

多分辨率空间数据模型理论

实现技术研究

测绘出版社

● 张锦 著

DUOFENBIANLV
KONGJIAN SHUJU MOXING
LILUN
YU
SHIXIAN JISHU YANJIU

多分辨率空间数据模型理论 与实现技术研究

张 锦 著

测绘出版社

· 北 京 ·

内 容 提 要

本书系统地论述了多分辨率空间数据的模型理论、算法和实现技术。主要包括:空间数据特性和 UML 统一模型语言;特征模型理论;超图对象模型和超图算法;形式化多分辨率空间数据模型理论;规范化集成多分辨率空间数据组织和管理对象模型;路网自动综合算法;自适应规则三角形网多分辨率地形模型;不规则三角网多分辨率地形模型;分区计算 DEM 时相邻分区分辨率平滑过渡方法和多分辨率地形表现实现技术。

全书反映了地理信息系统领域多分辨率空间数据模型理论的最新进展和地形可视化实现技术,可作为地理信息系统、测绘工程、地理、地质和计算机软件等专业的教师、科研人员、研究生和高年级学生的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

多分辨率空间数据模型理论与实现技术研究 / 张锦著.

北京:测绘出版社,2004.3

ISBN 7-5030-1130-0

I. 多... II. 张... III. 地理信息系统—数学模型

IV. P208

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 044672 号

测绘出版社出版发行

(100054 北京宣武区白纸坊西街 3 号)

电话:(010)68512386 68531609 网址:www.sinomaps.com

北京市通州区次渠印刷厂印刷 新华书店经销

2004 年 3 月修订版 2004 年 3 月第 1 次印刷

开本:890×1240 1/16 印张:8

字数 238 千字 印数:0001—3000 册

定价:19.00 元

前 言

随着数字地球、数字省、区域和数字城市研究与应用的深化,多分辨率空间数据库模型理论与实现技术的研究已成为 GIS 研究的热点之一。多分辨率 GIS 要求以不同的分辨率水平浏览、管理或表现空间信息内容,空间对象存在多个预定义分辨率水平的几何表现,这些不同的分辨率水平表现或是存储多个版本,或是应用归纳综合方法动态创建。基础数据库的构造和多个综合数据库的派生视不同的情况,其难易、复杂程度存在很大差别,主要的挑战是提出有效地存取和更新已有数据、集成新的数据和在同一时间、一致性地管理空间数据的多个综合版本的模型和方法。

多分辨率空间数据主要包括 DLG、DEM 和 DOQ 数据。由于这些数据的获取方式、表现内容存在很大差异,所以在建立多分辨率空间数据的组织模型时应分别考虑。又由于相当多的应用需要将上述 3D 数据集成应用,所以建立的多分辨率数据模型应能提供集成数据的管理、计算与表现能力。

本书是根据作者的博士论文修改而成,是作者近年来在多分辨率空间数据模型理论和实现技术领域研究成果的总结。

全书共分九章,第一章绪论,主要介绍地理信息系统模型理论的研究现状和本书的主要内容。第二章首先对空间数据特性进行了分析研究,重点分析研究了空间数据的尺度特性。本章的另一个研究内容为 UML 统一建模语言在 GIS 中的应用,利用 UML 可设计、表示出符合国际标准的面向对象系统模型。第三章分析研究了基于特征的空间数据模型理论,特征模型为客观世界地理现象与实体表达提供了一个较完备的模型。第四章提出了一个实用、完整的超图对象模型 HOOM,用于组织空间数据,并将图论中的一些超图算法应用到 HOOM。第五章应用单纯复形、偏序关系和等价关系理论分析研究了形式化多分辨率空间数据模型的基本理论问题。第六章重点研究了规范化集成多分辨率空间数据组织和管理对象模型和路网综合算法;第七章主要围绕多分辨率地形表现模型和实时地形简化应解决的关键技术问题;自适应规则三角形网多分辨率地形模型简化算法;不规则三角网地形模型简化算法等问题展开研究。是本书的研究重点之一。第八章是实现技术,重点是应用 OpenGL 开发地形可视化软件系统的原理和方法。

在本书出版之际,首先感谢导师刘大杰教授和龚健雅教授对我的指导、培养和帮助,本书的研究工作是在二位导师的悉心指导下完成的。导师严谨的学风、渊博的学识和对事业执著的追求永远是我学习的榜样。

在本书的研究和写作过程中,得到了中科院测地所许厚泽院士、朱耀仲所长,武汉大学李德仁院士、毋河海教授、杜道生教授、王伟教授,国家基础地理信息中心陈军教授,同济大学刘妙龙教授,香港理工大学史文中博士、李志林博士,亚洲理工学院陈晓勇博士的指导和帮助,对能有机会与他们进行讨论感到非常荣幸。同时感谢 Dr. Hugues Hoppe、Peter Lindstrom、Leila De Florani 和 Ben discoe 提供的重要文献资料和系统开发资源。

在本书完成之际,作者对所有给予关心和帮助的单位和个人表示衷心的感谢,感谢武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室、山西省自然科学基金对本专著研究的资助和太原理工大学青年基金和矿业工程学院对本书出版的部分资助。

由于时间较为仓促,加上笔者水平有限,书中错误在所难免,敬请广大读者批评指正。

张 锦

2004 年 4 月

目 录

第一章 绪 论	(1)
§ 1.1 地理信息系统的发展与现状分析	(1)
§ 1.2 GIS 空间数据模型理论研究现状和存在的问题	(6)
1.2.1 数据模型的 3 层结构	(6)
1.2.2 面向对象的数据模型	(8)
1.2.3 基于特征的空间数据模型理论	(9)
1.2.4 超图模型	(10)
§ 1.3 多分辨率空间数据模型研究现状和存在的问题	(11)
§ 1.4 制图综合理论与技术研究现状和存在的问题	(11)
§ 1.5 本书的主要研究内容	(13)
第二章 空间数据特性和 UML 对象建模理论	(14)
§ 2.1 空间数据产品类别和数据特性	(14)
2.1.1 空间数据产品分类	(14)
2.1.2 空间数据特性	(16)
§ 2.2 GIS 中的分辨率、尺度和精度	(18)
2.2.1 尺度问题	(18)
2.2.2 应用中有关尺度问题的分类	(20)
2.2.3 IT 领域相关分辨率问题	(21)
2.2.4 GIS 应用中的分辨率问题研究	(22)
§ 2.3 统一模型语言 UML	(24)
2.3.1 静态结构图	(25)
2.3.2 用例图(Use Case)	(28)
2.3.3 顺序图	(28)
2.3.4 协作图	(30)
2.3.5 状态图	(31)
2.3.6 活动图	(31)
2.3.7 实现图	(31)
2.3.8 组件图	(31)
2.3.9 配置图	(31)
§ 2.4 本章小结	(31)
第三章 基于特征的空间数据模型理论	(33)
§ 3.1 特征概念	(33)
§ 3.2 特征模型	(34)
3.2.1 特征对象的组成	(35)
3.2.2 特征对象和几何对象之间的关系	(35)
3.2.3 基本几何对象的层次和关系	(36)
3.2.4 抽象机制	(37)
§ 3.3 特征模型空间关系表达	(38)
3.3.1 属性关系	(39)

3.3.2	时间关系	(40)
3.3.3	空间关系	(40)
3.3.4	特征关系形式化的基本技术问题	(41)
§ 3.4	特征模型的应用	(42)
§ 3.5	本章小结	(43)
第四章	应用超图对象模型组织空间数据	(45)
§ 4.1	超图概念	(45)
4.1.1	应用超图模型表达面向对象的语义关系和基本的空间关系	(46)
§ 4.2	超图对象模型	(48)
§ 4.3	超图理论应用于超图对象模型	(50)
4.3.1	平面图论基本概念和图的矩阵表示	(50)
4.3.2	超图基本理论	(52)
4.3.3	超图表示与超图对象模型表示的关系	(53)
4.3.4	超图理论应用实例	(54)
§ 4.4	基于超图对象模型组织特征空间数据的 GIS 开发技术	(54)
§ 4.5	本章小结	(56)
第五章	形式化多分辨率空间数据模型理论	(58)
§ 5.1	预备知识	(58)
5.1.1	集合的叉积	(58)
5.1.2	关系	(58)
5.1.3	关系的表示和运算	(59)
5.1.4	逆关系	(59)
5.1.5	复合关系和闭包运算	(60)
5.1.6	等价关系	(60)
5.1.7	偏序关系	(60)
§ 5.2	单纯形和单纯复形	(61)
5.2.1	单纯复形的表示	(62)
§ 5.3	单纯复形用以表示离散空间	(63)
5.3.1	闭合空间对象的表示	(63)
5.3.2	一般空间对象表示	(63)
5.3.3	空间关系表达	(64)
5.3.4	多分辨率空间对象操作的形式化表示	(65)
§ 5.4	形式化多分辨率空间数据模型表达	(66)
§ 5.5	本章小结	(66)
第六章	多分辨率空间数据组织和计算的关键技术问题	(67)
§ 6.1	规范化多分辨率空间数据组织和管理对象模型	(67)
§ 6.2	不同投影下的空间数据转换	(68)
§ 6.3	自动综合算子和路网自动综合方法	(70)
6.3.1	自动综合算子	(70)
6.3.2	路网自动综合算法	(70)
§ 6.4	本章小结	(74)
第七章	多分辨率地形表现模型	(75)
§ 7.1	研究现状分析	(75)
7.1.1	问题的提出	(75)

7.1.2 地形可视化基本描述.....	(76)
7.1.3 研究现状分析.....	(76)
7.1.4 本书的主要研究问题.....	(78)
§ 7.2 DEM 算法基础	(78)
7.2.1 Voronoi 图和 Delaunay 三角形	(78)
7.2.2 TIN 模型算法	(79)
§ 7.3 关键技术问题.....	(81)
§ 7.4 多分辨率地形模型.....	(82)
7.4.1 自适应规则三角形网多分辨率地形模型.....	(82)
7.4.2 不规则三角网多分辨率地形模型.....	(85)
§ 7.5 分区计算 DEM 时边缘分辨率平滑过渡的方法	(90)
§ 7.6 本章小结.....	(92)
第八章 多分辨率地形表现实现技术	(93)
§ 8.1 基于图形渲染的算法基础.....	(93)
8.1.1 曲线、曲面表示的基础知识	(93)
8.1.2 光照模型.....	(93)
8.1.3 纹理及纹理映射.....	(96)
§ 8.2 OpenGL 概要	(99)
8.2.1 OpenGL 工作流程	(99)
8.2.2 OpenGL 图形操作步骤	(100)
8.2.3 Windows NT 下的 OpenGL 函数	(100)
8.2.4 OpenGL 基本功能	(100)
8.2.5 Windows NT 下 OpenGL 的结构	(101)
8.2.6 OpenGL 变换	(101)
8.2.7 三维图形显示流程	(104)
8.2.8 OpenGL 中的光照	(105)
8.2.9 OpenGL 中的纹理	(106)
§ 8.3 利用 OpenGL 开发地形可视化软件	(107)
8.3.1 基本框架	(107)
8.3.2 MIPmaps 纹理映射	(108)
8.3.3 HyperTerrain 地形可视化软件	(109)
§ 8.4 本章小结	(109)
后 记.....	(110)
参考文献.....	(112)

第一章 绪 论

§ 1.1 地理信息系统的发展与现状分析

地理信息系统(GIS:Geographic Information System 或 Geo-Information System)是一种特定而又十分重要的空间信息系统,它是采集、存贮、管理、分析和描述整个或部分地球表面(包括大气层在内)与空间和地理分布有关的空间信息系统(李德仁等,1995)。加拿大测量学家 R. T. Tomlinson 于 1963 年最早提出地理信息系统这一术语,并且建立了世界上第一个 GIS——加拿大 GIS(CGIS),用于自然资源的管理和规划。经过 20 世纪 70 年代和 20 世纪 80 年代的研究,特别是经过 20 世纪 90 年代的大发展,目前已经迅速发展成为一种全新的信息管理和处理技术,在全球范围 GIS 已形成一个巨大的信息产业。地理信息系统的核心是地理空间数据库,而关键技术是建立几何数据和属性数据间的对应关系和特征要素间的空间关系,及多源、单分辨率或多分辨率空间数据的集成与管理。基于这些关键技术研发的 GIS 平台和应用开发环境,已在国民经济各领域、政府和军事部门得到广泛应用,并且促成一门新学科——地球空间信息学(Geomatics)的形成。GIS 的典型功能见图 1-1。

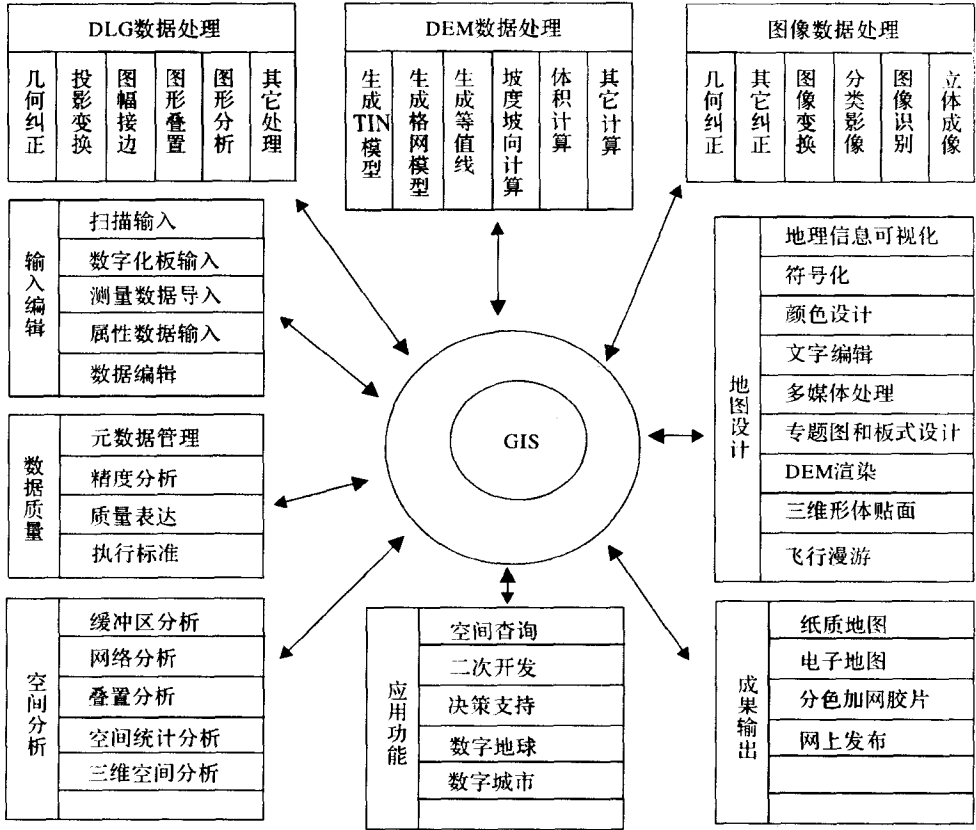


图 1-1 GIS 典型功能

GIS 是一种与 MIS、CAD/CAM 有着本质技术区别和密切联系的地球空间信息系统,见图 1-2。充分认识 GIS 的技术特点及其在信息系统中的位置有助于开展 GIS 的研究和利用相关领域的技术成果。

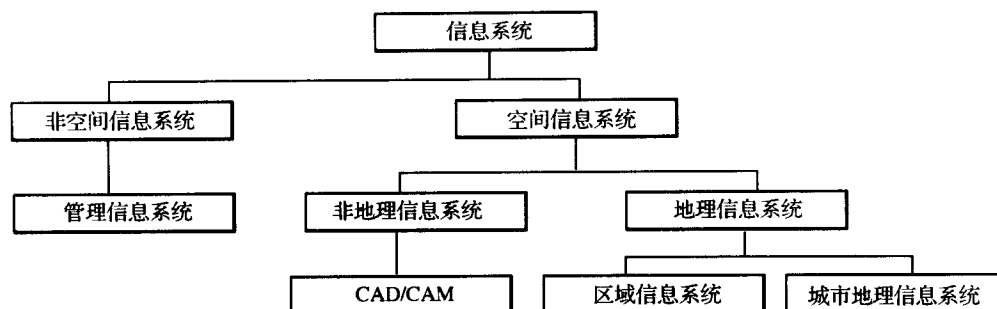


图 1-2 地理信息系统在信息系统中的位置

美国国家地理信息和分析中心 NCGIA 在 20 世纪 80 年代末,分如下 12 个原创性研究课题对 GIS 的基础理论进行了研究(NCGIA,1988):

1. 主题:空间数据库精度 研究领域:空间分析和空间统计学

主题负责人:Michael F. Goodchild。时间:1988.9 ~ 1989.11;

主要参加人:Anselin, Amrhein, Davis, Estes, Mackinnon, Rogerson, Simonett, Star, Tobler;

主要研究目标:评定空间数据的统计模型;内插和估计的构造和评价技术;GIS 产品的数据不确定性和置性问题。

2. 主题:空间关系语言 研究领域:空间关系一般理论

主题负责人:Andrew U. Frank 和 David M. Mark。时间:1988.7 ~ 1990.7;

主要参加人:Couclelis, Ehlers, Golledge, Rapaport, Smith, Zubin;

主要研究目标:以自然语言确定空间概念和空间关系的形式化认知或语义模型;基于拓扑学和几何学构造空间概念和空间关系的形式化数学或逻辑模型。

3. 主题:多表现 研究领域:可视化、空间关系和数据库结构

主题负责人:Barbara P. Buttenfield。时间:1988.9 ~ 1990.4;

主要参加人:Barrera, Beard, Ehlers, Frank, Mark, Smith, Tobler, Walters;

主要研究目标:自相似性和尺度依赖性;地图要素的数字表现模型;与分辨率水平相关的自动特征要素简化和选择算法;相同对象多表现的数据库组织方法。

4. 主题:GIS 在决策支持中的应用和价值 研究领域:社会、经济和体制问题

主题负责人:Earl Epstein。时间:1988.10 ~ 1990.4;

主要参加人:Beard, Calkins, Estes, Ducheneau, Goodchild, Onsrud, Star, Zubrow;

主要研究目标:与决策支持相关的不确定性和风险问题;与土地利用相关的决策支持实验模型。

5. 主题:超大 GIS 数据库结构 研究领域:空间理论和数据库

主题负责人:Terence R. Smith。时间:1989.5 ~ 1991;

主要参加人:Band, Barrera, Estes, Ehlers, Frank, Gersho, Star;

主要研究目标:超大数据库需求分析;遥感数据特征数据类型;超大 GIS 数据库和关联的 GIS 产品功能部件。

6. 主题:空间决策支持系统 研究领域:空间分析

主题负责人:Michael F. Goodchild。时间:1989.9 ~ 1991.4;

主要参加人:Batta, Church, Onsrud, Simonett, Smith;

主要研究目标:决策支持系统的 GIS 数据结构;GIS 框架内有效的结构化空间搜索算法。

7. 主题:空间信息质量的可视化 研究领域:可视化、空间统计学和应用

主题负责人: Kate Beard 和 Barbara Buttenfield。时间: 1990.5 ~ 1992;

主要参加人: Calkins, Couclelis, Goodchild, Bialis, Amrhein, Rogerson, Ehlers, Frank, Mark, Tobler;

主要研究目标: 实现多种不同的空间信息数据质量(可靠性、精度和确定性等)可视化方法; 评价这些方法的有效性。

8. 主题:地图设计专家系统 研究领域:可视化和专家系统

主题负责人: Andrew U. Frank 和 David M. Mark。时间: 1990 春 ~ 1992;

主要参加人: Barrera, Beard, Buttenfield, Smith, Tobler;

主要研究目标: 设计各种类型地图输出的专家系统。

9. 主题:空间信息共享 研究领域:社会、经济和体制问题

主题负责人: Earl Epsteinhe 和 Hugh Calkins。时间: 1990 夏 ~ 1992;

主要参加人: Ducheneau, Estes, Frank, Onsrud。

10. 主题:GIS 中的时态关系 研究领域:空间和空间时态分析

主题负责人: Andrew U. Frank。时间: 1990.5 ~ 1992;

主要参加人: Barrera, Couclelis, Mark, Michaelsen, Rapaport, Smith, Tobler, Zubrow;

主要研究目标: 时间模型的理解(连续时间、离散时间和事件); 非单调系统中时态逻辑和演绎策略的推理方法; 时态 GIS 的构建和查询实现。

11. 主题:GIS 中的空间-时间统计模型 研究领域:空间和空间-时态分析

主题负责人: David S. Simonett 和 Joel Michaelsen。时间: 1990.10 ~ 1992.9;

主要参加人: Abrahams, Botkin, Dozier, Estes, Frank, Mark, Melack, R. Smith, Zubrow;

主要研究目标: 社会、自然和应用科学中空间和时态尺度变化的基本过程; 空间-时间统计模型分类及其应用于选择合适的数据结构表达 GIS 中特定的社会和自然过程的时态可变性; 有效的数据刷新算法对应于不同的时态变化尺度。

12. 主题:GIS 和遥感(RS) 研究领域:空间分析和空间统计

主题负责人: Jack Estes 和 Frank Davis。时间: 1990.10 ~ 1991.9;

主要参加人: Dozier, Leick, Simonett, R. Smith, Star;

主要研究目标: 改进数据获取和处理方法; GIS 中遥感数据存储和集成的数据结构。

在基本完成以上研究目标后, 20 世纪 90 年代中期, 同样在美国国家自然科学基金的资助下, 研究工作则由 GIS 大学联盟(UCGIS, 1996 www.ucgis.org/research_white/)组织, 分如下 10 个研究主题开展: (1)空间数据获取和集成; (2)分布式计算; (3)地理表现扩展(动态、多维和全球); (4)地理信息认知; (5)地理信息的互操作性; (6)尺度; (7)GIS 环境的空间分析; (8)未来的空间信息基础设施; (9)空间数据和基于 GIS 分析的不确定性; (10)GIS 和社会。

选择 UCGIS 研究主题的一个最主要的出发点是将 GIS 作为一门科学, 关键的研究问题有哪些。此时 GIS 中的 S 非 System, 而是 Science。

国际上其它大学和研究机构, 也不同程度对 GIS 的基础理论展开了卓有成效的研究, 奥地利维也纳工业大学地理信息研究所(<http://www.geoinfo.tuwien.ac.at/>), 如 Stephan Winter 对于不确定性空间关系(Winter, S., 2000); Adrijana Car 关于层次推理的研究(Adrijana Car, 1994)和 Sabine Timpf 关于地图层次数据结构的研究(Sabine Timpf, 1998)。法国国家地图研究所 IGN 由 Anne Ruas 领导的地图综合国际研究小组同样在地图综合的研究与实践中取得了令人瞩目的成果(<http://www.cogit.ign.fr/>)。

进入 21 世纪, GIS 的研究与应用步入一个充满生机的崭新阶段。一方面 IT(信息技术)业的高度发展, 为 GIS 技术的实现和应用的全方位拓展奠定了坚实的硬软件基础, 另一方面遥感技术(RS)和卫星全球定位技术(GPS)的广泛普及和应用, 使得 GIS 中最重要的部分——空间数据的获取变的快捷、实时, 同时数据的分辨率可满足多方面应用的需求, 如测地卫星的分辨率从 100 m 到 0.61 m, 将来会达到更高; 获取数据的区域仅需给定区域的地理坐标范围。作为商品出现的空间数据和多要素、多尺度国家、区域基础

地理信息的有条件提供必然会激发 GIS 在更广范围的应用。

IT 和其它相关技术的高度发展和作为商品出现的空间数据的多样性,一方面如上所述会激发 GIS 在更广范围的应用,并提升 GIS 的服务能力;另一方面,起步于 20 世纪 60 年代的 GIS 技术和理论,在经历过技术上强调图形表达、几何和属性数据集成、空间关系和空间分析、多源数据集成或一体化和初步的分布式即 WebGIS,应用上着重于地图制图、桌面式空间数据基本信息服务、网络式空间数据集成信息服务、初步的分布式空间信息服务、数字地球及数字区域和数字城市几个阶段后,也出现了相当多需要进一步解决或完善的技术和理论问题。

1. 多源、多分辨率空间数据集成技术与自动综合算法

多源主要指数据的获取方式是多种多样的,如三维激光扫描、遥感影像、航空影像、非量测相机影像、扫描地形图、数字化地形图、实测数据等。多分辨率空间数据主要指空间数据系列,主要包括多分辨率 DLG、DEM 和 DOQ 数据。由于这些数据的获取方式、表现内容存在很大差异,所以在建立多尺度空间数据的组织模型时应分别考虑。又由于相当多的应用需要将上述 3D 数据集成应用,所以建立的多分辨率空间数据模型应能提供集成数据的管理、综合计算与表现能力。本书主要围绕这一领域开展研究。

2. 多维动态 GIS 空间数据建模、处理与分析

多维动态数据模型是数字地球基础研究方面的一个核心问题,关系到如何全面、详尽地描述与表达人们居住的三维星球、区域、国家,并在其中嵌入动态的经济、政治、军事、科技、人文乃至历史信息,以便于人类更深入、更系统、更全面地了解,并便于科学有效地保护我们的生存环境[陈军,蒋捷,2000]。具体包括多维空间数据模型与建模方法——用以表达三维空间实体及其时空变化的四维时空对象的定义、表达和数据组织,多维查询表达、数据排序与检索算法及数据结构,顾及时空语义的多维空间数据模型与逻辑建模方法等;多维空间数据动态处理与集成方法——三维实体间时空拓扑关系的动态生成与存取的算法及

数据结构,基于 Web 的异构多维空间数据的分布式数据管理与空间数据互操作及分布式处理方法;多维空间数据时空分析与可视化——多维数据的时空统计与内插分析,时空数据的实时动态显示方法。

3. 地理信息认知和方法论

地理认知的两个重要概念地理意向(Intention,指意识对某物的指向性)和地理意象(Mental Images,表示在地理意向性理论指导下的地理形象思维所产生的各种象,如地理景观、地理区域、地理系统等)表明了地理思维的基本特点,图 1-3 是基本的地理认知图式,图 1-4 是基本的地理认知理论研究体系[鲁学军,1998]。认知研究将导致设计出利用人类地理知觉和专门知识的系统和地理描述上的完善。认知研究希望得出便于没有经验的用户对地理信息的正确理解和使用,同时使有经验的用户提高他们的工作能力和效率。优先研究问题见http://www.ucgis.org/research_white/cog.html。

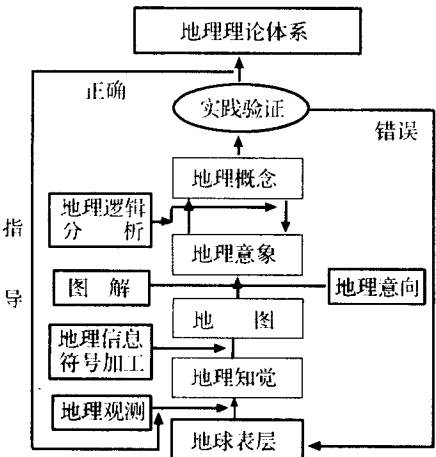


图 1-3 地理认知图式

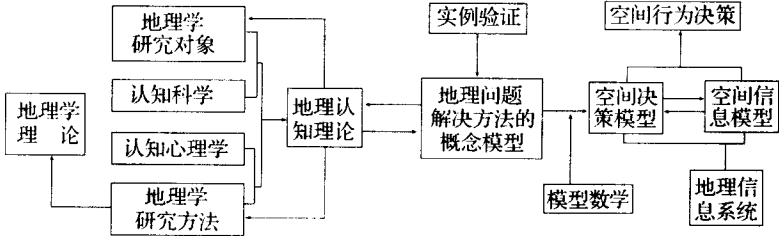


图 1-4 地理认知理论研究体系

4. GIS 空间数据的质量和不确定性分析

GIS 空间数据的质量直接影响着 GIS 的分析和应用[刘大杰, 等, 1999]。这一领域已取得的研究成果主要是:误差可控地图矢量化[邹清华, 等, 1996];矢量数据位置不确定性模型[刘文宝, 1995; 孟小林, 1996; 童小华, 1997; 刘大杰, 1998; 童小华, 1999; 史文中, 2000];属性数据的精度度量和质量控制方法[刘春, 2000];DEM 地形描述精度量化模拟研究,给出了 DEM 地形描述误差的均方差值可表达为 DEM 的水平分辨率和地面垂直曲率的函数[汤国安, 等, 2001];使用 Monte Carlo 法模拟量化 DEM 的不确定性,在此基础上派生出对地形参数计算的影响[Wechsler Suzanne P, 2000];新的研究方向主要集中在不精确区域中的不确定性空间关系[Winter, S., 2000];空间分析过程中的不确定性和多分辨率空间数据变换过程中的不确定性等。

5. 空间信息的分布式、移动式计算

传统的研究集中在 WebGIS 的实现框架和开发技术,当前信息技术正在飞速地朝着分布式计算的方向发展。地理信息本身具备的空间分布的特征以及决策者的管理和地理层次的不同等,使得 GIS 的问题和应用特别适合利用分布式计算。美国 UCGIS 协会将分布式 GIS 列为今后 GIS 发展的 10 个主要方向之一。UCGIS 认为基于 Internet 的 GIS 是近期分布式 GIS 发展的主要目标[阎君, 1998]。

分布式 Internet GIS 是以 Internet 为信息基础平台,分布式计算理论技术为基本的计算模型。Internet GIS 所涉及的对象是 Internet 环境下分布存贮的空间数据及其相关的对于空间数据子集的各种操作。数据的分布是指空间数据可以存在不同的物理节点上并且分别加以维护和管理;计算的分布是指借助计算机网络将分布在不同地点的构件(即对象)组织在一起,通过相互间的协作,进行信息处理的一种方式。数据及计算的分布并不仅仅是简单的物理位置的不同,它涉及的包括从数据和计算服务的发布与发现、元数据、数据与计算的迁移、多源异构数据的互操作到平衡网络负载等一系列问题,与传统的 GIS 有着很大的不同,软件的体系结构有着根本性的改变。

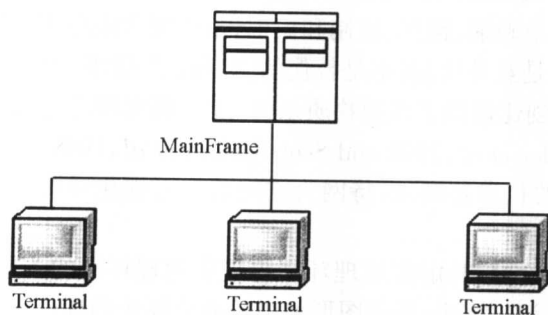


图 1-5 集中式计算方式

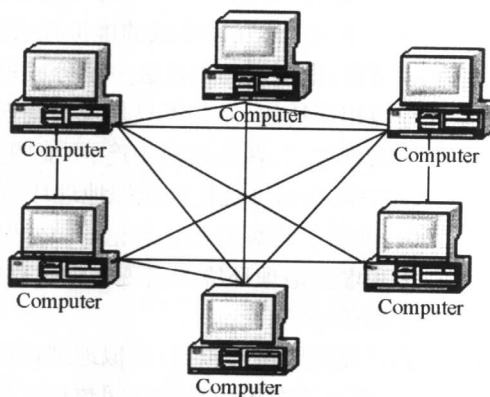


图 1-6 分布式计算模式

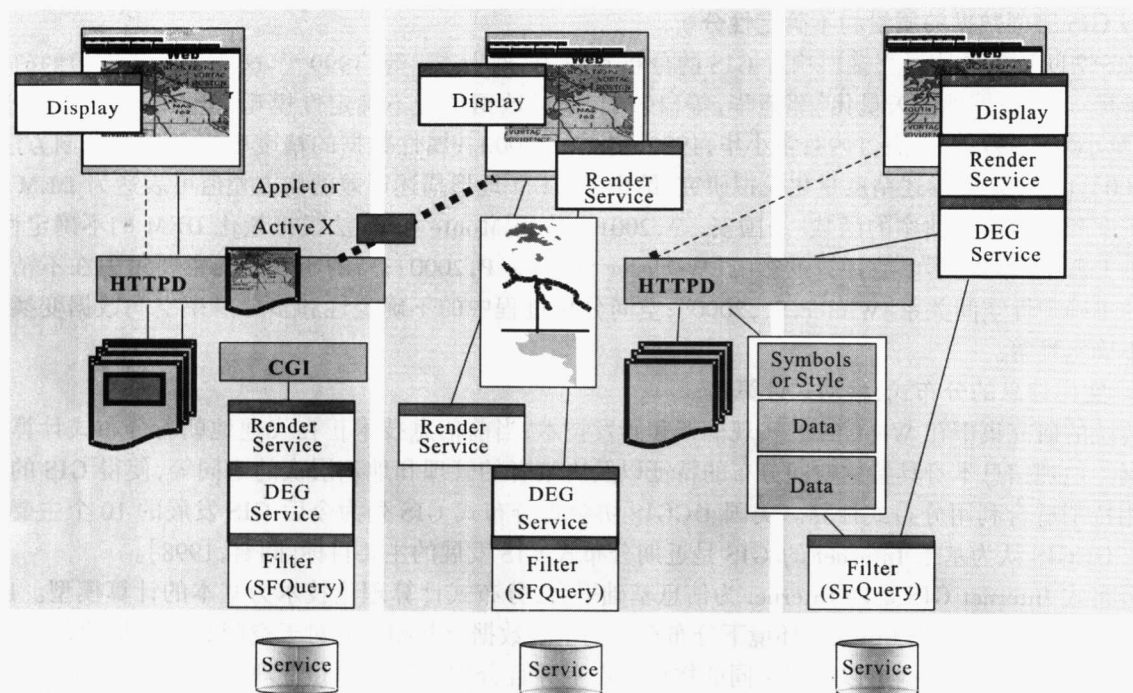
对于分布式计算或者称分布式系统、分布式应用,不同的学者有着不同的定义。A. S. Tanenbaum 认为一个分布式系统可以看作是一些独立的计算机集合 [Tanenbaum, 1995]。Carl L. Hall 则将分布式计算定义为通过多个独立的计算机处理来完成一个特定的任务 [Hall, 1995]。

Allan Doyle 给出了三种可能的 WebGIS 系统体系结构,客户端请求地图图像的方式,客户端请求图形元素的方式和客户端请求空间数据的方式。见图 1-7[Allan Doyle, 1999]。

关注的研究问题主要为:分布式计算模式;移动终端数据服务和终端数据服务开发标准;满足安全性、保密性要求的空间数据存储、压缩、分发技术和数据共享。

6. 空间数据可视化和虚拟地理环境

地学可视化是科学计算可视化与地球科学结合而形成的概念,是关于地学数据的视觉表达与分析。从不同的角度出发可分为地图可视化、地理可视化和 GIS 可视化等[龚建华, 林琿, 2001]。虚拟地理环境包括化身人类社会主体及围绕该主体的所有环境,它由实境和虚境层面组成。实境层面包括因特网、内部



DEG = Display Element Generator SF = Simple Features

图 1-7 三种客户-服务器结构[Allan Doyle, 1999]

网、计算机、设备、数据、音像、图形、图像等媒介,通过交互、感知认知和想象在人脑中形成的虚拟世界以及在虚拟世界中主体与主体互动形成的虚拟社会世界。虚拟层面,可以分成地理位置层面,内表达数据层面和外表达境像层面;虚拟层面可以进一步分成单主体感知认知层面和互主体社会层面。虚拟地理环境是以现实地理环境相依托的,但并不只是现实地理环境的简单映射、镜像、复制和模拟,是以现实地理环境为基础的一种新的创造,二者是紧密相连、不能脱离分开的;是互补的,而不是替代的[林琿, 龚建华, 2002]。

IT 技术为空间数据可视化和虚拟地理环境的实现和创建提供了客观物质条件,虚拟现实理论与技术[张茂军, 2001]和科学计算可视化理论与技术[W. Schroeder *et al*, 1998 and Scott Orford *et al*, 1998]为空间数据可视化和虚拟地理环境的实现和创建提供了相应的技术基础,因特网为空间数据可视化和虚拟地理环境提供了服务环境。

关键性的研究问题主要包括:虚拟地理环境的基础理论框架;虚拟地理环境与现实地理环境的关系;虚拟场景表达;视点或视场依赖的空间数据可视化和简与细化算法;基于图形和图像渲染算法的理论基础和实现技术;虚拟全景空间的模型与算法和可视化工具与软件系统开发等。

§ 1.2 GIS 空间数据模型理论研究现状和存在的问题

过去的若干年,许多专家学者在这一领域开展了多方面的研究,可从以下几个方面综述这些研究成果。

1.2.1 数据模型的 3 层结构

1. 概念数据模型

确定所感兴趣的现象的基本特性,描述实体间的相互联系,从而确定空间数据库的信息内容。目前广为采用的基于平面图的点、线、面数据模型和基于连续铺盖(Tessellation)分割的栅格数据模型(如四叉树分割法)。基于平面图的点、线、面数据模型的一个核心问题是描述和表达点、线、面空间目标及其相互间的拓扑空间关系[Laurini, 1992]。点、线、面的空间目标的划分基于几何特性或地理特性,空间拓扑关系的建立基于点集拓扑学原理, J. Corbett 建立了空间要素划分的单元结构理论[J. Corbett, 1985]。早期,实

体-关系法是建立空间概念模型时采用的主要方法[Peter P. CHEN, 1976; Caron, 1993; Webster, 1992], 如果将某些实体进一步细分的话, 则得到 ECR 模型(Entity-Category-Relationship Model)[Armstrong, 1990]。近期, 基于特征的概念模型对空间目标和空间关系通过惟一性标识、位置信息、非空间属性、拓扑关系、非拓扑关系和方法进行描述和定义[Usery, 1996; Tang, 1996]; 面向对象的整体数据模型[肖乐斌, 等, 2001]; 超图数据模型则通过空间类、对象、类属性、对象属性、类关系和属性关系来完成对空间现象和关系的描述和定义[F. Bouille, 毋河海, 1991; 崔伟宏, 1995; 张锦, 1998], 其数学基础是图论和集合论, 作者研究了超图模型与面向对象模型的集成问题。

这些概念数据模型描述了二维平面图基本特征和简单关系, 美国国家数字制图委员会于 1986 年提出了制图单元的要害分类, 定义了 0-维要素(点、结点)、1-维要素(线段、连线、有向连线、线串、链、弧、环)、2-维要素(区域、多边形、像元、网格单元)和特殊要素(特征点、标识点、区域点、区域链、完整链、网络链)[苏亚芳, 1994]。

将二维 GIS 概念模型扩充到三维或多维空间, 并扩充时态版本定义等是近些年的热门研究方向之一。

对以上模型理论的总体评价是: 单元结构理论或基于点、线、面几何或地理空间目标的划分完成了基本空间几何特征的抽取, 空间拓扑关系建立了空间目标的相邻、关联和包含关系, 一般说来, 这些概念和关系大多着重于几何特征(当然也部分考虑了地理特征或制图特征)。事实上, 基于几何特征和地物层叠置的 GIS 系统在应用的伸缩性、灵活性, 以及利用自然知识的能力等方面均存在严重不足, 见后续章节的论述。

2. 逻辑数据模型

逻辑数据模型是根据概念数据模型确定的空间数据库信息内容(空间实体及相互关系), 具体地表达数据项、记录等之间的关系, 因而可以有不同的实现方法。早期一些 GIS 系统普遍采用层次结构、网络结构和关系模型, 一般说来表现复杂关系的能力较差或本身的关系过于复杂不便计算。

数据模型设计的主要目的是为了有效的数据处理组织数据。逻辑数据模型设计阶段集中于转换数据的语义模型为形式化、面向记录、可实现但独立于系统的描述[Thanasis Hadzilacos, 1996]。在将概念模型转换为逻辑模型时, 还必须考虑已经应用在典型 GIS 系统中的物理模型。

一般说来逻辑数据模型需要处理下述相关问题。

(1) 需要处理大型、复杂和时间模糊定义的对象。比如通过平铺分割(划分工作区)、分层和建立关系等方法管理巨型实体。

(2) 必须处理具有位置和时间属性的空间实体。比如通过引入空间数据基准和建立在其上的坐标数据, 并关联属性数据表达空间实体。

(3) 数据实体间建立拓扑集成约束的空间关系。

(4) 引入时间维后实体的版本控制。

(5) 长时务处理中的并发性和一致性控制。

对于逻辑模型设计应解决的问题有:

(1) 定义空间数据, 包括它们的几何类型(点、线、多边形及其组合形式)。

(2) 按照标准地理特征要素类型(如: 居民地、河网水系等)组织空间数据。

(3) 空间数据与非空间数据的连接。

(4) 拓扑和其它空间关系约束。

(5) 版本化实体和时间。

[Thanasis Hadzilacos, 1996]给出了一种地学关系模型, 详细研究了 GIS 逻辑模型的相关问题, 这是非面向对象 ARC/INFO 系统采用的逻辑模型。

3. 物理数据模型

逻辑数据模型并不涉及最底层的物理实现细节, 众所周知, 必须将逻辑数据模型转换为物理数据模型, 即要设计空间数据的物理组织、空间存取方法、数据库总体存储结构等。数据存取和查询优化是这一

领域的重要研究课题[Kriegel HP, 1991; Lee YC, 1993]。

超图模型为空间存取(尤其是分布式存取)和查询优化提供了新的方法,超图数据模型的图论抽象表示方法,表达了数据组织和抽象的各种信息,方便了概念设计和逻辑设计,凡图示所表示的联系,均可用作检索路径,数据完整性约束可作为类的附加属性加以说明[张锦, 1998],但是目前这方面的研究还很不深入,很不具体,这也是今后的研究方向。

中外学者进行了大量的应用超图理论进行属性数据关系运算性质的研究,尤其是中国学者郝忠孝给出了:基于超图的最小覆盖集的求法[郝忠孝, 1990];基于逆向 FD 超图的属性闭包求解算法研究[郝忠孝, 1994];关系数据中 MVD 超图的讨论[郝忠孝, 1994];基于逆向 MVD 超图的求 MVD 最小覆盖算法研究[郝忠孝, 1994]等多篇研究论文,这些研究成果可作为应用超图理论开展空间数据库研究的基础。

将所选用的概念模型转换为逻辑模型是设计 GIS 空间数据库的核心任务,除去经典的地学关系(ARC/INFO、MGE 等采用)等模型,一些新的研究成果同样引起了人们的关注,如:面向对象的空间数据模型[龚健雅, 1993, 1995;唐小明等, 1994;杨树强, 1997]、时空数据模型[Langrane. G, 1993]、Voronoi 动态空间数据模型[C. M. Gold, 1991]、三维空间数据模型[Molennar M, 1990]、分布式空间数据模型[ShongXianFeng, 1997; R. M. Jones, 1997]和基于超图模型的空间数据模型[F. Bouille, 1977; 崔伟宏, 1995; 张锦, 1998]等。

1.2.2 面向对象的数据模型

采用面向对象技术,即把 GIS 要处理的地理目标,抽象为不同的对象,建立各类对象的联系图,并将各类对象的属性与操作封装在一起。一般是将地理空间目标对象抽象为结点、弧段上的内点、弧段、点状地物、线状地物、面状地物、复杂地物、无拓扑关系的面条地物(如等高线)、地物类、专题层、工作区、工程等一系列对象[龚健雅, 1995]。利用面向对象的数据模型可完成三维空间数据模型[龚健雅, 1997, 孙敏, 等, 1998]、时态空间数据模型[龚健雅, 1995]等模型的初步定义。ESRI 公司在基于面向对象技术的新版 ARC/INFO 系统中推出了一种新的 GIS 数据模型——GeoDatabase[ESRI, 2000]。

Geodatabase 数据库是 ESRI 公司在其商业 GIS 软件 ARC/INFO 8 中推出的一种新型的面向对象的数据模型。在 Geodatabase 数据库中融入了面向对象的核心技术,如:类、对象、封装、继承和多态等思想和技术。Geodatabase 数据模型的目的就是为了让用户能更容易、更自然地表示 GIS 数据特征和更容易地建立特征之间的各种关系。Geodatabase 给用户提供了大量的实体对象模型(如河流、道路、建筑物等),让用户摆脱了抽象的点、线、面模型,使用户的操作更加简便和接近现实世界。Geodatabase 除了支持地理特征的一般行为外,还支持一些象 CAD 数据模型和 Coverage 数据模型所不能支持的特殊行为。利用 Geodatabase 来实现对地理数据的存储和管理将给我们带来如下好处[余应刚, 包世泰, 2000]。

(1) 数据录入和编辑更加精确。由于对数据的录入和编辑大多数能被智能的检测行为所保护,所以几乎不会犯什么错误。

(2) 用户用更直觉的数据对象工作。通过适当的设计,一个 Geodatabase 包含有符合用户数据模型的数据对象。用户用他们感兴趣的对象进行工作,例如电线、道路和湖泊,从而替代了通用的点、线、面。

(3) 特征具有了一个更丰富的上下文。由于有拓扑关联、空间表示和一般关系等原因,不但要定义特征的特性,而且还要有与其他特征相关的上下文。这样,当其中一个特征被移动、修改或删除时,有助于说明整个特征集到底发生了什么。也可借助这个上下文找出或检查与之相关联的另外一个特征。

(4) 能制作更好的地图。能更多的控制特征的绘制,也能增加智能的绘图行为。能把复杂的绘图方法直接应用到 ARC/INFO 的绘图应用程序中,而且通过编写软件代码还能执行高度专业化的绘图方法。

(5) 在地图上显示的特征是动态的。当在 ARC/INFO 中对特征进行处理时,这些特征能对邻接特征的改变做出相应的反应。你也能使特征与定制的查询或分析工具发生联系。

(6) 定义了更好的特征外形。Geodatabase 数据模型用直线、圆弧、椭圆弧和贝塞尔(Bezier)曲线来定义特征的外形。

(7) 特征组是连续的。通过设计,Geodatabase 数据模型能容纳非常巨大的特征组而不需要其他的空

间分区或块(Tiles)。

(8) 许多用户能同时编辑地理数据。Geodatabase 数据模型支持许多人能在本地区域编辑特征,然后对出现的任何差异进行处理使之达成一致。

分布式空间数据模型[Shong XianFeng, 1997; R. M. Jones, 1997; ZhongErshun, 1997; 张锦, 1998];目前的主要成果是关于万维网 GIS 的实现方法的研究。

面向对象的技术是当今国际信息技术领域流行的模型和系统构造方法,具有无比的生命力。但是我们也应该强调由于其是一种通用的信息处理技术[Stroustrup, 1986],所以在构造 GIS 模型和计算时,常令研究开发人员感到茫然,典型的表现有:

(1) 基于层和几何特征的 GIS 概念模型与面向对象的思想差距较大。

(2) 即使利用面向对象的方法完成了 GIS 的空间对象定义,并实现了对象的分类、概括和聚集类的联合、继承和封装等,但在空间关系的构造和空间计算的模式确定方面仍然缺乏具有全面指导面向对象 GIS 空间模型的理论。如,如何利用面向对象的方法实现 GIS 空间对象或类的自动综合(如比例尺变换所需的对象或区域的自动综合);如何把集中式的 GIS 海量数据进行分布式存储,并进行分布式运算等。相同的情况也发生在其它领域的应用中,比如万维网中的超文本模型,如仅知道 HTML 语言和超文本模型的特征,则难以从本质上刻画超文本的所有性质,而一个基于 Petri 网的超文本形式模型则有助于超文本中各种主要问题的解决,并可实现智能超文本系统的建模[余盛海, 1995]。

(3) 基于点、弧段、线、多边形、复杂对象等对象定义只能抽取 GIS 空间现象的一般特征,不能满足空间现象多变、突变、关系蕴涵复杂的要求,实现的空间解算功能有限。

综上所述,虽然面向对象的方法给 GIS 系统设计和功能实现带来了前所未有的方便与快捷,但是仅有面向对象的模型或方法是不够的。面向对象的空间数据模型应该是 GIS 空间数据模型的一部分,但需要强调的是面向对象程序设计方法则是实现 GIS 系统和计算的最重要的方法。

1.2.3 基于特征的空间数据模型理论

基于特征(Feature-Based)的建模方法是在 20 世纪 80 年代出现的、相对于空间数据的图层组织方法而提出的新方法。由于基于特征的建模方法更适合于人们对现实地理世界的理解方式,因此,它一出现便立即引起 GIS 界的极大关注,并立即被应用于 GIS 系统开发及应用实践中,其中最重要的应用领域有两个:一个是 GIS 标准化研究及标准制定;第二是基于特征的 GIS 数据库的开发工作。特征 GIS 数据模型以基于实体的观点来看待地理现象,将地理现象表示为 GIS 的特征对象和关系。特征的定义既反映了真实的地理实体,又包含了对实体的数字描述。特征模型所依据的概念来自于认知心理学中的分类理论以及地图制图学与 GIS 中包括抽象和概括概念在内的数据建模理论。一个特征包括任何地理现象均具有的 3 个方面——空间、专题和时间。特征结构提供了直接获得空间、专题以及时间方面的属性和关系的方法,从而支持多种表达和多种几何结构,诸如矢量与栅格,这种丰富的结构对于空间分析和复杂的地理过程模拟具有重要的价值[董鹏, 张锦, 1999]。

基于特征的 GIS 系统(FBGIS)强化了空间特征固有的内在联系。典型的特征对象部件有:惟一性标识符、位置信息、非空间属性、拓扑关系、非拓扑关系和方法,如学校由教师、学生、管理人员和教辅人员、教室、实验室等组成,在空间上分布的学校各组成单元有其特有的界定属性和包含、组成和空间拓扑关系。而基于层模型的 GIS 系统空间要素或特征之间的非空间关系需要构造,系统并不重视这种自然的关系。

目前组织地理现象的方法的局限性主要体现在两个方面:(1) 基本的矢量和栅格模型把重点放在地理现象的位置上,而牺牲了通过在分类属性和相互关系的基础上构造实体而提供的丰富的分析能力。(2) 层叠方法不提供对成对或成组的基本几何对象执行空间分析的能力[Goodchild, 1987, 1991]。

第一个局限性主要是由于地理实体在矢量系统中被构造为数学上的点、线、面,而在栅格系统中则构造为网格单元。因为公路不是数学上的线,城市也不是数学上的点,而且网格单元结构是对应于不确定地理实体的任意的空间分割,因而这两个模型在地理现实中均不存在。第二个局限性要求开发新的模型来充分支持空间分析。如果我们给一个观众提供一个地理场景并询问他看到了什么,就会很容易地发现基

于特征模式的必要性。回答不会是点、线、面和网格单元,而是诸如河流、湖泊、公路和森林等地理实体。

基于地理图层的传统地图框架在处理复杂的地理过程模拟和空间分析手段方面表现得不够充足。困难出在作为基础的数据模型是否需要直接反映地理实体,还是通过复杂的数据处理,使得这些实体能用传统的图层模型提供给用户,从而使用户能在其中命名地理实体和对这些实体进行空间分析。

E. Lynn Usery 提出了一个在 GIS 中构造特征的概念模型[E. Lynn Usery, 1996]。该模型明确地包括空间、专题、时间 3 方面的属性和关系,以构造基于特征的 GIS,并且牢固地以认知心理学中的分类理论、以及地图制图学与 GIS 中发展形成的数据建模理论为基础。该模型能有效地表示三维和更高维实体以及时间事件。该模型还直接支持地理现象的多种空间表达,诸如栅格和矢量数据。

Agatha Y. Tang 等人针对基于特征的 GIS 系统设计了一个空间数据模型——面向对象的特征模型[Agatha Y. Tang, Teresa M. Adams, E. Lynn Usery, 1996]。该模型采用面向对象方法以整体的方式来体现地理特征和关系。基于特征的面向对象 GIS 系统中创建两种对象类型,即几何对象和特征对象。特征对象是基本元素。特征对象封装几何对象。基于特征的面向对象 GIS 还提供抽象机制。通过使用面向对象技术,使复杂对象的表示和 FBGIS 系统的实现成为可能。

但是,目前关于特征模型研究发表的文献资料,主要还是集中在模型框架的研究,对于应用特征模型表达空间关系、特征关系的形式化表述和特征的数据组织方法的研究很少有研究成果发表,这些又是特征模型应用最基本的技术问题,应该予以研究解决。

1.2.4 超图模型

超图模型最早是由法国巴黎大学的 F. Bouille 教授于 1977 年提出的[毋河海, 1991; 崔伟宏, 1995]。

超图模型的基本数据单元有:类、对象、类属性、对象属性、类关系、对象关系。

类:类是表示具有相同的一些性质并可能表示成相同的关系。类的图示为一闭合曲线,其元素封闭于该闭合曲线内,并用一个标志点标示类。

对象:一个对象是某一类的元素,具有该类的性质。对象的图示为表示类的闭合曲线的一点。

类属性:类的属性是该类全部元素可具备的性质。类属性以与类相连的方框表示。

对象属性:对象属性为其所属类的属性的实例值,以与对象相连的方框表示。

类关系:类与类之间的弧表示其间的关系。弧的两端可为同一个类,表示同类对象间的联系。两个类之间可有多条链表示不同内容的关系。

对象关系:对象关系表示类关系的具体化,表示具体对象的关系,以对象与对象之间的弧表示。在超图数据模型中属性的概念有很大的覆盖面。一个属性可为:

- (1) 一个单一的数值;
- (2) 一个 n 维数组;
- (3) 一个程序或法则(如约束条件);

(4) 一个结构,其本身又可以超图描述。因此属性不但描述了对对象或类的静态特性,而且还描述了其动态特性。属性可为程序这一点与面向对象的概念十分吻合,描述了该对象或类的合法操作。属性可为结构则表达了复杂对象描述的一个方面。

F. Bouille 教授在描述 HBDS 时指出, HBDS 的数学基础是集合论,但是我们知道图论里也有超图的概念和基本理论, HBDS 与图论里面的超图究竟有什么关系,图论里面的一些算法能否应用到 HBDS 中,这对于基于 HBDS 的 GIS 计算是非常重要的。第二个问题是 HBDS 应用中相关的类如何划分,类之间存在一些什么关系。这也是本书研究特征模型的主要原因,作者提出的方法是特征和特征对象作为 HBDS 中的类与对象。第三个问题是如何应用 HBDS 规范化表达面向对象的语义关系。第四个问题是 HBDS 并不是一个数据模型,而是表达类之间或对象之间关系的数据结构,所以需要在 HBDS 的基础上,构造一个可以组织空间数据,并可以表达空间关系的空间数据模型,由于面向对象的技术是当今建立信息模型的主要技术,所以在 HBDS 基础上提出的空间数据模型应支持面向对象的语义操作,即超图对象模型(HOOM)。