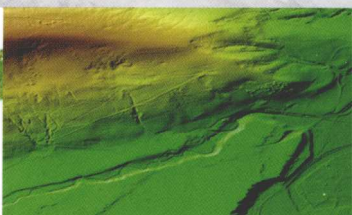
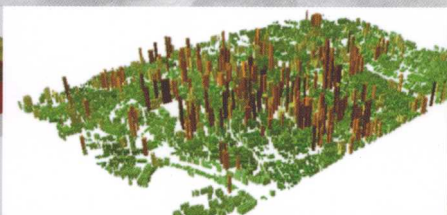
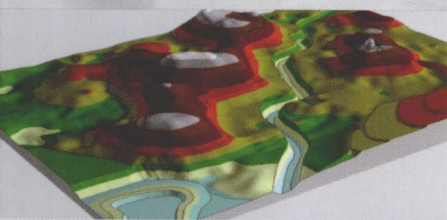
 地理信息技术实训系列教程

数字高程模型实验教程

李发源 汤国安 晏实江 祝士杰 编著



P231.5
05



科学出版社

013030773

P231.5
05

地理信息技术实训系列教程

数字高程模型实验教程

李发源 汤国安 晏实江 祝士杰 编著

地理科学国家级实验教学示范中心建设项目
地理信息系统国家级教学团队建设项目



P231.5
05

科学出版社



北航

C1636371

内 容 简 介

DEM 是地理数据库中的核心数据, 是进行地形分析的基础, 被广泛应用于测绘、遥感、资源、环境、城市规划、农林、灾害、水电工程及军事等领域。

本书作为“数字高程模型”课程的配套实验教材, 紧扣课程教学大纲, 以实验为核心组织内容, 设计了多个专题实验和综合实验, 其中专题实验又包括基础实验和自主实验两部分。各部分的实验由浅及深, 具有一定的层次性, 便于教师组织教学。

本书可作为高等院校地理、地质、海洋、气象、测绘、环保等专业本科生和研究生的教材, 也可供其他相关学科的各类专业技术者阅读参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

数字高程模型实验教程/李发源等编著. —北京: 科学出版社, 2013. 3
地理信息技术实训系列教程

ISBN 978-7-03-036905-5

I. ①数… II. ①李… III. ①数字高程模型-高等学校-教材
IV. ①P231.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 041493 号

责任编辑: 杨 红/责任校对: 郑金红
责任印制: 阎 磊/封面设计: 迷底书装

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

新科印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2013年3月第一版 开本: 720×1000 B5

2013年3月第一次印刷 印张: 8 1/2

字数: 160 000

定价: 25.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

前 言

数字高程模型 (Digital Elevation Model, DEM) 的概念于 1958 年由 Miller 提出, 经过 40 多年的发展, DEM 的诸多基础理论问题都得到了深入研究, DEM 以及基于 DEM 数字地形分析的理论与技术方法体系正在形成。作为地理信息系统地理数据库中最为重要的空间信息资料和赖以进行地形分析的核心数据系统, 国家测绘部门将其作为国家空间数据基础设施 (NSDI) 建设的重要内容之一。随着全国多尺度 DEM 的相继建立, 其正在科学研究、生产与国防建设中发挥越来越重要的作用。在理论研究方面, DEM 的不确定性、DEM 的尺度效应、DEM 的地学分析、基于 DEM 的数据挖掘都取得了很大的突破。在应用方面, 也从一般的地形因子提取, 支持三维漫游等简单应用向更多样的形式、更广泛的领域发展。可以说, 在很多应用者看来, DEM 所代表的已经不仅仅是一般的记录海拔高程的空间数据, 还包括一种空间分析的思路、一种地学处理的方法。

近年来, 高等院校有关专业, 特别是自然地理学、地图学与地理信息系统、地图制图与地理信息工程、摄影测量与遥感、大地测量学与测量工程等专业都纷纷将数字高程模型作为本科生、研究生的必修或选修课。由汤国安等编著的《数字高程模型教程》在各高校得到广泛应用, 但配套的实验教材还未见出版。

本书作为“数字高程模型”课程的配套实验教材, 紧扣课程教学大纲, 设计了 DEM 数据采集、DEM 建模、基本地形因子提取、水文分析、地形特征要素提取、DEM 可视化六组专题实验和太阳辐射模拟、城市日照模拟、填挖方分析、洪水淹没分析、梯田 DEM 构建、道路统计分析六个综合实验。其中专题实验又包括基础实验和自主实验两部分, 基础实验由学生在教师的指导下完成, 属于原理验证类实验; 自主实验是理论的拓展及延伸, 由教师提出主要实验思路, 学生在课后独立完成, 属于能力拓展类实验。综合实验要求学生能综合运用多种空间分析方法解决实际地学问题, 既是理论的提升, 也是学生能力的拓展实验。三种类型的实验有一定的相关关系及递进关系, 由浅及深, 在教学过程中可配合展开。

本书的研究工作得到国家自然科学基金项目 (40930531、40801148、41171299) 的资助。

DEM 理论及应用研究的发展非常迅速, 本书虽力求全面并紧跟其发展趋势, 但由于作者水平和时间有限, 书中难免存在疏漏之处, 恳请读者批评指正。

作 者

2013 年 1 月

目 录

前言

概述	1
0.1 引言	1
0.2 DEM 实验的基本特征及其在本课程中的作用	1
0.3 全书框架结构	3
1 实验一 DEM 数据采集	4
1.1 基础实验：基于等高线的数据采集	4
1.2 自主实验 1：基于遥感影像的数据采集	16
1.3 自主实验 2：基于 LiDAR 的数据采集	17
1.4 自主实验 3：基于 InSAR 的数据采集	20
2 实验二 DEM 建模	23
2.1 基础实验 1：基于不规则、规则分布采样点的 DEM 建立	23
2.2 基础实验 2：基于等高线数据的 DEM 建立	24
2.3 基础实验 3：TIN 的建立及 TIN 与 GRID 的转换	28
2.4 自主实验：不同来源数据 DEM 建立的误差分析	31
3 实验三 基本地形因子提取	32
3.1 基础实验 1：坡度、坡向的提取	32
3.2 基础实验 2：变率与曲率的提取	35
3.3 基础实验 3：坡面形态因子的提取	41
3.4 基础实验 4：坡面复杂度因子的提取	51
3.5 自主实验：坡度因子提取的不确定性	55
4 实验四 水文分析	56
4.1 基础实验 1：汇水网络提取	56
4.2 基础实验 2：流域分割	62
4.3 自主实验：水文分析的不确定性	65
5 实验五 地形特征要素提取	66
5.1 基础实验 1：地形特征点的提取	66
5.2 基础实验 2：地形结构线的提取	77
5.3 基础实验 3：基于坡面形态要素的地形分割	85
5.4 自主实验：流域地形特征点簇的建立及应用	91

6 实验六 DEM 可视化	92
6.1 基础实验 1: DEM 地形渲染	92
6.2 基础实验 2: DEM 3D 可视化	97
6.3 基础实验 3: 可视性分析	108
6.4 自主实验: 移动基站的选址分析	111
主要参考文献	112
附录 综合实验	113
综合实验一 太阳辐射模拟	113
综合实验二 城市日照模拟	115
综合实验三 填挖方分析	117
综合实验四 洪水淹没分析	119
综合实验五 梯田 DEM 构建	121
综合实验六 道路统计分析	125

概 述

0.1 引 言

数字高程模型是地形曲面的数字化表达，它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者说是地形表面形态的数字化表示，英文为 Digital Elevation Model，简称 DEM。数字高程模型的概念于 1958 年由 Miller 提出，经过 40 多年的发展，DEM 的诸多基础理论问题都得到了深入的研究，DEM 以及基于 DEM 数字地形分析的理论与技术方法体系正在形成。作为地理信息系统地理数据库中最为重要的空间信息资料和赖以进行地形分析的核心数据系统，国家测绘部门将其作为国家空间数据基础设施（NSDI）建设的重要内容之一。随着全国多尺度 DEM 的相继建立，其正在科学研究、生产与国防建设中发挥着越来越重要的作用。在理论研究方面，DEM 的不确定性、DEM 的尺度效应、DEM 的地质分析、基于 DEM 的数据挖掘都取得了很大的突破。在应用方面，也从一般的地形因子提取、支持三维漫游等简单应用向更多样的形式、更广泛的领域发展。可以说，在很多应用者看来，DEM 所代表的已经不仅仅是一般的记录海拔高程的空间数据，还包括一种空间分析的思路、一种地学处理的方法。

近年来，高等院校有关专业，特别是自然地理学、地图学与地理信息系统、地图制图与地理信息工程、摄影测量与遥感、大地测量学与测量工程等专业都纷纷将数字高程模型作为本科生、研究生的必修或选修课。但是，目前还没有一本专门针对 DEM 实验教学的教材。虽然已有的 GIS 实验教材，如汤国安等编著的《ArcGIS 地理信息系统空间分析实验教程》和《ArcView 地理信息系统空间分析方法》、党安荣等编写的《ArcGIS 8 Desktop 地理信息系统应用指南》、刘良明主编的《ArcView 基础教程》、宋小冬等编写的《地理信息系统实习教程》等都有关于 DEM 地形分析的相关实验，但都相对较为零散，不具系统性，要作为“数字高程模型”课程的配套实验教材仍显不足。因此，迫切需要一本在内容上既强调理论与实际相结合，又融合最新的研究成果；在方法上既注重学生基本能力，又强化创新思维能力培养的实验教材。

0.2 DEM 实验的基本特征及其在本课程中的作用

DEM 实验具有综合性、数据多元性、突出空间分析方法、可视化等特点，

抓住这些特点，有助于 DEM 实验的设计与教学的开展。

1. 综合性

前已述及，DEM 所代表的已经不仅仅是一般的记录海拔高程的空间数据，还包括一种空间分析的思路、一种地学处理的方法。DEM 地形分析的诸多内容都融合了地理学、计算机科学与技术、测绘科学与技术、遥感科学与技术、空间科学与技术等学科的理论与技术，是一类综合的分析方法。因此，DEM 课程实验也具有一定程度的综合性，同时也要求学生具有多学科的背景知识，才能更好地理解并运用 DEM 地形分析的理论与方法解决相应的地学问题。

2. 数据多元性

DEM 实验的数据已不仅仅是 DEM 数据本身，遥感影像、土地利用、DLG 数据也常常用于一些综合的地学分析，在实验数据方面具有多元性。多元性主要体现在以下几个方面。

(1) 多时空性。数据源既有同一时间不同空间的数据系列；也有同一空间不同时间序列的数据。

(2) 多尺度性。根据实验需要而采用不同尺度对地理空间进行表达，不同的观察尺度具有不同的比例尺和不同的精度。

DEM 实验要求学生能够理解数据的多元性，掌握不同数据的结构，应该清楚实验对空间数据要求的特殊性和严格性，熟练掌握各种数据的处理方式，知道如何采集、管理应用、转换、传输相应数据。

3. 突出空间分析方法

空间分析是 GIS 最核心的功能，DEM 实验几乎涉及了 GIS 空间分析的所有功能。对 GIS 空间分析的理解有不同的角度和层次。按处理的空间数据结构类型来看，可分为栅格数据分析及矢量数据分析；按分析对象的维数来看，包括一维、二维、三维及多维分析；按分析的复杂程度可分为空间查询分析、空间信息提取、空间综合分析、数据挖掘与知识发现、模型构建等。DEM 实验的设计要围绕空间分析这个核心展开，突出各种空间分析方法的实验，充分发掘学生的空间思维能力，培养学生运用多种空间分析方法，并借助模型求解来解决实际地学问题的能力。

4. 可视化

DEM 实验可以实现数据输入、处理、计算过程、结果等一系列过程的可视化，提供基于空间坐标的图形可视化功能。可视化技术使人能够在三维图形世界

中直接对具有形体的信息进行操作, 和计算机直接交流。DEM 实验的可视化特性使学生能够更加直观地了解实验内容, 加深对地形分析的理解。

0.3 全书框架结构

本书作为《数字高程模型》课程的配套实验教材, 紧扣课程教学大纲, 设计了 DEM 数据采集、DEM 建模、基本地形因子提取、水文分析、地形特征要素提取、DEM 可视化六组专题实验和太阳辐射模拟、城市日照模拟、填挖方分析、洪水淹没分析、梯田 DEM 构建、道路统计分析六个综合实验。其中专题实验又包括基础实验和自主实验两部分, 基础实验由学生在教师的指导下完成, 属于原理验证类实验; 自主实验是理论的拓展及延伸, 教师提出主要实验思路, 由学生在课后独立完成, 属于能力拓展类实验。综合实验要求学生能综合运用多种空间分析方法解决实际地学问题, 既是理论的提升, 也是学生能力的拓展实验。三种类型的实验有一定的相关关系及递进关系, 由浅及深, 在教学过程中可配合展开。

1 实验一 DEM 数据采集

实验目的：了解基于不同数据源的 DEM 数据采集过程

实验要求：练习基于等高线的数据采集方法，掌握地图预处理、地图数字化及后处理的相关方法

实验数据：1:1 万地形图（局部）

1.1 基础实验：基于等高线的数据采集

等高线是地形图的基本要素之一，地形图主要通过等高线来表达地物高度和地形起伏。已有地形图数据由于覆盖范围广、比例尺系列齐全、获取较为经济等而成为各种尺度 DEM 建立的主要数据源。

由地形图到等高线的第一个步骤即是地形图的数字化。在数字化之前必须设计好数字化所采用的技术路线，它不仅直接关系到地图数字化的效率，而且也关系到数字化成果的质量。确定数字化的技术路线包括采取何种方式进行数字化，数字化精度要求如何，选取什么样的地图作为数字化底图，对哪些要素进行数字化，如何对数字化要素进行分层和分幅，以及代码的设计等。

本实验采用的数字化软件包括 Photoshop、GeoScan、ArcGIS 和 ArcInfo；数字化底图为一幅 1:1 万地形图的一部分，地形图等高距为 5m。

图幅控制点坐标：图幅控制点坐标是用来进行图幅定向的，它能够确定地图的地理位置和比例大小。本实验的控制点坐标见表 1-1。

表 1-1 图幅控制点坐标表

项目	北坐标	东坐标
左上	3857154	544744
右上	3857154	545108
右下	3856916	545108
左下	3856916	544744

地图的分层与分幅：GIS 是以图层的方式管理地图的，将点、线、面等地理实体按其性质的不同分别归入不同的图层进行分层管理是 GIS 管理空间数据的基本方式。本实验的分层及代码见表 1-2。

表 1-2 地理要素分层及代码表

项目	层名	包括的要素	代码
等高线层	terlk	计曲线	201
		首曲线	202
		高程点	103
线状水系层	wtlpt	线状表示的河流	301
面状水系层	wtlnt	面状表示的河流（封闭）	302
		湖泊（封闭）	303

具体实验步骤如下。

1. 地图预处理

1) 变形纠正

纸质地图常常会有少许变形；扫描过程中由于图形倾斜，造成扫描后的地图产生变形，因此在数字化前，需要对地图进行纠正。如果存在几何变形，可利用 ERDAS 的几何校正模块进行纠正；如果是扫描过程造成的图像倾斜，则可在 Photoshop 下进行纠正。首先，利用【标尺】沿着图幅边缘画一条横线（图 1-1），然后选择【图像】菜单中的【旋转画布】下的【任意角度】，在弹出的对话框中会自动计算要旋转的角度，点击【好】完成图像校正（图 1-2）。

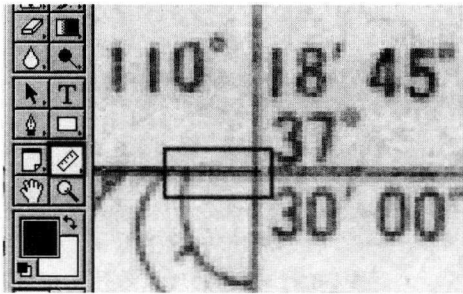


图 1-1 标尺的运用

2) 二值化

不少数字化软件接受的数据为二值化的数据，因为二值化后的数据量减小很多，在很大程度上提高了图形的显示跟踪速度。二值化处理也是在 Photoshop 下处理。选择【图像】菜单中的【调整】下的【阈值】，移动小三角直到图像满意为止（图 1-3）。处理完后将图像保存为 TIF 格式。



图 1-2 画布旋转示意图



图 1-3 二值化处理示意图

2. 数字化采集

(1) 打开 GeoScan, 调入地图, 在【调图】中选择【调入栅格图像】, 在弹出的对话框的【文件类型】中选择 TIF, 找到存放地图的位置, 将图打开。选择【实用工具】中的【图像反色】。

(2) 地图定向: 在【地图】中选择【图形定向】, 在弹出的对话框中选择【齐次方程定向(至少四点)], 点击【OK】。将鼠标移至左上方点在角点上,

在弹出的放大图上精确定位，并输入坐标，点击【接受量测】。其他控制点按顺时针方向以此类推，并回到第一个点，把第一个点再做一遍，之后，选择【结束量测】（图 1-4）。

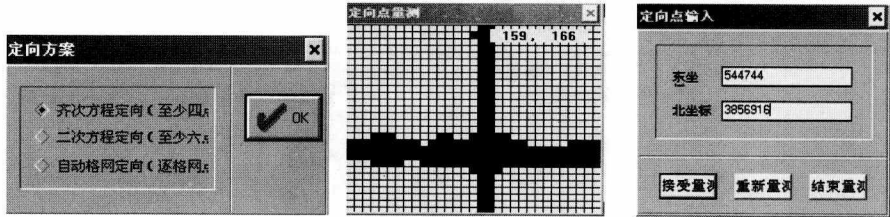


图 1-4 图幅定向操作

(3) 创建图层：在【设置】中选择【图层控制】，在这里分别创建表 1-2 所示的图层，并以不同的颜色区分开来，先设置等高线层 terlk 为当前图层（图 1-5）。

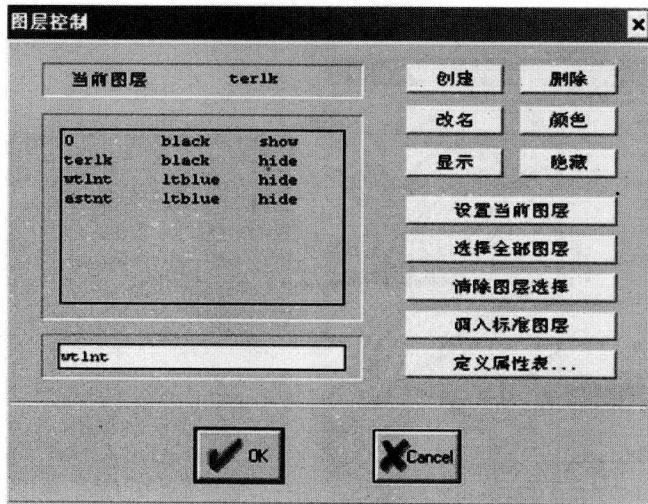




图 1-5 GeoScan 中创建图层

(4) 数字化跟踪：选择 GeoScan 的数字化工具，其中按钮  有半自动跟踪功能，选择 1 表示自动跟踪，选择 3 表示手动跟踪。

(5) 属性赋值：赋值按钮  有查询属性和赋值的双向功能。点击要赋值的对象，在弹出的对话框中，输入高程值和代码（图 1-6）。

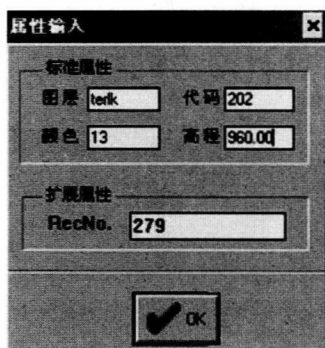


图 1-6 属性录入

(6) 成果输出：数字化完成之后首先要存盘，选择【调图】中的【保存矢量图形】。然后将成果输出，选择【调图】中的【输出外部格式】，并选择【输出到 AutoCAD】，在弹出的对话框中，选择默认值（图 1-7）。这时，在文件目录中会多一个与地图名称一样的 dxf 文件。

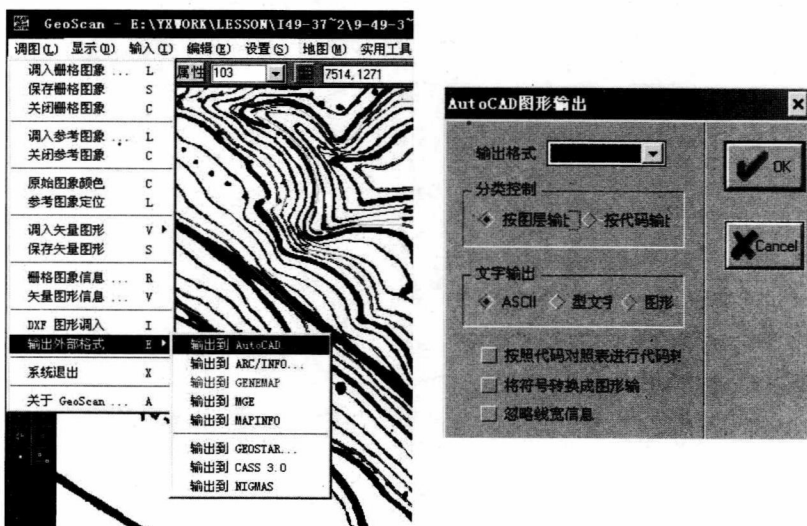


图 1-7 数据转出

3. 数据后处理

数字化完的数据都不可避免地存在着错误或误差，属性数据在输入时，也难免会存在错误，因此对图形数据和属性数据进行检查、编辑和处理，是保证数据

正确可用的必要条件。本实验的数据处理在 ArcInfo 中进行。

下面以等高线层为例，将主要步骤罗列如下，其他层的处理类似。

首先将 dxf 文件转入 ArcInfo 中，形成 coverage 文件。打开 ArcInfo，首先进入工作空间，然后进行文件转换。命令如下：

```
Arc: w E: \gis\zhm          “进入工作空间”
Arc: dxfarcl.dxf terlk      “dxf 转 coverage, 1.dxf 为 dxf 文件名,
terlk 为等高线的层名”
Enter layer names and options (type END or $REST when done)
Enter the 1st layer and options : terlk all    “将等高线层中的所有内容都
包括进来”
Enter the 2nd layer and options : end
Do you wish to use the above layers and options (Y/N)? y
Processing E: \GIS\ZHXM\1.DXF ...
Externalling BND and TIC...
    452 Arcs written.
    288 Labels written.
    0 Annotations written.
    0 Annotation levels.
Arc: build terlk line      “创建线的拓扑关系”
Building lines...
Arc: build terlk point    “创建点的拓扑关系”
Building points...
Arc: joinitem terlk.pat terlk.xcode terlk.pat terlk-id terlk-id “将原始文
件中记录点属性的字段与 ArcInfo 中记录点属性的 PAT 表连接”
Joining terlk.pat and terlk.xcode to create terlk.pat
Arc: joinitem terlk.aat terlk.acode terlk.aat terlk-id terlk-id “将原始文
件中记录线属性的字段与 ArcInfo 中记录线属性的 AAT 表连接”
Joining terlk.aat and terlk.acode to create terlk.aat
Arc: additem terlk.pat terlk.pat elev 8 8 n 2 “给 PAT 表增加高程字段
(elev), 并定义字段长度和类型”
Adding elev to terlk.pat to produce terlk.pat
Arc: additem terlk.pat terlk.pat code 3 3 I “给 PAT 表增加代码字段
(code), 并定义字段长度和类型”
Adding code to terlk.pat to produce terlk.pat
Arc: additem terlk.aat terlk.aat elev 8 8 n 2 “给 AAT 表增加高程字段
```

(elev), 并定义字段长度和类型”

Adding elev to terlk. aat to produce terlk. aat

Arc: additem terlk. aat terlk. aat code 3 3 I “给 AAT 表增加代码字段 (code), 并定义字段长度和类型”

Adding code to terlk. aat to produce terlk. aat

Arc: tables “进入表模块”

Copyright (C) 1982~2000 Environmental Systems Research Institute, Inc.
All rights reserved.

TABLES Version 8.0.2 (Tue Feb 22 08: 01: 14 PST 2000)

Tables: sel terlk. pat “选择 terlk 层的点表”

288 Records Selected.

Tables: calculate elev = dxf-elevation “将 dxf-elevation 字段中的高程值赋给 elev 字段”

Tables: calculate code = dxf-thickness “将 dxf-thickness 字段中的代码值赋给 code 字段”

Tables: sel terlk. aat “选择 terlk 层的线表”

452 Records Selected.

Tables: calculate elev = dxf-elevation “同上”

Tables: calculate code = dxf-thickness “同上”

Tables: q “退出表模块”

Leaving TABLES...

Arc: dropitem terlk. pat terlk. pat dxf-layer dxf-color dxf-thickness dxf-type “删除 terlk 层 PAT 表中的多余字段, 如 dxf-layer, dxf-color, dxf-thickness, dxf-type 等”

Dropping items from terlk. pat to create terlk. pat

Arc: dropitem terlk. pat terlk. pat dxf-elevation dxf-handle dxf-angle dxf-size “同上”

Dropping items from terlk. pat to create terlk. pat

Arc: dropitem terlk. pat terlk. pat dxf-text dxf-attrib dxf-iid “同上”

Dropping items from terlk. pat to create terlk. pat

Arc: dropitem terlk. aat terlk. aat dxf-layer dxf-color dxf-thickness dxf-type “删除 terlk 层 AAT 表中的多余字段, 如 dxf-layer, dxf-color, dxf-thickness, dxf-type 等”

Dropping items from terlk. aat to create terlk. aat

Arc: dropitem terlk. aat terlk. aat dxf-elevation dxf-handle dxf-curve “同上”

Dropping items from terlk. aat to create terlk. aat

Arc: build terlk line

Building lines...

Arc: build terlk point

Building points...

此时，可以显示一下 terlk 层的点表和线表，看一看表的结构和内容及拓扑关系。

Arc: list terlk.pat “显示点表 (PAT) 的信息” (图 1-8)

```
Arc: list terlk.pat
```

Record	AREA	PERIMETER	TERLKH	TERLK-ID	ELEU	CODE
1	0.00000	0.00000	1	1	1093.30	0
2	0.00000	0.00000	2	2	1089.20	0
3	0.00000	0.00000	3	3	1091.10	0
4	0.00000	0.00000	4	4	1093.00	0
5	0.00000	0.00000	5	5	1092.80	0
6	0.00000	0.00000	6	6	1096.30	0
7	0.00000	0.00000	7	7	1097.10	0
8	0.00000	0.00000	8	8	1095.20	0

图 1-8 ArcInfo 中属性表的显示

Arc: list terlk.aat “显示线表 (AAT) 的信息” (图 1-9)

```
Arc: list terlk.aat
```

1						
FNODE#	=	0				
TNODE#	=	0				
LPOLY#	=	0				
RPOLY#	=	0				
LENGTH	=		110.81945			
TERLKH	=	1				
TERLK-ID	=	1				
ELEU	=	1093.00				
CODE	=	201				
2						
FNODE#	=	0				
TNODE#	=	0				
LPOLY#	=	0				
RPOLY#	=	0				
LENGTH	=		1093.95642			
TERLKH	=	2				
TERLK-ID	=	2				
ELEU	=	1095.00				
CODE	=	201				

图 1-9 ArcInfo 中属性表的显示

可以看到线表中有 LPOLY # (左多边形)、RPOLY # (右多边形)、FNODE # (起始节点)、TNODE # (终节点) 等字段, 说明已经建立了拓扑关系。在这里, 由于等高线是互不相交的线, 所以它们的值都等于 0。

消除悬挂:

Arc: ae “打开 Arcedit 模块”

Copyright (C) 1982-2000 Environmental Systems Research Institute, Inc.