



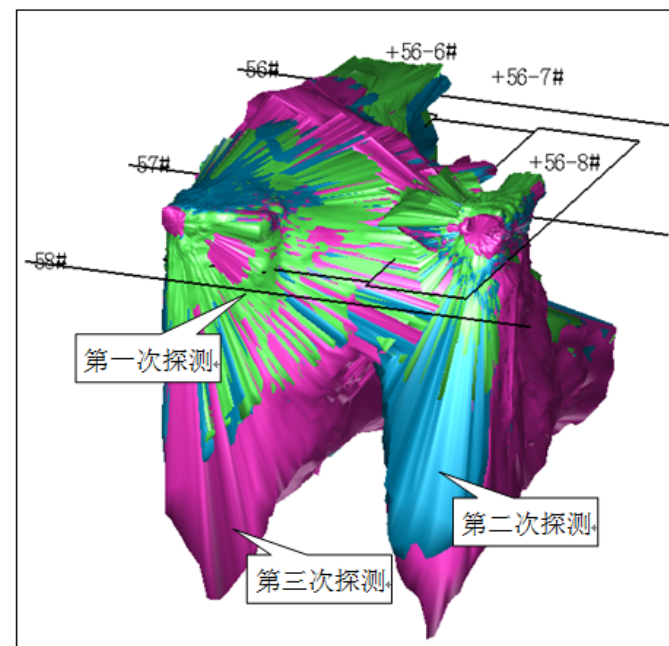
安全信息技术

第3章 工程结构三维激光探测技术

主讲人：胡建华 教授

提 纲

- 引言
- 3.1 三维激光探测设备及原理
- 3.2 工程结构三维可视化表达
- 3.3 采空区三维激光探测可视化集成系统



引言

● 三维激光探测技术

又称为**实景复制技术**,是光、机、电和计算机技术融为一体的高新测量技术,快速、无接触、高密度、高精度获得实体三维数据、三维模型及线、面、体等各图件数据。

● 三维激光探测仪的工作原理

通过**激光**在空气中传播的**速度与时间**来计算设备到目标物的**距离**,通过发射光与返回光的**干涉条纹**来确定数据点与数据点之间的**角度**,进而计算出实体上各点在空间的**三维坐标**。



采空区三维激光探测示意图

引言

● 三维激光探测技术在工程领域的应用

- 数字化城市建设：城市扩建、重建和改造，城市道路和管线规划；
- 工程测绘：大坝和电站基础地形测量，公路、铁路、桥梁与河道测绘，建筑物地基测绘；
- 工程结构测量：大坝、边坡、桥梁、隧道和地下硐室结构检测与变形监测，工程结构几何尺寸、空间位置测量，管道、线路测量。

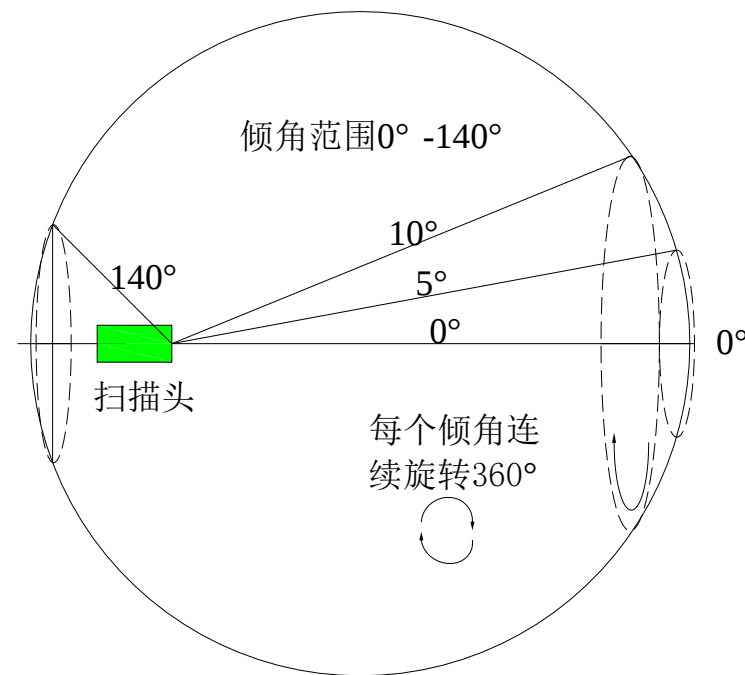


3.1 三维激光探测设备及原理

3.1.1 采空区三维探测系统CMS

● (1) CMS探测的基本原理

- CMS探测采用的激光测距仪扫描头可做 360° 旋转并自动收集距离和角度数据。
- 扫描头伸入采空区后，每完成一次 360° 探测，扫描头将按照操作人员事先设定的角度自动抬高仰角并进行新一圈的旋转探测，连续测量收集更大旋转圈上的探测点数据，直至完成全部的探测工作，最终获取采空区海量三维激光点云空间数据。



CMS探测原理示意图

3.1 三维激光探测设备及原理

3.1.1 采空区三维探测系统CMS

● (2) CMS的基本构成和主要技术指标

- 研制单位：加拿大Optech公司；
- 测量范围：650m（白壁），350m（墙壁反光率为20%）；
- 扫描头转动角度：0-360°；
- 仰角转动范围：0-160°；
- 测量精度：±2cm；
- 分辨率：1cm；
- 扫描头最快转动速度：21°/s。



3.1 三维激光探测设备及原理

3.1.1 采空区三维探测系统CMS

● (3) CMS的主要优缺点

第一

设备构成简单，移动、架设、操作和清理工作都容易完成。

第二

可灵活作业且更安全。既可手动探测，以进行初步或特殊测量；也可自动探测，CMS扫描头伸入危险或人员无法进入的盲区（如封闭的采场或天井）进行探测，而操作员则位于安全舒适的位置。

第三

实现快速、准确地全方位探测。通过直径25 cm的钻孔即可对CMS入口处进行全方位三维精密测量。

第四

海量空间数据可反映多层信息。如完整的采场实际结构图和实际爆破结果等，进而核实实际采场及出矿口的贫化率，增加效益，提高效率。

第五

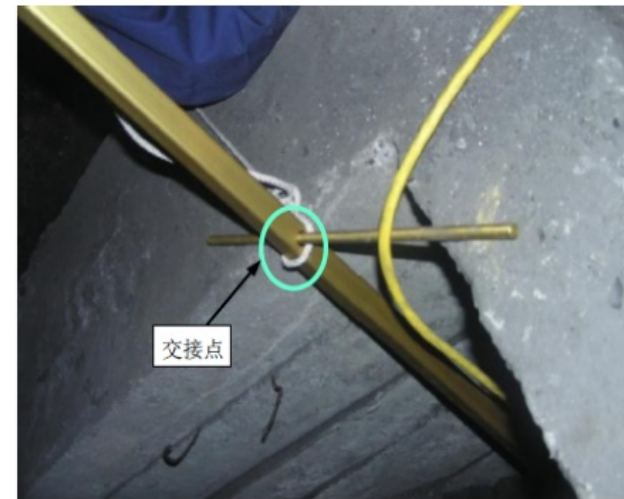
CMS采用激光探测，故不能用于煤矿探测。

3.1 三维激光探测设备及原理

3.1.1 采空区三维探测系统CMS

● (4) CMS现场探测方法分类

1) 采空区底部CMS探测 2) 封闭采空区CMS探测 3) 采空区上部通道



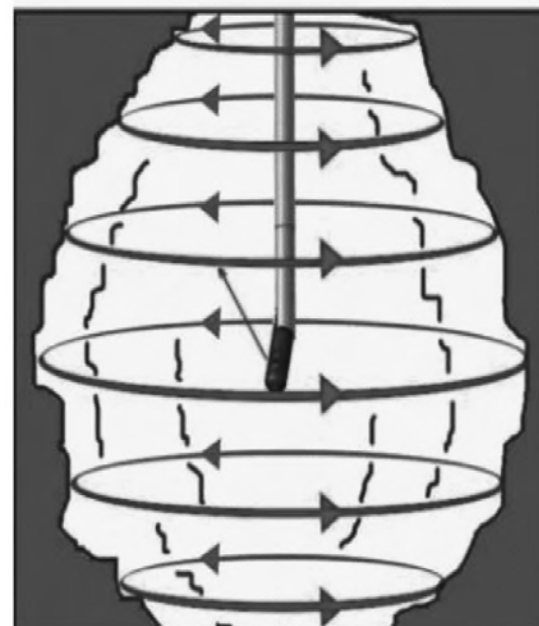
CMS现场探测图

3.1 三维激光探测设备及原理

3.1.2 钻孔式三维激光探测仪C-ALS

● C-ALS工作原理及主要技术指标

- 研制单位：英国MDL公司；
- 探头直径：5cm；
- 探测范围半径：150 m；
- 精度：±5cm，分辨率：1 cm；
- 竖直方向探测范围： $-90^{\circ} \sim +90^{\circ}$ ；
- 水平方向探测范围： $0^{\circ} \sim 360^{\circ}$ 。



C-ALS激光探测仪及工作原理

3.1 三维激光探测设备及原理

3.1.3 无人机三维激光探测系统HM100

● (1) HM100 作业原理

- 通过机载三维激光探测仪的**高精度惯性制导系统**即可实时获取无人机的飞行速度、飞行姿态以及飞行轨迹等参数，同时配合基于**激光测距**的自主避障功能，实现井下无GPS信号环境下的**智能飞行探测**；
- 机载三维激光探测仪每秒可获取数十万**点云数据**，通过**WiFi发射器**可实时传输测量数据至接收设备，并同步到存储设备中。



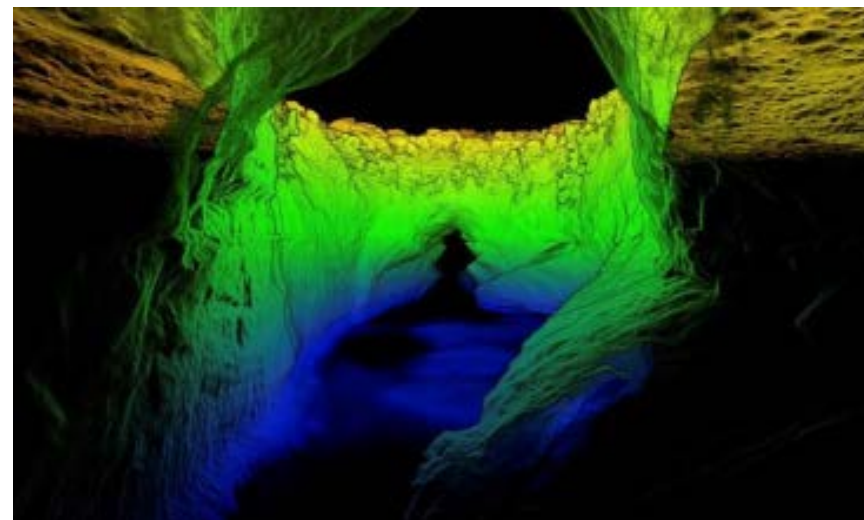
无人机三维激光探测系统及其作业原理

3.1 三维激光探测设备及原理

3.1.3 无人机三维激光探测系统HM100

● (2) HM100 作业流程

- 探测作业点开展无人机三维激光探测；
- 点云数据导入配套的点云数据处理软件；
 - 点云数据的抽稀；
 - 坐标校正与转换；
 - 点云误差处理以及点云模型的构建；
- 构建出采空区的实测模型。



无人机三维激光探测效果图

3.2 工程结构三维可视化表达

3.2.1 三维激光点云处理

● (1) 噪声点产生的主要原因

1) 探测系统自身误差所引起的噪声点

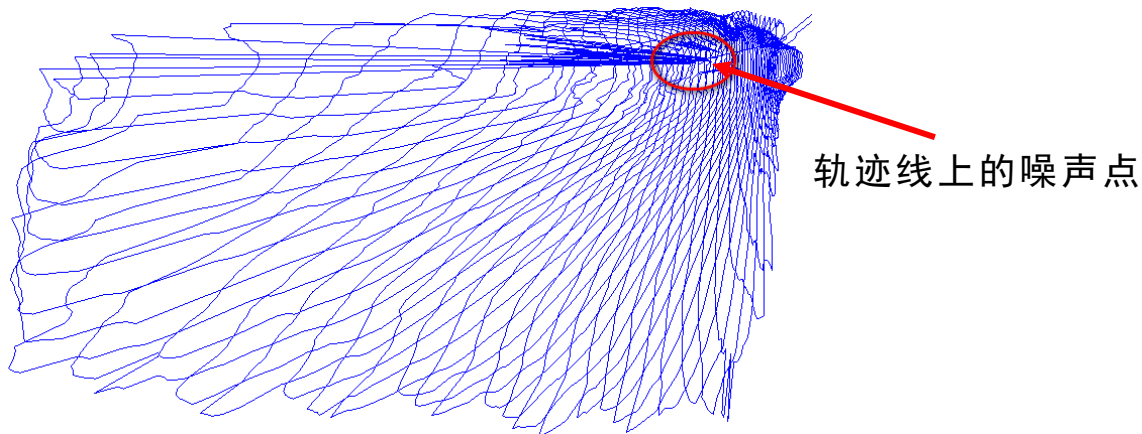
- 探测仪本身的精度设置引起的误差；
- 扫描头水平放置不当引起的误差。

2) 外界环境变化引起的噪声点

- 探测时没有在最佳温度、湿度和粉尘浓度的条件下进行探测。

3) 探测环境存在遮挡引起的噪声点

- 在采场顶部的大量支护形成遮挡物；
- 探测采空区的边界时，激光探测到支护等遮挡上产生的噪声点。



3.2 工程结构三维可视化表达

3.2.1 三维激光点云处理

● (2) 噪声点的主要特征——针对探测环境存在遮挡引起的噪声点

第一

噪声点到紧邻前后两点的距离之和，
远大于正常点到紧邻前后两点的距离之和。

第二

噪声点与紧邻前后两点形成的夹角，
远小于正常点与紧邻前后两点形成的夹角。

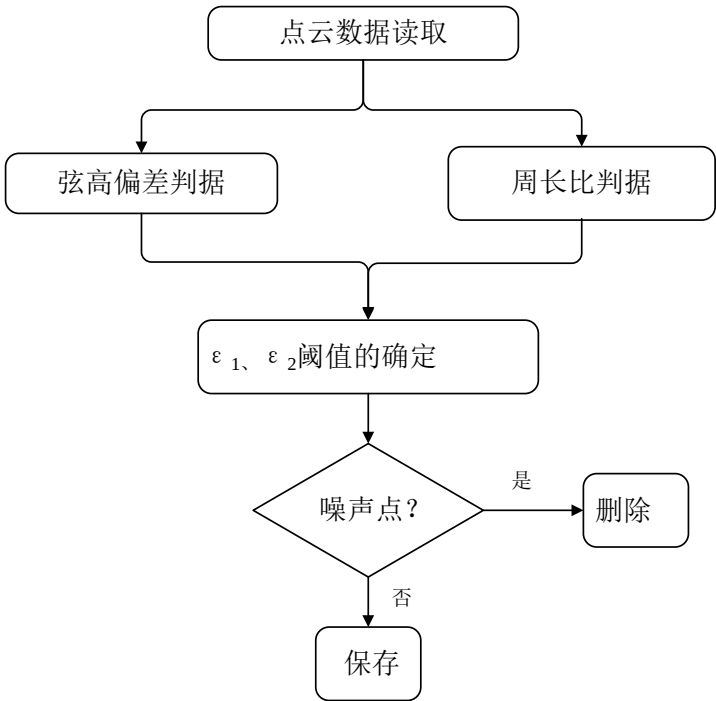
第三

噪声点到紧邻前后两点连线的距离，
远大于正常点到紧邻前后两点连线的距离。

3.2 工程结构三维可视化表达

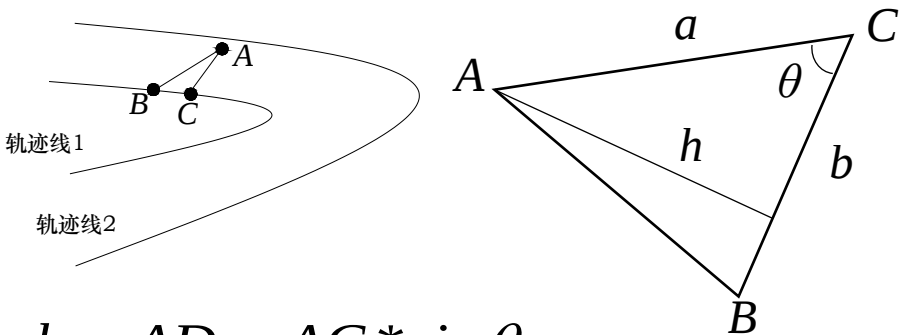
3.2.1 三维激光点云处理

● (3) 噪声点过滤方法



噪声点过滤流程图

➤ 1) 弦高偏差判据



$$\left\{ \begin{aligned} h &= AD = AC * \sin \theta \\ \cos \theta &= \frac{ab}{|a| * |b|} = \frac{a_x b_x + a_y b_y + a_z b_z}{\sqrt{a_x^2 + a_y^2 + a_z^2} + \sqrt{b_x^2 + b_y^2 + b_z^2}} \\ h &= \sqrt{\frac{1 - (a_x b_x + a_y b_y + a_z b_z)}{\sqrt{a_x^2 + a_y^2 + a_z^2}}} \end{aligned} \right.$$

3.2 工程结构三维可视化表达

3.2.1 三维激光点云处理

● (3) 噪声点过滤方法

➤ 2) 周长比判据

$$L = \sqrt{(a_x - b_x)^2 + (a_y - b_y)^2 + (a_z - b_z)^2} + \sqrt{(a_x - c_x)^2 + (a_y - c_y)^2 + (a_z - c_z)^2} + \sqrt{(c_x - b_x)^2 + (c_y - b_y)^2 + (c_z - b_z)^2}$$

➤ 3) 判别方法

求出三角形的周长
 L (或弦高 h)

将之与紧邻两三角形的周长
 L_1 、 L_2 (或者 h_1 和 h_2) 作比值
记为 $L'=L_1/L_2$ ($h'=h_1/h_2$)

与设定的阈值 ε_1 (或 ε_2) 相比较判断是否为异常点 (即噪声点), 噪声点需要删除

3.2 工程结构三维可视化表达

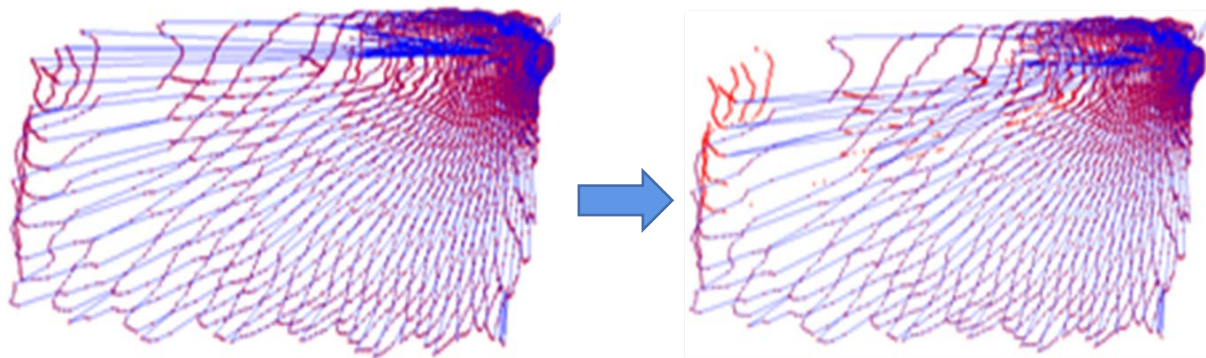
3.2.1 三维激光点云处理

● (4) 噪声点过滤步骤

读取XYZ数据文件，将点的空间信息存入到数据容器中，其空间信息包含采空区边界点的 x 、 y 、 z 坐标值以及该点所在圈数的位置。

定义初始圈（一般将探测圈的第一圈作为初始圈）。

根据弦高偏差法判据判断弦高比 h' 与 ε_1 的关系，及周长比 L' 与 ε_2 的关系；若 $h > \varepsilon_1$ 且 $L > \varepsilon_2$ ，则该点为噪声点应该过滤。



噪声点过滤前后对比效果图

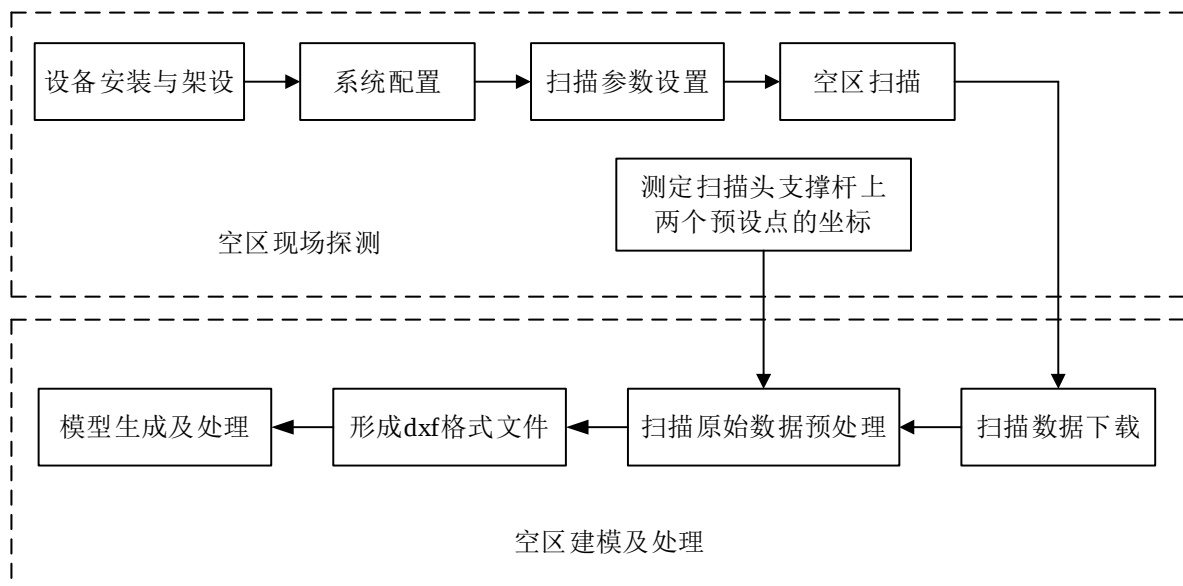
综合考虑点云数据过滤的效率，将过滤后建立的三维模型求得的体积与运用较成熟的其他软件相比产生的误差相比较，确定两个阈值 ε_1 、 ε_2 的选取。

3.2 工程结构三维可视化表达

3.2.2 三维模型可视化操作

● (1) 三维可视化表达的流程

- 在三维点云数据处理的基础上，运用数字化工具建立工程结构三维可视化模型，实现工程结构三维可视化表达。



注意：在对采空区三维实体模型进行处理的过程中，经常需要对其全方位观察，通过绕空间任一旋转轴旋转可以实现。OpenGL提供了在空间中物体绕任意轴旋转的功能，但是需要提供旋转轴的坐标，而当前计算机的输入设备没有输入三维数据的功能。

因此，**三维旋转实现**是工程结构三维可视化表达的重点。

3.2 工程结构三维可视化表达

3.2.2 三维模型可视化操作

- (2) 采空区三维模型的构建步骤

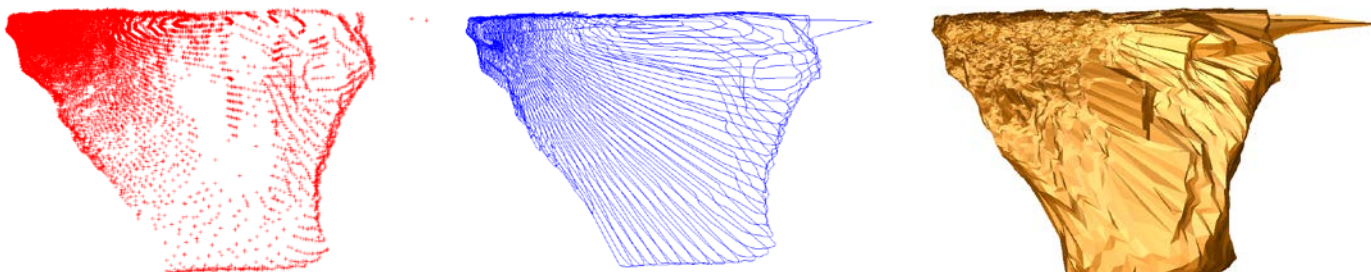
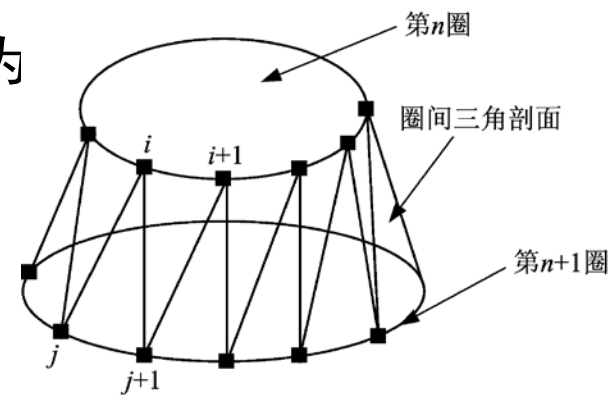
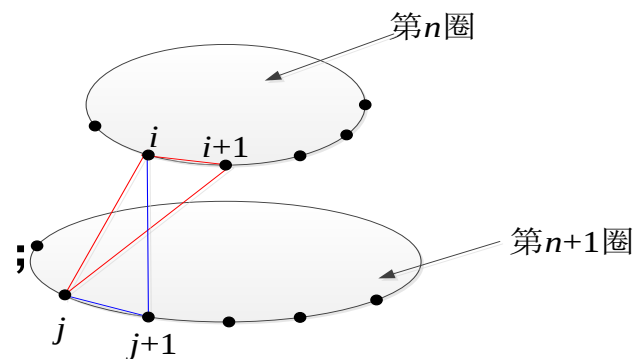
- 1) 读取“xyz”格式数据文件，将采空区边界点的 x 、 y 、 z 坐标值、圈数等空间信息存入到vector点的数据容器中；
- 2) 定义一条初始边（一般选取相邻两圈的第一个点连线作为初始边）；
- 3) 设第 n 圈的第 i 个点和第 $n+1$ 圈的第 j 个点的连线形成的边记为 e_1 ，对比第 n 圈的第 $i+1$ 个点和第 $n+1$ 圈的第 $j+1$ 个点连接形成的三角形的周长大小；

3.2 工程结构三维可视化表达

3.2.2 三维模型可视化操作

● (2) 采空区三维模型的构建步骤

- 4) 按照最小周长的原则，通过计算和比较两个三角形的周长值，选取周长较小的点最为三角形的第三个点（如右图）；
- 5) 将生成的三角形存入到三角形的vector容器中；
- 6) 运用OpenGL界面显示功能将所有三角形显示出来，即为采空区的三角网格模型，如下图。

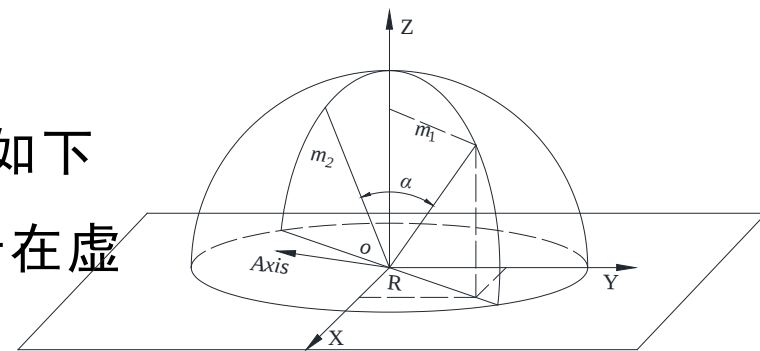


3.2 工程结构三维可视化表达

3.2.2 三维模型可视化操作

● (3) 三维坐标轴的二维表达与三维旋转实现

- 1) 在计算机图形技术中，利用投影变换技术将三维物体转化为二维图形，因此旋转前后的三维物体具有不同的投影点。
- 2) 对物体三维旋转转化：鼠标在屏幕上沿某一方向的移动等价于物体绕三维空间中某一坐标轴的旋转，该坐标轴平行于屏幕且垂直于鼠标移动方向。
- 3) 三维旋转时假设把三维物体放置于一个**虚拟球**中（如下图）。鼠标和虚拟球同步旋转，当按下鼠标时，相当于在虚拟球上确定了一点，拖动鼠标相当于移动该点。



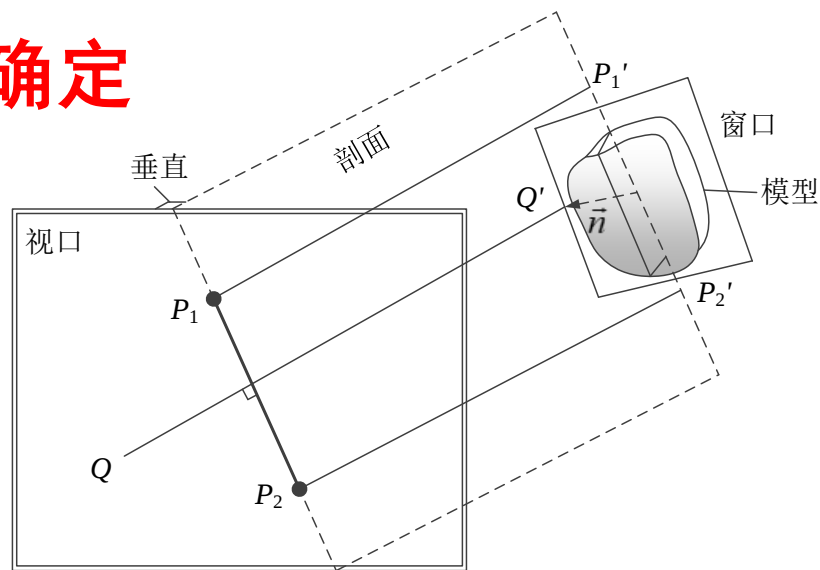
3.2 工程结构三维可视化表达

3.2.3 模型分析及剖面自动生成

➤ 以采空区三维实测模型为基础，运用数字化工具可形成采空区任意方向的剖切面。所生成的采空区剖面可为矿山在采空区周边进行相关开采设计（如矿柱开采）等工作提供必要的基础性依据（如实际边界等）。

●（1）任意方向剖切平面确定

➤ 1）拉线方式



3.2 工程结构三维可视化表达

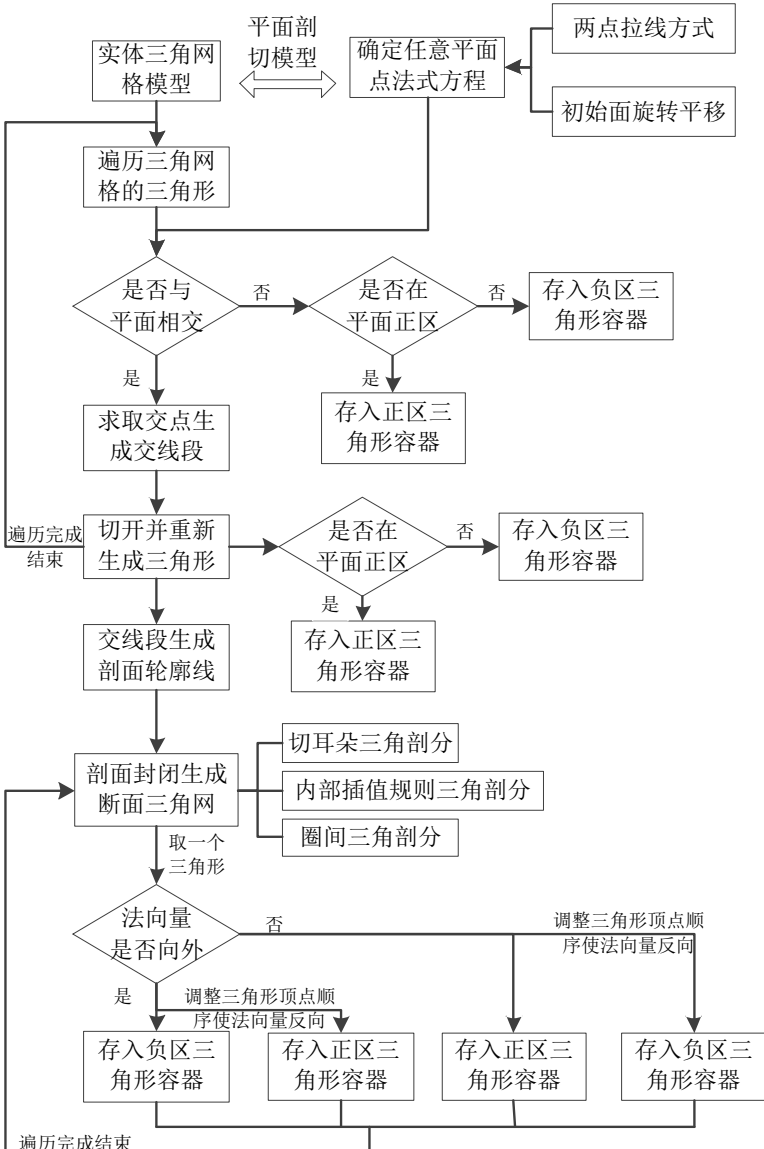
3.2.3 模型分析及剖面自动生成

● (1) 任意方向剖切平面确定

➤ 2) 旋转和平移方式

- 首先生成一个初始平面；
- 然后将平面以初始中心点为原点，围绕X、Y、Z轴分别旋转角度 α 、 β 、 γ 。
- 假设初始法向量变换为旋转后法向量，当平面绕x轴旋转 α 角时，其坐标变换为：

$$\begin{bmatrix} x_1 & y_1 & z_1 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_0 & y_0 & z_0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\alpha & \sin\alpha & 0 \\ 0 & -\sin\alpha & \cos\alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$



3.2 工程结构三维可视化表达

3.2.3 模型分析及剖面自动生成

● (2) 相交判断及交线提取

➤ 1) 相交判断

三角形与剖切平面的空间位置关系主要有9种情况：

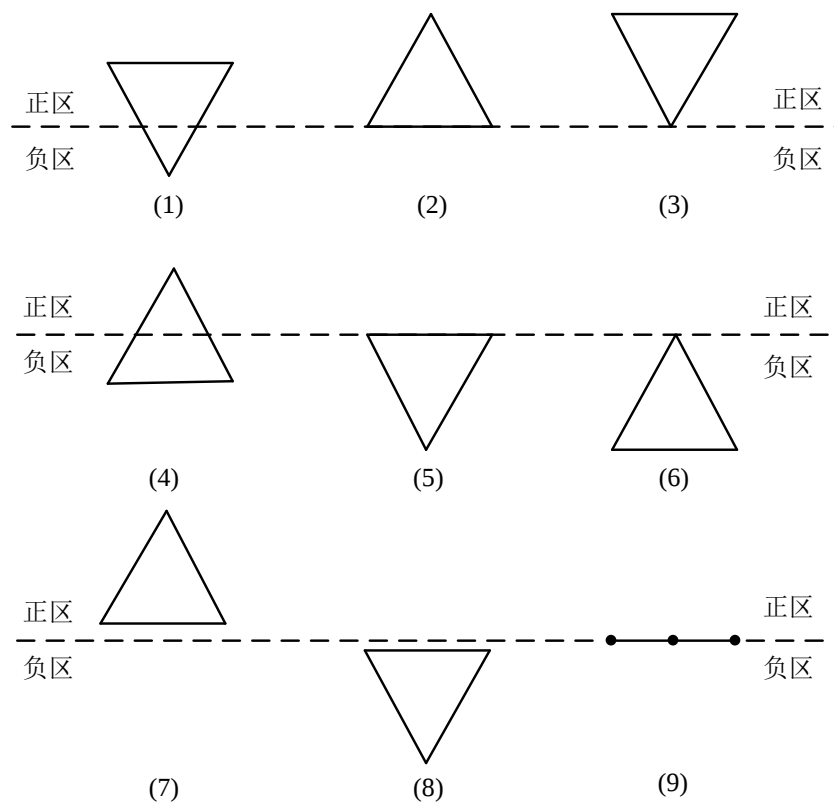
当 $AX+BY+CZ+D=0$ ，则 P 点在平面上；

当 $AX+BY+CZ+D>0$ ，则 P 点在平面正半空间（正区）；

当 $AX+BY+CZ+D<0$ ，则 P 点在平面负半空间（负区）。

➤ 2) 提取交线

$$t = \frac{x_1 - x_i}{x_2 - x_i} = \frac{y_1 - y_i}{y_2 - y_i} = \frac{z_1 - z_i}{z_2 - z_i} \quad t = \frac{A(x_0 - x_1) + B(y_0 - y_1) + C(z_0 - z_1)}{A(x_0 - x_2) + B(y_0 - y_2) + C(z_0 - z_2)}$$



三角形与平面的空间关系

3.2 工程结构三维可视化表达

3.2.3 模型分析及剖面自动生成

● (3) 三角形重构的步骤

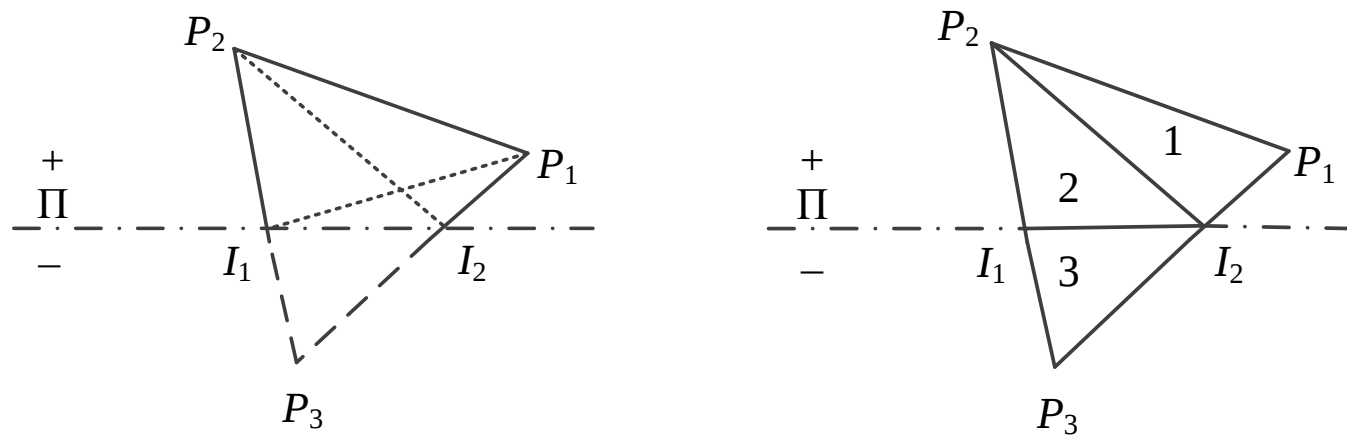
- 1) 利用简化判据判断剖切平面 Π 和 $\triangle P_1P_2P_3$ 三角形的相交关系；
- 2) 当判断相交存在交点时，则运用上节方法求出交线，设两个交点为 I_1 和 I_2 ；
- 3) 计算线段 P_1I_2 和 P_2I_1 长度，当长度小于 10^{-6} 时则将线段视为共点，四边形作为一个三角形输出；
- 4) 如果上述两线段长度均大于 10^{-6} 时，分别计算四边形 $P_1P_2I_1I_2$ 的两条对角线 P_1I_1 和 P_2I_2 剖分的一对三角形中最小角，取最小角较大的对角线情况作为三角形重构方案；

3.2 工程结构三维可视化表达

3.2.3 模型分析及剖面自动生成

● (3) 三角形重构的步骤

➤ 5) 输出三角形1、三角形2和三角形3。



三角形重构算法示意图

3.2 工程结构三维可视化表达

3.2.3 模型分析及剖面自动生成

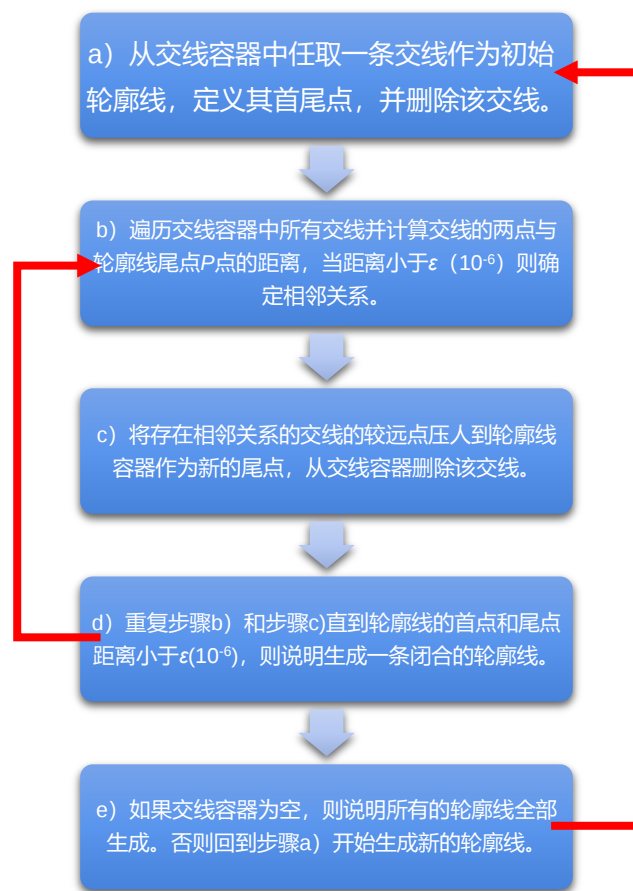
● (4) 剖面轮廓线生成及模型断面封闭

➤ 1) 剖面轮廓线生成

➤ 2) 模型断面封闭

- 切耳朵三角剖分
- 内部插值三角剖分
- 线圈间三角剖分

➤ 3) 算法效果分析



3.2 工程结构三维可视化表达

3.2.3 模型分析及剖面自动生成

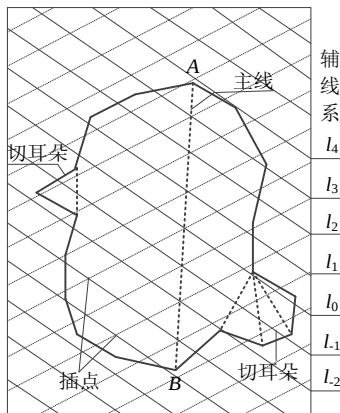
● (4) 剖面轮廓线生成及模型断面封闭

➤ 1) 剖面轮廓线生成

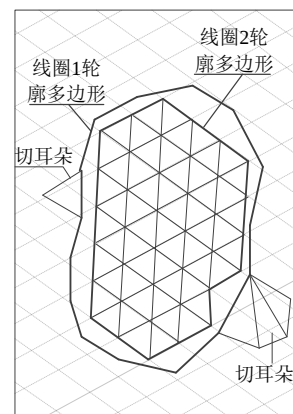
➤ 2) 模型断面封闭

- 切耳朵三角剖分
- 内部插值三角剖分
- 线圈间三角剖分

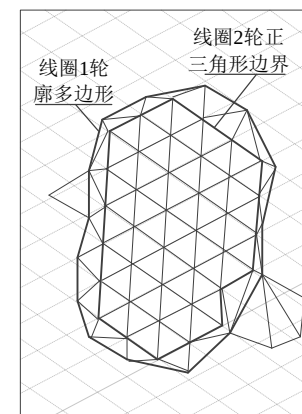
➤ 3) 算法效果分析



正三角形排列的内部插值



模型断面封闭算法示意图



3.2 工程结构三维可视化表达

3.2.3 模型分析及剖面自动生成

● (4) 剖面轮廓线生成及模型断面封闭

➤ 1) 剖面轮廓线生成

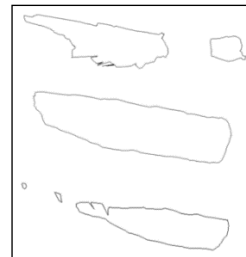
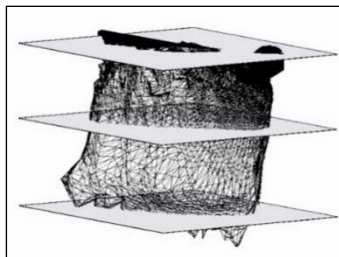
➤ 2) 模型断面封闭

- 切耳朵三角剖分

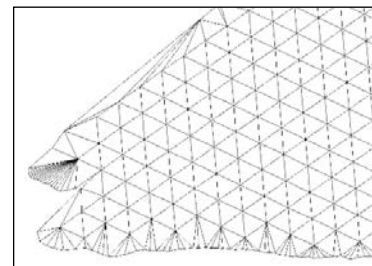
- 内部插值三角剖分

- 线圈间三角剖分

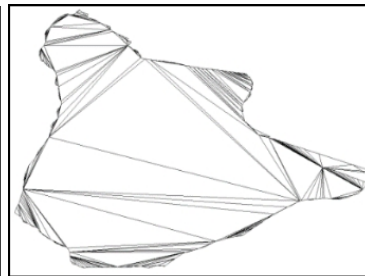
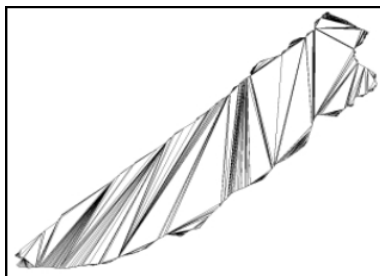
➤ 3) 算法效果分析



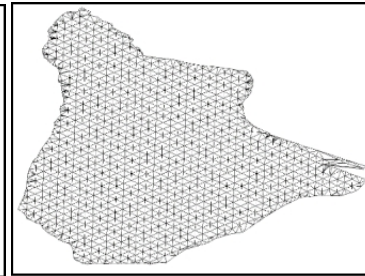
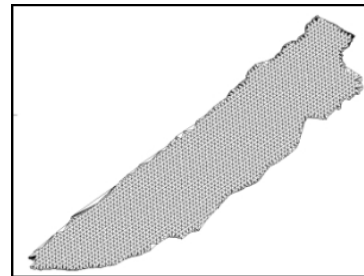
算法生成剖面轮廓线



封闭断面的三角网局部效果图



单一切耳朵算法效果



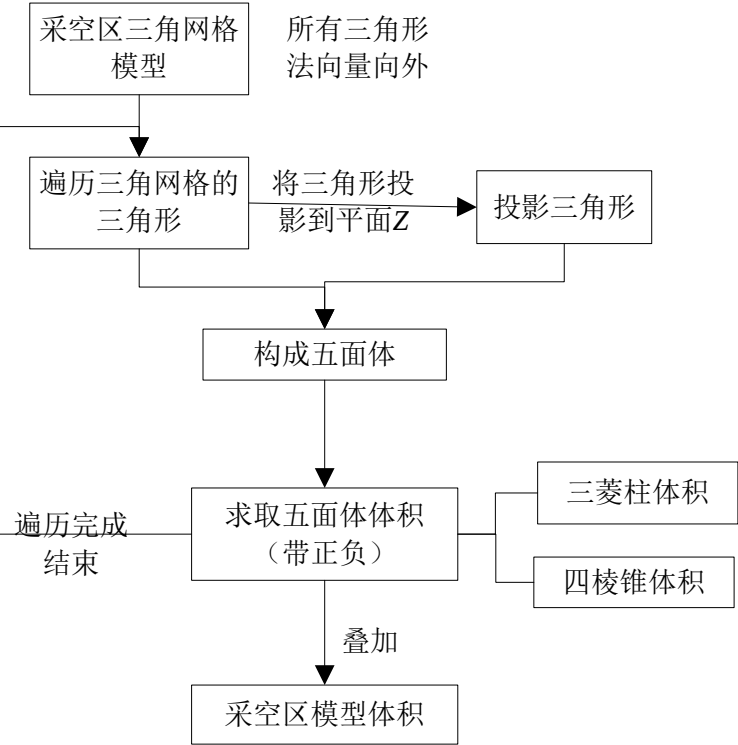
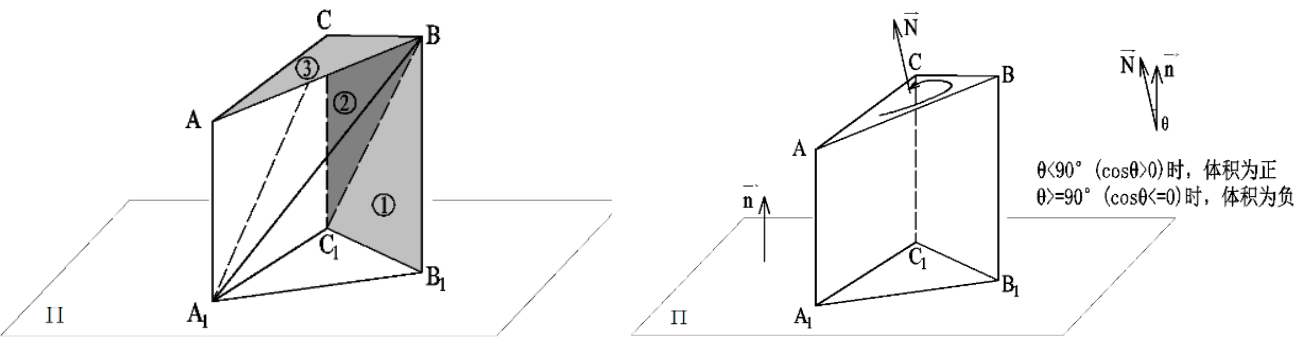
封闭断面算法效果

3.2 工程结构三维可视化表达

3.2.3 模型分析及剖面自动生成

● (5) 采空区三角形投影体积算法

- 采空区体积的获取是采空区充填以及灾难监测的重要基础。
- 三角形投影体积算法前提是建立的采空区三角网模型封闭且所有三角形的法向量指向外。



采空区三角形投影体积算法流程

3.2 工程结构三维可视化表达

3.2.3 模型分析及剖面自动生成

- (6) 采空区三角网格模型布尔运算算法

- 布尔运算是通过对两个以上的物体进行并集、交集、差集的运算，从而得到新的物体形态。

➤ 1) 算法原理——算法的关键

其一

实现三角形单元间的快速碰撞相交检测。

其三

准确判断三角形在另一模型的内部或外部。

其二

根据三角形间的相交判断和交线生成，对主三角形进行区域划分并重新三角剖分。

3.2 工程结构三维可视化表达

3.2.3 模型分析及剖面自动生成

● (6) 采空区三角网格模型布尔运算算法

➤ 1) 算法原理——算法的内容

第一

根据三角网格模型自动计算工程体方位，沿走向构建三角网大包围盒，排除包围盒外部的三角形，将其归类为外部三角形。

第二

沿走向构建每个三角形的AABB包围盒，结合平衡二叉树空间划分进行碰撞检测，对于包围盒相交情况进行三角形间的相交判断。

第三

利用平面正负区域判据和三角形与平面的交线是否有重叠线段判据，进行空间三角形相交判断，并对相交三角形提取交线段，并生成交线链或交线环。

3.2 工程结构三维可视化表达

3.2.3 模型分析及剖面自动生成

● (6) 采空区三角网格模型布尔运算算法

➤ 1) 算法原理——算法的内容

第四

利用交线链和交线环对三角形进行区域划分，并采用细分三角剖分法对划分区域多边形进行二次三角剖分。

第五

根据交线法向量对二次三角剖分的三角形进行内外判别。

第六

根据相邻三角形共边原则将剩余未区分三角形归类到内部或外部。

3.2 工程结构三维可视化表达

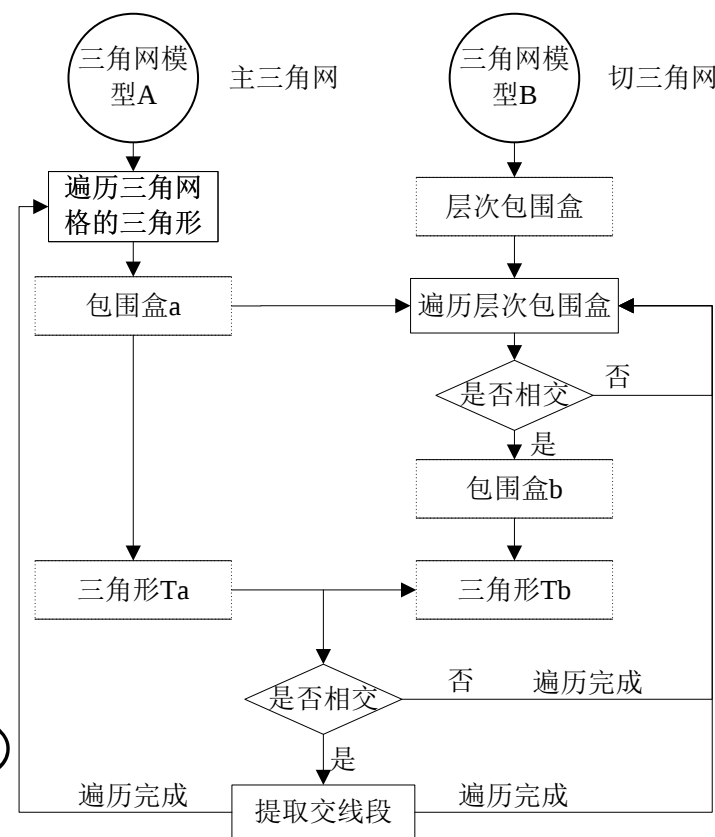
3.2.3 模型分析及剖面自动生成

● (6) 采空区三角网格模型布尔运算算法

➤ 2) 沿走向AABB包围盒碰撞检测

几何模型间的碰撞检测，目前常用的基于各种不同的包围体碰撞检测算法，其不同包围体类型有：

- AABB包围盒 (axis-aligned bounding box)
- OBB包围盒 (oriented bounding box)
- k-DOps包围体 (k sided Diseretely oriented Polytopes)
- 圆柱包围体
- 球包围体



包围盒碰撞测试流程图

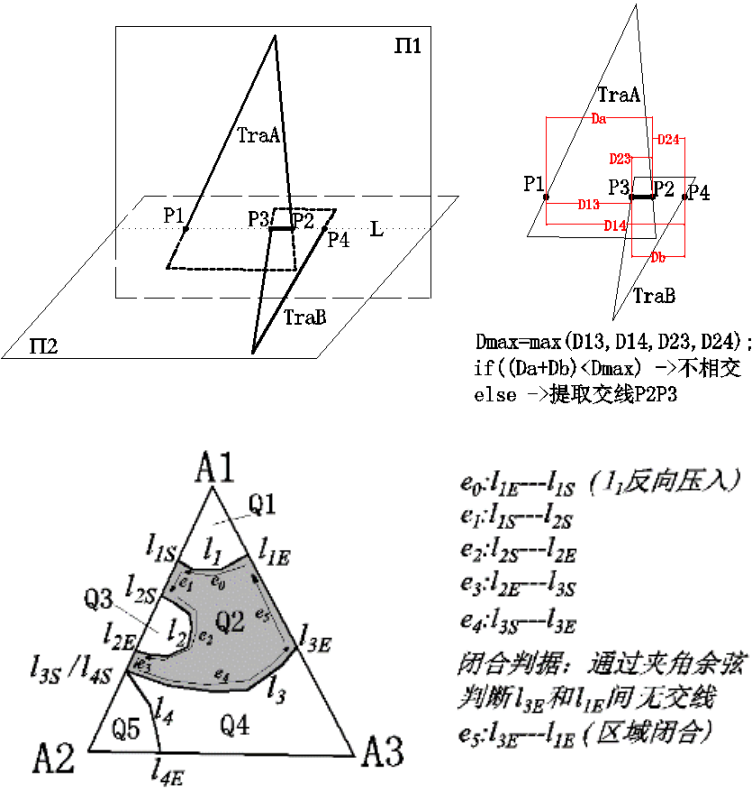
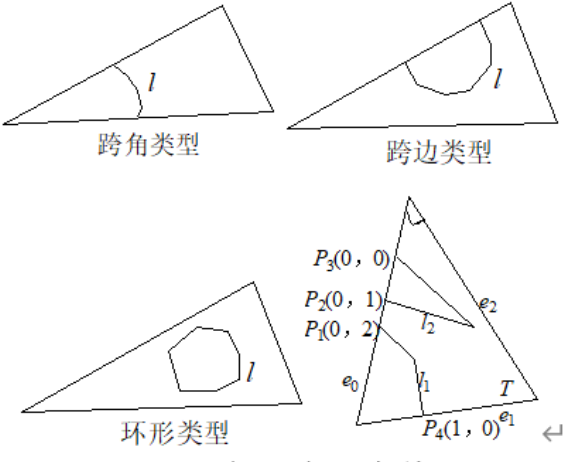
3.2 工程结构三维可视化表达

3.2.3 模型分析及剖面自动生成

● (6) 采空区三角网格模型布尔运算算法

➤ 3) 三角形相交判断及交线生成

- 三角形相交判断
- 交线生成
- 三角形相交区域划分
- 三角形内外关系判断



三角相交判断及交线生成原理图

3.3 三维激光探测可视化集成系统

● 采空区三维激光探测可视化集成系统（CVIS）

是专门用于采空区三维激光探测空间信息处理的集采空区信息管理、采空区激光探测点云数据去噪优化、采空区三维模型构建、模型可视化显示及操作、模型编辑、剖面生成、采空区体积及顶板面积计算、模型间布尔运算以及可与第三方软件交互等功能于一体的采空区三维激光探测信息可视化集成系统。

- 其发展方向是实现标准化、智能化、集成化和虚拟设计化。

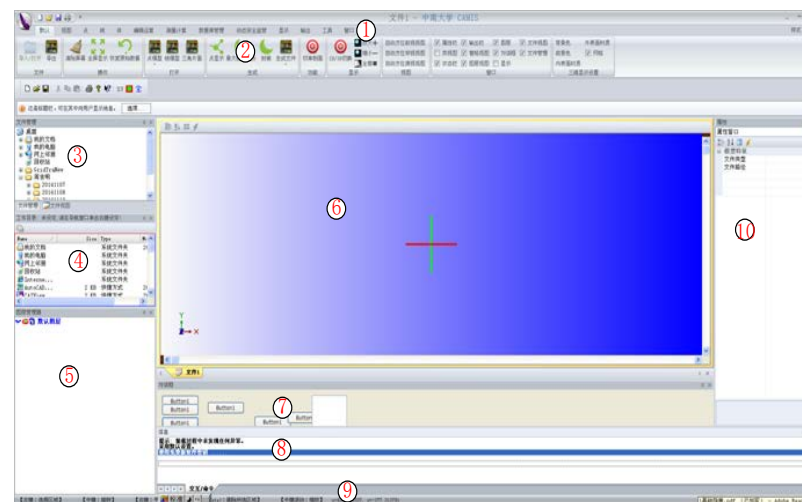
3.3 三维激光探测可视化集成系统

3.3.1 集成系统界面及系统设计

● (1) 集成系统界面特点及构成

集成系统CVIS的主界面如图，其特征为：

- 1) 所有功能有组织地集中存放；
- 2) 更好地在每个应用程序中组织命令；
- 3) 提供足够显示更多命令的空间；
- 4) 丰富的命令布局更容易地找到重要的常用的功能；
- 5) 可以显示图示，对命令的效果进行预览。



集成系统CVIS主界面

3.3 三维激光探测可视化集成系统

3.3.1 集成系统界面及系统设计

● (2) 集成系统CVIS设计

➤ 1) 系统功能设计

- (a) **采空区三维模型构建功能需求**：激光探测点云空间信息数据的读取、三角剖分、构建采空区模型。
- (b) **采空区三维可视化功能需求**：建立采空区三维模型可视化视景环境、基本三维图形操作、优化三维模型显示、采空区垮塌冒落情况。
- (c) **采空区可视化计算功能需求**：采空区的体积和顶板暴露面积
- (d) **采空区信息管理功能需求**：建立Accesss数据库，实现对采空区信息记录的查询、添加、修改和删除等操作。

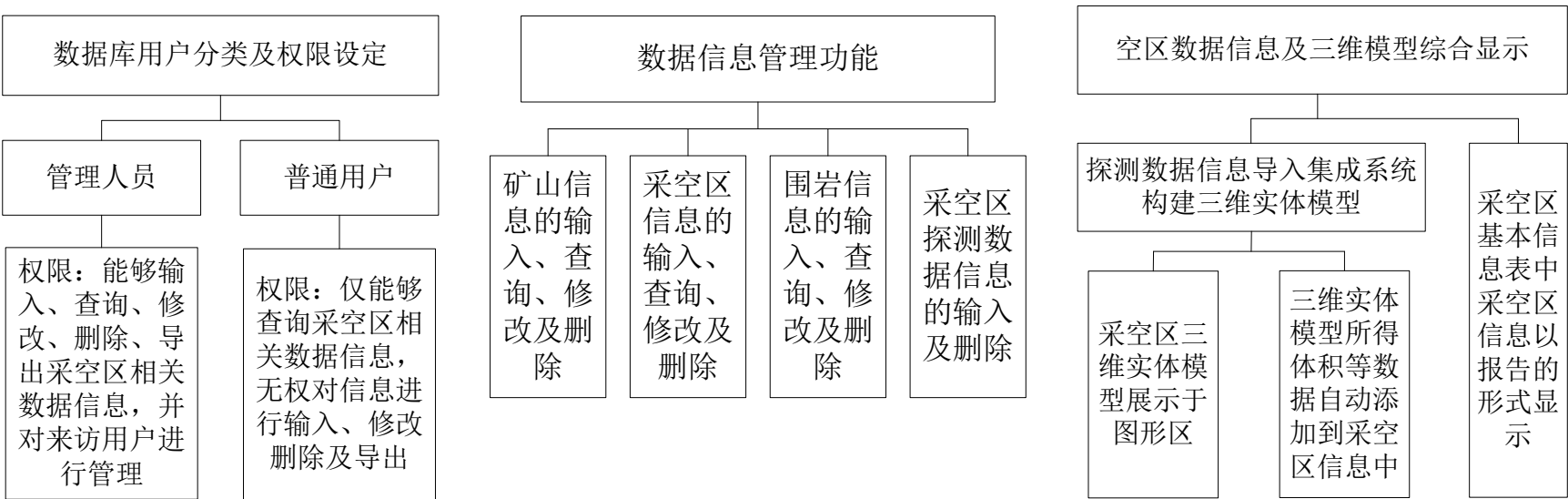
3.3 三维激光探测可视化集成系统

3.3.1 集成系统界面及系统设计

● (2) 集成系统CVIS设计

➤ 2) 数据库设计

(a) 数据库功能设计：控制、管理和显示。



3.3 三维激光探测可视化集成系统

3.3.1 集成系统界面及系统设计

● (2) 集成系统CVIS设计

➤ 2) 数据库设计

(b) 数据库表设计：采空区信息数据库系统通过数据库表实现采空区相关信息的分类和存储，并通过数据库表间关系反映采空区信息的关联性。

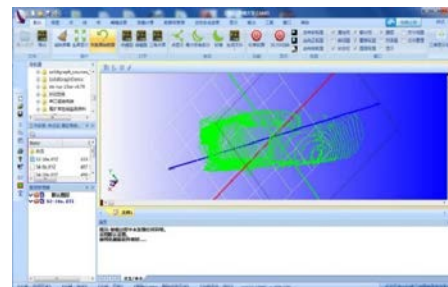
- **矿山信息表**：矿山名称，矿山地理位置，出产金属，矿山联系人，矿山联系电话，矿山岩性和备注。
- **采空区信息表**：矿山名称，采空区名称，地理位置，探测时间，探测工具，探测次序，前靶标坐标，后靶标坐标，探测抬升角和采空区围岩信息等。
- **围岩信息表**：矿山名称，围岩名称，泊松比等围岩特性。
- **原始探测信息表**：采空区探测过程中探测点的三维空间坐标信息。
- **用户信息表**：用户名，用户密码，用户权限，用户类别和其他信息。

3.3 三维激光探测可视化集成系统

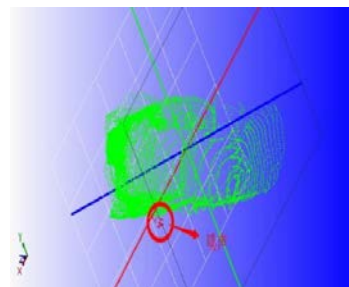
3.3.2 集成系统功能

● (1) 集成数据预处理与模型构建

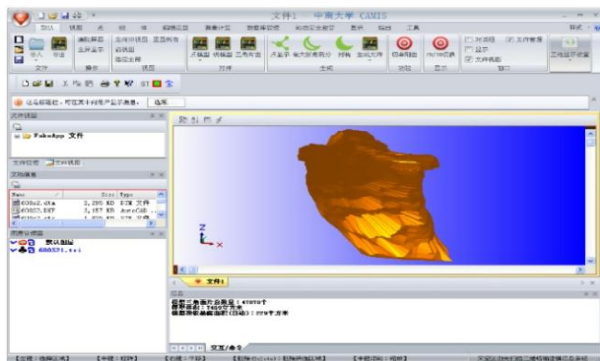
- 1) 点云数据去噪
- 2) 采空区三维模型构建
- 3) 模型三维显示



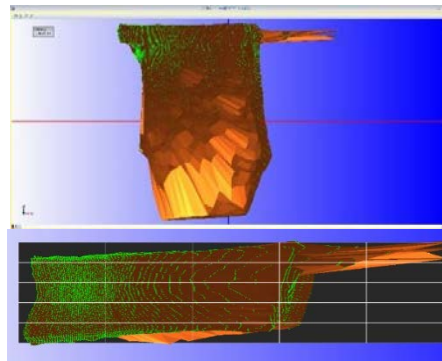
自动去噪界面



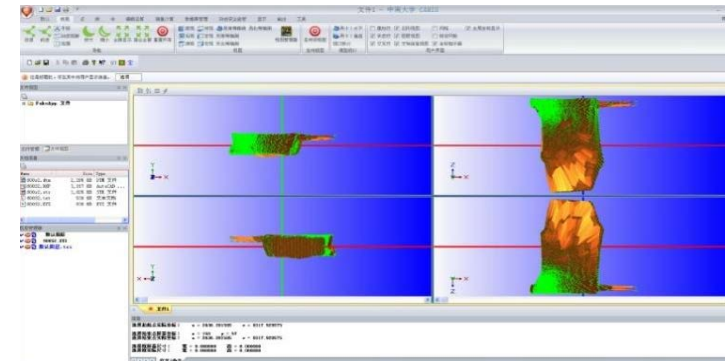
手动去噪



模型构建



全屏、多视角和点云显示

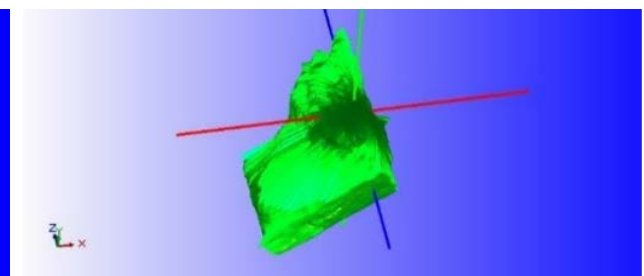
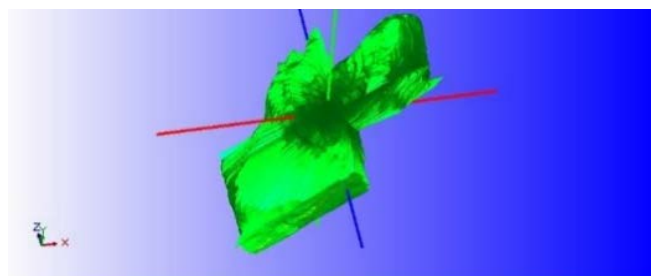
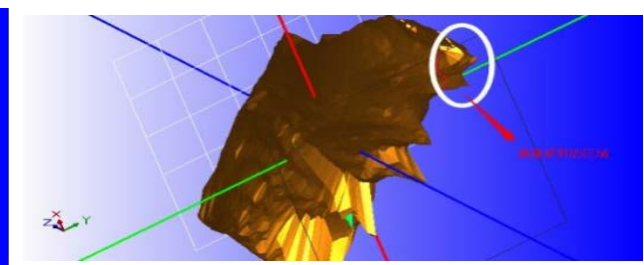
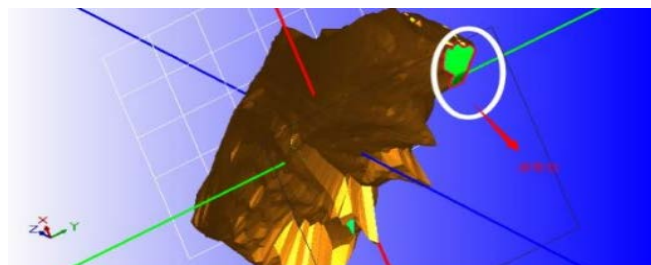
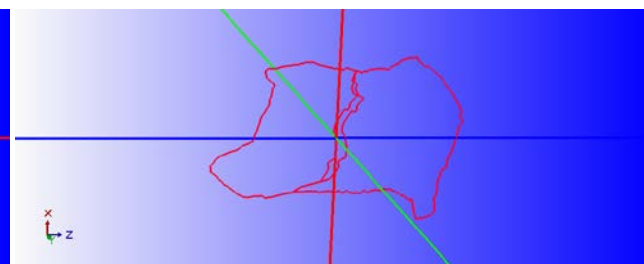
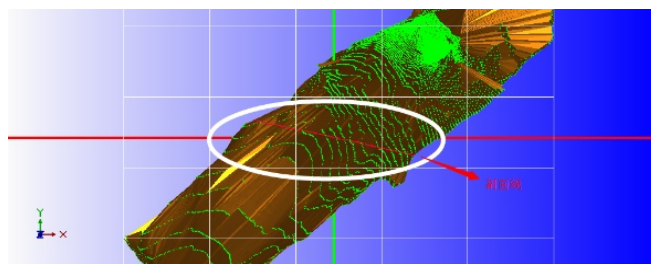


3.3 三维激光探测可视化集成系统

3.3.2 集成系统功能

● (2) 模型编辑与布尔运算

- 1) 模型剖切
- 2) 模型修剪
- 3) 模型布尔运算

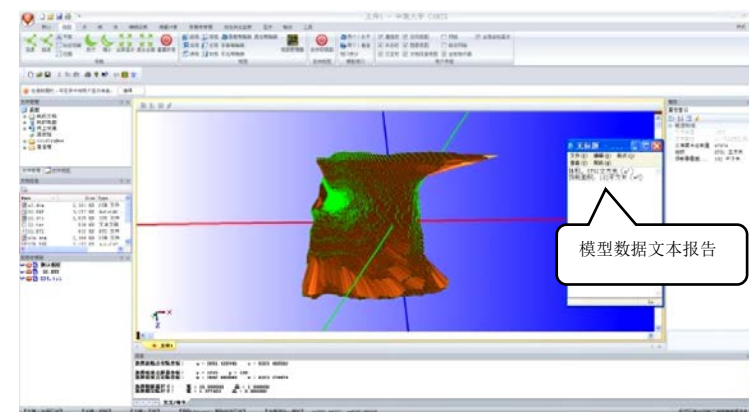
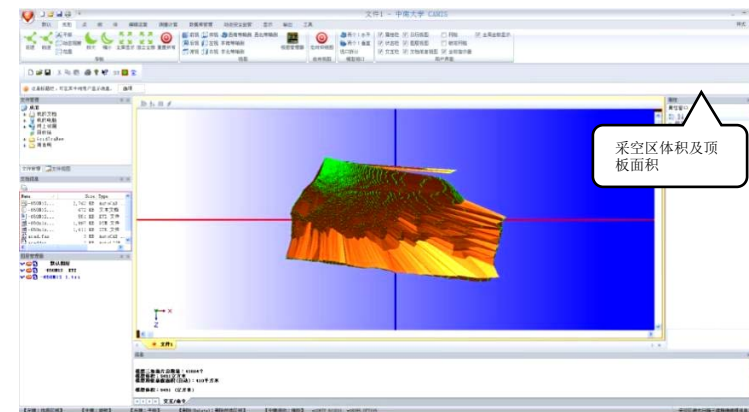
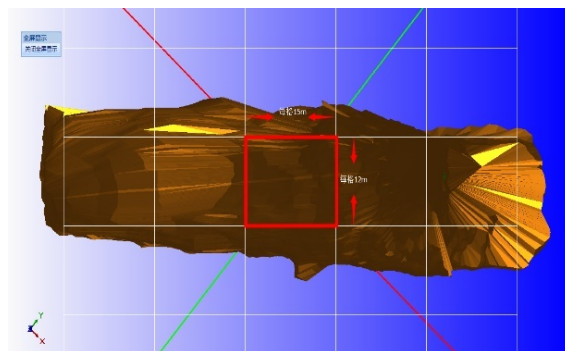
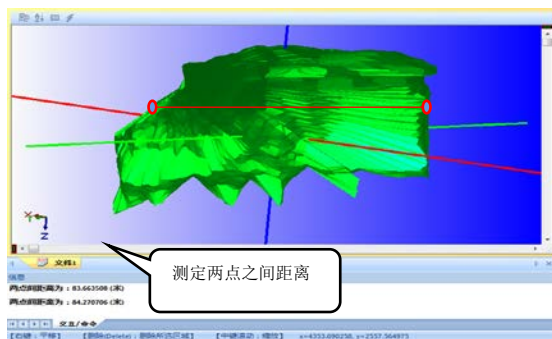


3.3 三维激光探测可视化集成系统

3.3.2 集成系统功能

● (3) 模型计算与测量

- 模型计算功能实现采空区体积计算及暴露顶板面积的计算；
- 鼠标可以测定任意两点的距离，二是显示网格测量采空区三维模型。



思考题

1. 三维激光探测原理是什么？
2. 工程结构三维可视化处理软件有哪些？
3. 工程结构三维可视化表达的内容有哪些？
4. 三维激光探测可视化集成系统的主要功能有哪些？