



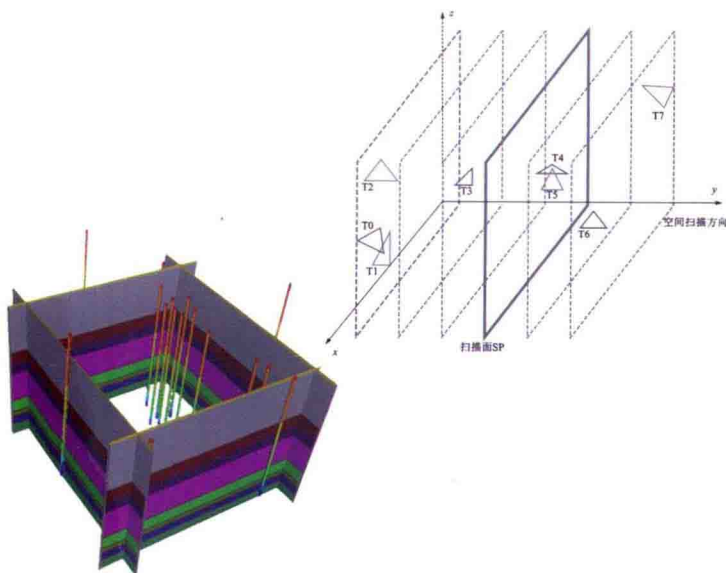
学 | 术 | 专 | 著

三维地质建模 方法与应用

SANWEI DIZHI JIANMO
FANGFA YU YINGYONG

王永志 王 慧 廖丽霞 陈建忠 赵春环

著



中南大学出版社
www.csupress.com.cn

国家自然科学基金(41361078)

江西理工大学

出版资助

江苏金沙信息技术有限公司

三维地质建模方法与应用

王永志 王 慧 廖丽霞 陈建忠 赵春环 著



中南大学出版社
www.csupress.com.cn

·长沙·

图书在版编目 (C I P) 数据

三维地质建模方法与应用 / 王永志等著. -- 长沙:
中南大学出版社, 2018. 1
ISBN 978 - 7 - 5487 - 3136 - 8

I. ①三… II. ①王… III. ①三维—地质模型—建立
模型—研究 IV. ①P628

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 017824 号

三维地质建模方法与应用

王永志 王 慧 廖丽霞 陈建忠 赵春环 著

☐责任编辑 韩 雪

☐责任印制 易红卫

☐出版发行 中南大学出版社

社址: 长沙市麓山南路

邮编: 410083

发行科电话: 0731 - 88876770

传真: 0731 - 88710482

☐印 装 长沙雅鑫印务有限公司

☐开 本 787 × 1092 1/16 ☐印张 14.25 ☐字数 360 千字

☐版 次 2018 年 1 月第 1 版 ☐2018 年 1 月第 1 次印刷

☐书 号 ISBN 978 - 7 - 5487 - 3136 - 8

☐定 价 48.00 元

图书出现印装问题, 请与经销商调换

前言

我国幅员辽阔,广袤的国土下面蕴藏着丰富的资源。能源等宝贵资源对于国家生产力的发展起到关键的推动作用。如何找到那些未发现的地下资源并进行合理开发利用,便是地质研究领域的主要课题。真实的地下空间分布与构造较为复杂,多年来随着国内外勘探研究的不断深入,对地下资源资料的采集手段也变得越来越多元化,收集的数据相对于以前的信息变得更丰富、更完善、更全面。同时,运用飞速发展的计算机技术,结合当下现有的勘探数据来构造地质体的三维模型已经变成可能。在矿业领域,三维地质模型可以对地下岩体的岩性、产状、空间分布进行精确的三维表达,为施工提供方便。一个成功的三维地质模型,可以直观、形象地展示出地质对象的空间形状、属性分布及拓扑关系,从而有助于地质勘探开发人员进行科学分析和深入研究,为地下资源的勘探、开发、利用及决策提供有效的依据。

现阶段在矿业领域对模型精度的要求越来越高,精确的三维地质模型是进行数值计算的基础,是进一步开展矿业活动的保障。针对三维地质建模研究现状及关键技术研究,本书系统、全面地对三维地质建模所涉及的关键技术与方法进行总结,并在现有三维地质模型方法的基础上进行深入研究,从多源数据的获取、组织与管理以及三维地质建模的关键技术与三维数据模型等方面进行详细阐述。同时,本书对三维地质建模技术在盐腔围岩蠕变模拟分析以及固态金属矿储量计算中的实际应用进行概述,从实例中可以看出三维地质建模方法的研究对矿业资源开采与利用具有较高的理论指导价值。

本书根据作者近年来完成的科研项目所取得的成果编著而成,本书主要包括7个章节,重点对现有三维地质建模方法及作者近几年来在三维地质建模领域的研究成果进行介绍。第1章绪论,旨在通过一系列的详细阐述来加深读者对三维地质模型与建模方法的认识,以及了解部分现有三维地质建模软件的概况。第2章三维地质建模多源数据组织与管理,主要介绍三维地质建模中多源地质数据的获取、组织与管理,包括基础地理数据获取与管理、基础地质数据获取与管理、地面沉降数据获取与管理、声呐测腔数据获取与管理等内容。第3章三维空间数据模型,对目前三维地质建模过程中使用较多的面元模型、体元模型、混合模型等进行阐述与分析。第4章三维地质建模关键技术,着重介绍三维空间插值、三维空间索引、实体间布尔运算、三维空间网格离散和三维空间模型网格细分等算法的原理,以及它们结合盐腔这种特殊地质构造的实际应用。第5章三维地质建模方法,重点围绕基于多源数据融合

的三维地质建模方法、基于细分虚拟钻孔的三维地质建模方法、面向属性信息表达的三维地质建模方法、知识规则驱动下的三维地质建模方法以及基于声呐测腔数据的盐腔三维表面重建方法进行介绍。第6章基于三维地质建模的盐腔围岩蠕变模拟与分析,以江苏金坛盐矿资源为研究对象,采用三维地质建模方法构建盐腔围岩三维体元模型,该模型可用于盐腔围岩蠕变模拟分析,通过分析蠕变模拟过程中盐腔内压变化、不同矿柱距离对盐腔蠕变特性变化的影响,得出金坛地下盐腔蠕变的规律,从而指导该地区盐腔的安全使用和建造。第7章三维地质建模与 Surpac 耦合的矿产资源储量计算,从 Surpac 软件构建矿体三维地质模型存在的一些问题出发,研究三维地质建模与 Surpac 软件结合的方式对矿体进行建模并对其资源储量进行计算。

本书是根据作者多年从事该领域研究、开发和教学工作以及近年来完成的科研项目所取得成果的基础上编写而成的,同时作者参阅了大量国内外有关论著、期刊、毕业论文等文献资料,并与相关专家、学者、工程师等进行了反复交流与沟通。感谢研究生陈健、潘红伟、赵慧、杨路生、刘鹏或、康念坤、李辉、吕华、朱思静、席靖等对本书相关材料的收集、整理。感谢常州市国土资源局金坛分局的桂卫华、肖亮明、孙云清、王慧等工程师对本书撰写过程中提供的数据支持和宝贵建议。值本书出版之际,谨向他们表示最衷心的感谢。

三维地质建模相关理论与方法的研究在不断深入,其应用领域也不断扩大,本书虽力求全面并紧跟相关技术发展与应用的前沿,但编者水平和时间有限,书中难免存在错误和不妥之处,恳请读者批评指正。

笔 者

2018 年 1 月

目 录

第1章 绪 论	(1)
1.1 三维 GIS 理论与方法概述	(1)
1.1.1 二维 GIS 到三维 GIS	(1)
1.1.2 三维 GIS 空间数据组织与管理	(2)
1.1.3 三维 GIS 空间分析方法概述	(5)
1.1.4 三维 GIS 空间模型	(7)
1.2 三维 GIS 发展与应用现状分析	(8)
1.2.1 三维 GIS 发展现状	(8)
1.2.2 三维 GIS 应用现状分析	(10)
1.3 三维地质建模理论与方法现状	(11)
1.3.1 三维地质建模数据模型研究现状	(11)
1.3.2 三维地质建模方法现状	(16)
1.4 三维地质建模软件应用现状	(18)
1.4.1 三维地质建模软件介绍	(18)
1.4.2 三维地质建模应用现状	(22)
本章小结	(23)
第2章 三维地质建模多源数据组织与管理	(24)
2.1 基础地理数据	(24)
2.1.1 基础地理数据获取方法	(24)
2.1.2 地理空间数据坐标转换	(26)
2.1.3 基础地理数据库	(29)
2.2 基础地质数据	(30)
2.2.1 钻孔数据	(30)
2.2.2 地质平面图数据	(32)
2.2.3 地质剖面图数据	(33)
2.2.4 地球物理数据	(35)
2.2.5 基础地质数据库设计与实现	(35)
2.3 地面沉降数据	(36)
2.3.1 地面沉降与地裂缝数据获取概述	(37)
2.3.2 地面沉降监测内容与数据特点	(38)
2.4 声呐测腔数据	(39)
2.4.1 声呐测量原理	(40)

2.4.2	声呐测量设备	(40)
2.4.3	声呐测量法特征	(41)
2.4.4	声呐数据处理与可视化	(41)
2.5	三维地质建模多源数据库设计与实现	(42)
2.5.1	三维地质建模多源数据库结构设计	(42)
2.5.2	三维地质建模多源数据库实现	(42)
	本章小结	(43)
第3章	三维空间数据模型	(44)
3.1	三维空间数据模型概述	(44)
3.1.1	三维空间数据模型发展现状分析	(44)
3.1.2	三维空间数据模型分类	(45)
3.2	面向地矿的面元模型	(46)
3.2.1	边界表示模型	(46)
3.2.2	线框模型	(47)
3.2.3	序列断面模型	(47)
3.2.4	多层 DEM 模型	(48)
3.3	面向地矿的体元模型	(48)
3.3.1	规则体元模型	(48)
3.3.2	非规则体元模型	(51)
3.4	面向地矿的混合三维模型	(56)
3.4.1	八叉树-四面体 (Octree - TEN) 混合模型	(56)
3.4.2	线框-块体 (Wire Frame - Block) 混合模型	(57)
3.4.3	断面-三角网 (Section - TIN) 混合模型	(58)
3.4.4	三角网-八叉树 (TIN - Octree) 混合模型	(58)
3.4.5	矢栅混合模型	(59)
	本章小结	(60)
第4章	三维地质建模关键技术	(61)
4.1	三维空间插值方法	(61)
4.1.1	样条插值方法	(62)
4.1.2	反距离插值方法	(63)
4.1.3	泰森多边形插值方法	(64)
4.1.4	克里格插值方法	(65)
4.2	实体间布尔运算	(69)
4.2.1	空间分解法	(69)
4.2.2	层次包围盒法	(69)
4.2.3	快速相交检测算法——Space Sweep 法	(69)
4.2.4	基于欧拉算子的空间实体布尔运算	(76)

4.3 三维空间网格离散	(80)
4.3.1 映射法	(80)
4.3.2 栅格法	(80)
4.3.3 Delaunay 法	(81)
4.3.4 推进波前法	(83)
4.4 三维空间模型网格细分	(84)
4.4.1 Loop 细分算法原理及应用	(85)
4.4.2 蝶形细分算法原理及应用	(86)
4.4.3 改进的蝶形细分算法原理及应用	(88)
4.5 三维空间索引	(90)
4.5.1 八叉树索引结构	(90)
4.5.2 R 树及其变种树索引结构	(92)
4.5.3 八叉树与三维 R 树混合索引结构	(96)
本章小结	(100)
第 5 章 三维地质建模方法	(101)
5.1 基于多源数据融合的三维地质建模方法	(101)
5.1.1 多源数据组织与管理	(101)
5.1.2 三维地层模型构建	(103)
5.2 基于细分虚拟钻孔的三维地质建模方法	(105)
5.2.1 空间数据结构定义	(106)
5.2.2 钻孔地层信息模型设计	(106)
5.2.3 初始地表三角网模型构建	(108)
5.2.4 细分虚拟钻孔的生成	(108)
5.2.5 多层 DEM 的缝合	(110)
5.2.6 实例分析	(111)
5.3 面向属性信息表达的三维地质建模方法	(112)
5.3.1 面向属性信息表达三维地质建模方法研究背景及意义	(112)
5.3.2 三维地层模型的构建	(113)
5.3.3 三维地质体元模型构建	(115)
5.3.4 三维地层模型拓扑检查	(116)
5.3.5 地质体三维体元模型构建与品位信息表达	(116)
5.4 知识规则驱动下的三维地质建模方法	(118)
5.4.1 知识规则驱动下的三维地质建模方法背景及应用	(118)
5.4.2 地质构造特征分析	(119)
5.4.3 地质知识规则集建立与推理	(122)
5.4.4 基于知识规则的三维地质模型构建	(136)
5.5 基于声呐测腔数据的盐腔三维表面重建	(140)
5.5.1 盐腔的检测	(141)

5.5.2	盐腔三维表面拓扑重建的数据结构	(141)
5.5.3	盐腔三维表面拓扑重建	(143)
5.5.4	盐腔三维表面模型有效性检查	(144)
5.5.5	实例与分析	(145)
本章小结		(146)
第6章 基于三维地质建模的盐腔围岩蠕变模拟与分析		(148)
6.1	盐腔围岩蠕变模拟研究背景与意义	(148)
6.1.1	研究背景	(148)
6.1.2	研究意义	(149)
6.2	研究区概况及基础数据的组织与管理	(150)
6.2.1	研究区自然条件与开采状况	(150)
6.2.2	区域地质构造特征	(151)
6.2.3	地层沉积特征	(152)
6.2.4	盐岩层分布特征	(154)
6.2.5	相关数据的组织与管理	(157)
6.3	盐岩蠕变本构关系分析	(158)
6.3.1	盐岩蠕变本构关系概述	(158)
6.3.2	蠕变模型基本元件及其应力-应变关系	(160)
6.3.3	蠕变模型基本元件的组合及其性质	(162)
6.3.4	盐岩蠕变本构模型的构建	(164)
6.4	盐腔蠕变数值模拟与分析	(170)
6.4.1	盐腔蠕变数值模拟原理	(170)
6.4.2	盐腔蠕变数值模拟流程	(172)
6.5	盐腔围岩体元模型构建与盐腔蠕变模拟实验	(174)
6.5.1	盐腔围岩蠕变数值分析计算模型构建	(174)
6.5.2	单个盐腔蠕变模拟实验	(175)
6.5.3	盐腔内压对盐腔蠕变特性的影响分析	(177)
6.5.4	不同矿柱距离对多个盐腔蠕变特性的影响分析	(182)
本章小结		(184)
第7章 三维地质建模与 Surpac 耦合的矿产资源储量计算		(186)
7.1	研究背景与意义	(186)
7.1.1	研究背景	(186)
7.1.2	研究意义	(187)
7.2	矿产资源储量计算方法现状及问题分析	(188)
7.2.1	矿产资源储量计算方法现状	(188)
7.2.2	矿产资源储量计算方法问题分析	(188)
7.3	研究方案与技术路线	(189)

7.4 三维地质建模与 Surpac 软件耦合方法	(190)
7.4.1 Surpac 软件所支持的三维模型数据格式	(190)
7.4.2 三维地质模型解析	(192)
7.4.3 三维数据模型转换与实例验证	(194)
7.5 三维地质建模与 Surpac 耦合的矿产资源储量计算实例	(197)
7.5.1 矿体三维模型实例验证与分析	(197)
7.5.2 矿体品位建模	(197)
7.5.3 储量计算与结果分析	(203)
本章小结	(204)
附 图	(205)
参考文献	(210)

第1章 绪 论

随着社会经济的飞速发展,城市化进程不断加快,矿产资源开采规模不断扩大,空间和能源的供需矛盾日益严峻,地下空间开发与利用、矿产资源勘探与开发的需求越来越迫切,城市地下工程建设、矿产普查与勘探、地下水资源勘探与保护、地下能源储库建设等地质工程项目日益增多。人们无论对地下空间作何种开发利用,都需要对其地质环境、地质构造情况进行详细的勘测和分析才能够进行施工作业。因此,如何对地质单元、区域地质构造、地层结构和矿产地质体等蕴含的地质信息进行知识挖掘,探索真三维地质建模方法已成为三维地理信息系统(Geographical Information System, GIS)研究领域的热点问题。本章首先围绕三维 GIS 理论与方法,逐步讨论三维 GIS 的数据获取、数据模型、空间分析、发展现状等。在此基础上,围绕三维地质建模理论与方法的现状,分析了三维地质建模数据模型、建模方法与应用以及相关建模软件等现状。

1.1 三维 GIS 理论与方法概述

二维 GIS 虽然考虑了三维实体的表面视觉效果,但是对其内部属性和几何信息的表达不足。随着 GIS 应用的深入,从真三维空间来处理 and 解决问题变得越来越重要。本节首先分析了二维 GIS 到三维 GIS 扩展的理论基础,进而分析了三维 GIS 空间数据组织与管理、三维 GIS 空间分析方法、三维空间数据模型等理论基础和研究现状。

1.1.1 二维 GIS 到三维 GIS

自从 20 世纪 50 年代计算机科学日渐兴起,计算机在测绘制图、地理信息管理方面大放异彩。对于地理信息的组织和管理,加拿大在 20 世纪 60 年代实现了世界上第一个地理信息系统软件——加拿大地理信息系统(Canada Geographic Information System, CGIS),并提出了地理信息系统这个名字,从此地理信息系统不断发展,成了今天在很多领域不可或缺的工具。GIS 是在计算机的支持下对地球表面部分或者全部的地理信息进行采集、存储、管理、运算、分析、显示和描述的技术系统。

最初, GIS 是基于二维思维下建立起来的用来处理地理信息数据的系统,经过 60 多年的发展,现如今 GIS 已经实现了数据存储、数据管理、数据检索、数据编辑、数据分析、数据可视化等方面的诸多功能,在资源配置、决策制定、科学调查等方面发挥了重要的作用。随着科技的进步、社会的发展,传统的二维 GIS 在目前的很多领域(比如矿山、地下管线、地层研

究等)出现了应用上的瓶颈,其根本原因在于二维 GIS 没有高程坐标,仅仅视高程为地理要素(或场景)的一个属性来处理。传统 GIS 表达三维场景是将 z 值投影到一个模型上,显示时三个轴均被显示,其模仿人类从某点观察物体产生的视觉,使三维对象看起来像真正的三维对象一样,但是这种面三维技术有明显的缺点,即它表达的模型内部是空的。以上问题使得在地下管线铺设、地质勘查等高程信息非常重要的工程中,传统 GIS 对地理信息的表达、处理、显示等都相当的不方便,无法满足需要。针对这些问题,当务之急是实现可以处理真正的三维数据的三维 GIS。

三维 GIS 表达考虑多个高程值出现的情况,将多个同一位置上的 (x, y, z) 观测点表达在同一个数据结构中,实现建模、查询、分析、操作等工作。从不同的角度出发, GIS 有三种定义:基于工具箱的定义,认为 GIS 是一个从现实世界采集、存贮、转换、显示空间数据的工具集合;数据库定义,认为 GIS 是一个数据库系统,在数据库里的大多数数据能被索引和操作,以回答各种各样的问题;基于组织机构的定义,认为 GIS 是一个功能集合,能够存贮、检索、操作和显示地理数据,是一个集数据库、专家和持续经济支持的机构团体和组织结构,提供解决环境问题的各种决策支持。基于工具箱的定义强调对地理数据的各种操作,基于数据库的定义强调用来处理空间数据的数据组织的差异,而基于组织的定义强调机构和人在处理空间信息上的作用,而不是他们需要的工具的作用。三维 GIS 在功能上,除了特有的三维分析功能外,其他方面很多可以借鉴或者直接利用二维 GIS 功能来实现,但在数据采集、数据模型、空间操作、分析算法、系统维护及界面设计等诸多方面要比二维 GIS 复杂得多,其中如何构建适合三维 GIS 操作、分析、显示的数据模型是三维 GIS 的核心。

三维 GIS 是二维 GIS 的扩展,所以具有二维 GIS 所具备的全部功能,王继周等在前人的基础上总结出三维 GIS 应该具有以下 11 种功能:三维数据获取;数据质量评估和控制;数据存贮;三维空间模型建立、编辑和修改;三维空间关系描述和表达;不同类型和不同比例尺的数据结构转换;空间变换;三维可视化;时态数据处理;三维空间分析;系统管理。

当前三维 GIS 还处在一个发展阶段,大多数相关软件主要集中在三维场景的可视化方面,很多软件真正意义上的三维空间分析与处理功能还无法实现。下面我们将针对目前三维 GIS 现状,对其数据获取、数据组织管理、数据表达、空间分析能力、数据模型以及应用现状进行概述与分析。

1.1.2 三维 GIS 空间数据组织与管理

三维空间数据作为三维 GIS 操作的基础对象,其获取方式、组织方式、表达方式对系统的实现、更新、发展都有重要的意义。当前三维数据的获取、组织管理、表达随着专业领域的发展也有了新的方式。

1. 三维空间数据获取

三维空间数据获取方式主要有点、面、体三种方式。点方式获取数据的三维空间数据的技术有天文观测、罗盘定位、惯性测量、大地工程、工程测量、矿井测量、GPS 技术、钻井勘探等;面方式获取数据的技术有摄影测量、遥感技术、激光扫描技术、集成传感技术等;体方式获取空间数据的技术有 CT 扫描、3D 地震技术等。

三维空间数据获取的仪器设备与技术手段也在不断更新和发展。经纬仪、水准仪、全站仪、测量机器人的出现使测量工作变得更加方便、精确。经纬仪和水准仪通过仪器提供的特

水准线实现角度和高程测量,需要一系列的计算得出测量区域内的位置定位。全站仪、测量机器人在测量和计算方面实现了半自动和全自动,大大地减少了人力。遥感技术利用高塔、飞机、火箭、飞船、航天飞机、卫星等观测地球表面的目标。利用遥感卫星,人们可以远距离、不接触地探测地表,确定地变化,实现地外观测的目的。数字化地图是另一项实现纸质地图变成电子地图的新技术。上述几个技术中全站仪、测量机器人在工程测量和大地测量中用来测定地表位置,可以获得三维和二维的空间点数据,遥感技术主要是获得地表的二维影像;经纬仪、水准仪需要一定的辅助工具才能获得地面的二维或三维数据;数字化地图只能将纸质地图转化为二维的电子地图。

目前三维空间数据的获取也可以从地表和地下两个层次进行。地表三维空间数据的获取方面,GPS 测量技术、摄影测量技术、激光扫描测量技术实现了三维空间数据点获取方式和面获取方式。GPS 测量技术利用围绕地球的卫星定位系统为地表工作站提供实时的三维空间数据;摄影测量技术利用影像和地面实际情况的关系,解析出三维的地面影像,表达地面的特征、变化;激光扫描测量技术利用主动发射的激光信号在仪器与测量目标之间所花费的时间计算出目标的位置。激光扫描不仅密度高,获得的数据精度也高,扫描结果是一个面状的点云。

地下三维空间数据的获取方面,钻孔勘探技术、应用地球物理技术、三维地震技术被应用比较多。钻井勘探技术通过向地下钻进一定宽度、一定深度的钻孔来获得地下的岩层组成、空间位置、空间关系等信息,在区域地质调查、工程地质调查、矿山资源勘探等领域应用较多;应用地球物理技术利用声学、力学、电磁学、核物理学、光学等学科,借助各种测量仪器获得地层信息;三维地震技术利用炸药爆炸等方式获取地表回传的震动波形,从而为地质体空间信息的解析提供数据基础。

2. 三维空间数据组织管理

数据组织管理要求满足数据的共享、容易检索、减少冗余等要求,从这个角度出发,数据的组织管理方式大致经历了以下过程:文件管理、文件结合关系数据库管理、全关系型数据库管理、面向对象数据库管理。

早期的数据是以文件方式存储的,这种存储方式不利于数据共享,检索费时,数据冗余大,占用存储空间,数据库是应对这一问题出现的数据管理技术。空间数据库是针对空间数据数据量大、属性数据和几何数据结合的特点实现的空间数据检索、查询、插入、删除、更新的数据库,可以进行数据的处理和分析。

文件管理方式目前已经很少采用,这种方式是将空间实体的属性数据和几何数据分别存储为不同的文件,两者之间通过标识码来联系。这种组织方式的优点是结构灵活、操作简便、地图显示速度快,即每个软件厂商可以任意定义自己的文件格式以及操纵工具,管理各种数据。而这种管理的缺点也是显而易见的——难以适应大批量数据处理,属性数据管理功能较弱,需要开发者自行设计和实现对属性数据的更新、查询、检索等操作,而这些功能,可以利用关系型数据库来实现。

数据库的出现使空间数据可以通过属性数据利用数据库管理的方式进行管理,而对于几何数据则采用文件的方式实现,两者之间通过标识码来联系及文件结合关系数据库管理。这种方式在早期的空间数据管理方式中普遍采用。事实上目前很多空间数据库仍采用这种方式。这种管理方法的优点是可以充分利用关系型数据库管理系统提供的强大的属性数据管理

功能,属性数据管理能力大为提高,特别是为建立空间数据库的工作提供了许多方便,大大提高了建库能力。

在全关系型数据库管理方式中,使用统一的关系型数据库管理空间数据和属性数据,空间数据以二进制数据块的形式存储在关系型数据库中,形成全关系型的空间数据库。GIS 应用程序通过空间数据访问接口访问空间数据库中的空间数据。很多数据库厂商在关系数据库的基础上扩展了空间数据库实现空间数据的管理。采用全关系型数据库管理 GIS 数据的优点是一个地物对应于数据库中的一条记录,避免了对连接关系的查找,使得属性数据检索速度加快。但是,由于空间数据的不定长,会造成存储效率低下,此外,现有的 SQL 并不支持空间数据检索,需要软件厂商自行开发空间数据访问接口。

为了克服关系型数据库管理空间数据的局限性,学者们提出了面向对象数据模型,并依此建立了面向对象数据库。应用面向对象数据库管理 GIS 的空间数据,可以通过在面向对象数据库中增加处理和管理空间数据功能的数据类型以支持空间数据,包括点、线、面等几何体,并且允许定义对于这些几何体的基本操作,包括计算距离、检测空间关系甚至稍微复杂的运算,如缓冲区分析、叠加符合分析模型等,也可以由对象数据库管理系统无缝地支持。面向对象数据库模型是一个统一的、完美的数据管理方式,但是由于其技术上不成熟,以及传统的关系数据库应用广泛,数据的迁移必定带来成本的增加,目前关系数据库可以满足所遇到的数据管理问题等原因,面向对象数据库还不是主流的空间数据组织与管理方式。

在三维空间数据的检索上,高维的索引技术发挥着重要作用,可以加快检索速度。按照空间索引结构的发展,空间索引技术主要分为:基于二叉树的索引技术、基于 B 树的索引技术、基于 Hashing 的网格技术、基于空间对象排序法技术四类。

基于二叉树的索引技术的典型范例有 KD 树、HDB 树、LSD 树等。主要用于索引多维数据点,对非点状的空间对象索引效率比较低。目前的空间数据库索引技术中基于 B 树的空间索引主要有 R 树及其变体。该索引技术的基本思想是将空间对象及索引空间用其最小外接矩形或最小外接盒子来近似表示,简化计算、减少存储空间;网格索引技术的基本思想是将研究区域纵横分成若干个均等的小块,每个小块作为一个桶,将落在该块内的对象放入小块对应的桶中。这类索引主要适用于索引多维空间点。基于空间对象排序法的基本思想是将索引空间划分为许多小的格子,为每个格子确定一个唯一的编码,然后用与空间对象相交的格子的编码表示该空间对象,或通过计算求取编码来表示空间对象。

3. 三维空间数据表达

三维空间数据的表达方式对于三维场景、三维现象、三维实体的认识有很重要的意义。早期的 GIS 在空间数据方面将属性数据和几何数据分开组织管理,表达空间事物时利用投影的方式将三维空间实体水平投影到某一个平面上形成一幅图像,使用者必须理解一定的制图知识才能理解所要表达的信息。随着数据库技术的发展,数据的组织管理方式出现了很大的进步,实现了属性数据、几何数据的一体化管理模式,面向对象数据库模型更是解决了人们对于事物认识与计算机处理之间存在的差异,在三维空间数据的显示方面立体的三维展示正在成为新的表达方式。三维空间数据的立体表达离不开计算机技术的发展,其中三维可视化技术就是其中重要的技术之一。

可视化技术是指运用计算机图形图像处理技术,将复杂的科学现象、自然景观以及十分抽象的概念图形化,以便理解现象、发现规律和传播知识。三维可视化技术可以实现科学现

象、自然景观在计算机上立体展示,通过人机交互方式从不同的角度观察、操作这些场景数据。随着 GIS 应用领域的不断扩大、普及程度的不断提高,人们对 GIS 的操作界面和分析结果的可理解性提出了越来越高的要求。可视化技术是改善操作界面、提高分析结果可理解性的有效手段。

三维空间数据在计算机屏幕上展示的可视化技术对于非专业的研究人员学习起来很有难度,鉴于此,很多专业的研究团体、组织和软件厂商开发出了三维可视化开发工具来方便研究人员使用。渲染器是 3D 引擎的核心部分,它可完成将 3D 物体绘制到屏幕上的任务,目前市场上的 3D 引擎插件有 Render Max、Mental Ray、Maxwell Render、Brazil、Vray、Finalrender、Turtle、Cartoon 等。渲染器分为硬件渲染器和软件渲染器。软件渲染器通常基于底层图形应用程序接口(Application Program Interface, API)构建,采用适合硬件架构的光栅化方法进行渲染。图形 API 负责与硬件的通信,常用的图形 API 包括 DirectX 和 OpenGL。

DirectX(Direct eXtension, DX)是由微软公司创建的多媒体编程接口,由 C++ 编程语言实现,遵循 COM。被广泛使用于 Microsoft Windows、Microsoft XBOX、Microsoft XBOX 360 和 Microsoft XBOX ONE 电子游戏开发,并且只能支持这些平台。DirectX 是旨在使基于 Windows 的计算机成为运行和显示具有丰富多媒体元素(例如全色图形、视频、3D 动画和丰富音频)的应用程序的理想平台。DirectX 包括安全和性能更新程序,以及涵盖许多技术的新功能。应用程序可以通过使用 DirectX API 来访问这些新功能。DirectX 是由很多 API 组成的,按照性质分类,可以分为四大部分:显示部分、声音部分、输入部分和网络部分。

OpenGL(Open Graphics Library)是一个开放的三维图形软件包,它独立于窗口系统和操作系统,以它为基础开发的应用程序可以十分方便地在各种平台间移植;OpenGL 可以与 Visual C++ 紧密对接,便于实现机械手的有关计算和图形算法,可保证算法的正确性和可靠性;OpenGL 使用简便,效率高。它具有建模、变换、颜色模式设置、光照和材质设置、纹理映射、位图显示和图像增强、双缓存动画(Double Buffering)功能,可以实现深度暗示(Depth Cue)、运动模糊(Motion Blur)等特殊效果。

OpenGL API 通过 OpenGL 图形库来使用 3D 硬件,多数 3D 卡支持这种方法。而 DirectX API 使用微软的 DirectX 库——归并到 Windows 操作系统中。在旧的 3D 卡上面,OpenGL 一般绘制速度较快一些,而在现代的 3D 卡上面,DirectX 的表现则更加出色。现在的 OpenGL 版本只有一个,而 DirectX 版本有很多。DirectX 通过提供更新版本的方式来扩展功能,而 OpenGL 通过一个通用的扩展(OpenGL Ext)模块来对功能进行扩展。

1.1.3 三维 GIS 空间分析方法概述

空间分析是各类综合性地学分析模型的基础,为复杂的空间应用模型的建立提供了基本工具。GIS 的空间分析能力是其魅力所在,也是与 CAD、IMS 等其他软件的区别所在。GIS 空间分析是基于地理对象的位置和形态特征的数据分析技术,其目的在于提取和传输空间信息。随着社会的发展,各个领域对空间分析的需求增加,不同的空间分析技术将会不断涌现,研究和探索适用实际需求的三维 GIS 空间分析技术,对于推动三维 GIS 理论与应用具有重要现实意义。

1. 三维 GIS 基本空间分析方法

三维 GIS 具有二维 GIS 常用的空间分析功能,主要包括缓冲区分析、叠置分析、网络分

析、追踪分析、表面分析、统计分析等方法,此外还有水文分析和通视分析等方法。

缓冲区分析是以某个要素为基础,建立周围一定距离范围内的缓冲区域,来分析该要素与周围空间其他要素的关系的分析方法;叠置分析是将代表不同主题的各个数据层面进行叠置,产生一个新的数据层面,从而提取空间隐含的信息的一种分析方法,其结果综合了原来两个或多个层面要素的属性;网络分析是对地理网络、城市基础设施网络进行地理分析和模型化的过程,通过研究网络的状态及模拟和分析资源在网络上流动和分配情况,解决网络结构及其资源等的优化问题;追踪分析是基于时间序列的可视化和分析工具,是对带有时间属性的事物和现象变化的历史回放,以及实时数据的动态显示;表面分析主要通过生成新的数据集,如等值线、坡度、坡向、山体阴影等派生数据获得更多的反映原始数据及蕴含的空间特征、空间格局等信息;统计分析是在栅格数据中对一个或多个数据集进行数值统计处理,包括计算数值取值范围、最大值、最小值、标准差等。

水文分析是数字地形分析的一个重要方面,包括提取水流方向、汇流累积量、水流长度、河流网络、河网分级、流域分割等内容。至于三维场景的表面分析在 GIS 软件中非常重要,通过 Terrain 数据集、TIN 数据集或者栅格数据集生成三维立体表面,直观地观察场景的表面特征,或者通过一定的计算获取计算场景的通视性、可视域、体积、表面积、坡向、坡度、曲率等内容,帮助人们了解场景的特点。

通视分析是通过通视算法实现三维场景中两点之间通视情况的一种操作,在工程测量、施工放样、基站架设等很多方面具有重要的作用。可视域分析是对于三维场景中通过某一点可以观察到的周围区域进行计算的一种算法实现。可视域分析可以获得观察点周围可以观测到的区域,在军事、通信等领域有重要的作用。

2. 三维 GIS 进一步扩展的空间分析方法

三维 GIS 能够针对三维空间实体或场景的特殊性进行扩展,具有一些适用三维空间分析操作的功能,如三维空间查询与索引、三维空间网格离散、三维空间布尔运算、三维空间可视化分析等。

三维空间查询与索引是数据库必备的功能。数据的检索与查询是需要花费时间的,尤其是在遇到频繁访问数据操作时,花费的时间更多。数据的检索与查询速度依赖于算法的合理性和计算机硬件的处理速度。在三维空间数据海量的特征下,数据的查询更加耗时,只靠计算机性能和算法难以实现。三维空间索引是针对三维空间数据的特征提出的数据组织和管理方法,比如八叉树和三维 R 树索引等,是实现空间数据高效检索与查询的有效方法。

三维空间网格离散分析是针对三维地质体模型具有空间结构复杂和数据量大等特点提出的一种三维空间分析方法,但目前在地矿领域的应用还有一定的局限性。三维网格离散分析中相对应用较广的四面体网格剖分,因其具有单形体单元、易于编辑和能够快速显示等特点,成为比较早在地学领域中应用的技术之一。但是面对复杂而庞大的地质数据,四面体网格剖分也遇到了诸如效率低、网格质量低等问题。目前 Delaunay 法四面体网格剖分、推进波前法(Advancing Front Technique, AFT)四面体网格剖分以及改进八叉树等方法都是四面体网格剖分算法中的几个成熟算法。

三维空间布尔运算是针对三维实体、三维场景中遇到的实体之间相交、相切、贯通、包含等诸多问题实现的处理算法。这些方法对于隧道贯通模拟、山体开挖模拟等问题具有很好的解决效果。通过布尔运算处理,可以直接获得需要的模拟效果,这有助于施工人员和设计

人员全面、准确地理解和掌控工程质量和进度。目前在复杂的地质体、地形实现布尔运算处理对地质方面的研究很有意义。

三维空间可视化分析目前处在探索的阶段,其分析能力更多地集中在三维场景的显示方面,比如三维场景的立体显示、三维场景渲染、三维场景变化动态展示、辅助信息的可视化等。三维空间可视化分析技术可以帮助研究者立体地感受三维空间数据的空间分布情况、三维模型在真实场景中的展示效果、数据处理后三维场景的动态变化效果等,加深研究者对三维场景的认识,有助于三维 GIS 的推广应用。

1.1.4 三维 GIS 空间模型

模型是对某种现象或者某些事物的抽象、简化表达,一个好的模型可以反映出事物或现象的内在本质,帮助我们理解这些事物和现象。数据模型是通过数据形式表现事物或现象的一种方式,构建一个好的数据模型,有助于人们理解地理空间对象,同时也有助于计算机处理。在地理信息方面关于构建好的数据模型是整个地理信息系统的核心问题。通过对地理实体或地理现象的深层分析,学者们建立了很多模型来表达对地理实体和现象的理解,如其中较为有名的栅格数据模型、矢量数据模型。目前,针对三维空间数据模型的研究,普遍将这些模型归纳为四类。

第一类是三维矢量模型,即基于矢量(Vector)或边界面(Boundary Surface)表示的模型。它抽象三维空间中的实体为三维空间中的点、线、面、体四种基本元素,并用它们的集合来构造更复杂的对象。曲线以起点、终点来限定其边界,以一组型值点来限定其形状;曲面以一个外边界环和若干内边界环来限定其边界,以一组型值曲线来限定其形状;体以一组曲面来限定其边界和形状。矢量模型能精确表达三维的线状实体、面状实体和体状实体的不规则边界,数据存储格式紧凑、数据量小,并能直观地表达空间几何元素间的拓扑关系,空间查询、拓扑查询、邻接性分析、网络分析的能力比较强,而且图形输出美观,容易实现几何变换等空间操作,不足之处是操作算法较为复杂,表达体内的不均一性的能力较差,叠加分析实现较为困难,不便于空间索引和空间分析。这类模型有:三维形式化数据结构(3D Formal Data Structure, 3D FDS)数据模型、四面体格网(Tetrahedral Network, TEN)、不规则三角网(Triangulated Irregular Network, TIN)等。

第二类是三维栅格模型,也叫做体模型,它是基于体元表示的数据模型,这类模型侧重于3D空间体的表示,如矿体、水体、建筑物等,通过对体的描述实现3D空间对象表示。其优点是易于表达三维空间属性的非均衡变化,便于空间操作和分析,但存储空间占用较大,计算速度也较慢。如规则格网(Regular Grid)、3D栅格、形状(Shape)模型、八叉树(Octree)模型等属于三维栅格模型。

第三类是混合或集成数据模型。由于三维空间实体的多样性与复杂性,无法实现一个模型通用的情况,为适应不同的分析和处理,采用集成和混合的方式实现。将不同的数据模型放在同一个系统内,通过转换实现不同模型的表达,这是集成数据模型,其宗旨在于发挥不同数据模型的优点而把它们集成起来,实现3D空间实体的存储、处理;将一些不同模型混合起来,利用各自的优点提供一种可行的方案,以适应不同的分析和处理,此类模型称之为混合数据模型。混合或集成数据模型实际上采用的是一种折中的方法,它在弥补了前两种数据模型不足的同时,也降低了它们各自的优越性。不论是混合还是集成,本质上都是传统的数