

# 矿山开采沉陷研究中矿山3维可视化的实现

张照杰<sup>1</sup>, 梁增伟<sup>1</sup>, 陈庆运<sup>2</sup>, 李娜<sup>3</sup>

(1. 山东正元地理信息工程有限责任公司 测绘分公司, 山东 济南 250101;

2. 首都钢铁集团 首钢矿业公司地质研究所, 河北 迁安 064404; 3. 安徽理工大学 地球与环境学院, 安徽 淮南 232001)

**摘要:**以顾桥1117(1)首采面为例,从CAD图形中提取开采前的地面高程点、等高线图层数据,并对其他图层地物进行分类,提取相应的各类地物数据,然后结合顾桥矿地质采矿条件,通过概率积分法生成预计地表沉陷区数据,和开采前地表高程数据融合,建立受采煤影响的矿区DEM,通过对地物模型建模,运用分层着色模式,获得矿区开采3维可视化图形。从而直观显示由于地下采煤引发的地表沉陷情况,以进行较为深入的分析。

**关键词:**开采沉陷;概率积分;数据叠加;可视化

中图分类号:TD17;P208

文献标识码:B

文章编号:1672-5867(2010)02-0140-04

## Implementation of 3D Visualization in Mining Subsidence

ZHANG Zhao-jie<sup>1</sup>, LIANG Zeng-wei<sup>1</sup>, CHEN Qing-yun<sup>2</sup>, LI Na<sup>3</sup>

(1. Surveying and Mapping Branch, Shandong Zhengyuan Geographic Information Engineering Co., Ltd, Jinan 250101, China; 2. Shougang Institute of Geology, Capital Iron and Steel Group, Qian'an 064404, China;

3. School of Earth and Environment, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China)

**Abstract:** Taking the NO. 1117(1) first face in Guqiao mine as example, this paper extracted elevation points and contour lines data from the CAD graphic of pre-mining ground, and classified other layers, some kinds of features also be extracted. Then combining with Guqiao geological mining conditions, it established DEM of affected coal mining by the way of using probability-integral method to generate surface subsidence data, and fusion the data with elevation points. It obtained the 3D visualization graphics of mining area by the way of establishing feature model and hierarchy coloured model, and displayed the surface status caused by underground coal mining subsidence to conduct a more depth analysis.

**Key words:** mining subsidence; probability-integral; data overlay; visualization

## 0 引言

目前,有许多学者正在研究将GIS应用到矿业工程中,但应用到开采沉陷理论的研究较少,还没有形成系统、成熟的理论。但是从某种意义上,地理信息系统为开采沉陷提供一种认识和理解地理信息的新方式。对于矿山开采3维可视化,还没有比较成熟的软件。由于缺乏成熟的3维GIS软件,现阶段通常是2维GIS与一个3维的模型、分析工具箱集成满足一些特定的应用。由于2维GIS中缺乏3维实体操作以及处理3维几何和拓扑的能力,因此无法完整地描述3维地理现象,也无法实现空间查询和空间分析。本文结合GIS应用,介绍开采沉陷数据的提取,分析矿山开采沉陷实测数据和预测数据,建立地面高程模型,并通过地对地物模型建模,运用分层着色模式,获得矿区开采3维可视化图形,完成矿山的3维可视

化显示,并由此实现直观地分析地表沉陷的功能。

## 1 DEM数据的获取

在矿区DWG格式地形图中,高程信息主要通过高程点和等高线来表达,而且,在一般的DWG格式地形图中,点、线、面等地物分层存储,不同的地物类型也是分层存储,这为我们提取高程数据提供了方便。

### 1.1 高程点的提取

在一般的基于AutoCAD地形图中,高程点展绘时高程点和高程注记是两个独立的实体,而高程注记的移位必须在与之对应的高程点周边的一定范围内进行,所以要进行高程注记的自动移位必须进行高程点与高程注记匹配工作。在AutoCAD的地形图中高程点一般用块进行表示,而高程注记属于文字,所以可以将高程注记作为块的属性来进行表示。高程注记从属于高程点,高程点为

收稿日期:2009-05-30

作者简介:张照杰(1980-),男,山东聊城人,助理工程师,硕士,2007年毕业于山东科技大学大地测量学与测量工程专业,主要从事卫星定位与导航技术研究与应用。

主实体,高程注记为次实体,高程点与高程注记为一个实体,这样就可以实现高程点与高程注记的一体化了。

高程点提取的主要思路<sup>[1-2]</sup>:

- 1) 首先打开 DWG 文件,建立选择集,在高程点图层中过滤出高程点;
- 2) 读取高程点 3 维坐标,判断其是否具有高程属性;
- 3) 如果高程点的高程值非 0,则直接将点坐标提取并存储;
- 4) 如高程点高程值为 0,需要进行高程点与高程注记的匹配、存储。

为了提取高程点数据,首先创建一个选择集“dian”,而后设置选择集过滤的两个参数,第一个参数指定过滤器的类型,第二个参数指定过滤的条件。设置参数选择范围为整个图形,即选择图中所有满足条件的对象。然后,读取选择集中每个高程点,将每个高程点对象的 3 维坐标分别提取出来。

如果提取的高程点的  $z$  坐标不为 0,则可将此提取的坐标直接存储。如果提取的高程点  $z$  坐标为 0,说明高程点的高程是通过高程注记的形式表现出来的,需要将高程点与高程注记进行匹配。

先构造另一个注记选择集,通过设置选择集参数在图中过滤出高程注记,并读取每个注记的平面坐标以及注记内容(高程点的高程值),然后以某一高程点为中心,求出待匹配高程点与每个注记的距离,记录最小距离高程注记及其注记内容。而后判断待匹配高程点与此高程注记的距离,如果距离小于 2 m,此注记所标定的高程即为待匹配高程点的高程(对于 1:10 000 地形图,高程点与相对应的注记的距离一般不会超过 40 mm),否则,高程点与注记的距离大于 2 m,就可认为此点并非高程点而不予提取。

## 1.2 等高线的提取

用计算机生成等值线(等高线)其实就是利用已知数据通过插值得出我们关心的属性值的位置,然后把它们变成图。所以由已知推出未知是等值线生成的一项任务。

在等值线分析中,一般我们这样描述那些已知的数据点: $p(x, y, value)$ ,其中  $x$  为点的  $x$  坐标值, $y$  为点的  $y$  坐标值, $value$  为这一点上的属性值。

等值线生成程序的理论基础是计算机图形学的空间插值理论,其基本假设是:空间位置上越靠近的点,越有可能具有相似的特征值;而距离越远的点,其特征值相似的可能性越小,并认为这些特征值的空间变化是平滑的,且服从某种分布概率和统计稳定性关系。

对于不同的应用,这种分布概率和统计上的稳定性关系是不同的,因此相应等值线生成算法也各不相同。一般来说,原始数据在采集时的采样频率要满足采样定理,即相邻采样点之间的属性值在空间上服从均匀分布,所以通用的等值线生成程序中等值点的判断是基于线性插值原理。

对于二元函数  $z=f(x, y)$ ,若给定函数值  $z=value$ ,则其图像是一条平滑曲线。此曲线上所有的点具有相同的

列坐标值,这样的曲线称为等值线。改变二值可以得到许多等值线沿二方向正投影到一个与  $xoy$  而平行的平面上,则可得到一幅等值线图。

在已有的 CAD 地形图中等高线已经存在于同一个图层之中,通过打开该图层,运用人工方式,通过检查和操作,删除不相关的信息,保存为后缀名为 DXF 格式文件。

高程点和等高线(等值线)数据提取的目的:为了建立高精度的 DEM,就要求尽可能地收集含有高程的数据,通过对于高程点和等高线的收集,可以获得建立 DEM 的大量数据。当地形图之中某部分缺失高程点或者等高线时,可以通过另外一个进行补充,并且高程点和等高线密集能够真实反映该区域的地面起伏情况。

## 1.3 剔除数据中的粗差

地形图获取的过程中,由于人员、设备等原因,从 DWG 格式地形图中提取的数据可能带有粗差,而粗差的存在会给我们生成的首采工作面 DEM 的质量产生影响,因此应将其剔除。现在,常用的剔除粗差的方法有很多,例如:

- 1) 人机交互方式;
- 2) 反距离加权法;
- 3) 基于线性回归的方法;
- 4) 基于点方式剔除粗差的方法;
- 5) 基于坡度信息剔除粗差的方法;
- 6) 基于 3 维可视化剔除粗差的方法等。

由于 DWG 格式地形图中的高程数据在成图时已经经过严格的质量检核,高程数据中含有的粗差较少,且数据在提取过程中精度不会损失,因此,在剔除数据的粗差时,本文采用 3 维可视化的人机交互方式剔除数据粗差<sup>[5]</sup>。

人机交互方式,就是将已经生成好的高程数据文件,通过 3 维可视化软件,例如:ArcGIS Desktop 中的 ARCS-cene 软件,通过 3D 分析工具生成 3 维可视化图形,通过人工的方式将其高程异常点寻找出来,将可疑剔除,从而获得高精度数据。

## 1.4 其他地物类型的提取

由于矿区地形图经过多次的添加和修改,其中各个地物图层中的类别格式不一定完全准确,例如,房屋图层中的格式文件应当为面文件,但是从其中发现有部分是线文件,为此,必须修改其不正确的格式,使其转换成对应面文件。还有部分线文件由于其中间不连续,因此,也要通过手工方式进行修改,使其变成连续的线。

通过以上操作以后,获得对应的单独的高程点数据、房屋数据、河流数据、道路数据等,这些数据我们将分别单独保存为后缀名为 DXF 格式的文件。

## 2 TIN 的建立

### 2.1 沉陷区地面高程处理

通过从地形图中转换而来的数据,含有坐标信息、高

程信息等。能够真实地反映地面的情况,但是通过使用概率积分法生成的数据文件,内容为坐标文件和下沉量,只能反映出地面的下沉情况。

地面高程模型和预计模型结合以后,可以清晰地显示塌陷区的情况,在图中看出有规则数据生成的图形和原始地形生成的图形结合区域,高程变化快,形成一个陡峭的地形,这是因为原始地表数据生成的 TIN 反映出真实的地表情况,但是从概率积分法生成的数据中可以看出该区域的预计下沉量是 0 mm,不能反映出该区域的真实高程情况,这种方法明显有错误,所以要把预计的下沉值修改成对应的真实高程值。将通过重新建立预计模型,使其格式变成和高程模型一样的真实高程的新的塌陷区的预计模型。为此,就要求进行高程融合,以实现塌陷区域的真实高程。结合 VB 和 ArcEngine 进行二次开发,提取 DEM 数据中的高程点信息。

### 2.2 开采沉降值的转换

开采沉降计算得到的结果是规则格网存储的数据,而原始地形数据一般是根据原始的地形采集到的在空间上没有一定规律的离散点数据。由于数据格式不一样,必须进行离散点数据的转换<sup>[6]</sup>。

考虑到本软件的应用情况,可以对规则格网存储的开采沉降值进行插值,得到在相应原始地形数据点坐标处的开采沉降值,然后,通过对该点两个数据的叠加,最终获得受采煤影响以后的开采沉降区域的 DEM。

### 2.3 插值的实现算法

开采沉降值是在一定矩形区域上  $n \cdot m$  节点  $(x_i, y_j)$  ( $i=0, \dots, n-1; j=0, \dots, m-1$ ) 上的函数值  $z_{ij} = z(x_i, y_j)$ , 可以利用二元三点插值公式计算指定插值点  $(u, v)$  处的函数近似值  $w = z(u, v)$ 。

设给定矩形域上的  $n \cdot m$  个节点在两个方向上的坐标分别为:

$$\begin{aligned} x_0 < x_1 < \dots < x_{n-1} \\ y_0 < y_1 < \dots < y_{m-1} \end{aligned}$$

相应的函数值为:

$$z_{ij} = z(x_i, y_j) \quad (i = 0, 1, \dots, n-1; j = 0, 1, \dots, m-1)$$

选取最靠近插值点  $(u, v)$  的 9 个节点,其两个方向上的坐标分别为:

$$\begin{aligned} x_p < x_{p+1} < x_{p+2} \\ y_q < y_{q+1} < y_{q+2} \end{aligned}$$

然后用二元三点插值公式:

$$z(x, y) = \sum_{i=p}^{p+2} \sum_{j=q}^{q+2} \left( \prod_{\substack{k=p \\ k \neq i}}^{p+2} \frac{x - x_k}{x_i - x_k} \right) \left( \prod_{\substack{l=q \\ l \neq j}}^{q+2} \frac{y - y_l}{y_j - y_l} \right) z_{ij}$$

计算插值点  $(u, v)$  处的函数近似值。

这样生成的数据就把预计的下沉量数值换算成了正常高程值,由此得到我们的地表高程模型数据。得到的高程数据是 Shp 标准格式的,打开这个文件,通过查看其表属性(如图 1 所示),可知在 ZValue 值中生成的就是叠加后的高程数据。从中我们可以看出这就是转变后的真实高程。至此我们就完成了预计高程数据和原始高程数据的叠加。

FID	Shape	ID	pName	ZValue	Descr	OwnerID
144	Point	0.636341	0	23.504622	0	0
145	Point	0.636341	0	23.504211	0	0
146	Point	0.636341	0	23.511763	0	0
147	Point	0.636341	0	23.51491	0	0
148	Point	0.636341	0	23.512306	0	0
149	Point	0.636341	0	23.509902	0	0
150	Point	0.636341	0	23.509229	0	0
151	Point	0.636341	0	23.504696	0	0
152	Point	0.636341	0	23.503142	0	0
153	Point	0.636341	0	23.508872	0	0
154	Point	0.636341	0	23.506296	0	0
155	Point	0.636341	0	23.503122	0	0
156	Point	0.636341	0	23.434707	0	0
157	Point	0.636341	0	23.448211	0	0
158	Point	0.636341	0	23.480394	0	0
159	Point	0.636341	0	23.515299	0	0
160	Point	0.636341	0	23.521842	0	0
161	Point	0.636341	0	23.514936	0	0
162	Point	0.636341	0	23.508321	0	0
163	Point	0.636341	0	23.501326	0	0
164	Point	0.636341	0	23.510641	0	0
165	Point	0.636341	0	23.523859	0	0
166	Point	0.636341	0	23.517077	0	0
167	Point	0.636341	0	23.550295	0	0
168	Point	0.636341	0	23.506162	0	0

图 1 叠加后的沉降区数据

Fig. 1 Subsidence area data after overlaid

## 3 地物模型的建立

### 3.1 建筑物模型的建立

1) 根据建筑物每个角点的坐标从 DEM 获得一个高程值,将该值加上地面高度  $H1$ ,作为该角点的高程,所有角点的高程应大致相近,因此可以通过取平均值或取最小值的方法确定一个值作为该建筑物的基准高程,以保证建筑物模型的顶面处于水平。

2) 由建筑物的楼层数和所设定的楼层高度确定建筑物的高度  $H2$ ,加上基准高程即得到模型顶面的高程  $H3$ 。建筑物模型是采用地形图中提取的建筑物范围和高度生成的多面柱体。

### 3.2 道路模型的建立

道路模型可以用紧贴地表和高出于地表两种方式来建立,视其宽度、等级及有关具体情况来确定。级别低的,如乡村路、小路等,可以让其紧贴地表,而高速公路、国道及其他高等级公路可以让它高出于地表一定的距离,使之尽可能地接近真实情况。由于道路数据已经封闭为多边形,因此可以方便地建立其模型。对于紧贴地表的道路,可以用与后面介绍的绿化地、植被相同的方法建立模型。

已知:道路中心线  $(X1, Y1, X2, Y2, \dots, Xn, Yn)$ 、道路宽度  $W$ ,算法如下:

- 1) 求得道路左、右侧边线 3 维坐标;
- 2) 道路面进行大 3 角面剖分;
- 3) 循环求得左右侧边线与 DEM 的所有交点的 3 维坐标,并将所有交点加入 DEM 中。如 DEM 中有 Right 数据,则逆时针形成多边形,并剖分;如 DEM 中有 Left 数据,则顺时针形成多边形,并剖分;
- 4) DEM 中有数据的剖分,加上道路的简单剖分,即可建立与地形融合在一起的 3 维道路模型。

### 3.3 绿化地、植被、水系模型的建立

大比例尺地图上城区内的绿化地、中小比例尺地图上的植被都具有明确的边界,且都紧贴在地表上。其模型的构造比较简单,首先从 DEM 中获取其平面图形的边

界点 3 维数据,即可建立它们所覆盖范围的曲面的模型。湖泊、水库、水塘等面状水系要素,也都具有明确的边界,并且由于其范围不大、水面近似水平,所以可以通过平面多边形的三角剖分来建立三角网,同时从 DEM 得到其边界高程从而建立其模型。至于线状水系要素,则直接从 DEM 得到线上各点的高程即可进行下一步的图形显示。绿化地、植被、水系的 结构定义与地形三角网相似。

### 3.4 地形可视化的分层着色模式

分层着色就是根据当前点的相对高程指定某种颜色映射机制对三角形顶点进行着色<sup>[6]</sup>。在绘制场景时根据栅格点的高程值进行区间划分,并按区间依次进行着色,其实现原理与利用 DEM 高程值产生相应的纹理图像相同,也可按照该原理进行线性着色以获得效果更好的真彩色地形纹理或灰度纹理。

分层着色时对颜色的选取十分关键,首先要考虑该区域的地质条件、地表状况、水域分布等地理因素,同时也要考虑到 3 维可视化的视觉效果,如运用分层着色模式进行着色时,颜色的光亮度选择应该遵循水在地势较低的地方比在较高的地方暗一些的原理,使其更符合一般的视觉感观。选用的颜色也不宜与相邻区域存在较大的差异,以免造成明显的区域断层现象。在地形高程差很大的区域,可以采取增加分级区间数的办法来确保丰富模型颜色的效果<sup>[7-9]</sup>。

## 4 利用 VB + ArcGIS Engine 完成软件的实现

### 4.1 使用 Visual Basic 6.0 作为开发语言

Visual Basic 6.0 是一种可视化的、面向对象和采用事件驱动方式的结构化高级程序设计语言,可用于开发 Windows 环境下的各类应用程序。它简单、易学、效率高,且功能强大可以与 Windows 专业开发工具 SDK 相媲美。

### 4.2 选择 ArcGIS Engine 进行二次开发

ArcGIS Engine 开发工具包是一个基于组件的软件开发产品,用于建立和部署自定义 GIS 和制图的应用程序。ArcGIS Engine 开发工具包不是一个终端用户产品,而是一个应用程序开发人员的工具包。可以用 ArcGIS Engine 开发工具包建立基本的地图浏览器或综合、动态的 GIS 编辑工具。使用 ArcGIS Engine 开发工具包,开发人员在建立定制的地图接口方面具有前所未有的灵活性。开发人员可以使用几个 API 中的任何一个来建立独一无二的应用程序,或者将 ArcGIS Engine 组件与其他软件组件组合起来实现地图与用户管理信息之间的协同关系<sup>[10]</sup>。

### 4.3 矿山 3 维可视化的实现

应用顾桥煤矿首采工作面建立模型,其原始数据为 CAD 格式文件,通过上面各个章节的处理,再通过利用矿区开采沉降桌面软件生成文件,即可得到该地区的 3 维模型。主要界面及部分功能界面如图 2 所示。

通过导入数据,对地形数据和预计下沉数据进行融合,可以得到矿区开采沉降的 TIN,通过建立地物模型,渲



图 2 软件主界面  
Fig.2 Interface of software

染、着色等最终获得开采沉降区域的可视化成果。图 3 为融合了预计下沉数据的不规则三角形格网,图 4 为加入地物信息的 3 维地形图。

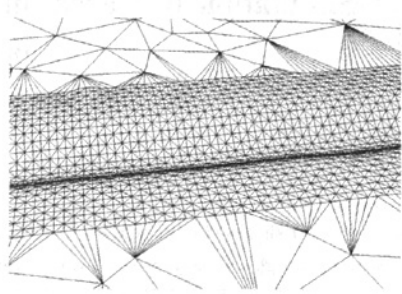


图 3 叠加后的 TIN 结构图  
Fig.3 Structure of TIN after overlaid

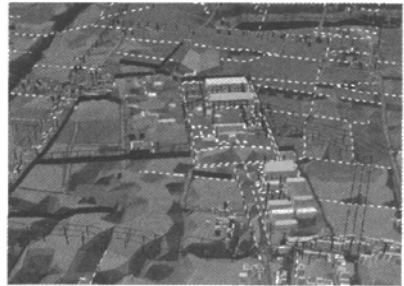


图 4 加入地物信息的 3 维地形图  
Fig.4 Add features to 3D topographic map

从图面上,可以直观地了解地面下沉情况,而且能够完成图上的点击查询和距离丈量等操作。

## 5 结束语

为了满足矿山信息化建设的需要,应加快 3 维可视化技术在矿山沉降分析中应用的理论研究和软件开发,这对于实现矿山开采科学化、管理现代化、生产高效化,都具有重要的意义。本文通过对煤层开采引起的地表沉降区域数据和原始地形数据的融合,建立地物模型,并结合

(下转第 148 页)

数数据则可以降低不适宜人类居住地区的人口分布权重,使模拟结果接近于真实情况。

模拟得到的辽宁人口密度空间分布图表明:辽中地区城市化水平较高,全省人口高密度地区多数位于该地区,局部人口密度超过2 000人/km<sup>2</sup>;辽东半岛地区交通便利、港口众多,经济贸易与旅游业发展速度较快,整体人口密度较高,部分沿海市辖区人口密度超过1 000人/km<sup>2</sup>;辽东地区地势起伏,森林覆盖率较高,全省密度较低地区多数位于该区域内,仅与中部平原接壤的市辖区人口密度较高;辽西地区多为低山丘陵,地表植被覆盖率低、土地相对贫瘠,大部分地区人口密度低于500人/km<sup>2</sup>,仅沿海部分市辖区人口密度相对较高。

本文缺少辽宁省乡镇级的人口统计数据与行政界线数据,未能够对模拟的人口密度空间分布精度进行检验。同时,本文未充分考虑海岸线对人口密度空间分布的影响,模拟得到的沿海城市人口密度空间分布与真实情况可能存在一定偏差,在后续模型改进过程中需进一步完善。

### 参考文献:

- [1] 卓莉,陈晋,史培军,等.基于夜间灯光数据的中国人口密度模拟[J].地理学报,2005,(60):266-276.
- [2] 廖顺宝,李泽辉.基于人口分布与土地利用关系的人口数据空间化研究——以西藏自治区为例[J].自然资源学报,2003,18(6):659-665.
- [3] 江东,杨小唤,王乃斌,等.基于RS,GIS的人口空间分布研究[J].地球科学进展,2002,17(5):734-738.
- [4] 冯健.杭州市人口密度空间分布及其演化的模型研究[J].地理研究,2002,21(5):635-646.
- [5] 王法辉,金凤君,曾光.区域人口密度函数与增长模式:兼论城市吸收范围划分的GIS方法[J].地理研究,2004,23(1):97-103.
- [6] 杨小唤,刘业森,江东,等.一种改进人口数据空间化的方法:农村居住地重分类[J].地理科学进展,2006,25(3):62-69.
- [7] 尹京苑,张桂芳,单新建.基于TM影像的人口密度数字模拟——以北京地区为例[J].灾害学,2007,22(1):31-35.
- [8] 董春,刘纪平,赵荣,等.地理因子与空间人口分布的相关性研究[J].遥感信息,2002,(4):61-64.
- [9] 刘纪远,岳天祥,王英安,等.中国人口密度数字模拟[J].地理学报,2003,58(1):245-256.
- [10] 田永中,陈述彭,岳天祥,等.基于土地利用的中国人口密度模拟[J].地理学报,2004,59(2):283-292.
- [11] 刘燕华.中国适宜人口分布研究——从人口的相对分布看各省市可持续性[J].中国人口、资源与环境,2001,11(1):34-37.
- [12] 宋国宝,李政海,鲍雅静,等.纵向岭谷区人口密度的空间分布规律及其影响因素[J].科学通报,2007,52(增刊):78-85.
- [13] 寿孝鹤,李雄藩,李庶玉.中国省市自治区资料手册[M].北京:社会科学文献出版社,1990.
- [14] 高秀静.辽宁省地图册[M].北京:中国地图出版社,2005.
- [15] 王春菊,汤小华.基于GIS的福建省人口统计数据空间化[J].地理与地理信息科学,2004,20(4):71-74.
- [16] 马桂萍.辽中地区资源型城市的组团效应[J].南阳师范学院学报(社会科学版),2006,5(1):27-29.
- [17] 李靖宇,赵伟.关于加大辽东半岛海洋经济区开发力度的现实论证[J].决策咨询通讯,2008,(1):24-28.
- [18] 姜楠,张正.辽宁省东部山区经济发展战略研究[J].辽宁经济,2005,(2):22-23.
- [19] 张士利,沈威.辽宁省西部地区生态建设状况分析[J].内蒙古林业调查设计,2008,31(2):17-18.

[责任编辑:王丽欣]

### (上接第143页)

生产实际,使用VB 6.0对ArcGIS Engine进行了二次开发,开发出了矿区开采沉陷桌面软件,实现了矿区沉陷的3维可视化。但软件地物模型还存在一些缺陷,不能真实反映建筑物的结构情况,在后续的工作中还需要进一步完善。

### 参考文献:

- [1] 舒飞.中文版AutoCAD 2004二次开发标准教程[M].上海:科学普及出版社,2004.
- [2] 余承飞,方勇.AutoCAD 2000二次开发技术(Object-ARX)[M].北京:人民邮电出版社,1999.
- [3] 陈平萍,王艳华.利用VirtuoZo全数字摄影测量系统自动生成等高线[J].铁路航测,2003,(1):23-25.
- [4] 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].济南:山东科技大学,2004.
- [5] 夏建云,邸元.基于散点及边建立数字地面模型的研究及实现[J].贵州工业大学学报,1999,28(4):17-21.
- [6] 徐青.地形3维可视化技术[M].北京:测绘出版社,2000.
- [7] 赫向阳.3维地理信息系统有关技术的研究与实现[D].郑州:信息工程大学,2002.
- [8] JH Lau,SH Pan,C Xa.3D large deformation and nonlinear stress analyses of TIN whisker initiation and growth on lead-free components[J].Electronic Components and Technology Conference,2003,(5):27-30.
- [9] 王继周,李成名,林宗坚.3维GIS的基本问题与研究进展[J].计算机工程与应用,2003,(24):56-57.
- [10] Euan Cameron等.ArcGIS Engine开发指南[G].ESRI中国(北京)有限公司译.北京:ESRI中国(北京)有限公司,2004.

[编辑:宋丽茹]