

脉状矿的矿产储量最优计算

李国光 周建平 胡道章

(航天技术系)

摘要 本文利用改进的三维克里金法对脉状矿进行储量计算, 给出一个有效的储量与品位分布计算程序。文中提出网格法理论处理矿体边界和断层问题, 采用圆锥法计算脉状矿的半变异函数等办法, 为提高估算精度和加快计算速度起到了很好的作用。

关键词 最优计算; 矿产储量

1. 引言

矿山的开采必须以可靠的地质资料, 特别是矿产储量和品位分布为依据, 因此, 根据地质勘探的钻孔数据及其他勘探手段的数据, 正确地估算矿产储量和品位分布, 对开发矿业具有很重要的意义。目前, 国外普遍地采用克里金法, 国内也出现一些类似的计算程序, 此法依据样品资料和待估矿块的相对位置以及相关程度来估算矿块的品位和储量, 并使估计方差最小, 因而和传统方法相比, 大大地提高了计算精度。但是, 对待矿体形态变化大, 矿石性质比较复杂的脉状矿来说, 克里金法还不能处理好矿体边界和断层问题, 矿块的岩性和矿性尚需要人工绘制分层平面图, 用特征号输入计算机; 现有的变异函数计算方法也不适应斜薄层矿体的要求。根据上述情况, 我们提出一些改进方法, 在一个大型铅锌矿的实际计算中, 收到了较好的效果。

2. 计算方法

本文采用超级块思想, 为计算方便, 把矿床简化成由方块组成的矿体模型, 超级块的划分用直角坐标系, 每个超级块在空间的位置如图 1 所示。待估超级块的品位 z_k^* 由周围 27 个信息超级块组成的邻域块段内的已知样品品位 z_j 来估算, 令邻域块段内共有 n 个已知样品, 则

$$z_k^* = \sum_{j=1}^n \lambda_j z_j \quad (1)$$

式中 λ_j 为权系数,是依据无偏条件和估算方差最小而求出的一组最优值。

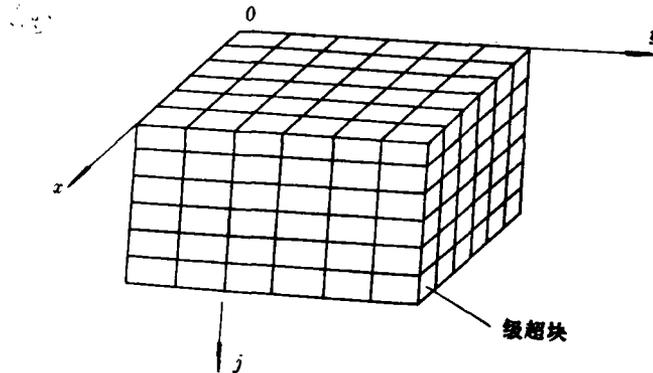


图 1

若令 z_k 为矿块的真实品位, z_k^* 为估计品位, 它们之间的偏差为 $z_k - z_k^*$. 无偏估算是指对那些大量数目的估计偏差期望值是等于零的, 即

$$E\{z_k - z_k^*\} = 0 \quad (1)$$

而估计方差最小是指 $\sigma_E^2 = E\{[z_k - z_k^*]^2\}$ 最小。

根据地质统计学理论(参看文献[1]), 估计方差可用样品间、待估块间以及样品与待估块之间的协方差来表示, 可推出如下估计方差表达式

$$\sigma_E^2 = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \lambda_i \lambda_j \bar{C}(X_i, X_j) + \bar{C}(V, V) - \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \lambda_i \bar{C}(X_i, V) \quad (2)$$

式中 $\bar{C}(X_i, X_j)$ 为样品 i, j 之间的平均协方差; $\bar{C}(X_i, V)$ 为样品 i 与待估块 V 间的平均协方差; $\bar{C}(V, V)$ 为待估块自身的平均协方差。无偏条件的数学表达为

$$\sum_{i=1}^n \lambda_i = 1 \quad (3)$$

由此看出: 要使估计偏差在无偏条件下达到最小, 是一个求约束极值问题。求最优值的数学模型为:

求设计变量 $\lambda_i, i=1, 2, \dots, n$

使目标函数 σ_E^2 最小

满足约束条件 $\sum_{i=1}^n \lambda_i = 1$

利用拉格朗日乘子法可推出下面克里金方程

$$\left. \begin{aligned} \sum_{j=1}^n \lambda_j \bar{C}(X_i, X_j) - \mu &= \bar{C}(X_i, V), i=1, 2, \dots, n \\ \sum_{i=1}^n \lambda_i &= 1 \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

写成矩阵形式为

$$[K][\lambda] = [M] \quad (5)$$

其中

$$[K] = \begin{bmatrix} \bar{C}(X_1, X_1) & \bar{C}(X_1, X_2) & \cdots & \bar{C}(X_1, X_n) & 1 \\ \bar{C}(X_2, X_1) & \bar{C}(X_2, X_2) & \cdots & \bar{C}(X_2, X_n) & 1 \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ \bar{C}(X_n, X_1) & \bar{C}(X_n, X_2) & \cdots & \bar{C}(X_n, X_n) & 1 \\ 1 & 1 & \cdots & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

$$[\lambda] = \begin{bmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \vdots \\ \lambda_n \\ -\mu \end{bmatrix}, \quad [M] = \begin{bmatrix} \bar{C}(X_1, V) \\ \bar{C}(X_2, V) \\ \vdots \\ \bar{C}(X_n, V) \\ 1 \end{bmatrix}$$

方程(4)中的平均协方差只与样品的位置有关,当样品的位置确定时可以算出,因而式(4)中的未知变量与方程式数目相等,存在唯一解。解此线性方程组便可得到一组最优的权系数 λ 。

3. 矿体边界的确定

本文提出用网格法理论处理矿体边界和断层问题,这里作如下说明。

1) 网格法数学模型

假如某钻孔穿过矿体,开孔坐标在原始数据中给出,见矿坐标和矿底坐标可由钻孔有关数据计算而得。如果相邻三个钻孔都穿过此矿体,且不在一条直线上(见图2),则可以用适当的空间曲线分别连接各钻孔的见矿坐标和矿底坐标,只要选择的曲面性质与矿体边界形状比较吻合,就可以得到这三个钻孔之间边界的大致形状。

2) 矿域内网格划分方法及人工虚拟钻孔

在一个矿域上总有一批钻孔存在,对某一矿体而言,我们可以找出穿过该矿体的所有钻孔,将这些钻孔按开孔坐标标在一平面图上。如图3所示,有10个钻孔穿过矿体,用三角形连接各钻孔得到10个三角形,它们构成一个三角形网络。对每一个三角形可用前面所述方法确定边界,从而钻孔范围内的边界就确定了。

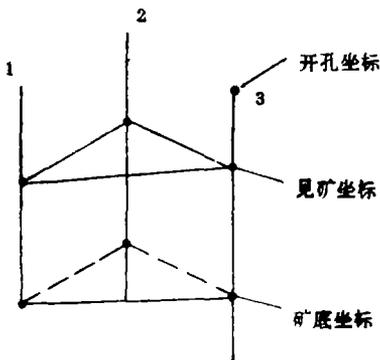


图 2

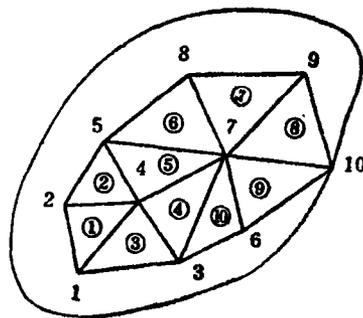


图 3

从图3可见, 钻孔以外的区域被排除于矿体之外。这不符合实际情况。地质勘探数据是有限的, 有些信息需要借助地质工作者的经验进行推断。图4是矿体剖面图, 钻孔A、B之间的矿体边界是拟合得到的, 而钻孔A左边部份则是由推断所得。本文提出虚拟钻孔概念, 以补偿地质数据的不足。图4中假想一钻孔从C点穿过, 此孔的坐标可由作图求得, 并赋予其与真实钻孔一样的数据, 从而可以确定见矿坐标与矿底坐标。但计算中虚拟钻孔的品位数据是不利用的。例如在图3上布置11~19号虚拟钻孔, 得到如图5所示的网络。不难看出, 此网络已经能够相当准确地描述了矿体边界。

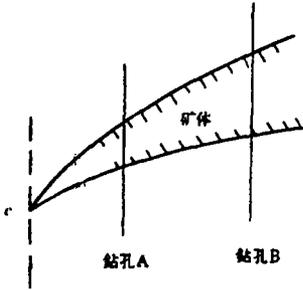


图 4

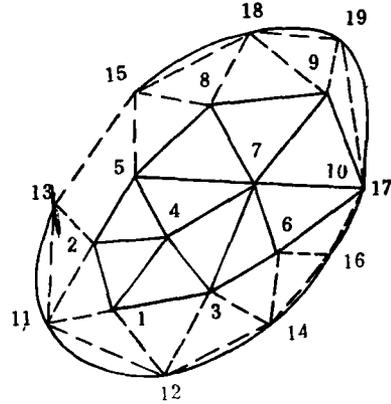


图 5

3) 断层的处理

如图6所示, 矿体1在断层处发生间断。我们采用在同一位置上用两个虚拟钻孔分别标识断层左右两侧的矿体, 两个钻孔的开孔坐标相同, 但品位应分别表示断层两侧的矿体(此二个孔是重叠在一起的)。如果沿断层布置一系列此类钻孔, 连接三角形网络时, 使断层上相邻虚拟孔的连线成为网络线的组成部份, 断层就被区别开。

4) 矿块岩性与矿性的估算

利用上面提到的网格法理论, 用包含某矿块的三角形网格顶点的三个钻孔资料, 来估算此矿块的岩性和矿性。假如某钻孔包含A、B两种岩性(矿性)的岩芯, 如图7所

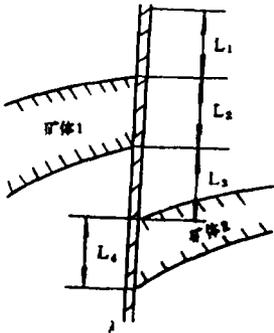


图 6

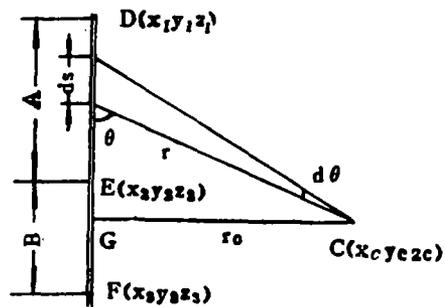


图 7

示。从 C 点 (矿块中心点) 向钻孔作垂线, 距离为 r_0 , 微元 ds 对 C 点岩性 (矿性) 的影响取

$$dI = \frac{\sin\theta ds}{r^2} \quad (6)$$

利用 $\sin\theta ds = -rd\theta$, 则 A 段岩性 (矿性) 对 C 点的影响系数为

$$I_A = \int_B^D \frac{\sin\theta ds}{r^2} = \int_B^D \frac{-d\theta}{r} \quad (7)$$

又 $r_0/r = \sin\theta$, 代入上式积分得

$$I_A = \frac{1}{r_0} (\cos\theta_D - \cos\theta_B) \quad (8)$$

其中 θ_D 、 θ_B 分别为 DC 、 BC 与 DF 的夹角。同理可得

$$I_B = \frac{1}{r_0} (\cos\theta_E - \cos\theta_F) \quad (9)$$

三个钻孔对 C 点的影响系数可同样计算, 然后将相同岩性 (矿性) 的影响系数相加, 取对应于影响系数最大的岩性 (矿性) 作为此矿块的岩性 (矿性) 估值。

4. 圆锥法计算变异函数

脉状或层状矿床的矿体厚度较薄, 各矿体走向倾向又不尽一致。采用现有的变异函数计算方法, 若用一维不规则点变异函数研究矿体垂直方向矿化变异, 将由于矿体厚度较薄, 资料对数少而影响结果; 若用二维平面扇形域变异函数公式研究矿体水平方向矿化结构, 在垂直矿体走向方向上, 同样取不到较多的数据资料, 这样所模拟的矿化结构将会脱离实际, 给储量估算带来误差。本文提出圆锥形计算域变异函数数学模型, 按走向和倾向方向计算变异函数。(见图 8)

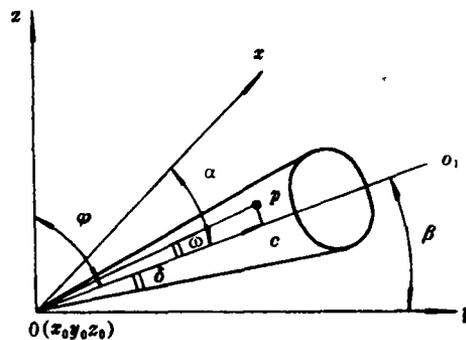


图 8

设 $\overline{OO_1}$ 为计算方向轴, $O(x_0, y_0, j_0)$ 、 $P(x_p, y_p, j_p)$ 为计算资料对, α, β, φ 分别为 $\overline{OO_1}$ 与三个坐标轴的夹角。则有

$$\overline{PO} = \sqrt{(x_p - x_0)^2 + (y_p - y_0)^2 + (j_p - j_0)^2}$$

线段 \overline{PO} 在计算轴 $\overline{oo_1}$ 上的投影为

$$\overline{OC} = (x_p - x_0) \cos \alpha + (y_p - y_0) \cos \beta + (j_p - j_0) \cos \varphi$$

$$\overline{OC} / |\overline{PO}| = \cos \omega$$

当 $\cos \omega > \cos \delta$ 时, 则计算实验变异函数 $\gamma(h)$, 否则就不计算。 δ 为容许界限角。

确定计算方向 $\overline{oo_1}$ 的办法是: 先对矿体(或矿脉群)进行分析, 找出矿体(或矿脉群)的走向和倾向, 然后按地质勘探工程布置位置对, 在每个方向找出具有代表性的空间两点坐标。每一个矿体一般布置4个计算方向, 每一个方向又由上述两点空间坐标定位, 连接两点即得所求的计算方向轴。方向轴求出后, 再分别求出各计算轴与三个坐标轴的夹角 α 、 β 和 φ , 凡是落入圆锥形域内的资料对, 就用下式计算变异函数。

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [z(x_i) - z(x_i + h)]^2 \quad (10)$$

其中 $N(h)$ 是向量 h 的资料对数, $z(x_i)$ 是位置为 x_i 的区域化变量, $z(x_i + h)$ 是距 x_i 为 h 的区域化变量。

采用圆锥形计算域, 按走向和倾向计算 $\gamma(h)$ 能使计算 $\gamma(h)$ 的数据对数增加, 能确切地反映矿体走向和倾向的变化性, 解决了计算倾斜薄矿体及脉状矿体 $\gamma(h)$ 难的问题, 既简化了计算步骤, 又如实地反映了矿体矿化规律。

5. 计算实例与结果分析

本文对一个大型铅锌矿进行了考核计算。此矿矿床严格受地层构造和岩性双重控制, 计算范围内的矿体多呈层状和似层状, 计算采用的已知数据为: x, y, z 坐标方向上划分的超级块网格数分别为42, 27, 55; 超级块尺寸为40米 \times 40米 \times 15米; 次级块尺寸为20米 \times 20米 \times 15米; 选择的区域化变量为铅和锌的品位与方差; 地质勘探资料提供202个钻孔数据, 经不同方向变异函数曲线的比较, 确定全矿区属各向同性结构, 采用球状模型拟合, 其结构参数为

铅: $C_0 = 0.648, C_1 = 0.9763, a = 195.0$

锌: $C_0 = 27.4248, C_1 = 1.2301, a = 195.0$

程序软件在亿次机上运行, 采用FORTRAN语言, 运行20分钟得到全部计算结果。这里给出部份结果, 详细结果请见文献(4)。图10是第17分层的矿产分布图, 附表1是对应此层

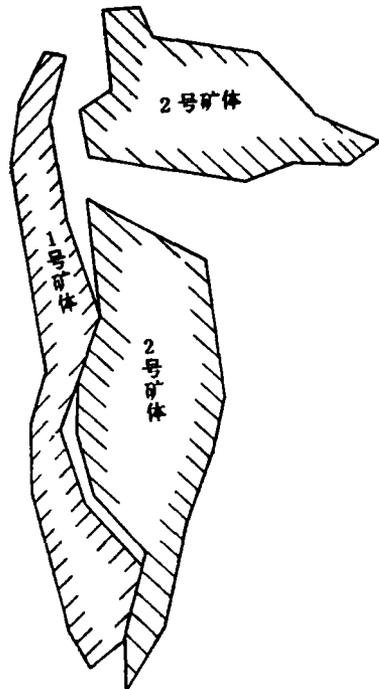


图 9

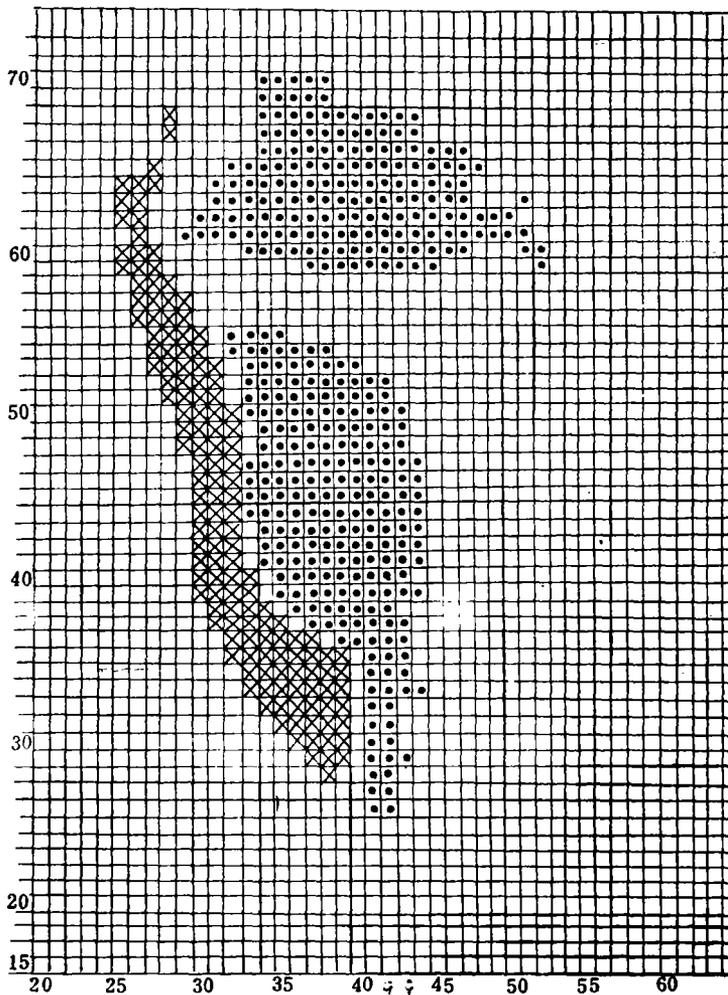


图 10 ×代表1号矿体 ·代表2号矿体

的次级块品位、方差等分布表（只列出一部份），附表2是此层的储量计算结果。

根据地质勘探资料，我们用常规计算方法抽样检查几个矿层的计算结果，说明本文所给出的计算结果是正确的。图10是依据地质勘探资料用人工办法制出的第17分层矿产分布图，与计算机得到的图9十分吻合。然而用人工办法制出一层矿产分布图，需要一个人用2~3天。而本程序运行20分钟便可得到35个分层和各垂直剖面的矿产分布图，计算效率的提高是相当可观的。计算得到的次级块品位分布图以及最后得到的储量计算结果，也与常规方法相近，绝大多数矿块的估计方差在0.3~0.5之间，表现出有一定的精度。

结 束 语

本文对克里金法进行了深入地应用研究，结合脉状矿的特点提出一些改进办法，给出一个具有自己特色的程序软件，可供工程设计部门选用。课题完成中得到中国金属学会稀有金属学术委员会副主任、中南工业大学教授赵秦生博士的热心指导，长沙有色冶金设计研究院陈大慈、代玉华、唐伟光等同志也参加了部份研制工作，在此表示衷心地感谢。

附表 1

P_b 1.17 0.34 Z_n 6.49 0.43 1 1 2	P_b 1.20 0.18 Z_n 6.57 0.23 1 1 2				P_b 0.03 0.23 Z_n 0.06 0.28 2 2 1
	P_b 0.51 0.06 Z_n 3.24 0.08 1 2 2			P_b 0.03 0.39 Z_n 0.06 0.49 2 2 1	P_b 0.02 0.33 Z_n 0.06 0.42 2 2 1
P_b 0.46 0.33 Z_n 3.29 0.42 1 1 2	P_b 0.41 0.32 Z_n 2.97 0.40 1 1 2	P_b 0.45 0.18 Z_n 3.19 0.23 1 1 2			
P_b 0.49 0.33 Z_n 3.43 0.42 1 1 1	P_b 0.49 0.37 Z_n 3.43 0.47 1 1 2	P_b 0.51 0.42 Z_n 3.62 0.53 1 1 2			
	P_b 0.88 0.41 Z_n 5.47 0.51 1 1 1	P_b 0.70 0.49 Z_n 6.76 0.52 1 1 1	P_b 0.69 0.49 Z_n 6.83 0.51 1 1 2		
	P_b 0.88 0.26 Z_n 5.21 0.33 1 1 1	P_b 0.76 0.28 Z_n 6.29 0.35 1 1 1	P_b 0.73 0.29 Z_n 6.54 0.36 1 1 1	P_b 0.40 0.41 Z_n 4.44 0.51 1 1 2	

25

26

27

28

29

30

表中意义

铅	品位	方差
锌	品位	方差
矿体	岩性	矿性

其中 岩性 $\begin{cases} 1 & \text{代表砂岩} \\ 2 & \text{代表灰岩} \end{cases}$

矿性 $\begin{cases} 1 & \text{代表氧化矿} \\ 2 & \text{代表硫化矿} \end{cases}$

附表 2

矿体	矿性	有矿次级块数	矿石重(万吨)	铅重(万吨)	锌重(万吨)
1	氧化矿	62	81.1	0.709	4.50
	硫化矿	81	126.0	1.650	9.13
2	氧化矿	260	343.0	1.270	6.30
	硫化矿	112	173.0	0.724	4.65
3	氧化矿				
	硫化矿				

参 考 文 献

1. 侯景儒, 黄竞先编著: 地质统计学及其在矿产储量计算中的应用, 地质出版社, 1981。
2. 侯景儒, 黄竞光等译: 矿业地质统计学, 冶金工业出版社, 1982。
3. 周建平, 陈大慈: 计算地质储量时矿体边界的近似确定及岩性、矿性的估计问题, 工程设计与研究, 1986, 第3期。
4. 国防科技大学、长沙有色冶金设计研究院: $\times \times$ 铅锌矿的矿产储量计算研究报告, 1986年12月。
5. David, M, Geostatistical ore reserve estimation, Elsevier, Amsterdam, 1977.

Optimal Calculation of Ore Reserves for Multiple Layer Mine

Li Guoguang, Zhou Jianping

Hu Daozhang

Abstract

This paper discusses the calculation of ore reserves and grade distribution using the modified three-dimensional kriging method. An efficient program for calculating ore reserves and distribution of grade is given. In this paper are presented a new method which can determine the boundary of an ore deposit by nets and imaginary drills, Konic method for calculating Variogram. The results obtained show that these approaches have a good effect on raising accuracy and hastening convergence.

Key Words: Optimal calculation; Ore Reserves