

基于 Delaunay 构网的地层 2D, 2.5D 建模

朱合华^{1, 2}, 吴江斌³

(1. 同济大学 地下建筑与工程系, 上海 200092; 2. 安徽理工大学, 安徽 淮南 232001;
3. 华东建筑设计研究院有限公司, 上海 200002)

摘要: 将地质勘探中的钻孔数据抽象为离散点源信息, 设计了离散点的二分拓扑数据结构; 在此基础上, 提出了用三角形表示地层的 2D 竖直剖面模型与 2.5D 叠层 TIN 模型, 并采用 Delaunay 算法构建模型, 同时对断层、尖灭等突变信息的处理也作了初步探讨; 最后对一些典型地层进行了重构。该模型具有三角网, 便于数据存储、处理与可视化等固有优点, 其建模方法也体现了充分利用计算机、适于海量数据的特点。

关键词: 数值分析; Delaunay 三角化; 地层; 建模

中图分类号: O 241

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2005)22 - 4073 - 07

2D AND 2.5D MODELING OF STRATA BASED ON DELAUNAY TRIANGULATION

ZHU He-hua^{1, 2}, WU Jiang-bin³

(1. *Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;*
2. *Anhui University of Technology, Huainan 232001, China;* 3. *East China Architecture Design and Researching Institute Co., Ltd., Shanghai 200002, China*)

Abstract: Geological borehole is the main information for engineers to know the distribution of soil strata. In this paper, geological boreholes are abstracted as scattered point data. Each point is the demarcation point between two different strata and a topologic dimidiated data structure is designed for it. Then, the 2D section model of strata was brought out. The model represents the distribution of soil in different depths and each stratum is reconstructed by a series of triangles. In order to represent the horizontal variation of a strata, the 2.5D multi-TIN(triangulated irregular network) model is brought out. The interface between two different soils is also represented by a series of triangles in the 2.5D model. The 2D and 2.5D models were constructed by Delaunay triangulation based on the scattered point data abstracted from boreholes. Then the paper explained the modeling details and method of dealing broken mutation such as fault, dwindles and lens. At last, some assumed classical strata are constructed with the proposed method. The model is convenient for storing, analyzing, visualization and realization by computer. The conventional strata model obtained by corresponding reconstruction algorithms is almost not the final model for visualization. This modeling method based on triangulation can construct the visualization model of strata simultaneously when the reconstructed strata model is accomplished. So it unified the entity strata model and visualization model, which simplifies algorithms and data structure.

Key words: numerical analysis; Delaunay triangulation; strata; modeling

收稿日期: 2004 - 06 - 01; **修回日期:** 2004 - 12 - 23

基金项目: 教育部第四届高等学校青年教师奖励计划项目; 上海市岩土工程重点学科资助项目

作者简介: 朱合华(1962 -), 男, 博士, 1983年毕业于重庆大学采矿工程系化学矿开采专业, 现为教授、博士生导师, 主要从事隧道及地下工程设计理论、岩土力学数值分析方法、数字地下空间与数字化工程等方面的教学与研究工作。E-mail: zhuhehua@tongji.edu.cn.

1 引言

地层剖面图是反映不同竖直平面上地层分布的传统方法。一般的做法是由工程地质人员利用剖面上各钻孔上的地层分布数据绘制地层分布线，在分布线的基础上确定各地层的分布区域，而后利用不同的颜色或图元对不同的地层区域进行填充而得到二维地层图^[1, 2]。长期以来地层剖面图的绘制几乎完全经过工程人员的手工绘制，在此过程中要经过数据计算、转换与成图等处理。手工绘制不仅繁琐，而且不利于图形的复制、修改与保存。

广大科技与工程人员都在寻求地质剖面的计算机建模，目前主要有 3 种处理办法：(1) 利用计算机辅助设计软件(如 CAD, Mico Station, Surfer)等工具进行绘图^[3, 4]，这是最常用的办法，但自动化程度低，只解决了绘图电脑化的问题。(2) 开发地质剖面绘制的相关软件，可以实现数据库管理，为数据的录入、计算与共享提供了方便，在剖面图的绘制过程中能体现一定的自动化。但这样的软件开放性与灵活性较小，且分析功能比较弱^[5~7]。(3) 基于地理信息系统实现地质剖面的绘制^[8]。地理信息系统的开放性与强大的数据管理与分析、人机交互操作、图形可视化与分析功能在地层剖面的建模上显示强大的优势。过去，在利用计算机建立剖面模型上所做的工作主要在图形绘制与可视化上^[9]，目前人们已注意开发剖面模型的自动建立功能，如自动寻找地层界线、地层界线的曲线拟合^[10]和地层区域的自动寻找^[11]。应该认识到地质剖面模型的建立与工程地质人员的专业知识水平和工程经验有很大关系，让计算机完全代替是不太现实的。可喜的是人们正在寻求充分利用计算机的各种地质剖面图的绘制方法^[12, 13]及地质断层、褶皱等复杂地质构造的数学处理^[14, 15]。因此，发展既充分利用计算机、减少人员工作量，又反映地质工程师认知的建模方法是当前发展的趋势^[16]，但其相关研究较少，而且二维地质剖面的计算机建模主要通过一些插值算法结合基本地质认识实现各地层分界线的建立，而后采用格栅、三角形或多边形面实现各地层的可视化，其实质是基于边界线建模的可视化表达。本文通过一些数据与基本地质特征的抽象结合构模算法实现构模与可视化的一体化。2.5D 建模主要应用于地形表面模型的建立，本文将其扩展应用到地层的 2.5D 建模，且本文提出的 2D 与 2.5D 建模数据与方法具有

系统性与通用性，便于相关软件的集成开发。

2 钻孔点源信息的二分拓扑数据结构

鉴于土层建模所用的信息都来自于钻孔，作者将每一个钻孔柱状图离散为一系列点，每一个点即是 2 种不同土层的分界点。根据土层的成层性，可采用上、下土层属性来描述离散点的这种二分拓扑属性(见图 1)。

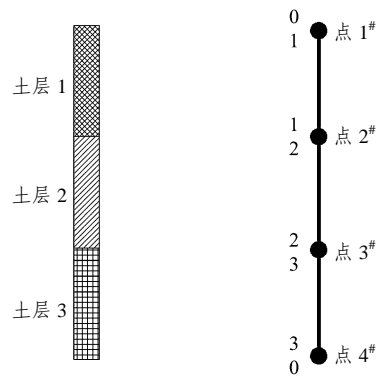


图 1 钻孔点源信息的二分拓扑结构示意图

Fig.1 Topologic dimidiate data structure of scattered point on boreholes

离散点的数据结构如下：

Struct Point

```
{double m_x;           //x 坐标
double m_y;           //y 坐标
double m_z;           //z 坐标
int m_upsoilID;       //上土层号
int m_dsoilID;        //下土层号}
```

根据图 1 所示的钻孔柱状图，离散后得到的点源信息可见表 1。

表 1 钻孔离散后得到的点源信息

Table 1 Scattered point information abstracted form boreholes

点号	坐标/m			土层号	
	x	y	z	上	下
1#	0.0	0.0	10.0	0	1
2#	0.0	0.0	8.0	1	2
3#	0.0	0.0	6.0	2	3
4#	0.0	0.0	4.0	3	0

3 地层 2D 建模

3.1 基于约束 Delaunay 三角剖分的竖直剖面地层模型的提出

Delaunay 三角剖分已广泛应用于 GIS 中的 TIN 建立, 也有学者采用约束 Delaunay 三角剖分来处理地形中的背坡与峡谷等特征地理空间。竖直剖面地层模型的建立也借用了这样的思想。

地层 2D 竖直剖面模型就是对剖面上钻孔离散点源信息采用 Delaunay 算法将所构建的地层剖分成一系列三角形片面, 每一种地层都由一组三角形片面构成, 三角形表示的地层既不相互嵌入也不相互重叠(见图 2)。

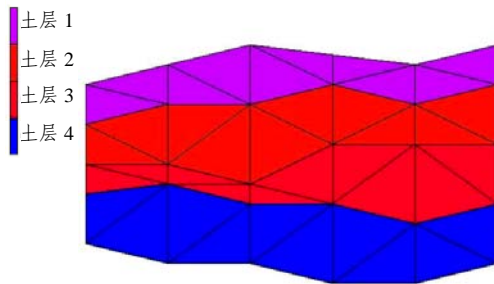


图 2 地层 2D 竖直剖面模型示意

Fig.2 2D triangulated section model of strata

基于约束 Delaunay 三角剖分的竖直剖面地层模型的特点是: (1) 充分发挥计算机的数据处理、构图的能力, 对于相对简单的地层基本无需人工处理便可直接建立地层竖直剖面模型; (2) 灵活的人机交互操作, 充分体现工程师的知识与经验从而完成对复杂地质剖面图的建立; (3) 每一块地层都由一系列的三角形来表示, 便于地层的矢量表示与拓扑关系的表达, 也有利于地层可视化及相关的空间分析。

3.2 地层 2D 竖直剖面模型的建立

3.2.1 建模方法

地层 2D 竖直剖面模型的建立过程如下:

- (1) 从数据库中提取该剖面相关的钻孔信息, 并抽象得到离散点源信息;
- (2) 由一些简单规则生成特征线, 如断层线、地层界面线(对于简单地层这一步可以省略);
- (3) 地质工程师根据经验对特征线进行更改(这一步只在很复杂的地层构模中才会用到);

- (4) 对剖面区域进行约束 Delaunay 三角剖分;
- (5) 根据三角形上 3 个点的拓扑属性判断每个三角形所属的地层, 并用不同的颜色、纹理或填充图元对不同地层进行填充表示;
- (6) 其他诸如图例、符号、注记、框表的布置与表示。

其中约束 Delaunay 三角剖分算法与三角形属性判断是基础; 复杂地层特征线处理是难点, 直接影响到复杂地层建模的合理性。

3.2.2 土体属性判定准则

在对钻孔离散点三角构网后, 便要确定某一三角形所表示的土层。三角形由 3 个顶点构成, 前面描述了离散点的二分土层拓扑信息, 接下来就是要通过三角形 3 个顶点的土层拓扑信息的权重来确定三角形的土层属性, 这便是一个概率问题。如图 3 所示三角形土体的属性为 2。

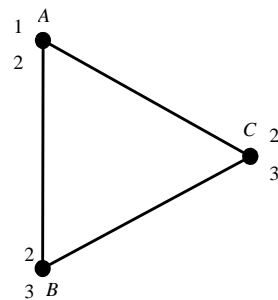


图 3 三角形所属土层属性判断

Fig.3 Judgement of stratum attribute of triangle

3.2.3 复杂地层中特征线的处理

如果将钻孔点直接进行 Delaunay 构网, 则在地质变化大时势必会出现各地层的不协调现象(见图 4)。因此, 对于复杂地层可以先确定地层界线、断层线, 然后将这些线作为特征线来完成约束 Delaunay 三角剖分。有学者采用层扩展处理的方法来确定地层分界线, 具体做法是: 根据地层的上下关系进行层扩展处理, 以横向搜索追踪的方式, 如遇到地层尖灭时停止地层的追踪, 再根据相邻钻孔

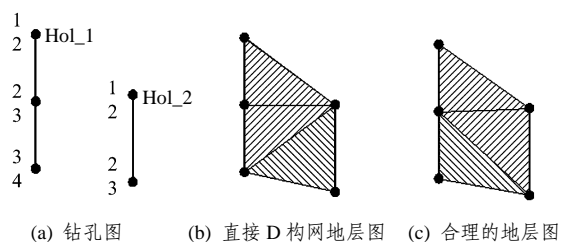


图 4 Delaunay 构网引起的不协调地层

Fig.4 Unmeet strata constructed by Delaunay triangulation

的地层情况继续新的追踪。本文则先根据离散点信息由程序按逐层对每层的界面点进行横向搜索，确定地层线与断层线，当地层线与断层线相遇时自动切断地层线。本文应用整体平移法^[15]的思想来构建断层影响下的特征线。

3.3 典型地层 2D 建模实例

本文 2D 建模中的钻孔信息皆为作者自行设定的假想情形，目的在于模拟各种典型地层剖面图(见图 5)。

4 地层 2.5D 建模

4.1 2.5D 叠层 TIN 模型的提出

不规则三角网 TIN(triangulated irregular network) 已在地形表面的 2.5D 模型中得到广泛的应用，对于三维地层来说，传统的 TIN 只描述地表的形态而不能反映地层在竖直向的分布，而竖直剖面模型虽能反映地层在某个剖面上的分布情况，但整个区域地层的竖直分布需由多个剖面来反映，即使用多个剖面也难以描述某一地层在水平向的变化。因而 TIN 与剖面模型都无法对三维地层进行直观和完整的描述。

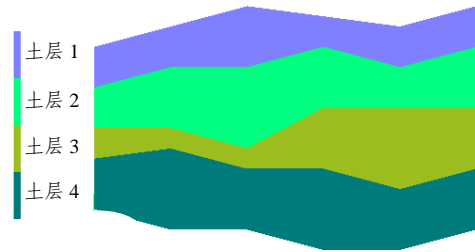
通过三角网来建立基于边界表达的三维地层模型是三维地质建模的一个主要研究方向^[17~19]。这些模型往往通过基于切片级三维建模方法，或采用三角形来表达所建三维地层模型的边界。虽然采用三角形作为三维地层模型的边界表达，但其建立过程相对复杂，需要大量的人工干预，且概念不明确。

在多层 DEM^[20, 21]建模概念及其 TIN 表达的基础上，作者提出了地层叠层 TIN 模型(见图 6)的概念，即对于某区域的三维地层，相应地可以用多层 TIN 来描述不同的地层界面、断层面及其他特征边界的形状。由于叠层 TIN 只对地层之间的分界面进行描述，并没有对地层作真三维的体表达，这里将其称之为地层 2.5D 模型。

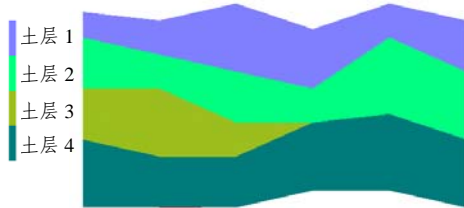
该模型的特点是能直观地反映地层在水平向与竖直向的三维空间上的分布情况，便于可视化。叠层 TIN 数据结构相对简单、储存量小，能反映地层拓扑空间的相邻关系，能方便地进行竖直剖切等空间分析。

4.2 建模方法

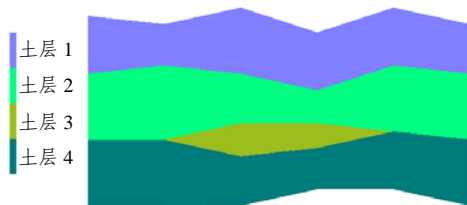
4.2.1 建模步骤



(a) 简单地层 2D 模型



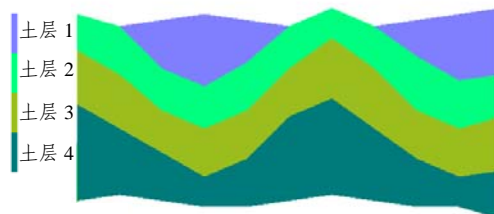
(b) 尖灭地层 2D 模型



(c) 透镜体地层 2D 模型



(d) 断层地层 2D 模型



(e) 褶皱地层 2D 模型

图 5 典型地层 2D 建模

Fig.5 2D section modeling of classical strata

根据钻孔中带有拓扑属性的空间离散点建立地

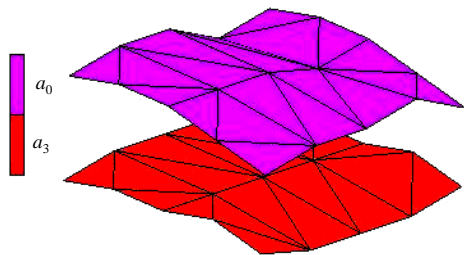


图 6 2.5D 叠层 TIN 模型示意图
Fig.6 2.5D mult-TIN model of strata

层 2.5D 叠层 TIN 模型，其基本步骤如下：

(1) 从数据库中提取钻孔信息，并获取地层界面点信息，按不同的地层界面属性将这些离散点分类；

(2) 根据需要增加每层 TIN 的特征线信息；

(3) 逐一对每一地层界面点构造 TIN；

(4) 地层 TIN 之间相交、地层 TIN 与断层面相交等特征面相交处理；

(5) 地质工程师根据经验对 TIN 进行更改；

(6) TIN 的可视化，采用不同的颜色或纹理表达不同层次上的 TIN；

(7) 其他诸如钻孔图、图例、符号、注记以及框表的布置与表示。

4.2.2 复杂地层特征面的处理

2.5D 模型中用来表示地层界面、断面的 TIN 称之为特征面，这些特征面可用于三维地质模型的构建。2 个特征面相交时可能会出现 2 种情形，即截断型(L 型, T 型)与交叉型(十型)(见图 7)，可以通过指定 2 个相交面的相交特性来实现不同的相交类型。

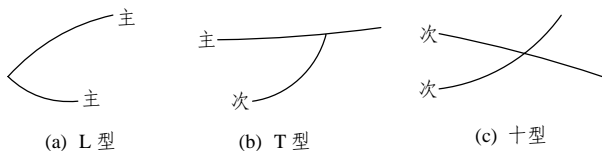


图 7 特征面的 3 种相交类型

Fig.7 Three intersecting types of characteristic surface

特征面的相交处理在计算几何学上就是求解 TIN 与 TIN 相交的问题，根据模型的要求，在求交后，2 个 TIN 面在相交直线处必须满足几何协调与拓扑协调。TIN 与 TIN 相交算法(相交后需满足几何与拓扑协调)可以通过作者提出的三角形自分解的

算法来实现，而且在地层 2.5D 叠层 TIN 模型中对地层与地层、地层与断层的相交处理有很大不同，需分别处理。

(1) 地层界面相交

当地层界面相交时，则可以通过指定地层界面的上述相交关系来实现地层尖灭、透镜体和嵌入等三维复杂地层的建模。

在三维地层建模中，通过指定地层面相交类型来定义地层的分布与走势是充分体现地质工程认知的一个环节，但这同时也增加了使用者的工作量，而且在某些情况下往往无法判断相交类型。为了减少地层相交的人为指定工作及相交计算，作者在地层 TIN 之间相交判断与计算前先对地层 TIN 进行一次预处理。预处理就是将地层 TIN 与钻孔作相交校验。当该 TIN 与钻孔相交且交点不为三角形的顶点时，该相交的三角形则被删除。经过预处理后，原本相交的地层 TIN 之间相交的可能性大大减少，也降低了人为进行相交判断与相交计算等繁琐工作。但预处理只能是定出了地层分布的一个大轮廓，丢失了一些细节上的精度，对于 2.5D 模型来说，预处理的代价使得建立的模型中在可能出现相交的地层 TIN 之间的不连续；对于 3D 模型来说，预处理可能使得地层与地层在相交的细节处与非预处理得到的结果有差别。这里建议在大多数三维地层建模中使用预处理，而对特别复杂情形则采用人工指定相交处理。

(2) 地层界面与断层相交

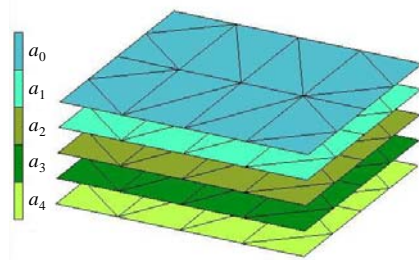
根据地层 2.5D 叠层 TIN 模型中对断层处理的分类，贯穿性断层与局部断层情形下相交处理各不相同。

对于贯穿性断层，先对断层的上、下盘分别构建 TIN，然后对上、下盘的地层 TIN 分别与断层作 T 型相交，即将地层 TIN 延伸到与断层相交。

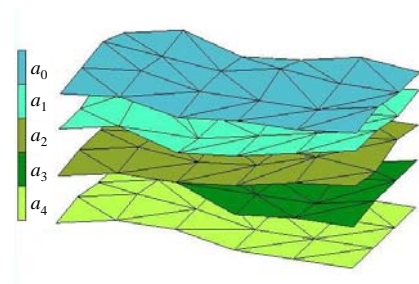
对于局部性断层则可以按 2D 中断层处理的整体法处理，即先求得地层 TIN 与断层 TIN 的交线，然后根据断层的落差与平移得到上盘和下盘地层与断层的交线。

4.3 典型地层 2.5D 建模实例

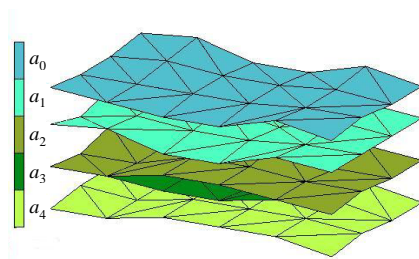
在地层 2.5D 建模中也采用假想的钻孔信息，建模实例中主要考虑了 4 种地层：水平地层、一般地层、尖灭地层和透镜体地层(见图 8)。



(a) 水平地层 2.5D 模型



(b) 尖灭地层 2.5D 模型



(c) 透镜体地层 2.5D 模型

图 8 典型地层 2.5D 叠层 TIN 模型

Fig.8 2.5D multi-TIN modeling of classical strata

5 结 语

本文将地质钻孔信息离散为具有二分拓扑数据结构的点源信息,采用 Delaunay 算法基于离散点构建出地层的 2D 垂直剖面模型,并在多层 DEM 与 TIN 的基础上提出了适于地层水平表达的地层 2.5D 叠层 TIN 模型。建模还考虑了对地层尖灭、断层等突变信息的处理。建立的地层 2D, 2.5D 模型具有以下特点:皆采用 Delaunay 算法构建相应的地层模型,具有统一的算法理论基础,能充分利用计算机处理数据的能力;采用三角形作为地层模型的基元,便于快速可视化,并利于数据存储与管理。

目前,正在对构模方法处理复杂问题的适应性 与健壮性、地层模型的空间三维分析与专业深层次应用方面作进一步的研究。

参考文献(References):

- [1] 张京生,董向勇. 滑坡地质体剖面表达与绘制方法探讨[J]. 测绘通报, 2002, (9): 62 - 64.(Zhang Jingsheng, Dong Xiangyong. Study on representation and drawing of geological sections for landslide body[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2002, (9): 62 - 64.(in Chinese))
- [2] 张明山,陈发景. 平衡剖面技术应用的条件及实例分析[J]. 石油地球物理勘探, 1998, 33(4): 532 - 540.(Zhang Mingshan, Chen Fajing. Application condition of balanced-section technique and the case analysis[J]. Oil Geophysical Prospecting, 1998, 33(4): 532 - 540.(in Chinese))
- [3] 李新宁,王家林,吴健生,等. 借鉴 GIS 基本思想在 Sufer 中实现复杂地质图件的绘制[J]. 物探化探计算技术, 2001, 23(1): 63 - 67.(Li Xinning, Wang Jialin, Wu Jiansheng, et al. Drawing of complex geological body map by Sufer borrow idea from GIS[J]. Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration, 2001, 23(1): 63 - 67.(in Chinese))
- [4] 郑承虎. 利用 AutoCAD 绘制工程地质剖面图的几点技巧[J]. 工程勘察, 1994, (4): 21 - 23.(Zheng Chenghu. Some skills about drawing of geologic section by AutoCAD[J]. Geotechnical Investigation and Surveying, 1994, (4): 21 - 23.(in Chinese))
- [5] 陈国强,徐连锋,王庆苗. 工程地质图软件开发与应用[J]. 工程地质计算机应用, 2002, (1): 9 - 12.(Chen Guoqiang, Xu Lianfeng, Wang Qingmiao. Development and utilization of program for drawing of engineering geology[J]. Computer Application of Engineering Geology, 2002, (1): 9 - 12.(in Chinese))
- [6] 李义才,刘刚,吴冲龙. 计算机辅助实测地质剖面图编绘系统设计[J]. 中国区域地质, 2001, 20(3): 304 - 308.(Li Yicai, Liu Gang, Wu Chonglong. Design of the computer-aided geologic section-making system[J]. Regional Geology of China, 2001, 20(3): 304 - 308.(in Chinese))
- [7] Selender C L, Taylor R B. 地质剖面图绘制程序——GSSECT[J]. 华东地质学院学报, 1992, 15(4): 360 - 366.(Selender C L, Taylor R B. Program of drawing of geologic section—GSSECT[J]. Journal of East China Geological Institute, 1992, 15(4): 360 - 366.(in Chinese))
- [8] 孙明明,李明建,鲁孟胜. 利用 MAPGIS 实现计算机编制工程地质剖面图[J]. 山东煤炭科技, 2001, (3): 45 - 46.(Sun Mingming, Li Mingjian, Lu Mengsheng. Drawing of geologic section by MAPGIS[J]. Shandong Coal Science and Technology, 2001, (3): 45 - 46.(in Chinese))
- [9] 楚王辉,黄地龙,周泉. 地质剖面图在计算机中的自动绘制[J].

- 电脑与信息技术, 2001, (6): 42 - 48.(Chu Wanghui, Huang Dilong, Zhou Gao. Auto drawing of geologic section by computer[J]. Computer and Information Technology, 2001, (6): 42 - 48.(in Chinese))
- [10] 丁字明, 马文田. 地质剖面计算机辅助绘图的数学模型及算法[J]. 武汉水利电力学院学报, 1992, 25(2): 9 - 16.(Ding Yuming, Ma Wentian. Mathematical modeling and algorithm of the computer aided drafting for engineering geological profile[J]. Journal of Wuhan University of Hydraulic and Electric Engineering, 1992, 25(2): 9 - 16.(in Chinese))
- [11] 李 锋, 胡维平. 剖面图中分层区域自动生成的计算机实现[J]. 岩土力学, 2001, 22(1): 117 - 120.(Li Feng, Hu Weiping. The computer realization of generating the layered regions in sectional graphs[J]. Rock and Soil Mechanics, 2001, 22(1): 117 - 120.(in Chinese))
- [12] 吕维先. 计算机勘探模拟系统的剖面图交互式编辑子系统[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 1994, 19(4): 407 - 411.(Lu Weixian. Sub-interactive editing system of geologic section of computer exploration simulation system[J]. Earth Science—Journal of China University of Geosciences, 1994, 19(4): 407 - 411.(in Chinese))
- [13] 李有清, 朱世平. 一种制作地质剖面图的新方法“找点法”[J]. 江西地质科技, 1993, 20(2): 63 - 71.(Li Youqing, Zhu Shiping. A new method of generating geologic section by find point[J]. Geological Science and Technology of Jiangxi, 1993, 20(2): 63 - 71.(in Chinese))
- [14] 方世明, 刘 刚, 赵温霞, 等. 地质图切剖面中褶皱构造的计算机辅助编绘[J]. 地质与勘探, 2002, (3): 52 - 54.(Fang Shiming, Liu Gang, Zhao Wenxia, et al. The drawing aided by computer of the anticline and syncline in the section from geological map[J]. Geology and Prospecting, 2002, (3): 52 - 54.(in Chinese))
- [15] 门桂珍, 萨贤春, 雷宝林. 地质剖面图的计算机绘制技术[J]. 煤田地质与勘探, 1995, 23(1): 34 - 37.(Men Guizhen, Sha Xianchun, Lei Baolin. A computer automatic plotting technique of geological profile[J]. Coal Geology and Exploration, 1995, 23(1): 34 - 37.(in Chinese))
- [16] 狄卫民. 地质剖面图和平面图的计算机辅助绘制[J]. 黄金科学技术, 2002, 10(4): 36 - 39.(Di Weimin. Drawing a geological section or plane graph with computer aided design[J]. Gold Science and Technology, 2002, 10(4): 36 - 39.(in Chinese))
- [17] Matile G L D, Keller G R, Pyne D M, et al. Development of methods for 3D geological mapping of southern Manitoba Phanerozoic terrane[A]. In: Report of Activities 2002[C]. [s. l.]: [s. n.], 2002. 274 - 282.
- [18] Yonezawa G, Tatsuya N, Masumoto S, et al. 3D geologic modeling and visualization of faulted structures: theory and GIS application[A]. In: Proceedings of the Open GIS-GRASS Users Conference 2002—Toronto[C]. Toronto: [s. n.], 2002. 315 - 321.
- [19] 方海东. 三维地质建模技术及其在润扬长江公路大桥中的应用[硕士学位论文][D]. 南京: 南京大学, 2002.(Fang Haidong. 3D geologic reconstructing technology and its application in Runyang bridge[M. S. Thesis][D]. Nanjing: Nanjing University, 2002.(in Chinese))
- [20] 胡金星. 三维地学模拟体可视化技术的应用研究[J]. 煤炭学报, 1999, 24(4): 345 - 349.(Hu Jinxing. Research of 3D geoscience modeling and body visualization[J]. Journal of China Coal Society, 1999, 24(4): 345 - 349.(in Chinese))
- [21] 王纯祥, 白世伟, 贺怀建. 三维地层可视化中的地质建模研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(10): 1 722 - 1 726.(Wan Chunxiang, Bai Shiwei, He Huajian. Study on geological modeling in 3D strata visualization[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(10): 1 722 - 1 726.(in Chinese))