模型拓扑关系的研究”（2016 子项目 49）；北京建筑大学博士基会（00331612014）。

由于数字矿山的建设总体上仍处于起步阶段，涉及内容十分广泛，随着科技的进步，相关技术将获得迅速发展，加之作者水平和时间限制，本书所研究的理论与关键技术难免会有不妥和不足，恳切期望专家、学者和读者指正。

黄 明

2016 年 7 月 20 日

目 录

| | |
|------------------------|----|
| 前言 | |
| 第 1 章 绪论 | 1 |
| 1.1 研究意义 | 1 |
| 1.2 研究现状 | 2 |
| 1.2.1 三维地质建模研究现状 | 2 |
| 1.2.2 三维巷道建模研究现状 | 9 |
| 1.2.3 三维交互可视化研究现状 | 9 |
| 1.2.4 Web 3D 信息发布现状 | 11 |
| 1.3 现有研究的不足 | 11 |
| 第 2 章 TIN、TEN 集成三维地质建模 | 13 |
| 2.1 地层 | 13 |
| 2.2 建模区块段及地层确定 | 15 |
| 2.2.1 块段划分原则 | 15 |
| 2.2.2 地层划分 | 17 |
| 2.3 地层层面三角 (TIN) 剖分 | 18 |
| 2.3.1 Delaunay 三角剖分 | 18 |
| 2.3.2 Delaunay 分治-合并算法 | 21 |
| 2.4 二维 Delaunay 约束建模 | 24 |
| 2.4.1 边界线约束建模 | 25 |
| 2.4.2 洞约束模型 | 27 |
| 2.4.3 地质断层的处理 | 28 |
| 2.4.4 多轮廓线边界三维重构 | 33 |
| 2.4.5 质量细分算法 | 35 |
| 2.5 四面体三维模型 | 40 |
| 2.5.1 四面体三维模型基础 | 40 |
| 2.5.2 基于面模型体边界约束的四面体模型 | 41 |
| 2.5.3 四面体网格细分 | 43 |
| 2.5.4 四面体薄元消除算法 | 47 |
| 2.6 本章小结 | 48 |

| | |
|---------------------------------|-----|
| 第 3 章 矿井巷道三维模型 | 50 |
| 3.1 巷道几何形态描述..... | 50 |
| 3.1.1 巷道分类及几何特征..... | 50 |
| 3.1.2 巷道的数据表达..... | 54 |
| 3.2 巷道三维模型的构建..... | 57 |
| 3.2.1 巷道特征点的计算..... | 57 |
| 3.2.2 独立巷道模型..... | 62 |
| 3.2.3 交叉连接巷道模型..... | 72 |
| 3.2.4 巷道与地质体模型的耦合性处理..... | 76 |
| 3.3 巷道模型三维拓扑..... | 77 |
| 3.3.1 巷道拓扑分类..... | 77 |
| 3.3.2 巷道节点的生成..... | 78 |
| 3.3.3 节点-弧段拓扑..... | 79 |
| 3.3.4 巷道与地质体岩性拓扑..... | 81 |
| 3.4 巷道三维模型的实现..... | 82 |
| 3.4.1 实现流程..... | 82 |
| 3.4.2 数据结构..... | 83 |
| 3.4.3 功能算子..... | 86 |
| 3.5 本章小结..... | 88 |
| 第 4 章 三维交互可视化 | 89 |
| 4.1 三维图形变换..... | 89 |
| 4.1.1 图形平移及缩放..... | 89 |
| 4.1.2 投影变换..... | 90 |
| 4.1.3 基于四元素的旋转交互..... | 92 |
| 4.2 DirectX 图形绘制管道流水线数据流组织..... | 95 |
| 4.2.1 顶点及索引缓冲区..... | 95 |
| 4.2.2 实体正反面剔除..... | 97 |
| 4.2.3 适合揭层信息展示的内存划分..... | 98 |
| 4.3 材质和光照处理..... | 101 |
| 4.4 纹理贴图..... | 104 |
| 4.4.1 纹理坐标计算..... | 104 |
| 4.4.2 纹理贴图的实现..... | 105 |

| | |
|-----------------------------------|------------|
| 4.5 地质巷道三维模型的透明叠加显示 | 105 |
| 4.5.1 颜色混合原理 | 105 |
| 4.5.2 地质体与巷道透明叠加显示实现 | 106 |
| 4.6 三维拾取算法 | 107 |
| 4.6.1 三维视点和拾取点的射线矢量 | 107 |
| 4.6.2 射线矢量对场景中实体的求交 | 109 |
| 4.7 本章小结 | 110 |
| 第 5 章 Web 3D 信息发布 | 112 |
| 5.1 Java 3D 图形系统 | 112 |
| 5.1.1 Java 3D 虚拟场景空间数据组织 | 112 |
| 5.1.2 视模型 | 114 |
| 5.2 服务器端三维图形引擎 | 115 |
| 5.2.1 Java Servlet 开发原理 | 115 |
| 5.2.2 Web 三维地质巷道 Servlet 引擎 | 117 |
| 5.2.3 三维图形数据通信引擎 | 124 |
| 5.2.4 多用户并发操作处理 | 126 |
| 5.3 客户端三维图形交互 | 128 |
| 5.3.1 Ajax 异步通信技术 | 128 |
| 5.3.2 GWT-Ext 客户端 Web 架构 | 128 |
| 5.3.3 客户端对三维场景图像浏览的操作 | 130 |
| 5.3.4 客户端 Applet 三维图形浏览 | 131 |
| 5.4 本章小结 | 132 |
| 第 6 章 系统实现与应用 | 133 |
| 6.1 实验系统设计 | 133 |
| 6.1.1 系统开发环境 | 133 |
| 6.1.2 系统总体结构设计 | 133 |
| 6.1.3 系统功能描述 | 135 |
| 6.2 系统主要功能实现 | 138 |
| 6.2.1 研究区构造与地层概况 | 138 |
| 6.2.2 三维地质模型建立 | 139 |
| 6.2.3 三维巷道模型 | 142 |
| 6.2.4 巷道与地质体的集成模型 | 142 |
| 6.2.5 三维模型集成可视化 | 143 |
| 6.2.6 三维巷道漫游 | 144 |

| | | |
|--------------|---------------------|------------|
| 6.3 | Web 3D 信息发布 | 145 |
| 6.4 | 模型的应用功能 | 145 |
| 6.4.1 | 基于 GIS 双向查询 | 145 |
| 6.4.2 | 断层与地层（煤层）变化查询 | 146 |
| 6.4.3 | 地质体任意切割 | 146 |
| 6.4.4 | 巷道掘进防突揭煤预警 | 147 |
| 6.4.5 | 巷道救援仿真 | 148 |
| 6.5 | 本章小结 | 149 |
| 第 7 章 | 总结与展望 | 150 |
| 7.1 | 总结 | 150 |
| 7.2 | 展望 | 152 |
| | 主要参考文献 | 153 |

第1章 绪 论

1.1 研究意义

高产高效矿井技术是当今世界采煤发达国家普遍采用的一种先进的现代化采煤技术和管理方式，也是衡量一个国家煤炭工业发达程度的主要标志。实现高产高效矿井技术需要在选择开采盘区之前准确探测其内部地质构造以及在巷道开拓后及时预测和探测工作面内地质异常问题。开采地质条件掌握程度直接关系到采煤的经济效益。而矿井三维地质巷道建模技术是矿产的勘探与开发领域的一个关键技术，它将不可见的地下情况在计算机中表示出来，是地质体可视化、矿产资源分布、井位及巷道设计等工作的基础。因此，建立三维地质巷道模型对能源的探测与开发具有重要的作用。

煤矿井工开采存在水、火、瓦斯、矿尘和冒顶五大严重灾害，这些事故大多与地质构造有关，如瓦斯事故与煤系地层、复杂多变的地质构造（褶皱、断裂），以及复杂的巷道通风系统紧密相关。矿井地质构造也是影响煤炭生产和安全重要的地质条件。例如，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的良好通道，常聚集更多的瓦斯，当掘进工作面通过断层时，易于发生瓦斯灾害。因此，建立真三维的地质巷道模型，并借助计算机可视化技术有利于帮助人们正确认识和理解矿井的地质对象的空间特征和分布规律，这对矿井生产和安全至关重要。此外，针对事故发生点，利用三维巷道模型的网络空间分析功能还可以为组织事故救援决策提供可视化的决策技术支持。

传统的矿井信息管理基于地质、巷道等纸介质图件，以进行人为管理为主。地质信息的模拟与表达方式主要有两种，其一是采用平面图和剖面图进行表达（如底板等高线图、采掘工程平面图、地质剖面图、钻孔剖面图等），其实质也是将三维地质环境中地层、矿体与地质现象投影到某一二维平面（ XY 平面、 XZ 平面或 YZ 平面）上进行表达；其二是采用透视和轴侧投影原理，将三维地质环境中的地层、矿体与地质现象进行透视制图，或投影到两个以上的平面上进行组合表达，以增强三维视觉效果，提高人们的三维理解水平。这两种方式同样存在空间信息的损失与失真问题，而且制图过程繁杂，信息更新困难。这种管理方式不

具备查询、几何量算及基于空间分析的预测和决策等功能。三维地质巷道模型可以帮助决策者们直接从三维空间的角度去理解和表达地质体与矿井巷道系统，并利用三维可视化交互手段实现对地质巷道三维体进行多角度、多方位的浏览。

随着地球信息科学与技术的发展，数字矿山已成为矿山信息化、现代化的发展方向。数字矿山是空间技术、信息技术、网络通信技术及其应用发展到一定阶段的产物，是基本解决了 Internet 传输、管理标准化、规范化问题，并在网络带宽、大量存储数据库管理等关键技术开发方面取得一系列重大突破之后的新一轮发展计划。从这里可以看出，数字矿山是基于网络进行信息共享的，而研究矿井三维地质巷道的 Web 信息发布正是数字矿山系统构建的重要内容和关键技术。

矿山信息系统主要面对两类空间目标，即掘进巷道和地层，巷道是采矿生产中将煤炭从工作面运送到地面，以及通风、安全输送工人的通道。综上所述，研究矿井三维地质巷道模型及 Web 3D 信息发布系统，对提高矿山安全生产能力和科学管理水平具有重要的理论意义和广泛的应用前景。

1.2 研究现状

1.2.1 三维地质建模研究现状

三维地质建模首先需要研究三维空间数据模型。关于三维空间数据模型，20 世纪 60 年代初就出现了块段（Block）模型，70 年代研究和发展了 CSG（Constructive Solid Geometry）模型、B-rep 模型等。特别是近二十年，国内外学者研究提出了 20 余种三维空间数据模型。在不区分准三维和真三维的前提下，吴立新教授根据上述模型是对地学空间目标进行表面描述还是空间剖分，将其分为按单一三维构模、混合三维构模和集成三维构模 3 种模式。其中，单一三维构模是指采用单一的面元模型和体元模型对三维空间对象进行几何描述和三维构模；混合三维构模则是采用两种或两种以上的表面模型或体元模型同时对同一三维空间对象进行几何描述和三维构模；集成三维构模则是采用两种或两种以上的不同模型分别对系统中不同的三维空间对象进行几何描述和三维构模，分别建立的三维模型集成起来即形成对系统完整的三维表示。

三维空间数据模型分类如表 1.1 所示。

表 1.1 3D 空间数据模型分类

| 面元模型 | | 单一构模 | | 混合构模 | 集成构模 |
|---|---------------------|-------------------------|----------------------------|-----------------|---------------------------|
| | | 体元模型 | | 混合模型 | 集成模型 |
| | | 规则体元 | 非规则体元 | | |
| 表面模型 (Surface) | 不规则 TIN 模型 (TIN) | 结构实体几何 (CSG) | 四面体格网 (TEN) | TIN-Grid | TIN-CSG |
| | 格网模型 (Grid) | 体素 (Voxel) | 金字塔 (Pyramid) | Section-TIN | TIN-Octree (Hybrid 模型) |
| 边界表示模型 (Brep) | | 针体 (Needle) | 三棱柱 (TP) | WireFrame-Block | TIN-GTP |
| 线框 (Wire Frame) 或 相连切片 (Linked Slices) | | 八叉树 (Octree) | 地质细胞 (Geocellular) | Brep+CSG | CSG-TIN-GTP |
| 断面 (Section) | | 规则块体 (Regular Block) | 非规则块体 (Irregular Block) | Octree-TEN | Brep-TIN-GTP |
| 多层 DEMs | | | 实体 (Solid) | GTP-TEN | |
| | | | 三维 Voronoi 图 | GTP-TEN-Voxel | |
| | | | 广义三棱柱 (GTP) | Brep-GTP-TEN | |

注：斜体部分为栅格模型；多层 DEMs 当采用 TIN 构模时为矢量模型，若采用 Grid 构模，则为栅格模型；其他为矢量模型或矢栅混合、矢栅集成模型。

1. 面元模型

基于面元模型主要侧重于三维空间实体的表面表示，如地形表面、地质层面、构筑物与地下工程的轮廓与空间框架，主要包括 Grid 模型、TIN 模型、多层 DEM、B-rep 模型、Wire Frame 模型、Section 模型等^[1]。

TIN 与 Grid 模型是一种表面模型 (Surface Model)，并非真正的三维模型，是 2.5 维的。TIN 将无重复点的散乱数据点集进行三角剖分，使这些散乱点形成连续但不重叠的不规则三角面片网，可以比较精确地表达边界，还可以较好地表达三角形之间的拓扑关系。目前，TIN 的构建方法理论和技术都比较成熟。

Grid 模型将表面划分成规则的格网，每个格网点上对应一个属性值。当原始数据点分布不规则时，需进行插值处理以得到格网点的值。格网模型不存储拓扑关系，其明显的缺点是难以精确表达边界，不能表达多值面，也不适合表达具有断层的表面。这两种模型一般用于地形表面构模，也可用于层状矿床构模。

多层 DEM 建模方法，首先基于分界点按 DEM 的方法对每个岩层、土层进行插值或拟合，然后根据岩层、土层的属性对多层 DEM 进行交叉划分处理，形成空间中严格按照岩性为要素进行划分的三维地层模型的骨架结构。在此基础上，

[1] 车德福. 基于 GTP 的复杂地质体多尺度空间建模研究[D]. 北京: 中国矿业大学, 2006.

引入地下空间中的特殊地质现象、人工构筑物等点、线、面、体对象，完成对三维地下空间的完整剖分。该方法的缺点是难以描述内部信息。

B-rep 的最普遍方式是多边形表面模型，它使用一组包围物体内部的平面多边形，也即平面多面体，来描述实体。B-rep 模型中，空间实体的几何信息与拓扑信息分开存储，其数据结构可用体表、面表、弧表、边表、顶点表五个层次来描述。B-rep 模型表达精确，数据量小，并能显式地表达空间几何元素间的拓扑关系，具有显示速度快，易于实现欧拉操作等优点；但具有结构复杂，不易模型修改等缺点。B-rep 在国外的一些三维地学软件中被广泛采用，但这些软件分别使用了不同的技术来实现。

田宜平采用 B-rep 模型，对剖面地质体多边形和弧段进行逐个编码，通过人工属性编码完成剖面间地质体边界的对应和三维地质体的生成^[1]。用这种交互编码的方法建立地质模型，工作量大且容易出错，完成的编码是静态的，不易动态修改。为了使 B-rep 模型能有效地建立和描述地下复杂地质构造及动态演化，吴冲龙提出了 B-rep-体元结构模型，利用 B-rep-体元结构模型，可以有效地描述地质体各部分的空间逻辑关系，通过赋予这些体元以相应的地质属性，并定义由这些体元连接而成的地质体，进而可以组合成完整的三维地质模型。

Molennar 以 B-rep 模型表示法为基础，在二维拓扑数据结构的基础上，提出了一种基于三维矢量图的形式化数据结构（3D FDS），定义了结点、弧、边和面四种几何元素之间的拓扑关系及其与点、线、面和体四种几何目标之间的拓扑关系。该模型将三维空间实体间多种复杂空间拓扑关系用 is-in、is-on 表达，数据管理、操作和更新都极为复杂。

1997 年，李青元等对 B-rep 模型实体间的拓扑关系表示进行了深入的研究，提出以结点、边、环、曲面片、体之间的五组拓扑关系表达地层，以“界面引入-体划分”来动态创建和维护这五组拓扑关系，并用一棵二叉树来表达界面与该界面分隔的体之间的关系。但距实用还有一段距离，还有很多问题需要解决。

2. 体元模型

(1) 体模型的规则体元

基于体模型建模方法将三维连续空间离散化，由一系列连通但不重叠的体元组成，体元的属性可以独立描述和存储，因而可以进行三维空间操作和分析。根据体元的规整性，可分为规则体元模型和非规则体元模型。规则体元模型的优点是数据模型简单，并且易于空间分析操作，主要限制是不能描述复杂地质体，边界精度难以保证。代表性的规则体元模型有 CSG、Octree、Voxel、Needle、Regular Block 等。

[1] 田宜平. 盆地三维数字地层格架的建立与研究[D]. 武汉: 中国地质大学, 2001.

CSG 法构造实体几何法的基本概念由美国人 Voelcher 和 Requicha 于 1982 年提出,这是一种由简单的基本体元(如球、圆锥、圆柱等)通过正则 Boolean 运算(并、交、差)构造复杂三维空间对象的表示方法。该方法把复杂三维空间对象描述为一棵二叉树,树的叶节点为基本体元,中间节点为正则 Boolean 运算集。

(2) 体模型的不规则体元

不规则体元模型的各元素与相邻元素之间没有隐含的或逻辑的关系,因此元素之间的关系必须明确陈述,即需要建立相应的拓扑结构。不规则体元模型主要有实体(Solid)、四面体格网(TEN)、金字塔(Pyramid)、三棱柱(Tri-Prism, TP)和广义三棱柱(Generalized Tri-Prism, GTP)等。

1) 四面体格网(TEN)模型。TEN 模型由 Pilouk、Chen 等人提出,它以四面体作为最基本的体元,将任意一个三维空间对象剖分成一系列邻接但不交叉的不规则四面体,由于四面体是用面最少的体元,对其进行的数据操作计算量小,可以有效地进行三维插值运算和可视化;四面体间的邻接关系可以反映空间实体间的拓扑关系。

四面体的算法主要从二维 Delaunay 三角剖分扩展到三维 Delaunay 的体剖分。Bowyer 和 Watson 于 1981 年提出的增量算法已经被证明是最优的一种方法,也是当前较流行的网格自动生成算法之一。但其对简单凸体剖分比较适用,对复杂受限的数据场剖分存在许多问题。Joe 于 1991 年提出了一种称为局部转换三角剖分的算法,算法对存在五点共球的情况通过局部改变其拓扑关系来保证最终剖分结果的合理性,但这种算法仍不能处理具有约束面、孔洞或其他非凸区域的情况。Lattuada 等人于 1997 年对 3D-四面体格网在地质领域内的应用进行了研究,研究工作表明四面体格网能很好地用于地质体的三维建模法。Borouchakai、George 和 Thompson 充分利用了单元的邻接关系,将随机点插入的时间复杂度降至 $O(MgN)$ 到 $O(N)$ 之间。相对于插入已知点,插入形心的逐点插入算法增加了计算插入点和查找最大可插度单元的步骤。此外,Jonathan 于 1998 年提出了 Delaunay 优化的四面体生成方法,Joel 于 1995 年提出懒惰约束四面体生成方法。

国内学者在四面体生成算法方面也做了大量的研究工作。陈学工等人 2002 年提出了一种空间散乱点集 Delaunay 四面体剖分算法,即对空间散乱点集首先进行最大空球凸多面体剖分,然后在多面体内部做 Delaunay 四面体剖分,这种方法消除了“退化”现象,但对于保证边界的一致性比较困难。包颖采取先将物体剖分成大小相同的立方体,再将立方体剖分成四面体的方法,虽然速度很快,但对恢复边界的原始形状存在困难。2003 年王建华提出的算法避免了四面体单元的重叠,能够较好地生成任意形状物体。2001 年郭际元给出了三种建立四面体格网的算法思想及步骤:生长算法、逐次插入算法和分治算法,但她的逐点插入算法生成 Delaunay 四面体网格中的 LOP 难以保证所生成的 TEN 是 DTEN。此外,刘衍聪、张军、钟正、李水乡等对四面体剖分算法都进行了研究和改进。在四面体的

具体应用中,吴江斌等人 2005 年提出了地层的真三维四面体模型,对地层尖灭、断层等突变信息的处理进行了探讨,实现了三维地层的 TEN 和 TIN 双重表达和地层切割、查询等空间分析。

尽管如此, TEN 模型在地质领域仍然没有获得广泛应用,其中一个重要的原因是当地质体边界(如断层)作为约束条件时剖分算法极其复杂,目前缺乏有效解决像逆断层这样复杂地质现象的算法。另外在表达地层时,用 TEN 对地层进行剖分会造成大量的数据冗余。

2) 三棱柱 (Tri_Prism, TP) 构模。TP 模型地质建模主要基于钻孔数据,它由 Simon 提出于 1994 年,张煜等于 2001 年给出了 TP 体元的定义,并详细讨论了相关切割和剖分算法,列举了基于该模型的数字地层模型的相关应用。戴吾蛟等 2001 年以不规则 TP 为基本单元,讨论了不规则 TP 网络 (TPN) 模型的数据结构、拓扑建立、拓扑检查和空间插值问题,但在地学应用方面缺乏深入讨论。此后, Gong 等人于 2002 年提出了三棱柱体 (TPV) 模型,毛善君 2002 年提出应用煤矿地质的似直三棱柱 (ARTP) 模型,对 TP 模型进行了深入的研究和发展。程朋根 2005 年提出一种基于多层 DEM 与似三棱柱体元 (QTPV) 的混合三维数据模型。模型包含顶点、线段(棱边、三角形边)、三角形、侧面四边形、似三棱柱体元和 DEM 六个基本元素,同时包含点对象、线对象、面对象、体对象、复杂对象、空间对象六个对象,设计了六个基本元素和两种地质对象的数据结构和它们之间的拓扑关系,并指出基于多层 DEM 与似三棱柱体元的混合三维数据模型具有同时表达空间对象的表面和内部结构的能力,适合地质勘探领域的三维建模。由于 GTP 模型的三条棱边是垂直平行的,因此要求数据来源钻孔必须垂直,这在钻孔较浅和地质条件比较简单的情况下是近似成立的,但在实际钻探过程中,由于地质条件和人为因素的影响,钻孔的偏斜是不可避免的。虽然 Gong 等人提及可以通过将三棱柱体的侧面剖分三角形的方法来处理上下三角形顶点不对应的问题,但对其数据结构、空间操作以及拓扑关系等没有讨论,也没有给出基于偏斜钻孔应用的实例。由于 TP 模型不能基于真实偏斜钻孔建模,也难以处理复杂地质构造,因此在地质体建模中有一定的局限性。

3. 混合模型

混合建模法是指采用两种或两种以上的表面或体元模型同时对同一 3D 空间对象进行几何描述和 3D 建模。典型的有 Octree 与 TEN、B-rep 与 CSG、TIN 与 Sections、Wire Frame 与 Block、B-rep 与 TEN 等混合建模方法。

1978 年 Hunter 提出的八叉树 (Octree) 概念,其模型具有结构简单,操作方便等显著优点;但随分辨率的提高将成倍增加数据量,且其始终是近似表示。为此,一些学者对八叉树结构进行了数据压缩编码方面的研究。在三维地质建模方面,2007 年韩国建等研究了 Octree 表达矿山地质对象的方法,但随着精度的提高,

数据量迅速增大。TEN 模型具有精确表示目标和较为复杂空间拓扑关系的能力,但构建算法复杂,某些场合数据量较大。为在不增加存储空间的前提下实现目标的精确表示,李德仁等借鉴二维 Grid 和 TIN 混合建模的思想,将 Octree 和 TEN 有机结合起来,以 Octree 作整体描述, TEN 作局部描述,用以表达含断层的复杂地质体。Octree 与 TEN 是一种根本上的混合,对目标的操作与显示都是对这两种模型同时进行。尽管该混合模型有许多优点,但在实际应用时,需要根据地质现象的复杂程度决定 Octree 与 TEN 的结合程度,这在多变的三维空间现象时很难操作,同时空间实体间的拓扑关系也不易建立。

B-rep 与 CSG 混合建模方法: B-rep 模型显式地表达实体的几何与拓扑信息,对外表细节描述较详细;但对实体的几何特征整体描述能力弱,不能反映实体的构造过程和特点,也不能记录实体的组成元素的原始特征。而 CSG 模型记录实体的拼合过程和所含体素的定义参数,必要时还可附加实体和体素的属性信息。

单元分解法以不同类型的基本体元,分解构造实体来反映实体本身的细节,各体元之间存在公共面,但不相交,只要基本体元类型足够多,那么就能够运用该方法来进行三维表示。由于分解路线的不同,因此可以产生不同的结果,即表示结果不具有唯一性。2003 年,李建华通过研究基于单元分解表示(CE)、CSG 和 B-rep 三种基本空间数据模型的矢量与栅格结构混合的数据模型,并顾及实体之间的拓扑关系建立三维地质模型。B-rep 与 CSG 理想的混合方式是允许相互之间转换,当其中一种模型修改时,另一种模型也应做出相应的更新。但是,从 CSG 转换成 B-rep 没有问题,而从 B-rep 转换成 CSG 却难以实现。目前在 CAD 实体造型系统中,一般采用一种模型为主,另一种模型为辅的混合方式。B-rep 与 CSG 混合建模所描述的多是一些形状已知、规则、单一的实体,对地学领域几何形状未知、复杂及实体较多的情况不适用。

Wire Frame 与 Block 混合建模方法以 Wire Frame 模型表达目标轮廓、地质或开挖边界,以 Block 模型填充其内部。为提高边界区域的模拟精度,可按某种规则对 Block 进行细分,如以 Wire Frame 的三角面与 Block 体的截割角度为准则来确定 Block 的细分次数(每次可沿一个方向或多个方向将尺寸减半)。该模型实用效率不高,即每一次开挖或地质边界变化都需进一步分割块体,即修改一次模型。

B-rep 与 TEN 混合建模方法是 GeotoolKit 软件中实现 GOCAD 与 IGMAS 数据转换的一种方法。以 B-rep 建立三维显示模型,以提高显示对象边界的精度,降低存储容量;在不注重显示效果而侧重地学空间分析的模型中,如物理属性模型、地质应力分析模型等,将 B-rep 转化为 TEN。这种混合建模方法易于展开不同应用领域的空间分析和数学计算,B-rep 和体元表示法是目前地学计算机模拟研究和应用的主流。

4. 集成模型

集成建模是指采用两种或两种以上的不同模型分别对系统中的不同三维空间对象进行几何描述和三维建模。代表性的有 TIN 与 CSG、TIN 与 Octree、TIN 与 GTP 集成建模方法,此外还有面向对象的矢栅集成,用于三维地质模型的集成方法等。

TIN 与 CSG 集成建模是当前 3D GIS 和 3DCM 建模的主要方式,TIN 模型表示地形表面,CSG 模型表示建筑物实体,两种模型的数据是分开存储的。为了实现 TIN 与 CSG 的集成,在 TIN 模型的形成过程中将建筑物的地面轮廓作为内部约束,同时把 CSG 模型中建筑物的编号作为 TIN 模型中建筑物的地面轮廓多边形的属性,并且将两种模型集成在一个用户界面。这种集成是一种表面上的集成方式,一个目标只由一种模型来表示,只是通过公共边界进行连接,无论是操作还是显示都是分别进行的,难以表达复杂断层、褶皱和节理裂隙等精细地质结构。

TIN 与 Octree 集成建模中 TIN 表达三维空间物体的表面,Octree 表达内部结构,用指针建立 TIN 和 Octree 之间的联系。TIN 主要用于可视化与拓扑关系表达。这种模型集中了 TIN 和 Octree 的优点:拓扑关系搜索很有效,可以充分利用映射和光线跟踪等可视化技术;缺点是八叉树数据须跟随 TIN 数据的改变而改变,否则会引起指针混乱。

针对城市地上下空间实体(包括地上空间实体、地表空间实体和地下空间实体)数据来源及分布特征,王彦兵在 2005 年提出了 TIN 与 GTP 集成建模方法。该方法以三角形为基本元素来表达地表及地上空间实体的外部形态,以 GTP 为基本构模元素来表达地下空间实体的几何特征,所有的实体描述都包括基本元素——三角形。因此,该模型对地表地形和地上空间实体采用约束 Delaunay 三角网解决二者在界面上的无缝集成;对地下空间实体和地表地形的集成利用层次三角网来实现,从而达到对城市空间实体三维建模的目的。该模型能够较好地实现地表地形与地上实体的集成,但对地表、地下集成有些欠缺。

1997 年龚健雅等以矿山为研究背景提出了一种矢量与栅格集成数据模型,该模型采用面向对象方法,将空间对象定义为零到三维及复杂对象,并将数字表面模型、数字立体模型、像元和体元、柱状实体等引入模型中处理复杂三维空间问题。该集成建模方法在实际运用中根据不同的需要选择不同的数据模型或结构对空间对象进行表达。2001 年程朋根等人以地勘工程的各种三维空间对象为研究背景,提出适合地勘工程的矢栅集成数据模型,其实质是对上述模型的继承和发展。该建模方法以复杂体、体、面、线、点对象之间的逻辑关系来建立对象之间的拓扑关系: