

# 等高线的空间关系规则和渐进式图形简化方法<sup>\*</sup>

郭庆胜 毋河海 李沛川

(武汉测绘科技大学土地科学学院,武汉市珞喻路129号,430079)

**摘要** 详细讨论了等高线表达地形的规则和以此为基础自动建立等高线关系的方法,对地形特征点、线的提取改进了已有较成熟的方法,建立了一套实用的等高线图形简化的渐进式方法,并对其特殊情况的处理提出了具体的算法。这种方法把不同比例尺跨度的等高线图形综合融为一体,易于实现,等高线图形简化时的等高线相交可在综合过程中控制。

**关键词** 等高线;图形简化;地形特征;渐进式地图综合

**分类号** P283.1;P283.7;P208

等高线以成组的方式表达地形,等高线的综合通常希望以成组的方式进行,其目的在于有效地表达地貌特征。但是等高线本身是以离散的方式表达连续的地形表面,过分要求地形特征线的完整性有时是不现实的。地图的比例尺通常是突变的,当地图的比例尺从大到小发生突变时,等高线表达地形时的等高距更大,离散程度更大。当比例尺小到一定程度时,等高线只能以“造型”的方式表达地形。目前,有关文献主要用结构化的方法来解决这一问题。本文试图用“渐变”来获取“突变”的结果,并在渐进式地图综合过程中充分考虑等高线所反映的地形特征。该方法是线状要素的渐进式图形简化方法的拓展。这种思想在GIS的空间信息可视化中也是很有意义的,因为空间信息可视化时的比例尺是任意的,同时其显示的地理区域是不定的。

## 1 等高线表达的地形特征的特殊性

### 1.1 地形特征线的非完整性

通常认为,在结构化地貌综合中需建立谷底线和山脊线的网络,客观世界的地形就是如此。但等高线是以离散方式表示地形,成组的等高线图形的固有结构特征就表明了地形特征线的非完整性,如与其他谷底线无任何联系的独立的谷底线具有非完整性。等高线简化时需要考虑一组,因为一组才能表达某一种地貌。但并非处处如此,等高线图形简化时因地形平坦也无需考虑等

高线的关系,此时的地形特征线具有一种不完整性。据此,在等高线图形简化中就没有必要建立完整的区域性地形特征线网络结构。

### 1.2 谷底和山脊的复合性

一条线的弯曲往往会出现嵌套性,一条等高线也是如此。对于一组等高线而言,就会出现谷底或山脊的嵌套性,算法同线状要素图形的弯曲嵌套相类似,只是此处需要把特征点同特征线联系起来,同时确定特征点和特征线的重要程度,所形成的复合性谷底和山脊在地图综合过程中必须作为一个整体看待。

## 2 等高线(链)的方向调整及其空间关系的建立

在建立等高线的空间关系之前,所有等高线已经含有其高程值,但还必须有读图时所需的示坡线和高程点。在建立等高线空间关系的过程中,有两个假设:①等高线在图幅内不间断,为了满足此条件,可把间断等高线用不绘线连接起来,保证其连续性,或者找出使等高线间断的面,这种面可能是湖泊、水库、道路等,然后把图幅看成是由外图廓和多个内环组成,有时还需要把一幅图看成是几幅图。例如,一幅图是由多个岛屿组成时,只需要把图廓看成是一个任意多边形则可。②当一个区域的等高线被多边形剪裁时,认为同高、相邻、不封闭的等高线组可封闭。

收稿日期:1999-07-02.

<sup>\*</sup> 国家测绘局测绘科技发展基金及教育部霍英东青年教师基金资助项目,编号97010。

## 2.1 等高线描述地形时的规则

等高线描述地形时必须遵循一些规则,主要分为两类:等高线所固有的数学特征和等高线描述地形时的制图规则,正是这些规则才使等高线的空间关系能自动建立。

等高线所固有的数学特征的规则(其中 $\Delta H$ 是一个微量)为:

规则 1 理论上任何一条等高线必定自封闭。

规则 2 若等高线以逆时针方向存储,高程为 $H$ ,其位于高程为 $H - \Delta H$ 的等高线的封闭区域中,那么等高线左邻域的高程比等高线的高程高,右邻域的高程比等高线的高程低。

规则 3 若等高线以逆时针方向存储,高程为 $H$ ,其位于高程为 $H + \Delta H$ 的等高线的封闭区域中,那么等高线左邻域的高程比等高线的高程低,右邻域的高程比等高线的高程高。

规则 4 若等高线高程为 $H$ ,高程为 $H + \Delta H$ 、 $H - \Delta H$ 、 $H$ 的等高线都位于它的封闭区域中,那么判断等高线的左(右)邻域的高程时,取其中相邻的高程为 $H + \Delta H$ 或 $H - \Delta H$ 的等高线,利用规则 2 或 3。

关于等高线描述地形时的制图规则为:

规则 5 示坡线所示的方向和高程点是判断等高线的左(右)邻域的高程的肯定依据。因为等高线以离散的方式表达地形,等高线的左(右)邻域的高程关系有时无法确定。在调整等高线的方向时必须首先处理此等高线。

规则 6 等高线因为分幅等原因,出现开曲线式等高线,若高程为 $H$ 的开曲线式等高线有 $N$ 段,其和图幅边线可构造封闭多边形,封闭多边形内不会有高程为 $H$ 的开曲线式等高线,以虚拟等高线的自封闭性。

规则 7 若高程为 $H$ 的等高线构造的封闭多边形中无任何其他高程的等高线,该封闭多边形为“伪封闭多边形”,可利用其他制图规则。

规则 8 若高程为 $H$ 的等高线构造的封闭多边形中只有高程为 $H + \Delta H$ 或 $H - \Delta H$ 的等高线,那么判断等高线的左(右)邻域的高程时,利用规则 2 或 3。

规则 9 若高程为 $H$ 的等高线构造的封闭多边形中只有高程为 $H$ 的自封闭等高线,那么该封闭多边形为“伪封闭多边形”,先利用规则 5 判断自封闭等高线的左(右)邻域的高程,若无法处理,就利用其他相邻封闭多边形判断开曲线式等高线的左(右)邻域的高程。

规则 10 若高程为 $H$ 的等高线构造的封闭多

边形中有高程为 $H + \Delta H$ 、 $H - \Delta H$ 的等高线和高程为 $H$ 的闭曲线式等高线,判断等高线的左(右)邻域的高程时,利用规则 4。

规则 11 若高程为 $H$ 的等高线构造的封闭多边形中的高程为 $H + \Delta H$ 、 $H - \Delta H$ 的等高线都在高程为 $H$ 的自封闭等高线内,那么该封闭多边形为“伪封闭多边形”,先判断自封闭等高线的左(右)邻域的高程,再利用其他相邻封闭多边形判断开曲线式等高线的左(右)邻域的高程。

规则 12 在非伪封闭多边形已全部处理后,规则 7 中的开曲线式等高线若全部未判断左(右)邻域的高程,则检验此伪封闭多边形位于高程为 $H + \Delta H$ 、 $H - \Delta H$ 或 $H$ 的哪一种等高线多边形中,分别利用规则 2、3、13。

规则 13 在非伪封闭多边形已全部处理后,且规则 1~11 都不适用,若高程为 $H$ 的等高线构造的封闭多边形中只有高程为 $H$ 的等高线,则被包围的高程为 $H$ 的等高线的左(右)邻域的高程依外围等高线而定。设等高线以逆时针方向组织,若外围等高线的左邻域的高程比右邻域的高程高,则被包围的等高线的左邻域的高程比右邻域的高程低;若外围等高线的左邻域的高程比右邻域的高程低,则被包围的等高线的左邻域的高程比右邻域的高程高。

## 2.2 等高线方向调整与空间关系的建立

为了建立等高线间的层次结构,必须先知道哪些等高线按逆时针方向构成了一个环。数字化后的等高线数据中,等高线的方向是不一致的,必须作进一步调整,可根据规则确定“伪封闭多边形”,并调整等高线按逆时针方向构成,保证其“左高右低”。该算法见文献[1],本文只是建立了更完整的规则体系。

等高线是以成组方式描述地形的,等高线之间的关系是层次结构关系。在理想状态下,等高线的关系有两种:包含关系和并列关系。在等高线的层次结构表中存储了等高线的所有层次结构关系。层次结构表有 3 种:①封闭多边形号;等高线有序集合。②等高线关键字;封闭多边形号(关系代号,等高线关键字);…。③等高线关键字;左相邻的等高线集合;右相邻的等高线集合;…。第二种形式描述了等高线的树结构。

## 3 部分地形特征的提取

地形特征的提取方法有很多,本文是利用它局部控制等高线的渐进式图形简化,只是获取图

形简化所需的局部地形特征,获取方法相对简单,可以修正 Kweon (1994)提出的方法<sup>[2]</sup>,这是一种基于等高线地图的地形特征获取方法,地形特征是山头、洼地、山脊线和谷底线等。从等高线树的枝头上就可以根据其高程值判断该封闭曲线表示的是山头或洼地,当两条并列且相邻的等高线被另一条相邻的等高线包含时,该两条等高线之间就有一个鞍部。

河流是必然的谷底线,其与等高线的交点是必然的地形特征点。对于凸封闭等高线,在本算法中没有提取地形特征点,如图 1(a)所示。

探索地形特征线时改变其距离阈值,就可以获取局部地形特征线。通常情况下只需要其长度等于图形综合精度的 3 倍即可,其原因是:若弯曲的高度超过了规定精度的 3 倍,且此弯曲面积又小,此弯曲在渐进式图形简化过程中不会被删除,通常情况下,夸大此峡谷。若一旦删除就可能同相邻等高线相交。图 1(a)中就只有明显关联的局部地形特征线。地形特征线的数据组织方式为:

表结构 A——特征线编号,谷地(0)、河流目标号或山脊线(-1),特征线重要程度,等高线目标号(特征点号、等高线目标号)序列,删除标志。

表结构 B——等高线目标号,特征点号,特征点删除标志,特征点重要程度,关联的特征线编号或无关联的特征线(-1)。

## 4 等高线图形简化的渐进式方法

### 4.1 基本方法

线状要素图形简化的渐进式方法是线性的,其基本思想是利用渐变来获取突变的结果,等高线的渐进式图形简化需作进一步改进,因为必须考虑等高线之间的空间关系,特别是等高线之间相交的控

制。等高线的渐进式图形简化的基本思想是:首先依据已调整的等高线的方向确定等高线的弯曲是谷底还是山脊,并获取等高线弯曲的嵌套系数和特征点的重要程度<sup>[3]</sup>;然后根据特征点的重要程度和弯曲的大小渐进式简化等高线图形。

等高线图形渐进式简化的方法如下:

1)凸自封闭的等高线按封闭式线状要素图形简化的渐进式方法处理<sup>[4]</sup>。

2)先处理有特征点但无地形特征线关联的等高线弯曲,通常这种地区相对平坦,或地形特征不明显,处理方法同线状要素图形简化的渐进式方法<sup>[4]</sup>类似,按地形特征点的重要程度依次处理。根据地图制图规则,在删除小于阈值的弯曲时,当最小的谷底弯曲和山脊弯曲的大小差别不大时,以删除谷底为主。处理过程中,在表结构中对已删除的特征点加上删除标志,然后,采用同样方法,局部建立或调整地形特征线<sup>[2]</sup>。

3)处理同地形特征线相关联的弯曲,地形特征点和特征线有重要程度之分<sup>[3]</sup>。在渐进式等高线图形简化过程中,依据地形特征线的重要程度从低到高逐步处理,重要程度一样时,先谷底特征线,后山脊特征线。先寻找与特征线关联弯曲的平均面积最小的谷底线,若小于阈值,则删除该特征线及相关等高线上的关联弯曲,并重新计算此局部的特征点,特征点的编号依次递增,并按同样条件调整特征线<sup>[2]</sup>,该线就是合并后的山脊线。当多个相邻的谷底线(等高线的相邻弯曲)重要程度一样,且谷底线所关联的等高线弯曲的平均面积相差很小时,先删除中间的谷底线,以免此局部谷底线全部删除。依此循环,直至无符合条件的山谷线。然后按同样方法处理山脊线。图 1(b)是图 1(a)的等高线渐进式图形简化的结果。

### 4.2 特殊情况的处理

按上面所述的渐进式方法处理后,就需要检查奇异性弯曲和地形特征线:①弯曲大小小于阈值但未被删除,因其所在地形特征线上的其他弯曲的面积都比较大;②弯曲所在特征线的几何特征无法用现有特征点串近似描述,这是因为等高线选取的缘故,在本试验图中未出现;③因弯曲的删除可能会产生等高线的相交,此时需作移位处理,如图 2 所

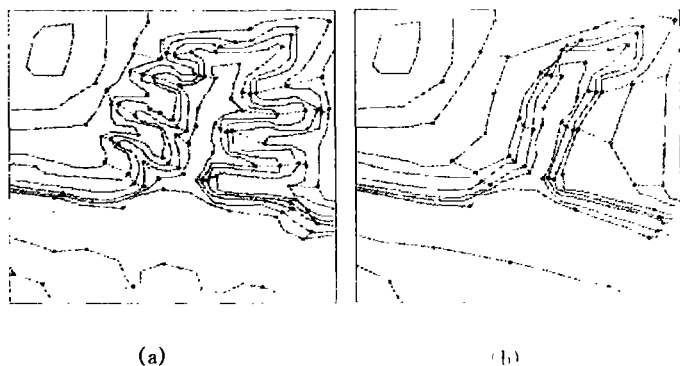


图 1 地形特征提取与等高线的渐进式图形简化示意图  
Fig. 1 Map on Extracting Topographic Characteristics and Progressive Graphic Simplification of Contour

示,虚线框是已处理的区域,其处理方法同线状要素图形简化的渐进式方法中的“移位”方法一样<sup>[4]</sup>。



图2 特殊情况的处理  
Fig.2 Handling of Special Case

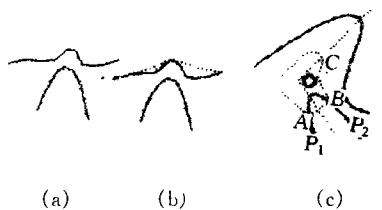


图3 等高线的塑形  
Fig.3 Contour's Modeling

1)若该弯曲的特征点重要性一般,则删除,但不能使特征线上相邻的特征点位于该弯曲内,若是,可以采用夸大方式,对于弯曲特征点很重要的

情况就只能采用夸大方式,如图3(a)、3(b)所示。

2)如图3(c)所示,因等高线的选取使得两弯曲的走向同原有方向相差较远,此种情况常出现在小比例尺地形图的谷底上,可选高程小的一个弯曲,依综合要求计算出AB,AB同特征线垂直,其长度为综合精度的2~3倍,然后以AB为宽沿特征线绘制平行线,至C点,OC为综合精度的2~3倍,重新构造一个弯曲 $P_1ACBP_2$ 。

本文方法把不同比例尺跨度的等高线图形融为一体,易于实现,等高线图形简化时的等高线相交可在综合过程中进行控制。对于非等高线表示的地形综合有待按此思想作进一步研究。

参 考 文 献

- 1 郭庆胜.建立等高线层次结构的智能化途径.武汉测绘科技大学学报,1995,20(增刊2):69~75
- 2 Kweon I S. Extracting Topographic Terrain Features from Elevation Maps. CVGIP: Image Understanding, 1994(2):171~182
- 3 郭庆胜.地图自动综合新理论与方法的研究:[学位论文].武汉:武汉测绘科技大学,1998
- 4 郭庆胜.线状要素图形综合的渐进方法研究.武汉测绘科技大学学报,1998,23(1):52~56

郭庆胜,男,34岁,教授。现主要从事地图学与GIS研究。代表成果:多媒体电子地图智能设计系统等。

## Spatial Relation Rules and Progressive Graphic Simplification of Contours

GUO Qingsheng WU Hehai LI Peichuan

(School of Land Science, WTUSM, 129 Luoyu Road, Wuhan, China, 430079)

**Abstract** Contour lines are a discrete representation of relief, but topographic surface is a continuous surface. Contours must be used to represent relief according to some rules. In this paper, two kinds of rules are shown. One is mathematical rule, the other is cartographic rule. With respect to these rules, the relationship between contour lines can be found. The direction of contour can be adjusted automatically. After that, the elevation of left part of contour line is higher than that of right part. The contour tree structure is saved in certain table.

The topographic terrain represented by contour lines is not complete. Based on the spatial relationships and the characteristic points of contour lines, the ridge lines and ravine lines can be linked partly. The rivers must be the ravine lines. The intersection between contours and rivers are the characteristic points. The important degrees of characteristic points are given according to complex degree of bends in contour lines. The important degrees of the ridge lines and ravine lines are given according to the important degrees of characteristic points associated with that. This information is stored in two structure tables.

(下转第93页)

变监测的数据分析及数据处理中的有关算法等。在理论研究的基础上,研制出一整套高精度GPS网平差处理与分析的软件系统,并应用于国家高精度GPS网的整体平差与结果分析。主要内容为:

1) 提出了基于相关分析的可靠性理论,以可靠性矩阵的列向量  $F_i = [r_{1i} \ r_{2i} \ \dots \ r_{mi}]^T$  的模作为平差系统可靠性分析的指标。研究了残差向量  $V$  与粗差观测量对应的向量  $F_i$  之间的强相关关系,并建立了通过  $F_i$  与  $V$  的相关分析方法进行粗差探测的理论,提出了一整套基于相关分析的粗差探测方法,及调整粗差观测量方差的相关稳健估计处理方法。这一理论对相关观测量的多粗差定位与消除、粗差间的可区分性判别具有明显的优点。

2) 提出了GPS网整体平差时合理划分子网、引入附加系统误差参数的整体平差模型和算法。解决了大规模、高精度GPS网中存在的不同位置基准、尺度基准、方位基准和时变基准的系统误差问题。

3) 提出了观测量随机模型的误差分析方法,将观测量误差的先验随机模型的误差划分为系统误差、粗差和偶然误差影响。并研究了观测量随机模型的系统误差对平差结果的影响和消除方法,提出了高精度GPS网平

差处理中随机模型的建立方法。

4) 研究了图论在GPS数据处理中的应用,提出了最简基本回路这一新的数学概念和算法,从理论和实践上解决了GPS网闭合环自动构成问题。

5) 研究了大规模、高精度GPS网数据处理中基准的使用、统一和转换方法。

6) 从理论上证明了等价观测量的可靠性矩阵的等价性。

7) 提出了GPS网数据处理中设计矩阵的高效压缩存储方法,使存储空间节约了  $4.5 \times n$  倍;并提出了与之相应的多维二次型  $A^T P A$  的压缩快速算法,消除了多余运算,成倍地提高了运算速度。

8) 在理论研究的基础上,独立地研制了一整套具有自主知识产权的大规模、高精度GPS平差与数据分析的软件系统。与国外先进的同类软件相比,该软件系统具有数学模型严密、丰富,算法先进、自动化程度高,系统误差分析和粗差分析功能强等特点。在我国“国家A级和B级GPS网”的整体平差及多个大规模GPS网的数据分析中,发挥了重要的作用。

9) 本文对国家GPS网的观测量进行了分析,根据其观测时间跨度大、覆盖面积广、数据量巨大、结构复杂、

精度分析不均等特点,研究了全网整体平差的方案和基本策略。国家高精度GPS网整体平差中,根据一定的原则将全国网划分为若干个子网,并在整体平差中加入系统误差参数,消除了国家高精度GPS网内所包含的系统误差。同时通过子网的无约束平差,调整子网的方差分量因子,消除各子网随机特性的系统误差。国家高精度GPS网粗差处理的特点是观测量相关、粗差含量多、总体数据量巨大。对此,本文提出了基于相关分析方法,通过对各子网的粗差分析,消除子网内部的粗差;通过对相邻子网的粗差分析,消除子网之间的粗差影响的处理策略。国家GPS网经过粗差处理后,大大提高了各子网和全国网整体平差精度。

10) 研究了高精度GPS形变监测网的分析方法,包括形变分析基准的选取和统一方法,形变量的计算和统计检验等,在此基础上对我国所建立的一些高精度地壳形变监测网进行了初步分析。

**关键词:** GPS数据分析;粗差分析;系统误差分析;形变分析;GPS网平差;国家高精度GPS A B级网。

**答辩地点:** 武汉测绘科技大学

**取得学位时间:** 1999年6月

(上接第34页)

The basic idea of progressive graphic simplification of contour lines is that the result of sudden change can be got from the progressive change. The self-closed contour can be handled by using the same method of self-closed linear feature progressive generalization. In generalization of other contours, firstly, the characteristic points, which are not associated with ridge and ravine, are handled progressively; the minimal bend is deleted with respect to the area of bend and important degree of the characteristic point. Then bends associated with ridges and ravines are handled according to important degree of the characteristic points and lines from small important degree to large important degree. The special cases in this method are shown and the algorithms of resolving these problems are given.

**Key words** contour line; graphic simplification; topographic terrain feature; progressive map generalization