中国人民解放军信息工程大学

硕士学位论文

地性线提取及DEM数据格式转换方法研究

姓名：尹亚娟

申请学位级别：硕士

专业：摄影测量与遥感

指导教师：秦志远

20070401

摘 要

随着地理信息系统的不断发展，数字高程模型作为地理信息系统的一种基础数据，在地学领域发挥着越来越重要的作用，已完全成为地理信息系统的重要组成部分。数字高程模型的质量是决定其使用价值的首要因素，而地性线自动提取及 DEM 数据格式转换是该领域中值得研究的问题。论文的主要工作包括：

1、本文全面系统地论述了基于地形特征建立各种高质量 DEM 模型的理论和方法，分析了 DEM 研究的主要问题及发展现状，提出了地性线提取和矢量数据转换是当前研究与应用的主要方面，明确了本文的研究范围和基本思路。

2、借鉴制图综合的理论基础，提出了采用曲线弯曲原理和分析方法对等高线数据进行地性线自动提取的方法，详细阐述了按拐点分割等高线、分段提取特征点、按属性连接地性线的实现过程。

3、针对提高建模效率和改进建模精度等问题，研究了基于不同矢量数据建立高质量 DEM 模型的方法，包括基于离散点构建不规则三角网的常用算法、顾及地形特征约束条件下不规则三角网 TIN 的建模方法和改进措施、基于等高线数据构建不规则三角网的算法实现。

4、研究了基于各种数据源建立规则格网 DEM 的理论和方法，详细分析并实现了从不规则三角网 TIN 到规则格网 DEM 转换的改进算法——磨光函数内插算法。

5、研究了基于不规则三角网 DEM 和规则格网 DEM 数据进行等高线的自动追踪算法，根据这两种数据存储格式的拓扑关系，提出了同时适用于两种数据结构追踪等高线的通用算法等。

最后，对本文的研究成果和有待进一步研究和解决的问题进行了总结。

关键词：地理信息系统，数字高程模型，不规则三角网，地性线自动提取，曲线弯曲，地形建模

Abstract

With the developments of Geographic Information System, Digital Elevation Model, as a kind of base data of Geographic Information System, plays more and more important role in the geoscience area, and it has already become an important component of the Geographic Information System. The quality of Digital Elevation Model is the priority factor in determining use value. At the same time, extracting terrain character lines automatically and exchange of data format are worthy to research. In this paper, the main works include:

Firstly, the author discusses the theories and methods on constructing high quality Digital Elevation Model based on terrain feature from digital contour line. The main problems and current research of DEM are analyzed, extracting terrain character lines automatically and exchange of data format are the main directions in current research and application, which vital theory and methods based on are the base of this thesis.

Secondly, on the basis of referencing the theories on cartographic generalization, the author makes the study and experiment on automatic extraction of terrain character lines from digital contour by using principle and method of curve. The implementation process explained in detail include segmentattion of contour lines by inflection point, extraction of character points segment-by-segment,link terrain character lines by attribute.

Thirdly, in order to improving modeling efficiency and model accuracy, the author studies the method on constructing high quality Digital Elevation Model based on different vector data, involve common algorithms of constructing TIN based on irregular discrete points,modeling method and improving measures on constructing constraint D-TIN considering the terrain character, algorithms of constructing TIN based on contourlines.

Nextly, theory and methods on constructing Regular Grids based on Various data sources are researched, and the interpolation algorithm - Smoothing Function interpolation arithmetic of interpolating Regular Grid DEM from Triangulated Irregular Network is improved.

Finally, Universal algorithm of tracing contour line automatically from Triangular Irregular Network and Regular Grids are researched. According to the similar topological relations of the two kinds of data storage format, universal algorithm is point out to tract contourlines from these two data Format.

At last, the paper summarizes research productions and development direction.

Key Words : Geographic Information System(GIS), Digital Elevation Model (DEM), Triangulated Irregular Network (TIN), extracting terrain character lines automatically, curve, Terrain Model

原创性声明

本人声明所提交的学位论文是本人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。尽我所知，除了文中特别加以标注和致谢的地方外，论文中不包含其他人已经发表和撰写过的研究成果，也不包含为获得信息工程大学或其他教育机构的学位或证书而使用过的材料。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示谢意。

学位论文题目：地性线提取及DEM数据格式转换方法研究

学位论文作者签名：尹玉娟　日期：07年4月20日

作者指导教师签名：秦志远　日期：07年4月20日

学位论文版权使用授权书

本人完全了解信息工程大学有关保留、使用学位论文的规定。本人授权信息工程大学可以保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子文档，允许论文被查阅和借阅；可以将学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存、汇编学位论文。

（保密学位论文在解密后适用本授权书。）

学位论文题目：地性线提取及DEM数据格式转换方法研究

学位论文作者签名：尹玉娟　日期：07年4月20日

作者指导教师签名：秦志远　日期：07年4月20日

第一章 绪论

1.1 引言

地理信息系统（Geographic Information System，GIS）是在计算机软、硬件支持下，对空间信息进行管理、分析、表示和应用的技术系统或系统实体[1]。GIS 能够提供丰富的地理信息，同时具有大量的基于地理信息的分析功能，为决策提供信息服务。作为信息科学和信息产业的重要组成部分，地理信息系统的研究和应用受到了各行各业的普遍重视。如今 GIS 已广泛应用于资源调查、环境评估、区域发展规划、公共设施管理、交通安全等领域。

数字高程模型（Digital Elevation Model，缩写为 DEM）是通过有限的地形高程数据实现对地形曲面的数字化模拟或是地形表面形态的数字化表示的量化模型[2]。与传统地形图比较，DEM 作为地表信息的一种数字表达有着无可比拟的优越性。首先，它可以直接输入计算机，供各种计算机辅助设计系统利用；其次，DEM 可运用多层数据结构存贮丰富的信息，包括地形图无法容纳与表达的垂直分布地物信息，以适应国民经济各方面的需求；此外，由于 DEM 存贮的信息是数字形式的，便于修改、更新、复制及管理，也可以方便地转换成其它形式的地表资料文件及产品。随着计算机技术的迅猛发展和 GIS 理论的逐步完善，DEM 在 GIS 中得到了广泛应用，它是地理信息系统地理数据库中最为重要的空间地理信息和赖以进行地形分析的核心数据，更是工程建设、军事指挥、战场环境仿真、决策支持等各种系统中最为重要的底层数据，DEM 已成为地理信息系统的一个重要的组成部分。显然，DEM 的质量好坏直接决定着其它导出元素的精确性[3]。

数字高程模型是多学科交叉与渗透的高科技产物，已在测绘、资源与环境、灾害防治、国防等与地形分析有关的各个领域发挥着越来越大的作用。在测绘中可用于绘制等高线、坡度图、坡向图、立体透视图、立体景观图，并应用于制作正射影像图、立体匹配片、立体地形模型及地图的修测。在各种工程中可用于体积和面积的计算、各种剖面图的绘制及线路的设计。军事上可用于导航(包括导弹及飞机的导航)、通讯、作战任务的计划等。在遥感中可作为分类的辅助数据。在环境与规划中可用于土地现状的分析、各种规划及洪水险情预报等。近年来，随着空间数据基础设施的建设和“数字地球（Digital Earth）”战略的实施，更加快了 DEM 与地理信息系统、遥感等的一体化进程，为 DEM 的应用开辟了更广阔的天地[1]。

1.2 DEM 概述

1.2.1 DEM 的含义

数字地面模型（Digital Terrain Model，简称 DTM）是地形表面形态等多种信息的一个数字表达，是带有空间位置特征和地形属性特征的数字描述，即使用采样数据来表达地形

表面。DTM 本质上是描述地球表面形态多种信息空间分布的有序数值阵列，它可以用二维函数系列取值的有序集合来表示：

$$K_p = f_k(u_p, v_p), \quad (k = 1,2,3,\cdots,m; p = 1,2,3,\cdots,n) \tag{1-1}$$

其中，K_p 为第 p 个地面点上的第 k 类地面特性信息的取值，u_p、v_p 为第 p 个地面点的二维坐标，m（m 大于等于 1）为地面特性信息类型的数目，n 为地面点的个数。

当 $m=1$ 且 f_1 为对地面高程的映射时，式(1-1)表达的数字地面模型，即为所谓的数字高程模型。显然，DEM 是 DTM 的一个子集。实际上，DEM 是 DTM 中最基本的部分，它是对地球表面地形地貌的一种离散的数字表达，也是测绘学中最常用的地形表示模型。

从数学上，数字高程模型是表示区域 D 上的三维向量有限序列，用函数的形式描述为：

$$V_i = (X_i, Y_i, Z_i) \quad (i = 1,2,3,\cdots,n) \tag{1-2}$$

其中，(X_i, Y_i) 是平面坐标，Z_i 是 (X_i, Y_i) 对应的高程。当该序列中各平面向量的平面位置呈规则格网排列时，其平面坐标可省略，此时 DEM 就简化为一维向量序列 $\{Z_i, i = 1,2,3,\cdots,n\}$[1]。

1.2.2 DEM 的表示模型及其特点

随着对 DEM 需求的不断增加，使人们对 DEM 数据的多样性、实用性及其精度提出了更高的要求。

由于数字高程模型的数据来源不同，导致了数据存储结构的差别。主要的 DEM 数据结构表示模型包括：离散点数据结构、规则格网数据结构、等高线数据结构和不规则三角网数据结构等等[4]。

1、不规则离散点数据结构

由不规则离散点表示的 DEM 是将连续地球表面形态离散成在某一个区域 D 上的以 X_i、Y_i、Z_i 三维坐标形式存储的高程点 $Z_i((X_i, Y_i)\ ID)$ 的集合。离散点 DEM 往往是通过测量直接获取的地球表面的原始特征点数据。这些特征点之间相互独立，彼此间没有任何联系。它是数字高程模型中最简单的数据组织形式。

2、规则格网（Regular Grids，RGs）数据结构

规则格网 DEM 数据在水平方向和垂直方向按等间隔方式记录格网点的坐标，格网点的高程 Z 表示地形，格网点的平面坐标隐含在行列号中，故适宜用矩阵形式进行存贮，即按行（或列）逐一记录每一个格网单元的高程值。

这种高程矩阵存储量最小（还可以进行压缩存储），非常便于管理使用，且易于用计算机进行计算处理。这使得它成为目前运用最广泛的一种 DEM 数据格式形式。尽管规则格网 DEM 在计算和应用方面有许多优点，但也存在许多难以克服的缺陷。比如：在地形平坦的地方，存在大量的数据冗余；在不改变格网大小的情况下，不能准确表示地形的结构和表达复杂地形的突变现象等等。通常，为了压缩栅格 DEM 的冗余数据，可采取用游程编码或四叉树编码方法对数据进行处理；为准确表示地形细部，可采用附加地形特征数

据以描述地形结构。

3、等高线数据结构

等高线是通过对地球表面的水平切割而产生的连续曲线。等高线通常被存成一个有序的坐标点对序列，可以认为是一条带有高程值属性的简单多边形或多边形弧段。等高线是地形表达最为常用的形式，能较为直观科学地反映地面高程、山体、坡度、坡形、山脉走向等基本的地貌形态及其变化。但是利用等高线重新构建地表模型时，只能近似地表示真实的地球表面，在水平切割过程中丢失的详细地表信息是不可能从等高线中恢复的。另一方面，单条等高线无法直接反映地貌形态，必须通过等高线组间接地表示地貌形态。

4、不规则三角网（Triangular Irregular Network，缩写为 TIN）数据结构

为克服规则格网的缺点，采用附加地形特征数据（如山脊线、山谷线、断裂线等和地形特征点等）的方法，按一定的规则将离散点连接成覆盖整个区域且互不重叠、结构最佳的三角形，从而构成完整的 DEM，这就是不规则三角网 DEM。TIN 克服了高程矩阵中冗余数据的问题，其最主要的优点就是具有可变的分辨率，可根据不同地形，选取合适的采样点数；另外，TIN 还具有考虑重要表面数据点的能力，能利用地貌的特征点线，较好地表示复杂地形。许多年来，它一直是人们的研究热点。但其缺点是数据结构复杂，构成 TIN 算法复杂，计算时间长，大区域的 TIN 的管理十分困难。

离散点、规则格网、等高线、不规则三角网四种数字高程模型的数据结构，因为数据来源不同，采用不同的数据存储结构，导致了存储空间大小、空间关系描述、计算任意一点所需时间的差异。对较大区域范围的地形数据进行存储分析操作时这些差异比较明显。比如，与其它数据结构相比，由规则格网数据结构存储的 DEM，可以利用镶嵌技术将小范围数据合并为大范围 DEM 数据，极大地提高存储分析的效率[53]。因此，在实际研究与应用中，根据区域的研究目的和大小，需要对数据存储的结构格式进行转换，以达到最优化的存储和快速查询与编辑。

1.3 DEM 研究的主要问题及发展现状

从 20 世纪 60 年代开始，数字高程模型就成为测绘学科的一个重要分支，对 DEM 的研究主要包括：地形数据采样、地形建模与内插、数据组织与管理、地形分析与地学应用、DEM 可视化、不确定性分析和表达等。其中，高度逼真、多尺度地形建模技术和快速高效的内插算法是数字高程模型研究永恒的主题[2]。

国内外关于 DEM 建模方法的研究从 60 年代延续至今，主要围绕两个方面展开：一是如何提高建模算法的效率；二是如何改进模型表示地形的逼真度与精度。提高算法效率的基本方法是提高建模过程中的查询效率，如采取数据分块方法。如何改进模型表示地形的逼真度与精度仍是目前 DEM 建模的重要研究内容。一般而言，格网分辨率越高，描述的地形越逼真，但相应的数据量也会大大增加，对于要满足实时计算、显示等要求，显然用高分辨率的格网“逼近”地形表面这种方法具有一定局限性。另一种有效的方法是在 DEM 内插中加入地形特征信息，来提高 DEM 的精度和逼真度。这种方法比较有效，但到目前

为止，地形特征的自动提取一直是一项研究难题。GIS 对地形的表达采用了矢量等高线、栅格 DEM 和不规则三角网 TIN 三种模型，在三种表达方式中地形结构特征均为隐含的，需要特定的提取算法。从规则格网、TIN 和等高线提取地形特征，是当前研究与应用的主要方面[5][6]。

1.4 本文的研究内容

本文主要研究以下内容:

（1）由数字化等高线数据自动提取地性线

本文拟采用曲线弯曲分析的原理和方法对地性线的自动提取问题进行研究和探讨。

（2） 顾及地形特征的数字高程模型的构建。

针对提高建模算法的效率和改进模型精度的问题，研究了顾及地形特征约束条件下不规则三角网 TIN 的建模方法和改进措施。

（3）不规则三角网 TIN 到规则格网 DEM 的转换

研究由 TIN 生成格网 DEM 数据的线性内插和磨光函数内插算法。

（4）矢量等高线数据的自动追踪

研究由不规则三角网 TIN 和规则格网 DEM 快速追踪矢量等高线数据的通用方法。

第二章　基于矢量等高线数据的地性线自动提取

地性线是地貌形态的骨架线，是描述地貌形态时的控制线，主要包括山脊线、山谷线，是地面最重要且最有用的信息[7]。地性线在水文分析、污染扩散分析、矿物质分布分析、土壤侵蚀分析、高质量 DEM 生成、制图综合、遥感数字图像处理及解析地貌等方面均有着十分重要的应用[8]。比如在地形建模中地性线作为辅助信息，可以有效避免信息丢失。在实际作业过程中，采集的原始数据通常用不规则三角网或者等高线数据格式记录，在入库前需要将其转换给规则格网数据格式，在数据转换中不可避免的会造成细节信息丢失，日后使用这些数据时，读取的信息是不全面的。如果在转换格式之前，提取地性线，并记录这些细节，为将来数据的使用提供精确的辅助信息，有效地提高了数据信息的准确性和精确性。同时，地性线作为重要的地形结构信息，在利用等高线重新构建地貌形态的过程中发挥着相当大的作用。由于地形图上并没有显性的地性线要素，地性线信息只是隐含在等高线等要素中，以往地性线只能通过人工数字化的方法得到。因此，在需要大量获取地性线的情况下，利用数字化等高线数据自动提取地性线是一项十分有意义的工作。

从目前研究的方向看，地性线的追踪主要是针对矢量等高线数据的追踪和规则格网 DEM 数据的追踪两种。而从精度和实用性来看，基于矢量等高线数据的地性线追踪意义更大些。

2.1 基于矢量等高线数据的地性线自动提取算法回顾

1986 年，慕尼黑工业大学制图系教授 Finster walder 提出了地性线的自动追踪问题。如何自动确定地性线，减少人工采集工作量的问题，已成了一个研究重点。目前，国内外学者在基于等高线数据自动提取地性线的算法方面已经进行了比较多的研究[9-23]。

基于等高线提取地形特征的算法有很多种，包括等高线曲率判别法、等高线垂线跟踪法、等高线骨架法和Voronoi图骨架法等。

1、等高线曲率判别法[9]

等高线曲率判别法用于从数字化等高线数据中提取地形特征线，主要步骤为：（1）首先计算出每条等高线上一定间距的离散点的曲率绝对值（在计算等高线曲率值时，通常采用样条函数进行等高线内插）；（2）将曲率绝对值大于某一给定阈值的离散点选择出来，作为形成地形特征线的备选点；（3）每一条等高线均按上述两步处理完毕之后，找出区域内的山顶点和谷底点，并以这些点为起始点，根据一定的条件和搜索策略将已确定的备选点纳入各自所在的山脊线和山谷线。

显然，该方法与基于几何分析原理的算法一样，均将地形特征点的判定和该点地形所属地形特征线的确定分开考虑，因此，存在与几何分析算法同样的阈值缺陷问题。在确定地形特征线上的点时，全区域采用一个相同的曲率阈值作为判定地形特征线上点的条件，它忽略了每条地形特征线自身的变化规律。当阈值选择较大时，会丢失许多地形特征线上

的点，使得后续所跟踪的地形特征线较短且存在间断；当阈值选择较小时，会将一些本来不是地形特征线上的点误认为是地形特征线上的点，这样给后续地形特征线的跟踪带来很多麻烦。另外，在地形复杂（地形破碎）和等高线不光滑（存在噪声）的区域，地形特征线的跟踪十分困难。

2、等高线垂线跟踪法

等高线垂线跟踪法的过程是：（1）以一定的步长在数字化等高线上选取离散点，并计算各离散点处等高线的法线方向的单位矢量；（2）将该单位矢量在 X 、Y 方向进行分解；（3）以（1）、（2）步为基础，通过内插计算得到其他非等高线上的点（所需点）所在处的等高线的法线方向矢量；（4）按高程由高到低的顺序进行等高线法向矢量跟踪，并求取跟踪所得的各等高线法线轨迹的交汇点；（5）交汇点的有序连接即为地形特征线。该算法的实质是找出地形曲面上每点的流水轨迹，这些轨迹的顺序连接即为汇水线，各汇水线之起点所组成的线即为流水线。

此法理论严密，以整体分析为基础，它比起局部分析法（如等高线曲率判别法）有着抗干扰（噪声）能力强的优点，计算出的山谷线和山脊线位置与实际情况符合很好，但它只是间接分析与寻找地形特征线，因此有着计算量大和地形特征线上的点确定比较麻烦的缺点，并且它对较平滑的山谷山脊无能为力。

3、等高线骨架化法

骨架化法又称中心轴化法，近年来被广泛用于图像、图形处理领域。在图形图像处理领域，图形骨架是指二维图形边界内距其两侧边界等距离点的集合所组成的线，即图形的骨架线或中心轴，是二维几何图形内各个不相互包含的所有最大内切圆圆心的轨迹线。

图形骨架化法用于提取山脊线和山谷线时，是将同一条等高线的中心轴线视为地形特征线，先求取每条等高线弯曲部分的骨架，然后连接相邻等高线的骨架以得到山脊线和山谷线。该方法的实质是将地形特征线两侧的地形视为对称变化，这显然与大多数地形变化不相符合。所以，用该方法所提取的地形特征线有很大程度的近似性，当对同一地形特征线上相邻近的两条等高线用该方法进行处理时，所提取的地形特征线并不一致，当等高线不光滑或存在噪声时，并不能得到满意的结果。

4、基于Voronoi图的骨架法

如果使用等高线数据生成不规则三角网，显然它对应的Voronoi多边形的各个顶点将构成地形的骨架点。由这些骨架点构成的内容有三部分：主要部分是骨架线或中心轴线，一部分则是地形特征线，另一部分是很小的毛刺。中心轴线上点的高程值是两等高线高程的平均值，而地形特征线上的高程值则可通过内插方式求得。毛刺的形成主要是由于等高线不光滑、有许多小的弯曲造成的。

Voronoi图骨架法最大的优点是：在建立Delaunay三角网和Voronoi图的过程中，可以直接得到地形骨架线和地形特征线。地形骨架线可用于等高线的简化、综合等方面，但必须对骨架线进行处理，以消除其上的小毛刺。另外，地形特征线也需要寻找合理的方法进行

连接。

上面介绍了基于等高线数据自动提取地形特征线的一些常用算法，目前看来这些算法都存在一定的缺陷，归纳起来主要有以下两种：

（1）地形特征线不连续，比较零碎；

（2）在地形建模方面的研究比较少。

目前，如何从等高线中获取高质量的完整的地形特征线数据，并在此基础上建立高质量的数字高程模型仍是测绘领域研究的一项重要内容。本章将等高线看作线状曲线要素，从曲线的弯曲特性出发，研究地性线自动提取问题。

2.2 曲线弯曲的数学形式化定义

2.2.1 曲线拐点的数学定义与判别准则[24]

1、拐点的定义

拐点又叫做扭转点，即在其前后存在的一个邻域内，使得其前后曲线段的凸凹特性相反。或者说，过拐点的切线把邻域内的曲线分成两部分，后者位于此切线的异侧。在数字环境下，曲线是由离散坐标点来表示的。此时，拐点的确定分为两个子过程：（1）在原始数据的哪两点之间或曲线图形的哪一条边的区间存在拐点；（2）拐点在该区间的何处。

2、拐点存在边（区间）的判别——相邻两矢量叉积的应用

由于两个不共线矢量的叉积可以决定所构成转角的凸凹特征，故对于拐点存在区间的判别，可通过对每相邻四点（A、B、C、D）（其中每相邻三点不共线）进行测试来实现。如图 2-1，A、D点是否位于B、C点连线的异侧。由这四个有序点可形成三个有序矢量（AB、BC、CD），这三个有序矢量可以形成两个有序的矢量叉积。拐点存在的充要条件就是这两个有序矢量叉积异号，即

$$(AB\times BC)\cdot(BC\times CD)<0 \tag{2-1}$$

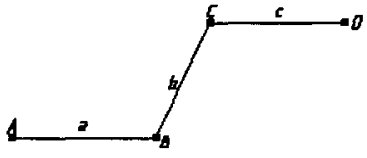


图2-1 拐点存在的折线段BC的判别

由于在计算机环境下，曲线是由有序坐标串给定的，因此，为了能直接利用现有的直角坐标进行计算，需要把式（2-1）转换为用直角坐标表示的关系式：

$$AB\times BC=a_xb_y-b_xa_y=(x_B-x_A)(y_C-y_B)-(x_C-x_B)(y_B-y_A) \tag{2-2}$$

$$BC\times CD=b_xc_y-c_xb_y=(x_C-x_B)(y_D-y_C)-(x_D-x_C)(y_C-y_B) \tag{2-3}$$

最后，式（2-1）所表示的连续四点间拐点存在条件的坐标表达式为：

$$[(x_B-x_A)(y_C-y_B)-(x_C-x_B)(y_B-y_A)]\cdot[(x_C-x_B)(y_D-y_C)-(x_D-x_C)(y_C-y_B)]<0 \tag{2-4}$$

作连续两个相邻矢量叉积（曲率或凹向的标志数），当其符号为负时则存在拐点，这个拐点就在两个矢量叉积的中间共享边 BC 区间某处。如果拐点所在边的长度很短，则可取其中点为所需拐点，这时可直接进入下一个拐点的确定。否则，需要进行离散点曲线拐点位置的确定。

3、拐点信息的主要应用

拐点是曲线上曲率最小点（零曲率点），它是曲线凹向的变化点（凸凹交替点），是图形数学弯曲的分界点。拐点信息的主要应用有：形成曲线的总体趋势线、用于曲线特征的自动分段、测度线状目标曲折程度、评估曲线信息量等。

2.2.2 曲线的弯曲分析[25]

2.2.2.1 弯曲的定义

• 基于拐点的弯曲的定义

拐点是曲线上的一类特殊的点，许多学者将连接拐点的线称为曲线的中轴线或趋势线，这些都是基于拐点的特殊性。一个弯曲是曲线的一部分，它是由许多连续的点组成。弯曲上每个点出发的两线段都有转折角，或正或负，弯曲的两个端点会改变转角的正负性，可称改变转角正负的点为曲线的拐点。

在拐点处曲线改变弯曲的方向，更严格地说是改变弯曲的延续方向，使之向相反的方向弯曲。如图2-2，曲线上 P_1P_2 段是逆时针弯曲，而 P_2P_3 段是顺时针弯曲，弯曲在拐点 P_2 处发生变向。这种基于拐点的弯曲通常连续间隔的分布在中轴线的两侧。我们可以通过弯曲大小和弯曲形状来描述曲线：弯曲大小指弯曲和基线间的多边形的面积；弯曲的形状指弯曲和基线构成的凸多边形。

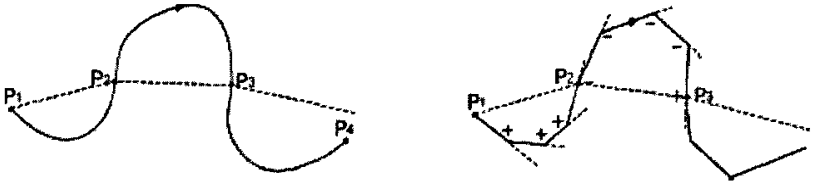


图2-2 基于拐点的弯曲定义

这种弯曲定义同时有两个特性：

（1）正角弯曲和负角弯曲总是相间出现；

（2）弯曲是相邻的，覆盖了曲线的所有点。

在实际应用中，如果弯曲端点处连续的转折较小，为了保持视觉上弯曲的整体性，可将此弯曲与邻近的弯曲合并。如图2-3，拐点 A 和拐点 C 是弯曲的端点，AC 是基线（基线是弯曲端点的连线），A 的转角很小，将弯曲的端点 A 纠正到 B 点。

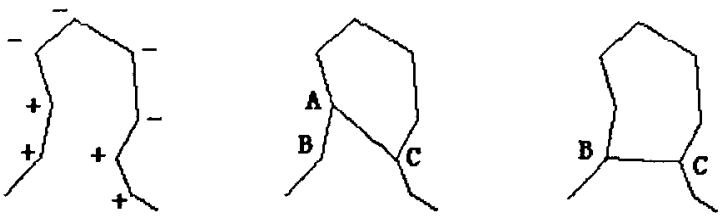


图2-3 弯曲扩展

• 基于张角的弯曲定义

费立凡（1993）提出一种基于张角的弯曲定义方法[9]，这种方法定义的弯曲和人们感官认识上是一致的。如图2-4，设P_0是弯曲上的一点，在P_0的附近取一点P_1，以P_1为原点，作射线P_1P_0。假设P_1在P_0的下方，则让P从P_0开始在曲线上P_0的前方沿曲线运动，运动过程中，张角$\angle P_1P_0P$有一个最大值，设最大张角处为点P_2。再以P_2为原点，作射线P_2P_0，让P从P_1点出发，沿P_1下方的曲线运动，得最大张角点P_3，……。依次类推，得到一系列点P_0、P_1、P_2、P_3、P_4、P_5、……，直到点P_{n-1}与P_n的距离小于预定的限差ε，且P_n与P_{n+1}的距离也小于限差ε，则P_{n-1}与P_n就是弯曲的两个端点。

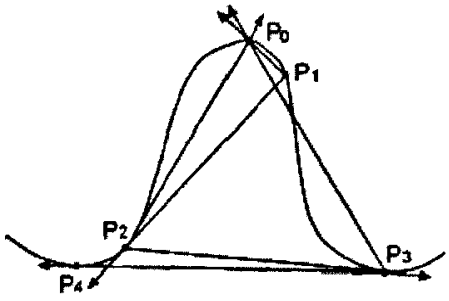
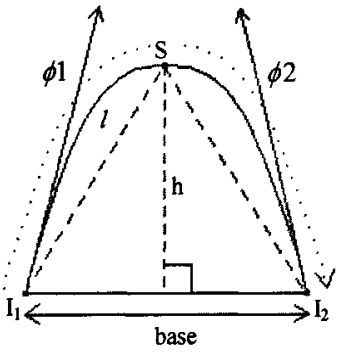


图 2-4 基于最大张角的弯曲定义

2.2.2.2 弯曲的度量分析

曲线的几何描述是基于特征点探测的，Attneave（1954）指出曲线上的信息多集中在曲线方向改变较快的点上[26]。因此现在有一种认识，就是图形探测是基于特征点的探测（Thapa 1988）[27]。在欧几里德平面几何上，特征点主要指曲率的极值点：顶点和拐点；但这种定义太严格，应该将其扩展，包括曲率不连续的点、端点、交点和切点（Freeman，1978）[28]。Skopeliti and Tsoulos（1999）曾对制图中曲线的图形参数进行过详细的描述[29]。



2-5 弯曲度量的表达

对曲线l上的连续转折点间的每一个弯曲部分（如图2-5），我们可以计算：

·矢高h；

·基线长（点间的欧几里德距离）；

·点(I_1, I_2)之间的曲线长L；

·Φ_1和Φ_2之间的转角；

·曲线和基线间的面积。

这些度量标准可以粗略定义曲线的类别，用于矢量数据的各种化简方法都是基于这几个度量标准的，是单独应用度量的特例。如Dauglas-Peucker法就是基于矢高标准的化简方法。如有必要，我们还可对更复杂的度量标准进行具体描述：

·曲线l和基线(I_1, I_2)之间的面积；

·三角形(S, I_1, I_2)的面积；

·顶点S在基线(I_1, I_2)上的投影。

Poorten and Jones（1999）提出应用Delaunay模型依据宽度、深度和面积对曲线进行结构分析，从而进行综合的方法[30]。

2.2.2.3 等高线弯曲的形状

等高线弯曲形状的表达是一个不确定性问题，Wang提出了紧凑度概念[31]（Compactness degree）来进行曲线弯曲形状的描述。其主要思想是通过描述弯曲形状与V形、U形、半圆形、开矩形、开三角形拟合的程度来表达弯曲的形状。由于等高线数据是由折线段来表示的，因此各种弯曲形状可以归结为两种基本形状：V形弯曲和U形弯曲（如图2-6所示）。



(a)V形弯曲　　(b)U形弯曲

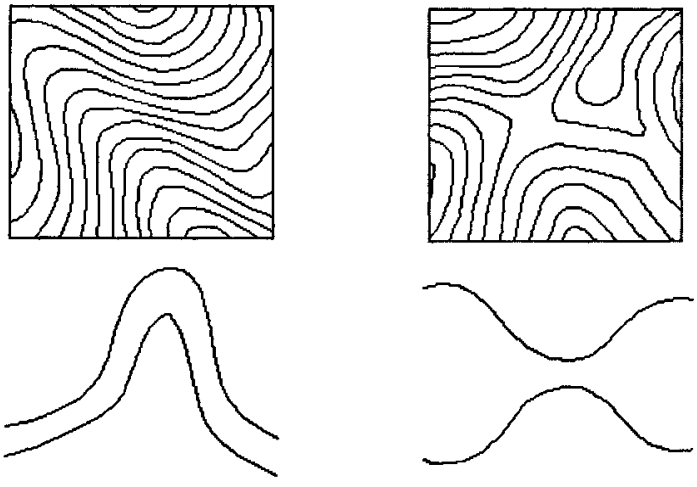
图2-6 弯曲的基本形状

2.2.2.4 等高线弯曲的类型

等高线是地形地貌的表达，它表达地势的起伏特征，由于地势的连续性，使得临近的等高线组在弯曲、走向等方面具有一定的相似性。首先将等高线中的弯曲分为两种类型：一致性弯曲和对立性弯曲：

·一致性弯曲指等高线的弯曲开口方向一致，等高线之间多呈平行分布，实地上分布在地势起伏均匀或舒缓的地带中，比如山脊和山谷，如图2-7（A）；

·对立性弯曲则主要发生在等高线的鞍部、山顶和谷底，反映在弯曲处开口方向相反，如2-7（B）。



（A） 一致性弯曲　　（B） 对立性弯曲

图2-7 等高线弯曲的类型

2.2.2.5 确定弯曲的顶点

弯曲的顶点就是两个相邻拐点之间所分离出来的弯曲坐标序列各点中，曲率值最大的点。曲率的计算公式为：

$$K=\left|\frac{y''}{(1+y'^2)^{3/2}}\right| \tag{2-5}$$

对于有完整的函数表达式的曲线，可直接用式（2-5）计算曲线上任意一点的曲率。对于数字化矢量等高线来说，等高线被记录为由离散点顺序组成的折线段，那么计算折线上任意一点（除去两个端点）的曲率时，可以先用该点相邻的左右两点计算该点处的一阶和二阶差分，再用差分代替式（2-5）中的一阶和二阶导数。若相邻三点的坐标分别为(x_0,y_0)、(x_1,y_1)、(x_2,y_2)，则由差商的定义得到相邻两点的一阶差商为：

$$f[x_0,x_1]=\frac{f(x_0)-f(x_1)}{x_0-x_1}=\frac{y_0-y_1}{x_0-x_1} \tag{2-6}$$

$$f[x_1,x_2]=\frac{f(x_1)-f(x_2)}{x_1-x_2}=\frac{y_1-y_2}{x_1-x_2} \tag{2-7}$$

相邻三点的一阶差商为：

$$f[x_0,x_1,x_2]=\frac{f[x_0,x_1]-f[x_1,x_2]}{x_0-x_2} \tag{2-8}$$

离散点曲率公式为：

$$K=\left|\frac{y''}{(1+y'^2)^{3/2}}\right|=\left|\frac{2f[x_0,x_1,x_2]}{(1+f[x_0,x_1]^2)^{3/2}}\right| \tag{2-9}$$

对于V形弯曲，有一个明确的弯曲顶点；而对于U弯曲，则可能需要探测两个顶点。

2.2.2.6 弯曲参数的形成

通过拐点的确定，分离出各个单独的弯曲及其派生值：弯曲弧长l与弯曲底线长度d。弯曲长度l与弯曲端点（拐点）连线d之比可用来表达各个弯曲的弯曲系数。因此有

$$K_1=l_1/d_1,\ K_2=l_2/d_2,\ \ldots\ldots,\ K_n=l_n/d_n \tag{2-10}$$

对于整条曲线或者曲线分段，可以取其各个弯曲系数的平均值：

$$K=\frac{\sum_{i=1}^{n}k_i}{n}=\frac{\frac{l_1}{d_1}+\frac{l_2}{d_2}+\cdots+\frac{l_n}{d_n}}{n} \tag{2-11}$$

若近似地取$d_1=d_2=\cdots=d$，则上式化简为：

$$K=\frac{\sum_{i=1}^{n}k_i}{n}=\frac{\frac{l_1}{d_1}+\frac{l_2}{d_2}+\cdots+\frac{l_n}{d_n}}{n}=\frac{l_1+l_2+\cdots+l_n}{nd}=\frac{\sum l}{L},\quad (L=nd) \tag{2-12}$$

此式为通常所采用的评价曲线的曲折系数公式。式（2-12）表明，整条曲线或曲线分段的曲折系数等于曲线长度与拐点连线长度之比。它与各个弯曲的曲折系数之间的关系是：通常所采用的简化公式（2-12）的近似前提是假设相邻拐点连线的长度相等。

2.3 自动提取地性线的实现步骤

基于矢量等高线数据自动提取地性线的实现主要包括以下步骤：（1）等高线数据的预处理；（2）建立等高线拓扑关系；（3）自动提取地性线上的特征点；（4）地形特征点的匹配连接。

2.3.1 等高线数据的预处理

矢量等高线数据是追踪地性线、建立数字高程模型的基础数据，其质量直接影响其使用效果，因此在追踪地性线之前，必须对等高线数据进行检查修改。

在等高线数字化生产过程中，由于地貌形态复杂、数据量大、人机交互作业易出错和图象处理技术存在缺陷等原因，不可避免地造成等高线数据存在几何信息误差和属性信息误差。几何信息误差主要包括等高线的点位或线位误差、等高线相交或自交和数据采集不均匀引起的数据冗余和等高线不光滑等。属性信息误差主要包括少量高程错误和系统高程错误。

在等高线数据的预处理中，可采用专门的等高线检查软件进行处理，软件应具有的最基本的功能是进行线编辑，主要有对线的增加、删除、移动、续线、闭合、分割、属性修改等，另外应有对点的增加、删除、移动等功能。

2.3.2 等高线和地性线的数据结构

等高线和地性线都是连续的曲线，当它们离散为矢量数据时，曲线往往以折线代替，表示为线段、特征点序列，下面给出了等高线和地性线的数据结构。

定义等高线数据结构如下：

```
class CContourLine:public CObject
{
Public:
    int ClassID;//计、首曲线标志
    int ColorFlag;//颜色标志（雪线）
    int CloseFlag;//曲线闭合标志
    double Altitude;//曲线高程
    long Code;//等高线编号
    long FatherCode;//父层（包含该条等高线的较低一层）等高线编号
    long PointSum;//该条等高线上的采样点总数
    CTypePtrArray<CObArray,CMapPoint2D*> m_ContourPointArray;
                                        //该条等高线上的采样点坐标串
    ……
};
```

定义地性线数据结构如下：

```
class CSkeletonLinePoint:public CObject
{
Public:
    long LevelCode;//所属等高线的层号
    long ContourCode;//所属等高线的编号
    int CharacterFlag;//特征点类型标志（山脊点、山谷点、鞍部点）
    double x,y,z;//地性线特征点的三维坐标
    ……
};

class CSkeletonLine:public CObject
{
Public:
    long Code;//地性线编号
    int CharacterFlag;//特征点类型标志（山脊点、山谷点、鞍部点）
    CTypePtrArray<CObArray,CSkeletonLinePoint*> m_SkeletonLinePointArray;
                                                    //地性线上特征点坐标串
    ……
};
```

2.3.3 建立等高线拓扑关系

建立等高线拓扑关系的实质是要确立父层等高线（高程较低的等高线层）对子层等高线（高程较高的等高线层）的包含关系，并确定同层等高线之间的并列关系。等高线本身是线状要素，然而在其等值面上也提供一定的信息量。因此，在实际应用中，人们往往将其视为面状要素，利用等高线间的嵌套关系来分析地表形态。同时，等高线又是以组的方式来表达信息的，具有群组特性。由此，本文根据等高线的特点，设计了如下方法来建立等高线的拓扑关系：

（1）按照高程值对等高线进行分层，将高程相同的等高线记录入一层，得到等高线高程与等高线采样点坐标串的有序集合{高程值H，{高程值=H的等高线采样点坐标}}(表2-1)。

表 1-1 分层等高线坐标串

层号	高程值	坐标串
1	$H_1 = H$	L_{11}、L_{12}、……、L_{1n_1}
2	$H_2 = H - h$	L_{21}、L_{22}、……、L_{2n_2}
	……	……
i	$H_i = H - (i-1) \times h$	L_{i1}、L_{i2}、……、L_{in_i}

（2）对等高线进行闭合处理。按照几何学、物理学的约定：取等高线为有向线，沿等高线前进时（通常取逆时针方向），等高线与地貌的关系规定为其左侧（朝）高，右侧（朝）低。对于闭合等高线所形成的封闭多边形的判断不存在任何技术问题，故此处不再赘述。对属于同一层的所有非闭合等高线，依次计算其首末点到区域原点（区域外接矩形的左下角点）沿区域边界线的逆时针方向的距离，按到原点的距离对首末点进行排序。按照判断准则组合新的闭合多边形即为新的闭合等高线（对在处理过程中加入的边界线角点做出标记，在后续过程中不参加计算）。依此对所有层次中的等高线进行闭合处理[24]。

（3）建立等高线拓扑关系。高程最低的等高线构成最大的面，其余高程的等高线均将被包含在最低层构成的面里。同时，同层等高线存在并列关系，即存在多个独立的闭合曲线时，其关系为并列关系。父层等高线闭合处理完成后，与之相邻的子层等高线按同样方法进行，并判断子层等高线包含在父层等高线的哪个闭合曲线内，并按父层闭合曲线的标记进行记录。

2.3.4 地性线上特征点的自动提取

地性线上特征点自动提取的主要步骤为：

（1）计算等高线上的拐点。根据式（2-4）计算每条等高线上的拐点存在的区间，由于检索拐点只是为了分割曲线段，故不需要计算拐点精确的坐标，这里用拐点所在区间的中点代替拐点，坐标以及高程值用线性内插的方法计算即可。

（2）分割等高线。按照拐点的位置将等高线分割成性质特征单一的弯曲，并记录弯曲的凸凹性（正负性）。根据等高线方向的约定，正角弯曲表示该弯曲为山脊，负角弯曲表示该弯曲为山谷。记录每个弯曲的正负性。

（3）计算弯曲的顶点。如果等高线为闭合曲线，则计算折线夹角，小于α（α为给定阈值）的折线顶点记录为山脊线特征点；若等高线为非闭合曲线，则根据式（2-10）计算每段弯曲的弯曲系数k，当$k < \varepsilon$时（ε为根据多次实验得到经验值），认为曲线接近直线，不进行顶点计算；否则，判断每段弯曲上的采样点个数，如果点数$n=3$，中间点即为弯曲顶点；如果$n>3$，根据式（2-6）、（2-7）、（2-8）、（2-9）计算该段弯曲的顶点。按照

该顶点所在弯曲的正负特性，记录为山脊线备选特征点或者山谷线备选特征点（如图 2-8 所示）。

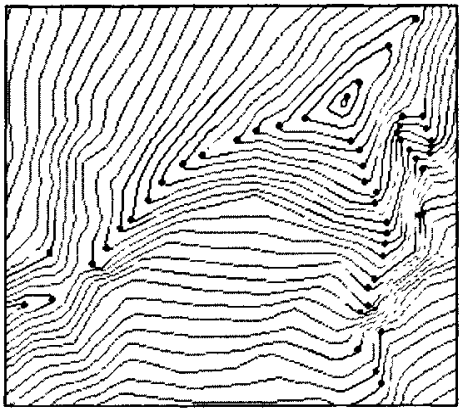


图 2-8 用实验数据提取的地形特征点（局部）

2.3.5 地形特征点的匹配连接

地形特征点的匹配连接包括两个步骤：高程值内插和特征点连接。由于弯曲的正负属性，得到的地形特征点已经区分为山脊线特征点和山谷线特征点，可以分别连接山脊线特征点和山谷线特征点。山脊线特征点存在以下几种情况，对于山脊线的匹配连接，给出如下分析：

（1）如图 2-9 所示，山顶闭合等高线存在两个特征点，为了合理连接两个特征点，采用闭合曲线内局部构网，连接内部边（等高线上的三角形边为外部边）的中点，得到闭合曲线的骨架线，各个中点为内插特征点。

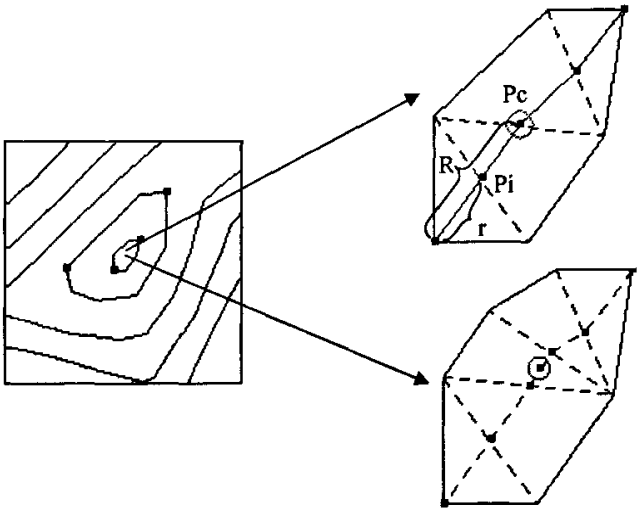


图 2-9 连接山顶闭合等高线上的特征点

内插特征点的高程值由其所在内部边的两个端点线性内插得到，具体过程：当内插特

征点个数n为奇数时，选择第$(n+1)/2$个点为内插中心点P_c；当内插特征点个数为偶数时，取第$n/2$个点和第$(n+2)/2$个点的中点为内插中心点P_c。假设山顶坡度处处相等，设Z_0为山顶等高线的高程，Z_c为山顶最高点（内插中心点）的高程。由于山顶控制点的高程值未知，因此假设$Z_c = Z_0 + h/2$，h为等高距。假设内插特征点P_i沿骨架线计算到等高线特征点的平面折线距离为r；内插中心点P_c到与P_i同侧的等高线特征点的平面折线距离为R，山顶内插特征点高程的计算公式如下：

$$Z_i = (Z_c - Z_0) \times r/R + Z_0 \tag{2-13}$$

内插特征点的高程值计算完毕后，将这些点从内插中心点向两边分别顺序记入两个地性线链表。如果闭合等高线上仅有一个特征点，则直接记录入地性线链表。

（2）如图2-10所示，山脊上有一个特征点。假设P_{i-1}、P_i是分别位于第$i-1$层和第i层的特征点，且已经记入地性线链表中，P_{i+1}是位于第$i+1$层上的特征点。判断P_{i+1}是否在该条地性线上的方法是：以点P_{i-1}、P_i连线的垂线为分界线，搜索第$i+1$层上与点P_{i-1}异侧的特征点，将与P_i点距离最近的点P_{i+1}记入地性线链表中。

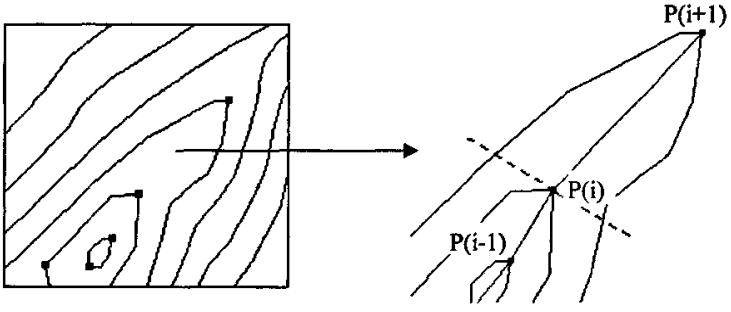


图2-10 连接山脊上的特征点

（3）一个特殊情况：如图2-11所示，P_i是第i层上的地性线特征点，P_{i+1}是计算得到的第$i+1$层上的地性线特征点，当等高线形状不规则时，出现了由点P_i和点P_{i+1}连线构成的地性线与等高线相交的情况。

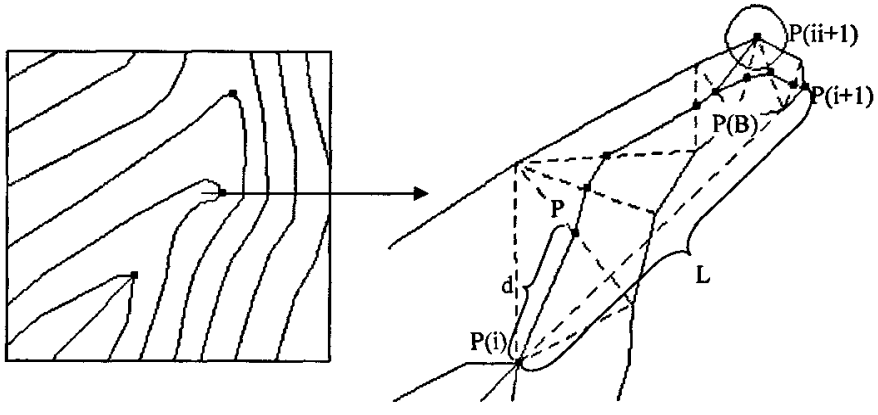


图2-11 地性线与等高线相交的情况

解决的方法是：保留曲率最大的弯曲顶点P_{i+1}，在该段弯曲上选取曲率次大的点P_{ii+1}作为特征点，然后对点P_i附近的等高线点进行构网，即以P_i作为构网的第一个结点，搜索第$i+1$层等高线上与P_i距离最近的点连接成基线，利用三角网生长算法得到局部三角网，连接内部边中点得到局部骨架线，各个中点为内插特征点。在山脊处，按非等坡度情况处理，沿骨架线内插特征点的高程值与其相对距离成正比（在有许多分支的情况下，以最大分支作为参考线）。设Z_i、Z_{i+1}为相邻两条等高线上点P_i和P_{i+1}的高程值，d为内插特征点到P_i点的平面折线距离；L为P_{i+1}到P_i的平面折线距离。内插特征点P高程值的计算公式为如下：

$$Z = Z_i - (Z_i - Z_{i+1}) \times d/L \tag{2-14}$$

P_{ii+1}对边上的内插特征点为地性线分支点，记为P_B。从P_i点开始依次记录内插特征点，最后记入P_{i+1}，该条地性线记录完毕，转入查找第$i+2$层的特征点。然后将P_B和P_{ii+1}记入新的地性线链表（地性线链表数加一）。

山脊线特征点匹配连接的基本思想是：首先设计计数变量K和L，K记录已连接的地性线数，L记录已完成的地性线数。由高程值最高的层特征点开始，匹配连接地性线，此时$K=1$，$L=0$。特征点在加入地性线链表后，在原特征点集中删除该点。当遇到分支时，记录新的地性线链表，并记$K=K+1$；当前地性线匹配完毕后，令$L=L+1$，并转向下一条地性线的匹配。当$K=L$时，表明最高层当前特征点引出的地性线匹配完毕，进而进入下一个特征点引出的地性线的匹配判断。当独立特征点下层没有可以扩展的特征点时，直接删除该点。重复上述过程，直到特征点集为空，即完成山脊线的自动提取（如图2-12所示）。山谷线将检索顺序改为由高程值最低层开始即可。

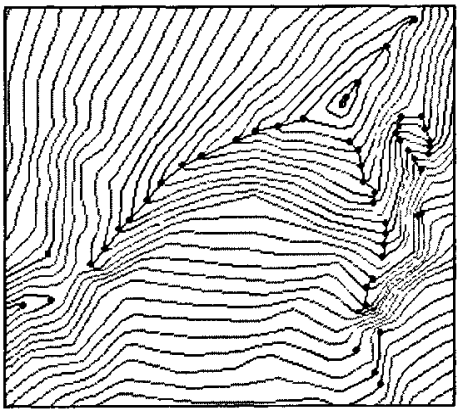


图2-12 用实验数据提取的地性线（局部）

2.4 本章小结

本章回顾了常用的地性线提取算法，并指出了各种算法的优缺点。介绍了曲线弯曲的基本理论和度量标准，并阐述了基于曲线弯曲分析提取地性线的原理，然后基于此原理对地性线的自动提取过程进行了详细的描述和分析。

第三章　顾及地形特征的不规则三角网 DEM 的建立

3.1 Delaunay 三角网的定义与基本特性

3.1.1 不规则三角网的有关概念及性质

3.1.1.1 不规则三角网 TIN 的构网法则[1][33]

在数字地形建模中，不规则三角网 TIN 通过从不规则分布的数据点生成的连续三角面来逼近地形表面。对于 TIN 模型，其基本要求有三点：

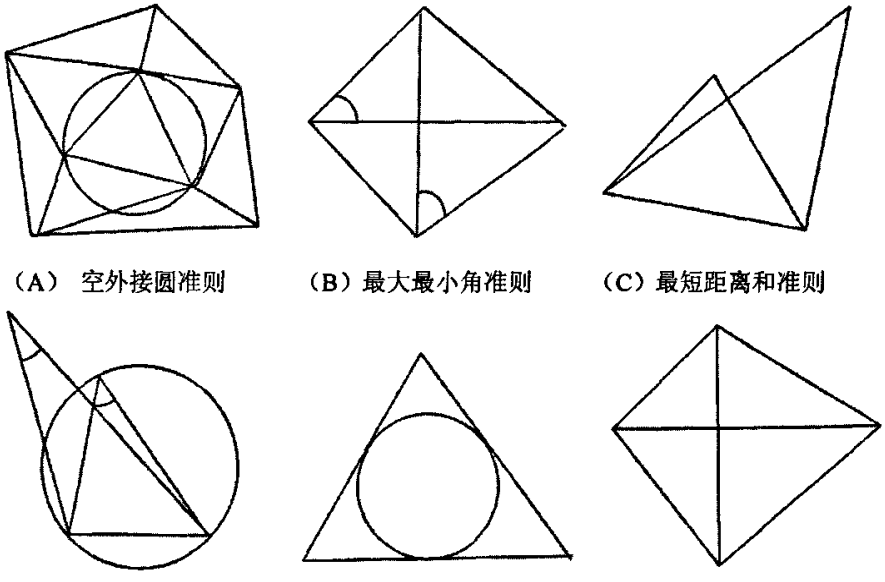
（1）TIN 中的三角形互不相交，即三角形网络是唯一的；

（2）力求最佳的三角形几何形状，每个三角形尽量接近等边形状；

（3）保证最邻近的点构成三角形，即三角形的边长之和最小。

3.1.1.2 不规则三角网 TIN 的三角剖分准则

TIN 的三角剖分准则是指 TIN 中三角形的形成法则，它决定着三角形的几何形状和 TIN 的性质。目前，在 GIS、计算几何和计算机图形学领域常用的三角剖分准则有以下 6 种[34]：



（A） 空外接圆准则　（B）最大最小角准则　（C）最短距离和准则

（D）张角最大准则　（E）面积比准则　（F）对角线准则

图 3-1 TIN 的三角剖分准则

（1）空外接圆准则：在 TIN 中，过每个三角形的外接圆均不包含点集的其余任何点，如图 3-1（A）所示。

（2）最大最小角准则：在两相邻三角形形成的凸四边形中，这两个三角形中的最小内角一定大于交换凸四边形对角线后所形成的两三角形的最小内角，如图 3-1（B）所示。

（3）最短距离和准则：指一点到基边两端的距离和为最小，如图 3-1（C）所示。

（4）张角最大准则：一点到基边的张角为最大，如图 3-1（D）所示

（5）面积比准则：三角形内切圆面积与三角形面积或三角形面积与周长平方之比最小，如图 3-1（E）所示。

（6）对角线准则：两三角形组成的凸四边形的两条对角线之比超过给定限定值是，对三角形进行优化，如图 3-1（F）所示。

所以，TIN 的建立应基于最佳三角形的条件，即应尽可能保证每个三角形是锐角三角形或三边的长度近似相等，避免出现过大的钝角和过小的锐角。在所有可能的三角网中，Delaunay 三角网在地形拟合方面表现最为出色，因此常常被用于 TIN 的构建。当不相交的断裂线等被作为预先定义的限制条件作用于 TIN 的生成时，则必须考虑带约束条件的 Delaunay 三角网。

3.1.2 Delaunay 三角网的定义与基本特性

3.1.2.1 Delaunay 三角网的定义[34]

1、（平面普通）Voronoi 图的定义

对于二维欧几里德平面上的任意一点 $p(x_p,y_p)$ 来说，其与生长点 $p_i(x_i,y_i)$ 的欧几里德距离为 $d(p,p_i)=\|\bar{x}-\bar{x}_i\|=\sqrt{(x_p-x_i)^2+(y_p-y_i)^2}$，其中 $\bar{x}$ 是 p 的坐标向量。如果 p 距生长点 p_i 最近的话，则有 $\|\bar{x}-\bar{x}_i\|\le\|\bar{x}-\bar{x}_j\|$，$i\neq j$，$j\in I_n$。据此，可给出平面普通 Voronoi 图的定义如下：

对 $P=\{p_1,p_2,\cdots,p_i,p_j,\cdots,p_n\}$，（$3\le n<\infty,\bar{x}_i\neq\bar{x}_j,i\neq j,i,j\in I_n$），由

$$V(p_i)=\{p\mid d(p,p_i)\le d(p,p_j),j\neq i,j\in I_n\} \tag{3-1}$$

给出的区域称为生长点 p_i 的 Voronoi 多边形，而所有生长点 p_1，p_2，…，p_n 的 Voronoi 多边形的集合

$$V=\{V(p_1),V(p_2),\cdots,V(p_n)\} \tag{3-2}$$

构成了 P 的 Voronoi 图。

2、标准(不带约束条件)Delaunay 三角网的定义

若一个 Voronoi 图的 n 个（$3\le n<\infty$）空间生长目标满足非共线条件，将其中具有公共 Voronoi 边的生长点对相连，如果得到的全是三角形的话，则称之为 Delaunay 三角网（Delaunay Triangualation，缩写为 DT），否则称为 Delaunay 准三角网（Delaunay Pretriangualation，DP）。对于后者中的非三角形的多边形进行三角剖分可得到 Delaunay 三角形。不难看出，Delaunay 三角形与 Voronoi 生长点是一一对应的，这些生长点同时也是 Delaunay 三角形外接圆的圆心，如图 3-2。

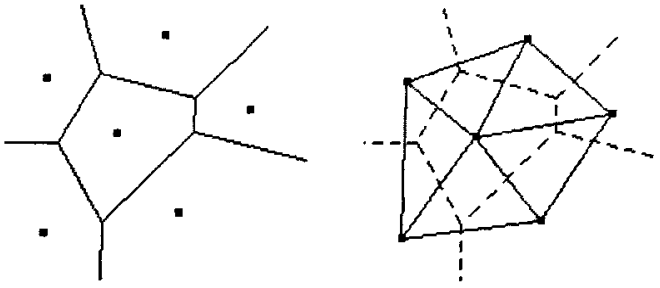


图 3-2 Voronoi 图和 Delaunay 三角形

Delaunay 三角形实质上是一种相互邻接且互不重叠的三角形的集合，其中的每一个三角形的外接圆内均不包含其它三角形的顶点。

3.1.2.2 Delaunay 三角网的特性

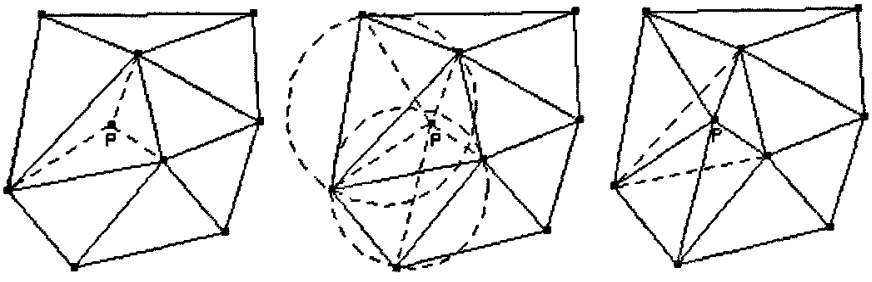
Delaunay 三角网具有两个很重要的特性[35]：

1、空外接圆性质

保证最邻近的点构成三角形，即三角形的边长之和尽量最小，且每个 Delaunay 三角形的外接圆内不包含其他任何点，称之为 Delaunay 三角网空外接圆性质。这个特性是创建 Delaunay 三角网的基本法则与判别标准。尽管 Delaunay 三角网并不是最理想的三角网，但总体上它趋于最佳，为最合适的选择。只要不超过三个邻域点在欧几里德平面上共圆，则 Delaunay 三角网总是唯一的。

2、最大最小角性质

在由点集 V 中所能形成的三角网中，Delaunay 三角网中三角形的最小内角尽量最大，即三角形尽量接近等边三角形。Lawson（1972）提出了根据最大最小角度法则建立局部几何形状最优的三角网：在由两相邻三角形构成的凸四边形中，交换此四边形的两条对角线，不会增加这两个三角形六个内角总和的最小值[36]。



（a）新点插入　　（b）对角线交换　　（c）新三角网

图 3-3 LOP 局部优化过程

在最大最小角度法则的基础上，Lawson 又提出了局部最优方法（LOP-Local Optimization Procedure）：交换凸四边形的对角线，可获得等角性最好的三角网。图 3-3 给出了当一个新点加入三角网后完成 LOP 交换的过程。

局部优化过程 LOP 是 Delaunay 三角网构建的关键过程。LOP 优化原则为：运用 Delaunay 三角网的性质对由两个有公共边的三角形组成的四边形进行判断，如果公共边小于四边形的另一条对角线，即其中一个三角形的外接圆包含第四个顶点，则将这个四边形的对角线互换。

3.1.3 带约束条件的 Delaunay 三角网的定义与性质

3.1.3.1 带约束条件的 Delaunay 三角网的数学定义[2]

带约束条件的三角网要保持数据域原有的约束条件，如果三角网是 DT 三角剖分，则带有约束条件的 DT 三角网为 CDT（constrained delaunay triangulation，缩写为 CDT）。约束 CDT 的数学定义为：

设数据集合为 $CV=V\cup S$，V 为离散点集，$V=\{x_i,y_i\}$（$i=1,\cdots,n$），S 为 CV 中的线段约束关系，$S=(\{x_j,y_j\},(x_k,y_k))$（$0\le j$，$k\le n$），$T$ 为 CV 的一个三角剖分，TE 为 T 中的不重合边集，TV 为 T 的顶点集，当 T 满足如下关系时，T 为 CDT。

（1）对于任意的 $t\in T$，必有 t 的三个顶点 $\in T$，且 TV 为 CV 的一个子集；

（2）对于任意的 t，其三条边除在顶点外互不相交；

（3）$S\subset TE$，即 S 是 TE 的子集，S 的约束关系在 TE 存在；

（4）对于任意的 $t\in T$，如果 t 的外接圆中含有除 t 三顶点外的其余 V 中的点，则 t 的三条边中必存在有由 S 中的约束边；

（5）对于任意的 $t\in T$，如果组成 t 的三个顶点不存在任何约束关系，则 t 必定满足空外接圆法则。

上述条件中，（1）、（2）保证了离散点数据域 CV 的正确三角剖分；（3）说明了约束线段为两三角形共有；（4）、（5）在（1）、（2）、（3）的基础上优化三角网为 Delaunay 三角网。

带约束条件的 Delaunay 三角网是标准 Delaunay 三角网的扩充，当 $S=\varnothing$ 时，CDT 退化为 DT，当 CV 和 S 中仅有边界数据时，CDT 为简单多边形的三角剖分。一般来说，CDT 中的三角形只具有局部优化，这主要是因为在具有约束线段的两三角形组成的四边形中已不再满足空外接圆法则和最大最小角法则，故常规 DT 的空外接圆和最大最小角特性只存在于无约束线段的三角形中。

3.1.3.2 带约束条件的 Delaunay 三角网的性质

CDT 三角网具有下述性质（如图 3-4）：

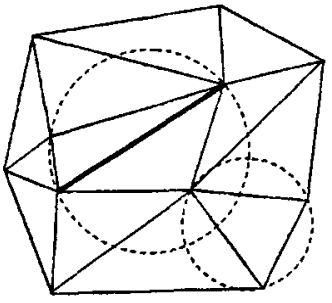


图 3-4 CDT 的性质

（1）通视性：设$P_i,P_j \in CV$，且P_i和P_j为线段P_iP_j的两端点，CDT是CV的一个三角剖分，如果P_i和P_j的连线不与CDT中任何三角形边（顶点除外）及S中的线段相交，则称P_i和P_j是可见的。

（2）空外接圆性质：如果组成t的三条边不是约束边，在t为 Delaunay 三角形，当且仅当过t的外接圆中不含其余T中三角形的顶点且t的三顶点是相互可见的。

（3）最大最小角性质：如果两相邻的三角形t_1、t_2的公共边$e \notin S$，那么由t_1和t_2组成的四边形当交换对角线后，其最小内角达到最大。

（4）局部优化性质：对T中的任意一个三角形t，如果其三边均不在S中，则t一定满足空外接圆性质或最大最小角性质。

带约束条件的 Delaunay 三角网具有标准 Delaunay 三角网的两个特性，这些性质也是建立约束 Delaunay 三角网的算法依据。它选择最邻近的点形成三角形，并使得约束线段成为三角形的边。所不同的是由于约束条件的限制，可人为增加对地形细部特征的显现，使生成的三角网更加逼近真实地貌。虽然约束 Delaunay 三角网具有很大的优点，但增加约束条件的同时，也增加了构网难度。

3.2 基于离散点构建不规则三角网 TIN 的常用算法

基于离散点构建不规则三角网的基本思路是：利用随机分布的高程采样点建立连续的覆盖整个研究地区的不规则三角网 TIN。其技术关键是确定哪三个离散数据点构成一个最佳三角形，并使得每个离散采样点均成为三角形的顶点。由于 Delaunav 三角形具有良好的特性，构造 TIN 的方法一般都归结为 Delaunay 三角网。根据 Delaunay 三角网的实现过程的不同，可以分为逐点插入法、三角网生长法、分治算法、凸包法等[6]。

3.2.1 逐点插入算法

Lawson（1977）最早提出逐点插入法建立 Delaunay 三角网的基本思想[37]。该算法的基本思想是：在一个包含所有数据点的初始多边形中，将未处理的点逐次加入到已经存在的 Delaunay 三角网中，每次插入一个点后，将 Delaunay 三角网重新定义（如图 3-5）。初始 Delaunay 三角网包含所有数据点，可以为超三角形或矩形结构，该算法的基本步骤是：

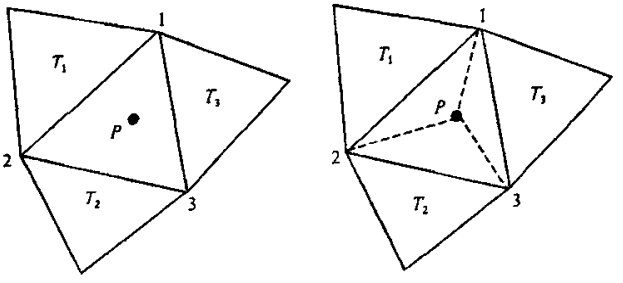
1、首先定义一个包含所有数据点的初始多边形；

2、从数据集中任意选择一个点，插入到初始多边形中建立初始 Delaunay 三角网；

3、然后按以下步骤进行迭代计算，直至所有数据点均被处理：

（1）从数据点中取出一个采样点 P，在初始三角网中找出包含 P 的三角形 T，P 与此三角形三个顶点相连，生成三个新的小三角形；

（2）应用 Lawson LOP 局部优化方法从里到外优化所有生成的三角形，确保所有点内插后的三角网为 Delaunay 三角网。



（a）包含新插入点 P 的三角形　　（b）插入新点 P 的初始三角剖分

图 3-5 逐点插入算法实现过程

从上述步骤可以看出，逐点插入算法的思路非常简单。先在包含所有数据点的一个多边形中建立初始三角网，然后将余下的点逐一插入，用 LOP 算法确保其成为 Delaunay 三角网。各种实现方法的差别在于其初始多边形的不同以及建立初始三角网的方法的不同。

该算法的时间复杂度一般情况下为 $O(N^{3/2})$，最坏情况下达到 $O(N^2)$，该算法的时间效率比较低，优点是算法思路较简单，占用内存空间较小，空间性能较好。

3.2.2 三角网生长算法

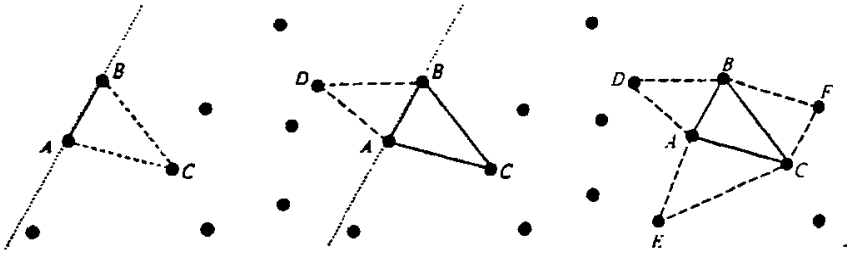
Green 和 Sibson（1978）提出的递归方法通过顺序扫描数据点，计算平面 Dirichlet 多边形。在此过程中随着新点的加人，以递归的方式改变新点周围 Dirichlet 多边形的邻接关系[38]。Brassel 和 Reif（1979）给出的算法与 Green 和 Sibson 的算法有关，这种算法从任意一点开始，在一维排序链表中以循环搜索方式查找此任意点的泰森邻域点，将建模区域划分为泰森多边形，然后把这一点与其所有泰森邻域点连接以形成 Delaunay 三角网，并由此生长，直至所有点都包含到三角网中[39]。三角网生长算法的基本过程为（如图 3-6）：

（1）在数据区域中取任意一点，查找距离此点最近的点，相连后作为初始基线；

（2）在初始基线右边应用 Delaunay 法则搜寻第三点（位于基线右侧，与基线中点距离最近，且与基线不共线的点）；

（3）生成 Delaunay 三角形，以三角形的两条新边（从基线起始点到第三点及第三点到基线终止点）作为新的基线；

（4）重复步骤（2）、（3），直至所有基线处理完毕。



a）由基边 *AB* 扩展初始三角形（b）直线分区原理扩展第一条边（c）扩展三角形 ABC 的三条边

图 3-6 三角网生长算法实现过程

上述过程表明，三角网生长算法的基本思路是，首先找出数据域内相距最短的两点，连线成为 Delaunay 三角形的一条边，然后按 Delaunay 三角网的判断法则找出包含此边的 Delaunav 三角形的另一端点，依次处理所有新生成的边，直至最终完成。这种算法大部分的计算都是在大量数据点中搜寻给定基线右侧符合要求的邻域点。因此，各种实现方法多表现在搜寻“第三点”的方法不同。

该算法同逐点插入算法同样，时间复杂度在一般情况下为 $O(N^{3/2})$，最坏情况下达到 $O(N^2)$。同样，该算法的时间效率较低，优点是占用内存空间较小。

3.2.3 分治算法（分割-合并算法）

Shamos 和 hoey 基于 Voronoi 图的构建，提出了分治算法的思想[40]。Lewis 和 Robinson 则将分治算法的基本思想用于 Delaunay 三角网的构建[41]。该算法的基本思想为：采用递归分割点集，直到每个子集中仅包含三个离散点并生成三角形，将子集构建三角网，然后把子集中的三角网由下而上逐级合并，经优化生成最终的三角网。

在该算法中，涉及三个根本问题：点集划分方法、子三角网生成法以及子集之间三角网的合并。不同的实现方法对这三个问题有不同的处理过程，比较有效的处理方法是 Lee 和 Schachter 提出的算法[42]（如图 3-7），对于给定的 n 个互不重合平面离散点中的数据集 V，分治算法的基本步骤如下：

（1）以横坐标为主、纵坐标为辅，将离散点集 V 按升序排列，即 $(x_i, y_i) < (x_{i+1}, y_{i+1})$，其成立条件为：$x_i \le x_{i+1}, y_i \le y_{i+1}$，然后递归执行以下步骤；

（2）将离散点集 V 分成近似相等的两个子集 V_L 和 V_R，其中 V_L 包括数据集中的前一半，V_R 包括其余部分；

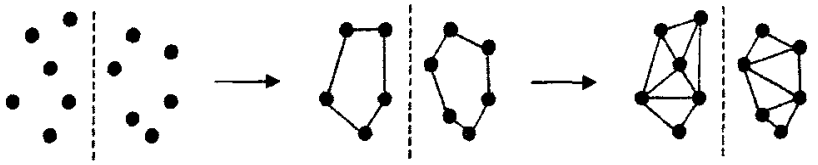
（3）在子集 V_L 和 V_R 中分别生成 Delaunay 三角网，并用 LOP 局部优化算法优化所生成的三角网；

（4）计算 V_L 和 V_R 的凸包，找出连接 V_L 和 V_R 的公共边及其邻接的两个三角形；

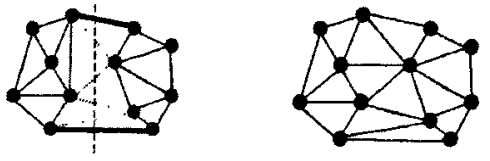
（5）从凸包下部的公共边开始，由底往上合并其邻接三角形。如果某一公共边的一

个端点位于其中某一个三角形的外接圆内，则将此非 Delaunay 边删除，然后应用 Delaunay 法则选择正确的 Delaunay 边；

（6）重复步骤（2）-（5），直到最终的 TIN 建立完毕。



（a）分割离散点集　　（b）建立子集的凸包　　（c）在凸包中分别生成 D-TIN



（d）合并相邻三角形　　（e）LOP 优化生成 D-TIN

图 3-7 分治算法实现过程

分治算法的基本思路是使问题简化，把点集划分到足够小，使其易于生成 Delaunay 三角网，然后从单元子集开始，用 LOP 算法将局部 Delaunay 三角网合并，依此往上最终合并得到全局的三角网。因此，分治算法的合并步骤以同层优先，由下往上的递归方式进行的。

该算法的时间复杂度为 $O(N\log N)$，其中 N 为数据点数，因此该算法执行时间效率高，但是递归运算复杂，需占用较大的系统内存。

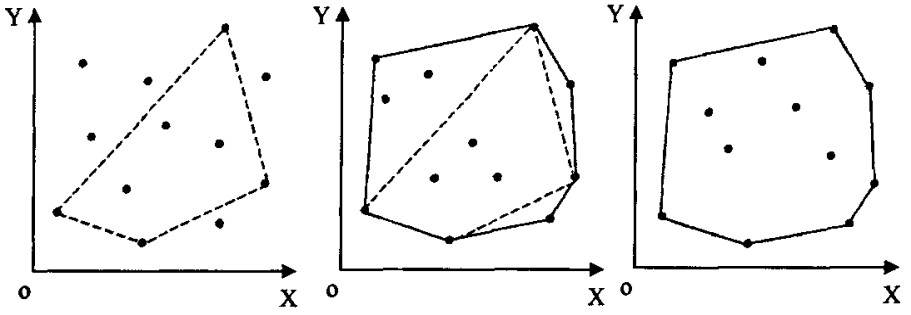
3.2.4 凸包算法

所谓凸包就是由包含二维平面上的点集中所有点的最小凸多边形。在凸包中，连接任意两点的线段必须完全位于凸包多边形内。凸包是数据点的自然极限边界，相当于包围数据点的最短路径。显然，凸包必定是该点集 Delaunay 三角网的外部边界。凸包的产生过程为（如图 3-8）：

（1）建立初始凸包：将 $\min x$、$\min y$、$\max x$、$\max y$ 的点或 $\min(x+y)$、$\min(x-y)$、$\max(x+y)$、$\max(x-y)$ 的点连接起来作为初始凸包，并按逆时针方向存贮于链表中；

（2）修改凸包：对链表中相邻的两点，检查位于其右侧距离最大的点（计算三角形面积即可）。若点存在，或最大距离为零且该点位于上述两点之间，则将该点插入链表中上述两点之间；否则，不插入。重复上述过程，直到链表中的每一条均判断一次，即完成凸包的形成；

（3）生成凸包：以最终形成的凸包代替初始凸包，并将链表写入凸包坐标数据文件。



（a）建立初始凸包　　（b）修改凸包　　（c）生成凸包

图 3-8 凸包的建立过程

基于凸包构建 Delaunay 三角网有多种方法，典型的为前沿推进法和环切边界法。

前沿推进法是以凸包的每一条边作为新生成三角形的起始边（所有三角形的边按照逆时针方向存储），向凸包内逐渐“推进”，找到相应一点满足 Delaunay 构网法则，生成第一层 Delaunay 三角形；然后依次以第一层三角形的各边为起始边，找到相应一点满足 Delaunay 构网法则，生成第二层 Delaunay 三角形……如此进行下去，直到构网结束（每条新边最多参与两次构网）。前沿推进法的基本思想是在凸包范围内，以凸包边界为基线采用三角网生长算法逐层生成 Delaunay 三角网，其实质是结合凸包的三角网生长算法。

环切边界法是在凸包链表中每次寻找一个由相邻两条凸包边组成的三角形，在该三角形的内部和边界上都不包含凸包上任何其他点；将这两条凸包边的公共点删除，得到新的凸包链表。重复以上过程，直到凸包链表中只剩下 3 个离散点为止。将凸包链表中的最后三个点构成一个三角形，该三角形连同已经找到的三角形形成整体，成为凸包三角形剖分结果。环切边界法的基本思想是将凸包范围内的离散点依次代替凸包上的点，缩小包含离散点的凸包范围包，直到最小凸包仅含三个点，并由该三点组成三角形，完成凸包三角形剖分，其实质是结合凸包的逐点插入算法。

3.3 约束离散点构建不规则三角网 TIN 的算法

3.3.1 约束三角网的构建算法回顾

根据实现过程，CDT 的构建算法可以归纳为以下几种：

（1）约束图法。Lee 和 Lin 在 1986 年提出了基于约束图计算 CDT 构造算法[43]。他们首先用 $O(N^2)$ 的时间计算约束数据域的可见性图，然后用 $O(N^2)$ 的时间检测优化可见性图并形成 CDT；

（2）分割-合并算法。Lee 和 Schachte 在 1981 年提出了非约束数据域 Delaunay 三角剖分的分割-合并算法[42]，Chew 将其推广至约束数据域[44]。分割-合并算法虽然执行效率较高（时间复杂度为 $O(N\log N)$），但约束线段的存在使得分割过程的实现比较困难；

（3）加密算法。Boissonnat 在进行 CDT 构造的研究中，将约束数据转换为非约束数

据，即对约束线段按空外接圆规则进行加密，然后对加密后的数据进行非约束数据域的Delaunay 三角剖分[45]。Boissonnat 认为加密过程的时间复杂度为$O(N\log N)$，虽然该算法简单易行，但是加密点的存在不但加大了数据量，而且改变了原来的数据集；

（4）Shell 三角化算法[46]。该算法是 Piegl 和 Richard 在 1993 年提出的，其实质是非约束数据域三角网生长算法的推广。算法由任意约束线段开始，以可见性和空外接圆特性为准则寻找可扩展的第三点。该算法关键是要解决好第三点的查询问题，以提高算法效率。

（5）两步法。这时目前采用较多的一种方法，即首先对约束数据集建立非约束 Delaunay 三角网（初始三角网），然后引入约束线段并调整为约束三角网。根据引入约束条件的过程与方法的差异，“两步法”由许多不同的具体算法：①Bernal 和 Sloan 的算法是在初始三角网过程中不区分约束与非约束点，而在调整过程中使之满足约束条件[47]；利用连续的对角线交换法实现约束线段的嵌入，要求可交换对角线的四边形是严格凸的，而这一点在实际应用中较难满足；②Floriani 算法的核心是简单多边形的 Delaunay 三角剖分[48]，实现过程递归执行，因而更具灵活性。虽然递归过程的执行效率很高，但是内存的开销很大。

3.3.2 约束三角网的边交换迭代算法

该算法是基于已存在的三角网实现的，该三角网称为初始三角剖分网，初始三角剖分网可利用现存的任意一种 Delaunay 三角剖分算法得到，如逐点插入算法、三角网生长算法、分割-合并算法等。初始三角剖分网中可包含或不包含有带约束关系的离散点，但不含约束线段关系。如果在初始三角剖分网中含有带约束关系的离散点，则在约束线段的嵌入过程中，按离散点的点号进行调整；如果不包含，则首先按逐点插入算法插入约束线段的顶点，然后调整约束关系。约束三角网的边交换迭代算法的主要步骤为：

1、对数据域中每一个约束线段，按如下的过程进行处理。设当前处理的约束线段的两个端点为V_i和V_j。

2、检查线段V_iV_j是否已存在于三角网中，如果V_iV_j已经是三角形的一条边，则V_i和V_j的约束关系已满足，返回步骤 1 进行下一条约束线段的处理；如果V_iV_j在三角网中不存在，说明V_i和V_j的约束关系被破坏，这时要找出与V_iV_j相交的所有三角形的边（如图 3-9），并将与V_iV_j相交的三角形的边存储于一个边链表 EList 中。

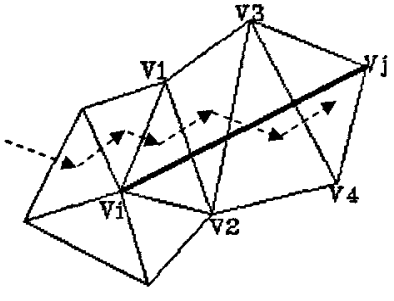


图 3-9 查找与约束边相交的三角形的边

3 、交换相交的边（如图 3-10）。如果边链表 EList 中的边V_kV_l和V_iV_j相交，做如下处理：

（1）如果共用相交边V_kV_l的两个三角形组成的四边形不是严格的凸四边形，则V_kV_l不处理，放回边链表。

（2）如果共用相交边V_kV_l的两个三角形组成的四边形是一个严格的凸四边形，则交换对角线，设新的对角线顶点为V_m和V_n，并同时用两个新的三角形取代原来的两个旧三角形。

（3）检测V_mV_n是否与V_iV_j相交，如果相交，则将V_mV_n放回 EList 中，如果不相交，则将其置于一个新的边链表 NEList 中。

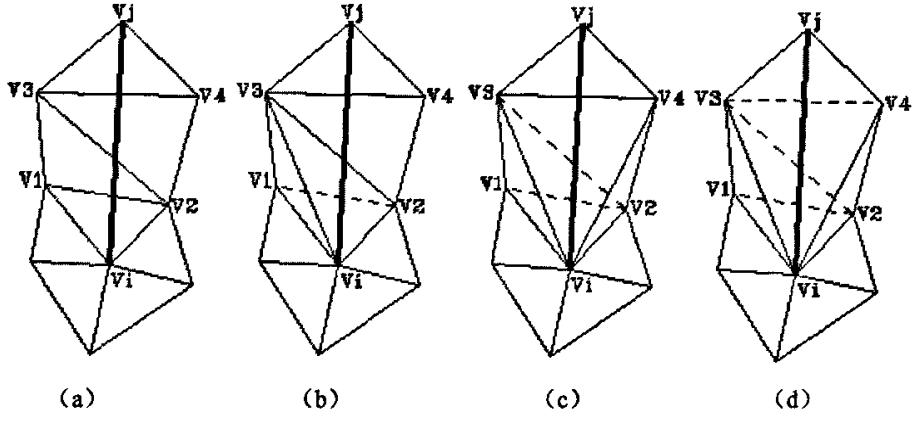


图 3-10 交换相交三角形边

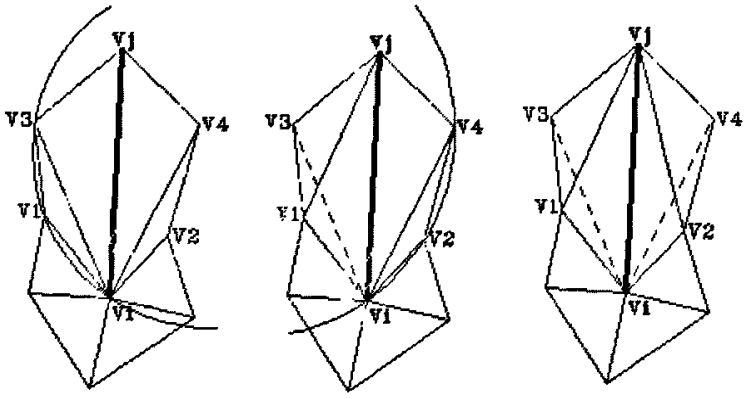
（a）约束条件 ViVj，相交边链表中的边 V1V2、V3V2、V3V4；（b）V1ViV2V3 所组成的四边形严格凸，用 ViV3 替换 V1V2；（c）V3ViV2V4 所组成的四边形严格凸，用 ViV4 替代 V3V2；（d）V3ViV4Vj 所组成的四边形严格凸，用 ViVj 替代 V3V4

4、局部三角网优化处理（如图 3-11）。重复下列过程直到没有边交换为止。

（1）循环处理不相交边链表 NEList 中的每一条边。

（2）设 NEList 中的边为V_kV_l，如果V_kV_l与V_iV_j重合，则退出。

（3）如果共用V_kV_l的两个三角形不满足空外接圆准则，则交换对角线，设交换后的对角线为V_mV_n，并用V_mV_n代替 NELis 中的V_kV_l，同时用交换对角线后的三角形代替原三角形。



(a) (b) (c)

图 3-11 相交边交换后三角形的 LOP 优化处理

(a) Vj 在 ViV3V1 的外接圆中，用 V1Vj 替换 ViV3；(b) Vj 在 ViV2V4 的外接圆中，用 V2Vj 替换 ViV4；(c) 最终三角网，在约束条件 ViVj 下的局部最优 DT 三角网

3.4 基于矢量等高线数据构建 TIN 的一般算法

随着计算机应用技术和 GIS 技术的发展，人们越来越多地使用不规则三角网 DEM 或规则格网 DEM 来模拟和表达地面高程特征。如前所述，采用离散点来构建 TIN 是一种直接的方式，但在很多情况下，已经不再保留原始采样数据，而只有等高线图或数字化的等高线数据。如何利用等高线数据来构建 TIN，尤其是构建高质量的 TIN，就成为 GIS 中的一项重要任务。

从等高线生成 TIN 一般有三种方法，即等高线的离散点直接生成法、加入特征点的 TIN 优化法和以等高线为特征约束的特征线法。

1、等高线的离散点直接生成法

该法是直接将等高线上的点离散化，即按一定间距从等高线上重采样（因此也可称为等高线重采样法），或从 CAD 等软件系统所管理的等高线文件中读取离散点数据，然后基于重采样点（或离散点）构建 D-TIN。由于仅考虑了点而忽略了等高线数据的特殊几何结构，往往会导致奇异的结果，如在谷区、峰区或大拐弯处出现三角形的三个顶点均位于同一条等高线上（即所谓的“平三角形”），或者三角形的某一条边穿越了等高线等。而以上情况都是不允许的。因此，这种直接法在实际工作中很少采用。

2、加人特征点的 TIN 优化法

这种方法实质上是对直接生成法的改进。在等高线离散点构建 TIN 的基础上，采用加入特征点的方式来消除“平三角形”，并按某种准则通过扫描优化方式来消除穿越等高线等不合理现象。特征点的加入可以是手工加入，但在效率、合理性、完整性等方面存在问题；也可以设计一定的算法，由计算机来自动提取特征点，算法的原理主要是基于原始等高线的拓扑关系。

3、以等高线为特征约束的特征线法

该法的核心思想是：每一条等高线必须当作特征线或结构线，而且线上不能有三角形生成，即三角形不能跨越等高线。

无论是基于等高线图，还是基于数字化的等高线数据，以等高线为特征约束的特征线法均有一个数据预处理的过程。预处理的主要内容包括：数据数字化、离散化，离散数据点分布均匀化，地形特征点（即地面曲率变化点和坡度变化点，如峰点、谷点、鞍点、变坡点等）与特征线（山脊线，山谷线或流水线等）的加入，以及地形突变线（断层、陡坎、悬崖等）与突变区（陷落柱、岩溶柱、孤峰、洼地等）的加入等。

根据是否加入地形特征点与特征线、以及是否加入地形突变线与突变区等，可以将基于等高线构建 TIN 的算法分为有约束和无约束两种基本模式。显然，以等高线为特征约束的特征线法要求所构建的三角形不可跨越等高线，即等高线本身就是约束条件。因此，从本质上说以等高线为特征约束的特征线法属于约束条件下离散点的三角剖分。

3.5 建立顾及地形特征的不规则三角网 DEM 的实现步骤

以等高线和地性线为特征约束条件建立不规则三角网，其基本思想是：在建立等高线拓扑关系的基础上，以等高线为约束边，对等高线逐层构建 D-TIN。即从最高层等高线开始，仅在相邻两层等高线之间构建三角网。这样可以避免三角网穿越等高线的情况发生。加入地性线局部优化生成的三角网消除“平三角形”。本文采用三角网生长算法构建等高线间的三角网，对于出现“平三角形”的地方加入地性线数据修正。

3.5.1 等高线数据的预处理及地性线提取

如前文 2.3 节所述，等高线数据的预处理及地性线自动提取在这里不再重述。

3.5.2 不规则三角网 TIN 的数据结构

在不规则三角网 TIN 模型中，基本的结构元素有三角形的顶点、边和面。因此，不规则三角网 TIN 的数据结构包括：TIN 的点结构、TIN 的边结构和 TIN 的面结构。

TIN 三角形顶点的数据结构：

```
class CMapPoint3D:public CObject
{
public:
    double x;
    double y;
    double z;
    ……
};
```

TIN 三角形边的数据结构：

```
class CTinEdgeElement:public CObject
{
public:
    long Vertex1;
    long Vertex2;//记录构成三角形边的两个顶点的标号
    long LeftTrianglar;
    long RightTrianglar;//记录左右两侧的三角形标号
    int EdgeLI;//记录边为所在左边三角形的第 I 条边
    int EdgeRI;//记录边为所在右边三角形的第 I 条边
    ……
};
```

TIN 三角形面（一个三角形）的数据结构：

```
class CTinTrianglarElement:public CObject
{
public:
    long Vertex[3];//记录构成三角形的三个顶点的标号
    long Edge[3];//记录三角形三边的编号
    long Trianglar[3];//记录顶点对应边的三角形标号（即邻接三角形）
    ……
};
```

3.5.3 建立初始 D-TIN

对于等高线数据来说，建立 TIN 的最简单的方法就是将其看作是约束的离散点直接建立 TIN，等高线数据即是约束条件。在建立等高线空间拓扑关系的基础上，由最高层次的等高线开始，每次仅考虑相邻两个层次的等高线进行构网，即将相邻层次等高线上的点看作离散点，直接建立 Delaunay 三角网。具体过程如下：

（1）对最高层次的等高线进行构网。纳入扩展三角形搜索范围的数据只有该条等高线数据。如果该层有并列关系的多条等高线，则对每条等高线分别构网。

（2）加入第$i+1$层的等高线数据，对第i层等高线数据构成的三角网进行扩展。纳入搜索范围的数据包括：第i层等高线数据和第$i+1$层等高线数据。如果第$i+1$层等高线中有并列关系的多条等高线，那么根据其拓扑关系，仅纳入具有包含关系的等高线数据进行扩展。

在相邻两层等高线之间构网完毕后转入下一层三角网的扩展。

重复第（2）步，直到所有等高线作为三角形边加入到 TIN 网中（如图 3-12）。注意，在建立等高线拓扑关系时，为了形成闭合等高线而加入的区域边界点（区域外接矩形的四个角点）坐标，不参加三角网构网。

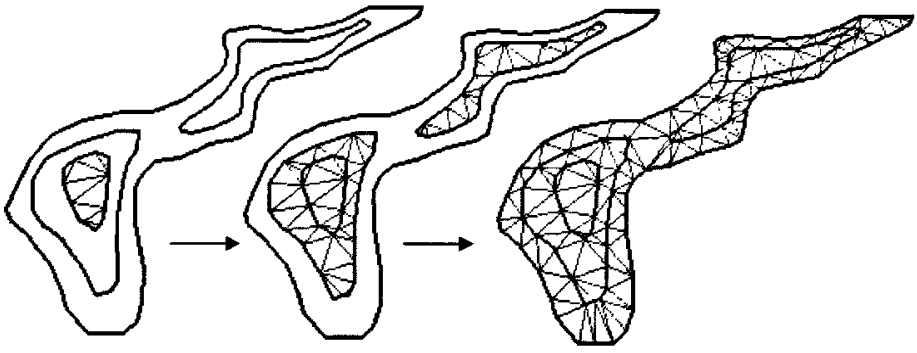


图 3-12 建立等高线（一）间的 Delaunay 三角网（一）

3.5.4 加入地性线修改“平三角形”

在建立的初始 Delaunay 三角网中，由于是逐层建立三角网，以等高线作为限制边，有效地避免了三角形穿越等高线的问题，但是在山脊、山谷、鞍部等地方出现了“平三角形”，这时需要加入地性线来修改“平三角形”。

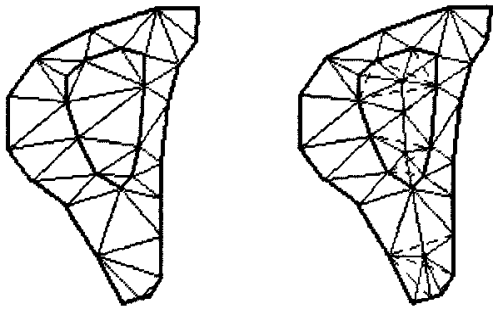


图 3-13 加入地性线修改“平三角形”

具体实现过程为：在“平三角形”出现的地方，匹配地性线，判断地性线出现在哪个三角形内，然后按照约束三角网的边交换迭代算法交换地性线限制边，将地性线上的特征点加入到三角网中构网，最终消除“平三角形”（如图 3-13）。

3.6 几点改进

3.6.1 数据索引分块

本章对原始数据区域进行格网划分，建立分块索引，缩小了“第三点”的搜索范围，提高构网速度。分块格网大小 *BlockInterval* 可以按照实际需要确定，也可以按照经验公式（3-3）确定：

$$BlockInterval = \sqrt{\frac{A}{\sqrt{N}}} \tag{3-3}$$

其中，A 为采样区域的面积，计算公式为

$$A = \Delta x \times \Delta y$$

$$\left.\begin{aligned} \Delta x &= x_{\max} - x_{\min} \\ \Delta y &= y_{\max} - y_{\min} \\ x_{\max} &= \max\{x_1, x_2, x_3, \cdots, x_n\} \\ x_{\min} &= \min\{x_1, x_2, x_3, \cdots, x_n\} \\ y_{\max} &= \max\{y_1, y_2, y_3, \cdots, y_n\} \\ y_{\min} &= \min\{y_1, y_2, y_3, \cdots, y_n\} \end{aligned}\right\} \tag{3-4}$$

N 为整个数据域内的采样点总点数（则得到的每个格网中的点数为 $\sqrt{N}$ ）。

原始数据格网划分后，需要把原始数据逐个扫描依次，按下式计算数据点所在的格网单元（第 i 行第 j 列），并把数据点放入对应的格网单元中。

$$\left.\begin{aligned} i &= (\text{int})((y_k - y_{\min}) / BlockInterval) \\ j &= (\text{int})((x_k - x_{\min}) / BlockInterval) \end{aligned}\right\} \tag{3-5}$$

构建不规则三角网时，除了需要对离散点建立格网索引外，生成的三角形和每个三角形的三条边都需要建立格网索引，确定三角形所在格网即是确定其中心点所在的格网，三角形中心点计算公式为：

$$\left.\begin{aligned} x_c &= (x_1 + x_2 + x_3)/3 \\ y_c &= (y_1 + y_2 + y_3)/3 \end{aligned}\right\} \tag{3-6}$$

确定三角形边所在格网即是计算该边的中点所在格网。

3.6.2 点在三角形中的查找

一般将点在三角形中的查找算法称为三角形的定位问题。解决这个问题最直接的方法就是利用计算几何中点在多边形（此处为三角形）中的测试方法。本章结合索引定位缩小定位范围，再利用三角形面积公式判断点相对于三角形的方位来查找点位于哪个三角形中。具体方法如下：

按照区域分块，检索与该点位于同一格网并且点与中心点距离最近的三角形。设该三角形 $\Delta V_1V_2V_3$ 的三个顶点坐标分别为 $V_1(x_1, y_1)$、$V_2(x_1, y_2)$、$V_3(x_3, y_3)$，任意一点坐标为 $P(x, y)$，则在 $\Delta V_1V_2V_3$ 内的面积坐标 L_1、L_2、L_3 定义为：

$$L_1 = A_1 / A，\ L_2 = A_2 / A，\ L_3 = A_3 / A \tag{3-7}$$

其中，A 表示 $\Delta V_1V_2V_3$ 的面积，A_1、A_2、A_3 分别表示 ΔV_2V_3P、ΔV_3V_1P、ΔV_1V_2P 的面积，由三角形面积公式得：

$$\left.\begin{aligned} L_1 &= [(x_3 - x_2)(y - y_2) - (x - x_2)(y_3 - y_2)] / A \\ L_2 &= [(x_1 - x_3)(y - y_3) - (x - x_3)(y_1 - y_3)] / A \\ L_3 &= [(x_2 - x_1)(y - y_1) - (x - x_1)(y_2 - y_1)] / A \end{aligned}\right\} \tag{3-8}$$

设三角形顶点逆时针排列，则当 P 在三角形中时，所有的面积坐标分量均大于零，即 $L_1 > 0$、

$L_2>0$、$L_3>0$；若P不在三角形中，则至少有一个面积坐标分量小于零，其关系为：如果P在顶点V_i对边的外侧，则面积坐标分量$L_i<0$。在不规则三角网建立拓扑关系的前提下，利用面积坐标分量正负值的判断，可以得到点P相对于三角形的方位，然后检索邻接三角形，重复判断过程直到三个面积坐标分量均大于零为止。若点在三角形边上，即面积坐标分量为零，则认为在该三角形内。

在实际计算中，并不计算三角形面积坐标，仅得到正负号即可。则P的面积坐标L_1、L_2、L_3简化为：

$$\left.\begin{aligned} L_1&=(x_3-x_2)(y-y_2)-(x-x_2)(y_3-y_2)\\ L_2&=(x_1-x_3)(y-y_3)-(x-x_3)(y_1-y_3)\\ L_3&=(x_2-x_1)(y-y_1)-(x-x_1)(y_2-y_1)\end{aligned}\right\} \tag{3-9}$$

该算法具有较高的定位效率，评价复杂度为$O(N^{1/4})$。

3.7 本章小结

本章从不规则三角网的基础理论出发，详细介绍了标准Delaunay三角网和带约束条件的Delaunay三角网的定义、基本特性以及常用的构建算法；设计实现了基于矢量等高线数据的不规则三角网的构建，其基本思想是在建立等高线拓扑关系的基础上，结合三角网生长算法将等高线数据逐层添加到三角网中，建立初始Delaunay三角网，然后利用约束三角网的边交换迭代算法，用地性线修改初始Delaunay三角网中出现的“平三角形”。

第四章 不规则三角网 TIN 到规则格网 DEM 的转换

不规则三角网 TIN 是采用离散点构网的方式进行地形表面重建的，由连续的相互连接的三角面组成，适合任意复杂地形模拟，而且易于表达拓扑关系、任意点内插方便、内插速度快；而基于规则格网 RGs 的 DEM 往往不是地形表面的原始采样点，而是通过原始数据插值得到，但是规则格网 DEM 也具有上述特点，并且因其数据结构简单，便于存取、处理和地形分析等原因，在实际计算机数据处理中比 TIN 的应用更为广泛。因此，从 TIN 建立高质量规则格网 DEM 一直是一项重要的研究内容。

4.1 不规则三角网 TIN 到规则格网 DEM 的转换

在建立 TIN 后，可以由 TIN 内插该区域内任意一点的高程。由 TIN 内插生成规则格网 DEM 有很多算法，但大多数算法均将三角形视为平面，按线性内插方法计算。

TIN 到规则格网 DEM 转换的基本原理是：在由原始离散点构成的 TIN 三角网的基础上，利用规则格网点集对应的三角网，计算当前格网节点落在哪个三角形中，在此三角形确定的平面上内插出格网点的高程值。主要步骤包括检索格网点和内插格网点高程两部分。

1、检索格网点所在三角形

对于给定平面坐标 $P(x,y)$ 的格网点，要基于 TIN 内插该点的高程，首先要确定该点落在哪一个三角形中。通常的方法是依次判断格网点 $P(x,y)$ 与所在分块中每个三角形的位置关系，直到找到其所在三角形为止。这种方法的本质是固定格网点坐标，动态检索包含该点的三角形。该方法工作量较大，内插速度较慢。本文对检索方法进行了改进，即固定三角形，动态检索三角形内包含的格网点，具体方法是依次取出每个三角形，并确定三角形的外接矩形；计算外接矩形范围内包含的格网点坐标，然后判断这些格网点哪些落在该三角形中，如图 4-1。

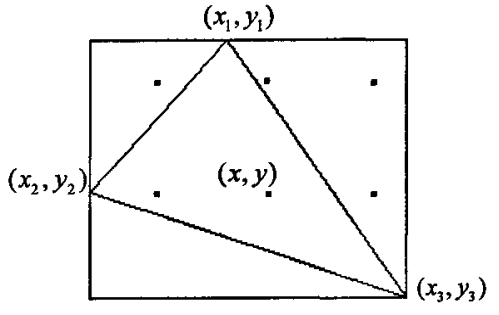


图 4-1 判断三角形内包含的格网点坐标

设当前三角形顶点坐标分别为 (x_1,y_1)、(x_2,y_2)、(x_3,y_3)，判断格网点 $P(x,y)$ 是否落在此三角形内的矩阵方法[49]：

$$D=\begin{vmatrix} x_i & y_i & 1 \\ x_j & y_j & 1 \\ x & y & 1 \end{vmatrix},\ (j=i+1;i=3,\text{则}j=1) \tag{4-1}$$

当$D\geq 0$时，则P点落在三角形内。

2、内插格网点高程

设三角形所在的平面方程为

$$Ax+By+Cz+D=0 \tag{4-2}$$

若P点所在的三角形三顶点坐标分别为(x_1,y_1,z_1)、(x_2,y_2,z_2)、(x_3,y_3,z_3)，则上式中

$$A=(y_1-y_3)(z_2-z_3)-(y_2-y_3)(z_1-z_3) \tag{4-3}$$

$$B=(x_2-x_3)(z_1-z_3)-(x_1-x_3)(z_2-z_3) \tag{4-4}$$

$$C=(x_1-x_3)(y_2-y_3)-(x_2-x_3)(y_1-y_3) \tag{4-5}$$

$$D=-(Ax_3+By_3+Cz_3) \tag{4-6}$$

则格网点P的高程值为

$$z=-(Ax+By+D)/C \tag{4-7}$$

其中(x,y)为格网点的坐标。

在整个区域上，由于相邻三角形的公共边上对应有两公共节点，两点决定一条直线，而这直线为相邻两平面的交线，所以能保证连接处连续。这样的算法实现简单，但生成的数据质量不够高。仅能保证地面连续而不能保证光滑，具体表现在地形显示中，两片三角形公共边处容易出现异常的地形棱角，如果是两片狭长三角形或者当两片三角形的二面角较小时，上述缺陷尤其突出。这既影响了显示效果，也与实际地形不符。

4.2 不规则三角网 TIN 到规则格网 DEM 转换的优化

为了消除两片三角形相接处的棱角，Preusser（1984）曾提出了 C 连续双 5 次多项式插值方法[50]。但是该算法复杂，不便应用。王家耀（2001）则基于所定义的光滑函数，提出了一种一种在两片三角形公共边附近一定区域内，由 TIN 到规则格网 DEM 数据光滑处理的内插算法[6][51][52]。经这种方法计算出的网格点的高程能保证表面光滑。现简单介绍如下。

1、磨光函数与磨光宽度

磨光函数的基本思想是通过对一个函数积分后再取差商，以得到一个与原函数近似的函数。因此，不妨对函数$f(x)$作一次以h为步长的对称差商：

$$\frac{\delta_h f(x)}{h}=\frac{1}{h}\left[f(x+\frac{h}{2})-f(x-\frac{h}{2})\right]$$

$$=\frac{1}{2h}\left[(x+\frac{h}{2})_+^2-(x-\frac{h}{2})_+^2\right]$$

$$=\begin{cases}x, & x>\dfrac{h}{2}\\ \dfrac{1}{2h}(x+\dfrac{h}{2})^2, & -\dfrac{h}{2}\le x\le\dfrac{h}{2}\\ 0, & x<-\dfrac{h}{2}\end{cases} \tag{4-8}$$

函数（4-8）与$y=x_+$很相似，仅在$-h/2\le x\le h/2$这一段上有差异：

$$\frac{1}{2h}(x+\frac{h}{2})^2-x_+$$

这一差异是与h同阶的量，且在$x=-h/2$和$x=h/2$处分别切于原折线$y=x_+$，两者的图形比较见图 4-2。

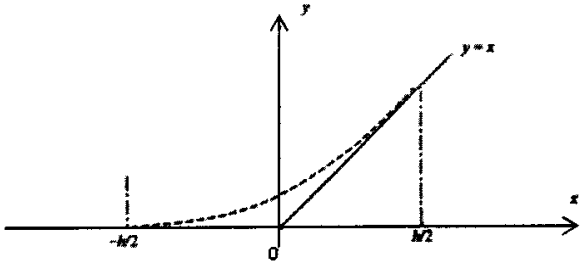


图 4-2 差商函数原理

这种先积分一次再实行差商所得的函数称为磨光函数，它和原函数有较好的近似性质，且提高了光滑性。其一般性定义为：

定义　设有函数$f(x)$，对函数$f(x)$作一次不定积分后，再作一次以h为步长的对称差商，所得的新函数

$$f_1(x)=\frac{\delta_h}{h}\int f(t)dt=\frac{1}{h}\int_{x-h/2}^{x+h/2}f(t)dt \tag{4-9}$$

为原来函数$f(x)$的一次磨光函数，即对函数$f(x)$进行了一次磨光，h称为磨光宽。随着磨光宽度$h\to 0$，磨光函数$f_1(x)$趋向于原来的函数$f(x)$。

2、两直线的磨光函数

如图 4-3 所示，设折线L的方程为:

$$L:y=\begin{cases}a_1x,\cdots,x>0\\ a_2x,\cdots,x<0\end{cases} \tag{4-10}$$

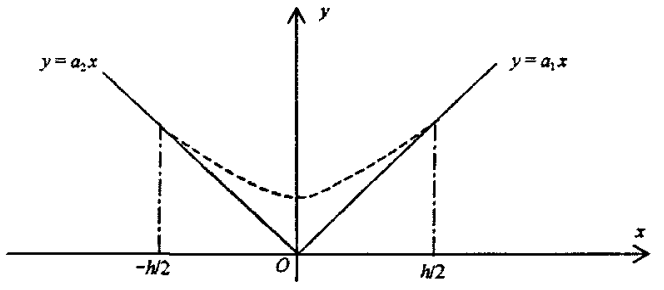


图 4-3 折线磨光

对折线 L 进行磨光，经积分运算求得其磨光函数为:

$$f_1(x)=\begin{cases} a_1x, & x>\dfrac{h}{2} \\ \dfrac{x^2}{2h}(a_1-a_2)+\dfrac{x}{2}(a_1+a_2)+\dfrac{h}{8}(a_1-a_2), & -\dfrac{h}{2}\le x\le\dfrac{h}{2} \\ a_2x, & x<-\dfrac{h}{2} \end{cases} \tag{4-11}$$

3、两片三角形接边处磨光

如图 4-4 所示，设 ΔABC 和 ΔABD 为两个以 AB 为公共边的空间三角形，DD' 和 CC' 分别垂直于 AB，D'、C' 为垂足。设 A、B、C、D 的坐标分别为 (x_a,y_a,z_a)、(x_b,y_b,z_b)、(x_c,y_c,z_c)、(x_d,y_d,z_d)。判断两个三角形是否在同一平面上，若不在，则由这两个相邻三角形内插规则格网点的磨光过程包括空间变换、直线磨光和逆变换，具体步骤如下:

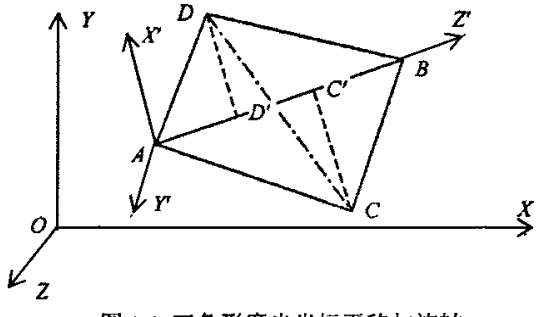


图 4-4 三角形磨光坐标平移与旋转

（1）空间变换

为便于计算和分析，将上述三角形作空间变换，使 AB 平行于 Z 轴，且 A 与原点重合。因此，需要经过平移和旋转变换。

首先平移：按下式将坐标原点移至 A 点，

$$\begin{cases} x' = x - x_a \\ y' = y - y_a \\ z' = z - z_a \end{cases} \tag{4-12}$$

然后旋转：以点 A 为原点，AB 为 z' 轴，x' 轴位于 ΔABD 内，y' 轴垂直于 ΔABD。设原始坐标系为 $O-XYZ$；平移旋转后的坐标系为 $A-X'Y'Z'$。令 $A-X'Y'Z'$ 中 X'、Y'、Z' 轴关于 $O-XYZ$ 的方向角如表 3-1 所示。

表 3-1　坐标平移旋转后的方向角

	Ox	Oy	Oz
Ox'	α_1	β_1	γ_1
Oy'	α_2	β_2	γ_2
Oz'	α_3	β_3	γ_3

设任意点 P 在 $O-XYZ$ 和 $A-X'Y'Z'$ 中的坐标分别为 (x,y,z) 和 (x',y',z')，则它们的变换公式为：

正变换：

$$\begin{cases} x' = x\cos\alpha_1 + y\cos\beta_1 + z\cos\gamma_1 - x_a \\ y' = x\cos\alpha_2 + y\cos\beta_2 + z\cos\gamma_2 - y_a \\ z' = x\cos\alpha_3 + y\cos\beta_3 + z\cos\gamma_3 - z_a \end{cases} \tag{4-13}$$

逆变换：

$$\begin{cases} x = x'\cos\alpha_1 + y'\cos\beta_1 + z'\cos\gamma_1 + x_a \\ y = x'\cos\alpha_2 + y'\cos\beta_2 + z'\cos\gamma_2 + y_a \\ z = x'\cos\alpha_3 + y'\cos\beta_3 + z'\cos\gamma_3 + z_a \end{cases} \tag{4-14}$$

（2）直线磨光

显然，ΔABC 和 ΔABD 在 $X'AY'$ 面上的投影均为一条交于原点 A 的直线。设 ΔABC 和 ΔABD 的投影线关于 X' 轴的斜率分别为 a_1 和 a_2。可知，$a_1 = 0$，如图 4-5 所示。

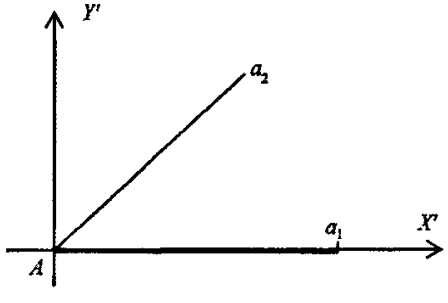


图 4-5 三角形投影线及其斜率

为适用式（4-11）的磨光函数，图 4-5 须与图 4-3 对应。令 $X'AY'$ 绕 Z' 轴旋转一个角度 θ，使 Y'' 恰好位于两条投影线的角平分线上，如图 4-6 所示。

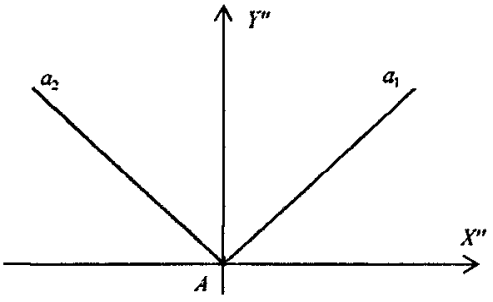


图 4-6 三角形投影线的旋转处理

设任意点 P 在 $X'AY'$ 和 $X''AY''$ 中的坐标分别为 (x',y',z') 和 (x'',y'',z'')，则它们的变换公式为：

正变换：

$$\begin{cases} x'' = y'\sin\theta + x'\cos\theta \\ y'' = y'\cos\theta - x'\sin\theta \\ z'' = z' \end{cases} \tag{4-15}$$

逆变换：

$$\begin{cases} x' = x''\cos\theta - y''\sin\theta \\ y' = x''\sin\theta + y''\cos\theta \\ z' = z'' \end{cases} \tag{4-16}$$

于是两条投影线的斜率 $a_1 = -a_2$，式（4-11）的磨光函数可简化为：

$$f_1(x) = \begin{cases} a_1 x, & x > \dfrac{h}{2} \\ \dfrac{x^2}{h}|a_1| + \dfrac{h}{4}|a_1|, & -\dfrac{h}{2} \le x \le \dfrac{h}{2} \\ a_2 x, & x < -\dfrac{h}{2} \end{cases} \tag{4-17}$$

选取合适的磨光宽度 h，即可以对两条投影线进行磨光。

（3）逆变换

首先按平面方式内插出规则格网点，然后根据公式（4-13）、（4-15）和（4-17），可以对两个三角形上的所有格网点进行磨光处理。之后，根据公式（4-16）、（4-14）进行逆变换回到原始坐标系，则两片三角形的公共边附近被磨光，即可以得到一个光滑的格网曲面。

4、磨光内插步骤和算法分析

由不规则三角网 TIN 到规则格网 DEM 的磨光内插的具体步骤如下:

（1）建立每一个三角形与周边三角形的拓扑关系；

（2）确定规则格网 DEM 数据的横纵方向的步长及磨光宽度；

（3）将 TIN 数据中的每个三角形按其重心分割为三个子三角形，找出具有公共边的所有子三角形对偶。其目的是将三角形分成三个区域，在每个区域内利用拓扑关系找出与另一个有公共边的三角形的子三角形，磨光这两个子三角形的公共边；

（4）按规则格网 DEM 的横纵方向的步长，求出落在各子三角形中的所有格网点(x,y)数据，并将三角形视为一个平面，按线性内插原理求出各格网点的高程值z；

（5）按公式（4-13）、(4-15）和（4-17），在子三角形对偶中进行磨光计算；

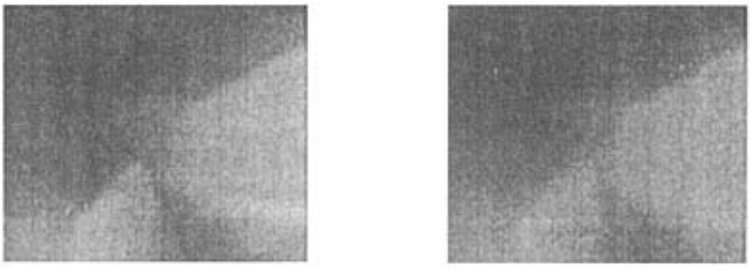
（6）按公式（4-16）、(4-14），对磨光计算结果进行逆变换，即完成 TIN 数据到规则格网 DEM 的转换和磨光内插，并求出磨光后的高程值。

重复步骤（3）-（6），直至完成 TIN 数据到规则格网 DEM 数据的转换和磨光内插。

使用上述方法进行 TIN 数据到规则格网 DEM 数据的转换和磨光内插的关键，是选择合适的磨光宽度。由于磨光宽度很难用一定的规律进行控制，所以在磨光计算时，为得到较好的磨光效果，且保留 TIN 的基本地形特征，就必须用不同的磨光宽度进行试探。可以针对不同的区域和地形特征设置不同的磨光宽度。比如，可令当两个三角形的夹角小于某一角度时，磨光宽度等于预设宽度的两倍。此外，当格网点落在三角形顶点时，可以分别在两组以上的子三角形对偶中进行磨光内插。如果导致高程结果不一致，对此取其平均值即可。

4.3 两种内插方法的结果比较

图 4-7(a)是线性内插所得规则格网 DEM 数据，图 4-7（b）则是用磨光内插方法得到的规则格网 DEM 数据。可以看出图 4-7(a)中有明显的棱角存在，而图 4-7(b)中没有。由此可见磨光内插算法明显地提高了显示效果，更能真实地表现地貌形态。



(a)线性内插法　　(b)磨光函数内插法

图 4-7 两种内插方法生成的格网 DEM 结果比较

4.4 本章小结

在实际应用中，规则格网 DEM 数据比不规则三角网 TIN 数据的应用更为广泛，因此本章介绍了由不规则三角网 TIN 到规则格网 DEM 的转换方法。采用线性内插方法生成的规则格网 DEM 数据质量不高，在两片三角形接边处不够光滑。为了保证规则格网 DEM 的内插质量，采用了一种在两片三角形公共边附近一定区域内，由不规则三角网 TIN 数据到规则格网 DEM 数据光滑处理的内插算法。该算法能有效消除相邻两片三角形相接处的棱角现象，更逼真地表现地形。

第五章 矢量等高线数据的自动追踪

矢量等高线数据的自动追踪通常都是基于不规则三角网DEM和规则格网DEM数据完成的，主要包括：起始等值点定位、等值点高程值的内插计算、等值点追踪和等值线光滑等步骤。基本思想是以具有拓扑关系的多边形数据（比如三角形和矩形）为基础，先定位起始等值点，由“出点既是入点”查找等值线前进路径，追踪至等值线闭合或者是到边界为止。不规则三角网 DEM 和规则格网 DEM 都是具有拓扑关系的多边形数据，因此基于这两种模型数据的等高线追踪算法是可以通用的，只要修改记录多边形的数据结构即可。下面仅介绍基于不规则三角网 DEM 的等高线自动追踪算法。

5.1 等值点内插方法及其平面位置确定

等值点的内插都是在三角形的边上进行的，三角形的各边上是否有等值点的情形有以下几种（如图 5-1）：

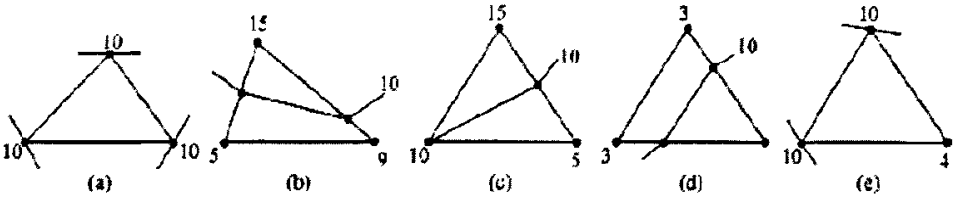


图 5-1 三角形内插等值点的各种情形

（1）若三角形的三个顶点的高程相等，则三角形的边上无等值点。如果三个顶点的高程等于等值线的高程，即三个顶点就是等值点，由于顶点可能被两个以上三角形共用，所以在这里将不考虑这种情况，如图 5-1(a)所示。

（2）若三角形三个顶点高程值不相等，那么，当每条边的二个端点高程满足：

$(z-z_1)(z-z_2)\geq 0$时，则该边无等值点，否则必有等值点；

$(z-z_1)(z-z_3)\geq 0$时，则该边无等值点，否则必有等值点；

$(z-z_2)(z-z_3)\geq 0$时，则该边无等值点，否则必有等值点。

但是，一个三角形不可能三条边上都有等值点，只可能在两条边上有等值点，即只要在一条边上有等值点，在其余两边上必有一边存在等值点。这是最常见的现象，如图 5-1(b)所示。

（3）若三角形三个顶点高程不等，而其中有一个顶点高程等于等值线高程，则如果该三角形还存在一个等值点，必须是位于该顶点的对边上，如图 5-1(c)所示。凡是一个三角形只有两个等值点的情况，都必须加以考虑。

（4）若三角形有两个顶点高程相等，该三角形如果存在等值点，必位于靠近第三点的两边上，如图 5-1(d)或者该相等的两顶点就是等值点，如图 5-1(e)。后一种情况将不在本

三角形中考虑。

在确定三角形边上存在等值点后，用内插法求得等值点的坐标，其线性插值公式（5-1）为：

$$\begin{cases} x_{B_1} = x_1 + \dfrac{x_2 - x_1}{z_2 - z_1}(z - z_1) \\ y_{B_1} = y_1 + \dfrac{y_2 - y_1}{z_2 - z_1}(z - z_1) \\ x_{B_2} = x_2 + \dfrac{x_3 - x_2}{z_3 - z_2}(z - z_2) \\ y_{B_2} = y_2 + \dfrac{y_3 - y_2}{z_3 - z_2}(z - z_2) \end{cases} \tag{5-1}$$

式中：x_1、y_1、z_1、x_2、y_2、z_2、x_3、y_3、z_3分别为三角形三顶点坐标，z为等高线值。

5.2 等值点的自动追踪

具有z值的等值点往往组成一条以上的等值线。它们可能是闭合曲线也可能是非闭合曲线，无论是哪种曲线，都必须首先找出起始等值点，该点被称为线头。闭合等值线一定位于数据区域内部，其内部三角形边上任意一个等值点均可作为线头和线尾。非闭合等值线一定开始于数据区域的边界又结束于边界，所以起始等值点和终止等值点一定位于边界三角形的最外边上。

如图 5-2，a、g两个等值点是等值线的线头和线尾，其数学特征判别如下：在任意三角形中如果存在两个等值点，其中一点必然是等值线通过该三角形的入口点，另一个是等值线走出该三角形的出口点。如果等值点不是位于边界之上（如图 5-2 中b、c、d、e、f点），则该点既是前一个三角形的出口点，又是下一个相邻三角形的入口点；如果该点是位于边界上的等值点，它只能是该三角形的入口点或者是出口点，不可能同时是入口点又是出口点。

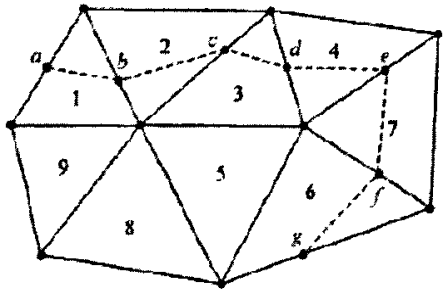


图 5-2 寻找开等值线的起始点和终止点

基于上述分析，追踪等值点的具体步骤如下：

（1）首先按三角形的序号找出有等值点的三角形T，判断等值点存在情况，计算其入

口点t_{in}和出口点t_{out}，并记录其位于所在三角形的边号；

（2）根据三角网拓扑关系，判断出口点的位置，如果出口点所在边的邻接三角形标号T_{out}为空，则表示该出口点位于边界上；如果邻接三角形标号T_{out}不为空，则记该出口点为相邻三角形等值线入口点，计算邻接三角形内的等值线出口点，并将计算结果顺序记入等值线链表。重复判断过程，直到出口点所在边的邻接三角形标号为空，即找到位于边界上的出口点。如果出口点t_{out}与三角形T的入口点t_{in}坐标相同，即首尾等值点重合，则表明该等值线为闭合等值线，结束本次查找。

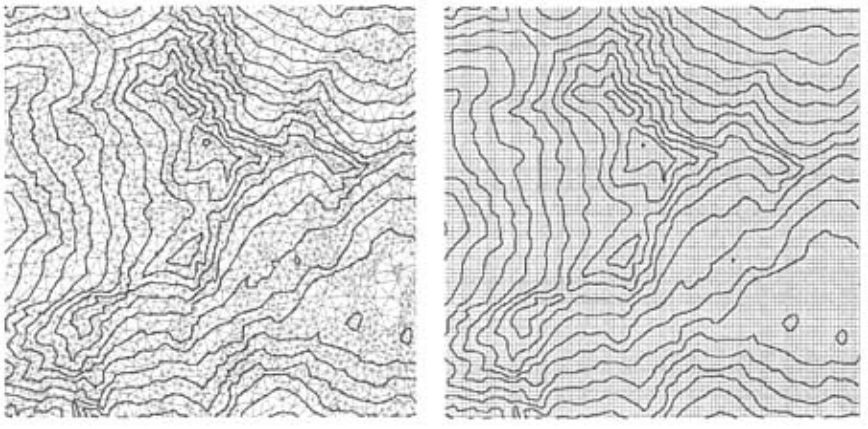
（3）沿三角形T的出口点t_{out}寻找到边界等值点之后，回到三角形T，以该三角形的入口点t_{in}为起点，寻找进入该三角形的找邻接三角形，倒序查找等值点，将得到的结果依次插入链表头，直至到达边界等值点为止，完成该条等值线的追踪过程。

（4）完成一条给定高程值的等值线追踪后，即调用曲线光滑子程序，把离散等值点连接成光滑曲线。

（5）重复以上过程，直到完成所有三角形的查询，即完成等高线的自动追踪。

5.3 基于不规则三角网 DEM 和规则格网 DEM 追踪等高线的实现

图 5-3(a)是基于不规则三角网 DEM 追踪得到的等高线数据，图 5-3（b）则是基于规则格网 DEM 追踪得到的等高线数据。可以看出基于 TIN 的等高线追踪结果精度高，更能真实地表现地貌形态，规则格网越密精度越高，但是效率会越低。



(a)基于 TIN 追踪等高线　　(b)基于规则格网追踪等高线

图 5-3 两种追踪方法的结果比较

5.4 本章小结

不规则三角网 DEM 和规则格网 DEM 能都精确的模拟现实地形，但是矢量等高线图更容易观察地形的变化。本章介绍了在建立拓扑关系的基础上，自动追踪等高线的方法，并比较了基于两种数字高程模型追踪等高线的方法和结果。基于 TIN 的等高线追踪结果精度更高，更能真实地表现地貌形态。

第六章 实验结果及分析总结

本文所做研究实现的主要功能包括：基于等高线数据的地性线自动提取、规则格网 DEM 的构建、不规则三角网 DEM 的构建、等高线的自动跟踪。

操作系统：Windows XP

开发的语言环境：Visual C++ 6.0

硬件环境：CPU AMD500+，内存 512 兆，硬盘 80G

6.1 地性线自动提取算法的实验结果及分析总结

6.1.1 地性线自动提取算法的实验结果

本文实验所用等高线数据是由全数字摄影测量工作站编辑过的入库数据，并由工作站挂接的 MicroStation 编辑提取，原始数据文件均在立体影像上经过匹配检查。本文以具有拓扑关系的等高线数据为基础，依照拐点对等高线进行分割，其结果如图 6-1 所示。

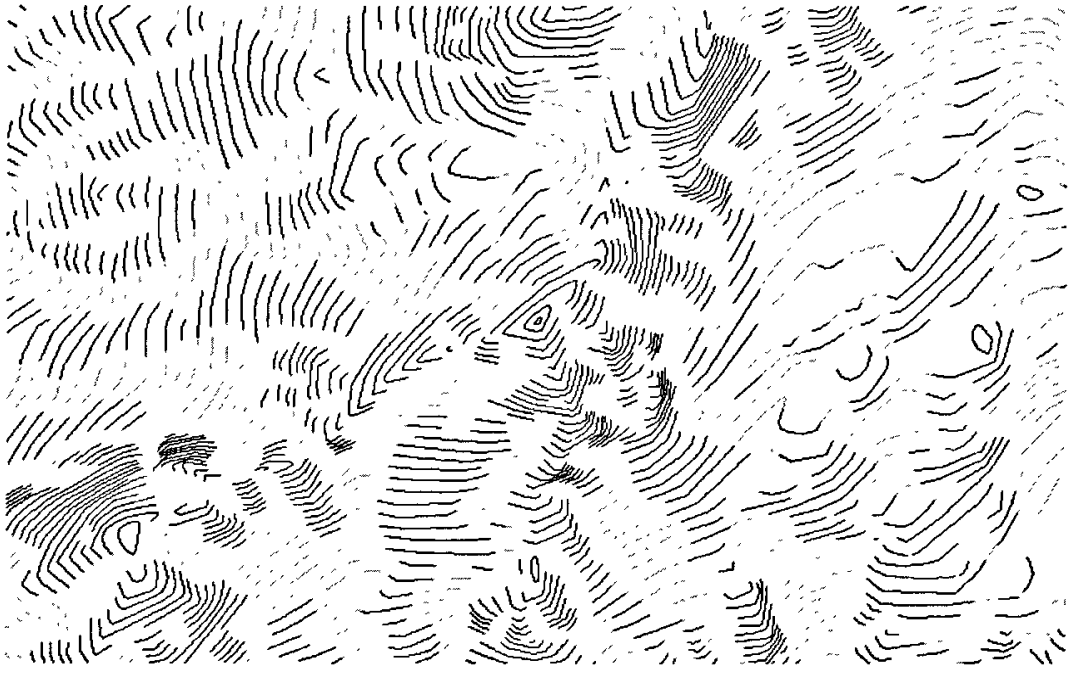
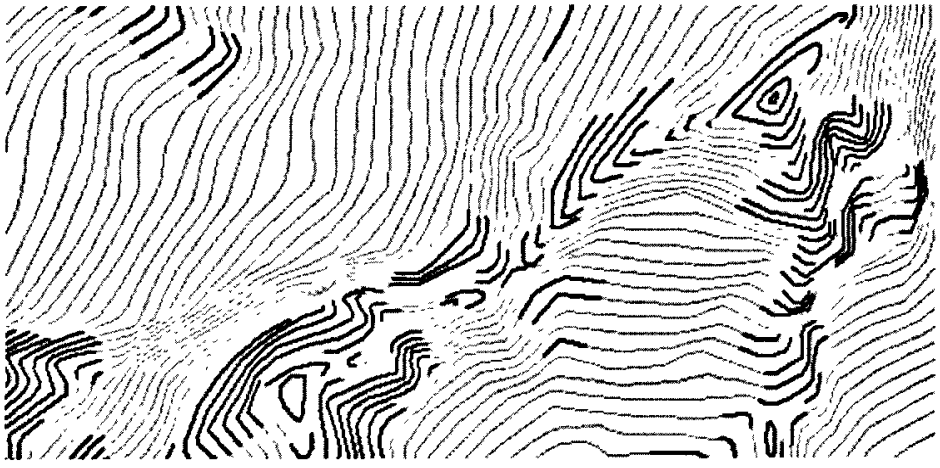
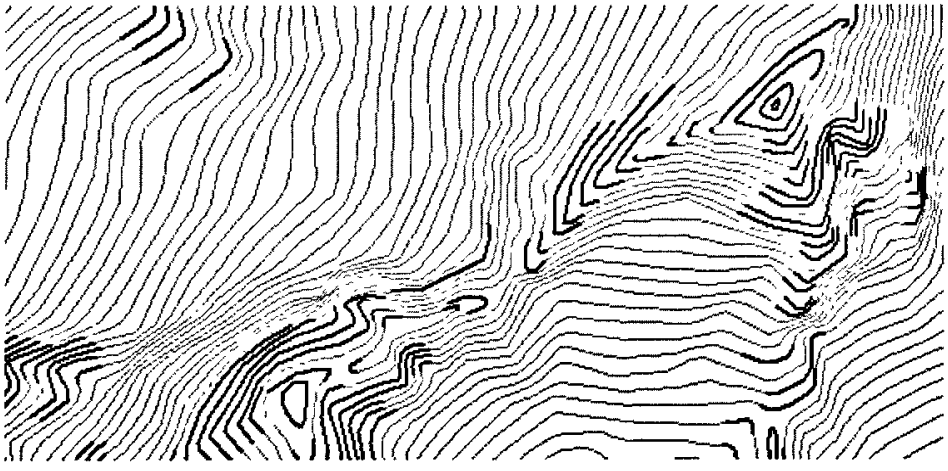


图 6-1 分割等高线（局部）

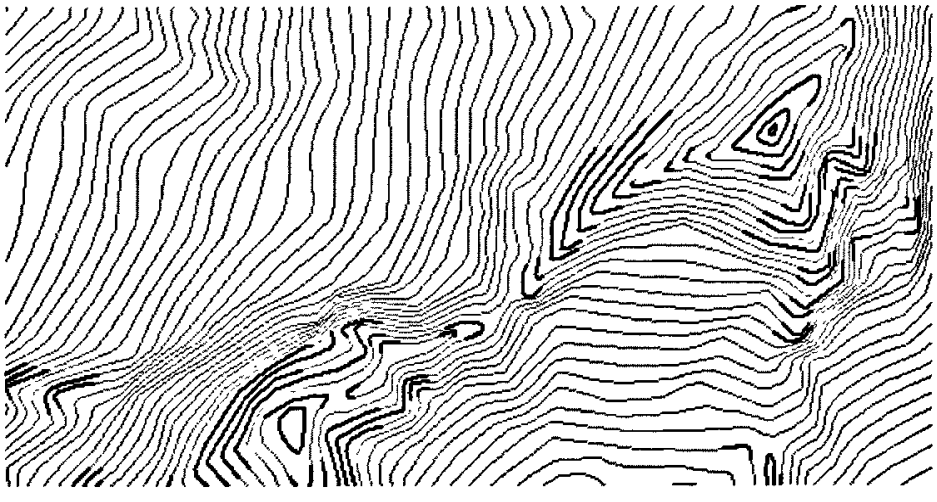
等高线分割完毕后，以 $k=1.10$、$k=1.15$、$k=1.20$ 对分段等高线进行取舍，确定提取特征点的弯曲段，得到如下结果（图 6-2）：



（a）k=1.10 时，确定地形特征点存在的弯曲段



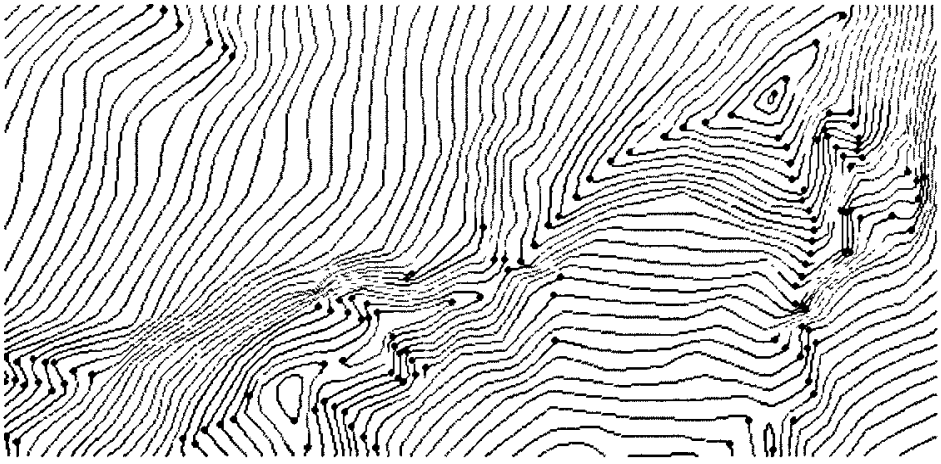
（b）k=1.15 时，确定地形特征点存在的弯曲段



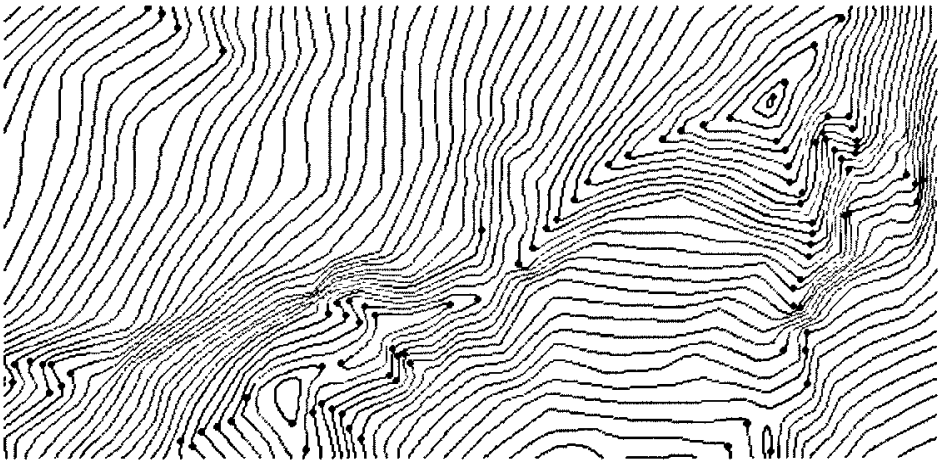
（c）k=1.20 时，确定地形特征点存在的弯曲段

图 6-2 用实验数据确定地形特征点存在的弯曲段（局部）

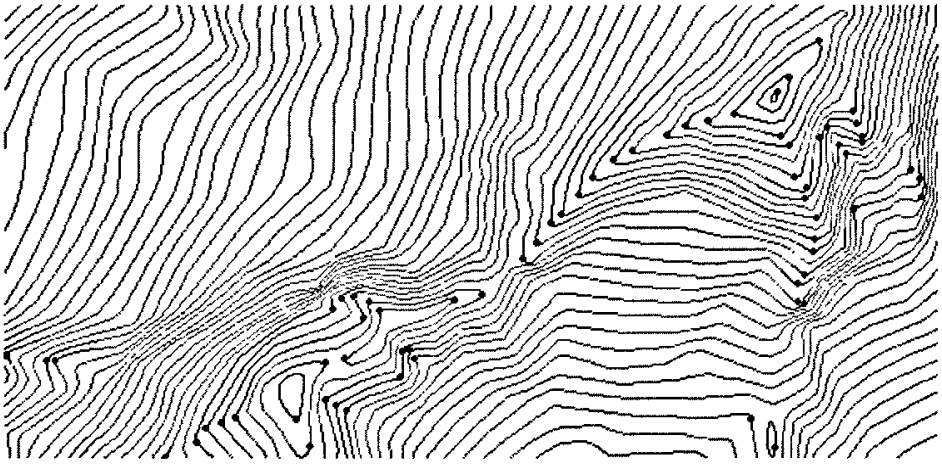
在弯曲段上提取特征点，如图 6-3 所示



（a）k=1.10 时，提取的特征点



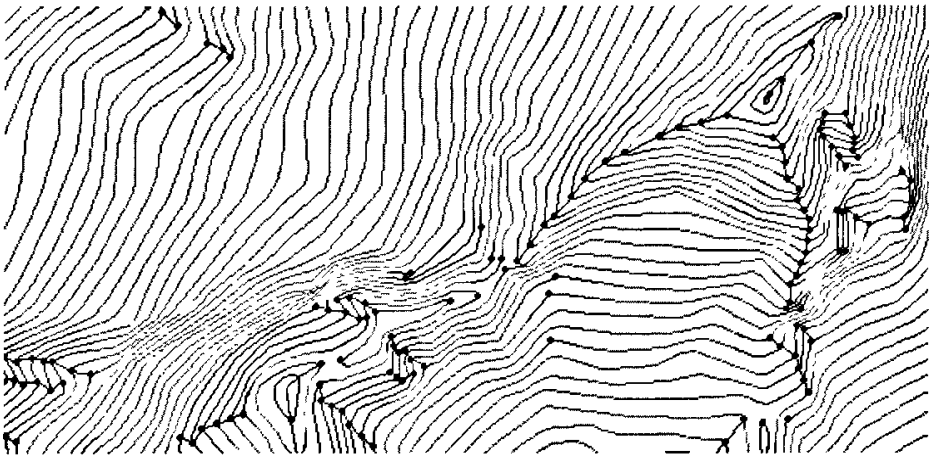
（b）k=1.15 时，提取的特征点



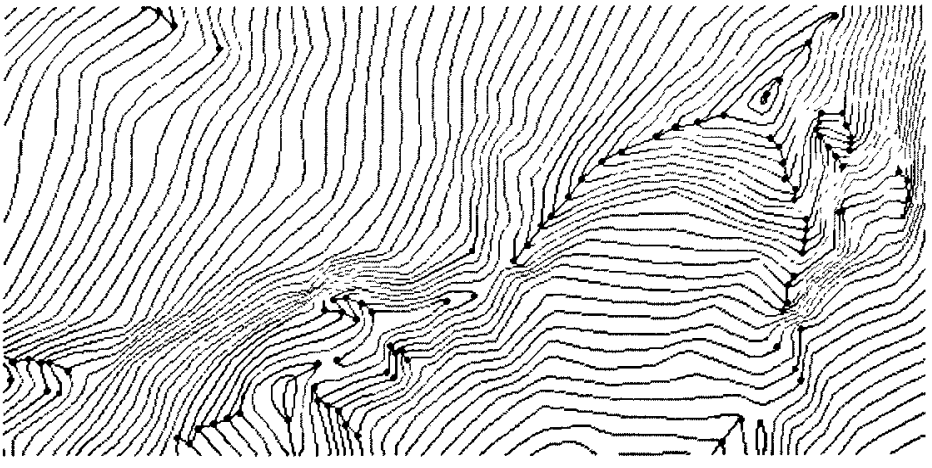
（c）k=1.20 时，提取的特征点

图 6-3 用实验数据提取的特征点（局部）

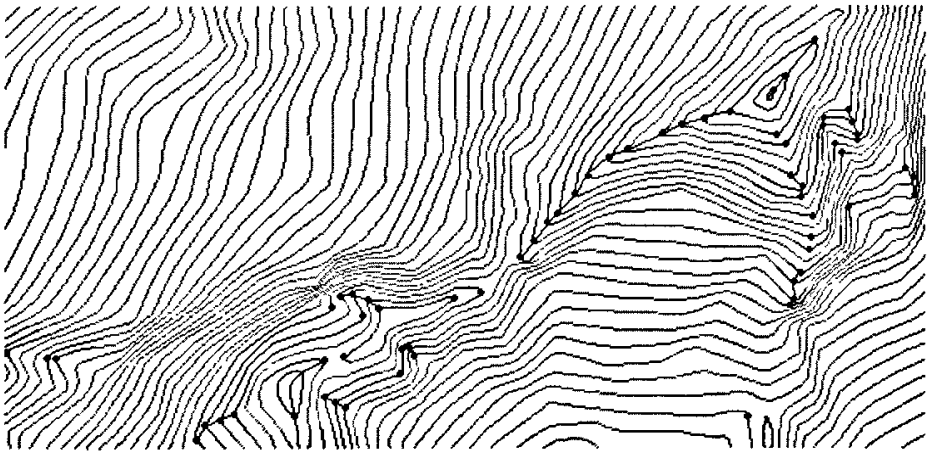
连接地形特征点，形成连续的地性线，其结果如图 6-4 所示。



（a）k=1.10 时，提取的地形线



（b）k=1.15 时，提取的地形线



（c）k=1.20 时，提取的地形线

图 6-4 用实验数据提取的地性线（局部）

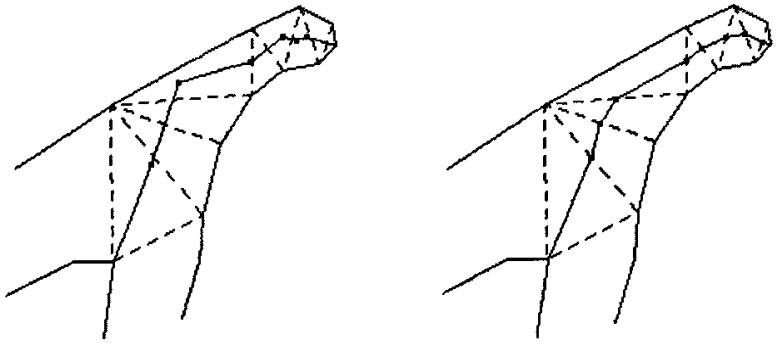
6.1.2 地性线自动提取算法的分析总结

如何对等高线的曲线特征进行准确的数学描述，是确定等高线上特征点集的关键，而特征点的准确获取是地性线自动提取的关键。采用任何算法必须考虑到不同地貌类型的地形特征，必须使用相应的算法及阈值才能取得较好的追踪效果，任何追踪算法都不可能完全地实现地性线的自动追踪。

本文中的实验数据是由 Helava 全数字摄影测量工作站编辑处理过的矢量等高线数据。依据实验结果可得出以下结论：

1、由于等高线拓扑关系的建立，间接建立了等高线在山脊与山谷区域的曲线弯曲方向，所以在计算弯曲拐点的过程中，通过判断弯曲拐向就可以直接得到山脊点和山谷点存在的区域，对这些区域进行标记，在计算弯曲顶点的同时就可以直接区分特征点是山脊点还是山谷点。以往的算法经常是先搜索出特征点，然后再给出判断模型，依次判断特征点是山脊点还是山谷点。本章的方法省去了地性线特征点属性的判断过程，提高了执行效率。

2、改进 Voronio 图，得到近似的等高线骨架线。计算 Voronio 图结点是通过计算三角形两边中垂线的交点得到的，这些结点组成的骨架线不够光滑（如图 6-5(a)所示）。在精度许可的情况下，本章直接用三角形两边的中点代替 Voronio 图结点，得到近似的骨架线（如图 6-5(b)所示）。近似骨架线的获取方法简单，且曲线较为光滑；并且作为提取地性线过程中的辅助数据，其精度达到使用要求，不影响地性线的准确度。



(a)由 Voronio 图得到的骨架线　　(b)近似骨架线

图 6-5 由 Voronio 图得到的骨架线与近似骨架线的对比

3、经过多次实验，当 $k=1.15$ 时，得到的地形特征点比较合理；

4、利用上述算法得到的地性线，在山顶部分可以得到连续的地性线，但是由内插算法得到地形特征点，其高程值为近似值。对于建立高精度 DEM 模型来说，其应用价值不高；

5、对分割的每段弯曲分别计算弯曲顶点，由于阈值——弯曲参数以经验确定，会造成提取的特征点数过多或过少。当特征点数较多时，多余的特征点参加计算容易引起特征点匹配困难，影响计算效率；当特征点数较少时，提取的地性线不完整；

6、提取特征点时只计算弯曲顶点——曲率最大的点，对于 V 形弯曲来说，可以得到准确的特征点；对于U形弯曲，得到的特征点位置不准确，最终提取的地性线会出现方向突变的折线；

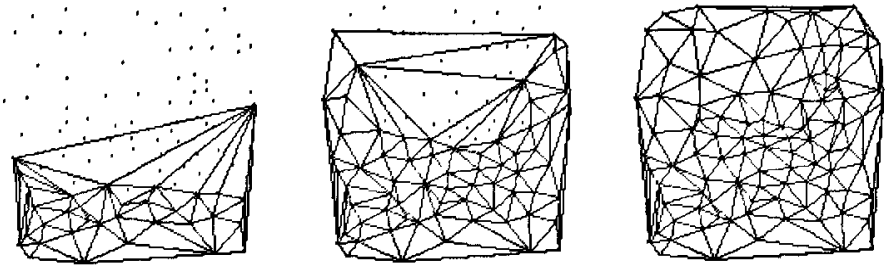
7、对于等高线形状规则的地方，提取效果较好；对于地形复杂，等高线形状不规则的地方，提取效果较差；

8、提取的地性线还需要经过人工编辑，才可以用于实际研究中。

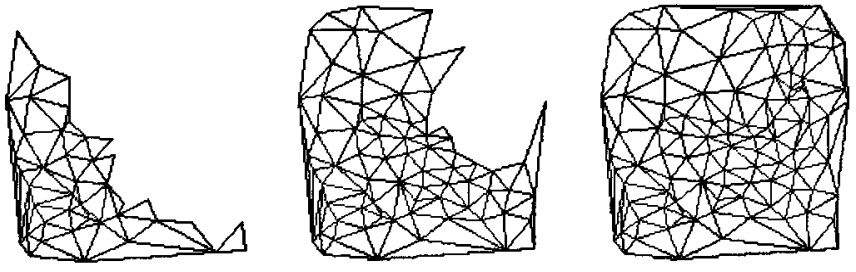
6.2 构建不规则三角网实验结果与分析总结

6.2.1 基于离散点不规则三角网的实验结果与分析

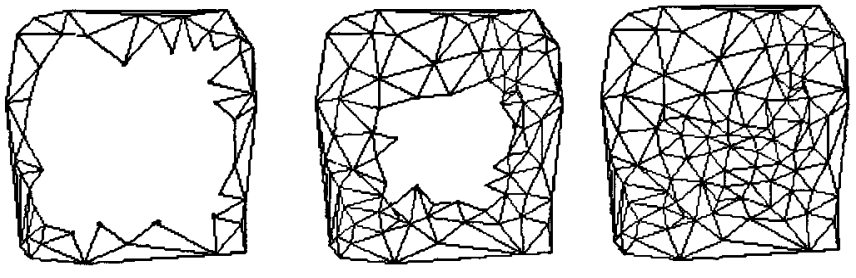
本文对构建不规则三角网的方法进行了研究，各种方法的实现过程及结果如 6-6 所示。



（a）逐点插入算法



（b）三角形生长算法



（c）前沿推进算法

图 6-6 不规则三角网构建算法比较

6.2.2 基于矢量等高线数据构建不规则三角网的实验结果与分析

本文在建立等高线拓扑关系的基础上，按分层顺序等高线依次纳入搜索范围，逐层扩展三角网，结果如下：



图 6-7 逐层扩展三角网

然后在出现“平三角形”的位置加入地性线修改三角网，消除“平三角形”（如图 6-8）。



图 6-8 加入地性线消除“平三角形”

结果表明，逐层扩展三角网的方法，缩小了扩展三角形时的等高线上点的搜索范围，提高了构网效率，同时有效地避免了三角形穿越等高线的问题；加入地性线，地性线上的特征点参与构网，最终消除“平三角形”。

6.3 构建规则格网 DEM 的实验结果与分析

6.3.1 基于离散点构建规则格网 DEM 的实验结果与分析

本文采用了两种内插算法构建规则格网 DEM，分别是移动曲面拟合法和反距离权内插法。搜索范围选用搜索圆和搜索正方形，搜索方向分为无方向和四方向。分别构建了 10 米、20 米、50 米格网间距的 DEM。精度检测的真值依据是由全数字摄影测量工作站编辑过的入库数据，并且均在立体影像上经过匹配检查，本文算法构建的规则格网与这些真值数据做对比得到最后的精度表。由下式计算得到不同方法不同间隔 DEM 的精度见表 6-1、表 6-2。

$$\sigma_{DEM} = \frac{1}{n}\sum_{k}^{n}(R_k - Z_k) \tag{6-1}$$

表 6-1 移动曲面拟合法构建的 DEM 精度

搜索方向 / 格网间距（m）	无方向	四方向
10	6.1216870	5.1966026
20	6.2846601	5.2848101
50	7.1921605	6.1353098

表 6-2 反距离权内插法构建的 DEM 精度

搜索方向 / 格网间距（m）	无方向	四方向
10	3.2943209	4.1080334
20	4.1594986	4.4230243
50	6.3954658	5.3738704

结果表明，反距离权内插法构建的 DEM 精度高于移动曲面拟合法构建的 DEM，内插格网间隔越小，内插精度越高；搜索方向越精确，内插精度越高。加入地性线辅助数据，可以提高 DEM 的精度，但是对于大区域 DEM 数据的内插来说，仅能提高局部格网点的精度，插入少量的地性线，对总体精度来说，效果不明显。

6.3.2 基于不规则三角网构建规则格网 DEM 的实验结果与分析

本文采用了线性内插算法和磨光函数内插算法两种方法实现了由不规则三角网构建规则格网 DEM。其精度记录如下表：

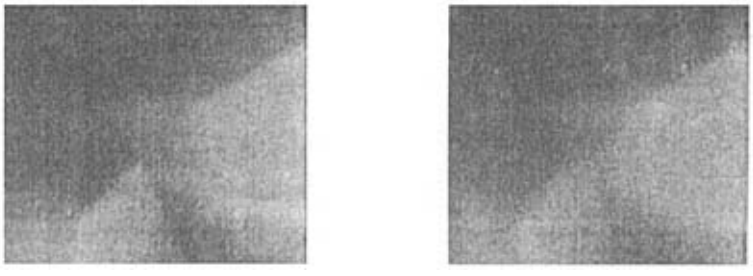
表 6-3 线性内插法构建规则格网 DEM

格网间距（m）	10	20	50
精　　度	10.2884795	10.4164318	13.1872011

表 6-4 磨光函数内插法构建规则格网 DEM

磨光宽度 / 格网间距（m）	8.5	9	10	11	11.5
10	0.1591141	0.1629744	0.1673065	0.1721047	0.1721047
20	0.1223404	0.1264931	0.1311181	0.1362061	0.1362061
50	0.2603080	0.2973510	0.3400972	0.3889079	0.3889079

如图 6-9，给出采用晕渲法表示规则格网 DEM 数据，图 6-9(a)是线性内插所得规则格网 DEM 数据，图 6-9（b）是磨光函数内插方法得到的规则格网 DEM 数据。



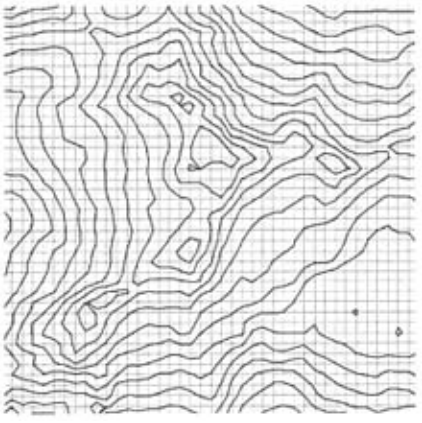
(a)线性内插法　　(b)磨光函数内插法

图 6-9 两种内插方法生成规则格网 DEM 的结果比较

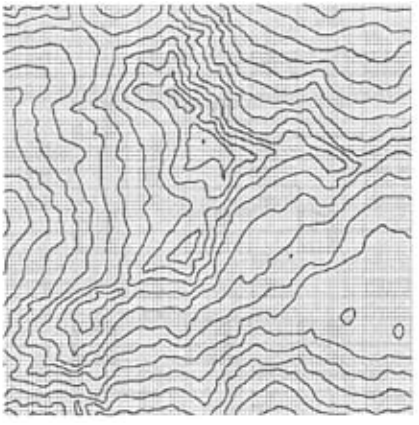
结果表明：磨光函数内插算法可以大大提高构建规则格网 DEM 的精度，同时，随着磨光宽度的减小，精度随之提高。由图 6-9 可以看出(a)中有明显的棱角存在，而(b)中没有。由此可见磨光内插算法明显地提高了显示效果，更能真实地表现地貌形态。

6.4 等高线追踪算法的实验结果及分析

本文根据不规则三角网 DEM 和规则格网 DEM 各自的拓扑关系，编写实现了基于 TIN 和规则格网 DEM 追踪等高线的通用算法，分别提取了等高距为 25 米、50 米、100 米的等高线，结果如下：



（a）50 米格网间距

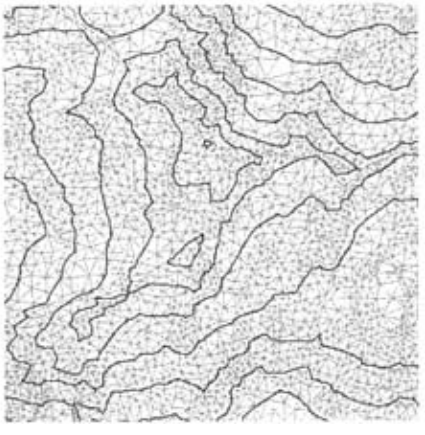


（b）20 米格网间距

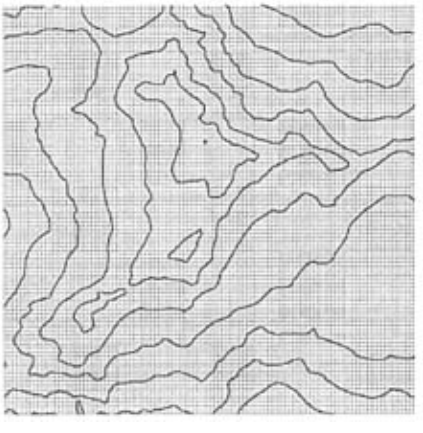


（c）10 米格网间距

图 6-10 基于规则格网 DEM 提取的等高距为 50 米的等高线

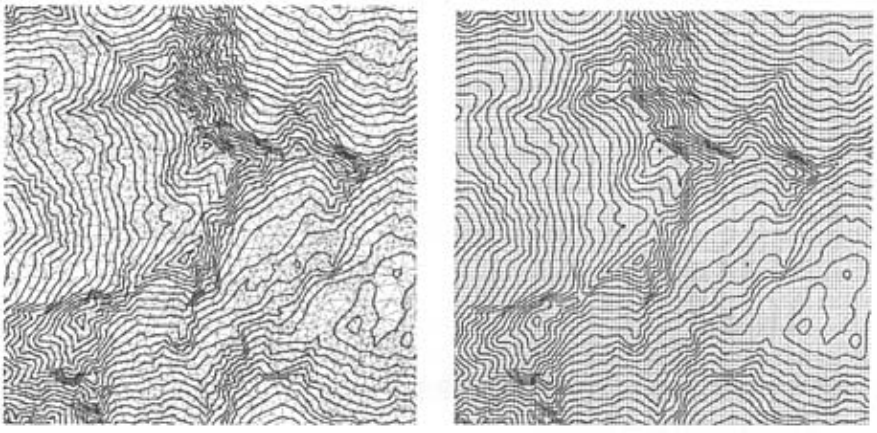


(a)基于 TIN 追踪等高线



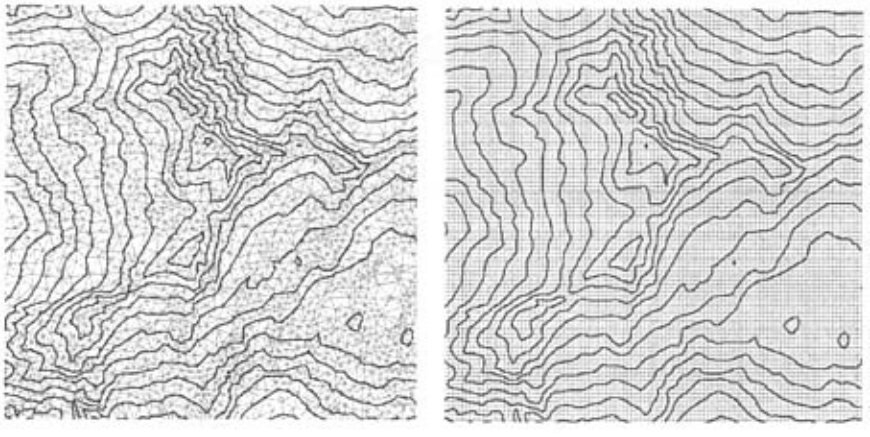
(b)基于规则格网追踪等高线

图 6-11 等高距为 100 米的等高线比较



(a)基于TIN追踪等高线　　(b)基于规则格网追踪等高线

图 6-12 等高距为 50 米的等高线比较



(a)基于TIN追踪等高线　　(b)基于规则格网追踪等高线

图 6-13 等高距为 25 米的等高线比较

结果表明：基于 TIN 的等高线追踪结果精度高，更能真实地表现地貌形态；规则格网越密追踪的等高线精度越高，但是效率会越来越低。

第七章 总结与展望

7.1 本文的工作总结

本文主要研究了基于矢量等高线数据的地性线的自动提取，进一步探讨了顾及地形特征的不规则三角网DEM的建模方法，同时探讨了各种DEM存储模型格式之间的相互转换。本文第一章阐述了论文研究内容相关背景和论文的组织结构，从第二章到第五章详细分析了本文研究内容的理论、方法以及实现过程。论文所做的工作主要包括以下几个方面:

（1）在对已有地性线提取算法分析总结的基础上，借鉴制图综合中对曲线弯曲的分析和处理方法，提出了基于曲线弯曲分析提取地性线的方法。通过对分割等高线上每段弯曲计算弯曲顶点得到特征点，然后利用弯曲正负方向判断特征点属性，最后连接同属性的特征点实现地性线的自动提取。

（2）总结已有的标准 D-TIN 和带约束条件 D-TIN 的构建方法，基于等高线数据分析了顾及地形特征的 TIN 建模方法。提出了基于三角网生长算法逐层扩展等高线数据构建三角网的方法，并通过约束 Delaunay 三角剖分实现对地性线的特殊处理。

（3）利用磨光函数内插法改进了由不规则三角网 DEM 内插生成规则格网 DEM 的线性内插算法，消除了三角形间的棱角，大大提高了建模精度，同时得到了光滑的 DEM 模型，更能逼真地显示地形。

（4）分析了不规则三角网 DEM 和规则格网 DEM 拓扑关系的相似性，提出了同时适用于两种数字高程模型追踪等高线的方法。

7.2 进一步的研究展望

地形特征线的自动提取是一项相当复杂的工作，不仅在 DEM 中有重大用处，而且在制图综合等其它行业也有很多用途。而对于地形建模的研究是一个复杂的过程，如何改进模型表示地形的逼真度与精度仍是目前 DEM 建模的重要研究内容。随着数字高程模型的普遍应用，对各种模型数据的需求也逐步多样化，因此各种模型之间的转换问题也成为广泛研究的目标。本文对这两方面都做了研究，在今后的研究和应用仍需要做相当大的努力和大量的工作，今后需要进一步改进和完善的地方概括如下：

（1）目前基于矢量等高线数据提取的地性线，其精度受数据源精度和等高线矢量化精度的影响，虽然自动化程度在不断提高，但要想提高准确度仍离不开人工的干预。如何进一步提高基于矢量数据提取地性线的精度和自动化程度是今后需要进一步研究的内容。

（2）可以利用灰度图像进行地性线的提取，由于地形坡向、坡度、太阳方位角和太阳高度角决定了灰度图像上各像素点的灰度级，因此可以利用灰度级的大小判断山脊向光和背光的临界线，由此得到山脊的大致位置。同理，也可以得到山谷的大致位置。改变太阳方位角和高度角，将得到一系列的临界线，综合取舍临界线最终得到地性线。这一提取地性线的思路还有待于在今后的实践中进行研究。

（3）当地形复杂时等高线数据是不规律的，在这种地区很难实现地性线自动提取。这对提取算法的设计提出了更高的要求，针对不同的地形提出不同的算法以满足实际应用需要，是今后进一步完善的目标。

（4）构建数字高程模型中，如何提高模型表示地形的真实度以及优化构建模型的算法是需要深入研究的内容，提出的顾及地形特征的 T1N 构建方法，其中对约束线段嵌入的算法仍需要进一步的优化。

（5）附加地形特征数据由规则格网数据格式到其它类型数据格式转换的方法还有待于进一步研究。

参考文献

[1] 李志林，朱庆. 数字高程模型[M]. 武汉：武汉测绘科技大学出版社，2000.

[2] 汤国安，刘学军，闾国年. 数字高程模型及地学分析的原理与方法[M]. 北京：科学出版社，2005.

[3] 毋河海，龚健雅. 地理信息系统（GIS）空间数据结构与处理技术[M]. 北京：测绘出版社，1997

[4] 王家耀，崔铁军，苗国强. 数字高程模型及其数据结构[J]. 海洋测绘，2004，(3).

[5] 姚慧敏. 基于地形特征建立高质量 DEM[D]. 信息工程大学测绘学院，2002.

[6] 吴立新，史文中. 地理信息系统原理与算法[M]. 北京：科学出版社，2003.

[7] 毋河海. 地图综合基础理论与技术方法研究[M]. 北京：测绘出版社，2004.

[8] 朱庆，赵杰，钟正. 基于规则格网 DEM 的地形特征提取算法[J]. 测绘学报，2004，33(1)：77-81.

[9] 费立凡. 地形图等高线成组综合的实验[J]. 武汉测绘科技大学学报，1993(增刊)：6-22.

[10] 陈向东. 利用数字化等高线数据自动生成地形结构线[J]. 北京测绘，1994(1)：6-12.

[11] 郭明武，吴凡. 等高线自动提取结构线方法与问题处理[J]. 地球信息科学，2005(7)：113-119.

[12] 陈海燕，万刚. 利用等高线数据自动生成地性结构线的算法研究[J]. 测绘通报，2003(3)：21-23.

[13] 黄培之. 提取山脊线和山谷线的一种新方法[J]. 武汉大学学报(信息科学版)，2001(26)：247-252.

[14] 靳海亮，康建荣，高井祥. 利用等高线数据提取山脊(谷)线算法研究[J]. 武汉大学学报(信息科学版)，2005(9)：810-812.

[15] Christopher Gold, Maciej Dakowicz. Terrain Modeling Based on Contours and Slopes[A], Symposium on Geospatial Theory, Processing and Applications, Ottawa 2002.

[16] 陈涛，艾廷华. 多边形骨架线与形心自动搜索算法研究[J]. 武汉大学学报（信息科学版），2004，29(5)：443-446.

[17] Tang L. Automatic Extraction of Specific Geomorphological Element from Contours[A], Proceedings of the 5th SDH conference[C], Charleston, SC, 1992(2):554-556.

[18] 艾廷华，祝国瑞，张根寿. 基于 Delaunay 三角网模型的等高线地形特征提取及谷地树结构化组织[J]. 遥感学报，2003，7(4)：292-299.

[19] G Aumann, H Ebner, L Tang. Automatic Derivation of Skeleton Lines from Digitized Contours[J], ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing , 1991(46):259-268.

[20] 崔先国，汝绪伟，曲均浩. 一种山脊线和山谷线提取的新方法[J]. 中国地理信息系统协会第八届年会论文集，2004：733-736.

[21] 毛可标，陈向东. 地形结构线自动生成方法研究[J]. 测绘科学，1995(3)：12-18.

[22] 刘颖，翟京生. 一种自动识别地性线的新方法[J]. 海洋测绘，2005，25(3)：21-23.

[23] 汝绪伟. 基于等高线数据的地形特征线提取及地形建模研究[D]. 山东科技大学，2004.

[24] 毋河海. 地图综合基础理论与技术方法研究[M]. 北京：测绘出版社，2004.

[25] 应申. 曲线的一致性化简及曲线相交的研究[D]，武汉大学，2002.

[26] Attneave F. Some Informational Aspects of Visual Perception.Psychological Review, 1954(61):183-193.

[27] Thapa K. Automatic Line Generalization using Zero Crossings, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 1988, 54(4):511-517.

[28] Freeman H. Shape Description via the Use of Critical Points,Pattern Recognition, 1978(10):159-166.

[29] Skopeliti A, Tsoulos L. Parametric description of the shape of cartographic line, Tech Chron, Sci, J, TCG, I, 1999:1-2.

[30] Poorten P. and Jones J C. Customizable Line Generalization using Delaunay Triangulation, CD-Rom Proceeding of 19th ICC,Ottawa,Section 8.1999.

[31] Wang Z, Muller J C. Line Generalization Based on Analysis of Shapes Characteristics, Cartography and Geographic Information System, 1998, 25(1):3-15.

[32] 张宏，永宁，刘爱利. 地理信息系统算法基础[M]. 北京：科学出版社，2006.

[33] 谢祥根，符锌砂. 考虑地形特征的三角网数模建立方法[J]. 中国公路学报，2000(1)：10-13.

[34] 陈军. Voronoi 动态空间数据模型[M]. 北京：测绘出版社，2002.

[35] 刘学军，符锌砂. 三角网数字地面模型的理论、方法现状及发展[J]. 长沙交通学院学报，2001(2)：24-30.

[36] Lawson C L. Generation of a triangular grid with application to contour plotting[J], California Institute of Technology Jet Propulsion Laboratory, Technical Memorandum 299, 1972.

[37] Lawson C L. Software for C^1 Surface Interpolation Mathematical Software III[M], New York: Academic Press, 1977.

[38] Green P J, Sibson R. Computing Dirichlet tessellations in the plane[J], The Computer Journal, 1978, 21(2):168-173.

[39] Brassel K E, Reif D. Procedure to Generate Thiessen Polygons[J], Geophysical Analysis, 1979(11):289-303.

[40] Shamos M I, Hoey D. Closest-point Problems[J], In: Proceedings of the 16th Annual Symposium on the Foundations of Computer Science, 1975:151-162.

[41] Lewis B A, Robinson J S. Triangulation of Planar Regions with Applications[J], The Computer Journal, 1978, 21(4):324-332.

[42] Lee D T, Schachter B J. Two Algorithms for Constructing a Delaunay Triangulation[J], Int. J. of Computer and Information Sciences, 1980,9(3) :219-242.

[43] Lee D T, A Lin. Generalized Delaunay Triangulation for Planar Graphs[J], Discrete and Computational Geometry, 1986(1):201-217.

[44] Chew L P. Constrained Delaunay Triangulation, in Proceedings of Third ACM Symposium on Compuational Geometry[M], Waterloo:[s.n.],1987.216-222.

[45] Boissinnat J D. Shape Reconstruction from Planar Sections[J], Comput Vision Graphics Image Process, 1988,44:1-29.

[46] Piegl L A. Algorithm and Data Structure for Triangulation Multiply Connected Polygonal Domains[J],

Computer and Graphics, 1993,17(5):563-574.

[47] Sloan S W. A Fast Algorithm for Constructing Delaunay Triangulation in the Plane[J], Advanced Engineering Software, 1987,9(1):34-55.

[48] Floriani L D. An Online Algorithm for Constrained Delaunay Triangulation[J], CVGIP:Graphical Models and Image Processing, 1992,54(3):290-300.

[49] 徐青，吴寿虎，朱述龙，邱振戈. 近代摄影测量[M]，解放军出版社，2000，2.

[50] Preusser A. Bivariate Interpolation ueber Dreieckselementen durch Polynome 5, Ordung mit C1-kontinuitaet, Zeitschrift fuer Vermessungswesen, 1984(109,Heft 6):292-301.

[51] 崔铁军，董延春，杨大洲. TIN 到格网 DTI 的内插算法[J]，地理信息系统与电子地图技术的进展，湖南地图出版社，1999.

[52] 王家耀. 空间信息系统原理[M]. 北京：科学出版社，2001：197-203.

[53] 秦忐远，苏媛媛，尹亚娟. DEM 无缝镶嵌及二维可视化技术研究[J]. 黑龙江工程学院学报（自然科学版），2005(1)：4-7.

作者简历　攻读硕士学位期间完成的主要工作

一、 个人简历

尹亚娟，女，1976 年 11 月出生，河南郑州人。

1999 年 7 月毕业于解放军测绘学院，军事空间信息工程专业 获学士学位；

2003 年 9 月考入信息工程大学测绘学院攻读硕士学位，后因身体原因于 2003 学年休学一年，由 2004 学年继续学业至今。

二、攻读硕士学位期间发表的学术论文

1．“DEM 无缝镶嵌及二维可视化技术研究”，《黑龙江工程学院学报》(自然科学版)，2005 年第 1 期，第三作者

2. “地形特征线自动提取方法研究”，《军事测绘》，2007 年第 2 期，第一作者

三、攻读硕士学位期间的科研情况

1．总参测绘局课题：“影像地图制作与应用技术研究”，2005 年，排名第五

致　谢

三年的研究生生活即将结束，在攻读研究生期间我得到了很多人的关怀和帮助，没有他们的关怀和帮助，很难想象自己能如期完成学业。

首先要感谢我的导师秦志远教授，三年中，无论在学习还是生活方面，都得到了他的细心关照。在论文开题和论文写作中秦教授对我进行了悉心的指导，其平易近人的人格魅力和治学严谨的工作态度给我留下了深刻的印象，使我领悟到了许多人生的哲理，相信所有这些将使我受益终身。

感谢研究生处的各位领导与老师在三年研究生生活中所给予的帮助与指导。

感谢周丽雅、莫华、姬渊、陈磊等同学在平时学习与生活中以及论文完成过程中给予的无私帮助。

感谢一起学习和生活的所有同学，感谢他们陪我一起度过了丰富而充实的三年研究生生活，是这个友好团结向上的集体让我们的求学生涯充满信心与乐趣，三年生活中收获的不仅仅是学业，而且还有纯真的友谊与美好的回忆。

深深感谢我的父母对我多年的培养!感谢他们辛苦为我创造的求学环境和对我学业的大力支持，感谢他们在我成长的每一个阶段所付出的凝聚着他们心血的爱!

二〇〇七年四月二十日

地性线提取及DEM数据格式转换方法研究

万方数据 WANFANG DATA 文献链接

作者： 尹亚娟
学位授予单位： 中国人民解放军信息工程大学

相似文献(10条)

1.学位论文 邹烷 基于数字高程模型的矢量数据可视化研究 2006

矢量数据用来表示空间位置上的精确关系，易于定量分析，因而地理信息系统的空间分析多以矢量数据为处理对象；数字高程数据(DigitalElevationModel，DEM)用于描述地形起伏状况，可以用于提取各种地形参数，如坡度、坡向等，并能进行通视分析、流域生成等应用分析，因此DEM数据在定性分析方面较有优势。为了兼有二者的优点，混合地理信息系统的也逐渐成为研究的热点，其关键问题就是复杂二维矢量数据与多分辨率地形格网之间的实时叠加及渲染。

本文主要研究了空间矢量数据和地形格网的精确叠加及可视化问题，在分析现有研究成果的基础上，分别从基于矢量几何计算和基于在线纹理两条主线进行研究，并取得如下成果：

1.研究了地形可视化技术的最新进展，并对不同地形简化算法的优缺点及算法性能的进行了比较。

2.提出了对矢量数据建立分段索引，支持叠加矢量数据的ROAM算法。算法的基础是对矢量数据计算与格网相交的拐点，并以得到的拐点对矢量数据进行分段索引处理，实时渲染时根据当前帧的细节层次渲染被索引的矢量。

3.基于在线纹理的方法，矢量动态渲染到纹理(Render-to-Texture)技术，实现矢量数据与地形数据的动态叠加。

4.使用内存映射文件技术及多线程调度技术，用于管理和调度大数据量地形数据和纹理数据。

5.使用C++语言和OpenGL图形库编写了有关三维地形分析，三维地形可视化的算法，并为Vega3DGIS所采纳。

本文所有的研究工作都是在中科院计算所开发自主知识版权的织女星三维地理信息系统(Vega3DGIS)的过程中完成，vega3DGIS是织女星地理信息系统(VegaGIS)平台的一个专业工具。

2.期刊论文 李明.纪小琴.王宝禄 浅谈数字高程流域水系模型 -水利科技与经济2007,13(5)

简要介绍数字高程模型(DEM)和数字高程流域水系模型(DEDNM)的基本概念、原理.基于辽河水系老哈河流域栅格DEM数据,采用DEDNM提取水系信息,构建数字流域,并阐述了在数字高程模型中凹陷区域识别和消除、流域分水线勾划、河网生成、河网与子流域编码及河网结构拓扑关系的建立.

3.学位论文 刘凯敏 数字高程建模与数据可视化 2007

随着计算技术与地理信息系统(GIS)的迅速发展，‘数字高程模型(DEM)作为地理表面地形的数字描述和模拟已成为空间数据基础设施和“数字地球”的重要组成部分。几十年来对数字高程模型的研究始终方兴未艾、十分活跃。建立数字高程模型并实现它的可视化成为本文的研究方向。由于规则格网模型具有计算处理方法简单有效，且和遥感数据在结构上容易匹配等优点，其被视为DEM中最基本和最重要的一种模型。

本文主要研究了以下三个方面的内容，约束边界下基于离散采样点建立规则格网模型的算法，基于该格网模型生成等高线的算法，以及对生成的等高线进行处理，包括光滑和生成明暗等高线。

微机矿山项目的采样点数据包含约束边界，该约束边界实际上就是研究区域。与传统的建模方式比较，约束边界下格网建模只需要插值计算出区域之内的格网点，区域外的格网点在后续的地形研究中不需要用到，因此只需要赋一个特殊的值加以区分即可。如果对所有格网点都进行一次是否落在区域内的判断，显然较为麻烦。因此，本文借助设立两种参考点，只需要对边界附近的格网点进行判断，完成了约束边界下格网模型的建立，为地形研究提供了数据基础。

在约束边界下建立的格网模型中，目前常用的等高线追踪算法是等高线传播算法。该算法在约束边界上插值等高点存在一些问题，针对这些问题，本文提出了一种新的等高线追踪算法，将等高线的追踪以格网为单位进行，有效地解决约束边界下等高线的追踪问题。

在等高线的处理和明暗等高线的绘制算法方面，本文介绍了使用张力样条函光滑等高线，并实现了明暗等高线的绘制。

4.期刊论文 王凤霞.范士陈.张超.WANG Feng-xia.FAN Shi-chen.ZHANG Chao VR-GIS技术及其在泥沙运动分析中的应用 -河南大学学报（自然科学版）2007,37(2)

首先对VR-GIS及其相关概念进行了简单介绍,并分析了作为VR-GIS血液的DEM数据方面的研究以及制作过程.在此基础上,就如何应用VR-GIS技术进行海底水深图处理、水下泥沙运动可视化和水下泥沙运动的空间分析进行了探讨.

5.期刊论文 李春红.任立良.达卫特.王美荣 数字流域水系构建方法浅析 -水文2002,22(6)

基于辽河水系老哈河流域栅格DEM数据,分别采用数字高程流域水系模型(DEDNM)、河流工具RiverTools、地理信息系统Arcview软件,根据地形提取水系信息,构建数字流域,并分析比较了三者在凹陷区域识别、水系、子流域及其拓扑关系生成方面的差异.总的来说,数字高程流域水系模型的可修改性较好;而RiverTools软件可视化程度高,使用方便,并具备强大的图示和地形分析功能;ArcvieW基于地理信息系统(GIS)更易于进行二次开发.

6.学位论文 龚珍 三维地形模型构建及其可视化技术研究 2006

数字高程模型DEM是地理信息系统GIS中的重要组成部分之一，在可视化技术中有极其广泛的应用。数字高程模型的建模则是其中的关键，尤其在复杂域数据场的可视化技术中，模型建模的好坏直接影响到其显示性能。至今为止人们已经提出了几种高程模型，其中比较有代表性的就是基于Delaunay三角网的地形模型。Delaunay三角网的特性决定了基于Delaunay三角网的地形模型空间结构最优，可操作性好。因此基于Delaunay三角网的地形模型在可视化方面获得了广泛的应用。在实际的应用中，如对象重建中模型边界、地表模型中的山脊线、山谷线、断裂线等，当这些互不相交的断裂线与扩展边界加入到三角网时，标准Delaunay三角网无法满足需要，因此需要扩展成为带约束条件的Delaunay三角网。本文研究的内容就是带约束条件的Delaunay三角网算法以及其在地形与地物的可视化方面的应用。

本文提出了将限定的Delaunay三角网应用到地形与地物的融合过程中的方法。该方法充分利用了限定三角网中限定边或点的特性，对地物进行了充分的描述，取得了比较好的效果。文章首先介绍了地形建模的基本概念，方法以及三维地形可视化技术的国内外研究现状。接着对地形TIN模型的构建方法——Delaunay三角网生成算法，进行了详细的介绍和分析，在此基础上重点讨论了约束的Delaunay三角网的生成算法，对生成带约束条件的Delaunay三角网中的关键步骤给予了详细的描述。同时介绍了地物数据的获取方式及建模方法，并对地物与地形的融合进行了研究。最后本文对于Delaunay三角网技术的应用前景做了总结和展望。

7.会议论文 陶旸 DEM数值精度与地形形态精度分析 2007

格网DEM是目前数字高程模型生产与应用的主流数据模型，由于规则格网数据结构与生产技术的影响，DEM地形描述的准确性存在较大的区域性差异，如何既维护DEM结构的简单性，又保证地形局部形态的高精度，是新一代DEM构建的核心问题。本文通过分析DEM数值精度与地形形态精度的联系与区别，结合地形数字模拟的本质任务，阐述了新一代DEM的基本内容、构建方法和需要解决的关键技术问题。

8.会议论文 宋伟东.李兰勇.隋心.董山 露天矿采场时空数据库的构建与应用研究 2008

本文针对露天矿开采设计、生产计划编制、工程测量验收，以及生产管理等技术工作，以常规基于CAD的开发模式，不能对露天矿采场三维地理空间信息进行有效的可视化描述与处理的问题，提出了以地理信息系统技术为核心，建立基于时间序列的露天矿采场时空数据库的方法。文中以某露天矿采场时空数据库构建与应用为例，以地理信息系统技术为核心，采用顾及台阶特征的露天采场地形建模理论与方法，精确构建采场三维模型，同时利用地理空间分析技术从序列的三维模型中提取与生产、管理相关的重要数据，为采矿生产决策服务。

9.会议论文 翁伟琳.陈楠 DEM分辨率对地形因子的影响分析 2007

地形因子的提取对水土流失、土地利用、土地资源评价、城市规划等的研究起着重要的作用。而数字高程模型(DEM)包含了大量的地形信息，是地形分析的主要数据源。众所周知，地形因子的提取精度与DEM分辨率有着直接的关系。本文以漳州为例，选择8种不同网格分辨率，选取地面坡度、剖面曲率、坡向、平面曲率4个地形因子作为研究对象，分析不同分辨率对地形因子的影响。研究表明，随DEM分辨率值的增大，DEM对地形的概括度也越高，可以根据应用的需要，选择合适的DEM分辨率。

10.学位论文 杨万春 基于小波多尺度分解的数字高程模型研究 2007

本文在查阅相关文献资料的基础上对规则格网DEM的快速构建算法进行了研究，利用数据分块插值算法生成DEM地表网格。在此基础上，利用小波变换理论对数字高程模型(DEM)数据进行多分辨率分析，简化了模型，并以此来降低计算机的处理数据量，达到快速的场景生成。本研究以本文的理论研究成果为基础并结合相关课题，利用VC++开发环境研究开发了规则格网DEM生成和简化系统。

本文链接：http://d.g.wanfangdata.com.cn/Thesis_Y1240869.aspx
授权使用：贵州大学(guizdx)，授权号：12d59ece-e33c-4fda-bb8d-9e75017dc29a
下载时间：2011年1月24日