中南大学

硕士学位论文

不规则三角网及其可视化实现

姓名：宋秋艳

申请学位级别：硕士

专业：计算机应用技术

指导教师：陈学工

20080604

摘 要

不规则三角网（TIN）是数字高程模型（DEM）中最基本和最重要的一种模型，它能以不同层次的分辨率来描述地形表面，可以灵活的处理特殊地形。因此，TIN 的构建和重构、基于 TIN 模型的等值线追踪以及对 TIN 模型的三维可视化都是 GIS 中的重要研究领域。本文将着重从这四个方面进行研究。

本文综合了当前构建 TIN 的众多算法，设计并实现了凸壳内插生成 TIN 的算法。同时，对传统的 TIN 等值线追踪算法进行了改进，即在传统算法的基础之上，增加了保存等值点和各种点、边、三角形的拓扑关系数组，设计相应的数据结构，并利用等值点数组和拓扑关系数组，对 TIN 进行重构，重构后的 TIN 比原有的 TIN 在实现可视化方面显得更加细腻。

最后，针对 TIN 模型在表示地形上不够形象、直观，以及利用 TIN 进行数据分析困难等缺点，本文利用 OpenGl 和 VC++.net 实现了对重构后的 TIN 的彩色晕渲，并对不同垂直高度的晕渲效果进行比较，在精度要求不是很高的情况下，该算法具有一定的实用性。

关键词 不规则三角网，Delaunay 三角化，等值线，晕渲

ABSTRACT

The Triangular Irregular Network(TIN) is regarded as the most basic and important model in DEM. it can describe the surface topography in terms of different levels of resdution. It can deal with special terrain flexibly. This thesis mostly researches on the algorithm of constructing Triangulation and reconstructing Triangulation, the algorithm of constructing and disposing contours based on TIN, and the algorithm of visualization based on TIN, which are the important research fields in GIS.

The algorithm of constructing TIN is designed and implemented, then the traditional methods of constructing contour based on TIN are amended, that is, the all data-structure of the algorithm are designed, including array of equivalent-point and borders and point-borders and so on. the equivalent points and topological relations are made to reconstruct TIN, which is much finer than the original TIN in visualization.

Finally, taking the image and intuitive TIN and the difficulties of TIN data analysis into consideration, the thesis designes and implements a algorithm of hill-shading with OpenGL and VC++.NET. in the case of poor precision ,the algorithm is somewhat practical.

KEY WORDS Triangular Irregular Network, Delaunay Triangluation, Contour, Hill-shading

原创性声明

本人声明，所呈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，除了论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或撰写过的研究成果，也不包含为获得中南大学或其他单位的学位或证书而使用过的材料。与我共同工作的同志对本研究所作的贡献均已在论文中作了明确的说明。

作者签名：宋秋艳　　日期：2008 年 6 月 4 日

学位论文版权使用授权书

本人了解中南大学有关保留、使用学位论文的规定，即：学校有权保留学位论文并根据国家或湖南省有关部门规定送交学位论文，允许学位论文被查阅和借阅；学校可以公布学位论文的全部或部分内容，可以采用复印、缩印或其它手段保存学位论文。同时授权中国科学技术信息研究所将本学位论文收录到《中国学位论文全文数据库》，并通过网络向社会公众提供信息服务。

作者签名：宋秋艳　导师签名　　日期：2008 年 6 月 4 日

第一章 绪论

数字地形模拟是针对地球表面实际地形地貌的一种数字建模过程，这种建模的结果通常就是一个数字地形模型（Digital Terrain Model，DTM）[1-2]。DTM 的概念是 C. L. Miller 提出的，后来人们把基于高程或海拔分布的数字高程模型称为 DEM（Digital Elevation Model，DEM）。DEM 是建立 DTM 的基础数据，其它的地形要素可由 DEM 直接或间接导出，如坡度和坡向。而且 DEM 在测绘、土木工程、地质、矿山工程、景观建筑、道路设计、防洪、农业、规划、军事工程、飞行器与战场仿真等诸多领域得到了广泛应用。因此 DEM 自开始被采用以来，受到了极大的关注。

1.1 研究内容和研究意义

DEM 是地理空间定位的数据集合，因此凡涉及到地理空间定位，在研究过程中又依靠计算机系统支持的课题，一般都要建立数字高程模型。从这个角度看，建立 DEM 是对地面特性进行空间描述的一种数字方法途径，DEM 的应用可及整个地学领域。

本文的研究课题是构建基于离散的散乱点集的 TIN 构建和基于等高线的 TIN 的重构，并对重构后的数字高程模型 TIN 进行可视化处理。研究内容包括以下四个部分：

(1) 基于散乱点的不规则三角网模型（Triangulated Irregular Network，TIN）建立；

(2) 基于 TIN 的等值点计算和等值线生成；

(3) 基于等高线和出散乱点集构建的 TIN 对 TIN 进行重构，以缩小散乱点集构建的 TIN 中三角形的尺寸，使得 TIN 更好的拟合地形；

(4) 对重构后的数字高程模型 TIN 进行可视化处理。

TIN 是 DEM 中被视为最基本和最重要的一种模型。它既可适应规则分布数据，也可适应不规则分布数据；既可通过对三角网的内插生成规则格网网格，也可根据三角网直接建立连续或光滑表面模型。研究适应于海量数据的、高效的和符合实际应用需求的 TIN 的生成方法就是为了找到一种能高效建立数字高程模型的方法，使我们能够将数字高程模型应用到更广泛的地学领域中去。

从 DEM 生成等高线一直是计算机辅助制图的基本任务之一，也是 DEM 最重要的应用之一。而基于 TIN 的等高线跟踪方法由于直接利用了原始观测数据，

不仅避免了由于内插造成的精度损失，而且能更逼真地表达地形特征。通过计算机实现等高线追踪算法，能高效的由数字高程模型得到实用的数字等高线地图。这样做不仅能节省大量的人工，而且能有效的保证等高线的精度。

但是读懂 DEM 需要一定的专业知识，如果将 DEM 转换成三维的图形是很有意义的一件事情。开发一个将 DEM 转化为直观的三维地形图的外部程序。基于等高线建立 DEM 的研究就是使地形特征和地理信息表现得更加直观，更加易懂，让即使没有专业知识的人也能读懂 DEM 所表现的信息，也能了解地形特征；就是使 DEM 应该像一张彩色照片一样直观易懂可视化，用三维的形式表现出来，符合人的视觉要求；就是为了方便做地学领域的各种设计、规划与分析。

1.2 数字高程模型的国内外研究现状与水平

随着科学技术特别是计算技术的迅速发展，在 DEM 的数据获取方法、数据存储和数据处理速度等方面已经取得了一些突破性进展。数字地形模拟已经成为地球科学重要的分支之一。实际上，由于地理信息系统（Geographic Information System，GIS）的普及，在美国、中国、德国、英国等国家，DEM 作为数字地形模拟的重要成果已经成为国家空间数据基础设施（National Spatial Data Infrastructure，NSDI）的基本内容之一，并被纳入数字化空间数据框架（Digital Spatial Data Framework，DSDF）进行规模化生产。目前，DEM 已成为各勘测部门的基本任务和日常工作之一。DEM 作为地球空间框架数据的基本内容，是各种地理信息的载体，在国家空间数据基础设施的建设和数字地球战略的实施进程中都具有十分重要的作用[1-4]。

1.2.1 不规则三角网的生成

DEM 有多种表现形式，TIN 是其中最重要的一种形式。TIN 是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。从表达地形信息的角度而言，TIN 模型的优点是它能以不同层次的分辨率来描述地形表面，即由于 TIN 的三角形随点集密度变化而变化，当点集密集时生成的三角形小而密，稀疏时生成的三角形大而疏。这与实际的地形特征恰好一致，因此由于其能够较好地反映实际地形信息而被广泛使用。特别当地形包含有大量特征，TIN 模型能更好地顾及这些特征从而能更精确合理地表达地表形态[5,6]，所以近年来 TIN 的建立算法和数据结构的研究发展得很快。

在目前所有的三角化算法中，以 Delaunay 三角剖分算法的应用最为广泛，这是由于 Delaunay 三角剖分算法能自动的避免狭长三角形单元。Delaunay 三角

形的两个显著特性——最大最小角特性和空外接圆特性是构成各种 Delaunay 三角剖分算法的基础[7]。Delaunay Triangulation 算法可分为间接 Delaunay 三角剖分算法和直接 Delaunay 三角剖分算法。间接 Delaunay 三角剖分算法的基本思想是先生成 Voronoi 图，再根据 Voronoi 图和 Delaunay 三角网的对偶关系生成 Delaunay 三角网[1]。而直接 Delaunay 三角剖分算法中则没有 Voronoi 图的生成过程。间接 Delaunay 算法复杂而且内存开销大且效率低下，现今很少使用。因此在后面的章节中 Delaunay 三角剖分算法即指直接 Delaunay 三角剖分算法。直接 Delaunay 三角剖分经典算法，根据其实现过程可分为分治算法、逐点插入算法和三角网生长法三种类型[7]。近年来国内外出现了一些改进经典算法基本思想的时间效率更高的 Delaunay 三角剖分的算法，如快速插入算法[8-10]和合成算法[11]，而且还出现了大量的不同于经典算法基本思想的 Delaunay 三角剖分算法，如贪心算法[12]、扫描线算法[13]和凸壳算法[14]。

1.2.2 等高线的生成和处理

等高线数据的来源，有依据数字摄影测量和全野外数字测图中获得的地形离散点数据，生成等高线；地形图扫描矢量化，生成等高线两种方式。从发展趋势来看，数字摄影测量和全野外数字测图是发展方向。我们常常用到的是不规则的原始数据，即离散点数据为依据进行等高线生成，首先应在制图区域构造一个格网，规则网格或不规则网格，然后才能进行等高线生成。近来，许多专业工作者探讨了许多各有特色的方法，但大体上可归纳为三种方案：

(1) 利用规则的矩形网格交点上的数据直接进行等高线的生成[15]；

(2) 不规则原始数据为依据，用双三次拟合、按距离加权平均或按距离加权最小二乘法等方法拟合一张曲面 Z=f(x，y)，将规则网格点的平面坐标代入曲面方程求解网格点高程后进行等高线的生成[16]；

(3) 根据不规则分布的数据点构成 TIN 进行等高线的生成[17]。

前两种又叫规则网格法，后一种又称为不规则网格法。无论是采用规则网格法，还是利用不规则网格法进行等高线生成，都有需要研究的基本问题，如等高点位的寻找、等高点的追踪和等高线的光滑处理。

等高线生成的结果是由折线构成，不光滑。当不规则三角网的尺寸非常小时分段折线近似曲线，但当不规则三角网的尺寸很大时，这种办法得到的等高线不光滑[18-20]。等高线光滑即可以看成曲线光滑的过程。现在曲线光滑算法包括拉格朗日插值法[21]、Bezier 曲线[22]、最小二乘法[23]、圆弧逼近法[24]、参数样条函数[25]、B 样条函数[26]、自然参数曲线等[27]。

1.2.3 不规则三角网 TIN 可视化

地形可视化是一门以研究数字高程模型DEM或数字地形模型DTM的简化、仿真、显示等内容的学科，它经过了一维、二维、三维可视化阶段，其中三维地形可视化是发展的趋势，经历了线划图、模拟灰度图、高度真实感三个阶段的发展[28]。广泛应用于虚拟与现实、战场环境仿真、娱乐与游戏、地形漫游、地形的穿越飞行、土地管理与应用，气象数据的可视化、道路选择、网络GIS等众多领域[29]。1998年美国副总统戈尔提出了"数字地球"的概念[30]，使得地形可视化的研究更加深入和热门，不规则三角网（TIN）通过不规则分布的数据点生成连续三角面来逼近地形表面 ，可以采用多分辨率来描述复杂地形以及顾及特征线，可以更加精确合理的表达地形形态。三角形在计算机图形学被认为是最简单的几何图元，是计算机可以直接处理的对象，因此，在很多的实际应用中，也将格网等转换为三角网；所以，三角网在地形可视化方面很有优势。近年成为地图学和地理信息系统的研究热点。

1.3 研究思路和关键问题

在构建 DEM 时，TIN 具有以下优点：三角形的大小和形状依据地形的复杂程度而变化，所有已知的数据点被存储在三角形的顶点中；能够将断裂线的信息作为三角形的边加入三角网中；由规则格网生成等高线时遇到的鞍点问题在 TIN 结构中不再存在；一些基于三角面的地形参数计算变得更直接和更简单，如坡度、坡向和体积。而在三维地形重建和可视化方面，TIN 可根据不同地形区域的平缓陡峭，用大小各异且疏密不同的三角网格描述。特别是 Delaunay 三角网，它满足最小角为最大的原则，能尽量避免狭长三角形的出现，适用于各种数据分布密度，且有利于更新和直接利用各种地形特征信息和原始数据，并且具有唯一性好、适应不规则形状区域等优点，是一种比较符合实际应用需要的模型。

因为本文选用 TIN 作为等高线生成和处理以及三维地形重建和可视化的基础数据模型，所以本文首先需要研究 TIN 建立算法，然后研究数字等高线生成和处理算法，以及重构 TIN，最后实现基于 TIN 的三维可视化。

由于人们希望得到效率更高的建网算法。因此本文在 TIN 建立算法方面要做以下两个方面的研究：

(1) 基于离散点的 TIN 三角剖分算法；

(2) 三角形局部优化处理。

在等高线的提取过程中需要区分闭合等高线与非闭合等高线。用上述办法生

成的等高线是由折线构成，不光滑，因此需要对等高线进行光滑处理。因此本文在等高线的生成和处理方面要做以下两个方面的研究：

(1) 寻找计算等值点的方法；

(2) 等值线生成方法。

利用离散点建立 TIN，由于受点集中点的分布情况的影响，当点集中点的分布尺寸较大时，三角形表示的区域也大，在进行可视化时，给人造成一种区域不连续的感觉，因此本文在对 TIN 进行可视化处理之前，为了提高可视化的效果，对 TIN 进行了重构。在 TIN 重构方面要做以下两方面的研究：

(1) 将等值点插入 TIN ；

(2) 根据 TIN 中三角形的形状和等值点在三角形中的分布情况，联结三角网。

对 DEM 进行可视化处理方面，本文作如下研究：

(1) 光的强度和颜色的计算方法；

(2) 可视化的处理算法。

综上所述，本文的研究解决以下四个关键问题：

(1) 选择合适的数据结构表示数字高程模型，建立良好的拓扑关系，构建三角网；

(2) 寻找等值点，构造合理数据结构；

(3) 重构 TIN 时对等值点的处理，简化 TIN 重构过程；

(4) 如何合理的计算可视化的参数，提高可视化的效果。

1.4 论文的组织结构

本文共分六章，结构如下：

第一章 绪论，主要概述了本文的研究内容和研究意义，介绍了 DEM 在国内外的研究现状和水平，并详细描述了研究思路和关键问题。

第二章 基于离散点的不规则三角网的生成算法研究，介绍了 TIN 的基本概念和特性以及 TIN 的体系结构，回顾了 Denauney 三角剖分的常用算法，并详细介绍了基于点集的不规则三角网的构建过程。

第三章 一种基于等值线的不规则三角网重构方法研究，阐述了基于不规则三角网的等值点的插值、等值线的追踪，并利用等值点和原始数据点对不规则三

角网进行重构。

第四章 用 OpenGL 实现 TIN 的三维可视化，介绍了 OpenGL 的功能、特点和基本的工作流程，详细阐述了地形晕渲的原理、过程，设计了地形晕渲的生成算法和实验结果。

第五章 结论与展望，对全文所开展的工作进行了总结，并指明了进一步的研究方向。

第二章 基于离散点的不规则三角网的生成算法研究

基于离散点集的不规则三角网的生成算法有很多，许多的学者也在这方面作过大量的研究，通常的算法有三角剖分法[30-34]、快速生长法[35-36]、数学形态表示法、辐射扫描法、基于凸壳技术的算法、基于凸壳和拓扑结构的算法、基于凸壳的快速生长法[37-39]、退火算法[40]、基于点线集的三角剖分法[41-43]等等，在构造TIN的精度和速度上都各有成就。章孝灿[44]等设计一种利用拓扑结构和凸壳技术的快速 TIN 生成算法，该算法先对离散点集按扫描线方式进行排序，然后建立第一个凸壳，凸壳为有序边的集合，当有序边为逆时针时，将位于凸壳右侧的点与凸壳边相联结，将所有的离散点按这个原则联结成不规则三角网，最后对联结后的 TIN 进行全局优化处理。该算法的不足是为动态凸壳生成，点集中点的分布不同时，凸壳边的变化大，不稳定。本文在研究该算法的基础上，对该算法进行了改进，首先对散乱点集按升序排序，然后建立凸壳，且凸壳按逆时针连接，使得点集中的点除位于凸壳边上外，其余所有的点都位于凸壳内，并且是位于边界边的左侧，然后用插入法联结三角网，在连接的过程中，采用 Delaunay 三角网外接圆特性对其进行局部的优化。并且在实现的过程中保存相应的数据结构。

综上所述，基于离散点的不规则三角网生成的关键步骤可以分为四步：(1) 对散乱点排序；(2) 构造凸壳；(3) 三角网的联结；(4) 三角网联结优化。

2.1 不规则三角网 TIN 概述

不规则三角网模型根据区域有限个点集，将区域划分为互不重叠的三角面格网，区域中任意点落在三角面的顶点、边上或三角形内。不规则三角网数字高程由连续的三角面组成，三角面的形成和大小取决于不规则分布的测点，或节点的位置和密度。不规则三角网与规则格网不同之处是随地形起伏变化的复杂性而改变采样点的密度和决定采样点的位置，因而它能够避免地形平坦时的数据冗余，以不同的分辨率表示地形，同时又能按地形特征点如山脊、山谷线、地形变化线等表示数据高程特征。

2.1.1 TIN 的数据结构

1、TIN 的基本元素

TIN 有三个基本元素：节点、边、和面。节点是相邻三角形的公共顶点，是构建 TIN 的采样数据。边是指两个三角形的公共边界，包含地形的各种特征线，

也是 TIN 连续而不光滑的具体反映。面是由最近的三个节点所组成的三角形面，是 TIN 描述地形表面的基本单元。在 TIN 中的每一个三角形描述了局部地形状态。TIN 的三个基本元素之间存在着邻接、关联等拓扑关系。

2、TIN 的数据结构

由于不规则三角网中三角形的不规则性，与规则格网 GRID 的数据结构相比，不规则三角网 TIN 的数据结构复杂得多。它不但需要存储每个顶点的高程信息，而且还要存储三角形顶点的平面坐标、顶点之间的连接关系和邻接三角形等拓扑关系。

在 TIN 中，基本的结构元素有三角形顶点、边和面。他们之间存在点与线、点与面、线与面、面与面等拓扑关系。因此，围绕三角形的拓扑关系而产生了多种 TIN 的数据结构：TIN 的点结构、面结构、边结构、点面结构、边面结构、点边面结构等等。其中，最简单的是由三角形顶点坐标和三角形构成的结构。这些结构在特定的应用领域中存在各自的优势，但是一种结构不可能适用于所有的场合。实际上，在具体应用时，结合实际情况会灵活的设计数据结构。

2.1.2 TIN 的体系结构

从结构上讲，TIN 主要通过节点（地形采样点）、三角形边和三角形面之间的关系来显示或隐式的表达地形散点的拓扑关系，因此，设计一个高效的、结构紧凑的、维护方便的 TIN 的存储与组织结构对 TIN 的应用与数据库的维护是至关重要的。

作为 TIN 的基本单元，三角形的几何形状直接决定着 TIN 应用质量。由于地形的自相关性，相互接近的地形采样点，它们之间的关联程度较大。同时，理论与实践证明：狭长的三角性的插值精度比规则的三角形插值精度可信度要低。因此，在 TIN 中对三角性的几何形状有着严格的要求。一般的有三条原则：尽量接近正三角形；保证最近的点形成三角形；三角形网络唯一。此为三角形原则划分问题。

一个良好的数据结构和三角形划分准则，必须由高效的算法和程序实现。算法在具体应用中发挥的作用由算法本身的性能和实现它的程序质量共同决定。而程序的好坏很大程度上依赖算法的原理。对算法本身在理论上进行分析论证，寻求一种高效率、高精度、使用面广的算法是 TIN 建立中重要的一环。

由上述的分析可知，TIN 的数据组织、三角划分准则、算法和程序构成了 TIN 的基本理论体系框架。如图 2-1。

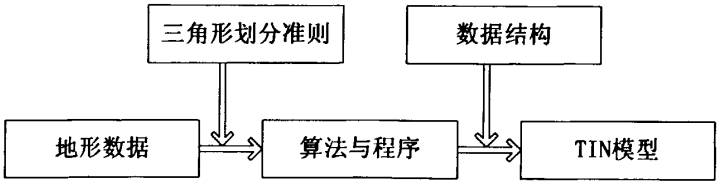


图 2-1 TIN 体系结构

2.2 狄洛尼（Denauney）三角网的定义和性质

2.2.1 狄洛尼（Denauney）三角网的定义

1908 年，数学家 M.G.Voronoi 在数学上定义了平面上的 Voronoi 图，它由一组连续多边形组成，多边形的边界是由连接两相邻点线段的垂直平分线组成。而连接所有相邻的 Voronoi 多边形的生长中心所形成的三角网称为 Delaunay 三角网。它具备了点不共线，四点不共圆的特点。因此，它所形成的三角形具有最优的特性，即三角形的形状最好，避免了狭长三角形的产生。

Delaunay 三角网的外边界是一个凸多边形，它由连接点集 V 中的凸集形成，通常称为凸壳[44-46]。

2.2.2 狄洛尼（Denauney）三角网的性质

Delaunay 三角网具有两个非常重要的性质。

空外接圆性质：在由点集 V 所形成的 Delaunay 三角网中，其每个三角形的外接圆均不包含点集 V 中的其他任意点；

最大-最小内角性质：在由点集 V 所能形成的三角网中，Delaunay 三角网中三角形的最小内角是最大的，即在两相邻三角形形成的凸四边形中，这两三角形的最小内角一定大于交换凸四边形对角线后所形成的两个三角形的最小内角。

Delaunay 三角网由于具备了这两个性质，使得按照 Denauney 三角剖分的三角形最大限度的避免狭长三角形的出现，并且保持三角形构网具有唯一性。Miles 证明 Delaunay 三角网是“好的”三角网；Sibson 认定“在一个有限点集中，只存在一个局部等角的三角网，这就是 Delaunay 三角网”；Lingas 进一步论证了“在一般情况下，Delaunay 三角网是最优的”；Tsai 认为，“在不多于 3 个相邻点共圆的欧几里德平面中，Delaunay 三角网是唯一的”。Delaunay 三角剖分是目前应用最为广泛的三角剖分方法。

2.3 狄洛尼（Denauney）三角网生成算法回顾

Denauney 三角剖分分为直接三角剖分和间接三角剖分。间接 Denauney 三角剖分首先计算 Voronoi 图，然后由 Voronoi 图产生 Delaunay 三角网。这种方法的算法复杂、内存开销大、效率低，现今很少使用。直接 Denauney 三角剖分是利用离散点按照空外接圆或者最大-最小内角性质，直接生成 Delaunay 三角网，是目前基于离散点三角剖分的主流算法。

Tsai 根据实现过程，将 Denauney 三角剖分分成三类：分而治之算法、三角网增长算法和逐点插入算法。

2.3.1 分而治之算法

分而治之算法最早是 1975 由 Shamos 和 Hoey 提出的，Lewis 和 Rovinson 在 1978 年利用该方法进行了三角网的剖分，随后 Lee 和 Schachter、Dwyer 等对他们的算法进行了改进和优化。

分而治之算法的思路是将复杂问题简单化，首先将数据点分割成包含少量点的子集，如一个子集中包括三个、四个点，然后每个子集进行三角剖分，并用局部优化算法（LOP）进行优化，保证三角剖分为Denauney 三角网，最后是对每个子集的三角剖分进行合并，形成最终的整体三角网。不同的实现方法可有不同的点集划分方法、子网生成方法及合并方法。Lee 和 Schachter 提出了分而治之的经典算法，其基本步骤如下：

Step1 把点集 *V* 以横坐标为主，纵坐标为辅按升序排序，即数据点之间满足条件：$(x_i, y_i) <= (x_{i+1}, y_{i+1})$；

Step2 把点集 *V* 分为近似相等的两个子集 *VL* 和 *VR*；

Step3 在 *VL* 和 *VR* 中生成三角网；

Step4 用 Lawson 提出的局部优化算法 LOP 优化所生成的三角网，使之成为 D-三角网；

Step5 找出连接 *VL* 和 *VR* 中两个凸壳的底线和顶线；

Step6 由底线至顶线合并 *VL* 和 *VR* 中两个三角网；

Step7 结束。

该算法的时间复杂度为(NlogN)，其中 N 为数据点数，因此该算法执行时间效率高，但在 *VL* 和 *VR* 中生成三角网时，采用了递归运算，需占用较大的系统

内存。

2.3.2 三角网生长算法

三角网生长算法最早由 Green 和 Sibson 在 V 图中实现，稍后 Brassel 和 Teif 也发表了类似的算法。分为收缩生长算法和扩张生长算法，收缩生长算法是先生成凸壳，并以凸壳为源头，逐步缩小以形成整个三角网。收缩生长算法与数据点的分布密度有关，实际情况比较复杂。扩张生成算法与收缩算法过程刚好相反，算法是从一个三角形开始向外层扩展，最终形成覆盖整个区域的三角网，是常用的三角网生长算法。

扩张生长算法的思想是先找出点集中最近两点连接成一条边，按照狄洛尼三角网构成原则找出第三点，将这三点连接成初始三角形，再以该三角形的每一条边为基线扩展连接相邻离散点，组成新三角形，初始三角形的三边处理之后，继续以新三角形的边连接其他离散点，直到所有的离散点均包含在三角网中。该算法的基本步骤：

Step1 在区域内所有离散点任取一点作为初始三角形的第一个顶点；

Step2 找距离第一个顶点最近的点，作为初始三角形的第二个顶点，两点相连生成初始基线；

Step3 找出距离初始基线中点最近且不和已有两点在一条直线上的点作为初始三角形的第三个顶点，三点连接成三角形，即为初始三角形；

Step4 三角形的两条新边作为新的基线；

Step5 重复步骤 Step3、Step4直到所有基线处理完毕。

该算法的时间复杂度在一般情况下为 $O(N^{3/2})$，最坏情况下达到 $O(N^2)$，因此该算法的时间效率低，优点是占用内存空间较小。在该算法的基础上有许多的改进算法，其改进点主要集中在“第三点”的搜索和三角形重复的判断上。

2.3.3 逐点插入算法

逐点插入算法的思想最早由 Lawson（1977）提出，随后 Lee 和 Schachter（1980）、Bowyer（1981）、Watson（1981）、Tsai（1993）等先后对其进行改进，是一种动态的构网方式。

逐点插入算法的思路是将未处理的点加入到已经存在的狄洛尼三角网中，然后判断点所在的三角形，如果点在三角形内，连接点与三角形的各顶点，利用

Denauney 三角剖分准则，找出影响区域，删除影响区域中的边，对影响区域利用 Denauney 三角剖分准则重新构网，直到区域中所有的点都加入到三角网中。该算法的基本步骤如下：

Step1 首先定义一个包含所有数据点的初始多边形，即包含所有数据点的凸闭包；

Step2 在凸闭包中构建初始狄洛尼三角网；

Step3 从内部数据点中取出一点加入到三角网中；

Step4 搜寻包含该点的三角形，将该点与此三角形的三个顶点相连，形成三个三角形；

Step5 利用 Denauney 三角网的剖分准则，找出影响区域，从里到外更新所有生成的三角形；

Step6 重复步骤 Step3， Step4， Step5直到处理完点集中所有点。

该算法的时间复杂度与三角形生长法相同，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。

通常，分而治之算法的效率是最高的，但是当数据量比较大，分块比较多时，块之间的合并算法复杂，且花时也多，并且递归执行，内存消耗大；三角网生长算法和逐点插入法的执行效率差不多，但是在构网的过程中逐点插入法能保持较好的空间特性，本文选择了逐点插入法完成不规则三角网的构建。

2.4 改进的凸壳内插生成不规则三角网算法

2.4.1 凸壳内插生成算法思路

根据前面所描述的构建不规则三角网的方法和 Denauney 三角剖分的方法知道，Denauney 三角剖分适用于各种数据分布密度，有利于更新和直接利用各种地形特征信息，直接利用原始数据、保持原有精度，并具有唯一性好、追踪绘制等高线算法简单、适应不规则形状区域等优点，因而被认为最适宜表面逼近、建立数字地面模型。利用 Delaunay 三角形构网建立 TIN 地形模型是一种有效的地形建模方法。如果原始数据的数据量不大，可以采用三角网生长法和逐点插入法，逐点插入法具有占用内存空间少，并且空间性能好的优点，如果数据量很大的话，则需要首先将数据分块以加快查询速度。本文采用的是凸壳内插 Delaunay 三角

网算法实现不规则三角网地形模型的生成。

章孝灿在文献[44]中基于凸壳技术提出了一个 Delaunay 三角剖分的快速算法，Larkin[47]改进和完善了的凸壳生成算法,实验证明利用凸壳生成三角网可以提高构网的效率，因此，凸壳生成三角网逐渐进入研究人员的视线。

点集生成不规则三角网算法的思路是先对点集进行处理。然后，建立点集 V 的凸壳，使得除凸壳边界点外，点集中的所有点都在凸壳中。接着逐点插入点集中的点并根据 Delaunay 三角剖分原则，进行剖分。最后对初始的三角网采用局部优化算法进行优化处理。在实现该算法时，设计了合理的数据结构，使得构建的三角网便于等值线提取和三角网重构。

2.4.2 数据结构

算法的执行效率与数据结构之间存在密切的关系。一个良好的数据结构有利于对数据进行高效的管理，从而将提高算法的执行效率。本文中的算法用到以下数据结构（本文算法在 VC++.NET 下实现，这里没有给出类的方法）：

（1）三维点类

```
class Point3D:public CObject            //三维坐标点类
{
public:
    double m_X1,m_Y1,m_Z1;
    ……//定义基本的赋值、取值方法、构造函数和析构函数等
};
```

（2）有向边类

```
class Edge
{
public:
    int   m_index1;    //起点序号
    int   m_index2;    //终点序号
    int   m_index3;    //保留
    byte m_bFlag;      //边界边标志
```

```
    byte m_eFlag;      //等值边标志
    ……//定义基本的赋值、取值方法、构造函数和析构函数等
};
```

（3）有向三角形类

```
class Triangle
{
public:
    int   m_index1;    //顶点1序号
    int   m_index2;    //顶点2序号
    int   m_index3;    //顶点3序号
    int   m_normal;    //三角形法向量在法向量数组中的序号 byte m_flag;
//标志
……//定义基本的赋值、取值方法、构造函数和析构函数等
};
```

为了操作和使用的方便，系统定义了一个索引数组类。

（4）索引数组类

```
class IndexArray
{
public:
    CArray<int,int> m_intArray;
……//定义基本的赋值、取值方法、构造函数和析构函数等
};
```

在构建不规则三角网的同时，建立一个良好的拓扑结构对于三角网的查询和等值线的生成都可以很方便，为此，系统还建立了下面一些拓扑关系：

（1）点-边-三角形拓扑结构

```
class PET_TIN
{
```

```
public:
    IndexArray m_edges;
    IndexArray m_triangles;
    byte   m_flag;          //标志
.....//定义基本的赋值、取值方法、构造函数和析构函数等
};
typedef CArray<PET_TIN,PET_TIN> PET_TIN_TOP;
```

（2）边-三角形拓扑结构

```
class ET_TIN
{
public:
    int m_triIndex1;//左侧三角形序号
    int m_triIndex2;//右侧三角形序号
.....//定义基本的赋值、取值方法、构造函数和析构函数等
};
typedef CArray<ET_TIN,ET_TIN> ET_TOP;
```

（3）三角形-边拓扑结构

```
class TE_TIN
{
public:
    int m_edgeIdx1;//边的序号
    int m_edgeIdx2;//边的序号
    int m_edgeIdx3;//边的序号
.....//定义基本的赋值、取值方法、构造函数和析构函数等
};
typedef CArray<TE_TIN,TE_TIN> TE_TOP;
```

（4）点-边拓扑结构

```
class PE_TIN
{
public:
    IndexArray m_edges;
……//定义基本的赋值、取值方法、构造函数和析构函数等
};
typedef CArray<PE_TIN,PE_TIN> PE_TOP;
```

2.4.3 凸壳内插生成不规则三角网算法关键步骤

凸壳为 Delaunay 三角网的外边界，对凸壳的形成和凸壳在三角网的联结过程中作用的不同研究，形成了一些算法。章孝灿在文献[44]提出了一种基于凸壳的快速生长算法，该算法利用凸壳的特性，避免了三角化时的交点测试，提高了三角网的生成速度，凸壳的形成与三角网联结同时进行，但是该算法根据点集的不同分布，凸壳的形成是动态的，凸壳的边界数变化大。本文从凸壳的形成上进行改进，即先对点集排序，然后，生成包含该点集的凸壳，并且按逆时针的方向保存所有的凸壳边，使得点集中所有的点都处在凸壳边的左侧。最后再进行三角网的联结。具体过程如下：

1、散乱点集排序

寻找点集中 y 坐标最小的点，如果不唯一，再寻找 x 坐标最小的点，按字典顺序对其进行升序排列。

2、凸壳生成算法

建立凸壳是整个三角网生成算法的第一步，凸壳是由二维平面上给定点集中的点构成，包含点集所有点的凸多边形。凸壳边界线段为有向线段，这里将线段按逆时针方向进行连接和存储。在建立凸壳的过程中，关键是求距凸壳边界距离最大的点。在该算法中，设计了凸壳边界合理的数据结构：边数组 Edgearray、三角形数组 Triarray 和变量 a、b、c。其中，变量 a 表示凸壳边界边的起点，变量 b 表示凸壳边界边的终点，变量 c 表示距边界边 ab 距离最大的点。该算法基本步骤如下：

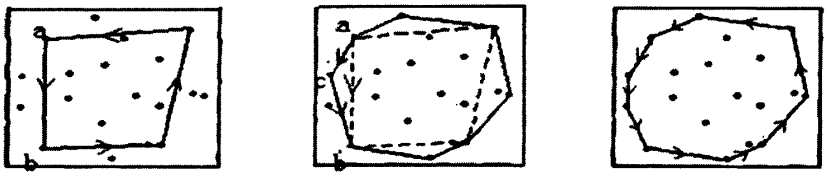
Step1 输入点集 V 中所有的点，并初始化边数组 Edgearray、三角形数组 Triarray 和相应的拓扑关系数组；

Step2 求所有点的 min(x-y),min(x+y),max(x-y),max(x+y);将这四个点按逆时针方向连接，形成初始凸壳，并保存四条有向边到边数组 Edgearray，修改边的边界标志为边界边；

Step3 读边数组 Edgearray 中的第一条边 ab，如果边 ab 右侧存在离散点，则求所有的在 ab 边右侧的点，以及这些点到边 ab 的距离的最大值，记录取得最大值的点为 c，连接 ac、cb，删除边数组 Edgearray 中的 ab 边，同时将边 cb 和 ac 保存到边数组 Edgearray 中；

Step4 读凸壳边数组中的下一条边，重复执行 Step3，直到边数组中所有的边都不存在右侧点，即生成最后的凸壳。

由上述算法可知：凸壳建好后除凸壳边界外，点集中所有的点都位于凸壳边界的左侧，图2-2形象的描述了凸壳形成过程。



（a）初始凸壳　　（b）进行了部分扩展　　（c）最终凸壳

图 2-2 为凸壳形成过程

3、初始三角网生成

利用 Denauney 三角网的外接圆特性构造初始三角网。因此，需要判定点与三角形外接圆的位置关系。

（1）点与三角形外接圆的位置关系的确定

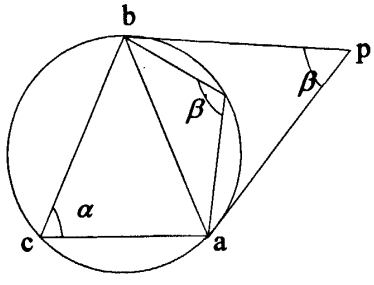


图 2-3 空外接圆判断

图2-3所示，设△abc 的坐标为 a（x_1，y_1），b（x_2，y_2），c（x_3，y_3），任给一点 p 的坐标为（x_p，y_p），则点 p 与△abc 外接圆关系为：

$$\beta' - \beta = \begin{cases} >0 \\ =0 \\ <0 \end{cases}$$ 公式（2-1 ）

在公式（3-1）中，当$\beta'-\beta>0$时，点 p 在圆外，当$\beta'-\beta=0$时，点 p 在圆上，当$\beta'-\beta<0$时，点 p 在圆内。考虑$\beta'+\alpha=180^\circ$，如果$\beta'=\beta$，则有$-\tan\alpha=\tan\beta$，设函数 f 为外接圆检测函数，f 的定义为：

$$f=-\frac{\tan\alpha}{\tan\beta}=\begin{cases}>1\\=1\\<1\end{cases}$$ 公式（2-2）

将公式（2-1）转换为公式（2-2）进行判断时，要考虑两种特殊情况，其一就是当点 p 位于三角形 abc 边上时，公式（2-2）不成立，不过从构网的算法可知，这种情况是不可能发生的；其二则是当点 p 位于边 ab、ac 或者是 bc 的延长线上时，这里不考虑这种情况。换言之，要求点与三角形的边不共线。当 f>1时，点 p 在圆外,f=1时,点 p 在圆上,f<1时,点 p 在圆内,将(2-2)式中的$\tan\alpha$和$\tan\beta$用△abc 顶点坐标表示,经过简化后为：

$$\tan\alpha=\frac{(x_3-x_1)(y_2-y_1)-(x_2-x_1)(y_3-y_1)}{(x_3-x_1)(x_2-x_1)+(y_3-y_1)(y_2-y_1)}$$ 公式（2-3）

$$\tan\beta=\frac{(x_3-x_p)(y_2-y_p)-(x_2-x_p)(y_3-y_p)}{(x_3-x_p)(x_2-x_p)+(y_3-y_p)(y_2-y_p)}$$ 公式（2-4）

由于点 p 不可能出现在三角形 abc 的边上，因此公式(2-3)、(2-4)和(2-5)始终是成立的。设$\Delta x_{ab}=x_a-x_b$，$\Delta y_{ab}=y_a-y_b$，则函数 f 可以最终简化为：

$$f=\frac{(\Delta x_{31}\Delta y_{21}-\Delta x_{21}\Delta y_{31})(\Delta x_{3p}\Delta x_{2p}+\Delta y_{3p}\Delta y_{2p})}{(\Delta x_{31}\Delta x_{21}+\Delta y_{31}\Delta y_{21})(\Delta x_{3p}\Delta y_{2p}-\Delta x_{2p}\Delta y_{3p})}$$ 公式（2-5）

公式（2-5）仅含加减乘除运算，比计算三角形外接圆的圆心和半径，然后计算圆心和其他点的距离，通过距离和外接圆半径的比较简单。

（2）初始三角网生成算法

初始三角网指的是利用 Denauney 三角网的外接圆特性建立的三角网，该三角网并没有进行优化处理，在该算法的实现过程中，设计了多个数据结构：三角形数组 Triarray 用来储存三角网中的三角形，点-边拓扑关系数组 petop 用来储存三角形的点与边的位置关系，点-边-三角形拓扑关系数组 pettop 用来储存点、边

和三角形的位置关系。这些数据结构的设计，为以后等值点的寻找和 TIN 重构提供便利。下面详细的给出了初始三角网的生成算法：

Step1 读入离散点集 V 和凸壳边数组 Edgearray，并初始化三角形数组 Triarray、点-边拓扑关系数组 petop、点-边-三角形拓扑关系数组 pettop；

Step2 取边数组 Edgearray 的第 i 条边，初值为第一条边，在该边的左侧查找距该边最近的点，使得该点与第 i 条边构成的三角形满足空外接圆特性，标志第 i 条边已经使用过；

Step3 判断新形成的边在数组中是否存在，如果不存在，将新边存入边数组 Edgearray，将新生成的三角形按逆时针顺序保存到三角形数组 Triarray，并生成该边的相应的拓扑关系，将拓扑关系保存到数组 petop、pettop 中；

Step4 读边数组中的下一条边 i+1，判断是否已使用过，如果没有，重复 Step2；否则，读另一条边，重复 Step4；直至边数组 Edgearray 中所有的边都被标志为使用过，初始三角网生成。

（3）顶点插入

顶点插入的关键是判定点在三角形中的位置和局部三角网的优化方法。下面就这两方面的问题进行详细的分析。在分析的基础上，设计顶点插入算法。

① 点在三角形中位置的判断

图 2-4，给出了点 p 和有向三角形 abc 的一种位置关系，下面通过向量叉积来判定点是在三角形内还是在三角形边上或者是位于三角形的外部。

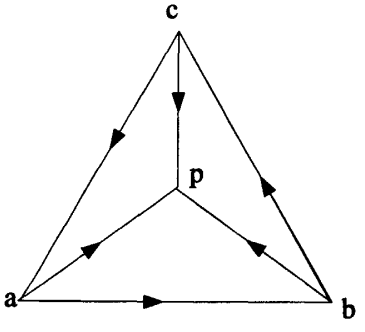


图 2-4 点在三角形内的判断

如图2-4所示，△abc按逆时针方向存储，顶点坐标分别为 $a(x_1,y_1)$，$b(x_2,y_2)$，$c(x_3,y_3)$，点 p 的坐标为 $p(x_p,y_p)$，分别求向量 ab 与 ap、bc 与 bp、ca 与 cp 的叉积：

$$\overrightarrow{n_1}=\overrightarrow{ab}\times\overrightarrow{ap}=(x_2-x_1)(y_p-y_1)-(x_p-x_1)(y_2-y_1)$$

$$\overrightarrow{n_2} = \overrightarrow{bc} \times \overrightarrow{bp} = (x_3 - x_2)(y_p - y_2) - (x_p - x_2)(y_3 - y_2)$$

$$\overrightarrow{n_3} = \overrightarrow{ca} \times \overrightarrow{cp} = (x_1 - x_3)(y_p - y_3) - (x_p - x_3)(y_1 - y_3)$$

按照右手螺旋规则，如果$\overrightarrow{n_1}$>0，$\overrightarrow{n_2}$>0，$\overrightarrow{n_3}$>0,则点 p 在△abc 内，如果$\overrightarrow{n_1}$<0,则点 p 在△abc 外，且在边 ab 的右侧，同理，$\overrightarrow{n_2}$<0，$\overrightarrow{n_3}$<0 时，则点 p 在△abc 外，分别在边 bc 和 ca 的右侧。

② 顶点插入算法

将该顶点插入后，要求得到的三角网依旧满足外接圆特性，因此，在插入的过程中必须同时进行优化处理。算法中用到的数据结构在前面已经描述过，这里不再描述。下面是顶点插入算法的步骤：

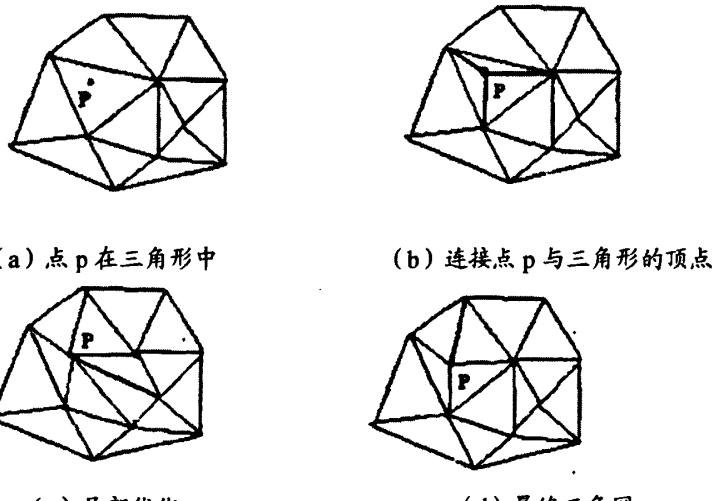
Step1 利用上述方法查找包含插入顶点的三角形；

Step2 利用本节1中所述的点与外接圆位置关系判定方法，查询所有外接圆包含顶点 P 的三角形；

Step3 删除所有两个影响三角形的公共边，并将公共边从边数组 Edgearray 中删除，同时删除包含该公共边的三角形，修改相应的拓扑关系数组，将插入点同影响三角形的全部顶点连接起来，重新形成 Delaunay 三角形，将新生成的边和三角形分别保存到数组 Edgearray 和 Triarray，并生成该边的相应的拓扑关系，将拓扑关系保存到数组 petop、pettop 中；

Step4 重复步骤 Step1~ Step3直到所有的点插入完毕。

上述算法进行顶点插入的过程可以用图2-5（a）~（d）来描述。



（a）点 p 在三角形中　　（b）连接点 p 与三角形的顶点

（c）局部优化　　（d）最终三角网

图2-5 顶点插入过程

第三章 一种基于等值线的不规则三角网重构方法研究

由等值线（当给定的特征值为高程时，称之为等高线）构造不规则三角网的方法有很多，基本步骤大多是先将等值线离散化，然后再对离散后的点集进行三角化，构造不规则三角网。本文根据研究的实际情况，研究了一种先出散乱点集构造不规则三角网，然后，在其基础上提取等值线，将等值线与三角形边的交点即等值点作为插入点，对不规则三角网进行重构。显然，重构后的三角网中的格网尺寸更小，更能表现地形的特征。

等值线图是最常用的图形之一，在地学中，描绘地形高度的等值线图就是等高线图，本文研究的空间属性只有高程信息，所以本文中的等值线即为等高线。它是用来表示那些具有连续分布特征的地形现象，可以表示地面和空间连续分布现象，并且可以精确表示这些现象的垂直变化和水平方向的强弱差异，因此它的应用相当广泛。绘制等高线是对大量离散的、又具有一定规律的几何量值或物理量值，用数学的方法插值变换成图的过程。等高线作为地形图所表示的地理信息中最主要的一类地貌，具有以下的性质和特点：

（1）同一条等高线上各点的高程相等；

（2）相邻等高线的水平间隔与地面坡度成反比。即地面坡度越大，相邻等高线的间隔越小；反之则越大；

（3）等高线的弯曲形态与相应的实地地貌形态一致；

（4）一般情况下等高线是互不相交闭合曲线，只有在边界的时候才可能出现开曲线；

（5）在彩色地形图上，等高线用一定宽度的彩色线条表示。

等值线的生成一般由离散点经过插值得到各种网格模型，然后查找等值点，最后进行等值线追踪[21]。如三角网、规则网格等，相对于规则格网而言，三角网具有以下特点：对于分布不规则的离散点，不须变换成规则网格，可直接利用原始观测点插补等值点，这样可以提高等高线的精度，且对特征高程点部位任意小的等高线图形均能绘出；应用三角网法绘制的等高线图可具有自由边界，在有观测点地均可出现等高线；三角网法绘制等高线时进行等高线的追踪时可以自动避免规则网格的鞍点问题，因此方法简单。本文采用不规则三角网生成等高线，等高线生成过程一般为：离散点插值成不规则三角网（第三章已经完成）；在网格模型的基础上计算等值点；按一定规则追踪得到等值（高）线。

3.1 计算等值点

离散点内插生成不规则三角网后，等值点的内插都是在三角形边上进行的，三角形边上是否有等值点可从以下几种情况进行讨论，图 3-1（a）～（f）列出了等值点存在时的所有可能位置，此时，假设等高线的高程为 20。

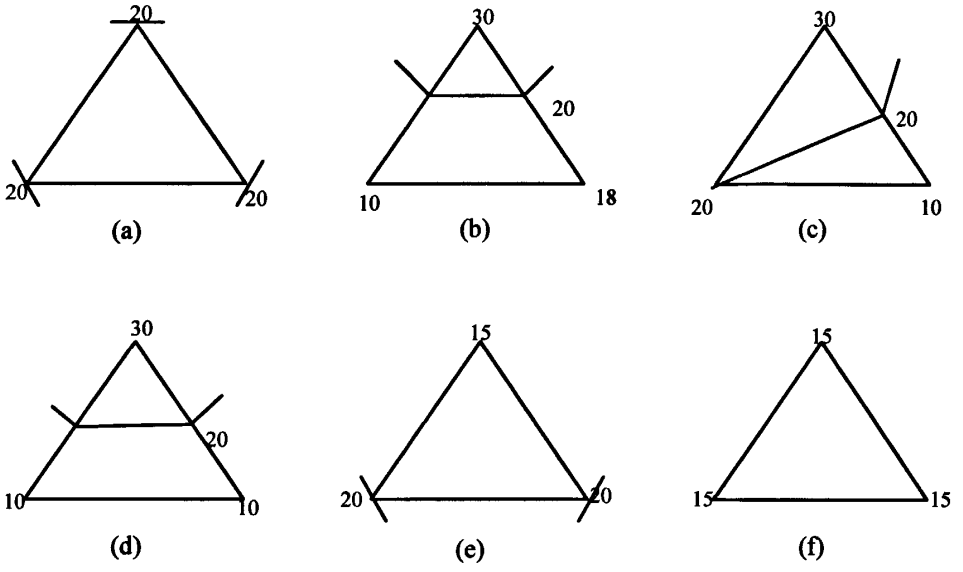


图 3-1 三角形内插等值点的各种情形

（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某条等高线的高程，即 $h=h_1=h_2=h_3$，则三角形的三个顶点都是等值点，如图 3-1（a）；

（2）若三角形三顶点高程值不相等，则当每条边存在等值点可通过下面的式子判断：

$(h-h_1)(h-h_2)>0$ 时,则该边无等值点，如图 3-1（f）；$(h-h_1)(h-h_2)=0$ 时，则该边的其中一个顶点或者该边的两个顶点就是等值点，如图 4-1（a）、（c）（e）；$(h-h_1)(h-h_2)<0$ 时，则该边一定存在等值点如图 3-1（b）、（c）、（d）。

但是，一个三角形的一条边最多可能出现两个等值点，不可能存在三个及以上的等值点；

（3）若三角形顶点高程不等，而其中有一个顶点高程等于等值线高程，则如果三角形还存在一个等值点，则该等值点一定位于该顶点的对边上，如图 3-1（c）；

（4）若三角形有两个顶点相等，该三角形如果存在等值点，等值点必位于

靠近第三点的两边上，如图 3-1（d）。

由于三角形的顶点可能被两个以上的三角形共用，因此，在进行等值线的追踪时，可能出现二义性，为了简化算法，对顶点是等值点的情况进行预处理。即当顶点的高程等于给定等高线的高程时，对顶点高程给一个微小增量，也就是说这时，一个三角形只能有 0 或 2 个等值点出现，这样既可以简化追踪算法，又不至于影响到精度，如有需要可以标志该顶点，在等高线追踪完成后，还原该顶点的高程值。

3.1.1 计算等值点坐标

等值点位置的计算，即是要求出给定高程值等值线在某一特定位置处的坐标。计算等值点坐标后即可进行等值线的追踪。等值点计算最常见的方法是判断给定高程的等值线与已知高程的数据点之间的关系，然后通过内插得到该点的平面坐标，常见的插值方法为线性内插和双线性内插，本文使用线性内插方法实现，假如△abc 存在等值点，顶点字符代表顶点的高程，各顶点的坐标已知为 a（x_1，y_1，h_1）、b（x_2，y_2，h_2）、c（x_3，y_3，h_3），等值点 p 的坐标（x，y，h）。如图3-2 所示：

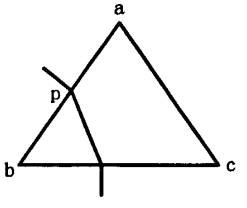


图 3-2 等值点计算

那么，点 p 的坐标可以通过线性插值得到，坐标值求法如公式（3-1）：

$$\begin{cases} x = x_1 + \dfrac{x_2 - x_1}{h_2 - h_1}(h - h_1) \\ y = y_1 + \dfrac{y_2 - y_1}{h_2 - h_1}(h - h_1) \end{cases} \qquad \text{公式（3-1）}$$

在公式（3-1）中，当出现特殊情况，即 h2= h1 时，公式（3-1）不成立，此时，说明边 ab 与水平面平行，点 p 在边 ab 上，将边 ab 投影到水平面，则点 p 在水平面上存在投影点 p1，利用平面上的直线方程求得点 p1 的平面坐标。则该点的平面坐标也为点 p 的平面坐标。

3.1.2 计算等值点算法

本文按照逐个三角形逐条边处理原则，求出通过三角形边上所有等高线的等

值点坐标，该算法中涉及到如下数据结构：不规则三角网数组 Triangles 存储了 3.5 中生成的所有三角形，数组 ep1、ep2、ep3，其中 ep1 用来存储边 ab 上的所有等值点，ep2，ep3 分别存储 bc 和 ca 边上的等值点，三角形顶点变量 a、b、c 及其编号 i1、i2、i3 和顶点相应的高程变量 h1、h2、h3。算法描述如下：

Step1 输入等高距；

Step2 读入不规则三角网数组 Triangles，调整所有的三角形，使得三角形下边顶点高程小，上边顶点高程大，且以高程最小的顶点为三角形的起点顶点，将三角形按 abc 逆时针排列，三角形顶点 a 的编号为 i1、高程为 h1，b 的编号为 i2、高程为 h2，c 的编号为 i3、高程为 h3，有向边 ab 的编号为 ei1，bc 的编号为 ei2，ca 的编号为 ei3；

Step3 建立数组 ep1、ep2、ep3，并初始化为空，其中 ep1 用来存储边 ab 上的所有等值点，同理，ep2，ep3 分别存储 bc 和 ca 边上的等值点；

Step4 取第 i 个三角形的 ab 边，如果 ep1 为空，则求其等值点：利用顶点 a、b 的高程和等高距，求出通过该边的等值点的个数，然后分别利用公式（4-1）内插得各等值点的平面坐标，将它们按高程从小到达，保存到数组 ep1；否则处理该三角形的其他边；同理处理该三角形的 bc 和 ca 边；

Step5 如果三角形没有处理完，取下一个三角形，重复 Step4，直到所有三角形的所有边上的等值点都求得平面坐标。

3.2 等值线生成

3.2.1 等值线生成原理

等值线分为开曲线和闭曲线，开曲线始于边界，又终于边界，闭曲线位于区域内部，起点和终点重合，三角网等值线追踪的原理[47-49]是：如果等值点在边界边上，则该点某一条等值线的入点或出点，而如果等值点在内部边上，则该点既是入点又是出点。当三角形的顶点是等值点时，由于该顶点被多个三角形所共享，在追踪等值线时可能出现二义性，所有要对该顶点进行处理。

3.2.2 等值线生成

根据等值线的生成原理，可知等值线生成时，主要包括等值线追踪时的走向和去向，以及对顶点是等值点时的处理。

1、 等值线的追踪

确定出全部等值点后，必须有一规则，有一次序将它们连成等值线，这就是

等值点的追踪问题，分以下3步处理:

（1）确定等值线进入网格时的走向

对于任意三角形单元，其等值线可能有以下3种方式通过三角形单元(如图3-3（a）~(c)):

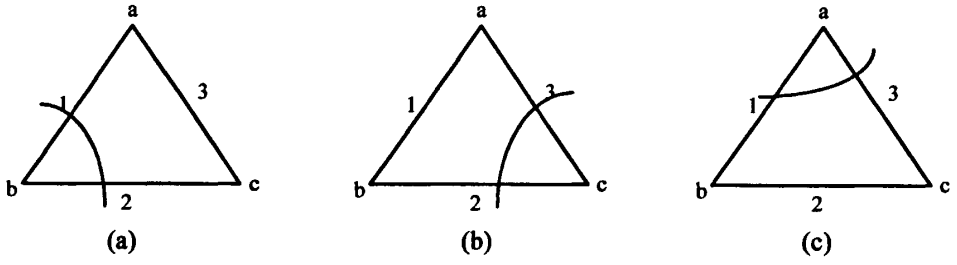


图3-3 三角网等值线的走向

（2）确定等值线进入网格后的去向

等值线进入网格后，从网格的另外两个边方向出去，可以按这样一个次序追踪下一个等值点，即先考虑等值线原来的前进方向，后考虑当前等值点的远近。

（3）网格点为等值点的处理

有时网格点高程值与相交而高程值相等，此时等值线通过网格点，而网格点同时又是3个相邻网格的公共点，同一等值点分别存放在3个不同的单元中，在追踪时一定会发生重复使用和追踪混乱的问题，故对此情况必须预先处理，其方法是对网格点加上一个足够小数值给予修正。

2、 等值线的搜索

搜索等值线的关键是如何找到线头，再从线头搜索到线尾。下面分开曲线和闭曲线加以阐述：

（1）开曲线的搜索

先从边界的最下边从左至右搜索，看有无等值点，若有，按自下而上的情况增加一虚设点，追踪下一等值点，直至该等值线搜索完，继续向右寻找等值点，若有，重复上述过程；若无，分别从三角形的左边至右边作类似的搜索。

（2）闭曲线的搜索

扫描三角形的每条边，按网格点在三角形中存储顺序扫描，如有等值点把它作为线头，记下位置，按存储顺序的情况增加一虚设点，追踪下一个等值点直至返回原起始点若无等值点，继续扫描，直到全部网格边扫描完为止。

3.3 基于等值线的三角网重构算法研究

在对 TIN 的可视化处理时，TIN 中三角形的形状直接影响到可视化的效果，格网的尺寸越小，越能表现地形的细节特征，格网的尺寸越大，表现地形的细节越粗糙。因此，在实际应用往往需要对 TIN 进行处理，即要求重构 TIN。

3.3.1 三角网重构算法思路

三角网重构的算法，根据实际的需要不同，重构的算法区别较大，通常是采用基于格网和等值线进行。基于格网的往往采用将网格的对角线按某个方向划分成三角形，然后内插点，有时也有对格网进行四分或八分的。本文采用基于等值线的三角网重构，即将等值点作为内插点，重构 TIN。

三角网重构的目的是为了在对 TIN 进行地形可视化时达到一种符合实际需要的效果，本文设计的算法思路是：将基于 TIN 生成等值线时求得的等值点内插到凸壳内插生成的不规则三角网中，以缩小三角网中格网的尺寸，利用生成三角网和等值点时建立的各种数据结构，对三角形的形状与等值点在三角形边上的分布情况进行分类处理。由于算法在实现时利用了等值点，因此，这里将重构的三角网中包含等值点的三角形称为等值三角形，将重构后的三角网称为等值三角网。

3.3.2 三角网重构算法

格网的尺寸越小，越能表现地形的细节特征，在可视化之前，利用原始数据点和 3.1 节对不规则三角网进行内插生成的等值点，对不规则三角网进行重构，重构不规则三角网，即为等值三角网。下面按不规则三角网的三角形的形状和三角形各边的等值点的情况分别进行讨论。

3.1 节在内插等值点的时候已经对不规则三角网中的三角形进行了调整：三角形按逆时针排列，并且下边顶点的高程小，上边顶点的高程大。经过这种处理后，我们将不规则三角网中的三角形形状分为五种类型，见图 3-4。

图 3-4 说明：设三角形为△abc，顶点 a 在原始点序列中的序号为 i1、高程为 h1，顶点 b 在原始点序列中的序号为 i2、高程为 h2，顶点 c 在原始点序列中的序号为 i3、高程为 h3。Type1：h1<h2<h3；type2：h1<h3<h2；type3：h1=h2<h3；type4：h1=h3<h2；type5：h1<h2=h3。

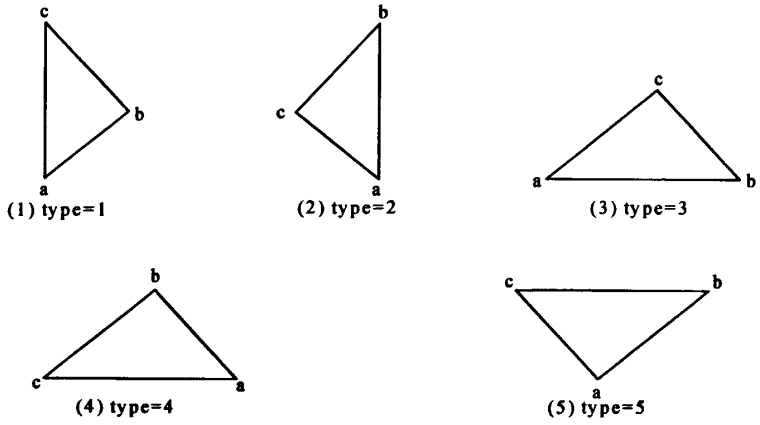


图 3-4 不规则三角网 TIN 中三角形形状分类

这里等值三角网的生成算法的思路是将 3.1 所求得的等值点插入到 2.5 得到的 TIN 中，根据 TIN 中三角形与等值点之间的位置关系，对 TIN 进行重构。该算法设计的数据结构有：等值三角网数组 cnttrangles 用于存储重构后的 TIN，三角形法向量变量 normal 用于存储重构后的各三角形的法向量。算法描述如下：

Step1 初始化等值三角网数组 cnttrangles 和三角形法向量变量 normal；

Step2 输入不规则三角网数组 trangles 和三角形各边等值点数组 ep1、ep2 和 ep3；

Step3 取不规则三角网中的第一个三角形，如果三角形中没有等值点，则将其加入数组 cnttrangles 中，利用叉积计算该三角形的法向量，保存到变量 normal，否则，判断三角形的类型，转至相应类型处理函数，计算所得到的等值三角形的法向量，并保存，读下一个三角形；

Step4 数组 trangles 中的三角形未处理完，转 Step3，直到所有的三角形都处理完，即等值三角网生成。

下面根据三角形的形状分类进行讨论。

1、 三角形类型为 type=1 时的处理方法

定理 3-1 当三角形的类型为 type=1 时，如果 ab 边存在 n1>0 个等值点、bc 边存在 n2>0 个等值点，那么在 ca 边存在 n1+n2 个等值点。

证明：设 ab 边上等值点的高程为 ha，bc 边上等值点的高程为 hb，因为，

△abc 顶点的满足 h1<h2<h3，那么 h1<ha<h2，又，通过三角形的等值点数为 0 或 2，所以当 ab 存在高程为 ha 的等值点时，与之对应的另一个等值点肯定在 ca 边上；同理可证，当 bc 边存在等值点时，与之对应的等值点肯定也在 ca

边上。

根据三角形边上等值点分布情况和定理 3-1，从下到上依次处理各边，并按边上等值点的情况，归纳为以下 11 种方式构造等值三角形，此时，考虑了顶点 b 为等值点的情况。如图 3-5（a）~（k）所示，图中黑点为等值点，加粗三角形为等值三角形。其中图（a）为 ab 上存在等值点，且该点为 ab 边上的第一个等值点时三角形的联结方式；图（b）为 ab 边上存在多个等值点时的联结方式；图（c）为 ab 边上有且仅有顶点 b 为等值点时的联结方式；图（d）为 ab 边上存在等值点且顶点 b 也为等值点时的三角形联结方式；图（e）为 bc 边上不存在等值点，且顶点 b 为等值点时三角联结方式；图（f）为 ab 边存在、bc 不存在等值点，同时顶点 b 也不是等值点时的联结情况；图（g）为 bc 边不存在、ab 存在等值点时的三角形联结情况；图（h）为 ab 不存在，bc 存在等值点，且该等值点为 bc 边上第一个等值点的联结情况；图（i）为顶点 b 不是等值点，且等值点边 bc 的第一个等值点、ab 边存在最后一个等值点时的联结方式；图（j）为 bc 存在多个等值点的情况；图（k）为处理边 bc 上的最后一个等值点的情况。

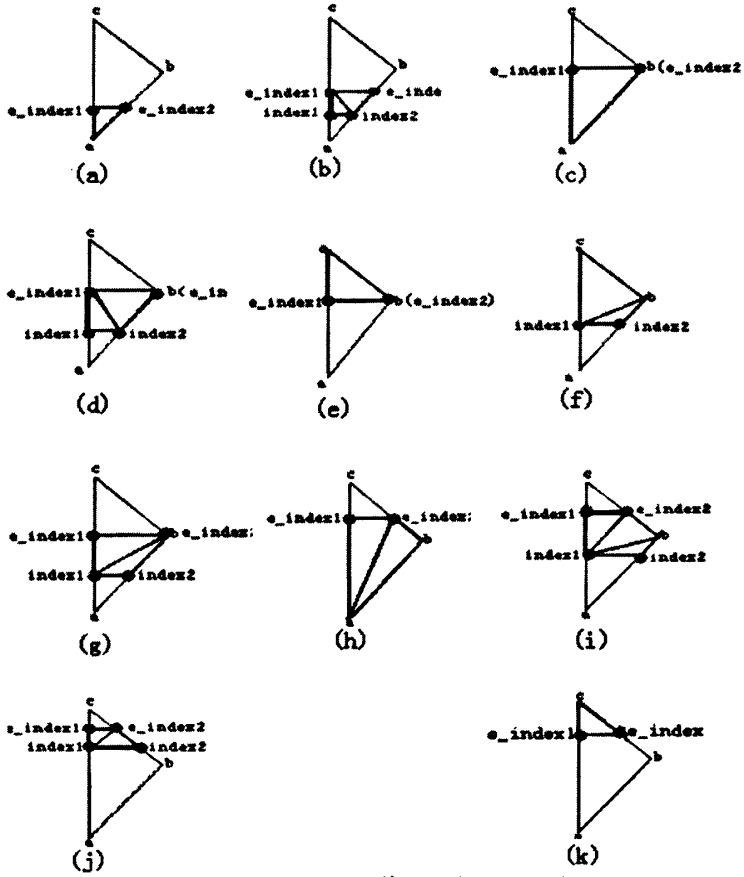


图 3-5 三角形形状为 type=1 时，等值三角形的构造方法

2、 三角形类型为 type=2 时的处理方法

定理 3-2 当三角形的类型为 type=2 时，如果 ca 边存在 n1>0 个等值点、bc 边存在 n2>0 个等值点，那么在 ab 边存在 n1+n2 个等值点。

证明同定理 3-1；

Type=2 时的处理同 type=1 相似，只是将 ab 边换成 ca 边，将点 b 换成点 c 考虑即可。

3、 三角形类型为 type=3 时的处理方法

定理 3-3 当三角形的类型为 type=3 时，如果 bc 边存在 n1>0 个等值点，那么在 ca 边也存在 n1 个等值点。

证明：设 bc 边上等值点高程为 h，则有 h2<h<h3, 又 h1=h2< h3，那么，可得 h1<h<h3，即 bc 和 ca 边上有相同的等值点个数。

等值三角形的构造如图 3-6（a）~（c），其中（a）为 bc 边上存在等值点，且该点为第一个点时的三角形联结情形；（b）为 bc 边上存在多个等值点时，三角形的联结；（c）为 bc 边存在等值点，且该点为最后一个等值点时的三角形联结。

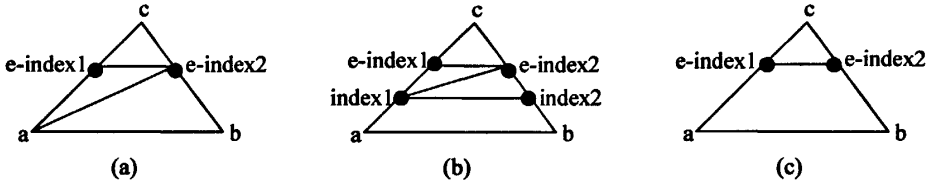


图 3-6 type=3 时等值三角形的构造方法

4、 三角形类型为 type=4 时的处理方法

定理 3-4 当三角形的类型为 type=4 时，如果 ab 边存在 n1>0 个等值点，那么在 bc 边也存在 n1 个等值点。

证明：同定理 3-3。处理也类似于 type=3 时，将图 4-7 中的顶点 b 换成 a，c 换成 b，a 换成 c 即可。

5、 三角形类型为 type=5 时的处理方法

定理 3-5 当三角形的类型为 type=5 时，如果 ab 边存在 n1>0 个等值点，那么在 ca 边也存在 n1 个等值点。

证明：同定理 4-3。处理方法上与 type=3 时，略有不同，如图 3-7（a）~（c）。其中，（a）表示 ab 边上存在等值点，且该点为第一个等值点时三角形联结方式；

（b）表示 ab 边上存在多个等值点时三角形联结方式；（c）表示 ab 边上最后一个等值点的三角形联结情况；

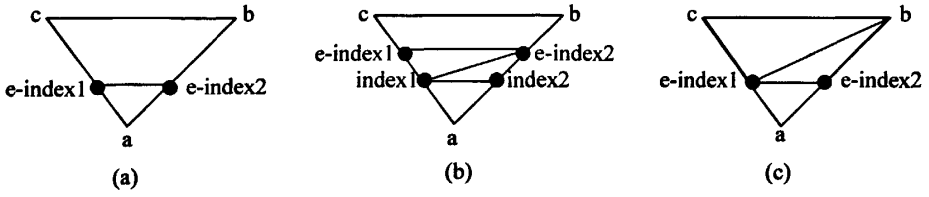


图 3-7 type=5 时等值三角形的构造方法

算法利用原有三角网和等值点，对三角形的形状进行分类，采用分形方法对原有三角网进行重构，即等值三角网就重构后的 TIN。对三角形的形状进行分类处理后，不用进行三角形的等同和交叉判断，方法实现简单。

由上所述，该算法思路简单，易于实现。对于精度要求不是很高的地形可视化有一定的实用性。

第四章 用 OpenGL 实现 TIN 的三维可视化

TIN 虽然实现了地形表面的数字化表达，但是信息隐含，地形可读性差。因此，需要对它进行可视化处理，即以 TIN 为基础实现对地形的直观表达。地形可视化包括二维和三维地形可视化，二维地形可视化包括等高线地形图、分层设色图和剖面图等，三维地形可视化包括三维地形透视图、晕渲图、地形细节层次模型等。其中，晕渲图以所表示的地貌立体感强、直观易读、生动形象，对地貌形态的表达能力强，能形象地反映绝大多数的地貌形态，并且用晕渲所表示的地貌没有数量概念的特点在地形制图方面被广泛的应用。本文就是以 TIN 为基础，利用 OpenGL 的强大绘图功能，在 VC++.NET 下实现的对 TIN 的三维可视化。

4.1 OpenGL 简介

OpenGL（Open Graphic Library）是由 SGI 公司设计的一套功能强大的底层三维图形 API[51]，是目前最主要的二维和三维交互式图形应用程序开发环境，它简单易用的函数为三维图形渲染提供了强大的功能，已成为业界应用的最为广泛的图形应用编程接口。

4.1.1 OpenGL 的特点和功能

OpenGL 具有下面两个特点：

（1）OpenGL 的软件接口与硬件无关，可以在 Windows 系列操作系统、unix、linux、Macos 等多种平台上运行，因此，OpenGL 的应用程序有较好的移植性；

（2）OpenGL 可以在客户机/服务器系统上工作，即具有网络透明性；

OpenGL 具有下面七大功能，使得其在三维图形建模和处理方面拥有强大优势：

（1）建模，OpenGL 图形库除了提供基本的点、线、多边形的绘制函数外，还提供了复杂的三维物体（如球、锥、多面体、茶壶）等以及复杂曲线和曲面（如 Bezier, Nurbs 等曲线或曲面)绘制函数；

（2）变换，OpenGL 图形库的提供平移、旋转、缩放变换和平行投影(又称正射投影)和透视投影两种变换；

（3）颜色模式设置，OpenGL 颜色模式有两种，即 RGBA 模式和颜色索引；

（4）光照和材质设置，OpenGL有多种光照模式，其中光源有辐射光(Emitted Light)、环境光(Ambient Light),漫反射光(Diffuse Light)和镜面光(Specular Light)。材质用光反射率来表示，场景(Scene)中物体最终反映到人眼的颜色是光的红绿蓝分量与材质红绿蓝分量的反射率相乘后形成的颜色；

（5） 纹理映射(Texture Mapping)，利用 OpenGL 纹理映射功能可以十分逼真地表达物体表面细节，实现具有高度真实感的三维图形；

（6）位图显示和图像增强，OpenGL 提供融合(Blending)、反走(Antialiasing)和雾化(fog)等特殊图像效果处理；

（7）双缓存(Double Buffering)动画，双缓存即前台缓存和后台缓存，简而言之，后台缓存计算场景、生成画面，前台缓存显示后台缓存已画好的画面。

4.1.2 OpenGL 的基本工作流程

OpenGL 的基本工作流程如图 4-1：

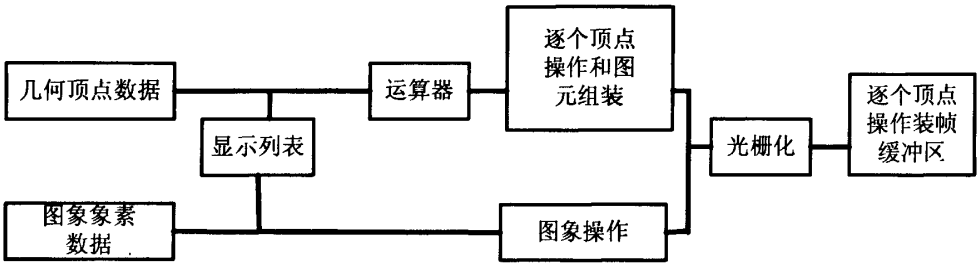


图 4-1 OpenGL 基本工作流程

从图 4-1 可知，OpenGL 中进行主要的图形操作直至在计算机屏幕上渲染绘制出三维图形的基本步骤：

（1）根据基本图形单元建立模型，并且对所建立的模型进行数学描述（OpenGL 中把点、线、多边形、图像和位图都作为基本图形单元）；

（2）把模型放在三维空间中的合适的位置，并且设置视点（viewpoint）以观察所感兴趣的景观；

（3）计算模型中所有物体的色彩，其中的色彩根据应用要求来确定，同时确定光照条件；

（4） 把景物模型的数学描述及其色彩信息转换至计算机屏幕上的象素，这个过程也就是光栅化（rasterization）。

4.1.3 VC++.NET 调用 OpenGL 的方法

1、VC++.NET 调用 OpenGL

OpenGL 是用 C/C++语言编写的，而 VC++.NET 是基于消息驱动机制的，编程灵活，代码执行效率高的 C/C++的高级版本，因此，用 VC++.NET 调用 OpenGL 函数库来实现三维地形可视化很方便，需要将头文件和导入库做相应的处理，即只需将 OpenGL 的动态链接库 openg132.dll, glu32.dll、glew32. dll 和 glut32.dll 添加到 VC++.NET 中，在 VC++.NET 的应用程序头文件中包含 glew.h、glext.h、glut.h、glxew.h、glxext.h、wglew.h、 wglext.h 等头文件，VC++.NET 就可调用 OpenGL 中的函数。在调用 OpenGL 之前必须对它进行初始化，即要获取绘图的设备描述表（Device Contex ，DC）和 OpenGL 的着色描述表（Rendering Context，RC）以及设备环境像素格式设置：每一个 OpenGL 都被连接到一个着色描述表上，而着色描述表将所有的 OpenGL 调用命令连接到设备描述表上，Windows 的设备描述表被定义为 **hDC** ，DC 将窗口连接到 GDI(Graphics Device Interface 图形设备接口)，而 RC 将 OpenGL 连接到 DC，由变量 **hWnd** 保存 Windows 指派的句柄。

2、初始化 OpenGL 环境

由于 OpenGL 是跨平台的，在 Windows 下对它编程使用的是 Windows API，因此，首先需要对它进行初始化，初始化的关键是要设置 OpenGL 的像素格式，具体设置如下：

```
#include"headFile.h"
Class InitOpenGL
{
 Private:
      HDC hDC;
      HGLRC hRC;
      GLuint pixelformat;
 Public:
      InitOpenGL();
      ~InitOpenGL();
      Void Set DC(HDC hdc);
```

```
    BOOL Set OpenGLPixelFormat();
    BOOL Init();
    Void Resize Window(GLuint width , GLuint height);
};
```

4.2 OpenGL 绘制三维地形

OpenGL 绘制三维地形的一般过程：场景设置，包含几何变换、投影变换、光照处理和环境设置；地形模型构建、模型变换以及模型映射；三维显示。

4.2.1 场景设置

OpenGL 中的场景设置主要包括几何变换和投影变换以及光照处理，下面具体的进行讨论：

1、几何变换

几何变换是指三维场景中的物体运动姿态的变化，包括物体的平移、旋转和缩放，对应OpenGL函数分别是glTranslate(),glRotate(),glScale()，从而确定物体在场景中的位置、旋转角度和缩放比例。

2、投影变换

投影变换决定了物体投影到窗口的方式，OpenGL提供了两种投影方式：透视投影和正交投影方式。透视投影基本符合人类的视觉习惯，同样尺寸的物体离视点近的比离视点远的大，远到极点即消失。正如人眼不能聚焦到非常近或非常远的物体一样，透视投影有2个剪切面:近剪切面和远剪切面，分别将离视点太近和太远的物体部分地或全部地剪切掉。为了达到上述投影效果，透视投影的取景器被设计成一个被截去了顶的四面锥体，因此取景器又称为观察锥。落在取景器内的物体朝着观察锥的顶点的方向投影，观察锥的顶点就是视点，靠近视点的平面称为近剪切面，观察锥的底称为远剪切面。观察锥的底平行与xoy平面，并向z轴负方向延伸。正交投影 正交投影的取景器是一个封闭的平行六面体。与透视投影不同，从一端到另一端，取景器的大小不变，因此同样尺寸的物体，离视点近的物体与离视点远的物体经投影后，它们的大小仍然是相同的。

3、光照处理

要绘制逼真的地形，就必须要进行光照处理，利用OpenGL进行光照处理时，由函数glcolor*（）指定物体的颜色，OpenGL还可以控制光照与物体的关系，产

生多种视觉效果。光照处理的一个重要的步骤是计算可见面的光照强度，常用的方法是计算模型中所有可见面的每个点的光照强度或者是只计算少量面的每个点的光照强度，通过插值完成其他面的亮度计算。本文中的算法是间接的计算所有可见面的光照强度，即是利用光源位置与可见面的法向量之间的关系，为了减少计算量而直接采用了顶点的法向量参与计算光照而获取顶点的颜色。

4.2.2 地形模型映射

地形模型映射[52-53]就是把数字形式的地形数据转成 OpenGL 的基本格式,并计算相关的参数(如顶点颜色和法向量)的过程，常见的数字高程模型如 TIN 和 grid 的数据都不能直接在 OpenGL 中使用，必须要转换成 OpenGL 的原语序列。系统中采用了将 TIN 数据转换成 OpenGL 的三角面原语序列。

4.3 地形晕渲的实现

第三章实现了通过对原始离散点构建的 TIN 求等值点，得到重构后的 TIN，TIN 是对地形的数字描述，信息隐含，读者不能直观的获取地形信息，为了便于读者进行直观、形象的理解地形信息，并利用地形信息进行直观的地形分析，必须对 DEM 进行可视化，先后出现的可视化方法有写景法、地貌晕翁法、地貌晕渲法、分层设色法等，近几年出现了利用虚拟显示实现的具有真实感的三维可视化方法也成为研究的热点。本文利用 OpenGL 和 VC++.net 实现了地形的彩色晕渲。

4.3.1 DEM 生成晕渲的基本原理

地形晕渲法[54-57]也称地貌晕渲法或阴影法，它根据假定的光源对地面照射所产生的阴影强弱明暗程度，用相应浓淡的色彩或墨绘制阴影，显示地貌起伏形态。利用 DEM 生成晕渲的基本原理是：确定光源方向；计算 DEM 单元各顶点的法向量或者是 DEM 单元的坡度和坡向；将法向量或者坡向与光源方向比较，向光面赋浅色调，背光面赋深色调。本系统简单的实现了地貌晕渲与分层设色、等高线的叠加，对晕渲的精度要求不是很高，采用的是 DEM 单元各顶点的法向量与光源方向的比较来计算各顶点的明亮度。

4.3.2 计算机制作晕渲

根据 DEM 生成地貌晕渲的原理，利用计算机制作晕渲的一般步骤：利用获取的数据建立 DEM 模型；计算 DEM 单元顶点法向量；确定光源位置和设置地

表垂直与水平比例尺参数；颜色设置；编程生成具有阴影和明暗变化的晕渲图。

1、构建 DEM 模型并计算单元顶点法向量

读取&cnttriangles 数组中的三角形，用向量的叉积计算三角网中所有三角形的法向量，法向量的方向与三角形平面呈右手螺旋关系，将法向量保存到数组& triNormals，根据三角网的 pettop 拓扑关系，找到与预求法向量的顶点 p 关联的所有三角形，从数组& triNormals 中读取该三角形法向量，求得这些三角形的平均法向量，并对该向量作归一化处理后得到的值，即为顶点 p 的法向量。

2、光源的选择

晕渲受光源位置的影响，光源位置不同，晕渲的效果存在明显差异。采用的光源通常有直照光源、斜照光源和综合照光源三种[59]。斜照光源可以显示地貌立体和山脉及其走向，在计算机自动地貌晕渲时，一般采用斜照光源，在实验中假设光源是以平行光线从一定高度角的方向照射到地面上，光源的位置表示为(S，A)/(方位角，倾角)， 方位角取值为-180 度—180 度，倾角取值 0—90 度，实验将光源的位置设置成人机交互，用户可以根据需要，对光源的位置进行设置，默认的光源位置为（90，45）/（方位角，倾角）。

3、垂直比例参数设定

地表的起伏很复杂，对不同的区域可以选择不同的垂直比例尺参数，如对于丘陵地貌形态一般加大其地形垂直比例，使其山脉拔起，增大阴阳坡的对比，可以较好地表现微地貌的形态，对高山地区，由于海拔本身较高，山峰陡峭，可以减少垂直比例，使山坡阴面不至于过暗，在晕渲自动生成软件中，一般提供了人机交互方式，可以对不同的区域设置不同的垂直比例参数[48]，实验中对垂直比例参数设置提供人机交互方式，用户可以根据需要进行设置，实验也证明了对同一地区，相同光照下，对垂直比例进行一定的夸张，地表的起伏效果存在明显的不同。

4、色彩的设计原则

地貌晕渲从色彩角度可分为 3 种：黑白晕渲、双色晕渲和彩色晕渲，彩色地貌晕渲是使用色彩的浓淡、明暗和冷暖对比来建立地貌的立体感觉，相对于单色晕渲在有更丰富的表现力[60]。在地貌晕渲过程中，可以用分层设色的原理结合地貌类型和地理景观的设色原则进行色彩的设置， 只要设色合理，就能获得理想的晕渲，制作黑白晕渲时，分层设色全部为浅灰色;制作双色晕渲时，分层设色全部为某一彩色;制作彩色晕渲时，可根据需要在首层，末层设不同的彩色(必要时可在中间任何一层插一色彩)，就可获得色彩丰富的彩色晕渲，甚至可制作出十分接近自然色的晕渲，值得注意的是，层数应该与等高线的条数成整数倍关系，

即一个等高距分成几层或几个等高距合成一层，便于在某一高度设色，理论上讲，层数越多越好，这样可以使分层设色的色彩十分柔和地渐变，而实际上层数太多是意义不大的，层数多少可根据等高线的间隔而定，等高线间隔大时层数多，反之，则少。实验中，采用分层设色的原则，建立了色彩表，用户可以使用默认的灰色设置，也可以根据需要，对不同的等高带设置不同的颜色。

4.3.3 TIN 晕渲算法关键步骤

本实验是在 VC++.NET 环境下，利用 OpenGL 和 MFC 编程实现的。将 TIN 转化为三维可视化地形图的方法有多种，本实验实现的是 TIN 的彩色晕渲，算法思路是计算 TIN 中各顶点的法向量，根据法向量来计算各顶点的颜色，达到光直接照射的地方强度大，颜色亮，而背光的地方，光的强度弱，因此，得到的颜色暗。数组 v 为 TIN 中三角形各顶点的法向量，数组 teptop 存储三角形-边-顶点(teptop)拓扑关系。具体算法描述如下：

Step1 计算不规则三角网中三角形的总数 m；

Step2 计算三角形各顶点的法向量，将三角形各顶点的法向量保存到数组 v 中，并保存三角形-边-顶点(teptop)拓扑关系；

Step3 初始化 OPENGL 环境；

Step4 设置光源位置；

Step5 设置图形绘制坐标转换的偏移量，进行几何变换，调整到窗口的合适位置；

Step6 取数组&cnttriangles 的第 i（初值为 0）个三角形；

Step7 如果 $i>m$-1，转 Step11，否则，读取三角形 i 三个顶点坐标；

Step8 取得各顶点的法向量，并与光源的平行光比较；

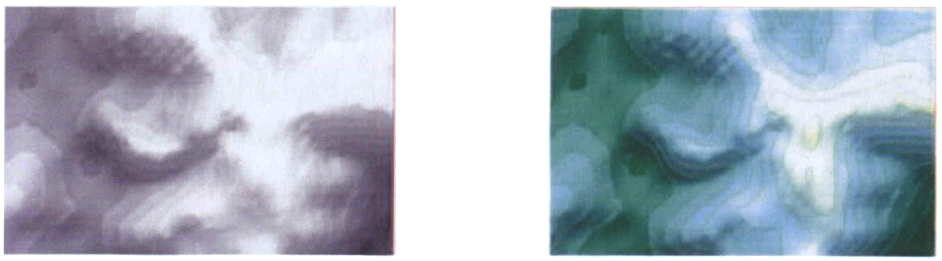
Step9 计算三角形各顶点的颜色；

Step10 顶点输出；读下一个三角形 i，转 Step7；

Step11 结束。

4.3.4 TIN 晕渲算法的实验结果

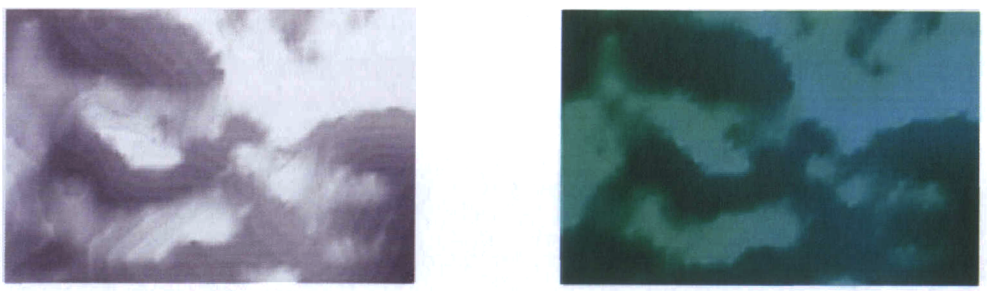
图 4-2 和图 4-3 是利用 OpenGL 和 VC++.net 实现的上节算法的实例，其中图 4-2 的参数设计为光源位置为（90，45），垂直比例为 144 的黑白和彩色晕渲效果图。



（a)黑白晕渲　　（b）彩色晕渲

图 4-2 地形晕渲效果图 1

此时，光线直射到地形表面，明暗效果不是很明显。图 4-3 的参数光源位置同图 4-2 中光源位置的设置，但对垂直比例尺进行调整后的晕渲效果图。



(a)黑白晕渲　　（b）彩色晕渲

图 4-3 地形晕渲效果图 2

图 4-2 和图 4-3 相比，调整垂直比例尺前后，晕渲的效果存在明显的差异，可见通过设置影响晕渲效果的两个参数：光源位置和垂直比例尺，可以得到效果不同的晕渲图，实现对地形细节的不同描述 。

第五章 结论与展望

5.1 论文的研究工作及成果总结

当前，人们希望得到高效率的建网算法，在实际应用时，要求三角网的连接合理，尽可能地反映出地形特征。而TIN模型在表示地形上又不够形象、直观，以及利用TIN进行数据分析时存在诸多困难，因此，对TIN重构以及TIN的可视化是值得大家研究的重要课题，本文主要完成了以下几个方面的工作：

（1）分析了基于离散数据点集，构造不规则三角网TIN常用的三种方法的优、缺点。改进并实现了一种集凸壳技术和逐点插入算法的优点于一体的凸壳内插生成TIN的算法，该算法思路简单，易于实现；

（2）针对传统的TIN等值线追踪进行修正，即在传统算法上，增加了保存等值点和各种点、边、三角形的拓扑关系数组，设计了相应的数据结构。并将等值点作为插入点，对TIN进行重构；

（3）针对TIN模型在描述地形上不够形象、直观，对TIN的数据分析困难的缺点，本文利用OpenGl和VC++.net实现了对重构后的TIN的彩色晕渲，设计对TIN的彩色晕渲算法，该算法简单、易于实现。并用实验进行验证。

5.2 展望

地形地貌的可视化是地学领域中的重要的研究课题，由于时间和条件的限制，本文中的研究工作只是冰山一角，许多的工作需要进一步的深入研究与实践。就本文而言，需要在以下几个方面继续努力开展工作：

(1) 具有高度真实感的实时地形显示，随着计算机图形处理设备性能的不断提高，地形三维可视化技术正向着实时动态显示、交互式控制、具有高度真实感的场感画面显示等方向发展。与一般地景“虚拟现实”表现形式不同的是，基于遥感影像(多种传感器、多种分辨率以及多光谱)的纹理映射技术和表现形式，可以达到内容上更加真实、信息上更加丰富、时态上更加显示的效果、结合GIS. VR以及RS等技术的融合与应用，地形可视化技术的发展应该是：在显示方式上，向“虚拟现实”方向上发展；在数据组织和功能结构上，向地理信息系统(GIS)方向上发展；如何将数字高程模型实时显示成接近真实地形的图像还需要进一步的研究和实践；

（2）地形可视化时的地形模型简化的研究，为了提高显示的效率，采用一

点的简化方法，对数字高程模型进行简化；

（3）数字高程模型的构建，建立数字高程模型的两个重要的方面就是提高建网的效率和精度，本文中采用的算法对建网的效率和精度都没有做深入的分析和讨论；

（4）数字高程模型的应用，地形可视化的一个重要的目的就是要读者对地形信息进行直观的理解和分析，对地形分析方面的研究有待进一步的展开。

参考文献

[1] 李志林，朱庆．数字高程模型[M]．武汉：武汉大学出版社，2003

[2] Twito R H, Mifflin R W, Mcgaughey R J.The MAP Program:Building the Digital Terrain Model．Portland:Pacific Northwest Research Station,2000

[3] Kvamme K L.The Digital Elevation Model.www.cast.uark.edu/~k-kvamme/Class-raster1/Kvamme-DEM.pdf.,2006

[4] Bi Huaxing, Li Xiaoyin, Guo Mengxia, et al.Digital Terrain Analysis Based on DEM.Frontiers of Forestry in China,2006,(1)：54~58

[5] Groshong R H.3-D Structural Geology: A Practical Guide Io Quantitative Surface and Subsurfaces Map Interpretation.Berlin:Springer,2006

[6] 袁博，邵进达．地理信息系统基础与实践[M]．北京：国防工业出版社，2006

[7] 邵春丽，胡鹏，黄承义．Delaunay 三角网的算法详述及其应用发展前景[J]．测绘科学，2004，29(6)：68~71

[8] Kolingerova I,Zalik B．Improvements to Randomized Incremental Delaunay Insertion.Computers & Graphics.2002,(26):477~490

[9] Sohler C.Fast Reconstruction of Delaunay Triangulations.Computational Geometry,2005,31:166~178

[10] Sheng Zhou,Jones C B.HCPO: An Efficient Insertion Order for Incremental Delaunay Triangulation.Information Processing Letters.2005,(93):37~42

[11] 吴宇晓，张登荣．生成Delaunay三角网的快速合成算法[J]．浙江大学学报，2004，31(3)：343~348

[12] Levcopoulos C, Krznaric D.The Greedy Triangulation can be Computed from the Delaunay Triangulation in Linear Time.Computational Geometry,1999,(14)：197~220

[13] Zalik B.An Efficient Sweep-Line Delaunay Triangulation Algorithm. Co-mp uter-Aided Design,2005,(37):1027~1038

[14] 章孝灿．快速高精度 DEM 生成技术研究：[博士学位论文]．杭州：浙江大学，2003

[15] 张渭军，李永军，刘向阳．数字地面模型中等高线的自动绘制[J]．地球科学与环境学报，2004，26(1)：76~78

[16] 赵建三．基于格网 DEM 的自适应等高线内插方法[J]．中南工业大学学报(自然科学版)，2003，34(3)：315~319

[17] 杨道勇，肖云岫. 利用三角形网格进行等值线分析与绘制[J]. 四川气象，2005，(2)：38~39

[18] Su Wei Min,Wu Fan. Research on Constructing Contours from Regular Terrain Grids Containing Invalid Data.Journal of China University of Mining and Technology(English Edition),2004,14(2):138~142

[19] 李佐锋,李瑞江,尹家珍．曲线拟合的目标规划方法[J]．长春邮电学院学报,1994(2)：47~51

[20] 王琨琪，李平 ．一种光滑曲线的圆弧拟合新方法[J]．西安工业学院学报，1994（3）：243~247

[21] 李旺挥，肖仲怀．常用曲线的拟合[J] ．工业技术，1995（2）：8~10

[22] 许恺．三种曲线拟合方法的精度分析[J] ．上海铁道大学学报，1996（3）：26~30

[23] 徐进军，张洪波．曲线拟合中的几个问题[J] ．四川测绘，1997（3）：117~118

[24] 王新葵．CAD中线图的曲线拟合[J].机械设计,1997(12)：18~20

[25] 李岩影，过静君．等高线扫描图象的高效自适应识别方法[J] ．北京测绘，2000（2）：9~12

[26] 和正民.关于计算机自动绘制光滑曲线的数学方法的探索[J] ．北京地质，1998（1）：17~23

[27] 李正越，娄健．自动生成高质量等值线图的算法探讨[J] ．中国煤田地质，1998（3）：62~64

[28] 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

[29] 雷磊．三维地形生成及可视化技术研究：[硕士学位论文] ．哈尔滨工程大学，2005

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

[31]Peetr vanecek,Ivana Kolingero Fast Denaunay stratification[J].ACM,2003:83~88

[32]I Kolingerova B.Improvements to randomized incremented Denaunay insertion[J].Computers & Graphics,2002(26):477~490

[33]Victor J DTsai Denaunay triangulations in TIN creation an overview and a linear-time algorithm[J].International Journal of GIS,1993:7(6):501~524

[34]Zhang xiaocan.Huang zhicai.Dai Qicheng.An Algorithm of speedily Building TIN Based on Topological structure and convex shell in GIS[J].Chinese.Journal of Computers,2002,25(1):1212~1218

[35]Min Weidong,Tang zesheng.The Delaunay triangulation of a point se with in an

arbitrary 2Ddomain[J].Chinese Journal of Computers.1995,18(5):357~364

[36]C Bradford Barber,David P Dobkin,Hannu Huhdanpaa.The Quick Hull Algorithm for Convex Hulls[J].ACM Transcations on Mathematical soft-ware,1996:22(4):469~483

[37] 郭达志，杜培军，盛业华等. 数字地球与 3 维地理信息系统研究[J]. 测绘学报,2000,29(3) 250~256

[38] Groshong R H. 3-D Structural Geology: A Practical Guide Io Quantitative Surface and Subsurfaces Map Interpretation.Berlin:Springer,2006

[39] Kvamme K L.The Digital Elevation Model.www.cast.uark.edu/~k-kvamme/Class-raster1/Kvamme-DEM.pdf,2000

[40] 洪家荣，丁明峰，李星原. 三角剖分的模拟退火算法[J] . 计算机学报，1994，17(9)： 682~689

[41] 周培德. 平面散乱点线集三角剖分的算法[J] . 计算机辅助设计与图形学学报，2003，15(9)：1141~1144

[42] 周培德. 平面点线集三角剖分的扫描算法[J] . 北京理工大学学报，2004，24(2)： 129~132

[43] 闵卫东，唐泽圣. 二维任意域内点集的Delaunay三角划分的研究[J] . 计算机学报，1995，18(5) ：357~364

[44] 章孝灿，黄智才，戴企成，潘云鹤等. GIS中基于拓扑结构和凸壳技术的快速TIN生成算法[J] . 计算机学报，2002，25(11)：1212~1217

[45] 陈学工，陈树强，王丽青等. 基于凸壳技术的Delaunay三角网生成算法[J] . 计算机工程与应用，2006，0（6）： 27~29

[46] 叶绿，赵家森. GIS中点集凸包的快速运算[J] . 测绘学报，2004，33（4）：319~322

[47] 张小望. 基于点的构网算法及等值线追踪方案设计[J]. 测绘通报，1998（9）：21~24

[48] 张渭军，李永军，刘向阳. 数字地面模型中等高线的自动绘制[J]. 地球科学与环境学报，2004，26（1）：76~78

[49] 张冬明等. 等值线图的自动绘制方法[J]. 工程设计CAD与智能建筑，2001（7）69~71

[50] Larkin B J.ANSIC Program to Detemine in Expected Linear Time the Vertices of the Convex Hull of a set of Planar Points. Computers &Geo-sciences 1991.17(3):431~443

[51] 孙家广. 计算机图形学[M]. 北京：清华大学，2001. 286~330

[52] 刘友光，黄桂兰，黄全义等. 工程中数字地面模型的建立与应用及大比例尺数字测图[M]. 武汉测绘科技大学出版社，1997

[53] 薛 安，马蔼乃，李天宏等. 基于OpenGL实现真实感地形表现的研究[J] . 中国图象图形学报，Vol.6(A),No.8Aug.2001，800~805

[54] 赵耀红，史晓峰. DEM在OpenGL中的三维显示[J] . 现代情报，November 2003 No.11 70~71

[55] 李少梅，孙群. 数字制图中地貌晕渲技术的发展现状[J]. 测绘通报，2003（1）：18~23

[56] 施祖辉. 地貌晕渲法[M] . 北京：测绘出版社，1985

[57] Yoeli P.The Mechanisation of Analytical Hill Shading[J].The Cartographic Journal,1967,4(2):82~88

[58] 马晨燕等. 基于DEM的地貌晕渲地图的研制[J]. 测绘信息工程，2004，29（5）：17~18

[59] 郭庆胜，王晓延. 地貌晕渲中光源使用方法与用色规则的研究[J]. 武汉大学学报（信息科学版），2004，29（1）：20~23

[60] 郭礼珍，李 霖，张园玉. 基于视觉表象的彩色晕渲地图色彩设计[J] . 武汉大学学报（信息科学版），2000，29(6) ，438~440

致 谢

首先，我非常感谢我的导师陈学工副教授。陈老师渊博的知识、勤奋的治学精神和对学术的敏锐洞察力引导我进入科研的世界，也让我学会了如何有效地思考解决问题和进行科学研究的方法与态度。在我的学习、科研和生活上，陈老师也给予了谆谆教导和亲切关怀，为我的学习和研究工作提供了良好的条件。从陈老师身上，我看到了一丝不苟的治学态度和兢兢业业的科学研究精神，这些都将影响我今后的学习和工作，指导我在今后的道路上不断前进。

在此我要特别的感谢我的老师徐德智教授，在他的悉心指导和严格要求下，我的论文才能顺利的完成。

感谢黄晶晶、李小勇、韦美雁、杜丹蕾、曾俊钢等同学及同事，在我攻读硕士期间给予的帮助和支持。

感谢我的父母、公婆和先生，是他们给予我精神上的支持和鼓励，帮我照顾襁褓中的孩子。在此，也要感谢我的女儿，虽然，她还只有 2 个月大，但是她给了我完成学历的信心。

攻读硕士期间的主要研究成果

发表论文情况：

宋秋艳，陈学工．利用 DEM 制作彩色晕渲图．湖南科技学院学报．2007，28（9）：104~105

不规则三角网及其可视化实现

作者： 宋秋艳
学位授予单位： 中南大学

万方数据 WANFANG DATA 文献链接

相似文献(10条)

1.学位论文 陈敬周 数字高程模型的生成与应用 2007

数字地形模拟是针对地形地貌的一种数字建模过程，这种建模的结果通常就是一个数字高程模型，借助于这种数字地形的表达，现实世界的三维特征能够得到充分而真实的再现。近年来，由于地理信息系统的普及，DEM作为数字地形模拟的重要成果已经成为国家空间数据基础设施的基本内容之一，并被纳入数字化空间框架进行规模化生产。

基于规则格网的数字高程模型和基于不规则三角网的数字高程模型是目前数字高程模型的两种主要结构。规则格网数字高程模型用在水平方向和垂直方向上等间隔排列的地形点的高程来表示地形，格网点的平面坐标隐含在行列号中。由于规则格网数字高程模型在存储、管理和便于使用方面的优越性，使其成为广泛使用的一种数据结构，但缺点是不能准确地表示地形的结构，在格网大小固定的情况下，无法表示地形的细部。不规则三角网是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，实际上是建立离散点之间的空间关系。不规则三角网既可适应规则分布数据，又可适应不规则分布数据，同时还可以对其内插生成规则格网数据，它能较好的顾及地貌特征点、线，表示复杂地形表面。

从数字高程模型内插等高线一直是计算机地图制图的基本任务之一，也是数字高程模型最重要的应用之一。等高线能够真实的反映出地貌形态和地面高低起伏，它是地形图的重要元素之一。对于规则格网数据可以利用格网数据结构存储的格网结点信息按照一定的追踪规则直接追踪生成等高线。而实际生产中往往得到的是离散的数据点，因而一般是首先构建三角网，在此基础上实现等高线的自动追踪。本文研究了数字高程模型的生成及基于数字高程模型的等值线的自动追踪方法。主要内容包括：(1)数字高程模型数据的获取以及数字高程模型常用的数据结构；(2)三角网的构建方法以及拓扑关系的自动建立。(3)建立规则格网数字高程模型的各种数学模型，离散数据生成规则格网的方法实现。(4)基于规则格网和三角网的等值线追踪方法以及曲线光滑的常用算法。

2.期刊论文 徐双全.XU Shuang-quan 地理信息系统和数字高程模型在河口滩涂地形冲淤分析中的应用 -泥沙研究 2006(6)

采用1982年至2002年长序列长江口滩涂地形图纸资料,使用地理信息系统(GIS)进行地形图纸的数字化,建立不同时相河口滩涂地形数字高程模型(DEM),定量地提取滩涂地形的特征参数和分析滩涂地形冲淤演变规律.

3.学位论文 刘德义 地理信息系统中的三维数字高程模型 2004

随着三维GIS(地理信息系统)理论和计算机图形学的飞速发展,如何将海量的地学数据形象地表达出来以及三维地形的交互性操作方法的研究成为当前GIS研究的热点.该文介绍了应用DEM数据实现地形三维可视化的方法,在VC++6.0环境下,以OpenGL作为三维图形绘制工具,以ACCESS数据库为属性数据库,运用ADO开发技术建立了一个基于全球DEM数据的交互式三维地形可视化系统.利用网格法生成三维地形.通过坐标变换和采用OpenGL中的glBegin(GL_LINE_STRIP)函数实现了矢量数据的绘制,实现了矢量图层的叠加.利用OpenGL提供的函数实现了三维的渲染、三维地形表面的贴图;利用OpenGL实用库中的函数ReadPixels()和函数gluUnProject()将三维地形上经纬度的反算出来,实现了三维地形表面经纬度的查询;结合数据库开发技术ADO实现了基于空间特征的三维地形属性查询.结果表明,该方法能够获得较好的视觉效果,并可在一定范围内对三维地形进行一般的交互性操作,从而实现了地理信息系统中的三维数字高程模型的应用.

4.期刊论文 木合塔尔·艾买提.玉素甫江·如素力.MUHETAER·AIMAITI.YUSUFUJIANG·RUSULI 数字高程模型(DEM)的建立及应用——以新疆师范大学为例 -新疆师范大学学报（自然科学版）2007,26(3)

数字高程模型的是"数字地球"概念中的核心技术.数字高程模型具有运用多样性的特点,在实际生活有广泛的应用性.文章中提出用地理信息系统3D功能和数字高程模型形成的线性模式与计量地理学的相关知识形成数字高程模型的方法,并以新疆师范大学为例介绍数字高程模型的应用性并在DEM上建立新疆师范大学可视三维模型.

5.学位论文 黄晶晶 数字高程模型TIN和等高线建模 2007

随着地理信息系统(GIS)的发展，数字高程模型(DEM)成为空间信息系统的一个重要组成部分，并且是工程建设、战场环境仿真等许多领域最为重要的基础数据之一。我们可以将DEM的表示方法主要为三类，即规则格网模型、不规则三角网模型和等高线模型。由于不规则三角网(TIN)能以不同层次的分辨率来描述地形表面，所以TIN被视为DEM中最基本和最重要的一种模型，而且TIN与等高线之间的相互转换是DEM建模的最基本方法。因此本文主要研究了常用于TIN生成的Delaunay三角网生成算法、基于TIN的等高线生成和处理算法和基于等高线建立TIN的算法。

在基于离散点的Delaunay三角网生成算法方面，本文在优化了凸壳生成算法的基础上，提出了一种Delaunay三角网凸壳生成算法，其时间复杂度为O(nlogn)。该算法首先对离散点进行排序，然后利用新插入点与已生成凸壳之间的位置关系，再进行新凸壳生成和三角网联结，最后利用有向边的拓扑结构进行三角网优化。在三角网联结过程中该算法不但避免了所有的交点测试，而且使得新加入点与凸壳边的平均比较数不多于4次，从而保证了三角剖分的高效。

在基于TIN的等高线生成和处理算法方面，本文实现了在任意边界区域内等高线的追踪过程。在标注的位置和密度研究的基础上，本文完善了数字等高线高程的自动标注算法，使得自动标注的过程更加人性化和结果更加符合人们的读图习惯。在光滑等高线的问题上，本文使用张力样条函数解决了等高线光滑时的相交问题。

在基于等高线建立TIN的算法方面，为了保证建立的TIN能保持等高线中的高质量的几何及高程信息，本文先将等高线离散化后建立初始三角网，再将等高线线段作为约束条件嵌入到初始三角网中。在约束条件嵌入问题上，本文提出了“插入-交换”约束边嵌入算法，该算法的时间效率不受影响域形状的影响而且计算量较小。本文还完善了TIN中平坦区域的修正算法，该算法不仅补充了平坦区域搜索法没有完成的部分，还能保证修正了平坦区域后的TIN能较好地虚拟现实地表的真实形状，并且能提高修正速度。

所开发的软件在运行多组地形数据后所得到的实验结果表明本文提出的实现流程和算法能够实现快速地、高精度地进行数字高程模型TIN和等高线建模的目的。

6.期刊论文 李小根.周进.黄志全.姜彤.王安明.LI Xiao-gen.ZHOU Jin.HUANG Zhi-quan.JIANG Tong.WANG An-ming 基于数字高程模型的水库三维可视化分析 -华北水利水电学院学报2010,31(1)

以某水库CAD地形图为原始数据建立了高精度的数字高程模型,并进行了精度分析、地形因子分析、可视性分析和库容、淹没面积计算.应用GeoVRML技术完成了网络虚拟地理信息系统的构建,研制了计算结果可视化与查询、图形数据可视化、库区虚拟场景漫游等功能,实现了对深层次信息的挖掘和远程可视化表达.结果表明,在高精度的数字高程模型基础上能够实现三维可视化分析、计算等功能,有利于空间数据的压缩并应用于WebGIS的发布.

7.学位论文 车德福 GIS中数字高程模型的建立与应用研究 2004

数字高程模型的建立与应用的研究,近来越来越受到人们的重视,特别是地形的可视化的研究更是倍受关注.该文论述了基于规则格网数字高程模型(DEM)的建模原理和方法,并建立了模型.重点研究了数字高程模型在三个方面的应用:1等高线绘制的方法.采用先进的等高线追踪方法,提高了绘制等高线的准确性,解决了等高点即格网点的情况;2基于OpenGL地形的三维可视化.采用了有效的数据结构,设计了高效的插值方法,使地形三维显示逼真,并充分使用了OpenGL的显示列表技术,减少内存的占用,提高了显示速度;3数字地形的空间分析.实现任意两点间剖面的自动绘制及可视性的分析;结合研究的建模方法,采用面向对象的可视化工具Vi sua l C++6.0、利用OLE技术实现与GI S软件Mapi nfo连接,开发了实用程序DF3DTL实现了上述三方面的应用,该程序

具有一定实际推广价值.

8.会议论文 王永君.龚健雅 一种基于COM的数字高程模型可视化管理模式 2001

提出一种基于部件对象模型(COM)体系的数字高程模型管理、分析与可视化解决方案,在设计中,讨论了将可视化图形库(OpenGL等)与数字高程模型(DEM)结合的两种模式.最后阐述了利用文中提出的管理模式开发的一种数字高程模型可视化管理部件包GeoVDT,该工具包为地理信息系统基础软件Geostar 4.0新版本的一部分.

9.学位论文 张军 数字高程模型的建立及应用研究 2007

随着计算机技术及信息技术的不断发展和数字化概念在测绘中的应用不断深入，数字高程模型(DEM)越来越成为地理空间基础设施和“数字地球”的重要组成部分。在GIS蓬勃发展的今天，DEM的数据源和建立方法将是测绘和GIS领域重点研究的课题之一。

本文主要介绍了数字高程模型的数据获取方式及建立方法，并介绍了数字高程模型的特点、分类和表示方法及特征，对DEM的两种主要表示方式进行了比较；狄洛尼三角网是TiN中最优的三角网，文中还介绍了狄洛尼三角网的三种生成方法及TIN的线形内插方法，并简单探讨了DEM的精度估计。ArcGIS 8是一个统一的地理信息系统平台，本文通过实例，介绍了运用ArcGIS软件中Arc Catalog、Arc Toolbox、Arc Map、Arc Scene以及AutoCAD建立不规则三角网(TIN)模型的过程。最后提出了结论和展望。

10.期刊论文 余威.郑瑞山.YU Wei.ZHENG Rui-shan GIS数字高程模型技术在城市规划设计中的运用 -天津城市建设学院学报2006,12(3)

针对目前地理信息系统(GIS)技术在规划行业中难以推广的现状进行了简要分析,列举了GIS技术在规划中已经成熟的运用模式,建议通过以推广运用数字高程模型(DEM)技术为GIS系统的应用起点,同时结合实际案例,介绍了DEM在规划设计过程中的使用方法.

本文链接：http://d.g.wanfangdata.com.cn/Thesis_Y1325243.aspx
授权使用：贵州大学(guizdx)，授权号：a2799e19-b824-48a4-96d6-9e75017ea80d
下载时间：2011年1月24日