太原理工大学

硕士学位论文

地层趋势面拟合与DEM建模

姓名：康志军

申请学位级别：硕士

专业：矿产普查与勘探

指导教师：葛永慧

20070501

地层趋势面拟合与DEM建模

摘 要

三维地层模型为地质研究提供了一种新的手段，使以前常用的二维图形和存在于地质工作者头脑中的三维信息通过计算机的模拟显示出来，并实现相应地层信息的查询，使地质工作者从三维空间更深入的研究地质体的空间分布规律和特征。

本文讨论了常用的表面建模方法和常用的数据拟合方法，在详细分析目前3D空间建模方法的基础上提出了格网虚拟柱模型，该模型以钻孔数据为基础，平面上表现为规则格网（Grid）结构，在Grid结构的交叉点上定义虚拟柱，虚拟柱的信息由钻孔资料内插得到，同时利用开采中修正的底板等高线数据对得到的虚拟柱进行校正。数据的内插采用了加权移动趋势面拟合、TIN结构内插、加权移动趋势面拟合结合TIN结构内插的方法。

加权移动趋势面拟合方法克服了趋势面拟合算法拟合度较低和显著性不明显的缺点。在计算过程中利用 R 和 F 检验决定移动拟合的半径和参考点权重的大小，通过调整拟合半径和参考点权重使地层较小的变形得以表现，同时保证了地层的平滑连接和足够的精度。

TIN 结构内插采用了扫描线算法，该算法依次取三角网中的每一个三角形为研究对象，然后分别计算出各个三角形内所有格网节点的属性值，加快了寻找格网点所在三角形的计算速度。

加权移动趋势面结合 TIN 结构内插的方法，利用了加权移动趋势面拟合方法生成的曲面具有较好的延展性且曲面更加光滑和 TIN 结构可以较好

的保留地层发育情况的特点，取得了较好的效果。

利用底板等高线数据校正虚拟柱算法采用了首先对等高线区域先进行拓扑构建，然后用剖面线算法计算校正点的方法；对等高线形状较为特殊的情况算法中作了特别约定。同时对断层的形态进行了分类，给出了描述不同形态断层的方法。论文的最后给出了虚拟格网柱模型的总体设计思路，并用软件具体实现。

关键词：三维地层建模，格网虚拟柱，趋势面，断层，软件开发

STRATUM TREND SURFACE FITTING AND DEM MODELING

ABSTRACT

Three dimension stratum model provides a new approach for geology research so that the most commonly used two dimension figure and the three dimension information stored in the geologists' minds can be displayed by computer simulation. At the same time the corresponding stratum information inquiry can be implemented. In this way, geologists are able to further study the space distribution law and characteristic of geological body.

In this paper, the commonly used surface modeling method and data fitness method are discussed, grid and fictitious column model is proposed based on a thorough analysis on current 3D space modeling method, This model was established on the foundation of drilling database, and it is expressed as the formal structure of Grid on the plane. fictitious column was set on the crossing of the Grid structure. The information on fictitious column was obtained by adding code to drilling histogram. An approach to modify the virtual pole is obtained utilizing the motherboard contour line gained during exploitation.The data interpolation used the method of weighted technology of moving trend surface fitting、the TIN structure interpolation、the weighted technology of moving trend surface fitting unified the TIN structure interpolation.

Weighted technology of moving trend surface fitting gets over the weakness of trend surface fitting including fitting low and markedness is not obvious , and in the calculations using the R and F test decide the moving fitting radius and the size of weight of reference points, through adjusting the fitting radius and the weight of reference points to represent smaller deformation of stratum, at the same time ensuring the smooth linking of stratum and sufficient precision.

The scan line algorithm has used in the TIN structure interpolation, this algorithm takes in the triangular net each triangle was researched object , then separately calculates in each triangle the all Grid points attribute value, The computation speed was faster of Grid point pertain in triangle.

The weighted technology of moving trend surface fitting unified the TIN structure interpolation, the characteristic was used of weighted technology of moving trend surface fitting method production curved surface to have a better ductility and the TIN structure may the better retention stratum growth situation.The method has obtained a better effect.

Adjusted the hypothesized column algorithm using the motherboard contour line data was to firstly topologize in the coordinated altitude region, then calculate point of rectification using profile line algorithm to make the special agreement on special situation of coordinated altitude shape. Meanwhile the paper carried on the classification to the shape of faultage, produced the method of description of different shape of faultage. The paper finally produced total

design thought of grid and fictitious column model.

Key Word: three dimensional stratum modeling，grid and fictitious column，trend surface，fault，software development

声　　明

本人郑重声明：所呈交的学位论文，是本人在指导教师的指导下，独立进行研究所取得的成果。除文中已经注明引用的内容外，本论文不包含其他个人或集体已经发表或撰写过的科研成果。对本文的研究做出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本声明的法律责任由本人承担。

论文作者签名：康志军　　日期：2007.6.3

关于学位论文使用权的说明

本人完全了解太原理工大学有关保管、使用学位论文的规定，其中包括：①学校有权保管、并向有关部门送交学位论文的原件与复印件；②学校可以采用影印、缩印或其它复制手段复制并保存学位论文；③学校可允许学位论文被查阅或借阅；④学校可以学术交流为目的，复制赠送和交换学位论文；⑤学校可以公布学位论文的全部或部分内容（保密学位论文在解密后遵守此规定）。

签　　名：康志军　　日期：2007.6.3

导师签名：[illegible]　　日期：20070603

第一章 绪论

1.1 引言

我国是世界上最大的产煤国家，煤炭作为我国今后很长一段时间的最主要的能源来源，可以保证的供应年限并不是很长。面对快速增长的煤炭需求，必须在加大煤炭资源勘探力度的同时提高煤炭资源的开采效率；同时煤矿安全高效开采也是保证煤矿企业可持续发展、能源稳定供应的关键所在。煤矿生产特点是必须面对复杂多变的地质和开采技术条件，根据地层变化情况寻找合适的开采方法，所以，对岩层变化的认识程度将很大程度上决定资源开采的效率和生产的安全。

1.2 本文的选题依据

本论文的选题依据是利用适当的三维地层模型，研究三维地层数据的拟合算法和数据存储利用的方法，为地质研究提供了一种新的手段，使以前常用的二维图形和存在于地质工作者头脑中的三维信息通过计算机的模拟显示出来，并实现相应地层信息的查询。使地质学家从三维空间更深入的研究地质体的空间分布规律和特征。同时三维模拟也是使传统采矿业走出浪费严重，经济效益低下，走向又好又快的可持续发展之路的必然趋势。现在许多煤矿开采中事故较多，资源浪费严重，其原因之一是对矿山的地质条件以及总体资源状况了解不足。进行本项研究和基于该研究成果的三维地质模拟软件将对矿山企业的生产管理将产生较大的影响。

1.3 本文主要研究的内容

本文的最终目标是找到一种适用的三维地层模型和算法方法，实现地层数据的准确拟合和地表的 DEM 建模，为三维地质模拟软件作数据准备。基本思想是首先利用煤矿已有的钻孔柱状图数据生成初始的三维模型，然后利用底板等高线数据对初始三维模型进行合理的校正，最后加入断层数据，合并生成三维地层数据。

本文的主要工作

1. 分析了现有的三维模型及其特点。
2. 分析了常用表面建模的方法及其特点。

3. 确定了格网虚拟柱模型的三维模型。
4. 由传统的趋势面拟合方法发展出了加权移动趋势面拟合算法，利用不同的算法实现三维数据的内插。
5. 利用煤矿已有的底板等高线数据对三维地层数据进行纠正。同时对剖面线算法作了改进，加快了剖面线上点的计算速度。
6. 提出了一种断层模型，并对含断层的剖面线生成算法作了研究。

第二章 三维地学模拟概述

三维地学模拟系统(3D Geosciencs Modeling System)，3DGMS 由加拿大 Simon W.Houlding 于 1993 年首先提出的。其含义是：一门运用现代空间信息理论来研究地层及其环境的信息处理、数据组织、空间建模与数学表达，并运用科学可视化技术来对地层及环境信息进行真三维再现和可视化交互的科学与技术[1]。利用 3DGMS 的强大的地质分析功能和辅助管理决策功能，为矿山设计、规划、开采、防火救灾以及矿区的可持续发展提供强有力的工具，为领导的决策和正常的生产服务。

2.1 现有三维模型现状

随着三维地学模拟系统的快速发展和计算机技术的广泛应用，传统的二维图形表示越来越多的被三维立体图所取代。三维显示技术在很多的领域得到大量的应用，例如地质、虚拟城市、地形地貌、三维游戏等领域。地质模型的三维显示已成为当前矿山地质的发展方向之一。地质学家们往往通过调查取得地层岩体结构、断层构造、地质特征等，进而研究它们的规律。三维地质模型的显示可以应用交互技术对其模型进行多种变换，帮助地质工作者在动态场景中思维、推理，使之全面深入地研究地质的各类变化特征与规律。由于地质结构的复杂性和数据的有限性，导致了三维显示模型形成的复杂性，因此在地质领域中地层数据模型的研究和地层的拟合是当前研究的热点及难点。

过去十几余年中，三维空间构模方法提出了 20 余种空间构模方法。主要可以归纳为面模型(Facial Model)、体模型(Volumetric Model)和混合模型(Mixed Model)三大类构模体系[2]。

面模型是目前应用比较广泛的模型之一，基于面模型的构模方法侧重于三维空间实体的表面表示，如地形表面、地质层面、构筑物(建筑物)及地下工程的轮廓与空间框架。所模拟的表面可能是封闭的，也可能是非封闭的。如格网结构(Grid)，不规则三角形格网(TIN)，边界表示(BR)和参数函数等。通过表面表示形成三维空间目标，其优点是便于显示和数据更新，不足之处是难以进行空间分析。曹代勇、朱小第作了三维地质模型可视化技术的研究，以 TIN 模型来描述地质界面以及地质构造，但不涉及地质体内部的描述[3]。此类模型需要存储的信息少，形体显示和更新速度快，但是，因为没有描述形

体的内部属性，因而很难进行形体的三维空间分析和查询，不能很好地支持矿山的开采工程设计[4]。

体模型基于三维空间的体元分割和真三维实体表达，是目前研究的比较广泛也是最有发展前途的一种数据模型，它的中心思想是将三维空间物体离散为三维体元的集合。体元的属性可以独立描述和存储，因而可以进行三维空间操作和分析。可以根据体元的规整性分为规则体元和非规则体元两个大类。规则体元包括 CB-tree、Voxel、Octree、Needle 和 Regular Block 共 5 种模型。规则体元通常用于水体、污染和环境问题构模，其中 Voxel,Octree 模型是一种无采样约束的面向场物质（如重力场、磁场）连续空间的标准分割方法，Needle 和 Regular Block 可用于简单地质构模。非规则体元包括 TEN、Pyramid、TP、Geocelluar、Irregular Block、Solid、3D-Voronoi 和 GTP（广义三棱柱，Generalized Tri-Prism）共 8 种模型。非规则体元均是有采样约束的，基于地层界面和地质构造的面向实体的三维模型。

体模型中应用较多的是GTP模型和四面体格网（Tetrahedral Network—TEN）模型。GTP模型的主要特点是基于钻孔数据，利用钻孔数据的不同分层来模拟地层，表达地层面的形态。GTP由上、下不一定平行的两个三角形和三个侧面四边形所组成的空间单元，如图2.1。利用GTP进行地层建模时，其上下底面的三角形集合可以表达不同的地层面，侧面四边形可以描述层面间的相邻关系，而GTP体元则可表达层面间的内部实体。GTP模型在模拟层状矿体时，可以表达出各层矿体的形态，并可根据矿体的层状信息快速生成3D空间数据模型。此外，GTP模型充分考虑了组成GTP的各空间元素之间的拓扑关系，包括相邻、相离、连接等。利用GTP的这些拓扑关系，便于进行3D空间的拓扑分析。

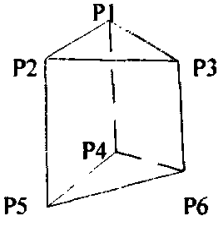


图2.1 GTP模型

Fig2.1 GTP model

尽管如此，该模型在进行空间查询和操作时还存在不足。由于GTP模型中三棱柱的三条棱边不一定平行，GTP的侧面不一定是平面。因此，GTP进行平面剖切时，在侧面上形成的切割线不一定是直线，或者说进行剖切时切相邻两条侧棱的切割线与侧面不一

定共面。GTP被切割时,其切割面可能在切割多边形之间出现了空洞。对此,吴立新[5]提出在GTP模型中引入三条对角线作为临时性构模要素，将每个侧面分为2个三角形，每个GTP分为3个四面体，从而来处理侧面非平面的问题，以此来支持3D空间操作。

GTP 模型中表达的拓扑关系主要是实体之间的连接关系，进行拓扑描述的实体主要包括构成空间实体的六类基本元素，即点、TIN 边、棱边、侧面、TIN 面和 GTP。但是，对于任意空间实体之间的空间拓扑关系表达没有进行论述。且由于 GTP 模型侧面是一个不规则空间曲面，空间实体之间在进行空间求交时比较困难。同时不能提供适当的人机交互能力，不利于后期对模型的修整[5]。

四面体格网（Tetrahedral Network—TEN）是将目标空间用紧密排列但不重叠的不规则四面体形成的格网来表示，其实质是 2D TIN 结构的 3D 扩展。在概念上首先将 2D Voronoi 格网扩展到 3D，形成 3D Voronoi 多面体，然后将 TIN 结构扩展到 3D 形成四面体格网。四面体格网由点、线、面和体四类基本元素组合而成。整个格网的几何变换可以变为每个四面体变换后的组合，这一特性便于许多复杂的空间数据分析。同时，四面体格网既具有体结构的优点，如：快速几何变换，快速显示；又可以看成是一种特殊的边界表示，具有一些边界表示的优点，如：拓扑关系的快速处理。但模型数据量较大，计算过程繁琐[6]。

混合模型就是对两种或者两种以上的数据模型进行优势整合所形成的折衷模型。常见的有 TIN+栅格模型、TIN+Octree 等。龚健雅、夏宗国提出了矢量与栅格集成的面向对象的三维数据模型[7]。这些模型可以解决复杂建模问题，但是不易建立空间拓扑关系。李清泉、李德仁[8]针对城市、海洋等领域的应用，发展了三种不同的空间模型的集成方法，第一种是用于城市三维构模基于不规则三角网（TIN）的集成模型，第二种是用于地质、海洋等领域基于八叉树和四面体格网的混合模型，第三种是具有一般性矢量栅格集成的三维空间数据模型。

2.2 现有三维软件现状

在国外：美国 Intergraph 公司研制的 MGE 软件中的 MGE Voxel Analyst(MGVA)地下三维分析模块,它具有基于真三维的地质体分析功能；该公司另外又推出了 I/EMS 系统，I/EMS 系统首先利用 GIPSIE 软件进行三维空间数据内插，再用 NURBS 生成不同层次的表面，最后通过一个层的上、下两个表面来构造对象的体模型。它能够表示

复杂的几何对象，可对复杂表面和一个平面进行相交处理。系统在地质构造的表达描述上有较大优势。美国 Dynamic Graphic 公司推出的专用可视化软件 IVM(Interactive Volume Modeling)可支持用户对三维空间的测量属性值进行建模、显示和交互控制，其建模过程是先取某一物理特征值的若干散乱数据点，据此计算出一个三维网格，此网格表示该物理性质在三维空间的分布模型，该软件已成功地用于油田渗透率分布的研究，地下含水层中污染情况的监测，地球大气中臭氧浓度、海洋中盐度与温度的分布研究；此外，该软件还可用于进行地学三维几何联系和特征联系的研究。系统擅长于对三维空间中属性连续变化的各种现象，如：温度、浓度等进行建模、显示和分析，对三维空间中属性值不连续变化的对象，如：矿石类型等的表示和处理有一定的困难。公司的另一地学三维可视软件地球可视模拟系统(Earth Vision Modeling System)所生成的三维空间立体图形可以清楚地反映地层与地质结构的空间分布及其相互关系，以此揭示岩体中结构面的发育与分布规律。美国 Stratamodel 公司推出 T-SGM(Stratigrphic Geo-cellular Modeling)软件，用于处理钻孔数据。它采用“地理细胞网”技术，首先将 2D 格网输入到用户定义的地层框架模型(Stratigraphic FrameworkModel)，由输入的格网定义连续的边界，然后用户根据需要确定在每个序列中需要多少层来描述地层结构，再将钻孔数据输入 SGM，钻孔模型在每一个钻孔位置对地层格网采样，并确定各层与钻孔的交点，钻孔模型的形成是在每一个钻孔以一定的间隔内插一个属性值，属性模型是将同一层内的钻孔之间的属性进行内插，得到每一个分块的属性值。系统的特点是:用户可以根据地层的边界准确描述地质构造和分散内插的属性值；每个格网可存储 100 项属性；滤波功能使得属性模型中的属性值平滑。系统的不足之处是:只针对钻孔数据，强调数据分层，对于不能分层的连续变化现象的数据的处理有困难。美国 Reservoir Characterization Research and Consulting 公司集中地质、地球物理、油气藏工程、地质统计学等学科的专家进行研究，于 1998 年推出了三维地球模拟软件(3D Earth Modeling)，该软件可以进行油气藏的三维显示与分析。澳大利亚 MAPTEK 公司开发的 VULCAN 软件是一个真三维勘探 GIS 与可视化软件，具有较好的三维空间建模、交互、可视化功能，并可进行矿藏储量计算与三维空间分析，主要应用于矿业环境管理、三维空间信息管理、模拟与可视化。除此以外，国外比较著名的地学三维软件还有：法国的 GOCAD 软件，澳大利亚的 DATAMINE 软件等[9]。

国内在 20 世纪 80 年代，主要是利用 dBASE 和 Basic、Fortran 语言开展地学信

息的管理、多元统计方法在矿山的应用以及利用 AutoCAD 进行简单矿图的绘制工作。20 世纪 90 年代以来，中国矿业大学、北京科技大学、武汉大学、中国地质大学、中科院武汉岩土力学所、北京大学、石油大学、南京大学、山东科技大学、河南理工大学等单位的一批博士、硕士研究人员围绕三维地学模拟进行了广泛的研究，自主开发或二次开发了一些三维地学模拟实验系统或应用系统，分别具备了不同程度和适应不同条件的三维地学模拟和可视化功能[9]。

但是由于地质问题的复杂性，地质信息的数量、类型众多，已经开发出的三维可视化软件系统具有针对性强、通用性差的特点，并且大多数系统仅能处理并显示格式或类型固定的地质信息。国外软件价格昂贵，国内企业使用中经济效益差。因此总体来说离真正的在我国矿山行业实际应用还有一定的距离。

第三章 常用表面建模的模型

3.1 常用于表面建模的模型

常用于表面建模的通用多项式有[10]

独立项	项次	表面性质	项数
$Z=a_0$	0 次项	平面	1
$+a_1X+a_2X$	1 次项	线形	2
$+a_3X^2+a_2Y^2+a_5XY$	2 次项	二次抛物面	3
$+a_6X^3+a_7Y^3+a_8X^2Y+a_9XY^2$	3 次项	三次抛物面	4
$+a_{10}X^4+a_{11}Y^4+a_{12}X^3Y+\cdots$	4 次项	四次抛物面	5

3.1.1 基于点的表面模型

如果只使用多项式的零次项来建立DEM表面，则对每一数据点都可建立一水平平面(如图3.1所示)。假如使用单个数据点建立的平面表示此点周围的一小块区域(在地理分析领域也称为该点的影响区域)，则整个DEM表面可由一系列相邻的不连续表面构成。

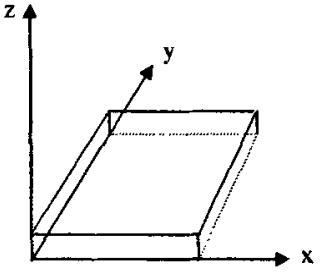


图3.1 点模型

Fig3.1 point model

对每一个单独平面的子面域，其数学表达式可简单表示为：

$$Z_i = H_i$$

式中的Z_i指点i周围一定范围内水平面的高度，H_i为i点的高程值。

这种计算方法非常简单，但困难之处在于确定相邻点间的边界。由于这种方法是在单个数据点高程信息的基础上形成了一系列的子面，因此这种方法被认为是基于点的表面建模方法。

从理论上说，因为这种方法只涉及独立的点，所以可用于处理所有类型的数据。就此而论，不规则分布的数据可通过建立不规则形状的平面来完成表面建模的过程。至于确定每一点的影响区域，如果使用的数据具有规则的结构，例如正方形格网、等边三角形、六边形等，则计算更为简单。尽管在表面建模时实行这种方法似乎可行，但由于其所建立的表面不连续(如图3.2)，因此并不是一种真正实用的方法。

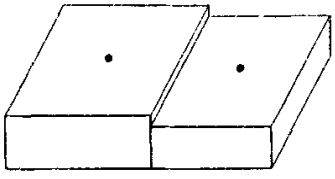


图 3.2 点模型表面

Fig3.2 the surface of point model

3.1.2 基于不规则三角网（TIN）的表面建模

如果使用通用多项式中更多的项，则可以建立更为复杂的表面。分析多项式的前三项(两个一次项和一个零次项)，可以发现它们能生成一个平面。为决定这三项的系数，最少需三个点。这三个点可构成一个平面三角形，从而决定了一倾斜的表面。如果每个三角形所代表的平面只用于代表三角形所覆盖的区域，则整个DEM表面可由一系列相互连接的相邻三角形组成。这种建模方法通常被称为基于三角形的表面建模(如图3.3)；所建立的模型通常称为不规则三角网模型（TIN）。

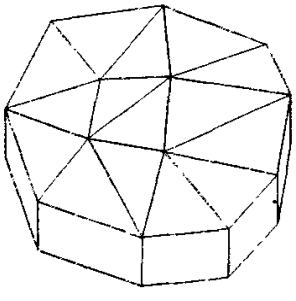


图 3.3 TIN 模型

Fig3.3 TIN model

由于规则正方形格网、矩形或其他任意形状的多边形都可以分解为一系列的三角形，因此三角形被认为是在所有图形中最为基本的单元。基于三角形的表面建模可适用

于所有的数据结构，而不管这些数据是由选择采样、混合采样、规则采样、剖面采样生成，还是由等高线法生成。由于三角形在形状和大小方面有很大的灵活性，所以这种建模方法也很容易地融合断裂线、生成线或其他任何数据。因此，基于三角形的方法在地形表面建模中得到了越来越多的重视，已成为表面建模的主要方法之一。

实际上，对于三角形建模的方法有时会使用高于一次的多项式，在这种情况下形成的三角形已不是平面的三角形，而可能是一曲面。

3.1.3 基于格网（Grid）的表面建模

如果通用多项式中的前三项与a_3,X,Y项一起使用的话，则至少需要4个点以确定一个表面。这种表面称为双线性表面。理论上，任意形状的四边形都可用做这种表面的基础，但考虑实际因素，比如输出的数据结构以及最终的表面形态，正方形格网为最佳的选择。在基于格网表面建模的情况下，最终表面将包含一系列邻接的双线性表面。

从实用的角度来看，格网数据在数据处理方面有很多优点，因此根据规则格网采样方法和渐进采样方法获取的数据，特别是正方形格网数据，最适合基于格网的表面建模，这也是为什么有些DEM软件包只接受格网数据的原因。在这种情况下，对数据必须首先进行从随机到格网内插的预处理，以确保输入数据为所要求的形式。基于格网的建模常用于处理覆盖平缓地区的全局数据，但对于有着陡峭斜坡和大量断裂线等地形形态比较破碎的地区，如果不进行特殊处理(增加特征点、线或加大密度)，这种方法并不适用。

应当指出，高次多项式也可用于建立DEM表面，但它的一个主要问题是，如果对范围较大的区域使用高次多项式函数，则可能导致DEM表面出现无法预料的抖动。为减少这种情况的发生，在实际应用中通常只使用二次或三次项。

使用多项式建立DEM表面所需要的最少高程点的数目由所使用项的数目决定。在实际应用下，用于建立DEM表面的几何结构除可使用基本的三角形或正方形格网外，还可使用其他的几何图形。考虑到在数据结构和数据处理方面的困难，原始的高程数据能否均匀分布仍然是非常重要的。

3.1.4 混合式表面建模

在地形建模领域通常将经某一特定几何结构构建而成且用于表面建模的实际数据结构称做网络。基于这一点考虑，也可以说DEM表面通常是由两种主要类型格网网络或三角形网络建立的。然而在建立DEM表面时，也经常用到混合建模方法（如图3.4）。例如对格网网络来说，可将其分解为三角形网络以形成线性的连续表面；反之，对不规

则三角网经内插处理，也可形成格网网络。



图 3.4 混合式表面模型

Fig3.4 the surface model of mixed

3.2 常用表面建模算法

3.2.1 TIN模型的建立

TIN（不规则三角网）模型中通常用到Delaunay三角网。1908年，G.Voronoi首先在数学上限定了每个离散点数据的有效作用范围，即其有效反映区域信息的范围，并定义了二维平面上的Voronoi图（以下称为V-图）。1934年，B.Delaunay由V-图演化出了更容易分析应用的Delaunay三角网（以下称为D-三角网）。由于D-三角网的特性，它被广泛的应用于分析离散数据和建立TIN[11]。

1．D-三角网的定义和特性[12]

D-三角网的定义是：

有公共边的V-多边形称为相邻的V-多边形。连接所有相邻的V-多边形的中心所形成的三角网称为D-三角网。

D-三角网具有以下两个重要的性质。

①．空外接圆性质：任何一个三角形的外接圆内均不包含其他的数据点。

②．最大最小内角性质：在所有可能形成的三角形中最小内角是最大的。

这两个性质有效的保证了D-三角网是最接近等角或等边的三角网，同时也是自动构建D-三角网的算法依据。

2．D-三角网的生成算法回顾[13]

自动建立的算法基本可归为三类：分治算法、逐点插入法和三角网生长法。Tsai对此曾作了一个非常好的回顾[14]，现将其作简要介绍。

2.1分治算法

Shamos和Hoey首次提出了一个用分治算法的思想，并生成V-图的分治算法。Lewis

和Robinson将分治算法思想应用于生成D-三角网。Lee和Schachter有改进和完善了Lewis和Robinson的算法[14]。

Lee和Schachter算法的基本步骤是：

把点集V以横坐标为主，纵坐标为辅按升序排列，然后递归的执行以下步骤：

把点集V分为近似相等的两个子集V_L和V_R，在V_L和V_R中生成三角网；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；找出连接V_L和V_R中两个凸壳的底线和顶线；由底线至顶线合并V_L和V_R中两个三角网。

以上步骤显示，分治算法的基本思路是使问题简化，把点集划分到足够小，使其易于生成三角网，然后把子集中的三角网合并生成最终的三角网，用LOP算法保证其成为D-三角网。不同的实现方法可有不同的点集划分法、子三角网生成法及合并法。

分治算法是通过递归地执行同一源代码而实现的。因此，当数据量很大时，会产生许多中间层次而占用大量计算机内存，即要求栈空间非常大。如果计算机没有足够的内存，这一方法就无法使用。

2.2 逐点插入法

Lawson提出了用逐点插入法建立D—三角网的算法思想。Lee和Schachter，Bowyer，Watson，Sloan，Macedonio 和Pareschi，Floriani和Puppo，Tasi先后进行了发展和完善。

逐点插入算法的基本步骤是：

定义一个包含所有数据点的初始多边形，在初始多边形中建立初始三角网，然后迭代以下步骤，直至所有数据点都被处理：

插入一个数据P，在三角网中找出包含P点的三角形，把P点与三角形的三个顶点相连，生成三个新的三角形；

用LOP算法优化三角网。

从上述步骤可以看出，逐点插入算法的思路非常简单，先在包含所有数据点的一个多边形中建立初始三角网，然后将余下的点逐一插入，用LOP算法确保其成为D-三角网。各种实现方法的差别在于初始多边形的不同以及建立初始三角网的方法不同。

逐点插入法虽然容易实现，空间要求不大，但它最大的不足是时间效率极低。

2.3 三角网生长法

Green和Sibson首次实现了一个生成Dirichlet多边形团的生长算法[15]。Brassel和Reif稍后也发表了类似的算法[16]。McCullagh和Ross通过把点集分块和排序改进了点搜索方

法，减少了搜索时间[17]。Maus也给出了一个非常相似的算法[18]。

三角网生长算法的基本步骤是：

以任一点为起始点，找出与起始点最近的数据点相互连接形成D-三角形的一条边作为基线，按D-三角网的判别法则（即它的两个基本性质），找出与基线构成D-三角形的第三点；

基线的两个端点与第三点相连，成为新的基线；

迭代以上两步直至所有基线都被处理。上述过程表明，三角网生长算法的思路是，先找出点集中相距最短的两点连接成为一条Delaunay边，然后按D-三角网的判别法则找出包含此边的D-三角形的另一端点依次处理所有新生成的边，直至最终完成。各种不同的实现方法多在搜寻"第三点"上做文章。

3.2.2 Grid模型建立的算法[10]

Grid模型建立的方法主要分为两种，一种是直接利用离散点来内插格网点，另一种是经由三角网内插。

在直接内插中，根据建立的表面模型的大小，可分为逐点法、局部法及全局法。逐点法指的是，对每一内插点都建立自己的一个内插模型来进行内插。这个模型由内插点周围的已知点建立。常用的方法有加权平均法和移动拟合法等。局部法指的是，在一个局部的小范围内建立一个表面模型，然后在这个局部范围的内插点由这个模型来内插。全局法指的是在整个范围内，有所有的已知点来建立一个模型，所有的格网点都由这个模型内插得到。

由三角网内插是先由离散点的建立三角网，然后再内插。内插方法分为两种，一种是由内插点所在的斜面三角形来内插该点的高程；另一种方法是由最邻近内插点的一串三角形来拟合一个曲面，然后由该曲面来求内插点的高程。

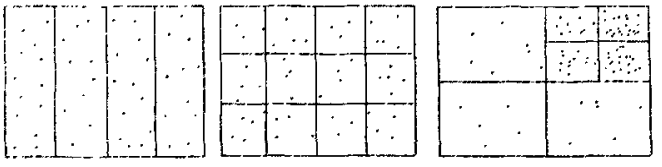
其算法中常要的的数据拟合方法在第四章中详细描述。

3.2.3 算法的改进

1．D-三角网的改进算法

上述的三种算法中，三角网生长法算法最为复杂，80年代后相应的研究已经很少，较多的是分治算法、逐点插入法及分治算法的逐点插入法合并算法。逐点插入法的改进主要集中在初始凸包和初始三角形的生成上，分治算法的改进主要在数据分块方法的改进上，而合并算法是改进算法中应用最多的[19]。

改进的算法中通常要对数据进行分块如图3.5，常用的数据分块方法有：均匀条带分割(图a)、等格网分割(图b)、四叉树分割(图c)和自适应分块等。用前两种方法不能够随着空间分布的不同而产生变化，在空间分布产生异常的时候会降低算法的效率，即算法不够稳定。第三种算法则会自动随着点的空间分布不同而不同，从而在空间点分部差别很大的情况下，仍然可以保证较稳定的算法执行效率。同时四叉树结构也有利于限定边的嵌入。第四种算法是在等格网分割的基础上，给定一个最低限，每一格中的点数大于最低限时动态调整网格宽度。



图a　　图b　　图c

图 3.5 不同的数据分块方法

Fig3.5 different technique of data segmentation

等格网分割算法：

1) 对给定坐标点集分别求出横、纵坐标的最大最小值。然后用点集内总点数除去每块的平均点数(预先给定)、得到分块总个数，然后求出块宽度、块行数及块列数；

2) 由块行数、块列数和块宽度及起点坐标，就可求出各块的边界。

3) 检索整个坐标点集，对边界范围内的点存入对应的点集中，若点数少于给定的值（预先给顶)转4)、否则继续下一块，直到所有的块都生成完毕为止；

4) 将该块(i, j)向正方向($i+1$, j)和反方向（i, $j+1$）扩展一个距离，按3）中的规则修改其中数据，然后转3)。

均匀条带分割与等格网分割类似。

四叉树分割[20]：

建立采样数据四叉树结构的基本思想是：首先定阀值，检查区域内采样数据个数是否超过阀值；若超过，则将该区域4等分，然后对4个子分区进行同样的处理，直到所有子分区内的采样数据个数均不超过阀值为止。具体操作为[21]：

设n_q 为预先给定的阀值，若采样区域内采样数据个数 $n > n_q$,则将采样区4等分，得到4个子区，每个子区内的采样数据个数为 N_i (i=0,1,...3)；若4个子区中存在 $n_i > n_q$, 的子区，则将其再4等分，直到所有子区的采样数据个数$N_i < n_q$ (i=0,1,...3)为止，由此得

到的树即为采样数据的四叉树结构。在此四叉树中，只有叶子结点含有采样数据。

显然可以对四叉树深度进行调节的只有n_q，n_q愈大，四叉树深度愈小，遍历四叉树算法效率高，但结点内搜索效率降低；反之，n_q愈小，四叉树深度愈大，遍历四叉树算法效率低，但结点内搜索效率较高。所以，n_q的取值应合理，一般以四叉树的深度不超过10为宜。

自适应算法[22]：

自适应网格技术将点集划分成子集，并且子集内点的数目少于给定阀值。同时用多级网格管理离散点及三角网，用多叉树的数据结构模拟多级网格。对叶子网格内的点采用逐点插入法生成D-子三角网，再由顶层网格开始，采用合并算法将D-子三角网逐级递归合并为D-三角网。

设点集V 中有N个离散点. 对V进行多级网格划分。使得子网格中的点少于等于阈值。网格的宽度逐级减小. 如图3.6所示。

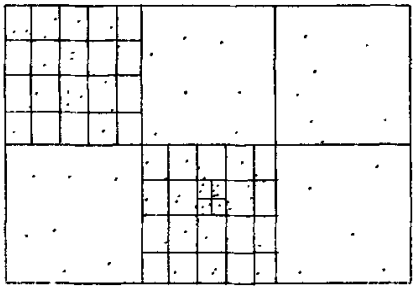


图3.6 多级格网自适应划分

Fig3.6 auto partition of multi-level grid

自适应网格划分点集的优点在于：

(1)网格的宽度适应点的疏密变化；

(2)嵌套深度浅，耗费空间小；

(3)点集划分速度快，时间复杂度为$O(N)$；

(4)便于点及三角网的管理。

3.3 本文中TIN结构的实现

通常构建TIN结构按点、边、三角形设计数据结构。为了实现本文提出的算法，设计了三角网所涉及的数据结构，即点结构、边结构、三角形结构。数据结构定义如下：

```
typedef struct PThreeDimDotStruct      //三维坐标点结构
{
```

```
    double x;
    double y;
    double h;
} PThreeDimDotStruct;
typedef struct PEdgeStruct                    //三角形边结构
{
    long Start;                               //边起点
    long Start;                               //边终点
    long LeftTri;                             //边左边三角形编号
    long LeftTri;                             //边右边三角形编号
} PEdgeStruct;
typedef struct PTriangleStruct                //三角形结构
{
    long DotA;                                //三角形顶点 A
    long DotB;                                //三角形顶点 B
    long DotC;                                //三角形顶点 B
    long AEdge;                               //A 点的对边编号
    long BEdge;                               //B 点的对边编号
    long CEdge;                               //C 点的对边编号
    } PTriangleStruct;
```

本文中生成 TIN 的算法主要分为两步，第一步，生成包含所有数据点的初始凸壳；第二步，插入其他离散点生成最终的三角形。

1．凸壳的生成

设在离散点集 V 中有 n 个点，选择一定位于凸包上的特征点，分别为 x 值最小的点、x 值最大的点、y 值最小的点、y 值最大的点，因为特征点有时数是四个，有时是三个，所以要记录特征点的个数 m。

```
    for(i=0;i<m;i++)
    {
        if(i!=m-1)
        {
```

```
        for(j=0;j<n;j++)
        {
            if(点 j 位于凸壳线（点 i 与点 i+1 的连线）右侧或点在凸壳线上)
                凸壳线变为点 i 与点 j 的连线;
                k=j;
            else 标记这个点在左侧,不可用;
        }
        凸壳线变为点 k 与点 i+1 的连线;
    }
    if(i==m-1)
    凸壳线变为点 m-1 与点 0 的连线;
    重复上面的判断过程;
}
```

判断点在线的那一侧的算法：

设线的起点坐标为(x1,y1),终点坐标为(x2,y2),待定点为(x3,y3)，

```
k=(y1 – y3)*(x2 – x3)-(x1 – x3)*(y2 – y3);
if (k>0)    待定点在线的左侧
if (k<0)    待定点在线的右侧
if (k=0)    待定点在线上
```

2．三角形的生成

① 以凸包的链表的第一个点为端点，连接其余的点生成初始三角形；

② 优化初始三角形，使其符合 D—三角形的要求；

③ 判断不在凸包上的待插入点在哪一个三角形中；

④ 把待插入点与所在三角形的三个端点相连，生成新的三角形；

⑤ 对新生成的三角形进行优化，使其符合 D—三角形的要求；

⑥ 对下一个点重复第③步。

3. 判断点在三角形中的算法

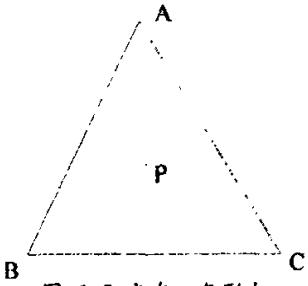


图 3.7 点在三角形中

Fig3.7 point in the triangle

设四个点的坐标分别为 $A(xa,ya),B(xb,yb),C(xc,yc),P(xp,yp)$，

$a=((xp-xc)\times(yb-yc)-(yp-yc)\times(xb-xc))/((xa-xc)\times(yb-yc)-(ya-yc)\times(xb-xc));$

$b=((xp-xc)\times(ya-yc)-(yp-yc)\times(xa-xc))/((xb-xc)\times(ya-yc)-(yb-yc)\times(xa-xc));$

$c=1-a-b;$

if (a>0 && a<1 && b>0 && b<1 && c>0 && c<1)　　点在三角形内部；

else if (a<0 || a>1 || b<0 || b>1 || c<0 || c>1)　　点在三角形内部；

else 点在三角形的边上。

4．三角形优化算法的特殊情况[23]

优化就是按照空外接圆特性进行的即：

① 如果四个点符合空外接圆特性，则不优化

② 如果待定点在已有的三角形边上且这条边没有相邻三角形（如图 3.8 所示），则分别连接三个点生成两个新三角形，并与相邻三角形进行优化。

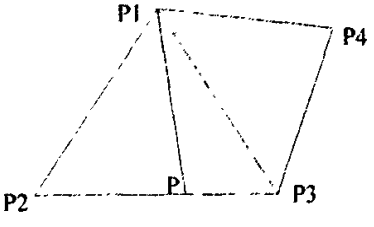


图 3.8 内插点在边界边上

Fig3.8 insert point on borderline

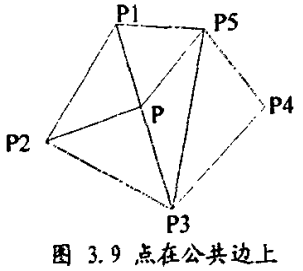


图 3.9 点在公共边上

Fig3.9 insert point on public side

③ 如果待定点在已有的三角形边上且该边有两邻接的三角形(如图 3.9 所示)，这时增加的三角形的个数（与点在三角形中一样）为 2 个。增加的边个数(与点在三角形中一样)为 3 个，只是进行 LOP 优化时涉及到四条边，其具体的过程与点在三角形中一样，这里不再展开讨论。

第四章 常用数据拟合方法

地层数据的获取在矿山开采前期主要依靠钻孔的方法，在矿山开采中可以通过揭露获得一定的数据，通常情况下这些数据比较稀少，有的一些位置甚至没有数据，因此我们需要对地层数据进行插值处理，以形成合理的地质层面。地层数据的处理、插值必须考虑地质构造的特殊条件和要求，不能简单的直接套用常规的自动插值方法。尽管给出的地质数据分布往往很不均匀，而且数量有限，但它们之间仍存在某些联系和规律性，对这些联系和规律并加以合理利用，才能获得较好的拟合效果。

4.1 常用插值方法介绍

通常情况下地质勘探线的布置要考虑到地质构造、矿藏赋存、地貌、水文等情况，因此多数取样点的分布是不均匀的，即使较为均匀其密度往往不能满足建模要求。如何利用这些已知点内插出未知点的数据是建模过程中必须完成的工作。常用作表面建模数据内插的方法有线性内插、克里金法(Kringing)、距离幂反比法、方位加权拟合法、趋势面拟合等。

4.1.1 线性内插[10]

线性内插是首先使用最靠近查知点的三个已知点数据确定一个平面，继而求出内插点的高程的方法。基于 TIN 的内插广泛采用这种方法。

设所求的函数形式为

$$Z = a_0 + a_1 x + a_2 y$$

参数 a_0, a_1, a_2 可以根据三个已知参考点如 $P_1(x_1, y_1, z_1), P_2(x_2, y_2, z_2), P_3(x_3, y_3, z_3)$ 计算求得。结算三个参数可以根据式(4-1)进行严密计算：

$$\begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & x_1 & y_1 \\ 1 & x_2 & y_2 \\ 1 & x_3 & y_3 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ z_3 \end{bmatrix} \tag{4-1}$$

但是当三个参考点所过构成的几何形状趋近于一条直线时，这种严密计算会出现不稳定的解，因此宜采用双线性内插法。如图 4.1 所示，根据三个已知参考点 (A, B, C) 双线性内插点 $p(x_p, y_p, z_p)$ 高程的计算方法是：

$$z_l = z_A + (z_B - z_A)(x_l - x_A)/(x_B - x_A)$$
$$z_r = z_A + (z_C - z_A)(x_r - x_A)/(x_C - x_A)$$
$$z_p = z_l + (z_r - z_l)(x_p - x_l)/(x_r - x_l)$$

其中 $y_p = y_l = y_r$，点 l,r 分别位于直线 AB 和 AC 上。这种方法可以保证稳定可靠的解。

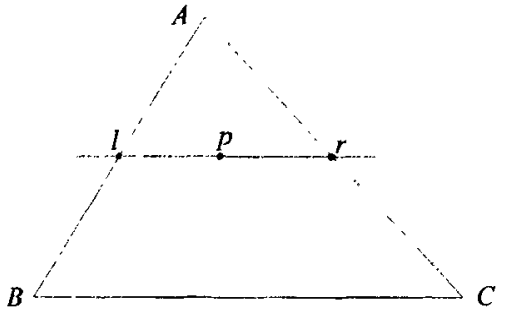


图 4.1 基于三角形的线性内插

Fig4.1 linear interpolation based on triangle

线性内插的优缺点：

1．优点

① 方法简单，编程容易，计算速度快；

2．缺点

① 线性内插的结果是由三角形的三个点确定的平面。一般钻孔数据的间距较大，用线性内插的方法会得到很大的平面，不符合地层发育的情况；

② 外推能力差；

4.1.2 克里金法(Kringing)

克里金插值是利用变异函数所揭示地质变量的空间关系进行最优无偏插值。设未知网络的区域变量真值为 Z，其估计值为 Z_i，通过该网络影响范围内的几个信息点的值 $Z(X_i)(i=1,2\cdots n)$ 线性组合得到 Z_i；

$$Z_i = \sum_i^n \lambda_i Z(X_i)$$

其中样本 $Z(X_i)$ 的权系数 λ_i 由克里金方程组求得。

克里金方法的优缺点：

1．优点

① 充分考虑了区域化变量的空间变化特征，理论和误差分析严谨；

② 克里金方法是无偏最优的，给出明确的参估半径(变程)；

2．缺点

① 计算量大，程序复杂；

② 精度取决于理论半变异函数准确程度，在样本数据少时，无法确定变异函数，该方法不可用；

③外推能力差；

4.1.3 距离幂次反比法

距离幂次反比法是用被估块段周围一定距离内的样品作无偏线性插值。即

$$Z^* = \div\sum_{i=1}^{m}\lambda_i z_i$$

$$\lambda_i = \frac{d_i^{n}}{\sum_{i=1}^{m}\frac{1}{d_i^{n}}}$$

λ_i——第 i 个参估点的权系数；

Z^*——待估点的值；

d_i——第 i 个参估点到待估点的距离；

m——参估点的个数；

n——幂指数；

z_i——第 i 个参估点的的样本值。

距离幂次反比法的优缺点；

1．优点

①方法简单，编程容易，计算速度快；

②对煤层煤质指标估值时满足精度要求；

2．缺点

①权系不尽合理；

②理论上参估半径和幂指数的取值尚无定论；

③外推能力差；

4.1.4 方位距离加权拟合法

方位距离加权法是以待求点 M_0 为坐标原点建立坐标系，将象限进行 n_0 等分，从而将平面划分为 $4n_0$ 等分，在每一等分区内选取离 M_0 最近的点作为代表(如果在第 i 等分

中有已知点值的话），并记第 i 等分内离 M_0 最近的点为 M_i，则有：

$$E(M_0)=\sum_{i=1}^{4n_0}C_{0i}E(M_i)$$

其中：

$$C_{0i}=\frac{\frac{1}{r_{0i}^2}}{\sum_{i=1}^{n}\frac{1}{r_{0i}^2}}=\frac{\prod_{\substack{k=1\\k\neq i}}^{n}r_{0k}^2}{\sum_{j=1}^{n}\prod_{\substack{k=1\\k\neq j}}^{n}r_{0k}^2}$$

式中 r_{0k} 为 M_0 点到 M_k 点的距离。

1．优点

①方法简单，编程容易，计算速度快；

2．缺点

①已知数据分部不均匀时都结果的影响较大；

4.2 趋势面插值方法

传统的趋势面分析方法是通过回归分析原理，运用最小二乘法拟合一个非线性函数，实质是将多项式回归（非线性模型）模型转化为多元线性回归模型。趋势面通常把实际的地理曲面分解为趋势面和剩余面两部分，前者反映地理要素的宏观分布规律，属于确定性因素作用的结果；而后者则对应于微观局域，是随机因素影响的结果。趋势面分析的一个基本要求，就是所选择的趋势面模型应该是剩余值最小，而趋势值最大，这样才能保证足够的拟合精度。最先在曲面生成中使用移动曲面拟合方法的是Lancaster和Salkauskas[24]，后来Belytschko将其应用于无网格方法中[25]。

就数学原理和地学专业应用背景而言，趋势面和残差面具有不同的特点和性质。趋势面反映了区域性的变化规律，它受大范围内系统性因素的控制；残差曲面则反映了局部性的变化特点，这些特点受局部性因素和随机因素的控制。

用于计算趋势面的数学表达式有多项式函数和傅立叶级数之分。最常用的是多项式函数，下面介绍的也是这方面的内容。

4.2.1 趋势面拟合的一般形式

趋势面的一般形式为：

$$z=a_0+a_1x_1+a_2x_2+\cdots+a_px_p$$

设地层实际观测数据为

$Z_i(x_i, y_i)(i=1,2,\cdots n)$，趋势面拟合值为 $\hat{Z}_i(x_i, y_i)$，则有

$$Z_i(x_i, y_i) = \hat{Z}_i(x_i, y_i) + \varepsilon_i \tag{4-2-1}$$

(4-2-1)式中 ε_i 为残差。当(4-2-1)式中 (x_i, y_i) 变化时可以计算出每一个的点的趋势值和残差。令 $x_1 = x, x_2 = y, x_3 = x^2, x_4 = xy, x_5 = y^2, \cdots\cdots$ 则

$$\hat{z} = a_0 + a_1 x_1 + a_2 x_2 + \cdots + a_p x_p = AX \tag{4-2-2}$$

其残差平方和为 $\Omega = \sum_{i=1}^{n}[z_i - \hat{z}_i]^2 = \sum_{i=1}^{n}[z_i - (a_0 + a_1 x_{1i} + \cdots + a_p x_{pi})]^2$

使 $\Omega \to \min$ 这就是在最小二乘法意义下的趋势曲面拟合。求 Ω 对 a_0，a_1，…，a_p 的偏导数，并令其等于 0，得方程组：

$$\begin{cases} na_0 + a_1\sum_{i=1}^{n} x_{1i} + \cdots + a_p\sum_{i=1}^{n} x_{pi} = \sum_{i=1}^{n} z_i \\ a_0\sum_{i=1}^{n} x_{1i} + a_1\sum_{i=1}^{n} x_{1i}x_{1i} + \cdots + a_p\sum_{i=1}^{n} x_{pi}x_{1i} = \sum_{i=1}^{n} x_{1i}z_i \\ \cdots\cdots \\ a_0\sum_{i=1}^{n} x_{pi} + a_1\sum_{i=1}^{n} x_{1i}x_{pi} + \cdots + a_p\sum_{i=1}^{n} x_{pi}x_{pi} = \sum_{i=1}^{n} x_{pi}z_i \end{cases} \tag{4-2-3}$$

用矩阵形式表示

$$X = \begin{bmatrix} 1 & x_{11} & x_{21} & \cdots & x_{p1} \\ 1 & x_{12} & x_{22} & \cdots & x_{p2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & x_{1n} & x_{2n} & \cdots & x_{pn} \end{bmatrix} \quad Z = \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ \vdots \\ z_n \end{bmatrix} \quad A = \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ \vdots \\ a_p \end{bmatrix}$$

则（4-2-3）式变为

$$X^{\mathrm{T}}XA = X^{T}Z$$

以二次趋势面模型

$z = a_0 + a_1 x + a_2 y + a_3 x^2 + a_4 xy + a_5 y^2$ 为例，其矩阵形式为：

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & \cdots & 1 \\ x_1 & x_2 & \cdots & x_n \\ y_1 & y_2 & \cdots & y_n \\ x_1^2 & x_2^2 & \cdots & x_n^2 \\ x_1y_1 & x_2y_2 & \cdots & x_ny_n \\ y_1^2 & y_2^2 & \cdots & y_n^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & x_1 & y_1 & x_1^2 & x_1y_1 & y_1^2 \\ 1 & x_2 & y_2 & x_2^2 & x_2y_2 & y_2^2 \\ & & & & & \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ & & & & & \\ 1 & x_n & y_n & x_n^2 & x_ny_n & y_n^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ a_4 \\ a_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & \cdots & 1 \\ x_1 & x_2 & \cdots & x_n \\ y_1 & y_2 & \cdots & y_n \\ x_1^2 & x_2^2 & \cdots & x_n^2 \\ x_1y_1 & x_2y_2 & \cdots & x_ny_n \\ y_1^2 & y_2^2 & \cdots & y_n^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} z_0 \\ z_1 \\ \\ \vdots \\ \\ z_n \end{bmatrix}$$

上式计算可得　$A=(X^TX)^{-1}X^TZ$　(4-2-4)

将(4-2-4)式代入(4-2-2)式即可加密每一点的高程值。

在实际应用中，往往用次数低的趋势面逼近变化比较小的地理要素数据，用次数高的趋势面逼近起伏变化比较复杂的地理要素数据。次数低的趋势面使用起来比较方便，但具体到某点拟合较差；次数较高的趋势面只在观测点附近效果较好，而在外推和内插时则效果较差。

移动趋势面拟合是指在每一个未知点(x,y)处内插变量Z值时，利用某一范围内的数据按照趋势面拟合的方法计算内插值。

4.2.2 影响区域的决定

在确定趋势面的次数后依据(4-2-2)式中需要解算的参数个数决定进入影响区域的源数据点的个数。一般按一定半径计算进入影响区域的源数据点的个数。如图 4.2，以待定点O为圆心，R为半径，当$S_{O-Pi}<R$时源数据点i进入计算队列。

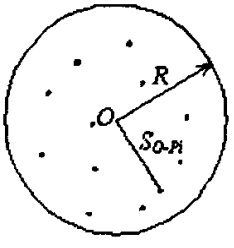


图 4.2 影响范围

Fig.4.2 the influence region

4.2.3 权的确定

在加权的移动趋势面拟合方法中权是指进入待定点影响区域内的数据的影响值。根据数据点距待定点远近不同，利用"距离越远对插值点的影响越小"的思想，可赋以适当的权值，权重可采用$P_i=1/S_i^2$或$P_i=[(R-S_i)/S_i]^2$或$p_i=e^{-\frac{S_i^2}{R^2}}$等形式（其中$S_i$为距离，

R 为采样圆半径)。

设进入影响范围的数据点的数量为 n 个则权阵 P 为：

$$P=\begin{bmatrix} P_1 & 0 & \cdots & \cdots & 0 \\ 0 & P_2 & & & \\ \vdots & & \ddots & & \\ \vdots & & & P_{n-1} & 0 \\ 0 & \cdots & \cdots & 0 & P_n \end{bmatrix}$$

则 $A=(X^T PX)^{-1}X^T PZ$ (4-2-5)

将(4-2-5)式代入式(4-2-2)即可得到加密点的高程。

4.2.4 趋势面模型的适度检验

①趋势面拟合适度的 R^2 检验

趋势面与实际面的拟合度系数 R^2 是测定回归模型拟合优度的重要指标。一般用变量 z 的总离差平方和 SS_T 中回归平方和 SS_R 所占的比重表示回归模型的拟合优度。

剩余平方和 $SS_D=\sum_{i=1}^{n}(z_i-\hat{z}_i)^2$ 回归平方和 $SS_R=\sum_{i=1}^{n}(\hat{z}_i-\bar{z})^2$

总离差平方和 $SS_T=SS_D+SS_R$

$R^2=\frac{SS_R}{SS_T}=1-\frac{SS_D}{SS_T}$ ，R^2 越大，趋势面的拟合优度就越高。

②趋势面拟合适度的显著性 F 检验

趋势面适度的 F 检验，是对趋势面回归模型整体的显著性检验。

$$F=\frac{SS_R/p}{SS_D/n-p-1}$$

在显著性水平 α 下，查 F 分布表得 F_α，若计算的 F 值大于临界值 F_α，则认为趋势面方程显著；反之则不显著[26]。

在计算过程中可建立 F 分布表字典，使程序能自动实现对模型显著性的判断。

4.2.5 加权的移动趋势面拟合流程图

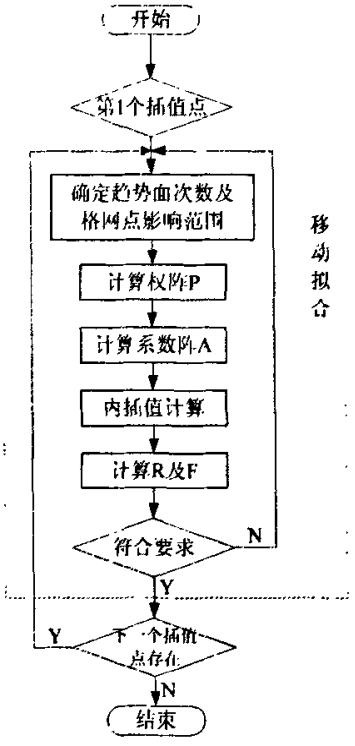


图 4.3 加权移动趋势面拟合流程图

Fig.4.3 the fitting flow chart of weighted technology of moving trend surface

4.2.6 加权的移动趋势面拟合过程

1、对第 n 个点确定趋势面次数及进入影响范围点的个数。

2、计算权阵 P 及系数矩阵 A。

3、插值计算及 R 与 F 值计算。

4、如果 R 与 F 值符合要求则执行第 5 步，否则返回第 1 步调整趋势面次数及进入影响范围点的个数。

5、对第 $n+1$ 个点重复以上过程。

4.2.7 应用实例

利用某矿区的 66 个钻孔数据的某煤层底板高进行了实验。表 4.1 为样本数据，表 4.3 中利用加权移动趋势面拟合时定权方式为 $P_i = 1/S_i^2$；为保证线性方程组有解，二次拟合限定进入范围的点数为 9 个；三次拟合限定进入范围的点数 12 个。

表 4.1 样本数据

Tab.4.1 the sample data

X	Y	H	X	Y	H	X	Y	H
80209.63	91703.20	956.98	81917.10	97786.16	967.51	78673.26	90322.21	938.77
79798.56	91973.26	950.06	79858.95	90724.38	951.07	79712.73	89615.79	940.16
80627.12	91412.42	959.87	79653.61	90865.93	949.95	79506.13	89756.32	943.11
79380.10	92263.47	946.42	79237.65	91144.34	944.14	79919.96	89475.54	940.22
81455.52	90851.87	962.73	80273.22	90444.13	951.97	81335.26	93349.48	966.80
81010.47	91123.55	959.11	80067.82	90586.41	951.34	80506.95	93910.06	958.80
79932.28	91277.89	954.17	78820.62	91428.42	938.62	82163.64	92790.67	981.94
79518.96	91558.97	948.06	80481.94	90306.38	952.50	81838.87	90563.00	960.60
80346.76	90998.32	956.09	83866.85	98883.84	965.69	78807.39	89626.08	940.67
79104.02	91839.31	943.18	83037.96	99444.45	963.11	78393.37	89905.80	936.95
80760.98	90718.01	958.49	82209.14	100003.91	959.68	79432.41	89201.36	939.21
81175.17	90437.68	958.51	84157.98	101101.64	957.45	79226.11	89342.87	944.17
78527.77	89210.96	940.46	80773.55	92521.41	956.13	79846.71	88920.88	939.11
78943.73	88930.87	944.58	83329.40	101661.31	954.83	79640.14	89061.48	938.62
79359.95	88647.54	937.31	82500.78	102222.40	952.52	80054.78	88781.43	940.46
79764.89	88360.69	937.40	79944.90	93082.08	954.03	82408.58	94977.06	984.14
78798.36	87820.28	939.01	81601.95	91960.83	965.72	78238.54	86988.17	931.98
79627.72	87257.96	938.76	79578.52	90309.91	945.92	79068.17	86428.07	934.08
81625.92	95566.84	979.13	79372.78	90451.96	946.50	79897.67	85868.68	939.36
80797.31	96128.19	982.11	78953.67	90737.38	940.60	82746.56	97225.94	972.05
79298.53	89895.97	944.04	79992.61	90029.45	942.36	80200.88	89890.79	942.59
79093.02	90037.29	944.09	79786.38	90170.77	944.60	78543.11	91012.95	936.85

表 4.2 整体趋势面拟合的适度检验表

Tab.4.2 the moderation examination table of the whole trend surface fitting

	R^2	F	SS_D	SS_R
2 次趋势面	0.499	12.120	2.9×10^7	2.9×10^7
3 次趋势面	0.498	12.120	5.5×10^7	5.5×10^7

从表 4.2 中可以看到，二次趋势面判定系数 $R_2^2=0.499$，三次趋势面判定系数 $R_3^2=0.498$，可见二次趋势面和三次趋势面的拟合程度太低，达不到实用的程度。讨论显著性也就失去了意义。这也证明如果离散数据较多且形状复杂时，单纯用一个函数进行整体拟合是不合理的。

表 4.3 移动趋势面拟合的适度检验表

Tab.4.3 the moderation examination table of the moving trend surface fitting

	R^2	F	SS_D	SS_R
2 次移动趋势面	0.994	551.566	62.40	10108.06
3 次移动趋势面	0.995	637.324	55.25	10356.98

从表 4.3 中可以看到，二次趋势面判定系数 $R_2^2=0.994$，三次趋势面判定系数 $R_3^2=0.995$，可见二次趋势面模型和三次趋势面模型的拟合程度都较高，并且差别不大。

在置信水平 $\alpha=0.05$ 下，查 F 分布表得：

$F_{2\alpha}=F_{(0.05)}(5,3)=9.01$　　$F_{3\alpha}=F_{(0.05)}(9,2)=19.4$，

显然 $F_2>F_{2\alpha}$，$F_3>F_{3\alpha}$。可见二次趋势面和三次趋势面的回归模型都较显著。但是三次趋势面需要用到 12 个参数，计算过程较为复杂。所以用二次趋势面较为合适。

表 4.4 移动趋势面拟合误差

Tab.4.4 the fitting error of the moving trend surface

	二次移动拟合(m)	三次移动拟合(m)
$\lvert\max \Delta h\rvert$	2.90	2.78
$\lvert\min \Delta h\rvert$	0.04	0.02

表 4.4 为移动趋势面拟合得到的最大和最小误差，虽然拟合精度较高但不能保证每一个样本点内插值的精度。在文献[27]中提到：加权模型中误差项的数学期望为 0 即 $R^2 == 1 \quad \Delta H == 0$，可见通过加权移动拟合的改进可以克服移动趋势面拟合模型的缺点。

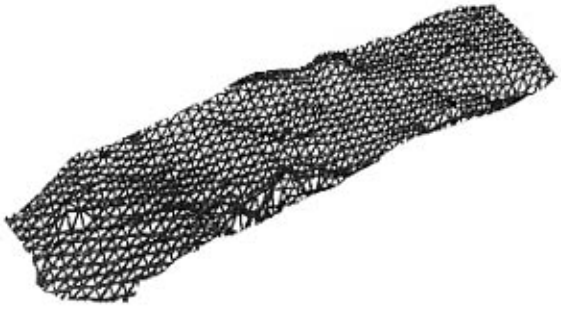


图 4.4 移动趋势面拟合

Fig.4.4 the moving trend surface fitting

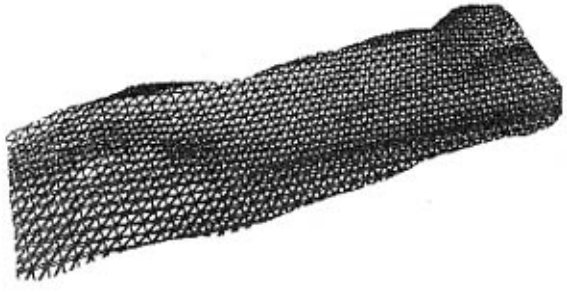


图 4.5 加权的移动趋势面拟合

Fig.4.5 the weighted technology of moving trend surface fitting

图 4.4 和图 4.5 分别是用移动趋势面拟合、加权移动趋势面拟合的结果。结合表 2、表 3 可以发现，图 4.4 的优点是拟合程度较高，较小的地层变形得以体现，缺点是表面凹凸不平，不符合地层构造的一般规律。图 4.5 在图 4.4 的基础上加权得到，在保证拟合精度的同时，较小的地层变形得以体现，而且得到的图形平滑流畅，符合地层构造的

一般规律。

4.2.8 加权趋势面拟合的优缺点

加权移动趋势面拟合方法其优点在于：

① 通过限制进入拟合范围的源数据点，能够使源数据的微小变形得以表现。

② 应用加权的方法不需要进行分段（分块）拟合，且保证了图形的光滑。

③ 通过趋势面次数与权的合理搭配得到更高的拟合精度。

缺点在于：

① 权的确定具有不确定性，需要多次选择找到合适的定权方式。

第五章 三维地层模型的确定和拟合方法选择

在矿山开采前获取地层数据的唯一办法就是打钻孔获取地层岩芯，然后根据钻孔的数据和地质工程师的经验对地层进行划分，形成合理的层面，确定地层的沉积和分布情况，然后通过对数据的插值和对地层进行拟合得到地层的三维描述，实现三维计算机模拟。通常由于钻孔的成本过高不能在矿区内打太多的钻孔，所以选择合适的三维模型和拟合方法是建立三维地层模型的关键。

5.1 格网虚拟柱三维地层模型

本文提出一种格网虚拟柱模型。该方法能够充分利用钻孔数据，同时可方便的利用开采中揭露的地质构造修整三维模型，对模型中的每一个点可以通过实时内插的方法查询三维信息。

5.1.1 格网虚拟柱模型的基本原理

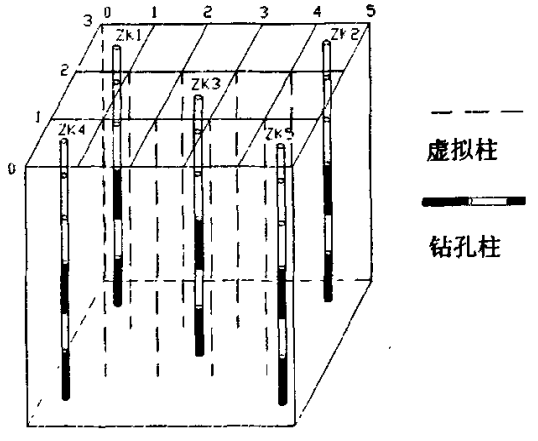


图 5.1 格网虚拟柱模

Fig.5.1 The model grid and fictitious column

如图5.1，格网虚拟柱模型在平面上表现为规则格网（Grid）结构，在Grid结构的交叉点上定义虚拟柱，虚拟柱的信息由钻孔柱加密或有等高线数据内插得到。

5.1.2 格网虚拟柱模型的三维地层建模

1．地表建模

由于地貌形状千变万化，在生成地表 DEM 时不但用到地表高程数据以及钻孔的孔

口坐标而且要考虑地表的断裂线，例如：坎、河流。因此在构建地表 DEM 时选用了基于约束条件的 Delaunay 三角网生成方法。

2．地层建模与虚拟柱的内插

首先根据建模区域的标准柱状图将钻孔柱状图标准化和地层统一编码。编码的原则为同一钻孔的不同地层具有不同的编码，不同钻孔相同的地层具有相同的编码。然后利用钻孔孔口位置的平面坐标生成地层的TIN结构。TIN结构可最大限度的保留了地层的走向趋势，是格网虚拟柱模型的基础。由于不涉及断裂线等因素，用传统的方法构建TIN结构即可。

3．基于格网虚拟柱模型的地质体显示

任何一个地质体都可以由上顶面、下底面、侧面构成，对地质体进行平面切割时应根据切割面与虚拟柱的关系寻找相关的虚拟柱拟合出地质体的各个面。利用这一模型对地质体进行切割建立地质体模型可明显的看到不同层位的地层信息。

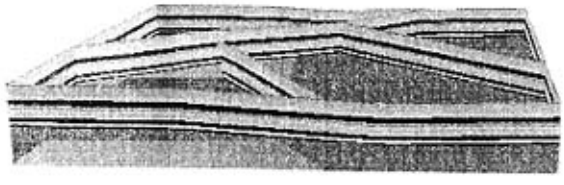


图5.2 切割地质体形成的立体图

Fig.5.2 The generated 3D geo-fence based on clipping action

5.2 格网虚拟柱模型的数据内插

在现实生产中通常得到的钻孔数量较少，如何利用较少的数据得到较高的精度是三维地质模型实现的关键。在地表 DEM 建模中常用到利用 TIN 线性结构内插的方法，在地层拟合中由于钻孔数量有限利用 TIN 结构线性内插会形成较大的平面，这不符合地层发育的规律。本文中设计了以下的算法针。从地表开始，按照地层的分部情况对每一层计算一次得到每一个虚拟柱的数据。

5.2.1 TIN 结构线性内插生成 Grid 结构

利用钻孔的孔口坐标生成相应的TIN结构，对利用生成的TIN结构内插生成Grid结构。在各种方法中如何确定格网结点所在的三角形是算法中费时较多的过程，利用扫描线算法可以较好的解决这个问题[28]。

依次取三角网中的每一个三角形为研究对象，然后分别计算出各个三角形内所有格网节点的属性值，这也就完成了从三角网到规则格网的构建过程。具体算法实现过程中，

在三角形内计算格网节点坐标时，采用了类似扫描线填充的方法；在内插格网节点属性值时，其参数A，B，C只与三角形顶点坐标有与关，因此同一个三角形，参数只需计算一次，其内部所有格网节点的坐标值代入式(5-2-2)即可。

$$\begin{aligned} A &= (yb-ya)(hc-ha)-(yc-ya)(hb-ha) \\ B &= (hb-ha)(xc-xa)-(hc-ha)(xb-xa) \\ C &= (xb-xa)(yc-ya)-(xc-xa)(yb-ya) \end{aligned} \qquad (5\text{-}2\text{-}1)$$

$$h = ha-[A(x-xa)+B(y-ya)]/C \qquad (5\text{-}2\text{-}2)$$

根据上述基本思想，现将三角网生成规则格网的算法描述如下:

(1) 依次取出三角网中三角形ΔABC，根据其三个顶点A、B、C的坐标，按式(5-2-1)计算出参数A、B、C，并计算出顶点X的最小、最大值:

$x_{min}=min(xa,xb,xc)$, $x_{max}=max(xa,xb,xc)$

(2) 根据该三角形顶点x_{min}、x_{max}以及格网间距kgap，计算出它在格网行方向的起始行X_{min}和终止行X_{max}，即找到行方向依次要扫描的格网节点坐标范围。

(3) 从起始行到终止行范围内依次取出行坐标X_i，构成水平扫描线x_i，将它与三角形的三条边分别求交，求得2个或3个交点(交点数目为3时表示该扫描线正好与三角形顶点相交)

(4) 在求得的交点中找到最小值x_{min}与x_{max}，并根据格网间距离求出在列方向的起始列$Ymin$和终$Ymax$即找到列方向要求扫描的格网节点$Ymin, Ymin+1 \cdots Ymax$

(5) 应用式(5-2-2)，依次计算Y_i行内各格网节点的高程值。

(6) 回到步骤(3)，计算Y_i+1行内格网节点的高程值，直到[$Ymin$，$Ymax$]内的值全部完成。

(7) 回到步骤(1)重复执行，直至该三角网网所有的三角形都处理完毕。

可以看出，上述算法不需要任何附加的三角形搜索时间，因此效率非常高。

在这种算法中，当三角形的内角较小时，内插结果可能出现异常值。实验证明当三角形的最小内角大于5度时一般不会出现异常值。

5.2.2 加权移动趋势面结合TIN结构内插

由于TIN结构可以较好的保留地层发育的情况，趋势面拟合方法具有较好的延展性，如果可以把TIN结构与趋势面拟合方法相结合可以取得较好的效果。

以二次趋势面为例：

$z = a_0 + a_1x + a_2y + a_3x^2 + a_4xy + a_5y^2$ 中含有六个参数而一个三角形中只有三个点，为了把三角形三个点的数据应用到趋势面中可以对三角形做一定处理。

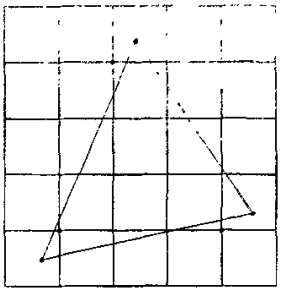


图5.3 TIN结构结合趋势面拟合的方法

Fig5.3 TIN and trend surface integrate

如图 5.3 把三角形三个端点的钻孔数据赋予给距离它最近的虚拟柱，这样就得到了六了钻孔的信息，把这六个钻孔数据代入到 4.2 节提到的移动加权趋势面拟合的方法中，结合 5.2.1 节中提到的扫描线算法计算这个三角形中每一个虚拟柱的信息。

这种方法的优点是：较好的保留了 TIN 结构的信息，且得到的曲面具有较好的延展性。缺点是：给最近的虚拟柱赋值不符合实际，但在地层倾角不大的情况下，对结果的影响并不大。

5.2.3 加权移动趋势面拟合

利用在 4.2 节中提到移动加权趋势面拟合的方法也是得到地层数据的可行之路。

5.3 小结

本章主要提出了格网虚拟柱模型的三维地层模型，同时描述了模型中地层数据内插的三种方法。由于原始钻孔数量的限制，单纯的利用一种方法难以适合所有的地层发育情况，因此在实际的应用中应该在三种算法中寻找最合适的算法。

第六章 等高线反演算法的实现

利用钻孔数据对地层进行合理的分层，确定地层的空间分布，然后通过数据插值和拟合得到地层的三维描述，从而建立地质体的三维模型。此方法虽然理论上可行，但是需要在采区内打较多的钻井，耗费大量的人力、财力。由于条件限制，在一个采区内打大量的钻井，这对于我国的大多数煤矿而言是行不通的。不过我国矿山工作者已经作了详细的工作，利用钻孔资料和开采中揭露的数据对矿区的煤层底板等高线图进行了大范围的绘制，每个矿区都有了详细的煤层底板等高线图，所以三维地层数据要根据现在煤矿的具体情况，利用已有的煤层底板等高线数据校正格网虚拟柱模型中的虚拟钻孔数据。

6.1 等高线预处理

网格化之前应该做以下的工作：①对闭合的等值线，应将首尾两点连接起来；②在等值线图录入时断开的同一条等值线需要将断开处连接；③要给等值线图上的每条等值线赋予一定的高程值。

6.2 等高线的离散[29]

在计算机中等高线数据一般用两种方法存储：一种是用坐标序列组成，点与点之间用直线连接。这种方法的优点是显示效率高，刷新速度快；缺点是点数据量大。另一种是用较少的点，点与点之间用曲线连接。这种方法的优点是点的数量少，缺点是显示效率低，刷新速度慢。不论用那一种存储方式，在等高线生成 DEM 前都要对等高线上的点进行离散。

在将等高线离散成数据点时，在等高线较密和曲率大的地方应该适当的将数据点多取一些，在等高线稀疏和曲率较小的地方数据点可以少一些。这样形成的三角网能够较好的反映实际地形的变化。在将等高线离散成数据点时，由于用等高线生成格网数据的精度要求不同，对等高线离散时所样点的间隔和要求也有不同。等高线离散成数据点时，点与点之间的距离可以用位于同一条等高线上的三个点所形成的夹角值的大小来判断，其中夹角的计算方法如下：

设等高线上相邻三点组成的三角形边长为 a,b,c，则根据余弦定理得

$$\cos B = \frac{a^2 + c^2 - b^2}{2ac}$$

在不同用途和精度的三角网中，$\cos B$的取值可以有不同的标准，现在假定$\cos B$的值定为m,搜索点时所用的搜索距离定为s，那么等高线离散算法的基本过程如下：

确定等高线上的一点B(当等高线为封闭曲线时，点可以取等高线上的任意一点，当等高线为不封闭曲线时，点不可以取等高线上的两个端点)。以点 B 为起点向两端以距离 s 扩展，可以确定两个点A,C。利用余弦定理判断$\cos B$的值小于 m 时，则$A.C$两点为扩展点，当$\cos B$的值大于m时，则A,C两点不可用以距离$s/2$(这个数可以根据精度要求而有不同的取值)扩展，如果后扩展的两点符合要求，则这两点为扩展点。

以新扩展的两点为起始点向外扩展，然后用余弦定理判断新点是否符合要求。

6.3 常用的等高线内插算法

通常选一类较简单的函数如代数多项式或分段多项式使得$P(x_i)=f(x_i)$对$i=1,2,\cdots,n$成立。这里$P(x_i)$就是我们的插值函数，其中$x_1,x_2,x_3\cdots x_n$称为插值节点。从常用的一阶、二阶插值方法有线性插值（两点插值）、抛物线插值（三点插值）、圆弧插值（三点插值）等[30]。

常用的等高线内插算法主要有：等高线生成 TIN、剖面内插和的单点内插三种。

6.3.1 等高线生成 TIN

利用离散后的高程点按照第 3.2 节提到的 TIN 模型生成的规则生成初使的 TIN 模型，由于数据沿等高线分布，常会出现两种不合理的三角形，第一种为三角形边穿越了等高线，第二种为三角形的三个点在一条等高线上（平三角形）。这两种情况都需要处理。

1．三角形边穿越等高线的处理[31]

穿越等高线的三角形处理基本思想是把中间等高线上的点作为约束边对穿越等高线的三角形和相邻三角形按照含约束条件的 D-三角形构网原则从新生成三角网。

（1）历遍所有三角形，如果三角形中有两个端点的高差大于一倍等高距则这个三角形穿越了等高线。

（2）寻找这个三角形的相邻三角形，生成这些三角形的特征凸包。

（3）寻找位于中间等高线上的两个点，作为约束边生成特征凸包的约束三角形。

2．平三角形的处理[29]

平三角形的处理处理的基本思想为交换对角线或内插点。

（1）历遍所有的三角形，如果三角形三个端点的高程值相等则为平三角形。

（2）寻找该三角形每条边的相邻三角形，对每一条边的相邻三角形组成的四边形如果该四边形是凸四边形，则如果交换对角线后不与等高线相交则交换对角线，否则判断剩余的两条边。

（3）如果没有实现交换，则寻找相邻三角形组成的四边形是凹四边形的边，在公共边中内插点增加两个三角形。

由等高线的离散点生成TIN后，利用5.2节提到的算法计算格网交点上虚拟柱的值。

6.3.2 剖分内插[32]

剖分内插通常使用一类较简单的函数如代数多项式或分段多项式，使的 $P(x_i = f(x_i))$ 对 $i=1,2,\cdots,n$ 成立。这里的 $P(x)$ 就是我们的插值函数，其中 $x_1,x_2,\cdots x_n$ 称为插值节点。下面介绍几个常用的插值算法。

1．线性插值（两点插值）

已知两点坐标为 $A(x_a,y_a,h_a)$、$B(x_b,y_b,h_b)$ 及待插值点 $C(x_c,y_c)$ 和 S_{AC}、S_{BC}，求 h_c；

$$h_c=\frac{S_{BC}}{S_{AC}-S_{BC}}h_a+\frac{S_{AC}}{S_{BC}-S_{AC}}h_b$$

2．抛物线插值（三点插值）

已知三点坐标为 $A(x_a,y_a,h_a)$、$B(x_b,y_b,h_b)$、$C(x_c,y_c,h_c)$ 及待插值点 $D(x_d,y_d)$ 和 S_{AD}、S_{BD}、S_{CD} 求 h_d；

$$h_d=\frac{S_{BD}S_{CD}}{(S_{AD}-S_{BD})(S_{AD}-S_{CD})}h_a$$
$$+\frac{S_{AD}S_{CD}}{(S_{BD}-S_{AD})(S_{BD}-S_{CD})}h_b+\frac{S_{AD}S_{BD}}{(S_{CD}-S_{AD})(S_{CD}-S_{BD})}h_c$$

3．圆弧插值（三点插值）

已知三点坐标为 $A(x_a,y_a,h_a)$、$B(x_b,y_b,h_b)$、$C(x_c,y_c,h_c)$ 及待插值点 $D(x_d,y_d)$ 和

S_{AD}、S_{BD}、S_{CD}求h_d；

先求出由（S_{AD}、h_a）、（S_{BD}、h_b）、（S_{CD}、h_c）决定的圆，再求出圆在点D上的h_d值。由于h_d可能有两个，一般用所生成圆的凸凹来区分。

待插值点通常有两种情况，即待插值点在等高线线上和待定点不再在等高线上线上。若待插值点位于等高线上，则该点的高程之就等于等高线的高程值；若待插值点不在等高线上，如图6.1示，则从点$P(x.y)$出发在0°~180°的范围内每隔一定角度引一条

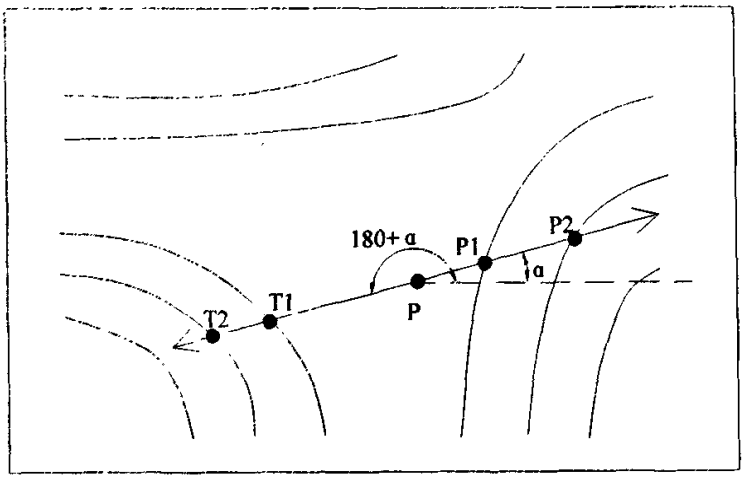


图 6.1 多剖面插值算法

Fig 6.1 multisection interpolation algorithm

角度为α的射线，求出这条射线与等值线的交点（每条射线最多取两个点），记录为$PT_1(S_1,h_{p1})$，$PT_2(S_2,h_{p2})$其中S_1,S_2表示PT_1,PT_2到P点的距离，且$S_1 \le S_2$。h_{p1},h_{p2}表示PT_1,PT_2的高程。交点的个数用p表示。再向这个方向的反方向引一条角度位$\alpha+180°$的射线，求这条射线与等值线的交点记录为$NT_1(S_1',h_{t1})$，$NT_2(S_2',h_{t2})$其中S_1',S_2'表示NT_1,NT_2到P点的距离的负数，且$S_1' \ge S_2'$。h_{t1},h_{t2}表示NT_1,NT_2的高程，交点数目用n表示。完成上面两个方向的取点后就完成了剖面线的取点，利用所取得的几个点就可以计算出待插值点的高程值。

为了叙述方便先说明两类三点插值。

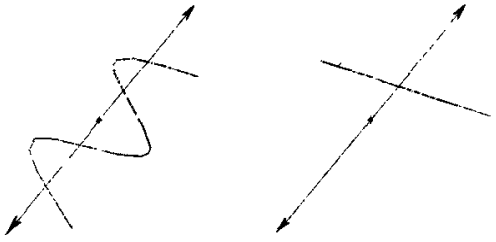
(1) 第一类三点插值：交点为NT_1、PT_1、PT_2，待插值点在NT_1、PT_1之间，h_P用三点插值求出，权值

$$P=[(3.0/S_1)/|S_1'|]*\min[(S_1+|S_1'|)/(S_2+S_1),(S_2-S_1)/(S_1+|S_1'|)]$$

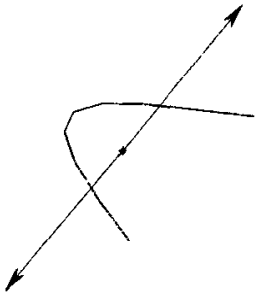
(2) 第二类三点插值：交点为 NT_1、NT_2、PT_1，待插值点在 NT_2、PT_1 之间，h_P 用三点插值求出，权值

$$P=[(3.0/S_1)/|S_1'|]*\min[(|S_1'|+S_1)/(S_1'-S_2'),(S_1'-S_2')/(|S_1'|+S_1)]$$

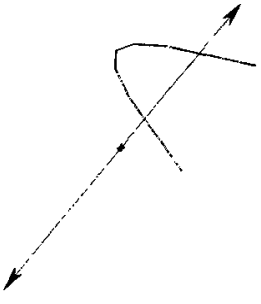
剖面线与等高线的交点数目可能出现的情况较多，须分别处理如下。



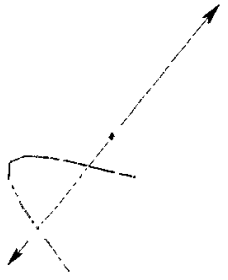
（1）所有点的高程相等或点数小于两个，$P=0$；否则按以下的式子计算。



（2）$n=1,p=1$，高程值用线性插值求解，$P=1/(S_1*|S_1'|)$。

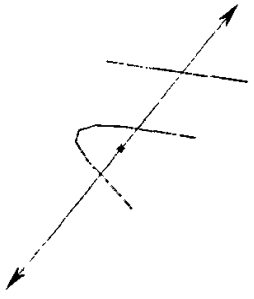


（3）$n=0,p=2$，高程值用线性插值求解，$P=1/(S_1*S_2)$。

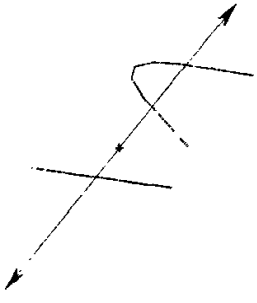


（4）$n=2, p=0$，高程值用线性插值求解，$P=1/(S_1' * S_2')$。

（5）$n=1, p=2$，按下列情况讨论。



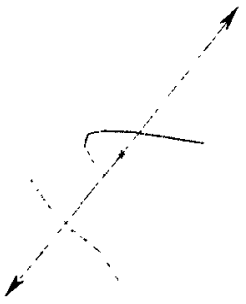
① $h_{i1}=h_{p1}$ 且 $h_{p1}\neq h_{p2}$，h_1, P_1 采用第一类三点插值，h_2 用 PT_1, PT_2 线性插值求解，$P_2=1/(S_1 * S_2)$，$P=P_1+P_2$，$h=P_1/(P_1+P_2)*h_1+P_2/(P_1+P_2)*h_2$。



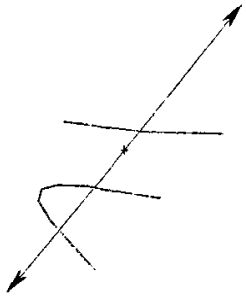
② $h_{i1}\neq h_{p1}$ 且 $h_{p1}=h_{p2}$，h_1, P_1 采用第一类三点插值，h_2 用 NT_1, PT_1 线性插值求解，$P_2=1/(S_1 * |S_1|)$，$P=P_1+P_2$，$h=P_1/(P_1+P_2)*h_1+P_2/(P_1+P_2)*h_2$。

③ 其余情况，h, P 采用第一类三点插值求解。

（6）$n=2, p=1$，按下列情况讨论。



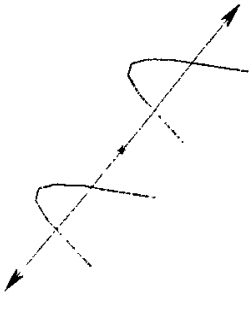
① $h_{t1}=h_{p1}$且$h_{t1}\neq h_{t2}$，h_1,P_1采用第二类三点插值，h_2用NT_1,NT_2线性插值求解，$P_2=1/(S_1'*S_2')$，$P=P_1+P_2$，$h=P_1/(P_1+P_2)*h_1+P_2/(P_1+P_2)*h_2$。



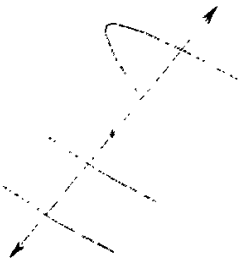
② $h_{t1}\neq h_{p1}$且$h_{t1}=h_{t2}$，h_1,P_1采用第二类三点插值，h_2用NT_1,NT_2线性插值求解，$P_2=1/(S_1*|S_1'|)$，$P=P_1+P_2$，$h=P_1/(P_1+P_2)*h_1+P_2/(P_1+P_2)*h_2$。

③ 其余情况，h,P采用第二类三点插值求解。

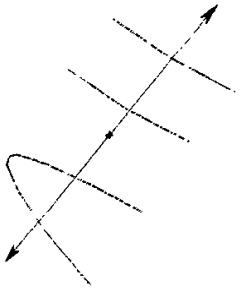
（7）$n=2,p=2$，按下列情况讨论。



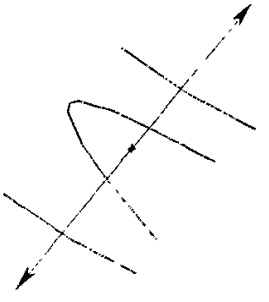
① $h_{t1}=h_{t2}$、$h_{p1}\neq h_{t1}$且$h_{p1}=h_{p2}$，h用NT_1,PT_1线性内插求解，$P=(-1/S_1)/|S_1'|$。



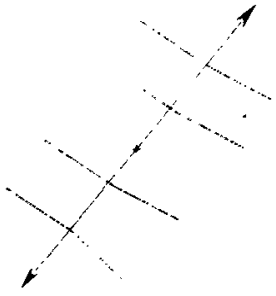
② $h_{t1} \neq h_{t2}$、$h_{p1} \neq h_{t1}$且$h_{p1} = h_{p2}$，h，P 用NT_1, PT_1, PT_2三点，采用第一类三点插值求解。



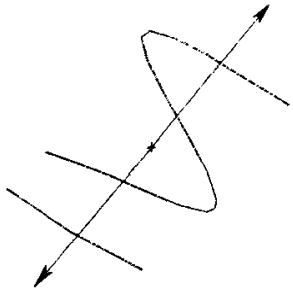
③ $h_{t1} = h_{t2}$、$h_{p1} \neq h_{t1}$且$h_{p1} \neq h_{p2}$，h，P 用NT_1, NT_2, PT_1三点，采用第二类三点插值求解



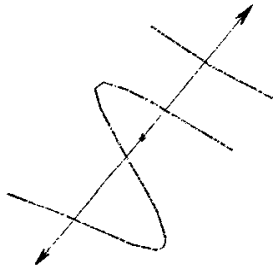
④ $h_{t1} \neq h_{t2}$、$h_{p1} = h_{t1}$ $h_{p1} \neq h_{p2}$且，h_1，P_1用NT_1, NT_2, PT_1三点，采用第二类三点插值求解，h_2，P_2用$NT_1.PT_1, PT_2$三点，采用第一类三点插值求解，$P = P_1 + P_2$，$h = P_1/(P_1 + P_2) * h_1 + P_2/(P_1 + P_2) * h_2$。



⑤ $h_{l1} \neq h_{l2}$、$h_{p1} \neq h_{l1}$且$h_{p1} \neq h_{p2}$，h_1，P_1用NT_1, NT_2, PT_1三点，采用第二类三点插值求解，h_2，P_2用NT_1, PT_1, PT_2三点，采用第一类三点插值求解，$P = P_1 + P_2$，$h = P_1/(P_1 + P_2) * h_1 + P_2/(P_1 + P_2) * h_2$。



⑥ $h_{l1} = h_{l2}$、$h_{p1} = h_{l1}$且$h_{p1} \neq h_{p2}$，h_1，P_1用NT_1, PT_1, PT_2三点，采用第二类三点插值求解。



⑦ $h_{l1} \neq h_{l2}$、$h_{p1} = h_{l1}$且$h_{p1} = h_{p2}$，h_1，P_1用NT_1, NT_1, PT_1三点，采用第一类三点插值求解。

针对--个待定点，求出该点在多个剖面线上的高程值及值权值，利用权值对高程进行加权平均就得到该点的最终高程值。

6.3.3 单点内插法[33]

设某一网点 P 的坐标为$P(P_x, P_y)$，其取值邻域的确定要保证至少有两条等高线通

过。

计算步骤为：

（1）计算待插点近似高程 H'_p。由领域内已知数据点利用二次曲面计算网点 $P(P_x,P_y)$ 的近似高程，曲面方程为

$$Z(x,y)=\sum_{k=0}^{2}\sum_{l=0}^{k}a_{kl}x^{k-l}y^{l}$$

曲面方程系数的个数为 6 个，设邻域内的观测值个数为 N，当 $N>6$（N 不应超过 10）时，用最小二乘法确定系数 a_{kl} ski；当 $N<6$ 时，去掉二次项；当数据点为 3 个时，线形性内插法计算近似高程。

（2）进一步判断网点 $P(P_x,P_y)$ 与领域内高程的关系并利用张力样条函数连接领域内离散等高线数据点。由网点 P 向其领域内的等高线 R_1(高程为 H_1) 离散点间的弦线作垂线，设交点为 $K(K_x,K_y)$，根据曲线方程求出 K 从在 R_1 曲线上的相应位置 $K_0(K_{x0},K_{y0})$。

（3）找出最佳拟合曲面点，根据点 K_0、P 建立曲面方程，求出该直线与领域内所有等高线的交点 $K_j(K_{xj},K_{yj})$ $(j=1,2,\cdots,n)$，并找出是距离 PK_j 较小的 K'、K'' 及相应等高线 R'、R''，其高程为 H'、H''。

利用这一方法确定的最佳拟合曲面避免了曲面方程的病态情况.当 P_i 点位于拟合曲内时能够得到满意的结果.但如果待插网从落于拟合曲之外时.拟合效果就会出现不稳定。选取最佳拟合点时有关阀值得确定也比较困难。

6.4 等高线反演的数据结构与算法流程

本文针对等高线反演的过程设计了以下的计算流程。

(1) 由等高线生成离散点坐标；

(2) 建立离散点的拓扑关系；

(3) 求取格网点的高程；

(4) 校正已生成的虚拟柱。

等高线离散点数据用文本文件存储

文本文件的数据格式为：

地层编码，高程值，点的个数

x，y

……

x，y

end

地层编码，高程值，点的个数

x，y

……

x，y

end

用到的数据结构为：

```
typedef struct PPointHeadStruct          //等值线离散点数据结构头结构
{
  int StratumCoding;                     //地层编码
  int PointNum;                          //点的个数
  double CoorderX;                       //等高线的高程(m)
} PPointHeadStruct
typedef struct PPointStruct              //等值线离散点数据结构
{
  double CoorderX;                       //离散点X坐标(m)
  double CoorderY;                       //离散点Y坐标(m)
}PPointStruct
```

基于煤层底板等高线生成地层网格点高程值实现算法：

为了求取煤层顶底板网格点的高程值，首先建立等值线间的拓扑关系，寻找等值线所在的区域，然后在区域内求取点的高程值。

1．自动建立等值线拓朴关系的算法[34]

（1）寻找落在边界线上某线段（i,i+1）所有等值线的线头和线尾以及线段的起点和终点。

① 基本原理

已知边界直线段（i,i+1），两端点的坐标为：（x_i,y_i）和（x_{i+1},y_{i+1}），则其方程为：

$$y-y_i=\frac{y_{i+1}-y_i}{x_{i+1}-x_i}(x-x_i) \tag{6-4-1}$$

为了判断任一点（x,y）是否在此线段上，将式（6-4-1）改写为：

$$f=(y-y_i)*(x_{i+1}-x_i)-(y_{i+1}-y_i)*(x-x_i) \tag{6-4-2}$$

则点在线段上的条件为：

$$\begin{cases} |f|<\varepsilon \qquad \varepsilon>0\text{且较小} \\ \min(x_i,x_{i+1})\le x\le \max(x_i,x_{i+1}) \\ \min(y_i,y_{i+1})\le y\le \max(y_i,y_{i+1}) \end{cases} \tag{6-4-3}$$

若将等值线的线头或线尾点（x_k,y_k）代入式（6-4-2）中的x,y计算f值，如果满足式（6-4-3）的条件，则该线头或线尾落在这一边界线段上，否则没有落在该线段上。

② 算法

根据上述原理，写出查找边界（i,i+1）线段上的等值点的算法如下：

a．首先记录线段（i,i+1）的起点i，将该点的坐标（x,y,z）、点数、等值线序号、边界线段端点标志和此点在所有边界上端点和等值线点中的序号赋给记录点的数据结构。若端点不是等值线点，则点数为 1，等值线序号给定任一负数以便区别等值线点，边界线段端点标志设为 2，检索标志设为任一正值，点的序号暂时赋值为 0。

b．遍历所有等值线，逐一找出每一条等值线的线头和线尾坐标，将此两点坐标分别代入式（6-4-2）中计算，并按式（6-4-3）条件判断，若落在边界线段上，则记录该点。点数记录为等值线点数，点的标志若是线头设为 0，若是线尾设为 1，检索标志设为任一正值，点的序号暂时赋值为 0。

c．记录边界线段的终点i+1，具体同记录起点i。

通过上述方法即可找出落在某一边界线段上所有的等值线点和两个端点，在这种情况下，所找出的点还没有按顺序排列，而且在端点是等值线点的情况下，出现点的重复记录，这种重复包括上一线段的等值线点与端点的重复以及下一线段的等值线点与端点的重复，考虑到从第二边界线段开始不记录线段起点的情形，由此会出现 3 个重复点，所以为了排除重复点，首先对每一线段上检索到的点进行排列顺序。

（2）将边界线上等值线点及边界线段各端点排序。

算法如下：

a. 计算在边界(i,i+1)线段上各等值线点与起点 i 点的距离；

b. 根据与起点 i 的距离大小，由小到大排序，从而确定从端点 i 到端点 i+1 所有点的排列顺序；

c. 将边界线按顺序将每一线段上的等值线点和线段端点按 a、b 两个步骤全部排序，然后按顺序记录好各点，如果不是首条线段，则去掉边界线段起始点的记录，由此确定了在边界线上所有点的排列顺序。

（3）删除边界线上记录的重复点。

a. 找出边界线段端点是等值线点的情形并标记，然后删除此端点；

b. 找出由于边界线端点是等值线点而引起检索点重复的情形并作标记；

c. 删除重复的等值线点，并将没有重复点的等值线及端点按顺序建立一条边界线。

（4）检测边界方向，若为顺时针方向，则转换为逆时针方向。

（5）找出同一等值线线头与线尾在整个边界线点中的序号，即线头对应的线尾的序号，线尾对应着线头的序号。

（6）建立相邻等值线的拓朴关系区域。

2 基于等高线区域求取网格点高程值

将等高线生成等值线拓扑区域，根据任一点所在的区域，按照本文 6.3.2 节提到的算法计算格网点高程值。

本方法中关键问题是生成相邻等高线间的拓扑区域和求任一直线与曲线交点。一般来说，在计算机图形中曲线是由一系列小线段连结起来的折线，求任一直线与曲线的交点，实质上就是寻找直线与曲线中的哪一个折线段相交，然后求这两直线的交点。其方法如下：

（1）判断直线与曲线中的折线相交：

① 计算直线的两个端点与曲线上所有折线段端点的向量积，即

$$e_i = \begin{vmatrix} x_i - x_1 & y_i - y_1 \\ x_2 - x_i & y_2 - y_i \end{vmatrix}$$

② 若 $e_i = 0$，则折线端点即为直线与曲线的交点；

③ 若 $e_i \cdot e_{i+1} < 0$，则直线与（i,i+1）折线段相交；否则不是相交线段。

（2）计算交点坐标：

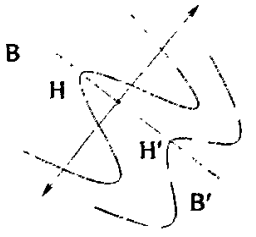
$$A_1 = y_2 - y_1 \qquad B_1 = -(x_2 - x_1) \qquad C_1 = -(y_2 - y_1)x_1 + (x_2 - x_1)y_1$$

$$A_2 = y_{i+1} - y_i \qquad B_2 = -(x_{i+1} - x_i) \qquad C_2 = -(y_{i+1} - y_i)x_i + (x_{i+1} - x_i)y_i$$

交点坐标：

$$x_0 = \frac{B_1C_2 - B_2C_1}{A_1B_2 - A_2B_1}, \quad y_0 = \frac{C_1A_2 - C_2A_1}{A_1B_2 - A_2B_1}$$

在上文 5.3.2 中提到的算法在以下情况下所取得的等高值不符合实际，需要做特殊处理。



通过待定点 P 做垂直于已知方向α的直线 BB'，求于 BB' 最近的两个条等高线的交点 HH'，用线性插值的方法计算 P 点的高程。

插值结束后利用获取的地层格网点高程值调整上下层的层厚，校正已生成的虚拟钻孔。

第七章 地层中断裂线的处理

7.1 断层的描述

地质构造是地球在漫长的演变过程中由于地壳变动而形成的当前地下形态。由于地壳运动，地层在某处发生断裂和显著的位移，形成断层。断层是地质构造中最常见也是最重要的，所以断层的建模将关系到能否正确形象的显示地层的构造。

7.1.1 断层要素

断层各个组成部分的名称叫断层要素。主要的断层要素有断层面、断盘和断距。

1．断层面及断层上盘、下盘：断层面的产状用走向、倾角及倾向表示。位于倾斜断层面之上的岩层称为断层上盘，简称上盘；位于倾斜断层面之下的岩层称为断层下盘，简称下盘。

2．断层线：断层面与地面的交线。

3．交面线：岩层层面与断层面的交线叫交面线。上盘岩层层面与断层面的交线称为上盘交面线；下盘岩层层面与断层面的交线称为下盘交面线。

4．断距：断层两盘相对错开的距离，称断距。断距有三种类型是常用的，它们是：真断距、地层断距和落差。

(1) 真断距：断层面上某一点，随着上、下盘相对位移而撕裂为两个点，两点之间的移动距离称为真断距。真断距代表两盘相对位移的总距离，又称为总断距。它同时又包含有方向，所以真断距是个向量。

沿各方向分解的分量如下：

铅垂断距：是真断距的铅垂分量；

水平断距：是真断距的水平分量；

走向断距：是真断距沿断层面走向线的分量；

倾向断距：是真断距沿断层面倾向线的分量。

平移断层的总断距等于走向断距。

(2) 地层断距：上下盘中同一地层层面的垂直距离。

(3) 落差：在横切或斜切断层的剖面内，上下盘同一岩层界线与断层线各有一个交

点，这两个点的高程差称为断层落差，简称落差。

7.1.2 断层的分类

从不同的角度对断层分类的描述也不同。以下介绍两个方面的分类。

1．根据两盘相对位移方向分类

(1) 正断层：上盘相对下降，下盘相对上升的断层为正断层。

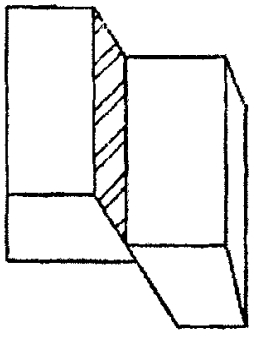


图 7.1 正断层示意图

Fig7.1 normal fault sketch map

(2) 逆断层：上盘相对上升，下盘相对下降的断层为逆断层。

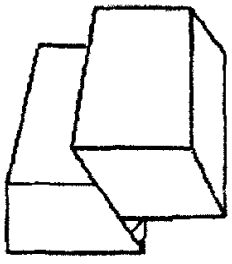
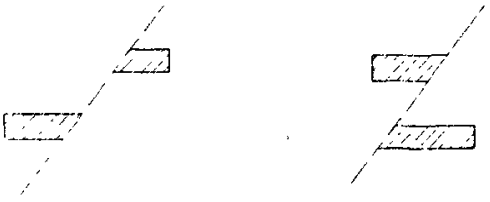


图 7.2 逆断层示意图

Fig7.1 reverse fault sketch map

2．根据倾斜方向的分类

(1) 正倾：断层倾角与断层走向右手的夹角小于 90 度。

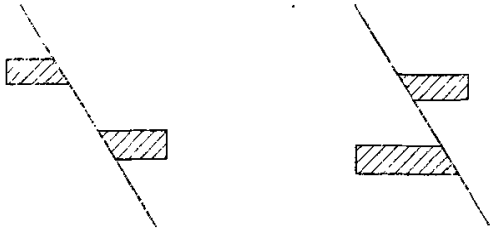


正倾正断层　　正倾逆断层

图 7.3 正倾

Fig7.3 normal dip

(2) 逆倾：断层倾角与断层走向右手的夹角大于 90 度。



逆倾正断层　　逆倾逆断层

图 7.4 逆倾

Fig7.4 reverse dip

7.1.3 断层的描述

本系统中用来描述断层的要素有：起点坐标 P (x, y, h)、长度 (s)、方位角 (α)、倾角 (β)、铅垂断距 (d)。其中铅垂断距以走向左侧为基准，右边升高为正，降低为负。由此可见，正断层为正数，逆断层为负数；同时限定倾角β 的范围 0 度到 90 度之间。不论断层的形状如何都可以表现为一个或几个平面的组合，任意一个断层平面都可以通这五个量描述，如图 7.5 示。

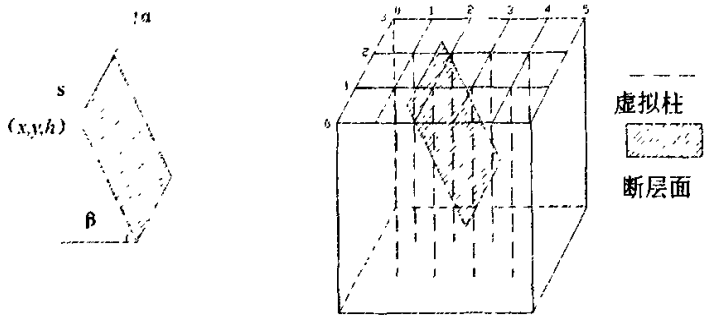


图 7.5 断层的表示

Fig 7.5.The expression of faultage

对不同断层的描述如下图示。

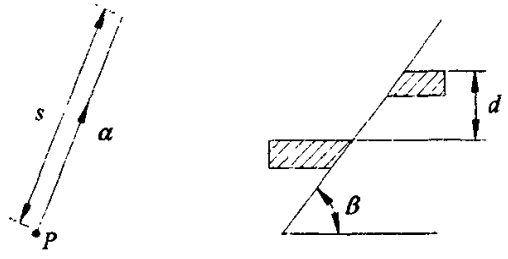


图 7.6 正断层正倾

Fig7.6 normal fault of normal dip

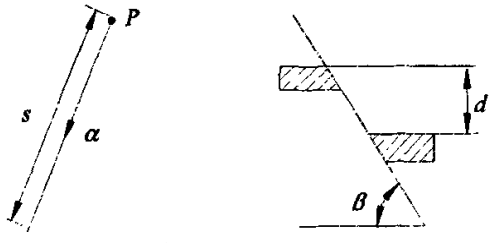


图 7.7 正断层逆倾

Fig7.7 normal fault of reverse dip

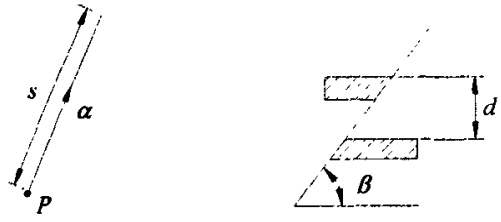


图 7.8 逆断层正倾

Fig7.8 reverse fault of normal dip

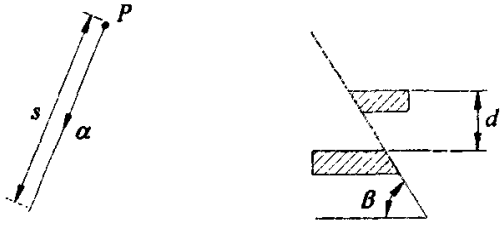


图 7.9 逆断层逆倾

Fig7.9 reverse fault of reverse dip

7.2 断层的实现

在上文提到的模型中并没有考虑断层的存在，这不符合现实的地层发育情况，需要加以改进。在一个矿区中有的断层只在一个地层中存在，有的断层则是在多个地层中同时存在，需要分别处理。

在本系统中断层的数据结构为

```
typedef struct PDCStruct                    //断层数据结构
{
    char    CName[21];                      //断层名称
    double DCoorderXYH[3];                  //断层起点坐标(m)
    double DAzimuth;                        //断层方位角
    double DLong;                           //断层长度
    double DDatH;                           //断层铅垂断距
} PDCStruct;
```

对地质体进行平面切割时，根据断层的参数计算断层是否在切割面上，切割面与断层面相交的情况如图7.10示。



图 7.10 断层的切割

Fig 7.10The incision of faultage

进行地层切割时，利用切割线周围的虚拟钻孔用本文4.1节中提到的算法计算出切割线的剖面数据，依据铅垂断距（d）调整断层范围内的剖面数据生成含有断层信息的剖面线。

第八章 三维建模格网虚拟柱模型

8.1 格网虚拟柱模型设计思路

本文提出了格网虚拟柱模型的三维建模方法，该方法以钻孔柱状图和底板等高线数据为原始资料，在模型中加入了断层建模的方法，为三维地质模拟软件作数据准备。本文完成的软件部分总体设计如下图 8.1 示：

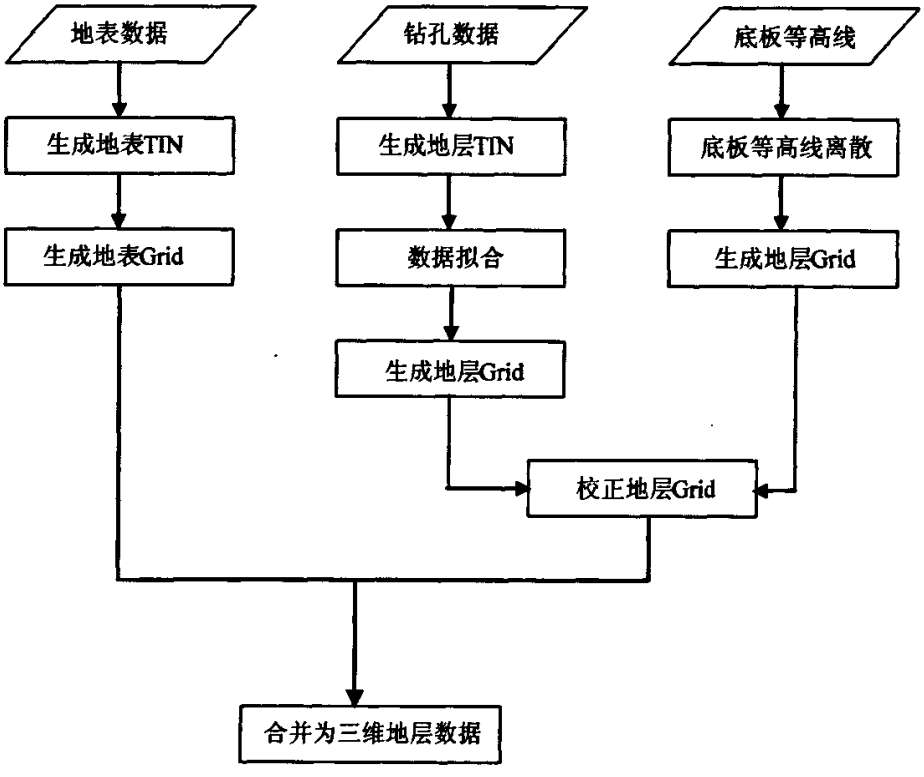


图 8.1 总体设计

Fig8.1 collectivity design

第九章 结论与展望

9.1 结论

论文主要完成了以下的内容。

1. 分类比较了三种空间构模方法，分析了不同构模方法的优缺点，总结了国内外地质建模软件的发展方向。研究了常用的表面建模方法和数据拟合方法，分析了 TIN 模型和 Grid 模型的优缺点。

2. 总结了常用数据拟合方法的特点，在传统趋势面拟合方法的基础上，发展出了移动加权趋势面拟合算法，同时在算法中引入趋势面模型适度检验方法，实现了对计算精度的合理控制。

3. 提出了格网虚拟柱模型，设计了三维地层建模的数据组织方式，实现了以钻孔数据为基础，采用加权移动趋势面拟合、TIN 结构内插、加权移动趋势面拟合结合 TIN 结构内插的三种算法。

4. 改进了利用底板等高线数据，生成三维地层数据的算法。算法中首先建立等高线的拓扑区域，再利用剖面线算法计算三维地层数据，该算法加快了剖面线与等高线求交点的过程，计算时间大为缩短。

5. 提出了一种断层的描述模型，对含有断层的格网虚拟柱模型中切割生成剖面线作了初步研究。

9.2 展望

我国是世界上煤炭产量最大的国家，今后几十年煤炭仍然是我国的主要能源，矿山的安全、高效生产时保证我国能源安全的重要因素。传统的制图方法及管理方法远远不能满足矿山生产的要求。如何把矿区的地质发育情况和矿井通风、排水到机电、运输等行业，有机结合起来，维系众多的地质、采矿、通风安全等多方面的信息，派生出系列专用三维立体图，是今后发展的方向之一。

参考文献

[1] Simon W.Houlding.3D geoscience modeling-computer techniques for geological characterization. (MJ.Springer-Verlag:[s.n.],1994.

[2] 岳昊，含断层地层的三维地质建模与剖切，[硕士学位论文][D]，青岛，山东科技大学，2005

[3] 朱小弟，三维地质模型可视化技术研究，[硕士学位论文][D]，北京，中国矿业大学北京校区，1999

[4] 龚键雅，夏宗国，矢量与栅格集成的三维数据模型[J]，武汉测绘科技大学学报，1997，22(15)，7-15

[5] 王彦兵，吴立新，史文中 GTP模型中四面体的引入及其空间模型扩展[J]，地理与地理信息科学，2003，19(5)，16-20

[6] 李德仁，李清泉，一种三维GIS混合数据结构研究[J]，测绘学报，1997，26(2)，128-133

[7] 龚健雅，矢量与栅格集成的三维数据模型，武汉测绘科技大学学报[J]，1997，22(1)，7-15

[8] 李清泉，李德仁，三维空间数据模型集成的概念框架研究[J]，.测绘通报，1998，27(4)，325-330

[9] 段福洲，地质体三维模型和数据结构的研究与实现，[硕士学位论文][D]，北京，首都师范大学，2004

[10] 李志林，朱庆，数字高程模型[M]，武汉大学出版社，2005

[11] 王 鹏，刘立娜，潘成鹤，GIS 中 Delaunay 三角网的快速建立及拓扑自动生成[J]，测绘信息与工程，2004，24(4)，24-27

[12] 武晓波、王世新、肖春生，一种生成 Delaunay 三角网的合成算法[J]，遥感学报，2000，4(1)，32～35.

[13] 武晓波、王世新、肖春生，Delaunay 三角网生成算法研究[J]，测绘学报，1999，28(1)，28～35

[14] V.J.D.Tsai.delaunay trangulations in TIN Creation;an overview and linear-time algorithm[J].Int.j.of GIS;1993,7(6);501-524，

[15] Green P J. and Sibson R.C. Computing Dirichlet Tesselations in the Plane[J]. The

Computer Journal.1978.21(2):168-173

[16] Brassel K E. and Reif D. Procedure to Generate Thiessen Polygons[J].Geophysical Analysis.1979(11);289-303

[17] McCaullagh M T. and Ross C G.. Delaunay Triangulation of a Random Data Set For lirarithmic Mapping[J]. The Cartographic Journal,1980(17);93-99

[18] Maus A.Delaunay Triangulation and the Convex Hull of n Points in Expected Linear Time[J].BIT. 1984(24);151-163

[19] 奕晓岩，一种 TIN 生成算法及其三维显示[J]，海洋测绘，2004，24(5)，39-41

[20] 安乐，电子沙盘中DEM/DTM生成算法和模型建立算法的研究及其系统的开发，[硕士学位论文][D]，北京，中国农业大学，1999

[21]叶海建，安乐，基于四叉树结构的DEM生成算法[J]，中国农业大学学报，2000，5(4)，91-94

[22] 宋占峰，蒲　浩，詹振炎，快速构建Delaunay三角网算法研究[J]，铁道学报，2001，23(5)，85-91

[23] 刘少华、程朋根、陈红华、吕开云，Delaunay 三角网内插特征点算法研究[J]，2002，25(3)，254～257

[24] Lancaster P, Salkauskas K. Surfaces generated by moving least squares methods[J]. Mathematics of Computation, 1981, 37 (155): 141~158.

[25] Belytschko T, LuY Y, Gu L. Element-free galerkinmethods[J]. Int.J.Numer.Meth.Engng., 1994,46 (37):229~256.

[26] 颜庆津，数值分析[M.]，北京，北京航空航天大学出版社，2005，207～208

[27] 曾伟生，骆期邦，贺东北，论加权回归与建模[J]，林业科学，1999，35(5)，5-11

[28] 吴焕萍，潘　懋，胡金星等，规则格网DTM快速构建算法研究[J]，计算机应用研究，2004，26(6)，25-29

[29] 刘锦中，马辉，基于等高线的DEM生成算法研究和实现[J]，现代测绘，2004，27(3)，34-36

[30] 工建宇，滕树钦，一种基于等高线生成 DEM 的方法[J]，计算机应用，2002，22(8)，30-32

[31] 靳海亮，高井祥，康建荣，一种基于等高线生成三维地形的实用方法[J]，2005，21(8)，150-152

[32] 张发勇，徐世武，李才仙，等值线多剖面插值法生成规则数字地面模型[J]，1998，23(4)，390-392

[33] 杜建刚，曾学贵，廖贤明，基于等高线数据鱼骨状 DEM 的建立[J]，北方交通大学学报，1997，21(4)，437-440

[34] 康建荣，不规则区域等值线拓扑关系的建立及充填算法[J]，测绘通报，2004，(9)，7-9

[35] 葛永慧，余哲，刘志德，测绘编程基础[M]，北京，测绘出版社，2002

致 谢

本文的研究工作是在恩师葛永慧教授的精心指导下完成的。在我三年研究生的求学生涯中，恩师葛永慧教授在学业上给予我悉心指导，在社会实践中给予我极大的鼓励和支持和帮助。借此机会，我对恩师葛永慧博士表示衷心的感谢！

感谢我的父母、兄弟对我的理解与支持！

感谢测绘科学与技术系的所有老师，是他们使我拥有了扎实的专业基础知识，本课题的研究工作才得以顺利进行！

感谢柳亚琴、胡海斌、于峰涛、李波、郭森同学对论文的完成提出了宝贵的意见和建议，在此，我祝他们事业有成，前途光明！

衷心感谢实验室的老师和同学在学习和生活等各个方面给予我的帮助。我祝愿大家心想事成，万事如意！

攻读学位期间发表论文

发表的论文：

[1] 康志军，郭小亮，张东升，测量与 GIS 常用坐标系及其转换，科技情报开发与经济，2007，19（8），139-141

[2] 葛永慧，康志军，加权移动趋势面拟合，工程图学学报，已录用

科研成果：

[1] 参与了山西省“十一五”攻关项目（20060311118-01）的研究