

采用三元弯曲组划分的线要素化简方法

钱海忠¹ 何海威¹ 王 骁¹ 胡慧明¹ 刘 闯¹

1 信息工程大学地理空间信息学院,河南 郑州,450002

摘 要:当前基于弯曲的线要素化简在化简过程中对于连续小弯曲的化简处理有所欠缺。针对此提出了基于三元弯曲组的化简方法。该方法首先将连续的弯曲划分到各个弯曲三元组中;然后针对三元弯曲的不同组合类型采用不同的化简方式进行化简;最后设计循环化简判断规则,重复化简过程直到所有弯曲满足化简阈值,从而实现连续弯曲的间隔化简。实验表明,该方法能够有效地保持弯曲的形态特征以及不同化简阈值结果间的层次性。

关键词:制图综合;线要素化简;曲线弯曲;弯曲组;渐进式化简

中图法分类号:P208 **文献标志码:**A

曲线化简是自动制图综合研究的一个经典课题。比较经典的曲线化简方法包括有 Douglas-Peucher 算法(D-P 算法)、垂距法、BLG(binary line generalization tree)、Li-Open-Shaw 算法等^[1-6]。基于曲线弯曲识别的曲线化简方法的出现,不仅能够有效地避免化简中出现的曲线自相交问题,化简效果也比较符合人类对制图综合的认知规律。目前主要的弯曲识别算法有拐点法、单调链法、Delaunay 三角网法、斜拉式弯曲识别算法以及基于通视性的弯曲识别及塑形法等^[7-11]。

基于弯曲的线要素化简方法已应用于各类地图要素的化简中,如等高线、海岸线、水系以及道路等^[12-15]。然而,当前的化简方法在处理连续细小弯曲时,对弯曲删除的判断过程考虑不够充分,未考虑相邻弯曲的相互影响。这对只需要考虑一侧弯曲化简的线要素(如等高线、海岸线)来说影响不大,但对于需要考虑两侧弯曲化简的线要素(如道路、河流)来说,若直接根据阈值删除弯曲,忽略化简时两侧相邻弯曲的相互影响,可能出现“一刀切”(即过度化简,如图 1 所示)的情况。因此,需要设计一个合理的相邻弯曲删除策略,实现化简过程的渐进展开。

本文在分析基于弯曲化简的形态变化规律的基础上,提出了基于“三元弯曲组”划分的线要素

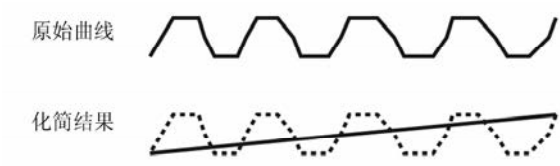


图 1 直接根据阈值化简的结果
Fig. 1 Simplify Road by Threshold Directly

化简方法。

1 连续弯曲化简时的形态变化

化简的层次性是指在不同化简阈值下,不同化简结果的曲线形态呈现由繁到简的渐进变化。在化简过程中,一个基本弯曲的删除会对与其相邻的弯曲形态产生影响。合理地利用相邻弯曲间的相互影响,可以在满足化简阈值的前提下,最大限度地保留弯曲的原始形态^[15]。如图 1 所示,假设原始曲线上的 8 个弯曲均刚好满足删除阈值,若直接按照阈值删除,则所有 8 个弯曲一次性全部删除,化简结果为一条直线。然而实际上,对该线要素进行间隔弯曲删除就能使结果满足化简阈值,同时最大限度地保留了弯曲的形态特性。

如图 2 所示,间隔性地删除了 3 个弯曲,即得到由 3 个大弯曲组成的曲线,使化简结果满足阈值要求(图 2(a));若进一步扩大删除阈值则可得

到如图 2(b)所示效果,不同程度的化简结果之间体现出一定的层次性关系。

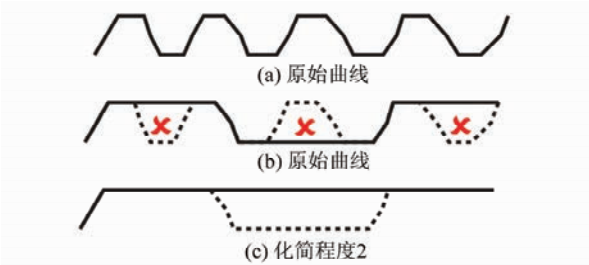


图 2 间隔式化简的结果
Fig. 2 Interval Line Simplification

但并不是所有的曲线都可以简单地采取等间隔的弯曲化简,图 2 中示例的情况只在弯曲均匀分布时才适用。在实际应用中,连续排列的弯曲大小各异,等间隔删除可能会对不满足删除阈值的弯曲进行误删。

由基本弯曲的性质以及弯曲化简的形态变化规律可推导出一个重要结论:一个弯曲化简后的影响不会超出以其为中心的异侧相邻弯曲的范围。因此本文提出了以 3 个相邻弯曲组成的“三元弯曲组”为划分单元,在各个弯曲组中进行弯曲化简的方法,整个曲线的化简则可以看做是 n 个“三元弯曲组”化简结果的组合,从而达到间隔化简的目的。

2 “三元弯曲组”构建和化简

三元弯曲组的定义为:以某一弯曲为参考,结合与其有邻近关系的两个弯曲所组成的弯曲组。例如,若与弯曲 L_n 有邻近关系的弯曲为 R_n 和 R_{n+1} ,则 (R_n, L_n, R_{n+1}) 为一个弯曲组。研究三元弯曲组的化简,对于保持曲线化简前后的整体形态特征具有十分重要的意义。

2.1 弯曲邻近关系探测

三元弯曲组的构建关键在于邻近关系的探测。由弯曲的连续性可知,凹凸弯曲总是依次出现,因此可以直接通过弯曲的序号索引到该弯曲的相邻异侧弯曲,不需要进行繁琐的空间运算。

如图 3 所示,图中弯曲依次交替出现,弯曲 L_n 的相邻弯曲为 (R_{n-1}, R_n) 或 (R_n, R_{n+1}) ,三者组成一个弯曲组,具体组合形式与起始弯曲的类型有关。

如图 3(a)所示,若起始弯曲为左弯曲 L_1 ,则 L_1 的相邻弯曲只为 R_1 , L_n 的相邻弯曲为 $(R_{n-1}, R_n) (n > 1)$; R_m 的相邻弯曲为 $(L_m, L_{m+1}) (m \geq 1)$ (在程序中判断时,需要先验证 L_{m+1} 和 R_n 是否存

在,若不存在则 L_n 的相邻弯曲只为 R_{n-1} , R_m 的相邻弯曲只为 L_m)。

如图 3(b)所示,若起始弯曲为右弯曲 R_1 ,则 L_n 的相邻弯曲为 $(R_n, R_{n+1}) (n \geq 1)$; R_1 的相邻弯曲只为 L_1 , R_m 的相邻弯曲为 $(L_{m-1}, L_m) (m > 1)$ (在程序中判断时,需要先验证 L_m 和 R_{n+1} 是否存在,若不存在则 L_n 的相邻弯曲只为 R_n , R_m 的相邻弯曲只为 L_{m-1})。

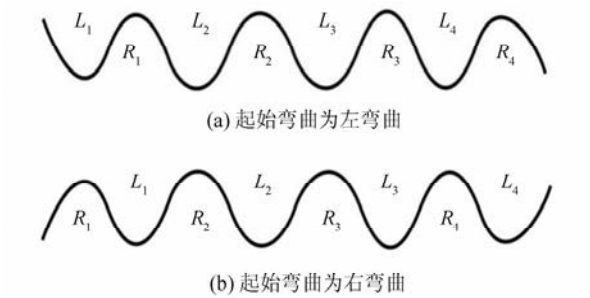


图 3 弯曲的邻近关系探测示例
Fig. 3 Adjacent Relation of Bends

2.2 三元弯曲组化简分析

三元弯曲组的化简归纳起来一共有 10 种不同的情况,具体可以分为 3 种类型。

第一类 三元弯曲组中只有 1 个弯曲小于删除阈值时的化简。该类中又可分为图 4 中的 3 种情况。对于该类情况的化简直接删除弯曲组中满足删除条件的弯曲即可(图 4 中 \times 表示满足删除条件的弯曲, \checkmark 表示需要保留的弯曲)。

第二类 三元弯曲组中有 2 个弯曲小于删除阈值时的化简。如图 5 所示,该类也分为 3 种化简情况。针对不同情况,需要讨论弯曲间的位置关系和面积大小关系(为了方便表示,图 5 中弯曲从左至右依次用 A、B、C 表示)。如图 5(a)、5(b)所示,弯曲组中相邻弯曲 B、C 均满足删除条件,则对 B、C 的面积 S 进行判断,图 5(a)、5(b)中分别是 $S_B < S_C, S_B > S_C$,因此在图 5(a)、5(b)中分别对弯曲组中的 B 和 C 进行删除;当两个面满足删除条件的弯曲不相邻时,如图 5(c)所示,则直接对两侧的弯曲进行删除。

第三类 三元弯曲组中 3 个弯曲均小于删除阈值时的化简,如图 6 所示。对于该类型弯曲组的化简,主要考虑中间弯曲与两边弯曲之间的面积大小关系,可以概括为图 6 所示的 4 种类型。

1)中间弯曲 B 面积均大于两边的弯曲 A、C 的面积,且弯曲 A、C 面积之和也小于弯曲 B,如图 6(a)所示,对于该情况直接删除面积较小的两边弯曲 A、C。

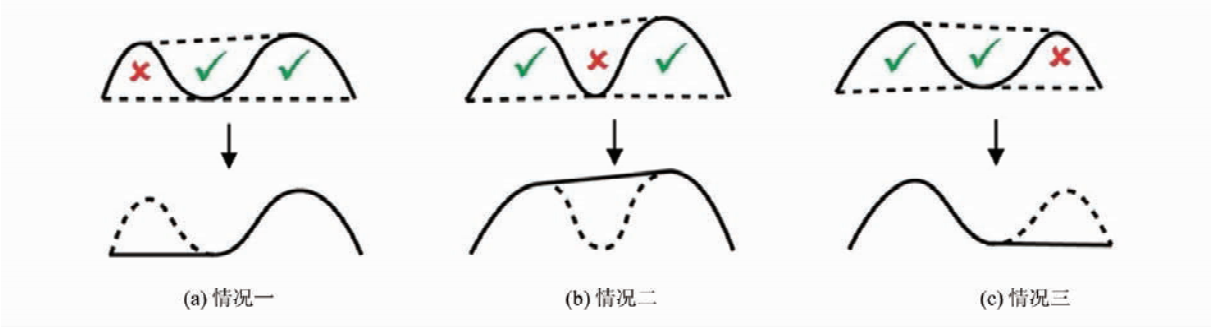


图 4 只有 1 个弯曲小于删除阈值时的化简
Fig. 4 Simplification when One Bend is Less than the Threshold

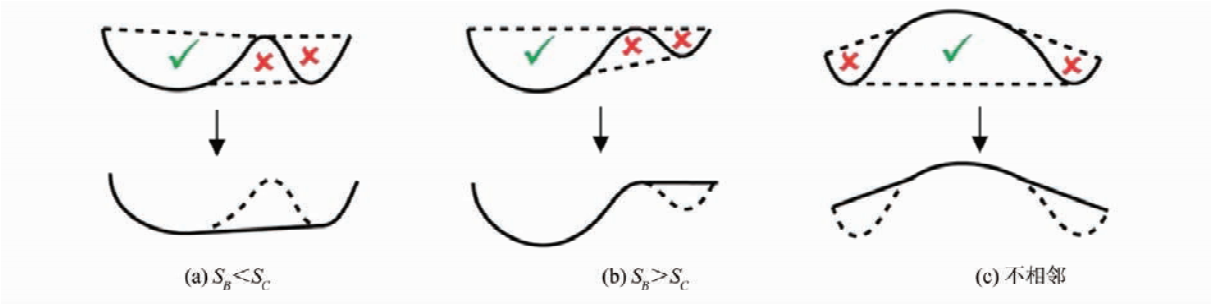


图 5 有 2 个弯曲满足阈值小于删除阈值时的化简
Fig. 5 Simplification when Two Bends are Less than the Threshold

2)中间弯曲 B 面积均大于两边的弯曲 A 、 C 的面积,但弯曲 A 、 C 面积之和大于弯曲 B 。如图 6(b)所示。对于该情况,采取位移误差最小原则,删除中间弯曲 B 。

3)中间弯曲 B 面积最小,如图 6(c)所示,则直接删除弯曲 B 。

4)中间弯曲 B 的面积处于 A 、 C 两者面积值

之间,如图 6(d)所示, $S_A > S_B > S_C$ (或者 $S_C > S_B > S_A$)。考虑如何达到化简弯曲组的目的且化简后整体位置误差较小,若只删除弯曲 C 则弯曲 A 不能得到化简,对于后续的化简来说仍要删除 A ,这样造成的位移误差更大。因此依据位移误差最小原则,对于此情况采取删除中间弯曲 B 的方法进行化简。

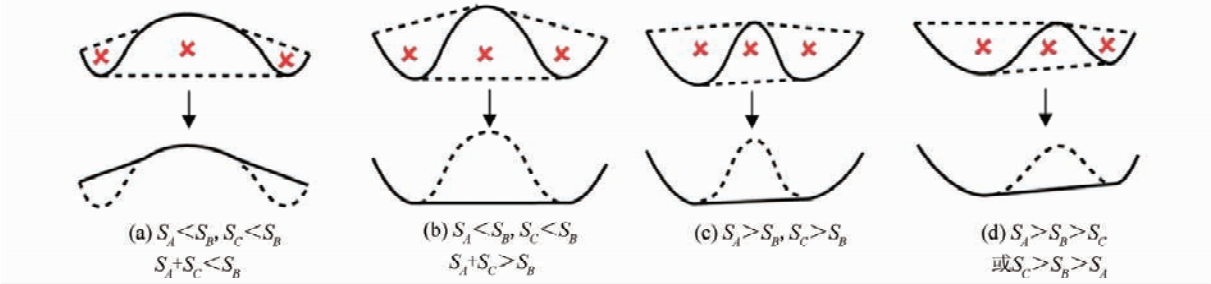


图 6 当 3 个弯曲均小于删除阈值时的化简
Fig. 6 Simplification when Three Bends are Less than the Threshold

3 基于三元组的循环化简策略

一次化简并不能保证化简的结果均符合化简阈值的要求,因此需要制定循环化简的策略。在

每次化简后对曲线重新进行弯曲识别,构造新的三元弯曲组,通过不断地化简合并弯曲组来实现曲线形态逐渐向化简目标形态靠拢。基本流程如图 7 所示。

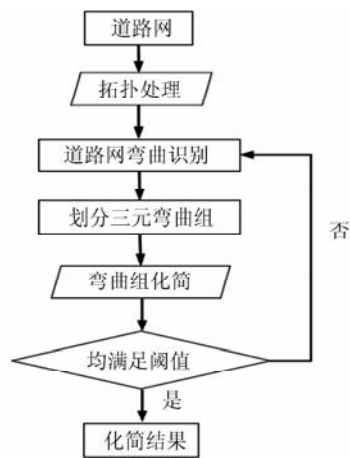


图 7 基于弯曲组的线要素化简流程图
Fig. 7 The Process of Line Simplification Based on Bend Groups

具体循环化简步骤如下。

1)从第一个弯曲开始,每 3 个弯曲划分为一个弯曲组;

2)对弯曲组的类型进行判断,根据 § 2 的化简策略对弯曲组中的弯曲进行化简;

3)对上一次化简的结果重新提取新的弯曲,并判断是否均满足删除阈值的要求,若是则化简结束,否则回到步骤 1)重新开始化简。

本文中将道路弯曲基线长度作为阈值参数,例如把前比例尺下弯曲基线小于 5 mm 的弯曲视为弯曲待删除对象,下文中所提到的弯曲阈值也均采用弯曲基线长度作为判断标准。通过该循环化简过程后,曲线上的所有弯曲对象均满足删除阈值的要求,曲线形态以一种渐进化简的形式得到了完善。具体过程如图 8 所示。图 8 中展示了每一次循环后的道路形态,图 8 中箭头指示的是典型变化区域放大示例。由放大部分可以看出,每一次被化简的弯曲对象之间均呈现间隔分布,使得化简过程能够有层次地展开。完成最后一次循环后,当前所有弯曲均满足化简阈值,不再需要化简,相关统计数据见表 1。

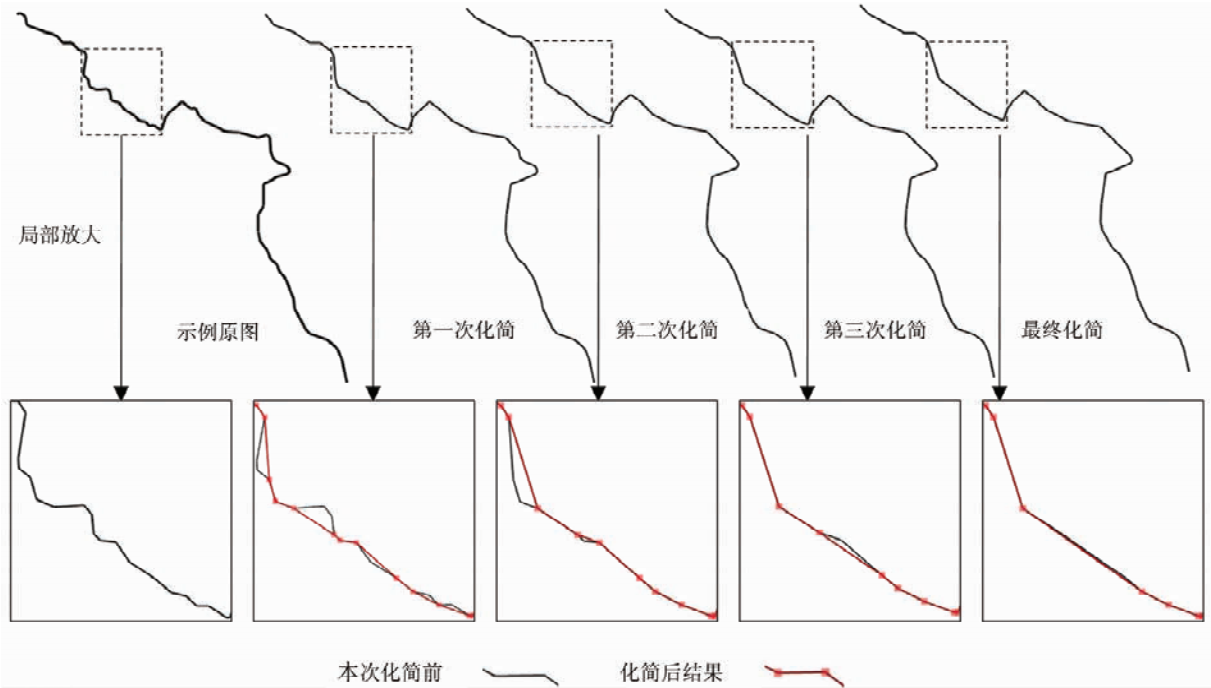


图 8 基于三元弯曲组的循环化简效果示例
Fig. 8 Simplification Circulation Based on Three-Element-Bend Groups

表 1 循环化简过程中的相关数据统计				
Tab. 1 Statistics of Line Simplification Circulation				
相关统计项	第一次	第二次	第三次	最终
删除弯曲数	23	4	2	2
删除节点数	21	6	2	2

由图 8 中的放大示例和表 1 可以看出,随着

循环次数的增加,化简的力度越来越小,整个循环过程可以看作是在不断对线要素化简结果进行修缮的过程。从最终的化简结果可以看出,该方法化简得到的曲线比较平滑,同时较好地保持了道路的主要形态特征。

4 对比实验与分析

本文将基于三元弯曲组的化简方法与已有的 D-P 算法、基于弯曲的化简方法(直接删除满足阈值的弯曲)分别对北京周边某地区 1:5 万道路数据的局部区域进行化简对比实验,如图 9 所示。该部分区域属于郊区,道路形态比较曲折,能够很好地检验各种化简方法的效果。

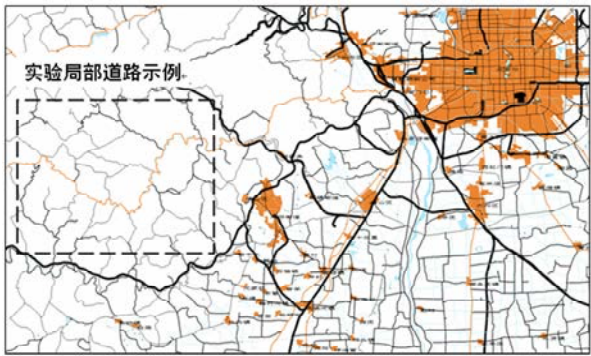


图 9 实验数据图
Fig. 9 Original Road Network Data

为了保证化简前后道路网的拓扑一致性,在实验区对道路实验数据实现拓扑预处理(道路的断链、接链处理)。同时,对于 D-P 化简,通过强制保留道路网相交处的节点保持拓扑关系;

对于基于三元弯曲组划分的化简以及基于弯曲的化简,通过强制保留存在交点的弯曲以及保留曲线的起止节点的方式来避免拓扑关系的改变。

需要说明的是,由于本文对比的是使用 D-P 化简方法与基于三元弯曲组的化简方法化简后曲线要素的局部形态特征变化,因此需要将两种化简方法置于相同的“化简程度”下进行对比。本文定义“化简程度”为被化简单元占总化简单元的百分比,也称为压缩率。D-P 化简的化简单元是曲线节点,其化简程度只能用节点的压缩率来衡量;而基于三元弯曲组划分的化简单元是弯曲,其化简程度只能通过弯曲的压缩率来衡量。本文对两种化简方法在几组相同“化简程度”下的结果进行了对比,具体见表 2。原图的总节点数是 1 159,总弯曲数是 564。

由表 2 中的数据对比可知,在相同的化简程度下,D-P 化简方法保留的节点数量要远少于基于三元弯曲组化简方法保留的节点数量,然而其弯曲的数量却比后者多。这意味着,组成 D-P 化简结果中基本弯曲所包含节点数要少一些,这将导致弯曲的平滑度降低,呈现锯齿状。由图 10 的对比可以印证这一结论,在相同的化简程度下,图 10(a)、10(b)中从左到右依次为化简程度 70%、80%、90%。基于三元弯曲组的化简结果要更加平滑。

表 2 D-P 化简方法与本文化简方法结果对比统计

Tab. 2 Statistics of Douglas-Peucher Method and Three-Element-Bend Group Based Method

化简程度/%	化简后节点数量		化简后弯曲数量	
	D-P 化简	基于三元弯曲组化简	D-P 化简	基于三元弯曲组化简
50	600	877	319	280
70	331	586	220	182
80	237	354	169	115
90	144	188	87	77

同时,本文还将基于三元弯曲组的化简方法与常用的基于弯曲的化简方法在相同的几组化简阈值下进行了对比实验。实验的统计结果见表 3。由表 3 中统计数据对比可以看出,在相同的化简阈值下,基于弯曲的直接化简方法删除了更多的弯曲数量和节点数量,化简的力度较强。但是由于其采取的是直接删除不满足阈值的所有弯曲

的方法,因此对相邻的细小弯曲一概进行了删除,不同阈值化简结果之间不能体现出较好的层次性。而基于三元弯曲组的化简方法则在层次性上表现较好,曲线在不同阈值处理下的细节呈现出依次增强的概括过程,如图 11 所示。图 11(a)、11(b)中从左到右依次为化简阈值 2 mm、5 mm、10 mm 和 20 mm。

表 3 基于弯曲的化简方法与本文化简方法结果对比统计

Tab. 3 Statistics of Regular Simplification Method and Three-Element-Bend Group Based Method

化简阈值/mm	化简后节点数量		化简后弯曲数量	
	基于弯曲的化简	基于三元弯曲组化简	基于弯曲的化简	基于三元弯曲组化简
2	678	877	233	280
5	316	586	113	182
10	143	354	59	115
20	64	188	5	77

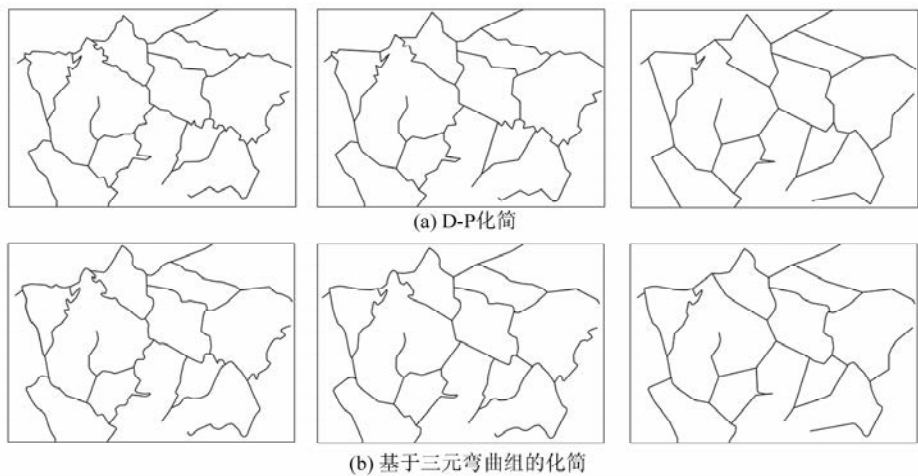


图 10 基于三元弯曲组与 D-P 方法对比
Fig. 10 Comparison of Douglas-Peucher Method and Three-Element-Bend Group Method

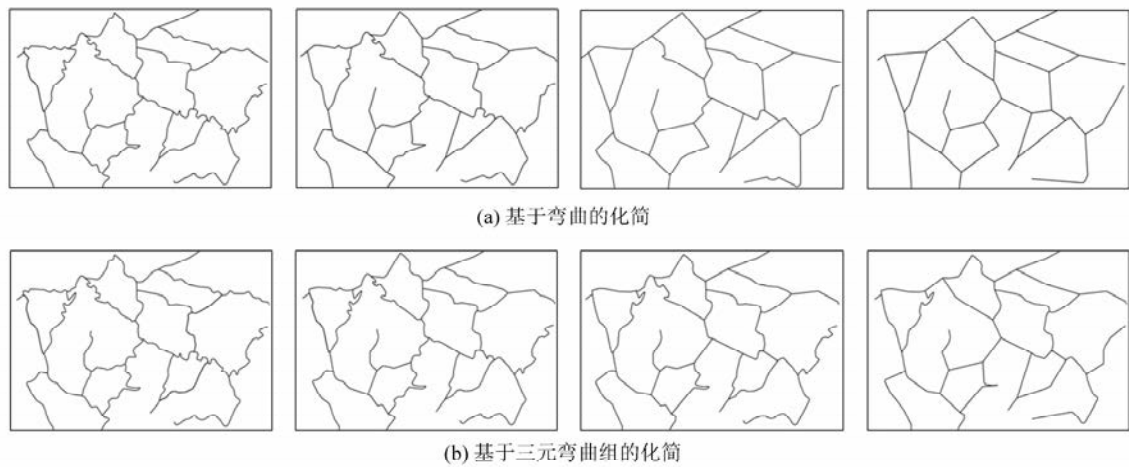


图 11 本文方法与基于弯曲的化简方法对比
Fig. 11 Comparison of Curve Bend Based Method and Three-Element-Bend Group Method

从以上化简的结果图和统计表中的数据可以得出以下结论。

- 1) D-P 化简虽然对曲线的形态化简效果明显,但是化简结果导致了大量的尖锐角的出现,对于地图道路要素来说是不符合自然规律的。如表 2 所示,在弯曲压缩率相近的情况下,D-P 化简算法保留的节点数明显小于基于弯曲组的化简算法,导致化简结果比较生硬,平滑度不够;结果图中可以看出对形态的保持效果较差,没有体现出“综合”的本质。
- 2) 基于弯曲的化简方法,由于直接删除小于阈值的弯曲,使得在同一化简阈值下化简后的节点以及弯曲数量远少于基于弯曲组的化简方法,导致在化简时力度过猛,没有考虑到弯曲之间的相互影响和制约(表 3)。从化简的结果图可以看出,不同阈值的化简结果之间形态变化突然,由于对所有满足阈值的弯曲采取“一刀切”的处理方

式,没有体现出不同显示尺度上的层次性。

3) 基于三元弯曲组的化简,通过划分三元弯曲组以及采取循环化简策略,在保证化简结果满足化简阈值的情况下,对连续出现的相邻小弯曲尽量保持了较多的节点和弯曲结构。从图 10(b)来看,化简结果较好地保持了道路原本的形态特征,曲线形态平滑;从图 11(b)可以看出,随着化简阈值的增大,不同阈值化简结果在显示尺度上体现出较好的层次性。

由于本文的道路化简方法采取的是基于弯曲的方式,因此在化简结果的形态保持上比起基于节点的 D-P 算法更加平滑;又由于本文顾及了道路连续弯曲之间的影响,采取了基于“三元弯曲组”的间隔化简方式,避免了一般基于弯曲的直接化简所导致的“一刀切”的情况,不同阈值化简结果之间能够体现出层次性的过渡,使得化简的结果得到改善。

5 结 语

针对线要素上连续细小弯曲的化简问题,本文提出了“三元弯曲组”的概念,并对“三元弯曲组”的特性进行分析,划分“三元弯曲组”类型,针对不同类型弯曲组制定不同的化简方法,并将其应用于线状道路要素的化简中。从化简的结果来看,该方法能够有效地对道路要素进行化简,弥补了以往基于弯曲化简方法对连续小弯曲化简的不足,化简结果在不同化简阈值下体现出递进的层次关系,在各阈值范围内较好地保持了道路本身的形态特征。该方法可有效应用于细小弯曲较多且需要同时考虑双侧弯曲化简的要素(如道路、河流等)化简中。

参 考 文 献

[1] Wang Jiayao. The Principle of Cartographic Generalization for General Map [M]. Beijing: Publishing House of Surveying and Mapping,1993:78-84(王家耀. 普通地图制图综合原理[M]. 北京:测绘出版社,1993:78-84)

[2] McMaster R B. Automated Line Generalization [J]. *Cartographica*, 1987, 24(2): 74-111

[3] Douglas D H, Pecucker T K. Algorithms for the Reduction of the Number of Points Required to Represent a Digitized Line or Its Caricature [J]. *The Canadian Cartographer*, 1973, 10(2):112-122

[4] Li Zhilin, Openshaw S. Algorithms for Line Generalization Based on Natural Objective Principles [J]. *International Journal of Geographic Information Systems*, 1992, 6(5):373-389

[5] Nie Hongshan , Huang Zhijian. A New Method of Line Feature Generalization Based on Shape Characteristic Analysis [J]. *Metrology and Measurement Systems*, 2011, 18(4):597-606

[6] McMaste R B. A Statistical Analysis of Mathematical Measures for Linear Simplification [J]. *The American Cartographer*, 2013, 13(2): 103-116

[7] Zhang Qingnian, Liao Ke. Line Generalization Based on Structure Analysis [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*, 2001, 40(5): 118-121(张青年,廖克. 基于结构分析的曲线概括方法[J]. 中山大学学报(自然科学版),2001,40(5): 118-121)

[8] Wang Pengbo, Wu Fang, Zhai Renjian. A Topo-

logic Method for Automated Generalization of Road Networks [J]. *Journal of Geomatics Science and Technology*, 2009, 26(1):64-68 (王鹏波,武芳,翟仁健. 一种用于道路网综合的拓扑处理方法[J]. 测绘科学技术学报,2009, 26(1):64-68)

[9] Wu Hehai. Automatic Determination of Inflection Point and Its Applications [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2003, 28(3): 330-335(毋河海. 数字曲线拐点的自动确定[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2003, 28(3): 330-335)

[10] Wang Zeshen , Muller Jean-Claude. Line Generalization Based on Analysis of Shape Characteristics [J]. *Cartography and Geographic Information Systems*, 1998, 25(1): 3-15

[11] Guo Qingsheng, Huang Yuanlin, Zhang Liping. The Method of Curve Bend Recognition [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*,2003, 33(6):596-599 (郭庆胜,黄远林,章莉萍. 曲线的弯曲识别方法研究[J]. 武汉大学学报·信息科学版,2003, 33(6):596-599)

[12] Qian Haizhong, Wu Fang, Chen Bo, et al. Simplifying Line with Oblique Dividing Curve Method[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2007, 36(4): 443-456(钱海忠,武芳,陈波,等. 采用斜拉式弯曲划分的曲线化简方法[J]. 测绘学报,2007,36(4):443-456)

[13] Zhu Qiang, Wu Fang, Qian Haizhong. An Identification Method of Line Curves Based on Cognitive Laws [J]. *Journal of Liaoning Technical University (Natural Science)*, 2014, 33(4):521-527 (朱强,武芳,钱海忠,等. 一种顾及认知规律的曲线弯曲识别方法[J]. 辽宁工程技术大学学报·自然科学版, 2014,33(4):521-527)

[14] Zhai Renjian, Wu Fang, Zhu Li, et al. Line Simplification Based on Geographic-Feature Constraint [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2009, 34(9): 1 021-1 024 (翟仁健,武芳,朱丽,等. 利用地理特征约束进行曲线化简[J]. 武汉大学学报·信息科学版,2009,34(9):1 021-1 024)

[15] Wu Fang, Zhu Kunpeng. Geometric Accuracy Assessment of Linear Features' Simplification Algorithms[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2008, 33(6): 520-523(武芳,朱鲲鹏. 线要素化简算法几何精度评估[J]. 武汉大学学报·信息科学版,2008,33(6):600-603)

Line Feature Simplification Method Based on Bend Group Division

QIAN Haizhong¹ HE Haiwei¹ WANG Xiao¹ HU Huiming¹ LIU Chuang¹

¹ Institute of Geographical Spatial Information, Information Engineering University, Zhengzhou 450002, China

Abstract: General line feature simplification methods have some defects on the simplification of the continuous small bends, as it failed to maintain the hierarchy of the simplification. Hierarchy of the simplification refers to that, under different threshold, the curves of different simplified results show a gradual change from complicated to simple. Analyses of morphological changes in the simplification based on bend shows that, the deletion of a basic bend will have an effect on the adjacent curved form. The rational use of the interaction between adjacent bending can maximize the retention of the original form of bending, under the premise of meeting the simplification threshold. Aiming at the simplification problem of continuous small bends, this paper puts forward the concept of three-element-bend group division, which re-plans the simplification process of continuous bend, dividing the road into three different element bend groups, simplifying the bend group in different way according to the different type of bend groups, and execute simplification process according to a circulating simplification strategy. Thus the interval simplification of line feature is realized, thus maintained the hierarchy of the simplification. The simplification experiment test shows that this method can maintain the morphological characteristics of the original road and a hierarchy between different threshold results.

Key words: map generalization; line simplification; curve bend; bend group; gradual simplification

First author: QIAN Haizhong, PhD, professor, specializes in spatial data auto-generalization, E-mial: haizhongqian@163.com
Corresponding author: HE Haiwei, PhD candidate, E-mail: adai928@126.com
Foundation support: The National Natural Science Foundation of China, Nos, 41571442, 41171305.