

文章编号: 1007-4619(2007)03-0311-07

GIS 线目标间拓扑关系描述的层次方法

邓 敏¹, 李志林², 李永礼²

(1. 中南大学 测绘与国土信息工程系, 湖南 长沙 410083; 2 香港理工大学 土地测量与地理资讯学系, 香港 九龙)

摘 要: 拓扑关系是一种相对较弱的空间目标位置约束, 已广泛应用于空间查询、分析和推理等实际应用中。本文主要研究 \mathbb{R}^2 中两个线目标间拓扑关系的描述和区分方法, 采用的基本思路是将两个线目标间的关系描述为若干个基本关系的组合。在拓扑关系描述和区分时, 提出了具有不同分类能力的拓扑不变量, 分别是: 维数、分离数、交分量类型和交分量全序, 并依次建立了相应的分类方法。分析发现, 在 \mathbb{R}^2 中的两个线目标间具有 17 种潜在的基本关系。其中的 11 种是描述复合线/线关系的基本构成单元。

关键词: 拓扑关系; 线目标; 拓扑不变量

中图分类号: P208 文献标识码: A

A Hierarchical Approach to Line-Line Topological Relations in GIS

DENG Min, LI Zhilin, LI Yongli

(1. Department of Surveying and Geomatics, Central South University, Hunan Changsha 410083, China)

(2. Department of Land Surveying and Geomatics, The Hong Kong Polytechnic University, Kowloon, Hong Kong, China)

Abstract: Topological relations have been recognized to be very useful for spatial query analysis and reasoning. This paper concentrates on the topological relations between two lines in \mathbb{R}^2 . The line of thought employed in this study is that the topological relation between two lines can be described by a combination of finite number of basic (or elementary) relations. Based on this idea, a hierarchical approach is proposed for the description and determination of basic relations between two lines, where the topological invariants including dimension, the number of separates, type of components and sequence of components in the intersection of two lines are defined and utilized. Seventeen (17) basic relations are identified and eleven (11) of them form the basis for combinational description of a complex relation, which can be determined by a compound relation model.

Key words: topological relations; line object; topological invariant

1 引 言

空间关系理论是计算机领域和地理信息科学领域的重要基础理论课题之一, 并已在地理信息系统 (GIS)、认知科学与机器人、计算机视觉、影像理解、

数据库系统等众多领域受到较大关注^[1,2]。在地理信息科学领域, 空间关系理论已广泛应用于空间数据建模、空间查询、分析、推理、制图综合、图像检索和地图理解等诸多方面, 发挥着十分重要的作用^[3], 例如, 9 交模型已被具有空间关系查询功能的 Oracle 数据库管理系统^[4] 和 ArcIn 地理信息系统

收稿日期: 2005-10-07 修订日期: 2006-06-27

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (编号: 40501053); 香港特别行政区政府研究基金资助项目 (编号: POLU 5228/06E); 测绘遥感信息工程国家重点实验室开放基金项目 (编号: WKI040304 WKI050303)

作者简介: 邓 敏 (1974—), 男, 1997 年和 2000 年在山东科技大学分别获学士、硕士学位; 2003 年在武汉大学获博士学位; 2005 年南京大学博士后出站, 现为中南大学教授。主要研究领域为遥感与 GIS 空间数据质量、地理信息的不确定性分析与建模, 以及空间关系理论与应用。已发表学术论文 40 余篇。E-mail: dengmin028@yahoo.com

采用^[5]。

空间关系理论内容广泛,目前国际上的研究集中在空间关系的语义问题、空间关系的描述和表达、基于空间关系的查询与分析以及空间推理等方面,尤其是拓扑关系描述模型^[6]。一些比较有代表性的模型有 Egenhofer 等人提出的基于点集拓扑学的矢量数据 4 交模型^[7]和 9 交模型^[8],以及人工智能专家 Randell 等人提出的基于区域连接演算 (Region Connection Calculus RCC) 的空间逻辑模型^[9]。后来,White 对两个矢量模型加以改进,并通过栅格单元的矢量表达方式实现了栅格表达下的拓扑关系描述^[10]。中国陈军教授及其合作者利用空间实体的 Vorono 区域替代空间实体外部,改进了 9 交模型,提出了基于 Vorono 图的新 9 交模型 (简称为 V9I)^[11]。

随着 GIS 应用的不断深入和发展,空间关系理论已逐渐应用到一些新的研究领域,包括多重表达拓扑关系一致性评价^[12]、图像检索^[13]、多尺度空间数据库更新及其一致性维护^[14]、空间场景变化探测和结构相似性分析^[15]、空间数据质量评价^[16]等。在这些应用研究领域中,传统的空间关系概念和内涵都得以拓展了,同时对空间关系信息 (主要是拓扑关系) 的区分和表达也提出了更高层次的需求。近年来,在该方面取得了一些进展。例如,李志林等人利用空间代数操作的多算子定义,建立了一种新的 Vorono 空间代数模型,该模型具有较强的拓扑关系区分能力^[17];邓敏等人在其提出的 4 交模型基础上发展了面目标间拓扑关系的层次描述模型^[18];Clementin 等人建立了线目标间拓扑关系区分的拓扑不变

量^[19]。但是需要指出的是,Clementin 等人定义的不变量与线目标指定的方向密切相关,并且在拓扑不变量的描述上不具有层次性。基于此,本文研究了线目标间拓扑关系的层次表达方法,且主要是通过提出具有不同区分能力的拓扑不变量来实现的。

2 R 中线目标间基本拓扑关系层次的描述

2.1 基于分离数和维数的线-线关系描述

对于在 R^2 中的一般线目标 (折线或曲线) 由于其内点的自由度为 2 使得它的内点集不像线段目标,即不能由其两个端点线性表达。在这种情况下,线目标间的拓扑关系情形在理论上将具有无穷多种类型。例如,两个线目标可以相交一次,也可以相交为 $n (n \geq 2)$ 次,并且相交次数不同,拓扑关系类型也不同。在此,定义两个线目标相交为 0 次或 1 次的情形为基本关系,即有 $\chi(A \cap B) \leq 1$; 而定义两个线目标相交次数大于 1 的关系为复合关系,即有 $\chi(A \cap B) > 1$ 。

在基本关系情形中,对于相交为 0 次的情形,称为 Disjoin 关系;而对于相交为 1 次的情形,则可根据它们之间交集的维数信息进一步区分为 Join 关系 (即 $\dim(A \cap B) = 0$) 和 Overlap 关系 (即 $\dim(A \cap B) = 1$)。至于 Join 关系,可以细分为 Cross 关系和 Meet 关系;而 Overlap 关系可以细分为 Partially overlap 关系和 Wholly overlap 关系,如图 1 所示。这些将在下节中区分。

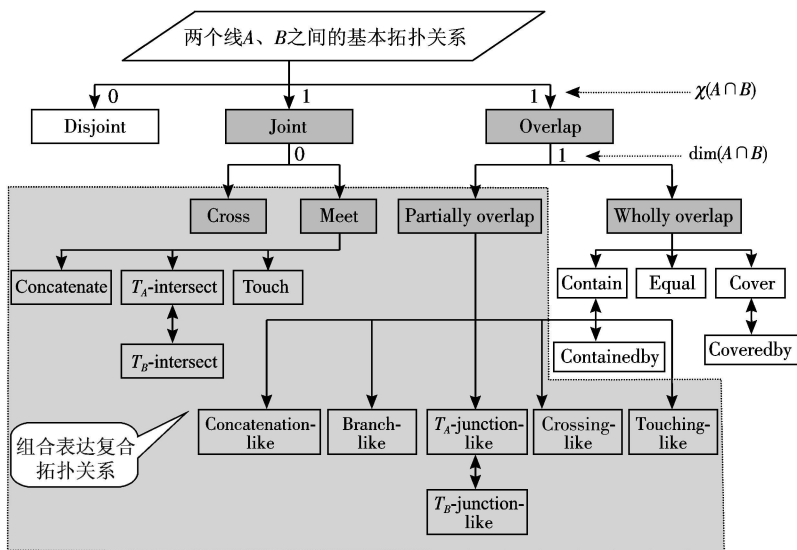


图 1 R^2 中两个线目标间基本关系的层次描述框架

Fig 1 Hierarchical descriptions of basic topological relations between two lines in R^2

2.2 基于交分量类型和局部序的线-线关系描述

对于 Join 关系, 基于点交分量类型将其细分为 5 种情形, 分别记为 R_a, R_b, R_c, R_d 和 R_e 如图 2 所示。其中, 每个实心圆点表示线的一个端点。对于任意一个点交分量 R_i 它的局部顺序 $L\alpha(R_i)$ 按下述方式定义: 以 R_i 为圆心, 以无穷小正数 ϵ 为半径画一个圆 (即邻域), 则圆与两个线目标的交点在圆上的排序则为点 R_i 的局部顺序。在实际操作中, 局部顺序可以通过比较 R_i 在两个线目标的相邻点的坐标来

确定。此外, 图 2 中在表示局部顺序时标识的 A 和 B 分别表示圆与线目标的交点在线目标 A 和 B 上。考虑到在排序时起始点选择的任意性, 下面的排序是等价的。

类型 $R_a: \langle A B \rangle \equiv \langle B A \rangle$

类型 $R_b: \langle A B B \rangle \equiv \langle B A B \rangle \equiv \langle B B A \rangle$

类型 $R_c: \langle A B A \rangle \equiv \langle A A B \rangle \equiv \langle B A A \rangle$

类型 $R_d: \langle A B B A \rangle \equiv \langle A A B B \rangle \equiv \langle B A A B \rangle \equiv \langle B B A A \rangle$

类型 $R_e: \langle A B A B \rangle \equiv \langle B A B A \rangle$

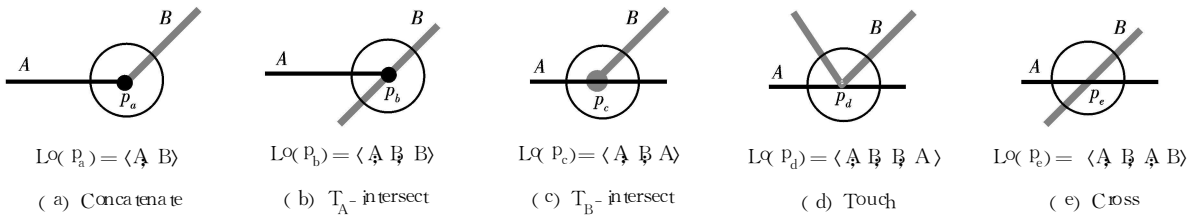


图 2 在 Join 关系中可能出现的 5 种点交分量类型
Fig 2 Five types of 0-dimensional components in Join relation

下面简要说明各种点交分量类型的完备性。

- ①对于类型 R_a 交点的连通度为 2 根据排列组合则有 $2^2=4$ 种情形, 但排除 $\langle A A \rangle$ 和 $\langle B B \rangle$ 两种情形, 并考虑其等价性, 故只有一种情况。
- ②对于类型 R_b 和 R_c 即交点的连通度为 3 根据排列组合则有 $2^3=8$ 种情形, 但排除 $\langle A A A \rangle$ 和 $\langle B B B \rangle$ 两种情形, 故只有 6 种情形。考虑其等价性, 只有两种情况。
- ③对于类型 R_d 和 R_e 即连通度为 4 根据排列组合则有 $2^4=16$ 种情形, 但排除出现 3 个 A 或 3 个 B 的组合情况, 即共有 $C_4^3+C_4^3=8$ 种情况, 另外, 排除出现 4 个 A 或 4 个

B 的组合情况, 即 $C_4^4+C_4^4=2$ 因此, 只有 $16-8-2=6$ 种情形。考虑其等价性则只有两种情况。

进而, 根据点分量的不同组合可以构成不同的线交分量。由于线交分量的两个端点的连通度必须满足 $Dn(R_i) \leq 3$ 即在线交分量中不含有图 2 中 (d) 和 (e) 两种点交类型。对于 Partially overlap 关系, 则有 6 种线交分量类型, 分别记为 l_1, l_2, \dots, l_6 (图 3)。在图中, 黑、灰实心圆状符号分别为线目标 A 和 B 的端点, 并且线交分量类型可以利用交点的局部序来区分。例如在图 3 (e) 中, 两个点交分量的局部序

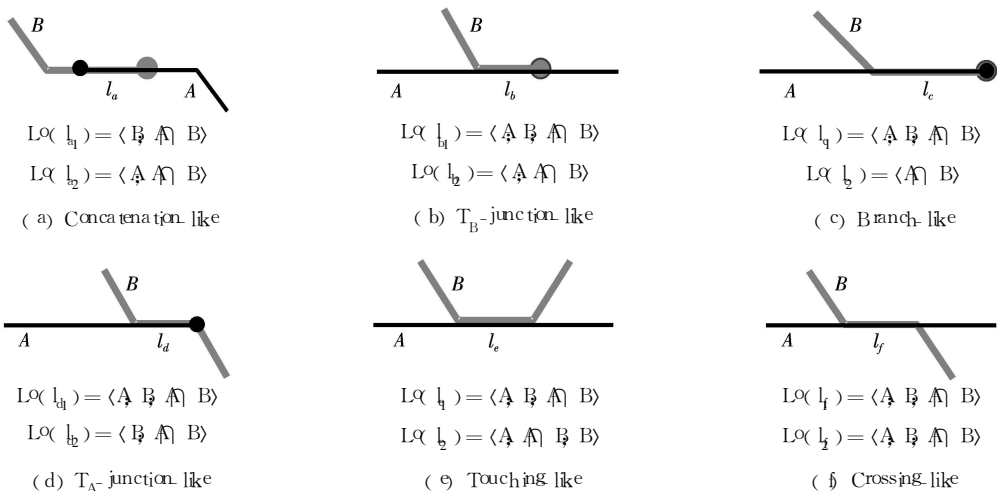


图 3 在 Partially overlap 关系中可能出现的六种线交分量类型

Fig 3 Six types of 1-dimensional components in partially overlap relation

可以表达为: $L\alpha(l_1) = \langle A \setminus B \setminus A \cap B \rangle$ 和 $L\alpha(l_2) = \langle A \setminus A \cap B \setminus B \rangle$ 。进而, 6 种线交分量分别称之为 Concatenation like, T_B -junction like, Branch-like, T_A -junction like, Crossing like 和 Touching like overlap。

类似地, 对于 Wholly Overlap 关系, 则有 5 种交分量类型, 分别记为 l_1, l_2, \dots, l_k (图 4)。相应地, 这些线交分量类型分别称之为 Equal, Contain, Cover, Contained by 和 Covered by。

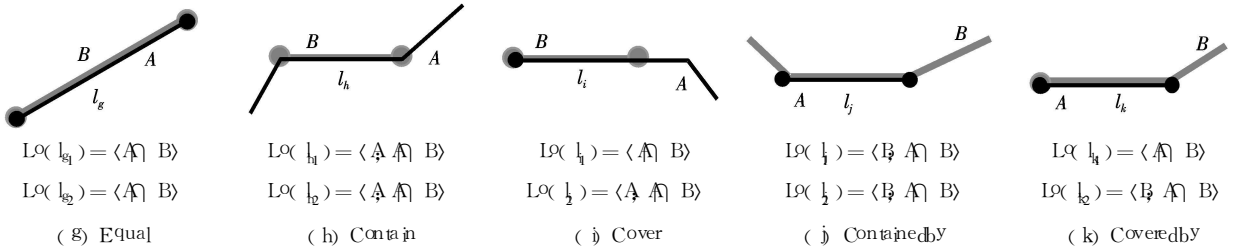


图 4 在 Wholly overlap 关系中可能出现的 5 种线交分量类型

Fig 4 Five types of 1-dimensional components in wholly overlap relation

从上述分析可以发现, 在图 2、图 3 和图 4 中列出的 16 种交分量类型都分别表示了一种基本关系。于是, 对于 \mathbb{R}^2 中的两个线目标, 总共有 17 种基本关系 (包括 Disjoint 关系)。特别地, 除 Wholly overlap 关系中的 5 种类型和 Disjoint 关系之外, 其他的 11 种基本关系 (即 Join 和 Overlap 关系中的分量类型) 将是进一步描述复合线/线关系的基本构成单元。

3 复合线/线拓扑关系描述模型

当两个线目标间的相交次数大于 1 时, 即 $\chi(A \cap B) > 1$, 则称这样的关系为复合关系。基于从复杂 \rightarrow 简单的分解思想来看, 一个复合线/线拓扑关系可以描述为若干个基本关系的组合。如图 5 线目标 A 和 B 间拓扑关系可以分解为 5 个基本关系, 依次为 Crossing (R_c), Crossing like overlap (l_1), T_B -intersect (R_c), Crossing (R_c) 和 Crossing (R_c)。但是, 以不同顺序组合这些基本关系, 则可能得到不同类型的拓扑关系。为此, 下面提出 3 种层次递进的序, 并分别给出它们的表达方法。

3.1 交分量的基本排序

交分量排序是在上节分量类型 (即基本关系) 区分的基础上纳入各分量的排列顺序建立起来的, 它可看作是对所有交分量的一个整体约束, 并且也是一个拓扑不变量, 即具有在旋转、拉伸、压缩等连续变换下不变的性质。

对于两个线目标 A 和 B 不妨设它们之间有 r 个交分量, 这里有 $r = \chi(A \cap B)$ 。建立一个交分量排

列顺序的方法是:

- (1) 以其中一个线目标 (不妨设为 A) 为参考目标, 从它的一个端点开始跟踪交分量, 并依次标识为 $0, 1, \dots, r-1$, 一直跟踪到目标 A 的另一个端点结束。
- (2) 从另一个线目标 B 的一个端点开始跟踪, 在跟踪过程中依次记下所遇到的交分量的标识号, 一直跟踪到目标 B 的另一个端点结束。
- (3) 将在 (2) 中依次记下的标识号排成一列, 则为交分量的排列顺序, 用 $Order(B)$ 表示。

在此, 不妨假设在 (3) 中得到的所有交分量排列顺序表达为:

$$Order(B) = \langle \delta(l_1), \zeta(l_2), \dots, \zeta_1(l_{r-1}) \rangle \quad (1)$$

考虑到起始交分量选择的任意性, 则式 (1) 可等价表达为:

$$Order(B) = \langle \zeta_1(l_{r-1}), \zeta_2(l_{r-2}), \dots, \delta(l_1) \rangle \quad (2)$$

式中, 参数 $i (0 \leq i \leq r-1)$ 为交分量的类型。

以图 5 为例, 根据上述步骤, 首先在线 A 上的交分量出现顺序标识为 0, 1, 2, 3, 4。然后可得到在线 B 上的出现顺序为 2, 3, 4, 1, 0。于是, 根据式 (1) 或 (2) 有

$$Order(B) = \langle 0(R_c), 1(l_1), 4(R_c), 3(R_c), 2(R_c) \rangle$$

或等价地表达为

$$Order(B) = \langle 2(R_c), 3(R_c), 4(R_c), 1(l_1), 0(R_c) \rangle$$

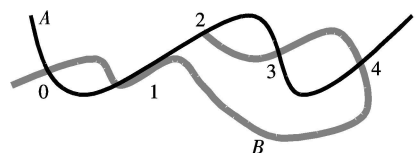


图 5 交分量序表达的一个示例

Fig 5 An example for representing sequence of component types in the intersection

3.2 交分量中特征点的排序

一种具有更强整体约束的序是交分量中点的排列顺序 (用 OCP 表示), 它是由点交分量和每个线交分量中的端点构成的。并且, 它也是一个拓扑不变量。对于两个相交的线目标 A 和 B 所需的交分量的点集合 (记为 S_p) 可按如下步骤计算得到:

- (1) 计算目标集合 A 与 B 的差集, 记为: $Diff_A = A - B$
- (2) 取差集的闭包, 得到 $\overline{Diff_A}$;
- (3) 计算集合 $\overline{Diff_A}$ 与 $Diff_B$ 的差集, 即有: $S_p = \overline{Diff_A} - Diff_B$ 。

然后, 采用交分量序的确定方法来表达点的排列顺序。类似地, 可以为:

$$OCP(B) = \langle cp_0, cp_1, \dots, cp_n \rangle \quad (3)$$

显然, 结合交分量中点的顺序则能澄清一些在交分量序中容易混淆的拓扑情形。如图 6(a) 与 (b), 在交分量排序下不能区分, 而在交分量中的点顺序时则可区分。

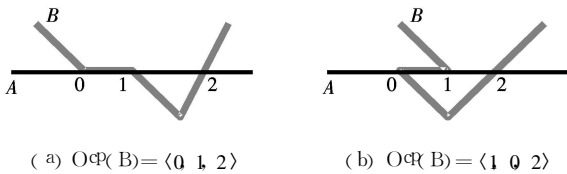


图 6 需要特征点顺序支持的一些拓扑关系情形
Fig 6 Need of the order of characteristic points in the intersection

3.3 相邻环连接关系的序

交分量序及交分量中的点构成的序都是对 $A \cap B$ 中的交分量进行约束, 并没有从整体上约束它们的连接方向。然而, 当两个线目标相交时, 它们之间

形成的环以及相邻环之间的连接关系却可以从整体上完全确定交分量之间的连接方向。其中, 每个环是依次由交分量序中相邻的两个分量及它们之间的连接线段构成。并且, 环的个数比交分量的个数少 1。这里, 区分环的类型为纯环 (pl) 和混合环 (m)。它们的区别在于是否包含线目标的端点。如果将环转换为多边形, 则仅需判断线目标的端点在哪个多边形中。对于简单的线目标, 混合环的个数至多为 2。于是, 环的类型的序 (用 Ol 表示) 可以表达为:

$$Ol(B) = \langle l_0, l_1, \dots, l_{r-2} \rangle \quad (4)$$

式中, $l_i (0 \leq i \leq r-2)$ 为环的类型。

进一步地, 相邻环之间连接关系可区分为相离 (d)、相接 (m)、覆盖 (c) 和覆盖于 (cb) 四种。在判断相邻环的关系时, 将每个环视为一个环界定的区域。并且, 相邻环的关系的个数比环的个数少于 1, 即 ($r-3$) 个。在此基础上, 可以表达相邻环之间连接关系的序 (用 Olr 表示) 为:

$$Olr(B) = \langle l_0, l_1, \dots, l_{r-3} \rangle \quad (5)$$

式中, $l_i (0 \leq i \leq r-3)$ 为相邻环的关系。

顾及在 3.1—3.3 节中建立的各种交分量序, 可建立一个描述线/线复合拓扑关系的模型, 表达为:

$$TR(A, B) = OCP(B) \cup OCP(B) \cup Ol(B) \cup Olr(B) \quad (6)$$

3.4 算例分析

下面以图 7 为例加以说明。在图中, 线目标 A 和 B 之间的交集包含有 7 个交分量, 分别记为 $0, 1, \dots, 6$ 它们的序为 $OCP(B) = \langle 0(P_c), 1(P_c), 3(D), 2(P_c), 5(P_c), 6(P_d), 4(P_c) \rangle$, 而其特征点 (用虚框表示) 的序为 $OCP(B) = \langle 0, 1, 4, 3, 2, 6, 7, 5 \rangle$ 。进而, 7 个交分量分别形成 6 个环, 按照其构成的交分量标识号依次记为 lp_1, lp_2, \dots, lp_6 。例如, 环 lp_1 是由 $0(P_c), 1(P_c), l_{01}(A)$ 和 $l_{01}(B)$ 四个部分构成; 而

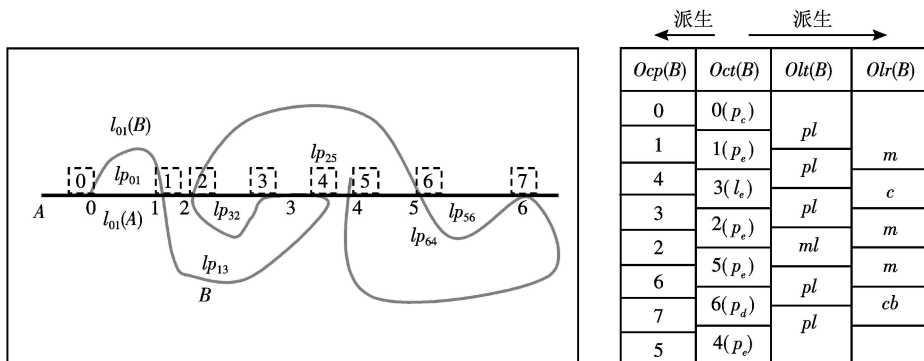


图 7 基于交分量及其序的复合关系描述

Fig 7 Description of compound relations based on intersection components and their sequences

环 \mathbb{R}_3 是由 $1(\mathbb{R}_e)$, $3(\mathbb{L})$, $1_5(A)$ 和 $1_3(B)$ 四个部分构成, 依此类推。至于相邻环之间的关系, 可分别区分 \mathbb{R}_{01} 与 \mathbb{R}_3 为相接关系, \mathbb{R}_{13} 与 \mathbb{R}_{32} 为覆盖关系等。从而可以进一步描述环的类型构成的顺序为 $Olt(B) = \langle p_1, p_1, p_1, m_1, p_1, p_1 \rangle$, 相邻环之间连接关系的序信息可表达为 $Olr(B) = \langle m, c, m, m, c \rangle$ 。

4 线目标间拓扑关系的完备性

完备性的证明可以通过三种方式进行。一种是建立在严密的数学逻辑基础上, 证明两个空间图形结构是同胚的, 即证明它们之间存在一个连续的双

射函数, 这种方式通常是非常复杂的, 并且也比较困难。另一种方式是通过给定的一组拓扑不变量条件可以完全确定两个目标形成的空间图形结构。如图 8(a), (b)和 (c)分别是给定的一组拓扑不变量条件, 根据不同的拓扑不变量条件组合, 可以分别确定两个线目标形成的空间图形结构。具体的实现方法见文献 [19]。最后一种方式也就是本文所指的分类信息的完备表达, 本文提出的模型在其分类层次上都是对线目标间拓扑关系的完备描述, 如基于分量类型的模型。当所有的分类信息被完备地表达时, 那么这种分类表达即具有前两种方式的完备性意义, 如文中提出的基于分量全序的描述模型。

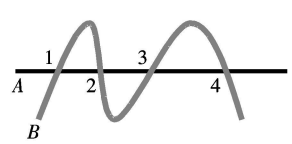
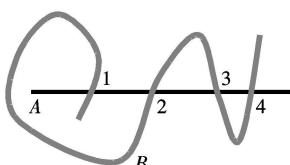
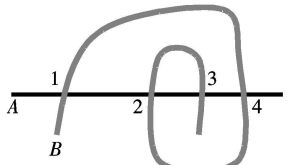
给定的—组拓扑不变量条件	$(a) O\Phi(B) = O\psi(B) = \langle 1(P_e), 2(P_e), 3(P_e), 4(P_e) \rangle;$ $O\chi(B) = \langle p_1, p_1, p_1 \rangle;$ $Olr(B) = \langle m, m \rangle$	$(b) O\Phi(B) = O\psi(B) = \langle 1(P_e), 2(P_e), 3(P_e), 4(P_e) \rangle;$ $O\chi(B) = \langle m_1, p_1, p_1 \rangle;$ $Olr(B) = \langle m, m \rangle$	$(c) O\Phi(B) = O\psi(B) = \langle 1(P_e), 2(P_e), 3(P_e), 4(P_e) \rangle;$ $O\chi(B) = \langle p_1, m_1, p_1 \rangle;$ $Olr(B) = \langle m, m \rangle$
形成的空间图形结构			

图 8 利用给定的拓扑不变量组合条件确定两线目标形成的空间图形结构示例

Fig 8 Some examples of spatial configuration generated by a set of given topological invariants

5 结 论

(1)在 \mathbb{R}^2 中, 两个线目标间的拓扑关系区分信息来自于线目标本身的交集。线目标间拓扑关系描述的详细程度取决于交集信息的表达层次, 即拓扑不变量对拓扑信息的分类能力。并且发现两个线目标间存在 17种基本关系。

(2)本文提出的拓扑不变量与空间目标的几何特性(如长度、面积、局部方向等)无关, 并且在引入顺序上具有层次性、递进性的特点, 一方面满足了实际应用分析中不同层次的要求, 另一方面建立的形式化模型具有递进的区分能力。同时, 也解决了 Egenhofer等人(1995)提出的有关拓扑不变量引入的顺序问题。

(3)本文提出的线/线关系描述方法是一种直接基于线目标本身的方法, 而不是线目标的拓扑分量(边界和内部), 从而避免了线目标在 \mathbb{R} 和 \mathbb{R}^2 中拓扑定义矛盾的问题。

参 考 文 献 (References)

[1] Wooldridge M, Duckham M. A Computing Perspective M]. 2nd Edition, CRC Press, London, 2004

[2] Yu Q Y, Liu D Y, Liu Y B. An Extended Egg-yolk Model between Indeterminate Regions[J]. Acta Electronica Sinica, 2004, 32(4): 610—615 [虞强源, 刘大有, 刘亚彬. 一种不确定区域的扩展蛋黄模型 [J]. 电子学报, 2004, 32(4): 610—615]

[3] Deng M. Extended Models on Topological Relations in Vector GIS[Theories and Methods D]. Wuhan: Wuhan University, 2003. [邓敏. 矢量 GIS中拓扑关系的扩展模型. 理论和方法 [D]. 博士学位论文, 武汉: 武汉大学, 2003]

[4] Oracle. http://www.oracle.com/

[5] ESRI. http://www.esri.com/

[6] University Consortium for Geographic Information Science Research Priorities for Geographic Information Science[J]. Cartographic and Geographic Information Systems, 1996, 23(3): 115—127

[7] Egenhofer M J, Franzosa R. Point-set Topological Spatial Relationships[J]. International Journal of Geographical Information Systems, 1991, 5(2): 161—174

[8] Egenhofer M J, Herring J. Categorizing Binary Topological Relationships between Regions, Lines, and Points in Geographic Database[R]. Technical report, University of Maine, Orono, ME, 1991

[9] Randall D A, Cui Z, Chen A G. A Spatial Logic based on Regions and Connection[A]. Kaufmann M, San Mateo. Proceedings of the 3rd International Conference on Knowledge

- Representation and Reasoning [J]. 1992
- [10] Chen J, Li C, Li Z, et al. A Voronoi-based 9- intersection Model for Spatial Relations [J]. International Journal of Geographical Information Science, 2001, 15(3): 201—220
- [11] Winter S. Topological Relations between Discrete Regions [A]. Egenhofer M, Herring J R. Advances in Spatial Databases [C]. Lecture Notes in Computer Science, No. 951. Springer, Berlin, 1995.
- [12] Guo Q, S Du X, Ç Liu H. Research on Quantitative Representation and Abstraction of Topological Relation between two Regions [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2005, 34(2): 123—128. [郭庆胜, 杜晓初, 刘浩. 空间拓扑关系定量描述与抽象方法研究 [J]. 测绘学报, 2005, 34(2): 123—128.]
- [13] Luo R, Zhang Y, S Fan Y, H. Research on Content-based Image Retrieval in Remote Sensing Imagery Database [J]. Journal of Remote Sensing, 2002, 6(1): 24—29. [罗睿, 张永生, 范永弘. 遥感图像数据库基于内容查询的研究 [J]. 遥感学报, 2002, 6(1): 24—29.]
- [14] Liu W, Z Chen J, Li Z, L, et al. Detection of Spatial Conflicts between Rivers and Contours in Topographic Database Updating [A]. Proceedings of the 4th workshop on Dynamic and Multi-dimensional GIS [C]. Pontypridd, Wales, UK, 5—8 September, 2005.
- [15] Winter S. Location Similarity of Regions [J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2000, 55: 189—200.
- [16] Ragja L, Winter S. Contributions to a Quality Description of Area Objects in Spatial Data Sets [A]. Fritsch D, Englich M, Sester M. International Archive of Photogrammetry and Remote Sensing Symposium on GIS Between Visions and Applications [C]. 1998, vol. 32/4, 479—486, Stuttgart.
- [17] Li Z, L, Zhao R, L, Chen J. A Voronoi-based Spatial Algebra for Spatial Relations [J]. Progress in Natural Science, 2002, 12(7): 528—536.
- [18] Deng M, Feng X, Z Chen X, Y. Hierarchical Models of Topological Relations between Area Objects [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2005, 34(2): 142—147. [邓敏, 冯学智, 陈晓勇. 面目标间拓扑关系形式化描述的层次模型 [J]. 测绘学报, 2005, 34(2): 142—147.]
- [19] Clementini E, Di Felice P. Topological Invariants for Lines [J]. IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering, 1998, 10: 38—54.