

文章编号:1673-9469(2011)04-0069-05

## 基于 GOCAD 的三维地质模型构建

张燕飞,朱杰勇,张威

(昆明理工大学 国土资源工程学院,云南 昆明,650093)

**摘要:**阐明了利用 GOCAD 进行三维地质建模的思路及主要建模步骤。以哨牌矿区为例,利用 GOCAD 模拟了该区从震旦系灯影组到第四系地层及断裂。在模拟地形、地层及构造面时通过离散光滑插值技术(DSI)很好地消除了单纯的由克里金插值产生的畸变。由面模型向体模型转化时选用 GOCAD 的 SGrid 代替 SOLID 功能,更加方便准确的反应了真实地质情况。最后分析了 GOCAD 生成三维地质模型的实际应用并绘制 Slicer 法剖面图。

**关键词:**GOCAD; 三维地质模型; 离散光滑插值

**中图分类号:** P623 TP391

**文献标识码:** A

### 3D geological modeling method based on GOCAD

ZHANG Yan-fei, ZHU Jie-yong, ZHANG Wei

(Faculty of Land Resource Engineering, Kunming University of Science and Technology, Yunnan Kunming 650093, China)

**Abstract:** Basing on the study of the professional 3D geological modeling software GOCAD, this article summarized the modeling principle and process. Combined with the obtained landform and geological data about faults and stratum from Dengying formation in Simian system to Quaternary system, the 3D geological visualized modeling of Shaopai mining area is built up by GOCAD. In this model, the DSI (discreted smooth interpolation) could clear up the aberration caused by Kriging when the landform, stratum and structural surface simulate are simulated. It is easily to reflect the actual geological condition by utilizing SGrid function instead of SOLID when face model is translated into volume mode. Finally, the application of the 3D geological modeling by using GOCAD was shown and the Slicer profile was given.

**Key words:** GOCAD software; 3D geological modeling; discrete smooth interpolation

从上世纪八十年代开始,三维地质建模技术便在国外开始广泛应用。经过几十年发展,建立了二十多种空间建模理论。这些理论可以划分为依靠面元、体元或者混合方式建立模型。如最为常见的规则网格(Grid)、不规则三角网格(TIN)就是依据面元建立地质体表面模型的常用方法<sup>[1]</sup>。

目前,市场上用于三维地质建模的软件有很多,其中发展较为成熟且应用广泛的有法国 Nancy 大学研发的 GOCAD (Geological Object Computer

Aided Design), 加拿大阿波罗科技集团公司推出的三维建模与分析软件 Micr, 斯伦贝谢公司开发的三维可视化建模软件 Petrel, 英国 Midiandvalley 勘探公司出品的模拟构造运动的 3DMove 软件。我国三维地质建模研究虽然相对较晚,但随着地质领域及计算机技术的发展,量化研究及三维可视化研究渐渐成为发展的趋势。而 GOCAD 以其强大的建模功能在国内外占有很大市场。近年来我国很多专家学者将 GOCAD 应用于石油、地质灾害等领域取得了良好效果。

收稿日期:2011-10-28

基金项目:云南省会泽县其它地区(金红、雨碌、待补)铅锌矿快速定位预测新技术新方法研究(619320100079)

作者简介:张燕飞(1986-),男,内蒙古鄂尔多斯人,硕士研究生,从事工程岩土体稳定、三维建模及数值分析。

## 1 GOCAD 概述

GOCAD 地质建模软件是主要应用于地质领域的三维可视化建模软件,是国际上公认的主流建模软件,具有以下特点<sup>[2]</sup>:(1)功能强大。GOCAD 软件具有强大的三维建模、可视化、地质解译和分析的功能。既可以进行表面建模,也可以进行实体建模;既可以设计空间几何对象,也可以表现空间属性分布。GOCAD 具有离散光滑插值技术(DSI)及多种地质统计算法,可以更加方便准确地模拟复杂地质构造。(2)应用广泛。GOCAD 在地质工程、地球物理勘探、矿业开发、水利工程中都有广泛的应用,既可以数值模拟、优化设计也可以进行风险评估。(3)界面友好,人机交互能力强,实现了以 workflows 为主的半自动化建模。(4)数据接口齐全。GOCAD 不但可以导入导出多种格式的点、线、面、体或网格文件,而且与很多大型专业软件如 CAD、ER Mapper、ArcView、FLAC3D 等也可以交换数据。

## 2 应用实例

以三维非拓扑方式建模为主,辅以三维拓扑建模,即先弱化研究对象地质属性,重点分析各部分空间几何关系,通过面模型构建三维模型,然后再赋以相应地质属性如构造面、地层界面、侵入体或与资源相关的控矿(油、水)构造等。只有具有地质属性的三维模型才能反应地层或块体间交切、错动和新老关系,才能为下一步空间分析或划分网格建立力学模型提供依据。

### 2.1 地形面模拟

哨牌矿区以山地为主,地表高差变化较大、沟壑纵横。目前已完成该地区大比例尺地形测量,并在 AutoCAD 中绘制成图。GOCAD 既可以模拟三维地形面也可以将地表出露的地层、构造等信息赋予地形面,生成三维地形地质面。在模拟地形面时,所有等高线必须赋有正确高程值。由于 GOCAD 不识别汉字,所以文件名、图层名应以英文或数字命名。启动 GOCAD,新建项目 landform(新项目最好保存于根目录下或者以非汉字命名的文件夹中,否则 GOCAD 可能会无法创建或打开)。在项目设置 Initialize Project Units 中,Depth axis positive values 选择 Upward,其他选项可以保持默认。然后通过 File - Important Objects - Cul-

tural Data - DXF 加载地形文件,GOCAD 会自动分辨 DXF 中各图层,并以不同文件名保存为 Curve 单元(PL 文件)中,文件名一般与图层名相同。勾选等高线所在 PL 文件,在右侧视图窗口中查看三维等高线是否正确。然后在 Pointset 选项下,通过 New - From PointsSet Curve or Surface 命令将等高线离散,并生成 PointSet 的 VS 文件(见图 1)。也可以通过 MapGIS、Surfer 等软件先将等高线离散,以 X、Y、Z 的坐标形式保存于 .txt、.det、.xls 等文件中。然后直接导入 GOCAD 生成 VS 文件。

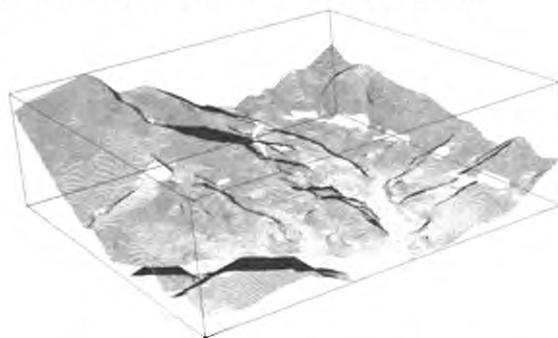


图1 哨牌矿区地形离散点分布图

Fig.1 The distribution of geomorphic discrete points in Shaopai mining areas

GOCAD 常用两种方法生成地形曲面:(1)根据离散点分布形式在 Curve 中拟合地形边界线,拟合的精度根据需要调整。然后在 Surface 中通过边界线和离散点以相似三角(homogeneous triangles)网格构建曲面(见图 2a),即 Surface - NEW - From PointsSet and Curve。(2)根据 Wizard - Surface Creation - From Data (without internal Borders)向导生成面,对于地形面与原始控制点吻合较差的区域可以通过增加相应的控制点,再进行局部光滑平顺处理(DSI),多次反复直到符合要求(见图 2b)。具体方法为:选择控制点及边界线,通过 Constrain All Borders On Straight Line 将边界线转换为模糊控制点,引入插值方向,GOCAD 会自动进行 DSI 插值。

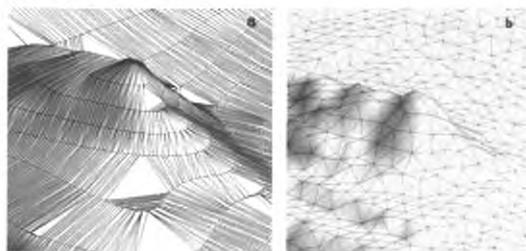


图2a 直接三角网格构建曲面; 图2b DIS构建曲面

Fig.2a The surface construction by direct triangle meshes; Fig.2b The surface construction by DIS

该方法也适用于地层、构造的模拟。哨牌矿区地形面采用 Wizard 向导中插值法模拟,并对高速公路附近及某些冲沟地区进行了局部光滑处理。将三维地形面按地表出露地层及构造行迹划分为不同区块,并赋予不同颜色表示相应地层,见图 3。

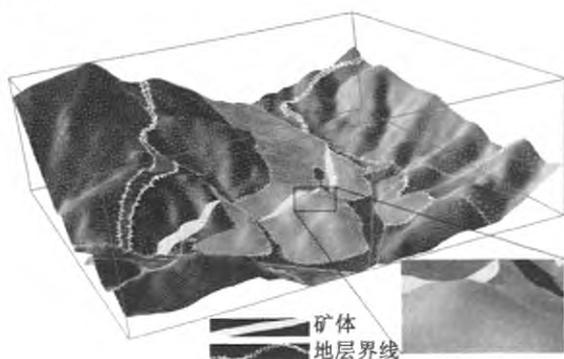


图3 哨牌矿区三维地形地质图

Fig.3 The 3D topography and geology map of Shaopai mining areas

## 2.2 层面、结构面模拟

哨牌矿区处于小江断裂带、垭都-水城断裂带和弥勒师宗断裂带挟持的三角地带内,受这些深大断裂带多期活动影响,矿区地形地质条件复杂。矿区主要出露震旦系上统( $Z_2$ )和寒武系下统( $\epsilon_1$ )地层,震旦系上统主要为灯影组( $Z_2dn$ )地层,与下伏寒武系地层整合接触。寒武系主要是下统的渔户村组( $\epsilon_{1y}$ )和箬竹寺组( $\epsilon_{1q}$ ),该地层为哨牌矿区主要含矿层位。矿区较新地层为中泥盆统海口组( $D_2h$ )和上泥盆统宰格组( $D_3zg$ )。海口组与下伏地层假整合接触。宰格组下伏地层整合接触。

哨牌矿区主要断裂有  $F_1$ 、 $F_2$  (待补断裂)、 $F_3$ 、 $F_4$  和  $F_5$  断裂。 $F_1$  为一逆断层,断层面产状  $165^\circ \angle 46^\circ$ ;  $F_2$  (待补断裂)以压性为主,兼具扭性,断层面产状约为  $319^\circ \angle 62^\circ$ ;  $F_3$  与  $F_5$  为平移断层,产状分别为:  $130^\circ \angle 65^\circ$ 、 $349^\circ \angle 45^\circ$ ;  $F_4$  为张扭性断层,产状约为  $29^\circ \angle 51^\circ$ 。哨牌矿区地形地质图见图 4。

层面和结构面建模是三维地质建模最核心的部分,这些面存在于地质体内部,无法直观观察到,因此要想提高模拟精度就需要大量获取模拟区域地表与地下地质信息,特别是层面和构造面产状、埋深、厚度等。如果模拟区域通过钻孔等手段获取了大量地质信息,此时建立层面、构造面模

型相对简单,只需将同一层面或结构面上的数据以 X、Y、Z 的形式整理成文本文件并导入 GOCAD,然后利用 Surface - NEW - From Pointsets 命令生成层面或结构面。以这种方式建模,只要地质数据足够丰富,建立的模型是相对准确的。

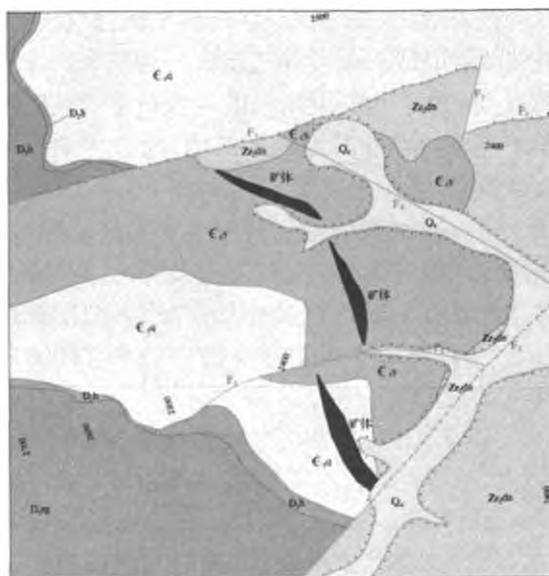


图4 哨牌矿区二维地形地质图

Fig.4 The topography and geology map of Shaopai mining areas

在大多数情况下建模所需要的地质信息是通过野外踏勘和少量工程获得的。哨牌矿区的模拟就属于这种情况。根据层面和构造面的地表行迹和产状模拟地表以下较浅范围内地质体是可行也是准确的。随着对模拟区域研究的深入,所获得地质资料也越多。此时可以再次对已有三维模型增加约束精准校正或扩大模拟深度。

在 GOCAD 中,坐标与地质图坐标一致,Y 轴正向为北,X 轴正向为东,向上为 Z 方向。野外测量的产状需转换为对应面的切向量才能利用。设岩层产状为“倾向  $\angle$  倾角” ( $a \angle b, 0 \leq a \leq 360, 0 \leq b \leq 90$ ),则该层面的切向量为

$$x = \cos(b) \sin(a) \quad (1)$$

$$y = \cos(b) \cos(a)$$

$$z = -\sin(b)$$

以哨牌矿区  $F_2$  断裂为例,断层面产状为  $319^\circ \angle 62^\circ$ ,即  $a = 319^\circ, b = 62^\circ$ ,代入上式,得  $x = -0.308; y = 0.354; z = -0.8829$ ;因为哨牌矿区仅模拟地下 150 m 范围内的地质体,当斜距大于 170 m 时  $F_2$  的深度大于 150 m,满足模拟需求。此时只需将  $F_2$  的地表控制点沿 X、Y、Z 分别移动 -53 m、61 m 和 -150 m 就得到  $F_2$  地下 150 m 深度

的控制点。

哨牌矿区的地形地质图是在 MapGIS 中绘制成图的,以 .WT、.WL、和 .WP 格式保存。

由于 GOCAD 不能直接识别 MapGIS 文件,因此需将该线文件转换为 DXF 文件。在 AotoCAD 中打开该 DXF 文件,进入 3D 建模空间,捕捉各地质界线与等高线的交点并连接成三维曲线。该三维曲线就是地层走向或断层的地表行迹。在三维视图中多角度查看所绘三维曲线,检查与地形面的吻合情况,若存在问题可在 AotoCAD 或 GOCAD 中适当增减控制点或调整相关点坐标使之吻合,保存文件。然后将三维曲线所代表层面(构造面)产状代入式(1),计算出相应切向量,再根据模拟深度,沿切向量方向平移,使 z 方向的平移距离等于模拟深度,保存文件。

将 AotoCAD 中绘制的地质界线导入 GOCAD,在右侧窗口中可以清楚看到各界线相对关系。通过 GOCAD 中 Surface - NEW - Several Curves 命令,选择同一层面(构造面)不同高程的两条地质界线,生成对应层面(构造面)。由于地表与地下的地质情况不完全相同,因此由地表地质界线与产状生成的界面可能在交切关系上存在不合理或与实际情况不符的情况。GOCAD 具有强大的编辑功能,可以通过增加约束、局部 DSI<sup>[3]</sup>或 reshape Surface 命令,调整三角网的控制点来实现曲面的编辑。

由于点集数据的离散性及地层的复杂切割关系,生成的地层(构造)面范围各不相同,为了将所有地层约束在研究范围内,生成规则的三维模型,必须为地层面建立统一约束,使地层面限制在同一范围内。在 GOCAD 中选择研究区域的边界线,通过 New - Built InForms - Tube 命令建立研究区域边界的垂向切面,然后利用 Tools - Border - Extend 或 Cut By Surfaces 将没有靠近边界面的层面、构造面延伸,将超过边界面的层面、构造面切割删除。

### 2.3 钻孔的生成

钻孔是三维地质模型制作的重要资料。在 GOCAD 中,钻孔属于测井(well)的一种形式,垂直或倾斜钻孔的加载方式与直井或斜井相同。但不同文件格式有不同的加载方法,在文本文件中,可以直接加载钻孔名称、钻孔位置(X、Y、Z)、补心海拔 KB、孔深等信息。钻孔生成后可以在其对应

maker 选项中加载或键盘录入分层、断裂信息,如:地层名称、厚度、产状等。结合哨牌矿区已有探矿工程资料,本文加载了从 ZK1 到 ZK5 的 5 个钻孔,并且每个钻孔都生成了相应的 maker,见图 5。

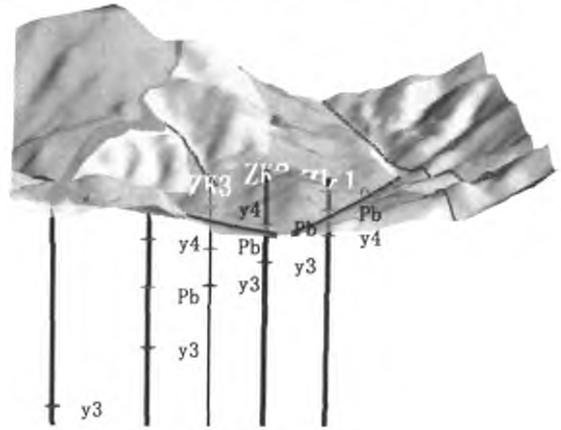


图5 哨牌矿区钻孔分布图

Fig.5 The distribution of drill holes in Shaopai mining areas

### 2.4 三维体模型创建

GOCAD 可以通过 SGrid (网格模型对象)和 Solid (实体模型对象)两种方式实现由面模型向体模型的转化<sup>[4]</sup>。直接选用 Solid 功能生成复杂的三维地质体较为困难,因为 GOCAD 仅能从点集、封闭曲面或单个面及厚度创建 Solid。SGrid 是由六面体格子组成的单元集,确定地层分界面及网格密度后,GOCAD 可以通过六面体单元“充填”两层界面间的地层,所有这些六面体单元组成 SGrid。划分的六面体单元越小,拟合效果越好,锯齿现象越不明显。此外,六面体单元的节点信息可以导出,有利于进一步对地质体进行空间分析及数值模拟。

在 Workflows 中新建 3D Reservoir Grid Builder, GOCAD 将以向导模式半自动化建立模型。主要步骤如下:(1) Select Horizons,确定模拟地层的范围,单击已经建立好的最新地层顶面和最老地层底面。(2)在 Specify Gridding 中,可以选择自动、交互、或已有模式计算网格(Gridding)和地层厚度(Pillars),无特殊要求可以选择自动计算。(3) Define Units,定义各中间地层,计算各地层等体积线,并将中间地层按新老顺序排列。(4)最后在 Build Grid 中将三维网格细化,减少锯齿,生成体模型。通过该方法生成的体模型每一个单元都有独立的八节点坐标和属性点,可赋予多个属性值,见图 6。

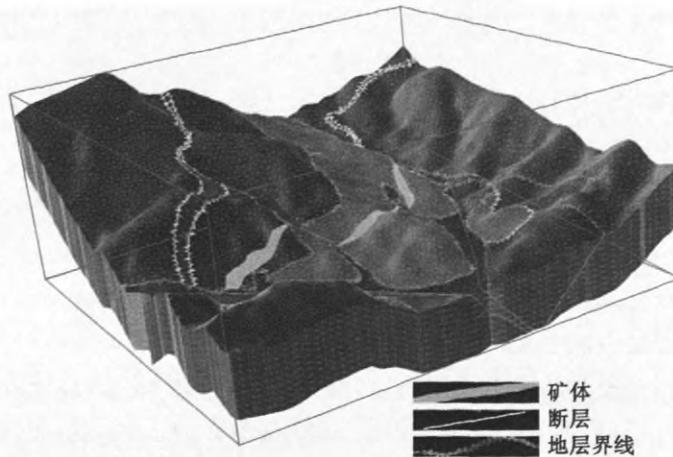


图6 哨牌矿区三维地质模型

Fig.6 The geological 3D model of Shaopai mining areas

### 3 结束语

GOCAD 是一款强大的地质建模软件。一方面可以识别多种数据来源,极大简化建模,而且在建模时可以采用克里金插值加密点,对于插值产生的畸变可以通过 DSI 功能修正。因此建立的三维模型更加逼近真实地质体。另一方面,随着研究的深入常需要在地表、钻孔或坑道中取样进行各种物理力学性质试验或化学元素分析,把试验所得数据以取样点属性的方式赋予三维模型中对应钻孔上,然后将有限的实验数据通过 GOCAD 的 DSI 功能插值加密,就能绘制相关属性模型或变量图,进而对其进行专项分析。

### 参考文献:

- [1] 王明华,白云. 3D 地质建模研究现状与发展趋势[J]. 土工基础, 2006, 20(4): 68 - 70.
- [2] 张夏欢,高谦. GOCAD 地质三维建模技术在矿山边坡工程中的应用[J]. 矿业快报, 2008, 9(9): 113 - 114.
- [3] 詹莉,刘聪元. GOCAD 及其在乌东德工程的应用[J]. 工程地质计算机应用, 2009, 5(3): 34 - 35.
- [4] 管树巍, A NDREAS PLESCH, 李本亮,等. 基于地层力学结构的三维构造恢复及其地质意义[J]. 地学前缘, 2009, 7(4): 142 - 143.

(责任编辑 刘存英)

(上接第 59 页)

- [14] HUGGINS F E, HUFFMAN G P. Modes of occurrence of trace elements in coal from XAFS spectroscopy [J]. International Journal Coal Geology, 1996, 32: 43 - 44.
- [15] FINKELMAN R B. Modes of occurrence of potentially hazardous elements in coal; levels of confidence [J]. Fuel Processing Technology, 1994, 39: 21 - 34.
- [16] 代世峰,任德怡,刘建荣,等. 河北峰峰矿区煤中微量

元素有害元素的赋存与分布[J]. 中国矿业大学学报, 2003, 32(4): 358 - 361.

- [17] 刘英俊,曹励明,李兆麟,等. 元素地球化学[M]. 北京: 科学出版社, 1984, 50 - 501.
- [18] 庄新国,曾荣树,徐文东. 山西平朔安太堡露天 9 煤层中的微量元素[J]. 地球科学, 1998, 23(6): 553 - 558.

(责任编辑 马立)