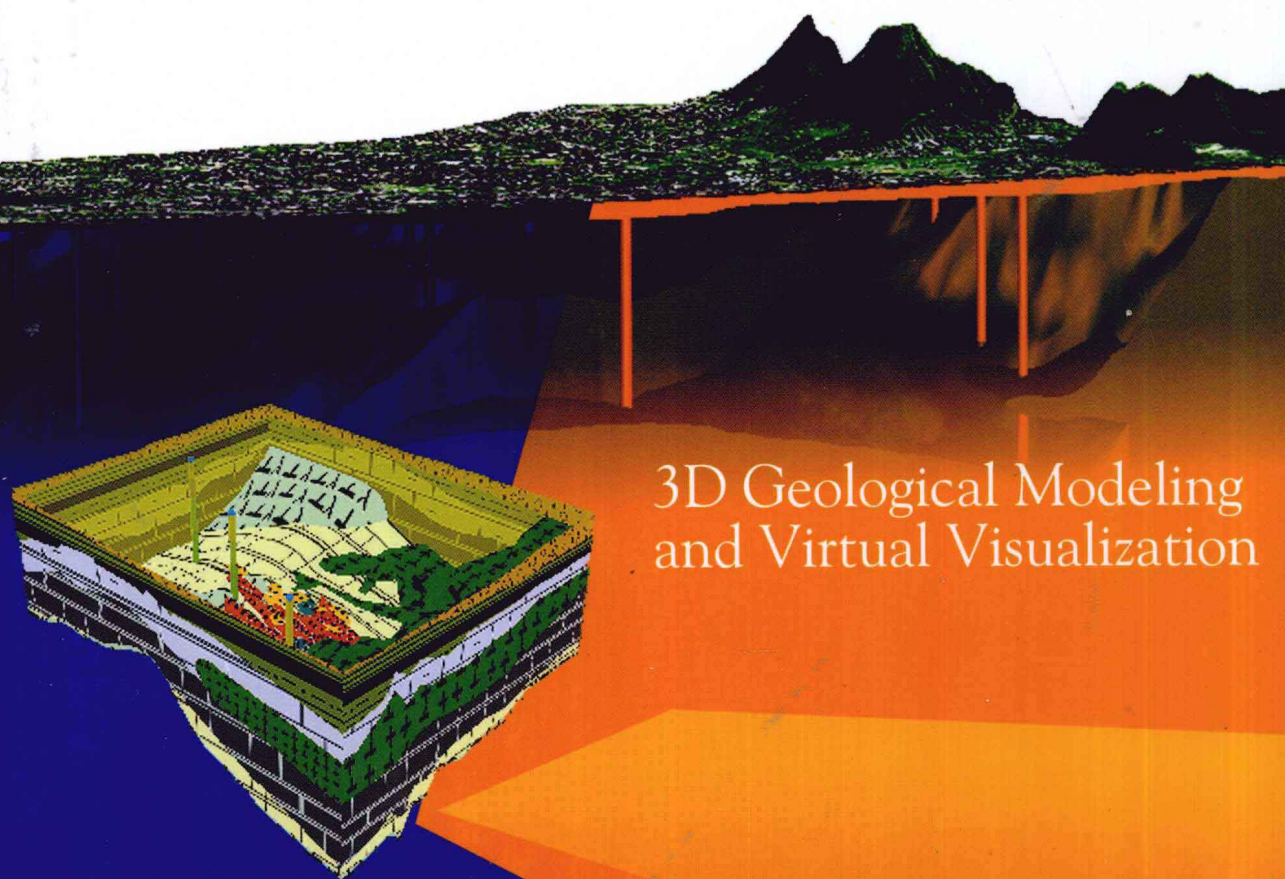


虚拟地质建模 与可视化

武 强 徐 华 著



3D Geological Modeling
and Virtual Visualization



科学出版社

虚拟地质建模与可视化

武 强 徐 华 著

科 学 出 版 社

北 京

前 言

20 世纪 90 年代后期出现了数字地球 (Digital Earth) 的概念,即建立一个多分辨率、三维动态表达的虚拟地球,使获取、存储、处理和显示地学数据的方法发生深刻的变化。数字地球试图探索提供关于地球参考信息交换与发布的一个全球环境,而虚拟地质建模与可视化技术 (3D Geological Modeling and Virtual Visualization) 是实现数字地球计划的前提之一,为广地质工作者带来了新的机遇和动力,有利于更好地开展本领域及相关领域的科学研究和工程实践。

虚拟地质建模与可视化是利用虚拟现实技术构建一个虚拟地质环境,对三维地质空间的地表和地下数据进行解释、集成、模型构造以及可视化显示与分析;是展示和解释三维地质体的一个崭新的科学手段和工具,主要表现在对地质数据及其概念的表达方法、对地质数据及其解释的不确定性评价以及对地质体和地质过程在多尺度下的空间分析等。虚拟地质建模不仅可以为地质工作者提供一个直观地观察与研究地质单元的空间展布及其相互关系、对现有大量地质数据和资料进行有效保存与管理的手段,同时,还能够对已完成的勘察工作进行检验,为后续的勘探设计、施工操作等提供有力的地质依据,并对地质勘探与管理决策具有重要理论指导意义和实用价值。

本书论述了虚拟地质建模与可视化研究背景、理论方法和关键技术,是作者在虚拟地质建模与可视化领域十几年的研究基础上撰写而成,反映了国家自然科学基金项目 (40572149、40772162、49872080、40742013)、国家“十一五”科技支撑计划课题 (2007BAK24B01)、国家重点基础研究发展计划课题 (973) (2006CB202205)、国家科技重大专项 (2009ZX05060)、教育部重大科研培育项目 (2004-295) 和北京市教委科研计划项目和煤炭资源与安全开采国家重点实验室自主研究课题等项目的一系列研究成果。基于所提出的理论方法,在“.NET”环境下开发了具有自主知识产权的三维地质模拟软件系统 (GeoSIS、GeoUSS 等),该系统已在北京、安徽、湖南、云南、贵州、广西、山东和河北等地完成了数字矿山和三维地质建模及其应用的研究工作。

全书共分 10 章,内容包括两个方面:

① 基础理论和技术方法。第 1 章主要介绍了虚拟地质建模与可视化中的基本概念、研究内容、国内外研究现状以及面临的关键问题;第 2 章介绍了相关的数学基础和理论方法,重点分析三维地质建模中常用的空间插值方法;第 3 章从不同角度对空间数据模型进行了归纳分类,强调空间几何模型与拓扑模型在复杂地质构造模拟过程中的重要因素;第 4 章主要论述了基于多源数据集成的建模方法,包括体系结构设计、面向源和面向对象集成方法、实体模型构建以及空间信息质量检测模型等;第 5 章论述了虚拟地质建模可视化环境的设计以及虚拟场景中真实感与交互性设计对三维地质建模的影响;第 6 章介绍了地

质体的开挖切割、栅状图生成、等值线计算以及储量计算等空间数据可视化分析与查询方法。

② 系统研发与应用。第7章详细介绍了作者基于上述理论研究成果开发的 Geo-主系统,包括系统体系结构、系统功能模块、类的设计以及相关算法。第8章至第10章介绍了以 Geo-主系统为核心主体扩展的 GeoSIS、GeoGSS、GeoUSS 等系统,适合于矿山地质与开发、城市地质调查、海岸带地质调查、石油、地勘和水利等领域的多比例尺三维地质建模工作,为多学科的协作研究架设了一个共享的信息平台。

本书的研究和编写工作得到了中国矿业大学(北京)、北京石油化工学院、清华大学、北京大学以及相关的研究院、企事业单位等众多领导、师生和工程技术人员的大力支持。在项目研究期间,得到了李青元博士、毛善君博士、邓俊辉教授、徐青教授、孙延奎博士、张志鸿博士、张明恒博士、胡立堂博士、吴立新博士、林辉教授、范明教授和孙振祖教授等专家学者的热情帮助和指导;来自国外的专家学者 J. L. Mallet 教授、N. L. Jones 博士、Preusser 教授、H. M. John 博士、Xu Xiaofeng 博士、Zou Xukai 博士、Zhou Wanfang 博士、K. Vic 博士、Geng Zhenwen 博士、Tian Fuyu 博士及 J. John 博士等给予了热情指导和帮助。我们的研究团队包括董东林、关文革、陈巍瑛、刘守强、朱斌及李铎等博士以及赵鹏、曹候杰、樊振利、李坤、张晓亮、李磊、王俊杰、黄松柏及费雯悦等几十位硕士,没有他们的辛勤工作,就没有我们现在的研究成果。此外,开滦集团有限责任公司、河北冀中能源股份有限公司、北京市地质矿产勘查开发局、山东省地质矿产勘查开发局及淮北市水务局等企事业单位的领导、工程师和工作人员,提供了大力协作,在此一并表示深切的谢意。

由于作者水平有限,书中难免有错误及不当之处,恳请广大读者批评、指正和帮助。

武 强 徐 华

2010年6月

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 虚拟地质建模与可视化的含义	1
1.2 虚拟地质建模与可视化的重要意义	2
1.3 国内外研究现状与发展趋势	4
1.3.1 三维地质模型设计	5
1.3.2 三维地质建模体系结构	9
1.3.3 可视化设计环境	10
1.3.4 应用进展	12
1.3.5 面临的关键难题	14
1.4 虚拟地质建模与可视化系统设计	15
1.4.1 设计目标	15
1.4.2 虚拟地质环境组成	15
1.4.3 系统体系结构	15
第 2 章 数学基础与理论方法	17
2.1 基本原理	17
2.1.1 基本概念	17
2.1.2 基本几何定义	18
2.1.3 相关准则	18
2.2 基本几何算法	20
2.2.1 几何定位	20
2.2.2 凸壳	23
2.2.3 Voronoi 图	24
2.2.4 二维 Delaunay 三角化	25
2.2.5 Delaunay 四面体化	29
2.3 实体集合运算	32
2.3.1 Boolean 运算	32
2.3.2 曲面求交运算	33
2.4 空间插值方法	37

2.4.1	三次样条插值函数	37
2.4.2	B 样条函数曲线及曲面插值	39
2.4.3	反向距离加权插值	40
2.4.4	Kriging 插值	40
2.4.5	离散光滑插值	42
2.4.6	神经网络插值	45
第 3 章	空间数据模型	47
3.1	空间数据模型基础	47
3.1.1	空间数据模型	47
3.1.2	几何元素定义	48
3.2	空间数据模型分类	49
3.3	模型设计方法	51
3.3.1	线框表达模型	51
3.3.2	表面表达模型	52
3.3.3	实体模型	55
3.3.4	混合模型	58
3.4	地质体空间几何模型	60
3.4.1	超体元实体模型	60
3.4.2	断层数学模型	61
3.4.3	褶皱几何模型	64
3.5	空间属性模型	65
第 4 章	基于多源数据集成的三维地质建模	67
4.1	概述	67
4.1.1	基于剖面的建模	67
4.1.2	基于层面的建模	68
4.2	体系结构	68
4.3	地质数据特点及分类	71
4.3.1	地质数据特点	71
4.3.2	地质数据分类	71
4.3.3	数据处理策略	73
4.4	多源数据集成技术	73
4.4.1	集成技术的方式	73
4.4.2	多源数据集成流程	74
4.4.3	面向源集成	74
4.4.4	面向对象集成	82
4.4.5	多源数据集成实例	83

4.5 实体建模方法	83
4.5.1 基本方法概述	83
4.5.2 基于对象的空间几何模型	84
4.5.3 基于体分割的多层次三维拓扑模型	86
4.5.4 三维建模设计策略	92
4.6 空间信息质量检测模型	96
4.6.1 概述	96
4.6.2 质量检测模型设计	97
4.6.3 不确定性分析	98
4.6.4 数据的不完整性	99
4.6.5 逻辑的不一致性	100
4.6.6 误差检测与分析校正	102
4.6.7 质量标准与评估	103
4.6.8 实例分析	104
第5章 虚拟地质模拟环境设计与实现	107
5.1 虚拟现实系统特征	107
5.2 模拟环境架构	108
5.2.1 硬件环境	108
5.2.2 软件环境	109
5.3 可视化技术方法	110
5.3.1 可视化的含义	110
5.3.2 三维地质模型可视化的表现形式	110
5.3.3 虚拟环境中可视化设计流程	111
5.3.4 数据场可视化方法	112
5.3.5 面向特征的驾驭式可视化方法	114
5.4 场景渲染技术	115
5.4.1 渲染技术概述	115
5.4.2 光照模型	116
5.4.3 透明度设计	117
5.4.4 纹理映射	118
5.5 模拟方法	120
5.5.1 虚拟地质场景中模拟方法	120
5.5.2 静态模拟	121
5.5.3 动态模拟	121
5.5.4 实时绘制	123
5.6 检测技术	124
5.6.1 碰撞检测技术	124

5.6.2 片断测试技术	125
5.7 交互式体系结构	126
5.7.1 交互式体系结构框架	126
5.7.2 面向对象的交互式图形编辑工具	127
5.7.3 空间交互式体插值技术	128
5.7.4 面向对象的空间数据选择和拾取设计方案	129
5.7.5 虚拟漫游交互设计	130
第6章 空间地质数据可视化分析	131
6.1 基本方法概述	131
6.2 立体剖面及栅状图的计算与表示	131
6.2.1 计算方法	132
6.2.2 空间切割类型	132
6.2.3 算法实现	133
6.3 开挖操作与分析	134
6.3.1 开挖应用需求分析	134
6.3.2 基于 SSI 的开挖算法	135
6.3.3 基于四面体的开挖算法	135
6.4 等值线及其填充分析方法	137
6.4.1 由等高线提取 DEM 模型	137
6.4.2 根据网格模型产生等值线	138
6.5 三维空间体积与储量计算	139
6.5.1 常规储量计算方法	140
6.5.2 体积计算方法	141
6.5.3 基于地质体模型的储量计算	141
6.6 空间数据分层查询结构	142
6.6.1 分层查询结构框架	142
6.6.2 多维数据库设计	142
6.6.3 查询方法	143
6.7 多维数据分析	145
第7章 系统设计与实现	148
7.1 系统设计策略	148
7.2 系统体系结构	149
7.3 系统功能模块	150
7.3.1 空间数据处理	152
7.3.2 实体建模设计	152
7.3.3 可视化设计	153

7.3.4 空间数据分析	153
7.3.5 专业模型接口	154
7.4 空间类库设计方法	154
7.4.1 空间类体系结构	154
7.4.2 空间对象类	154
7.4.3 数学模型支撑类	157
7.4.4 模型构建与应用类	157
7.4.5 图形类	157
7.4.6 主调模块及辅助类	157
7.5 类的设计	158
7.5.1 类及其关联类图	158
7.5.2 类的继承与派生	159
7.6 算法研究与分析	160
7.6.1 算法概述	160
7.6.2 多值面网格模型的生成算法	161
7.6.3 区域递归分割算法	165
7.6.4 可变三角化算法	167
7.7 接口设计	168
7.7.1 用户接口	168
7.7.2 外部接口	168
7.7.3 内部接口	169
7.8 系统出错处理	169
7.9 系统环境与性能	170
7.9.1 系统环境	170
7.9.2 系统性能	170

第 8 章 GeoSIS 三维地质建模可视化系统研发与应用

8.1 GeoSIS 建模流程	173
8.2 研究区域概况	175
8.3 区内地质特征	176
8.3.1 地层特征	176
8.3.2 构造特征	178
8.3.3 水系特征	179
8.4 数据结构及其预处理	179
8.4.1 钻孔数据	179
8.4.2 地质边界	181
8.4.3 DEM 数据	181
8.4.4 断层数据	182

8.4.5 褶皱数据	184
8.4.6 层面数据	185
8.4.7 剖面 CAD 设计	185
8.4.8 辅助数据	188
8.5 三维地质模型构建	188
8.5.1 多源数据集成与处理	188
8.5.2 层面模型建立	188
8.5.3 实体模型重构	190
8.6 三维模型空间分析与应用	191
8.6.1 三维地质模型一体化显示	191
8.6.2 空间信息分析	194
8.6.3 空间信息查询	195
8.7 典型案例分析	198
8.7.1 地质勘探区	198
8.7.2 矿区	213
8.7.3 油田区	220
第 9 章 GeoGSS 地下水模拟可视化设计	222
9.1 应用背景	222
9.2 系统可视化设计方法	222
9.3 系统开发环境	224
9.4 典型案例分析	224
第 10 章 GeoUSS 地下水渗流场模拟可视化系统研发与应用	227
10.1 系统体系架构	228
10.1.1 地下水动态仿真环境	228
10.1.2 地下水仿真流程	229
10.1.3 关键算法	231
10.2 基本原理与方法	232
10.2.1 单元基函数	232
10.2.2 流速计算	233
10.2.3 流径点坐标计算	234
10.3 地下水渗流场动态模拟	234
10.3.1 虚拟开采条件下流场模拟	235
10.3.2 地下水水位动态模拟	235
10.3.3 特征提取	236
10.3.4 流线生成与动态跟踪	237
10.4 数据管理	239

10.4.1 拓扑结构	239
10.4.2 存取管理模式	240
10.5 三维动态可视化分析与发布	241
10.5.1 VR 可视化分析	241
10.5.2 三维 Web 发布	242
10.6 典型案例分析	243
10.6.1 数据集成与管理	243
10.6.2 水文地质模型导入与重构	244
10.6.3 可视化分析与预测	248
参考文献	255

彩图

第 1 章 绪 论

1.1 虚拟地质建模与可视化的含义

虚拟地质建模与可视化 (3D Geological Modeling and Virtual Visualization) 是发达国家在 20 世纪 80 年代后期提出并发展起来的一个新的研究领域,是由勘探地质学、数学地质、地球物理、地理信息系统、遥感、计算几何、数据挖掘、科学可视化和虚拟现实等学科形成的一门新型交叉性学科,是地球科学和信息科学的高度综合。20 世纪 90 年代后期提出了数字地球 (Digital Earth) 的概念,即建立一个多分辨率、三维动态表达的虚拟地球,使获取、存储、处理和显示地学数据的方法发生深刻地变化。数字地球试图探索提供关于地球参考信息交换与发布的一个全球环境 (图 1.1),其中,虚拟地质建模与可视化技术的发展是实现数字地球计划的前提之一,为地质学者带来了新的机遇和动力,并有助于更好地开展相关领域的研究工作 (Matthias, 2000)。

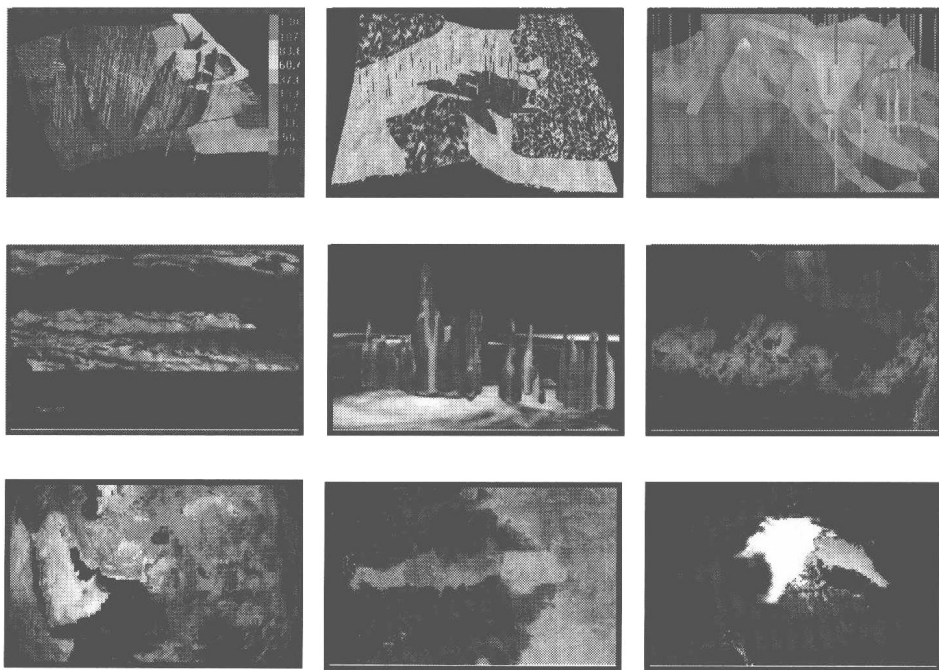


图 1.1 数字地球

部分图片引自 Digital Earth, 2009, <http://svs.gsfc.nasa.gov/projects/index.html>.

虚拟地质建模与可视化是指利用虚拟现实技术构建一个虚拟地质环境,对三维地质空间的地表和地下数据进行解释、集成、模型构造以及可视化显示与分析,即在虚拟地质环境中进行三维空间的地质建模,并将建模过程、建模结果进行可视化的理论、方法和技術,简称三维地质建模或三维地质模拟(3D Geological Modeling, 3DGM)。

主要包括3个层次的内容:

① 虚拟地质环境:指利用计算机生成的虚拟地质环境,地质学者可以通过使用各种特殊装置进入这个环境中,并操作、控制环境中的虚拟对象,对复杂地质数据进行可视化与交互处理,具有沉浸感、交互性和构想性。

② 三维地质模型:是虚拟地质建模与可视化的核心任务,主要涉及数据测试与验证、地质数据解释、多源数据集成、三维空间几何模型或称结构模型构建以及反映地质体内部物理、化学等属性参数的属性模型构建等技术方法。三维地质模型能够展示异种、多源数据在空间上的高度集成和可视化显示。

③ 可视化空间应用与分析:是在三维地质模型基础上的空间分析、计算以及各个相关学科的应用模拟与仿真。这些地质体网格模型包含了诸如岩性、地质构造和地质边界等数字化信息,为进一步的地质研究提供了一个基础的地质平台,例如,在已建立的地质体模型基础上进行地下水流的动态模拟等科学研究。

在三维空间内对地表和地下数据进行集成、可视化与分析的这种能力是展示和解释三维地质体的一个新的机会和科学手段,主要表现在:① 对地质数据及其概念的表达方法;② 对地质数据及其解释的不确定性评价;③ 对地质体和地质过程在多尺度下的空间分析。

1.2 虚拟地质建模与可视化的重要意义

地质体通常具有非常复杂的空间几何形态以及属性分布,尽管可以利用遥感、地震勘测和摄影测量等技术进行解析,但也只能获取空间分布不规则、数量有限或缺乏解释复杂地质现象能力及精度的数据。为了对研究区域的地质构造空间分布情况,岩性分布情况以及金、矿、汽及油等的位置,勘探储量,作业计划和开采中心等描述和研究,需进一步了解地质特征,传统的地质数据分析方法基本上是以点、线、剖面等为基础进行推算预测的,并形成对地质构造、地层规律和矿产富集状况的了解与认识,岩层特性的物探解释都是以二维(2D)的剖面图或等值线图表达的。随着应用研究在广度与深度地不断拓宽与深化,将三维空间信息处理简化为二维投影模型的方法已不再满足需要,它不能够真实地反映与刻画自然界复杂的三维(3D)地质现象,缺乏动态处理和时空分析的能力,存在很大的局限性。因此,虚拟环境中的三维地质建模及其相关技术的研究已成为国际上具有挑战性的课题之一(Royer, 1997; Breuning, 1999; Mark, 2001)。二维数据处理向三维空间信息处理的延伸是一场革命,因为二维数据处理技术受到许多限制,不能够明确表达三维空间所蕴涵的信息,而三维地质模型可以准确地描述所有二维和三维勘探数据,增强解释力(John and Keith, 2000; Laurent, 2000)。

虚拟地质建模不仅可以为地质学者提供一个直观地观察与研究地质单元的空间展布及其相互关系、对现有大量地质数据和资料进行有效保存与管理的手段,同时还能够对已完

成的勘察工作进行检验,为后续的勘探设计、施工操作等提供有力的地质依据;对地质勘探与管理决策具有重要实际意义。以往地质体是在地质学家的脑子里,而虚拟地质建模可以直观的将地质体展现在三维虚拟环境中,由于地质现象的复杂性和不确定性等特点,地质学者需要考虑多种地质因素和复杂条件进行地学模拟,在一定的范围内,建立多种可能的实现,产生最优、最合理和最符合地质规律的模型设计方案,揭示地质体内部结构、空间复杂的变化规律以及属性参数的分布特征,进行综合一体化和三维量化的研究与管理,直接反映出地质现象中的不确定性等因素。三维地质建模技术及其应用可以提出辅助决策的勘探计划,有利于合理、有效地进行各种评价以避免投资风险,在商业上也将产生更大的经济利益。

Garrett 等(1997)认为三维地质模拟计算机系统的出现暗示在交叉学科领域中将具有改变工作进程的潜力,许多交叉学科研究组织已经强调软件共享、三维可视化及数据访问的重要性。三维地质建模技术将为地质学者的研究开发工作提供一个坚实的支撑,提高分析地质体的能力,包括预测钻孔位置和自动探明断层产状等,并且通过耦合研究区域多源数据,完善空间信息处理的方法,提供统一的三维显示通道,以支持在同一个坐标系中勘探数据的全方位、一体化显示。改进与完善空间地质数据的集成或耦合方法、数据的表达形式及空间地质几何形态的模型描述,已成为地质学者的迫切需求(Breuning, 1999; John and Keith, 2000)。随着勘探地球物理和遥感影像处理等技术的迅速发展,使地质数据、摄影测量数据、遥感数据以及地球物理数据的三维空间多源数据耦合成为可能;为快速、准确地建立三维复杂地质模型提供了前提、奠定了基础;拓宽了对包含逆冲断层、倒转褶皱等复杂地质体进行资源分析与评价的应用范围。基于多源数据的地质模型及其信息处理系统还能够提供重要的经济决策依据,如投资优先策略、发展规划和未来勘探预算等。

科学可视化(scientific visualization)是发达国家于20世纪80年代后期提出并发展起来的一个新的研究领域;是当今生命科学和工程科学应用中关键性的研究课题,其技术水平正在从后台处理向实时跟踪和交互控制发展;是将科学计算、分析等过程中涉及的数据及其变化和最终结果以图形图像方式直接表现出来,并进行交互处理的理论、方法和技术。各种具体的或抽象的地质模型可以通过可视化技术,实时、形象且直观地展现出来(唐泽圣等, 1999; Serge and Martin, 2000)。

三维地质可视化系统所提供的空间分析与交互能力十分有限,不能满足应用的需要。在20世纪90年代初,诞生了虚拟环境中的三维可视化理论和技术,其主要特征为:沉浸感、交互性与创造力。虚拟环境中的三维地质建模提供了一种沉浸式的交互环境,可将因时空限制人类无法直接看到的地下场景以三维的立体的方式呈现在地质学者的面前。它由计算机生成的人机交互的三维空间环境构成,是人类与计算机和复杂的地质数据进行想象、处理和交互作用的一种新的手段。三维可视化技术集计算机图形学、多媒体技术、计算机系统工程、计算机交互跟踪技术和人工智能等多种学科和技术于一体,其核心是由三维图形组成的虚拟空间及在这个虚拟空间内人机交互界面的生成,三维地质数据建模生成复杂场景的算法研究至关重要,此外,它还具有物理建模、动态仿真和交互性设计等功能。自20世纪90年代以来,虚拟现实的进步和发展对科学进步和社会发展产生了深远的

影响(蒋庆全, 2002; 朱景和、袁怀雨, 2002; Pan, 2002)。

目前, 国内外关于虚拟环境中的三维地质建模与可视化方面的研究还处于起步阶段, 面临着许多理论与技术难题。虚拟环境中人与人、人与虚拟的自然界环境以及人与地质对象的时空领域等之间存在相互作用, 要求研究区域不仅具有高质量的数据, 高精度、可靠的三维数据模型设计, 还要求建立一个合理的高性能的交互式的体系结构, 以提供一个快速、准确、真实的三维可视化环境及更加广阔的设计空间和灵活的设计方法, 帮助地质学家直观、形象、准确地把握科学计算的局部和整体概念。通过虚拟环境中的三维数字化模拟, 实现模型设计、模型重构、模型检测、模型分析及模型显示等地质空间信息处理与应用的全部过程。其目的是为了增强地质数据的表现力, 改进对地质数据的理解和应用环境; 提高信息的利用率和空间分析能力, 帮助地质学者在三维空间中观察、解释、分析及模拟地质现象; 通过已知数据预测和了解研究区域内地质构造的空间展布情况, 并为获取矿藏位置及储量等重要信息提供崭新的手段; 通过视点变换或设计虚拟对象, 把地质学者的逻辑思维转化成虚拟环境中具有时间、空间的形象思维的试验场, 有助于加强对复杂地质现象的深刻认识; 揭示地质资料中包含的深层信息和内在联系, 挖掘并提取传统研究模式下获取不到的知识。这不仅实现科学计算工具和环境的进一步现代化, 从而使科学研究工作的面貌发生根本性的变化; 同时, 节约了资金, 减少了实际应用中的盲目性, 降低了风险, 对生产及环境分析起到了指导和决策作用, 具有重大的经济与社会效益。

1.3 国内外研究现状与发展趋势

虚拟环境中的三维建模与可视化技术的主要应用领域为医学、地质勘探、气象、计算流体力学和分子模型构造等。发达国家在这些领域的研究工作十分活跃, 近几十年来, 许多著名大学、国家实验室及大公司一直致力于三维建模与可视化技术的研究与开发, 从 20 世纪 70 年代的 CSG (Constructive Solid Geometry) 模型、B-reps (Boundary representation) 模型; 到随后关于三维空间数据集成或混合模型的研究, 如 TIN (Triangulation Irregular Network) 与 GRID 的集成、TEN (Tetrahedron Network) 与八叉树的混合模型、B-reps 与 TEN 的集成等; 以及基于这些集成或混合模型进行的空间计算和分析研究。

根据研究对象的差异, 三维对象模型可以分为两大类, 即 CAD (Computer Aided Design) 对象模型和自然对象模型。CAD 的目标是设计一个并不存在的三维几何复合体, 从固定拓扑的初始模型开始, 根据实体的空间分布特征, 通过调控参数获得期望的三维复合体模型。而地质建模必须根据局部的、分布不规则且精度不足的信息, 来重建已存在的几何形状相当复杂且拓扑关系未知的地质对象。商用三维机械 CAD 软件对地质建模的主要限制在于断层拓扑结构的设计和缺乏灵活处理贯穿整个实体的不同属性分布的能力 (Szeliski and Tonnesen, 1993; Renard and Courrioux, 1994; Liao and Medloni, 1997; Gopi and Krishnan, 2000)。

由于地质空间分布的不连续性、复杂性及不确定性, 适用于其他领域的建模方法和可视化技术并不能够完全适合地质体的建模与可视化研究, 需要结合计算机图形及图像处理

技术、数据挖掘、科学可视化、虚拟现实及勘探地质学、数学地质、地球物理、GIS 和遥感等领域的研究成果。Mallet (1992) 曾经证明机械 CAD 建模技术所采用的参数曲面表示法, 如 Bézier 和 B-spline 插值法, 不适合地球科学, 从而提出了离散光滑插值工具 DSI (Discrete Smooth Interpolator), 允许对三维空间定义的地质体每个节点的位置及其属性进行插值。近年来, 对于能否将成熟的机械 CAD 设计理念与技术融入地质建模过程中, 以缩短研究开发的周期、提高模型设计与分析的效率, 已有部分学者做了一些这方面的尝试, 如: CAD 软件可以作为三维建模数据预加工处理的有效工具及基于 CAD 的软件包试图解决多值面构网等问题, 这也是三维地质建模技术未来研究的目标之一 (Jones and Wright, 1991; Yvon, 1998)。

20 世纪 90 年代初, Mallet 初步建立了面向对象的客观实体建模的理论和方法并逐步完善和发展, 对一系列空间对象进行抽象、归类和派生, 通过将复杂空间数据的结构、操作、运算等进行封装和继承, 简化了三维数据模型的定义, 增强了三维空间数据的表现力。Serge 等提出一个开放式基于 CORBA 系统的体系结构, 通过三维地质数据库 GeoToolKit 将地质三维建模和可视化工具 GOCAD 与地球物理三维建模工具 IGMAS 有机的结合, 使得用户不仅可以远程存取数据, 还能够访问三维几何数据库操作。Faust 和 Koller 等比较成功地进行地理信息系统和虚拟实现系统的集成, 并提出虚拟 GIS 的概念。

随着互联网的蓬勃发展, 使用 VRML (Virtual Reality Modeling Language) 建立三维数据模型, 把复杂模型转换成压缩格式, 适合基于 Web 的虚拟三维模型的设计与应用。美国 IEEE 汇刊自 1995 年开始增加了 “IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics” 刊物, 对三维建模与可视化的研究提供支持。一些研究成果已经开始进入应用阶段, 具有代表性的商业化软件主要有 EarthVision、Lynx、AVS、Mve 和 GOCAD 等 (Simon *et al.*, 1997; Kevin and Ian, 1999; Serge and Martin, 2000; Mark, 2001)。

而国内对地质学的三维可视化研究与应用还比较薄弱, 无法形成规模, 具有自主知识产权的商品化系统很少。虽然已经有学者开始从事虚拟场景技术的研究, 但主要集中在医学、机械、城市规划和军事等领域, 面向地质的虚拟环境中三维建模与可视化研究才刚刚起步, 应加快理论和技术的研究步伐, 缩短与国外先进软件产品和技术差距。

1.3.1 三维地质模型设计

三维建模理论与技术的研究已有近 30 年的历史, 随着各个领域科学技术的发展及应用范围的逐步拓宽, 建模理论与技术也在不断地改进和发展。三维模型是建立在空间分割原理基础之上的, 即一个对象的任何复杂几何形状都可以由有限个简单形状拟合而成, 如地层可以通过许多三角形面片来逼近, 用一系列四面体网格近似模拟一个断块等。因此, 三维建模的核心技术是关于空间对象的三维表示方法, 研究如何描述空间实体的几何形状及其相互关系。国内外学者提出了各种建模方法约 20 余种, 主要可以归纳为 CSG 模型、基于面模型、基于体模型以及混合模型。

1.3.1.1 CSG 模 型

CSG 的基本概念是由 Voelcker 和 Requicha 提出的。它是一个框架结构,由几何元象,如块体、球体、圆柱体及圆锥体等,通过集合论的正则 Boolean 运算(并、交、差等)构造复杂三维对象的表示方法。CSG 采用树结构表述一个复杂对象,称为 CSG 树,树的叶结点对应于一个几何元象并记录几何元象的基本参数,中间结点为正则集合运算,根结点作为查询和操作的基本单元,对应于一个对象名。CSG 在 CAD、CAM 领域已经形成了产业规模,在理论研究上提出了 CSG 的正则化理论,正则 Boolean 操作能够区分任何一个点与带边界对象之间的关系,通过将简单的几何形状进行切和联合操作,形成复杂的空间几何形状。Rossignac 延伸了 CSG 的表达,提出构造性非正则几何理论,以描述非流型对象,并引入拓扑学的相关概念到 CSG 中。其难点是一些操作(如使一条边形成环)难以描述,而且获得一个真实的边界表示非常困难且费时(Stefan, 1997; 李清泉、李德仁, 1998)。

1.3.1.2 面 模 型

CSG 造型方法能够很好地应用于机械制作,但很难适应于地下建模,主要是由于地质形状的高度复杂性(Norman and James, 1992; Mallet *et al.*, 1997)。Stouffs 等(1996)认为实体模型中最流行的是边界表示法,主要是因为正在寻找答案的许多问题都与实体的表面有关。

基于面模型的建模方法侧重于三维空间实体的表面表示,如地形表面、地质层面、断层面、构筑物及地下工程的轮廓与空间框架,主要包括 B-rep 模型、Wireframe 模型、Section 模型及多层 DEM 模型等。

B-rep 模型是基于曲面的表示方法,定义一系列 NURBS 等曲面或由二维三角形或四边形构成的曲面,由这些曲面描述一个闭合的实体。从历史上看,边界模型是最早用计算机表达三维对象的方法之一。考虑到每个实体都有边界,且每个三维实体可以由它的边界唯一确定这个事实,利用实体边界隐含地表达实体,而不需要列举实体内部的所有点(Shapiro, 2002)。这种方法并不约束空间几何形体,但不能描述实体的内部结构及其属性。

边界模型的主要几何元素包括顶点、边和面,面主要分为:参数曲面、隐式曲面和多边形曲面。参数曲面是从平面子集到空间的映射,典型的是 B-Spline (或 NURBS) 曲面。隐式曲面被定义为从空间到实数的一个光滑映射,能够表达圆锥体、球体及圆柱体,通常也可作为 CSG 方法的元象。多边形曲面是由多边形的一个集合构成,能够合理地组织起来表达地形和褶皱等实体对象的表面(Carl *et al.*, 1996; Stefan, 1997)。理论和技术上都比较成熟的是基于矢量结构的不规则三角网 TIN 和基于栅格结构的四边形网格 GRID 形成的曲面,并广泛应用于三维地质建模系统中,如 Norman 和 James (1992) 及 Jonathan (2000) 等学者提出基于空间离散点的网格 Delaunay 自动生成算法及其优化改进算