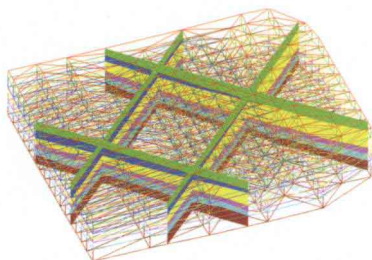


三维空间数据 建模及算法



程朋根 文红 著

本书特色：

1. 提出三维空间数据模型总体框架及分类体系
2. 基于多层DEM三维地层模型建模与模型操作算法实现
3. 对三维空间数据模型研究现状及其适用性进行比较分析
4. 三维复杂地质体及三维虚拟战场环境三维建模技术与方法
5. 研究基于似三棱柱体三维地质体建模理论与方法并进行实验
6. 力求从模型、建模方法、模型操作及实验四方面进行问题的阐述



國防工業出版社

National Defense Industry Press

内 容 简 介

三维地理信息系统(GIS)是建立数字地球的关键技术,在数字城市、数字矿山、虚拟战场等研究领域具有较大的应用潜力。三维GIS理论研究与软件开发成为国际GIS研究领域的难点和热点问题之一,三维数据建模是三维GIS的核心,三维GIS功能的发挥取决于其所选择的三维数据模型与建模方法。

本书以地质勘探工程及虚拟战场三维现象为对象,以建立数字矿山、虚拟战场为研究目标,系统介绍了三维GIS空间数据建模及其算法。主要内容包括:三维空间数据模型研究现状,各种三维现象的空间特征和信息获取方法,矢量与栅格集成的空间数据模型总体框架与分类体系,基于似三棱柱三维数据模型、基于多层DEM三维地层层模型及其它们的数据结构、建模方法和模型操作算法,三维复杂地质体建模方法,三维虚拟战场及建模技术。

本书可作为测绘、城市规划、资源勘探、矿山开采、海洋、大气、军事、社区管理、GIS等学科领域的研究开发人员及相关专业教师、研究生的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

三维空间数据建模及算法/程朋根,文红著. —北京:
国防工业出版社,2011. 11
ISBN 978-7-118-07767-4

I. ①三... II. ①程... ②文... III. ①三维-空间测
量-数据处理 IV. ①P236

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第217859号

※

国防工业出版社出版发行
(北京市海淀区紫竹院南路23号 邮政编码100048)
北京奥鑫印刷厂印刷
新华书店经售

*

开本 787×1092 1/16 印张 12¼ 字数 278千字
2011年11月第1版第1次印刷 印数 1—3000册 定价 38.00元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)68428422 发行邮购:(010)68414474
发行传真:(010)68411535 发行业务:(010)68472764

前 言

地理信息系统(GIS)为人们提供了采集、存储、管理和分析空间信息的有效工具,然而目前大多数商业GIS软件都是基于二维或2.5维的,这已导致它在描述真三维空间现象上的不足,限制了它的应用范围。克服这一缺陷的唯一办法是研究开发具有描述真三维空间对象能力的三维GIS软件。三维GIS理论与软件开发已成为国际GIS领域的热点和难点,三维GIS研究仍存在许多没有解决或解决不好的问题,理论上主要表现在三维空间数据模型和数据结构、三维数据获取方法、大容量数据的存储和管理、三维空间对象建模和分析及三维可视化技术。其中三维数据建模是三维GIS的核心,三维GIS各种功能的发挥取决于其三维数据建模方法的选取;如何从采集到的三维数据或根据传统的二维数据构建空间实体三维模型是三维GIS研究的关键。由于不同的研究领域,空间对象在其形态、数据获取方法和应用目的等方面存在较大差异,因此,根据不同的专题研究领域针对性地开展三维空间数据模型与建模方法的研究具有十分重要的意义。

本书作者在攻读博士学位论文期间主持完成了多项三维空间数据建模方面的研究课题,以地质矿山工程为研究对象开展了地矿三维空间数据模型、建模方法及模型操作算法进行研究工作,并做了相应的实验研究。本书是在作者博士论文基础上完成的,是作者近年来在三维空间数据建模领域研究成果的总结,同时还参考了国内外同行部分相关研究成果。本书主要内容包括以下几个方面。

(1) 阐述GIS空间数据模型的相关概念、术语、空间数据模型与空间数据结构的关系;对三维空间数据模型的研究现状进行回顾与分类,归纳各类数据模型的特点,对各种常见的三维空间数据模型适用性进行了系统的比较分析。

(2) 提出矢量与栅格集成的空间数据模型总体框架的概念,给出了总体框架分类体系;以建立地矿三维空间数据模型为目标,研究了采用基于似三棱柱体元的三维空间数据模型、基于混合体元的三维空间数据模型、基于多层数字高程模型(DEM)与似三棱柱体混合数据模型,采用统一建模语言进行描述。在矢量与栅格集成的面向对象数据模型中,以复杂体—体—面—线—点对象之间的逻辑关系建立模型内各对象之间的拓扑关系,设计13个空间对象的逻辑数据结构来实现它们之间存在的10种拓扑关系。

(3) 分析似三棱柱体元构建三维模型的特点,对基于似三棱柱体体元的逻辑数据模型、模型组成元素和对象的数据结构及它们之间的拓扑关系进行了阐述;设计了根据真实钻孔数据构建似三棱柱体模型的算法,对地层似三棱柱体建模过程中出现的特殊问题提出了合理的处理方案,给出了地勘工程对象似三棱柱体建模思路。研究了似三棱柱体元

平面切割的各种情况,设计了似三棱柱体模型被平面切割时形成剖面图的算法;对似三棱柱体元四面体剖分的必要性、剖分的方式、编码、剖分算法等进行了研究;采取对比分析的方法对似三棱柱体模型建模效益进行了分析。

(4) 阐述基于多层 DEM 的三维地层模型的概念,设计了相应的概念模型、数据结构,采用 5 组拓扑关系表来维护模型中 4 种实体之间的拓扑关系;分析了现有三维地层模型建模过程,提出了“钻孔-分层面片建模方法”概念,并设计了三维地层模型构建工作流程。根据多层 DEM 的三维地层建模需要研究了基于格网索引的带约束数据的地层层面三角网(TIN)构建方法、基于 TIN 的模型拼合算法、带岛屿的约束数据域 TIN 剖分算法、基于最小内角动态判定的简单多边形三角剖分方法等相关算法。

(5) 针对复杂地质体建模,对基于等高线并具有断层结构的复杂地质体层面 TIN 建模方法进行了介绍和讨论,对基于多轮廓线的复杂地质体建模方法进行了研究和扩展。

(6) 对构建三维虚拟战场环境中的三维建模技术进行了较为系统阐述,包括地形建模技术、地物地貌建模技术、特殊效果生成技术以及三维军标设计与建模等。

由于时间仓促,水平有限,本书难免存在疏漏或不妥之处,欢迎读者批评指正。

作者

2011 年 8 月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 三维 GIS 研究现状	2
1.2.1 三维 GIS 特点与功能	2
1.2.2 三维 GIS 软件与应用需求	2
1.2.3 三维 GIS 发展的需要解决的问题	4
1.3 三维空间数据建模研究意义	4
1.3.1 地矿三维建模研究意义	4
1.3.2 三维虚拟战场研究意义	6
1.4 本书内容与章节安排	7
参考文献	9
第 2 章 三维 GIS 空间数据模型研究综述	10
2.1 GIS 空间数据模型	10
2.1.1 数据模型	10
2.1.2 空间数据模型	10
2.1.3 空间数据结构	14
2.2 三维空间数据模型研究现状与分析	15
2.2.1 三维空间数据模型回顾	15
2.2.2 基于面表示的模型	17
2.2.3 基于体表示的模型	22
2.2.4 基于混合表示的模型	26
2.2.5 三维空间数据模型分析	29
2.3 建立三维空间数据模型应考虑的因素	34
参考文献	34
第 3 章 三维建模现象及其描述方法	37
3.1 三维建模现象	37
3.1.1 地表三维现象与描述方法	37
3.1.2 三维自然地质现象与描述方法	38
3.1.3 地下勘探工程现象与描述方法	41
3.2 三维建模对象几何与空间维特征分析	42
3.3 地质信息特征来源与表达	43
3.3.1 地质信息及其特征	43

3.3.2	地质信息来源分类	44
3.3.3	地质信息的表示形式	46
3.3.4	地质信息的图形表达	47
3.4	空间信息的获取与数据处理	48
3.4.1	地表三维空间信息获取方法	48
3.4.2	三维地质体空间信息的获取方法	50
3.4.3	测井资料解释与分析	51
3.4.4	钻孔测斜资料计算	52
3.4.5	从二维地质图件上获取地质体三维信息	53
	参考文献	54
第4章	三维空间数据模型框架	56
4.1	三维空间建模基础	56
4.1.1	面向对象的概念	56
4.1.2	空间拓扑关系	57
4.1.3	离散模型概念	58
4.2	矢量与栅格集成的空间数据模型总体框架	61
4.2.1	栅格数据结构建模描述	61
4.2.2	矢量数据结构建模描述	61
4.2.3	空间数据模型总体框架	62
4.2.4	空间数据模型分类体系	63
4.3	地矿三维空间数据模型	64
4.3.1	基于似三棱柱体三维数据模型	65
4.3.2	基于混合体元的三维空间数据模型	66
4.3.3	基于多层 DEM 与 QTPV 混合数据模型	68
4.4	地矿三维空间数据模型逻辑结构设计实例	69
4.4.1	逻辑数据结构设计	70
4.4.2	实例描述	74
	参考文献	77
第5章	似三棱柱体三维数据建模及算法	78
5.1	引言	78
5.2	基于似三棱柱体的三维数据模型	78
5.2.1	似三棱柱体元定义	78
5.2.2	基于似三棱柱体元数据模型	79
5.2.3	模型拓扑关系描述	81
5.2.4	模型数据结构设计	82
5.3	地层和地勘工程似三棱柱体建模思路和算法	85
5.3.1	基于原始采样点地层建模方法	85
5.3.2	地层似三棱柱体建模特殊问题处理	86
5.3.3	基于地层界面插值点的建模方法	90

5.3.4	地勘工程对象似三棱柱体建模	94
5.4	似三棱柱体模型操作算法设计	94
5.4.1	模型切割算法设计	94
5.4.2	似三棱柱体体元的四面体剖分	97
5.4.3	地质体表面模型的提取	100
5.5	似三棱柱体模型建模效益分析	101
5.6	基于似三棱柱三维地质体建模与可视化系统	103
5.6.1	实验系统功能	103
5.6.2	实验数据与结果	104
	参考文献	107
第6章	基于多层 DEM 三维地层模型与相关算法	109
6.1	引言	109
6.2	基于多层 DEM 的三维模型与建模流程	110
6.2.1	基于多层 DEM 的三维地层模型	110
6.2.2	基于多层 DEM 的地层建模过程	113
6.3	地层层面数据空间插值	115
6.4	地层层面构建方法	116
6.4.1	TIN 概述	116
6.4.2	格网索引	118
6.4.3	无约束数据的地层层面 TIN 构建方法	120
6.4.4	带约束数据的地层层面 TIN 构建方法	120
6.4.5	算法效益	122
6.5	三维地层模型构建与操作方法	123
6.5.1	基于最短对角线方法的表面建模	123
6.5.2	地层层面缝合成体	125
6.5.3	地层模型的剖切处理	125
6.5.4	基于多层 DEM 与 QTPV 混合模型建模方法	126
6.6	地层模型的相关算法研究	127
6.6.1	模型拼合算法	127
6.6.2	简单多边形三角剖分方法	129
6.6.3	带岛屿的约束数据域的 TIN 剖分算法	131
6.7	基于多层 DEM 的三维地层建模与可视化系统	134
6.7.1	系统功能及实验效果图	134
6.7.2	算法实例	135
	参考文献	138
第7章	复杂地质体建模方法	141
7.1	复杂地质体 TIN 建模方法	141
7.1.1	断层的处理	141
7.1.2	含逆断层的复杂断层界面的局部分区	143

7.1.3	煤层底板 TIN 模型的建立	145
7.2	基于多轮廓线的复杂地质体建模方法	149
7.2.1	简单轮廓线之间的三维地质体重构	150
7.2.2	多轮廓线之间的三维地质体重构	154
7.2.3	实验系统设计与实现	157
	参考文献	160
第 8 章	三维虚拟战场及建模技术	162
8.1	引言	162
8.2	地形建模技术	164
8.2.1	地形仿真建模	164
8.2.2	真实数据地形建模	165
8.2.3	基于 LOD 的三维地形简化技术	166
8.2.4	三维虚拟战场场景管理	172
8.3	地物地貌建模技术	175
8.3.1	地物地貌建模方式	175
8.3.2	地物地貌建模方法	175
8.3.3	地物地貌对象嵌入技术	177
8.4	特殊效果生成技术	177
8.4.1	基于粒子系统的特殊效果生成	177
8.4.2	战场环境声音仿真	183
8.5	三维军标设计与建模	184
8.5.1	三维军标符号及分类	184
8.5.2	三维军标建模	185
8.5.3	军标符号的表达	186
	参考文献	187

第 1 章 绪 论

1.1 引 言

地理信息系统 (Geographic Information System, GIS) 是一种专门用于采集、存储、管理、分析和表达空间数据的信息系统^[1]。它是一门集地球科学、空间科学、环境科学、地理学、信息学和自动制图技术等最新成就的新兴边缘学科。自 20 世纪 60 年代 GIS 出现以来, GIS 得到了非常迅猛的发展, 它与遥感技术一起成为地球空间信息技术的核心内容。地球空间信息技术被看成是继生物技术和纳米技术之后发展最为迅速的三大新技术, GIS 技术已成为空间数据处理、集成和可视化最成功的技术之一, 作为地球空间信息处理的有效工具极大地推动了地球空间信息技术在各个领域的应用^[2]。GIS 为人们提供了采集、存储、管理和分析空间信息的有效工具, 已经深入到测绘、城市、交通、规划、土地管理、地质、矿山、环境保护、电力、通信、商业、银行、公安、工农业生产布局、军事等诸多与国计民生密切相关的领域, 并在其中发挥着越来越重大的作用。GIS 脱胎于地图, 它是从计算机地图制图演进而来的, 以至于目前大多数商业 GIS 软件都采用二维数据来描述空间对象, 即所谓的二维 GIS 或 2.5 维 GIS。尽管二维 GIS 发展已经比较成熟, 能帮助人们解决各自学科研究与工程领域的许多问题, 但由于它在描述三维空间对象时作了种种假设和限制, 将空间对象的三维坐标投影到二维平面上来处理, 这将导致它在描述真三维空间现象上的不足, 限制了它的应用范围, 克服这一缺陷的最有效的办法是研究开发具有描述真三维空间现象能力的三维 GIS 软件。随着计算机技术和数据获取技术的迅速发展, 具有处理真三维数据能力的三维 GIS 的发展受到了极大的关注。三维 GIS 在日益增长的三维空间信息需求的牵引和蓬勃发展的现代新兴技术的驱动下得到了稳步发展。首先诸如城市、海洋、大气、地下工程和军事等重大领域问题的完整解决和空间信息的社会化应用服务迫切需要三维 GIS 技术的支持; 其次三维空间数据获取技术的发展极大地方便了各种规模不同细节程度的三维空间数据的可得性; 另外信息通信技术的进步为更有效地处理和利用海量三维空间数据提供了强有力的支撑。严格来讲, 三维 GIS 也应该和二维 GIS 一样, 具有对空间数据进行获取、建模、组织、存储、管理、操作、分析和表现的功能, 但由于三维空间数据描述的复杂性, 使得大多数与三维 GIS 有关的研究成果都还立足于特定的有限领域, 而且都还是分散的、不全面的。目前, 三维 GIS 的应用功能还主要局限于三维可视化与逼真的视觉表达方面, 而重要的三维分析和操作功能还很有限, 以至于目前市场上还没有像传统的二维 GIS 软件一样得到公认的、可以满足大多数需要的、成熟的商品化三维 GIS 软件^[3]。研究开发三维 GIS 软件仍处于探索与实验阶段, 还有许多问题需要解决, 理论上主要表现在三维空间数据模型和数据结构、三维数据获取方法、大容量数据的存储和管理、三维空间对象建模和分析及三维可视化技术。其中三维数据模型与数据结构是三

维 GIS 的核心,三维 GIS 各种功能的发挥直接取决于其三维数据模型的选取。如何从采集到的三维数据或根据传统的二维数据构建空间实体的三维模型是三维 GIS 研究的关键之一。不同的研究领域,空间对象在其形态、数据获取方法和应用目的等方面存在较大差异,因此根据不同的专题领域针对性开展三维空间数据模型与建模方法研究是目前常用的研究模式,具有十分重要的意义。

1.2 三维 GIS 研究现状

1.2.1 三维 GIS 特点与功能

三维 GIS 是指能对空间地理现象进行真三维描述和分析的 GIS 系统,是布满整个三维空间的 GIS。其研究对象是通过空间 x,y,z 轴进行定义,每一组 (x,y,z) 值表示一个空间位置,而不是二维 GIS 中的每一组 (x,y) 值表示一个空间位置。可以认为,二维 GIS 是三维 GIS 在空间上的简化,三维 GIS 是 GIS 在空间上的延伸。三维 GIS 的要求与二维 GIS 相似,但在数据采集、数据模型、空间操作及分析算法、系统维护、界面设计等诸多方面要比二维 GIS 复杂得多。从二维 GIS 到三维 GIS,尽管只增加了一个空间维数,但它可以包容几乎所有的空间信息,突破常规二维表达的约束,为更好地观测和理解现实世界提供了多种选择。

在三维 GIS 中,空间目标通过三维坐标定义空间对象,空间关系复杂程度更高;三维 GIS 的可视表现不再是静止的二维地图符号表示,它比二维 GIS 复杂得多,以致于需要借助专门的三维可视化理论、算法来解决。借助于三维可视化功能,三维 GIS 对客观世界的表达能给人以更真实的感受,它以立体造型技术给用户展现地理空间现象,不仅能够表达空间对象间的平面关系,而且能描述和表达它们之间的垂向关系。对空间对象进行三维空间分析和操作也是三维 GIS 特有的功能。而与 CAD 及各种科学计算可视化软件相比,它具有独特的管理复杂空间对象能力及空间分析的能力。三维空间数据库是三维 GIS 的核心,三维空间分析则是其独有的能力。与功能增强相对应的是,三维 GIS 的理论研究和系统建设工作比二维 GIS 也更加复杂。

三维 GIS 除了具备二维 GIS 的传统功能以外,还应该具有如下功能:①能够同时管理三维空间中的零维到三维的空间对象;②以三维可视化形式表现 2.5 维、三维对象。③借助三维空间数据库技术来管理空间信息;④基于三维的空间分析功能,并包容二维 GIS 的空间分析功能;⑤多数据源包容与集成功能。

1.2.2 三维 GIS 软件与应用需求

由于三维 GIS 的复杂性,目前国际国内还没有一个成熟完整的三维 GIS 系统,与三维 GIS 相关的系统大多集中在三维可视化方面。有些二维 GIS 软件在原有基础上增加了三维功能,使其能够表达现实世界中的三维对象。但真正成熟的三维 GIS 商业化软件还很难从市场上得到。针对迅速增长的三维应用需求,越来越多的 GIS 软件都在强化其稳定的三维能力。三维可视化软件主要集中在两个方面:一是三维地形与三维城市可视化软件;二是三维地学模拟软件。在三维地形与城市可视化软件方面,国内外已经有了比较成

熟的研究成果,比较典型的有 ESRI 的 ArcView 3D Analyst,它提供了对全球多分辨率数据进行三维无缝可视化以及基本的空间查询和表面分析的能力;MultiGen 公司在 ArcView 系统基础上进行扩展所开发的 SiteBuild3D™;GEONOVA 公司的 DILAS,支持多节点层次的三维建模,基于 Oracle 对象关系数据库的数据管理与存储,和基于 Web 网络的地质信息服务;ERDAS 公司的 IMAGING Virtual GIS 软件,是一个三维可视化工具,可以使用户在真实的虚拟环境中进行交互操作,进行纹理属性等信息查询;瑞士 ETH Zurich 大学开发的 Cyber - City GIS 软件是一套基于摄影测量数据进行三维立体重建的软件,能够进行数字城市的三维模型重建和数据管理;MultiGen - Paradigm 公司的 MultiGenCreator,它是一个重要的实时三维城市建模软件系统;适普软件公司开发的三维可视软件 IMAGIS;吉奥信息工程技术有限公司研制的数码城市地理信息系统(CCGIS);北京灵图软件技术有限公司开发的三维地理信息系统软件系列产品 VRMap;等等。在三维地质模拟软件方面,国内外的大学、公司和研究机构结合地质勘探与矿山开采需要开发一些具有三维地质建模与可视化功能的软件系统,比较有影响的有:加拿大 Kirkham Geosystems 公司的 MicroLYNX + ;美国 C Tech 开发公司的 EVS;法国 Nancy 大学的 GoCAD;Geo Visual System Limited 为石油工业提供的三维建模和可视化软件,如 GEOcard;GeoQuest 公司推出的有关地质模型可视化软件 Framework3D, Proper3D 和 FloGridSAND;澳大利亚 Micromine 有限公司开发的勘探及开发工作中应用的软件系统 MicroMine;美国地质调查局的 Modflow 建模软件;澳大利亚 Encom 公司的 ModelVision、澳大利亚 Maptek 公司的 Vulcan;中国地质大学的 GeoView;中国矿业大学的 GeoMo3D;北京理正设计研究所理正地质软件;东方泰坦科技有限公司研制的 TitanT3M 三维建模软件;等等。从介绍上述有关软件的资料分析可以看出,现在开发的三维产品主要集中在地形表达和三维可视化方面,由于不是基于真三维数据表达,一些基于真三维的分析功能难以实现,所以并不是真三维 GIS。

三维 GIS 系统的应用十分的广泛,尤其在城市、地质、海洋、军事、通信、水利、电力等领域应用更为明显和迫切,具有较大的需求。

在城市领域,三维 GIS 应用最为广泛,尤其在城市规划、道路交通、物业管理、数字社区等方面的应用比较突出。在规划领域,三维 GIS 可以模拟建筑物的重建和拆迁、道路的扩建、城市或小区的远景规划、现有的景观分析以及城市污染现象的模拟等,从而可以了解到某一建筑物或小区景观的过去、现在和未来。在三维城市模型中用户可以选定一定的路线模拟飞机飞行或汽车行使效果,或完全由用户通过鼠标或操纵杆进行操纵在三维场景中进行任意漫游。在物业管理领域,利用三维城市模型可以模拟该小区的三维景观从而建立数字式的小区,对于小区的建筑物的销售和售后服务进行管理,大大降低人力物力和财力的消耗,与通信相结合可以建立智能化的小区。

在地质领域,三维 GIS 系统可以用于地下矿体、地质结构的三维表现和分析,对于地下的几何形体的三维表达可以使用三维的数据模型予以描述。与二维 GIS 中的二维表达相比,三维 GIS 中的表达更加直观、真实。目前,三维 GIS 系统在该领域内的应用大部分停留在地下不规则矿体、坑道、岩层等几何形体的三维几何表达方面,基于真三维结构的三维分析还有待于进一步的探讨和研究。

在海洋领域,三维 GIS 系统可以用于海底地形的三维表达、海水温度场模型的建立,通过海水温度场三维模型的建立,可以模拟和三维表现不同深度的海水的属性描述。在

水利领域,三维 GIS 可以建立和模拟洪水模型,与数字地面模型相结合,可以用于水利设施的规划、洪水的模拟、淹没面积的计算等。与原来的二维 GIS 中用单纯文字和图表的描述相比,三维 GIS 的描述和表达更加直观和简洁。

在军事领域,未来的战争将是数字化战争,数字化战场是其中的关键。数字化战场以三维 GIS 为基础,以战场通信系统为支撑,实现信息收集、传输、处理自动化,网络一体化的信息化战场。敌我双方的各种战争信息通过三维地理坐标定位和整合,包括自然、地理、社会、经济、军事等方面,通过直观的方式显示出来,并随着战场的变化而动态显示,从而为各级作战指挥在战前演练、战场指挥、战后评估提供一种全新的高技术手段。

在移动通信领域,利用三维 GIS 中的三维城市模型可以用有效地对无线电发射塔的最佳选址进行分析,减少或消除移动通信领域盲点或盲区的存在。此外,利用重建的三维城市模型可以建立三维的电子地图,与 GPS 相结合建立三维的导航系统,比现有的建立在二维电子地图上的导航系统更具有直观性和现实意义。

1.2.3 三维 GIS 发展的需要解决的问题

三维 GIS 系统与二维 GIS 相比,无论从描述空间对象的复杂程度、要实现的功能、还是所要进行的空间分析、可视化表达等方面都远比二维 GIS 要复杂得多。发展三维 GIS 尽管可以借鉴二维 GIS 方面的很多理论、技术和经验,在生物、医学、地质、大气等领域已有很多成功的三维可视化技术可以引用,但由于三维 GIS 涉及的专业领域很广,它还有很多问题需要解决。国内外学者对此有比较一致的观点。肖乐斌等认为三维 GIS 面临的主要问题包括四个方面:三维数据实时廉价获取、大数据量的存储与快速处理、完整的三维空间数据模型与数据结构、三维空间分析方法的开发^[4]。发展三维 GIS 需要解决的技术问题包括:①三维数据模型与数据结构技术,②三维空间关系与空间索引技术,③三维 GIS 数据获取技术,④三维 GIS 数据管理技术,⑤三维 GIS 数据可视化技术,⑥三维 GIS 数据分析技术,⑦三维 GIS 软件开发等。上述问题和技术是研究开发三维 GIS 必不可少的,其中三维数据模型、三维分析、三维可视化是三维 GIS 的三大关键技术。在这三大技术中,三维空间数据模型和数据结构理论与方法是三维 GIS 研究的核心技术,它是三维 GIS 能否成功的关键。

1.3 三维空间数据建模研究意义

1.3.1 地矿三维建模研究意义

能源危机的加剧和人类人口的急剧膨胀,使得世界各国都十分重视能源的勘探与开采工作,都在利用各种近代的高科技勘探手段,包括地质、地球物理、地球化学和遥感等,研究勘探区的地质结构,以期发现更多的可利用矿床。随着对地球勘探工作研究的不断深入,人们已经拥有大量的有关地球表面、地球内部(地下)的地质信息,例如运用现代化地质、地球物理综合研究手段获得的研究区地质构造信息,通过遥感、野外地质观测等获得的地形地貌信息,通过二维和三维地震、测井、取芯化验等获得的地下地质体的几何、物

性信息等,地质勘探信息的数量和复杂性已经远远超出地质学家认识和应用它们的能力^[5]。地理信息系统技术发展与应用领域的不断扩展,为地质学家管理和处理复杂的地质信息提供了有效的技术手段。为了能够从三维角度研究地质构造与矿体的空间分布,地质学家非常渴望能够利用各种地质信息建立三维空间地质模型,利用可视化手段再现三维地质体,以便能够真实地重建地下各类空间对象的结构,描述各种资源的空间分布,模拟各类矿产资源在开发过程中的各种参数变化趋势,分析地质现象的几何形态、相互关系及分布。在地质矿产资源勘探与开采领域,地矿三维 GIS 的作用是非常明显的,可以说它贯穿于地质普查、详查勘探、矿山开发与管理等整个过程^[6]。显然为地质研究工作者研究开发基于三维空间数据的地矿三维 GIS,必将为地质研究、矿产普查与勘探、矿山开采与管理等工作带来前所未有的技术革命,有效提高地质勘探信息的管理水平,大大提高地质学家的劳动生产率、减轻工作强度,有利于地质问题的研究和分析的进一步深入,有利于更准确地进行矿产资源的决策规划,减少矿产资源勘探风险,将产生巨大的社会和经济效益。

从实际应用角度来看,采用三维空间数据模型所建立起来的地质模型可以有效地为地矿行业解决 5 个方面的技术问题。①改善地质体三维可视化。研究人员采取改变视点、光照、透明度、质材等参数,可以非常直观地显示地质体的空间形态与分布,从而避免不同专业背景的地质工作者由于空间想象能力、理解能力和工作经验的差异造成对同一地质现象的不同理解,减轻地质工作者的劳动强度。②有效进行地质模型的剖切,方便地质工作者清楚理解地质模型内部的各个细节,提供有价值的各种图件,如栅栏图、水平地质图等。③方便地进行钻孔轨迹设计,了解分析钻孔轨迹钻遇的地质目标和钻遇的地质界面的位置。④矿体体积与储量精确计算,根据地质体三维模型可以采用立体几何计算公式对地质体的体积与储量进行精确计算。⑤各种等值线图的自动生成,例如剖面上矿体品位分布等值线图。

在地勘工程研究领域,地质体三维模拟面临三大困难:①三维空间数据获取的艰难性,三维复杂地质对象建模与可视化主要依赖于原始输入数据,然而,稀疏的不充足采样数据、缺乏解释的地震剖面数据以及源于遥感的模糊性数据等,使模型的建立十分困难,也往往导致无法准确地描述地质体空间属性的变化特征。②地质体空间关系的复杂性。断层将地层切割成不连续的空间分布、岩石内的岩性变化复杂、时间和地质过程的动态本质等,使地质体及其空间关系变得异常复杂,由于地质体包含如逆断层、倒转、褶皱等多值面的地质现象,增加了数据结构、拓扑关系及相应算法的复杂程度,至今仍然缺乏成熟的解决方案。另外,长期的地质勘探研究工作积累了包含许多地质对象的庞大而复杂的空间模型,对于这种模型,难以确定地质对象之间空间、时间和结构上的相互关系,并保持它们的一致性。③空间分析能力的局限性。地质现象中存在的复杂性、不连续性及不确定性等客观因素以及三维地质建模的应用目的各异等主观因素,使三维模型的建立缺乏统一而完备的理论技术,导致现有系统缺乏空间分析能力^[7]。解决这三大困难的关键是研究合理的三维空间数据模型、高效的建模方法以及方便的模型操作算法,同时需要解决三维可视化问题。

地矿三维 GIS 能否有效模拟三维地质体,关键取决于三维空间数据模型,不同的数据模型对 GIS 的功能有很大影响。在过去的几十年来,国内外学者围绕三维地质模拟为研

究目的,对三维空间数据模型进行了较为深入的研究,并根据不同的地质现象研究了不同的地质建模方法,提出了许多各具特色的三维空间数据模型(在第2章进行较为详细地分析综述)。但所研究的三维数据模型大多是单个的、基于某些特定假设的、非真三维的,拓扑关系比较有限,制约了模型的应用和地矿三维GIS功能的发挥。从几何特征角度来看,三维空间数据模型可以归纳为基于面表示的模型、基于体表示的模型和基于混合表示的模型(或集成式)数据模型三大类。从数据描述格式来看,又可分为矢量、栅格(Raster)和矢量与栅格集成三种。由于现实世界的复杂性和应用领域的特殊性,对三维空间数据模型的研究很难得到一个通用的三维数据模型。目前学术界的一致观点是,不强求通用模型,而是针对不同的研究领域和应用目的针对性地开展研究,并主张采取混合数据模型的形式开展研究。

结合地质勘探与矿山采研究领域开展地矿三维空间数据建模与相关算法的研究具有十分重要的意义,主要表现在以下四个方面:①三维GIS理论研究还远不够成熟,需要从各种专业领域开展研究以期不断完善三维空间数据建模理论。地矿三维GIS是三维GIS的一个重要的应用领域,结合该领域针对性开展三维数据模型的研究将有利于推动三维空间数据模型理论与应用的发展,所以从理论研究角度来看也具有研究意义。②地矿三维空间对象远比地表三维对象复杂,数据的可获得性也比较特殊,在这样一个特殊条件下开展三维数据模型的研究更具有挑战性和实际意义,它将为地质勘探行业科学工作者提供更直观、更有效的、更可靠的研究手段,充实三维数据模型与相关算法。③三维数据模型是三维分析与可视化的基础,要想开发功能好的三维分析工具和可视化模块,必须首先解决三维数据模型问题。④地矿三维GIS是“数字地质”、“数字矿山”的重要组成部分,“数字矿山”与“数字地质”的建设将是使传统地质勘探与矿山行业走出困境,走可持续发展之路的有力技术支撑。

1.3.2 三维虚拟战场研究意义

20世纪90年代初,美国率先将虚拟现实技术用于军事领域,随着科学技术的发展,虚拟现实技术已经渗透进了军事生活的各个方面,并开始在军事领域中发挥越来越大的作用。世界各国都将虚拟现实技术在军事领域的应用列为高度军事机密。目前,虚拟现实技术在军事领域的应用主要集中在虚拟战场环境、军事训练和武器装备的研制。

在数字化战场环境中,敌我双方的各种战争信息(包括自然、地理、社会、经济、军事等方面)通过三维地理坐标定位和整合,采用三维直观的方式显示出来,并随着战场的变化而动态显示,从而为各级作战指挥在战前演练、战场指挥、战后评估提供一种全新的高技术手段。数字化战场环境是一个虚拟战场环境,它是一个基于三维数据模型、三维模拟的一个数字化平台。需要解决一系列的三维空间建模问题,除包含常规的三维地形(地理环境)建模技术外,还包括战场环境中各种地物地貌的建模、作战实体建模、战场环境各种特效效果的建模,以及战场态势信息的建模等。

在现代信息化战争中,将三维虚拟战场环境应用到作战指挥控制系统中,基于这个环境,战场变化过程、战场态势发展、双方兵力对抗过程等均被可视化,这足以增强指挥控制系统的真实感以及作战指挥人员的浸入性和交互性,从而大大提高指挥自动化系统的实

用性。例如,在虚拟战场环境中,军事指挥员除看到三维地形模型之外,还可以看到在空中飞行的直升机和导弹,在水面和水下游弋的舰艇,可以看到坦克行进时后面扬起的尘土和被击中坦克的燃烧浓烟,可以听到飞机或坦克的隆隆声由远而近,从声音来辨别目标的来向和速度等场景。这些效果使指挥员有一种身临实际战场的感觉,可大大提高军事训练的质量。

在军事训练,尤其是诸军兵种联合战役训练中,战场态势信息尤其重要,一个能够融合战场态势信息的三维虚拟战场环境的应用可以使诸军兵种在联合战役训练中做到不动一枪、一弹、一车的情况下,对一定区域或全区域所属的诸军兵种进行适时协调一致地训练。通过训练能够很好地发现协同作战行动中的问题,提高各军兵种的协同作战能力,并能够对诸军兵种联合训练的原则、方法进行补充和校正。所以,一个包含战场态势信息的三维虚拟战场环境的研究是十分必要和迫切的,它在战场的指挥决断和新战术、战法的演习验证中都将发挥重要的作用。因此,在军事领域,开展基于三维虚拟战场环境建模技术的研究具有重要的学术意义和使用价值。

1.4 本书内容与章节安排

本书以地质勘探、矿山开采工程以及三维虚拟战场环境中各种三维现象为研究对象,采取混合数据模型的方法对地矿三维空间数据模型、数据结构、建模方法及模型操作算法等方面进行研究,以形成一个较为完整的理论与方法体系,为地矿三维 GIS、虚拟战场等三维 GIS 应用服务。具体的研究内容如下:

(1) 在第 2 章,对三维空间数据模型的研究现状进行了回顾与分析。阐述了 GIS 空间数据模型的相关概念和术语。从几何特征角度和数据描述格式两个方面对典型的三维空间数据模型进行了分类。以比较表的形式从模型体元或基本特征、模型的优缺点、适应情况四个方面对各种三维空间数据模型进行了分析比较。指出研究或设计三维空间数据模型应考虑四个方面的因素:数据来源与特征、建模对象的类型与形态、模型应用目的以及对模型的操作。得出发展混和数据结构或将几种不同的数据结构结合起来是未来三维数据模型研究的方向的结论。

(2) 在第 3 章,对三维空间现象及其描述方法、表达形式与数据获取方法进行分析与讨论。讨论了地表、地下及虚拟战场中涉及的各种三维空间现象。空间建模对象从几何特征的复杂程度看,可以分为点对象、线对象、面对象和体对象,而从空间维角度来看,可以分为零维、一维、二维、三维、多维对象。地表三维建模现象采用基础地理信息的表达形式,主要包括数字线划地图、数字高程模型、数字正射影像图以及数字栅格地图;而地下三维建模现象的表达形式则多样化,主要有遥感图像、地质图、地形地质图、钻孔柱状图、勘探线剖面图、勘探工程综合平面图、矿体等高线图。介绍了三维空间信息获取方法,包括传统的地面测量方法、二维数据转换方法、摄影测量与遥感方法、LiDAR 测量方法、钻孔测斜资料直接计算、二维图件数字化等,并详细阐述了对后两者的计算方法与公式。

(3) 在第 4 章,研究矢量与栅格集成的空间数据模型总体框架、分类体系。阐述了建立三维空间数据模型的三个基本概念:面向对象的概念、空间拓扑关系、离散模型概念。

提出了矢量与栅格集成的空间数据模型总体框架概念,它是空间数据模型形式化表示,空间数据模型总体框架是各种空间数据模型的并集,而实际应用中一个具体的空间数据模型是它的一个子集。以地矿三维空间数据模型为研究目的,研究了基于似三棱柱体元的面向对象概念数据模型、基于混合体元数据模型以及基于多层 DEMs 与 QTPV 混合数据模型概念,并用统一建模语言对它们进行了概念设计。以实例形式研究了地矿三维空间数据模型,采用矢量与栅格集成的面向对象数据模型来进行描述;并以复杂体—体—面—线—点对象之间的逻辑关系建立模型内各对象之间的拓扑关系,设计了 13 个空间对象的逻辑数据结构来实现它们之间存在的 10 种拓扑关系。

(4) 在第 5 章,对基于似三棱柱体元三维空间数据模型及其相关算法研究。分析三棱柱体基本结构的基础,给出了三棱柱体的描述方法与几何约束条件,提出似三棱柱体的定义并讨论了其四种特例。研究似三棱柱体逻辑模型,设计了与 6 个似三棱柱体基本元素对应的 6 个拓扑关系表,采用面向对象方法中类的形式对各模型的几何元素和部分实体对象设计了相应的数据结构。研究基于原始采样点和基于地层界面插值点两种地层建模方法,对地层似三棱柱体建模过程中出现的特殊问题提出了合理的处理方案;分析讨论了地勘工程对象似三棱柱体建模思路。研究任意无限伸展平面切割似三棱柱体的模型时形成剖面图的思路与实现过程,讨论了似三棱柱体元四面体剖分码的组成方案、实现算法。采取对比分析的方法对似三棱柱体模型建模效益进行了分析,该模型除节省存储空间外,还具有精确描述实体内部结构、建模过程与结果唯一、实现面模型与体模型的转换以及地表与地下的统一建模的特点。

(5) 在第 6 章,对基于多层 DEM 三维地层数据模型及相关算法研究。采用统一建模语言描述了基于多层 DEM 三维数据模型的概念模型,提出了“钻孔—分层面片建模方法”,制定了三维地层模型构建流程。为提高地层界面 TIN 的构建速度和质量,研究了基于格网索引的带约束数据的地层层面 TIN 构建方法。针对地表工程和地下开挖、掘进工程设计的应用需求,研究了 TIN 模型拼合算法。为解决模型切割形成平面多边形的可视化问题,研究了基于最小内角动态判定的简单多边形三角剖分方法。针对地层模型剖切时剖面图上出现具有属性的带岛屿的约束数据域情形,提出了具有属性的带岛屿的约束数据域的 TIN 剖分算法,并采取岛屿内部构网、岛屿外部构网的分步策略,有效地解决了剖面图可视化问题。对复杂地质体表面在垂直方向出现重叠压盖时 TIN 构建算法设计复杂情况,研究了两轮廓线之间构建系列三角形面片的最短对角线方法。

(6) 在第 7 章,对复杂地质体建模方法研究。以基于等高线并具有断层结构的复杂地质体层面建模方法为例,对复杂地质体 TIN 建模方法进行了详细介绍,主要包括断层处理方法的分类、复杂断层界面的局部分区方法、煤层底板 TIN 模型的建立过程及相关算法。对基于多轮廓线的复杂地质体建模方法进行了研究和扩展。分析了简单及复杂轮廓线之间进行三维地质体重构理论与方法,研究了多轮廓线情况下空洞区域处理方法,有效提高建模质量。

(7) 在第 8 章,对构建三维虚拟战场环境中的各类三维对象及特效效果的三维建模技术进行了系统介绍。主要包括三维地形建模技术与基于 LOD 的三维地形简化算法、地物地貌建模技术与方法、基于粒子系统的特殊效果生成技术与算法,以及三维军标设计与建模方法等。

参 考 文 献

- [1] 陈述彭. 地理信息系统导论. 北京:科学出版社,1999.
- [2] 朱庆,林晖. 数码城市地理信息系统. 武汉:武汉大学出版社,2004.
- [3] Zlatanova S, Rahman A, Pilout M. 3D GIS: Current Status and Perspective. Proceeding of Joint International Symposium on Geospatial Theory, Processing and Application, 2002, July 8 - 12, Ottawa, Canada.
- [4] 肖乐斌,钟耳顺,刘纪远,等. 三维 GIS 基本问题探讨. 中国图象图形学报, 2001, 6A(9):842 - 848.
- [5] Jack R L. Rising to challenge; the role of the information sciences. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 1993,59(6):957 - 959.
- [6] 吴健生. 地质体三维可视化及其空间数据探索[D]. 北京:中国科学院地理科学与资源研究所,2001.
- [7] 武强,徐华. 三维地质建模与可视化方法研究. 中国科学 D 辑(地球科学), 2004, 34(1):54 - 60.
- [8] 程朋根. 地矿三维空间数据模型及相关算法研究[D]. 武汉:武汉大学,2005.
- [9] 陈健. 三维地层空间信息系统结合三维有限元的研究与实现[D]. 武汉:武汉岩土所,2001.
- [10] 李德仁. 当前国际 GIS 的研究和应用现状. RS, GIS, GPS 的集成与应用. 测绘出版社,1995.
- [11] 龚健雅,程朋根. 三维空间数据模型分析与研究[C]. 中国 GIS 协会理论与方法研讨会论文集. 北京:2004. 10: 1 - 11.
- [12] 侯恩科,吴立新. 三维地质模拟几个方面的研究现状与发展趋势. 煤田地质与勘探, 2000, 28(6):5 - 7.
- [13] 李德仁. 关于地理信息理论的若干思考. 武汉测绘科技大学学报, 1997, 22(2):93 - 95.
- [14] 李青元,林宗坚,等. 真三维 GIS 技术研究的现状与发展. 测绘科学, 2000, 25(2): 47 - 51.
- [15] 吴立新,张瑞新,等. 三维地质模拟与虚拟矿山系统. 测绘学报, 2002, 31(1): 28 - 33.
- [16] Mark Jessel. Three - dimensional geological modeling of potential - field data. <http://www.earth.monash.edu.au/~mark/strgps/>, 2003. 04. 04.
- [17] Robert Hack, Edmund Side. Three - Dimensional GIS:Recent Developments. ITC Journal,1994, (1):64 - 72.
- [18] Simon Cox, Dave Watson, et al. 3D Complex Geology Modelling. <http://www.agrc.csiro.au/publications/conferences/Ballarat97/talks/>,2003. 4. 2
- [19] 朱庆. 三维地理信息系统技术综述. 地理信息世界, 2004, 2(3):8 - 12.
- [20] 王家耀. 军事地理信息系统. 北京:解放军出版社,1998.
- [21] 王林旭. 虚拟战场中特殊效果生成和实体模型简化技术研究[D]. 长沙:国防科学技术大学,2002.
- [22] 刘扬,李京,秦明,等. 虚拟战场环境三维可视化的关键技术研究. 四川大学学报(工程科学版),2007,39(增刊):110 - 113.
- [23] 董志明. 战场环境仿真. 北京:国防工业出版社,2005.
- [24] 王家耀. 军事地理信息系统(MGIS)在现代化战争中的作用及其发展. 信息工程大学学报,2000,1(4): 23 - 25.
- [25] 张跃鹏. 战术军事地理信息系统数据模型分析. 测绘学院学报,2000,17(1):63 - 66.
- [26] 李景荣,施晓红,华祖耀. 虚拟战场环境三维仿真系统的设计与实现. 计算机时代,2008,(10):32 - 34.
- [27] Michael R F, Michael R. Electronic warfare for the digitalized battle field. Artech house, 2001.