



第3章

空间数据模型

3.1 GIS 空间认知和空间抽象

3.1.1 GIS 空间认知和空间抽象的实验背景

在地理信息系统中,现实世界的地理现象具有连续性、复杂性和多尺度特征,难以被计算机直接表达与处理。因此,有必要通过空间认知与空间抽象,将人类对地理空间的直观理解转换为形式化、结构化的空间模型。GIS 空间认知强调人类对空间位置、形态、分布及相互关系的理解方式,而空间抽象则是在此基础上对现实世界进行有目的的简化与概括,仅保留与研究目标相关的空间特征和属性信息。通过空间抽象,复杂的地理实体被表达为点、线、面或场等基本空间对象,为后续的空间建模、分析与计算奠定基础。开放地理空间信息联盟(Open Geospatial Consortium, OGC)是一个国际性的非营利性标准化组织,致力于制定和推广地理空间数据与服务的开放标准,以促进不同平台、系统和应用之间的互操作性。自 1994 年成立以来,OGC 已发布多项被全球广泛采用的核心标准。在数据建模方面,OGC 提出了对现实世界与地理信息系统之间的映射关系进行规范的统一框架,其核心目的在于为制定具体且具备互操作性的地理信息实施标准提供充分的概念模型与理论基础,从而为后续标准的设计与实现提供指导与支撑,并成为 GIS 空间认知和空间抽象中的重要基础。

3.1.2 GIS 空间认知和空间抽象的实验目标

理解 GIS 空间认知的基本思想与空间抽象的核心原则,掌握从现实世界到地理空间对象的抽象过程,能够根据研究需求合理选择抽象层次和空间表达方式,为概念模型与逻辑模型的构建提供理论依据。

3.1.3 GIS 空间认知和空间抽象的层次

本实验采用的 GIS 空间认知和空间抽象方法借鉴了 OGC 抽象规范的理念,将现实世界的地理实体与现象分层抽象为可概念化、可结构化的空间模型,为进一步的空间分析与系统开发提供理论基础。GIS 空间认知和空间抽象过程可以划分为 9 个相互衔接的“世界”,每一个世界对应现实世界向数字 GIS 转换过程中的一个抽象层次,如图 3-1 所示。

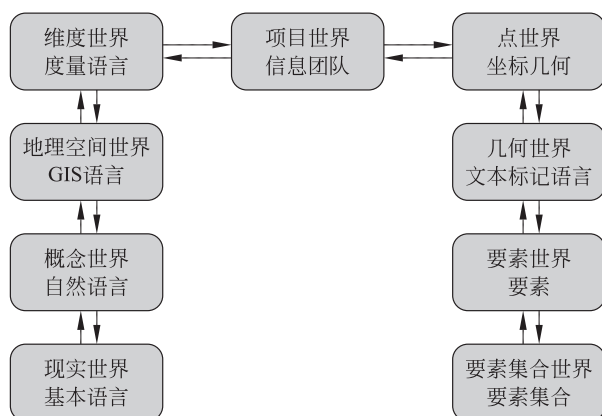


图 3-1 OGC 九层抽象模型

(1) 现实世界

现实世界是指所有事实的集合,不管它们是否被人类所知。这个层次并不涉及任何形式的抽象或建模,而是直接指代我们能观察到的真实世界,包括自然界的各种现象(如地形、水体、植被等)和人造的对象(如建筑物、道路、基础设施等)。

(2) 概念世界

概念世界是自然语言的世界,我们看到并认识到那些可以命名的东西。

(3) 地理空间世界

概念层次的世界充满了复杂的形状、样式、细节,这些复杂性在地理空间世界中被消除,并用简单的、浅显的抽象来代替。

(4) 维度世界

维度世界是地理空间世界的一个抽象概念,需要借助一系列测量工具进行测量,如卷尺、经纬仪、GPS 和/或指南针,并需要识别其中的一元关系(如弧的长度)和二元关系(如两点之间的距离、包含关系)。

(5) 领域/项目世界

地理信息团体是指共享数据的用户群,他们属于不同的专业领域,可以是数据使用者,也可以是数据提供者。地理信息团体将整个地理空间世界中的一个特殊的子集看成一个抽象。在三个不同的应用中,同一对象可以被抽象为三个不同的项目模型。正是项目世界语言的多样性导致了 GIS 信息交互的难题。

(6) 点世界

每个项目世界都有一个项目范围内的坐标参考系统,可以实现坐标定位,可以将点世界想象为笛卡儿空间充满了有限的特殊点集合。

(7) 几何世界

几何世界由点、多边形、多面体等填充,所有这些都在一个抽象坐标系中。点世界和几何世界之间的关联实际上是一个派生的关联。从点到几何图形的映射关系,由项目世界抽象中捕获的几何图形模式决定。

(8) 要素世界

不同类型的要素包含不同的属性集合,每个要素由两部分核心组成:几何形状与属性模式。

(9) 要素集合世界

在要素世界的基础上,将多个要素组织为集合或空间体系,突出要素之间的空间关系、拓扑结构及相互作用,为空间认知、模式识别与综合推理提供整体框架。

3.2 概念模型的设计与构建

3.2.1 概念模型设计与构建的实验背景

空间数据模型是 GIS 理论与应用体系中的核心组成部分,其本质在于对现实世界中地理现象和实体的空间特征、属性特征及其相互关系进行抽象,并转换为计算机可处理的形式化描述。科学合理的空间数据模型不仅决定了 GIS 对复杂地理对象的表达能力,更直接影响空间数据的存储效率、查询性能、分析深度以及可视化效果。在面向特定应用领域(如城市公共安全、应急管理)时,针对性地构建契合实际需求的空間数据模型,是实现精准建模、高效分析与智能决策的关键前提。

本实验结合城市空间中不同地理要素的特性,开展面向城市消防与公共安全的空间数据模型设计。随着城市规模持续扩张,道路网络、公共绿地、消防管道、消火栓等基础设施的数量与复杂度显著提升,其空间分布形态多样、拓扑关系交织,共同构成支撑城市运行与应急响应的基础骨架。这些要素在几何形态上呈现点(如消火栓)、线(如道路、消防管道)、面(如公园、建筑地块)等基本类型,在语义属性上则涵盖功能类别、服务半径、维护状态等多维信息,并通过邻接、连通、包含等空间关系形成有机整体。与此同时,城市空间中亦存在大量连续变化的场域型现象,例如基于设施布局与路网结构所衍生的消防服务能力空间覆盖、应急响应时间随距离衰减的梯度分布,以及由人口密度、建筑类型等因素耦合形成的火灾风险强度场。此类现象具有明显的空间连续性与过程性,难以通过离散的几何对象完整刻画,而需借助栅格模型、不规则三角网(TIN)或场模型(field model)等连续空间数据表达方式进行建模。

3.2.2 概念模型设计与构建的实验目标

深入理解 GIS 中常用的空间数据概念模型(如对象模型、场模型等)的基本原理、适用场景及其在表达不同类型地理空间现象时的匹配关系,并结合具体案例进行概念模型构建实践。

3.2.3 概念模型设计与构建的要素

本实验假设需面向某中等规模城市开展公共安全空间信息系统的构建,重点支撑消防设施布局优化与应急响应能力评估。在该城市空间中,既存在道路、公园、消防管道、消火栓等具有明确几何边界和独立身份的离散基础设施要素,也存在消防服务能力覆盖范围、应急响应时间衰减场、火灾风险强度分布等随空间位置连续变化的场域型现象。这些要素共同构成了城市公共安全运行的空间基础,其表达精度与组织方式将直接影响后续分析的科学与决策的有效性。针对上述复杂多样的地理对象,需依据其空间形态、属性特征及功能语义,选择适配的概念模型进行抽象与组织。

(1) 道路要素。从基础信息描述的角度看,道路要素需重点刻画如道路名称、等级等语义属性;而在空间关系方面,则需考虑与其他要素的交互模式。例如,道路与公园之间通常

表现为相邻关系,而与消防管道则多为相离关系。鉴于其线性的空间形态特征,道路要素可被概括为线状几何类型。

(2) 公园要素。公园作为重要的公共绿地资源,在构建概念模型时应着重描述其名称、面积等基本信息。在空间关系上,公园与消火栓之间可能存在包含关系,即公园内部可能设有若干消火栓;同时,公园与周边道路之间常呈现相邻关系。由于公园具有明确的边界和较大的占地面积,因此适合用面状要素表示,便于进行区域分析及功能分区研究,如图 3-2 所示。

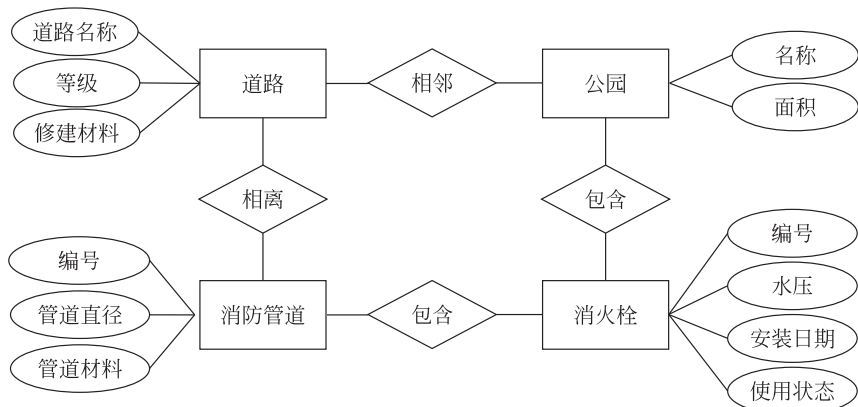


图 3-2 公园消防系统关系模型

(3) 消火栓要素。消火栓是城市消防安全体系中的关键节点,建模时应关注其编号、水压、安装日期和使用状态等属性信息。考虑到消火栓通常位于特定位置且体积较小,故将其抽象为点要素较为适宜。此外,消火栓往往分布在靠近消防管道的地方,甚至直接位于某些开放空间或设施内部,如公园之中,这进一步体现了其作为独立点对象的特性。

(4) 消防管道要素。对于消防管道而言,重要的是记录其编号、管径以及材质等技术细节。在空间布局上,消防管道虽然与道路保持一定距离,但会经过多个区域并连接众多消火栓,形成一个复杂的管网系统。因此,采用线要素来表达消防管道既能反映其实体形态,也能方便地展示其覆盖范围和服务路径。

(5) 连续变化的城市现象。除了上述基于对象模型的城市基础设施要素外,还有许多城市现象表现出连续变化的特点,如消防服务能力、应急响应效率以及风险强度等。这些现象难以通过离散的对象模型精确描述,更适合采用场模型进行抽象。在场模型框架下,整个研究区域被视为一个连续的二维空间域,其中任何一点都对应着特定的属性值,代表该地点的服务水平或风险程度。这种方法强调了属性随空间位置的变化规律,适用于模拟没有明确边界的地理现象。例如,通过构建场模型可以评估某个区域内各处的消防响应时间或火灾发生概率,从而为制定有效的城市消防策略提供科学依据。

3.3 逻辑模型的设计与构建

3.3.1 逻辑模型设计与构建的实验背景

在完成概念模型的构建之后,需进一步设计逻辑模型,以实现从概念模型到计算机可处

理形式的过渡。逻辑模型是连接概念模型与物理模型的中间环节,其作用是将概念模型中定义的空间实体、属性及其相互关系转换为计算机可处理的逻辑结构。它不涉及具体存储细节,但明确了数据的组织方式和关联规则。传统上,逻辑数据模型主要包括层次模型、网状模型、关系模型和面向对象模型,各类模型各有特点,适用于不同的应用需求。

3.3.2 逻辑模型设计与构建的实验目标

掌握逻辑模型的基本构成要素(包括实体、属性、关系与约束),能够依据概念模型设计合理的逻辑表达方案,并厘清逻辑模型与后续物理模型之间的衔接关系。

3.3.3 逻辑模型设计与构建的实验步骤

本节基于 3.2 节所建立的概念模型,开展城市地理要素的逻辑模型设计与构建。

(1) 逻辑模型设计需求分析。逻辑模型的构建需紧密结合城市基础设施管理的实际应用需求,围绕空间实体的三个核心维度进行系统设计:实体属性、实体间关系以及约束条件。其中,实体属性用于描述各类地理要素的基本信息(如名称、编号、状态等),支撑后续的信息查询、统计与可视化;实体间关系主要刻画不同地理要素之间的空间拓扑关系,包括相交、邻接、包含、相离等,为网络分析、服务覆盖评估等空间操作提供基础;约束条件则用于规范数据的完整性与一致性,例如确保消防栓必须位于道路缓冲区范围内,或停车区不得与公交站点重叠等业务规则。

(2) 逻辑模型的具体实现。以 3.2 节中定义的道路、公园、消防栓和消防管道的概念模型为基础,采用关系型数据模型对其进行形式化表达。具体而言,将每一类空间实体映射为一个关系表,如表 3-1~表 3-4 所示,其字段对应实体的关键属性;同时,针对实体间的空间关系,通过外键关联或独立的关系表予以显式表达。在完成所有地理实体向关系表的映射后,下一步是构建实体-关系模型图(entity-relationship diagram, ERD),即将结构化的表格及其关联关系可视化为图形化的关系模型,如图 3-3 所示。该过程旨在清晰表达各数据表之间的逻辑联系、主/外键约束及整体数据架构,从而为数据库设计提供直观、规范的指导。

表 3-1 道路类

属性	字段类型	取值限制	备 注
道路编号	字符型	长度小于 20 的字符串	主键
道路名称	字符型	长度小于 20 的字符串	
道路等级	字符型	可包含“主干道、次级道路、支路”等道路等级	单位为“米”
道路宽度	浮点型	大于 0 的浮点数	
通行状态	逻辑型	只能是“正常、故障”	

表 3-2 公园类

属性	字段类型	取值限制	备 注
公园编号	字符型	长度小于 20 的字符串	主键
公园名称	字符型	长度小于 20 的字符串	

续表

属性	字段类型	取值限制	备 注
公园类型	字符型	长度小于 20 的字符串	
公园面积	浮点型	大于零的浮点数	单位为“平方米”
开放状态	逻辑型	只能是“正常、故障”	

表 3-3 消火栓类

属性	字段类型	取值限制	备 注
消火栓编号	字符型	长度小于 20 的字符串	主键
消火栓类型	字符型	长度小于 20 的字符串	
出水口数量	整型	0~20 的整数	单位为“个”
所属管道编号	字符型	长度小于 20 的字符串	
安装日期	日期型	日期	
工作状态	逻辑型	只能是“正常、故障”	

表 3-4 消防管道类

属性	字段类型	取值限制	备 注
管道编号	字符型	长度小于 255 的字符串	主键
管道材质	字符型	可包含“铸铁、PE”等材质类型	
管道直径	浮点型	大于零的浮点数	单位为“米”
管道埋深	浮点型	大于零的浮点数	单位为“米”

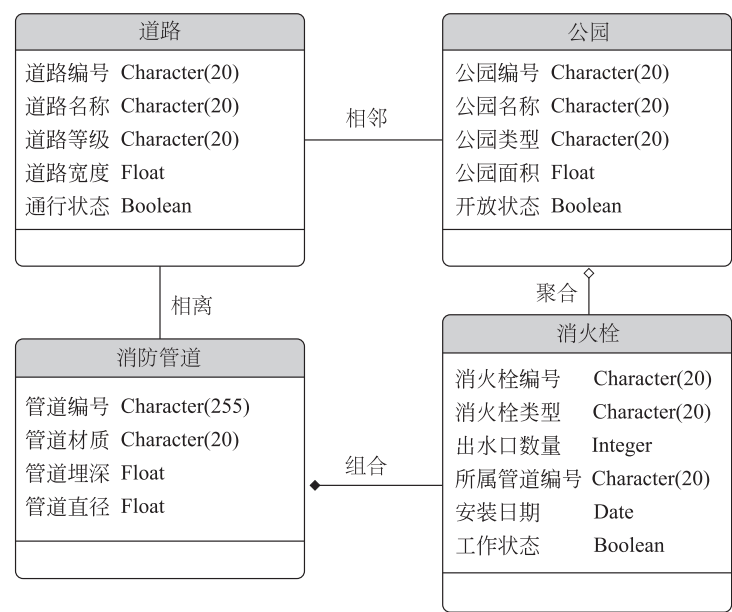


图 3-3 实体-关系图示例

在本项目的逻辑模型设计中,除对道路、消火栓、公园等离散地理实体采用对象模型进行关系化表达外,亦需对城市空间中具有连续分布特征的场域型现象进行系统建模。此类现象既包括传统的二维表面场(如地表火灾风险强度、消防服务能力覆盖范围、应急响应时间衰减场),也涵盖日益重要的三维体场(如地下消防管网水压分布、高层建筑内部烟雾浓度扩散场、城市热岛效应的垂直梯度等)。在逻辑层面,这些连续现象被统一抽象为定义于城市空间域上的标量场(scalar field):二维场可表示为从平面位置 (x,y) 到属性值的映射函数 $f(x,y)$,三维场则扩展为从空间坐标 (x,y,z) 到属性值的映射函数 $f(x,y,z)$ 。无论维度如何,该场在逻辑模型中均被视为一个独立的数据实体,其核心语义在于支持“按任意空间位置查询属性值”的操作能力,并可与离散设施建立逻辑关联。

3.4 物理模型的设计与构建

3.4.1 物理模型设计与构建的实验背景

完成概念模型与逻辑模型的设计之后,需进一步设计物理模型,以实现地理信息从抽象表达向可计算、可存储数据形式的最终转换。物理模型是空间数据建模体系中的最底层抽象,其核心任务是在特定技术环境下将逻辑模型所定义的实体、属性及其关系转换为具体的存储结构与数据格式。对于空间数据而言,物理模型不仅需要明确几何与属性的组织方式,还需要特别考虑空间数据的存储结构(如矢量或栅格)、空间关系的编码机制(如拓扑关系或坐标邻近性)以及高效的空间索引与访问策略。其根本目标在于:在保障数据语义完整性的前提下,实现数据的持久化存储、高效检索与快速分析。

3.4.2 物理模型设计与构建的实验目标

掌握物理模型的基本构建原理、常用空间数据结构的特点及其适用场景,并能够根据实际需求选择合理的数据表达形式。

3.4.3 城市地理要素的物理模型设计

本节基于 3.2 节构建的概念模型和 3.3 节构建的逻辑模型,进一步开展城市地理要素的物理模型设计。

(1) 对于以离散实体为研究对象的城市地理要素(如道路、公园、消防管道和消火栓等),可采用矢量数据结构进行物理表达。此类要素依据其几何特征分别建模为点(如消火栓)、线(如道路、消防管道)和面(如公园),并辅以相应的属性信息(如名称、编号、功能状态等)。以道路要素为例,其物理模型由一系列有序坐标点构成的折线(LineString)表达空间位置,并附带描述其语义特征的属性集合(如道路名称、等级等,见表 3-5)。为便于数据交换与互操作,可考虑采用 Shapefile、GeoJSON 等通用空间数据格式对矢量要素进行组织,确保其几何形态与语义属性在主流 GIS 平台中可被高效读取与处理。

表 3-5 道路类表及字段设计

字段名称	字段名称(英文简写)	字段类型	字段长度
道路编码	RoadID	文本型	255
道路名称	RoadName	文本型	20
道路等级	RoadClass	文本型	20
道路材料	RoadMaterial	文本型	20
地理位置	RoadGeom	地理数据	—

(2) 对于连续分布的场域型现象,则根据应用需求选择适当的物理表达结构。二维连续场可采用规则格网或不规则采样点集进行离散化存储,三维体场则可通过体素网格或分层不规则点云等方式实现空间属性的立体化表达。此类结构虽形式各异,但共同目标是在有限的存储资源下,尽可能保真地再现连续场的空间变异特征。

思考题

- 1. 现实世界中的地理现象既可以采用对象模型表示,也可以采用场模型表示。结合实例说明这两种模型在表达方式与适用场景上的主要差异。
- 2. 某区域拟建设一个“城市洪涝风险评估系统”。基于 GIS 空间数据模型,设计该系统的概念模型与逻辑模型框架。