



测绘科技专著出版基金资助  
CEHUI KEJI ZHUANZHU CHUBAN JIJIN ZIZHU

Description and Qualitative Reasoning of Spatial Relation in  
a Three-dimensional Space

刘新 刘文宝 李成名 著

# 三维空间关系的描述 及其定性推理



测绘出版社

测绘科技专著出版基金资助

# 三维空间关系的描述及其 定性推理

Description and Qualitative Reasoning of Spatial Relation in  
a Three-dimensional Space

刘 新 刘文宝 李成名 著

测 绘 出 版 社

· 北京 ·

© 刘 新 刘文宝 李成名 2010

所有权利(含信息网络传播权)保留,未经许可,不得以任何方式使用。

## 内容简介

空间关系主要包括拓扑关系、方向关系、距离关系三类,是 GIS 学科中的重要理论问题之一。它们的研究内容又可细分为空间关系描述和空间关系推理。本书阐述了三维空间关系理论方面的研究成果。首先建立了三维拓扑关系、方向关系、定性距离、综合拓扑方向关系(拓扑关系+方向关系)和位置关系的描述与表达模型。在此基础上,研究了它们的定性推理。

本书可作为地理信息系统专业及其相关专业研究生的选修教材或教学参考书,同时可供地理学、计算机科学、测绘科学与技术等领域从事空间信息处理与分析的研究人员和工程技术人员阅读参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

三维空间关系的描述及其定性推理 / 刘新, 刘文宝,

李成名著. —北京: 测绘出版社, 2010. 7

ISBN 978-7-5030-2023-0

I. ①三… II. ①刘… ②刘… ③李… III. ①地理信  
息系统—研究 IV. ①P208

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 099275 号

责任编辑 贾晓林 封面设计 李 伟 责任校对 董玉珍 李 艳

出版发行 测绘出版社

社 址 北京市西城区三里河路 50 号 电 话 010-68531160(营销)

邮政编码 100045 010-68531609(门市)

电子信箱 smp@sinomaps.com 网 址 www.sinomaps.com

印 刷 经 销 新华书店

成品规格 169mm×239mm

印 张 11.75 字 数 220 千字

版 次 2010 年 7 月第 1 版 印 次 2010 年 7 月第 1 次印刷

印 数 0001-1500 定 价 32.00 元

书 号 ISBN 978-7-5030-2023-0/P·464

本书如有印装质量问题,请与我社联系调换。

# 前 言

空间关系的描述和推理是当前测绘学、地理学、计算机学和认知科学等学科中共同关心的科学问题。空间关系主要包括拓扑关系、方向关系和距离关系三类,是GIS学科中的重要理论问题之一。它们的研究内容又可细分为空间关系描述和空间关系推理。以往空间关系的描述主要集中在二维空间关系:拓扑关系、方向关系、定性距离和位置关系的定性描述、表达及其定性推理。由于GIS研究范围的不断扩大,许多实际问题用二维空间关系理论无法很好地解决,研究三维空间关系理论势在必行。

本书首先建立了空间关系的描述与表达模型,在此基础上研究了空间关系的定性推理。第1章综合阐述和分析目前空间关系的研究现状。第2章采用单纯形数据模型基于点集拓扑理论研究拓扑关系的描述和推理。第3章研究方向关系的描述、表达模型及其定性推理。第4章研究距离关系的定性描述、表达及其推理。为揭示空间关系间的关联本质,第5章对拓扑关系和方向关系间的混合空间关系定性推理进行研究。为提高空间关系的描述、表达能力以及空间关系推理的准确性,第6章研究综合拓扑方向关系(拓扑关系+方向关系)的描述、表达模型及其定性推理,第7章研究位置关系(方向关系+定性距离)的描述、表达模型及其定性推理。

本书的研究工作得到了国家自然科学基金项目(40471109)、国家科技支撑计划项目子课题(2006BAJ15B02)、中国测绘科学研究院基础科研项目(77748)、地理空间信息工程国家测绘局重点实验室开放基金项目(B2808)、国家高技术研究发展计划项目(2009AA12Z147)等课题的资助。

本书的顺利完成得到了中国测绘科学研究院以及山东科技大学领导、老师和同事们的大力支持和帮助,在此一并致谢!

本书内容系作者近年来部分研究成果的总结,还有待于进一步深入研究。由于作者水平所限,书中难免有不足和谬误之处,恳请同行专家及广大读者赐教。

# 目 录

第 1 章 绪 论	1
§ 1.1 国内外研究状况	1
§ 1.2 空间关系的发展趋势	14
§ 1.3 本书的组织与安排	16
第 2 章 拓扑关系描述及其定性推理	18
§ 2.1 拓扑关系描述	18
§ 2.2 拓扑关系定性推理	24
第 3 章 方向关系描述及其定性推理	57
§ 3.1 二维方向关系描述及其定性推理	57
§ 3.2 三维方向关系描述及其定性推理	59
第 4 章 定性距离描述及其推理	83
§ 4.1 定性距离描述	83
§ 4.2 定性距离间的定性推理	86
第 5 章 混合空间关系定性推理	95
§ 5.1 二维混合空间关系定性推理	95
§ 5.2 三维混合空间关系定性推理	102
第 6 章 综合拓扑方向关系描述及其推理	112
§ 6.1 二维综合拓扑方向关系描述及其推理	112
§ 6.2 三维综合拓扑方向关系描述及其推理	120
第 7 章 位置信息的定性描述及其定性推理	147
§ 7.1 二维位置关系的定性描述及其定性推理	148
§ 7.2 三维位置关系的定性描述及其定性推理	158
参考文献	168

# CONTENTS

<b>Chapter 1 Introduction</b> .....	1
§ 1.1 Literature Review of Spatial Relations .....	1
§ 1.2 Future Research on Spatial Relations .....	14
§ 1.3 Framework .....	16
<b>Chapter 2 Description and Qualitative Reasoning of Topological Relations</b> .....	18
§ 2.1 Description of Topological Relations .....	18
§ 2.2 Qualitative Reasoning of Topological Relations .....	24
<b>Chapter 3 Description and Qualitative Reasoning of Directional Relations</b> ...	57
§ 3.1 Description and Qualitative Reasoning of Directional Relations in 2D Space .....	57
§ 3.2 Description and Qualitative Reasoning of Directional Relations in 3D Space .....	59
<b>Chapter 4 Description and Reasoning of Qualitative Distances</b> .....	83
§ 4.1 Description of Qualitative Distances .....	83
§ 4.2 Qualitative Reasoning of Qualitative Distances .....	86
<b>Chapter 5 Qualitative Reasoning of Mixed Spatial Relations</b> .....	95
§ 5.1 Qualitative Reasoning of Mixed Spatial Relations in 2D Space ...	95
§ 5.2 Qualitative Reasoning of Mixed Spatial Relations in 3D Space .....	102
<b>Chapter 6 Description and Reasoning of Integrated Topological and Directional Relations</b> .....	112
§ 6.1 Description and Reasoning of Integrated Topological and Directional Relations in 2D Space .....	112
§ 6.2 Description and Reasoning of Integrated Topological and Directional	

---

	Relations in 3D Space .....	120
<b>Chapter 7</b>	<b>Qualitative Description and Qualitative Reasoning of Location</b>	
	<b>Information</b> .....	147
§ 7.1	Qualitative Description and Qualitative Reasoning of Location	
	Relations in 2D Space .....	148
§ 7.2	Qualitative Description and Qualitative Reasoning of Location	
	Relations in 3D Space .....	158
<b>References</b>	.....	168

# 第1章 绪论

地理信息是与研究对象的空间地理分布有关的信息,它属于空间信息,并具有区域性、多维结构和动态变化等特征。地理信息系统(GIS)是以采集、储存、管理、分析和描述整个或者部分与空间和地理分布有关的数据的空间信息系统。空间关系是GIS学科中的重要理论问题之一,在GIS空间数据建模、空间查询、空间分析、空间数据挖掘、空间推理、制图综合、地图理解及应用等过程中起着重要的作用。本章将重点分析国内外空间关系的研究状况及其存在的问题。

## § 1.1 国内外研究状况

对于地理空间信息,空间实体除了具有各自的几何特征和非几何特征之外,还具有空间特征实体间的相对关系,即空间关系。空间关系是空间数据组织、查询、分析和推理的基础(Frank, 1992; Egenhofer, 1994a; 郭薇等, 1997b; 曹菡等, 2001a; Chang, 2002)。空间关系主要包括拓扑关系、方向关系、距离关系三类。按照研究范围,空间关系可分为二维空间关系和三维空间关系。而根据研究内容,空间关系又可分为空间关系描述和空间关系推理。

### 1.1.1 二维空间关系研究状况

在二维空间中,空间数据的采集、处理、表示与分析基于一个平面,即通过平面上的二维平面坐标 $(x, y)$ 对研究对象进行定义,描述的是二维(two dimensions, 2D)空间中的对象。空间数据可以用表达式 $v = f(x, y)$ 表示,其中, $v$ 是点 $(x, y)$ 对应的属性值(李德仁等, 1993; 郭达志, 2002)。在GIS中,经常涉及对多个空间目标的操作,使空间关系成为一项重要的研究内容。而空间关系研究的主体是空间对象之间的各种关系。空间目标大到一个国家,小到一个村镇或一个简单的地物。因此,空间目标在类型和层次上就具有多样性,这就决定了空间关系的复杂性(赵红超, 2006)。

空间对象在不同的尺度下具有不同的表现形式。在大比例尺下表现为狭长面域的空间对象,在小比例尺下则表现为线状空间对象(梁启章, 1995)。而面-面空间关系和线-线空间关系是不相同的。在研究空间关系时,不仅要研究原子对象之间的空间关系,还要研究原子对象与组合对象,以及组合对象与组合对象之间的空间关系,因此空间关系具有层次性。人们对空间关系的认知程度、空间数据的不确

定性以及空间关系在分析过程中的不确定性等造成了空间关系具有不确定性。空间对象的空间位置和范围随着时间的变化也会发生改变,如地块的合并与分割,空间对象的时空变化会导致其空间关系也发生变化(Chen et al,2000)。空间关系的描述和推理具有完备性、严密性、唯一性和通用性(Abdelmoty et al,1994)。空间关系的研究方法主要有:决策树法、遗传算法和逻辑推理等(Mckay et al,1997)。

### 1. 空间实体模型

在二维空间中,点、线和面是 GIS 中最基本的实体。根据物体的复杂程度可以将物体分为简单物体(简单点、线、面)和复杂物体(复杂点、线、面)。其中,简单点是二维实数域( $\mathbf{R}^2$ )上仅包含一个点的连通 0D(zero dimension, 0D)闭子集。简单线是在平面  $\mathbf{R}^2$  上的有两个终点且不自交的 1D(one dimension, 1D)连通闭子集,可以定义简单线为连续函数  $f: [0, 1] \rightarrow \mathbf{R}^2$  的像,并且满足  $\forall t_i, t_j \in [0, 1], f(t_i) \neq f(t_j), t_i \neq t_j$ 。简单面是平面  $\mathbf{R}^2$  上的齐次单连通闭子集(Egenhofer et al, 1991a, 1991b; Clementini et al, 1995a, 1996; Clementini et al, 1993)。

平面  $\mathbf{R}^2$  上的复杂几何物体是简单物体的推广(Clementini et al, 1995a, 1996),复杂点为平面  $\mathbf{R}^2$  上包含有限个不同点的 0D 点集。复杂线为连续函数  $f_i: [0, 1] \rightarrow \mathbf{R}^2$  (其中  $i=1, 2, \dots, n$ ) 像的并,即  $f_1([0, 1]) \cup f_2([0, 1]) \cup \dots \cup f_n([0, 1])$ 。复杂面是平面  $\mathbf{R}^2$  上的 2D 闭子集,它由多个交集为空集或在边界上相交的简单面的并构成。根据点集拓扑理论,2D 物体  $A$  将整个二维平面分为 3 个部分:内部( $A^\circ$ )、边界( $\partial A$ )和外部( $A^-$ )(熊金城,1981)。

现实世界中存在一种有内外两个边界的物体。内边界与外边界之间的部分是一个面,称由内外边界所形成的闭集为宽边界,称具有宽边界的物体为宽边界物体。宽边界简单面是边界为宽边界的简单面,宽边界线是内部为空集的宽边界面,宽边界复杂面是边界为宽边界的复杂面(Clementini et al, 1997a)。宽边界可以理解为物体的边界在一定时间内的变化范围。对一些连续变化的地理现象,内边界为最初状态的边界,外边界为最终状态的边界,如暴风雨前的海岸线和暴风雨之后的海岸线。宽边界也可以理解为物体在一段时间内的最大范围和最小范围。最大范围的边界和最小范围的边界所构成的闭区域称为宽边界,因此又称宽边界为不确定性边界。可以将宽边界物体和具有不确定性边界的物体统称为模糊物体。将不确定边界的面以及宽边界面常统称为模糊面(Dubois et al, 1987; Zhan, 1998)。用模糊语言描述这种不确定性是一种自然方式(Goodchild et al, 1990; Couclelis, 1996)。根据模糊集理论和点集拓扑理论,可用隶属函数刻画模糊面(张文修, 1984)。模糊面将其所在的二维空间划分为 3 个部分:核、不确定边界和外部。核是平面  $\mathbf{R}^2$  上隶属度值为 1 的部分,不确定边界是平面上隶属度为  $(0, 1)$  的部分,外部为平面上隶属度值为 0 的部分。当模糊物体为模糊点时,用其分布的均值和方差来描述模糊点(邓敏等, 1999)。当模糊点是运动变化的点时,分点的运动轨迹

分已知和未知两种情况研究模糊点的描述(邓敏等,2002)。宽边界有不同的近似表示方法,例如缓冲区方法、最小边界方法、凸包方法、格网方法、模糊集方法和粗糙集方法等(Brinkhoff et al,1993; Cohn et al,1995)。

## 2. 空间关系描述

当研究两个以上空间物体时,空间关系就必然成为研究的重要内容。空间物体的复杂多样性决定了空间关系的复杂多样性,包括由空间现象的几何特性引起的空间关系、完全由空间现象的非几何特性所导出的空间关系、由空间现象的几何特性和非几何特性共同引起的空间关系(郭仁忠,1997)。本书研究的空间关系是指由空间物体的几何特性所决定的关系。这类关系可概括为距离关系、方向关系和拓扑关系。

距离反映了物体间的几何接近程度。根据物体的空间图形,二维空间物体可抽象为点、线、面三类。根据各类物体间的组合形式,距离形式可归纳为六种:点-点、点-线、点-面、线-线、线-面、面-面间的距离。二维空间中两个区域间距离的常见定义方法有:两个区域质心间的距离,两个区域间的最短距离,两个区域间的最长距离(Santos et al,2005)。在二维笛卡尔坐标系中,两物体间的距离为两物体间的最短距离。根据人们的认知推理,距离常常映射为定性距离。定性距离必须对应于一个距离区间所指定的数值,并且能够排序和比较。用“很近、近、远、很远”等可直观地描述从近到远的距离变化(Hong,1994)。

方向关系描述一个物体相对于另一个物体的方位关系,由3个元素唯一确定:目标物、参照物和固定参考点(常指北极)。通常用指定的度数( $0^\circ, 45^\circ, \dots$ )表示原子方向,或者用具有一定方向区域的定性值或符号表示。原子方向的方向区域可用投影方法(Frank,1992,1996)或锥形系统(Peuquet et al,1987)获得。锥形系统方向区域的特点是随距离的增大而增大。由于锥形方法没有考虑参照物的大小和形状对方向划分的影响,因此当参照物为非点状物体时,采用锥形方法具有一定的局限性,故实用上通常采用投影方法划分方向区域。经常使用的方向关系有:东、南、西和北四方向关系。如果细分,可增加东北、西北、东南和西南,从而形成八方方向关系。如果再细分,也可以定义更细的方向关系,如16个不同的定性方向。还有一种方向关系叫位置方向关系,如上、下、前、后、左和右等。根据Frank(1996),基于投影的模型与基于锥形的模型相比,具有以下优点:基于投影模型产生的推理结果比基于锥形模型产生的推理结果更精确,并且比锥形模型易于实现。但锥形模型易于对空间进行更细的划分(Goyal,2000)。显然,方向关系不具有旋转不变性。在方向关系的描述方法中,首先是采用锥形方法或投影方法将参照物所在的空间进行划分,得到4个方向区域和1个同一区域或8个方向区域和1个同一区域。对于后者,常采用九交矩阵模型(9IM)表示方向关系。当隶属函数为布尔函数时,9IM为粗略方向关系矩阵(Goyal,2000);而当隶属函数为几何度量值的比值

时,9IM 为详细方向关系矩阵(Goyal et al,2001)。

拓扑关系是在连续空间变换(旋转、放大、缩小等)下保持不变的关系(Santos et al,2005)。拓扑关系不考虑空间物体的度量和物体在空间中的方向(郭仁忠,1997)。由于拓扑关系的改变意味着其他几何特征的改变,因此拓扑关系是一个非常重要的空间信息,吸引了众多学者来研究(Egenhofer et al,1991a,1991b)。

### 3. 拓扑关系描述方法

(1)点集拓扑方法。GIS 领域中广泛使用的拓扑关系描述方法是建立在点集拓扑学之上的四交模型(4IM)和九交模型(9IM)。根据点集拓扑学,空间对象所在的平面可以分为内部、边界和外部 3 个子集(熊金城,1981)。4IM 是根据平面  $R^2$  上两个空间对象的内部和边界的交集所组成的  $2 \times 2$  矩阵来判断对象间的拓扑关系,称这个  $2 \times 2$  矩阵为四交矩阵(Egenhofer,1993)。若物体为精确物体,通常用空集(0)和非空集(1)表示交集的值。因此,4IM 能够区分  $2^4 = 16$  种拓扑关系,除了不可能实现的情况之外,4IM 能够区分 8 种面-面关系、11 种线-面关系、12 种线-线关系、3 种点-面关系、3 种点-线关系和 2 种点-点关系。两个模糊物体的四交矩阵是模糊矩阵(Bjorke,2004)。9IM 是用两物体的内部、边界和外部间的交所组成的  $3 \times 3$  矩阵来描述两物体间的拓扑关系,所得  $3 \times 3$  矩阵为九交矩阵(Egenhofer et al,1991b)。对于精确物体,通过考虑 9 个交集的值:空集(0)和非空交集(1),使九交矩阵理论上能够区分  $2^9 = 512$  种关系。但实际上,对于精确边界的简单区域只有 8 种面-面拓扑关系可以实现(disjoint, meet, overlap, coveredby, inside, cover, contain, equal),有 36 种线-线拓扑关系可以实现,19 种线-面拓扑关系可以实现。这些关系是相互排斥并且是完全覆盖的(Egenhofer et al,1991a)。利用 9IM 还可以研究复杂线-线间的拓扑不变性(Clementini et al,1998)。对于宽边界的简单物体,9IM 用宽边界替换九交矩阵中的精确边界,利用九交矩阵可以区分平面  $R^2$  上宽边界简单面间的 44 种拓扑关系,宽边界复杂面间的 56 种拓扑关系,这其中有 44 种拓扑关系与宽边界简单面间的拓扑关系是一致的(Clementini et al,2001),还可以区分不确定线间的 146 种拓扑关系(Clementini,2005)。对于模糊物体区域间的拓扑关系,由于模糊物体边界的不确定性导致物体间的拓扑关系是模糊的。模糊物体  $A$  的截  $A_\alpha$  ( $0 \leq \alpha \leq 1$ ) 是精确物体,用  $A_\alpha$  的内部、边界和外部的九交矩阵研究模糊物体间的拓扑关系(刘文宝 等,2000)。

(2)DEM 方法。DEM 方法是在 4IM 或 9IM 中引入交集的维数来区分拓扑关系的一种方法。设定空集的维数为 -1,点的维数为 0,线的维数为 1,面的维数为 2(Clementini et al,1993)。把维数引入 4IM(即 DE+4IM),理论上 有 256 种不同情况。实际上除了不可能关系之外,存在 12 种面-面拓扑关系、17 种线-面拓扑关系、3 种点-面拓扑关系、24 种线-线拓扑关系、3 种点-线拓扑关系和 2 种点-点拓扑关系。把维数引入 9IM(即 DE+9IM)不仅可以区分 0D-meet、1D-meet、0D-cover、

1D-cover、0D-overlap、1D-overlap 等拓扑关系,还可以区分 12 种面-面拓扑关系、31 种线-面拓扑关系、3 种点-面拓扑关系、36 种线-线拓扑关系、3 种点-线拓扑关系和 2 种点-点拓扑关系(Clementini et al,1995a)。

(3)最小边界矩形法。最小边界矩形(Minimum Bounding Rectangles, MBRs)是与  $X, Y$  轴平行的且与物体相切的矩形。由于外接矩形比空间对象简单,可以降低空间关系处理的复杂度,因而可用两空间物体最小边界矩形间的拓扑关系来近似逼近研究物体间的拓扑关系。在具有拓扑约束的查询中,用 MBRs 间的拓扑关系作为快速发现 R 树所描述的拓扑关系的标准(Papadias et al,1995),用 MBRs 间的拓扑关系优化查询方法(Clementini et al,1994)。

(4)区域连接法(Region Connection Calculus, RCC)。如图 1.1 所示,首先定义两个区域之间的二元连接关系  $C(A, B)$ ,把  $C(A, B)$  的自反性和对称性作为公理,用量词  $\forall$  和  $\exists$  定义两个区域之间的 8 种基本拓扑关系 RCC-8(又称为 RCC-8 谓词):DC(相离),EC(外切),PO(部分相交),EQ(相等),TPP(内切),TPPi(被内切),NTPP(被包含),NTPPi(包含)(Randell et al,1992)。对二元关系  $C(A, B)$  有两种不同的定义:一种是面  $A$  和  $B$  至少有一个共同点(Clarke,1981, 1985),另一种是面  $A$  和  $B$  的拓扑闭包至少有一个公共点。(Cohn et al,1997; Bennett,2000) RCC-8 谓词仅能作用于原子区域,不能作用于原子区域的交集、并集和补集。在区域上执行布尔操作将提高 RCC-8 的表达能力,将 RCC-8 扩展为 BRCC-8(Renz, 1998)。这样,BRCC-8 谓词不仅能作用在原子区域,也能作用在原子区域的交集、并集和补集(Wolter et al,2000)。

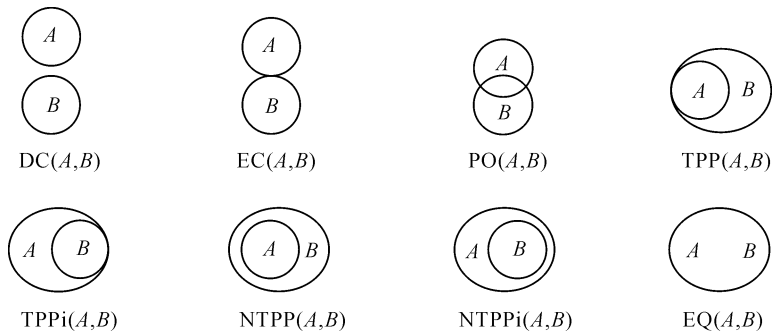


图 1.1 区域间的 8 种拓扑关系 RCC-8

(5)CBM(calculus-based method)方法。CBM 是基于计算描述拓扑关系。CBM 定义了 5 种拓扑关系  $TR = \{touch, in, cross, overlap, disjoint\}$  和边界算子  $b(A)$ 。当  $A$  为面时, $b(A)$  为圆环;当  $A$  为线时, $b(A)$  为线的端点。CBM 具有 3 个优势:完备性、排他性、表达力强。完备性是指拓扑关系能够描述所有可能的拓扑情况,即对于任意两个空间物体  $A$  和  $B$ ,总存在 CBM 定义的一个拓扑关系  $r \in$

TR,使得 A 和 B 间具有拓扑关系  $r$ ,即  $r(A,B)$  成立。排他性是指两个空间物体之间仅有一种拓扑关系,即  $r_1, r_2 \in TR, r_1 \neq r_2, r_1(A,B)$  和  $r_2(A,B)$  仅有一种情况成立。点、线和面之间的这 5 种拓扑关系是相互排斥并且能够覆盖所有的拓扑情况,且 CBM 能表达 DEM 的所有情况(Clementini et al,1993)。DEM 与 9IM 结合之后与 CBM 具有相同的表达力(Clementini et al,1995a)。

(6)2D-STRING 法。2D-STRING 法又称符号投影法,是由 Chang 等提出的二维字符串模型(Chang et al,1987,1988)。2D-STRING 把对象在 X 轴和 Y 轴上的投影坐标利用“=”,“<”,“:”三个算子连接起来形成一个字符串。其中,“=”表示两个物体沿某一坐标轴有相同的位置,“<”表示两物体沿坐标轴有“左-右”或“上-下”关系,“:”表示两物体有相同位置。由于 2D-STRING 间关系算子所能表达的空间关系很有限,许多学者对 2D-STRING 进行了改进(Jungert,1988; Jungert et al,1989)。但 2D-STRING 仍无法描述关于一条斜线的坡度信息。Jungert(1992)扩展了 2D-STRING,将投影平行于斜线方向而不是平行于水平和垂直坐标轴形成了 2D G-STRING,孙玉国(1993)将原 2D G-STRING 进行了扩展,形成了 2D T-STRING。2D T-STRING 能够处理三类定性空间关系:拓扑关系、顺序关系、辅助关系(包围与半包围关系)。2D-STRING 不仅可以描述拓扑关系也可以描述方向关系。

(7)Voronoi 图法。Voronoi 图是一种动态数据结构,按照距每一目标最近的原则将连续空间分为若干个 Voronoi 区域,每个 Voronoi 区域只包含一个目标(Franz,1991;李成名,1998;陈军,2002;赵仁亮,2002)。Egenhofer 等研究者所提出的 9IM 把目标的补作为外部区域,导致内部、边界和外部的线性依赖关系(Chen Jun et al,2001)不利于区分空间邻近和相离关系。同时,空间目标的补太大,带来了计算的复杂性。针对这一特点,陈军等用目标对象的 Voronoi 区域代替九交模型中的外部区域,得到 V9I 模型。V9I 模型不仅可以区分空间邻近和相离关系,还可以描述复杂对象间的拓扑关系,从而提高空间关系的分辨率,克服了以目标的补作为外部所带来的不足(Chen Jun et al,2001)。

(8)广义交模型描述法。广义交模型是先把对象和空间分解为典型的子集,然后利用这些子集间的交来描述空间关系的一种方法(Abdelmoty et al,1995)。设

$x$  为一对象, $x$  所在的空间为  $X$ ,且  $x_1, x_2, \dots, x_n$  为  $x$  的子集,则  $x = \bigcup_{i=1}^n x_i, x$  的补

集为  $\bar{x} = \bigcup_{i=n+1}^m x_i, X = x \cup \bar{x}$ 。利用上面的分解,对象  $x$  和  $y$  间的关系可以定义为

$$R(x, y) = \left( \bigcup_{i=1}^n x_i \right) \cap \left( \bigcup_{j=1}^m y_j \right)$$

$$= x_1 \cap y_1, x_1 \cap y_2, \dots, x_1 \cap y_m, x_2 \cap y_1, \dots, x_2 \cap y_m, \dots, x_n \cap y_1, \dots, x_n \cap y_m$$

式中, $x_i \cap y_j$  可以为空集或非空集。这个交集可以用一个  $n \times m$  矩阵来表示。通

过不同的空间分解策略,广义交模型可以描述复杂对象间的空间关系。

(9)符号阵列法。符号阵列(symbolic array)法是用符号阵列描述空间物体间的空间关系。其基本思想是用阵列元素描述空间物体,用元素间的空间关系描述物体之间的关系(Papadias et al,1992)。符号阵列法的不足之处:一种情况可能对应多个符号阵列。为了保证描述的唯一性,Papadias 和 Sellis(1994)提出了用空间索引描述拓扑和方向关系,而不考虑大小、形状和距离等信息。

#### 4. 拓扑查询

空间关系查询主要是具有拓扑约束的空间查询。拓扑查询主要解决两个问题:一是查询与给定的空间实体具有拓扑关系的空间实体,二是查询两个给定的空间实体之间具有什么拓扑关系。对于拓扑查询可分为精确物体的空间查询和模糊物体的空间查询。精确物体的空间查询又分为精确面-面、面-线、面-点、线-线、线-点和点-点查询(Clementini et al,1994,1995b)。模糊物体的空间查询也分为上述6种查询(Clementini et al,2001; Beauboef et al,2004)。查询语言设计中要考虑自然查询语言中的不确定性和模糊性问题,并研究如何把模糊和不精确性语言转化为自然查询语言(Wang,2003)。

#### 5. 拓扑关系的动态变化

拓扑关系是与时间相关的,并随自然现象和人为因素而发生改变。现有文献主要利用最近拓扑关系图研究拓扑关系的动态变化。最近拓扑关系图是把拓扑关系组织在一个图中,每个关系有一个节点,并且有一个弧将具有最小距离的每对拓扑关系相连(Egenhofer et al,1992)。拓扑关系的最小距离是对应的四交(或九交)矩阵中不同值的个数。对该图的另一个解释是把两个关系之间的弧作为从一个关系到另一个关系的平滑过渡,称之为概念邻域图(Freksa,1992),也称之为连续网络(Cui et al,1993)。概念邻域图分为点-点概念邻域图、点-线概念邻域图、点-面概念邻域图、线-线概念邻域图、线-面概念邻域图、面-面概念邻域图(Clementini et al,1997a, 2001; Cohn et al,1997)。

#### 6. 空间关系推理

空间关系推理是利用测量、观察或推理所获得的物体在空间中的信息以及物体之间的关系,推导隐含在物体之间的空间关系,并得出有效结论的过程(Sharma,1996)。空间关系推理是继空间关系描述后的又一个重要研究内容。空间关系推理分为两个层次(Hong,1994):在第一层次上,根据空间关系的建模方法将空间关系推理分为直接模型化推理和间接模型化推理;在第二层次上,进一步将直接模型化和间接模型化推理分为定量推理和定性推理。定量推理是利用数值计算解决推理任务,定性推理是用逻辑或推理规则等工具得出推理结果。

间接模型化空间关系定性推理包含有:图标索引法(iconic indexing)(Chang et al,1987; Jungert,1992)、Allen 区间逻辑及其扩展法(Allen,1983;

Guesgen,1989; Simmons,1990; Struss,1990; Vilain et al,1990; Montanari et al,1993)和符号阵列法(Papadias et al,1992,1994)。其中,基于 Allen 区间的时态逻辑在定性推理的研究中经常被采用。Allen 区间的最初提出是为了描述在一维时间域上,两个任意时间区域(段)之间的所有可能关系。两个时间段的所有可能关系共有 13 种,如图 1.2 所示(Hong,1994)。后来,Guesgen(1989)将 Allen 时态逻辑扩展到高维,进行空间推理。间接模型化空间关系定量推理有笛卡儿坐标计算等。

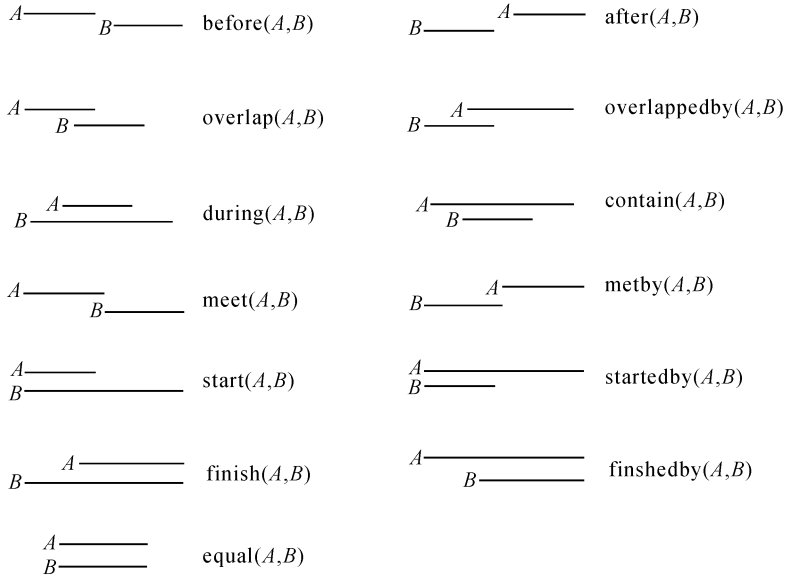


图 1.2 Allen 的两个时间段之间的 13 种可能关系

直接模型化空间关系的定量推理有: TOUR 模型推理(Kuipers,1990a,1990b; Kuipers et al,1990)、SPAM 模型推理(McDermott et al,1984)、MERCATOR 模型推理和 FUZZY 推理(Dutta,1989a,1989b)。按照所涉及的空间关系类型,直接模型化空间关系的定性推理可分为同类空间关系推理、异类空间关系推理、混合空间关系推理、综合空间关系推理(Sharma,1996)。同类空间关系推理是指推理过程中仅使用一种空间关系推理,如从拓扑关系推理拓扑关系,从方向关系推理方向关系。由于点、线、面间拓扑关系是不同的,所以同类拓扑关系推理又可进一步分为单种空间对象类型的推理,如两个线对象或两个面对象间的推理(Papadias et al,1999),以及多种空间对象类型的推理。设空间物体 A 与 B 的空间关系是  $R_1$ , B 与 C 的空间关系是  $R_2$ , A 与 C 的空间关系是  $R_3$ 。异类空间关系推理是由两种不同类型的空间关系  $R_1$  和  $R_2$ ,推导出空间关系  $R_3$ ,并且  $R_3$  的类型是  $R_1$  的类型或者是  $R_2$  的类型,如根据拓扑关系  $R_1$  和方向关系  $R_2$ ,推导 A 与 C 的拓

扑关系或方向关系。混合空间关系推理是根据一种空间关系推导另一种空间关系的推理,如根据拓扑关系推导方向关系或定性距离,根据方向关系推导拓扑关系或定性距离,根据定性距离推导方向关系或拓扑关系。其中根据方向关系推导拓扑关系可以分为两种类型(杜世宏,2004):基于一个参照系的推理和基于两个参照系的推理。基于一个参照系的推理是指已知  $A$ 、 $B$  及  $A$ 、 $C$  间的方向关系  $R_1$  和  $R_2$ ,推理  $B$ 、 $C$  间的拓扑关系。此时, $R_1$  和  $R_2$  都是以  $A$  为参照对象,故称为基于一个参照系的推理。基于两个参照的推理是指已知  $A$ 、 $B$  及  $B$ 、 $C$  间的方向关系  $R_1$  和  $R_2$ ,推理  $A$ 、 $C$  间的拓扑关系。此时, $R_1$  和  $R_2$  分别以  $A$  和  $B$  为参照对象,故称为基于两个参照系的推理。

综合空间关系推理是使用两种以上的空间关系进行推理。综合空间关系推理分为综合两种空间关系推理和综合三种空间关系的推理。综合两种空间关系的推理主要是综合拓扑关系和方向关系推理以及综合定性距离和方向关系的推理,其中,综合拓扑关系和方向关系的推理(Hernández,1994; Sharma,1996; Sharma et al,1995; 杜世宏,2004)是根据目标对象  $B$  与参照物  $A$  的拓扑关系和方向关系,以及目标对象  $C$  与参照物  $B$  的拓扑关系和方向关系,推导目标对象  $C$  与参照物  $A$  的拓扑关系和方向关系(Hernández,1990,1994)。综合定性距离和方向关系的推理(Down et al,1973; Frank,1992; Clementini et al,1997b; Sharma,1996)是根据目标对象  $B$  与参照物  $A$  的定性距离和方向关系,以及目标对象  $C$  与参照物  $B$  的定性距离和方向关系,推导目标对象  $C$  与参照物  $A$  的定性距离和方向关系。Frank(1992)提出了一种适于距离和方向关系推理的代数,该代数包含三个部分:一是距离和方向关系符号,如距离符号“近”和方向关系符号“北”;二是运算集(逆,复合等);三是公理集(推理规则)。距离方向关系的定性推理又称为位置信息的定性推理。在欧氏几何和笛卡儿坐标下,点的位置描述为点的坐标。在欧氏空间中,把连接两点的矢量视为两点的位置关系。在适当的尺度下,矢量的长度和方向对应位置关系的距离和方向。位置关系包含两个关系(Down et al,1973):距离关系和方向关系。当距离关系和方向关系均为定性关系时,位置关系就是定性的。称由  $A$  与  $B$  的定性位置关系和  $B$  与  $C$  的定性位置关系推导  $A$  与  $C$  的定性位置关系的推理为位置关系的定性推理。综合三种空间关系推理是综合拓扑、方向和定性距离三种空间关系的推理(Santos et al,2005)。拓扑、方向、距离三类空间关系之间并不是完全相互独立的,它们之间存在着一定的联系。将拓扑、方向、距离三种关系结合起来整体考虑,分析它们之间潜在的相互影响,构造一种拓扑、距离、方向关系的集成描述和推理模型,将提高空间关系描述的唯一性和空间关系推理的准确性(曹茵等,2001b;何建华等,2004)。由于定性推理在一定程度上比定量方法更容易被人们接受,因此定性推理成为空间推理的主要方法(郭平,2004)。上述空间推理分类用图 1.3 表示。

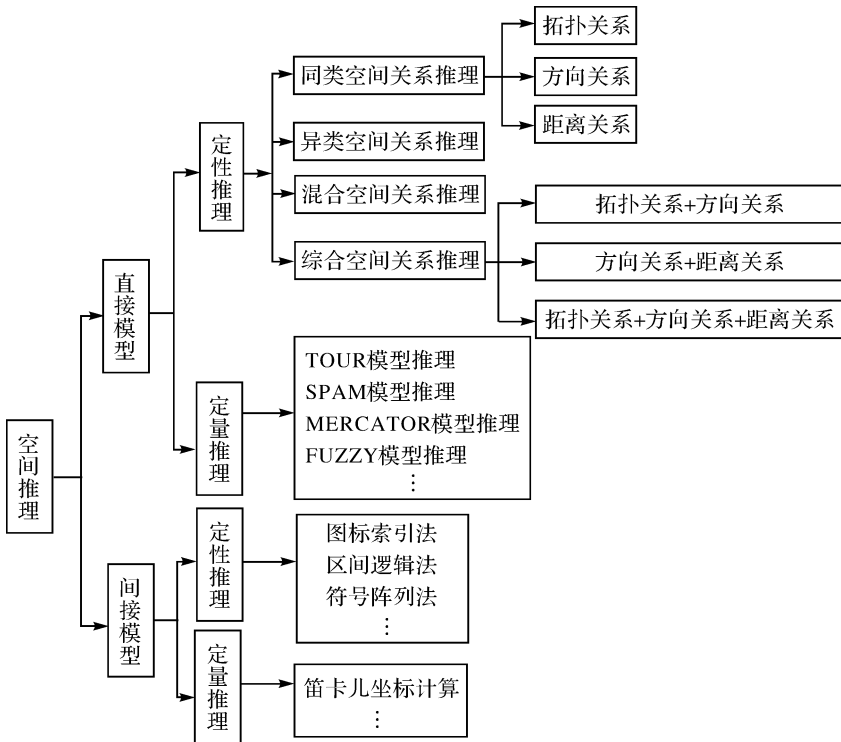


图 1.3 空间推理分类

按空间关系对是否考虑时间模型,将空间关系推理分为时空关系推理(谢琦,2006;孙海滨,2006)和非时空关系推理(Hong,1994;Sharma,1996)。按照所涉及的层次,可分为单层空间推理和多层空间推理(层次空间关系推理),多层空间推理是单层空间推理的推广,是在多个概念层上研究空间推理(Timpf,1992;Clementini et al,1994,2000)。

空间关系的推理方法可分为组合表法(Papadias et al,1999)、代数法(Frank,1992,1996)、逻辑法(如一阶逻辑法(Clarke,1981;Cui et al,1992,1993;Randell et al,1992;Bennett,1997))、时态逻辑法(孙海滨,2006)、语意网络推理(曹菡,2002)、基于产生式的推理(孙玉国,1993)、基于知识的推理等。曹菡(2002)提出代数推理、组合表推理和产生式推理的混合推理方法,能充分发挥各种推理方法的优势。

对空间关系的研究一个重要方面还表现在对空间联结规则的研究(Agrawal et al,1994;刘新等,2007a)。联结规则是形如  $X \rightarrow Y(\text{support}, \text{confidence})$  的规则,其中 *support* 和 *confidence* 分别为  $X \rightarrow Y$  的支持度和可信度。空间联结规则是在联结规则的前件或后件中包含空间关系的联结规则(Koperski et al,1995),在