引文格式:张浩,武芳,行瑞星,等.城市双线道路增量更新中单-双线道路拓扑冲突检测与处理方法[J].武汉大学学报(信息科学版),2025,50(3):587-595.DOI:10.13203/j.whugis20220161

Citation:ZHANG Hao,WU Fang,XING Ruixing,et al.Topological Conflict Detection and Processing Between Single- and Dual-Carriageway Roads in Incremental Updating of Urban Dual-Carriageway Roads[J].Geomatics and Information Science of Wuhan University,2025,50(3):587-595.DOI:10.13203/j.whugis20220161

城市双线道路增量更新中单-双线道路拓扑冲突检测与处理方法

张 浩[1] 武 芳[2] 行瑞星[2] 何正兴[1,3]

1 园测信息科技股份有限公司,江苏 苏州,215027

2 信息工程大学地理空间信息学院,河南 郑州,450052

3 同济大学测绘与地理信息学院,上海,200092

摘 要:在城市双线道路增量更新中,拓扑关系容易出现不一致现象。针对双线道路增量更新中单、双线道路拓扑冲突检测与处理的问题,提出了基于线-面关系扩展四交模型的拓扑冲突检测与处理方法。首先讨论了单、双线道路可能存在的拓扑关系类型与表达方式;然后设计了包含线-面关系、公共交点个数、是否是双线道路顶点的空间关系表达模型;最后通过计算更新前后单、双线道路拓扑关系矩阵差判定拓扑冲突的类型,并构建了对应的拓扑冲突处理规则。结果表明,所提方法能够有效表达单、双线道路的拓扑关系,并能够实现拓扑冲突自动化检测与处理,针对性强,准确率高。

关键词:城市双线道路;增量更新;拓扑关系矩阵;拓扑冲突检测;拓扑冲突处理

中图分类号:P208 **文献标识码**:A **收稿日期**:2023-11-10

DOI:10.13203/j.whugis20220161 **文章编号**:1671-8860(2025)03-0587-09

Topological Conflict Detection and Processing Between Single- and Dual-Carriageway Roads in Incremental Updating of Urban Dual-Carriageway Roads

ZHANG Hao[1] *WU Fang*[2] *XING Ruixing*[2] *HE Zhengxing*[1,3]

1 Sipsg Information Technology Co. Ltd, Suzhou 215027, China

2 Institute of Geographical Spatial Information, Information Engineering University, Zhengzhou 450052, China

3 College of Surveying and Geoinformatics, Tongji University, Shanghai 200092, China

Abstract: **Objectives**: The topological relationship is prone to appear inconsistent phenomenon in the incremental updating of urban dual-carriageway roads. **Methods**: Aiming at the problem of topological conflict detection and processing between single- and dual-carriageway roads, this paper proposes a topological conflict detection and processing method based on the extended polyline-polygon four-intersection model. First, we discuss possible topological relation types and expression between single- and double-carriageway roads. Then, a spatial relation expression model including the relation between polyline and polygon, the number of common intersections and whether it is the vertex of dual-carriageway roads is designed. Finally, the topological conflict types are determined by calculating the matrix difference between the correct topological relation and the updated topological relation of single- and carriageway-roads, and the corresponding topological conflict processing rules are constructed. **Results**: The experiment results show that the proposed method can effectively express the topological relationship between single- and dual-carriageway roads and finish the topological conflict detection and processing very well. **Conclusions**: The pro-

基金项目:国家自然科学基金(41801396);河南省杰出青年科学基金(212300410014)。

第一作者:张浩,硕士,主要从事空间数据库更新与应用研究。zhanghaogis@163.com

通信作者:武芳,博士,教授。wufang_630@126.com

posed method have the advantages of good pertinence and high precision.

Key words: urban dual-carriageway roads; incremental updating; topological relation matrix; topological conflict detection; topological conflict processing

道路数据是交通信息最主要的表达形式,对其进行快速更新需求迫切,其更新工作是整个空间数据库更新工作的重点之一。关于道路的更新,由于更新数据源和待更新数据可能存在属性信息或数据格式的差异,一般不考虑直接替换,而是采用增量更新方法[1-2],即通过更新数据源和起始比例尺数据之间的匹配来提取变化信息,完成空间数据的更新。由于在更新过程中各个数据源的精度、主题、时态等不同,不可避免地会出现数据质量问题[3]。空间实体的几何结构被破坏、空间关系错误、属性信息冲突等现象,影响了空间数据原有的可用性和价值。因而,对更新后的空间数据进行自动检测和及时有效地处理,可以提高空间数据的有效性和适用性。

关于道路数据更新和冲突检测,文献[3-4]对线要素空间冲突的检测方法进行了积极有益的探索,提出了空间冲突检测模型,并在1:50 000数据库更新中的空间冲突检测方面得到了较好的应用,实现了道路与河流等要素的拓扑冲突检测;文献[5]将空间数据的不一致性检测转换为知识获取的问题,提出了基于数据挖掘的空间冲突检测方法;文献[6]研究了道路网拓扑关系的构建技术,提出了一种分区域构建局部拓扑的处理方法;文献[7]以道路网为研究对象,提出了基于拓扑一致性的线目标空间冲突检测方法;文献[8]分析了道路数据之间的拓扑关系,并对需要缩编更新的数据建立了拓扑,通过大比例尺道路网地图对小比例尺地图进行缩编更新;文献[9]采用多元回归和支持向量机(support vector machine,SVM)的道路网匹配算法,研究了道路网匹配方法在多尺度道路网数据库中的联动更新;文献[10]使用5元组模型描述增量要素与邻近区域要素间的拓扑关系,实现道路网增量更新中拓扑冲突检测;文献[11]以志愿者地理信息(volunteered geographic information,VGI)道路数据为研究对象,围绕其应用涉及的质量评价、几何特征融合处理、属性特征融合处理等技术展开研究;文献[12]研究了多尺度道路和居民地空间关系的一致性处理方法,采用最小生成树构建建筑物间的关联关系,提出了一种面向空间约束的道路和居民地移位处理方法。

拓扑一致性一直是地理空间数据质量问题的研究重点。目前关于道路数据增量更新的研究对象都是以单线形式存储的道路,拓扑一致性检测与处理也只是针对单线道路之间,尚缺乏关于双线道路的研究。因此,本文针对城市双线道路增量更新中拓扑冲突检测方法展开研究,重点分析更新操作完成后单-双线道路之间的拓扑关系是否与新道路数据中对应的单-双线道路拓扑关系保持一致。

1 研究方法

本文双线道路增量更新的基本流程如图1所示,主要步骤包括双线道路识别[13]、变化信息检测[14]、增量信息入库及更新操作、拓扑冲突检测与冲突处理等。本文研究的重点是双线道路更新了旧的道路数据后产生的拓扑冲突检测问题。

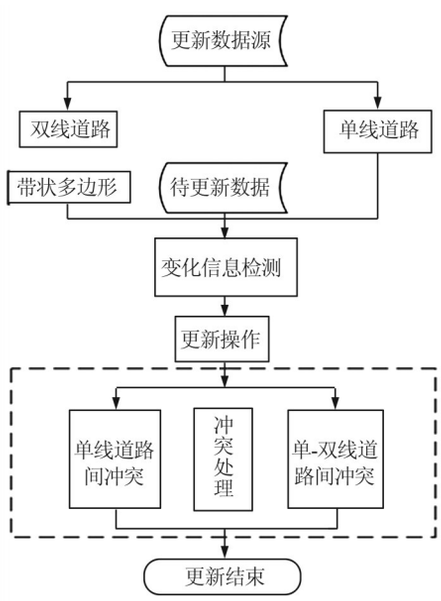


图1 城市双线道路更新流程

Fig. 1 The Proposed Updating Process of Urban Dual-Carriageway Roads

更新过程中需要记录每条道路的更新状态,以方便历史回溯以及拓扑冲突检测,而增量更新中双线道路引起的冲突主要是在单-双线道路的交汇处。双线道路作为变化信息更新了旧道路数据,如果与双线道路关联的单线道路也是变化信息,此时单-双线道路间的拓扑关系理论上是正确的,就不需要进行冲突检测。

1.1　单-双线道路拓扑关系表达

不同类型的空间冲突对应着不同的空间目标关系,其表达方式、判断规则、检测方法以及处理手段也有所区别,因此,拓扑关系分类是拓扑冲突检测的基础。通过分析道路数据发现,在单-双线道路交叉路口处,常见的正确单-双线道路交汇处的连接关系有5种,具体25种类型的示意图如图2所示,描述如下:

1)完全连接。如图2中的a1,单线道路穿越了双线道路的其中一条,且恰好又与另一条道路相连接,形状类似干字型。

2)不完全连接。如图2中的a2,单线道路恰好只与双线道路的其中一条道路相连接,形态类似丁字型,即单线道路与双线道路只有一个交点,且交点不仅是单线道路的端点,也是双线道路其中一条线的内点。

3)直线连接。如图2中的b1,单线道路在双线道路端点与其呈直线连接关系,整体呈一字型。单-双线道路只有一个公共点,且是彼此的端点。

4)转向连接。如图2中的c1,与图2中的b1类似,只是单-双线道路连接关系呈非直线模式。

5)T型连接。如图2中的d1,单线道路恰好相接于双线道路的端点处。公共点不仅是双线道路的端点,也是单线道路的内点。

由于更新数据源在获取、处理、表达以及道路自身结构复杂等方面的影响,导致其与待更新数据之间可能会存在差异,在进行双线道路增量更新后,单-双线道路间的空间关系可能遭到破坏,通过实验观察与分析,城市双线道路增量更新后常见的拓扑冲突类型可以分为以下4种:

1)相离型。单线道路与双线道路的每一条线都是处于相离状态,如图2中的a3、b2、c2、d2。

2)相接型。单线道路与双线道路的一条线恰好相接,如图2中的a1、a2、b4、c3、c4。

3)不完全穿越型。单线道路只穿越了双线道路的其中一条,如图2中的a4、b3、b5、c5、c6。

4)完全穿越型。单线道路同时穿越了双线道路的两条线,如图2中的a5、c7、d3。

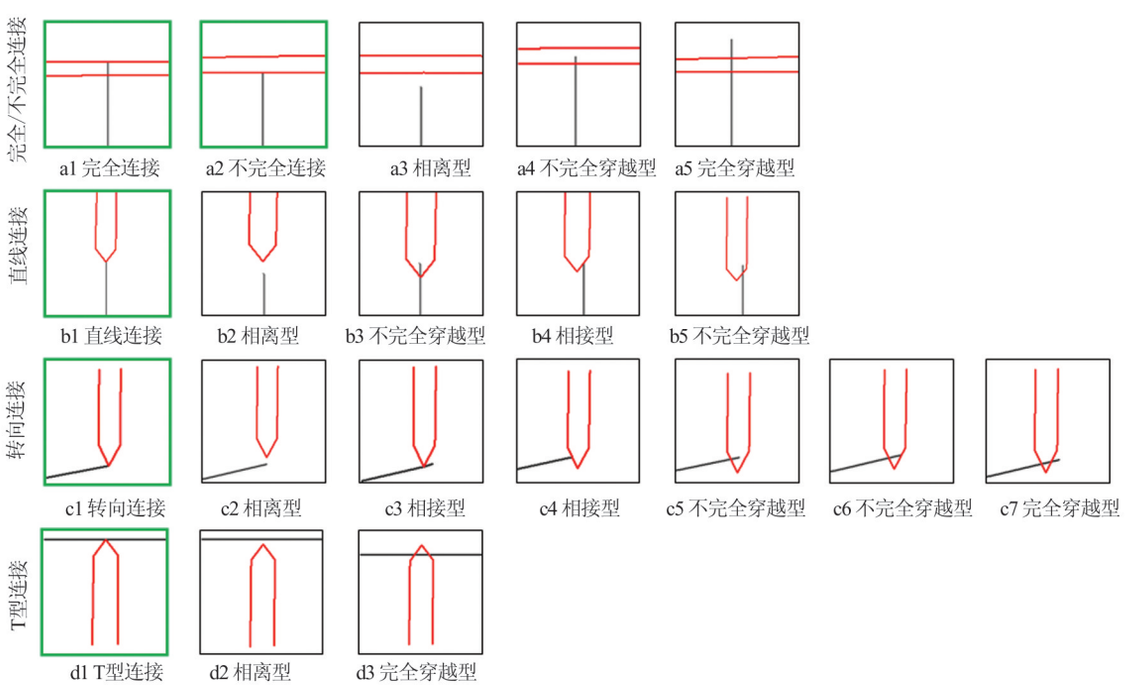


图2　道路更新后单-双线道路可能存在的拓扑关系

Fig. 2　Possible Topological Relation Types Between Single- and Dual-Carriageway Roads After Road Updating

1.2　面向冲突检测的拓扑关系描述

双线道路是由两条线构成,常规模型很难表达单-双线道路之间的空间关系。因此,为了保证双线道路的整体性,本文以双线道路围成的带状多边形代替线状双线道路(同时建立多边形与双线路段的关系映射表),转换成线-面空间关系进行处理,这样更容易进行单-双线道路空间关系的表达[13-14]

拓扑关系的表达和计算是进行拓扑冲突检测的基础,拓扑模型的选择关系着冲突检测的查全率和正确率,也影响着冲突检测的效率。用于冲突检测的拓扑关系表达模型应满足两个条件:第一,拓扑模型应该能够正确地将冲突与不冲突区分开来;第二,在满足第一个条件的基础上,模

型应越简单越好,这样可以降低拓扑关系计算的复杂度,提高检测的效率。

现有的拓扑表达模型除了四交模型、九交模型、Voronoi图模型[15]外,近年来又出现了许多细化表达模型,这些表达模型的区分度越来越高,但计算越来越复杂。由于本文研究的是城市双线道路更新中单-双线道路的拓扑关系问题,城市单-双线道路大部分呈直线型,结构相对简单,所以本文首先考虑的是采用经典的四交模型来描述单-双线道路的连接关系,数学表达式为:

$$T^4(A,B)=\begin{bmatrix} I(A)\cap I(B) & I(A)\cap O(B) \\ O(A)\cap I(B) & O(A)\cap O(B) \end{bmatrix} \tag{1}$$

式中,A、B分别表示双线构成的带状面要素和单线道路要素;$O(A)$表示A的边界;$O(B)$表示B的两个端点;$I(A)$表示A的内部;$I(B)$表示B内部的点集合,四交矩阵中的每个元素取值为空(0)或非空(1)。

双线道路作为变化量信息更新到旧道路数据后,5种正常的单-双线连接关系可能会遭到破坏。表1~表4分别是图2中5种正确连接关系在双线道路增量更新后可能对应的拓扑冲突类型。结合表1~表4,对比a1、a2、b1、c1、d1的关系矩阵可知,a1、d1能够直接根据关系矩阵区分出相应的关系类型,而a2、b1、c1的关系矩阵相同,无法根据矩阵确定出关系类型,不符合拓扑冲突关系检测表达模型的条件。因此需要进一步细化a2、b1、c1之间的特征,使其能够根据矩阵区分出拓扑关系类型。观察表1~表3中的线-面关系图可知,a2与b1和c1的区别是a2中的公共点不是双线道路的端点,因此可以通过判断公共点是否是双线道路端点区分出a2;b1和c1可作为同一种关系类型处理。表2中b1与b4、b3与b5的关系矩阵也相等,分析线-面关系图也可以通过公共点是否是双线道路顶点区分。

表1 a1与a2更新后可能的拓扑关系

Table 1 Possible Topological Relation Types of a1 and a2 After Road Updating

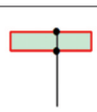
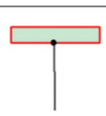
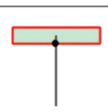
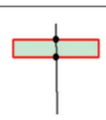
关系类型	a1	a2	a3	a4	a5
a1(a2)→					
关系矩阵(T^4)	$\begin{bmatrix}1&0\\1&1\end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix}0&0\\0&1\end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix}0&0\\0&0\end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix}1&1\\1&0\end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix}1&0\\1&0\end{bmatrix}$

表2 b1更新后可能的拓扑关系

Table 2 Possible Topological Relation Types of b1 After Road Updating

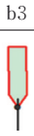
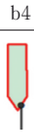
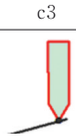
关系类型	b1	b2	b3	b4	b5
b1→					
关系矩阵(T^4)	$\begin{bmatrix}0&0\\0&1\end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix}0&0\\0&0\end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix}1&1\\1&0\end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix}0&0\\0&1\end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix}1&1\\1&0\end{bmatrix}$

表3 c1更新后可能的拓扑关系

Table 3 Possible Topological Relation Types of c1 After Road Updating

关系类型	c1	c2	c3	c4	c5	c6	c7
c1→							
关系矩阵(T^4)	$\begin{bmatrix}0&0\\0&1\end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix}0&0\\0&0\end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix}0&0\\1&0\end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix}0&0\\0&1\end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix}1&1\\1&0\end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix}1&0\\1&1\end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix}1&0\\1&0\end{bmatrix}$

综上分析,为了能够区分出各种类型的拓扑冲突,本文在四交模型的基础上进行了扩展,以扩展四交模型$\boldsymbol{R}$作为拓扑关系表达的计算模型,数学描述如下:

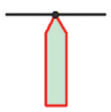
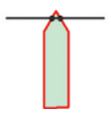
$$\boldsymbol{R}(R_{\text{single}},R_{\text{dual}})=(T^4,\text{Cnt_compt},\text{Is_P}_{\text{d}}) \tag{2}$$

式中,R_{single}、R_{dual}分别代表单、双线道路;T^4指单、双线道路间的四交拓扑表达;Cnt_compt表示公共交点个数,取值分别为0、1、2;Is_P_{d}表示是否有

公共点是双线道路的端点(关于双线道路端点的确认可参见文献[13],转向邻接弧段的交点即为双线道路的端点,这里不再赘述),取值为1或者0,其中1表示有,0则表示无。

表4　d1更新后可能的拓扑关系

Table 4　Possible Topological Relation Types of d1 After Road Updating

关系类型	d1	d2	d3
d1→			
关系矩阵(T^4)	$\begin{bmatrix}0&0\\1&0\end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix}0&0\\0&0\end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix}1&0\\1&0\end{bmatrix}$

1.3　基于关系矩阵差的拓扑冲突检测与处理

拓扑冲突检测的关键就是计算新数据和更新后的旧数据中的拓扑关系矩阵,通过矩阵差判断要素拓扑关系是否一致。如表5所示,基于本文提出的扩展四交模型计算出各种拓扑关系矩阵,分别对比正确拓扑关系与其更新后可能存在的拓扑关系矩阵,完全能够区分出各种拓扑冲突类型,说明本模型能够唯一区分出单-双线道路拓扑冲突(处理规则详见表6)。为了便于程序实现,表5中将扩展四交模型的简单表达方式记录为6位数字的形式,如$\boldsymbol{R}_{a1}$对应的扩展四交模型为$(\begin{bmatrix}1&0\\1&1\end{bmatrix},2,0)$,其简单记录方式则为101120。

表5　单-双线道路拓扑关系矩阵与处理规则

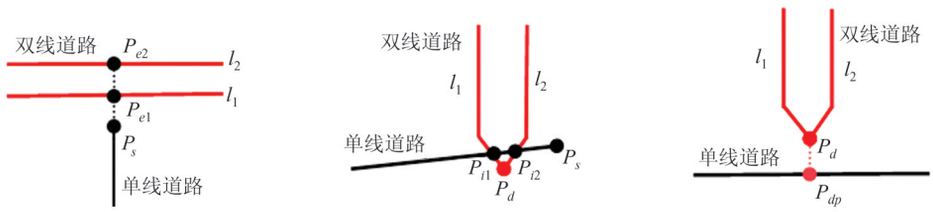
Table 5　Topological Relation Matrix and Processing Rules Between Single- and Dual-Carriageway Roads

连接关系	正确拓扑关系	更新后拓扑关系	拓扑关系矩阵差	拓扑冲突类型	处理规则
完全连接	$\boldsymbol{R}_{a1}$(101120)	$\boldsymbol{R}_{a1}$(101120)	$\boldsymbol{R}_{a1}-\boldsymbol{R}_{a1}$(000000)	符合拓扑一致性	
		$\boldsymbol{R}_{a2}$(000110)	$\boldsymbol{R}_{a1}-\boldsymbol{R}_{a2}$(101010)	相接型	Rule1
		$\boldsymbol{R}_{a3}$(000000)	$\boldsymbol{R}_{a1}-\boldsymbol{R}_{a3}$(101120)	相离型	Rule1
		$\boldsymbol{R}_{a4}$(111010)	$\boldsymbol{R}_{a1}-\boldsymbol{R}_{a4}$(0-10110)	不完全穿越型	Rule1
		$\boldsymbol{R}_{a5}$(101020)	$\boldsymbol{R}_{a1}-\boldsymbol{R}_{a5}$(000100)	完全穿越型	Rule2
不完全连接	$\boldsymbol{R}_{a2}$(000110)	$\boldsymbol{R}_{a1}$(101120)	$\boldsymbol{R}_{a2}-\boldsymbol{R}_{a1}$(−10−10−10)	相接型	Rule3
		$\boldsymbol{R}_{a2}$(000110)	$\boldsymbol{R}_{a2}-\boldsymbol{R}_{a2}$(000000)	符合拓扑一致性	
		$\boldsymbol{R}_{a3}$(000000)	$\boldsymbol{R}_{a2}-\boldsymbol{R}_{a3}$(000110)	相离型	Rule4
		$\boldsymbol{R}_{a4}$(111010)	$\boldsymbol{R}_{a2}-\boldsymbol{R}_{a4}$(−1−1−1100)	不完全穿越型	Rule3
		$\boldsymbol{R}_{a5}$(101020)	$\boldsymbol{R}_{a2}-\boldsymbol{R}_{a5}$(−10−11−10)	完全穿越型	Rule3
直线连接	$\boldsymbol{R}_{b1}$(000111)	$\boldsymbol{R}_{b1}$(000111)	$\boldsymbol{R}_{b1}-\boldsymbol{R}_{b1}$(000000)	符合拓扑一致性	
		$\boldsymbol{R}_{b2}$(000000)	$\boldsymbol{R}_{b1}-\boldsymbol{R}_{b2}$(000111)	相离型	Rule5
		$\boldsymbol{R}_{b3}$(111011)	$\boldsymbol{R}_{b1}-\boldsymbol{R}_{b3}$(−1−1−1100)	不完全穿越型	Rule3
		$\boldsymbol{R}_{b4}$(000110)	$\boldsymbol{R}_{b1}-\boldsymbol{R}_{b4}$(000001)	相接型	Rule6
		$\boldsymbol{R}_{b5}$(111010)	$\boldsymbol{R}_{b1}-\boldsymbol{R}_{b5}$(−1−1−1101)	不完全穿越型	Rule7
转向连接	$\boldsymbol{R}_{c1}$(000111)	$\boldsymbol{R}_{c1}$(000111)	$\boldsymbol{R}_{c1}-\boldsymbol{R}_{c1}$(000000)	符合拓扑一致性	
		$\boldsymbol{R}_{c2}$(000000)	$\boldsymbol{R}_{c1}-\boldsymbol{R}_{c2}$(000111)	相离型	Rule6
		$\boldsymbol{R}_{c3}$(001011)	$\boldsymbol{R}_{c1}-\boldsymbol{R}_{c3}$(00−1100)	相接型	Rule3
		$\boldsymbol{R}_{c4}$(000110)	$\boldsymbol{R}_{c1}-\boldsymbol{R}_{c4}$(000001)	相接型	Rule6
		$\boldsymbol{R}_{c5}$(111010)	$\boldsymbol{R}_{c1}-\boldsymbol{R}_{c5}$(−1−1−1101)	不完全穿越型	Rule7
		$\boldsymbol{R}_{c6}$(101120)	$\boldsymbol{R}_{c1}-\boldsymbol{R}_{c6}$(−10−10−11)	不完全穿越型	Rule7
		$\boldsymbol{R}_{c7}$(101020)	$\boldsymbol{R}_{c1}-\boldsymbol{R}_{c7}$(−10−11−11)	完全穿越型	Rule7
T型连接	$\boldsymbol{R}_{d1}$(001011)	$\boldsymbol{R}_{d1}$(001011)	$\boldsymbol{R}_{d1}-\boldsymbol{R}_{d1}$(000000)	符合拓扑一致性	
		$\boldsymbol{R}_{d2}$(000000)	$\boldsymbol{R}_{d1}-\boldsymbol{R}_{d2}$(001011)	相离型	Rule8
		$\boldsymbol{R}_{d3}$(101020)	$\boldsymbol{R}_{d1}-\boldsymbol{R}_{d3}$(−1000−11)	完全穿越型	Rule9

当两空间目标之间的拓扑关系与现实中的拓扑关系相矛盾时就定义为拓扑不一致,拓扑不一致即两个对象之间被禁止的拓扑关系[7,16]。空间实体之间的拓扑不一致性可通过改变对象之间的拓扑关系来处理,常用操作包括:(1)修改对象,包括移动和重塑的对象;(2)删除对象;(3)分割对象来创建新对象。为了确定每种关系矩阵差对应的拓扑冲突处理策略,需要构建拓扑处理规则库[17-18]。

图3为单-双线道路关系点示意图。双线道路对应的两条单线道路分别记为l_1、l_2(图3(a));双线道路的端点记为P_d(图3(b));双线道路端点

在单线道路上的投影点记为P_{dp}(图3(c))。单线道路在交叉路口处的端点记为P_s,按道路方向从P_s延长到双线道路l_1、l_2上的延长点分别记为P_{e1}、P_{e2}(图3(a));与双线道路l_1、l_2的交点分别记为P_{i1}、P_{i2}(图3(b))。道路之间是相互关联的,为了减少次生冲突,尽可能不采取道路整体位移方式。针对单-双线道路冲突处理的规则如表6所示。



(a) 单线道路投影点 (b) 单-双线道路交点 (c) 双线道路端点投影点

图3 单-双线道路关系点示意图

Fig. 3 Diagram of Relation Points Between Single- and Dual-Carriageway Roads

表6 单-双线道路拓扑冲突处理规则库

Table 6 Processing Rules of Topological Conflict Between Single- and Dual-Carriageway Roads

处理规则	处理对象	处理类型	具体动作
Rule1	单线道路	延长	P_s延长到P_{e2}
Rule2	单线道路	分割、删除	删除$P_{i2}\rightarrow P_s$线段
Rule3	单线道路	分割、删除	删除$P_{i1}\rightarrow P_s$线段
Rule4	单线道路	延长	P_s延长到P_{e1}
Rule5	单线道路	延长	P_s延长到P_d
Rule6	单线道路	顶点位移	P_s移动到P_d
Rule7	单线道路	分割、删除、顶点位移	删除$P_{i1}\rightarrow P_s$线段,P_{i1}移动到P_d
Rule8	双线道路	双线顶点位移	P_d移动到P_{dp}
Rule9	双线道路	分割、删除、双线顶点移位	删除$P_{i1}\rightarrow P_d$、$P_{i2}\rightarrow P_d$线段,P_{i1}、P_{i2}移动到P_{dp}

1.4 拓扑一致性检测与处理步骤

空间冲突的处理利用空间编辑功能对冲突对象进行处理。反复检验直至消除所有冲突后,才进行历史库备份与现状库更新处理,完成更新的全过程[1]。新道路数据中的双线道路已作为增量信息融合到旧道路数据中。拓扑冲突检测的对象主要就是与双线道路相关联的单线道路,具体过程如下:

1)遍历新道路数据中与双线道路关联的单线道路,检查单线道路更新状态,判断是否是增量信息,如果是,执行步骤5),否则执行步骤2);

2)计算单线道路与双线道路之间的拓扑关系$\boldsymbol{R}_{\text{new}}$;

3)根据新、旧道路数据中单线道路的匹配关系检索到旧单线道路,计算旧单线道路与双线道路之间的拓扑关系$\boldsymbol{R}_{\text{old}}$;

4)计算$\boldsymbol{R}_{\text{new}}-\boldsymbol{R}_{\text{old}}$,如果结果是0矩阵,则表示空间实体关系一致,不需要进行冲突处理,否则,根据处理规则进行拓扑冲突处理。

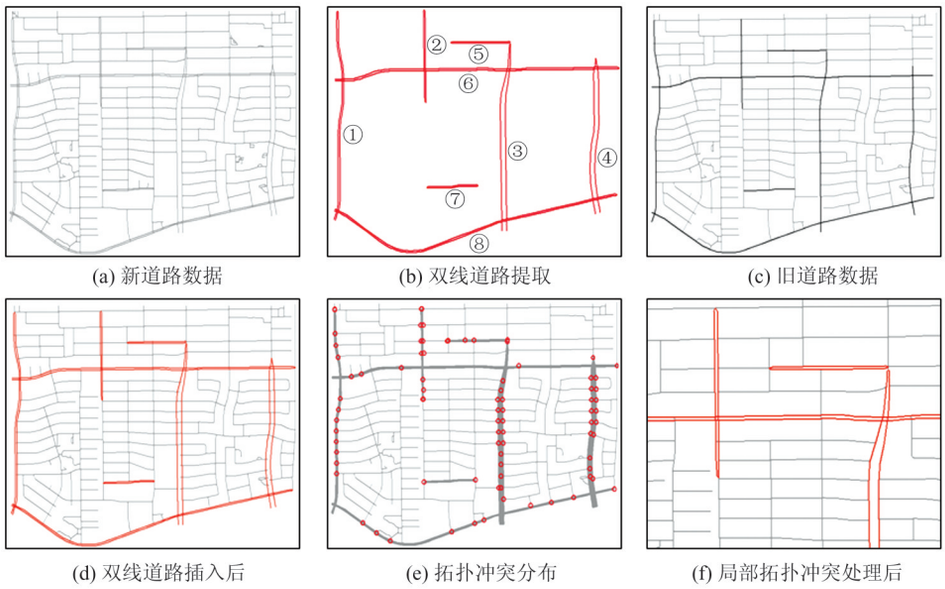
5)遍历下一个路段,重复上述步骤。

2 实验与分析

为验证本文方法的有效性,选取某城市两幅不同时期相同范围的大比例尺(1∶10 000)道路数据进行试验与验证。在进行城市双线道路增量更新中单-双线道路拓扑冲突检测实验之前,首先需要对新旧道路进行匹配,提取增量信息,然后删除旧道路数据中变化信息,将新道路数据中的增量信息插入到已删除变化信息的旧道路数据[19]。本文采用顾及双线道路特征的变化信息提取方法实现双线道路增量更新中变化信息的提取[14]。

单-双线道路拓扑冲突检测实验数据如图4所示,其中图4(a)是包含双线道路的新道路数据;图4(b)是从图4(a)数据中提取出来的双线道路数据,增量信息涉及8条道路(命名为①~⑧);图4(c)是旧道路数据,其中深色部分代表变化信息;图4(d)中红色部分表示插入到旧道路数据中的双线道路(删除变化信息,插入增量信息);图4(e)中红色圆圈处表示单-双线道路发生拓扑冲突的位置,总计85处;图4(f)是经过拓扑冲突检测与处理后的结果。

拓扑冲突的分类统计见表7。由表7可以看出,单线道路变更新成双线道路后,产生最多的拓扑冲突类型是不完全穿越型。主要包括完全连接和不完全连接两类交叉路口。完全连接型产生较多拓扑冲突(a1→a4)的道路如图4(b)的①、⑧号双线道路,不完全连接型产生较多拓扑冲突(a2→a4)的道路如图4(b)的②、③、④号双线道路。



(a) 新道路数据　(b) 双线道路提取　(c) 旧道路数据

(d) 双线道路插入后　(e) 拓扑冲突分布　(f) 局部拓扑冲突处理后

图 4　单-双线道路拓扑冲突检测试验数据

Fig. 4　Experimental Data of Topological Conflict Detection Between Single- and Dual-Carriageway Roads

表 7　拓扑冲突分类统计

Table 7　Classification Statistics of Topological Conflicts

冲突类型	连接关系					合计
	完全连接	不完全连接	直线连接	转向连接	T 型连接	
相离型	2	2	2	0	3	9
相接型	1	0	1	2	0	4
不完全穿越型	21	39	2	2	0	64
完全穿越型	4	1	0	1	2	8
合计	28	42	5	5	5	85

双线道路作为增量信息替换旧单线道路数据后,需要进行单-双线道路拓扑冲突检测,通过关系矩阵差判定拓扑冲突类型,进而根据拓扑冲突处理规则库进行拓扑冲突处理。根据§1.4 中的步骤 3),为了提高新旧单线道路的匹配率,在完成单-双线(主干道)匹配的基础之上,分别利用新旧数据中主干道与单线道路之间的层次关系作为约束条件进行匹配[20]。

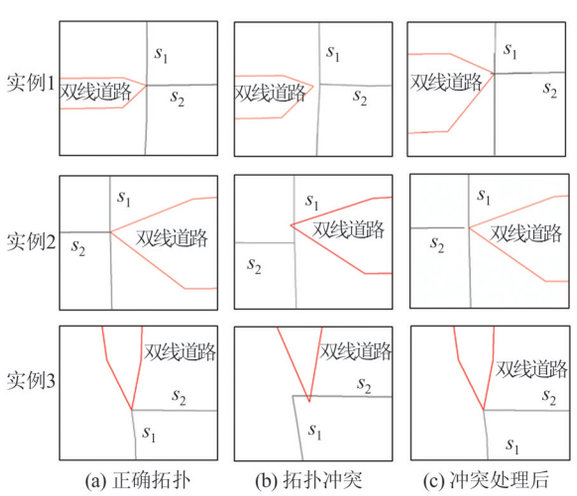
拓扑冲突处理实验结果统计见表 8。由表 8 可以看出,本文方法对单-双线道路拓扑冲突检测与处理具有较好的效果。

表 8　拓扑冲突处理实验结果

Table 8　Topological Conflict Processing Results

冲突类型	实际产生拓扑错误数	成功检测拓扑错误数	成功处理拓扑错误数	处理成功率/%
不完全穿越型	64	64	64	100.00
完全穿越型	8	8	8	100.00
相接型	4	4	4	100.00
相离型	9	9	7	77.78

选取 3 个拓扑冲突实例进行处理与分析,结果如图 5 所示。当双线道路更新到单线道路中后,3 个实例正确的单-双线道路拓扑关系如图 5(a)所示,而实际产生的拓扑冲突关系如图 5(b)所示,通过拓扑关系矩阵差进行拓扑冲突处理后的结果如图 5(c)所示。3 个实例拓扑冲突检测与处理的过程数据见表 9。



(a) 正确拓扑　(b) 拓扑冲突　(c) 冲突处理后

图 5　单-双线道路拓扑冲突检测与处理实例

Fig. 5　Examples of Topological Conflict Detection and Processing Between Single- and Dual - Carriageway Roads

由图 5(c)中的实例 1 和实例 2 可以看出,尽管根据双线道路与单线道路 s_1、s_2 的拓扑关系矩阵差进行了冲突处理,但双线道路与 s_2 依然存在拓扑冲突,通过分析,该问题主要和拓扑冲突检测与处理的顺序以及优先处理的对象有关。如实例 1,首先根据处理规则 Rule5 完成双线道路与 s_2 的冲突处理($\boldsymbol{R}_{b2}\rightarrow\boldsymbol{R}_{b1}$),之后根据 Rule8 完成对双

线道路与s_1的冲突处理($\boldsymbol{R}_{d2}\rightarrow\boldsymbol{R}_{d1}$),此时由于双线道路的端点发生了位移,导致原来处理好的双线道路与s_2拓扑关系发生了新的冲突($\boldsymbol{R}_{b1}\rightarrow\boldsymbol{R}_{b3}$)。同理,如实例2,先根据处理规则Rule5处理了双线道路与s_2的拓扑冲突($\boldsymbol{R}_{b2}\rightarrow\boldsymbol{R}_{b1}$),之后根据Rule9完成了对双线道路与$s_1$的拓扑冲突处理($\boldsymbol{R}_{d3}\rightarrow\boldsymbol{R}_{d1}$),此时由于双线道路的端点发生了变化,导致原来处理好的双线道路与s_2拓扑关系发生了新的拓扑冲突($\boldsymbol{R}_{b1}\rightarrow\boldsymbol{R}_{b2}$)。而对于实例3,无论是先处理双线道路与$s_1$,还是双线道路与$s_2$,都不会影响彼此的拓扑关系。综上分析,实例1和实例2拓扑冲突处理失败的原因是由于其他单线道路与同样的双线道路也存在拓扑冲突,在处理时导致双线道路端点位置发生了变化,从而引起原本处理好的拓扑关系再次产生冲突。因此如果想最大限度地保证单-双线拓扑冲突检测与处理一次性成功,最好的解决方法就是优先处理规则为Rule1~Rule7(处理对象是单线道路)的拓扑冲突,将处理规则为Rule8和Rule9(处理对象是双线道路)的拓扑冲突放在最后处理。

表9 拓扑冲突检测与处理实例分析

Table 9 Examples Analysis of Topological Conflict Detection and Processing

实例	正确拓扑关系类型		拓扑关系冲突		拓扑处理后矩阵差		处理结果	
	$\boldsymbol{R}_{dual-s_1}$	$\boldsymbol{R}_{dual-s_2}$	$\boldsymbol{R}_{dual-s_1}$	$\boldsymbol{R}_{dual-s_2}$	$\boldsymbol{R}_{dual-s_1}$	$\boldsymbol{R}_{dual-s_2}$	$\boldsymbol{R}_{dual-s_1}$	$\boldsymbol{R}_{dual-s_2}$
1	$\boldsymbol{R}_{d1}$(001011)	$\boldsymbol{R}_{b1}$(000111)	$\boldsymbol{R}_{d2}$(000000)	$\boldsymbol{R}_{b2}$(000000)	000000	−1−1−1100	成功	失败
2	$\boldsymbol{R}_{d1}$(001011)	$\boldsymbol{R}_{b1}$(000111)	$\boldsymbol{R}_{d3}$(101020)	$\boldsymbol{R}_{b2}$(000000)	000000	000111	成功	失败
3	$\boldsymbol{R}_{b1}$(000111)	$\boldsymbol{R}_{c1}$(000111)	$\boldsymbol{R}_{b2}$(000000)	$\boldsymbol{R}_{c7}$(101020)	000000	000000	成功	成功

3 结 语

城市双线道路增量更新中拓扑冲突检测是其中的重点和难点,目前国内尚缺乏双线道路在道路增量更新后拓扑冲突检测与处理方法。本文首先通过分析单-双线道路可能存在的拓扑关系,并对其进行分类与可视化表达;然后基于双线道路围成的带状多边形,提出了顾及双线道路特征的线-面关系扩展四交模型;最后通过计算正确拓扑关系与更新后拓扑关系的矩阵差以及构建对应的处理规则库,实现单-双线道路的拓扑冲突检测与处理。实验结果表明,本文方法能够有效实现单-双线道路拓扑冲突检测与处理,具有较好的实用性,对空间数据自动更新具有重要的理论和实践意义。

伴随着人工智能、制图综合的智能化发展,空间数据联动更新依然面临诸多挑战。相对于单线道路与双线道路之间的拓扑关系表达,双线道路以及复杂道路之间的拓扑关系表达更有难度,还需要进一步研究能够简单有效描述各类道路间拓扑关系的数学模型,需要进一步研究的工作是双线道路和复杂道路的复杂拓扑关系模型构建与处理。

参 考 文 献

[1] 张新长,郭泰圣,唐铁. 一种自适应的矢量数据增量更新方法研究[J]. 测绘学报, 2012, 41(4): 613-619.
ZHANG Xinchang, GUO Taisheng, TANG Tie. An Adaptive Method for Incremental Updating of Vector Data[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2012, 41(4): 613-619.

[2] 陈军,周晓光. 基于拓扑联动的增量更新方法研究:以地籍数据库为例[J]. 测绘学报, 2008, 37(3): 322-329.
CHEN Jun, ZHOU Xiaoguang. Incremental Updating of Spatial Database Based on Topological Linkage, Taking Cadastral Database's Updating as an Example[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2008, 37(3): 322-329.

[3] 刘万增. GIS数据库更新中空间冲突自动检测方法[M]. 北京:测绘出版社, 2009.
LIU Wanzeng. Automatic Detection of Spatial Conflict in GIS Database Updating[M]. Beijing: Sino Maps Press, 2009.

[4] 陈军,刘万增,李志林,等. 线目标间拓扑关系的细化计算方法[J]. 测绘学报, 2006, 35(3): 255-260.
CHEN Jun, LIU Wanzeng, LI Zhilin, et al. The Refined Calculation Method of Topological Relationships Between Line Objects[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2006, 35(3): 255-260.

[5] SHEEREN D, MUSTIÈRE S, ZUCKER J D. A Data-Mining Approach for Assessing Consistency Between Multiple Representations in Spatial Databases[J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 2009, 23(8): 961-992.

[6] 王鹏波. 多比例尺道路数据的联动更新研究[D].

郑州:信息工程大学,2009.
WANG Pengbo. Study on Linkage Update of Multi-scale Road Data[D]. Zhengzhou: Information Engineering University, 2009.

[7] 詹陈胜,武芳,翟仁健,等. 基于拓扑一致性的线目标空间冲突检测方法[J]. 测绘科学技术学报,2011,28(5):387-390.
ZHAN Chensheng, WU Fang, ZHAI Renjian, et al. A Method of Spatial Conflicts Detection for Linear Objects Based on Topological Consistency [J]. *Journal of Geomatics Science and Technology*, 2011, 28(5): 387-390.

[8] 丁宇虹. 导航电子地图中道路网增量缩编更新信息的提取[D]. 北京:首都师范大学,2013.
DING Yuhong. Extraction of Incremental Downsizing and Updating Information of Road Network in Navigation Electronic Map [D]. Beijing: Capital Normal University, 2013.

[9] 杨元维. 多特征的道路网匹配算法及更新应用研究[D]. 武汉:武汉大学,2016.
YANG Yuanwei. Researches on Methods of Multi-Characteristics Road Network Matching and Data Updating Applications[D]. Wuhan: Wuhan University, 2016.

[10] 周明辉,翟仁健. 道路网增量更新中拓扑冲突的检测方法[J]. 测绘科学技术学报,2017,34(3):315-319.
ZHOU Minghui, ZHAI Renjian. A Method of Topological Conflicts Detection in Incremental Updating of Road Network[J]. *Journal of Geomatics Science and Technology*, 2017, 34(3): 315-319.

[11] 马超. 自发地理信息道路数据融合处理关键技术研究[D]. 郑州:信息工程大学,2017.
MA Chao. Research on Key Technology of Data Fusion of Volunteered Information Geographic Road Data [D]. Zhengzhou: Information Engineering University, 2017.

[12] 马京振,孙群,温伯威,等. 结合轨迹数据的混合多特征道路网选取方法[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2022,47(7):1009-1016.
MA Jingzhen, SUN Qun, WEN Bowei, et al. A Hybrid Multi-Feature Road Network Selection Method Based on Trajectory Data [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2022, 47(7): 1009-1016.

[13] 张浩,武芳,巩现勇,等. 一种基于平行系数的双线主干道识别方法[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2017,42(8):1123-1130.
ZHANG Hao, WU Fang, GONG Xianyong, et al. A Parallel Factor-Based Method of Arterial Two-Lane Roads Recognition[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2017, 42(8): 1123-1130.

[14] 张浩,武芳,巩现勇,等. 顾及双线道路特征的变化信息提取方法[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2018,43(5):798-805.
ZHANG Hao, WU Fang, GONG Xianyong, et al. A Method of Change Detection Considering Characteristics of Dual-Carriageway Roads[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2018, 43(5): 798-805.

[15] 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.

[16] 简灿良. 多比例尺地图数据不一致性探测与处理方法研究[D]. 武汉:武汉大学,2013.
JIAN Canliang. A Study on Multi-scale Vector Map Data Inconsistency Detection and Handling Methods[D]. Wuhan: Wuhan University, 2013.

[17] 李靖涵,武芳,翟仁健,等. 居民地增量更新中拓扑冲突自动检测方法研究[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2017,42(3):408-413.
LI Jinghan, WU Fang, ZHAI Renjian, et al. Research on the Method of Detecting Topological Conflicts in the Process of Settlement Incremental Updating[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2017, 42(3): 408-413.

[18] 行瑞星,武芳,张浩,等. 基于正对投影距离的双线道路提取方法[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2018,43(1):152-158.
XING Ruixing, WU Fang, ZHANG Hao, et al. Dual-Carriageway Road Extraction Based on Facing Project Distance [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2018, 43(1): 152-158.

[19] 张旗升,王艳慧,刘轩朋. 面状实体增量融合过程中拓扑冲突检测及一致性维护方法研究[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2019,44(3):467-474.
ZHANG Qisheng, WANG Yanhui, LIU Xuanpeng. Topological Conflict Detection and Consistency Maintenance Method in Process of Area Entities Incremental Integration [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2019, 44(3): 467-474.

[20] 刘海龙,钱海忠,黄智深,等. 采用Stroke层次结构模型的道路网匹配方法[J]. 测绘科学技术学报,2013,30(6):647-651.
LIU Hailong, QIAN Haizhong, HUANG Zhishen, et al. Road Network Matching Method with Stroke-Hierarchical Model[J]. *Journal of Geomatics Science and Technology*, 2013, 30(6): 647-651.