



<http://www.phei.com.cn>

“十一五”国家重点图书出版规划项目

三维空间信息系统 模型与算法

Models And Algorithms for
Three Dimensional Spatial Information System

史文中 吴立新 李清泉 王彦兵 杨必胜 著

0110110111000100101001011001

0110110111000100101001011001

0110110111000100101001011001

0110110111000100101001011001

0110110111000100101001011001

0110110111000100101001011001

0110110111000100101001011001

0110110111000100101001011001



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

“十一五”国家重点图书出版规划项目

数字中国丛书

三维空间信息系统 模型与算法

Models And Algorithms for
Three Dimensional Spatial Information System

史文中 吴立新 李清泉 王彦兵 杨必胜 著

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 • BEIJING

内 容 简 介

本书重点从三维空间数据与可视建模两个方面进行了详细的介绍。全书共 9 章。第 1 章介绍了三维空间数据与可视化建模研究发展现状；第 2 章主要从 2D 空间、地表 3D 空间和地下 3D 空间三个方面讨论了三维空间数据的获取方法；第 3 章至第 7 章从数字地形建模与更新，3D 地理空间建模，3D 地质空间建模，地上下真 3D 空间集成建模，以及 3D 空间建模有关算法等方面介绍了最新的研究成果；第 8 章介绍了空间数据质量模型；第 9 章介绍了作者研究小组开发的实验系统与应用实例，以及国内外主要的 3D 建模工具与典型系统。

本书既可作为 GIS、计算机、科学可视化、三维建模等专业领域的硕士研究生、博士研究生以及高年级本科生的公共教材，也可作为我国从事三维数据获取与可视建模研究人员的技术指南。

未经许可，不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。
版权所有，侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

三维空间信息系统模型与算法 / 史文中，吴立新，李清泉等著 .—北京：电子工业出版社，2007.5
(数字中国丛书)

ISBN 978-7-121-04271-3

I. 三… II. ①史…②吴…③李… III. ①三维—地理信息系统—系统模型②三维—地理信息系统—算法
IV. P208

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 057902 号

责任编辑：张来盛 zhangls@phei.com.cn 特约编辑：石灵芝

印 刷：北京牛山世兴印刷厂
装 订：

出版发行：电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本：787×1 092 1/16 印张：18 字数：450 千字

印 次：2007 年 5 月第 1 次印刷

印 数：5 000 册 定价：38.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题，请向购买书店调换。若书店售缺，请与本社发行部联系，联系及邮购电话：(010) 88254888。

质量投诉请发邮件至 zlts@phei.com.cn，盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线：(010) 88258888。

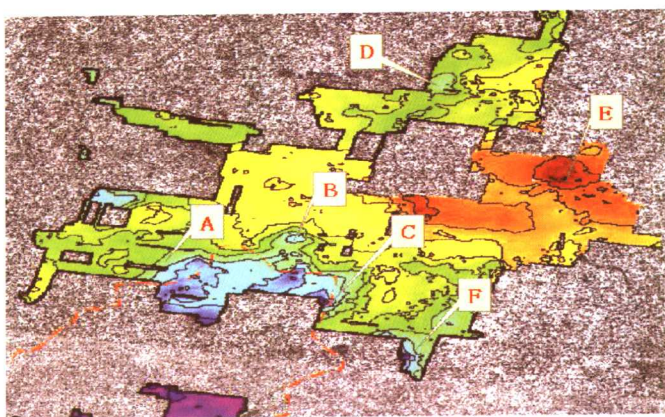
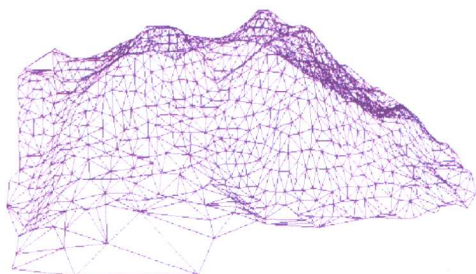
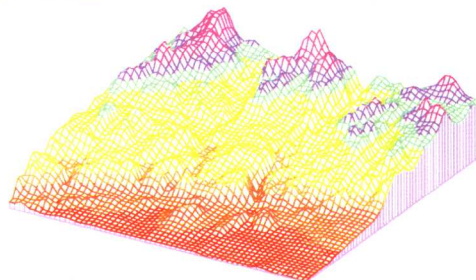


图 2-12 开滦矿区地表沉陷空间分布图



(a) TIN



(b) Grid

图 5-1 表面(Surface)模型

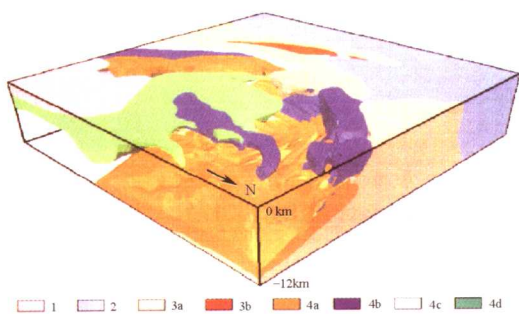


图 5-14 基于 Voronoi 图的地质模型

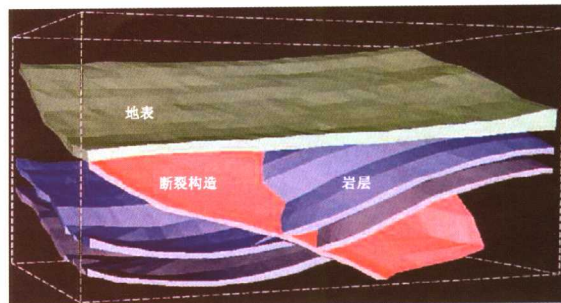


图 5-20 断面-三角网混合模型应用实例

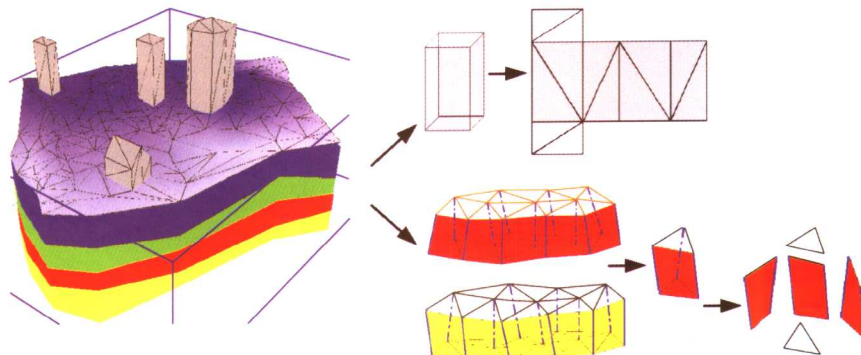
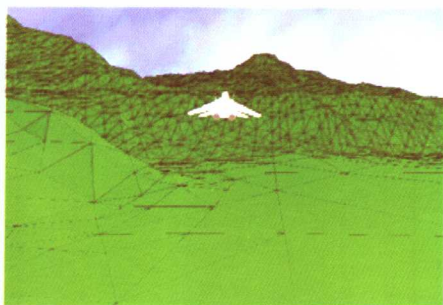
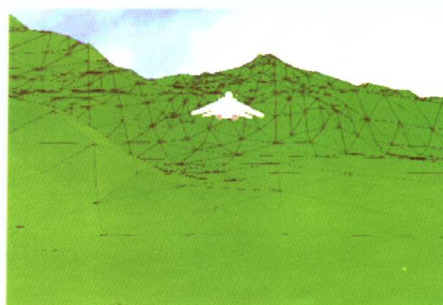


图 6-15 地上下空间层次关系描述与三角形分解



三角形数目: 3×10^7

图 7-35 $\tau=0.003$ 时的图象效果



三角形数目: 2.1×10^7

图 7-36 $\tau=0.008$ 时的图象效果

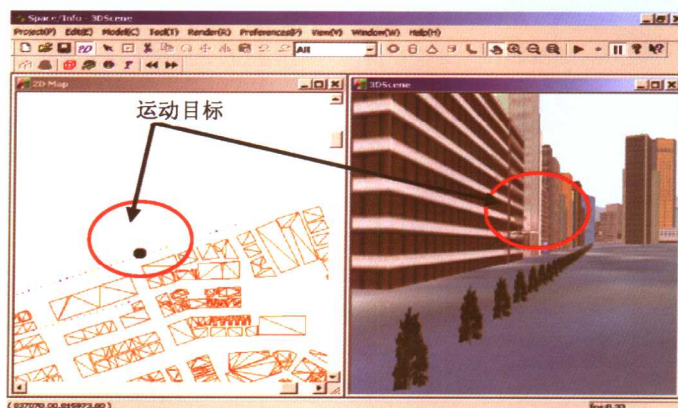


图 9-13 漫游状态下二维与三维景观的同一界面显示

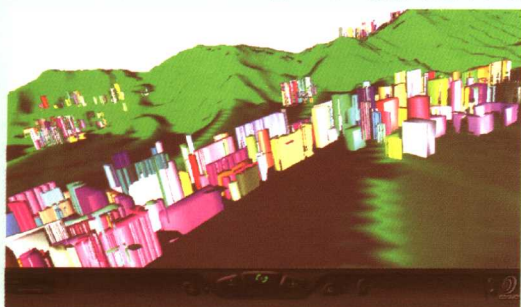
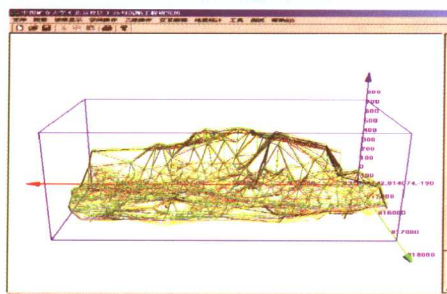


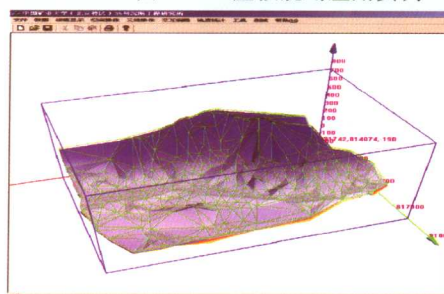
图 9-14 VRML 格式输出显示



图 9-16 虚拟规划应用实例



(a) 钻孔分布 TIN



(b) 三维地质模型

图 9-24 香港岛工程地质三维建模

《数字中国丛书》编委会

名誉主编：徐冠华 许智宏 陈述彭

执行主编：陈运泰 童庆禧

副主编：杨学山 刘燕华 李德仁 李小文 陈俊勇 迟惠生

方 裕 承继成 李 琦

编委（按拼音排序）：

陈拂晓 陈 军 陈秀万 程承旗 承继成 崔伟宏
董宝青 方 裕 龚建雅 过静君 郝 力 何建邦
景贵飞 李伯衡 李 斌 李 京 李 莉 李 琦
李增元 李志林 李志忠 廖小罕 林 晖 林宗坚
刘定生 刘燕华 刘纪远 闫国年 马蔼乃 潘 懋
秦其明 邵立勤 史文中 田国良 王 宏 王 桥
王钦敏 王瑞江 邬 伦 吴信才 徐 枫 徐希孺
晏 磊 杨崇俊 杨学山 叶嘉安 曾 澜 查宗祥
郑立中 周成虎

执行编委（按拼音排序）：

陈拂晓 陈秀万 程承旗 承继成 方 裕 李 琦
秦其明 邬 伦 晏 磊 曾 澜 郑立中

执行编委召集人：方 裕 承继成

总 序

毛泽东同志语重心长，寄重望于青年，他说：“世界是你们的”，“你们是早上八九点钟的太阳”。在进步节奏越来越快的信息社会，青年同志承受着巨大的压力，渴望插上知识的翅膀，需要凝聚智慧的力量，展翅腾飞，才能胜任历史重任，适应社会需求。他们需要通过键盘去解释这个多动的世界，需要用电脑去跟踪这个多变的世界，去了解过去，去改善现状，去打造未来。

近半个世纪以来，人们已经向太空发射了数以千计的遥感对地观测卫星、地球定位卫星、全球通信卫星。这些卫星夜以继日地运行在太空，监测着地球上资源、环境和生态的变化，监视着城市化和土地覆盖的更新。人们敷设了遍布各大洲的通信光缆，设置了进入千家万户的宽带互联网络，加速了电离层以内的信息流的流动。人们在平流层开发了超音速飞机，加速了洲际往来，还在不断地修建高速公路，提速火车，增加集装箱的制造和门对门的运输，加速物流配送的能力。于是，地球上的时空观念发生了很大的变化，以上海双休日旅游半径为例，在一小时之内可以到达杭州、宁波和南京；两小时之内，可以到达黄山、庐山和武夷山。来自千里之外的新疆的石油、天然气和来自长江三峡的电力，川流不息地供应到市区和郊区……这就是我们今天生活中面对的信息社会的现实，使我们不能不转变传统的时空观念。

这个数字的信息社会，还只是一个虚拟的、透明的世界。展望未来，“数字地球”还将进一步改变我们人类居住的这个星球的面貌。在我国也相应地提出了“数字中国”计划，各级政府正在推行“电子政务”改革管理模式，提高工作效率和服务水平，转变政府职能。计划到 2008 年，全国政府采购额将达 76 亿元人民币，实现 80% 城市的信息化。以北京为例，在城区已设计了万米网格的管理和监理新模式，加强社区的空间管理，从社区开始打破过去条块分割的局面。2008 年北京市将设置 2000 个便民信息亭，扩大公共信息服务范围；公司和企业积极开展电子商务能力建设，力争与国际接轨，缩小数字鸿沟，提高商贸竞争能力，节约水土资源，降低能源消耗成本；工业基地努力推行“电子制造”，走信息化带动工业化的新路。例如，我国地图测绘、地震、地质、气象行业早已实现全数字化；东北老工业基地也在实现自动化设计与质量控制一体化的基础上，明确提高了产量、质量，逐步促进工业生产的良性循环，向循环经济发展；在科技教育部门，大力推广远程教育和远程医疗，在我国西部开发和成人职业教育方面，取得了相当显著的实效，受到了普遍的欢迎。

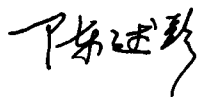
“数字中国”对国家经济规划与建设尤为重要。例如，粮食是否生产过剩，是否应该退耕还林、还草？煤炭生产是否过多？石油能源能否制约未来经济发展？是钢铁投资、汽车、房地产炒得过热，还是城市化过程太慢？水电、核电开发与火电比例是否失调？人口达到零增长是否导致老年化？西部开发战略，东北老工业基地改造与东部跨越式发展，带动中西部，孰先孰后，孰轻孰重？如何缩小地区差异、城乡差别？这些都是关系国家全面建设小康生活中的大问题，需要定性、定量地作出空间分析，为科学发展观提

供科学的依据。

中国主张从我做起，2004 年年底在北京大学成立了“数字中国研究院”；目前已有半数的省区开展“数字省区”建设；长江、黄河等五大河流启动“数字流域”工程；将近 1/3，约 200 个城市，广泛、深入地开展“数字城市”、“数字街区”和“数字社区”的试点。另外，在生态建设、功能区划、环境保护、文物保护等诸多方面，对协调城市与区域经济社会可持续发展，取得了可喜的进展。特别是近几年来，由于信息科学计算技术的迅速进步，IPv6 为网络计算提供大容量、快速的结点，第三代互联网的区域试点获得成功；空间信息的资源共享在技术上有了可靠的保障，公共的科学研究数据平台呼之欲出；空间分析模型与地学信息图谱也有所创新；汉字自动排版与专业制图软件开发有了重大突破；一个整合遥感、卫星定位系统、地理信息系统与互联网的全球技术系统，已脱颖而出，崭露头角，近 100 所大专院校为此设立了专科或本科，400 多家企业（法人）已注册，理论的梳理和人才的培养迫在眉睫。仅上海市就急需地理信息系统高级人才 6 万人。

从科学建设的角度着眼，无论是国家和社会的重大需求，还是人才培养、技术系统的开发、理论基础的研究，都需要一套能够反映当今国家数字化状况的丛书出版。北京大学的承继成、方裕教授等登高一呼，发起编写“数字中国丛书”，立刻得到了社会各界的积极响应，他们尽心尽力的奉献精神 and 协作攻关的团队精神，我是十分钦佩的。

丛书的形式能够为读者提供比较系统、全面的知识，早在清朝康熙乾隆盛世编辑的国家级《四库全书》举世瞩目，叹为观止。近代商务印书馆王云五主编的《大学丛书》、中华书局编印的中学生《万有文库》，对于我国近代人才的培养，发挥过巨大的历史作用，以这些丛书为范本，自学成才的名家大有人在。但上述丛书都是多学科性的，而《数字中国丛书》的编辑、出版则推陈出新，自成一体。以数字技术为主体，以中国的信息化与现代化为研究范围，整合数字资源，集成信息系统；以科学理论指导应用实践；以技术系统支持科学研究。执笔者都是该领域工作在第一线的著名学者。该丛书不仅是为我国全面建设小康社会，加速信息化和现代化作出切实的贡献，同时也是为共建、共享“数字地球”作出示范。我衷心祝愿《数字中国丛书》为我国国民经济信息化建设起到一定的推动作用。



中国科学院院士
第三世界科学院院士
国际欧亚科学院院士

序

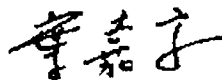
我们的生存环境是地球三维空间中的自然环境，其中的自然实体、人类工程及其活动变化等均是三维空间中的三维现象。但是，由于空间信息理论与技术发展的局限性，现有的地理信息系统主要是运用二维，或者是 2.5 维（地表模型）对现实世界建立数字表达模型，急需对现实世界进行三维空间建模与计算机可视化表达。三维 GIS 在过去十多年的发展中一度较为缓慢，其主要原因是三维空间建模与分析算法的理论发展难度较大，需要更多、更适合的三维模型与算法，特别是需要三维空间关系与三维拓扑的理论支持。

由史文中、吴立新、李清泉、王彦兵、杨必胜五人所著的《三维空间信息系统模型与算法》一书在总结本领域相关研究成果的基础上，系统地提出和阐述了三维空间信息系统的理论、方法与算法问题。其中，面向地理的三维空间模型提供了地表与地上三维空间目标的建模理论与方法；而面向地矿的三维空间模型描述了地下三维空间目标的建模理论与方法；面向地学的三维空间模型则是集地下、地表及地上三维空间目标的集成建模，是作者提出的对三维现实世界整体的一个比较全面的描述模型。在理论上，这是针对三维空间信息系统理论上的一个重要发展——它将现有的地上及地下三维空间建模领域结合在一起。

该书是该研究团队在该领域多年合作研究的结晶，其中许多成果是本领域近年来的重要新成果。尤其是所提出的三维空间建模理论与方法，如 2004 年发表于 *International Journal of Geographic Information Science* 关于 OO3D 模型的论文，以及 2005 年发表于 *Computer and Geosciences* 关于 GTP 模型的论文，已引起国内外的关注。GTP 已成为 GeoMo^{3D} 系统的核心模型，而所提出的地上、地下集成模型与方法已成为数字城市与数字矿山的集成建模的重要工具，并得到实际应用。

相信该书的出版，不仅是对三维 GIS 理论与技术发展的一次有力推动，而且将对促进三维 GIS 在地理信息科学的进一步发展作出重要的贡献。

中国科学院院士
香港大学教授



2007 年 3 月 20 日于香港

前 言

自 20 世纪 60 年代地理信息系统 (geographical information system, GIS) 诞生以来, 其功能、内涵和应用领域不断发展和扩充。地球空间信息技术 (geotechnologies, GIS 与遥感) 与生物技术 (biotechnology) 和纳米技术 (nanotechnology) 一起, 被认为是当今世界发展最快和最重要的三大技术。

近 40 年来, GIS 从最初的地籍数据库管理与机助制图起步, 经历由二维数据来描述地理对象, 发展到后来基于二维半的空间分析和可视化应用, 再发展到当前面向准三维 (2.75 维) 和三维的空间分析与可视化研究。这一发展过程中, 计算机图形学与可视化技术、三维空间信息采集技术、网络技术和通信技术等对 GIS 的发展起到了重要作用, 人们对 GIS 的理解、认识和分类也在不断丰富和完善。尤其近 10 年, 地学 (geosciences, 可理解为 geography、geology、geophysics、geodesy 及 geo-engineering 等涉地学科的统称, 因其英文名称之前缀均为 geo-) 领域关于三维空间信息采集、描述、组织、表达、建模、分析与可视化操作的研究与日俱增, 形成了两大并行发展的支流。其一是以地球表面及其上自然地理实体、人工建构实体为研究对象的三维地理信息系统 (3D GIS); 其二是以地球表面及其下自然地质实体、人工开掘实体为研究对象的三维地学模拟系统 (3D geosciences modeling system, 3D GMS)。

尽管测绘、地理、计算机科学领域的学者围绕 3D GIS 理论与方法进行了广泛研究, 但多以三维拓扑关系、准三维空间数据模型和三维逼真可视化为主, 真三维空间数据模型虽有所涉及, 但技术实现不多; 采矿、地质、岩土领域的学者围绕 3D GMS 理论与方法进行了深入研究, 但多以三维空间构模和地学可视化为主, 拓扑空间关系考虑得不够全面。目前, 真三维地学建模、地表与地下空间的统一表达、陆地海洋的统一建模、三维拓扑描述、三维空间分析、三维动态地学过程模拟、地学可视化等问题, 已成为地学与信息科学的交叉技术前沿和攻关热点。

特别是, 作为三维空间信息系统的重要组成部分, 3D GIS 与 3D GMS 分别对地球空间系统不同层面的对象 (地形、地表和地下) 进行建模和表达, 缺乏对三者之间的空间集成建模研究, 制约了三维空间信息系统作为地理、地质空间信息的集成载体来为社会经济与工程领域提供统一、集成、便捷、可视、动态的服务与决策支持。因此, 急需进行地形、地表与地下对象空间数据获取、处理、建模、可视化、质量分析等系列理论与技术研究。

近年, 香港与内地之间、南北校际之间的跨学科、跨领域合作研究和技术攻关取得了重要成果, 提出了若干三维空间数据模型与核心算法, 解决了若干关键问题与技术难题, 研发了几个基础软件与应用平台。在此基础上, 本书对三维地学信息、数据获取、空间模型、空间算法、数据质量等方面的科学问题和关键技术进行研究总结。旨在抛砖引玉, 希望借此促进三维空间信息系统的理论研究与技术发展。

特别感谢中国科学院院士叶嘉安教授为本书作序。

目 录

第 1 章 概述	(1)
§ 1.1 地学系统与空间信息系统	(1)
§ 1.1.1 地学系统与地学目标	(1)
§ 1.1.2 GIS 与空间信息系统	(3)
§ 1.2 地学认知与空间数据模型	(7)
§ 1.2.1 地学认知模型	(7)
§ 1.2.2 空间数据模型	(9)
§ 1.3 三维空间数据模型与构模概述	(12)
§ 1.3.1 空间维数分析	(13)
§ 1.3.2 三维空间模型与构模方法分类	(14)
§ 1.4 三维 GIS 与地学可视化	(16)
§ 1.4.1 3D GIS 与 3D GMS 的比较	(16)
§ 1.4.2 地学可视化	(17)
参考文献	(19)
第 2 章 3D 空间数据获取方法	(21)
§ 2.1 GIS 空间数据获取方法分类	(21)
§ 2.2 2D 空间数据获取方法	(22)
§ 2.2.1 天文测量技术	(22)
§ 2.2.2 大地测量与工程测量技术	(22)
§ 2.2.3 遥感技术	(26)
§ 2.2.4 地图数字化技术	(28)
§ 2.3 地表 3D 空间数据获取方法	(31)
§ 2.3.1 GPS 测量技术	(31)
§ 2.3.2 摄影测量技术	(33)
§ 2.3.3 激光扫描测量技术	(34)
§ 2.3.4 SAR 与 InSAR 技术	(37)
§ 2.4 地下 3D 空间数据获取方法	(41)
§ 2.4.1 钻孔勘探技术	(41)
§ 2.4.2 应用地球物理技术	(44)
§ 2.4.3 三维地震技术	(45)
参考文献	(46)
第 3 章 数字地形建模与更新	(48)
§ 3.1 数字地形建模方法	(48)
§ 3.1.1 TIN 建模方法	(50)
§ 3.1.2 Grid 建模方法	(55)

§ 3.2 数字地形模型内插	(58)
§ 3.2.1 整体内插方法	(59)
§ 3.2.2 局部内插方法	(61)
§ 3.3 数字地形模型的更新	(67)
§ 3.3.1 采样点插入与删除	(67)
§ 3.3.2 约束线插入	(77)
§ 3.3.3 约束线删除	(78)
参考文献	(82)
第 4 章 面向地理的三维空间模型	(84)
§ 4.1 3D FDS 模型	(84)
§ 4.1.1 3D FDS 模型的原理	(84)
§ 4.1.2 3D FDS 模型的拓扑描述	(86)
§ 4.2 TEN 模型	(86)
§ 4.2.1 TEN 模型的原理	(87)
§ 4.2.2 TEN 模型的拓扑描述	(88)
§ 4.3 <i>n</i> -cells 模型	(89)
§ 4.3.1 <i>n</i> -cells 模型的原理	(89)
§ 4.3.2 <i>n</i> -cells 模型的拓扑表达	(89)
§ 4.4 SSM 模型	(90)
§ 4.4.1 SSM 模型的原理	(90)
§ 4.4.2 SSM 模型的拓扑描述	(92)
§ 4.5 OO3D 模型	(92)
§ 4.5.1 OO3D 模型的概念模型	(92)
§ 4.5.2 OO3D 模型的逻辑模型	(94)
§ 4.5.3 OO3D 模型的形式化描述	(95)
§ 4.5.4 OO3D 模型的拓扑描述	(96)
§ 4.6 B-Rep+CSG 混合建模	(97)
§ 4.6.1 B-Rep 与 CSG 模型原理	(98)
§ 4.6.2 B-Rep+CSG 混合方式	(99)
§ 4.7 TIN+CSG 集成模型	(99)
§ 4.7.1 TIN+CSG 集成原理	(100)
§ 4.7.2 TIN+CSG 集成的技术关键	(100)
§ 4.8 矢栅集成 3D 模型	(101)
§ 4.8.1 矢栅集成 3D 模型原理	(101)
§ 4.8.2 矢栅集成数据结构	(102)
§ 4.9 3D 地理空间模型比较	(104)
参考文献	(106)
第 5 章 面向地矿的三维空间模型	(108)
§ 5.1 面元模型	(108)

§ 5.1.1 表面模型·····	(108)
§ 5.1.2 边界表示模型·····	(109)
§ 5.1.3 线框模型·····	(110)
§ 5.1.4 序列断面模型·····	(111)
§ 5.1.5 多层 DEM 模型·····	(111)
§ 5.2 体元模型·····	(111)
§ 5.2.1 规则体元模型·····	(112)
§ 5.2.2 非规则体元模型·····	(115)
§ 5.3 混合三维模型·····	(128)
§ 5.3.1 断面-三角网混合模型·····	(128)
§ 5.3.2 线框-块体混合模型·····	(129)
§ 5.3.3 八叉树-四面体混合模型·····	(129)
§ 5.4 集成三维模型·····	(130)
§ 5.4.1 三角网-八叉树集成模型·····	(130)
§ 5.4.2 矢栅集成模型·····	(132)
§ 5.5 三维地质空间模型比较·····	(133)
参考文献·····	(137)
第 6 章 面向地学的三维空间集成模型·····	(140)
§ 6.1 三维空间集成建模基础·····	(140)
§ 6.1.1 三维空间实体分类·····	(140)
§ 6.1.2 真三维空间集成建模概要·····	(141)
§ 6.2 三维空间集成建模原理·····	(142)
§ 6.3 地质体与开挖体的集成建模·····	(143)
§ 6.3.1 工程开挖体特征分析·····	(144)
§ 6.3.2 工程开挖体三维建模·····	(144)
§ 6.3.3 地质体与开挖体的三维集成建模·····	(145)
§ 6.4 基于 GTP 的地质体与开挖体真三维集成建模·····	(148)
§ 6.4.1 E-GTP 建模原理与方法·····	(148)
§ 6.4.2 真三维几何无缝集成数据模型·····	(151)
§ 6.4.3 真三维几何无缝集成数据结构·····	(152)
§ 6.5 基于 TIN 耦合的地上下几何无缝集成建模·····	(154)
§ 6.5.1 地上下几何无缝集成建模原理·····	(154)
§ 6.5.2 地上下几何无缝集成逻辑模型设计·····	(157)
§ 6.5.3 地上下几何无缝集成建模数据结构设计·····	(157)
参考文献·····	(160)
第 7 章 三维空间建模算法·····	(162)
§ 7.1 三维图形几何变换算法·····	(162)
§ 7.1.1 三维坐标变换·····	(162)
§ 7.1.2 投影变换原理·····	(164)

§ 7.1.3 投影空间与投影变换算法	(166)
§ 7.2 地形模型与地物模型的无缝集成算法	(169)
§ 7.2.1 基于规则格网的几何无缝集成算法	(170)
§ 7.2.2 基于非规则三角网的几何无缝集成	(171)
§ 7.3 TEN 模型的生成算法	(172)
§ 7.3.1 基于三维栅格的 TEN 模型生成算法	(172)
§ 7.3.2 基于矢量的 TEN 模型生成算法	(173)
§ 7.4 Octree 模型的生成算法	(176)
§ 7.4.1 基于三维阵列的生成算法	(176)
§ 7.4.2 基于表面填充的生成算法	(177)
§ 7.5 面向对象的三维模型重建算法	(177)
§ 7.5.1 面模型的三维重建	(177)
§ 7.5.2 体模型的三维重建	(178)
§ 7.6 GTP 模型三维重建算法	(179)
§ 7.6.1 GTP 模型中四面体的引入	(180)
§ 7.6.2 GTP 模型的空间切割算法	(181)
§ 7.7 地形 LOD 模型算法	(183)
§ 7.7.1 地形 LOD 模型算法概述	(183)
§ 7.7.2 层次结构 LOD 模型算法	(185)
§ 7.7.3 树结构 LOD 模型算法	(189)
§ 7.7.4 基于视点的混合结构 LOD 模型算法	(191)
§ 7.7.5 LOD 模型中裂缝修正算法	(196)
§ 7.8 多分辨率纹理生成与映射算法	(197)
§ 7.8.1 多分辨率纹理生成算法	(198)
§ 7.8.2 多分辨率纹理映射算法	(202)
§ 7.9 三维空间索引与显示判断算法	(205)
§ 7.9.1 三维空间索引机制	(205)
§ 7.9.2 基于索引的三维显示判断算法	(206)
§ 7.9.3 算法实验比较	(208)
参考文献	(209)

第 8 章 空间数据质量模型	(213)
§ 8.1 空间数据的不确定性	(213)
§ 8.2 二维空间数据的误差指标	(214)
§ 8.3 空间数据的不确定性模型	(215)
§ 8.3.1 一维空间特征的不确定性模型	(215)
§ 8.3.2 二维特征的不确定性模型	(217)
§ 8.3.3 N 维特征的不确定性模型	(220)
§ 8.4 二维空间数据误差的概率模型	(222)
§ 8.4.1 二维点位误差的概率模型	(222)
§ 8.4.2 二维线元误差的概率模型	(225)

§ 8.5 三维几何特征的误差模型	(227)
§ 8.5.1 三维点的误差模型	(227)
§ 8.5.2 三维线段的误差模型	(228)
§ 8.6 LOD 模型的误差分析	(230)
§ 8.6.1 LOD 模型的误差分析	(230)
§ 8.6.2 LOD 模型的误差计算	(231)
参考文献	(232)
第 9 章 三维空间信息系统与图形工具	(234)
§ 9.1 Space/Info 系统	(234)
§ 9.1.1 Space/Info 系统简介	(234)
§ 9.1.2 Space/Info 系统结构与功能模块	(235)
§ 9.1.3 Space/Info 系统算法设计	(239)
§ 9.1.4 Space/Info 系统应用实例	(243)
§ 9.2 GeoMo ^{3D} 系统	(246)
§ 9.2.1 GeoMo ^{3D} 系统结构与功能模块	(246)
§ 9.2.2 系统主要功能实现	(248)
§ 9.2.3 系统应用实例	(253)
§ 9.3 三维图形工具与典型系统	(255)
§ 9.3.1 三维图形工具	(256)
§ 9.3.2 若干典型三维系统	(261)
参考文献	(267)

第1章 概述

本章将在简要介绍地学系统与地学目标、GIS 与空间信息系统的基础上,对地学认知与空间数据模型研究进行简要回顾,并概述三维空间信息系统数据模型及其相关问题,包括空间维数分析、空间数据模型分类、3D GIS 与 3D GMS 的比较、地学可视化等。

§ 1.1 地学系统与空间信息系统

§ 1.1.1 地学系统与地学目标

空间参照与时间参照是自然与社会现象的两个基本参照系统,任何事物、任何现象都离不开这两个基本参照。换言之,空间坐标与时间刻度是标识自然万物与社会现象的两个特征。而地理系统及地学系统,正是指在某一个特定的时间和特定的空间内,由两个以上相互区别又相互联系、相互制约的地理要素或过程组成的系统,并具有特定功能和行为。用数学形式描述为: $S = \{\Omega, T, R\}$ 。其中, $\Omega = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ 表示系统中 n 个不同类型要素的集合; $T = \{t_1, t_2, \dots, t_m\}$ 表示系统所处的 m 个不同时间(时刻或时段); $R \subset \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ 表示系统中各要素之间的相互联系与相互制约关系。

1. 地学系统

地理系统主要涉及地球表层空间,按照层次划分,可以分为岩石圈、水圈、生物圈、大气圈和电离层,它们之间在空间上有交叉。传统的 GIS 所涉及的范围主要在岩石圈和大气圈之间,即地球的表面,也就是传统地理学所研究的范畴。而自 20 世纪 70 年代以来, GIS 在气象、地学等涉及全球变化或地下工程(如矿山、地质、隧道)领域的应用不断扩展, GIS 所涉及的范围已经向上进入大气层及地球的外层空间(包括电离层),向下进入地球内部(岩石圈层之内,地表以下 0~10 km)。以矿山 GIS 为例,其涵盖的空间对象上至大气环境,中至山川植被、道路建筑,下至矿坑边坡、井巷工程、煤岩地层等,如图 1-1 所示。

显然,这已经远远超出传统地理学和 GIS 的研究范畴。Goodchild 1992 年提出了地理信息科学(geographical information science)的概念,认为 GIS 已不仅仅是一个技术实现,而是与计算机科学、地理学、测绘学密切相关的一门科学^[3]。钱学森^[20]、马蔼乃^[18, 19]也曾精辟地指出:地理科学是自然科学与社会科学的桥梁,地理信息科学这门以高新技术武装的技术科学的发展,带动了整个地理科学的建立与发展。

学科的融合和交叉极大地推动了 GIS 的发展,丰富了 GIS 的学科内涵,包括地理空间信息认知、获取、表达、处理、共享、可视化、传输、使用等的基础理论与技术方法。人们开始重新思考 GIS 这一多年沿用的名词^[23],主要表现在两个方面:

- geoinformatics 和 geomatics 的出现;
- 以 science 代替 system。

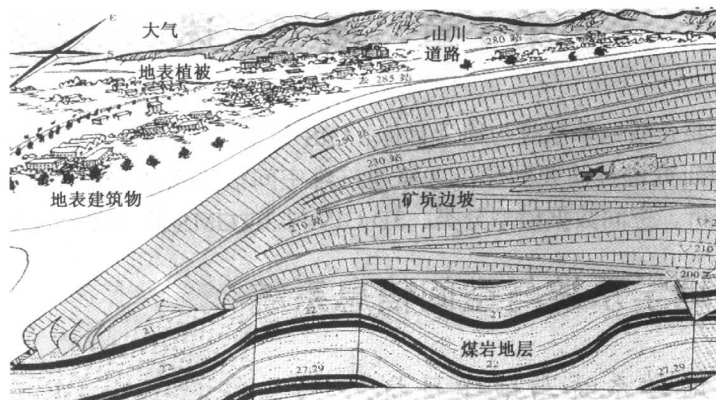


图 1-1 典型地学系统示意图^[16]

从学科融合与交叉的角度考虑,我们把涉及地球内部、表面及外部的系统通称为地学系统或广义地理系统^[25]。地学系统基本涵盖了当今人类生存、生活、研究和利用的与地球系统有关的现实世界整体。

2. 地学目标

地学系统所包含的各类空间目标称为地学目标或广义地理目标。人们对地学目标的认识过程首先是观察,根据观察视点、尺度特征、空间维数和兴趣点的不同,可以分为 4 种基本类型,即点状目标、线状目标、面状目标和体状目标^[25]。

1) 点状目标

点状目标是指可以用一对空间坐标、一个标识符和若干项描述属性来联合表示的地理目标。例如,可以包括测量控制点、电线杆、水井、水塔、矿井口、烟囱、单棵树、震中、火山口、山隘、山峰等。此外,在小比例尺情况下,某些具有面状地理目标可以忽略其面状几何特征而归化成点,例如,小至车站、工厂、学校、医院、机关、交通枢纽、矿点等,大至乡村、城镇、矿床等。

2) 线状目标

线状目标是指可以用一组空间坐标、一个标识符和若干项描述属性来联合表示的地理目标,可以是直线也可以是曲线。例如,可以包括各类边界线、境界线、电力线、通信线、海岸线和抽象的等高线,以及地下管网、巷道、河流、铁路、公路等。而实际上,河流、铁路、公路、地下巷道等是有宽度的,是一个狭长的地理区域。因此在大比例尺情况下,这些狭长的地理目标的宽度是不可忽视的,要以双线或条带状面域表示。一个地理目标要表示成线状或面状,与尺度及具体应用有关。

3) 面状目标

面状目标是指可以用一组空间坐标或若干线状目标的组合、一个标识符和若干项描