



中南大學
CENTRAL SOUTH UNIVERSITY



第六章 数字化地测技术

主讲人：毕林

2024年8月13日



目录

- 6.1 填挖方量计算方法
- 6.2 资源储量三维估算方法
- 6.3 资源储量三维动态管理



6.1

填挖方量计算方法

矿山开采生产与经营管理新模式的变革背景



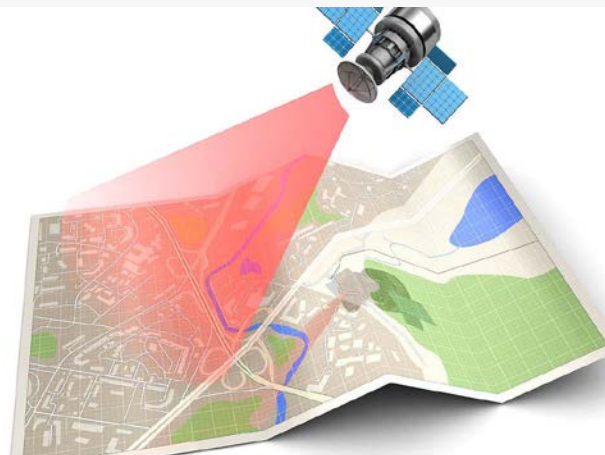


6.1.1 剖面法



剖面法原理

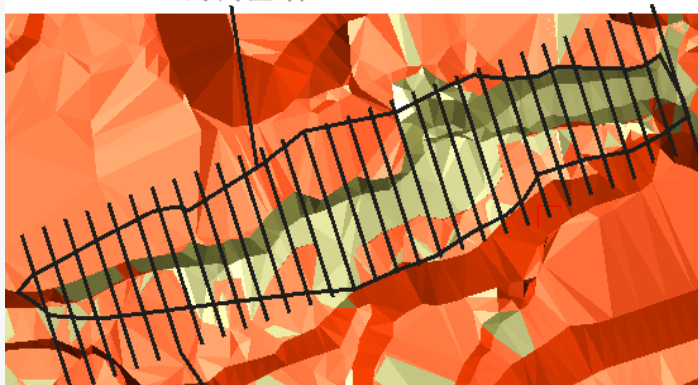
为了求得边界范围内填挖实体的体积，按照设定的剖面间距和方向剖切DTM，形成若干个平行的剖面，从而形成封闭区域。



公式选择原则

根据相邻两个剖面的封闭区域对应面积关系选择合适的公式计算体积。

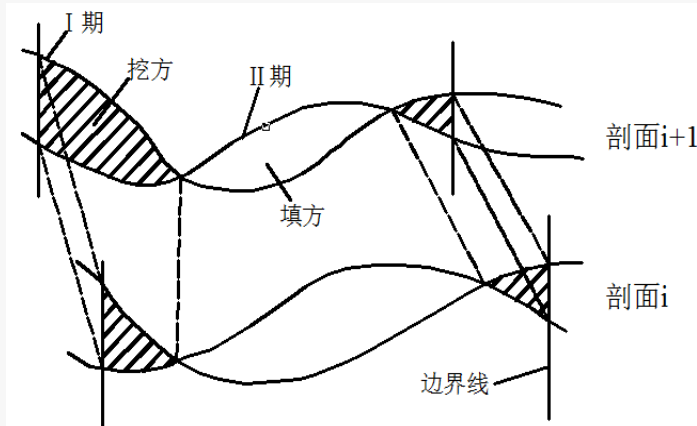
封闭区域



剖面线

面积计算原则

提取封闭区域的顶点，按照多边形面积计算原则采用式计算封闭区域的面积。



1) 体积计算公式



中南大學
CENTRAL SOUTH UNIVERSITY



01

棱柱体公式

当面积相对差 $k = (S_1 - S_2) / S_1$, $k \leq 40\%$ 时, 采用棱柱体公式。

02

截锥体公式

当 $k \geq 40\%$ 时, 采用截锥体公式。

03

楔形体公式

当 $S_2 = 0$, 楔形尖灭时, 采用楔形体公式。

04

角锥体公式

当 $S_2 = 0$, 锥形尖灭时, 采用角锥体公式。

2) 误差来源



中南大学
CENTRAL SOUTH UNIVERSITY

剖面法误差来源

剖面法将非线性剖面面积以线性的方式表达，用规则形体估算不规则形体的体积，导致计算结果存在误差。

剖面间距影响

当剖面间距无穷小时，计算的结果最接近准确值，但在工程实际运用中，只能选择一定的间距进行计算。

DTM交叉现象

在相邻剖面的间距内，可能会出现两期DTM交叉的现象，导致计算结果存在误差。

端部体积误差

在计算区域内垂直剖面方向上，两个端部的体积采用尖灭的方式计算也存在误差。





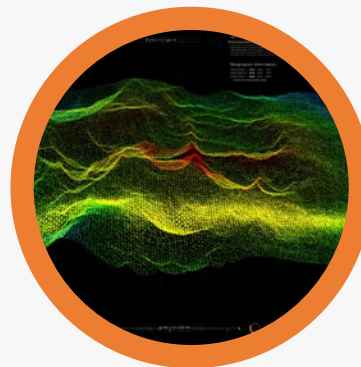
6.1.2 网格法



中南大学
CENTRAL SOUTH UNIVERSITY

网格法介绍

根据地形的特征和计算精度的要求，按照一定的单元尺寸对计算区域内的两期DTM分别进行平面规则网格化。



射线交叉法应用

通过射线交叉法进行点在多边形内的搜索，舍去中心点在边界范围外的单元。



中心点高程计算

每个中心点的高程等于该点在相应DTM上正交投影点的高程，每个单元的高程即为其中心点的高程。



1) 网格法原理



中南大学
CENTRAL SOUTH UNIVERSITY

搜索与舍去

提取每个单元的中心点，通过射线交叉法进行点在多边形内的搜索，舍去中心点在边界范围外的单元。

网格化

根据地形的特征和计算精度的要求，按照一定的单元尺寸对计算区域内的两期DTM分别进行平面规则网格化。

高程提取与规则

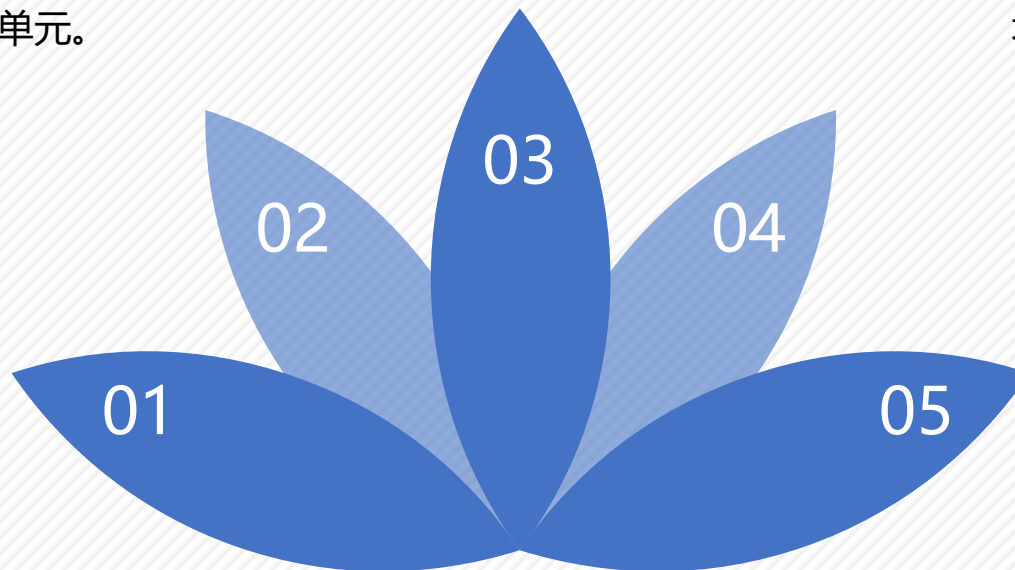
每个中心点的高程等于该点在相应DTM上正交投影点的高程，每个单元的高程即为其中心点的高程。

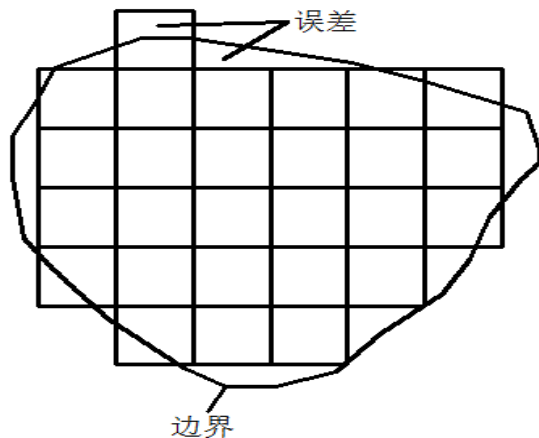
高差计算与体积

通过两期高程变化计算边界内单元的高差，大于零为挖方，小于零为填方，上下对应网格单元按照柱体规则计算体积。

填挖方量计算

分别累加相应体积即为填挖方量，网格法原理简单，计算速度快，但存在一定误差来源，需综合考虑。





01

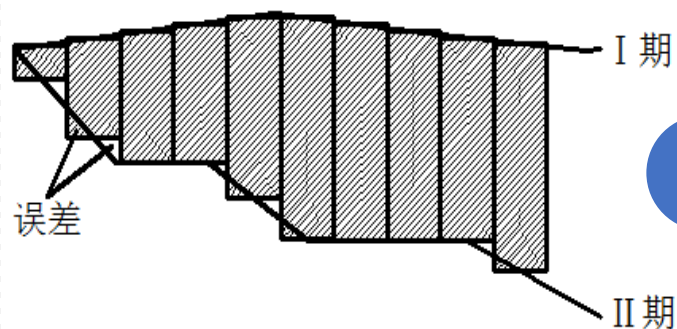
网格尺寸与计算精度

在网格划分时，网格尺寸越小，计算结果越接近实际值，但受计算速度和精度限制，只能选取一定网格尺寸进行划分。

02

计算死角与边界范围

在填挖方量计算时，由于网格尺寸的问题，导致边界范围内存在计算死角以及部分网格超出边界范围。



03

高程误差

通过累加上下网格对应形成的柱体体积来计算填挖方量，由于每个柱体的顶底面高程分别由各自中心点在相应的DTM上投影位置的高程确定，这会产生一定的高程误差。



6.1.3 三角网法



中南大学
CENTRAL SOUTH UNIVERSITY

三角网法原理

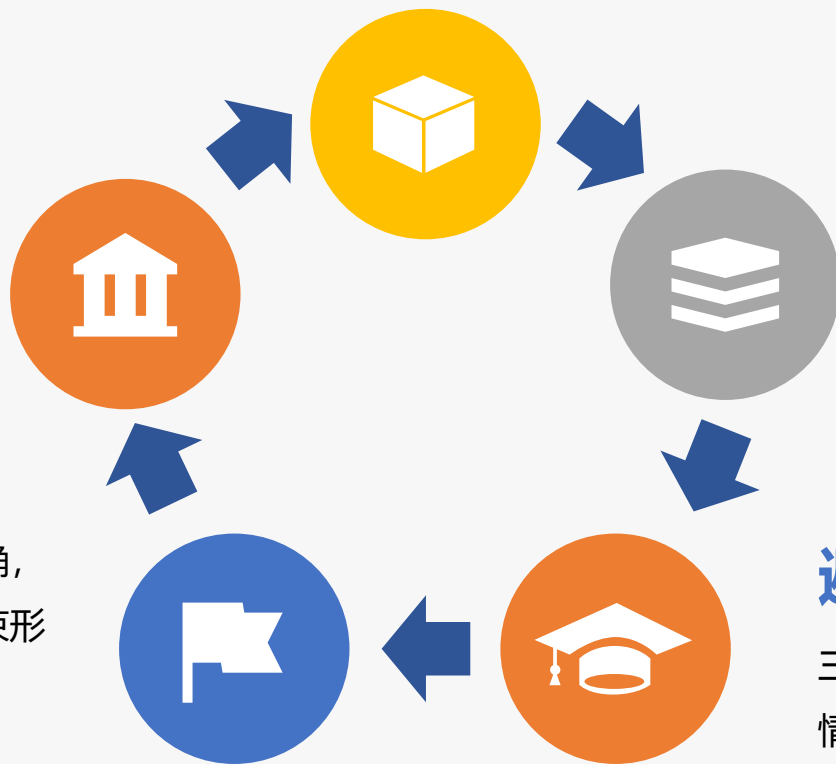
三角网法是一种通过建立DTM，并在其上构建Delaunay三角网来计算填挖方量的方法。

拟合台阶状地貌

在其他案例中，由于地形均存在多级台阶，通过对软件中生成的填挖实体观察可知，三棱柱无法较好地拟合台阶状地貌。

准确案例

只有案例三采用三角网法计算比较准确，因为案例三中没有明显的由原始线约束形成的特殊地形。



误差来源

三角网法存在误差，主要来自对台阶状地形的Delaunay划分。此方法会破坏原始的台阶状地貌。

避免两期DTM相交

三角网法没有考虑两期DTM三角形相交的情况，这可能导致计算误差较大。



6.1.3 三角网法 1) 三角网法原理



中南大学
CENTRAL SOUTH UNIVERSITY

01

DTMs取点与投影

设 I 期和 II 期地形模型分别为DTM I 和DTM II，首先分别取出DTM I 和DTM II在边界范围内的所有三角形顶点。

02

Delaunay三角网构建

将 I 和 II 中的点相互投影到对方的DTM上，可见投影后 I 期和 II 期中的点在XY面上相同，仅高程不同。

03

三棱柱形成与填挖方判定

对 I 期和 II 期构建Delaunay三角网，上下两个重新构建的三角网在拓扑连接上完全相同，形成三棱柱。

04

填挖方量计算

若三棱柱顶面三角形为 I 期则是挖方，反之则为填方。分别累加相应三棱柱的体积即为填挖方量。

2) 误差来源

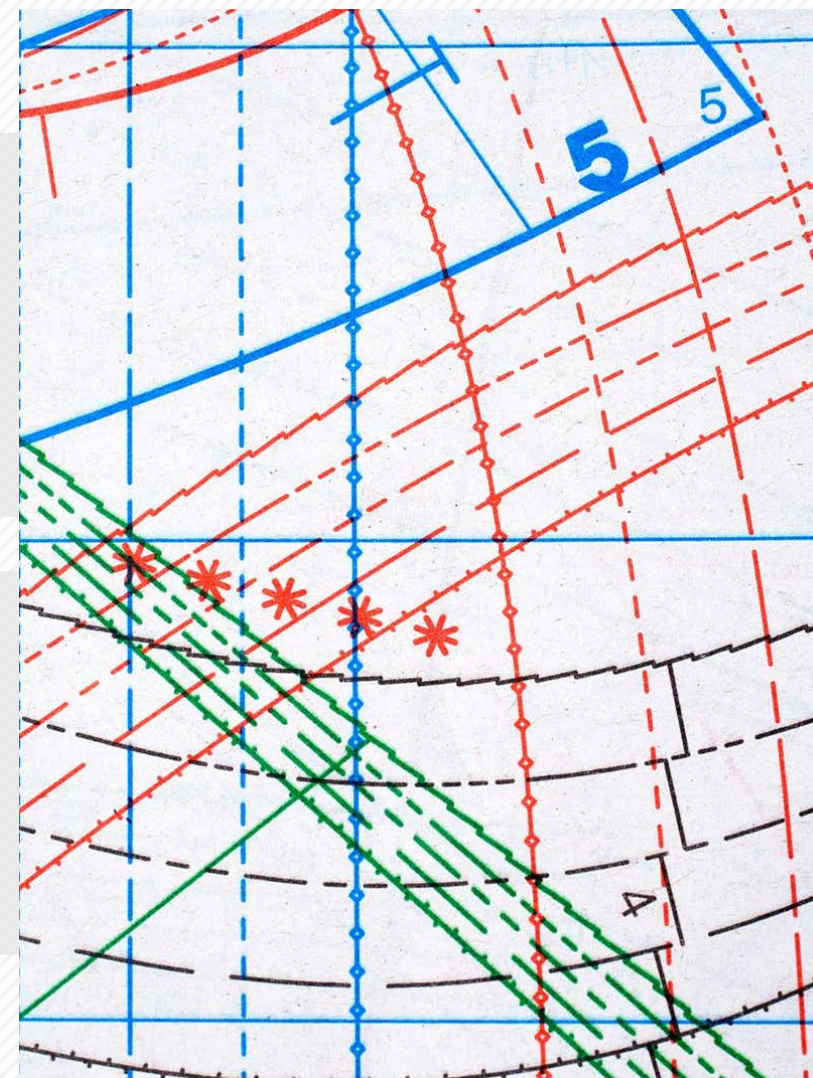


地形地貌破坏

在对台阶状地形进行Delaunay划分时，会破坏原始的台阶状地貌，出现“削平”台阶的现象。

DTM三角相交未考虑

三角网法未考虑两期DTM三角相交的情况，可能导致计算误差或计算死角。

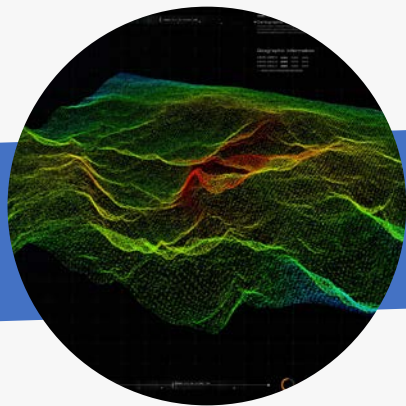




6.1.4 块段法



中南大学
CENTRAL SOUTH UNIVERSITY



区域离散化

将 I、II 边界所组成的三维区域离散化，舍去中心点在区域外的块段。



高差计算

计算区域内两期DTM的高差，大于零为挖方，反之为填方。



块体体积累加

分别累加相应区域内的块体体积即为填挖方量。



6.1.4 块段法



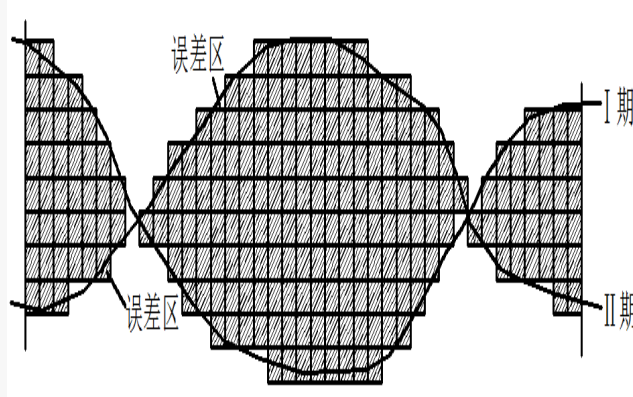
中南大学
CENTRAL SOUTH UNIVERSITY

1.79	1.58	1.85	1.31	1.62	0.92	1.24	1.01
1.78	1.56	1.83	1.22	1.61	0.86	1.18	1.03
1.53	1.32	1.55	1.12	1.36	0.59	1.05	0.87
1.24	1.04	1.37	0.92	1.24	0.49	0.94	0.79
1.27	1.04	1.27	0.96	1.29	0.51	0.95	0.82
1.07	0.79	1.18	0.64	1.15	0.38	0.79	0.70
0.93	0.74	1.09	0.74	1.10	0.54	0.78	0.60
0.82	0.64	0.98	0.67	1.06	0.25	0.65	0.52

01

与网格法的区别

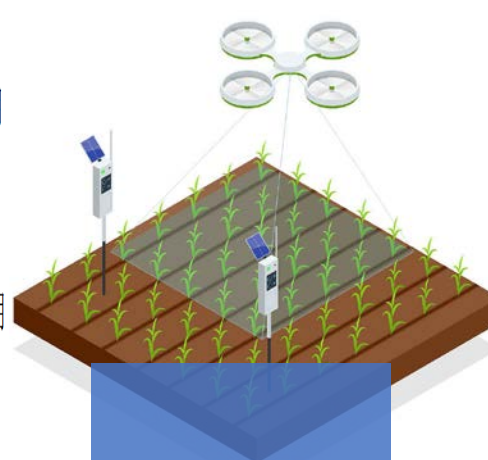
网格法仅在XY方向上将计算区域离散化，计算填挖区域内的柱体体积。



02

块段法介绍

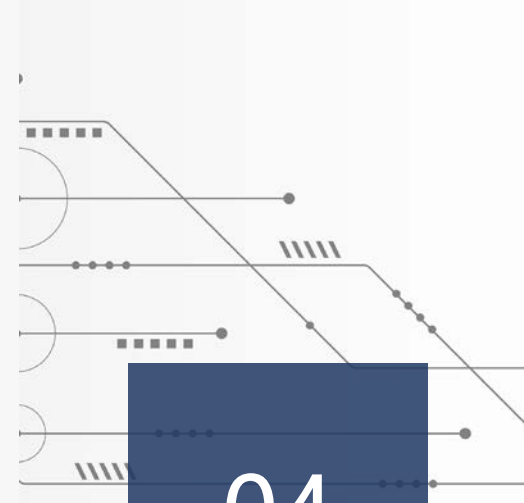
块段法是在XYZ方向上进行离散，计算填挖区域内块体体积。



03

块段法误差

块段法无法采用无穷小的块体尺寸将三维计算区域离散化，导致计算误差较大。



04

块段法要求

块段法对模型质量要求不高，特别是块体较大时，误差较大。



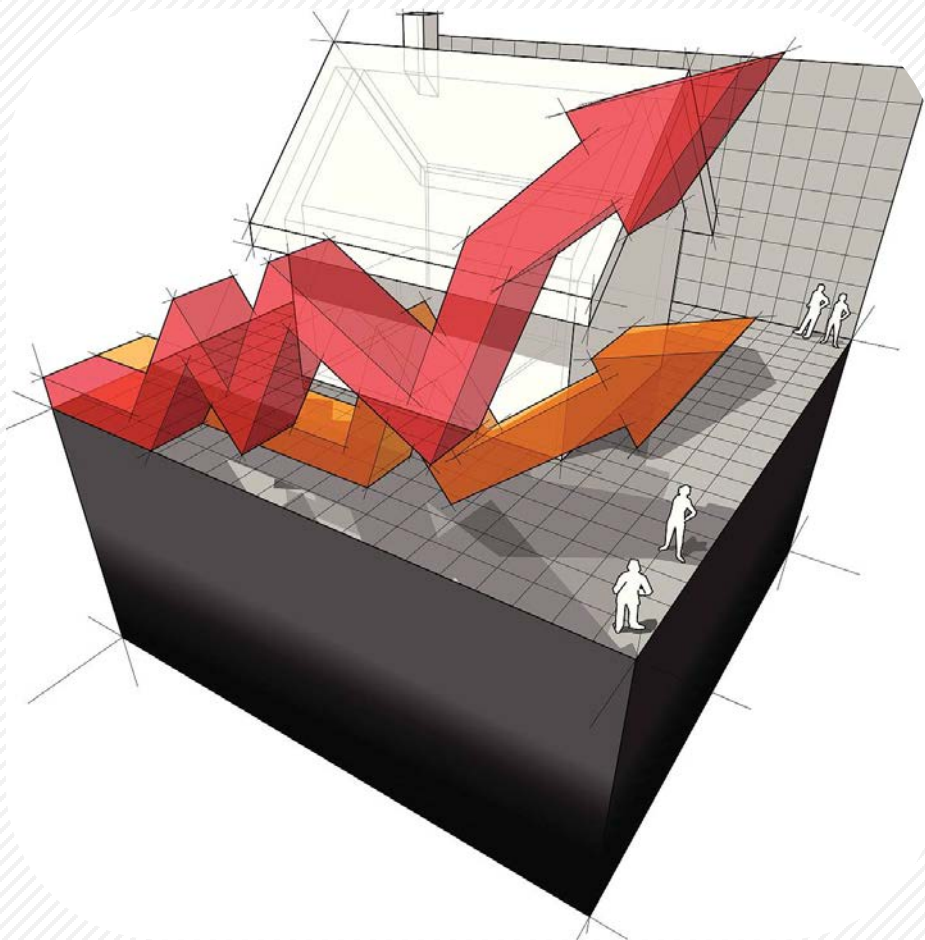
6.2

资源储量三维估算

由开采生产与资源管理新模式的变革背景



资源储量三维估算方法



● 三维估算方法

资源储量三维估算方法基于探矿工程数据，通过地质解译建立矿体模型，并基于开采范围建立地质属性模型。

● 插值方法

在矿体模型的约束下，采用插值方法对地质属性模型进行估值，最后统计资源储量。

● 插值方法选择

在进行三维资源储量统计时，主要采用距离幂次插值法和克立格插值法，其中克立格插值法应用更广泛。



6.2.1 样品数据分析与奇异值处理



中南大学
CENTRAL SOUTH UNIVERSITY

样品数据的统计分析

主要对样品数据进行探索性空间分析，以引导确定性模型的结构和解法。

空间依赖与空间异质性

研究数据的空间依赖性与空间异质性，描述空间分布，揭示空间联系的结构。

奇异值的识别与处理

奇异值是特别大和特别小的数值，可能引起较大误差，影响数据有效性。

特高品位的处理

特高品位对矿床资源估算影响较大，可通过直方图辅助经验数据识别，用临界值替换。

变异函数的稳健性

变异函数用于描述空间变异性，特高品位可能影响变异函数的稳健性。

周边单元块品位值

特高品位识别后，需检查并调整周边单元块的品位值，确保准确性。



6.2.2 样品组合



中南大学
CENTRAL SOUTH UNIVERSITY

01

样品组合

地质统计学中，正常载体上的岩心样品是研究区域化变量的基础。空间变异性会随载体大小和形状的变化而变化。

02

组合样长度

当矿床地质样品的取样长度不均匀时，需将样品长度重新组合，确保数据在正常载体上，以便进行区域化变量研究。

03

组合样属性值

按样品长度组合方法中，组合样的属性值是原始样品属性值的加权平均值。

钻孔 zk01

原始样品



L_1

L_2

L_3

钻孔 zk01

按定长组合
后的样品



L

$$G_C = \frac{L_1 G_1 + L_2 G_2 + L_3 G_3}{L_1 + L_2 + L_3}$$



组合样的长度对属性值的影响

组合样长度

组合样的长度不能小于原始样品的平均长度，因为缩短组合样的长度会导致属性值的变异性被平滑，从而影响结构分析的准确性。



属性值变异性

组合样的属性值对原始属性值的变异性进行了平滑，这有助于减少数据中的噪声和异常值，但也可能导致结构信息的丢失。

结构分析影响

如果每个样品的实际属性值变化较大，而组合样的长度小于原始样品的平均长度，这种平滑效应对结构分析的影响是重大的。



6.2.3 区域化变量的结构分析



1

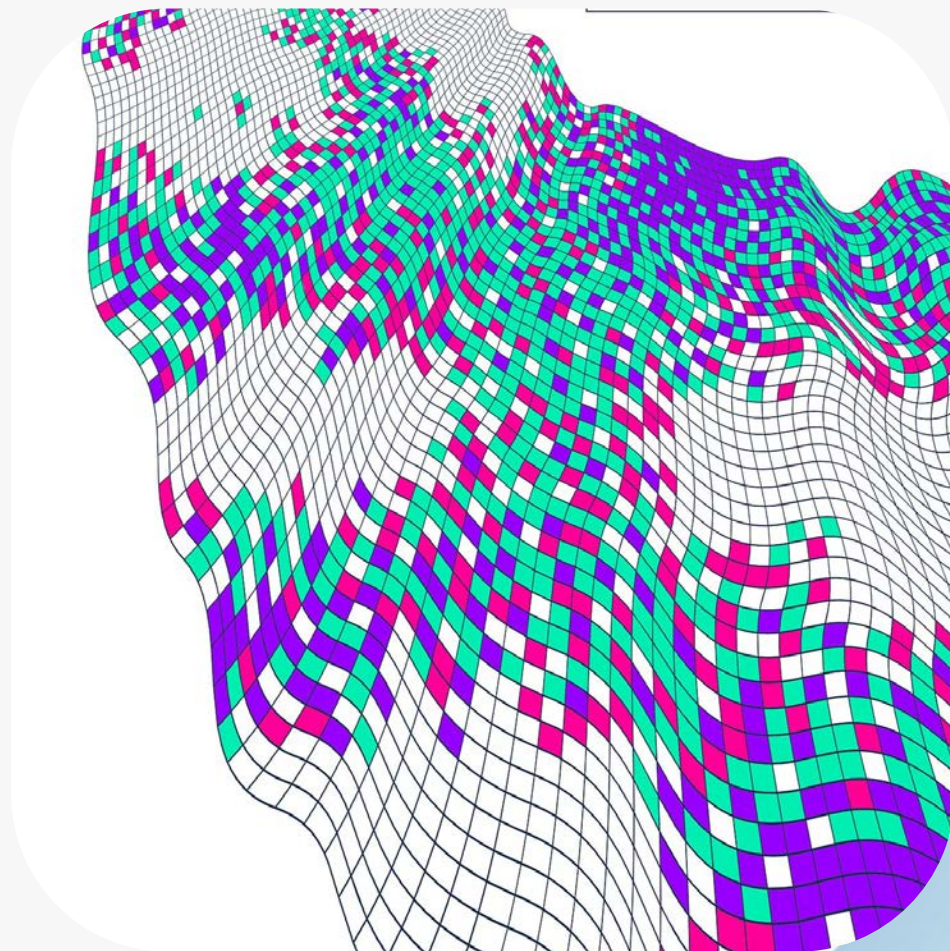
区域化变量定义

区域化变量就是指以空间点 x 的三个直角坐标 (x_u, x_v, x_w) 为自变量的随机场 $Z(x_u, x_v, x_w) = Z(x)$ 它常常反映某种空间现象的特征。

2

区域变量结构特点

区域化变量具有特定的空间结构，两个相互矛盾的性质：随机性和结构性。





1) 变异函数



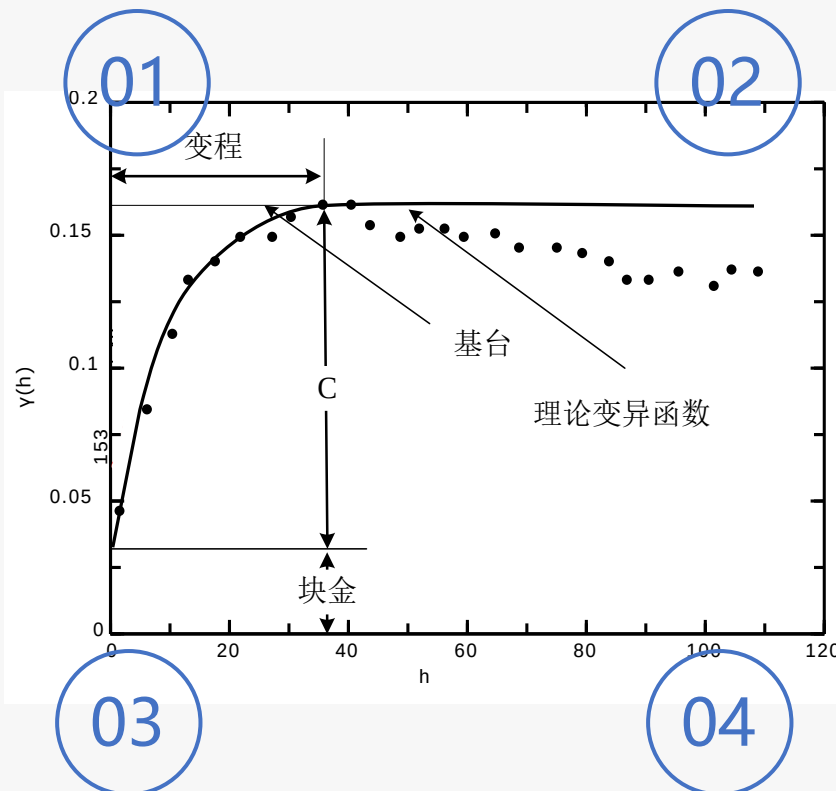
中南大学
CENTRAL SOUTH UNIVERSITY

变异函数

变异函数通常绘制为和对应滞后距 h 的二维图形，如为变异函数图及其主要组成。

基台

基台表示当 h 超过某一距离后，变异函数稳定在一个极限值附近，反映了区域化变量在研究区域内的变异强度。



变程

变程，记为 a ，表示变量和之间相互关系消失的最大距离，当 $|h| < a$ 时，变量之间存在相关性。

块金

块金，或块金效应，记为 C_0 ，反映变异函数在原点的间断性，可以是来自矿化现象的微小变异性，也可能是测量误差带来的。



2) 实验变异函数的计算

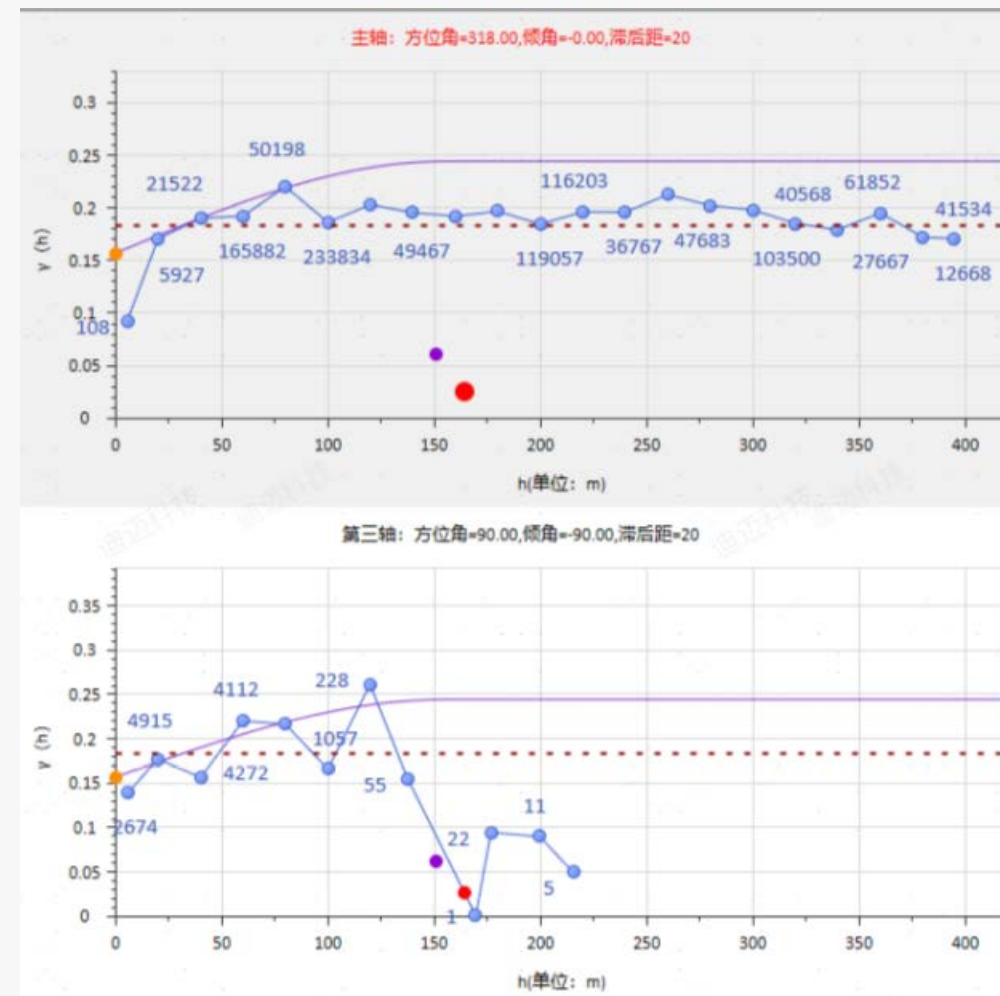


实验变异函数

实验变异函数是离散的，通过对比分析实验变异函数和定义理论变异函数所需要的基本步骤如所示。

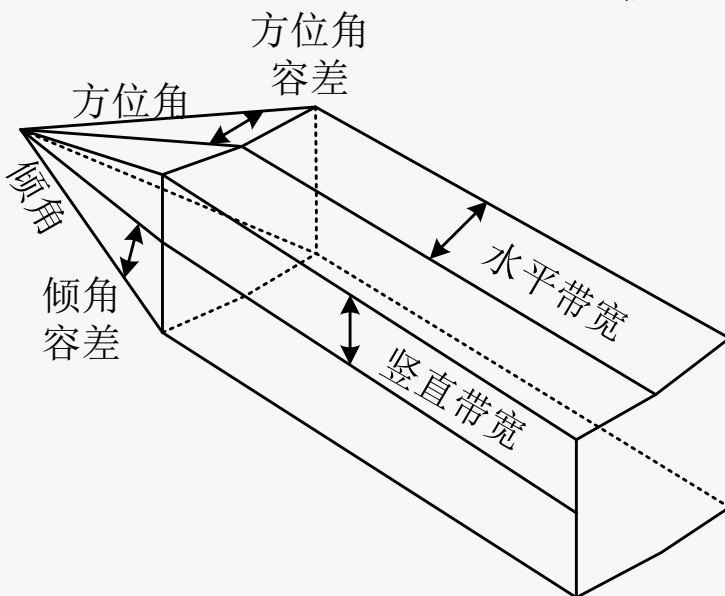
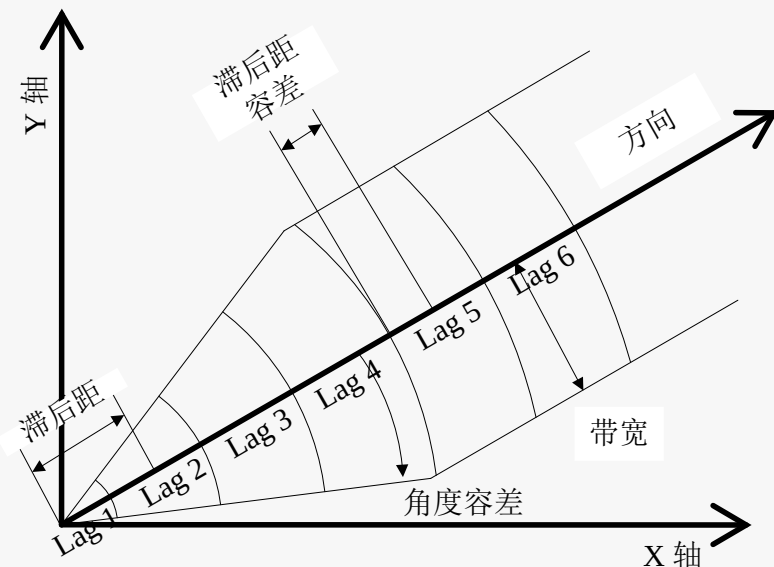
理论变异函数

理论变异函数使用数学公式表示实验变异函数反映的空间变异性，用于克立格算法。理论函数必须是正定的，以确保不出现非奇异解。





2) 实验变异函数的计算



变异函数计算

在计算变异函数时，需要使用容差距离和容差角度，并限制搜索条带的水平和垂直宽度。

方向变异函数

在三维环境下，需要指定方位角容差、倾角容差和垂直带宽。

指定方向变异

在全向搜索策略的基础上，增加方位角和方位角容差参数，如(c)所示。



3) 变异函数拟合



球状模型

球状模型的数学表达式为三次多项式函数， C_0 为块金值， $C+C_0$ 为基台值， a 为变程值。

指数模型

指数模型是描述空间变异性的一种理论模型，随着滞后距 h 的增大，变异函数值逐渐逼近基台值。

高斯模型

高斯模型也是描述空间变异性的一种理论模型，与指数模型类似，变程值 $h=3a$ ，基台值由 C_0 和 C 共同决定。

幂函数模型

幂函数模型是描述空间变异性的一种理论模型，其函数曲线呈线性关系，基台值由 C_0 和 C 共同决定。



3) 变异函数拟合



中南大学
CENTRAL SOUTH UNIVERSITY

各向同性

当变异函数只取决于 $|h|$ ，而与 α 和 φ 无关时，变异函数模型为“各向同性的”。

各向异性

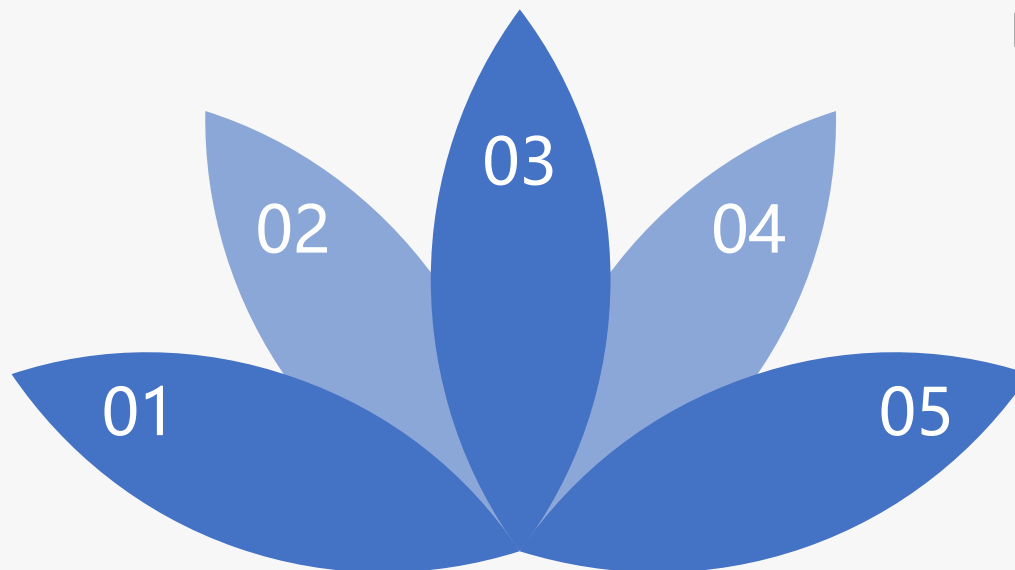
当区域化变量的变异性在空间各个方向不一致时，就为“各向异性的”。

几何各向异性

对于几何各向异性模型，可以通过矢量 h 的线性变换，将其转换为各向同性，用各向同性模型表示各向异性。

变异函数套合

变异函数表示为矢量 h 的函数， h 的直角坐标为，球坐标为， α 和 φ 为矢量的经度和纬度。



坐标变换矩阵

公式左边为几何各向异性模型，右边为各向同性模型，该模型的变程等于最大变程。



3) 理论变异函数模型的拟合



变异函数拟合方法

人工拟合方法和自动拟合方法在气象卫星图片中的应用，自动拟合方法包括加权最小二乘法、加权多项式回归法和线性规划法等。

人工拟合方法步骤

绘制散点图、选择理论变异函数类型、确定参数 C_0 、 C 和 a 、计算不同滞后距的变异函数真实值并绘制理论曲线。

自动拟合方法的作用

自动拟合方法在处理经常需要拟合大量变异函数的场合，如气象卫星图片，能够提供更准确的结果。

拟合程度判断

观察理论曲线与散点的拟合程度，判断是否完成拟合任务，如果任务合适则完成，否则重复步骤2到步骤4。



4) 变异函数模型的套合



中南大学
CENTRAL SOUTH UNIVERSITY

变异函数

变异函数是矢量 h 的函数，其直角坐标和球坐标分别为 h 、 r 、 α 和 φ 。

各向同性

当变异函数只取决于 $|h|$ ，而与 α 和 φ 无关时，变异函数模型为“各向同性的”。

各向异性

当区域化变量的变异性在空间各个方向不一致时，就为“各向异性的”。



几何各向异性

几何各向异性模型通过矢量 h 的线性变换转换为各向同性，要求各个方向上模型的块金和基台值相同。

公式左边

几何各向异性模型的左边为模型本身，右边为各向同性模型，模型的变程等于最大变程。

[A]表示

式中， $[A]$ 表示坐标变换矩阵， $[h]$ 和 $[h']$ 是两个坐标的列矩阵。



6.2.4 交叉验证



中南大学
CENTRAL SOUTH UNIVERSITY

方案比较内容

比较内容包括克立格类型、变异函数模型和临近数据搜索策略等。

差别计算

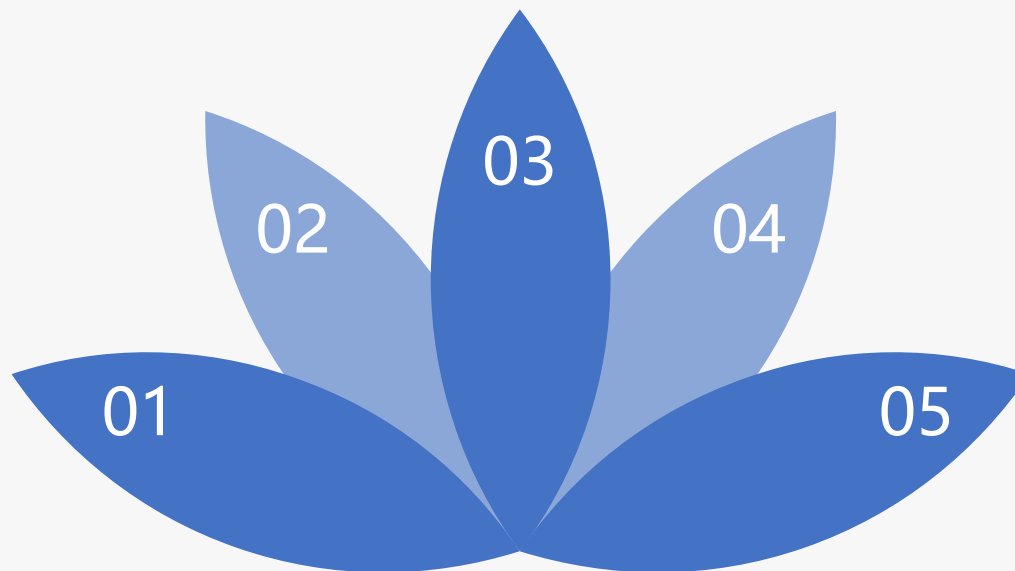
比较的基础是样品的真实值和估计值之间的差别。这个过程通常被称为“交叉验证”。

交叉验证作用

交叉验证仅是一种探索性方法，虽然其并不能确定性衡量变异函数模型和克立格类型好坏。

交叉验证目的

在使用地质统计学进行属性插值时，需要对不同的方案进行比较然后选择一个最好的方案。



理论变异函数模型

我们用交叉验证去帮助确定变异函数模型和克立格类型，是因为实验变异函数可能对应多个理论变异函数模型。



交叉验证的流程

01

实验变异函数计算：使用研究区域内的全部样品数据计算实验变异函数。

02

理论变异函数模型选择：根据实验变异函数得到几个拟合较好的理论变异函数模型。

03

克立格估值：使用每个理论变异函数模型，对每个样品点进行克立格估值。

04

诊断统计值计算：根据估值结果计算三个诊断统计值，包括平均误差ME、均方差MSE和均方差率MSER。

05

图形绘制：绘制诊断图形，包括样品真实值和估计值的散点图、误差直方图、误差和估计值的散点图以及误差位置分布图。



6.2.5 矿床资源量统计



利用建立的矿体模型或任意空间模型，可以对矿床中的各种元素进行平均品位、矿石量和金属量统计。

块段模型

块段模型的单元块采用了边界细分技术，块段模型单元块的尺寸大小不等，因此元素平均品位的计算按单元块体积加权平均。

矿床资源量统计



平均品位

若矿石体重 sg 已知，则矿石量计算公式为，金属量计算公式为，该矿山的矿石体重根据铁元素的含量高低相应变化。

矿石量计算

平均品位计算公式为，其中， $\bar{p}$ 为元素的平均品位， p_i 为第 i 个单元块的元素品位， V_i 为第 i 个单元块的体积， N 为单元块的总数。



矿床资源量统计的方法

模型建立

使用建立好的矿体模型或任意空间模型，可以对矿床中的各种元素进行统计。

统计标准

按照不同的标准进行平均品位、矿石量和金属量统计，计算出各个不同边界品位和标高的平均品位、矿石量和金属量。

品位计算

块段模型的单元块采用了边界细分技术，因此元素平均品位的计算按单元块体积加权平均。





6.2.5 矿床资源量统计



中南大学
CENTRAL SOUTH UNIVERSITY

矿床资源量统计的方法

矿石量计算

若矿石体重 sg 已知，则矿石量计算公式为：矿石量 = 平均品位 × 体重 / 100。

金属量计算

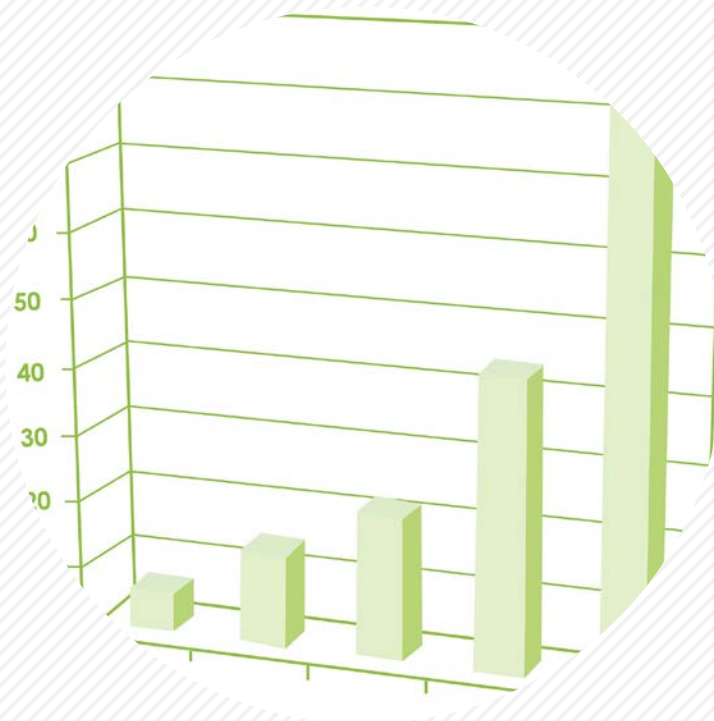
金属量计算公式为：金属量 = 平均品位 × 体重 × 回收率。

体重分段函数

该矿山的矿石体重根据铁元素的含量高低相应变化，可以理解为是一个分段函数。

体重值赋予

要对块段模型的单元块按铁元素品位区间赋予相应的体重值，以更准确地反映矿石的实际情况。





6.2.5 矿床资源量统计



中南大学
CENTRAL SOUTH UNIVERSITY

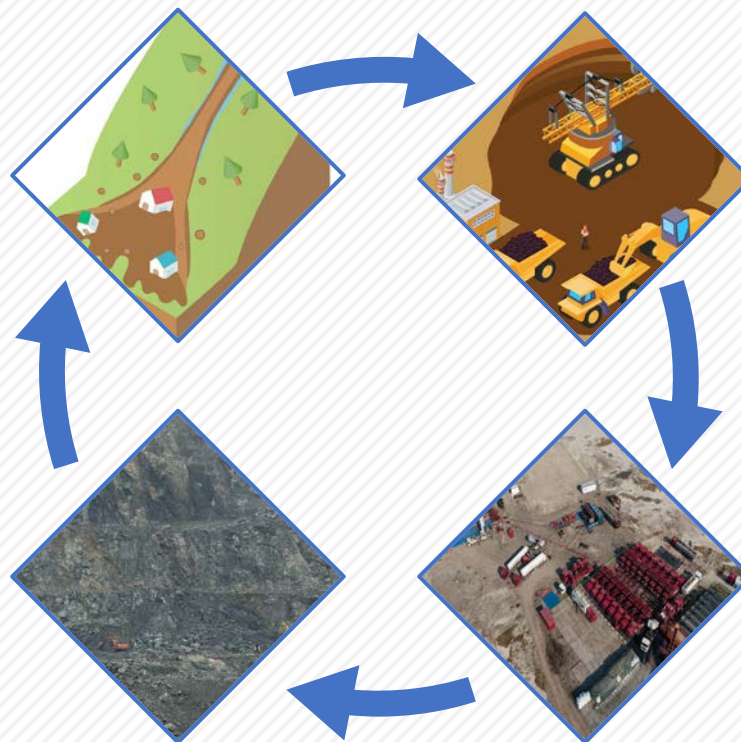
块段模型的单元块特性

块段模型特性

块段模型是一种常用的三维地质模型，其单元块的尺寸大小不等，因此元素平均品位的计算需按单元块体积加权平均。

金属量计算

金属量计算公式为：金属量 = 平均品位 × 体重 × 回收率。



加权平均计算

元素平均品位的计算公式为：平均品位 = $\Sigma (\text{元素品位} \times \text{体积}) / \Sigma \text{体积}$ ，其中N为单元块的总数。

矿石量计算

若矿石体重sg已知，则矿石量计算公式为：矿石量 = 平均品位 × 体重 / 100。



6.3

资源储量三维动态管理

—— 在开采生产与经营管理新模式的变革背景



6.3 资源储量三维动态管理



中南大学
CENTRAL SOUTH UNIVERSITY

矿山资源储量管理问题

随着三维数字化、可视化技术和矿产勘查与开发技术的发展，国内矿山在信息化建设方面做了大量工作，但资源储量管理仍存在数据质量低、动态监管难度大的问题。

统计计算精度低

目前大部分矿山用于统计计算资源储量的图形/模型和数据管理逻辑分离，无法描述矿体空间的内部特征及组成部分之间的拓扑关系。

资源储量分类统计的难度大

常规方法难以对矿山开采损失和设计损失进行精确统计，导致矿山无法按照要求对资源量和储量进行分类统计。





6.3 资源储量三维动态管理



中南大学
CENTRAL SOUTH UNIVERSITY



动态更新过程复杂

难以根据不断增加的矿体控制信息动态修正统计计算的模型/图形，不能及时掌握矿山的开采变化情况。



数据管理内容不明确

统计模型与数据管理之间的关联性较差，大部分矿山对资源储量过程数据的管理内容不甚明确，导致矿业集团及管理部门无法对资源储量数据进行追溯和验证。



矿产资源储量特征

矿产资源储量具有真三维、动态变化的特征，具有极高的几何形态和空间关系复杂性，依靠常规管理手段，难以实现对矿产资源储量的精细化管理。



三维建模与可视化技术

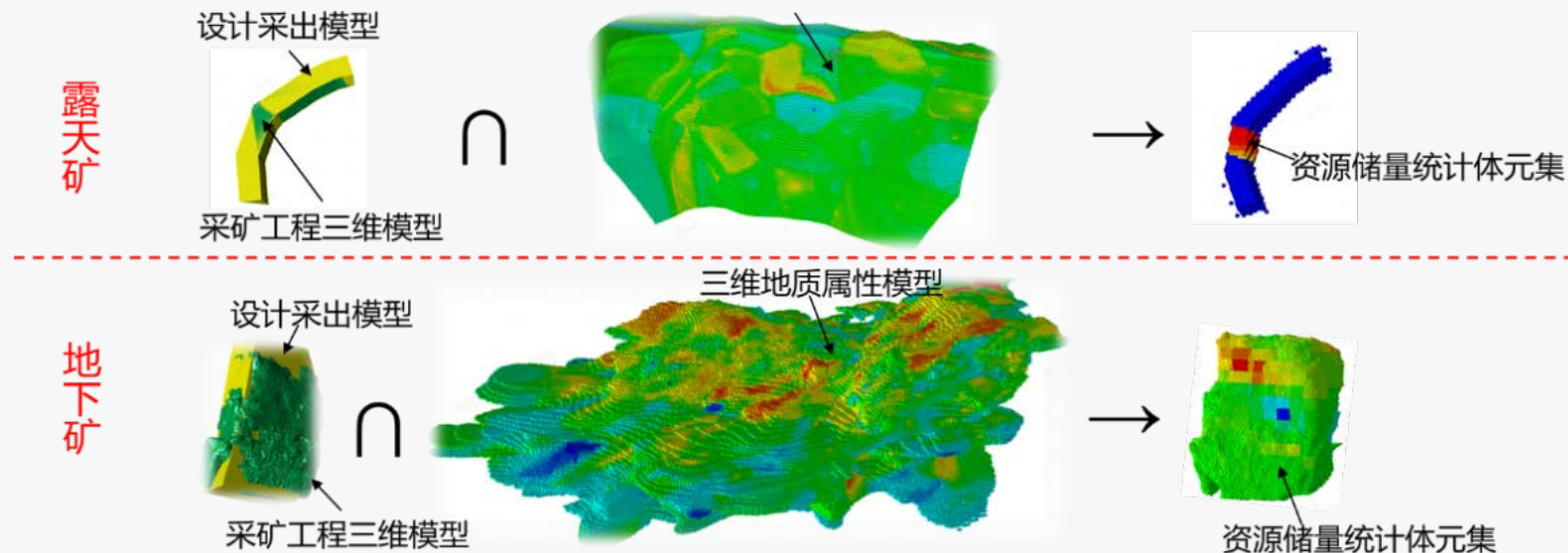
数字矿山逐步由二维向三维发展，三维地质建模与可视化技术是构建数字矿山的关键技术之一，能够实现矿山资源储量的动态化、规范化管理。



6.3.1 资源储量三维统计方法



中南大学
CENTRAL SOUTH UNIVERSITY



资源储量三维统计方法

资源储量三维统计方法是一种通过三维空间来统计资源储量的方法。

资源储量三维统计方法的作用

资源储量三维统计方法能够更全面地反映资源储量的空间分布和数量特征。



1) 三维统计计算方法



资源储量三维统计计算方法

通过设计采出模型、采矿工程三维模型等空间范围，约束三维地质属性模型，得到资源储量统计体元集，并统计资源储量统计体元集中体元的矿石量或有用组分量。

确定资源储量统计体元集的方法

通过设计采出模型和采矿工程三维模型分别约束三维地质属性模型，确定其对应的体元集，然后对两种体元集进行空间运算，确定资源储量统计体元集。

资源储量的矿石量和有用组分量的统计计算公式

资源储量的矿石量和有用组分量的统计计算公式如式所示，其中第 i 个体元的体积和质量分别用 V 和 m 表示，第 i 个体元的品位用 ρ 表示。



2) 资源量、储量分类统计



中南大学
CENTRAL SOUTH UNIVERSITY



固体矿产资源储量分类

根据《固体矿产资源储量分类标准》，固体矿产资源储量分为资源量和储量两类，资源量按地质可靠程度由低到高分推断资源量、控制资源量和探明资源量三类。



储量的定义与分类

储量是探明资源量和（或）控制资源量中可经济采出的部分，在充分考虑了可能的矿石损失和贫化，可进一步划分出可信储量和证实储量两类。



三维数字化方法

运用三维数字化方法统计资源储量类型时，需根据采矿设计、矿山勘探、预可行性研究、可行性研究等划分的资源储量类型范围，对三维地质属性模型的体元进行资源储量类型赋值。



统计计算

统计计算时，按含资源储量分类的体元属性信息进行类型统计，可得到各类资源储量的数量和比例等信息，为矿山开采和运营提供重要的数据支持。



3) 三维统计计算过程



资源储量统计计算

动用资源量是设计采出模型内部与采矿工程三维模型内部并集空间范围内的资源量。开采损失量是统计计算设计采出模型内部与所有采矿工程三维模型外部交集空间范围的资源量。非开采损失量是统计计算设计采出模型外部空间范围内的资源量。重算增减资源储量为重算后未开采资源储量与重算前未开采资源储量之差。查明资源储量可通过几何法、SD法、距离幂反比法或地质统计学法等估算。

生产矿量统计计算

开拓、采准与备采的空间范围是根据开拓、采准、备采的工程完成情况确定的。开拓矿量、采准矿量、备采矿量是分别统计计算开拓空间范围、采准空间范围与备采空间范围的储量。



6.3.2 数据管理与动态更新



中南大学
CENTRAL SOUTH UNIVERSITY

资源储量数据动态管理

矿山在统计计算资源储量时，需动态管理资源储量数据，包括三维地质结构模型、资源储量类型范围、设计采出模型等。

资源储量动态更新

矿山需根据实际需求，基于一定周期进行资源储量的动态更新，包括监管部门要求、矿山管理需要、市场和技术条件变化。

三维可视化查验

矿山及管理部门可根据管理数据的信息及参数，对资源储量进行三维可视化查验，对资源储量进行查询验证。

追溯检验

根据各统计周期资源储量的变动情况，对资源储量过程数据进行追溯检验，指导与监管矿产勘查与开发。





Q&A