

三维可视化环境下矿体空间数据插值¹⁾

吴健生^{2,4)} 王仰麟²⁾ 曾新平³⁾ 和志军³⁾ 陈振辉³⁾

(²⁾ 北京大学环境学院, 北京, 100871; (³⁾ 中国地质大学, 北京, 100083)

摘 要 大部分地学中的空间数据插值基于二维空间, 随着计算机三维可视化工具的出现和功能不断完善, 三维空间的数据插值成为可能。矿体的品位、资源量估算以前大多由手工计算完成, 在计算机三维可视化环境下, 可以快速地实现矿体品位和资源量的高精度估算。其基本原理是首先应用矿体的三维可视化技术建立矿体的三维表面模型, 精确地模拟矿体的形态; 其次应用块模型方法对矿体内部进行剖分, 建立体内部数据模型; 最后应用距离反比法和 Kriging 方法对矿体内部的特性数据(如品位)进行插值估算, 获得矿体内部所有块的特性数据, 从而得到矿体的内部特征规律。实例研究表明, 应用三维空间数据插值方法得到的矿体品位插值结果具有科学合理性, 对矿山生产有现实指导意义。

关键词 三维可视化; 块模型; 空间数据插值; Kriging 方法; 距离反比法

中图分类号 O 611.6

在矿业项目的评价、矿业开发和生产中, 矿体的品位和储量是其最主要的影响因素, 因此, 精确快速地估算矿体的品位和储量是矿业公司的第一需求, 但由于矿业公司的技术水平和矿体的复杂性, 人们一般采用手工方法估算矿体的品位和储量, 手工方法的特点是利用人的想象力解决矿体的复杂性这一难题, 但速度慢, 精度受限, 已不能满足大的矿业公司的需求, 而进行矿体品位和储量的高精度快速估算必须有高精度快速的空间数据插值方法。

在地质研究中, 地质学家、矿床学家首先通过研究矿体的空间形态, 摸清其分布规律, 其次是通过研究它的内部特性, 探寻和揭示矿体内部特性的变化规律, 如重力、磁力、密度、孔隙度、含水量、各种元素的含量等矿体物理和化学特性的变化规律。在对矿体的研究中, 由于矿体内部的观测点数据(矿体的勘探工程数据)有限且多数为离散数据, 要对它进行科学、系统的定量研究, 一般情况下, 数据量不能满足研究要求, 还必须大量补充数据及资料, 补充途径通常有 2 种: 一是补充勘探工程, 获得实际的勘探资料, 但需投入大量的资金和时间; 二是依据矿体内部的已知数据对其他区域进行空间数据插值, 插值得到的数值虽然存在小误差, 但投资较少且精度能满足研究和生产需求, 因此空间数据插值方法成为资料补充的一种有效的方法。

在插值研究中, 一般二维空间数据插值的方法也比较完善, 包括几何方法、统计方法、空间统计方法、函数方法、随机模拟方法、物理模型模拟方法和综合方法等。但在对矿体的研究中,

1) 国家自然科学基金重大研究计划(90102018)及 973(G2000046807)资助项目

4) 通讯联系人, Email: wujis@urban.pku.edu.cn

收稿日期: 2002-11-20; 修回日期: 2004-02-28

由于矿体是三维的实体, 必须进行三维空间的空间数据插值, 而这方面的研究较少, 大部分是把三度空间的数据插值转换成二维空间的数据插值^[1-3]。但随着三维可视化软件的出现和功能的不断完善, 真三维环境下的矿体的三维可视化技术也得到了飞速的发展, 三维矿体的空间形态模拟及三维空间数据插值也成为了可能。

矿体空间数据插值的研究和应用, 可以完善三维空间数据插值的理论, 为三维 GIS 提供部分理论和应用实例, 同时又可以为矿山生产服务, 故进行该领域的研究具有理论和实践意义。

1 矿体三维可视化环境下的空间数据插值的基本思路

要进行矿体的空间数据插值, 首先在三维可视化环境下建立矿体的三维可视化模型^[4], 模型的建立过程包括原始数据输入、空间数据库建立、矿体模拟、三维数据模型和数据结构、矿体三维可视化; 其次进行矿体的空间数据插值, 空间数据插值的方法很多, 但地质上常用距离反比法和克里格法。最后对空间数据插值结果进行可视化分析, 检查空间数据插值结果的合理性, 同时应用空间数据插值的结果分析矿体的品位分布规律, 研究矿床成因和成矿规律, 估算储量, 指导生产。矿体空间数据插值、结果应用具体步骤见图 1。

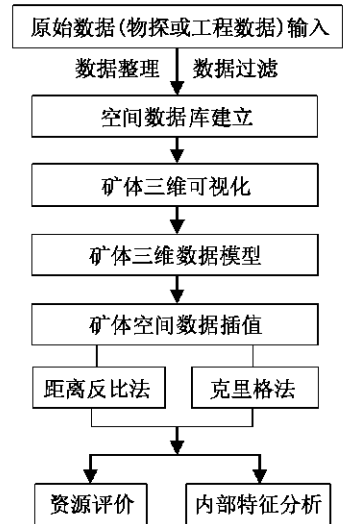


图 1 矿体空间数据插值及特征分析框架
Fig. 1 Framework of geological body analysis and interpolation

2 矿体三维数据模型))) 块模型

矿体是复杂地质运动的结果, 内部特征不均一, 位置不同, 内部特征一般不同, 因此必须建立矿体内部特征的数据模型, 对矿体内部进行模拟。块模型就是一种分割矿体、模拟矿体内部特征的有效数据模型, 它把矿体划分为一系列的小长方体单元, 长方体的尺寸确定原则是使每个小长方体单元的内部属性相同, 且该属性代表了矿体该位置的内部特征, 这样, 所有小长方体单元的属性变化规律就是整个矿体的特征变化规律。用这种小长方体单元堆砌来模拟矿体内部特征的模型, 被称为块模型。每一个带有属性的长方体单元, 被称为块或单元块。

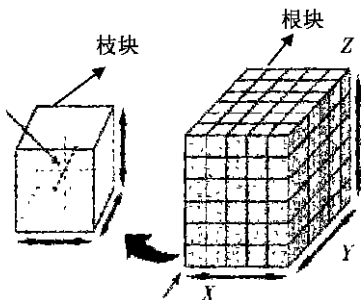


图 2 块模型定义

Fig. 2 Definition of block model

单元块有/ 根块0和/ 枝块0之分, / 根块0是指模型中允许的最大的长方体块; / 枝块0是/ 根块0或/ 枝块0被分割后形成的尺寸更小的长方体块。/ 根块0的大小是根据钻孔间距、采矿方法、地质条件及研究需求来确定。/ 根块0尺寸越小, 越能模拟矿体的自然形态。单纯采用/ 根块0的模拟方法可以提高计算机的效率, 降低程序实现的难度, 但如果单纯采用/ 根块0模拟, 无法精确模拟矿体的边界, 因此必须利用/ 枝块0的方法来进一步细化模型, 同时/ 枝块0可以进一步分割成尺寸更小的次级/ 枝块0, , 直至满足需要^[5]。块模型具体分割见图 2。图 3 表示在模拟矿体边界时/ 根块0、/ 枝块0

的关系图, 从图 3 中可以看出, 应用尺寸不断变小的/ 枝块0, 可以精确地模拟边界的形态。

在应用块模型对矿体内部进行剖分时, 可以根据
 工作要求、原始数据数量及其空间分布等来对矿体进行
 不同尺寸的块分割, 进而实现矿体内部的空间数据插
 值。块模型类似于栅格数据模型, 在计算机中容易
 实现, 计算速度快, 可以快速得到可信的空间数据插
 值结果, 同时可以避免栅格模型数据量大的缺陷, 且能够
 比较精确地模拟矿体的边界线。

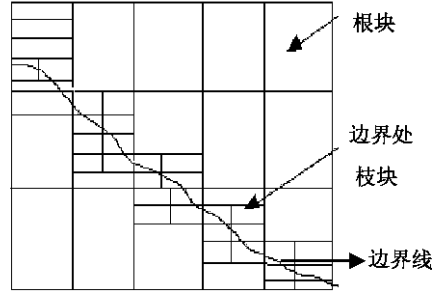


图 3 用于边界模拟的/ 枝块0与/ 根块0关系
 Fig. 3 The relation of / block0 and / sub-block0
 in boundary simulation

3 矿体空间数据插值方法

矿体的空间数据插值方法很多, 但一般采用距离
 反比法和克里格方法。

3.1 距离反比法

该方法认为被估单元块的地质属性与其周围一定距离内已知点的同一地质属性有关, 并且认为这种关系与已知点到被估单元块中心点的距离的 n 次幂成反比。计算公式为:

$$z_j = \sum_{i=1}^m w_i G_{ij}, \quad w_i = \frac{1 P d_i^n}{\sum_{i=1}^m 1 P d_i^n} \quad (1)$$

式中, z_j 为某点第 j 种地质属性估计值; m 为参加估值的邻近已知点个数; G_{ij} 为第 i 个已知点
 中第 j 种地质属性值; w_i 为第 i 个已知点对被估点的影响系数; d_i 为第 i 个已知点到被估点的
 距离; n 为距离的幂, 它对内插的结果影响较大, 它的选择标准是平均绝对误差最小, 一般用 n
 = 2, Oliver MA 等^[6]的研究结果表明, 幂越高, 内插结果越平滑。

3.2 克里格(Kriging)插值方法

Kriging 插值方法由南非地质学家 Krige 发明, 20 世纪 60 年代在法国统计学家 Matheron 的
 大量理论研究工作上逐渐趋于成熟^[7-10]。克里格(Kriging)插值方法在经典统计学的基础
 上, 充分考虑到地质属性的空间变化特征))) 相关性和随机性, 并以变异函数作为工具, 来研
 究矿体中各种问题, 其基本假设是建立在空间相关的先验模型之上, 假定空间随机变量具有二
 阶平稳性, 或者是服从空间统计的本征假设(intrinsic hypothesis)^[11-13]。它的特点为: 距离较近
 的采样点比距离远的采样点更相似, 且相似的程度是通过点对的平均方差度量。点对差异的
 方差大小只与采样点间的距离有关, 而与它们的绝对位置无关。矿体可以看成是空间中的一个
 域 V , 矿体内的许多观测可以看成是域 V 内一个点至另一个点的区域变量值。当区域变量
 沿 x 轴方向变化时, 区域化变量在 x 与 $x+h$ 处的值 $Z(x)$ 与 $Z(x+h)$ 的差的方差之半定义为
 区域化变量 $Z(x)$ 在 x 轴方向上的变异函数, 并记为 $C(x, h)$:

$$C(x, h) = \frac{1}{2} \text{Var}[Z(x) - Z(x+h)] \quad (2)$$

在二阶平稳假设下, 有下式:

$$C(h) = \frac{1}{2} E [Z(x) - Z(x+h)]^2 \quad (3)$$

理论变异函数模型类型较多, 最常见的理论模型是球状模型、高斯模型及指数模型。

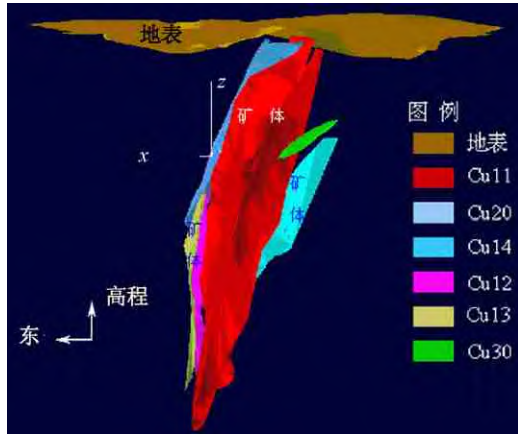
4 新疆某铜矿床空间数据插值结果及地质特征分析

该铜矿床位于新疆西部, 矿体分布于矿区次级同斜倒转向斜的回转端及两翼, 呈近南北向延伸, 与矿区构造线一致。在空间上, 主矿体总体形态为一倒转的向形, 严格受地层及向斜构造的控制。矿体产状南缓北陡, 向斜枢纽向南扬起。

以矿区的地质详查报告为原始资料, 利用地表工程及钻孔资料共 60 个工程的原始数据, 完成了数据库建立、矿体三维模型建立、主矿体铜品位数据插值、铜资源量估算和结果分析。

4.1 矿体三维模型的建立

在真三维可视化环境下, 以 $w_{Cu} > 0.13\%$ 作为边界品位圈定矿体, 利用勘探线上地质专家解译的矿体边界线为基础, 共圈定了 Cu11、Cu12、Cu13、Cu14、Cu20、Cu30 等 6 个矿体(图 4), 其中 Cu11 号矿体为主矿体的主要部分, Cu12、Cu13、Cu14 是主矿体在深部的分支, 从图 4 中可以看出, Cu11 主矿体在空间上为一个明显的倒转向形, 东翼长且呈稳定的厚层状, 矿体的连续性较好, 沿矿体倾斜方向厚度逐渐增大, 西翼短而薄; Cu20 矿体宽度不大, 呈一板状紧贴于 Cu11 矿体的东翼, 并向下逐渐尖灭; Cu30 为一个小矿脉, 分布于主矿体的开口处。



Cu11) 1 号矿带 1 号铜矿体; Cu12) 1 号矿带 2 号铜矿体; Cu13) 1 号矿带 3 号铜矿体; Cu14) 1 号矿带 4 号铜矿体; Cu20) 2 号铜矿体; Cu30) 3 号铜矿体

图 4 矿体三维可视化图

Fig. 4 3-Dimensional figure of ore bodies

4.2 主矿体铜品位空间数据插值

在本研究中, 主要以 Cu11 矿体为研究对象, 以普通克里格法为铜品位空间数据插值的主要方法, 同时也用距离反比法进行试验, 将其结果与普通克里格法对比。在对矿体进行三度空间的品位空间数据插值中, 一般应用搜索椭球体来确定已知点的空间分布规律, 搜索椭球体反映了已知点对未知点的影响范围和方式, 故除了要确定由理论变异函数拟合得来的块金值、基台值、变程外, 还必须确定搜索椭球体的轴参数和角度参数。

在该矿体的块模型中, 采用的/根块0大小为: $X=5010M, Y=5010M, Z=1010M$ 。/枝块0大小为: $X=1010M, Y=1010M, Z=1010M$ 。经多次拟合, 得到用克里格法进行品位空间数据插值时主矿体的理论实验函数拟合参数表(表 1)。

图 5 是搜索椭球体在矿体中的方位图。

表 1 理论变异函数拟合结果表

Table 1 Results of Theory Variogram Function Simulation

| 最大变程 | 块金值 | 基台值 | 搜索椭球体轴长参数 | | | 搜索椭球体角度参数 | | |
|------|-------|-------|-----------|-----|-------|-----------|--------|-----|
| | | | 第一轴 | 第二轴 | 第三轴 | bearin | plunge | dip |
| 200 | 01066 | 01733 | 193 | 117 | 701.2 | 152 | -30 | -77 |

说明: bearin、plunge、dip 为搜索椭球体 3 个相对轴夹角参数。

根据理论实验函数拟合结果, 对矿体进行空间数据插值, 在对品位空间数据插值的过程中, 样本数的选择原则是搜索椭球体中最少包含一个样本, 最多不超过 10 个样本。

4.3 空间数据插值结果分析

矿体空间数据插值结果的合理性分析是通过可视化分析及与实际情况对比分析实现的, 具体方法是对矿体内部特征进行分析。在该区主要是通过分析矿体内部的铜的品位变化规律、可视化分析空间数据插值结果、计算矿体的矿石量和金属量来实现。经过空间数据插值后的矿体, 每一个根块、枝块都有品位数据, 这样可以统计任意 Cu 品位区间(如计算 $1\% < w_{Cu} < 7\%$ 区间)内矿块的金属量、矿石量及平均品位, 对品位的空间分布规律进行分析。

图 6、图 7 为铜品位空间数据插值的结果图(为了显示直观, 分别只显示 $w_{Cu} > 3\%$ 和 $w_{Cu} > 5\%$ 的矿块), 从图中可以看出, $w_{Cu} > 3\%$ 的矿块主要分布在矿体的东翼, 且主要赋存于 300~ 650 m 高程段, 400~ 650 m 间最集中。 $w_{Cu} > 5\%$ 的矿块明显少于 $w_{Cu} > 3\%$ 的矿块, 主要分布在矿体的东翼, 且主要赋存于 480~ 650 m 高程段, 少量分布于 815~ 860 m 高程段。该结果与地质分析结果吻合, 说明空间数据插值结果比较合理。表 2 为应用不同方法对矿体的储量计算结果对比。

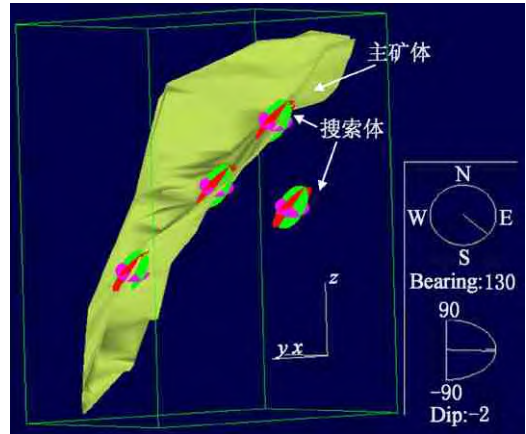
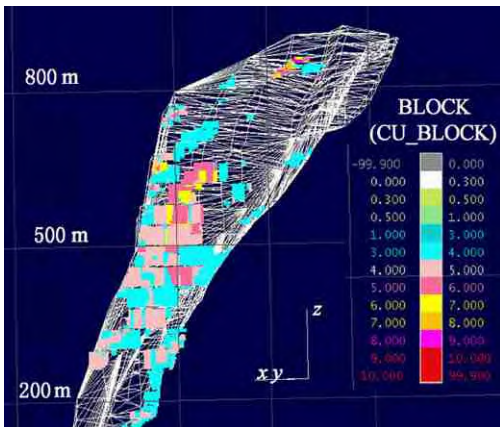


图 5 主矿体右翼空间估值时搜索体空间位置分布图

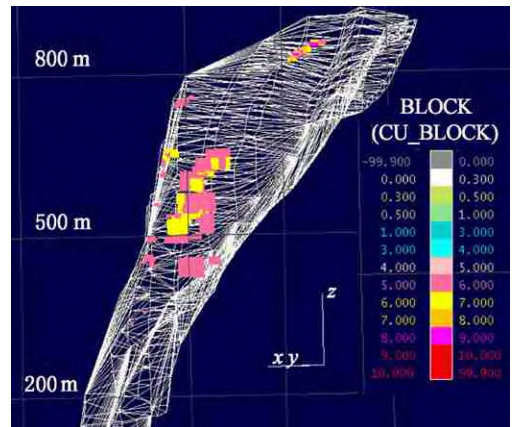
Fig. 5 The map of ellipse on right side of the main ore body



图中白细线为矿体三角网

图 6 Cu 品位 > 3% 的矿块分布图

Fig. 6 Ore block distribution of $w_{Cu} > 3\%$



图中白细线为矿体三角网

图 7 Cu 品位 > 5% 的矿块分布图

Fig. 7 Ore block distribution of $w_{Cu} > 5\%$

表 3 是三维可视化环境下估算的资源量结果与地质队的详细勘探报告中的储量(用地质块段法计算所得)对比表, 两者平均品位相差 1212%, 矿石量相差 9183%, 金属量相差

- 20197%, 整体来看, 计算机三维可视化环境下模拟计算的结果都比勘探报告中的小, 由于勘探报告中应用地质块段法粗略模拟矿体, 进行品位计算, 除了方法比较粗糙外, 人为主观影响也较大, 从矿体的品位估算原理及计算机处理方法等客观性来分析, 应用计算机模拟方法得到的结果合理性更高。

表 2 不同方法下的资源量评价结果对比表

Table 2 Evaluating result of different methods

| 计算方法 | 理论数学模型 | 平均品位P% | m _{矿石} /10 ⁴ t | m _{金属} Pt |
|--------|--------|---------|------------------------------------|--------------------|
| 普通克里格法 | 球状模型 | 21.1335 | 3.405167 | 726.606174 |
| 普通克里格法 | 高斯模型 | 21.1331 | 3.406147 | 726.690135 |
| 距离反比法 | | 21.1515 | 3.376127 | 726.422177 |

说明: 以上计算中, 矿体密度为 3126 t/m³。

表 3 储量计算结果对比表

Table 3 Result of reserves evaluating

| 项目 | 平均品位P% | m _{矿石} /10 ⁴ t | m _{金属} Pt |
|------|---------|------------------------------------|--------------------|
| 实验结果 | 21.1335 | 3.4051667 | 726.606174 |
| 勘探报告 | 21.4300 | 3.7771050 | 919.454100 |
| 两者差别 | - 1212 | - 9183% | - 20197% |

说明: 以勘探报告中的储量为基准计算两者差别。

5 结论和认识

矿体三维可视化及其空间数据插值是科学计算可视化技术在地质领域的一个具体应用。在真三维可视化环境下, 对矿体形态进行三维可视化; 在体可视化环境下, 利用块数据模型分割模拟矿体内部, 利用距离反比法和克里格方法对矿体品位进行空间数据插值, 估算各矿块的矿石品位, 研究矿石品位的空间分布规律。这种三维可视化环境下的空间数据插值及内部特性可视化分析把矿体的特性以直观形式呈现, 可以快速直观分析各内部特征间的相互关系和变化趋势, 直观分析空间数据插值结果的合理性。

矿体的空间三维形态模型和内部体模型的建立, 为矿体的研究提供了一个新的平台, 它改变了传统的平面思维方式, 让研究者在三维空间上研究和分析矿体的形态, 从三维空间的角度, 对矿体的内部空间特性进行精确的估算和评价, 从而透彻地研究矿体的各种特性, 得到矿体的成矿规律; 同时它又在矿业领域中实现了品位和资源量的传统手工估算到计算机化, 使得估算结果客观, 估算速度快、精度高, 大大提高了工作效率。因此三维环境下的矿体空间插值方法将成为矿业理论和实践的重要组成部分。

参 考 文 献

- 1 王仁坤, 闫红菱. 立三维地形模型的方法研究))) 利用梯度的离散点插值. 水利水电科技进展, 1996, 16(6): 25~ 27
- 2 易善栋, 李琦. 3D-GIS 数据表示和空间数据插值方法研究. 中国图像图形学报, 1999, 4(8): 697~ 701
- 3 陈云城, 李斌. 三维空间数据插值在岩性数据可视化中的应用. 沈阳建筑工程学院学报, 2000, 16(4): 289~ 291
- 4 Choi B K, Shin H Y, Yoon Y I, et al. Triangular of Scattered Data in 3D Space. CAD, 1988, 20(5): 239~ 248
- 5 Maptex Pty Ltd. Valcan 4. 1 User manual. Perth, Australia: Maptex Pty Ltd. 2001. 201~ 213
- 6 Oliver M A. Geostatistics Rare Disease and the Environment. In: Fischer M M, Henk J S, Unwin D(eds). Spatial Analytical Perspectives on GIS. GISDATA 4. London: Taylor and Francis, 1996. 67~ 85
- 7 侯景儒, 尹镇南, 李维明, 等. 实用地质统计学. 北京: 地质出版社, 1998. 32~ 36
- 8 沈步明, 沈远超. 金属矿山地质数据库与地质统计学. 北京: 科学出版社, 1994. 89~ 91
- 9 Journel A G, Huijbregts Ch. 侯景儒, 黄竞先译. 矿业地质统计学. 北京: 冶金工业出版社, 1982. 32~ 41

- 10 王政权. 地质统计学及在生态学中的应用. 北京: 科学出版社, 1999. 35~ 63
- 11 Anselin L, Getis A. Spatial Statistical analysis and Geographic Information System. In: Fischer M, Nijkamp P (Eds). Geographic Information Systems. Spatial Modeling and Policy Evaluation. Berlin: Springer-Verlag, 1993. 35 ~ 49
- 12 Openshaw S. Developing Appropriate Spatial Analysis Methods for GIS. In: Maguire D, Goodchild M, Rhind D (Eds). Geographical Information Systems: Principles and Applications. London: Longman, 1991. 389~ 402
- 13 Deutsch C V, Journel A G. GSLIB, Geostatistical Software Library and User's Guide. New York: Oxford University Press, 1998. 12~ 14

Ore Body Spatial Data Interpolation in 3D Visualization Environment

WU Jiansheng¹⁾ WANG Yanglin¹⁾ ZENG Xinping²⁾ HE Zhijun²⁾ CHEN Zhenghui²⁾

(1) College of Environmental Sciences, Peking University, Beijing, 100871; (2) China Geological University, Beijing, 100083)

Abstract The spatial data interpolation in geosciences is mostly in two-dimensional space. With three-dimensional environment the three-dimensional spatial data interpolation is possible. Most of ore body grade was calculated by hand, but in 3D visualization environment it can be calculated quickly and precisely. This method includes three parts. The first is that the three surface model is built with visualization technology. The geology body is simulated correctly and its shape is easy to analyze. The second is that the body is disassembled using block model. The inner of ore can be modeled by block model. The third is that inverse distance and Kriging methods are used in spatial data interpolation. The result from example researching shows that the spatial data interpolation methods in 3D environment are reasonable. The tonnage and metal reserve can be calculated.

Key words 3D visualization; block model; data interpolation; Kriging; inverse distance

* * * * *

校内要闻

北大7人入选首批新世纪百千万人才工程国家级人选

日前, 教育部公布了部属院校入选首批新世纪百千万人才工程国家级入选名单, 北大共有 7 人入选, 入选人数位居高校第一。北大入选的教师分别是: 环境学院周力平教授、经济学院刘伟教授、化学学院宛新华教授、法学院陈兴良教授、历史系荣新江教授以及医学部万有、汪涛教授。

新世纪百千万人才工程由国家人事部、科技部、教育部等 7 部委组织评选, 每 2 年选拔一次, 每次选拔 500 名左右。入选者都是我国教育、科技领域拔尖人才、学术技术带头人后备人才以及高层次急需人才。该工程是国家为实施人才强国战略, 加速培养造就年轻一代学术技术带头人而实施的一项重要的国家级人才工程。

(摘自北京大学新闻网 2004-06-17)