



中南大學
CENTRAL SOUTH UNIVERSITY



第7章 数字化采矿技术

主讲人：毕林

2024年8月13日



目录

- 7.1 三维可视化表达
- 7.2 露天矿境界优化
- 7.3 三维可视化开采设计
- 7.4 采掘（剥）计划编制
- 7.5 露天矿品位控制与配矿



7.1

三维可视化表达

矿山开采生产与经营管理新模式的变革背景





7.1.1 三维图形库



中南大学
CENTRAL SOUTH UNIVERSITY

维图形库

维图形库是一种用于存储和检索三维图形的软件系统，它允许用户以各种方式查看和操作三维图形。

数据管理

维图形库通常会配备一个强大的数据管理系统，能够高效地管理和组织三维图形数据。

实时显示

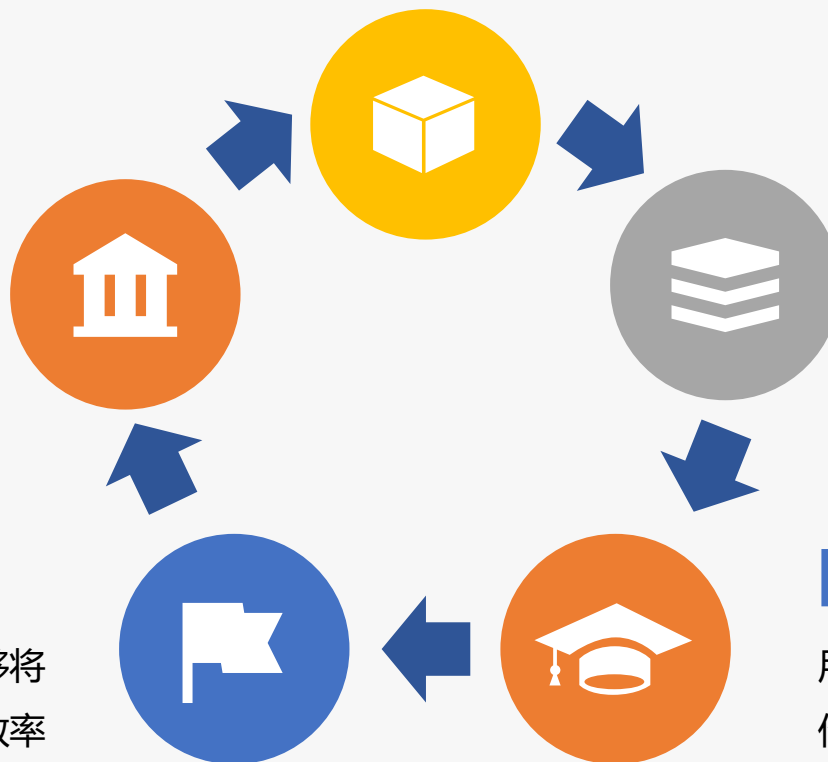
维图形库通常具有实时显示功能，能够将用户操作及时反馈给用户，提高绘图效率。

图形类型

维图形库中的图形对象可以是三维的，也可以是二维的，还可以是具有时间维度的四维图形。

图形操作

用户可以通过维图形库对图形进行各种操作，如缩放、旋转、平移、滤镜等，以满足各种应用需求。





1) OpenGL



ABSTRACT
backgro

01

OpenGL

OpenGL是Open Graphics Lib的缩写，是一套三维图形处理库，也是该领域的工业标准，是绘制高真实感三维图形，实现交互式视景仿真和虚拟显示的高性能开发软件包。

02

技术特点

OpenGL是一种与硬件、操作系统和网络环境无关的编程界面，可以建立活动的三维几何对象的交互式程序，可以独立于软、硬件平台，并可采用多种语言编程。

03

变换操作

变换操作是OpenGL的关键技术之一，通过存储变换矩阵的状态，实现取景、模型变换、投影变换、视口变换等操作，确保三维场景的正确映射。



1) OpenGL



双缓存技术

双缓存技术是OpenGL实现动画的关键技术，原理是计算机计算速度较快，可以实现显示图形的连续变化，似于电影放映，在一个缓存区中执行绘制命令。

坐标原点

在OpenGL中，确定对象的坐标原点是关键。这是对对象在三维空间中的定位点，对于理解对象的尺寸、位置和方向都至关重要。

基本操作

OpenGL显示图形的几何原理是把一个复杂的对象经过分解后，构造出OpenGL可处理的几何要素，并创建这个复杂对象的数学描述；然后把对象添加上颜色信息放置于三维空间中。

光栅化

光栅化是将对象的数学描述和颜色信息转换为屏幕像素表达的过程。通过将对象的每个像素点与屏幕上的像素点对应，实现图形的显示。





2) WebGL



中南大学
CENTRAL SOUTH UNIVERSITY



跨平台兼容性

WebGL可以在支持的浏览器上运行，无须插件或额外的安装，目前主流的现代浏览器都支持WebGL。



硬件加速

WebGL利用计算机图形硬件来加速图形渲染，提供更高的性能和更流畅的用户体验。



使用JavaScript编程

WebGL使用JavaScript编写和执行，使得开发者可以利用广泛存在的Web技术栈进行开发。



开放标准

WebGL是一个开放的标准，由Khronos Group维护，因此它具有良好的社区支持和广泛的文档资源。



7.1.3 三维渲染流程



中南大学
CENTRAL SOUTH UNIVERSITY

三维变换

在数学建模的基础上，地物需要进行三维变换，包括旋转、缩放、移动等操作，以调整地物的位置和方向。

数学建模

数学建模是三维可视化场景制作的第一步，地物的形状、位置和方向都需要通过数学方程来描述。

选择光照模型

选择合适的光照模型是三维可视化场景制作的另一重要步骤，它决定了地物表面的明暗程度和色彩表现。

建模处理

经过建模处理以后的各类地物，要想真实地显示在计算机屏幕上，还需要经过一系列必要的变换。

纹理映射

纹理映射是将地物表面的纹理信息映射到地物上的过程，它能够提高地物的真实感和质感。

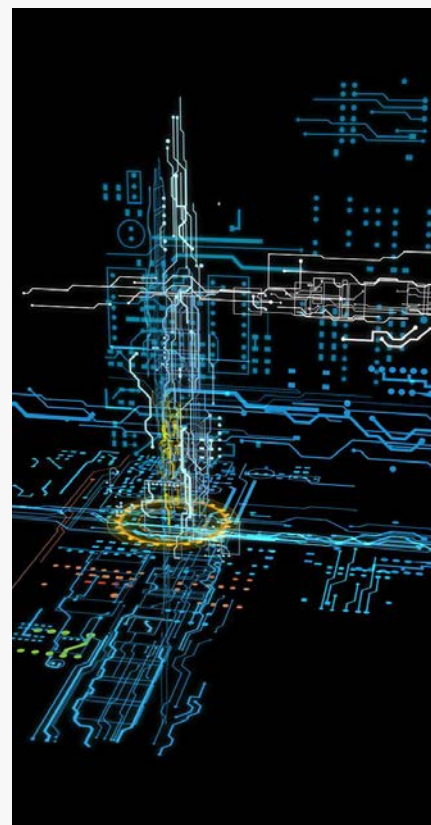
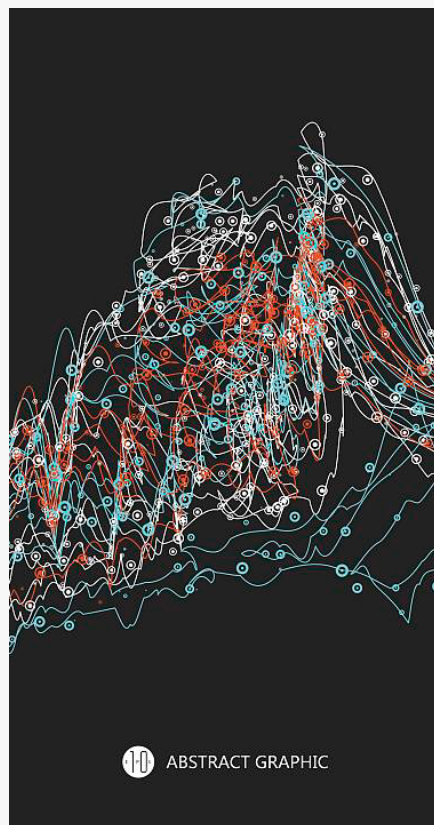




1) 数据预处理



中南大学
CENTRAL SOUTH UNIVERSITY



数据预处理

数据预处理是将建模后得到的物体的几何模型数据转换为基本图元形式，如点、线、（三角）面等，以便后续处理。



影像数据预处理

对于影像数据，如纹理图像，需要进行预处理，包括图像格式转换、质量改善和影像金字塔生成等。



2) 投影变换



中南大學
CENTRAL SOUTH UNIVERSITY

在三维场景渲染前，需设定光源性质、光源方位、明暗处理方式和纹理映射方式等参数。

场景参数设置

确定观察者和物体间的相对位置后，还需决定物体投影到屏幕上的方式。

视点位置和视线方向

投影变换是生成三维场景的重要基础和关键步骤，分为透视投影变换和正射投影变换两类。

投影变换

正交投影不改变物体相对尺寸，反映真实大小，主要用于工程图纸。

正交投影

透视投影遵守投影规则，与摄影或人眼效果相似，有较强的立体感。

透视投影



3) 消隐处理



01

调整视见区大小

实现一系列变换后，可以调整视见区的大小，或在同一个窗口上显示几个视图，从而更好地适应不同的显示需求。

02

计算明暗值

经光照模型计算可获得可见面元二维影像的明暗值，从而显示形成模型的浓淡渲染图。

03

光照模型考虑因素

光照模型应考虑由环境分布光源综合引起的泛光、穿过物体表面被吸收并重新发射出来的漫反射光、由物体表面光洁度产生的镜面反射光等效应。

04

表面光照特性

最终以不同颜色及其不同亮度表现不同要素的表面光照特性，从而更好地呈现三维场景的细节和质感。



4) 消隐处理



中南大学
CENTRAL SOUTH UNIVERSITY



消隐处理

在显示过程中，消除实体中被隐蔽的部分，以改善图形的真实感，消除多义性。

画家算法

根据地形模型面元的特点，采用由远至近处理的消隐算法，先对所有构图面元按距视点的远近进行排序。

深度缓冲区算法

将显示屏上每一像素所对应的地面深度信息记录到Z缓冲区中，通过检测Z缓冲区的值来确定像点是否可见。

光线跟踪算法

从视点出发，通过屏幕像素向场景投影光线，交场景中的第一个交点即为可见点，设置相应像素的光亮度为交点处的光亮度。



5) 纹理映射



中南大学
CENTRAL SOUTH UNIVERSITY

纹理映射增加模型逼真性

为了增加模型的逼真性和现实性，可以在三维模型的灰度图上增加纹理使其成为具有纹理映射的三维模型。

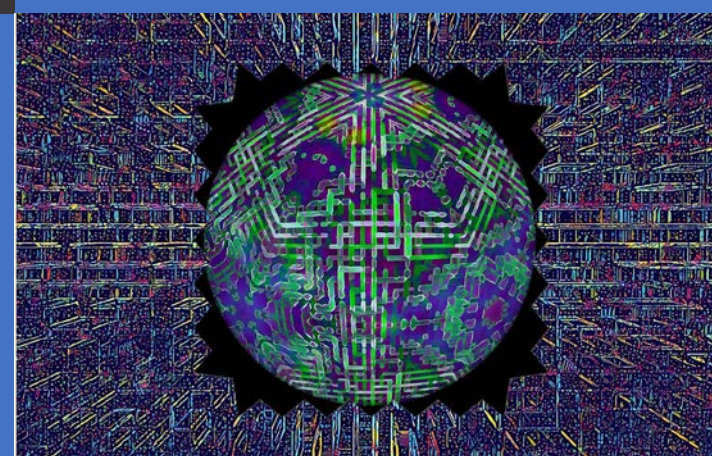
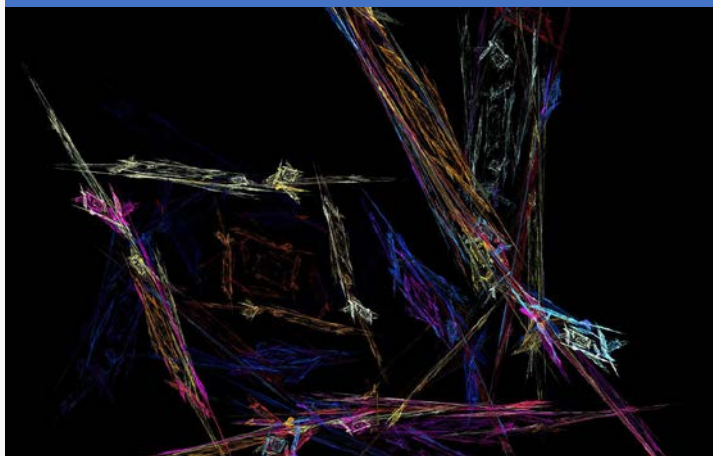


计算纹理繁琐

由于第二种方法繁琐、计算量大、速度慢，所以常用第一种方法，对于地形模型一般采用从航空正射影像图上提取纹理并进行纹理贴合。

影像图提取纹理方法

目前主要有两种方法对模型增加纹理映射，第一种是从影像图上提取纹理，第二种是按照一定公式计算纹理。





5) 纹理映射



建筑物的纹理提取

对于建筑物的墙体和屋顶，由于受成像方式和被其他建筑物遮掩等因素的影响，常采用在相邻的航空影像上提取可见表面的纹理数据。



不可见表面处理

对于在所有影像上均不可见的表面，则需要使用模拟纹理或地面摄影影像，基于纹理的不同表现形式，纹理可分为颜色纹理、几何纹理和过程纹理三大类。



颜色纹理

颜色纹理指呈现在物体表面的各种花纹、图案、文字等，主要用来表现表面较为光滑但有纹理图案的物体，如刨光的木材、大理石墙面、从高空观察的地景。



几何纹理

几何纹理指基于景物表面微观几何形状的表面纹理，如树干、岩石、山脉等；过程纹理则表示各种规则或不规则的动态变换的自然现象，如水波、云、火、烟雾等。





7.2

露天矿境界优化

矿山开采生产与资源管理新模式的变革背景





7.2 露天矿境界优化



中南大学
CENTRAL SOUTH UNIVERSITY

境界优化



境界优化是露天开采规划的重要组成部分，为企业的决策经营提供依据。

传统方法



传统手工圈定境界的方法，由于是一种试错法，求解结果只是近似解，难以达到境界优化的最终目的。

价值模型



基于价值模型，构建基于边坡角、地表的几何约束，求解出总的净价值最大的块集合体即为最终境界。

优化算法



国内外学者对露天境界优化理论和方法进行了深入研究，提出了多种优化算法，包括浮动圆锥法、LG图论法、线性规划法、网络最大流法等。



7.2.1 价值模型



中南大学
CENTRAL SOUTH UNIVERSITY

价值模型基础

价值模型是在地质属性模型的基础上，引入经济参数，如原矿价格、精矿价格、金属价格、矿石开采成本、废石剥离成本等，进行优化计算。

构建价值模型

构建价值模型需确定开采单元的尺寸，垂直方向尺寸采用台阶高度或其整数倍，水平方向尺寸参考采矿设备作业尺寸。尺寸过小影响优化效率，尺寸过大优化不够精确。



价值模型的作用

价值模型可帮助矿山实现境界优化和采剥计划优化，为决策提供重要依据。通过考虑各种成本和收益因素，价值模型能够确保矿山盈利并提高资源利用效率。

价值模型计算

价值模型中各最小单元的经济净价值根据矿山最终销售产品价值及成本进行计算，考虑原矿、精矿、金属等产品的价值和成本，确保优化结果的准确性。



7.2.2 浮动圆锥法



中南大学
CENTRAL SOUTH UNIVERSITY



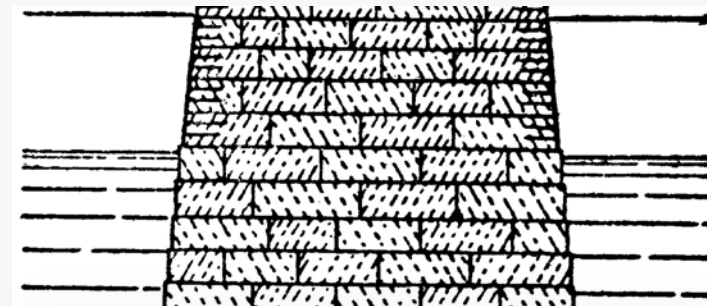
浮动圆锥法

浮动圆锥法是用系统模拟的方法解决露天开采境界的问题，将最简单的圆形露天坑近似地看成一个截头倒圆锥。



圆锥体

圆锥锥立在矿石方块之上，锥体上部直通地表，圆锥的母线与水平方向的夹角等于露天矿的边坡角。

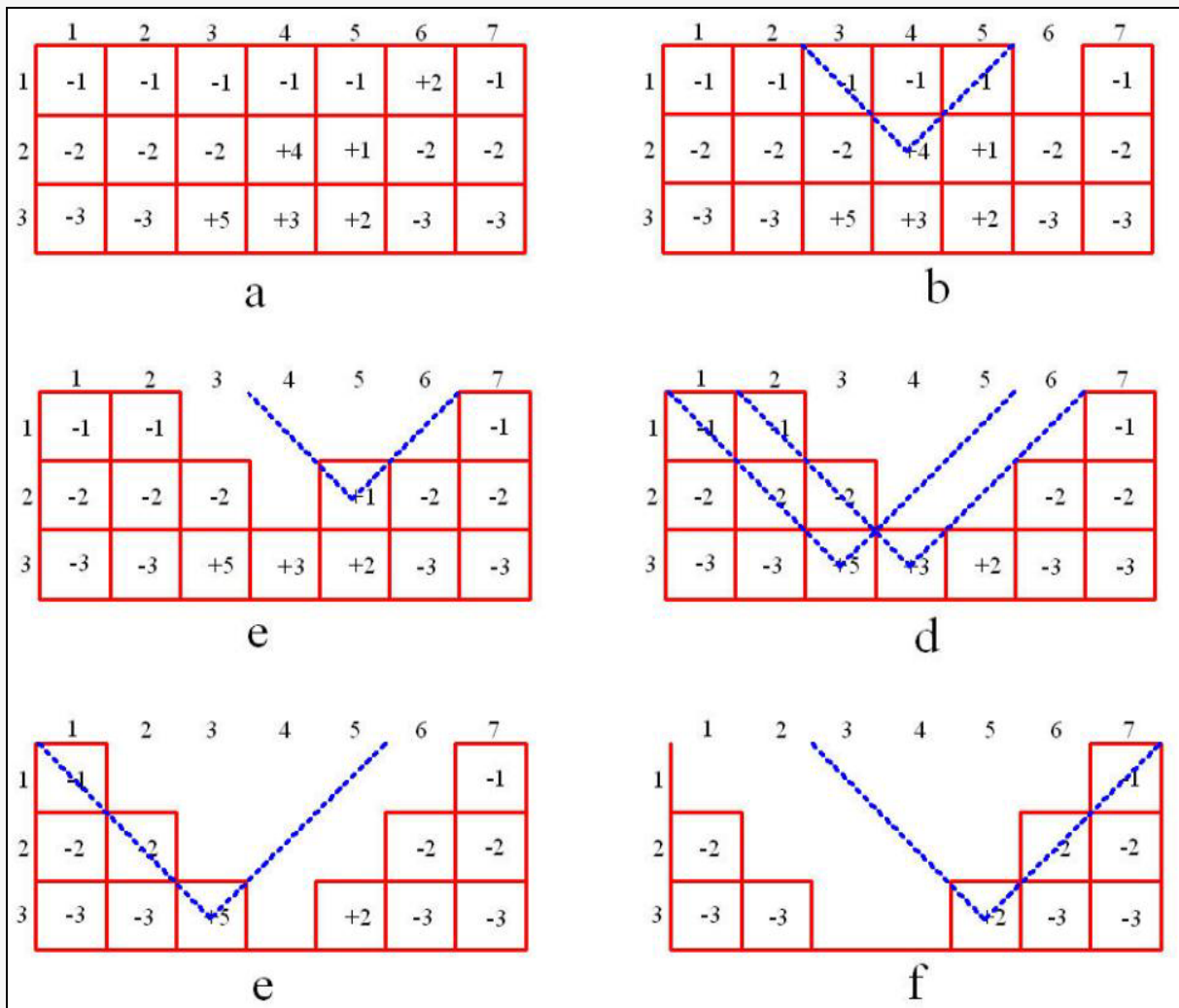


采矿决策

一个单锥可采与否，取决于被围在锥体内的各单元块矿、岩净价值之和，若净价值之和为正，则圆锥可采，反之不可采。



7.2.2 浮动圆锥法



将浮动圆锥法用于图 (a)所示的价值模型得到的最终开采境界，由上述过程中所有被采出的块组成图 (g)，若按照此境界进行开采，开采终了的采场现状如图 (f) 所示。境界总价值+6。若岩石与矿石比重相等，境界平均剥采比为 $7:5=1.4$ 。



7.2.3 L-G图论



中南大学
CENTRAL SOUTH UNIVERSITY

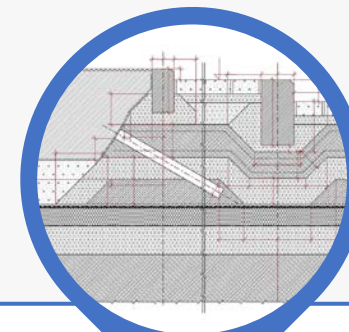


Helmut Lerchs和Ingo Grossman在1965年的论文中，首次将图论的思想引入最终境界问题，并提出了L-G图论法。



价值模型

L-G图论法是建立在价值模型之上的，价值模型是利用L-G图论进行境界优化的基础。



边坡角约束

在有向图中，根据边坡角约束构建有向图，最终境界问题就是在有向图中寻找最大闭包。



1) 基本概念



中南大学
CENTRAL SOUTH UNIVERSITY

L-G图论法

Helmut Lerchs和Ingo Grossman在1965年的论文中，首次将图论的思想引入最终境界问题，并提出了L-G图论法。

价值模型

在地质属性模型基础上，引入经济参数，计算出各最小开采单元块的净利润，从而构成的价值块集合。

价值块

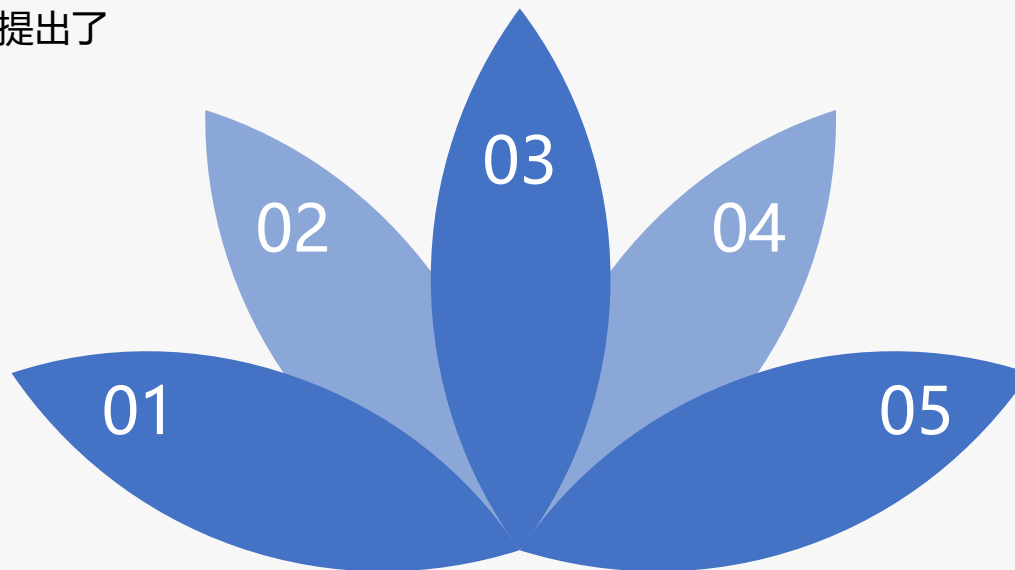
确定开采单元的尺寸，垂直方向尺寸采用台阶高度或其整数倍/整除数，水平方向尺寸参考采矿设备作业尺寸。

净价值计算

价值模型中各最小单元的经济净价值计算，根据矿山最终销售产品价值及成本进行计算。

价值模型应用

构建价值模型是矿山境界优化和采剥计划优化的基础，有助于提高矿山经济效益和资源利用率。





1) 基本概念



中南大学
CENTRAL SOUTH UNIVERSITY



形成可行开采境界

形成可行的开采境界的子图称为可行子图，属于闭包。

上评卷工作示意图



闭包的定义

闭包是指子图内的任一节点为始点的在原图中的所有弧的终点节点也在该子图内。



权值

模型中模块的净价值在图中称为节点的权值，闭包内诸节点的权值之和称为闭包的权值。



1) 基本概念



最大闭包

G中权值最大的闭包成为G的最大闭包。

树的结构

树是一个没有闭合圈的图，存在闭合圈是指图中至少有一个这样的节点，从该节点出发经过一系列的弧（不计弧的方向）能够回到出发点。

图的分类

需要对支撑节点的弧段进行分类，以便确认正确的开采顺序。



2) 正则化



● 正则树

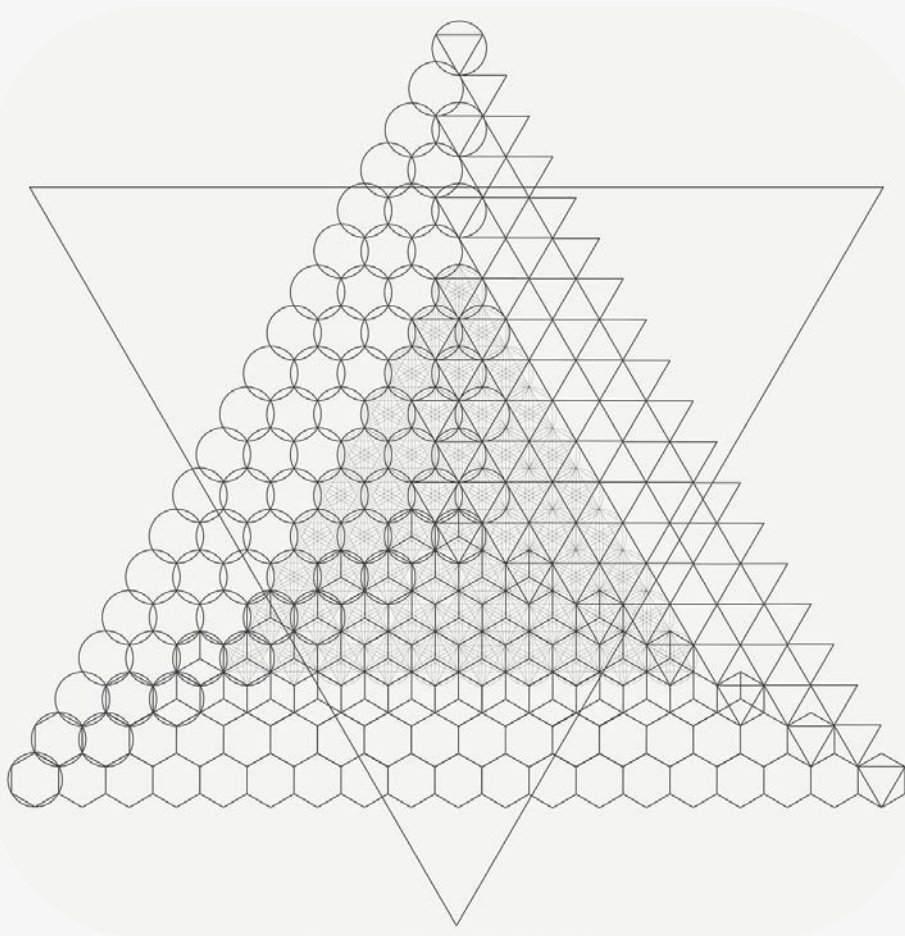
图论法中正则树是全部强弧均与根直接相连的一种状态，在求解最大闭包的过程中，强弧不与根直接相连，

● 强节点集合

图论法要求最终判断强节点集合时，树结构满足正则化的条件，通过遍历所有弧段，删除不与根节点直接相连的弧段。

● 权值计算与弧段删除

重新计算权值并标注弧的种类，形成新树后继续从步骤 I 的操作开始，直至所有强弧全部与根节点相连。





2) 正则化-实现步骤



有向图转换

LG图论法的核心定理是若有向图G的正则数的强节点集合Y是G的闭包，则Y是最大闭包。

初始正则树构建

构筑图G的初始正则树T0，最简单的正则树是在图G下方加一虚根x0，并将x0与G中的所有节点用P弧相连得到的树。

强节点集合判断

若正则树的强节点集合是有向图的闭包，根据定理可得该强节点集合是最大闭包，即构成最佳开采境界。

遍历寻找弧段

在有向图G中遍历寻找弧段 (x_i, x_j) ，满足 x_i 在强节点集合Y内但 x_j 在强节点集合Y外的条件。

正则化形成新树

在树中找出包含 x_i 的强正分支的根点 x_r 。将弧段 (x_0, x_r) 删除，用弧段 (x_i, x_j) 代替，并重新标记新树的各弧段类型。

闭包判断与境界确定

判断正则树的强节点集合是否为有向图的闭包，若是，则强节点集合为最大闭包，即为最佳开采境界。



7.2.4 线性规划法



中南大学
CENTRAL SOUTH UNIVERSITY

01

价值模型构建：线性规划法在构建价值模型时，仅在水平方向上进行划分，从而构建价值条柱。

02

几何约束满足：价值条柱开采的深度与其相邻价值条柱开采深度之间应满足露天开采几何约束。

03

境界确定：最优境界的确定即求解各价值条柱开采的深度，价值条柱数目远小于价值块的数目，故线性规划法理论上效率更优。

04

经济净价值与深度函数：为构架基于线性规划的境界优化数学模型，需构建经济净价值与开采深度的分段线性函数。

05

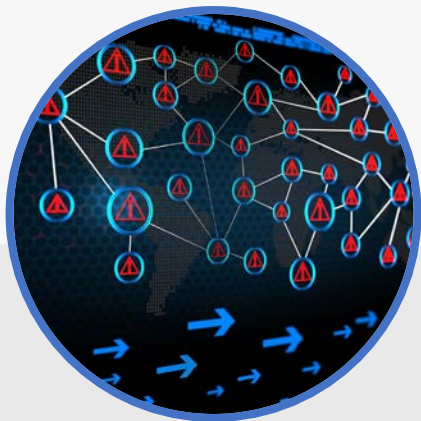
品位空间分布差异：对于金属矿山品位空间分布的差异性，分段线性函数构造困难且拟合精确性较差。



7.2.5 网络最大流算法

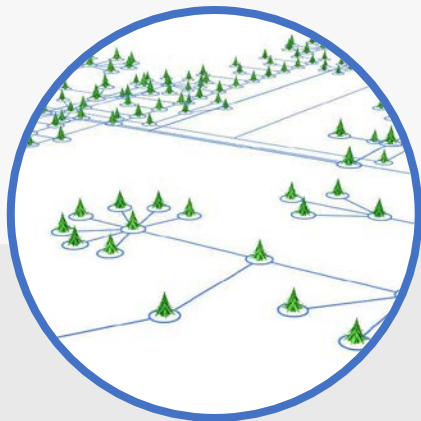


中南大学
CENTRAL SOUTH UNIVERSITY



网络最大流算法

网络最大流算法应用于求解露天矿境界优化问题，是由约翰逊在1968年提出的，后来被皮卡德在1976年证明。



价值块虚拟节点

网络最大流法将价值模型中的价值块虚拟为网络中的节点，增加两个虚拟节点作为发点和收点。



几何约束模型

通过构建价值块之间弧的关系形成网络，求解网络最大流得到最大流和最小截集，包含的节点对应价值块集合。



7.2.5 网络最大流算法



价值块经济净值

块抽象为网络中的节点集合，对应的经济净价值集合为，同时根据价值块经济净价值大小将价值模型分成两部分。

弧的容量

网络图中包含三类弧，对应不同的容量，所有负价值块与发点相连，正价值块与收点相连，容量为经济净价值的绝对值。

实际网络图

快速构建符合露天矿开采实际的网络图对于提高算法效率和准确性至关重要，是网络流法的核心步骤。

优点

网络最大流法能求得唯一最优解，逻辑严密，缺点是网络构建复杂、耗时长、灵活性差，关键在于网络有向图的构建和求解。

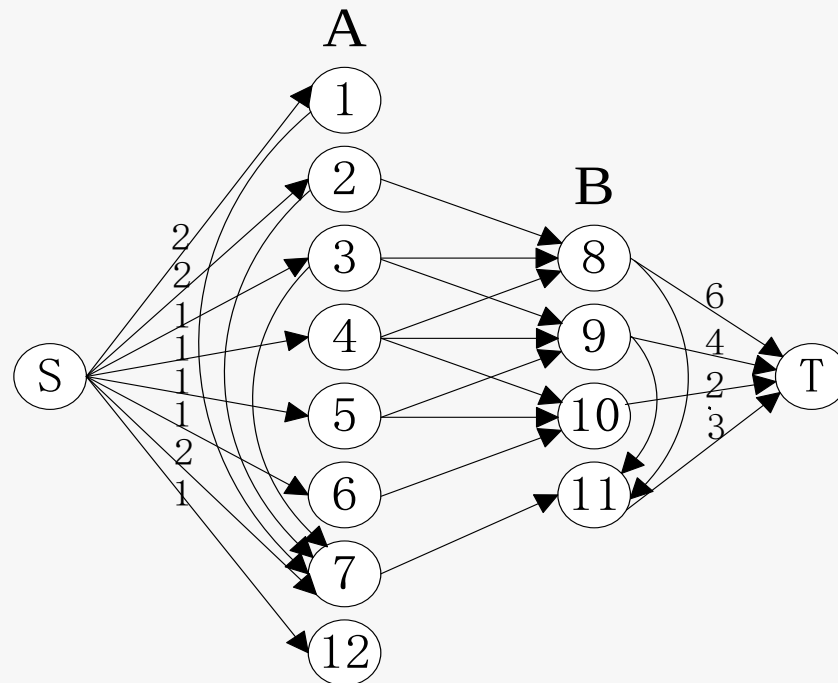


7.2.5 网络最大流算法



将价值模型中的各价值块虚拟为网络中的节点，增加两个虚拟的节点作为发点和收点，通过露天开采几何约束模型构建各节点之间弧的关系形成网络，通过求解网络最大流的方法得到最大流，同时即得到一个最小截集，该最小截集中所包含的节点对应的价值块集合即最终求得的最优境界。

① -2	② -2	③ -1	④ -1	⑤ -1	⑥ -1
	⑦ -2	⑧ 6	⑨ 4	⑩ 2	
		⑪ 3	⑫ -1		





7.3

三维可视化开采设计

—— 矿山开采生产与经营管理新模式的变革背景





7.3.1 计算机辅助设计基础



CAD即计算机辅助设计

CAD即计算机辅助设计 (CAD-computer-aided design), 利用计算机及其图形设备帮助设计人员进行设计工作。

计算机辅助设计的作用

在工程和产品设计中, 微机可以帮助设计人员担负计算、信息存储和图形绘制等工作, 从而减轻设计人员的劳动。

计算机辅助设计的优势

设计人员通常用草图开始设计, 将草图变为工程图的繁重工作可以交给微机完成, 从而加快设计速度。

计算机辅助设计的意义

CAD能够缩短设计周期和提高设计质量, 因为它能够快速制出整洁的图形并显示出来, 使设计人员及时对设计出判断和修改。



1) CAD技术分类



01

面向画面的CAD方法

利用计算机对图形变换、着色、修改、拷贝及图像处理等强大的图形编辑能力而获得较好的经济效益。

02

面向计算的CAD方法

主要用于设计工程中的计算步骤，如边坡分析、土建结构力学分析等，应用前提是设计对象所含各物理量间的关系和约束可以用数学方法描述和计算。

03

面向模型造型方法

主要用于设计过程中的对象模型表达、修改、定型阶段，以设计对象模型为操作对象，一般表达为三维实体。

04

面向综合的方法

操作对象是设计条件和设计领域知识，操作结果产生一个或若干个符合条件的设计对象，实现从设计要求到设计对象的映射。

05

面向实体的可视化方法

强调人体视觉和交互为中心的设计思想，从方案的构思、处理过程和最终结果都以实体图形或图像为基础。



2) 二维与三维CAD



中南大学
CENTRAL SOUTH UNIVERSITY

二维CAD的限制与挑战

二维CAD的局限性

在CAD发展的初期阶段，二维CAD系统是主流，但其所绘制的二维图缺乏立体感，需要阅图者通过空间想象理解形状。

01



02

绘制二维图纸的挑战

技术人员需花费大量时间绘制二维图纸，且需通过多种视图表达描述对象特征。非专业人员难以读懂图纸。

03

修改图纸的挑战

由于各图形之间不具关联性，对图纸进行修改时必须修改其他相关图形，这样很难保证图形的一致性。

04

二维图形的局限性

二维图形不能进行实体分析，仅在平面上表达，导致设计师难以直观地理解形状和结构。



2) 二维与三维CAD



中南大学
CENTRAL SOUTH UNIVERSITY

三维CAD的优势与应用



三维CAD系统的优势

三维CAD系统具有可视化程度高、形象直观、设计效率高，以及能提供完整的设计、工艺和制造信息等优势。

三维CAD系统核心

三维CAD系统的核心是三维模型，所表达的几何体信息越来越准确和完整，能解决“设计”的范围也越来越广泛。

三维CAD系统功能

三维CAD系统模型可以直接通过投影生成二维工程图；模型包含了更多的实际结构特征，可以进行各种计算。



2) 二维与三维CAD



中南大學
CENTRAL SOUTH UNIVERSITY

二维工程图的地位与影响

工程图的重要性

以二维形式表达的工程图是工程技术人员反映其设计思想的语言，具有简单、完整和准确等特点。

工程图的复杂性

工程图能够表达的对象复杂性几乎是无限的，人类近二百年来的实践充分证明了二维工程图表征对象的合理性和正确性。

改变思维方式

矿山开采行业的设计人员很难改变根深蒂固的二维思维方式，在一定时间内仍需依赖二维交互方式进行设计和采矿。





2) 二维与三维CAD



三维CAD是采矿CAD发展的主流

三维CAD优势

三维CAD系统具有可视化程度高、形象直观、设计效率高，以及能为企业数字化的各类应用环节提供完整的设计、工艺和制造信息等优势。

二维CAD局限

传统的二维CAD系统正在逐步被三维CAD系统所取代，因为三维CAD系统能够解决“设计”的范围更广泛，核心是三维模型，表达的几何体信息准确完整。

三维模型作用

三维模型可以直接通过投影生成二维工程图，包含更多的实际结构特征，通过赋予三维实体一定的属性，就可以进行各种计算。



7.3.2 采矿计算机辅助设计-特点



中南大学
CENTRAL SOUTH UNIVERSITY

01

采矿活动的特点：采矿活动是发生于真三维的空间中，随着开采过程的进行，三维空间是动态改变的。

02

数据可视化的优势：地质数据、工程设计数据和生产历史数据可以通过图像、曲线、二维图形、三维体和虚拟现实技术表示，并可对其相互关系进行可视化分析。

03

交互性的体现：数据获取、存储及更新的交互性；采矿工程设计的交互性；生产过程管理的交互性。

04

采矿CAD的要求：较高的可视化程度和方便的、友好的人机交互环境；各部门信息处理、传输的时效性和连续性；提高设计质量，缩短设计周期。

05

集成技术的作用：集成图形环境、集成图形处理方法和标准的数据接口技术，较强的通用性和可移植性。



1) 工程设计过程



中南大学
CENTRAL SOUTH UNIVERSITY

01

设计的面向目标问题求解活动：设计是一种面向目标问题的求解活动，包含问题的形成、创造性地构思、综合、分析、模拟及评价、判断和决策，到最后形成设计方案或局部设计方案。

02

设计师获得设计要求：设计师获得设计要求，包括功能要求、经济要求、制造技术要求、环节要求、审美要求等，是设计过程的起点。

03

方案设计：方案设计是整个设计过程中最活跃、最具创造性，也是智力活动最复杂的一个环节，方案设计是一种特殊的问题求解形式，也称构思。

04

设计对象修改验证定型：设计对象在此步骤中形成，需要修改、验证、定型，将大脑中的设计对象表达出来，对模型作进一步的计算，不合适之处予以改善，细节予以补充，最后定型。

05

制作技术文件：将定型的设计结果制作成技术文件，通常包括对象的三视图、剖面图、部件图及各种详细的说明等，是设计过程的终点。



2) 采矿设计与采矿CAD



采矿设计

采矿设计是工程技术人员根据约束条件，用工程手段改变环境，满足特定要求所进行的智能活动。

采矿设计原则

采矿设计除满足采出矿石外，应保证工程结构的自身存在，使它能够承受自然过程和人工生产过程施加的各种载荷和作用。

采矿设计经济性

采矿设计应考虑经济性以及与合作的协调性，以最低的成本、最小的环境破坏以及最好的安全性获取尽量多的矿石资源。



2) 采矿设计与采矿CAD



采矿设计阶段

采矿设计通常要经历方案设计、初步设计和施工图设计几个阶段，每个阶段都有自己的设计目标。



方案构思

工程师接到设计任务后，运用经验与知识进行设计构思，做出技术决策，确定设计原则，对后续设计有总体把握。



工程结构参数计算分析

结构和参数分析的目的是要确定设计方案中有关工程结构的应力载荷、约束条件等，是采矿设计的重要方面。



2) 采矿设计与采矿CAD



中南大学
CENTRAL SOUTH UNIVERSITY

01

采矿设计过程

包含对具体方案的设计和设计方案
的调整，以及施工图绘制和经济分析。

02

经济分析

经济分析是工程设计的重要方面，是
确定项目投资、编制和安排建设计划
的依据，也是确定工程造价、考核工
程成本和经济性的依据。

03

思维过程

工程设计是一种“面向目标问题的求
解活动”，包含问题的形成、创造性
地构思、综合、分析、模拟及评价、
判断和决策，直到最后形成设计方案
。



7.3.3 三维可视化与人机交互



三维可视化

三维可视化是一种将数据、信息、知识等元素以三维形式呈现，并可交互地探索、操作和发现的技术。



人机交互

人机交互是一种将用户与计算机系统连接起来，通过界面进行信息交流和反馈的过程。



三维可视化与人机交互

维可视化与人机交互结合，可以实现更加丰富、深入和便捷的信息交流与控制。





1) 人机交互



中南大学
CENTRAL SOUTH UNIVERSITY

人机交互的定义

人机交互是指人与计算机之间进行交互的过程，涵盖了计算机如何接收用户输入、处理数据和反馈结果。

01

人机交互的分类

人机交互可以分为批处理、交互式、自主式三种类型，每种类型都有其特点和适用场景。

02

03

人机交互的应用

人机交互在我们的日常生活中有着广泛的应用，如智能家居、智能汽车、智能穿戴设备等。



2) 人机交互技术

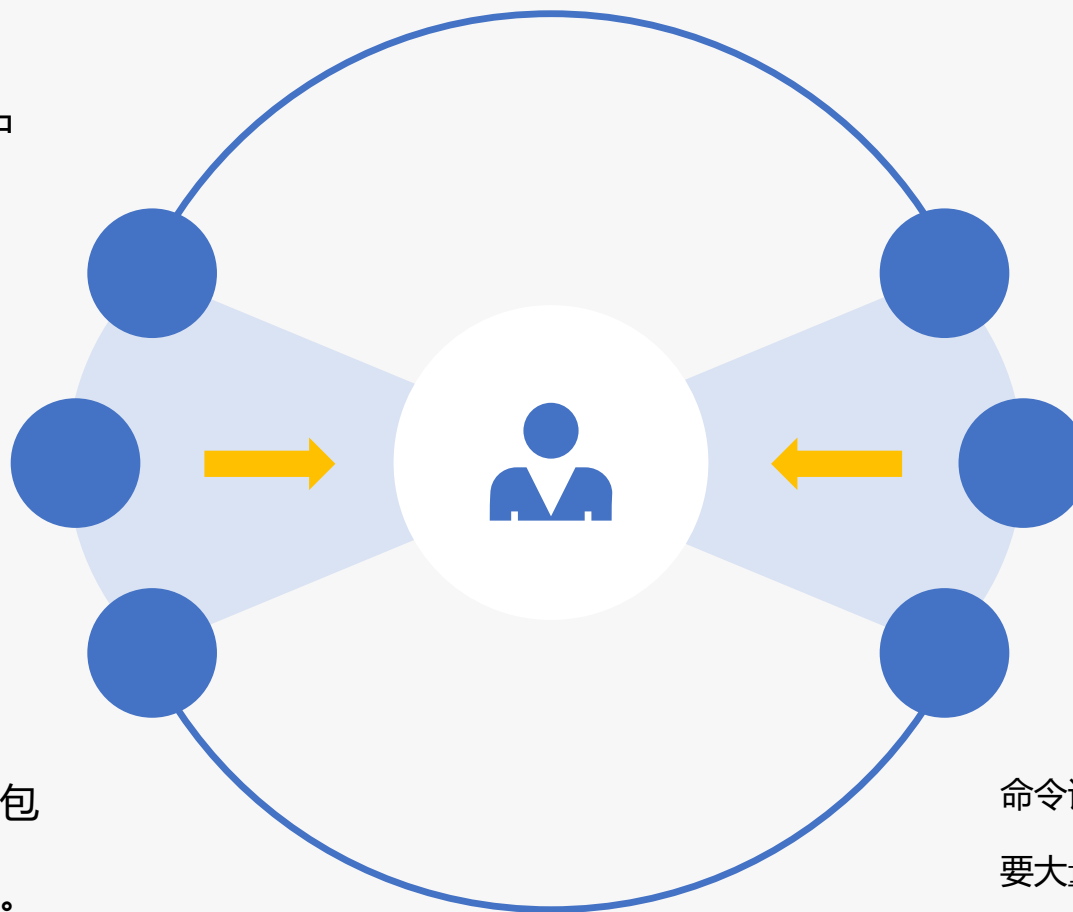


中南大学
CENTRAL SOUTH UNIVERSITY

交互处理是CAD中的重要部分，用户接口是图形系统必备的部分。

人机交互技术是一种通过计算机输入、输出设备实现人与计算机对话的技术。

人机交互技术涉及多个学科领域，包括人机工程学、认知学和心理学等。



人机交互的风格经历了命令界面、图形界面、多媒体界面等发展阶段。

虚拟现实技术和多通道用户界面是当前人机交互技术发展的方向。

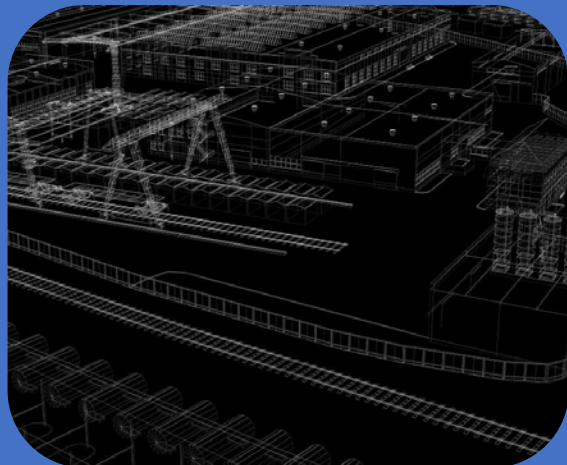
命令语言用户界面是早期人机交互技术，需要大量记忆和训练，适合专业人员使用。



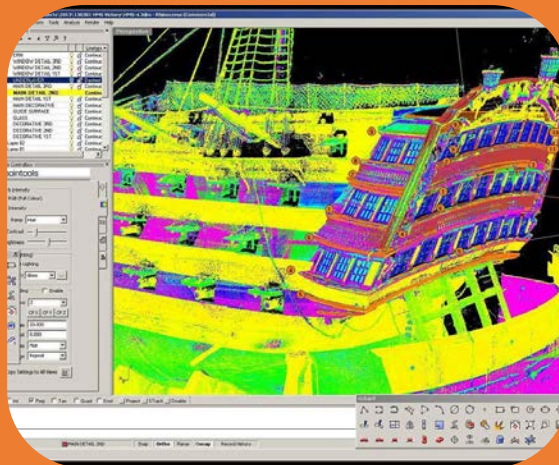
2) 二维三维一体化交互技术



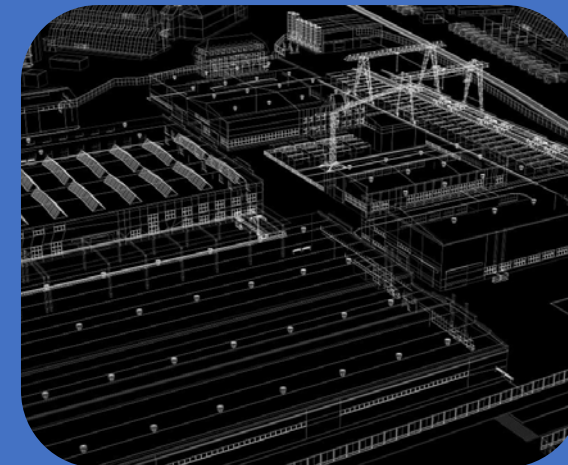
中南大學
CENTRAL SOUTH UNIVERSITY



维三维一体化交互技术是一种将二维和三维技术相结合，实现一体化交互的技术。



通过将二维和三维技术进行整合，使交互更加直观、生动和高效。



一体化交互技术可以应用于各种领域，如教育、医学、工程等，能够提供更好的用户体验。



(1) 三维交互



中南大学
CENTRAL SOUTH UNIVERSITY



三维交互

三维交互是指在三维可视化环境下进行人机交互工作，使用人员可以真实地把握设计对象及其环境的空间几何特征。

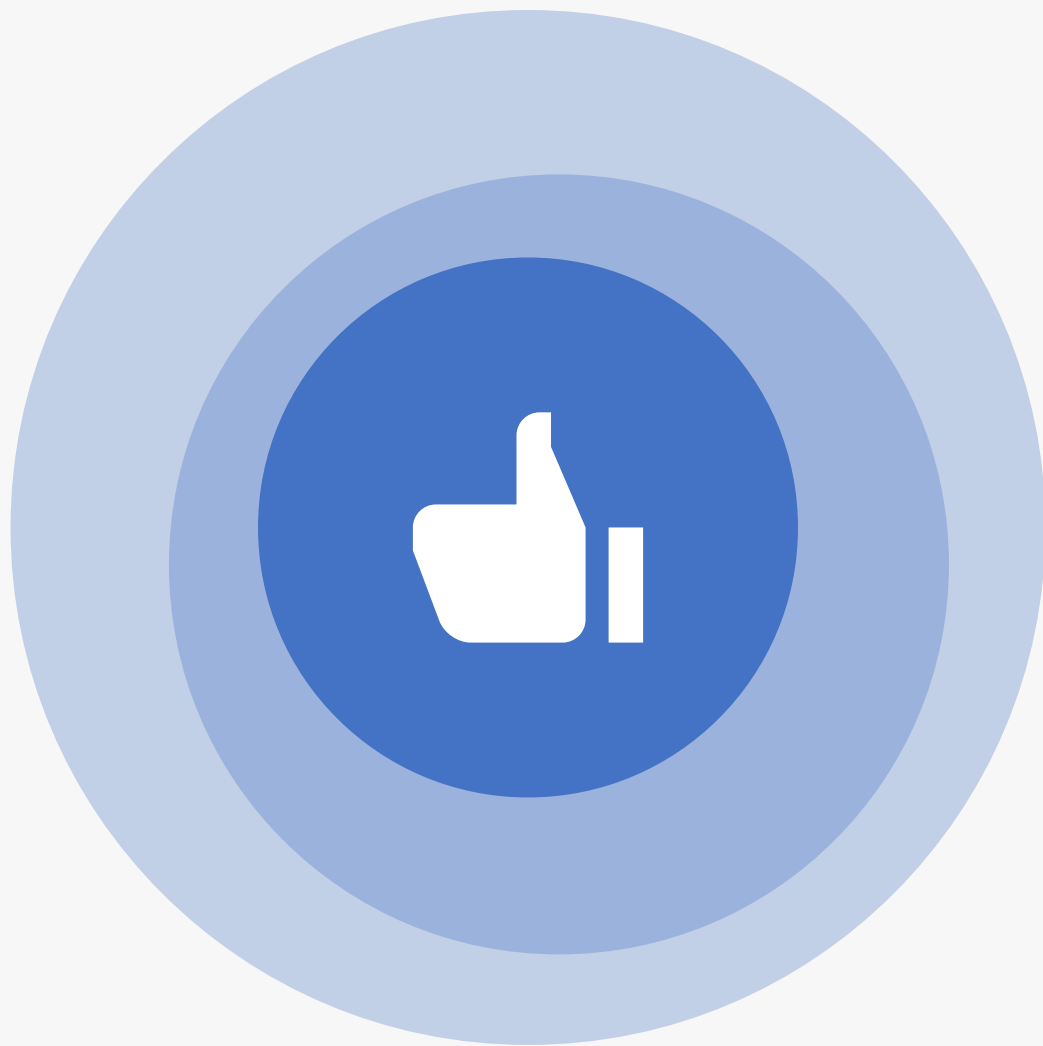
采矿设计

采矿设计过程中，需要处理的绝大部分数据和信息都具有几何和空间特性，矿床的几何模型是设计的基础。



几何数据

几何数据是采矿设计的先决条件，也是其他设计步骤的输入值，对于选择采矿设备至关重要。



绘制图形

几何数据通常以剖面图和平面图的形式供设计使用，但修改起来费时费力，新图是必要的。

二维转三维

将二维图转为三维模型困难，复杂的几何关系导致只有空间思维方面训练有素的设计工程师才能成功。

维可视化技术

维可视化技术赋予人们一种三维的、仿真的，并且具有实时交互的能力，采矿工程师可以利用新技术获取信息。



(1) 三维交互



中南大学
CENTRAL SOUTH UNIVERSITY



解放设计

采矿工程师可以从二维平面图中解放出来而直接进入三维世界，从而很快得到自己设计的三维采矿工程模型。

判断设计不足

采矿工程师可以快速判断设计不足或错误，达到优化设计、提高设计效率的目的，提高设计效率。



(2) 二维交互



中南大学
CENTRAL SOUTH UNIVERSITY

二维交互

二维交互是指利用二维图形元素（如点、线、面等）进行交互操作的过程。

适用范围

二维交互通常只适用于平面图形元素，对于三维图形元素则可能难以实现有效的交互。

操作方式

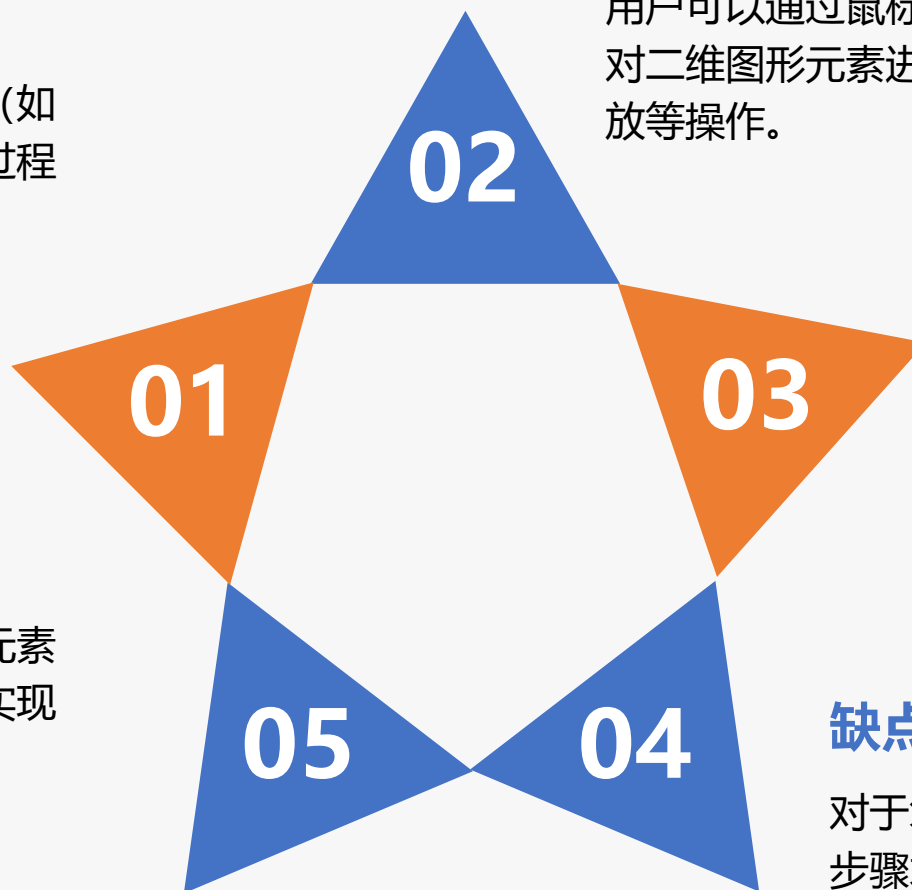
用户可以通过鼠标或触摸屏等设备，对二维图形元素进行点击、拖动、缩放等操作。

优点

二维交互的优点在于直观、易于理解 and 操作，可以让用户在计算机屏幕上直接看到操作效果。

缺点

对于复杂的交互任务，可能需要多个步骤才能完成，这可能会增加用户的操作难度。





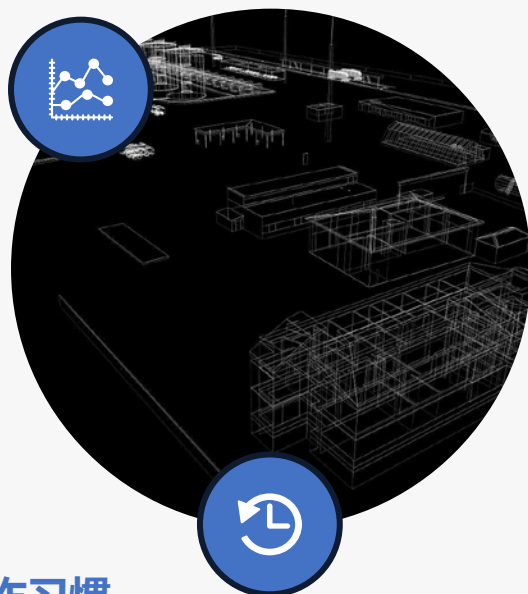
(3) 两者相结合的意义



中南大学
CENTRAL SOUTH UNIVERSITY

维交互环境

维交互环境可以还原真实场景和实体的空间形态，降低设计出错概率，提高工作效率。



传统思维与操作习惯

受传统思维习惯和操作习惯影响，采矿工程中多使用二维平面图。



二维三维交互技术

将二维三维交互技术有效结合，利用三维交互的优点，提高工作效率，降低出错可能性。

符合思维和操作习惯

符合使用人员的思维和操作习惯，确保设计的精确程度。



7.3.4 基于DMS的开采设计



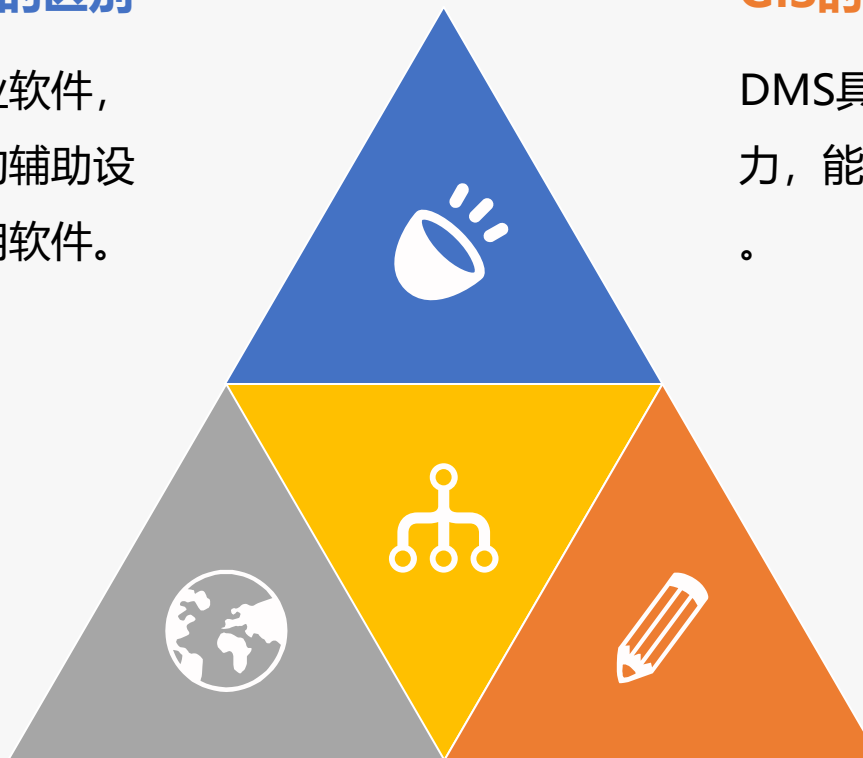
中南大学
CENTRAL SOUTH UNIVERSITY

DMS与CAD的区别

DMS是应用于矿山的专业软件，
而CAD是用于各行各业的辅助设计通用软件。

信息模型与图形

DMS具有GIS的特征，含有空间位置、几何形态信息外，还具有属性数据，比如资源类型、品位、矿岩物理性质的信息。



GIS的特征

DMS具有较强的空间统计分析能力，能对设计与进行仿真与优化。

空间统计分析能力

DMS是基于信息模型进行设计的，而CAD主要基于图形进行设计。



1) 基于DMS设计的方法-原理



中南大学
CENTRAL SOUTH UNIVERSITY



基于信息模型的设计

DMS是一种基于信息模型的设计方法，通过参数化设计和可视化仿真进行优化。



信息建模与数据整合

DMS建立信息模型，整合多源、多类型数据，促进数据共享和协同工作。



全面性信息建模

DMS提供全面的、多维的视图，将各种信息因素整合在一起，使用户能够综合考虑各种数据源的信息。



1) 基于DMS设计的方法-特点之指标计算



中南大學
CENTRAL SOUTH UNIVERSITY

● 工程量指标

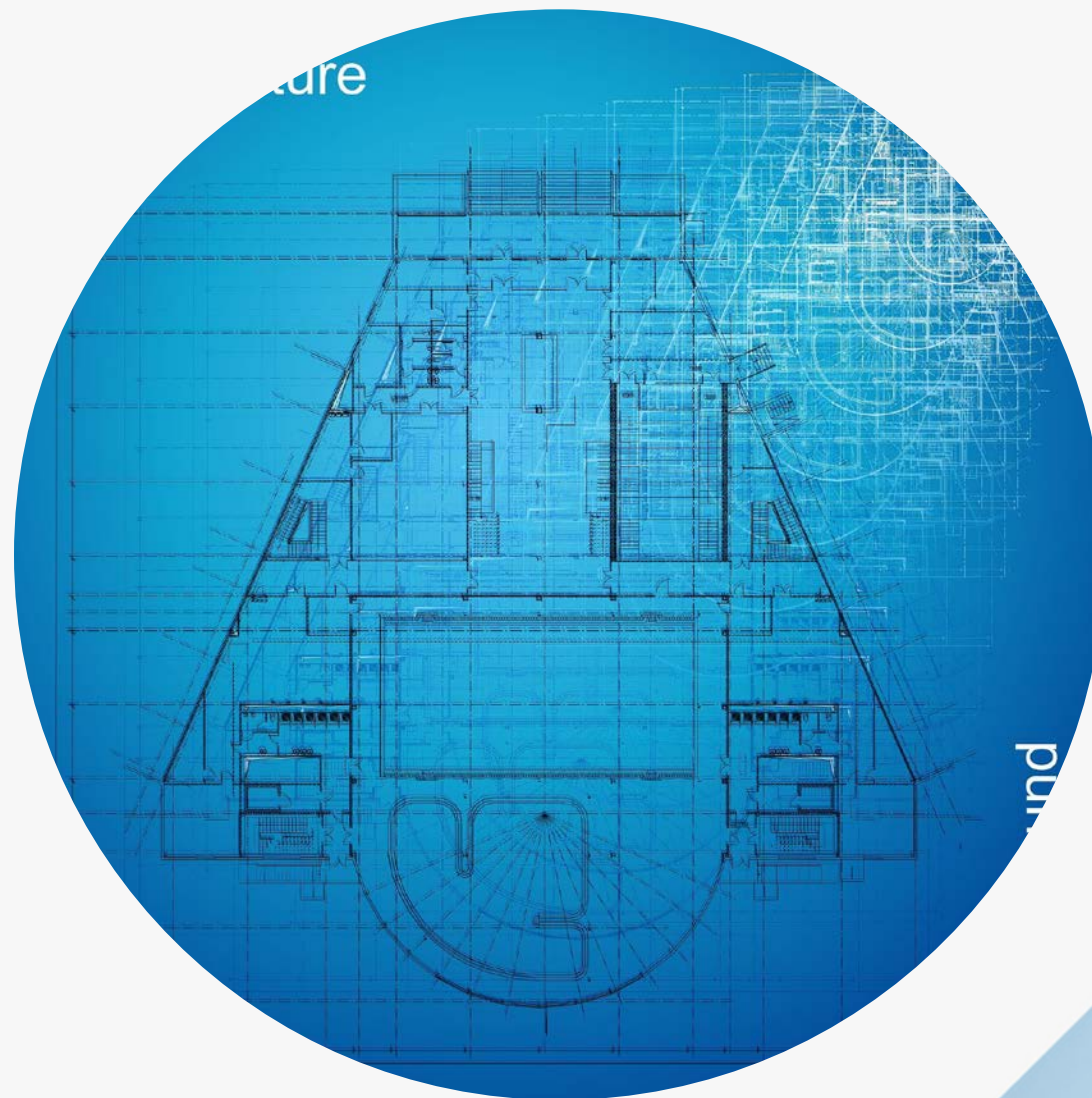
工程量计算主要包括巷道断面、长度、立方量、带矿、带岩量等指标。

● 矿量计算

矿量计算涉及每个采场的地质矿量、地质品位、上接矿量、下转矿量、崩落矿量等指标。

● 综合指标表

综合指标表包括整个分层矿量及工程量汇总，以便于分析和评估工程的规模和复杂性。





1) 基于DMS设计的方法-特点之仿真与优化



中南大学
CENTRAL SOUTH UNIVERSITY

DMS

DMS通常具有强大的可视化和仿真工具，允许用户在进行设计过程中进行虚拟现实、碰撞检测、可视化演示等。

VS

性能分析

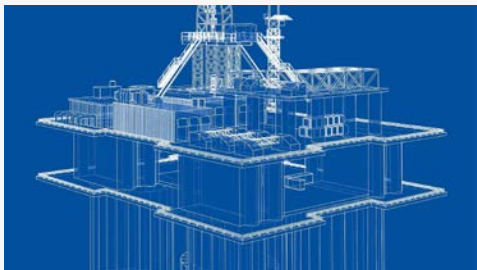
DMS可以进行性能分析和优化，如贫损指标、资源回收、开采效率、安全程度等，帮助工程师在设计阶段优化方案。



1) 基于DMS设计的方法-特点之自动化成图与交付

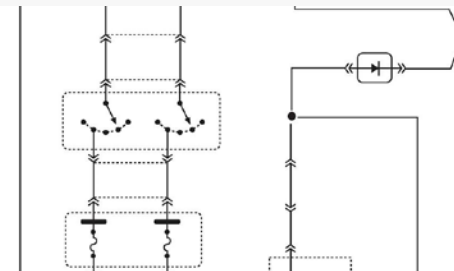


中南大學
CENTRAL SOUTH UNIVERSITY



DMS自动生成开采方案图、开采施工图、施工计划、材料清单等相关文档，从而提高了效率。

图纸发布功能可以实现图纸的自动签章和发布，交付功能可将设计成果集成移交到其他系统中。



基于DMS的开采设计方法强调全面的数据集成、智能规划和可持续性，使矿山开采更加高效、安全和可持续。



2) 基于DMS与CAD设计的区别



● 数据建模与几何建模

传统CAD设计注重几何建模，基于DMS的设计强调数据建模，包括多维数据，使得设计更具综合性和智能性。

● 参数化与关联性

基于DMS的设计通常是参数化的，设计元素可以受到参数的控制，使得设计能够更加容易地进行变更和优化。

● 协同设计

基于DMS的设计促进协同设计，多个设计领域的专家可以同时访问和修改信息模型，以协同工作。



2) 区别之数据建模与几何建模



中南大学
CENTRAL SOUTH UNIVERSITY

01

传统CAD设计侧重几何建模

传统CAD设计主要侧重于几何建模，使用图形对象（如线、圆、多边形）来表示设计。

02

数据建模相比几何建模的优势

数据建模在设计时不仅考虑形状和外观，还涉及属性、关系、材料、过程等信息。

03

基于DMS设计的优势

基于DMS的设计以内容为中心，而非传统CAD以图纸为中心，使得设计更具综合性和智能性。



2) 区别之参数化与关联性



中南大学
CENTRAL SOUTH UNIVERSITY



DMS设计参数化

DMS设计通常基于参数化，意味着设计元素受到参数控制，使得设计能够更加容易地进行变更和优化。

CAD设计局限性

传统CAD设计通常不具有相同程度的参数化和关联性，设计变更可能需要手动重新建模。





2) 区别之协同设计



中南大学
CENTRAL SOUTH UNIVERSITY

DMS设计促进协同设计

通过DMS设计，多个设计领域的专家可以同时访问和修改信息模型，以协同工作。



传统CAD设计协同性差

传统CAD设计依赖于文件的传递，导致协同设计更具挑战性。



3) 基于DMS设计的案例



DMS设计

DMS设计是一种以数据管理为核心的设计方法，它通过建立数据模型、数据分类、数据标准化等步骤，来实现数据的有效管理。

案例分析

为了实现数据的有效管理，我们设计了基于DMS的案例，包括数据采集、数据存储、数据分析和数据可视化等环节。

系统实现

通过DMS设计，我们实现了一个高效、稳定的数据管理系统，能够满足不同场景的数据管理需求，提升数据处理效率。



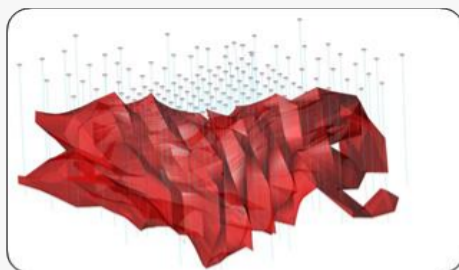
(1) 开采规划与优化



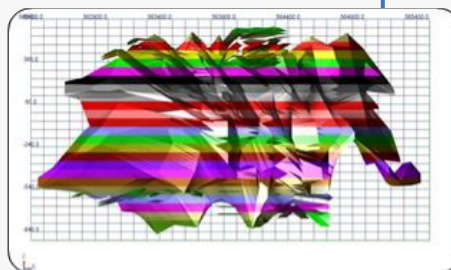
中南大学
CENTRAL SOUTH UNIVERSITY

三维模型

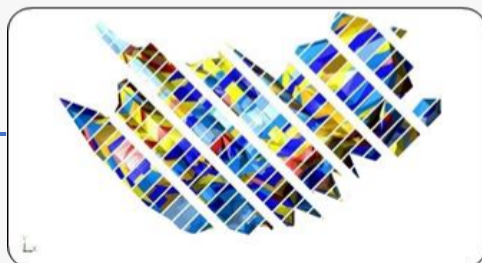
通过中段、分段、采场的自动划分、属性计算与表述，实现三维模型下的自动操作。



地质体建模



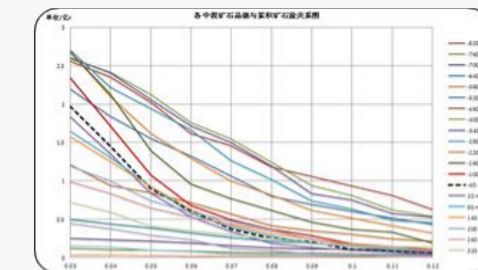
中段划分



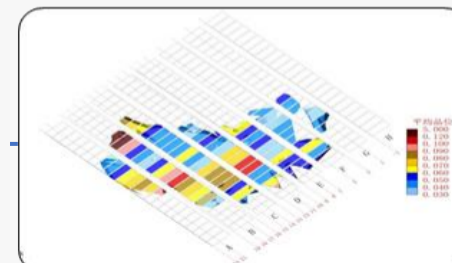
盘区划分与指标计算



盘区数量/矿量/金属量关系图



中段矿量品位分析



首采盘区优选



(2) 开采设计与优化



中南大学
CENTRAL SOUTH UNIVERSITY

模型准备

在回采爆破设计前，需要准备模型基础数据，包括采场模型或矿体模型、实测巷道模型以及块段模型。

回采爆破设计

排位线设计是在模型数据的基础上，在三维可视化环境下进行排位线参数化设计，然后生成一系列的排位线。

炮孔设计

在爆破边界的基础上，系统根据孔底距、边界容差、钻机高度、边孔角度、装药模式及爆破影响半径范围等参数进行炮孔自动设计和装药设计。



经济指标计算

回采设计的技术经济指标主要分为火工材料统计、爆破矿岩量统计和经济指标三类，具体有孔数、设计米数、炸药量、崩落矿量、岩量、平均品位、金属量、每米崩矿量、炸药单耗、损失率、贫化率等。

传统方法与DMS软件对比

传统的方法需要人工对进路每个炮排小剖面中孔数、设计米数的进行一一统计，然后填入表格中，工作量大且繁琐。

DMS软件的优势

基于DMS软件，可支持上述经济指标一键输出，快速进行经济指标计算，直至满足要求为止。



4) 基于DMS设计的意义



01

全生命周期管理

DMS使采矿项目的全生命周期管理成为可能，包括规划、设计、建设、运营和维护。

02

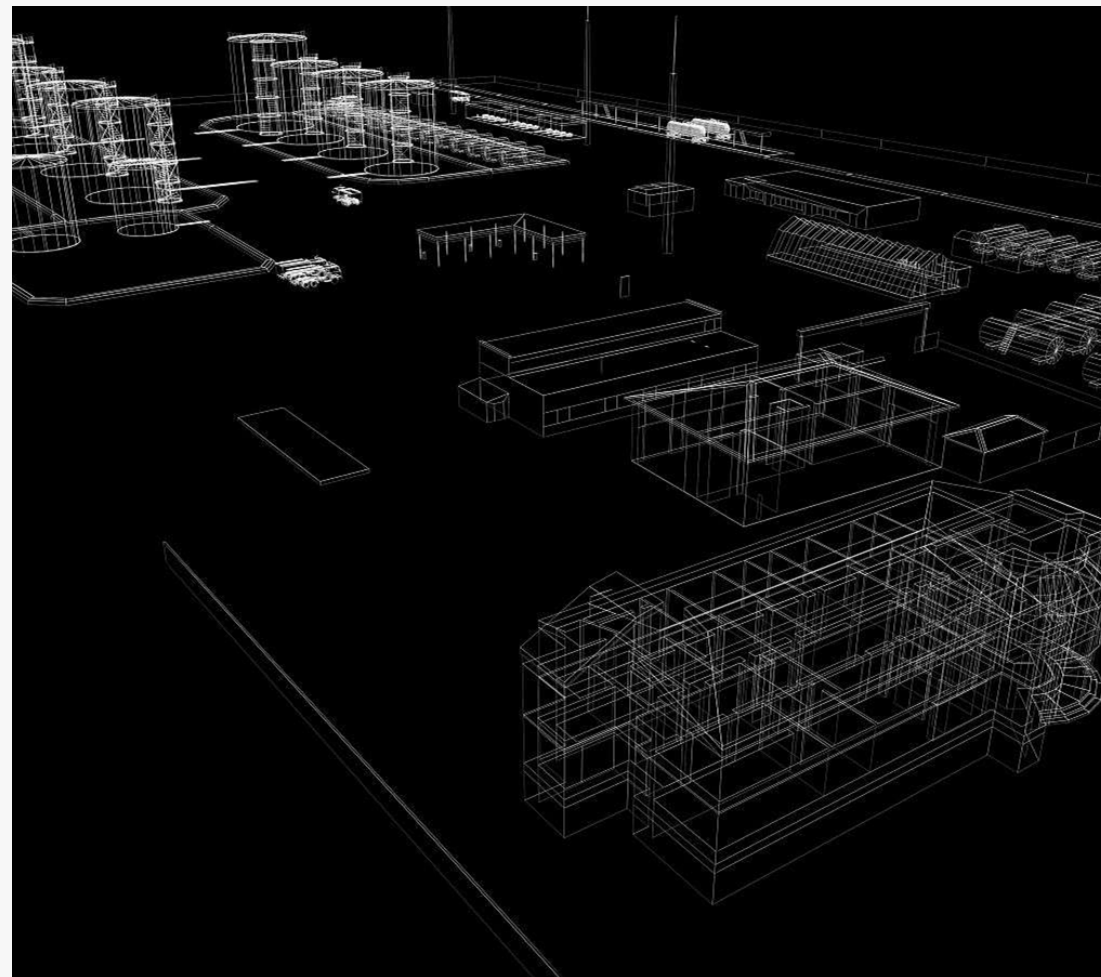
综合数据集成

基于DMS的采矿设计集成了各种数据类型，包括地质、地理、资源、环境和社会数据。

03

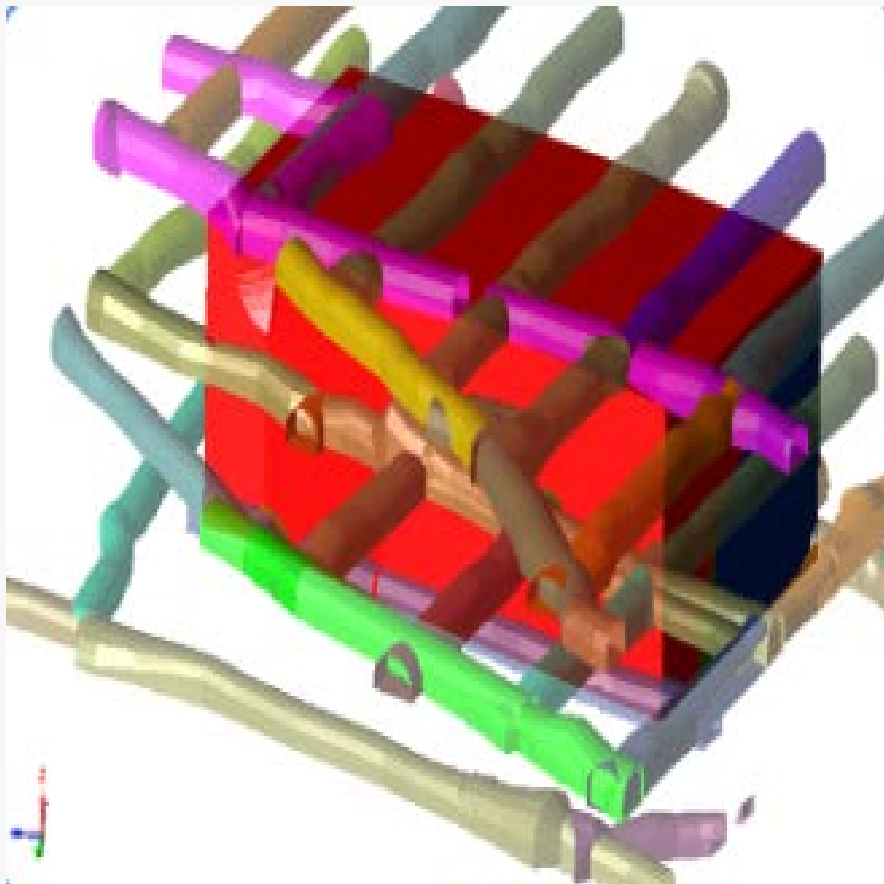
多学科协同设计

DMS鼓励多学科协同设计，确保设计各个方面的协调性。





4) 基于DMS设计的意义



可视化和仿真

基于DMS的采矿设计允许可视化呈现矿山项目，模拟不同情况下的效果，进行决策支持。

性能分析和优化

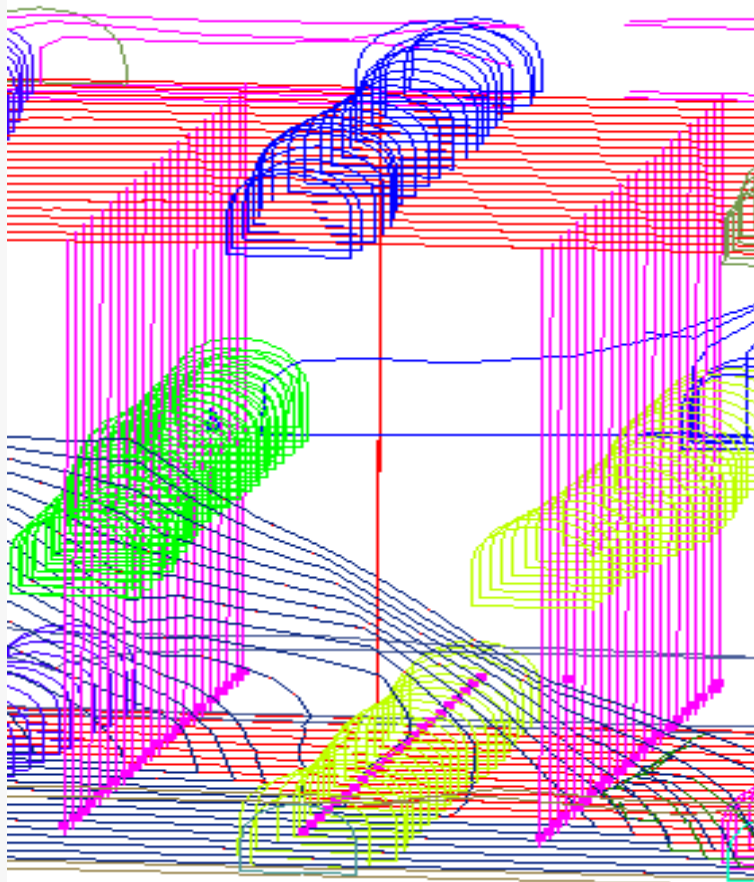
DMS可以用于性能分析和优化，如能源效率、结构分析、材料成本等。

减少错误和冲突

基于DMS的设计减少了设计中的错误和冲突，更容易发现和解决问题。



4) 基于DMS设计的意义



精确性和一致性

DMS提供了准确、一致和详细的数据，减少了设计错误和不一致性的风险。

数据驱动决策

DMS提供了丰富的数据，可以用于数据驱动的决策制定，以优化采矿计划。

全面的项目管理

DMS还支持项目管理，包括项目进度跟踪、成本控制、风险管理和决策支持。

数据更新和历史记录

DMS可以根据实际开采情况和新的地质信息不断更新，同时保留历史数据。



7.3.5 基于三维模型的成图技术



中南大学
CENTRAL SOUTH UNIVERSITY



基于三维模型的成图

基于三维模型的成图是在已有三维数据基础上，通过剖切、投影等操作自动生成二维图。



手工制图

手工制图下地质体轮廓线的绘制是通过工程、样段的控制点投影手动连线输出，是一种“示意图”。



三维模型成图技术

三维模型成图技术是通过在空间真实位置切割地质体，形成的精确轮廓线，造成与投影形成的工程、样段等不能完全对应。



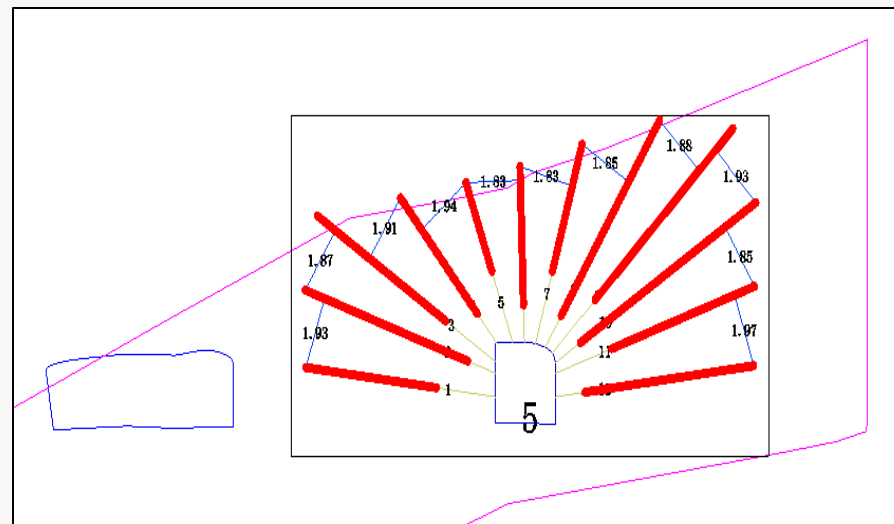
精确空间形态

三维模型成图技术本质是反映地质体、工程、样品的精确空间形态，而非手工制图下的工程图件。



图件要素

在基于三维模型的成图产生基本图件要素后，再通过图例、图幅、图签、网格、指北针等图件修饰处理即可制作出既符合要求的工程图件。





7.4

采掘（剥）计划编制

矿山开采生产与经营管理新模式的变革背景



7.4.1 计划编制基础



中南大学
CENTRAL SOUTH UNIVERSITY

矿山采掘计划编制

矿山采掘计划编制是矿山设计和开采最重要的环节之一，对矿山的总体经济效益有直接影响。

计划编制的科学合理性

计划编制的科学合理性直接影响着矿产资源的综合利用、矿山企业的经济效益和能否持续均衡地进行生产活动等方面。

计算机技术在矿山计划中的应用

随着计算机技术、三维可视化技术和运筹学的进一步发展，为矿山利用计算机在三维可视化环境下进行开采计划编制奠定了良好基础。



数字化开采计划编制

数字化开采计划编制综合利用地质体模型、工程模型以及矿块模型，能够快速生成开采计划的方案。

数字化计划编制的优势

相对于手工编制计划，数字化计划编制可以合理规划矿山工程在空间与时间上的顺序和采剥（掘）设备作业顺序。

实现开采总体经济效益最大化

数字化计划编制有助于降低采矿成本，提高生产效率，最终实现开采总体经济效益最大化的目标。



1) 露天矿采剥计划



● 露天矿采剥计划目标

根据矿山生产能力和剥采比等约束条件，确定技术上可行、经济上最优的矿岩采剥顺序。

● 经济优化目标

总体经济效益最大，即矿床开采过程中所实现的总净现值最大，决定矿块的开采顺序以获得最大累计净现值。

● 技术约束条件

采剥计划需满足技术约束条件，包括稳定供矿、适应设备能力、满足生产要求的时空发展关系等。



2) 地下矿采掘计划



中南大学
CENTRAL SOUTH UNIVERSITY



采掘计划复杂

地下矿采掘计划编制是一个复杂的系统工程，需要考虑各种因素，如各采场回采顺序、矿块生产能力、新水平准备时间等。



划分层次

在编制采掘计划时，需要根据时间和工程划分层次，合理安排各开采项目的采掘工程工作量、工期、施工顺序等。



资源安排

合理地安排设备、人力、资源的使用，确保开采项目的顺利进行，提高开采效率和安全性，为企业的可持续发展做出贡献。



7.4.2 露天矿采剥计划编制



中南大学
CENTRAL SOUTH UNIVERSITY

露天采剥计划优化方法

确定技术上可行的矿岩采剥顺序，以实现矿床开采总体经济效益的最大化。



经济效益最大化

通过优化矿岩采剥计划，矿床开采的总体经济效益将得到最大程度的提升。



矿岩采剥顺序

该顺序应贯穿整个矿山开采周期，确保矿床开采的稳定性和高效性。

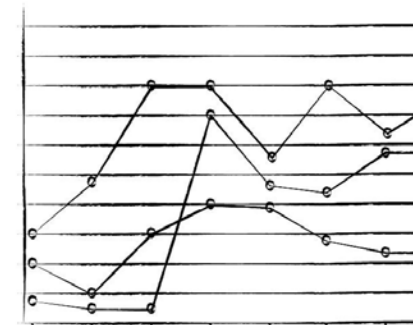
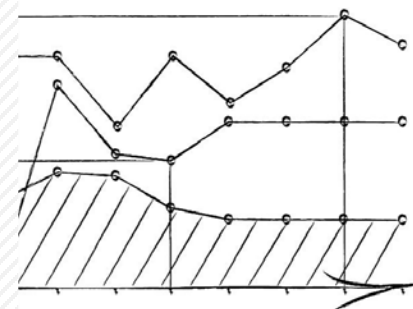




1

中长期采剥规划

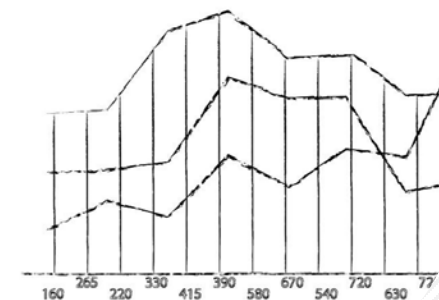
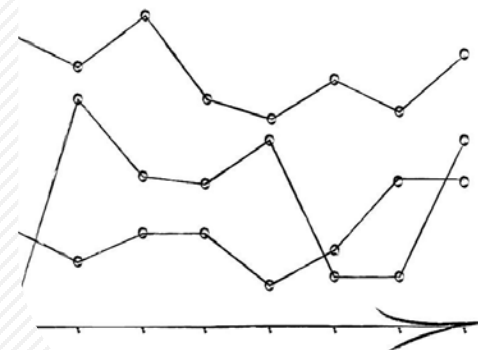
中长期采剥规划是在露天矿境界基础上进行的，以实现计划周期内净现值的最大化目标。



2

0-1型整数线性规划

采用0-1型整数线性规划建立数学模型，包括模型数据集、集合的索引、模型参数等。





7.4.3 地下矿采掘计划编制



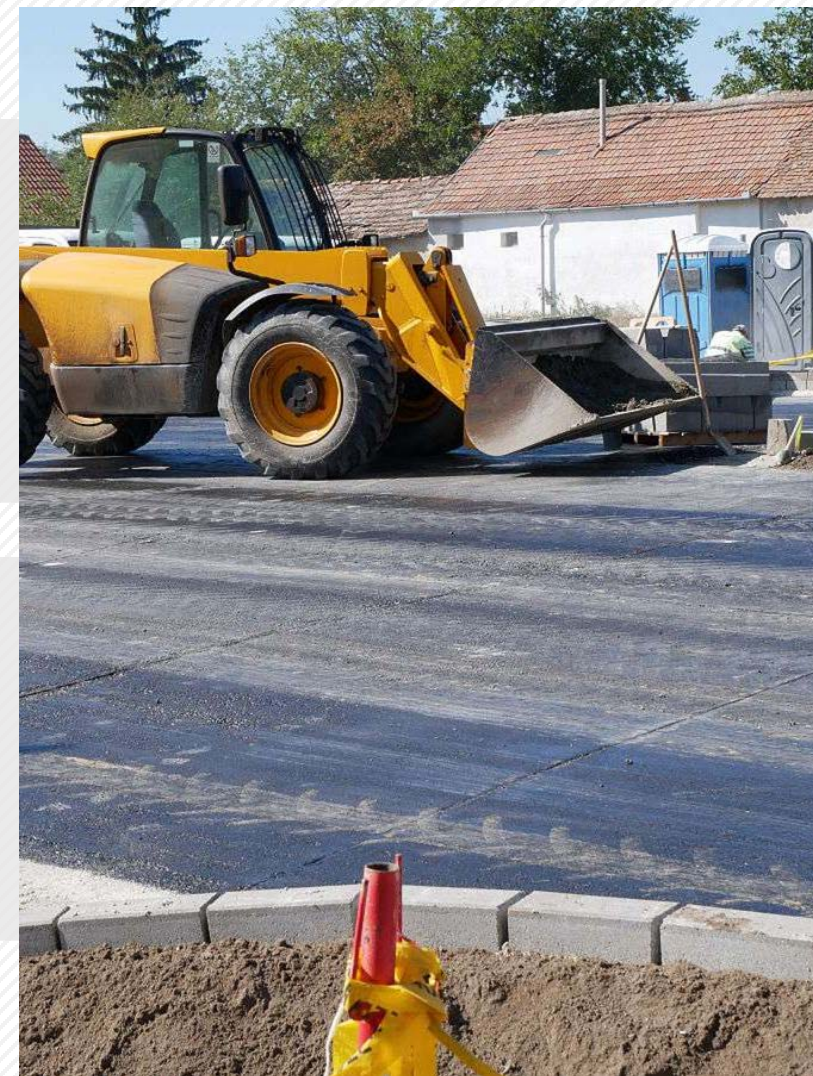
中南大学
CENTRAL SOUTH UNIVERSITY

确定掘进回采顺序

地下采掘计划优化方法需确定技术上可行且经济效益最大的掘进回采顺序，贯穿整个矿山开采周期。

编制生产计划

矿山管理者需从多个角度进行规划安排，其中编制生产计划是核心决策任务，需合理规划生产经营。





01

采掘计划编制方法 优化法

从上世纪60年代初计算机及运筹学引入矿业领域后，人们采用两种不同的思维方式去解决地下矿采掘计划中的种种问题。

02

优化法

优化法是通过将实际矿山采掘计划问题简化、抽象后建立相应的数学规划模型。通过理论分析计算，得到精确的结果，根据结果即可得到相应的采掘计划结果。

03

模拟法

模拟法是一种描述类型技术，相较于优化法有着更加灵活、处理更加复杂问题的能力。模拟法充分发挥计划编制人员的主观能动性，充分利用了计算机运算速度快的特点。

04

模型类型

模拟法一般采用排队论、关键路径法、网络计划技术、三维可视化等技术进行。其中应用较为广泛的为交互式模拟法，它依赖于矿山技术人员的经验。

05

交互式系统

交互式模拟法具有很大的灵活性和自由性，能满足矿山采掘计划系统中的复杂要求。同时，良好的支持环境，方便的操作界面，也为采掘计划的编制提供了很大的便利。



01

目标函数

根据矿山实际情况，目标一般为净现值，品位，金属量。在有限的资源条件下，使得总的偏离目标值的偏差最小。

02

权系数

根据矿山实际要求处理，其中净现值的权系数应特别注意，为实现净现值最大，应将下偏差的权系数加大，将上偏差的权系数减小。

03

约束条件

根据地下矿的实际情况建立混合整数规划模型，地下矿的数学模型的约束可以分为三类，逻辑约束，业务约束，空间约束。

04

逻辑约束

包括定义场所在计划周期是否开始某活动为决策变量，并规定当场所在时期开始 i 活动时取值为1，否则为0；保证连续性，每个场所只能开始一次某活动。



7.5

露天矿品位控制与配矿

矿山开采生产与经营管理新模式的变革背景



7.5 露天矿品位控制与配矿



中南大学
CENTRAL SOUTH UNIVERSITY

配矿

露天矿一般通过配矿来达到品位控制的目的，目前较为成熟。配矿又称矿石质量中和，为了达到选厂品位要求。

品位控制

为了确保生产的矿石符合经济和质量要求，以提高采矿活动的经济效益，在采矿过程中通常需要进行品位控制。

传统配矿

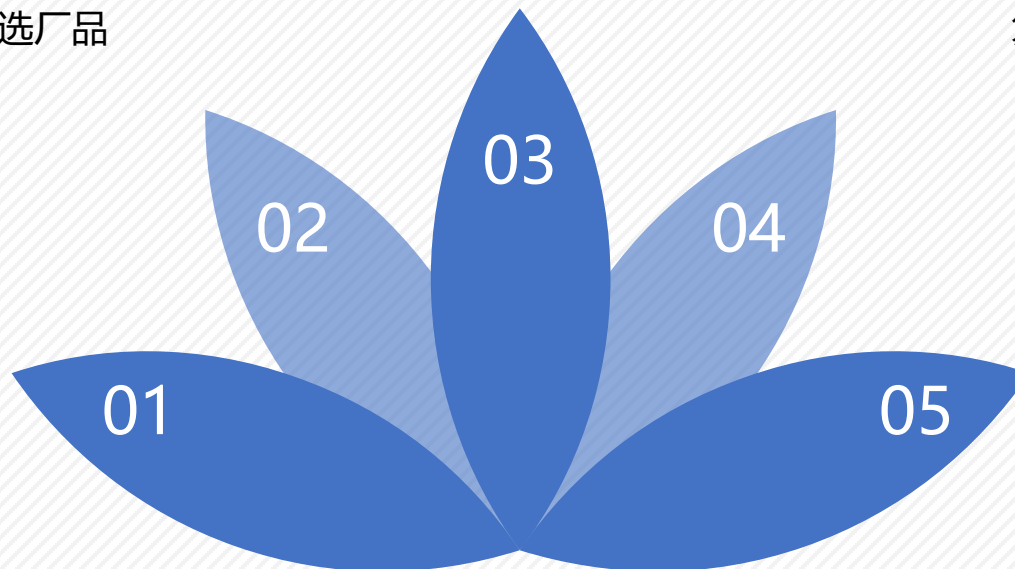
传统配矿管理仍通过人工手动的方式，通常是炮孔岩粉取样数据的算术平均计算爆区的平均品位。

凑配方式

人工选择参与配矿的爆堆、圈定爆堆铲装范围，这种凑配方式需要反复调整才能得到相对合理的配矿方案。

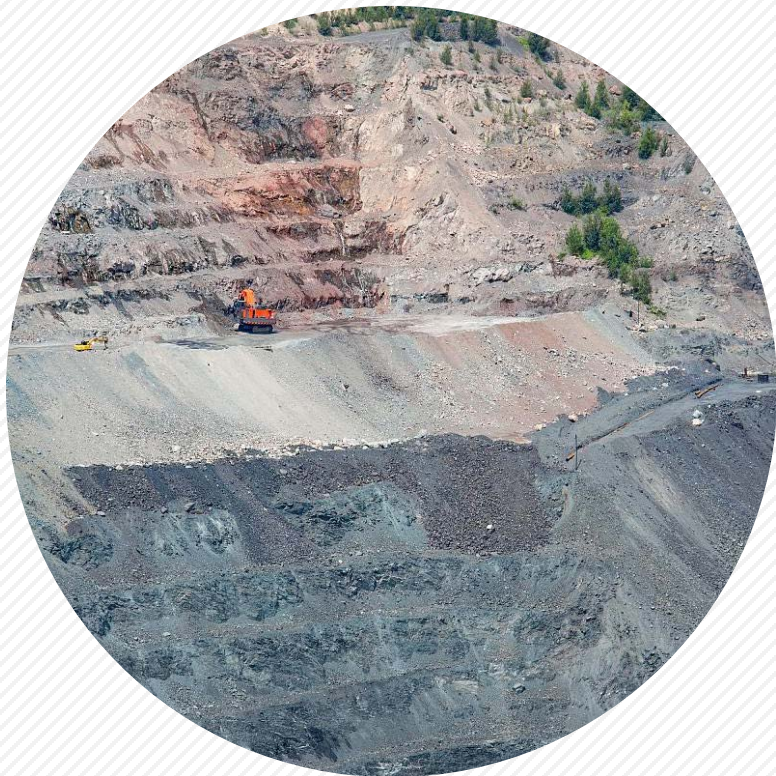
卸矿点要求

较难达到卸矿点对入选品位的要求，因为传统方法无法处理爆堆内元素品位的不均匀性。





7.5 露天矿品位控制与配矿



配矿难度与不确定性

露天矿山精细化配矿是矿山品位控制中的重点与难点，传统方法将爆堆视为一个平均的品位，无疑会造成配矿结果的不精确性。

配矿中的空间分布不均匀性

在配矿中考虑爆堆范围内各金属元素品位的空间分布不均匀性，以及如何处理共用爆堆、优选爆堆、备用爆堆和爆堆铲装推进形式等特殊配矿需求。

构建配矿数学模型

研究如何构建多卸点多元素的配矿数学模型，以实现配矿结果满足入选品位要求，为矿山品位控制提供更加科学和精确的决策依据。



7.5.1 配矿单元划分及估值



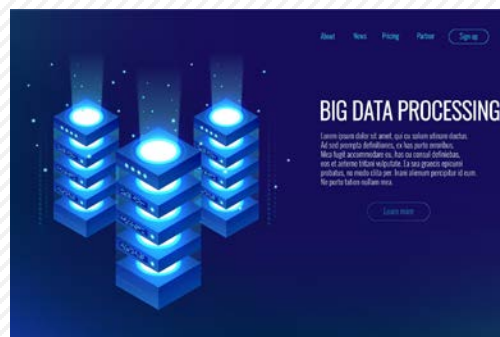
中南大学
CENTRAL SOUTH UNIVERSITY



现有的配矿方法均是将爆堆范围内的元素品位看作一个平均值，从而通过不同爆堆之间按一定的比例混合进行配矿，此类配矿方法仅适用于爆堆范围内元素品位波动较小的矿山。



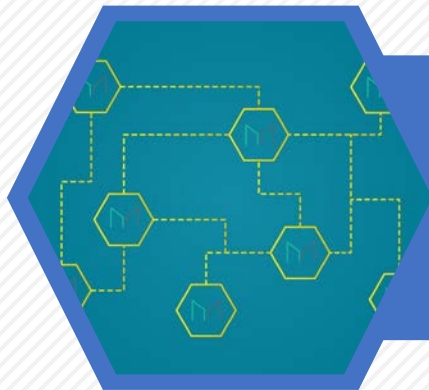
矿山采掘条带爆破后形成爆堆，由于矿山范围内各元素品位分布各异，导致不同爆堆之间元素品位分布相差较大，同一爆堆内同样存在品位分布不均匀的现象。



为此，寻求通过将爆堆离散化的方式表达爆堆内元素品位分布的不均匀性，将爆堆划分成配矿单元块的过程是指，在水平方位上，以爆堆线框范围作为边界，按照配矿单元块的长度和宽度将爆破分割成若干矩形块。



7.5.1 配矿单元划分及估值



对于爆堆内部的配矿单元块即规范的矩形块，而对于爆堆边界处的配矿单元块以爆堆线框进行约束形成的不规则块，从而使离散为配矿单元块后的爆堆保持其原有形状尺寸。

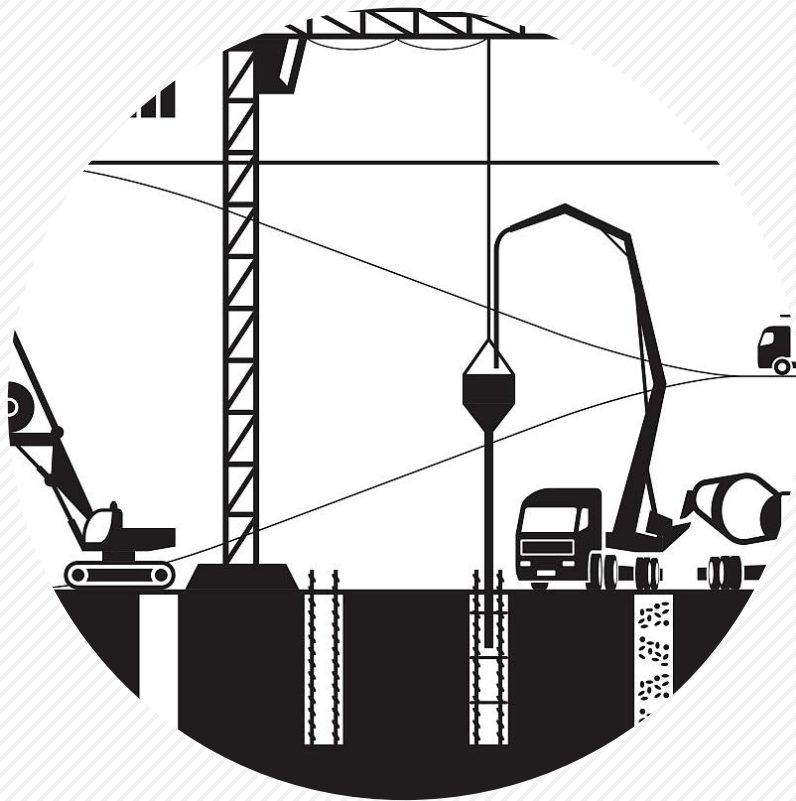
适用于松动爆破情况下的配矿单元划分及估值，结合某露天矿山实际情况，当前正在生产的爆堆如所示，利用空间插值方法，以化验后的炮孔岩粉数据作为样品点，对各爆堆内的配矿单元进行属性估值。



利用上述原理，将各爆堆按照 $2\text{m} \times 2\text{m}$ 的尺寸离散化，并对采场内离散化的爆堆进行cu元素和mo元素品位估值，得到估值后的爆堆内元素品位分布效果如所示。



7.5.2 爆堆铲装约束



爆堆铲装约束

描述的是在爆堆铲装作业中，为了确保安全和效率，需要遵循的一系列约束条件。

铲装设备选择

根据矿场或工厂的实际需求和条件，选择适合的铲装设备，并确保设备性能和安全性符合要求。

铲装作业规划

制定合理的铲装作业计划，优化设备使用 and 人员配置，确保作业过程有序、高效，且安全。

异常情况处理

针对可能出现的异常情况，制定相应的应急预案，确保在紧急情况下能够迅速、有效地处理问题。



7.5.3 配矿优化数学模型-1) 集合



中南大学
CENTRAL SOUTH UNIVERSITY

卸矿点集合

包含矿山中所有需要进行配矿的卸矿点，每个卸矿点都有其独特的编号。

共用爆堆集合

存储所有共用爆堆的信息，这些爆堆在供配矿过程中需要供给多个卸矿点。



优选爆堆集合

存储所有优选爆堆的信息，这些爆堆由于工程因素考虑，必须参与供配矿。

推进方式集合

存储所有可能的铲装推进方式，这些推进方式根据台阶主推进方向和自由面方向确定。

矿石元素集合

包含矿山矿石中所有需要配矿的金属元素，每个元素都有其独特的编号。



7.5.3 配矿优化数学模型-2) 索引



中南大学
CENTRAL SOUTH UNIVERSITY

01 爆堆索引

用于快速查找和定位特定爆堆，确保能够准确获取其相关信息。

02 备用爆堆索引

用于快速查找和定位备用爆堆，确保在需要时能够及时进行配矿。

03 单元块索引

用于快速查找和定位特定单元块，确保能够准确获取其相关信息。

04 卸矿点索引

用于快速查找和定位特定卸矿点，确保能够准确获取其相关信息。

05 配矿元素索引

用于快速查找和定位参与配矿的元素，确保能够准确获取其相关信息。

06 推进方式索引

用于快速查找和定位特定推进方式，确保能够根据设备条件 and 生产需求进行合理搭配。



7.5.3 配矿优化数学模型-3) 参数



中南大学
CENTRAL SOUTH UNIVERSITY

元素品位优先级权重

用于表示不同元素在配矿中的重要程度，根据元素的经济价值和市场需求进行设定。

卸矿点元素品位要求

表示卸矿点对于元素的最小和最大品位要求，确保配矿结果符合卸矿点的要求。

爆堆单元块矿量累加值

表示第 i 个爆堆在第 j 种推进方式下，从第0个单元块到第 k_i 个单元块的矿量累加值。

表示第 i 个爆堆的最小和最大生产能力，确保爆堆生产能力满足矿山生产需求。

卸矿点日处理能力

表示卸矿点的日处理能力，确保卸矿点能够及时处理配矿结果，避免积压。

供矿给卸矿点的最大爆堆数目

表示同时供矿给某个卸矿点的最大爆堆数目，避免过多爆堆导致现场设备调度困难。



7.5.3 配矿优化数学模型-4) 决策变量



中南大学
CENTRAL SOUTH UNIVERSITY



卸矿点元素品位偏差

卸矿点中元素品位小于最小品位要求的偏差和
大于最大品位要求的偏差。



供矿爆堆数目限制

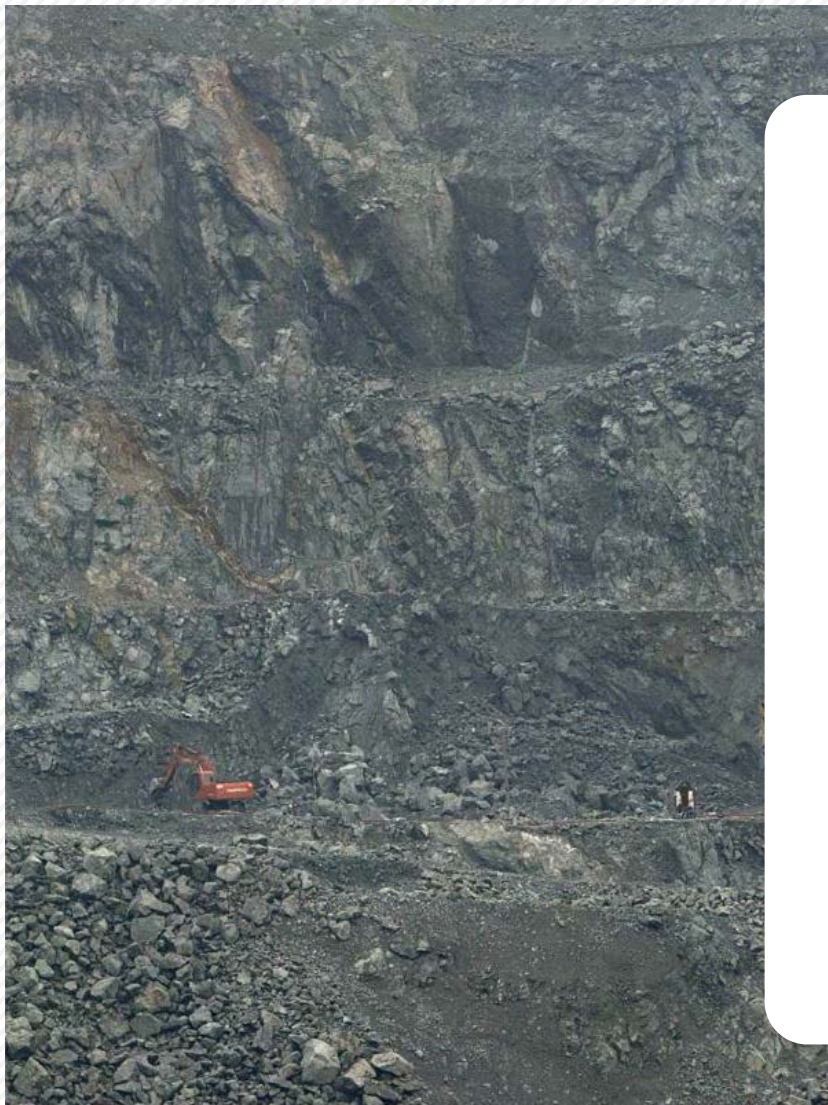
供矿给卸矿点的最大爆堆数目，确保设备调度
合理，避免过多爆堆导致调度困难。



7.5.3 配矿优化数学模型-5) 目标函数



中南大学
CENTRAL SOUTH UNIVERSITY



品位波动最小

目标函数旨在实现品位波动最小的优化目标，确保矿石质量稳定。

短期计划偏差

当短期计划出现偏差时，目标函数仍然能够求得最接近品位要求的配矿方案。



7.5.3 配矿优化数学模型-6) 约束



中南大學
CENTRAL SOUTH UNIVERSITY

01

约束条件（1）确保共用爆堆可供矿给所有卸矿点，实现有序调度。

02

优选爆堆约束

约束条件（2）优先选择优选爆堆参与配矿，确保工程需求得到满足。

03

爆堆日生产能力约束

约束条件（3）避免爆堆生产能力太小或超出设备最大生产能力。





7.5.3 配矿优化数学模型-6) 约束



中南大学
CENTRAL SOUTH UNIVERSITY



备用爆堆约束

约束条件 (4) 有效处理供矿爆堆剩余量不足的情况，以备用爆堆继续供配矿。

卸矿点日处理能力要求

约束条件 (5) 确保卸矿点日处理能力满足矿山设计要求。

供矿的爆堆数限制

约束条件 (6) 限制参与供配矿的爆堆总数在一定范围内，避免设备调度困难。



7.5.3 配矿优化数学模型-6) 约束



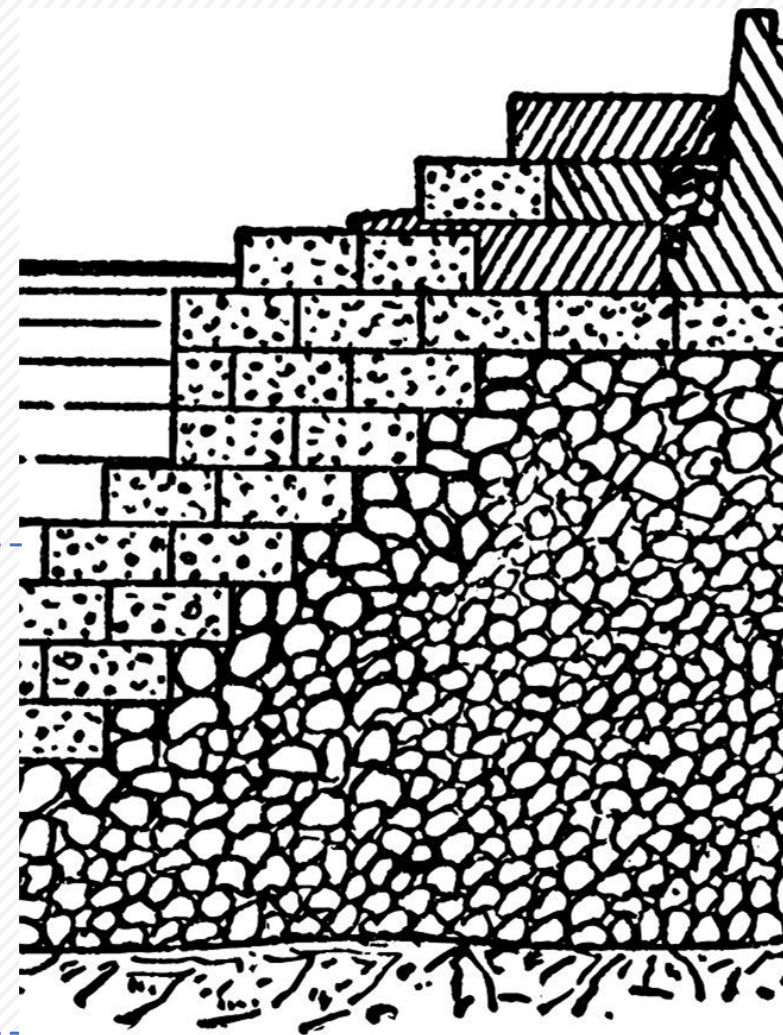
中南大學
CENTRAL SOUTH UNIVERSITY

卸矿点元素的最小品位要求约束

约束条件 (7) 和 (8) 确保矿山供配矿时各卸矿点各元素的品位在要求的品位波动范围以内。

决策变量逻辑约束

约束条件 (9) 实现各品位波动正负偏差变量的非负性，确保目标规划中目标函数的有效性。





Q&A