

基于通视性原理的等高线化简算法研究

朱 强 武 芳 翟仁健

(信息工程大学测绘学院, 郑州 450052)

摘 要 等高线自动综合历来是制图综合领域的重点和难点。目前已存在的等高线化简方法主要是一种几何上的逼近, 由于综合处理后的等高线难以保持原有的形态特征, 因此为了更好地进行等高线化简, 首次提出了一种基于最大通视条件的新的等高线化简方法。该方法首先利用最大通视性原理划分等高线化简区域, 并在每个划分的区域范围内, 对曲线段进行弯曲嵌套层次分析和等级划分; 然后在此基础上根据曲线段弯曲的等级和预先设定的阈值进行弯曲取舍。实验证明, 该方法在控制自相交、特征点保持等方面均明显优于其他化简方法, 化简后的形态保持, 更符合等高线的综合要求。

关键词 通视性 弯曲嵌套 等高线 自动综合 化简

中图法分类号: TP391.4 P283.7 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2009)02-0359-06

A Novel of Contour Line Simplification Algorithm Base on Visibility

ZHU Qiang, WU Fang, ZHAI Ren-jian

(Institute of Surveying and Mapping, Information Engineering University, Zhengzhou 450052)

Abstract It is important but difficult to generalize contour lines in cartographic generalization domain all along, and the graphic simplification of which is also a necessary difficulty. At present, existent simplification method of contour lines is mainly a geometrical approach, whose results after generalization process can hardly keep the primary shape characteristics. Based on analysis of area dividing and bend nesting of curve by the furthest visibility condition, a new generalization method of contour lines is proposed firstly. The experiment results show that the method is better than Douglas-Peucker algorithms on eliminating self-intersection, keeping character points, and can keep the shape after simplification better.

Keywords visibility, bend nesting, contour lines, automated generalization, simplification

1 引 言

等高线的自动综合是地图内容各要素综合中最复杂的课题之一^[1]。其主要原因是由于地貌的形态类型复杂多样, 因此对应的等高线图形的弯曲和疏密有很大的差别; 不仅地貌形态的自动识别比较困难, 而且要从整体识别区域地貌的结构, 并在宏观上进行等高线的综合取舍难度较大, 目前尚没有一种方法能够提供对地貌类型和等高线综合进行自动调节的机制^[2]。经过长期的研究, 目前基于等高线

的地貌自动综合方法主要包括单根等高线曲线化简综合法、等高线结构化综合法、基于分形分析的曲线综合法等等, 这些方法虽各有特色, 并能分别从各自的角度解决特定的问题, 但都不能胜任等高线综合的任务。由于基于等高线的地貌综合算法在线化简方面往往将其作为一个纯粹的几何问题, 因此单纯地利用曲线的几何特征在较低的层次上逼近原曲线, 其处理过程虽然简捷, 但容易导致对地形地貌表达的歪曲。

常用的曲线化简算法有 Douglas-Peucker 法(DP法)、光栅法、垂足法、角度法、最小面积重复删除法

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863)项目(2007AA12Z211); 国家自然科学基金项目(40671162, 40620130438, 40701157)

收稿日期: 2007-03-19; **改回日期:** 2007-09-14

第一作者简介: 朱 强(1979 ~), 男, 工程师。信息工程大学测绘学院硕士研究生。主要研究方向为地理信息系统、地貌自动综合等。

E-mail: Hugh_zhu@yahoo.com.cn

等。由于 DP 算法具有严格的保凸凹性,能保持曲线形状特征和减少线性位移量等优势,故 DP 算法最为经典,应用最广泛。其基本思想是由远到近,找出与矢量两端点连线的垂足最大的顶点,并判断其是否满足给定要求。但随着曲线形态的复杂化,简化效果亦随之变差,且该算法本身还存在曲线自相交等难以解决的问题,对此,许多学者进行改进算法研究。Tadeusz Chrobak 提出了一种将几何变换与 DP 算法相结合的方法,其能够根据曲线的细节程度插入新点,并能使得综合后的曲线能更好地吻合原始线划的形状^[3];王晏民针对 DP 算法循环判断次数过多、速度慢的缺陷,提出了保留中间距离最大顶点和减少重复循环判断的改进算法,其在形状保真度和速度上有所改进^[4];黄培之为了克服 Splitting 法(即 DP 算法)不可能在给定的精度限差条件下取得最大压缩比的问题,发展了具有预测功能的曲线矢量压缩算法,并在等高线上进行了方法试验^[5];此外,Buttenfield 等人也对此做出了改进^[6]。

经分析不难发现,等高线的综合过程不同于一般曲线的化简过程,因为它还要考虑地理特征因素,包括对等高线所表示实际地形特征的识别、不同区域的划分、不同曲线弯曲之间的嵌套关系和等级分类以及手工制图综合过程中相关规则的运用等。由于不同的等高线具有不同的形态特征,即使同一条等高线的不同部分,其形态特征也不尽相同,因此对等高线应根据不同的形态特征进行合理的化简区域划分,将得到更符合曲线认知规律的结果。本文首次提出了一种新的基于最大通视条件的等高线化简方法,其基本思想是:先利用最大通视性原理划分等高线的化简区域,并在每个划分的区域范围内对曲线段进行弯曲嵌套层次分析和等级划分;然后在此基础上根据曲线弯曲的等级和预先设定的阈值进行曲线弯曲取舍,就能够取得更好的综合效果。

2 基于最大通视条件的区域划分

2.1 通视性原理简介

通视性分析广泛应用于建模与仿真、地形勘探、导航制导、测量测绘、游戏娱乐及地理信息系统等多个领域。例如,依据适当的约束条件进行观察点的设置、地面测控点的选取、雷达位置的确定、3 维游戏中的视线判定等都要进行通视性判断^[7]。其原理是通过判断从视点 to 目标点的连线间是否有其他

点遮挡来判断目标点的可视性,若目标点没有被其他点遮挡,则可视,否则不可视(如图 1 所示)。

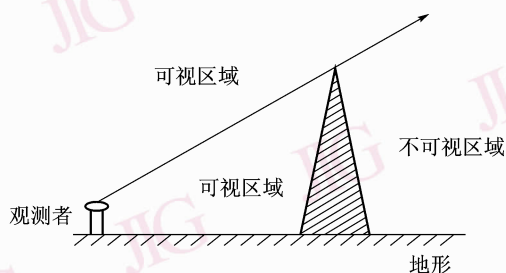


图 1 简单可视模型

Fig. 1 Simple visual model

2.2 等高线最大通视区域划分

由于对曲线进行不同的化简区域的划分,会得到不同的化简结果,因此,合理划分曲线的化简区域是保证曲线化简后仍可保持形态特征的基础。在此,本文引入最大通视性原理作为等高线区域划分的基础。

虽然等高线本身是没有方向的,但采集的等高线数据是有方向的。假定:对于正序走向,即沿等高线前进方向的左手边高程较低,右手边高程较高。等高线综合时,一般是通过删除小谷地并扩大山脊来达到整体上清晰表达地貌形态起伏的目的。对于已调整为正序走向的等高线,可利用最大通视原理,通过遍历整条曲线上的点来找到观测点所能观测到的最大视野目标点。由于能够挡住视野的点一定是构成山脊的点,所以通视点之间的区域必定是两山脊间对应的谷地。如图 2 所示,ABCDE 是一条复杂的等高线弯曲单元,对其可按照最大通视条件原理来寻找最大通视点,并进行区域划分。其基本算法步骤如下:

(1) 以原始有序点集 P 中起始的 2 个点(如点 A, A_1)构成的边为起始边,从第 $i(2 < i < n)$ 个点开始,依次判断第 i 个点是否在起始边的右边,即沿曲线的前进方向可视。如果可视,则将第 1 个点与第 i 个点的连线作为新的起始边,并从第 $i+1$ 个点开始继续寻找,直至终点,同时将构成最后一条起始边的末点(如点 C)记录到最大可视点集合 P_V (V 代表 visual,下同)。

(2) 以寻找到的 P_V 的最后一个点 p_i (如点 C)为起始点,在原始有序点集 P 中,从第 $i+1$ 个点(如点 C_2)开始(i 为点 p_i 在原始有序点集合 P 中的序号),按照步骤(1)的方法,依次循环,直到找到下一个最大的可视点 p_j (如点 E),并将其记录到可视点集合 P_V 。

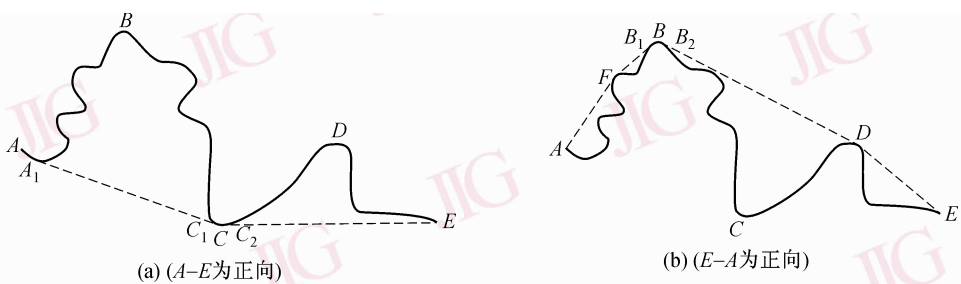


图 2 最大通视划分区域

Fig. 2 Dividing area by the furthest visibility

(3) 依次循环步骤(1)、(2),直至找到整条曲线所有的最大可视点,用于构成可视点的集合 P_v ,并将曲线的首末点分别记录在集合的首点和末点位置。此时,集合 P_v 内的相邻两点构成的区域就是最大通视区域。同时,由最大可视点集合 P_v 所划分的区域是同一级别的,它们之间不存在嵌套关系,而是同属于上一级的弯曲单元。

3 复合曲线的弯曲嵌套分析

3.1 弯曲单元

弯曲单元是曲线的基本构成单元,即一条曲线是由一系列前后串接的弯曲单元组成的。弯曲单元的定义如图 3 所示,其为介于两个相邻拐点之间的一个曲线段,弯曲 $\widehat{A_2BC_2}$ 的一阶导数处处可导,其二阶导数符号不变,该种弯曲称“数学弯曲”(简称弯曲单元)。图 3 所描述的弯曲 $\widehat{ABC}$ 称为“形态弯曲”,其是由弯曲单元 $\widehat{AA_1A_2}$ 、 $\widehat{A_2BC_1}$ 、 $\widehat{C_2C_1C}$ 构成。显然,形态弯曲不是弯曲单元,而是一种包含了多个弯曲单元的复合弯曲。

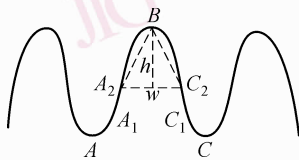


图 3 形态弯曲单元

Fig. 3 Shape bend

3.2 弯曲嵌套分析

自然曲线往往具有弯曲嵌套的特点,简单的按弯曲单元来划分曲线将不能够有效地反映复杂的结构形态特征。分析弯曲嵌套关系的目的是为了对曲

线的各段弯曲单元进行等级划分,并在此基础上按等级的高低顺序,根据弯曲单元取舍的条件进行曲线的化简。弯曲嵌套的划分有许多种,例如边界区域、曲线分支等。本文提出的划分等高线弯曲单元层次关系的思想是基于最大通视原理,如果采用如图 4 所示的数据结构及相关函数,则通过对等高线的弯曲单元划分,就可以清晰地分析出山谷之间的嵌套关系。因此,在等高线的化简过程中,为了有利于保持等高线的整体形态,应根据弯曲单元的层次关系,舍弃弯曲较小,且等级较低的弯曲单元。

```
template< class T>
class Bend_Nest
{
public:
    Bend_Nest( const T& item = T() ) :
        Element( item ), HighLevel( NULL ), LowLevel( NULL ) {}
    T Element; //弯曲嵌套保存的元素
    class Bend_Nest * HighLevel; //高一等级的弯曲指针
    class Bend_Nest * LowLevel; //低一等级的弯曲指针
    .....
}
```

图 4 数据结构

Fig. 4 The data structure

其具体过程如下:

- (1) 对原始曲线进行最大通视条件的区域划分,先得到最大通视点集 P_v ,并将原始曲线等级标识为 Lev (初次通视区域划分 $Lev = 0$),所划分的弯曲区域的等级标识为 $Lev = Lev + 1$ 。
- (2) 依次从点集 P_v 中先取出相邻两点 p_i^v, p_{i+1}^v ($0 < i < n - 1$),连接此两点,并在点集 P 的对应区域中寻找到与这两点连线距离最大的点作为最大谷深点 p_{val} ;然后将弯曲 $\widehat{p_i^v p_{i+1}^v}$ 划分成了两个同级别的

弯曲单元 $\widehat{p_i^V p_{val}^V} \widehat{p_{val}^V p_{i+1}^V}$, 弯曲等级 $Lev = Lev + 1$ 。

(3) 按照步骤(1)、(2)分别对这两个弯曲单元进行最大通视区域和等级划分,直至所有弯曲单元划分完毕。

根据此方法,等高线 $ABCD$ 的弯曲嵌套关系如图 5 所示。

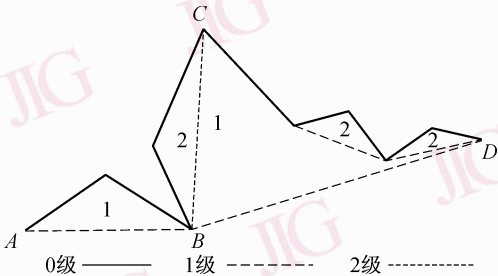


图 5 弯曲单元划分
Fig. 5 Dividing bend

4 基于最大通视条件的等高线综合方法

如前所述,等高线是由等级不同的弯曲单元嵌套构成的,对于不同等级的弯曲单元,其对曲线形态保持的重要性不同。一般而言,位于低层次的基本弯曲单元对曲线形态的影响较小,而高层次的弯曲单元则对曲线形态的影响显著。当比例尺由大变小时,位于低层次的弯曲单元往往由于过小而无法辨认,因而需要进行综合处理^[8]。本文是利用弯曲单元的面积作为综合取舍的主要依据。这里采用的两个参数即弯曲单元的内径 h 和弯曲宽度 w 来描述曲线形态(图 3)。经制图生产实践证明,当 $h \geq 0.4 \text{ mm}$, $w \geq 0.6 \text{ mm}$ 时,才能辨认清楚^[9]。然后据此就可以确定弯曲单元面积大小,在面积条件满足的情况下,应当保留。这样将更有利屏幕地图的无级缩放显示。当然,根据等高线综合的要求不同,该参数可以改变。基于最大通视条件的等高线综合过程如下:

- (1) 对给定的等高线进行初次最大通视区域划分,并把所得到的该等高线所有相对独立的特征弯曲单元标识为 1 级,同时将原等高线等级标识为 0 级。
- (2) 对于由第 1 步得到的同一级别的弯曲单元,要根据给定的面积阈值进行取舍。若弯曲单元面积大于给定阈值,则保留此弯曲单元进行下一步;否则删除该弯曲单元。
- (3) 对保留的弯曲单元依次利用最大通视原理进

行弯曲嵌套分析,先得到一组下一级别的弯曲单元,再按照给定的面积阈值进行取舍,直至划分到最低一层的弯曲单元,且符合弯曲单元的面积要求为止。

(4) 对处理过的等高线进行自相交检查,若出现自相交,则按照自相交控制的方法进行处理,直至消除所有自相交。

由于等高线数字化时,其首末点是随机的,如果直接进行通视区域划分,则会出现本应属于同一弯曲单元的首末区域被划分为两个上一等级的弯曲单元,从而导致如图 6 所示的划分错误(点 E 为起始点)。通过对等高线进行的分析发现,利用最大外接矩形对等高线进行初始划分,不仅可以有效地解决闭合和非闭合等高线区域的初始划分问题,并可以对这两类等高线进行统一化处理。其具体思路是:找出待综合的等高线的最大外接矩形,由于其是经过方向调整的,故可以被统一划分为左→上、上→右、右→下、下→左 4 个区域。显然,由于与最大外接矩形上下左右 4 个点对应的一定是山脊,所以初始划分的过程就是找出该等高线的最大地形特征区域,进而在此基础上进行通视区域划分,这既符合认知规律,也对实施等高线综合有实际意义,故此可将每条等高线最多划分为 4 段处理(图 7)。当找到该等高线的最大外接矩形及对应的上、下、左、右 4 个点后,即可将原等高线分成 4 条新的曲线 $\widehat{AB}$ 、 $\widehat{BC}$ 、 $\widehat{CD}$ 、 $\widehat{DA}$,它们的等级相同,且具有相对独立的形态特征,故应分别处理。

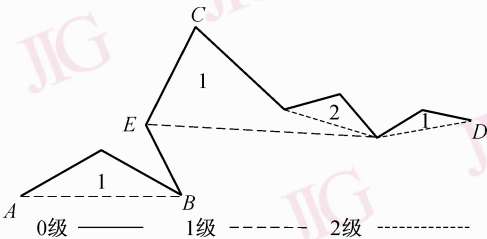


图 6 错误区域划分
Fig. 6 Dividing area wrongly

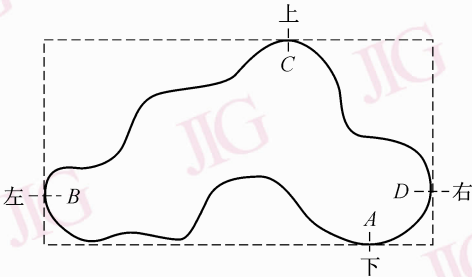


图 7 初始区域划分
Fig. 7 Dividing initial area

5 自相交控制

由于曲线具有复杂、多样、密集等特点,尤其是等高线,而运用常见的算法化简后则不可避免会产生曲线本身的自相交,这是不允许的,因此需要控制自相交现象的出现。目前通常采用位移转折点的方法来解决,也有采用将引起相交的小弯曲单元与相邻的两个弯曲单元看作成一个整体进行简化处理的方法来消除自相交现象^[10]。

显然,无论是采取位移方法,还是一致性化简处理方法,都无法避免由于点位移等操作而可能产生的进一步的自相交情况。即便按照上面的方法全部消除了相交情况,但由于进行多次的位移和一致性处理,也会导致曲线的严重变形,从而无法达到综合的目的。这样就可以找到相交的线段,并判断是由哪一条线所引起的相交。由于等高线本身不存在相交现象(除断崖、峭壁等少数特殊地貌外),而且所引起自相交的现象一定是由于对与该线对应弯曲单元进行综合所导致的,因此只要对此段弯曲单元进行分析处理就可以解决自相交问题,并可以保证最大程度的综合。

根据最大通视原理,在保留该弯曲单元的基础上进行下一层次的弯曲单元的划分和简化,并判断处理后的线段是否仍存在相交,如相交,则继续按上面的方法化简,直至不存在相交为止。这样由于能

保证线的相交处理是在原始数据的基础上进行的,从而精度和变形得以有效控制,也不会因为处理目前的相交而引起下一步相关联的自相交。如图 8 所示,原始等高线经过本文方法化简后,出现了如图 8(b)中所示的相交现象,经分析可知,此处是由于对弯曲单元 $\widehat{AB}$ 的综合所引起的相交。为了消除相关可根据本文处理自相交的方法,首先找到与引起相交的线段 $\widehat{AB}$ 对应的弯曲单元 $\widehat{ACDEFB}$,并在保留该弯曲单元的基础上,对其进行弯曲嵌套划分(如图 8(c)所示);然后将其划分为两个 i 级弯曲并进行综合处理,即通过删除第 $i+1$ 级的弯曲单元 $\widehat{ACD}$ 来得到弯曲单元 $\widehat{ADEFB}$;最后判断此步处理后是否还存在相交,如果仍存在,则继续寻找引起相交的线段,循环进行如上处理,直至消除相交,即得到如图 8(d)所示的最终化简结果。这种处理自相交的过程不仅可以有效地控制等高线的形态,而且不会引起因为该处自相交的消除而导致进一步的相交产生。

6 实验分析和结论

通过选取某一地区的数字化地形等高线图,本文分别采用 DP 算法和基于通视性原理的等高线化简方法进行处理,化简结果如图 9 所示。表 1 是 DP 算法和本文算法在相同的点压缩比下,分别对 1:5 万比例尺和 1:25 万比例尺地图上的等高线要素进行化简的时间比较。

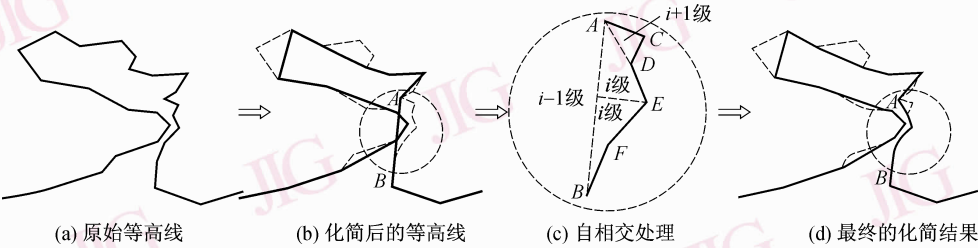


图 8 自相交的控制过程
Fig. 8 Process of eliminate self-intersection

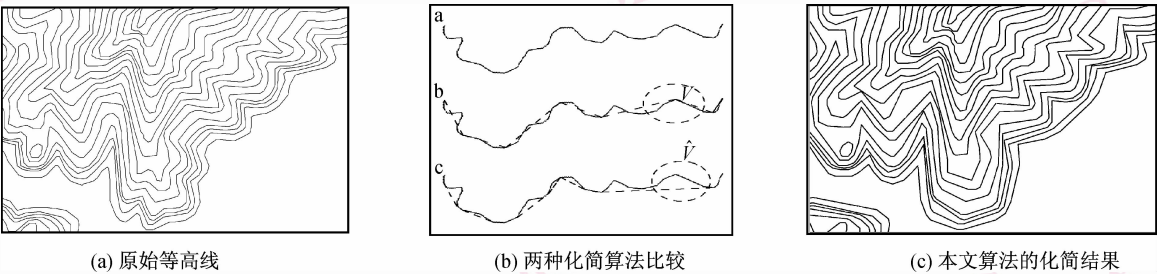


图 9 等高线化简实验结果
Fig. 9 Simplification results of contour lines

图 9(a) 显示了该区域的原始地貌,图 9(b) 是对该区域其中一条等高线利用 DP 算法和本文方法进行化简的结果对比,图中线 a 是原始的等高线,线 b 是利用 DP 算法化简的结果,线 c 是利用本文方法化简的结果,通过对比可以发现,DP 算法在单纯图形几何的逼近程度上要优于本文算法,但由于 DP 算法没有考虑化简的起始位置,因此不同的起始点会得到不同的化简结果;由于 DP 算法没有考虑弯曲单元嵌套的关系,致使本来应该舍弃的弯曲单元(谷地)却错误地保留下来,如图 9(b) 中点 V 和点 $\hat{V}$ 处;DP 算法由于没有考虑山谷点和山脊点在综合过程中的关系,以致频繁出现消脊扩谷的现象,不符合等高线综合的基本思想。相比较,线 c 很好地解决了上述问题,在等高线综合上的效果要优于 DP 算法。利用本文提出的方法进行化简后的等高线如图 9(c) 所示。

表 1 两种算法对不同比例尺图幅上等高线要素化简消耗时间比较
Tab. 1 Time that is spent in simplifying the contour elements on map sheets of different scales by the two algorithms 单位:ms

比例尺	Douglas-Peucker 算法	本文算法
1 : 50 000	695	5 836
1 : 250 000	2 983	49 867

由表 1 可以看出,在不同比例尺的图幅上,两种算法采用相同的点压缩比的情况下,DP 算法的化简时间基本保持稳定,本文算法由于在删除弯曲单元的过程中需要计算每个弯曲单元的面积以及在化简的过程中要进行自相交的调整控制,从而影响了化简的速度,而且随着数据量的增大,其化简时间相对于 DP 算法要长。但单纯从化简效率上很难确定哪种算法更适合等高线的综合,同时应该考虑化简的效果、形态保持及等高线的综合规则等。

本文通过对等高线的特点和制图综合的相关规范进行深入研究,指出等高线化简区域的合理划分和基于曲线弯曲的嵌套分析是该方法对等高线进行有效综合的关键所在。现有的其他等高线化简算法,如 DP 算法,虽然有较好的压缩效果和效率,但却难以合理解决自相交及手工综合规则的运用等问

题。本方法从嵌套层次关系入手,很好地解决了自相交问题,而且利用通视性原理对等高线化简区域进行划分,也较好地兼顾到等高线的特点,试验结果表明,本文方法在单根等高线的化简中的应用是正确和有效的。但由于等高线通常是以成组的方式表达地形的,等高线的综合也通常希望以成组的方式进行,由于本文方法从理论上还没有完全解决等高线之间的相交和套合问题,还有待深入研究。

参考文献 (References)

1 Wang Jia-yao, Wu Fang. Theory and Method of Digital Map Automated Cartographic Generalization [M]. Beijin: PLA Press, 1998: 66-84. [王家耀,武芳. 数字地图自动制图综合原理与方法[M]. 北京: 解放军出版社,1998: 66-84.]

2 Zhang Lin-lin. Study on Automated Relief Generalization by Structural Method [D]. Zhengzhou: Institute of Surveying and Mapping, Information Engineering University,2005. [张琳琳. 地貌自动综合的结构化方法研究[D]. 郑州:解放军信息工程大学测绘学院, 2005.]

3 Tedeusz Chrobak. A numerical method for generalizing the linear elements of large-scale maps, based on the example of rivers [J]. Chartographica,2000,37(1): 49-55.

4 Wang yan-min. Feature point selecting of vector curve [J]. Engineering of Surveying and Mapping,2002, 11(2): 8-10. [王晏民. 矢量曲线的特征点提取[J]. 测绘工程,2002,11(2): 8-10.]

5 Huang Pei-zhi. Vector data compression with prediction function [J]. Journal of Surveying and Mapping, 1995, 24(4): 316-320. [黄培之. 具有预测功能的曲线矢量数据压缩方法[J]. 测绘学报, 1995,24(4): 316-320.]

6 Battenfield B P. Scale-dependence and self-similarity in lines [J]. Cartographica,1989,26(1): 79-100.

7 Liu Xu-hong, Liu Yu-shu, Zhang Guo-ying. Visibility analysis using running maximum elevation angle interpolation [J]. Journal of Computer-aided Design & Computer Graphics, 2005, 17(5): 971-975. [刘旭红,刘玉树,张国英. 利用最大仰角插值技术的通视性分析算法研究[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2005, 17(5):971-975.]

8 Zhang Qing-nian, Liao Ke. Line generalization based on structure analysis [J]. The Publishing House of Zhongshan University,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, 2001,40(5):118-121.]

9 Guo Qing-sheng. A progressive line simplification algorithm [J]. The Publishing House of Wuhan Techincal University of Surveying and Mapping, 1998,23(1):52-56. [郭庆胜. 线状要素图形综合的渐进方法研究[J]. 武汉测绘科技大学学报, 1998, 23(1): 52-56.]

10 Ying Shen. Research on Consistent Line Simplification and Line Intersection [D]. Wuhan: Wuhan University, 2002. [应申. 曲线的一致性化简及曲线相交的研究[D]. 武汉:武汉大学, 2002.]