浙江大学

硕士学位论文

GIS空间分析方法研究

姓名：李晓军

申请学位级别：硕士

专业：地图学与地理信息系统

指导教师：刘南;刘仁义

20070520

中文摘要

随着GIS在理论和软件研制水平上的不断提高，其应用范围不断扩大，而GIS的空间分析功能也成为人们倍加关注的热点。GIS的发展已从数据库型GIS进入分析型GIS的阶段，这对其空间分析的能力提出了更高、更新的要求。因此对GIS空间分析的研究就成为一个非常重要的而且具有挑战性的研究课题，这也是本文的研究出发点。

本文首先对GIS空间分析的基本概念、方法体系、基本功能、国内外研究现状进行了深入地归纳总结。然后在详细分析了空间数据的基本特征，空间数据模型、空间数据结构和空间数据索引的基础上，阐述了GIS空间分析的基本方法，并从GIS空间分析的过程入手，重点研究GIS空间分析模型以及建模方法，提出了空间分析模型的设计方案，并结合实例对GIS空间分析图解建模的实现和设计思想进行了探讨。最后在空间分析模型的基础上研究GIS空间分析功能的若干关键算法实现，如空间查询、缓冲区分析等，并基于ArcGIS Engine技术探讨了GIS空间分析二次开发方法。在理论研究的基础上，本文设计并实现了一个GIS空间分析模块。

研究表明，充分利用 GIS 空间分析技术，结合图解建模方法，能够建立实际的空间分析模型，可以较好地实现 GIS 空间分析的基本功能，进而增强 GIS 的整体功能。

关键词： GIS，空间分析，空间数据模型，空间分析建模

Abstract

The increasing development of GIS both in the fields of theory and software research, coupled with its expanding range of utilization, the spatial analysis function for GIS has greatly drawn people's attention. Currently, GIS has evolved from database stage to analysis stage which demands a higher and newer requirement for GIS spatial analysis. As a result, the research into GIS spatial analysis becomes a topic of great importance and challenge, which is the starting point of this thesis.

The basic concept, the basic function and the current research situation home and abroad of GIS spatial analysis are clarified in this dissertation firstly. Then, based on the detailed analysis of the basic characteristics of spatial data, analysis of spatial data model, and analysis of spatial data structure as well as spatial data index, the basic methods of GIS spatial analysis are discussed. Next, by means of the processes of GIS spatial analysis, GIS spatial analysis model and its modeling methods are explored as the focus of the thesis. Furthermore, The plan for the spatial analysis modeling design and the realization and design of the spatial analysis modeling are analyzed with specific examples. Finally, based on analysis model, the realization of some key algorithms for the functionality of spatial analysis such as spatial query, buffer analysis etc., and GIS spatial analysis secondary development based on ArcGIS Engine are sudied. Proceeding from the theoretical framework, a GIS spatial analysis module is designed and realized.

The research shows that, practical spatial analysis model can be built if GIS spatial analysis technology integrated with diagram modeling is used; accordingly, the basic spatial analysis function of GIS can be actualized, and improve the whole GIS function.

Key words: GIS, Spatial Analysis, Spatial Data Model, Spatial Analysis Modeling

浙江大学学位论文独创性声明

本人声明所呈交的学位论文是我个人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。尽我所知，除了文中特别加以标注和致谢的地方外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含为获得浙江大学或其它教育机构的学位或证书而使用过的材料。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示了谢意。

研究生签名：李晓军 日 期：2007.6.9

浙江大学学位论文使用授权声明

浙江大学、中国科学技术信息研究所、国家图书馆有权保留本人所送交学位论文的复印件和电子文档，可以采用影印、缩印或其他复制手段保存论文。本人电子文档的内容和纸质论文的内容相一致。除在保密期内的保密论文外，允许论文被查阅和借阅，可以公布（包括刊登）论文的全部或部分内容。论文的公布（包括刊登）授权浙江大学研究生部办理。

研究生签名：李晓军 导师签名：[illegible] 日 期：2007.6.9

第 1 章 绪论

1.1 问题的提出与背景

自从地图出现以来，人们就始终在自觉或不自觉地进行各种类型的空间分析与量算。如在地图上量测地理要素之间的距离、方位、面积，乃至利用地图进行战术研究和战略决策等。

在 20 世纪的 60 年代，欧洲发生了地理科学的计量革命，北美洲则出现了地理信息系统（Geographic Information System，简称 GIS）的萌芽。法国的 Matheron 在前人的基础上，总结提出了"地统计学"的概念。在初期，主要是应用定量分析手段（主要是统计方法）来分析点、线、面的空间分布模式，后来则更多的强调地理空间本身的特征、空间决策过程和复杂空间系统的时空演化过程，并形成了空间分析的理论与技术方法。同一时期加拿大土地调查局建立的加拿大地理信息系统（CGIS）的投入使用，标志着应用型地理信息系统进入了全面发展的阶段。

陈述彭将 GIS 定义为，地理信息系统是一种采集、存储、管理、分析、显示和应用地理信息的计算机系统，是分析和处理海量地理数据的通用技术（陈述彭，2000）。这个定义是目前普遍被众多专家学者所接受的。定义清楚地指出，GIS 的功能是分析和处理地理数据。可见 GIS 的一半功能是分析数据，甚至可以说，GIS 处理地理数据的目的也是为了分析数据。空间分析因此被认为是地理信息系统区别于一般信息系统、CAD 或电子地图系统的主要功能特征，也是评价一个地理信息系统的主要指标（郭仁忠，2001）。从长远来看，空间分析是 GIS 的核心和灵魂。

一直以来，人们围绕 GIS 所做的研究和大量工作基本是建立庞大的空间数据库以及建立各种相关数据与空间位置或二、三维的坐标建立的一种连接关系，因而 GIS 空间分析技术的研究相对滞后于空间数据库的理论与技术。"今天当人们在一片'e'声中，热烈地讨论着"数字地球"、"数字城市"这些无疑属于信息技术应用高级阶段的热门话题的时候，我们不无遗憾地看到，在 20 年前就曾寄予莫大希望的地理信息系统，其现阶段能帮我们做的工作还主要是对空间数据的管理"（郭仁忠，2001）。没有强大空间分析功能的 GIS，不是完整的 GIS，GIS 如果不提供空间数据的分析处理功能，它就蜕化为一个地理数据库。Michael F.G.指出，地理信息系统真正的功能在于它利用空间分析技术对空间数据的分析，而不仅仅是停留在数据库型的 GIS 层面上，需要将关注点从数据库创建和系统开发建设，逐步转移到关注空间分析和空间分析建模上，挖掘对科学决策具有指导意义的信息，解决复杂多变的地学应用问题，这样就需要 GIS 提供强大、灵活的空间分析功能，包括缓冲区分析、空间统计分析、网络分析等。只有在空间分析强大理论基石上才能建立起灵活多样的应用模型，来满足不同用户方方面面的需求。

GIS 的最终目的是支持地理决策，同样，GIS 空间分析的最终目的是为了给决策提

供参考。空间分析主要通过空间数据和空间模型的联合分析来挖掘空间对象的潜在信息，其结果直接依赖于分析对象的空间位置。如果空间对象的空间位置发生了变化，则分析的结果也随之变化。通过空间分析可以发现隐藏在空间数据之后的更重要的信息，甚至是有关空间问题的一般性规律。因此，从这个意义上说，空间分析也可以看作是一个知识发现的过程。可以说空间分析反映了人们对于空间数据的理解与解译能力，也决定着人们利用空间数据的深度和广度。随着空间分析技术的不断发展，GIS 也将由一般的空间事务处理向分析型的空间决策支持方向迈进。因此在 GIS 中研究空间分析具有重要的意义。

1.2 GIS 空间分析概述

1.2.1 GIS 空间分析涵义

目前，提到的空间分析概念一般是指“GIS 空间分析”。国内外许多学者都对空间分析进行了研究（Unwin，1981；李德仁等，1993；Goodchild，1994；Haining，1994；陈述彭等，2000；郭仁忠，2001），但是对于空间分析下定义是比较困难的，关于其定义还没有一个统一的定论，不同领域有不同的涵义。比较典型的定义有以下几种：

Robert Haining 曾经对于空间分析给出如下定义：空间分析是基于地理对象的空间布局的地理数据分析技术（Haining，1994）。该定义是以地理目标空间布局为分析对象，从传统的地理统计与数据分析的角度出发，将空间分析分为三个部分：统计分析、地图分析和数学模型。这是一种统计型定义法，强调统计分析，而将地图分析和数学模型置于从属地位，从空间分析的需求和 GIS 的发展现状及前景看，这种定义不能完全概括空间分析的内涵。

李德仁认为：空间分析是从 GIS 目标之间的空间关系中获取派生的信息和新的知识（李德仁等，1993）。该定义侧重于图形与属性信息的交互查询，以获取派生知识或新知识，其分析对象是地理目标的空间关系。该定义以数据库管理系统为基础，将空间分析的类型按数据结构来划分，认为空间分析由以下几部分组成：拓扑空间分析，缓冲区分析、叠置分析、空间集合分析和地学分析，其划分是以空间分析的操作类型为标准的。

郭仁忠认为：空间分析是基于地理对象的位置和形态特征的空间数据分析技术，其目的在于提取和传输空间信息（郭仁忠，2001）。该定义侧重于空间信息的提取和空间信息传输，其分析对象是地理目标的位置和形态特征。它将空间信息分为：空间位置、空间分布、空间形态、空间距离、空间方位、拓扑、相似和相关。其对应的空间分析操作为：空间位置分析、空间分布分析、空间形态分析、空间关系分析和空间相关分析。这是一种信息提取型的定义方法，本质上仍是偏重于空间信息的管理，空间分析类型是依据空间信息类型来划分，两者之间的关系并不明确。

从以上几种定义可以看出，它们的侧重点各不相同，但是都从不同的方面对空间分析的内涵进行了阐释。综合这些学者的研究成果，作者认为 GIS 空间分析可以理解为目

前GIS技术可以实现的地理信息空间分析，GIS空间分析是对地理空间中的目标的空间关系和空间行为进行描述，为目标的空间查询和空间相关分析提供参考，进一步为空间决策支持提供服务的技术。

由于科学技术发展水平的限制，目前GIS空间分析只能为人们建立复杂的空间分析应用模型提供基本工具，对于不同的专业需求，还需在现有GIS和其它程序设计语言相结合的基础上，进行二次开发，设计出专业性强的空间分析应用模型。GIS应该具备完备的空间分析功能，而智能化的GIS还应具有实际应用模型，智能化的GIS实现的空间分析功能更加详细，发现的隐含信息更多。

本论文中主要研究GIS空间分析，提到的空间分析也主要是指这个方面的涵义。

1.2.2 GIS空间分析的方法体系

一直以来，对于空间分析的论述已经明显呈现出不同的认识。一种认为空间分析主要是对于点、线、面的参数描述和图形表示（Unwin，1981），另一种则认为空间分析主要是对地理对象的空间分布的研究与描述（Ripley，1981）。

Goodchild第一次对空间分析的框架作了较系统的研究。他将空间分析分为两大类：一类是所谓的“产生式分析（Product Mode）”，通过这些分析可以获得新的信息，尤其是综合信息，实质是提取显式存储空间信息（毋河海，1997）；另一类是所谓的“咨询式分析（Query Mode）”，旨在回答用户的一些问题，其实质是提取隐式存储空间信息（毋河海，1997）。后来他把空间分析的功能分为六组，即同类地理现象的属性分析（统计分析）、同类物体的位置和属性数据的联合分析、物体对属性的分析、多类物体的分析、从一类或两类物体产生新的物体对的分析、产生新一类物体的分析等。再后来他又采用不同的逻辑，把空间分析分为空间统计分析、空间相互作用、空间依赖、空间决策支持等，这是对空间分析进行高度抽象的结果，是对空间分析问题认识的进一步深化。

Robert Haining把空间分析分为三大部分，即统计分析、地图分析、数学模型。他没有具体阐述地图分析和数学模型的内容，只是着重于空间统计数据的抽样设计、统计整理、数据模拟以及统计特征的分析，就是以数学（统计）模型来描述和棋拟空间现象和过程，将本来模拟的地理模型转换成数学模型，以便于定量描述和模拟。他的主要贡献是对地理对象的空间分布的定量研究与描述。

黄杏元把GIS的空间分析功能分为数字地形模型分析、空间特征的几何分析和多变量统计分析等（黄杏元，1989）。他的观点与Robert Haining有些相似之处，多变量统计分析与统计分析、数字地形模型分析与数学模型相比，不过是更具体些。空间特征的几何分析是地图分析的内容。在他的著作中，把各种应用模型归为建筑在空间分析之上的独立的部分（黄杏元，1989），这与郭仁忠的论述是一致的。

陈述彭认为地理信息系统的空间分析功能可用于分析和解释地理特征间的相互关系及空间模式，把GIS的空间分析分为三个不同的层次：空间检索、空间拓扑叠加分析、空间模拟分析，并认为应更多的关注环境空间模拟模型的研究，同时把空间模拟分析分

为三类：一是地理信息系统外部的空间模型分析，将地理信息系统当作一个通用的空间教据库，而空间模型分析功能则借助于其它软件；二是地理信息系统内部的空间模型分析，试图利用地理信息系统软件来提供空间分析模块以及发展适用于问题解决的宏语言；三是混合型的空间模型分析，即充分利用软件所提供的功能，又充分发挥研究人员的主观能动性（陈述彭，2000）。其空间模拟分析的内容包含了各种应用模型，其目的在于模拟试验、预测预报，建立各专业自己的应用分析模型。

郭仁忠认为应该以空间信息作为框架来构造空间分析的体系，必须考虑不同信息之间的空间联系，如空间分布趋势和空间对比，从信息内涵上是有区别的，但从分析上讲，又是密切联系的，对于空间分布的图形描述既传递了空间分布信息，又传递了空间趋势和空间对比信息，因此空间分析框架应该基于空间信息的综合。为此，空间分析的模型与方法应从五个方面去分析和阐述：空间位置分析、空间分布分析、空间形态分析、空间关系分析和空间相关分析（郭仁忠，2001）。

1.2.3 GIS 空间分析的功能

空间分析是 GIS 全部内容之所在，一个 GIS 系统的先进性和实用性常常取决于其空间分析的功能。早期的 GIS 强调的是简单的查询，空间分析功能很弱或根本没有，随着 GIS 的发展，用户对 GIS 提出了更多的不是简单的查询就能解决的问题，这就促进了 GIS 空间分析功能的加强。黄杏元、汤勤（黄杏元等，1989）提出了 GIS 的空间分析功能。面对“人们被数据淹没，人们却饥饿于知识”，客观上要求大力发展空间分析理论方法，GIS 空间分析功能也越来越多。结合作者对当今 GIS 空间分析的理解，在黄杏元、汤勤的 GIS 空间分析功能基础上，提出了新的 GIS 空间分析功能图，如图 1-1 所示。

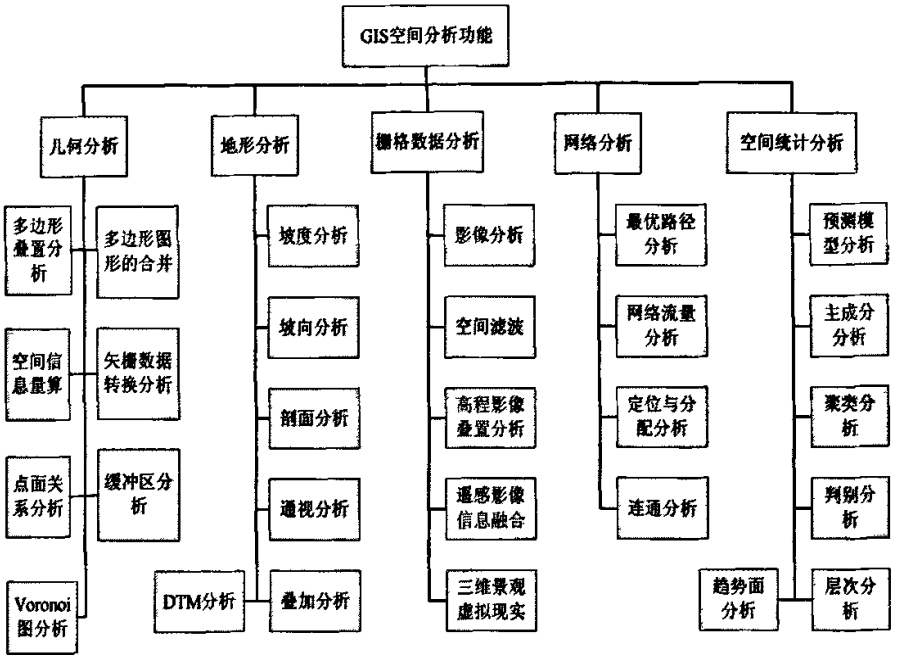


图 1-1 GIS 的空间分析功能图

1.3 GIS 空间分析研究现状

空间分析是建立在对空间数据的有效管理之上的，它的研究一直滞后于空间数据结构与空间数据库以及地图数字化和自动绘图技术的研究。特别是在进入 20 世纪 90 年代以后，基于数据库技术和因特网技术的支持并行处理和技术的跨越式发展，但空间分析的理论和技术没有根本的突破，国内外有关空间分析的理论和方法文献相对于 GIS 的其它技术来讲，数量是相当有限的。比较有名的著作和研究报告有 Unwin（1981）的《空间分析入门》，Haining（1994）的《社会与环境中的空间数问题》，Goodchild（1994）等人的《GIS 环境下的空间分析》，国内比较有代表性的是郭仁忠（2001）的《空间分析》，朱长青（2006）等所著的《空间分析建模与原理》。

由于空间分析对现实具有巨大的指导作用，美国 UCGIS 在 1998 年把空间分析列位当前 GIS 届十大重点问题之一，并将空间分析研究作为当今世纪 GIS 的 19 个研究方向之一，主要包括空间统计学地理数据的空间统计分析；地理边界和地图比例尺在空间数据体系中的作用；空间数据的采样和内插；GIS 数据结构和空间统计计算之间的关系等。

根据文献查询结果，可以发现国内学者对 GIS 空间分析的研究大多集中在近几年，众多学者对 GIS 空间分析的理论和应用等各方面进行了研究。具体如下：

1. GIS 空间分析方法理论

陶华学等（2001）对空间分析的方法作了理论上的探讨，提出了按处理对象（图像、数据、事件）的不同来相应开发 GIS 软件的通用型、专用型空间分析模型，分别采用“内

嵌”或“外挂”的途径予以结合，并通过实际的空间分析模型的建立，说明此种方法可以有效地解决时间、资金与人力资源地矛盾，具有很高地实用价值。

赖格英（2003）从地理信息系统应用中的薄弱环节着手，分析了空间分析模型在GIS 中的重要性和必要性，并对目前 5 种常用的空间分析模型的实现方法进行了分析和比较。

马天智等（2003）从地理信息处理系统的功能入手，分析了空间分析、应用模型和GIS 的关系，并提出加强应用模型与 GIS 的结合以及增强 GIS 的基本空间分析功能是增强 GIS 整体功能的两个比较行之有效的方法。王文慧等（2003）对 GIS 的空间分析技术的具体理论和实现进行了研究，系统地阐述了查询与量算、属性数据分析、空间叠置分析、空间接近度分析、网络分析等技术和方法，并探讨分析了 GIS 空间分析技术在车辆定位管理系统和公安系统中的应用。

杨驰（2006）分析了 GIS 中空间分析功能的现状和空间分析模型与 GIS 集成的研究现状，并对模型库进行了深入的剖析，提出了在 GIS 环境中建模的一些构想。

2. GIS 空间分析的应用

在交通设计管理领域，吴建华等（2004）探讨在电子海图中，使用 GIS 空间分析方法自动判断航线的偏航极限范围内是否存在危险点、线、面，为航线设计提供决策支持，并航路进行实时监视；徐京华（2004）基于 GIS 和 GIS－T 技术和方法，对交通网的主要空间特征分析、交通网地理背景信息分析以及分析技术等问题进行了研究，并通过实验证明了基于 GIS 的交通地理信息空间分析技术与方法具有及时、高效、准确等优越性；王明生等（2005）利用基于地理信息系统的铁路工程勘测设计空间数据库和地理信息系统强大的空间分析能力，量化影响铁路选线设计的各种因素。

在城市规划领域，韩勇等（2004）分析了基于 GIS 空间分析的城市地下管线的数据库结构，建立了空间分析模型，实现了城市地下管线的可视化和动态化管理；柯新利（2005）从数字城市的基本知识出发，分析了数字城市和城市地理信息系统之间的关系，并通过城市扩展现象的空间分析，预测其未来趋势，为城市可持续发展服务；钟凯文（2006）利用 GIS 的空间分析功能，在分析城市人防工程的 E-R 模型的基础上，提出了基于空间分析的城市人防工程的数据库结构，并以此建立了空间分析模型，阐述了模型的表示内容和实现方法。

在能源勘察评价领域，廖崇高等（2002）介绍了用于区域地质找矿的方法，并结合区域地质特征，选取了多源成矿预测的空间信息数据源，并利用 GIS 的空间分析功能进行多源信息的综合分析，预测成矿区域；施冬等（2004）以 GIS 的空间数据分析为手段，利用 GIS 的特征提取与特征合并功能，提取隐含在地质、地球物理及测试等数据中的判别有利储层的特征信息。

在商业应用领域，陈彦军等（2004）研究了 GIS 空间分析中的 voronoi 图和 TSP 两个模型在物流配送中的应用，并通过实例探讨了应用 GIS 空间分析模型在物流配送中的实现方法及过程；谢华等（2004）针对交通规划的特点，介绍了一种基于最优化原理和

GIS 空间分析方法的交通站点规划方法。

在土地管理与规划领域，朱会义等（2001）结合土地利用变化的实例分析，从数据、模型、数据处理等方面详细阐述了 GIS 空间分析方法在土地利用变化研究中的应用。

在生态环境保护领域，任鸿昌等（2004）利用 GIS 空间分析方法、遥感技术和统计手段，结合西部荒漠化地区的遥感资料，对中国荒漠生态系统的空间分布格局进行了详细的分析。

纵观众多学者的研究，可以看出空间分析的现状为：

1. 空间分析技术起步较晚，但由于涉及较广，目前尚未系统化。

2. 各领域进行空间分析通常有两种方法：一种是分析非空间特性的数据并依据地理空间来解释其结果，另一种是对物体的空间位置和联系进行分析。

3. 目前国内外大多数GIS产品的空间分析功能尚不能也很难满足各行各业的应用需求。大型的 GIS 平台（如 Arc/Info 等）狭义空间分析功能较强，产品相应较为完善，但性价比较高；而中小型的 GIS 平台（Arcview, Titan, MapInfo 等）吸引了大量用户，但空间分析功能较弱。

在上述研究的基础上，本文提出的 GIS 空间分析技术及其具体方法的实现，综合运用空间分析模型及建模和空间分析的多种开发手段，在应用上有着迫切的需求。

1.4 研究的主要内容

1.4.1 研究内容

本文试图在研究现有的空间数据模型、空间数据结构、GIS 空间分析理论和技术的基础上，对 GIS 空间分析方法及其实际应用进行深入研究，研究的主要内容有：

1. 对空间数据、空间数据模型、空间数据结构和空间数据索引进行分析研究，探讨空间数据的特征、各种空间数据模型以及空间数据模型的研究趋势，讨论各种空间数据结构，研究空间数据索引的方法，为后文 GIS 空间分析的研究奠定基础。

2. 分析 GIS 空间分析的基本方法，探讨空间分析过程、空间分析模型以及空间分析模型与 GIS 的集成方式，研究空间分析模型的建模方法，使用图解建模法设计空间分析模型，并结合实例对空间分析模型的实现和实际应用进行研究和探讨。

3. 研究空间分析的基本方法的实现，提出其实现的基本算法，对空间查询的算法进行优化，分析比较缓冲区分析的两种实现算法并分别对其进行改进。在此基础上，基于 ArcGIS Engine 技术探讨了 GIS 空间分析二次开发过程，设计并实现了空间查询、空间关系分析、缓冲区分析、空间统计分类分析等功能。

4. 结合以上的设计和研究，运用 Visual C++开发 GIS 空间分析模块，实现 GIS 空间分析的各种功能。

1.4.2 论文章节安排

根据本文的研究内容，将本文安排为六章，如图 1-2 所示。各章内容分别为：

第1章， 论文引言，主要介绍空间分析的基本概念和相关知识，提出本文的研究目标和研究内容。

第2章， 主要介绍空间数据特征、空间数据模型、空间数据结构和空间数据索引等相关背景知识。

第3章， 着重探讨了空间分析建模及实现。主要研究空间分析的基本方法，探讨了空间分析过程、空间分析模型、空间分析模型与 GIS 的集成方式和空间分析建模方法，设计空间分析模型，并结合实例对空间分析模型的实现和实际应用进行了研究和探讨。

第4章， 给出了空间分析基本方法的实现算法，并对空间查询和缓冲区分析的实现方法进行改进和优化，最后探讨了基于 ArcGIS Engine 技术的 GIS 空间分析常用功能的实现。

第5章， 实例研究，给出了 GIS 空间分析的应用实例。

第6章， 对本文进行总结，回顾本文的主要研究内容，给出了几点结论，提出下一步进行的工作的研究方向。

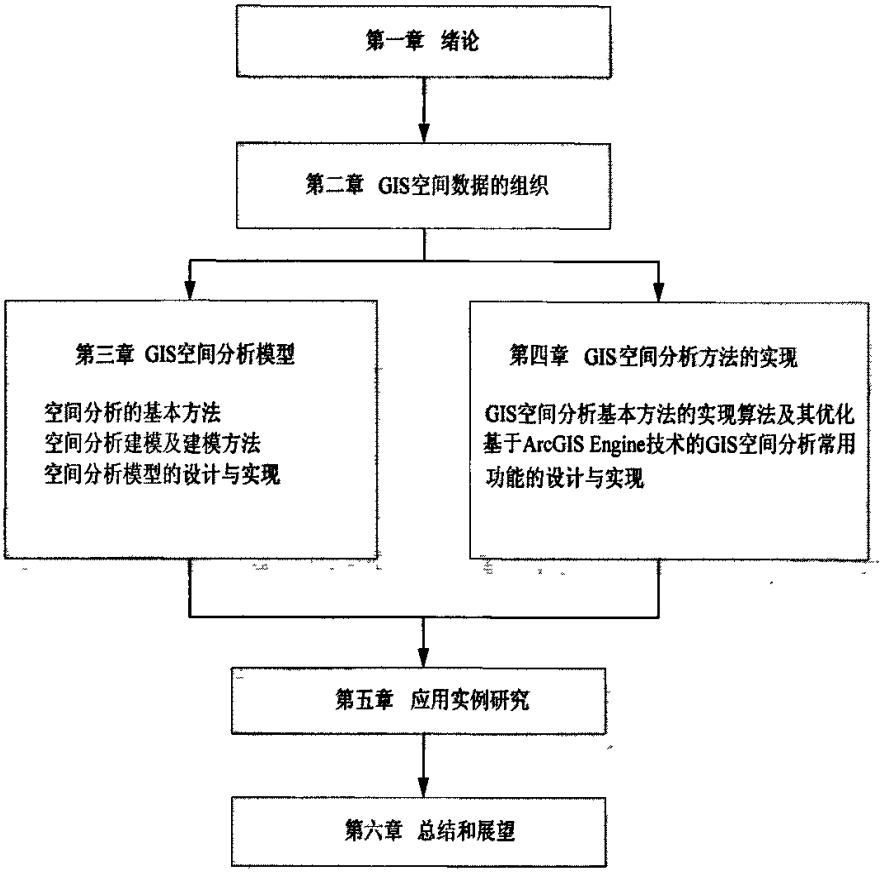


图 1-2 论文组织与章节安排

第2章 GIS空间数据的组织

在GIS中，空间数据是地理信息的载体，几乎所有GIS技术所要解决的问题都与空间数据有关。空间数据可依据它们的收集方式、存储方法、说明内容、使用目标等，用不同的数据模型进行组织。GIS空间分析的关键是在空间数据模型上建立分析模型，而空间分析模型的建立与空间数据结构息息相关。因此空间数据的组织在GIS中是个非常关键的问题，它决定着空间分析模型建立的方式。

2.1 空间数据特征

地理空间数据是符号化表示的、地球表层空间地理现象和事物的直接记录，是GIS所表达的现实世界经过模型抽象的实质性内容。它与一般计算机数据不同，有三个基本特征。

1. 空间位置特征

地理空间数据包括指明地物在地理空间中的位置的成分，它有两层含义：其一，地物本身的地理位置，位置通常用某种地理坐标（x，y，z或经纬度、高程等）或其组合来表达，也可用相对其它参照系或地物的位置来描述；其二，多个地物之间的位置相互关系，或空间关系，如地物之间的距离、相邻、相连和包含关系等。

2. 属性特征

除空间位置以外，地理空间数据还包括描述地物自然或人文属性的定性或定量指标的成分。例如，表述一个城镇居民点，若仅有位置坐标（x，y），那只是一个几何点，要构成居民点的地理空间数据，还需要其经济、社会、资源和环境等属性数据。

3. 时态特征

时态特征指地理数据采集或地理现象发生的时刻或时段。同一地物的多时段数据，可以动态地表现该地物的发展变化。若空间数据随着时间变化相对较慢，有时则被忽略。时态数据可以按时间尺度划分为短期、中期、长期和超长期等类型。

2.2 空间数据模型

空间数据模型是关于现实世界中空间实体及其相互联系的概念，它的作用是把地理信息转换成计算机能够处理的数字形式。空间数据模型包括：(1)数据类型定义。数据类型的实现不拘泥于某种实现形式，既可以是传统的结构化实现，也可以是面向对象的实现；(2)空间型关系的组织与存储形式。具有相同空间特征和非空间特征（关系属性）的空间对象在空间数据库中被组织到一起，称为空间型关系。空间型关系规定了空间特征与关系属性具体如何集成，两部分之间如何关联等细节。

一般而言，GIS 空间数据模型由概念数据模型，逻辑数据模型和物理数据模型等三个有机联系的层次所组成。其中概念数据模型是关于实体及实体间联系的抽象概念集，逻辑数据模型用来表达概念数据模型中数据实体（或记录）及其间关系，而物理数据模型则是描述数据在计算机中的物理组织、存储路径和数据库结构，三者之间的相互关系如图 2-1 所示。

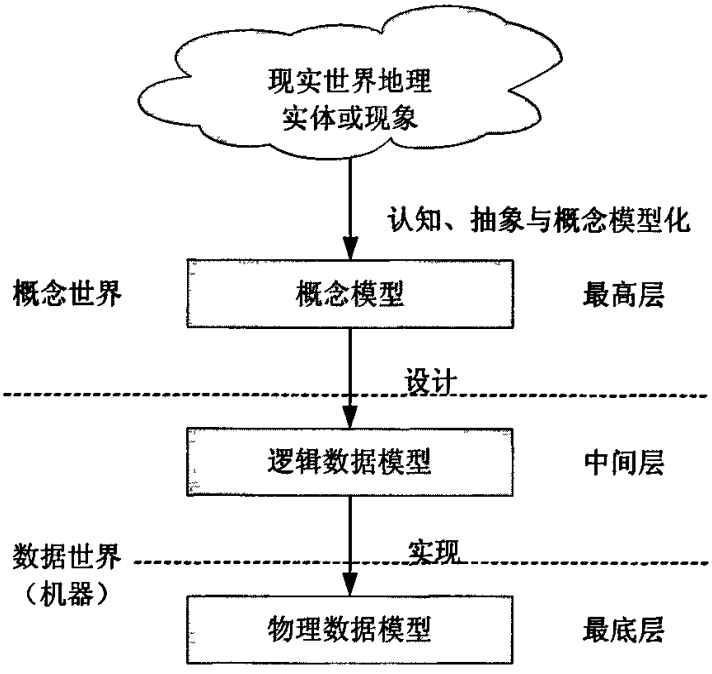


图 2-1 空间数据模型的三个层次

2.2.1 空间概念数据模型

概念数据模型是人们在计算机的环境下从不同角度出发和考虑，对现实世界中各种事物、彼此的关系及其发展过程的认识、研究和抽象的产物。具体的说，主要包括实体对象的特征描述、关系分析和过程模拟等内容。它是考虑用户需求的共性，用统一的语言描述、综合和集成各用户视图。其基本任务是，确定所感兴趣的现象和基本特性，描述实体间的相互联系，从而确定空间数据库的信息内容。从计算机系统的角度来看，它是抽象的最高层。

地球表面上的各种地理现象和物体错综复杂，用不同的方法或从不同的角度或视图认知地理空间，可能产生不同的概念模型。根据 GIS 数据组织和处理的方式，目前 GIS 空间概念数据模型大体上分为三类，即基于域（field-based）、基于对象（object-based）和基于网络（network-based）的数据模型（Jones，1997）。

1. 基于域的模型

基于域（object-based）的空间模型把地理空间的事务和现象作为连续的变量或体来看待，例如：大气污染程度、地表温度、土壤温度以及大范围空间和水域的流速和方向。

根据不同的应用，域可以表现为二维或三维。

栅格数据模型是典型的基于域的模型。栅格数据模型是基于连续铺盖（Tessellation）的，它是将连续空间离散化，即用二维铺盖或片面覆盖整个连续空间；铺盖可以分为规则的和不规则的，后者可当做拓扑多边形处理，如社会经济分区、城市街区；铺盖的特征参数有尺寸、形状、方位和间距，对同一现象，也可能有若干不同尺度、不同聚分性（Aggregation or subdivisions）的铺盖。

基于栅格的空间模型把空间看作空间单元（Cell）或像元（Pixel）的划分，每个像元都与分类或者标识的现象的一个记录有关。采用栅格模型的系统，通常都应用了分层的方法。在每个图层中栅格像元记录了特殊的现象的存在，每个像元的值表明了在已知类中现象的分类情况。

2. 基于对象的模型

基于对象（object-based）的模型将研究的整个地理空间看成一个空间域，地理实体和现象作为独立的对象分布在该空间域中，按照其空间特性分为点、线、面三种基本对象。对象也可能由其他对象构成复杂对象，并且与其他分离的对象保持着特定的关系，如点、线、面之间的拓扑关系。每个对象对应着一组相关的属性以区分出各个不同的对象，每个对象的概念视图标识单个地理现象。这些现象按照空间、时间和非空间属性以及其他现象在空间、时间和语义上的关系来描述。

矢量数据模型是典型的基于对象的空间数据模型。它以构成现实世界空间目标的边界来表达空间实体，其边界可以划分为点、线、面等几种类型，空间位置用采样点的空间坐标表达，空间实体的几何属性，如线的长度、区域间的距离等，均通过点的空间坐标来计算。根据对空间坐标数据的组织与存贮方式的不同，可以划分为拓扑数据模型（Topological Model）和非拓扑数据模型（Non Topological Model），例如面条模型（Spaghetti Model）。

在面条模型中，地物用一系列坐标串表示。这种表示记录了空间实体的形状信息，但没有考虑空间实体间的邻域关系，相邻多边形的公共边被重复存贮，其拓扑关系信息必须通过在数据文件中搜索所有实体的信息，并经过大量计算才能得出，因此难以有效地进行空间分析，但较适于制图系统。

拓扑模型是将实体间地某些拓扑关系和点、线、多边形直接存贮在表中，没有数据冗余。通过这些表，可以方便地判断线状实体的连通关系（Connectivity）和面状实体的邻接关系（Contiguity）。该模型在空间数据的组织、拓扑空间关系的表达、数据模型的拓扑一致性检验及图形恢复等方面均具有较强的能力，因而被广泛用于 GIS 软件，如 ARC/INFO，Grenamap，TIGER 等。但采用该方法构选新的拓扑空间关系时，所需的时间代价大。

矢量模型的突出优点是能方便地表达空间实体之间的拓扑空间关系，图形精度高，数据存贮最小，容易定义和操作单个目标，能方便地实现坐标变换、距离计算等操作。其缺点是缺乏与遥感及数字地面模型直接结合的能力，数据结构比较复杂，且难于处理

叠置操作。

3. 基于网络的模型

基于网络（network-based）的空间模型与基于对象模型的某些方面相同，都是描述不连续的地理现象，不同之处在于它需要考虑通过路径相互连接多个地理现象之间的相交情况。按照基于对象的观点，网络模型也可以看成基于对象的模型，它是由点对象和线对象之间的拓扑空间关系构成的。

2.2.2 空间逻辑数据模型

空间逻辑数据模型是 GIS 表示地理数据的逻辑结构，由概念模型转换而来。它是用户通过 GIS 看到的地理空间。逻辑数据模型的建立既要考虑用户容易理解，又要考虑便于实现，易于转换成物理数据模型。将所选用的概念模型转换为逻辑模型，除去经典的地学关系（ARC/INFO、MGE 等采用）等模型外，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、时空数据模型、Voronoi 动态空间数据模型、三维空间数据模型、分布式空间数据模型和基于超图模型的空间数据模型。

1. 面向对象数据模型

面向对象的数据模型采用面向对象的技术，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。利用面向对象的数据模型可完成三维空间数据模型、时态空间数据模型等模型的初步定义。

2. 分布式空间数据模型

分布式空间数据模型是网络环境中各场地（Site）或节点（Node）上数据集的逻辑集合。它是一组结构化的数据集合，逻辑上属于同一系统，而物理上分布在网络的不同节点上，具有分布性和逻辑协调性的特点。分布性是指数据不是存放在单一场地为单个计算机配置的存储设备上，而是按全局需要将数据划分成一定结构的数据子集，分散地存储在各个场地（节点）上。逻辑协调性是指各场地上的数据子集，相互间由严密的约束规则加以限定，而在逻辑上是一个整体。分布式空间数据模型是适合地理空间信息特点的、可运行的、按分布式数据模型方式存储和维护数据，并向应用的网络环境系统提供空间数据和信息的分布式系统。目前的主要成果是关于万维网GIS的实现方法的研究。

3. 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。中国学者崔伟宏教授在此领域作出了创造性的研究工作。

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。对超图模型空间类、对象、类属性、对象属性和类关系、对象关系的基本刻划可应用基于特征 GIS 的理论和方法。超图理论和超图结构（HBDS）用于 GIS 空间数据建模是近

些年的热门研究方向，已取得了大量的理论研究成果和一些应用成果。经典的超图数据结构是建立在超图理论和集合论的基础上，超图理论是超图模型的理论基础，集合论则是超图数据结构关系的基础。超图数据结构除去表现纵向的层次结构以外，其最大特点是同时展现复杂的横向非层次关系。

2.2.3 物理数据模型

空间逻辑数据模型并不涉及最底层的物理实现细节，众所周知，必须将空间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、空间存取方法等。物理数据模型是概念模型在计算机内部具体的存储形式和操作机制，它通过一定的数据结构，完成空间数据的物理组织、空间存取及索引方法的设计，实现对专题信息的操作，完成几何数据模型与专题、语义数据模型的关联。

2.2.4 空间数据模型研究的趋势

数据模型原始设计的主要动机是构建一个能够用真实世界抽象提取来代表该真实世界的模型。但是很难设想，用一个总目标的数据模型来适应各种情况。例如：某些空间数据模型对于空间分析来说效率却十分低；有些数据模型对于空间分析是有利的。

根据空间数据模型的设计研究的现状进行分析，归纳起来大体可以分为两个趋势，即综合性模型和定向性模型。

综合性模型设计的代表人物是 F.Bouille。他认为数据模型设计应该包括所有能够指出的实体及其相关关系。他提出了现象结构的新概念，或者称为以现象为基础的设计（Phenomennon Based Design）。所谓现象结构，实质上就是真实世界的综合代表，因此这种结构的设计是比较复杂的。但是，在理论上，它得到了超图数据结构的支持，具有较高的效率，因而尽管复杂，但仍然得到广泛的重视。

定向性模型的代表人物是 Mark。他认为，数据模型的设计应该着眼于应用目标，在模型设计时只包括与应用目标有关的实体及其相关关系，这种设计称之为倾向于最小复杂性研究。

上述两种观点，两种模型代表了当前数据模型研究的两种倾向。总的来说，一个模型如果越能代表真实、越灵活，就越具有应用潜力。同时，如果一个模型越适合于应用目标、越单一，就越能充分利用计算机的存贮空间，也就越有效率。

2.3 空间数据结构

空间分析建模选定一种空间数据模型后，可通过不同的空间数据结构来实现。空间数据结构是指对空间数据进行合理的组织，以便进行计算机处理。空间数据结构提供了为空间数据模型而定义的操作，并将之映射到数据结构特定的代码上。空间数据结构是存储结构与相关操作的低层次的描述，重点在于如何达到所要求的效果。空间数据模型

与空间数据结构的关系如图 2-2 所示。

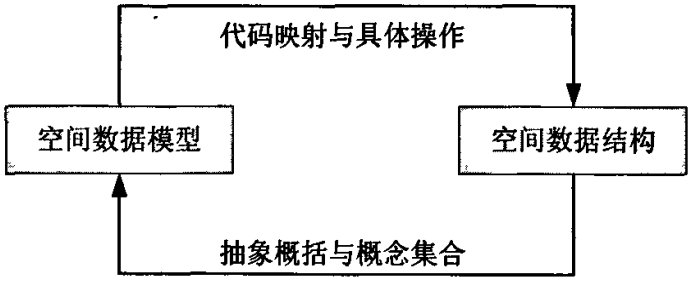


图 2-2 空间数据模型与空间数据结构的关系

2.3.1 栅格数据结构

栅格数据结构：以规则的像元阵列来表示空间地物或现象的分布的数据结构,其阵列中的每个数据表示地物或现象的属性特征。栅格数据结构就是像元阵列，用每个像元的行列号确定位置，用每个像元的值表示实体的类型、等级等属性编码。

点实体：表示为一个像元，如图 2-3（a）。线实体：表示为在一定方向上连接成串的相邻像元的集合，如图 2-3（b）。面实体：表示为聚集在一起的相邻像元的集合，如图 2-3（c）。

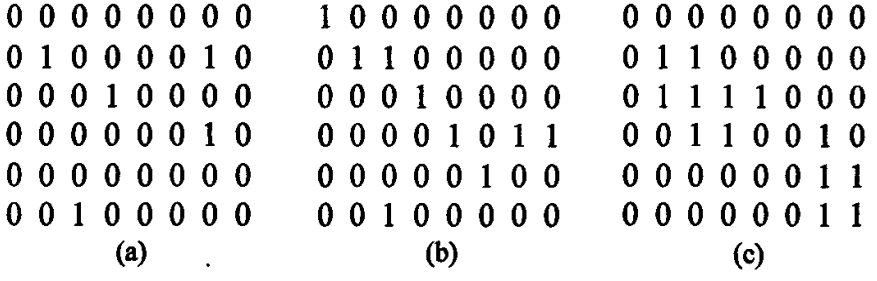


图 2-3 栅格数据结构。(a) 点实体；(b) 线实体；(c) 面实体

栅格数据表示的是二维表面上的地理数据的离散化数值。在栅格数据中，地表被分割为相互邻接、规则排列的矩形方块（也可以是三角形、六边形等），每个地块与一个像元相对应，如图 2-4 所示。因此，栅格数据的比例尺就是栅格（像元）的大小与地表相应单元的大小之比，当像元所表示的面积较大时，对长度、面积等的量测有较大影响。每个像元的属性是地表相应区域内地理数据的近似值，因而有可能产生属性方面的偏差。

栅格数据记录的是属性数据本身，而位置数据可以由属性数据对应的行列号转换为相应的坐标。栅格数据的阵列方式很容易为计算机存储和操作，不但很直观，而且易于维护和修改。由于栅格数据的数据结构简单，定位存取性能好，因而在 GIS 中可与影像数据和 DEM 数据进行联合空间分析。

栅格数据的获取方式通常有：来自于遥感数据、对图片的扫描、由矢量数据转换而

来（通过运用矢量数据栅格化技术，把矢量数据转换成栅格数据。这种情况通常是为了有利于 GIS 中的某些操作，如叠加分析等，或者是为了有利于输出）及由手工方法获取。其中手工获取是在专题图上均匀划分网格，逐个网格地确定其属性代码的值，最后形成栅格数据文件。

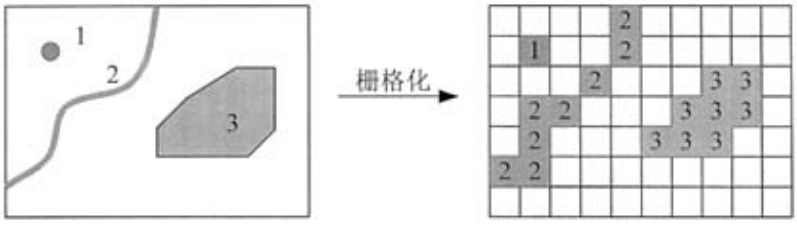


图 2-4 栅格数据的图形表示

栅格数据结构的表示：将栅格数据看做一个数据矩阵，逐行（或逐列）记录代码，可以每行都从左到右记录，也可以奇数行从左到右，偶数行从右到左。这种记录栅格数据的文件常称为栅格文件，且常在文件中存有该栅格数据的长和宽，即行数和列数。这样，具体的像元值就可连续存储了。其特点是处理方便，但没有压缩。由于地理数据往往有较强的相关性，也就是说相邻像元的值往往是相同的。因此，为了节省存储空间，需要进行栅格数据的压缩存储。

2.3.2 矢量数据结构

矢量数据结构是通过坐标值来精确地表示点、线、面等地理实体的。矢量数据结构可以表示现实世界中各种复杂的实体，当问题可描述成线和边界时，特别有效。矢量数据冗余度低，结构紧凑，并具有空间实体的拓扑信息，便于深层次分析。矢量数据的输出质量好，精度高。

获取矢量数据的方式有多种形式。由测量获得：可利用测量仪器自动记录测量成果（常称为电子手簿），然后转到地理数据库中；由栅格数据转换获得：利用栅格数据矢量化技术，把栅格数据转换为矢量数据；跟踪数字化：用跟踪数字化的方法，把地图变成离散的矢量数据。

在 GIS 中，矢量数据表示应考虑的问题：(1)矢量数据自身的存储和处理；(2)与属性数据的联系；(3)矢量数据之间的空间关系（拓扑关系）。

1. 简单数据结构

矢量数据的简单数据结构没有拓扑关系，主要用于矢量数据的显示、输出以及一般的查询和检索，可分别按点、线、面三种基本形式来描述。

(1) 点的矢量数据结构

点的矢量数据结构可由标识码、X 坐标和 Y 坐标组成。标识码通常按一定的原则编码，简单情况下可顺序编号。标识码具有惟一性，是联系矢量数据和与其对应的属性数据的关键字，属性数据单独存放在数据库中。

在点的矢量数据结构中也可包含属性码，这时其数据结构为：标识码、属性码、X坐标和Y坐标。属性码通常把与实体有关的基本属性（如等级、类型、大小等）作为属性码，属性码可以有一个或多个。X坐标和Y坐标是点实体的定位点，如果是有向点，则可以有两个坐标对。

(2) 线（链）的矢量数据结构

线（链）的矢量数据结构可表示为：标识码、坐标对数n、X坐标和Y坐标。标识码的含义与点的矢量数据结构相同。同样，在线的矢量数据结构中也可含有属性，如表示线的类型、等级、是否要加密、光滑等。坐标对数n指构成该线（链）的坐标对的个数。X, Y坐标串是指构成线(链)的矢量坐标，共有n对。也可把所有线（链）的X、Y坐标串单独存放，这时只要给出指向该链坐标串的首地址指针即可。

(3) 面（多边形）的数据结构

面的矢量数据结构可以像线的数据结构一样表示，只是坐标串的首尾坐标相同。这里自链索引编码的面（多边形）的矢量数据结构，可表示为：标识码、链数n和链标识码集。标识码的含义同点和线的矢量数据结构，在面的矢量数据结构中也可含有属性码。链数n指构成该面（多边形）的链的数目。链标识码集指所有构成该面（多边形）的链的标识码的集合，共有n个。

这样，一个面（多边形）就可由多条链构成，每条链的坐标可由线（链）的矢量数据结构获取。这种方法可保证多边形公共边的唯一性；但多边形的分解和合并不易进行；邻域处理比较复杂，需追踪出公共边；在处理“洞”或“岛”之类的多边形嵌套问题时较麻烦，需计算多边形的包含等。

2. 拓扑数据结构

建立拓扑关系是一种对空间结构关系进行明确定义的数学方法。具有某些拓扑关系的矢量数据结构就是拓扑数据结构，拓扑数据结构是GIS的分析和应用功能所必需的。拓扑数据结构的表示方式没有固定的格式，也还没有形成标准，但基本原理是相同的。

(1) 拓扑元素

点（结点）：孤立点、线的端点，面的首尾点，链的连接点等。线（链、弧段、边）：两结点间的有序弧段。面（多边形）：若干条链构成的闭合多边形。

(2) 最基本的拓扑关系

关联：不同拓扑元素之间的关系。如结点与链，链与多边形等。

邻接：相同拓扑元素之间的关系。如结点与结点，链与链，面与面等。邻接关系是借助于不同类型的拓扑元素描述的，如面通过链而邻接。在GIS的分析和应用功能中，还可能用到其他拓扑关系，如：包含关系：面与其他拓扑元素之间的关系。如果点、线、面在该面内，则称被该面包含。如某省包含的湖泊、河流等。连通关系：拓扑元素之间的通达关系。如点连通度，面连通度的各种性质及相互关系。层次关系：相同拓扑元素之间的等级关系。

(3) 拓扑关系的表示

拓扑数据结构的关键是拓扑关系的表示，而几何数据的表示可参照矢量数据的简单数据结构。在目前的 GIS 中，主要表示基本的拓扑关系，而且表示方法不尽相同。

面-链关系：面、构成面的链；链-结点关系：链、链两端点的结点；结点-链关系：结点、通过该结点的链；链-面关系：链、左面及右面。

在图 2-5 中，有面 A，B，C，D，E；有链 L_1，L_2，L_3，L_4，L_5，L_6，L_7，L_8，L_9，L_{10}，L_{11}，L_{12}；有结点 P_1，P_2，P_3，P_4，P_5，P_6，P_7。则其拓扑关系可以这样描述：每个面由多条链构成，每条链由两个结点连接，每个结点至少连接了三条链，而链的两边是面。

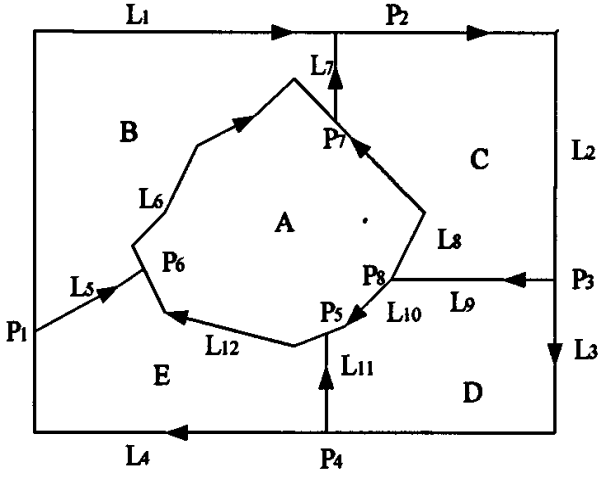


图 2-5 拓扑数据结构

2.3.3 矢量和栅格数据结构的比较

1. 矢量和栅格数据结构总体比较

矢量结构和栅格结构是利用计算机形象表现客观世界的两种基本方式，二者互相补充，相辅相成。矢量结构力图精确而简明地表达人类对地理空间事物简化抽象的结果，即点、线和多边形空间对象的轮廓，具有天然的精练性，以及为了保证准确、精练而带来的结构复杂性。栅格结构的基点是从某种（属性）角度，用简单规整的格网来模拟空间景观的整体形象，数据量大而结构简单，但抽象和简明地表达主要空间对象及空间关系的能力不够强。

矢量和栅格数据结构的表现手法和总体效果也正好相反：矢量结构的数据的空间位置坐标取值可以是任意的、连续的，但表达的空间形象是分立空间对象组成的画面，即总体效果是不连续的；而栅格结构的数据取值方式是不连续的、分立的，但总体表达效果却可以是连续的，表现为照片般的空间图像。

2. 矢量和栅格数据结构具体优缺点比较

对矢量和栅格数据结构的优缺点做一个较全面的分析比较，如表 2-1 所示。

表2-1 矢量和栅格数据结构的比较

	矢量数据结构	栅格数据结构
优点	①表示地理数据的的精度较高	①数据结构简单
	②严密的数据结构，数据量小	②易于进行空间分析
	③用网络连接法能完整地描述拓扑关系	③空间数据地叠置和组合十分容易方便
	④图形输出精确美观	④数据模拟方便
	⑤图形数据和属性数据更新、综合都能够实现	
	⑥它是面向目标的，能表达属性编码，能方便地记录每个目标的具体属性描述信息	
缺点	①数据结构复杂	①图形数据量大
	②矢量多边形的叠置算法比较复杂	②用大像元减少数据量，精度和信息受损
	③数学模拟比较困难	③地图输出不精美
	④技术复杂，特别是要求高的软硬件	④难以建立网络连接关系
		⑤投影变换花的时间多

2.3.4 矢量栅格一体化数据结构

矢栅一体化数据结构理论上是较为理想的，但这需要增加存储空间和处理时间。一种更好的方法是建立同时具有矢量和栅格两种特性的一体化数据结构。

矢量数据结构的复杂性，导致了操作和算法的复杂化。作为一种基于线和边界的编码方法，不能有效地支持影像代数运算，如不能有效地进行点集的集合运算，运算效率低而复杂。由于矢量数据结构的存储比较复杂，导致空间实体的查询十分费时，需要逐点、逐线、逐面地查询。矢量数据和栅格表示的影像数据不能直接运算，交互时必须进行矢量和栅格转换。矢量数据与DEM的交互是通过等高线来实现的，不能与DEM直接进行联合空间分析。

栅格数据的数据量与格网间距的平方成反比，较高的几何精度的代价是数据量的极大增加。因为只使用行和列来作为空间实体的位置标识，故难以获取空间实体的拓扑信息，难以进行网络分析等操作。栅格数据结构不是面向实体的，各种实体往往是叠加在一起反映出来的，因而难以识别和分离。对点实体的识别需要采用匹配技术，对线实体的识别需采用边缘检测技术，对面实体的识别则需采用影像分类技术，这些技术不仅费时，而且不能保证完全正确。

通过以上的分析可以看出，矢量数据结构和栅格数据结构是互补的，为了有效地实现 GIS 中的各项功能（如与遥感数据的结合，有效的空间分析）等，需要同时使用两种数据结构，并在 GIS 中实现两种数据结构的高效转换。

2.4 空间数据索引

空间管理的主要目的就是能够实现快速检索，这通过采用索引和排序实现。现在的辅助储存器是线性结构的，只适合储存一维数据。一维数据的访问方法比较成熟，如线性哈希表及二叉树。但是在保存空间关系的前提下，不存在空间对象的完全顺序结构，也就是说，不存在从两维或多维空间到一维空间的映射，而在高维数据中相邻的两个对象在一维的储存序列中也是相邻的，这使得设计高效的空间访问方法更困难。

空间索引就是指依据空间对象的位置和形状或空间对象之间的某种空间关系按一定的顺序排列的一种数据结构。作为一种辅助性的空间数据结构，空间索引介于空间操作算法和空间对象之间，通常的空间数据索引方法是使用近似的概念，索引结构管理一个或多个较空间对象简单的几何对象键值。首先选择对象的一种近似作为索引的快速过滤，最常用的是最小边界矩形（MBR），然后对过滤得到的对象与查询条件进行精确匹配。索引只管理对象的 MBR 及指向数据库对象描述的指针。这种索引得到的只是检索结果的候选集合，它还需要另一个精确匹配的判定过程。

目前存在的空间数据索引方法超过 50 种，这些方法中很多只有细微差别，绝大多数是从 B 树、哈希表、K-D 树改进而来的，还没有一种方法能够证明自身优于其他方法。各种方法的性能没有明显的差别，简单与稳定性是商业产品实现选择的首要因素，典型的是 SICAD、Smallworld GIS 中的四叉树、BSP 树、KDB 树、R 树、R+树、CELL 树等。下面只介绍 R 树。

R 树是一个类似于 B 树的高度平衡树，它是根据实际数据对象的最小边界矩形建立的，可以直接对空间中占据一定范围的空间对象进行索引，图 2-6 为一个 R 树的矩形分层结构。R 树的每一个节点对应所需访问的磁盘页 D（N）和区域 I（N），非叶节点的所有子节点的区域都在区域 I（N）的范围内，而且存储在磁盘页 D（N）中；叶节点的索引记录中包含指向实际数据对象的指针。R 树索引结构是完全动态的，它的插入、删除可以和搜索交叉进行，而无需周期性的重新组织。

空间数据库是空间对象的集合，每个对象都有唯一的标识符用于数据检索。在 R 树中，叶节点的索引记录形式为（object-identifier，MBR），其中 MBR 为包围该记录的最小边界矩形，obiect-identifier 是对象标识符，指向空间数据库的实际空间对象；非叶节点中，索引记录形式为（child-pointer，MBR），child-pointer 为指向 F 一层节点的指针，MBR 为覆盖以下节点所包含的所有矩形的最小矩形。

R 树中每个节点所能拥有的子节点数目是有上下限的。下限保证索引对磁盘空间的有效利用，子节点的数目小于下限的节点将被删除，该节点的子节点将被分配到其他的

节点中；而上限则规定每个磁盘页所能拥有的最大节点数，如果某个节点要求的空间大于一个磁盘页，那么该节点就要被分裂为两个新的节点，原来节点的所有子节点将被分配到这两个新的节点中。令 M 为一个节点中记录数目最大值，m≤M/2 为一个节点记录的最小值（它可作为调节树结构的一个可变参数），R 树满足以下特性：

1. 每个叶节点包含n～M个索引记录(根节点除外)，对叶节点中的每个索引记录，MBR是空间包围object-identifier所指元组所表示的空间对象的最小矩形。

2. 每个非叶节点有m～M个子树，非叶节点的每个记录中，MBR是空间包child-pointer所指的子节点中所有矩形的最小矩形。

3. 根节点至少有两个子女。

4. 所有的叶节点出现在同一层上。

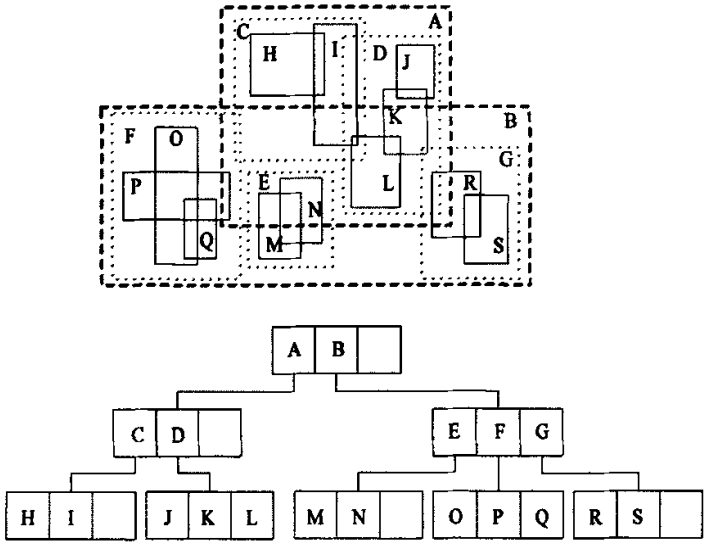


图 2-6 R 树空间索引示意图

第 3 章 GIS 空间分析模型

3.1 空间分析基本方法

GIS 空间分析的内涵极为丰富，这里将从空间查询、空间量测、叠置分析、缓冲区分析、网络分析、空间统计分类分析等几个方面对空间分析的基本方法逐一介绍。

3.1.1 空间查询

图形与属性互查是最常用的查询，主要有两类：第一类是按属性信息的要求来查询定位空间位置，称为“属性查图形”。这和一般的非空间的关系数据库的 SQL 查询没有区别，查询到结果后，再利用图形和属性的对应关系，进一步在图上用指定的显示方式将结果定位绘出。第二类是根据对象的空间位置查询有关属性信息，称为“图形查属性”。该查询通常分为两步，首先借助空间索引，在地理信息系统数据库中快速检索出被选空间实体，然后根据空间实体与属性的连接关系即可得到所查询空间实体的属性列表。

在大多数 GIS 中，提供的空间查询方式有：

1. 基于空间关系查询。
2. 基于空间关系和属性特征查询。
3. 地址匹配查询。

3.1.2 空间量测

1. 几何量算

几何量算对点、线、面、体四类地物而言，其含义是不同的。

(1) 点状地物（0 维）：坐标。

(2) 线状地物（一维）：长度、曲率、方向。

(3) 面状地物（二维）：面积、周长、形状等。

(4) 体状地物（三维）：体积、表面积等。

一般的 GIS 软件都具有对点、线、面状地物的几何量算功能，或者是针对矢量数据结构，或者是针对栅格数据结构的空间数据。

2. 形状量算

对目标地物形状的量测一般有两个方面：空间一致性问题，即有孔多边形和破碎多边形的处理；多边形边界特征描述问题。

度量空间一致性最常用的指标是欧拉函数，用来计算多边形的破碎程度和孔的数目。关于多边形边界描述的问题，由于目标地物的外观是复杂多变的，很难找到一个准确的指标量对其进行描述。最常用的指标包括多边形长、短轴之比、周长面积比、面积

长度比等。绝大多数指标是基于面积和周长的，对目标地物属紧凑型的或膨胀型的判断极其模糊。对于一个标准的圆形地物既非紧凑型也非膨胀型，则可以定义其形状系数 r 为：

$$r = \frac{P}{2\sqrt{\pi}\cdot\sqrt{A}} \tag{3.1}$$

其中：P 为目标地物周长，A 为目标地物面积。

如果 r<1，目标地物为紧凑型；r = 1，目标地物为标准圆；r >1，目标地物为膨胀型。

3. 质心量算

描述地理对象空间分布的一个重要指标是目标的质心位置。质心通常为一个多边形或面的几何中心，但在某些情况下，质心描述的是分布中心。质心是目标保持均匀分布的平衡点，它可以被赋予权重系数，计算公式为：

$$X_G = \frac{\sum_i W_i X_i}{\sum_i W_i}$$

$$Y_G = \frac{\sum_i W_i Y_i}{\sum_i W_i} \tag{3.2}$$

其中，i 为离散目标物，W_i 为该目标权重，X_i，Y_i 为离散目标物的坐标。

质心量算经常用于宏观经济分析和市场区位选择，还可以跟踪某些地理分布的变化，例如人口变迁、土地类型的变化等，也可以简化某些复杂目标。

4. 距离量算

在 GIS 中，距离通常是两个地点之间的计算，最常用的距离概念是欧氏距离，无论是矢量结构，还是栅格结构都很容易实现。

对于描述点、线、面坐标的矢量结构，有不同的距离概念。欧氏距离通常用于计算两点的直线距离，即

$$d = \sqrt{(X_i - X_j)^2 + (Y_i - Y_j)^2} \tag{3.3}$$

当有障碍或阻力存在时，两点之间的距离就不是直线距离，计算非标准欧氏距离的公式为：

$$d = \left[(X_i - X_j)^k + (Y_i - Y_j)^k\right]^{1/k} \tag{3.4}$$

当 k = 2 时，就是欧氏距离计算公式。当 k = 1 时，得到的距离称为曼哈顿距离。

3.1.3 叠置分析

叠置分析是将两层或多层地图要素进行叠加产生一个新要素层的操作，其结果将原来要素通过分割或合并等生成新的要素，新要素综合了原来两层或多层要素所具有的属性。叠置分析不仅包含空间关系的比较，还包含属性关系的比较。

1. 点与多边形叠加

点与多边形叠加，实际上是计算多边形对点的包含关系。叠加的结果是为每点产生一个新的属性。通过叠加可以计算出每个多边形类型里有多少个点，以及这些点的属性信息。

2. 线与多边形叠加

将线状地物层和多边形图层相叠，比较线坐标与多边形坐标的关系，以确定每条弧段落在哪个多边形内，多边形内的新弧段以及多边形其他信息。

3. 多边形叠加

这个过程是将两个或多个多边形图层进行叠加产生一个新多边形图层的操作，其结果将原来多边形要素分割成新要素，新要素综合了原来两层或多层的属性，一般有三种多边形叠置。

(1) 多边形之和（UNION）：输出保留了两个输入的所有多边形。

(2) 多边形之交（INTERSECT）：输出保留了两个输入的共同覆盖区域。

(3) 多边形叠合（IDENTITY）：以一个输入的边界为准，而将另一个多边形与之相匹配，输出内容是第一个多边形区域内两个输入层所有多边形。

3.1.4 缓冲区分析

缓冲区分析是针对点、线、面实体，自动建立其周围一定宽度范围以内的缓冲区多边形。缓冲区的产生有三种情况：一是基于点要素的缓冲区，通常以点为圆心、以一定距离为半径的圆；二是基于线要素的缓冲区，通常是以线为中心轴线，距中心轴线一定距离的平行条带多边形；三是基于面要素多边形边界的缓冲区，向外或向内扩展一定距离以生成新的多边形。

3.1.5 网络分析

对地理网络（如河网、交通网络等）、基础设施网络（如各种网线、供排水管线等）进行地理分析和模型化，是GIS中网络分析功能的主要目的。网络分析的根本目的是研究、筹划一项工程如何安排，并使其运行效果最好，如一定资源的最佳分配，从一地到另一地的运输费用最低等。其基本思想是在于人类活动总是趋向于按一定目标选择达到最佳效果的空间位置。这类问题在生产、社会、经济活动中不胜枚举，因此研究此类问题具有重大意义。

网络分析中的主要几种分析方法如下：

1. 路径分析

(1) 静态求最佳路径：由用户确定权值关系后，即给定每条弧段的属性，当需求最佳路径时，读出路径的相关属性，求最佳路径。

(2) 动态分段技术：给定一条路径由多段联系组成，要求标注出这条路上的公里点或要求定位某一公路上的某一点，标注出某条路上从某一公里数到另一公里数的路段。

(3) N条最佳路径分析：确定起点、终点，求代价较小的几条路径，因为在实践中往往仅求出最佳路径并不能满足要求，可能因为某种因素不走最佳路径，而走近似最佳路径。

(4) 最短路径：确定起点、终点和所要经过的中间点、中间连线，求最佳路径。

(5) 动态最佳路径分析：实际网络分析中权值是随着权值关系式变化的，而且可能会临时出现一些障碍点，所以往往需要动态地计算最佳路径。

2. 地址匹配

地址匹配实质是对地理位置地查询，它涉及到地址地编码（Geocode）。地址匹配与其它网络分析功能结合起来可以满足实际工作中非常复杂地分析要求。

3. 资源分配

资源分配网络模型由中心点（分配中心）及其状态属性和网络组成。分配有两种方式，一种是由分配中心向四周输出，另一种是由四周向中心集中。这种分配功能可以解决资源的有效流动和合理分配。其在地理网络中的应用与区位论中的中心地理论类似。常用的算法是P中心模型。

3.1.6 空间统计分类分析

多变量统计分析主要用于数据分类和综合评价。数据分类方法是地理信息系统重要的组成部分。一般说地理信息系统存储的数据具有原始性质，用户可以根据不同的实用目的，进行提取和分析，特别是对于观测和取样数据，随着采用分类和内插方法的不同，得到的结果有很大的差异。因此，在大多数情况下，首先是将大量未经分类的数据输入信息系统数据库，然后要求用户建立具体的分类算法，以获得所需要的信息。

1. 主成分分析

地理问题往往涉及大量相互关联的自然和社会要素，众多的要素常常给模型的构造带来很大困难，同时也增加了运算的复杂性。主成分分析是通过数理统计分析，将众多要素的信息压缩表达为若干具有代表性的合成变量，这就克服了变量选择时的冗余和相关，然后选择信息最丰富的少数因子进行各种聚类分析，构造应用模型。

2. 层次分析法

层次分析（Analytic Hierarchy Process,AHP）法是系统分析的数学工具之一。在分析涉及大量相互关联、相互制约的复杂因素时，各因素对问题的分析有着不同程度的重

要性，决定它们对目标重要性的序列，对建立模型十分重要。AHP 方法把相互关联的要素按隶属关系分为若干层次，请有经验的专家对各层次各因素的相对重要性给出定量指标，利用数学方法，综合专家意见给出各层次各要素的相对重要性权值，作为综合分析的基础。

3. 系统聚类分析

系统聚类是根据多种地学要素对地理实体进行划分类别的方法，对不同的要素划分类别往往反映不同目标的等级序列。系统聚类一般根据实体间的相似程度，逐步合并若干类别，其相似程度由距离或者相似系数定义，主要有绝对值距离、欧氏距离、切比雪夫距离、马氏距离，兰氏距离等。

4. 判别分析

判别分析与聚类分析同属分类问题，所不同的是，判别分析是预先根据理论与实践确定等级序列的因子标准，再将待分析的地理实体安排到序列的合理位置上。对于诸如水土流失评价、土地适宜性评价等有一定理论根据的分类系统定级问题比较适用。判别分析依其判别类型的多少与方法的不同，可分为两类判别、多类判别和逐步判别等。常用的判别分析有距离判别法、Bayes 最小风险判别、费歇准则判别等等。

3.2 空间分析建模方法

3.2.1 空间分析过程

空间分析是基于地理对象的位置和形态特征的空间数据分析技术，其目的在于提取和传输空间信息。GIS 提供一系列的空间分析工具，用户通过已有的数据模型，经过一系列的操作序列，求得一个新的模型，这个新模型可展现出数据集内部或数据集之间新的或未曾明确的关系，从而回答用户的问题。好的空间分析过程设计将十分有利于问题的解决。空间分析过程基本步骤（图 3-1）如下：

1. 明确分析的目的和评价准则。
2. 准备空间操作的数据。
3. 建立空间分析模型然后执行空间分析操作。
4. 解释和评价结果（如有必要，返回步骤 1）。
5. 改进分析结果，结果输出（地图、表格和文档）。

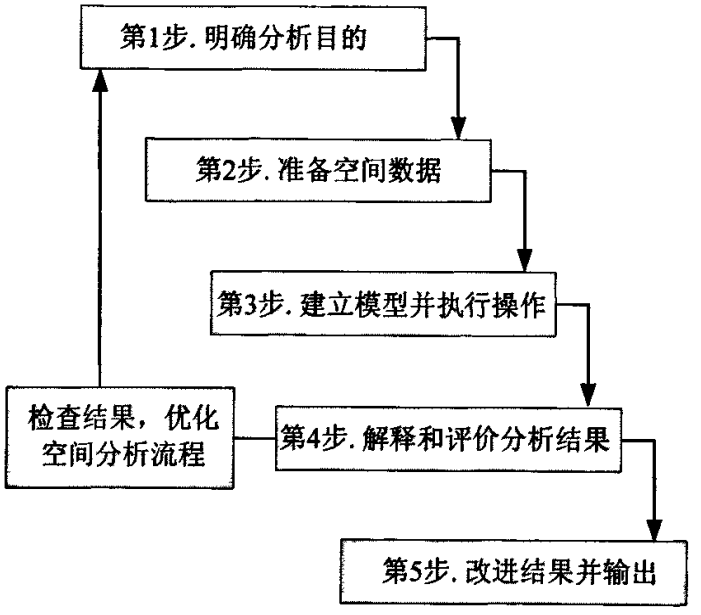


图 3-1 空间分析过程

空间分析过程实际上是一个地理建模过程，而空间分析依赖于空间分析模型，于是研究空间分析模型以及如何实现在 GIS 环境中建模至关重要。

3.2.2 空间分析模型

模型是人类对事物的一种抽象，人们再正式建造实物前，往往首先建立一个简化的模型，以便抓住问题的要害，剔除与问题无关的非本质的东西，从而使模型比实物更简单明了，易于把握。同样为了解决复杂的空间问题，人们也试图建立一个简化的模型，模拟空间分析过程，这样建成的模型就是空间分析模型。

空间分析模型是对现实世界科学体系问题域抽象的空间概念模型，具有以下特征：

1. 空间定位是空间分析模型特有的特性，构成空间分析模型的空间目标（点、弧段、网络、面域、复杂地物等）的多样性决定了空间分析模型建立的复杂性。

2. 空间关系也是空间分析模型的一个重要特征，空间层次关系、相邻关系以及空间目标的拓扑关系也决定了空间分析模型建立的特殊性。

3. 包括坐标、高程、属性以及时序特征的空间数据极其庞大，大量的空间数据通常用图形的方式来表示，这样，由空间数据构成的空间分析模型也具有了可视化的图形特征。

4. 空间分析模型不是一个独立的模型实体，它和广义模型中抽象模型的定义是交叉的。GIS 要求完全精确地表达地理环境间复杂地空间关系、因而常使用数学模型，此外，仿真模型和符号模型也在 GIS 中得到了很好的应用。

GIS 中空间分析模型的分类问题，目前研究的很少，在此把它分为以下几类：

1. 空间分布分析模型

用于研究地理对象的空间分布特征。主要包括：空间分布参数的描述，如分布密度和均值、分布中心、离散度等；空间分布检验，以确定分布类型；空间聚类分析，反映分布的多中心特征并确定这些中心；趋势面分析，反映现象的空间分布趋势；空间聚合与分解，反映空间对比与趋势。

2. 空间关系分析模型

用于研究基于地理对象的位置和属性特征的空间物体之间的关系。包括距离、方向、连通和拓扑等四种空间关系。其中，拓扑关系是研究得较多的关系；距离是内容最丰富的一种关系；连通用于描述基于视线的空间物体之间的通视性；方向反映物体的方位。

3. 空间相关分析模型

用于研究物体位置和属性集成下的关系，尤其是物体群（类）之间的关系。在这方面，目前研究得最多的是空间统计学范畴的问题。统计上的空间相关、覆盖分析就是考虑物体类之间相关关系的分析。

4. 预测、评价与决策模型

用于研究地理对象的动态发展，根据过去和现在推断未来，根据已知推测未知，运用科学知识和手段来估计地理对象的未来发展趋势，并作出判断与评价，形成决策方案，用以指导行动，以获得尽可能好的实践效果。

3.2.3 空间分析模型与 GIS 的集成

GIS 本身缺少强大的空间分析能力，空间分析模型的结果常常需要通过 GIS 来表达，GIS 和空间分析模型在功能上的互补是 GIS 与空间分析模型集成的主要驱动力。它们的有效结合可大大增强 GIS 的空间分析功能，进一步拓宽其应用范围，加深其应用的深度，同时 GIS 为模型的数据输入和预处理以及模拟结果的直观显示提供了极好的工具。

Bradley. O. Park 将GIS与空间分析模型结合的必要性归结为三点：

1. 在环境问题和社会、经济问题的解决中，空间表达非常重要，而现有的 GIS 软件缺乏解决复杂问题的预测能力和其它相关的分析能力。

2. 空间分析模型工具箱一般缺少足够灵活的类似 GIS 的空间分析环境，因而难以被缺少专业知识的用户所接受。

3. GIS 与空间分析模型的结合能使双方都变得更为功能强大。

GIS与空间分析模型的结合本质上是由需求驱动的，常用的方式有耦合和嵌入两大类，有以下四种形式：

1. 松散耦合型

模型与 GIS 相互并行、独立、各自拥有独立的数据结构和用户界面，它们之间通过文本文件等中间文件、或相互提供读写标准实现相互数据通信，如图 3-2（a）所示。其优点是模型与 GIS 都不受对方约束，可以发挥各自的优势，灵活性较强。但是其缺点在于系统间存在数据冗余，相互之间转换效率低下，缺乏统一界面，而且实时计算的可视化难以实现。

2. 紧密耦合型

以 GIS 为集成平台，用 GIS 提供的二次开发语言，如 MapBasic、Avenue 等宏语言或者脚本语言在 GIS 平台上开发空间分析模型，如图 3-2（b）所示。这种集成方法能够充分利用现有的 GIS 所提供的栅格操作分析功能，而且能为用户提供统一的界面。但是这种方式也存在不足，一是 GIS 提供的二次开发语言构造较为复杂的模型的能力比较低；二是系统运行效率普遍较低；三是动态功能实现较为困难，即使实现了，其实时计算的动态效果也不好。

3. GIS 中嵌入模型

这种方式以 GIS 为核心，在其内部嵌入相应的空间分析模型，通常需要由 GIS 开发商和模型专家共同完成，如图 3-2（c）所示。目前，各个商用 GIS 系统逐渐推出了各种专业的空间分析模块，如 ESRI 推出了专门用于电力、通信等管线系统应用的 ArcFM，其中就集成了专业的分析模型。在这种方式中，模型与 GIS 的融合是最好的，可以实现真正的“无缝”联结，从而可以充分利用 GIS 的分析功能，模型运行效果和效率可以得到保证。但是目前开发商推出的多是一些简单、常用的分析模型，在高级空间分析模型的集成方面并没有投入太多的力量。

4. 模型中嵌入 GIS 功能

这种方式以地理元胞自动机模型为核心，利用 DLL、OCX/ActiveX 技术，借助高级编程语言如 C/C++、Pascal 等，在模型系统的基础上开发必要的 GIS 功能，支持空间分析模型的运行，如图 3-2（d）所示。这种方式使模型设计者可以自由地设计和调整模型，对于探索高级的分析模型非常有利，而且模型运行效率也较高。但是这种方式工作量非常大，对模型构造者要求很高，而且常常作为建模者进行科学研究的工具，其它用户不易掌握。在目前的模型实现中，更多的采用在模型系统中嵌入必要的 GIS 功能。

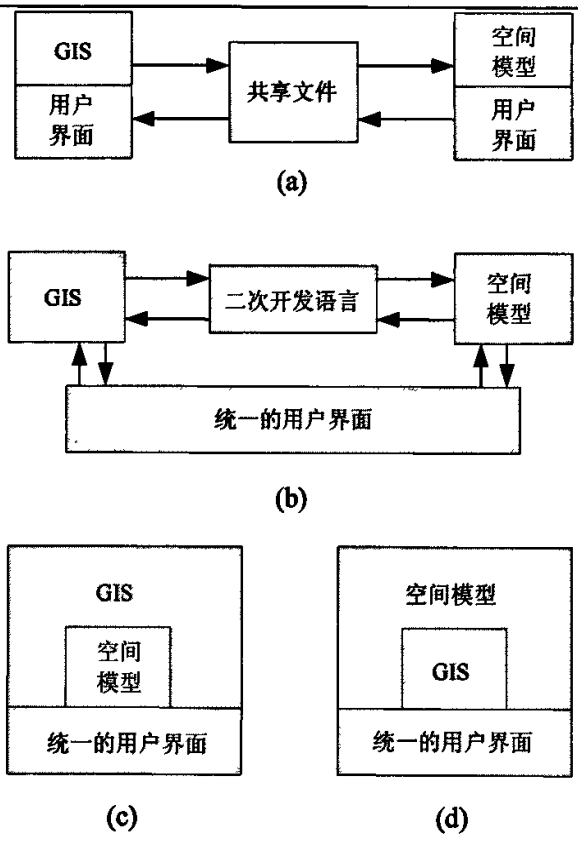


图 3-2 GIS 和空间分析模型的集成方式

(a) 松散耦合；(b) 紧密耦合；(c) GIS 中嵌入模型；(d) 模型中嵌入 GIS

3.2.4 空间分析建模方法

空间分析建模，由于是建立在对图层数据的操作上的，又称为 “地图建模”（Cartographic Modeling），它是通过组合空间分析命令操作以回答有关空间现象问题的过程，更形式化一些的定义是通过作用于原始数据和派生数据的一组顺序的、交互的空间分析操作命令，对一个空间决策过程进行的模拟。地图建模的结果得到一个“地图模型”，它是对空间分析过程及其数据的一种图形或符号表示，目的是帮助分析人员组织和规划所要完成的分析过程，并逐步指定完成这一分析过程所需的数据。地图模型也可用于研究说明文档，作为分析研究的参考和素材。

地图建模可以是一个空间分析流程的逆过程，即从分析的最终结果开始，反向一步步分析为得到最终结果，哪些数据是必须的，并确定每一步要输入的数据以及这些数据是如何派生而来。目前空间分析建模方法一般有以下 5 种方式： (1)GIS 环境内二次开发语言的空间分析建模法；(2)基于 GIS 外部松散耦合式的空间分析建模法；(3)混合型的空间分析建模法；(4)插件技术的空间分析建模法；(5)基于面向目标的图形语言建模法。

基于面向目标的图形语言建模法相对其他几种方法来说更加方便和直观，也更容易掌握，而且所有建模过程都在 GIS 系统内部进行，其中所使用的函数、逻辑操作和条件操作等都来源于 GIS 系统，因而有更好的可靠性和逻辑一致性。一些 GIS 软件提供了高级的可视化的地图建模辅助工具，用户只需使用其提供的工具在窗口中绘出模型的流程图，指定流程图的意义、所用的参数，矩阵等即可完成地图模型的设计，而无需书写复杂的命令程序。模型生成器（Model Builder）是 ArcGIS9 所提供的构造地理处理工作流和脚本的图形化建模工具。模型生成器如图 3-3 所示。

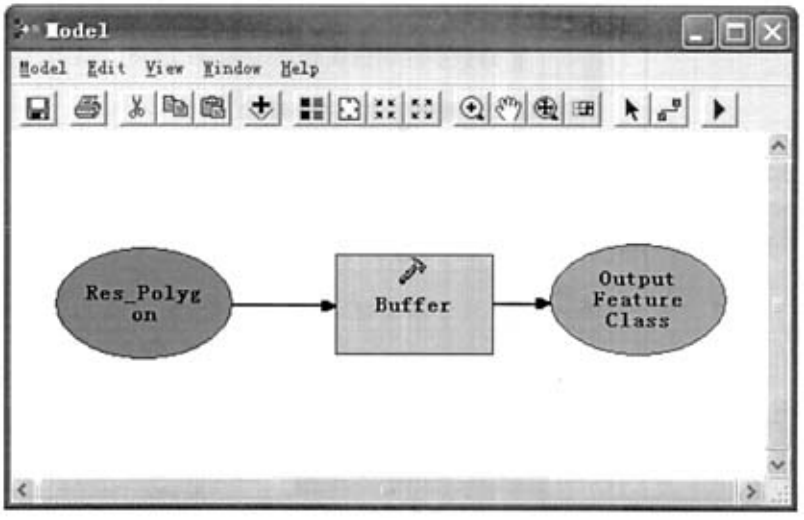


图 3-3 模型生成器

模型的形成过程实际上就是解决问题的过程，不论是简单的或复杂的模型，都需要经过如图所示的几个步骤。向模型生成器中添加数据和空间分析工具，并将一个个空间模型要素有机地连接起来，就能组成一个完整的空间分析图解模型，其流程图如图 3-4 所示。

1. 明确问题：分析问题的背景和建模的目的，掌握所分析对象的信息，即明确实际问题的实质所在。

2. 分解问题：找出与实际问题有关的因素，对所研究的问题进行分解、简化，明确模型中需要考虑的因素以及它们在过程中的作用，并准备相关的数据集。

3. 组建模型：运用数学知识和 GIS 空间分析工具来描述问题中的变量间的关系。

4. 检验模型结果：运行所得到的模型、解释模型的结果或把运行结果与实际观测进行对比。如果基本一致，表明模型是符合实际问题的；否则，模型与实际不相符，不能将模型运用到实际问题中。这就需要返回到建模前关于问题的分解，对假设作出修正，重复建模过程，直到模型的结果符合实际为止。

5. 应用分析结果：在对模型的结果满意的前提下，运用模型来得到对结果的分析。

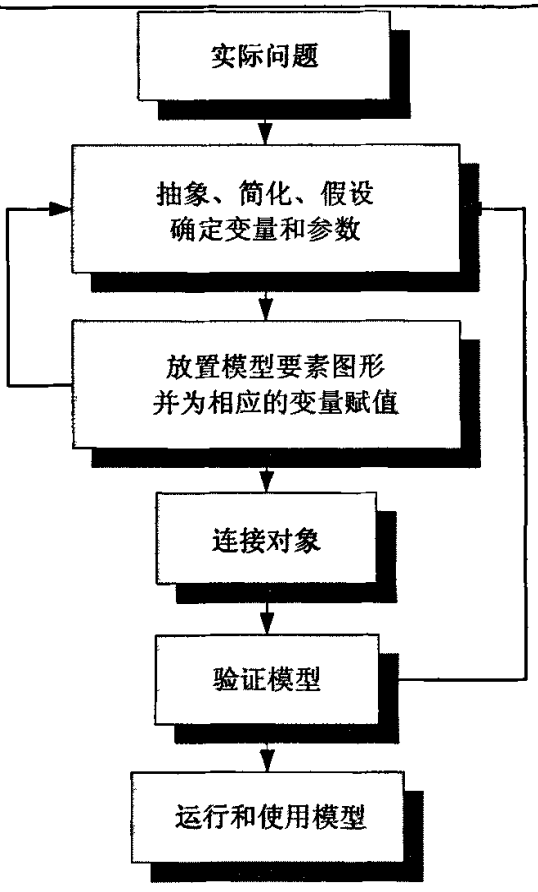


图 3-4 图解模型的建立流程

地理信息系统必将向着能够提供丰富、全面的空间分析功能的智能性 GIS 的方向发展，但就目前状况而言，这一点尚难如人意。因此实用系统建设中的二次编程工作量很大。这种基于功能指令的编程尽管是高级编程，但开发者仍不得不深入到算法的最细节技术中。理想的状态是找出空间分析的基本算子和对象，以某种运输逻辑积木式组合为复杂的分析模型，这应该是最具有刺激性和挑战性的研究课题。空间分析的算子和对象，即是所有空间分析模型的共性，可以无限重用。这样组合出来的空间分析模型并不只是针对某一个专业领域，而是所有的空间分析模型都可以用这种方式建立。但如何找出空间分析的基本算子和对象，以及如何以某种运算逻辑积木式组合为复杂的分析模型，这个问题还未充分引起人们的注意。建模是一个动态的、智能的过程，计算机无法很有效的做到这一点。让用户自主建模，由计算机来处理建模过程中的计算机工作，也许是一个不错的选择。

3.3 空间分析模型设计

本节将设计一个空间分析模型，分析某城市公园的分布是否方便了绝大多数的城市居民，来具体说明利用图解建模工具建模的过程。

3.3.1 模型准备

1. 问题

由于城市发展，某地政府部门准备规划增设公园，以更好地为居民提供公共娱乐服务，因此，政府部门在具体建设公园以前需要了解拟建设公园区域距离居民密集区的远近，以此判断公园的分布是否合理。

2. 分析

以公园点为中心作 1km 的缓冲区，然后与居民地层叠加，进行分析。

3. 所需数据

表3-1列出了建模所需的数据。

表3-1 建模所需数据

图层	名称	格式	数据源
公园点	Parks_Point	Shapefile	GreenValleyDB\Parks\Parks_Point
居民地	Res_Polygon	Shapefile	Project\City\Land\Res_Polygon

4. 需要完成的工作的流程

(1) 选定拟建设公园的位置点。

(2) 对公园点作 1km 的缓冲区。

(3) 将缓冲区图层与居民地图层作拓扑叠加。

(4) 叠加结果即为在公园一定距离内的居民区。

模型工作流程图如图 3-5 所示。

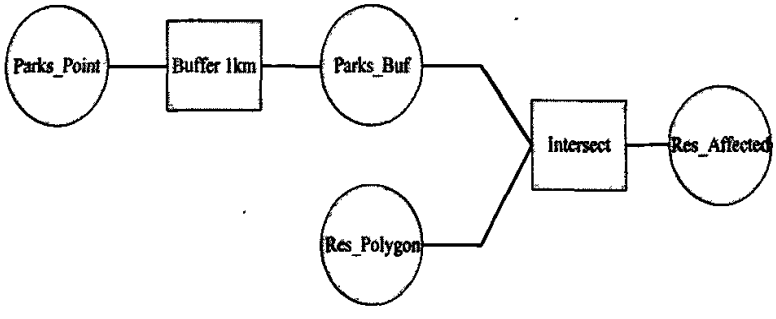


图 3-5 模型工作流程图

5. 新建模型

ArcGIS 的模型生成器在 ArcToolbox 工具箱中。在 ArcMap 中可以启动 ArcToolbox 并进行操作，新建一个“My Tools”工具箱，存放新建的模型“Park_Position”。

(1) 在 ArcToolbox 中，右键单击根结点“ArcToolbox”，选择 New Toolbox，新建工

具箱“My Toolbox”。

(2) 右键单击“My Toolbox”，在 New 中选择 Model，则生成模型生成器 Model，如图 3-6 所示。



图 3-6 新建模型

(3) 设置模型属性，修改 Name 为“Park_Position”，修改 Label 为“Park_Position”，如图 3-7 所示，并保存修改后的模型属性。



图 3-7 修改模型属性

(4) 保存模型，关闭模型生成器。

3.3.2 设计和编辑模型

模型生成器采用类似于所见即所得的可视化方法编辑空间分析模型。在此以图解模型工作流程图（图 3-5）为蓝图。

1. 对公园点作缓冲区

(1) 从图层树中拖动图层 Parks_Point 到模型生成器中，如图 3-8 所示。

(2) 拖动 ArcToolbox 下的 Buffer 工具到模型生成器中。如图 3-9 所示，Buffer 工具在模型生成器中显示为一个代表工具的矩形和一个代表分析处理后的新数据的组合。

(3) 根据数据流的先后顺序，连接相应的图形要素。连接数据 Parks_Point 到缓冲区分析工具 Buffer。如图 3-10 所示，连接后缓冲区分析工具被激活，工具显示为土黄色，新数据显示为绿色。

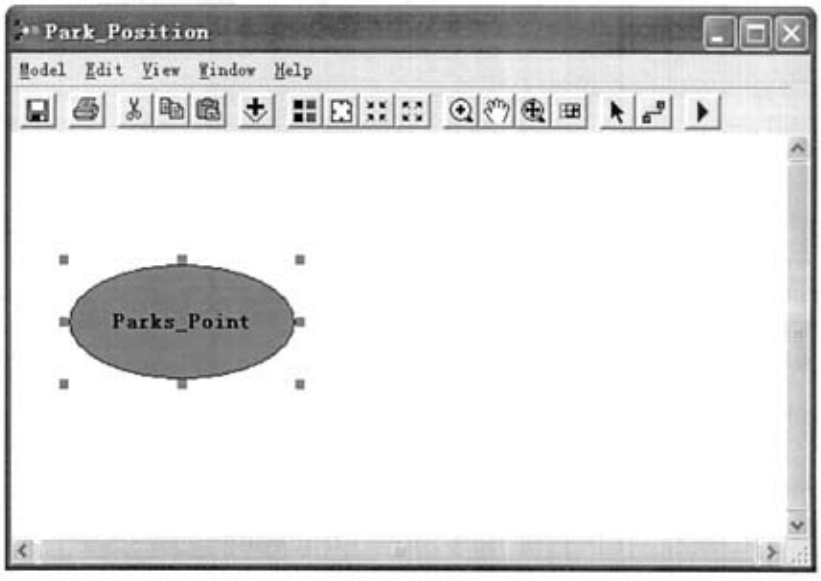


图 3-8 向模型生成器中加入数据

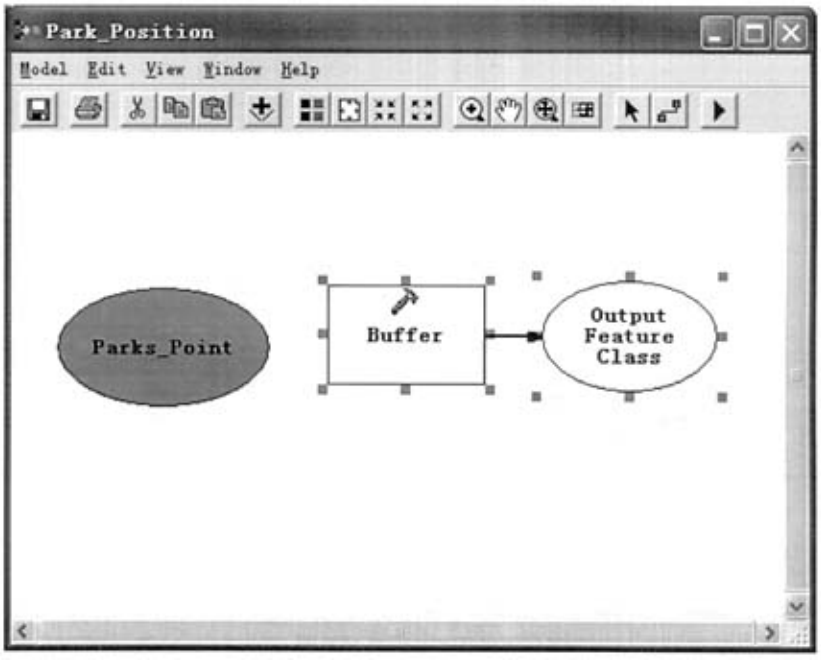


图 3-9 向模型中加入分析工具

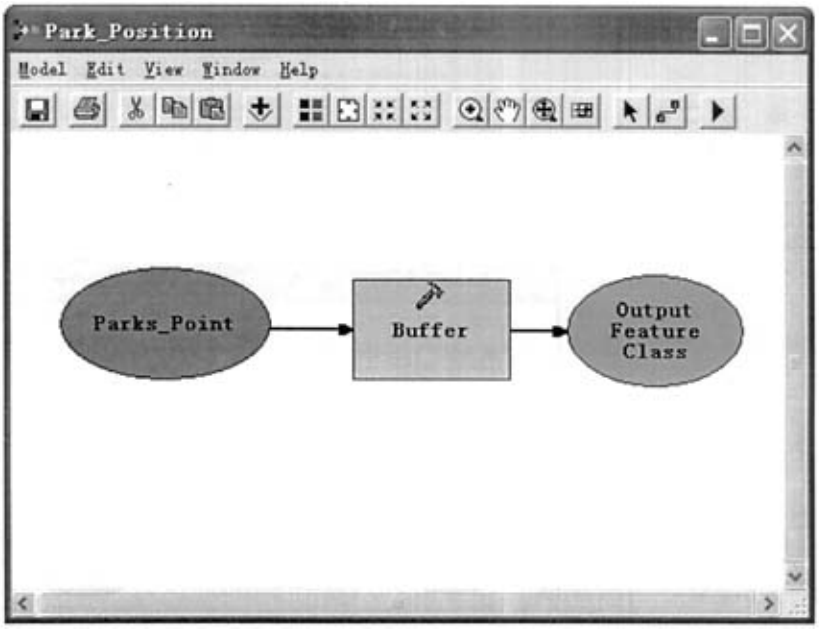


图 3-10 连接数据到处理工具

(4) 设置 Buffer 的各种参数，确定 Input Features 和 Output Feature Class，设置 Distance 的 Linear unit 中缓冲距离为 1km，设置 Dissolve Type 为 All，如图 3-11 所示。

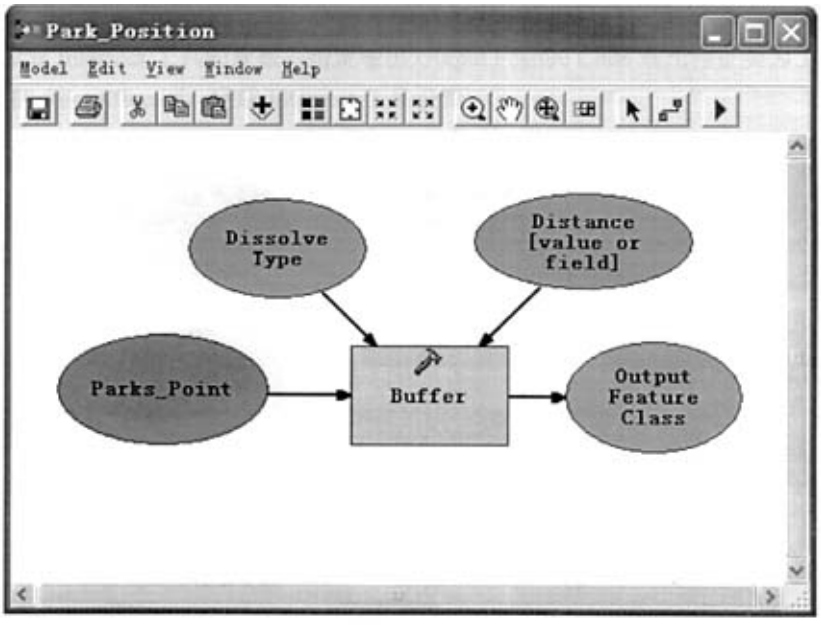


图 3-11 Buffer 工具参数设置

以上对公园点图层缓冲的设计完成了空间分析模型的一个单元，如图 3-12 所示。

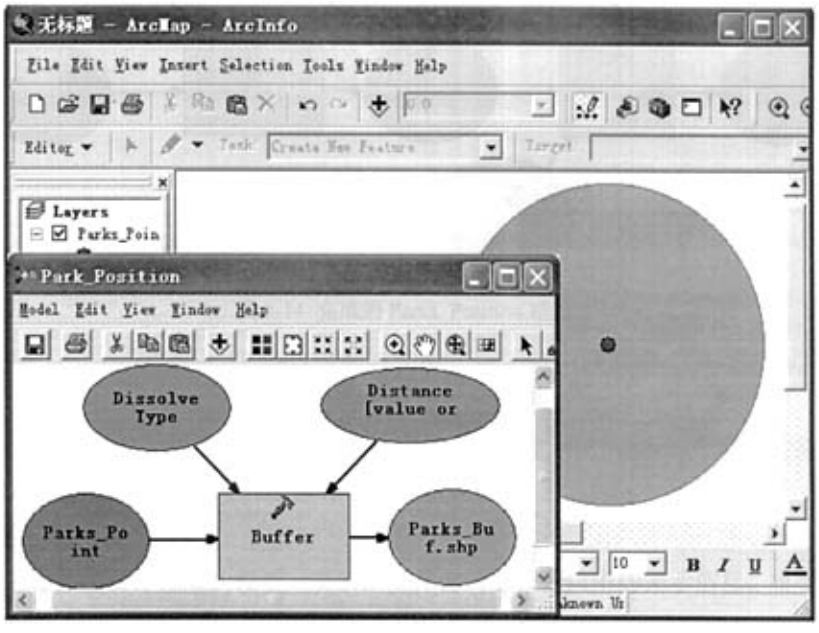


图 3-12 缓冲区分析效果图

2. 与居民地层叠加

(1) 从图层树中拖动图层 Res_Polygon 到模型生成器中，作为叠加操作的数据源。

(2) 拖动 Intersect 工具到模型生成器中，将 Res_Polygon 和 Parks_Buf 作为数据源，

连接到叠加分析工具 Intersect，如图 3-13 所示。

(3) 设置 Intersect 工具的参数，指定输出 Output Feature Class 输出特征类为工作目录下 Proj 的 Res_Affected，完成 Intersect 工具设置。

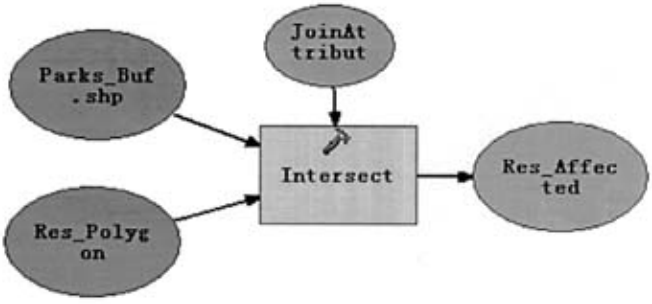


图 3-13 叠加图层

(4) 保存模型，完成模型设计，完成的模型如图 3-14 所示。

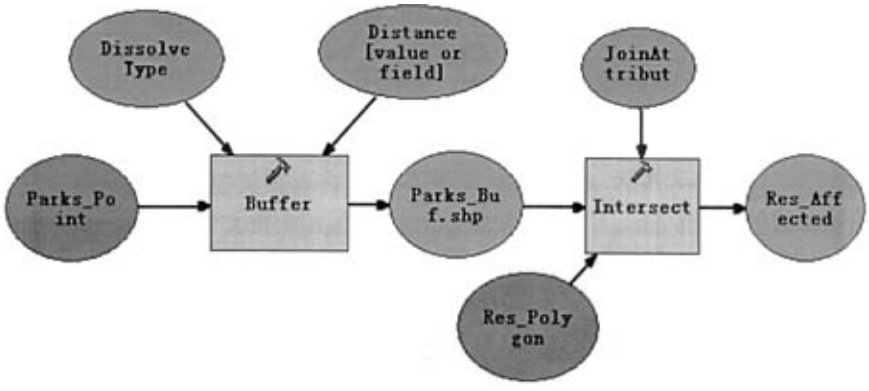


图 3-14 完成的 Parks_Position 模型

3.3.3 空间分析模型的应用

设计完成的模型可以在模型生成器中运行，也可以在 ArcToolbox 中调用。通过模型生成器，可以把任何一个中间结果打开显示在地图中。

1. 运行和使用模型。

(1) 运行已经设计完成的模型，观察系统弹出的运行窗口中的提示信息，模型运行结束后关闭运行窗口。

(2) 在地图中打开输出数据，查看运行结果，如图 3-15 所示。可以通过修改模型，来达到满意的结果。



图 3-15 公园所影响的范围

2. 转换模型

建立好的模型可以转换为脚本使用，脚本的形式有：Python，Jscript 和 VBStript。用模型生成器将模型导出为脚本并报存到脚本文件 Park_Position.vbs 中，在“My Toolbox”工具箱中通过“Add Script”向导添加脚本 Park_Positon.vbs 到工具箱中，如图 3-16 所示。可以在 Park_Position 项中打开文件查看和修改。以上就完成了整个空间分析模型的设计、实现和应用。

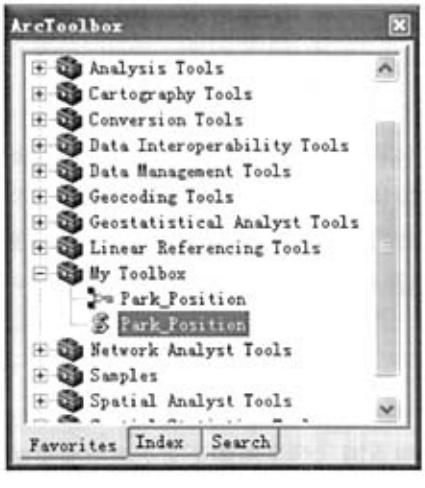


图 3-16 添加脚本到工具箱

第 4 章 GIS 空间分析方法的实现

4.1 空间查询的实现

4.1.1 空间查询的方式

空间查询是按一定的要求对地理信息系统所描述的空间实体及其空间信息进行访问，从众多的空间实体中挑选出满足用户要求的空间实体及其相应的属性。查询交互进行时，其结果能动态地通过两个视窗（图形窗口和属性表格窗口）进行显示。根据信息查询出发点不同，可分为三种不同的查询方式：基于空间特征的查询，基于属性特征的查询，基于空间关系和属性特征的查询。

基于空间特征的查询实际上就是人们通常说的根据图形查属性。目前大多数的商品化的 GIS 软件的查询功能都可完美地实现实体的简单查找，如根据鼠标所指的空间位置，系统可查找出该位置处的空间实体和空间范围（由若干个空间实体组成）以及它们的属性，并显示出该空间对象的属性列表，并可进行有关统计分析。

基于属性特征的查询可以利用标准结构化查询语言 SQL 通过关系数据库进行查询。我们可以在属性数据库中很方便地实现属性信息的复合条件查询，筛选出满足条件的空间实体的标识值，再到空间数据库中根据标识值检索到该空间实体。被检索到的空间实体以鲜异的色彩或高亮度显示在地图视图上。

而对于基于空间关系和属性特征的查询，由于传统的关系数据库的 SQL 语言并不直接支持空间数据及其关系操作，因此可以对标准 SQL 语言加以扩展，将空间关系的概念加入其中，使其具有处理空间查询的能力，并最终实现空间关系和属性特征的查询。

4.1.2 空间查询的实现

对于基于空间特征的查询操作，要先拾取出空间实体，再对实体进行查询或判断。因此空间实体拾取算法的好坏，将直接影响到查询结果。空间实体的拾取可以通过点、圆、矩形和多边形等方式实现。用点来拾取空间实体时，只要判断该点与某个实体的位置关系即可。对于圆、矩形和多边形等区域的拾取，采用覆盖选取的方法来实现。下面给出选取实体的具体方法。

1. 用圆来拾取空间实体

(1) 点

计算点到圆心的距离，如果此距离不大于圆的半径，则点被选中，否则未被选中。

(2) 线

如果线上的任何一点在圆内，则线被选中；把线拆分成多条线段，对于其中的任意

一条线段，可以计算圆心到该线段的距离，如果距离不大于圆的半径，而且线段的两个端点分别在圆心的两侧，则此线段被选中。

(3) 面

如果圆心在面内，则面被选中。如果面有一个顶点在圆内或面的任意一条边与圆相交，那么面就被选中。

2. 用矩形来拾取空间实体

(1) 点

如果点的坐标在矩形的范围内，则点被选中，否则没有被选中。

(2) 线

如果线的最小外包矩形在目标矩形内，则线被选中；或者把线拆成多个线段，如果其中任意一条线段与目标矩形的对角线之一相交，那么该线段被选中，只要有一条线段被选中，则线就被选中。

(3) 面

如果面的最小外包矩形在目标矩形内，则面被选中；如果目标矩形有一个顶点在面内或者面的任意一条边与矩形相交，那么面就会被选中。

3. 用多边形来选取空间实体

(1) 点

如果点在多边形内部或边界上，那么点就被选中。

(2) 线

如果线与多边形相交或相接，则线被选中。

(3) 面

如果多边形有一个顶点在面内或面的任意一条边与多边形相交，那么面就被选中。

4.1.3 空间查询的优化

在空间查询优化领域，至今还没有提出一套完整的优化系统设计方案。目前的研究方法是建立自己的代价模型，这种代价模型的研究重点是空间操作的代价估计，操作代价主要包括执行代价和 I/O 代价，同时还涉及空间谓词选择性，即满足对查询条件对象的数目与源对象集合数目的比值进行估计，谓词选择性大小在相当程度上决定了优化结果中谓词的执行顺序。

空间查询的优化过程大致分为如下 4 个阶段：

1. 将查询转换为某种内部表示，一般是将查询条件用语法树的形式表示。
2. 进行某些高效率的表达式转换，如先进行选择再连接，先进行投影再连接等，而且转换规则通常是有正确性保证的。
3. 谓词代价计算，一般与具体代价模型有关。
4. 选择代价最小的执行计划。

4.2 空间关系分析的实现

空间拓扑关系是空间关系分析的重要内容，它是基于点、线、面三类几何物体的，因此，拓扑关系的计算可以归结为点、线、面关系的计算。在这里线特指折线，面则特指多边形。

4.2.1 空间关系

空间关系中比较重要的是拓扑关系（topological relations）和方向关系（direction relations）。拓扑关系描述邻接、包含和叠置等关系，在平移、放缩、旋转等几何变化下保持不变。方向关系研究空间中的序，方向关系至今还没有普遍认可的标准定义，但是其广泛应用于空间分析等方面。

4.2.2 空间拓扑关系

这里主要借助 9-交叉模型（9-Intersection Model）研究拓扑关系。9-交叉模型穷举了两个地物间存在的所有可能的拓扑关系，具有很强的表达能力。该模型将所有类型的几何图形之间的空间关系表示为其内部、边界和外部的成对相交，并分析其交集的维度，从而实现对所有类型几何对象的空间关系表达。

假设给定两个地物 a、b，分别用 I（a）、B（a）和 E（a）和 I（b）、B（b）和 E（b）表示它们的内部、边界和外部，两两相交后产生一个 3×3 的矩阵。9-交叉模型可以用表 4-1 所示的矩阵来描述。

两个地物的空间拓扑关系可以这样判定：给定两个地物，再给一个 9-交叉模型的模式矩阵代表可接受的维度值，如果空间运算结果与任何一个接受值对应，则拓扑谓词返回真值，否则返回假值。

表4-1 9-交叉模型矩阵

	内部(Interior)	边界(Boundary)	外部(Exterior)
内部(Interior)	I(a)∩I(b)	I(a)∩B(b)	I(a)∩E(b)
边界(Boundary)	B(a)∩I(b)	B(a)∩B(b)	B(a)∩E(b)
外部(Exterior)	E(a)∩I(b)	E(a)∩B(b)	E(a)∩E(b)

4.2.3 空间拓扑关系实现

1. 点与点之间拓扑关系的算法

确定点与点之间拓扑关系的一般方法时根据两点之间的欧氏距离来判断两个点是否重合为同一个点，如果空间两个点之间的欧氏距离小于或等于一个确定的值，则认为两个点重合或者为同一个点；否则，认为两个点不重合或者不是同一个点。

2. 点与线之间拓扑关系的算法

确定点与线之间拓扑关系的一般方法是根据点与线之间的欧氏距离来判断点是否位于线上，如果点到线之间的欧氏距离小于或等于一个确定的值，则认为点位于线上；否则就认为点不位于线上。

令线L是由中间点P_1，P_2，…，P_n连接组成的，它们的坐标分别是（x_1，y_1），（x_2，y_2），…，（x_n，y_n），令点P_0的坐标是（x_0，y_0），则可以计算出点P_0到$L_{i,i+1}$（$L_{i,i+1}$是连接P_i和P_{i+1}的线段）或其延长线的欧氏距离$d_{i,i+1}$，并可根据$d_{i,i+1}$判断点P_0是否位于$L_{i,i+1}$或其延长线上，如果$d_{i,i+1}\leq\varepsilon$（ε是事先确定的值），就认为P_0位于$L_{i,i+1}$或其延长线上；当$d_{i,i+1}>\varepsilon$，则认为P_0不位于$L_{i,i+1}$或其延长线上；需要注意的是，为了说明P_0位于$L_{i,i+1}$，还必须判断P_0是否位于直线段$L_{i,i+1}$上。因此，必须对坐标进行比较，假设直线段$L_{i,i+1}$两个端点P_i和P_{i+1}的x坐标不相等（否则所有坐标值均相等，那么直线段$L_{i,i+1}$的两个端点P_i，P_{i+1}重合，直线段$L_{i,i+1}$就退化为一点），那么当x_0-x_i与x_0-x_{i+1}符号相反时，P_0位于直线段$L_{i,i+1}$上；否则，P_0位于$L_{i,i+1}$的延长线上，而不是位于直线段$L_{i,i+1}$上。由此可见，P_0位于$L_{i,i+1}$上必须同时满足两个条件：$d_{i,i+1}\leq\varepsilon$并且P_0位于直线段$L_{i,i+1}$上。

3. 点与多边形之间拓扑关系的算法

确定点与多边形拓扑关系的一般方法是射线判断法，从P_0作一射线到无穷远：

$$\begin{cases} x=x_0+u \\ y=y_0 \end{cases} \tag{4.1}$$

然后求射线与多边形的交点个数，进而根据交点个数来判断P_0位于多边形外还是位于多边形内。若有奇数个交点，则P_0位于多边形内；若有偶数个交点，则P_0位于多边形外。如图所示，射线a和c分别与多边形有2个和4个交点，为偶数，故判断点A和C在多边形外。而射线b和d分别与多边形有3个和1个交点，为奇数，故判断点B和D在多边形内。当射线穿过多边形顶点时，必须加以特殊对待。如图4-1所示，射线f过顶点，它与边6和边7都交于一点，若将交点计为两个，则还错误地判断F在多边形外。若规定射线过顶点时将交点数计为1，则又会错误地判断点E在多边形内。正确的方法应该是：如果共享顶点的两边分别在射线的同一侧，则交点数加2；如果共享顶点的两边分别在射线的不同一侧，则交点计数为1。例如，边7和边8都在射线e的一侧，交点计数为2；边1和边2都在射线i的一侧，交点计数为2；因此可判断E和I均在多边形外。同理可以得到f、g、h与多边形的交点计数为1、3、3，所以可以判断F、G、H在多边形内。

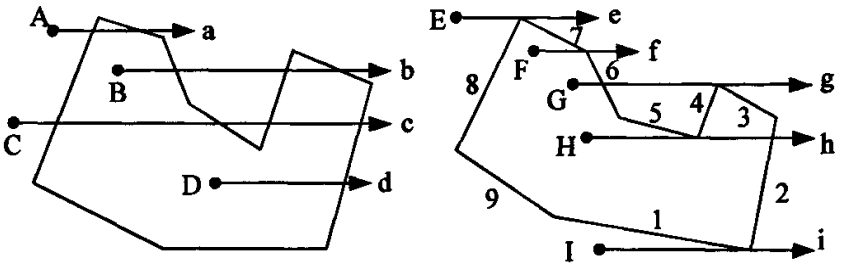


图 4-1 射线法判断点与多边形的关系

4. 线与线之间拓扑关系的算法

线与线之间的拓扑关系比较复杂，有 Disjoint，Touches、Crosses、Overlaps，Within，Contains、Equals 等七种关系。确定线与线拓扑关系算法的基本思想是：在平面扫描过程中，计算两条线的交点，根据交点分解复杂线段为子线段，判断每条简单线段的相对于另一条线的关系，并记录在（判断拓扑关系）变量中，最后确定线与线的空间拓扑关系。

算法：确定线与线之间的拓扑关系

```
01    将线 L1，L2 的结点和中间点从小到大按顺序存放在事件点表 eps 中
02    while(eps ≠ ∅) {
03       P = MIN(eps)，同时在 eps 中删除 P;
04       if P 点位于 sls(扫描线状态)的某条线段 s 上 then {
05          将 s 分为两个子线段：s 的左端点、P 和 P、s 的右端点 }
06       删除所有以 P 为右端点的线段
07       把以 P 为左端点的线段放在线段集合中
08       if 线段集合中同时有属于 L1 和 L2 的线段 {
09          if P 是线段的边界 then 线的关系是相触;
10          else 相交;
11          if 线段集合中有重叠线段 then 重叠; }
12       if 线段集合中有非重叠线段 then 相离;
13       return 线与线的空间拓扑关系;
14       将线段集合中的线段放在 sls 中，然后清空线段集合;
15       if sls 中新构成的相邻边交叉 then 交点插入 eps 中; }
16    return 线与线的空间拓扑关系;
```

5. 线与多边形之间拓扑关系的算法

线与多边形的关系有相离、相邻、相交和包含。线与多边形的关系的判别可以归结为线与组成多边形的各线段的拓扑关系，同时还必须判断线的端点是否在多边形内。一个比较容易实现的算法是：首先计算线与多边形各边的所有交点，再加上线的端点，按从小到大构成一个点集合，然后计算两个连续交点的中点，根据中点与多边形的关系判

断连续交点间线段与多边形的拓扑关系。

6. 多边形与多边形之间拓扑关系的算法

多边形与多边形的关系有相离、相邻、相交和包含。线与多边形拓扑关系的判别比较复杂，必须对组成一个面的各条线段分别判断它与另一个面的关系。同样，必须判断一个多边形的所有边界线段是否全都包含在另一个多边形内，才能判断是否相离或包含。

算法：确定多边形与多边形之间的拓扑关系

```
01    将多边形的顶点按从小到大顺序存放在 eps 中
02    while(eps ≠ ∅) {
03      P = MIN(eps)，同时在 eps 中删除 P;
04      if P 点位于 sls 中的某条线段上 then {
05        将线段一分为二：s 的左端点、P 和 P、s 的右端点;
06        多边形关系比较复杂，不只是某一种关系；}
07      删除所有以 P 为右端点的线段;
08      把以 P 为左端点的线段放在线段集合中;
09      while(eps ≠ ∅) {
10        e = MIN(线段集合)，同时在线段集合中删除 e;
11        在 sls 中插入 e;
12        判断 e 的奇偶性;
13        判断 e 相对于另一个多边形的关系
14        if e 是包含于关系 then {
15          if e 是一个多边形的边 then 存在包含于关系的边;
16          else  另一个多边形存在包含于关系的边；}
17        else if e 是相离关系 then {
18          if e 是一个多边形的边 then 存在相离关系的边;
19          else  另一个多边形存在相离关系的边；}
20        存在重叠关系的边；}
21      if sls 中新构成的相邻边交叉  then 存在交叉关系的边;
22      return 多边形拓扑关系；}
23    return 多边形拓扑关系;
```

4.3 缓冲区分析的实现

缓冲区分析的基本思想是给定一个空间实体的集合，在其周围建立一定距离（缓冲半径或宽度）的带状区（缓冲区多边形）,以确定这些物体对周围环境的影像范围或服务范围（邻近度问题）。从实体角度来讲，缓冲区分析是指在点、线、面实体的周围建

立的一定宽度的多边形。从数学角度来讲，缓冲区分析是给定一个空间对象或集合，确定它们的邻域，邻域的大小由邻域半径决定。空间实体的缓冲区为：

$$B_i = \{x : d(x, O_i) \le R\} \tag{4.2}$$

其中，R 为邻域的半径，称为缓冲距；d 一般是指最小欧氏距离。

B_i 即 O_i 的缓冲距为 R 的缓冲区，是全部距 O_i 的距离 d 小于或等于 R 的点的集合。对于空间实体集合

$$O = \{O_i : i = 1,2,\cdots,n\} \tag{4.3}$$

其缓冲距为 R 的缓冲区是其中单个空间实体的缓冲区的并集：

$$B = \bigcup_{i=1}^{n} B_i \tag{4.4}$$

4.3.1 缓冲区的建立

在建立缓冲区时，缓冲区的宽度并不一定是相同的，可以根据要素的不同属性特征，规定不同的缓冲区宽度，以形成可变宽度的缓冲区。例如，城市内住宅小区的噪音隔离带应根据住宅小区距离噪声源的距离远近而定，这样就可以按照距离的远近确定不同地理位置的住宅小区所设置的噪音隔离带的宽度，以产生所需要的缓冲区。

对于点、线、面等不同几何类型的地理要素，建立缓冲区的方式也相互有所不同。点的缓冲区的建立比较简单，即以某点要素为圆心，以缓冲区半径 R 作圆，得到点要素的缓冲区。面缓冲区的建立是以面要素的边界为基线向内外侧作平行线，平行线和基线里的区域就是面缓冲区。

在建立线的缓冲区时，通常要先运用线的矢量数据压缩算法对线进行重采样，以加快缓冲区建立的速度。一般来说，只需在线的两边一定的距离画平行线，并在端点出画半圆，就可以产生缓冲区多边形。在对线建立缓冲区时可能会出现重叠，这时就需要把重叠的部分去除，具体的操作方法是对缓冲区边界求交点，并判断每个交点是出点还是入点，以决定交点之间的线段是保留还是删除，这样就可得到岛状缓冲区。对多条线建立缓冲区时，需要把缓冲区内部可能重叠的区域去除，以合并成连通的缓冲区。

4.3.2 缓冲区的实现算法

1. 角平分线法

在轴线首末端点处，作轴线的垂线并按缓冲距截出左右边线的起止点；在轴线其他各个转折点上，用与该点所关联的前后两邻边轴线偏移量为缓冲距的两平行线的交点来生成两平行线的对应顶点，如图 4-2 所示。

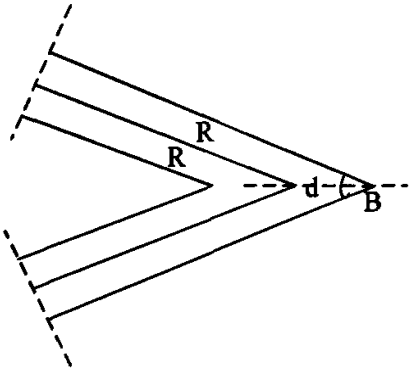


图 4-2 角平分线法

具体步骤如下：

(1) 选定目标，确定左右侧的缓冲距离；

(2) 获取各点坐标序列，并沿轴线前进方向，计算各点的角平分线，线段起点和终点处的角平分线为起始线段或终止线段的垂线；

(3) 在各点的角平分线的延长线上，分别以左右侧缓冲距离，确定各点的左右缓冲点位置，并将其按顺序相连，即构成左右缓冲区边界；

(4) 在起点和终点处，以左右侧缓冲距离之和为半径，以角平分线为直径所在位置分别向外作外接半圆，然后将半圆分别与缓冲区边界相连，即形成缓冲区。

该方法的缺点：

(1) 难以缓大限度的保证双线的等宽性。在尖锐转角处，凸侧角点随着角度的进一步变锐而沿角平分线远离轴线顶点。根据图 4-2，远离的情况可用公式（4.5）表示。

$$d = R \Big/ \sin\left(B \Big/ 2\right) \tag{4.5}$$

此式表明当缓冲距R不变时，d随着张角B的减小而增大，因而在尖角处平行线之间的宽度遭到破坏。

(2) 校正过程复杂。为了克服角平分法的缺点，要有相应的补充判别方案，用于校正所出现的异常情况。一些学者曾经进行了深刻的研究，提出了多准则的判别方案，较好的解决了出现的异常情况。但是由于异常情况不胜枚举，校正措施相当繁杂。

(3) 算法模型不够合理。首先由于几何生成算法不合理，而引起了很多异常情况，其次算法模型的逻辑构思条理不清，很难实现结构化。

2. 凸角圆弧法

算法原理：在轴线首尾点处，作轴线的垂线并按双线和缓冲区半径截出左右边线的起止点；在轴线的其他各个转折点处，首先判断该点的凸凹性，在凸侧用圆弧拟合，在凹侧用前后两邻边平行线的交点生成对应顶点。这样，外角以圆弧连接，内角直接连接，线段端点以半圆封闭，形成闭合的带状缓冲区边界，如图 4-3 所示。该方法能最大限度的保证平行曲线的等宽性，排除了角平分线法所带来的众多异常情况。

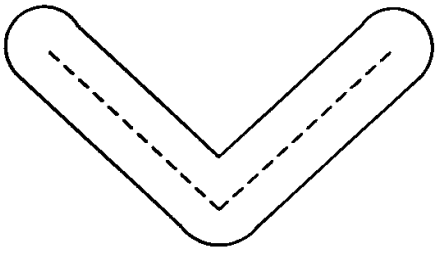


图 4-3 凸角圆弧法

实施步骤：

(1) 直线性判断

判断相邻三点是否在同一直线上，以便简化计算过程，特别是当相邻三点处于近似共线状态时，可以用简化计算过程代替平行线求交与圆弧连接。

可用的判断方法有：

方法一：点到直线距离法。可以直接利用解析几何中的公式进行判断。

$$h = \left(Ax + By + C\right) \Big/ \left[A^2 + B^2\right]^{1/2} \tag{4.6}$$

其中，A、B、C 为由首尾点构成的直线方程的系数，x，y 为中间点的坐标，h 为中间点到通过首尾点直线的距离。当 h 小于给定容差时，对相邻三点可作直线处理。

方法二：简化估算法。当求出顶点转角 B（以弧度为单位）而偏移量 E 是已知时，可通过下面的公式估算相邻三个点是否在同一直线上：

$$\sigma = E\left(1 \Big/ \sin\left(B/2\right) - 1\right) \tag{4.7}$$

当 σ 小于给定容差时，可判断相邻三个点近似在同一直线上。

(2) 折点凹凸性判断

轴线转折点的凹凸性判断是非常关键的一环，它能确保何处需要用圆弧连接和何处需要用直线求交。这个问题可转化为两个矢量的叉积（图 4-4）：把相邻两个线段看成两个矢量，其方向取为坐标点序方向。若前一个矢量以最小的角度扫向后一个矢量时为逆时针，则该点左侧为凹，右侧为凸，是凸顶点；反之，则该点为凹顶点。

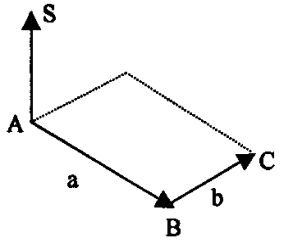


图 4-4 矢量的叉积

由矢量代数可知，矢量 AB，BC 可用其端点的坐标差来表示，即：

$$\begin{aligned} AB &= (X_B - X_A, Y_B - Y_A) = (a_x - a_y) \\ BC &= (X_C - X_B, Y_C - Y_B) = (b_x - b_y) \end{aligned} \tag{4.8}$$

在求矢量代数叉积时，遵循右手法则，即拇指向上，ABC 呈反时针方向，矢量叉积 S 为正；拇指向下，ABC 呈顺时针方向，矢量叉积 S 为负。

$$\begin{aligned} S &= AB \times BC = a \times b = (a_x b_y - b_x a_y) = \\ &(X_B - X_A)(Y_C - Y_B) - (X_C - X_B)(Y_B - Y_A) \end{aligned} \tag{4.9}$$

若 S>0,则 ABC 呈逆时针，顶点为凸；

若 S<0,则 ABC 呈顺时针，顶点为凹；

若 S=0,则 ABC 三点共线。

(3) 计算转折点相邻线段的方向角

与转折点相邻线段的方向角是以转折点为原点，从 X 轴正向逆时针旋转到该线段的角度。确定转折点相邻线段的方向角是作圆弧拟合和平行线求交的前提。

(4) 计算相邻两个线段的平行线的交点

在以转折点为原点的坐标系中，假设相邻线段的方向角为 α_1、α_2，缓冲距为 R，平行线交点 $P(x_p, y_p)$到转折点的距离为 d，令角平分线的方向角为 α，

则由
$$\begin{cases} R = d*\sin(\alpha - \alpha_2) = y_p \cos\alpha_2 - x_p \sin\alpha_2 \\ R = d*\sin(\alpha_1 - \alpha) = x_p \sin\alpha_1 - y_p \cos\alpha_1 \end{cases} \tag{4.10}$$

可得
$$\begin{cases} x_p = R(\cos\alpha_1 + \cos\alpha_2)/\sin(\alpha_2 - \alpha_1) \\ y_p = R(\sin\alpha_1 + \sin\alpha_2)/\sin(\alpha_2 - \alpha_1) \end{cases} \tag{4.11}$$

由此，可以通过坐标平移的相关公式得出平行线交点的坐标。

(5) 确定圆弧拟合的首尾点

圆弧拟合的起点是转折点沿前一个线段的法线方向向远离轴线方向平移一个缓冲区距离所得到的点，终点是转折点沿后一个线段的法线方向向远离轴线方向平移一个缓冲区距离所得到的点。

(6) 将平行线交点与圆弧拟合点存储在数组中

通过对每个轴线转折点的求解可以得到一系列位于轴线左右两侧的平行线交点和圆弧拟合点，为此定义两个结构体数组，分别存储左右两侧点及其属性信息，记为左侧数组和右侧数组。在此先将轴线首末点的圆弧拟合点存储在左侧数组中，最后需要将右侧数组反向，与左侧数组连接，形成闭合的顺时针带状缓冲区边界数组。

根据上述算法可得到算法流程图，如图 4-5 所示。

(7) 边线自相交处理

当轴线的弯曲空间不容许双线的边线无压盖地通过时，就会产生若干个自相交多边形，如图 4-6 所示。这些多边形可以分为岛屿多边形和重叠多边形。

岛屿多边形的边线矢量呈离心辐射状，重叠多边形的边线矢量呈向心汇集状。可通过判别封闭多边形的点序方向来判定岛屿多边形或重叠多边形。对于左边线，岛屿多边形呈反时针方向；对于右边线，岛屿多边形呈顺时针方向。而重叠多边形正好相反。岛屿多边形是缓冲区边线的有效组成部分，重叠多边形不是缓冲区边线的有效组成部分，不参与缓冲区有效边线的最终重构。

在一般情况下，当存在岛屿和重叠区时，最初所计算的边线被分割为外部边线和若干个岛屿，需要用复合目标的结构来组织和管理。在最终绘制边线时，只需把最外围的边线和岛屿轮廓绘出即可。

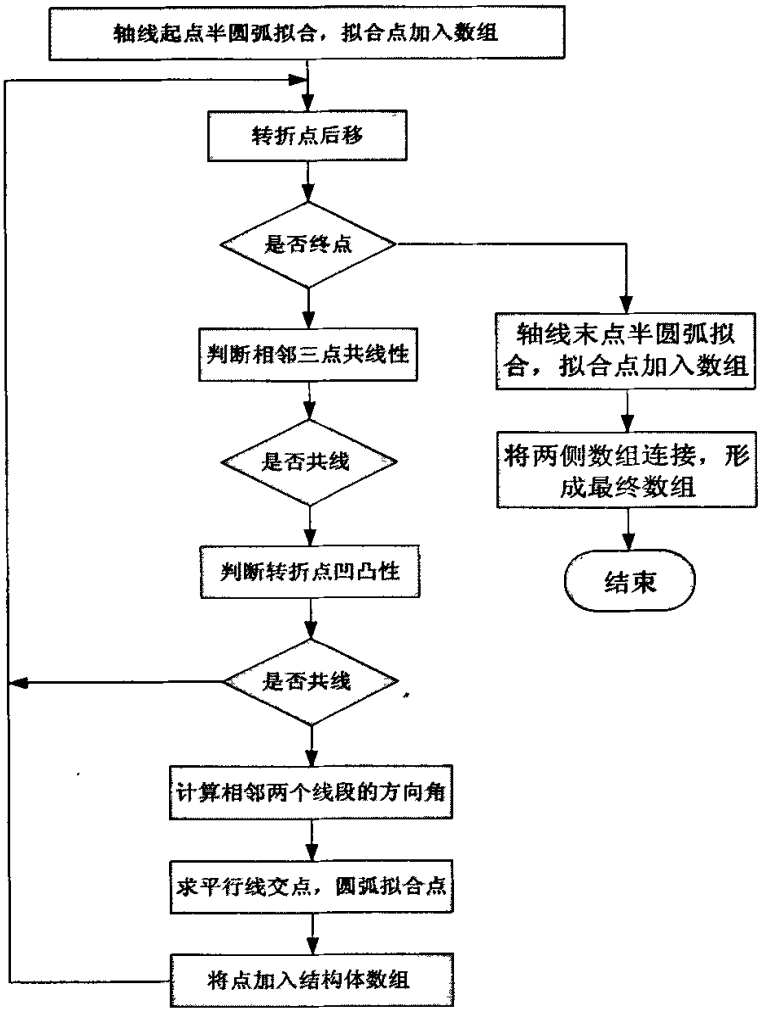


图 4-5 凸角圆弧法算法流程图

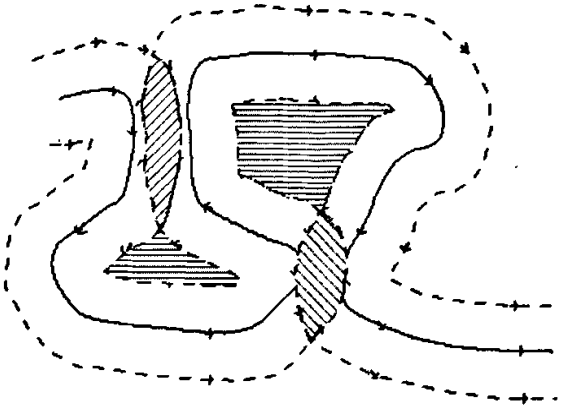


图 4-6 缓冲区多边形自相交的情况（据陈述彭，2000）

4.3.3 缓冲区算法的优化

本文在缓冲区矢量生成算法思想的基础上，分别对角平分线法和凸角圆弧法进行改进，进一步形成了一套新的缓冲区矢量生成算法。

1. 角平分线法的改进

这里主要对前文角平分线法生成算法的步骤(2)和步骤(3)进行改进。首先在轴线转折点处求得各转折点相对于相邻轴线的缓冲点，通过各转折点作相邻轴线的垂线，以缓冲区距离确定缓冲点。其中除了起点和终点外，其它各转折点都会求得两个缓冲点。

在求缓冲点时，需分两种情况来考虑：其一是轴线左侧缓冲点，其二是轴线右侧缓冲点。以轴线左侧缓冲点为例进行求解。令转折点的坐标为（x_0，y_0），缓冲点的坐标为（x_1，y_1），轴线的方位角为 α，缓冲区距离为 R，如图 4-7 所示。

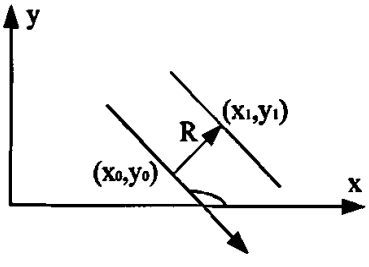


图 4-7 缓冲点求解

左侧缓冲点坐标为：

$$x = x_0 + R\sin\alpha$$
$$y = y_0 - R\cos\alpha \qquad (4.12)$$

同理，右侧缓冲点坐标也可以求出。角平分线及缓冲点求解如图 4-8 所示。将坐标原点平移至转折点 P，令线段 PA 的方位角为 α_1，PB 的方位角为 α_2，P_1 是转折点 P 相

对于轴线 PB 的缓冲点，P_2 是转折点相对于轴线 PA 的缓冲点。

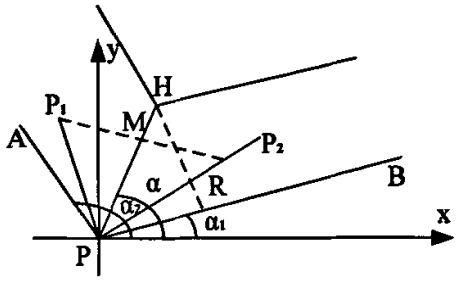


图 4-8 角平分线及缓冲点求解

首先求得线段 P_1P_2 的终点 M，则直线 PM 是 $\angle P_1PP_2$ 的角平分线，也是∠APB 的角平分线，由此可得直线 PM 就是转折点 P 处的角平分线。接下来确定缓冲点 H，假设角平分线 PM 的方位角为 α，根据缓冲区距离 R 可以得到缓冲点到转折点的距离：$d=R/\sin(\alpha-\alpha_1)$，若坐标平移前转折点 P 的坐标为（$x_0$，$y_0$），则缓冲点 H 的坐标（$x_1$，$y_1$）为：

$$\begin{aligned} x_1 &= x_0 + d\cos\alpha = x_0 + R\cos\alpha / \sin(\alpha - \alpha_1) \\ y_1 &= y_0 + d\sin\alpha = y_0 + R\sin\alpha / \sin(\alpha - \alpha_1) \end{aligned} \tag{4.13}$$

其它转折点的缓冲点坐标也可以此方法求得。可由起始线段和终止线段的垂线得到起点和终点的角平分线。在求得所有的缓冲点后，将左右缓冲点顺序相连，然后再与起点和终点处的外接半圆相连即可得到线状目标的缓冲区。

2. 凸角圆弧法改进

在前文对凸角圆弧法生成算法进行分析的基础上，对其改进，形成了一种新的缓冲区矢量生成算法。这里主要对线缓冲区生成算法进行改进和优化。

对于线状目标，可以生成双侧缓冲区和单侧缓冲区，还可以生成双侧不对称缓冲区。在此，我们对线双侧缓冲区生成算法进行研究。

(1) 作线起点处的缓冲圆弧段。这里采用正 n 多边形的相应折线段来近似替代起点处的光滑圆弧段，线段越多，产生的曲线越平滑，否则，曲线的锯齿状越严重。如图 4-9 所示，可以得到平面上一点（X,Y）关于任意指定的旋转支点位置（X_r, Y_r）旋转角 θ，从而得到新的点位置坐标（X',Y'）：

$$\begin{aligned} X' &= X_r + (X - X_r)\cos\theta - (Y - Y_r)\sin\theta \\ Y' &= Y_r + (Y - Y_r)\sin\theta - (Y - Y_r)\cos\theta \end{aligned} \tag{4.14}$$

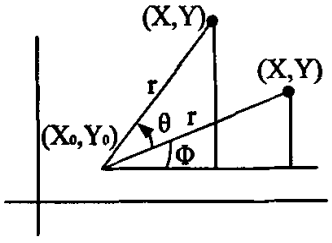


图 4-9 一点相对支点的旋转变换

如果 $Y=Y_r$，即 $\Phi=0$ 时，上面的公式变为：

$$X' = X_r + r\cos\theta$$
$$Y' = Y_r + r\sin\theta \qquad (4.15)$$

成为圆心位于旋转支点，半径为 r 的圆关于旋转角 θ 的方程。如果把起点看作是旋转支点，从而就可以使用上述公式依次得到用于近似表示点缓冲区边界的内接正 n 多边形各顶点的坐标。其中旋转角 θ 从 π 开始，按步长 δ 依次递增取值，直到 θ 等于 3π/2。

(2) 沿着由折线表示的线的走向，依次取两个相邻有向线段（三个相邻顶点），对转折点的凹凸性进行判断，其判断方法前面已经给出，在此不再赘述。如果为凸点，该点对应的缓冲区边界用类似于起点处的缓冲区圆弧段的处理方法进行处理，也即用正 n 多边形的边长近似表达。如果为凹点，则分别作这两个线段的右侧平行线，然后求出两平行线的交点即可。如果三点共线，只要求出前一线段的右侧平行线段的末点或后一线段的右侧平行线段的起点即可。

(3) 画线终点对应的右侧缓冲区边界，方法类似步骤(1)。其中旋转角 θ 从 π/2 开始，按步长 δ 依次递增取值，直到 θ 等于 π。然后按照上述类似的方法从线的终点开始，沿线走向的方向继续构成左侧缓冲区边界。

(4) 当缓冲区边线出现自相交问题时，首先在上述各顶点中，从起点开始，每次取两个相邻点，确定一条线段，接着依次与从第三点开始的每两个相邻点所确定的线段比较，判断两线段是否相交，如果相交则求出交点。依次类推直至所有的交点都被求出，然后对交点进行方向判断，可得出自相交多边形是岛屿多边形或重叠多边形。最终通过重构缓冲区边线的外环和内环产生缓冲区多边形。

4.4 空间统计分类分析的实现

在空间统计分析时需要对一些基本的统计量进行计算，例如属性数据的集中特征数，包括频数和频率、平均数、数学期望、中数、众数等，属性数据的离散特征数，包括极差，离差、平均离差、离差平方、方差与标准差、变差系数等。其中变差系数是用来衡量数据在时间和空间上的相对变化的程度，它是无量纲的量，记为 C_v：

$$C_v = \frac{\sigma}{\overline{X}} \times 100\% \qquad (4.16)$$

其中σ为标准差，$\overline{X}$为平均数。

为了把GIS空间地理数据中的统计数据用专题地图的形式表示出来，通常需要对统计数据进行分类和分级。分类和分级的方法很多，最常用的是系统聚类法。

系统聚类法是分类数据处理中用得最多的一种方法。其基本思想是：首先是n个样本各自成一类，然后规定类与类之间的距离，选择距离最小的两类合并成一个新类。计算新类与其他类的距离，再将距离最小的两类进行合并。这样每次减少一类，直到达到所需的分类数或所有的样本都归为一类为止。

每个样本单元有多个变量的原始数据，各种变量的量纲和数量大小是很不一致的，变化的幅度也不一样。假如直接用原始数据进行计算，就会突出绝对值大的变量的作用而削弱绝对值小的变量的作用。为了给每种变量以统一量度，在进行模型的统计计算前，往往需要对原始数据进行标准化变换，通常使用标准差标准化的方法。

如果有n个样本，每个样本有m个数据，则每个变量可记为$X_{i,j}$，其中i=1，2，...，n；j=1，2，...，m，标准化后的变量为$X'_{i,j}$，则：

$$X'_{i,j}=\frac{X_{i,j}-\overline{X_j}}{S_j} \tag{4.17}$$

其中，$\overline{X_j}$为第j个变量的平均数，S_j为j个变量的标准差。

在制图数据处理中，常用S代表标准差。当用样本标准差对总体标准差进行估算时，则采用无偏估计值，即：

$$S=\sqrt{\sum_{i=1}^{n}\frac{\left(X_i-\overline{X}\right)^2}{n-1}} \tag{4.18}$$

经过标准差标准化后，每种变量的平均值为0，方差为1。

对样本进行分类时，个体之间的相似性程度往往用“距离”来度量。它是将每个样本看成高维空间的一个点，点与点之间用某种法则规定距离，距离近的点归为一类。设有n个样本，每个样本测得m项指标，则每个变量记为X_{ij}，i=1，2，...，n；j=1，2，...，m。这里只介绍在标准化变量互不相关时采用的欧氏距离。两样本i和j的距离记为d_{ij}，则有：

$$d_{ij}=\sqrt{\sum_{k=1}^{m}\left(X_{ik}-X_{jk}\right)^2} \tag{4.19}$$

类与类之间的距离由许多定义方法，这里介绍最常用的最短距离法。在最短距离法中，定义两类之间的距离用两类间最近样本的距离来表示。用d_{ij}表示样本i和j的距离，用G_1，G_2，...表示类，用D_{pq}表示类G_p和G_q的距离，则有：

$$D_{pq} = \min d_{ij} \quad (i \in G_p, j \in G_q) \tag{4.20}$$

聚类步骤如下：

(1) 计算每两个样本的距离。在这里只需计算样本之间的一个距离即可。开始时每个样本自成一类，则类之间的距离 D_{pq} 就等于样本之间的距离 d_{pq}。

(2) 找出最小的类间距，设为 D_{pq}，则把 G_p 和 G_q 合并为一个新类 G_r。

(3) 计算新类与其他类的距离。新类 G_r 和某一类 G_k 的距离为 D_{rk}，则 D_{rk} 可用下面公式计算出：

$$D_{rk} = \min\{D_{pk} \bullet D_{qk}\} \tag{4.21}$$

重复第(2)和(3)步，直到所有的元素都成为一类或达到设定的分类数。

4.5 空间分析方法二次开发

ArcGIS Engine 是美国 ERSI 公司推出的由一组核心 ArcObject 包组成并用于构建定制应用的完整 GIS 组件库。ArcGIS Engine 是目前功能最强大和运用最广的 GIS 二次开发技术之一，能在应用开发时彻底地脱离 ArcGIS 的桌面平台并大大提高系统开发效率。故此本文选择 ArcGIS Engine 为开发平台来阐述 GIS 空间分析的二次开发过程。

4.5.1 空间查询

空间查询需要用到的接口主要包括 ISpatialFilter 等，它们所涉及的模块对象模型如图 4-10 所示。空间查询过滤（SpatialFilter）组件继承于过滤查询（QueryFilter）组件，是一个同时包含了空间约束和属性约束的查询过滤，可以用来同时使用空间约束和属性约束来从特征类中获取一组限定的特征。

ISpatialFilter 接口用来定义一个几何标准的查询。用户必须总是设置这三个属性：Geometry（几何）、GeomegtryField（几何字段）和 SpatialRel（空间关系）。ISpatialFiler 接口继承于 IQueryFilter 接口，在空间查询中，可以通过设置 WhereClause 语句来扩展查询，增加查询对特征属性的约定。SpatialRel（空间关系）属性读入一个枚举变量，定义着查询几何和目标几何之间的空间关系。

下面是利用 ISpatialFilter 接口来实现空间查询的代码：

```
Public Function SpatialQuery(pFeatureClassIN As IFeatureClass, searchGeometry As IGeometry,
spatialRelation As esriSpatialRelEnum, Optional whereClause As String = "") As IFeatureCursor
Dim pSpatialFilter As esriGeoDatabase.ISpatialFilter
  Dim strShpFld As String
  Dim pFeatCursor As esriGeoDatabase.IFeatureCursor
  Dim pQueryFilter As esriGeoDatabase.IQueryFilter
  ' create a spatial query filter
  Set pSpatialFilter = New esriGeoDatabase.SpatialFilter
  Set pSpatialFilter.Geometry = searchGeometry
  strShpFld = pFeatureClassIN.ShapeFieldName
  pSpatialFilter.GeometryField = strShpFld
  pSpatialFilter.SpatialRel = spatialRelation
  ' create the where statement
```

```
    pSpatialFilter.whereClause = whereClause
    ' perform the query and use a cursor to hold the results
    Set pQueryFilter = pSpatialFilter
    Set pFeatCursor = pFeatureClassIN.Search(pQueryFilter, False)
    Set SpatialQuery = pFeatCursor
End Function
```

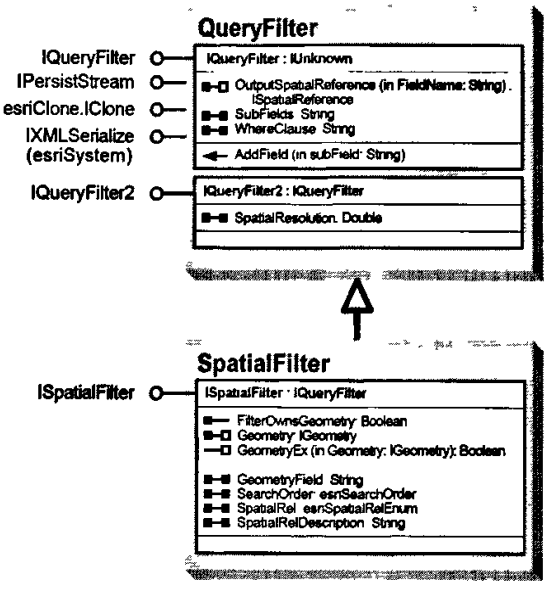


图 4-10 空间查询对象模型图

4.5.2 空间关系分析

空间关系支持基本的克雷门蒂尼（Clementini）关系，五种基本的克雷门蒂尼关系包括：相离（Disjoint）、相接（Touch）、叠盖（Overlap）、相交（Cross）和内含（Within）。esriSpatialRelIntersects、esriSpatialRelTouches、esriSpatialRelCrosses、esriSpatialRelOverlaps、esriSpatialRelWithin 和 esriSpatialRelContains 映射着相应的基本关系。其中交叉（Intersects）意味着非相离，包含（Contains，A 包含 B）意味着与内含相反（B 内含于 A），其他几个直接对应基本关系。

这些基本关系都属于枚举类型 esriSpatialRelEnum，ISelectionEnvironment 是 SelectionEnvironment 对象的主要接口，如图 4-11 所示，可以设置点、线、面之间的关系，然后进行空间关系操作。

下例是在进行空间关系分析操作时，用 ISelectionEnvironment 来设置图层要素之间的关系，代码如下：

```
Private Sub SpatialRelations (operator As esriSelectionResultEnum)
  Dim relOperator As esriSpatialRelEnum
  Dim pSelectEnv As ISelectionEnvironment
  Dim pMxApp As IMxApplication
  Set pMxApp = m_pApp
  Set pSelectEnv = pMxApp.SelectionEnvironment
  If (optSpatialOp(0).Value = True) Then
    pSelectEnv.AreaSelectionMethod = esriSpatialRelContains
  ElseIf (optSpatialOp(1).Value = True) Then
    pSelectEnv.AreaSelectionMethod = esriSpatialRelCrosses
  ElseIf (optSpatialOp(2).Value = True) Then
```

```
    pSelectEnv.AreaSelectionMethod = esriSpatialRelIntersects
  ElseIf (optSpatialOp(3).Value = True) Then
    pSelectEnv.AreaSelectionMethod = esriSpatialRelOverlaps
  ElseIf (optSpatialOp(4).Value = True) Then
    pSelectEnv.AreaSelectionMethod = esriSpatialRelTouches
  ElseIf (optSpatialOp(5).Value = True) Then
    pSelectEnv.AreaSelectionMethod = esriSpatialRelWithin
  End If
  pSelectEnv.LinearSelectionMethod = pSelectEnv.AreaSelectionMethod
  pSelectEnv.PointSelectionMethod = pSelectEnv.AreaSelectionMethod
  pSelectEnv.CombinationMethod = operator
End Sub
```

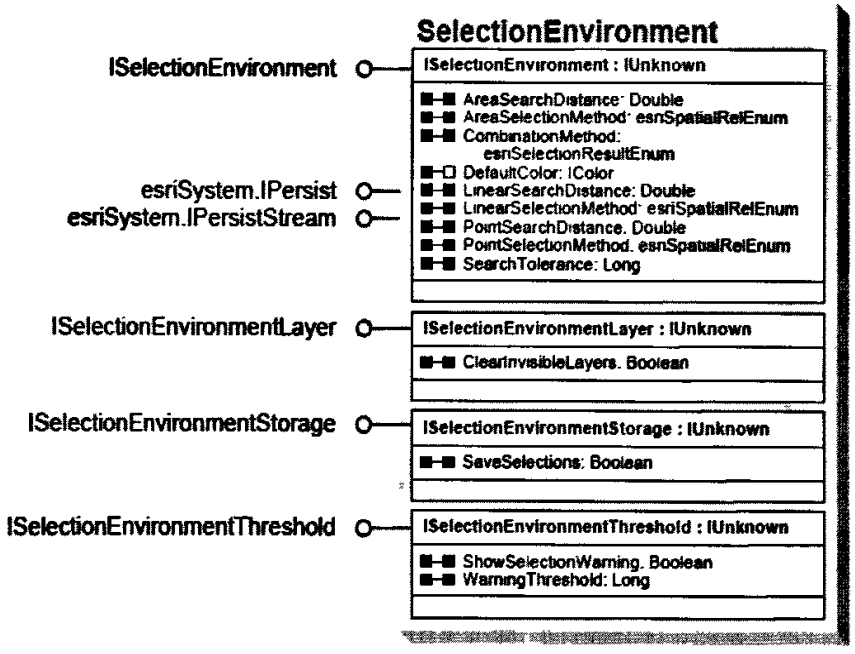


图 4-11 空间关系设置模型图

4.5.3 缓冲区分析

在 ArcGIS Engine 中缓冲区分析对应着一个类 FeatureCursorBuffer，它包括 IFeatureCursorBuffer，IFeatureCursorBuffer2 和 IBufferProcessingParameter 三个接口，如图 4-12 所示，有 Buffer 生成缓冲区图层并可以保存为多种形式，BufferToGraphics 可以直接在地图上生成缓冲区。

下例是在创建缓冲区时，用 FeatureCursorBuffer 类的接口来生成缓冲区，代码如下：

```
ipFeatureCursorBuffer->putref_FeatureCursor(ipFeatCursor);
ipFeatureCursorBuffer2 = ipFeatureCursorBuffer;
ipBufferProcessingParameter = ipFeatureCursorBuffer;
ipFeatureCursorBuffer->put_Dissolve(VARIANT_TRUE);
ipFeatureCursorBuffer->put_ValueDistance(m_nBufferDistance);
ipFeatureCursorBuffer->putref_FeatureCursor(ipFeatCursor);
ipFeatureCursorBuffer->put_PolygonBufferType(esriBufferAll);
ipFeatureCursorBuffer->put_Units(esriMeters, esriMeters);
ipBufferProcessingParameter->putref_FeatureClass(ipFeatCls);
ipBufferProcessingParameter->put_AdjustCirclesForProjection(VARIANT_TRUE);
ipBufferProcessingParameter->put_BufferSpatialReference(esriFeatureSetOptimizedSpatialReferen
ce);
ipBufferProcessingParameter->put_TargetSpatialReference(esriMapSpatialReference);
```

```
ipBufferProcessingParameter->put_InputHasPolygons(VARIANT_TRUE);
ipBufferProcessingParameter->put_SimplifyShapes(VARIANT_FALSE);
ipBufferProcessingParameter->put_GenerateRings(VARIANT_FALSE);
ipBufferProcessingParameter->put_SaveAsGraphics(VARIANT_FALSE);
ipFeatureCursorBuffer2->putref_BufferSpatialReference(NULL);
ipFeatureClassName->put_FeatureType(esriFTSimple);
ipFeatureClassName->put_ShapeType(esriGeometryPolygon);
ipFeatureClassName->put_ShapeFieldName(_bstr_t("Shape"));
ipFeatureCursorBuffer->Buffer(ipFeatureClassName);
```

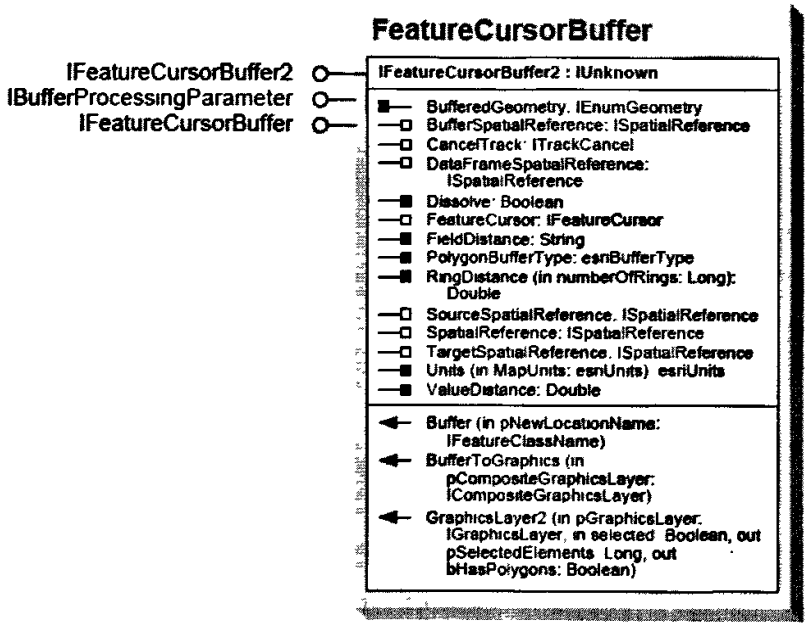


图 4-12 缓冲区分析对象模型图

4.5.4 空间统计分类分析

基础统计（BaseStatistics）组件用来生成和报告统计结果，如图 4-13 所示。IFrequencyStatistics 接口提供对用来报告频率统计的成员的访问。IGenerateStatistics 接口提供对用来生成统计结果的成员的访问。IStatisticsResults 提供对用来报告统计统计结果的成员的访问，可访问的属性包括 Count（数目）、Sum（和）、Maximum（最大值）、Minimum（最小值）、Mean（平均值）及 StandartdDieviation（标准差）。

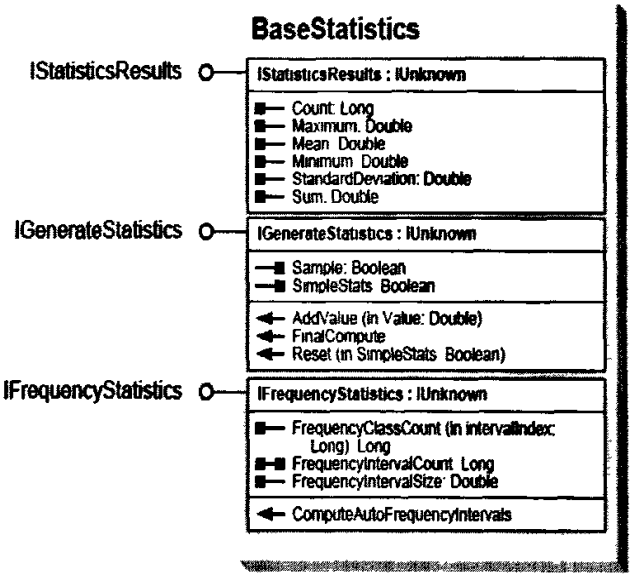


图 4-13 基础统计对象模型图

数据统计（DataStaticstics）组件允许返回统计结果及单个字段的唯一值（unique value），如图 4-14 所示。组件创建后，用来分析的数据通过 IDataStatistics::Cursor 属性，以游标的形式传入。

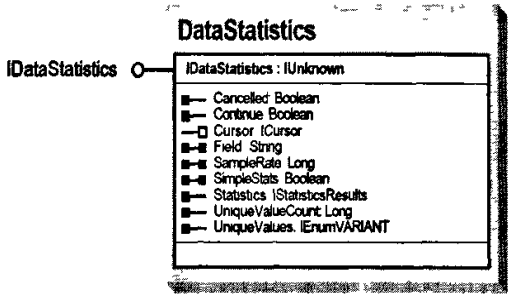


图 4-14 数据统计对象模型图

下例将利用 DataStaticstics 对象的 IDataStatistics 接口来统计地块面积的最大最小值和均值。代码如下：

```
IDataStatisticsPtr ipDataStat(CLSID_DataStatistics);
IFeatureCursorPtr ipFeatCursor;
ipFC->Search(NULL, FALSE, &ipFeatCursor);
ICursorPtr ipCursor(ipFeatCursor);
ipDataStat->putref_Cursor(ipCursor);
ipDataStat->put_Field((_bstr_t)"Shape_Area");
IStatisticsResultsPtr ipStatResult;
ipDataStat->get_Statistics(&ipStatResult);
long lCnt; double dMax, dMin, dMean;
ipStatResult->get_Count(&lCnt);
ipStatResult->get_Maximum(&dMax);
ipStatResult->get_Minimum(&dMin);
ipStatResult->get_Mean(&dMean);
```

第 5 章 应用实例研究

5.1 空间分析模块介绍

作者结合 GIS 的基本理论，运用 GIS 空间分析算法，用 Visual C++设计并实现了一个实际运行的系统。系统中包含空间分析模块，包括空间查询、空间量测、空间关系分析、缓冲区分析和空间统计分类分析等。在系统中，任意两个地物，基本图形要素之间均可进行空间查询、空间关系分析，可以对任意地物和基本图形要素进行缓冲区分析和空间统计分类分析。系统中的空间分析模块提供的功能如图 5-1 所示。

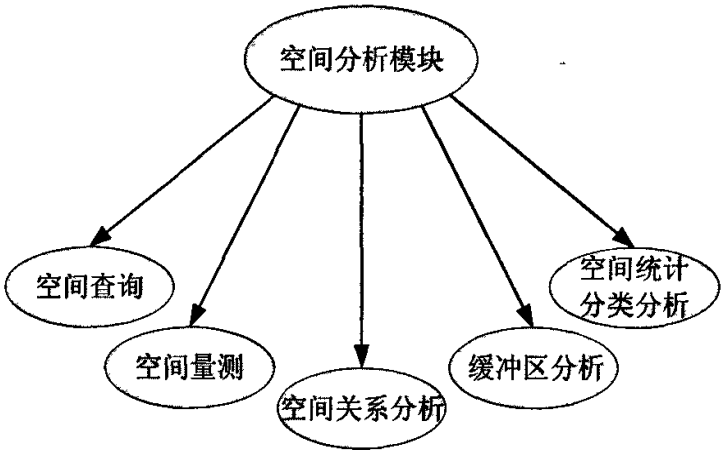


图 5-1 空间分析模块功能

1. 空间查询和量测

查询和定位空间对象，并用一些简单的量测值对地理分布或现象进行描述，如长度、距离、形状等。在此模块中主要包括图形与属性互相查询，基于空间关系的查询，以及距离量测等功能。

2. 空间关系分析

主要是指分析图层中的相关要素与参考图层中已选要素或在地图窗口中绘制的要素满足空间关系列表中指定的“空间关系”的要素按指定的选择集处理方式处理结果集。

3. 缓冲区分析

主要是指对地图窗口中已加载的图层在设定的缓冲区距离内按照一定的显示方式、生成方式和处理方式在选定要素周围标示缓冲区域，以便用户分析所选要素在指定缓冲区内的相关要素信息。

4. 空间统计分类分析

统计地图窗口中已加载图层的某类要素的面积，统计结果以面积分类统计对话框显示，并可将统计结果保存为文本文件。

5.2 运行效果

5.2.1 空间查询和量测功能示例

图 5-2 展示了在地图窗口中进行距离量测的运行结果。用鼠标在地图上画线来测量距离，可以在状态栏中显示线段距离和总距离。图中亮绿色的线显示了两点间的路线，在图的左下角状态栏中显示了线段距离和总距离。

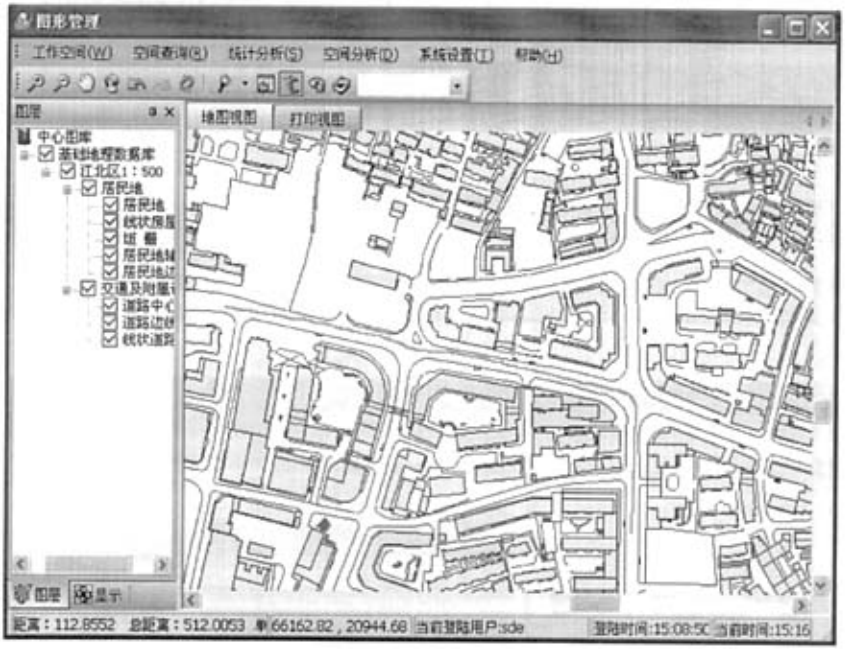


图 5-2 距离量测

图 5-3 展示了属性查图形的运行结果。从已知属性查询该属性对应的地物在地图上的位置，查询结果对应的地物在地图上外框以高亮显示，并将选中的地物的属性显示在系统底部属性列表窗口。图中红色的多边形表示被选中的地物，图底部的属性列表窗口显示了被选中地物的属性。

图 5-4 展示了图形查属性的运行结果。在地图上单击点选地物，查询选中的地物的外框高亮显示，并显示查询结果的对话框。



图 5-3 属性查图形

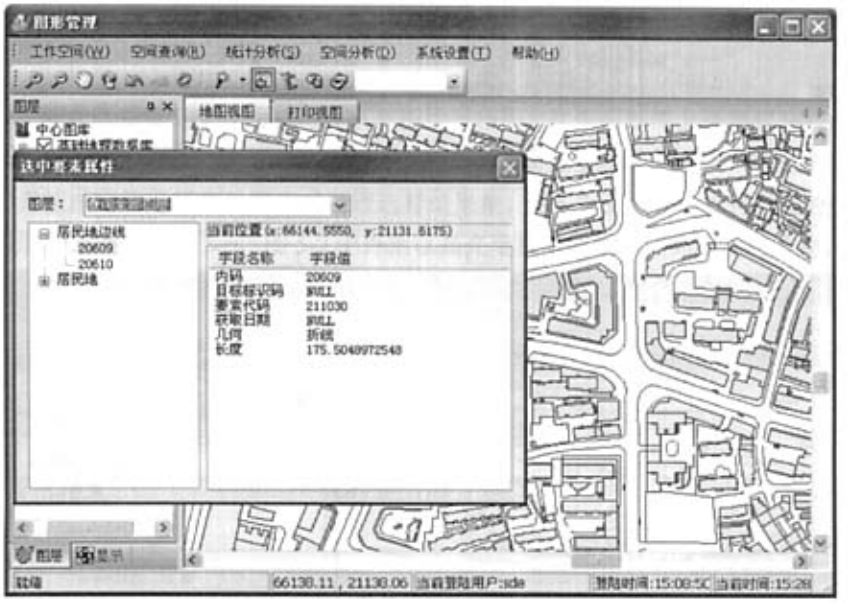


图 5-4 图形查属性

图 5-5 是空间关系查询的运行结果。其中目标查询是用选定的目标层和在地图上操作设置的目标进行查询，关系查询是用选定的目标层和用选择的关系层进行查询。查询结果对应的地物在地图上外框高亮显示，并将选中的地物的属性显示在系统底部属性列表窗口。图中以青绿色显示的地物即为被选中的地物。



图 5-5 空间关系查询

5.2.2 空间关系分析功能示例

图 5-6 是有选择集无交互的空间关系分析运行结果，首先在地图上选择要分析的要素，然后将参考图层中已选要素与分析图层中相关要素满足空间关系列表中指定的空间关系的要素按选定的选择集处理方式处理选择结果集。图 5-7 是无选择集有交互的空间关系分析运行结果。在图 5-6，图 5-7 中外框以高亮度显示的地物即为被选中地物。

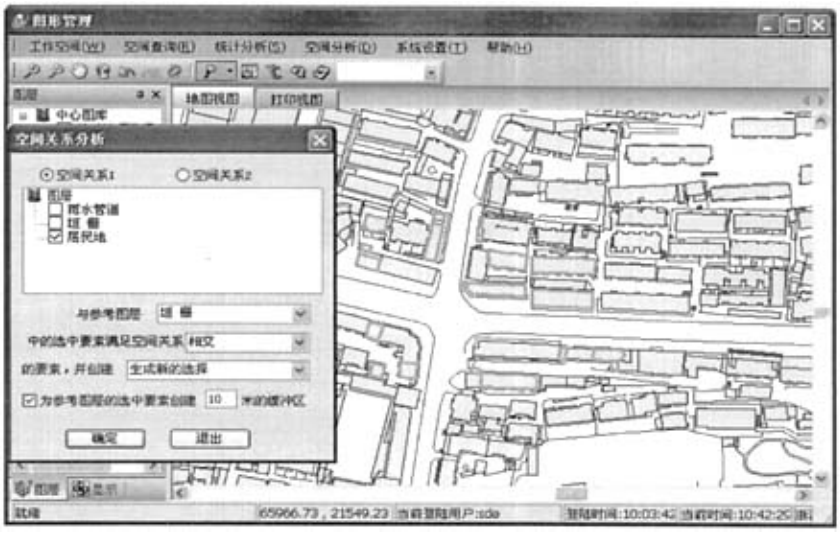


图 5-6 有选择集无交互的空间关系分析

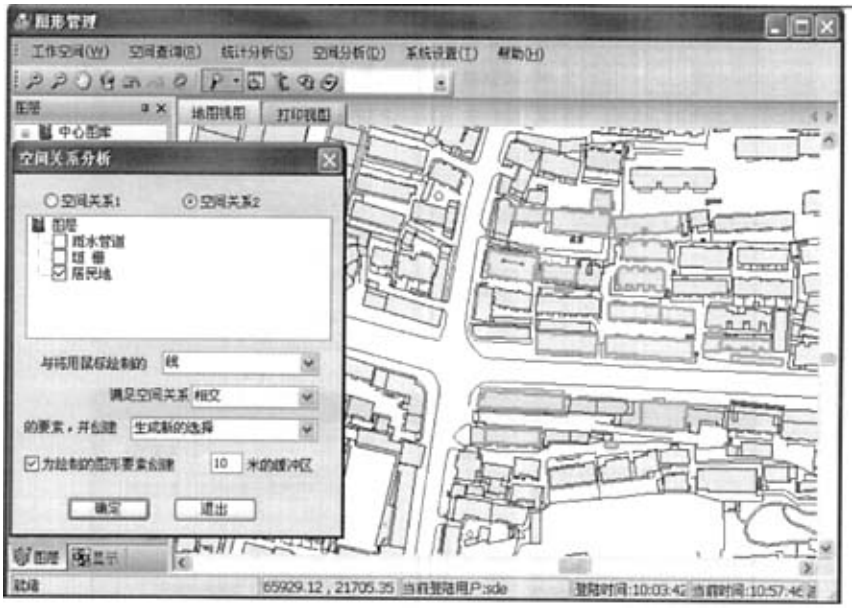


图 5-7 无选择集有交互的空间关系分析

5.2.3 缓冲区分析功能示例

图 5-8 设置缓冲区分析的相关参数。在图 5-8（a）中可以选择缓冲图层、设置缓冲距离和缓冲距离的单位，并可选择将缓冲结果集保存为图形或 Shapefile 文件。在图 5-8（b）中可以设置生成缓冲区时的缓冲区边界线的颜色、缓冲区范围内的填充颜色和填充样式。在图 5-8（c）中可以选择缓冲区的生成方式。在图 5-8（d）中可以选择缓冲区生成时的处理方式。



图 5-8 缓冲区分析相关属性设置

(a) 属性设置；(b) 显示方式设置； (c) 生成方式设置；(d) 处理方式设置

图 5-9 展示了缓冲区分析的运行结果。缓冲区分析可以对整个图层或已选择要素，交互选择缓冲区图层的字段，通过用户输入距离进行缓冲分析，并可查看缓冲结果。

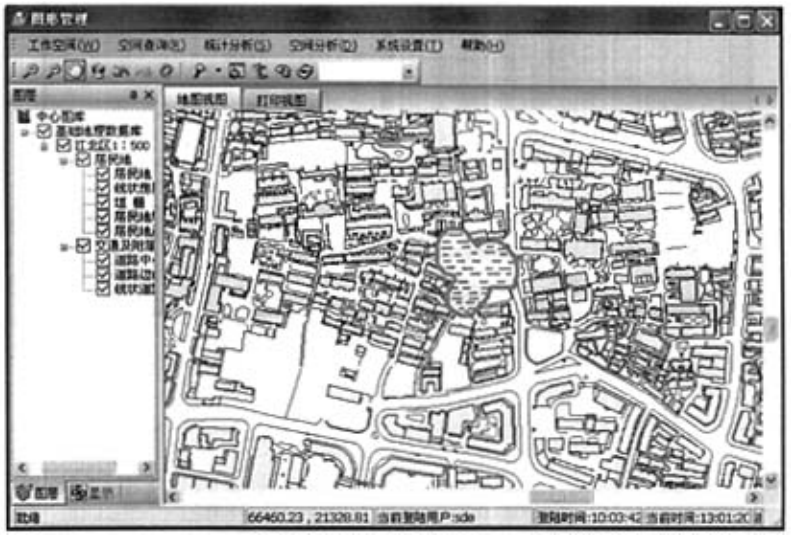


图 5-9 缓冲区分析

5.2.4 空间统计分类分析功能示例

本功能用于统计指定范围内的某类地物的面积，统计结果以面积分类统计对话框显示，如图 5-10。图 5-11 是保存统计结果为文本文件的运行示例。



图 5-10 面积分类统计



图 5-11 保存统计结果为文本文件

第6章 总结和展望

6.1 研究工作总结

空间分析的内涵极其丰富，作为GIS的核心部分之一，空间分析在GIS的应用中发挥着举足轻重的作用。目前GIS空间分析功能的偏弱严重阻碍了GIS作为空间数据分析和研究工具的使用，如何提高GIS空间分析功能是一个亟待解决的问题。本文从此问题出发，对GIS空间分析技术及其相关理论进行了研究。现将本文所作的研究总结如下：

(1) 系统地阐述了GIS空间分析的基本理论，探讨了空间数据模型、空间数据结构以及空间数据索引的原理，研究了空间数据模型的发展趋势。

(2) 分析了GIS空间分析的基本方法和空间分析的过程，探讨了GIS空间分析模型和建模方法，提出了空间分析模型的设计方案，并结合实例对空间分析模型的实现和实际应用进行了研究和探讨。

(3) 分析了GIS空间分析的基本方法的实现算法，分别对空间查询、空间关系、缓冲区分析和空间统计分析的实现算法进行了探讨和总结，并对空间查询和缓冲区分析实现的算法进行了优化和改进。

(4) 基于ArcGIS Engine技术对GIS空间分析方法的二次开发进行了分析和探讨，设计并实现了空间查询、空间关系分析、缓冲区分析和空间统计分类分析等功能。

(5) 结合实际应用系统，给出了一些应用实例，具体包括：空间查询和量测、空间关系分析、缓冲区分析、空间统计分类分析等。

6.2 后续工作展望

空间分析是GIS的重要特征之一，是GIS的核心和灵魂。本文对空间分析进行了探索和研究，取得了一些成果。然而，由于作者能力有限以及时间、精力等方面的原因，本论文在很多研究和应用方面还显得比较粗糙，有待进一步研究、完善，具体包括以下几个方面：

(1) 空间分析建模方法的研究和完善。空间分析建模是GIS空间分析研究的基础，模型的重用是其中的一个难题，如何找出GIS空间分析的基本算子和对象，以及如何以某种逻辑积木式组合为复杂的空间分析模型来达到无限重用的目的，还有待进一步的研究。

(2) 空间分析方法的进一步研究。在GIS空间分析基本方法的基础上，研究智能计算，探索基于智能计算技术的时空分析的有效模型和统一框架，并在GIS环境下建立时空一体化的时空过程模拟分析引擎。

(3) 空间分析算法的研究。在 GIS 空间分析方法的实现算法的效率、复杂度和所花费的代价等方面还需进一步的研究和探讨。

(4) 多维空间分析的研究。对多维信息的空间分析的机理进行分析、探讨和实现，对空间数据立方体的基本原理进行分析和探讨，研究如何使用空间数据立方体的分析操作来完成多维空间信息分析。

在论文搁笔之际，作者深感 GIS 空间分析的深入研究是一个长期的过程，本研究仅仅只是一个开端，很多问题还没有进行更深入的研究，但希望能对 GIS 空间分析方法的研究和发展起到一定的推动作用。最后，由于作者理论水平、实践经验等方面的限制，本文尚有许多不足之处，敬请各位师长、同仁指正。

致谢

逝者如斯，不舍昼夜，倏忽即逝的岁月，金子般的年华仿佛就要不见了，我很庆幸自己在两年的研究生生涯中没有虚度，不敢说学业有成，至少是追求不止，凡事但求无愧于父母的养育、恩师的教诲和自己的努力。

饮其流时思其源，成吾学时念吾师，在此谨向我尊敬的导师刘南教授和刘仁义教授致以诚挚的谢意与崇高的敬意。两位导师丰富的实践经验、渊博的专业知识、严谨的治学态度、务实忘我的工作作风、宽以待人的处事态度使我受益匪浅。两位导师在整个研究生阶段的学习生活、科研过程和论文撰写期间始终给我悉心的指导、鞭策和鼓励，让我深受感动。临别之际，真诚地祝福老师们工作顺利，桃李满天下。

感谢洪紫萍老师、朱建丽老师和谢炯老师两年来在学习和生活上给予的关心和帮助。

研究生学习期间朝夕相处的同学也是宝贵的财富，感谢我所有的师兄、师姐、师弟、师妹、同学和朋友们，是你们的情谊和帮助，让我在美丽的杭州感觉踏实温暖。

衷心感谢在百忙之中抽出时间审阅本论文的专家教授，感谢答辩委员会的各位老师和专家们对我的论文提出的宝贵建议，为我今后的学习和研究开拓了思路。

最后感谢我的亲人，焉得谖草，言树之背，养育之恩，无以回报，你们永远健康快乐是我最大的心愿。

李晓军

2007年5月于浙大

参考文献

陈建春．Visual C++开发 GIS 系统[M]．北京：电子工业出版社，2001．

陈述彭，鲁学军，周成虎．地理信息系统导论[M]．北京：科学出版社，2000．

陈彦军，吴国平，李敬民．基于 GIS 空间分析的物流配送模型研究及应用[J]．南京师范大学学报(工程技术版)，2004，4(3)：68-72．

崔铁军，董延春．地图数据的空间关系与数据模型[J]．测绘学院学报，2000，17(3)：195-200．

龚健雅．地理信息系统基础[M]．北京：科学出版社，2001．

顾军，吴长彬．常用空间索引技术的分析[J]．微型电脑应用，2001，17(12)：40-42．

郭仁忠．空间分析[M]．北京：高等教育出版社，2001．

韩勇，陈戈，李海涛．基于 GIS 的城市地下管线空间分析模型的建立与实现[J]．中国海洋大学学报，2004，34(3)：506-512．

黄杏元，汤勤．地理信息系统概论[M]．北京：高等教育出版社，1989．

江斌，黄波，陆峰．GIS 环境下的空间分析和地学可视化[M]．北京：高等教育出版社，2002．

柯新利．空间分析在数字城市中的应用[J]．咸宁学院学报，2005，25(6)：98-101．

赖格英．地理信息系统空间分析模型与实现方法的分析和比较[J]．江西师范大学学报(自然科学版)，2003，27(2)：164-166，184．

李德仁，龚健雅，边馥苓．地理信息系统导论[M]．北京：测绘出版社，1993．

廖崇高，杨武年，刘登忠等．基于 GIS 空间分析进行多源信息成矿预测[J]．物探化探计算技术，2002，24(2)：146-150．

刘南，刘仁义．地理信息系统[M]．北京：高等教育出版社，2002．128-184．

刘湘南，黄方，王平等．GIS 空间分析原理与方法[M]．北京：科学出版社，2005．

刘亚彬，刘大有．地理信息系统中空间对象间拓扑关系的推理[J]．软件学报，2001，12(12)：1859-1863．

马天智，张燕妮．空间分析方法、应用模型与 GIS 的关系[J]．湖南地质，2003，22(1)：70-72．

彭仪普．关于 GIS 数据结构的哲学思考[J]．铁路航测，2002(2)：22-24．

任鸿昌，吕永龙，姜英等．西部地区荒漠生态系统空间分析[J]．水土保持通报，2004，24(5)：54-59．

施冬，陈军，朱庆．利用 GIS 的空间分析功能进行油气储层综合评价[J]．物探化探计算技术，2004，26(2)：149-154．

陶华学，孙英君．GIS 空间分析模型的建立[J]．四川测绘，2002，24(4)：147-149．

王家耀．空间信息系统原理[M]．北京：科学出版社，2004．

王劲峰，柏延臣，朱彩英等．地理信息系统空间分析能力探讨[J]．中国图像图形学报，2001，6(9)：849-853.

王劲峰，李连发，葛咏等.地理信息空间分析的理论体系探讨[J].地理学报，2000，55(1)：92-102.

王明生，于金金．GIS 空间分析与铁路线路评价指标的量化[J]．铁道勘察，2005，31(6)：57-60.

王文慧，邱淑媛．GIS 的空间分析技术[J]．吐哈油气，2003，8(3)：377-382.

毋河海．关于 GIS 中缓冲区的建立问题[J]．武汉测绘科技大学学报，1997，22(4)：358-364.

吴建华，雷金平.空间分析方法在航线设计和航路监视中的应用[J].中国航海，2004(1)：41-43，61.

吴立新，史文中．地理信息系统原理与算法[M]．北京：科学出版社，2003.

谢华，都金康．基于优化理论和 GIS 空间分析技术的公交站点规划方法[J]．武汉理工大学学报(交通科学与工程版)，2004，28(6)：907-910.

徐京华．交通地理信息空间分析[J]．西南交通大学学报，2004，39(3)：353-357.

杨驰．GIS 空间分析建模构想[J]．测绘通报，2006(11)：22-25.

袁文，程承旗．基于基元叠加模型的一种缓冲区新算法[J]．地理信息世界，2000，3：13-17.

钟凯文．基于 GIS 的城市人防工程空间分析模型的建立与实现[J]．测绘与空间地理信息，2006，29(1).

朱长青，史文中．空间分析建模与原理[M]．北京：科学出版社，2006.

朱会义，何书金，张明．土地利用变化研究中的 GIS 空间分析方法及其应用[J]．地理科学进展，2001，20(2)：104-110.

Bradley O P. The need for integration[A]. In: Goodchild M F. Bradley O P. Louis T S(Eds). Environmental Modeling With GIS[C]，Oxford University Press，1993：30-34.

Christopher B Jones. Geographic Information System and Computer Cartography[M]. Longman Singapore Publishers(Pte)Ltd，1997.

ESRI. ArcGIS Desktop Help[DB/CD]. Redlands，California，ESRI Corp. 2004.

ESRI. ArcGIS Developer Help[DB/CD]. Redlands，California，ESRI Corp. 2004.

ESRI. Engine Developers Guide[M/CD]. Redlands，California，ESRI Corp. 2004.

Goodchild M F. Spatial Analysis Using GIS[M]. NCGIA，1994.

Haining R. Spatial Data Analysis in the Social and Environmental Science[M]. London：Cambridge University Press，1994.

Michael Zeiler. 为我们的世界建模[M]. 北京：人民邮电出版社，2004：21-30.

Riepley B D. Spatial statistics[M]. New York：Wiley，1981.

Unwin D. Introductory Spatial Analysis[M]. London： Mwthuen，1981.

作者简介

基本情况：

姓名	李晓军	性别	男	出生年月	1981.12	民族	汉
籍贯	河南巩义	婚否	否	研究生入学时间	2005.9	政治面貌	预备党员
现在工作或学习单位		浙江大学省 GIS 重点实验室				职务	无
单位通讯地址		浙江大学西溪校区地球科学系 154 信箱 310028					

主要简历	起止年月	学习或工作单位	职务、职称
	2001.9～2005.7	东北师范大学	学生
	2005.9～至今	浙江大学理学院地球科学系	硕士研究生

课程学习成绩	学位课程名称	学分	成绩	选修课程名称	学分	成绩
	现代网络与 GIS	2	83	战略管理专题	1	82
	地图设计与研究	2	87	易经与文化	1	87
	科学社会主义理论与实践	1	86	现代金融理论专题	1	80
	地理信息科学导论	3	89	生命伦理和生命法专题	1	87
	遥感图像处理与分析	3	88			
	硕士生英语	2	74			
	自然辩证法	2	81			
	土地资源与管理	2	80			
	GIS 程序设计	2	86			
	GIS 新技术及应用	2	80			
	GIS 实践	2	90			
				课程修习总学分	27	

科研项目情况：

课题名称	课题类别	研究时段	本人承担任务	完成情况
金华市基础空间数据交换平台	横向协作	2005.09～2006.08	软件设计开发	已经完成
城市规划管理信息系统	横向协作	2006.09～2006.11	软件设计开发	已经完成
测绘资料管理信息系统	横向协作	2007.01～2007.04	软件设计开发	已经完成

GIS空间分析方法研究

作者： 李晓军
学位授予单位： 浙江大学

相似文献(10条)

1. 期刊论文 王喜. 秦耀辰. 张超. WANG Xi. QIN Yao-chen. ZHANG Chao 探索性空间分析及其与GIS集成模式探讨 -地理与地理信息科学2006, 22(4)

探索性空间分析基于让数据说话的理念, 可以避免野值或非典型观测值的误导. 在对探索性空间分析的基本原理和概念界定的基础上, 探讨交互式和动态空间数据分析、地学可视化及可视化空间分布、确认性空间分析、空间数据挖掘等探索性空间分析的主要技术. 由于统计分析软件和GIS的数据格式差异很大, 直接将二者简单集成存在一定困难, 因此切实可行的集成方式是采用对象连接和嵌入(OLE)技术, 分别调用统计分析软件的探索性分析功能(或者函数)以及GIS的地图显示和空间分析功能, 并进行必要开发, 实现二者的集成. 最后对探索性空间分析的发展方向进行展望.

2. 期刊论文 靳军. 刘建忠 国内外GIS软件的空间分析功能比较 -测绘工程2004, 13(3)

通过分析空间分析与空间数据的关系, 详细比较了国内外GIS软件的空间分析功能, 介绍了国内外成熟的GIS软件在空间分析功能上的优势, 对空间分析的发展进行了展望.

3. 期刊论文 田雨. 韩作振. TIAN yu. HAN Zuo-zhen MATLAB辅助GIS空间分析建模实验设计与应用 -计算机工程与应用2010, 46(2)

根据地理信息系统GIS的特点和空间分析实验的特点, 提出利用MATLAB软件进行GIS空间分析实验设计, 并结合一个实例, 给出了MATLAB空间分析建模实验应用的主要内容和方法. 此实验设计应用有助于学生较快地理解GIS空间分析实验原理, 学会利用MATLAB软件分析解决GIS地学实际问题.

4. 期刊论文 周秋生. 梅晓丹. 黄明. ZHOU Qiu-sheng. MEI Xiao-dan. HUANG Ming 模糊数学与GIS空间分析支持下的城市警务预案设计 -测绘工程2008, 17(6)

将模糊数学与GIS空间分析相结合的GIS分析模型, 已成为探索GIS空间分析技术发展的新热点. 文中从模糊数学与GIS空间分析的基本理论入手, 以基于模糊算法的城市警务预案GIS空间分析为例, 具体阐述模糊C均值的自适应算法在GIS空间分析中的实际应用.

5. 学位论文 陈雪冬 红水河上游“龙滩水库GIS”空间分析应用模型的设计与实现 2004

随着GIS应用领域的拓宽, 对其空间分析能力的要求也越来越高. GIS发展的重心已经由侧重于数据获取、存储、管理、检索的初级阶段逐步向模拟、分析、预测预报的高级阶段转移. 人们也逐渐看到地理信息系统与应用模型的集成是地理信息系统与其他学科联合应用的必然, 但由于GIS和专业应用模型都具各自独立性, 它们之间的相容性成为集成技术的关键, 同时空间数据的复杂性也加剧了GIS与应用模型集成的难度. 在上述背景下, 该文围绕"龙滩水库GIS"系统的设计目标, 针对水库蓄水淹没后产生的一系列问题, 例如水库淹没损失评估、水库库容管理、水库库区移民安置区选址、移民安置区环境容量分析和相应的基础设施建设等问题, 设计了对应的空间分析应用模型, 用以解决上述问题. 水库蓄水淹没后期处理工作复杂多样, 涉及的数据形式和处理方法也很独特. 以GIS的数据形式表现水库淹没区的各种实物特征, 以GIS对空间数据的处理分析方法模拟水库淹没处理分析方法, 以水库建设后期处理的专家知识构建空间分析应用模型, 通过以上原则使水库淹没区的现实世界, 转换为计算机可操作的数字世界, 使GIS与水库淹没处理相互兼容, 达到二者完全意义上的统一协调, 从而使水库淹没的处理工作更加科学高效. 该文主要研究成果及创新如下:1. 针对水库建设后期工程(即水库蓄水淹没后)产生的一系列问题, 应用GIS空间分析技术, 结合水库后期建设方面专家经验和知识, 设计了用于解决以上问题的5个空间分析应用模型, 给出了这些模型的设计原理和实现方法. 2. 针对目前GIS、GIS空间分析技术、应用模型和水库相互结合难的现状, 以上述5个空间分析应用模型为基础, 探索三者之间相互结合使用的思路和技术方法, 创造和改进了生成水库淹没范围、道路选线、生成水位库容曲线图、移民安置选址分析和移民安置区环境容量分析等空间分析应用模型的实现算法并比较透彻地分析了它们实现的技术细节. 3. 设计和初步实现了"龙滩水库GIS决策支持系统"的系统原型, 对GIS空间决策支持系统的关键技术、技术路线和应用集成进行了阐述和成功的试验.

6. 期刊论文 朱欣娟. 石美红. 薛惠锋. 彭文祥 基于GIS的空间分析及其发展研究 -计算机工程与应用2002, 38(18)

空间分析是基于地理对象空间布局的地理数据分析技术, GIS的空间分析功能偏弱已经严重地阻碍了其作为空间数据分析和研究工具的使用. 新兴的智能计算技术为空间分析提供了新的机遇和发展契机, 神经网络、进化计算和人工生命在基于GIS的空间分析建模应用上具有巨大潜力. 研究发现基于GIS空间分析的发展将向时空分析领域拓展, 同时急待建立基于智能计算技术的时空分析的有效模型和统一框架, 形成GIS与时空分析模型高度融合的时空决策平台.

7. 学位论文 梁勤欧 人工免疫系统在GIS空间分析中的应用研究 2003

人工免疫系统的研究, 正逐渐成为工程技术和智能计算领域的研究热点. 人工免疫系统为GIS空间分析的研究与开发提供了新的理论和技术支持. 目前国内外人工免疫系统在GIS空间分析中的应用研究很少, 针对这种现状, 该文以克隆选择算法(CLONALG)及其扩展模型遗传克隆选择算法(CLOGA)、人工免疫网络模型(aiNet)等为主要研究方法, 以GIS空间分析中的定位—分配问题、预测问题、聚类问题等为主要应用和实验目标, 系统研究了人工免疫系统(AIS)在GIS空间分析中应用的理论与方法. 研究了GIS空间分析的涵义, 指出地理信息空间分析应称作"广义空间分析";GIS空间分析应该称作"狭义空间分析". GIS空间分析可以理解为目前GIS技术可以实现的地理信息空间分析. 提出在当今计算机和GIS理论和技术条件下新的GIS空间分析功能, 提出了人工免疫系统(AIS)应用于GIS空间分析的必要性和可能性. 研究了人工免疫系统(AIS)的国内外进展, 在此基础上, 提出了人工免疫系统(AIS)在空间信息系统中的主要应用方向, 包括空间数据获取、空间数据挖掘、GIS空间分析、地理系统模拟模型等. 分析研究了生物免疫系统的一些主要的概念和名词术语的含义, 并就人工免疫系统中涉及较多的克隆选择理论和独特型免疫网络理论, 进行了基本原理的分析研究. 为进一步分析研究和设计人工免疫系统模型奠定了基础. 研究了主要的人工免疫网络模型和免疫遗传算法模型的基本原理、算法流程及其主要特点. 提出它们在空间信息系统研究中的一些可能的应用方向. 指出人工免疫网络模型适合于空间(数据)信息的聚类、分类以及地理系统模拟研究; 免疫遗传算法模型适合于空间信息模型分析和地图、遥感图像的识别以及地理优化问题的研究. 归纳总结了人工免疫系统(AIS)在理论和技术领域有待进一步研究和解决的问题. 提出了人工免疫系统(AIS)理论模型方面, 以及人工免疫系统在空间信息系统中的应用方面未来的研究方向.

8. 期刊论文 余柏蒗. 吴健平. 魏晓峰. 刘杰 空间分析GIS软件开发研究 -测绘与空间地理信息2004, 27(5)

针对目前已有的空间分析软件包和GIS商业软件不能满足空间分析应用需求的现状, 我们利用组件技术和插件技术相结合的方法开发了一个空间分析GIS软件. 利用组件技术构建GIS框架, 利用插件技术开发空间分析插件, 并插入到GIS框架中. 软件目前已具有7类共17个空间分析模块, 其他开发人员可以按照插件开发规范开发新的模块, 扩展软件的功能. 软件已在一些研究项目中应用, 取得很好的效果.

9. 学位论文 刘晓 基于栅格数据的GIS空间分析算法及其软件实现研究 2005

地理信息系统(GeographyInformationSystem，GIS)是当代信息技术(InformationTechnology，IT)新的热点研究领域之一，在国民经济建设、资源与环境管理、国防与国家安全、旅游与社会文化等各领域，均具有广范的应用。在现实的应用开发中，GIS的功能与所选用的GIS平台软件密切相关。目前流行的商用GIS平台软件在空间分析功能方面差异较大，以ArcGIS等为代表的一类发展成熟的GIS平台软件在空间分析方面功能较强，但具有价格昂贵、系统复杂、培训及维护成本高等缺点，从而在一定程度上限制了这些软件的普及与推广使用。

本文系统的研究了栅格数据常用的空间分析方法及基于栅格数据的空间建模方法，归纳了各种栅格数据空间分析方法的使用条件及相互区别与联系

。在此基础上，利用面向对象技术，研制、开发了一个基于栅格数据的GIS空间分析工具——RasterTools。该工具简单实用，界面友好，使用的数据格式全部为明码文件。除了使用系统中预定义的空间分析功能外，还可以通过更改已有空间分析脚本，或编写全新的空间分析脚本的方法，实现更为丰富的空间分析和空间建模功能。

更进一步，顺应GIS软件发展的新潮流，分析、研究了ComGIS软件开发所依赖的技术基础，包括COM、OLE、ActiveX等内容，成功研制了一个新的GIS组件-RasterToolsObi。该组件以ActiveX控件的形式向客户提供了对栅格数据进行浏览、查询、空间分析等操作的功能，用户可以很方便的在自己的应用系统中实现与RasterTools系统工具相同的功能。RasterTools、RasterToolsObj两个产品为用户提供了在不同层面上实现对栅格数据进行操作的各种方法。在与传统信息系统耦合、嵌入开发及软件的开放性、可扩展性、使用复杂性及降低开发成本等各方面本软件均展现出明显的优势。

本文最后探讨了两个研究成果的应用领域和推广前景，并通过实际系统的开发，对RasterTools和RasterToolsObj两个成果进行了检验。结果证明，GIS系统工具RasterTools以及基于COM技术开发的ActiveX控件RasterToolsObj，具有较强的栅格数据处理功能并能提供灵活的栅格数据空间分析方法，特别是该组件具有的可以执行脚本语言的特点，更拓展了它的应用范围。这两个成果完全可以满足一般GIS应用项目的要求。

伴随计算机软硬件水平的不断提升，栅格数据在GIS应用项目中必将起到越来越重要的作用。RasterTools系统以及基于COM技术开发的RasterToolsObj控件成本低廉，功能专业，为基于栅格数据的GIS系统开发提供了一条捷径。同时由于两个产品功能专一，有灵活的脚本编写功能，因而也可以用于教学、科研等领域。

10.期刊论文 赵鹏祥.郝红科.刘广全.ZHAO Peng-xiang.HAO Hong-ke.LIU Guang-quan GIS空间分析在退耕还林中的应用研究 -水土保持通报2005,25(5)

空间分析功能是GIS的本质特征.选择黄土高原小流域退耕还林(草)工程为研究对象,以探讨GIS空间分析在退耕还林(草)工程中的应用方法为目标,确定了一种基于GIS空间分析的黄土高原小流域退耕还林(草)规划方法;建立了相关地理编码体系和规则,并运用GIS空间分析的坡度分析、坡向分析、叠置分析、属性分析等功能实现了规划的全过程,完成了黄土高原小流域退耕还林(草)规划图以及退耕地还林面积和还林规划面积统计.结果表明,此方法在以小流域治理为特点的黄土高原地区退耕还林(草)工程实施中有借鉴意义.

本文链接：http://d.g.wanfangdata.com.cn/Thesis_Y1124420.aspx
授权使用：中南大学(zndx)，授权号：9d1dd511-0012-46a1-9030-9db800c1bce0
下载时间：2010年7月19日