

文章编号:1672-9331(2021)02-0066-10

基于交集成分细分的面/面目标拓扑关系扩展模型

赵彬彬^{1,2}, 汤鑫¹, 唐忠立¹, 王安¹

(1. 长沙理工大学 交通运输工程学院, 湖南 长沙 410114; 2. 长沙理工大学 公路地质灾害
预警空间信息技术湖南省工程实验室, 湖南 长沙 410114)

摘要: 由于四交、九交拓扑关系模型未对空间目标的相交细节进行深入分析和详细表达, 导致其对面/面目标基本拓扑关系复杂情形的区分能力不足。为此, 以四交模型和九交模型为基础, 引入空间目标之间交点个数、交线条数、节点贡献值等定量、半定量元素, 扩展其表达矩阵中的交集非空元素, 构建基于空间目标交集成分细分的面/面目标拓扑关系扩展模型。剖析了面/面目标之间拓扑相接、拓扑相交和拓扑覆盖3类基本关系的多个复杂情形, 分析了基于交集成分细分的拓扑关系模型扩展方法及对复杂拓扑关系分析的计算过程。最后, 利用实例分析验证了扩展模型的有效性及其优势。结果表明: 扩展模型对面/面目标之间基本拓扑关系复杂情形的细节表达得更加准确、直观, 同时也增强了拓扑关系模型的量化、半量化表达能力。

关键词: 拓扑学; 四交模型; 九交模型; 空间关系; 交集成分

中图分类号: P208

文献标志码: A

Extended models of area/area object topological relations based on intersection component details

ZHAO Bin-bin^{1,2}, TANG Xin¹, TANG Zhong-li¹, WANG An¹

(1. School of Traffic and Transportation Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China; 2. Engineering Laboratory of Spatial Information Technology of Highway Geological Disaster Early Warning in Hunan Province, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China)

Abstract: Because the four-intersection and nine-intersection topological relation models fail to analyze and express the intersection details of spatial objects in depth, their ability to distinguish the complex cases of the basic topological relations of the area/area objects is insufficient. Therefore, based on the 4-intersection model and the 9-intersection model, quantitative/semi-quantitative elements such as the number of the intersection points, the number of intersection lines and the contribution value of nodes were introduced to extend the intersection non-empty elements in the expression matrix, and extended models of area/area object topological relations based on the intersection component details of spatial targets were constructed. This paper analyzed several complex cases of three basic relations about area/area objects, such as topological connection, topological intersection and topological coverage, meanwhile it explored the extension method of topological relation models based on the

收稿日期: 2020-11-19

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41301404); 湖南省自然科学基金资助项目(14JJ3083); 长沙理工大学公路地质灾害预警空间信息技术湖南省工程实验室开放基金资助项目(kfj160603)。

通讯作者: 赵彬彬(1980—), 男, 副教授, 主要从事多源、多尺度地图数据不一致性探测与处理方面的研究。

E-mail: zbbssir@163.com

intersection component details and the calculation process about complex topological relation analysis. Finally, the validity and advantage of the extended models were verified by an example analysis. The results show that the details of the complex cases of the basic topological relations between the area/area objects are expressed more accurately and intuitively by the extended models. Moreover, the ability of the quantitative/semi-quantitative expression of the topological relation models is also enhanced.

Key words: topology; 4-intersection model; 9-intersection model; spatial relation; intersection component

空间关系是人类在认知和描述现实世界时最常用的表达方式之一,也是空间数据组织、查询、分析和推理的基础,其研究内容主要包括拓扑关系、度量关系和顺序关系 3 个方面^[1]。基于一定的理论框架并结合人类认知所建立的拓扑关系模型是描述和区分空间目标之间空间关系的有力工具,例如,Egenhofer 等^[2]在点集关系中引入了目标的边界与内部以进一步描述目标间的空间关系,从而建立了两个集合对象之间拓扑空间关系的表达模型,即四交模型。在此基础上,进一步考虑两个集合对象外部之间的相交关系,进而构建了九交模型,以表达目标间更为复杂的拓扑关系^[3]。其后,多名学者对九交模型进行了扩展,提高了它的表达能力^[4-8]。除上述基于空间目标整体的拓扑模型之外,也有部分学者探讨了空间目标局部的详细情形,以提高目标间拓扑关系表达的精确程度。例如,周晓光等^[9]引入节点度来区分线/面目标交线的细分类型;曹亚妮等^[10]通过对线/面简单拓扑关系的分析和类型划分,提出了元拓扑关系的概念并构建了线/面复合关系的集成表达模型;林艳等^[11]将线目标和多面目标分解为线组之间的局部拓扑关系,提出了一种描述单线与多面目标之间拓扑关系的方法;王珂等^[12]用度量描述描述的交叠分量以三元组的形式描述了拓扑关系。现阶段对拓扑关系的研究成果较多^[13-18],以线/线拓扑关系为例,其研究成果对道路数据的处理和优化具有重要意义^[19-21]。但通过分析可知,相关研究大都缺少对空间目标本身局部细节的深入分析。文献[22]也指出,同一拓扑元素但非同一空间对象需要区别讨论,例如,目标边界节点、交成分等。由于空间目标之间的交点数目及其分布情形存在不确定性,这使得四交、九交模型对空间目标之间复杂拓扑情形的区分能力有所

不足。

为此,本研究以四交模型和九交模型为基础,着眼于空间目标之间的交集细节,针对同一拓扑元素不同空间目标形态的差别,深入研究空间目标的交点个数、目标本身节点以及交点等交成分细节,以此扩展四交、九交模型的非空交集部分,进而构建一种基于交成分细分的拓扑关系扩展模型,从而精确地表达和区分面/面目标之间复杂的拓扑关系。

1 基于点集的拓扑关系模型

1991 年,Egenhofer 等^[2-3]基于点集理论建立了描述空间目标之间拓扑关系的四交模型,随后又引入空间目标的外部进而建立了九交模型。四交模型和九交模型的表达式分别为:

$$\mathbf{R}_{4i}(A, B) = \begin{bmatrix} A^{\circ} \cap B^{\circ} & A^{\circ} \cap \partial B \\ \partial A \cap B^{\circ} & \partial A \cap \partial B \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\mathbf{R}_{9i}(A, B) = \begin{bmatrix} A^{\circ} \cap B^{\circ} & A^{\circ} \cap \partial B & A^{\circ} \cap B^{-} \\ \partial A \cap B^{\circ} & \partial A \cap \partial B & \partial A \cap B^{-} \\ A^{-} \cap B^{\circ} & A^{-} \cap \partial B & A^{-} \cap B^{-} \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: A° 和 B° 分别表示目标 A , B 的内部; ∂A 和 ∂B 分别表示目标 A , B 的边界; A^{-} 和 B^{-} 分别表示目标 A , B 的外部。

用式(1)和式(2)可计算出两空间目标之间的交集,通过判断该交集是否为空来确定两空间目标之间的拓扑关系。因此,式中每一个元素的取值为 ϕ (空)或 $\neg \phi$ (非空)。图 1 所示为面/面目标的拓扑相交关系。在图 1(a)~图 1(c)中, A , B 两目标的拓扑关系都是拓扑相交关系。显然,代入式(1)和式(2)后进行计算,其矩阵元素皆为 $\neg \phi$ (非空),即在图 1(a)~图 1(c)中 3 种相交情

形的四交、九交模型的表达均相同,但两面目标的相交细节不尽相同,如边界相交的次数及其交集结果、面目标边界的节点数目及其具体的分布等。此时,两个模型均不能有效区分上述情形,更无法精细地表达它们的拓扑关系。

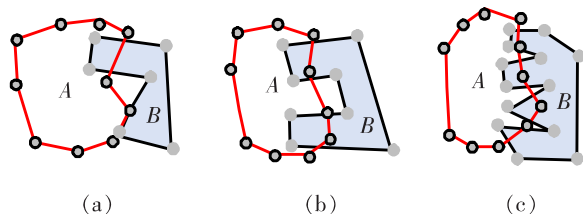


图1 面/面目标拓扑相交关系

Fig. 1 Topological intersection relations between area/area objects

分析可知,当两个面目标拓扑相交时, R_{11} 和 R_{91} 模型中的各元素均为非空,各交集元素包含点、线、面3种可能的成分。以九交模型为例,各元素可能的结果如下式所示:

$$\begin{aligned} R_{91(\text{相交})}(area, area) = & \\ \begin{bmatrix} area & line & area \\ line & line \text{ 或 } node & line \\ area & line & area \end{bmatrix} & \quad (3) \end{aligned}$$

不难看出,式(3)所示的模型将空间目标本身视为一个整体,仅考虑了两空间目标相交与否,未对空间目标相交部分(即局部细节)的交集成分进行深入分析,因而无法精准区分图1所示的拓扑相交情形。事实上,空间目标之间交集成分在局部细节上的差异是导致拓扑关系复杂多样的关键。

2 面/面目标拓扑关系扩展模型

以四交模型和九交模型为基础,在交集非空、涉及面目标边界的模型元素上扩展其上标和下标,记为 $\neg \phi_{(a,b)}^{(c)}$,其他元素只扩展上标。其中,下标 a, b 分别为 A, B 两面目标(以下简称为 A, B)的边界节点对交集部分的贡献值。如果两目标的交集包含其边界节点,则对应的贡献值记为目标交集内实际节点个数,否则对应的贡献值记为0。上标 c 为两目标交集成分中各类元素的个数,其值为有限自然数。当两空间目标的交集结果仅包含交点、交线和面中的一类时,仅有一个

值 c_1 ,即为其个数;若同时包含交线和交点,则 c 取值为 c_1 和 c_2 ,前者为交点数,后者为交线数。

2.1 四交模型扩展

四交模型能区分相离、相接和相交等8类面/面目标拓扑关系^[1],但也仅限于“粗糙”地表达拓扑类别,对每个类别可能出现的更复杂的情形尚不能“精细”区分。按照上述方法对四交模型进行扩展,从而得到基于交集成分细分的四交模型扩展(intersection component details based on 4-intersection model, ICD4I)。由于在相离和包含关系中面目标边界之间交集为空,故不属于本研究的讨论范畴。下面基于ICD4I模型详细探讨两面目标相接、相交和覆盖等拓扑关系的描述和表达。

2.1.1 拓扑相接

图2所示的8种拓扑相接情形的四交模型的表达结果均相同。深入分析其边界交集可知,它们在边界交集细节上区别明显。相对于图2(a)所示的情形,在图2(b)中拓扑相接的两面目标的边界无交线,仅有一个交点,且为 B 的边界节点之一,故 $\partial A \cap \partial B = \neg \phi_{(0,1)}^{(1,0)}$,上标记为 $(1,0)$ 。由于 A 边界上的4个节点都不属于该交集,所以下标记为 $(0,1)$,即 A 对两者交集的节点贡献值为0, B 对两者交集的节点贡献值为1。在图2(c)中拓扑相接的两面目标的边界部分重合,交集成分为一条线,于是 $\partial A \cap \partial B = \neg \phi_{(0,1)}^{(0,1)}$,上标记为 $(0,1)$,下标记为 $(0,2)$,即 A, B 对两者交集的节点贡献值分别为0和2。类似于图2(c),在图2(d)中拓扑相接的两面目标边界的交集也是一条线,区别在于 A, B 对两者交集的节点贡献值为1,故 $\partial A \cap \partial B = \neg \phi_{(1,1)}^{(0,1)}$ 。类似于图2(b),在图2(e)中两面目标边界的交集仅为一个点,且该点又是两面目标各自的节点,故 $\partial A \cap \partial B = \neg \phi_{(1,1)}^{(1,0)}$ 。图2(a)~图2(e)所示均为简单的单处相接情形,而图2(f)~图2(h)所示均为复杂的多处相接。在图2(f)中两面目标边界的交集可分为两部分,即独立的点和一条独立的线,且包含 B 的3个边界节点,记为 $\partial A \cap \partial B = \neg \phi_{(0,3)}^{(1,1)}$ 。在图2(g)中两面目标的边界交集包含两个独立的点,按上节所述扩展方法将其记为 $\partial A \cap \partial B = \neg \phi_{(0,2)}^{(2,0)}$,此交点数值按实际情况取有限自然数。类似地,在图2(h)中两面目标的边界交集包含两条分离的线,记为 $\partial A \cap \partial B = \neg \phi_{(0,2)}^{(0,2)}$,上标记为 $(0,2)$,下标记为 $(0,4)$ 。

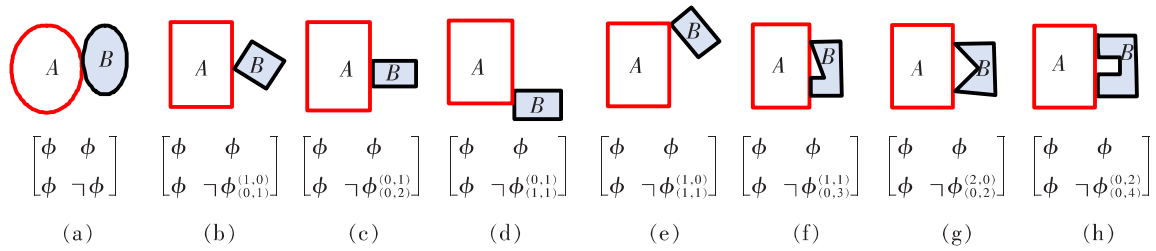


图 2 面/面目标拓扑相接示例及其 ICD4I 模型表达

Fig. 2 Examples of topological connection between area/area objects and their ICD4I model representations

2.1.2 拓扑相交

拓扑相交的两个面目标,其边界交成分亦复杂多样。图 3 所示为拓扑相交关系的 8 种情

形,其四交模型表达均相同,但每种情形的相交细节又不尽相同。显然,四交模型无法在交成分层次上将其区分开来。

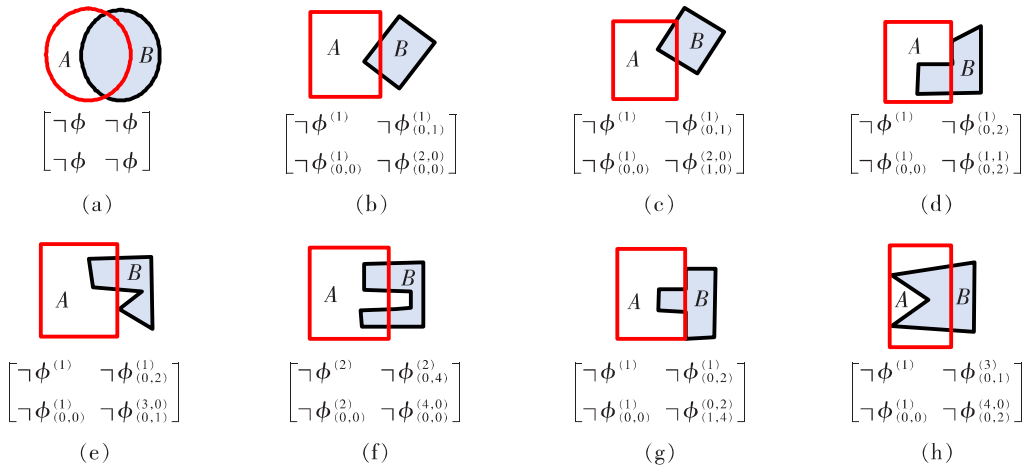


图 3 面/面目标拓扑相交示例及其 ICD4I 模型表达

Fig. 3 Examples of topological intersection between area/area objects and their ICD4I model representations

由于 A, B 内部的交成分为面,故在图 3 所示的每种相交情形中 $A^\circ \cap B^\circ$ 均为 $\neg \phi^{(1)}$ 。如在图 3(b)中, A 的边界在 B 的内部连续分布,且不包含其边界上的任一节点,而 B 的边界也在 A 的内部连续分布,但包含其边界上的一个节点,故 $A^\circ \cap \partial B = \neg \phi_{(0,1)}^{(1)}$, $\partial A \cap B^\circ = \neg \phi_{(0,0)}^{(1)}$ 。 A, B 边界的交集仅为两个交点,且都不是两面目标的节点,故 $\partial A \cap \partial B = \neg \phi_{(0,0)}^{(2,0)}$ 。图 3(c)所示的 ICD4I 表达与图 3(b)所示的相似,区别在于在 A, B 边界的交集中包含了 A 的一个节点,故 $\partial A \cap \partial B = \neg \phi_{(1,0)}^{(2,0)}$,其他交成分与图 3(b)所示的一致。在图 3(d)中, A, B 被包含在对方内部的边界部分都是连续的,其中 B 有两个节点分布在 A 的内部,故有 $A^\circ \cap \partial B = \neg \phi_{(0,2)}^{(1)}$, $\partial A \cap B^\circ = \neg \phi_{(0,0)}^{(1)}$,而 A, B 边界交集的成分为一个点和一条连续的线,且包含 B 边界上的两个节点,故 $\partial A \cap \partial B = \neg \phi_{(0,2)}^{(1,1)}$ 。在图 3(e)中,两面目标被包含在对方内部的边界部分都是连续的,其中 A 的内部包含了

B 边界上的两个节点,故有 $A^\circ \cap \partial B = \neg \phi_{(0,2)}^{(1)}$, $\partial A \cap B^\circ = \neg \phi_{(0,0)}^{(1)}$,而 A, B 边界的交成分为 3 个单独的点,其中包含 B 的一个节点,于是 $\partial A \cap \partial B = \neg \phi_{(0,0)}^{(3,0)}$ 。在图 3(f)中, A 的边界在 B 内部的分布为两段线段,不连续且不包含边界节点,因此 $\partial A \cap B^\circ = \neg \phi_{(0,0)}^{(2,0)}$ 。类似地, B 的边界在 A 内部的分布也为 2 段线段,但包含 4 个节点,故 $A^\circ \cap \partial B = \neg \phi_{(0,4)}^{(2,0)}$,而 A 的边界与 B 的边界共有 4 个交点,且 4 个交点都非两者边界上的节点,所以 $\partial A \cap \partial B = \neg \phi_{(0,0)}^{(4,0)}$ 。在图 3(g)中,由于 A 的部分边界在 B 的内部是连续分布的,不包含节点,且 B 的部分边界在 A 的内部也是连续分布的,且有两个节点,从而 $\partial A \cap B^\circ = \neg \phi_{(0,0)}^{(1)}$, $A^\circ \cap \partial B = \neg \phi_{(0,2)}^{(1)}$, A, B 边界的交成分为两段线段,其中包含 A 的一个节点和 B 的 4 个节点,故 $\partial A \cap \partial B = \neg \phi_{(1,1)}^{(0,2)}$ 。图 3(h)所示的情形较特殊, A, B 的边界共有 4 个交点,其中,左侧的两个交点为 B 的边界节点,并将包含在 A 内部的 B 的边界分割

成了3段,且 B 有一个边界节点在 A 的内部,而 B 内部包含的 A 的边界是连续的,故可得 $A^\circ \cap \partial B = \neg \phi_{(0,1)}^{(3)}$, $\partial A \cap B^\circ = \neg \phi_{(0,0)}^{(1)}$, $\partial A \cap \partial B = \neg \phi_{(0,2)}^{(4,0)}$ 。

2.1.3 拓扑覆盖

在面/面目标的基本拓扑关系中,由于拓扑覆盖与拓扑被覆盖的四交模型互为转置关系,因此,本研究仅讨论拓扑覆盖。当 A, B 为拓扑覆盖关系时,两者内部交集的成分可能为一个或多个点,一段或多段线段,也可能出现混合情况。图4所示为8种拓扑覆盖关系对应的ICD4I表达。这8种拓扑覆盖关系的四交模型均可用图4(a)所示的矩阵来表达。对 $A^\circ \cap \partial B$ 深入分析后可知,在图4(b)~图4(f)中,在 A 的内部, B 的边界都是连续的,所以在这5种情形的ICD4I表达中, $A^\circ \cap \partial B = \neg \phi_{(a,b)}^{(c)}$ 中的 c 都为1, a 都为0,再分别根据5种情形中 B 边界节点的贡献值确定 b 的大小。在图4(b)~图4(f)中, B 边界节点的贡献值分别为2,1,0,3和3,故可得对应的交集 $A^\circ \cap \partial B$ 的结果为 $\neg \phi_{(0,2)}^{(1)}$, $\neg \phi_{(0,1)}^{(1)}$, $\neg \phi_{(0,0)}^{(1)}$, $\neg \phi_{(0,3)}^{(1)}$ 和 $\neg \phi_{(0,3)}^{(1)}$ 。

类似地,对 $\partial A \cap \partial B$ 进一步细分可知,在图

4(b)~图4(d)中两面目标边界的交集为一条线,故其对应的 $\partial A \cap \partial B = \neg \phi_{(a,b)}^{(0,1)}$ 。在图4(b)中, A 边界节点的贡献值为0, B 边界节点的贡献值为2,可得 $\partial A \cap \partial B = \neg \phi_{(0,2)}^{(0,1)}$ 。在图4(c)中,两面目标边界节点的贡献值分别为1,3,可得 $\partial A \cap \partial B = \neg \phi_{(1,3)}^{(0,1)}$ 。在图4(d)中,两面目标边界节点的贡献值分别为2,4,可得 $\partial A \cap \partial B = \neg \phi_{(2,4)}^{(0,1)}$ 。在图4(e)和图4(f)中, A, B 的边界交集成分为一个点。在图4(e)中,该点仅是 B 的节点,故 $\partial A \cap \partial B = \neg \phi_{(0,1)}^{(1,0)}$ 。在图4(f)中,该交点同时为 A, B 的节点,故 $\partial A \cap \partial B = \neg \phi_{(1,1)}^{(1,0)}$ 。

最后对图4(g)和图4(h)所示的情形进行表达。 B 的边界在 A 的内部的分布都是不连续的。在图4(g)中, A 的内部不包含 B 的节点,但包含两条线,故 $A^\circ \cap \partial B = \neg \phi_{(0,0)}^{(2)}$ 。在图4(h)中, A 的内部包含 B 的两个节点,且包含两条线,故 $A^\circ \cap \partial B = \neg \phi_{(0,2)}^{(2)}$ 。在图4(g)中, A, B 边界的交集为两条不连续的线,不包含 A 的节点,但包含 B 的4个节点,故 $\partial A \cap \partial B = \neg \phi_{(0,4)}^{(0,2)}$ 。在图4(h)中, A, B 边界的交集为两个点,且这两个点既是 A 的节点也是 B 的节点,可得 $\partial A \cap \partial B = \neg \phi_{(2,2)}^{(2,0)}$ 。

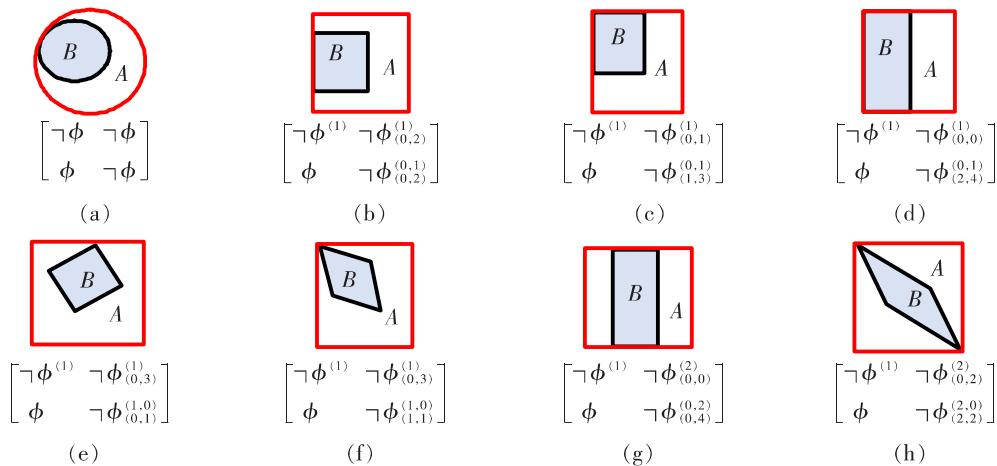


图4 面/面目标拓扑覆盖示例及其ICD4I模型表达

Fig. 4 Examples of topological coverage between area/area objects and their ICD4I model representations

同理可得相等、包含和被包含等拓扑关系的ICD4I表达,此处不再赘述。

2.2 九交模型扩展

四交模型相对简洁,但也能粗糙地表达面/面目标之间的拓扑关系。相对而言,九交模型纳入了目标的“外部”,这使其对拓扑关系的区分能力得到了提升。为了更精细地表达面/面目标之间复杂的拓扑关系,类似于ICD4I的扩展方式,按照

第1节所述方法对九交模型进行扩展,从而得到基于交集成分细分的九交模型扩展(intersection component details based on 9-intersection model, ICD9I)。

2.2.1 拓扑相接

图5中的 A, B 均为拓扑相接关系。图5(a)给出了 A, B 的四交、九交模型表达。不难看出,图5(b)~图5(f)所示的5种拓扑相接情形,四交、

九交模型无法精准区分上述 6 种面/面目标拓扑相接的复杂情形,且 ICD4I 模型无法进一步将图

5(b)与图 5(c)、图 5(d)与图 5(e)的拓扑相接情形区分开来。

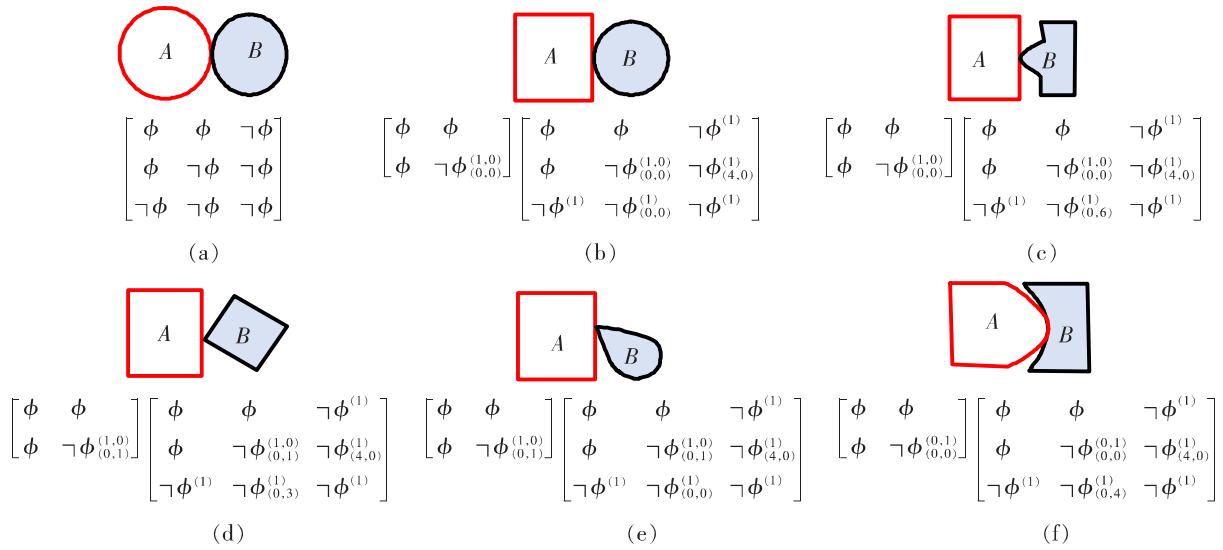


图 5 面/面目标拓扑相接关系的 ICD4I 和 ICD9I 模型表达及其对比

Fig. 5 ICD4I and ICD9I model representations of topological connection between area/area objects and their comparison

现基于 ICD9I 模型详细分析、表达上述面/面目标之间的拓扑相接情形。通过两面目标之间交成分的细分可知,在图 5(b)和图 5(c)中, A , B 的边界交集都是一条直线和一个弧段相接,其交集成分为一个点,且该点非节点,故其 ICD4I 表达中 $\partial A \cap \partial B = \neg\phi_{(0,0)}^{(1,0)}$,但这两种情形的外部节点数及外部节点的分布并不相同,可利用外部的交集成分对其展开描述。在图 5(b)中, A 的边界在 B 的外部是一条线,且有 4 个节点,可得 $\partial A \cap B^- = \neg\phi_{(4,0)}^{(1)}$, B 的边界在 A 的外部也是一条线,但没有节点,因此 $A^- \cap \partial B = \neg\phi_{(0,0)}^{(1)}$ 。在图 5(c)中,同样可得 $\partial A \cap B^- = \neg\phi_{(4,0)}^{(1)}$, B 的边界在 A 的外部也是连续的线,有 6 个节点,故 $A^- \cap \partial B = \neg\phi_{(0,6)}^{(1)}$ 。在图 5(d)和图 5(e)中,边界间的交集成分相同,为一个点,且为目标的一个节点,不同的是在图 5(d)和图 5(e)中 B 的节点数不同。显然,在图 5(e)中 B 更特殊,有且仅有一个节点,形似“探针”,扩展后图 5(e)中 $A^- \cap \partial B = \neg\phi_{(0,0)}^{(1)}$, $\partial A \cap B^- = \neg\phi_{(4,0)}^{(1)}$,而图 5(d)所示的情形比较普遍,最后可得外部与边界的交集成分为 $A^- \cap \partial B = \neg\phi_{(0,3)}^{(1)}$, $\partial A \cap B^- = \neg\phi_{(4,0)}^{(1)}$ 。在图 5(f)中,相接部分是一条连续的线,内部没有节点分布,所以 $\partial A \cap \partial B = \neg\phi_{(0,0)}^{(0,1)}$ 。 B 和 A 都是有节点的面状目标,若将其进一步精细表达,外部与边界的交集成分应为 $A^- \cap \partial B = \neg\phi_{(0,4)}^{(1)}$, $\partial A \cap B^- = \neg\phi_{(4,0)}^{(1)}$ 。

2.2.2 拓扑相交

当 A , B 为拓扑相交关系时,其九交模型的矩阵元素皆为非空。分析可知,ICD9I 模型对相交关系的表达清晰地反映在了其“十字”位置上的 5 个交集元素上,而其他位置的元素用 c 值表达“面的个数”。

图 6 所示为 A , B 拓扑相交的 6 种情形,其四交、九交模型表达均相同,如图 6(a)所示。简单的拓扑相交仅有两个交点,复杂的拓扑相交则存在多个交点,如图 6(b)~图 6(f)所示,其边界交集成分均为 4 个交点。由此可见,四交、九交模型不能有效区分这 6 种复杂的拓扑相交关系。

分析图 6(b)~图 6(d)中的边界交集成分可知, A , B 边界间的交集为 4 个点,且都包含 B 的两个节点,故有 $\partial A \cap \partial B = \neg\phi_{(0,2)}^{(4,0)}$ 。另外, B 的边界在 A 的内部分布为 3 条线,包含其边界上的 3 个节点,所以 $A^\circ \cap \partial B = \neg\phi_{(0,3)}^{(3)}$, A 的边界在 B 的内部也分为 3 条线,但不包含其边界节点,故有 $\partial A \cap B^\circ = \neg\phi_{(0,0)}^{(3)}$, A , B 内部的交集为 3 个不连续的“面”,故有 $A^\circ \cap B^\circ = \neg\phi^{(3)}$ 。由此可见,仅从面目标内部和边界两两之间的交集成分来看,ICD4I 模型无法区分图 6(b)~图 6(d)所示的复杂拓扑相交情形。在此,考虑空间目标的外部,利用 ICD9I 模型对上述拓扑相交情形进行表达。在图 6(b)与图 6(c)中, A 的边界在 B 的外部

为一条连续的线,且包括4个节点,于是 $\partial A \cap B^- = \neg \phi_{(4,0)}^{(1)}$,但在图6(d)中 A 的边界只有3个节点,故 $\partial A \cap B^- = \neg \phi_{(3,0)}^{(1)}$ 。在图6(b)与图6(d)中, B 的边界在 A 的外部为一条连续的线,且包含

两个节点,故有 $A^- \cap \partial B = \neg \phi_{(0,2)}^{(1)}$ 。在图6(c)中, B 的边界在 A 的外部是连续分布的,包含3个节点,故有 $A^- \cap \partial B = \neg \phi_{(0,3)}^{(1)}$ 。显然,根据 $A^- \cap \partial B$ 与 $\partial A \cap B^-$ 的交集成分可区分上述3种情形。

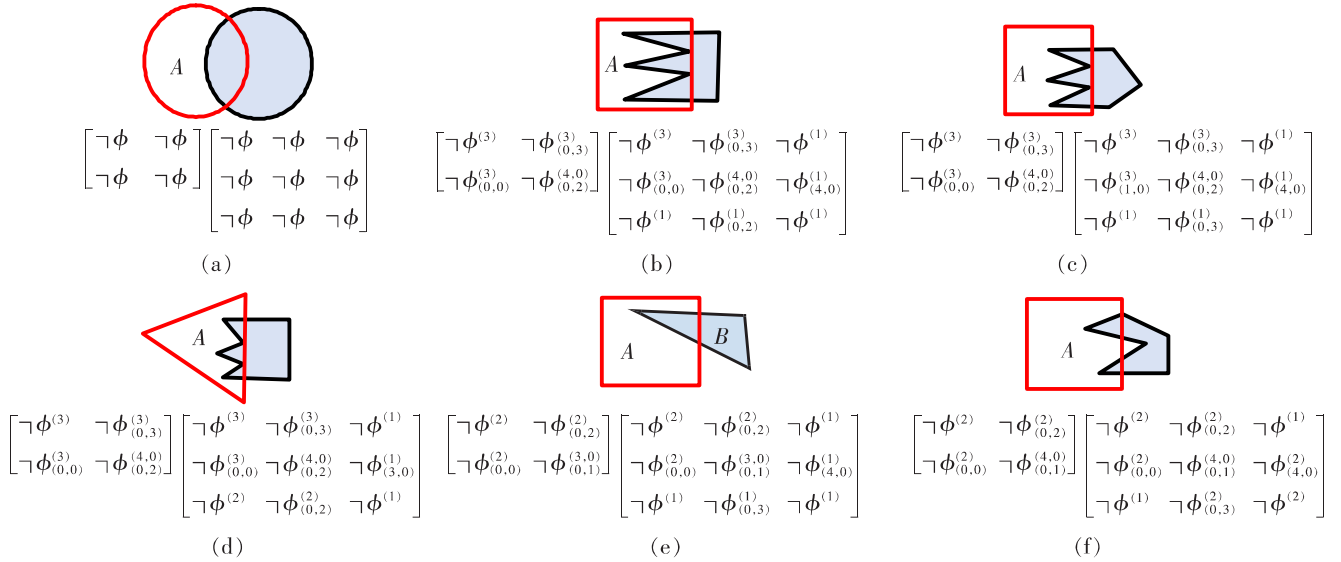


图6 面/面目标拓扑相交关系的 ICD4I 和 ICD9I 模型表达及其对比

Fig. 6 ICD4I and ICD9I model representations of topological intersection between area/area objects and their comparison

图6(e)和图6(f)所示为 ICD4I 模型能够区分的两种拓扑相交情形,但两者边界的交集成分有所不同。在图6(e)和图6(f)中,两面目标边界交集结果分别为 $\partial A \cap \partial B = \neg \phi_{(0,1)}^{(3,0)}$ 和 $\partial A \cap \partial B = \neg \phi_{(0,1)}^{(4,0)}$,而其他3个元素相同,分别为 $A^\circ \cap B^\circ = \neg \phi^{(2)}$, $\partial A \cap B^\circ = \neg \phi_{(0,0)}^{(2)}$ 和 $A^\circ \cap \partial B = \neg \phi_{(0,2)}^{(2)}$ 。需要指出的是,在图6(f)中 A 和 B 之间存在“缝隙”,故在 ICD9I 模型中, $A^- \cap B^\circ = \neg \phi^{(c)}$ 中的 c 值为1,而 $A^- \cap B^- = \neg \phi_{(a,b)}^{(c)}$, $A^- \cap \partial B = \neg \phi_{(a,b)}^{(c)}$ 和 $\partial A \cap B^- = \neg \phi_{(a,b)}^{(c)}$ 中的 c 值为2。

3 应用分析

3.1 应用实例1

通常,不同应用领域对区分拓扑关系的粗细要求也不尽相同。在图7中,面目标 A 和 B 分别代表 A 国与 B 湖,图7(a)~图7(c)分别为1994,2008和2014年3个不同年份某比例尺的 B 湖,其边界节点数分别为52,48和23, A 国国界线节点数为46。不难看出,3个不同年份 B 湖的岸线变化导致这两个面目标的拓扑细节也发生了变化,尤以两者相交部分的面积及该区域湖岸线细

节的变化为甚。详细分析3个不同年份 A 国和 B 湖的交集成分,可得其 ICD4I 和 ICD9I 模型,分别如图7(a)~图7(c)所示。对于 $R_{ICD4I}(A, B)$ 而言, $\partial A \cap \partial B = \neg \phi_{(a,b)}^{(c_1, c_2)}$, a, b 的值较小,且变化不大,不能反映边界间的拓扑变化, c_1 由2增大到4再减小到2, c_2 恒为0,表明两面目标的边界交集有变化,说明在3个不同年份 B 湖湖岸线与 A 国国界线的相对位置发生了变化,但仍不能表达出该变化的具体细节。对于 $A^\circ \cap \partial B = \neg \phi_{(a,b)}^{(c)}$,上述3个不同年份的 c 值分别为1,2和1, b 值也有变化,分别为17,25和10。由此可见,在2008年 B 湖湖岸线在 A 国内部的分布变得复杂(节点数变多),且湖岸线被分为不连续的两段,而在2014年节点数明显减少,湖岸线也只剩一段,这在一定程度上说明 B 湖的面积在逐渐缩小。 $\partial A \cap B^\circ = \neg \phi_{(a,b)}^{(c)}$ 中的数值变化较小,其中 a 为国界线节点,其值从有到无,说明 A 国境内 B 湖的面积在逐渐萎缩。对于 $R_{ICD9I}(A, B)$ 而言,其表达的细节信息更加丰富。其中,由 $A^- \cap \partial B = \neg \phi_{(a,b)}^{(c)}$ 可知, b 值在逐年减小,即 A 国境外 B 湖的面积总体上呈减小趋势;由 c 值分别为1,2和1可知,在2008年 A 国境外的 B 湖断开为两个湖面,如图

7(b)所示。随着水位的不断下降,截至 2014 年其中一个湖面彻底干涸消失,只剩下另一个湖面,如

图 7(c)所示。此外, $A^- \cap B^\circ = \neg \phi^{(c)}$ 和 $A^\circ \cap B^- = \neg \phi^{(c)}$ 中 c 值的变化也印证了以上的分析。

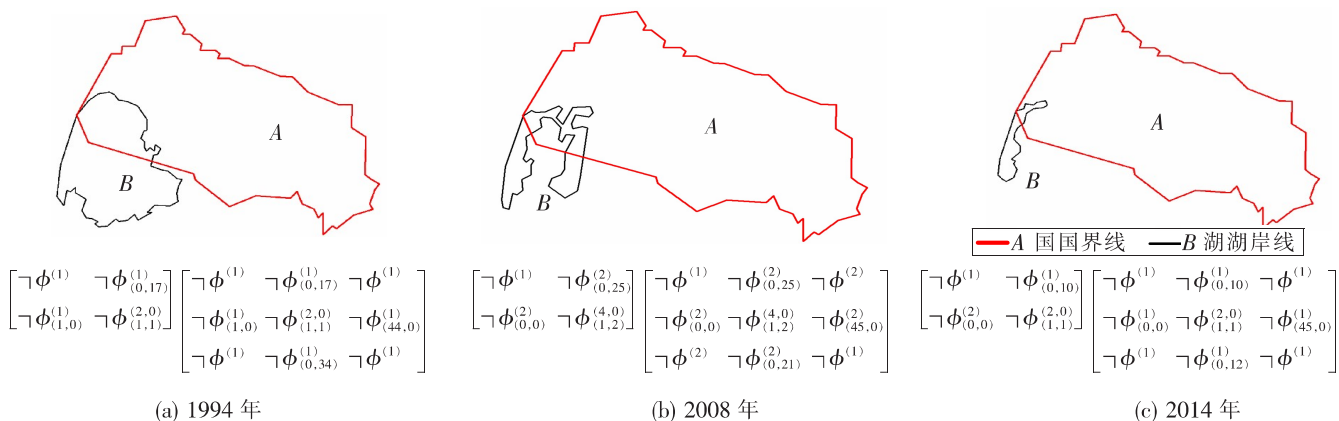


图 7 拓扑关系扩展模型应用实例 1

Fig. 7 Application example 1 of topological relation extended models

3.2 应用实例 2

在本应用实例中,两面目标 C, D 取自图 8(a)所示红圈中的某居民区,其细节及扩展模型表达如图 8(b)所示。两面目标 C, D 的边界节点数分

别为 4 和 18,为覆盖关系,因而 C, D 存在数据冗余问题。考虑到面目标 D 的详细程度与该区域其他居民区面目标的一致性,且高于前者,进而可推断 C 为冗余面目标。

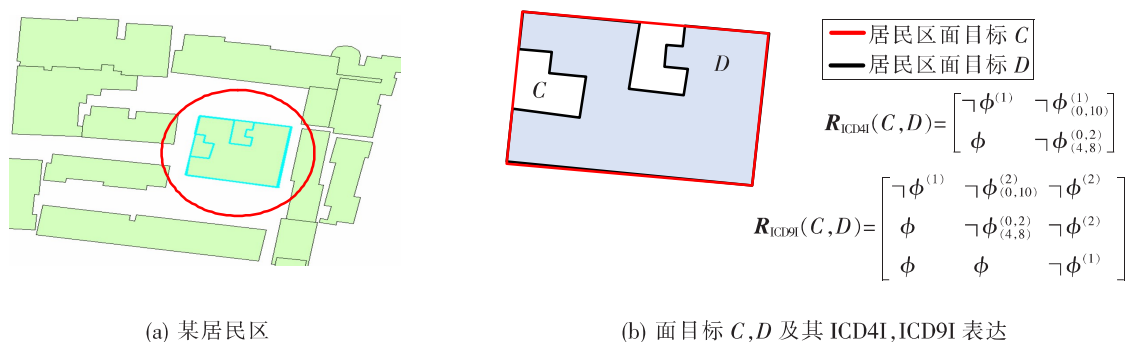


图 8 拓扑关系扩展模型应用实例 2

Fig. 8 Application example 2 of topological relation extended models

4 结论

四交、九交模型对空间目标之间的复杂拓扑关系仅具备粗糙层次的区分能力,属定性分析模型。由于空间目标的多样性及它们之间关系的复杂性,导致这两个模型无法精确表达各种空间拓扑关系。为此,本研究在四交、九交模型的基础上,通过定量化分析面/面目标之间的交集成分,建立了基于交集成分细分的拓扑关系扩展模型——ICD4I 和 ICD9I 模型,并将其运用于面/面目标复杂拓扑关系的分析和表达中,得到如下结论:

1) 相对于四交、九交模型而言,ICD4I 和 ICD9I 模型更直观易用,且能有效区分面/面目标间基本拓扑关系的各种复杂情形,利用数值的位置、大小和组合方式,达到了精确表达交集成分维度和数量的效果。

2) 能满足更精细层次的定量化、半定量化应用分析需求,可通过数值的大小反映拓扑关系的不同。

3) 对拓扑等价性提出了新的论点,且将面目标边界象化,深入研究了边界节点对拓扑关系的影响,区分了在相同边界交集成分下不同情形的拓扑关系,并将节点运用到数据处理中。

需要指出的是:① 在模型中用于表征两面目

标边界交集成分的指标 c , 其取值为实际总值, 没有体现交集各成分的先后顺序。为此, 后续研究将深入探讨线/线目标之间的复杂拓扑关系, 通过有序表达线/线目标之间的拓扑关系, 解决扩展模型仍然存在的不足。② 扩展模型可应用的面目标对象较少, 对节点的要求较严苛, 后续研究将进一步扩大扩展模型的应用范围。

〔参考文献〕

- [1] 贺鸿愿, 周晓光. 三维拓扑关系的基本问题和研究进展[J]. 地理信息世界, 2014, 21(3): 9-17.
HE Hong-yuan, ZHOU Xiao-guang. Basic problems and research progress of three-dimensional topological relations[J]. Geomatics World, 2014, 21(3): 9-17.
- [2] Egenhofer M J, Franzosa R D. Point-set topological spatial relations[J]. International Journal of Geographical Information Systems, 1991, 5(2): 161-174.
- [3] Egenhofer M J, Herring J. Categorizing binary topological relationships between regions, lines and points in geographic databases[J]. Statistics & Information Forum, 1990, 32: 1-28.
- [4] Chen J, Li C M, Li Z L, et al. A Voronoi-based 9-intersection model for spatial relations[J]. International Journal of Geographical Information Science, 2001, 15(3): 201-220.
- [5] 沈敬伟, 周延刚, 朱晓波. 面向带洞面状对象间的拓扑关系描述模型[J]. 测绘学报, 2016, 45(6): 722-730.
SHEN Jing-wei, ZHOU Yan-gang, ZHU Xiao-bo. Topological relations representation model between regions with holes[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2016, 45(6): 722-730.
- [6] 陈占龙, 冯齐奇, 吴信才. 复合面状对象拓扑关系表达模型[J]. 测绘学报, 2015, 44(4): 438-444.
CHEN Zhan-long, FENG Qi-qi, WU Xin-cai. Representation model of topological relations between complex planar objects[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2015, 44(4): 438-444.
- [7] Liu K F, Shi W Z, Zhang H. A fuzzy topology-based maximum likelihood classification[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2011, 66(1): 103-114.
- [8] 陈占龙, 叶文. 复杂面实体拓扑关系精细化模型[J]. 测绘学报, 2019, 48(5): 630-642.
CHEN Zhan-long, YE Wen. The precise model of complex planar objects' topological relations[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2019, 48(5): 630-642.
- [9] 周晓光, 陈斐, 陈军. 引入节点度的线/面拓扑关系细分方法与应用[J]. 测绘学报, 2015, 44(4): 445-452.
ZHOU Xiao-guang, CHEN Fei, CHEN Jun. A node-degree based line/polygon topological relationship refinement model and its application[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2015, 44(4): 445-452.
- [10] 曹亚妮, 吴芳华, 王丽君, 等. 基于元拓扑关系的线面空间关系集成表达模型[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2016, 41(1): 123-130.
CAO Ya-ni, WU Fang-hua, WANG Li-jun, et al. The integrated representation model of line-region spatial relations based on meta-relations[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2016, 41(1): 123-130.
- [11] 林艳, 刘万增, 韩刚. 一种单线与多面要素间的拓扑关系描述方法[J]. 测绘科学, 2013, 38(2): 128-131.
LIN Yan, LIU Wan-zeng, HAN Gang. A method for describing topological relations between single line feature and multi-polygon features[J]. Science of Surveying and Mapping, 2013, 38(2): 128-131.
- [12] 王珂, 张周威. 矢栅一体化拓扑关系的度量描述研究[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2015, 40(5): 638-643.
WANG Ke, ZHANG Zhou-wei. Quantitative representation of topology relations based on integrative data model of vector and raster[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2015, 40(5): 638-643.
- [13] 杜晓初, 黄茂军. 不确定线-面拓扑关系的描述与判别[J]. 测绘学报, 2007, 36(3): 340-343.
DU Xiao-chu, HUANG Mao-jun. Description and discrimination of topological relations between uncertain linear and area objects[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2007, 36(3): 340-343.
- [14] 牛继强, 徐丰, 姚高伟, 等. 基于粗集的多尺度空间拓扑关系不确定性定量评价模型[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2017, 42(6): 756-761, 781.
NIU Ji-qiang, XU Feng, YAO Gao-wei, et al. Quantitative evaluation model of the uncertainty of multi-scale space topological relations based on rough-set[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2017, 42(6): 756-761, 781.
- [15] 吴华意, 刘波, 李大军, 等. 空间对象拓扑关系研究

- 综述[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2014, 39(11):1 269-1 276.
- WU Hua-yi, LIU Bo, LI Da-jun, et al. Topological relations of objects: a review[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2014, 39(11):1 269-1 276.
- [16] 黄鸿, 赵志鹏, 张磊. 一种顾及精细层级的室内拓扑模型[J]. 测绘通报, 2019(10):155-159.
- HUANG Hong, ZHAO Zhi-peng, ZHANG Lei. A kind of fine-hierarchy-considered indoor topology models[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2019(10):155-159.
- [17] 王占刚, 杜群乐, 王想红. 复杂区域对象拓扑关系分解与计算[J]. 测绘学报, 2017, 46(8): 1 047-1 057.
- WANG Zhan-gang, DU Qun-le, WANG Xiang-hong. Dividing and topological relations between complex regions[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2017, 46(8):1 047-1 057.
- [18] 赵彬彬, 周凯, 刘泉菲, 等. 面/面目标之间拓扑关系的判定规则及其实现[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2018, 15(2):1-7.
- ZHAO Bin-bin, ZHOU Kai, LIU Quan-fei, et al. Decision rules and its implementation for topological relations between area objects[J]. Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science), 2018, 15(2):1-7.
- [19] 崔杨, 曾俊伟, 钱勇生, 等. 基于拓扑性质的河谷型城市公交站点网络复杂特性分析: 以兰州市为例[J]. 公路工程, 2018, 43(4):1-6.
- CUI Yang, ZENG Jun-wei, QIAN Yong-sheng, et al. Analysis of complex network characteristics of bus stations in valley city based on topological property: taking Lanzhou as an example[J]. Highway Engineering, 2018, 43(4):1-6.
- [20] 阮博, 郭平, 雷晏, 等. 基于灰色关联算法的军事运输路径优化[J]. 交通科学与工程, 2018, 34(4):83-89, 103.
- RUAN Bo, GUO Ping, LEI Yan, et al. Optimization of the military transportation path based on grey association algorithm[J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2018, 34(4):83-89, 103.
- [21] 赵诗诗, 卢毅, 郝利焯. 基于节点重要度的城市群城际道路公交线路规划[J]. 公路与汽运, 2018, 188(5):28-30, 34.
- ZHAO Shi-shi, LU Yi, HAO Li-ye. Intercity road bus route planning in urban agglomeration based on node importance[J]. Highways Automotive Applications, 2018, 188(5):28-30, 34.
- [22] Deng M, Chen T, Chen X Y, et al. Multi-level topological relations between spatial regions based upon topological invariants[J]. Geoinformatica, 2007, 11(2):239-267.