

地质体三维 建模方法与技术指南

DIZHITI SANWEIJIANMO FANGFA YU JISHU ZHINAN

杨东来 张永波 王新春 等著

地质出版社

地质体三维建模方法 与技术指南

杨东来 张永波 王新春 彭文祥
杨 钦 尚建嘎 李定平 刘 映
程 丹 刘天霸 庄一兵 著

地质出版社

· 北 京 ·

内 容 简 介

本书系统分析了目前国内外地质体三维模拟技术和应用软件开发现状,由此提出了不同领域地质体三维建模的数据需求、技术流程和主要建模软件的数据接口;详细阐述了 Micromine、Surpac、Magis、3D-Grid 等三维地质体模拟软件在矿山、地下水、城市地质等领域的应用实践和示范工作,以及提交的相应三维模型成果;并对今后如何展开相关工作提出了建议。

本书可作为开展三维地质建模工作的指导用书,同时亦可作为地质及相关专业学生的专业参考书。

图书在版编目(CIP)数据

地质体三维建模方法与技术指南/杨东来等著. —北京:地质出版社, 2007. 9

ISBN 978-7-116-05137-9

I. 地... II. 杨... III. 地质模型-计算机辅助设计-软件开发-指南 IV. P628-62

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 164007 号

责任编辑:杨友爱 蔡卫东

责任校对:郑淑艳

出版发行:地质出版社

社址邮编:北京海淀区学院路 31 号, 100083

电 话:(010) 82324508 (邮购部); (010) 82324581 (编辑室)

网 址:<http://www.gph.com.cn>

电子邮箱:zbs@ gph.com.cn

传 真:(010) 82310759

印 刷:北京地大彩印厂

开 本:787 mm × 1092 mm ¹/₁₆

印 张:16 图版:32 面

字 数:420 千字

印 数:1—1000 册

版 次:2007 年 9 月北京第 1 版·第 1 次印刷

定 价:50.00 元

书 号:ISBN 978-7-116-05137-9

(如对本书有建议或意见,敬请致电本社;如本书有印装问题,本社负责调换)

目 次

第一章 绪 言	(1)
一、必要性与可行性	(1)
二、主要工作	(1)
三、主要成果	(3)
第二章 地质体三维建模技术与软件的现状分析	(5)
第一节 地质体三维建模技术的现状分析	(5)
一、基于体的建模方法	(5)
二、基于面的建模方法	(9)
三、混合建模方法	(10)
四、泛权建模方法	(11)
第二节 地质体三维建模软件的现状分析	(13)
一、国外主要地质体三维模拟软件	(14)
二、国内主要地质体三维模拟软件	(38)
三、国内外地质体三维模拟软件现状的探讨分析	(48)
第三章 地质体三维建模技术的应用体系研究	(51)
第一节 地质体三维建模的数据需求与数据组织	(51)
一、矿区三维地质建模的数据需求与数据组织	(51)
二、城市地质三维建模的数据需求与数据组织	(53)
三、地下水三维地质建模的数据需求与数据组织	(60)
第二节 地质体三维建模的技术流程	(65)
一、矿区三维地质建模的技术流程	(65)
二、城市地质三维建模的技术流程	(69)
三、地下水三维地质建模的技术流程	(92)
第四章 主要地质体三维建模软件的数据接口	(97)
第一节 Micromine 软件的数据接口	(97)
一、地形等高线转换	(97)
二、剖面图转换	(99)
三、探矿工程数据的转换	(109)
第二节 Surpac 软件的数据接口	(113)

一、地形等高线转换	(113)
二、剖面图转换	(115)
三、探矿工程数据的转换	(117)
第三节 3D-Grid 软件的数据库接口	(121)
一、地形图	(121)
二、地表等高线 DEM 数据	(121)
三、地表卫星图片	(122)
四、剖面接口	(122)
五、钻孔接口	(124)
第四节 Mapgis 三维地质软件的数据库接口	(127)
一、三维数据管理体系结构	(127)
二、输入输出数据基本格式	(128)
三、二维矢量数据转换接口	(129)
四、三维空间数据转换接口	(129)
五、基础地理数据入库接口	(130)
六、钻孔类属性数据入库接口	(133)
第五章 主要地质体三维建模软件的应用示范研究	(137)
第一节 鹤庆北衙金矿三维地质建模示范 (Micromine)	(137)
一、示范区概况	(137)
二、数据源与数据组织	(140)
三、建模流程	(142)
四、小结	(162)
第二节 迪庆普朗铜矿三维地质建模示范 (Micromine)	(166)
一、示范区概况	(166)
二、数据源与数据组织	(168)
三、建模流程	(170)
第三节 迪庆普朗铜矿三维地质建模示范 (Surpac)	(175)
一、数据库的建立与操作	(175)
二、创建轮廓线	(176)
三、创建实体模型	(176)
四、创建块体模型	(176)
五、资源量估算	(182)
六、剖面分析	(184)
第四节 基于 Mapgis 三维地质软件的上海城市地质三维建模示范	(184)
一、上海人民广场地区三维地质建模研究	(184)
二、上海临港新城区三维地质结构建模研究	(193)

第五节 基于 3D-Grid 的上海城市地质三维建模示范	(194)
一、结构模型	(194)
二、属性模型	(196)
第六节 基于 3D-Grid 的华北地下水三维地质建模示范	(197)
一、建模所需资料概况	(197)
二、建模流程	(198)
三、华北平原三维地质分析	(217)
第七节 基于 Mapgis 的华北地下水三维地质建模示范	(218)
一、数据类型及数据量	(219)
二、水文地质剖面数据整理	(219)
三、等值线与高程点数据整理	(224)
四、水文地质钻孔数据整理	(225)
五、立体剖面构建	(225)
六、实体模型的构建	(225)
七、华北平原地下水三维地质模型介绍	(230)
第六章 主要地质体三维建模软件的对比分析	(233)
第一节 面向矿区三维地质建模的示范软件的主要特点	(233)
一、Micromine 的主要特点	(233)
二、Surpac 的主要特点	(234)
第二节 MAPGIS 三维软件的主要特点	(235)
一、MAPGIS 三维地质建模软件组成	(235)
二、MAPGIS 三维地质建模软件的主要特点	(239)
第三节 3D-Grid 软件的主要特点	(240)
一、3D-Grid 的结构建模	(240)
二、3D-Grid 属性建模	(241)
第七章 地质体三维建模的主要问题与建议	(244)
第一节 地质体三维建模实践的主要问题	(244)
一、矿区地质建模主要问题	(244)
二、区域地质建模主要问题	(244)
第二节 地质体三维建模的工作建议	(245)
一、面向应用的三维软件开发将是今后的主要方向	(245)
二、三维地质建模应用需要确定有限的工作目标	(245)
参考文献	(246)
图 版	

第一章 绪 言

以高速传递的信息流取代物质流是当今信息时代的一个显著特点,而图形无疑是传播信息的高效率载体,正所谓“一图胜千言”。在各种应用信息系统的建设过程中,尤其是涉及大量基于空间信息的地质资料时,如何实现地质体三维的可视化显示、满足人们对空间数据信息的视觉需求,是极为必要的。无论是矿产资源评估、地下水资源计算,还是地下空间利用,均需要表达与之相关联的一系列空间数据信息,所有这些信息的表现出了强烈的三维空间性。对人类的视觉来讲,基于枯燥的数字、甚至二维平面来表达物体对象的复杂三维结构是极为抽象的,这就要求开展地质体三维软件开发和应用工作,基于对象可视化目标将一个形象的地下空间世界展现给人们。

一、必要性与可行性

要开展矿产资源评价、地下水评价和地下空间管理,就必须查明地下空间的基本结构特征,增强对地质结构的认识。以往地质资料对地下空间的表达一般都是以平面图、剖面图及表格形式提供的,它们所反映的数据是离散的,有局限性的,在三维空间中研究这些数据时,其拓扑关系还难以考虑清楚;同时,由于地质空间分布的复杂性、模糊性与不确定性,在仅仅具有钻孔或少量地质离散点信息的地区,技术人员则很难得到直观有效的地质信息。

建立地下三维地质可视化模型,不但减轻了地质工作者的任务,方便他们进行专业领域知识的讨论、传播和发展,而且这样的模型还能将专业领域复杂的、抽象的或专业性过强的成果及结论用简洁的、直观的、易于被广泛接受的方法和形式表现出来,它还将有助于不同领域间方便、正确地进行知识交流,有助于决策者做出正确判断。

随着计算机图形学技术的不断发展,以及三维空间数据处理理论研究的不断深入,已经为我们提供了建立这样真三维地质模型的技术条件。利用计算机图形学及可视化技术,将二维抽象的地质信息以三维可视化的图形效果直观形象地表达出来,建立逼真的空间立体地质模型,并任意剖切地质体,对地质体进行三维交互信息查询等。这样可以更高效地描述各种地质信息,如特定区域岩性,某一区域地层的厚度等;直观有效地表达各种地质现象间的拓扑关系,如地层的接触方式等。从而大大加快专业技术人员对地质现象的认识,提高了工作效率,充分利用了地质资料的宝贵价值。

基于以上认识,需要我们建立一种权威的、不断更新的、区域性的、具有传承性的地质结构三维可视化模型,这个模型建立的初期可能是粗糙的,甚至是有错误的。但是随着专业人员对地质结构认识的不断深化和勘探精度的提高,这个模型会逐渐准确直至完全正确。计算机技术发展到今天,已经为我们提供了建立这样真三维地质模型的技术条件。

二、主要工作

本书内容是国土资源大调查项目中的一个工作项目,工作时间为2002—2005年度,

主要开展地质体三维建模的现状调研、示范研究、方法与指南编写等方面的研究工作。由中国地质调查局发展研究中心作为负责单位承担项目，参加单位有中国地质科学院水文地质环境地质研究所、北京航空航天大学、复旦大学、武汉中地数码软件技术公司、云南省地质调查研究院、上海市地质调查研究院、上海交通大学、西安科技大学。

1. 年度主要工作

根据中国地质调查局下达的任务书和经过批准的设计书，本工作项目实施过程中每年度的主要工作任务如表 1-1 所示。

表 1-1 项目按年度主要工作表

年度	主要工作
2002	主要是开展地质体三维可视化的预研究工作，进行国内外技术调研、需求分析、开展软件开发技术方案的设计和技术验证工作，为进一步开展应用软件的开发提供可行性论证和技术框架
2003	继续开展进行国内外技术调研、需求分析等工作，组织地质体三维可视化模拟软件原型系统的开发，并在选定地区进行应用示范
2004	专家对本工作项目的目标进行了重新定位，确定示范应用是本项目的主要工作目标。需完成对现有三维模拟软件的选择，并组织开展矿区、城市地质、地下水等领域的应用示范工作，编写三维地质建模方法和指南
2005	按照 2004 年度设计确定的总体目标，继续开展矿区、城市地质、地下水等领域的应用示范工作，组织开展选定软件（Surpac、Micromine、MapGis、3D-Grid）的数据接口开发工作，编写并提交三维地质建模技术方法与指南技术报告

2. 主要承担单位的分工

本项目由多单位合作完成（表 1-2），按技术优势承担不同的软件开发或三维地质建模的示范工作，并分别和项目承担单位中国地质调查局发展研究中心签订委托协议书。

表 1-2 项目按年度主要工作表

承担单位	年度	主要工作
中国地质调查局发展研究中心	2002—2005	工作项目的承担单位，负责项目的整体设计和组织工作，负责总体成果报告的汇总与成果提交
中国地质科学院水文地质环境地质研究所	2005	项目参加单位，负责华北平原地下水三维地质建模数据的组织与示范数据库建设，负责完成利用 mapgis 软件进行华北平原地下水系统三维建模工作
北京航空航天大学	2002—2005	项目参加单位，负责提供 3D-Grid 三维地质建模软件及相关数据接口的开发，完成基于 3D-Grid 软件的华北平原地下水系统三维建模的示范工作
复旦大学 上海交通大学	2003 2004 2005	项目参加单位，因项目主要技术人员所在单位的变更产生了两个合作单位，主要任务是对目前的地质体三维建模技术进行调研，并利用 Surpac、Micromine 两个软件开展矿区三维地质建模工作

续表

承担单位	年度	主要工作
武汉中地数码软件技术有限公司	2004	项目参加单位，负责提供 MAPGIS 三维地质建模软件用于示范建模工作，并协助开展城市地质、地下水等方面的应用示范工作
	2005	
云南省地质调查研究院	2004	项目参加单位，负责云南省矿区建模示范区的数据资料收集和示范数据库的建设，协助上海复旦大学开展矿区三维地质建模工作
	2005	
上海市地质调查研究院	2004	项目参加单位，负责上海城市地质建模示范区的数据资料收集和示范数据库的建设，开展矿区三维地质建模工作
	2005	
西安科技大学	2003	项目参加单位，负责地质体三维建模软件的需求分析

在开展矿区三维地质建模工作，Micromine 国际矿业软件开发及咨询公司（北京分部）、Surpac 国际软件公司北京办事处提供了应用软件和大量的技术支持；中国地质环境监测院参与了项目的早期工作，在项目运行过程中相关专家也给予了技术支持。

三、主要成果

本工作项目研究工作历时 4 年，涉及 9 个单位、30 余名技术人员，在工作的不同阶段提出了不同的研究成果，本书则是在这些成果基础上完成的总体技术报告，由杨东来、张永波、王新春根据各项目参加单位提供的分技术报告汇总而成。

第一章：主要介绍了项目的基本情况，开展本项工作的必要性，取得的主要成果等方面的内容，由张永波汇总编写。

第二章：详细论述了地质体三维建模技术的现状，并在此基础上，对目前国外现有的地质体三维建模软件进行了描述，并对我国开展的软件开发工作进行了评述。相关内容由彭文祥编写。

第三章：在开展应用示范研究的基础，针对矿区、城市地质、地下水等领域的三维地质建模进行了系统总结，提出了不同领域三维地质建模的数据需求和组织、三维建模的技术流程。相关内容由彭文祥、尚建嘎、杨钦、刘天霸等人编写。

第四章：在示范研究工作的基础上，提出了 Micromine、Surpac 等矿区三维建模软件的数据接口方案，利用常规软件实现的现有数据库数据向 Micromine、Surpac 需求格式的转化；针对国产软件 MAPGIS 和 3G-GRID 专门开发了适合地质调查部门的数据接口，使得现有数据可直接转换读取。相关内容由彭文祥、尚建嘎、杨钦等人编写。

第五章：针对矿区、城市地质、地下水三个应用领域利用不同的软件进行了 9 个应用示范，并分别提交了应用示范报告。相关内容由彭文祥、李定平、尚建嘎、庄一兵、杨钦、程丹、刘天霸等人编写。

第六章：以应用示范为基础，对 Micromine、Surpac 矿区建模软件进行了对比分析，并对国内软件 MAPGIS 和 3G-GRID 的主要特点进行了分析。相关内容由彭文祥、尚建嘎、杨钦等人编写。

第七章：通过对矿区、城市地质、地下水等不同领域的三维建模应用示范，提出了目前条件下开展三维建模存在的主要问题和技術难度，并结合这些问题提出了今后开展软件

开发和建模实践工作一些有益的建议。相关内容由张永波、彭文祥、尚建嘎等人编写。

三维地质建模是应用软件与专业地质工作相结合的复杂应用问题，三维建模应用软件的开发目前尚不成熟，专业数据的支持在区域性建模方面也存在有较多的问题，这就为开展三维建模示范应用带来了极大的难度。本项目组技术人员在开展项目研究工程中付出了极大的努力，对三维建模技术和应用实践也有了深入了解，在进行全面总结和汇总的基础上完成了本书的编写。但由于时间仓促，本书不足之处欢迎读者批评指正。

第二章 地质体三维建模技术与软件的现状分析

三维地学模拟系统(3D Geosciences Modeling System, 简称 3DGMS)是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,在 20 世纪 90 年代初开始为人们所重视。1992 年国际勘探地球物理学家协会和欧洲勘探地球物理学家协会成立了 SEG/ EAEG 3D 建模委员会,开展了 3D 建模工程(SEM)。1996—1999 年分别在英国 Leeds、新西兰 Otago、英国 Bristol、美国弗吉尼亚州 Fredericksburg 举行了 4 次地质计算机会议,内容包括地质建模、模拟和可视化。1997 年在西班牙巴塞罗那召开的国际数学地质会议上, Graeme Bonham-Carter 等强调地质体 3D 重建及可视化的重要性。1997 年 9 月,一个由青年科学家组成的国际组织在德国召开了地球科学信息可视化研讨会,涉及的主要问题是以地理为参照的空间和时间数据可视化。

第一节 地质体三维建模技术的现状分析

三维地质模型是研制地质体三维模拟与可视化软件的核心与基础。近年来国内外已有不少研究与探索,但总的来说,三维地质模型的数据模型的理论与技术仍未成熟,这在很大程度上制约了三维地学软件的开发,这方面的突破将有力地促进三维地学软件的发展。传统的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),其实质是将 3D 地质环境中地层、矿体与地质现象投影到某一 2D 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 3D 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 3D 视觉效果,提高人们的 3D 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。3DGMS 正是针对传统的地质信息模拟与表达方法的不足和缺陷,借助于计算机和科学计算可视化技术,直接从 3D 空间的角度去理解和表达地质体和地质环境。地质、矿山领域的一些专家学者,围绕矿床地质、工程地质和矿山工程等问题,对 3DGMS 的空间建模问题进行了卓有成效的理论与技术研究,澳大利亚、加拿大、英国、美国、南非等国还相继推出了一批在矿山和工程地质领域得到推广应用的 3DGMS 软件。

在分析三维空间建模方面的国内外大量研究文献的基础上,目前主要有四种类型的建模方法:即基于体的建模方法、基于面的建模方法、混合建模方法(表 2-1)以及泛权建模方法。

一、基于体的建模方法

体模型基于 3D 空间的体元分割和真 3D 实体表达,体元的属性可以独立描述和存储,

表 2-1 3D 空间建模方法分类

体模型		面模型	混合模型
规则体元	不规则体元		
结构实体几何 (CSG)	实体 (Solid)	不规则三角网 (TIN)	TIN-CSG 混合
体素 (Voxel)	四面体 (TEN)	网格 (Grid)	TIN-Octree 混合
八叉树 (Octree)	金字塔 (Pyramid)	边界表示模型 (B-Rep)	Wireframe-Block 混合
规则块体 (Regular Block)	三棱柱 (TP), 似三棱柱 (QTPV)	线框 (Wireframe) 或相连切片 (Linked Slices)	Octree-TEN 混合
针体 (Needle)	地质细胞 (Geocellular)	断面 (Section)	GTP-TEN 混合
	不规则块体 (Irregular Block)	断面-三角网混合	
	3D Voronoi 图	多层 (DEM)	
	广义三棱柱 (GTP)		

因而可以进行 3D 空间操作和分析。体元模型可以按体元的面数分为四面体 (Tetrahedral)、六面体 (Hexahedral)、棱柱体 (Prismatic) 和多面体 (Polyhedral) 等类型, 也可以根据体元的规整性分为规则体元和不规则体元两个大类。规则体元包括 CSG、Voxel、Octree、Needle 和 Regular Block 共 5 种模型。规则体元通常用于水体、污染和环境问题建模, 其中 Voxel、Octree 模型是一种无采样约束的面向场物质 (如重力场、磁场) 的连续空间的标准分割方法, Needle 和 Regular Block 可用于简单地质建模。不规则体元包括 TEN、Pyramid、TP、Geocellular、Irregular Block、Solid、3D Voronoi 和 GTP 共 8 种模型。不规则体元是有采样约束的、基于地质地层界面和地质构造的面向实体的 3D 模型。

1. 规则块体 (Regular Block) 建模

块体建模技术的研究和应用始于 20 世纪 60 年代初, 是一种传统的地质建模方法。20 世纪 60 年代和 70 年代开发的一些地质体模拟系统采用这种建模技术, 比较典型的有 RTZ 公司开发的 OBMS 和 OPDP 系统、Control Data 公司的 Mineval 系统和 Minetec 公司的 MEDS 系统。这类建模技术是把要建模的空间分割成规则的 3D 立方网格, 称为 Block, 每个块体在计算机中的存储地址与其在自然矿床中的位置相对应, 每个块体被视为均质同性体, 由克立格法、距离加权平均法或其他方法确定其品位或岩性参数值。该模型用于属性渐变的 3D 空间 (如浸染状金属矿体) 建模很有效, 对于有边界约束的沉积地层、地质构造和开挖空间的建模则必须不断降低单元尺寸, 从而引起数据急速膨胀。解决方式是只在边界区域进行局部的单元细化。

2. 结构实体几何 (CSG) 建模

首先预定义一些形状规则的基本体元, 如立方体、圆柱体、球体、圆锥及封闭样条曲面等, 这些体元之间可以进行几何变换和布尔操作 (并、交、差), 由这些规则的基本体元通过操作来组合成一个物体。生成的 3D 物体可以用 CSG 树表示。CSG 建模在描述结构简单的 3D 物体时十分有效, 但对于复杂不规则 3D 地物尤其是地质体则很不方便, 且效率大大降低。

3. 3D 体素 (Voxel) 建模

该模型的实质是 2D Grid 模型的 3D 扩展, 即以一组规则尺寸的 3D 体素 ($a = b = c$)

来剖分所要模拟的空间。基于 Voxel 的建模法有一个显著优点，就是在编制程序时可以采用隐含的定位技术，以节省存储空间和运算时间。该模型虽然结构简单，操作方便，但表达空间位置的几何精度低，且不适合于表达和分析实体之间的空间关系。当然，通过缩小 Voxel 的尺寸，可以提高建模精度，但空间单元数目及储量将呈三次方增长。

4. 八叉树 (Octree) 建模

类似于 2D GIS 中的四叉树的栅格，Octree 模型实质上是对 Voxel 模型的压缩改进。该方法将 3D 空间区域分成 8 个象限，且在树上的每个节点处存储 8 个数据元素。当象限中所有体元的类型相同时（即为均质体），该类型值存入相应的节点数据元素中。非均质象限再进行象限细分，并由该节点中的相应数据元素指向树中的下一个节点，如此细分直到每个节点所代表的区域都是均质体为止。Octree 模型在医学、生物学、机械学等领域已得到成功应用，但在矿床地质建模中有较大的局限性。基于八叉树，肖乐斌等提出了四层矢量化八叉树层次结构，边馥苓等提出了面向目标的数据结构。

5. 针体 (Needle) 建模

该模型的原理类似于结晶生长过程，用一组具有相同截面尺寸的不同长度或高度的针状柱体对某一非规则 3D 空间、3D 地物或地质体进行空间分割，用其集合来表达该目标空间、3D 地物或地质体。

6. 四面体格网 (TEN) 建模

该模型是在 3D Delaunay 三角化研究的基础上提出的，是一个基于点的 TEN 的 3D 矢量数据模型。其基本思路是用互不相交的直线将 3D 空间中无重复的散乱点集两两两连接形成三角面片，再由互不穿越的三角面片构成四面体格网。其中四面体 (Tetrahedral) 都是以空间散乱点为其顶点，且每个四面体内不含有点集中的任一点。TEN 建模时，四面体内点的属性可由插值函数得到，其中插值函数的参数由四个顶点的属性决定，因此，经过四面体剖分插值后，可以得到空间的 3D 数据信息。TEN 虽然可以描述实体内部，但不能表示 3D 连续曲面，而且用 TEN 来生成 3D 空间曲面也较为困难，算法设计较复杂。

7. 金字塔 (Pyramid) 模型

类似于 TEN 模型，只不过是使用 4 个三角面片和 1 个四边形封闭形成的金字塔状模型来实现对空间数据场的剖分。由于其数据维护和模型更新困难，一般很少采用。

8. 三棱柱 (Tri-Prism, TP) 建模

该模型是常用的简单的 3D 地学空间建模技术。张煜等给出了 TP 体元的定义，同时给出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。由于 TP 模型的前提是三条棱边相互平行，因而不能基于实际的偏斜钻孔来构建真 3D 地质，也难以处理复杂地质构造。戴吾蛟等则以不规则 TP 为基本单元，讨论了不规则 TP 网络模型 (TPN) 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。

9. 地质细胞 (Geocellular) 模型

其实质是 Voxel 模型的变种，即在 xy 平面上仍然是标准的 Grid 剖分，而在 z 方向则依据数据场类型或地层界面变化进行实际划分，从而形成逼近实际界面的 3D 体元空间剖分。

10. 不规则块体 (Irregular Block) 建模

不规则块体与规则块体的区别在于规则块体 3 个方向上的尺度 (a、b、c) 互不相等, 但保持常数 (如 OBMS 系统); 而非规则块体 3 个方向上的尺度 (a、b、c) 不仅互不相等, 且不为常数。非规则块体建模法的优势是可以根据地层空间界面的实际变化进行模拟, 因而可以提高空间建模的精度。

11. 实体 (Solid) 建模

实体建模法是在 20 世纪 80 年代发展起来的一种建模方法, 最初是采用多边形网格 (线框模型) 描述地质体的几何边界, 而用传统的块段模型描述地质体内部的品位或质量的分布。实体建模技术经过后来的发展已经比较成熟, 其典型代表是加拿大 Lynx 系统中提供的实体建模技术。该技术以地质体在三个平行剖面上的边界线及其连线构建元件 (Component) 来建模。元件不仅表示一个封闭的体, 也表示体内的属性。一个简单地质体就由这样的一系列元件所构成。地质体内部的属性变化仍然用传统的块段模型来模拟。在用传统的块段模型来模拟地质体内部的属性变化时, 一般要以地质体的边界作为约束, 这就涉及由线框模型或体元模型来生成地质体的三维栅格模型的问题, 在现有的商品化软件中, 这一问题已经得到解决。实体建模方法的主要优点是: ①用剖面来建模不但符合地质工作的方式, 而且可使建模者对现有资料进行解释和推断; ②不但可以精确地表达各种不规则地质体的几何形态, 而且可以描述地质体的属性; ③地质体几何模型容易修改; ④这种建模方法也适用于采掘工程边界的表达。其主要不足是: ①缺乏对各种不同复杂程度地质体之间及地质体几何元素之间必要的拓扑关系的描述, 从而使相邻地质体的边界不得不重复数字化, 地质界线、地质界面和地质体的查询以及地质对象的拓扑空间分析无法进行。②人工交互工作量巨大。

侯恩科针对该模型的不足, 进行了深入研究, 并根据面向对象方法的特点、计算机地质建模的特殊要求和地质体几何形态的不规则性以及产状的多样性特点, 提出了一种新的面向对象的不规则体元数据模型。将地质对象抽象为点、线、面、体四大类, 将地质体分为复合体、复杂体、简单体和体元四种对象类型。体元是构成地质体的基本体素, 它可以在局部坐标系中定义, 并由点、弧段、连接线、体元剖面多边形 (包括前、中、后 3 个剖面多边形边界) 和体元面五种基本对象类来描述。各对象类型之间的空间关系可由 12 种拓扑关系来描述。以这 12 种拓扑关系为基础, 定义了不规则体元数据模型的数据结构。

12. 3D Voronoi 图模型

3D Voronoi 图是 2D Voronoi 图的 3D 扩展。其实质是基于一组离散采样点, 在约束空间内形成一组面—面相邻而互不交叉 (重叠) 的多面体, 用该组多面体完成对目标空间的无缝分割。该模型最早起源于计算机图形学领域, 近年, 人们开始研究其在地学领域中的可行性, 试图在海洋、污染、水体及金属矿体建模方面得到应用。

13. 广义三棱柱 (GTP) 建模

针对地质钻孔尤其是深钻偏斜的特点, 吴立新等提出一种可以不受三棱柱棱边平行即 (钻孔垂直) 限制的 ATP (Analogical Tri—Prism) 建模方法, 后发展为广义三棱柱建模 (Generalized Tri—Prism, GTP), 并将 TP 建模称为其特例。而且, 基于 TIN 边退化和 TIN 面退化, 可以由 GTP 导出 Pyramid 模型和 TEN 模型。GTP 建模原理是: 用 GTP 的上下底面的三角形集合所组成的 TIN 面来表达不同的地层面, 然后利用 GTP 侧面的空间四边形

面来描述层面间的空间关系，用 GTP 柱体来表达层与层之间内部实体。其特点是充分结合钻孔数据，利用钻孔数据的不同分层来模拟地层的分层实体并表达地层面的形态。基于点、TIN 边、侧边、TIN 面、侧面和 GTP 定义了 8 组拓扑关系，据此可以方便地实现空间邻接和空间邻近查询与分析。而且，GTP 数据结构易于扩充，当有新的钻孔数据加入时，只需在局部修改 TIN 的生成以及在局部修改 GTP 的生成，而不需改变整个体的结构，这样使得 GTP 的局部细化与动态维护很方便。

二、基于面的建模方法

基于面模型的建模方法侧重于 3D 空间实体的表面表示，如地形表面、地质层面、构筑物（建筑物）及地下工程的轮廓与空间框架。所模拟的表面可能是封闭的，也可能是非封闭的。基于采样点的 TIN 模型和基于数据内插的 Grid 模型通常用于非封闭表面模拟；而 B—Rep 模型和 Wire Frame 模型通常用于封闭表面或外部轮廓模拟。Section 模型、Section—TIN 混合模型及多层 DEM 模型通常用于地质建模。通过表面表示形成 3D 空间目标轮廓，其优点是便于显示和数据更新，不足之处由于缺少 3D 几何描述和内部属性记录而难以进行 3D 空间查询与分析。

1. TIN 和 Grid 模型

有多种方法可以用来表达表面，如等高线模型、Grid 模型、TIN 模型等。最常用的表面建模技术是基于实际采样点构造 TIN。TIN 方法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；而 Grid 模型则是考虑到采样密度和分布的非均匀性，经内插处理后形成规则的平面分割网格。这两种表面模型一般用于地形表面建模，也可用于层状矿床建模。对于层状矿床，一般先生成各岩层接触界面或厚度在模型域上的表面模型，然后根据岩层间的截割和切错关系通过“修剪”、“优先级次序覆盖”、算术和逻辑运算方法对各岩层接触面或厚度进行精确修饰。

2. 边界表示（B—Rep）模型

通过面、环、边、点来定义形体的位置和形状。例如一个长方体由 6 个面围成，对应 6 个环，每个环由 4 条边界定，每条边又由两个端点定义。其特点是：详细记录了构成物体形体的所有几何元素的几何信息及其相互连接关系，以便直接存取构成形体的各个面、面的边界以及各个顶点的定义参数，有利于以面、边、点为基础的各种几何运算和操作。边界表示建模在描述结构简单的 3D 物体时十分有效，但对于不规则 3D 地物则很不方便，且效率低下。边界线可以是平面曲线，也可以是空间曲线。

3. 线框（Wire Frame）模型

线框建模技术实质是把目标空间轮廓上两两相邻的采样点或特征点用直线连接起来，形成一系列多边形，然后把这些多边形面拼接起来形成一个多边形网格来模拟地质边界或开挖边界。某些系统则以 TIN 来填充线框表面，如 DataMine。当采样点或特征点呈沿环线分布时，所连成的线框模型也称为相连切片（Linked Slices）模型，或连续切片模型。

4. 断面（Section）模型

断面建模技术实质是传统地质制图方法的计算机实现，即通过平面图或剖面图来描述矿床，记录地质信息。其特点是将 3D 问题 2D 化，简化了程序设计；同时在地质描述上

它也是最方便、实用性最强的一种建模技术；但它在矿床的表达上是不完整的，断面建模难以完整表达 3D 矿床及其内部结构，往往需要通过其他建模方法配合使用，同时由于采用的是非原始数据而存在误差，其建模精度一般难以满足工程要求。

5. 断面—三角网混合模型

在二维地质剖面上，主要信息是一系列表示不同地层界线的或有特殊意义的地质界线（如断层、矿体或侵入体的边界），每条界线赋予属性值，然后将相邻剖面上属性相同的界线用三角面片（TIN）连接，这样就构成了具有特定属性含义的 3D 曲面。其建模步骤为：①剖面界线赋值；②二维剖面编辑；③相邻剖面连接；④3D 场景的重建。

6. 多层 DEM 建模

首先基于各地层的界面点按 DEM 的方法对各个地层进行插值或拟合，然后根据各地层的属性对多层 DEM 进行交叉划分处理，形成空间中严格按照岩性（或土壤性质）为要素进行划分的 3D 地层模型的骨架结构。在此基础上，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 3D 地下空间的完整剖分。

三、混合建模方法

基于面模型的建模方法侧重于 3D 空间实体的表面表示，如地形表面、地质层面等，通过表面表示形成 3D 目标的空间轮廓，其优点是便于显示和数据更新，不足之处是难以进行空间分析。基于体模型的建模方法侧重于 3D 空间实体的边界与内部的整体表示，如地层、矿体、水体、建筑物等，通过对体的描述实现 3D 目标的空间表示，优点是易于进行空间操作和分析，但存储空间大，计算速度慢。混合模型的目的则是综合面模型和体模型的优点，以及综合规则体元与不规则体元的优点，取长补短。主要包括如下混合建模方法。

1. TIN-CSG 混合建模

这是当前城市 3D GIS 和 3DCM 建模的主要方式，即以 TIN 模型表示地形表面，以 CSG 模型表示城市建筑物，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 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，然后通过公共边界来连接，因此其操作与显示都是分开进行的。

2. TIN—Octree 混合建模

以 TIN 表达 3D 空间物体的表面，以 Octree 表达内部结构。用指针建立 TIN 和 Octree 之间的联系。其中 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，而且可以充分利用映射和光线跟踪等可视化技术。缺点是 Octree 模型数据必须随 TIN 数据的改变而改变，否则会引起指针混乱，导致数据维护困难。

3. WireFrame—Block 混合建模

以 WireFrame 模型表达目标轮廓或地质与开挖边界，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 WireFrame 的三角面与 Block 体的截割角度为准则确定 Block 的细分次数（每次沿一个方向或多个方向将尺寸减

半)。该模型效率不高,每一次开挖或地质边界的变化都要进一步分割块体,即修改一次模型。

4. Octree—TEN 混合建模

随着空间分辨率的提高,Octree 模型的数据量将呈几何级数增加,且八叉树模型始终只是一个近似表示,原始采样数据一般也不保留。而 TEN 模型则可以保存原始观测数据,具有精确表示目标和表示较为复杂的空间拓扑关系的能力。对于一些特殊领域,如地质、海洋、石油、大气等,单一的 Octree 或 TEN 模型很难满足需要,例如在描述具有断层的地质构造时,断层两边的地质属性往往是不同的,需要精确描述。因此,可以将两者结合起来,建立综合两者优点的 Octree—TEN 混合模型。该模型以 Octree 作整体描述,以 TEN 作局部描述。该混合模型虽然可以解决地质体中断层或结构面等复杂情况的建模问题,但空间实体间的拓扑关系不易建立。

5. GTP—TEN 混合建模

将四面体作为一种新的几何元素引入 GTP 模型中,利用 GTP 首先进行地层形态描述。再用四面体进行 GTP 和实体内部的几何与属性描述。任意一个地质体都可由一个或有限个 GTP 组成。任意一个 GTP 都可以剖分为三个四面体,剖分原则为:以 GTP 上某一结点为起点,作三条首尾相连(但不封闭)的、通过 GTP 侧面的对角线,可将 GTP 划分为三个四面体。

四、泛权建模方法

陈树铭认为地质三维领域中,地矿、石油的三维分析相对来说是比较简单的,相比之下工程地质、水文地质等的三维分析更复杂,比如说在地矿、石油领域应用克里格方法基本就可以分析,但是对于工程地质、水文地质分析来说,克里格方法基本是不可行的。并认为目前主要有三类地质三维重构算法,即剖面成面法、直接点面法,以及拓扑分析方法。在综合应用概率统计、模糊数学、神经网络、插值、积分等理论的基础上,构造了一种新算法(他称之为“泛权”算法),其核心思想就是能对任意 M 维的连续、非连续边界进行重构分析,并同时能耦合地模拟各种复杂背景因素的影响。

(一) 常用的三类地质三维重构算法

1. 剖面成面法

剖面成面法的基本思路是,在生成大量的地质剖面的基础上,再应用曲面构造法(趋势面法、DEM 生成技术)来生成各个层面,进而来表达三维体。比如国外的三维地质分析软件 GEOCOM 就是采取此种思路的一个典型。具体的解决步骤如下:

- (1) 收集、整理原始地质资料,并进行柱状和综合分层;
- (2) 建立地质空间多参数数据库;
- (3) 根据以上资料,应用人工交互式的地质剖面生成软件平台,加上专家的人工干预生成各种各样的空间地质剖面;
- (4) 分别根据各剖面的地层分布结果,加上专家的干预、分析参数的控制来生成各个地质曲面;
- (5) 建立地层空间曲面构架数据库;
- (6) 应用地质三维展示平台,基于地层空间曲面构架数据库、地质空间多参数数据