



滁州学院

本科生毕业论文  
(申请学士学位)

论文题目 基于断面测量数据的精细

河道 DEM 建立与分析系统

作者姓名 韩光辉

所学专业名称 地理信息系统

指导老师 王 春

2015 年 04 月 01 日

学 生： (签字)

学 号：

论文答辩日期： 年 月 日

指 导 教 师： (签字)

# 目 录

1 引言.....	1
1.1 研究背景.....	1
1.2 研究现状.....	1
1.3 研究内容与技术流程.....	2
1.3.1 研究内容.....	2
1.3.2 技术流程.....	3
1.4 论文构架.....	4
2 精细河道 DEM 建立.....	5
2.1 河道 DEM 构建模型.....	5
2.1.1 常规 DEM 构建模型.....	5
2.1.2 河道 DEM 构建模型.....	6
2.2 河道 DEM 构建技术.....	7
2.2.1 数据预处理与分析.....	7
2.2.2 断面测量散点的自动连接.....	9
2.2.3 网格加密与格网点高程内插计算模型.....	13
2.3 河道规则格网 DEM 融合及边坡嵌入.....	18
3 原型系统设计与实现.....	19
3.1 系统功能概述.....	19
3.2 原型系统界面.....	19
3.3 系统界面设计.....	19
3.3.1 快捷工具.....	19
3.3.2 矢量处理.....	20
4 原型系统测试.....	24
4.1 前期数据处理.....	24
4.2 河道 DEM 建立过程测试.....	25
4.3 精度评价.....	27
5 结论与讨论.....	28
5.1 主要成果.....	28
5.2 研究展望.....	28
参考文献.....	29
致 谢.....	30
附 录一（本科期间发表论文及奖励）.....	31
附 录二（程序源码）.....	32

## 基于断面测量数据的精细河道 DEM 建立与分析系统

**摘要：**断面测量是河道地形测量的主要方法，表现形式为断面散点数据，而其本质是具有沿着断面自成连续曲线的内在约束，本文以长江河道断面测量数据为例，研究了顾及断面测量数据内在约束和等深线特征的高精度河道 DEM 快速构建技术，实验包括：(1)长河道地形 DEM 生成的区域划分研究；(2)河道断面散点自动连接技术研究；(3)河道网格划分与格网高程点内插计算模型研究；(4)长江河道 DEM 的边坡嵌入研究。实验完成长江河道数字地形建模，突出了长江河床弯曲度、深槽连续性、边坡平滑度等河道地形特征并验证了精细河道 DEM 构建的可行性，最后基于 ArcEngine 二次开发技术，完成基于河道断面测量数据的精细河道 DEM 建立与分析系统，解决精细河道 DEM 快速构建难题，为河道数字地形分析提供参考。

**关键词：**数字高程模型（DEM）；TIN；河道断面；河道数字地形

## The Establishment and Analysis System of fine DEM Base on Cross-Section Measuring Data

**Abstract:** Cross section measurement is the main method of river topography measurement, and its expression form is the scattered point data, and its essence is the inherent restriction along the continuous curve along the section, This paper to the Yangtze River section measurement data as an example to study the construction of rapid construction technology section measuring data inherent restriction and bathymetric features high precision riverway DEM considering, Experiments include:(1) study on the regional division of DEM generation in the river channel;(2)study on automatic connection technology of river cross section;(3) Study on the calculation model of plug mesh and river elevation points within the grid;(4) Study on slope embedding of DEM in the Changjiang River. Experiment to complete the digital terrain modeling of the Yangtze River, The characteristics of river topography, such as the bending degree, the depth of the channel, the smoothness of the slope, and the feasibility of the DEM construction of the fine channel are verified, Finally, based on the two development technology of ArcEngine, DEM establishment and analysis system of fine river channel based on river section survey data, Solve the problem of rapid construction of fine river DEM, to provide reference for digital terrain analysis.

**Key words:** Digital Elevation Models ; TIN;river section;digital terrain of river channel

# 1 引言

## 1.1 研究背景

构建河道 DEM 能有效的反应出河道区域的基本空间分布规律<sup>[1-2]</sup>, 可以实现河道地形的定量分析与可视化, 促进河床冲淤分析, 河道可航区计算分析等一系列专业分析。一级河道数字地形分析、河道通视性分析、河床淹没分析、河床剖面分析等相关三维分析, 以长江河道的航道计算分析为例, 航道安全对船舶运输的安全航行具有很重要的意义, 而目前运输船舶一般装配有电子航道图系统也为安全航行提供一定的保障。

河道地形 DEM 数据是河道地理信息数据的重要组成部分, 其为河床演变分析、河道冲淤分析、河道整治决策分析、河道动态监测等具有重要意义。精细河道数字地形建模是根据河道测点数据创建河道地形 DEM。常规的 DEM 构建方案是直接利用测深点数据和等高线数据构建河道不规则三角网, 再有不规则三角网创建河道规则格网 DEM 模型; 这种方法确保了河道单点高程的准确性, 却无法对现实河道地形进行有效保真表达。断面测量是河道地形测量的主要方法, 获得的数据虽然表现为散点, 但实际上具有沿着断面自成连续曲线的内在约束, 如何顾及这一内在约束构建高精度河道 DEM, 对高精度分析河道地形特征, 具有重要意义。

本文从河道断面测量和等深线数据的特征出发, 研究河道 DEM 快速构建技术, 设计开发其原型系统, 解决河道 DEM 快速构建难题, 对河道数字地形分析等方面的研究具有一定的参考意义。

## 1.2 研究现状

随着 GIS 技术的发展以及数字地形分析需求的扩大, 河道数字地形的研究已然成为众多学者研究的内容, 包括河床演变、河道冲淤等方面的应用与分析, 解决河流泥沙冲淤量计算以及河道整治等诸多难题; 王强<sup>[3]</sup>在《GIS 在河道冲淤及河床演变分析中的应用》一文中已经开始对河道地形 DEM 的监理和地形分析的差值计算方法进行了探索; 许捍卫<sup>[4]</sup>在《长江江苏段河道 DEM 建立方法研究》中以长江江苏段河道为例, 对 DEM 建立过程中涉及的方法进行了研究; 王伟<sup>[5]</sup>在中国水利学会 2014 学术年会的论文《长河道地形的 DEM 生成、管理及应用》中分析了长河道地形数据具有测次多、河道长、跨多带、多比例尺的特点, 提出了“归一起点, 分块计算”的 DEM 生成方法; 其次汤丽洁等<sup>[6-9]</sup>、也对河道地形 DEM 的构建与生成提出了探索; 赵吉祥等<sup>[10-13]</sup>侧重研究了河床演变与河道整治等内容以及河道边坡风险分析等<sup>[14]</sup>, 而构建河道数字地形 DEM 有助于河床演变与河道数字地形分

析方面研究的展开。

上述学者在研究河道 DEM 构建时，基本上都是采用常规的 DEM 构建技术，即利用河道测深点数据和等高线数据创建河道不规则三角网，再由不规则三角网创建河道格网 DEM，虽然不规则三角网模型（TIN）能突出长江河床弯曲度、深槽连续性、边坡平滑度等河道地形特征，这样的好处在于能够保证 DEM 构建单点高程的准确性，但是影响了整体河道 DEM 的保真度；河道断面测量散点数据实际上是具有沿着断面自成连续曲线的内在约束，顾及这一内在约束构建高精度河道 DEM，是本文研究的重点也是前人研究中未曾提及的方案。本文着重研究了以“归一起点，分块构建”为方法并且顾及断面测量数据内在约束和等深线特征的高精度河道 DEM 快速构建技术，以长江中下游河道断面测量数据为例，完成长江河道数字地形建模；最后基于 ArcGIS Engine 二次开发技术，完成基于河道断面测量数据的精细河道 DEM 建立与分析系统，解决精细河道 DEM 快速构建难题，为河道数字地形分析提供参考。

## 1.3 研究内容与技术流程

### 1.3.1 研究内容

本文以基于河道断面测量数据的精细河道 DEM 快速构建技术为研究对象，通过对河道断面测量和等深线数据的特征分析，研究河道 DEM 快速构建技术，设计开发其原型系统，解决河道 DEM 快速构建难题。研究内容如下：

#### （1）以“归一起点，分块构建”为准则的区域分割

长江河道空间跨度大，流向曲折，这为长江河道地形构建加大了难度，也制约了河道 DEM 的统一生成，所以本文在研究了河道断面测量数据后，以“归一起点，分块构建”的原则，即统一高程基准点，以分区域构建的思路对河道进行 DEM 构建。

#### （2）河道断面测量散点的自动连接技术

断面测量是河道地形测量的主要方法，获得的数据虽然表现为散点，但实际上具有沿着断面自成连续曲线的内在约束，因此本文在研究了断面测量数据空间分布特征的基础上，将同一断面上的散点数据进行标识和自动连线，以实现顾及断面约束的高精度河道 DEM 构建。

#### （3）网格划分与格网点高程内插计算模型

为了能突出河道弯曲度、深槽连续性、边坡平滑度等河道地形特征，所以采用以断面约束线构建四边形的方式对线节点进行有效加密并研究格网点插值模型，现实河道地形进行有效保真表达。

#### （4）河道规则格网 DEM 边坡嵌入

为了避免可视化过程中河道规则格网数据边边缘出现参差不齐等现象，因此需要对河道 DEM

进行边坡嵌入处理，本文研究利用 1:10000 国家基础地理信息 DEM 数据进行河道的边坡嵌入，完整河道地形数据。

#### （5）河道 DEM 精度评价分析

DEM 的精度是地形分析的基础，所以河道 DEM 的精度高低将会直接影响基于河道 DEM 的地形分析的准确性，因此，本文以抽取部分测点，利用差值残差的方式进行河道 DEM 的精度评价。

#### （6）原型系统搭建与测试

原型系统包括 Coverage 与 shapefile 数据格式的转换、批量 shapefile 数据合并程序、二三维数据转换、断面扫描标识算法、散点自动连线算法、格网点划分算法、格网点插值算法、栅格计算、三维展示、系统帮助等模块；对原始数据进行高程数据的提取、数据格式转换、二三维数据转换、高程粗差剔除、统一坐标及基准面等一系列预处理后，实现断面散点的自动连接，实现顾及断面自成连续曲线的内在约束以及等高线特征高精度河道 DEM 的快速构建。最后完成系统的测试工作。

### 1.3.2 技术流程

本文研究的主要技术路线分为：技术方法研究和系统开发，由 GIS 空间分析技术，研究了河道 DEM 构建的理论方法同时确立系统的基础 GIS 功能模块，从河道 DEM 构建理论方法设计系统功能模块，最后实现系统的集成，完成基于断面测量数据的精细河道数字高程模型构建与分析系统，系统关系逻辑图如图 1-1 所示，论文研究的详细技术路线如图 1-2 所示：



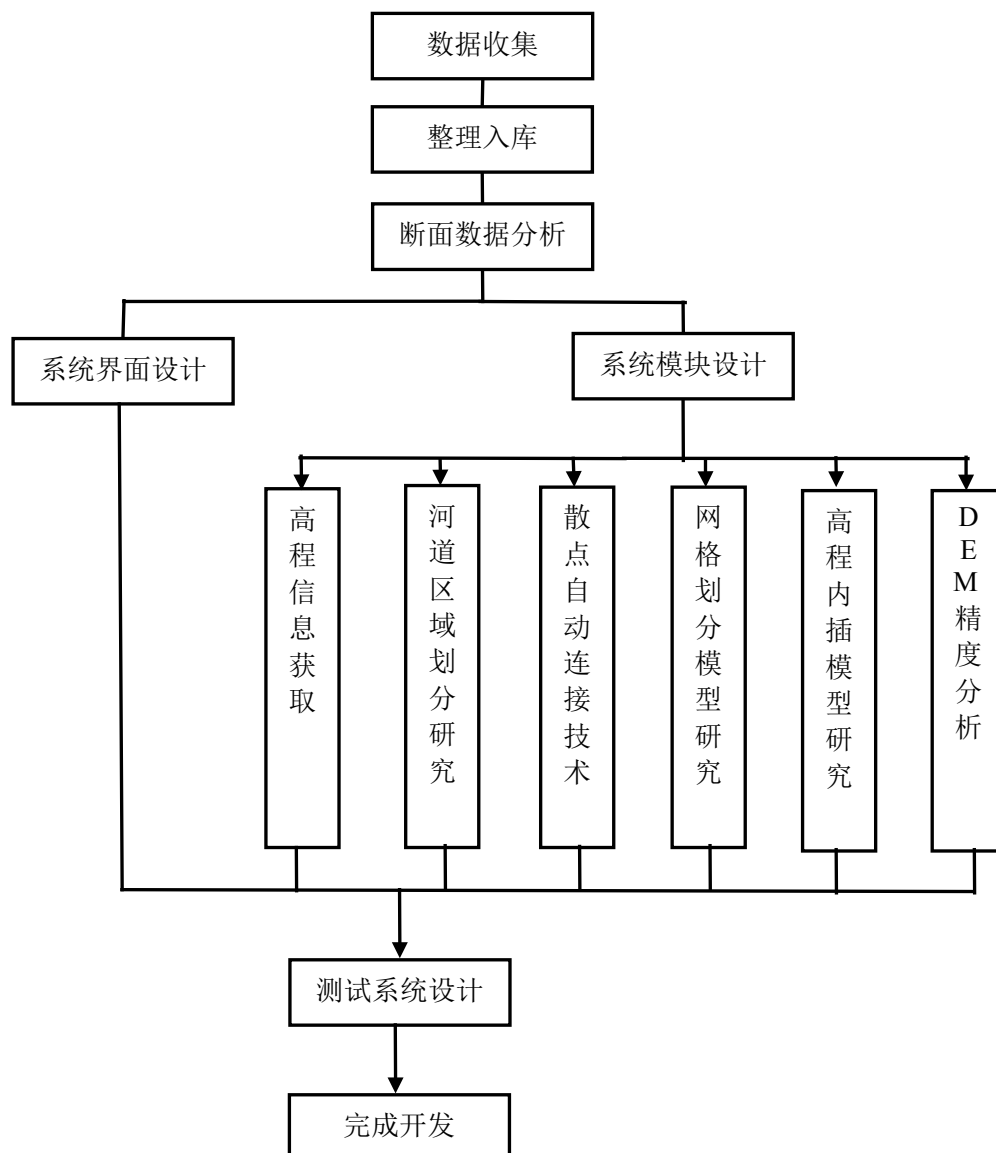


图 1-1 论文技术路线示意图

在充分分析现有长江河道断面散点特征的基础上，利用 GIS 空间分析技术以及本文研究的基于断面测量数据的精细河道 DEM 构建的方法等理论方法，从而确定了基于断面测量数据的精细河道 DEM 建立与分析的技术流程，主要包括三个方面：(1)长江河道断面测量数据的预处理，(2)长江河道断面测量数据的断面散点分布特征分析，(3)河道 DEM 构建处理流的算法设计与实现，分别对应。

## 1.4 论文构架

本论文主要包括目录、摘要、正文以及参考文献四个部分。其中正文分为引言、研究基础与方法、原型系统的设计与实现和原型系统的测试以及结论与展望五个章节。

第一章，引言。主要介绍了本论文的研究背景、现有的研究成果以及研究的目的和意义，并对研究现状做出简要分析和概括。

第二章，精细河道 DEM 建立。介绍了基于断面测量数据构建河道 DEM 的模型，同时介绍了高程数据获取、以“归一起点，分区构建”为方案的长江河道分区、顾及沿着断面自成连续曲线的内在约束的分区河道断面散点数据自动连接技术、河道格网划分与格网点高程内插计算模型研究、河道边坡嵌入等，研究出一套完整的基于河道断面测量数据的精细河道 DEM 建立方案。

第三章，原型系统的设计与实现。主要依据基于河道断面测量数据的精细河道 DEM 建立方法论实现系统运行。该部分主要包括主要系统功能设计、原型系统界面、核心代码。

第四章，原型系统的测试。介绍了系统的运行步骤，检验系统能否正确运行，测试结果正确性检测，并分析所得结果。

第五章，结论与展望。总结论文的实验过程，得出实验结论，同时指出本次论文研究过程中存在的算法、理论等的不足之处，并对精细河道 DEM 构建过程及应用提出展望。

## 2 精细河道 DEM 建立

### 2.1 河道 DEM 构建模型

#### 2.1.1 常规 DEM 构建模型

数字高程模型（digital elevation model，简称 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（即地形包面形态的数字化表示），高程数据通常采用绝对高程（即从大地水准面起算的高度）<sup>[1]</sup>；数学意义上的数字高程模型是定义在二维空间的连续函数  $H=f(x,y)$ 。由于连续函数的无限性，DEM 通常将有限的采样点用某种规则连接成一系列的曲面或者平面片来逼近原始曲面。数字高程模型建立的过程是一个模型建立的过程<sup>[1]</sup>，如图 2-1 是规则格网 DEM 建立的流程；

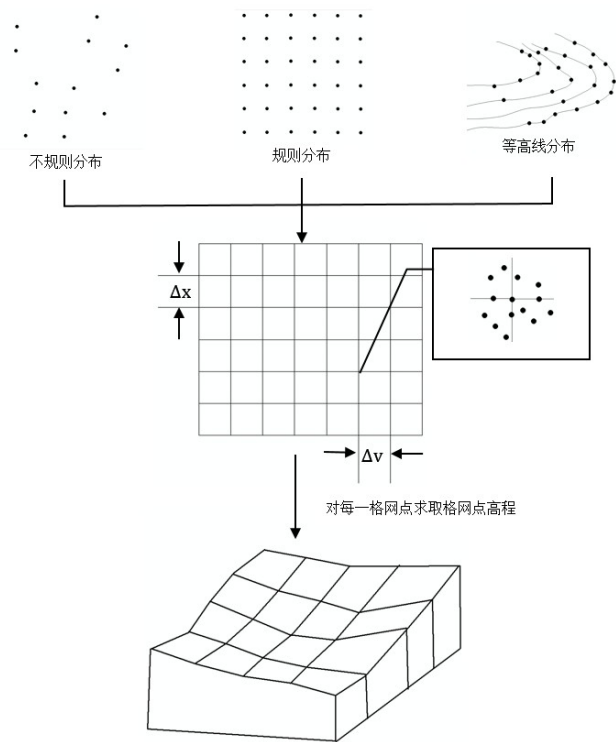
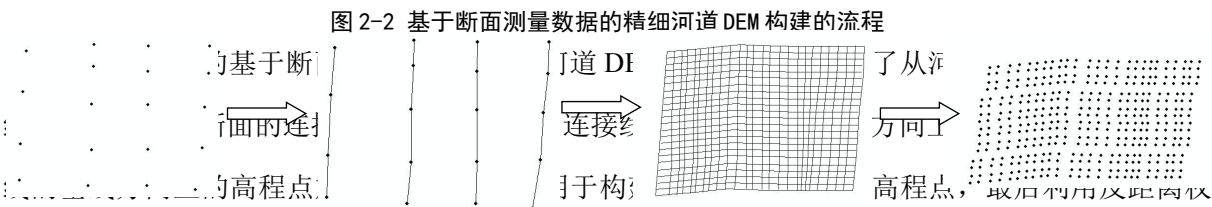


图 2-1 格网 DEM 建立流程

2.1.2 河道 DEM 构建模型

为了能突出河道弯曲度、深槽连续性、边坡平滑度等河道地形特征，所以采用以断面约束线构建四边形的方式对线节点进行有效加密，依据科学的插值方法实现河道地形进行有效保真表达。

对于上图描述的规格格网 DEM 建立的过程，根据采样点的值内插计算格网点上的高程值是最为关键的环节，而采样点的数量以及采样点高程精度是高程内插的基础，对于本文研究的数据而言，断面散点的比较稀疏，并且两个断面间的距离相隔较远，利用现有的高程散点数据无法实现河道数字地形的保真表达，所以在进行格网点高程内插之前需要进行格网点的加密，并形成不规则四边形，最终形成格网，保证采样点的数量也保证采样点的精度。如图 2-2 描述了基于断面测量数据的精细河道 DEM 构建的流程。



插值的方式实现河道格网 DEM 的生成。

## 2.2 河道 DEM 构建技术

### 2.2.1 河道数据预处理与分析

#### (1) 河道数据源

我国河道地形测量经历的漫长的历史，目前积累数据等各方面资料都比较丰富；而伴随着地理信息技术、遥感技术、全球定位技术的革新与普及，测绘技术也日新月异，伴随着水下地形扫测系统的出现，河道测量的精度、速度都在发生着巨大的改变，使得目前河道测量数据呈现一种多源多尺度的状态，所以如何充分利用和深度挖掘多源多尺度的河道测绘数据的价值，是目前 GIS 领域的一个研究的价值点，对河道地形信息进行合理的深度开发与利用是对人类的发展与进度在一定程度上是很有意义的。

本文中主要是利用上世纪（1914）至本世纪（2001）间不同间隔年代的长江扫描数据及数字化成果数据实现断面测量散点高程信息的获取，包括测深点数据和等深线数据。由于长江测量散点数据是按照图幅的方式和以不可编辑的 Coverage 格式进行管理与存储，所以在进行河道 DEM 构建实验前需要对 Coverage 数据进行格式转换，在转换格式的基础上完成数据的配准，数据入库等工作，保证实验进行的可控制性和有效性，数据预处理流程如图 2-3 所示：

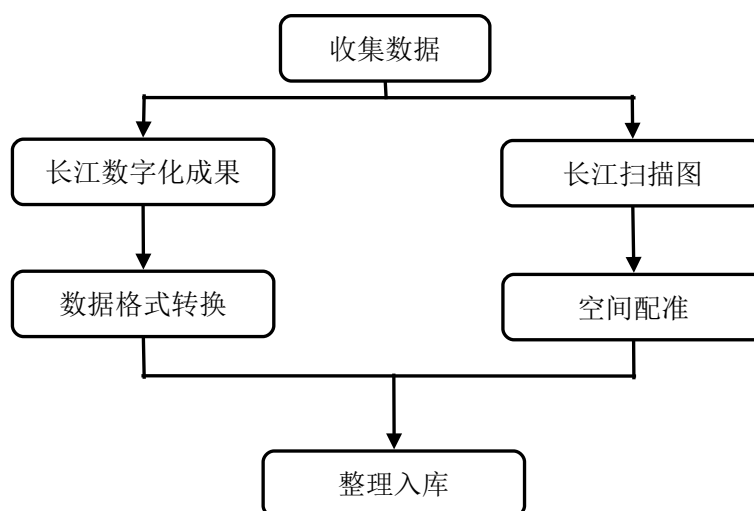


图 2-3 数据预处理流程

#### (2) 高程数据获取

在完成数据预处理的基础上，利用原始河道测量数据对照河道扫描图数据，进行数据的解译，提取出与河道扫描图相一致的高程字段，以批处理的形式，获得河道测量散点的高程值；具体思路是将测量散点属性表中的高程字段赋值给河道测量散点本身的高程属性，这样便于断面散点的自动连接技术的实现和格网点高程内插计算模型的研究与实现。

在进行数据合并和高程数据提取后，需要保证测深点数据和等深线数据处于同一基准面上，故需要对高程数据进行统一坐标及基准面等一系列预处理，以此确保高程数据的准确性。

### (3) 河道区域分割

长江河道空间跨度大，流向曲折，原始河道扫描图数据跨越时间段为 1914-2001 年，并且原始地形数据的比例尺不一致，包括 1:40000、1:50000 等多种比例尺，这些因素为长江河道数字地形构建加大了难度，也制约了河道 DEM 的统一生成，所以本文以“归一起点，分块构建”的原则对河道进行 DEM 构建，也为了方便对河道断面测量数据进行空间分布特征的研究和断面散点数据自动连接算法的设计和实现。

河道区域分割的原则是在提高河道 DEM 存取和使用速度、确保河道断面自成约束不被破坏的基础上，限制最大格网数为 2000\*2000。以 DEM 格网分辨率为 5m(1: 5000 地形生成)为例，则每个分块的 DEM 最多表达的范围是 10km\*10Km。在进行 DEM 分块时，基于原始数据的最左端作为起点，在横向方向上以 10Km 宽度进行大块的划分，当实际宽度不足 10Km 时，则以实际范围为准；然后对横向上划分的大块沿纵向按照 10km 的范围进行区域的分割，同样当实际宽度不足 10Km 时，则以实际范围为准。在区域分割过程中既需要保持 DEM 的连续性，又要充分考虑河段的流向特征，避免 DEM 数据的大量冗余，但所有区域需要保留一定的重叠区域，确保 DEM 在接边融合的过程中不出现无值区；如图 2-4 是长江河道的区域分割图。

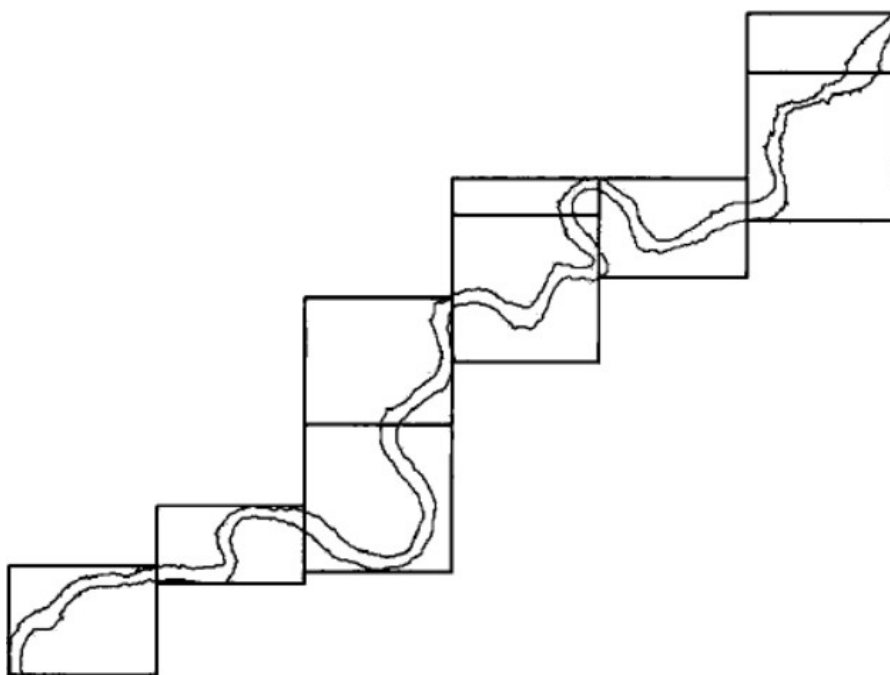


图 2-4 长江河道的区域分割图（部分）

## 2.2.2 断面测量散点的自动连接

### (1) 自动连接技术算法原理河道区域分割

断面测量是河道地形测量的主要方法，获得的数据虽然表现为散点，但实际上具有沿着断面自成连续曲线的内在约束，因此本文在研究了断面测量数据空间分布特征的基础上，将同一断面上的散点数据进行标识和自动连线，以实现顾及断面约束的高精度河道 DEM 构建。

本文在河道区域分割的基础上，充分分析了历年来长江河道断面散点的分布特征，提出并实现了以不固定点确定椭圆扫描确定同一断面高程散点和以最近距离点构建扫描线等两种方式首先标识出同一断面散点，然后再进行同一断面散点的连线，形成断面线。以下分别介绍两种扫描标识算法的原理：

#### a. 不固定点确定圆扫描标识法

长江河道空间跨度大，并且扫描图数据的时间跨度也大，所以长江河道散点数据的矢量化工作可能是分批次进行，这样无疑就导致了数据点位次序混乱，而点位的次序也无法重新改变，所以本文在考虑断面散点无序混乱的情况，提出以任意一点作为起始点构建扫描圆，结合长江边界线数据，采用递归算法的原理，将断面散点进行标识，在这个过程中扫描圆的半径设置靠人为判断决定，程序预留扫描圆半径阈值的设置，如图 2-5 是不固定点确定圆扫描标识法原理，图 2-6 是不固定点确定圆扫描标识算法终止条件。

图 2-5 中 A 点表示按河道断面散点存储点续中任意一点，按照设定的扫描圆半径，构建扫描圆，以空间相交为点和扫描圆为空间关系，查找出与 A 点相邻的 B 点和 E 点，然后设计递归算法，逐次对相邻的点构建扫描圆再进行点位关系的判断，以此逐步解算并标识出同一断面上的点；并依据图 2-6 中点 D 和 G 所构建的扫描圆与河道边界线的空间位置关系，如果他们的关系是空间相交，那么递归算法终止，如果他们的空间关系是相离，那么递归继续，并临时存储所有已经被标记的点位；此外对于图 2-7 中，对于边缘点与河道边界相离的距离大于扫描圆半径时，如果 C 点已经存在于临时存储的点位当中的话，那么同样终止扫描递归算法；当出现图 2-8 中点位排序顺序（A-G 顺序排列）的情况时，判断 B 点时候已经被扫描标识，如果没有被标识，那么则以 B 点进行下一步的扫描标识，最后对同一标识值得散点进行连线重组，实现断面散点的自动连接。程序计算流程如图 2-9 所示。

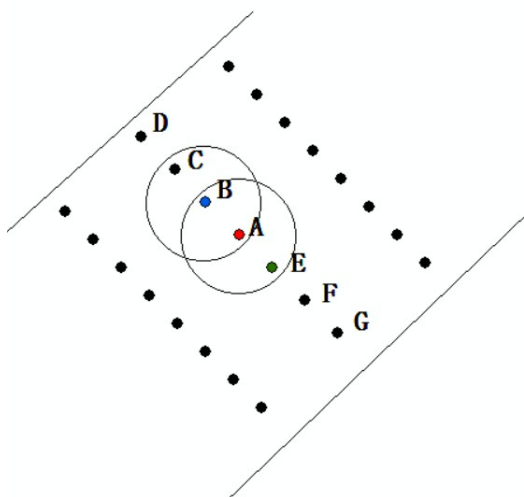


图 2-5 不固定点确定圆扫描标识法原理图

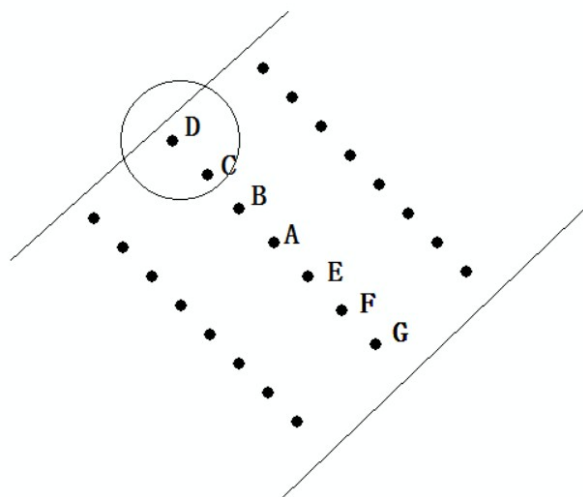


图 2-6 不固定点确定圆扫描标识算法终止条件图

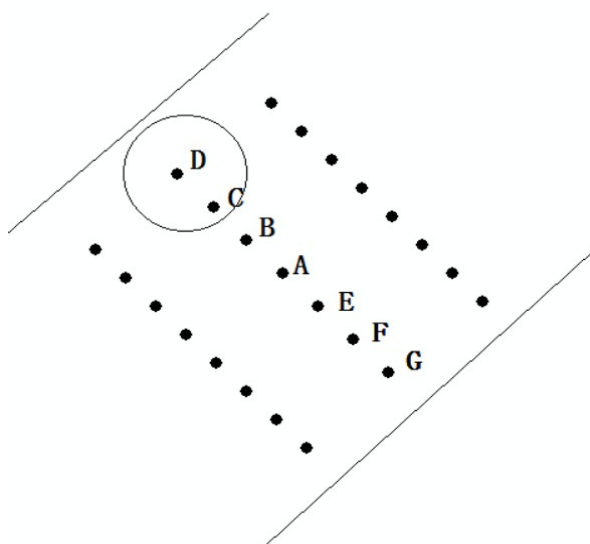


图 2-7 边缘点位与边界线相离图

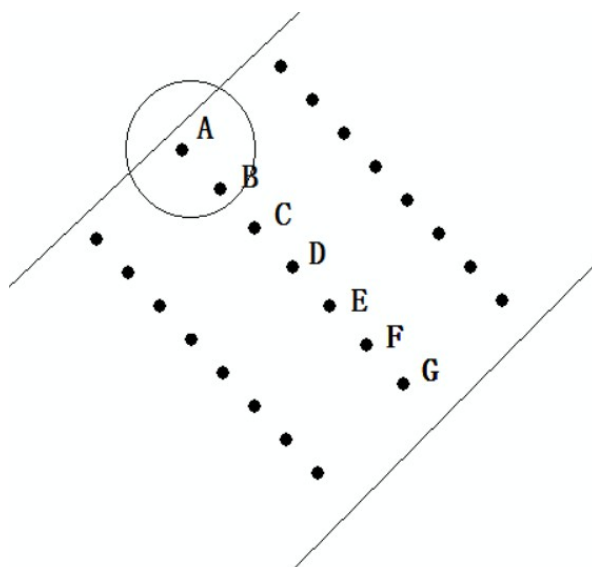
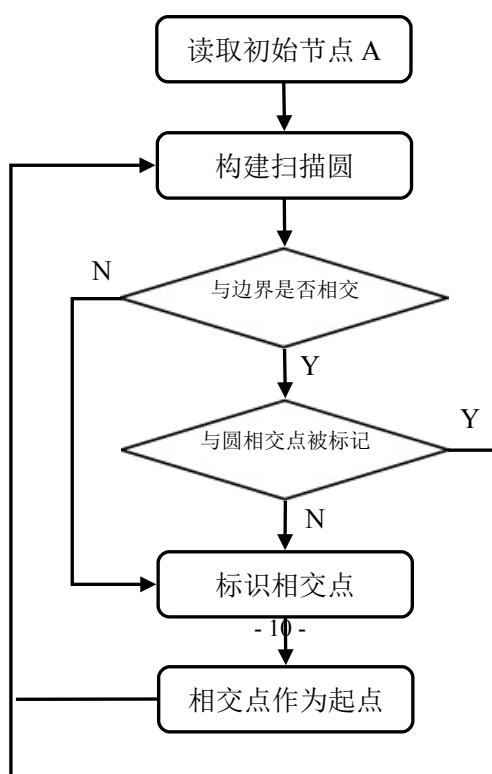


图 2-8 断面散点的特殊点位排序图



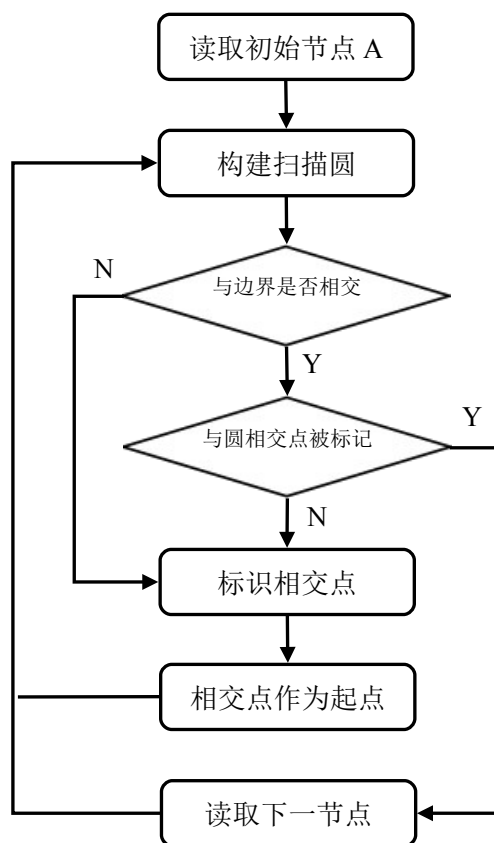


图 2-9 扫描圆扫描标识流程图

## b. 最近距离点构建扫描线标识法

对于点续排列间距小、扫描圆半径阈值无法确定的情况下，本文研究了另外一种扫描标识算法即：最近距离点构建扫描线标识法，获取断面点续集中任意一点 A，遍历所有点位，并计算出任一点与点 A 的距离，得到距离 A 点最近的点 B，同理得到距离点 B 的最近点位 C，如果 AB 间以及 BC 间的距离与扫描圆半径差的绝对值小于扫描圆半径时，则选用 AB 的中点 D，以及 BC 的中点 E 构建扫描线 DE，如图 2-10 所示，如果 AB 与扫描的半径差的绝对值大于扫描圆的半径或者 BC 与扫描圆半径长度差的绝对值大于扫描圆半径，那么分别选用 AB 和 BC 作为上述两种情况的扫描线进行断面散点的扫描标识，依次完成所有点位的空间扫描标识，最后对同一标识值得散点进行连线重组，实现断面散点的自动连接。如图 2-11 是算法执行流程图。



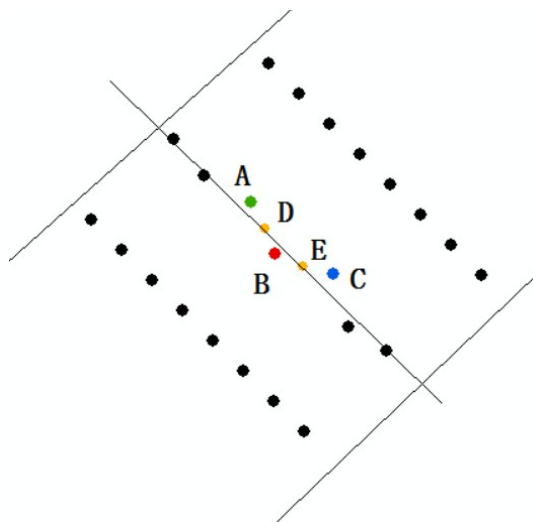


图 2-10 最近距离点构建扫描线标识法原理

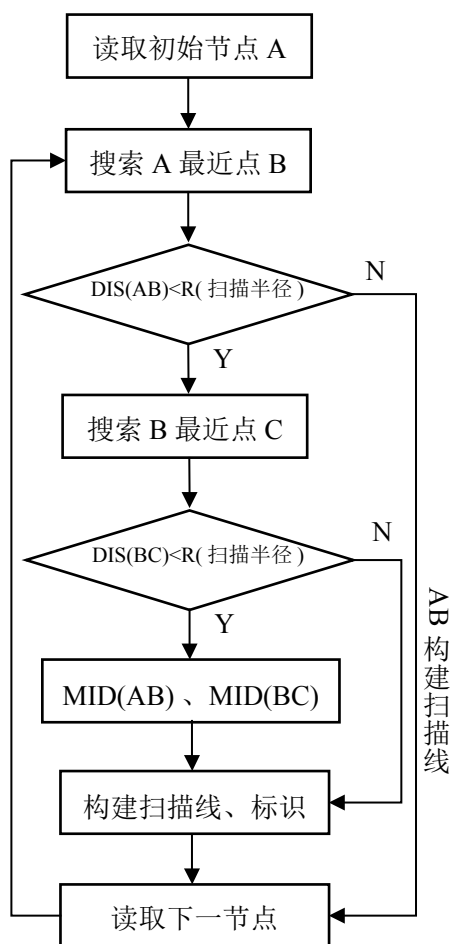


图 2-11 构建扫描线算法流程图

## (2) 自动连接技术的实现与处理

由于长江断面散点数据点位次序混乱，并且点位的次序也无法重新改变的特征，利用上述两种扫描标识算法实现断面散点连接后，会出现一些由于乱序点造成的线段错乱的情况如图 2-12 所示，对于这样的情况无疑会影响个网点划分以及格网点高程内插的计算，所以在实现断面线连接后务必

需要进行断面线的平滑处理，即对断面线上的散点进行重新排序，如图 2-13 是重新排序后的效果图。

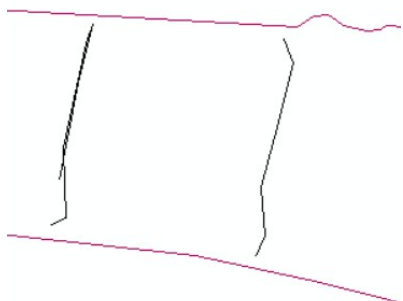


图 2-12 错乱点位线段

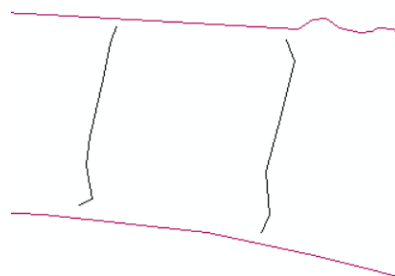


图 2-13 错乱线段重排序结果图

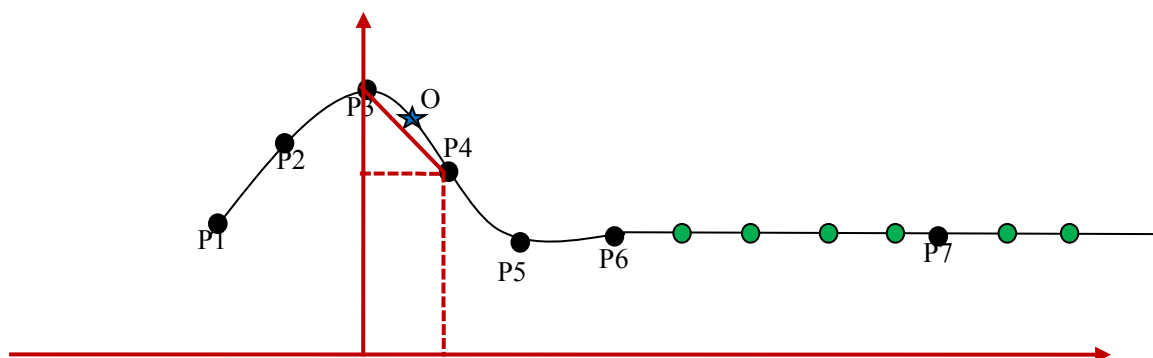
### 2.2.3 网格加密与格网点高程内插计算模型

#### (1) 格网点加密模型

格网点内插是指根据分布在格网内插点附近的已知高程的参考点来求解未知点高程值，该过程是 DEM 的核心问题，它存在于有关 DEM 的生产、精度分析、DEM 应用、DEM 空间分析等诸多环节中，所以说内插计算模型的选择是 DEM 建立过程中最为关键的环节。

本文所研究的实验样区是长江河道，在设计格网点加密模型时考虑到了线段中存在的多种情况如选段只有两个点或者三个点的情况、线段中三点共线的情况下设计了线性加密的方式进行河道格网线的加密，当线段中三点不共线的情况下设计了构建圆弧进行加密的方式，下文详细介绍了河道格网线加密的情况及详细的算法模型：

a. 首先通过三点判断其是否共线，即是否是一条直线，如下图 P1、P2、P3 是否共线，P2、P3、P4 是否共线等。



判断三点是否共线的方法选用测绘学上的垂距法，即下图 P2 到 P1P3 直线的距离，若是 P2M 线段的长度为 0，则 P1、P2、P3 三点共线，否则不共线。

实际中，我们采用一个垂直距离的阈值来近似的表示其是否共线，这样可以减少很大的计算量。

PM2 的距离为:

$$D = \sqrt{(M.x - p_2.x)^2 + (M.y - p_2.y)^2} \dots\dots\dots(1)$$

其中, 令:

$$a = pt_3.x - pt_1.x \dots\dots\dots(2)$$

$$b = pt_3.y - pt_1.y \dots\dots\dots(3)$$

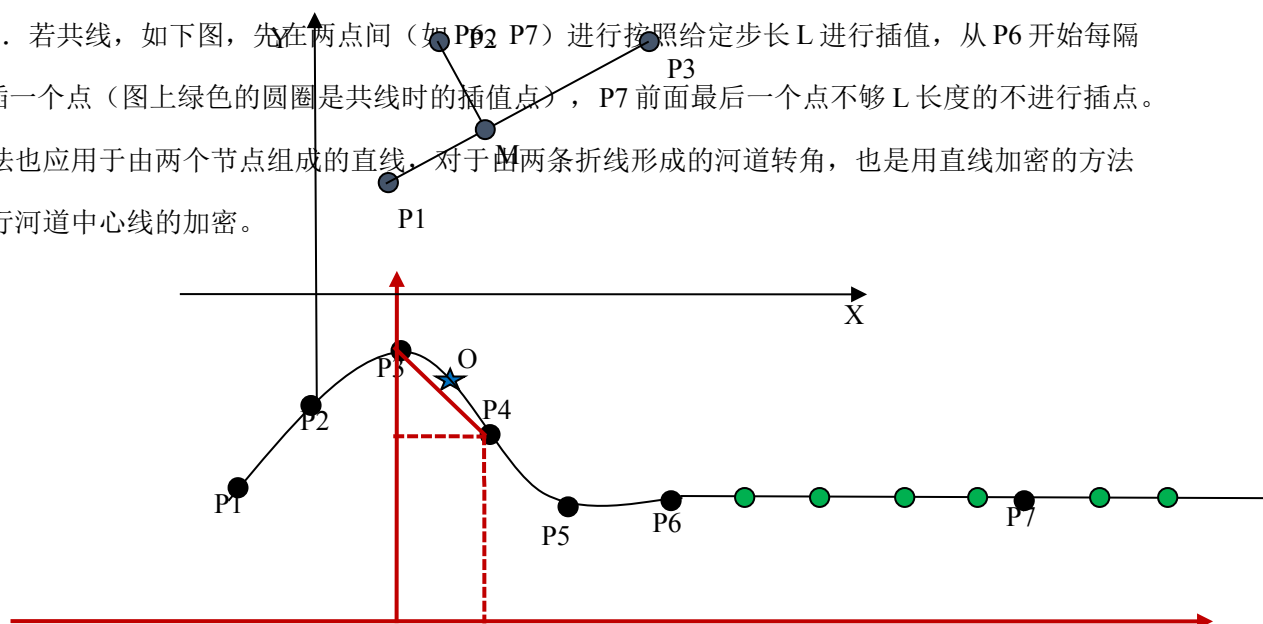
则:

$$M.x = (a * a * p_2.x + a * b * p_2.y - a * b * pt_3 + b * b * pt_3.x) / (a * a + b * b)$$

$$\dots\dots\dots(4)$$

$$M.y = (b * x - b * pt_3) / a + pt_3.y \dots\dots\dots(5)$$

b. 若共线, 如下图, 先在两点间 (如 P6 P7) 进行按照给定步长 L 进行插值, 从 P6 开始每隔 L 米插一个点 (图上绿色的圆圈是共线时的插值点), P7 前面最后一个点不够 L 长度的不进行插点。此方法也应用于由两个节点组成的直线, 对于由两条折线形成的河道转角, 也是用直线加密的方法去进行河道中心线的加密。



具体数学模型如下:

给定一系列点数据 (如 P1、P2、P3 等), 如下图, 在 P1P2 之间插点, 依次循环下去。具体算法如下:

首先求出 P1P2 两点间的距离, 公式为

$$L = \sqrt{(p_2.y - p_1.y)^2 + (p_2.x - p_1.x)^2} \dots\dots\dots(6)$$

插值点 A (第一个插值点) 的坐标为:

$$A.x = p_1.x + l * \cos \theta \dots\dots\dots(7)$$

$$A.y = p_1.y + l * \sin \theta \quad \dots\dots\dots(8)$$

其中  $l$  为给定插值步长（变量），人为给定；

$$\cos \theta = \Delta x / L \quad \dots\dots\dots(9)$$

$$\sin \theta = \Delta Y / L \quad \dots\dots\dots(10)$$

以此类推，第  $N$  个插值点的坐标应该为：

$$A.x = p_1.x + N * l * \cos \theta \quad \dots\dots\dots(11)$$

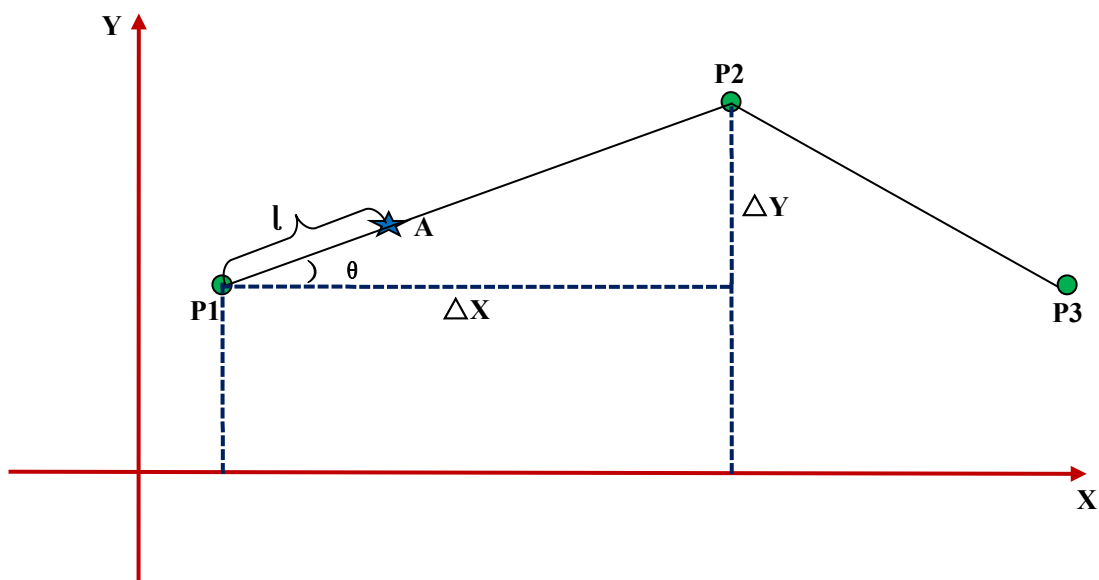
$$A.y = p_1.y + N * l * \sin \theta \quad \dots\dots\dots(12)$$

其中  $N$  有限制条件，即：

$$N * l \leq L \quad \dots\dots\dots(13)$$

注：最后一个插值点到  $P2$  点的距离不够  $l$  的长度，可以不进行插值。

以此类推，依此一直把所有给定高程点循环结束为止。



c. 若不共线，则先求出  $P1$ 、 $P2$ 、 $P3$  构成的圆弧的方程以及  $P2$ 、 $P3$ 、 $P4$  构成的圆弧的方程，圆弧方程公式为：

$$(x - A)^2 + (y - B)^2 = R^2 \quad \dots\dots\dots(14)$$

将三个点的坐标带入公式求出  $a$ 、 $b$ 、 $R$ ，即可求出圆弧方程。

令：

$$a = 2 * (x_2 - x_1) \quad \dots\dots\dots(15)$$

$$b = 2 * (y_2 - y_1) \dots\dots\dots(16)$$

$$c = x_2 * x_2 + y_2 * y_2 - x_1 * x_1 - y_1 * y_1 \dots\dots\dots(17)$$

$$d = 2 * (x_3 - x_2) \dots\dots\dots(18)$$

$$e = 2 * (y_3 - y_2) \dots\dots\dots(19)$$

$$f = x_3 * x_3 + y_3 * y_3 - x_2 * x_2 - y_2 * y_2 \dots\dots\dots(20)$$

$$A = (b * f - e * c) / (b * d - e * a) \dots\dots\dots(21)$$

$$B = (d * c - a * f) / (b * d - e * a) \dots\dots\dots(22)$$

$$r = \text{sqrt}((x - x_1) * (x - x_1) + (y - y_1) * (y - y_1)) \dots\dots\dots(23)$$

所插点 O 的位置计算为:

若是 X 方向间距大于 Y 方向间距, 则按照 X 方向的步长去加密;

$$O.x = p_2.x + l \dots\dots\dots(24)$$

$$O.y = (\text{曲线}_{p_{123}.y} + \text{曲线}_{p_{234}.y}) / 2 \dots\dots\dots(25)$$

若是 y 间距大于 x 间距, 则按照 Y 方向的步长去加密;

$$O.x = p_2.y + l \dots\dots\dots(26)$$

$$O.y = (\text{曲线}_{p_{123}.y} + \text{曲线}_{p_{234}.y}) / 2 \dots\dots\dots(27)$$

即首先计算插值点 O 的 X 坐标, 再把 X 带入两个曲线方程求对应的 Y 值, 求两个 Y 值的平均值。

以此类推, 第 N 个插值点的坐标应该为:

若是 X 方向间距大于 Y 方向间距, 则按照 X 方向的步长去加密

$$O.x = p_2.X + l * N \dots\dots\dots(28)$$

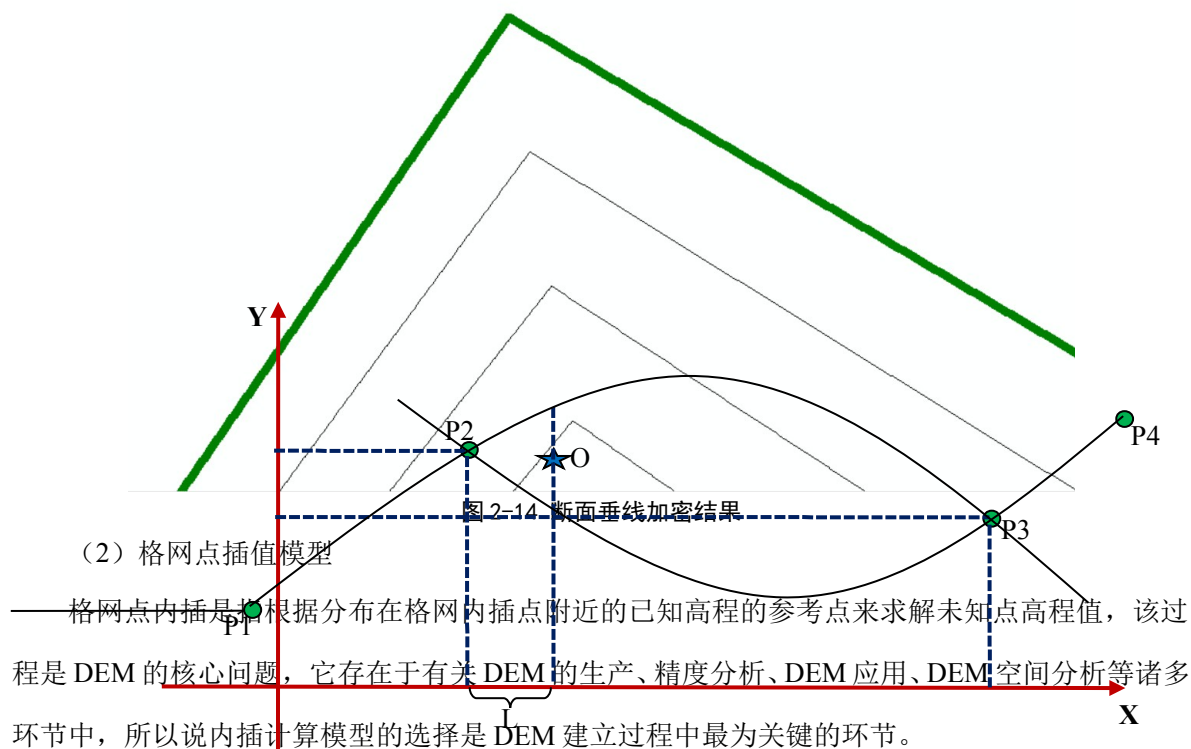
$$O.y = (\text{曲线}_{p_{123}.y} + \text{曲线}_{p_{234}.y}) / 2 \dots\dots\dots(29)$$

若是 y 间距大于 x 间距，则按照 Y 方向的步长去加密。

$$O.x = p_2.y + l \quad \dots\dots\dots(30)$$

$$O.y = (\text{曲线}_{p_{123}.y} + \text{曲线}_{p_{234}.y}) / 2 \quad \dots\dots\dots(31)$$

最后加密完成的河道线如下图所示：



本文在研究上述格网点加密方法的同时，就考虑了加密点（格网点）的插值方式，在沿断面方向上加密格网点的同时采用线性插值的方式计算格网点的高程值。

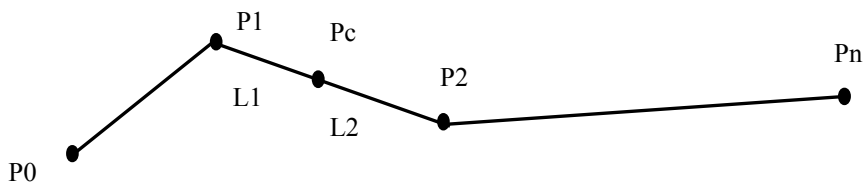


图 2-15 格网点线性插值

图中 P0、P1、P2 等代表中心线上节点，P0.Z、P1.Z、P2.Z 代表各节点所对应的高程值，其中 PC 点为两点之间距离大于阈值的插入点，PC.Z 为插入点缓冲距，插入点的高程值采用线性内插法计算，线性内插法如公式 2-1：

$$Z = \frac{L_1}{L_2 + L_1} * Z_1 + \frac{L_2}{L_1 + L_2} * Z_2 \dots\dots\dots (32)$$

式中 Z 代表内插结果，Z1、Z2 分别为插值点左右控制点的值，L1 为插值点到左控制点的距离，L2 为插值点到右控制点的值。若 L1 越小则其插值结果越接近 Z1，反之，L2 越小，则插值结果越接近 Z2 的值。

利用线性插值的方式实现逐点内插，解算每个格网点的高程值，完成规则格网 DEM 的构建。

## 2.3 河道规则格网 DEM 融合及边坡嵌入

本文创建的规则格网 DEM 数据是通过断面线进行格网划分和格网点高程内插后根据常见的 DEM 插值构建的方式实现每一个分块的规则格网 DEM 构建，该方法主要是按照要求的格网分辨率大小生成规则格网，对需要内插点和已知点形成一个拟合曲面，实现 DEM 构建。为了实现个好的表达效果，在规则格网 DEM 构建完成后，首先进行数据的融合，即对分块构建的 DEM 进行拼接，为了避免数据冗余和数据误差，本文直接利用栅格数据镶嵌的方式实现规则格网数据的融合；其次，在三维展示过程中，由于数据拉伸的情况存在，会造成规则格网数据边缘出现参差不齐的现象，影响视觉，所以对规则格网进行边坡嵌入处理，利用国家基础地理数据 1: 10000 规则 DEM 数据，在完成重采样后直接利用栅格数据镶嵌的方式，拓宽并填补规则格网的边缘数据。

## 3 原型系统设计与实现

### 3.1 系统功能概述

基于断面测量数据的精细河道 DEM 建立与分析系统是使用 Visual Studio.NET 的 C#开发工具，基于 ArcGIS Engine 软件结合 DEV Express 控件实现系统的开发，系统包括基本地图文档操作，地图操作快捷工具，矢量处理，系统帮助等主要功能菜单，系统的核心主要是集中在矢量处理模块中，系统核心业务即基于断面测量数据的精细河道 DEM 建立过程中数据处理流程，主要包括：断面测量数据的标识，断面测量散点自动连接，格网点划分，格网点插值等功能，3.3 小节中详细介绍了系统的主要功能模块。

3.2 原型系统界面

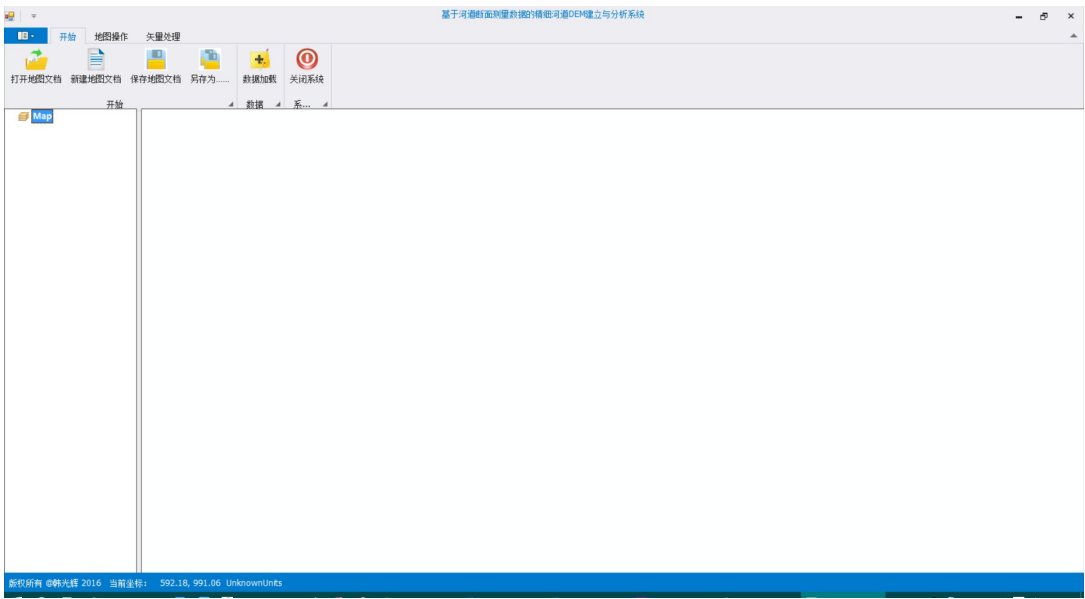


图 3-1 原型系统界面

3.3 系统界面设计

3.3.1 快捷工具

快捷工具包括打开文件，保存文件，比例尺调整，放大缩小和加载图层等工具。如图 3-1 所示。



图 3-2 系统快捷工具

3.3.2 矢量处理

基于断面测量数据的精细河道 DEM 建立与分析系统中矢量处理模块包括了对原始数据预处理（批量转换 Coverage2Shapefile，Shapefile 数据合并，二三位数据转换，重复点标识剔除等）、扫描



标识、自动连线、断面线平滑处理、格网划分程序、格网点高程点插值程序等；

#### a.批量 Coverage 转 Shapefile

批量 Coverage 转 Shapefile 功能是利用长江河道数字化成果的存储路径的规律，读取输入路径所包含的所有文件夹名称，并读取其中的 Coverage 格式的数据，逐个遍历，完成数据格式的转换，如图 3-2 是批量 Coverage 转 Shapefile 截图；

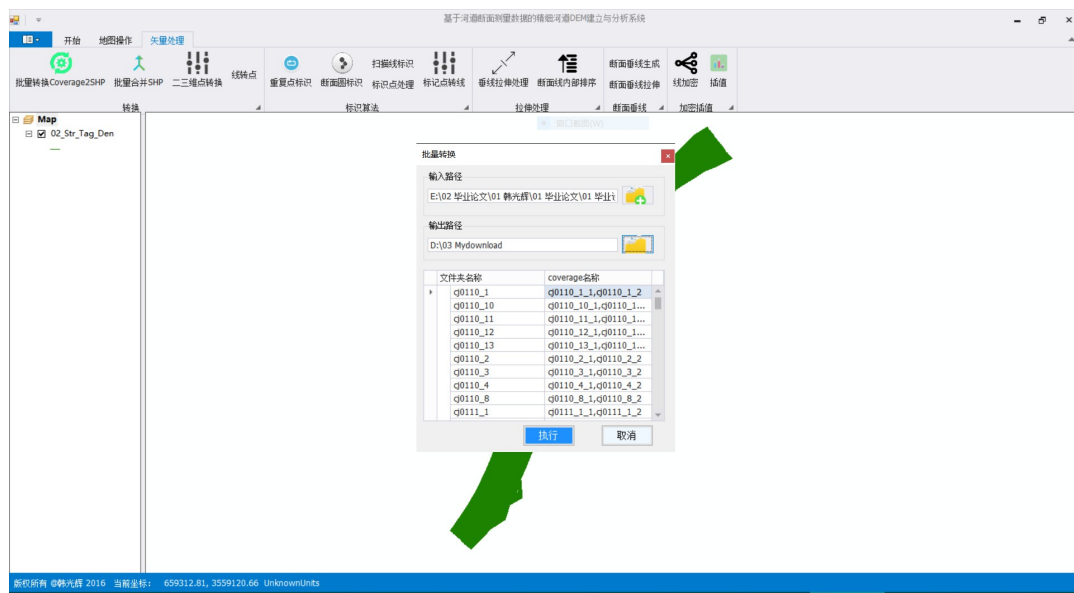


图 3-3 批量 Coverage 转 Shapefile

#### b.批量合并 Shapefile

批量合并 Shapefile 文件也是依据上述格式转换过程后存储的文件比较规律，既方便了数据的管理，也方便了程序的处理，如图是批量合并 Shapefile 截图；

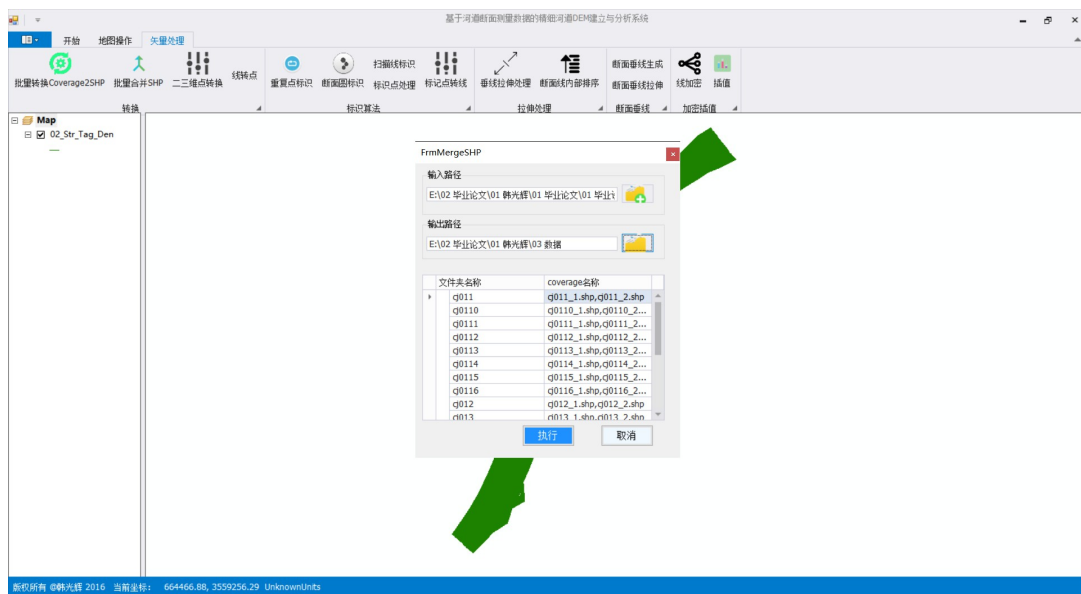


图 3-4 批量合并 Shapefile

#### c.二三维数据转换

二三维数据转换时基于断面测量数据的精细河道 DEM 建立的基础功能之一，此过程是高程信息获取的重要过程，该过程需要结合河道断面散点与原始河道扫描图数据进行对比，确定断面散点所蕴含的高程信息，以此实现二三维数据的转换，获取高程信息，如图是二三位数据转换截图：

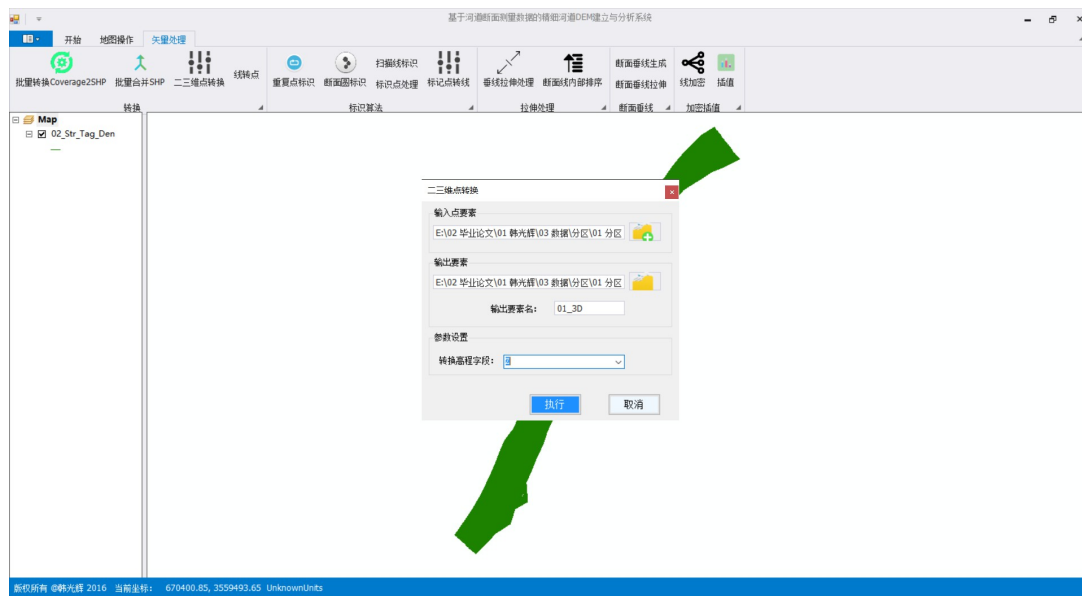


图 3-5 二三维数据转换图

#### d.重复点标识

重复点的存在会影响断面散点的扫描标识与自动连接，也会影响格网高程点的插值结果与插值的精度，所以在完成高程信息提取后就要进行重复点的标识与重复点的剔除，提高程序执行的效率也减少数据的冗余，如图是重复点标识程序：

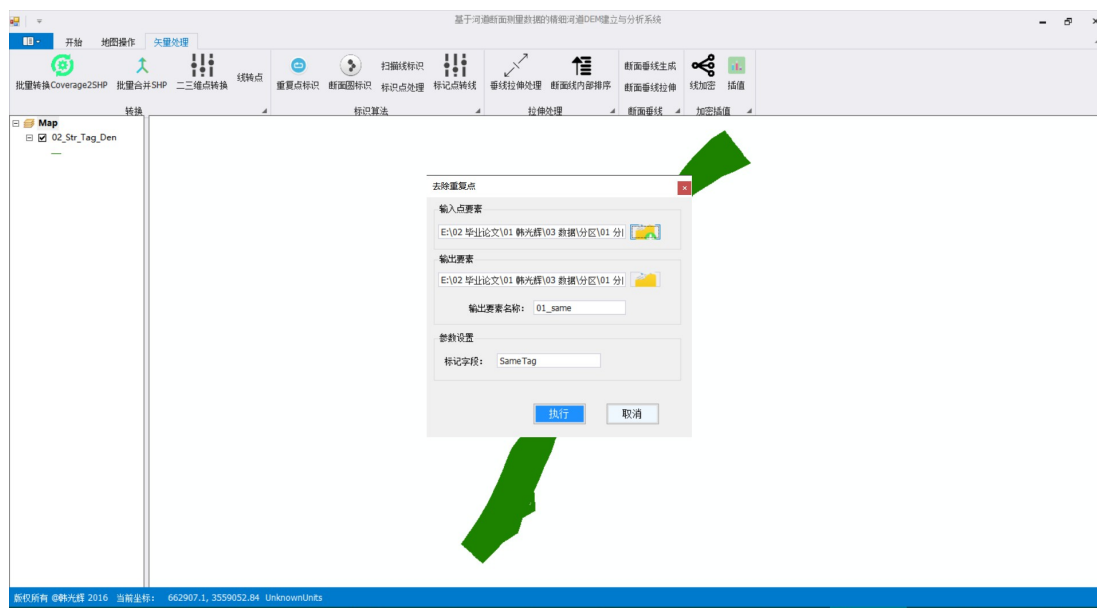


图 3-6 重复点标识

#### e.扫描圆标识法

扫描圆标识法是以任意一点作为起始点构建扫描圆，结合长江边界线数据，采用递归算法的原

理，将断面散点进行标识，在这个过程中扫描圆的半径设置靠人为判断决定，程序预留扫描圆半径阈值的设置；该过程是断面散点自动连接的重要过程，也是整个精细河道数字高程模型构建的重要过程，如图是扫描圆表示法程序；

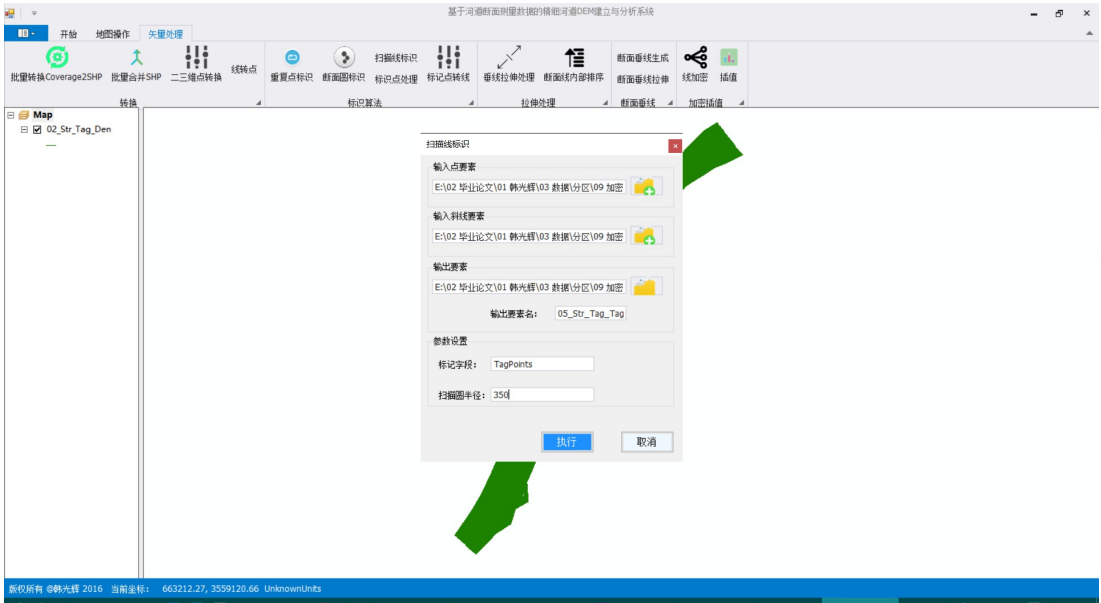


图 3-7 断面椭圆标识

f. 最近距离点构建扫描线标识法

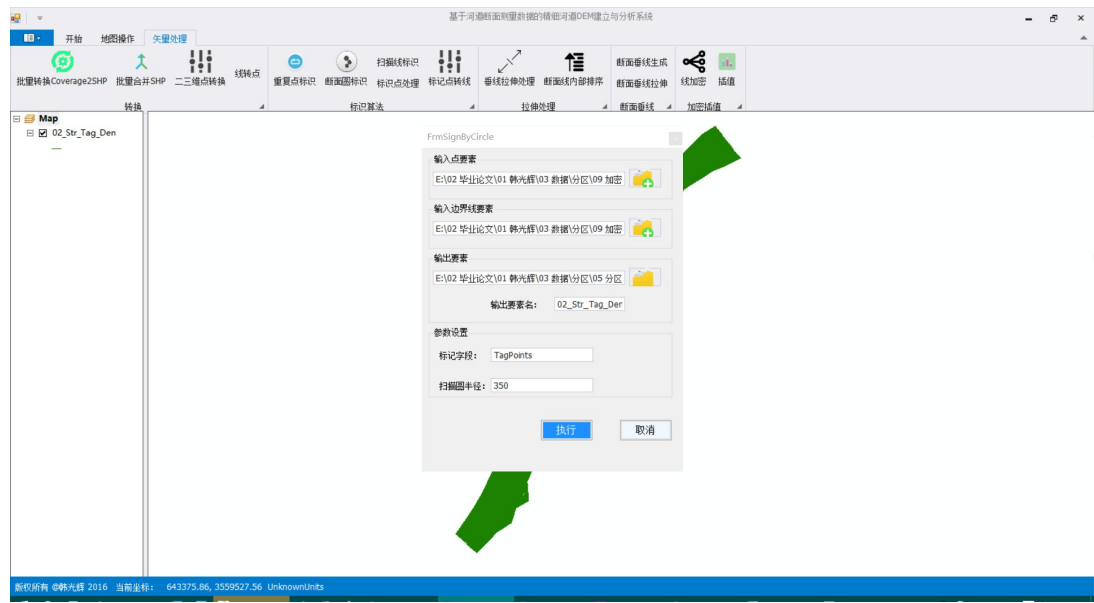


图 3-8 最近距离点构建扫描线标识

g.断面线平滑处理

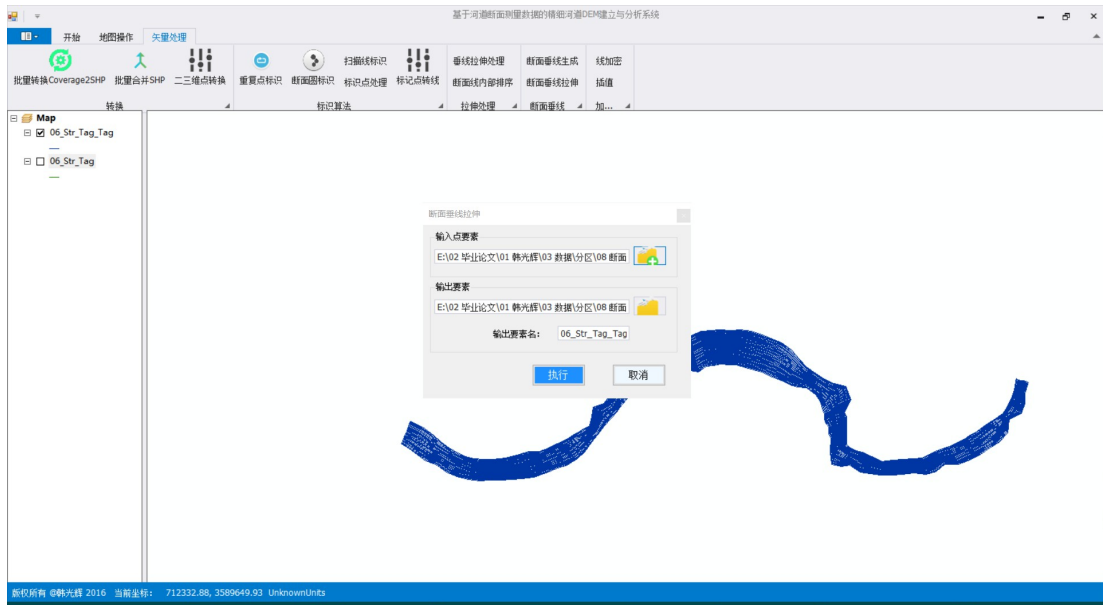


图 3-9 断面线平滑处理

h.加密

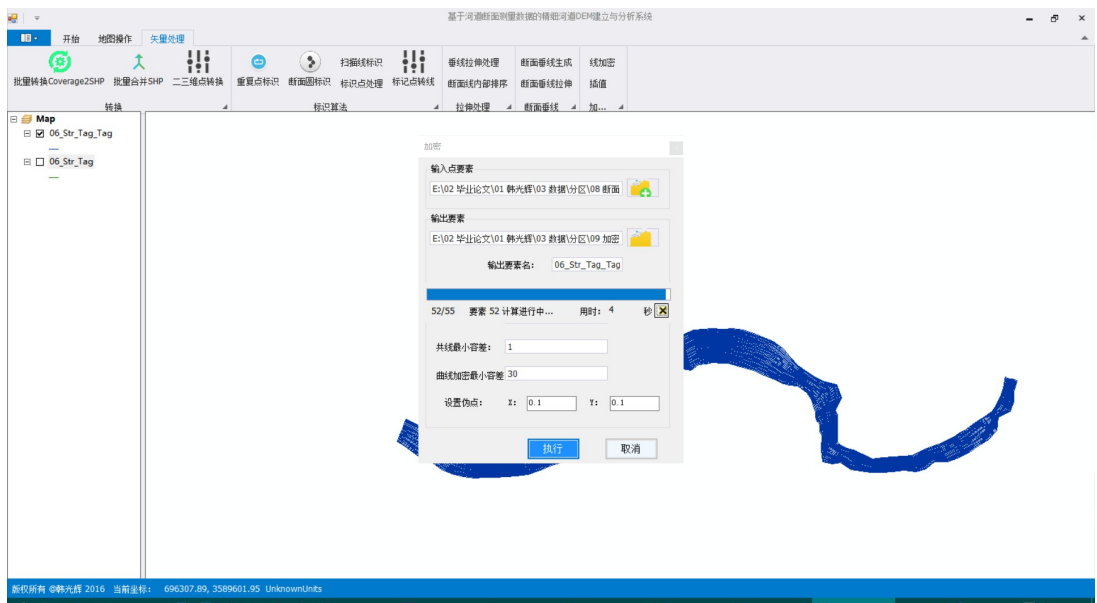


图 3-10 线节点加密处理

i.格网点高程内插程序

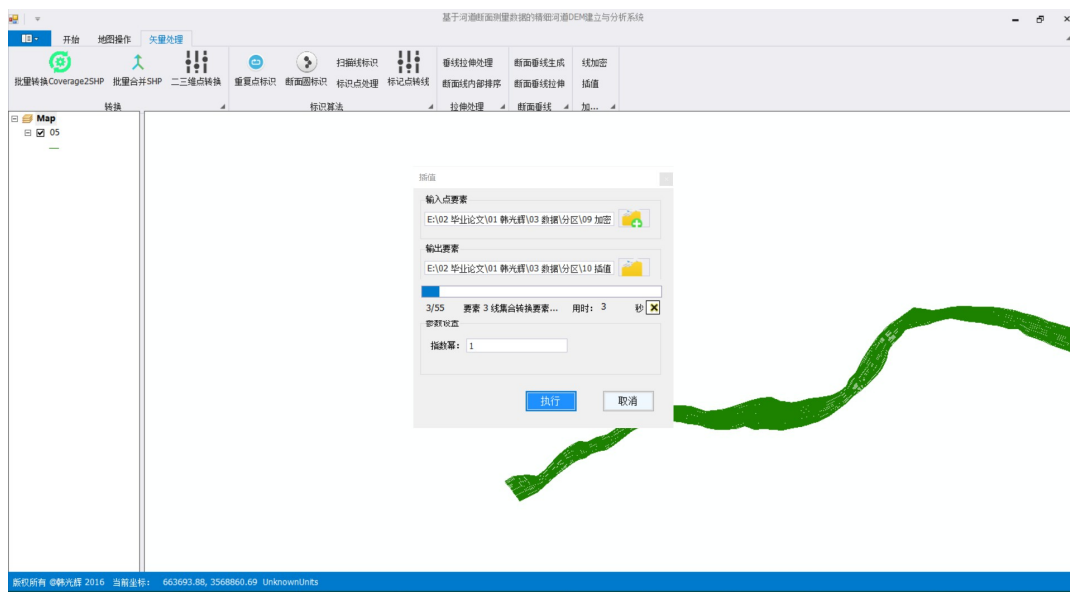


图 3-11 格网点高程内插

## 4 原型系统测试

### 4.1 前期数据处理

前期的数据处理包括了 Coverage 转换成 Shapefile 数据格式，批量合并 shapefile 以及河道 DEM 构建前的分区处理，如图 4-1 是合并后的长江断面数据；

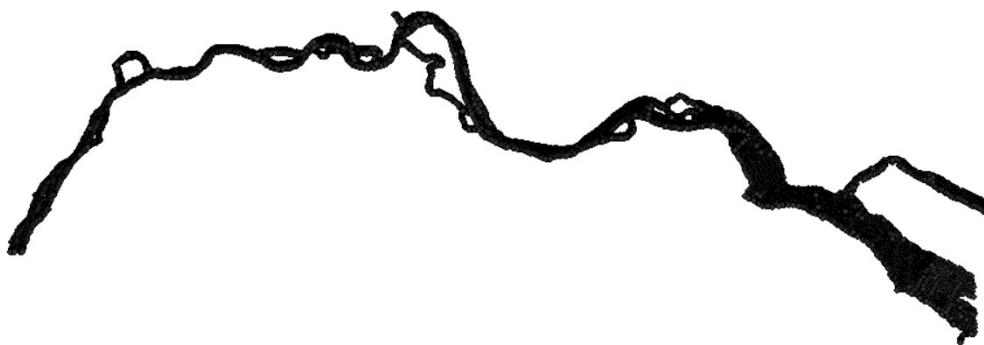


图 4-1 合并后长江断面数据

## 4.2 河道 DEM 建立过程测试

基于断面测量数据的精细河道 DEM 建立过程主要包括了自成约束的断面测量数据的自动连接，格网点划分与格网点高程内插计算模型的研究，但由于数据的无序性和随机排列的特征，所以在处理过程中也需要设计多种处理算法来实现平滑等处理。

断面线自动连接技术主要是利用了不固定点确定圆扫描标识法进行连接，但在自动连接的过程中也会出现一系列无法被标识到的点，所以需要对已标记点转成的线进行连接等处理，如图 4-2 是未被同一标识的断面线，图 4-3 是断面连接线处理结果；

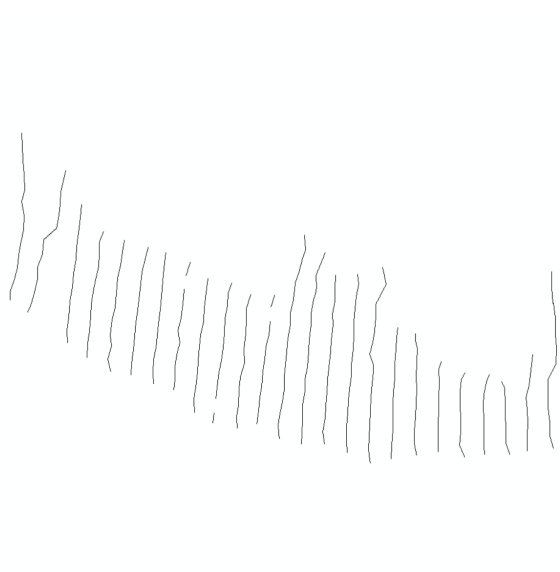


图 4-2 未被同一标识的断面线

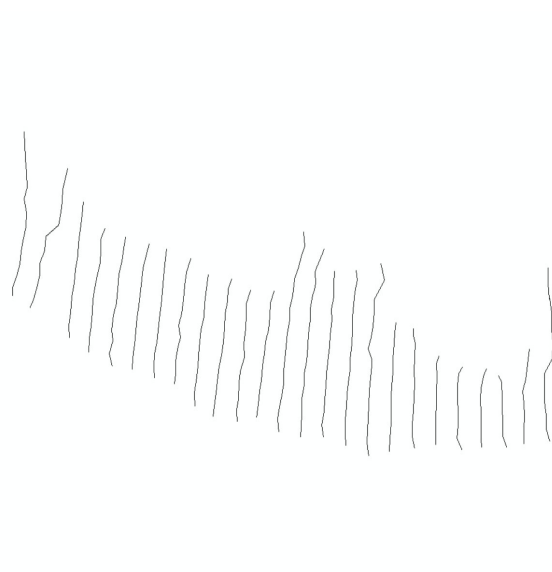


图 4-3 断面连接线处理结果

在完成断面线生成之后需要进行的是断面线垂线的生成，该过程是格网点划分与格网点高程内插的一个部分，利用断面线，设置距离阈值，并利用线性插值的方式内插计算出加密点的阈值，由于高程点的无序性，故断面线垂线也会出现无序的情况，同样需要进行断面线垂线的内部排序，该排序方法是依据自然界水的流向（自西向东）为原理，实现线段的排序，如图 4-4 是未经排序的断面线垂线集，图 4-5 是处理完成的断面线垂线集；

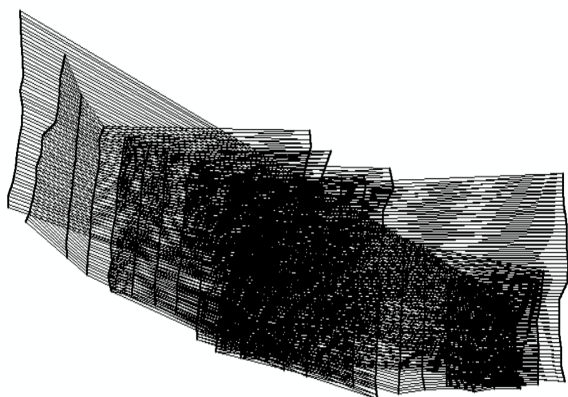


图 4-4 未经排序的断面线垂线集

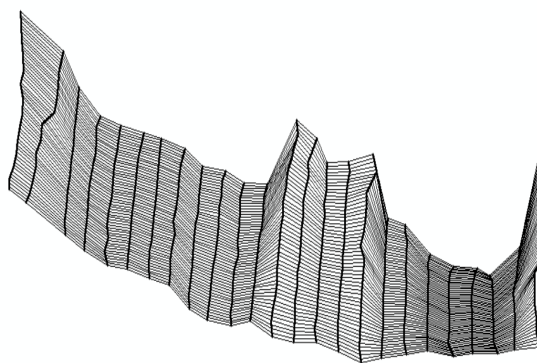


图 4-5 处理完成的断面线垂线集

在完成断面线垂线集生成的基础上需要对线的节点进行加密处理，加密完成后即完成插值，本文利用的线性插值方法实现插值，最后利用插值后的结果转成点，利用 ArcGIS 空间插值工具生成格网 DEM，如图 4-6 是长江的 DEM 结果图；

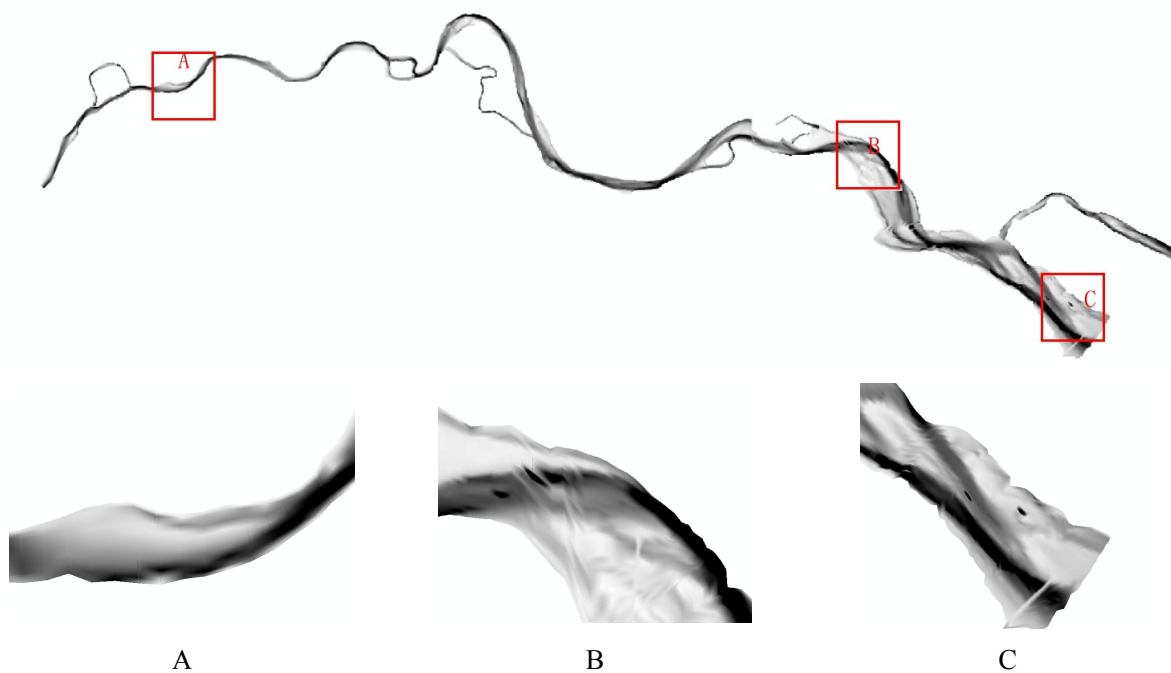


图 4-6 长江的 DEM 结果图

### 4.3 精度评价

河道 DEM 的精度是进行河道数字地形分析的关键，DEM 的精度将直接影响数字地形分析的准确性，因此需要对河道数字高程模型进行精度评价分析，通常情况下，DEM 的数据质量不可避免与

原始高程采样点的精度有关，还与高程内插计算方法等有着密不可分的关系。

本文对研究区域完成河道 DEM 构建后，利用原始等高线及原始构建高程散点进行随机采样 100 个高程点，利用差值残差的方式进行对河道 DEM 进行精度分析，如图 4-7 是 DEM 精度评价高程点采集示意图。

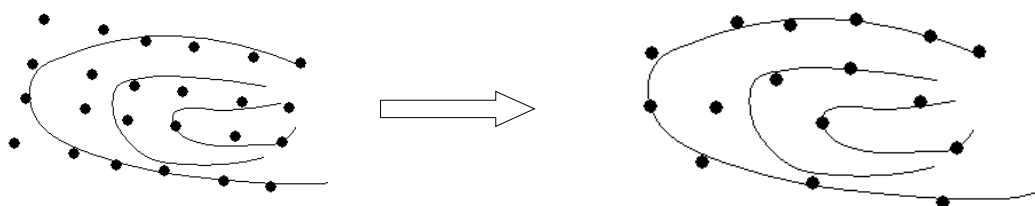


图 4-7 DEM 精度评价高程点采集示意图

本文对研究的区域进行随机抽取采样点，利用差值残差的方式进行 DEM 精度评价分析，分别计算出误差的极值、标准差、平均值，依据我国 1: 10000 数字高程模型生产技术规定的一级中误差为 2.5m，表 2-1 是误差结果。

表 4-1 误差结果

格网点高程误差/m	
极大值	0.8
极小值	-0.9
平均值	0.15
绝对值平均值	0.62
标准差	0.86

分析利用差值残差方式进行精度评价的结果结合表 4-1，极值上限分布在 0.8(m)，下限分布在 -0.9(m)，其中分布在 0.65-0.8 及 -0.9-0.70 的点数量为 22 个点，分布在 -0.7-0.65 的误差点的数量为 78 个点，占总检查点的 78%。

## 5 结论与讨论

### 5.1 主要成果

本文针对常规的 DEM 地形构建的方法，在精度误差和不能顾及沿着断面自成连续曲线的内在约束的内在条件而提出的改进方法，从理论和实际解决了解决河道 DEM 快速构建难题。并通过大量的实验对比分析证明本文所研究的河道 DEM 快速构建方法构建的精度和质量都符合实际的要求，



具有可行性。系统符合论文思想，运行结果与手动实验结果一致，达到系统设计的要求；完成了基于河道测量数据的精细河道 DEM 建立与分析原型系统，主要成功包括：

(1)基于河道断面测量散点数据的自动连接技术，即利用断面测量散点数据的空间分布特征，设计符合不同空间分布特征的扫描标识和自动连接算法。

(2)网格划分与格网点插值模型，即为了能突出河道弯曲度、深槽连续性、边坡平滑度等河道地形特征，所以采用以断面约束线构建四边形的方式对线节点进行有效加密，依据科学的插值方法实现河道地形进行有效保真表达。

(3)完成了基于断面测量数据的精细河道 DEM 建立与分析的原型系统的搭建，实现了河道 DEM 的快速构建。

## 5.2 研究展望

(1)系统的方法主要是在现有的内插方法的基础上进行改进来提高实验结果的精度，在以后可以通过使用新的更加高精度的内插方法基础之上，进一步提高河道数字高程模型的结果精度。

(2)本实验主要所选取的样本数据较少，对迭代过程中因为个人对内插过程中的参数设置不同可能导致实验结果的大相径庭，因此操作较繁琐，日后仍需改善。

(3)在本文所研究的河道断面自动连接技术的实现方面还存在一些不能满足实际情况的地方，需要对断面扫描标识算法进行进一步的改进，促进河道数字高程模型的建立与应用，促进河道数字地形分析的发展，促进河道整治、河床动态监测等诸多方面的发展。

## 参考文献

- [1] 汤国安,李发源,刘学军.数字高程模型[M].北京:科学出版社,2006.
- [2] Mooreid,Graysonrb.Lansonar.Digital terrain modelling:a review of hydrological, geomorphological, biologicalapplications[J].Hydrological Processes,1991,5( 1):3-30.
- [3] 王强. GIS 在河道冲淤及河床演变分析中的应用[D].武汉：武汉大学，2004.
- [4] 许捍卫，何江.长江江苏段河道 DEM 建立方法研究[J].测绘工程，2006,15（4）：33-36.
- [5] 王伟，翁正平，李圣伟.长河道地形的 DEM 生成、管理及应用[C].天津:中国水利学会 2014 学术年会，2014,939-945.

- [6] 汤丽洁,丁贤荣,赵吉祥. 基于 ArcGIS Engine 的河道数字地形建模[J].水利与建筑工程学报,2009,7(1):45-47.
- [7] 丁贤荣,王文.河道数字地形信息系统与长江镇扬河段 GIS 研制[J].河海大学学报(自然科学版),2001,29(4):120-122.
- [8] 翁正平,王伟,田宜平. 长江河道地形 DEM 生成与管理关键技术探讨[J].人民长江,2014,45(2):71-73+77.
- [9] 杨涛, 丁贤荣, 王文, 等.基于 COM 的河道数字地形系统开发\_长江镇扬河段河道地理信息系统[J].水文, 2001,21 (6) : 38-41.
- [10] 赵吉祥.数字河床洲滩演变空间建模分析[D].南京:河海大学,2007.
- [11] 王向东,汤立群,丁贤荣.应用 GIS 计算分析长江镇扬段河床演变[J].泥沙研究, 2008 (6) : 68-73.
- [12] 张红梅.基于 GIS 的河床冲淤演变可视化系统研究[D].武汉:武汉大学,2003.
- [13] 尹学良.河床演变河道整治论文集[C].北京:中国建材工业出版社,1996.
- [14] A.De Vincenzo,D.Palma.GIS Analysis for the Study of Slope Instability Processes in a fluvial asin.WIT Transactions on Ecology and the Environment,2005,Vol 80.
- [15] 杨明, 梁国亭, 赖瑞勋, 等.基于曲面内插技术的数字地形生成原理及应用[J].水利学报, 2007,38 (2) : 221-225;

## 致 谢

提笔写致谢，感慨万千，写完这篇致谢，也就意味着我的学生生涯就完全结束了，一直以为这一天离我很遥远，如今却近在咫尺了，或许这一生的学生时代就此完成，脱离学校，踏上社会。

首先我要感谢我的论文指导老师王春院长，大学四年一位名副其实的好老师，大一至今，一直是不悔的教导，不仅教会我们如何学习，更教会我们如何去面对工作、面对任务、面对很多问题，无论是在生活还是在学习上，对我们的关照，是我们一辈子都不能忘记的，他是一位良师，更是一位益友，感谢大学四年遇到这么一位好老师。

其次我想感谢我的团队成员们，大学四年我们一起学习，一起参加比赛，一起熬夜写程序，一起玩耍，这也是我大学四年的另外一笔宝贵财富，感谢在青春路上一起面对、一起成长的伙伴们。。

最后我要感谢我的父母和我的大学同学们，没有你们的支持和帮助，我不可能走到今天，在这里我想对你们说声，谢谢您！

祝福大家前程似锦、一帆风顺！

## 附 录一（本科期间发表论文及奖励）

**韩光辉**，王春，朱林,卜全祥.中国实景地图服务的现状与思考[J].资源开发与市场，2015（31）：100-102+48+130；

徐静，顾留碗，张耀民，**韩光辉**.规则格网 DEM 地形综合方法分析[J]. 测绘工程，2014，9(23): 26-31。

2015 年滁州学院首届 “互联网+”创新创业大赛一等奖；  
2015 年安徽省大学生 GIS 技能大赛 Web 应用设计组二等奖；  
2015 年第四届全国大学生 GIS 应用技能大赛特等奖。

## 附 录二（程序源码）

```
#region 点标记处理
/// <summary>
/// 点标记处理
/// </summary>
/// <param name="inputPath"></param>
/// <param name="outputPath"></param>
/// <param name="FcName"></param>
/// <param name="tagField">标记字段</param>
/// <param name="TolLine">共线容差</param>
/// <param name="TolDis">距离容差</param>
/// <returns></returns>
```

```

        public IFeatureClass TagPoints(string inputPath, string outputPath, string FcName, string
TagFieldName, string inputRange, double TolDis)
        {
            if (inputPath == "" || outputPath == "" || FcName == "")
            {
                MessageBox.Show("请输入正确参数！","参数错误提示");
            }
            CxReadCLS read = new CxReadCLS();
            //输入点要素类
            IFeatureClass pInFeaCls = read.GetShpByPath(inputPath);
            if (pInFeaCls.ShapeType != ESRI.ArcGIS.Geometry.esriGeometryType.esriGeometryPoint)
            {
                MessageBox.Show("输入点要素不是点要素，请检查！");
                return null;
            }
            //输入边界线要素类
            IFeatureClass pInRangeFeaCls = read.GetShpByPath(inputRange);
            if (pInRangeFeaCls.ShapeType !=
ESRI.ArcGIS.Geometry.esriGeometryType.esriGeometryPolyline)
            {
                MessageBox.Show("输入边界线数据不是线要素，请检查！");
                return null;
            }
            IFeatureClass pResFeaCls = this.CreatePointClass(outputPath, FcName, pInFeaCls);
            int TagIndex = pResFeaCls.FindField(TagFieldName);
            if (TagIndex < 0)
            {
                IField pField = new FieldClass();
                IFieldEdit pEdit = pField as IFieldEdit;
                pEdit.Name_2 = TagFieldName;
                pEdit.Type_2 = esriFieldType.esriFieldTypeInteger;
                pResFeaCls.AddField(pField);
            }
            TagIndex = pResFeaCls.FindField(TagFieldName);
            IFeatureBuffer pResFeaBuf = pResFeaCls.CreateFeatureBuffer();
            IFeatureCursor pResFeaCur = pResFeaCls.Insert(true);
            int featurecount = pInFeaCls.FeatureCount(null);
            FrmProgress pro = new FrmProgress(0, featurecount - 1);
            pro.Show();
            TimeSpan ts1 = new TimeSpan(System.DateTime.Now.Ticks);
            int procoun = 0;
            IList<int> OIDList = new List<int>();
            IList<int> TagOIDList = new List<int>();
            int tagValue = 0;

```

```

IFeatureCursor pFeaCur = pInFeaCls.Search(null, false);
IFeature pFea = pFeaCur.NextFeature();
while (pFea != null)
{
    TimeSpan ts2 = new TimeSpan(System.DateTime.Now.Ticks);
    TimeSpan ts3 = ts1.Subtract(ts2).Duration();
    pro.SetBarValue("要素 " + (pFea.OID).ToString() + " 计算进行中...", procount,
featurecount, ts3);
    procount++;
    bool breaktrue1 = false;
    for (int x = 0; x < TagOIDList.Count; x++)
    {
        if (pFea.OID == TagOIDList[x])
        {
            breaktrue1 = true;
            break;
        }
    }
    if (breaktrue1)
    {
        pFea = pFeaCur.NextFeature();
        continue;
    }
    IPoint pt1 = pFea.ShapeCopy as IPoint;
    OIDList.Add(pFea.OID);
    TagOIDList.Add(pFea.OID);
    pResFeaBuf.Shape = pFea.ShapeCopy as IGeometry;
    pResFeaBuf.set_Value(TagIndex, tagValue);
    pResFeaCur.InsertFeature(pResFeaBuf);
    IList<IFeature> pResFeaList = this.findCircle(pInFeaCls, pInRangeFeaCls, pFea,
OIDList, TagOIDList, TolDis);
    if (pResFeaList != null)
    {
        for (int h = 0; h < pResFeaList.Count; h++)
        {
            TagOIDList.Add(pResFeaList[h].OID);
            pResFeaBuf.Shape = pResFeaList[h].ShapeCopy as IGeometry;
            pResFeaBuf.set_Value(TagIndex, tagValue);
            pResFeaCur.InsertFeature(pResFeaBuf);
        }
    }
    tagValue++;
    pFea = pFeaCur.NextFeature();
}

```

```
pResFeaCur.Flush();  
if (pResFeaCur != null)  
{  
    pResFeaCur = null;  
}  
pro.Close();  
pro.Dispose();  
return pResFeaCls;  
}  
#endregion
```