

## 克服地质统计学矿床建模中主观因素影响技术研究

贾明涛, 潘长良, 王李管

(中南大学资源与安全工程学院, 长沙 410083)

**[摘要]**精确的矿石储量估算是矿山设计、生产及管理的重要依据,地质统计学方法由于其考虑了区域化变量的结构性和随机性的二重性特征,获得了日益广泛的应用。然而,由于地质统计学方法是建立在一定假设的基础上,再加之各种主观因素的影响,地质统计学储量估算往往存在一定的偏差。在总结前人工作及地质统计学储量估算工作经验的基础上,认为影响估值精度的因素可归纳为两个方面:矿床具体条件及取样情况(客观因素);储量计算时的处理手段和方法(主观因素),提出克服主观因素是解决偏差产生的重要途径,对主要主观因素的影响及解决办法提出了较为详尽的论述。

**[关键词]**地质统计学 矿床建模 储量估算精度

**[中图分类号]**P628 **[文献标识码]**A **[文章编号]**0495-5331(2003)04-0073-05

精确的矿石储量估算是矿山设计、编制生产计划的基础。目前有许多方法用于矿床储量的估算,其中地质统计学方法自20世纪60年代提出后,由于其考虑了区域化变量的结构性及随机性的二重性特征,在估值精度上与其他方法相比具有明显的优越性,因而获得了日益广泛的应用,已成为储量估算的标准手段之一。在美国,提供地质统计学储量估算报告已成为矿山企业获得银行贷款的必备条件之一。

然而,由于地质统计学方法是建立在一定假设的基础上,同时具体的矿床条件十分复杂,再加之各种主观因素的影响,应用地质统计学进行储量估算时,往往存在一定的偏差。这些偏差主要是由于应用克立格法推估品位时或多或少的存在着过度修匀的现象引起的,对产生这一问题的原因及其对策进行研究,对于具体的储量估算工作意义巨大。本文作者在总结前人工作及应用地质统计学方法进行储量估算工作经验的基础上,认为影响估值精度的因素可归纳为两个方面:矿床具体条件及取样情况(客观因素);储量计算时的处理手段和方法(主观因素)。因为客观因素是不能改变的,作者认为欲提高储量估值的精度,应从克服主观因素的不良影响入手,尽量减少由主观因素导致的品位过度修匀现象,提高储量估值的精度。基于此思路,本文对提

高克立格估值精度的方法进行详细的讨论,希望能够对具体的储量计算工作起到抛砖引玉的作用。

### 1 样品组合方法及组合样长度

参与克立格法品位推估的样品是通过地质勘探及生产勘探获得的,因为岩心长度的变化,各样品段长度不一,应用地质统计学方法进行储量估算时,要求所有的样品具有相同的承载,这就需要按照一定的方法及长度进行样品的组合工作。

将小规格样品转化成大规模组合样将得出3种结果:(1)沿钻孔将大量样品分群;(2)将异己样品修匀掉;(3)将样品转化成共同长度<sup>[1]</sup>。

然而,由于勘探时钻孔往往具有一定的倾角,如果按照固定的方法(如按台阶组合)进行组合,将不能获得同等长度的样品支撑。另一方面,许多情况下高品位样品长度较短,被低品位样品所包围,这时样品组合导致的样品值平均就减少了数据的变异性,因此样品组合方法及长度需要合理确定。

采用何种方法进行样品组合,按照地质统计学的要求,一个根本的原则应使所有的组合样落在相同的承载上。常用的组合方法有两种:(1)不考虑钻孔的倾角变化,按固定的垂直长度进行组合。(2)考虑钻孔的倾角变化,沿钻孔按固定长度进行组合。很显然第二种方法将可以获得长度相等的组

**[收稿日期]**2002-09-23;**[修订日期]**2002-11-04;**[责任编辑]**余大良。

**[基金项目]**国家自然科学基金项目(编号:59704004)资助。

**[第一作者简介]**贾明涛(1973年-),男,1998年毕业于中南工业大学,获硕士学位,在读博士生,讲师,现主要从事采矿及岩土工程可视化研究工作。

合样段。

关于组合样长度的选取,一个普遍接受的原则是向上组合(从孔底开始向上组合)比向下组合(从孔口开始向下组合)更为可靠<sup>[2]</sup>,组合样长度不应明显小于平均的样品长度,这样才可适当减少样品数量,适应计算机处理能力。同时也不应过大,因为这一方面将导致样品数目过少,在后面品位推估时,为了找到已知样品,需加大估值临域,另一方面会出现样品过度修匀,减少了样品的变异性。一般取单元块高度的一半。

## 2 样品品位分布形式

品位分布形式对克立格估值的精度具有极大的影响。这是因为普通克立格法具有“数据的权重独立性”的重要特征,也就是说,空间上各样品对待估值块段的贡献仅与其位置有关,而与其数值大小无关。这一特征只有在样品品位满足正态分布时才较为合理,得到的克立格估值结果才较为精确。但是对实际的矿床,在进行样品品位统计分析时,经常会出现偏离正态分布的情况。这些偏离有些确实属于非正态,而有些则属于因为不良因素的存在而导致的假象。确定样品分布形式的影响因素,对正确掌握样品品位分布形式具有重要的意义。概括起来,导致样品品位高度歪曲分布的因素主要有 3 个方面:(1)地壳中元素的丰度;(2)特异值的存在;(3)多次成矿导致的品位模式混合。

确定样品品位分布形式的重要途径是绘制直方图。因此,无论是歪曲分布、或无论是何种影响因素导致的歪曲,确保直方图绘制质量都非常重要。

### 2.1 样品品位直方图的绘制

一般认为,直方图的合理数据分组数应符合:(1)分组后数据频数为 0 的组数较少;(2)直方图上部轮廓线较连续;(3)组数适中,分组数  $M$  与数据个数  $N$  大致满足  $M \in [5, \min(25, 5/N)]$ <sup>[3]</sup>。对于此 3 条要求,可以使用相对信息熵及最大相对信息熵判据来评价。具体描述为:

$$H(M) = - \sum_{i=1}^M P_i \ln P_i = - \sum_{i=1}^N \frac{f_i}{N} \ln \left( \frac{f_i}{N} \right),$$

并约定:

$$f_i = 0 \text{ 时, } \ln(f_i/N) = 0 \quad (1)$$

$$H_r(M) = H(M) \ln M \quad (2)$$

式中: $H(M)$ —直方图香农信息熵;

$H_r(M)$ —直方图相对信息熵;

$M$ —样品分组数;

$N$ —样本总数;

$f_i$ —第  $i$  组样本频数;

当相对信息熵  $H_r(M)$  最大时,对应的样品分组数  $M$  最好<sup>[4]</sup>。

一般而言,此时作出的直方图在上部呈现锯齿状,尚需进一步进行平滑化的处理。对原始直方图进行平滑化应满足 3 个条件:(1)平滑后的直方图接近原始直方图;(2)平滑后的直方图尽可能平滑;(3)平滑后的直方图具有与原始直方图相同的均值和标准差。这 3 个条件用公式可表示为:

$$\text{Min} Q_1 = \sum_{i=1}^M |P_i - P_i^0| \quad (3)$$

$$\text{Min} Q_2 = \sum_{i=1}^M |P_i - P_{i+1}| \quad (4)$$

$$\sum_{i=1}^m P_i Z_i = m, \sum_{i=1}^M P_i Z_i^2 = m^2 + s^2, \quad (5)$$

$$\sum_{i=1}^M P_i = 1, P_i \geq 0 (i = 1, 2, \dots, M)$$

式中: $P_i^0$ —原始直方图中第  $i$  组的频率;

$P_i$ —平滑后直方图中第  $i$  组的频率。

很显然当式(3)成立时,条件(1)满足,式(4)成立时,条件(2)满足,式(5)成立时,条件(3)满足,该方程组可通过线性规划的方法求解<sup>[5]</sup>。

### 2.2 特异值的处理

由前面所述可知,引起直方图歪曲的原因之一是样品特异值的存在,而是否由此原因引起歪曲,很容易通过适当的措施(如移去特异值)得到验证。因此在遇到歪曲分布时,应首先对此进行判断。

一般认为,在高度歪曲分布的样品集中,高品位样品属于异己样品。然而,事实上在许多情况下,许多富的样品虽然其品位较高,但它们的统计特征还是与其余样品相似。文献[1]正是由此原因,认为将特异值叫做“影响性”样品更为贴切。因此,对于什么样的样品属于特异值理应去掉,是一个非常复杂、也是值得小心对待的问题。虽然国际上对特异值的识别和处理提出过诸多方法,但是大部分并没有充分的理论依据。此处对识别和处理特异值的一般原则及常规方法——估计临域法<sup>[6]</sup>进行介绍。

估计临域法由 D G 克立格及 D M 霍金斯提出,它应用地质统计学的基本思想识别和处理特异值,在理论和应用实践中均被证明相对其他方法是较优的。

公式为:

$$I = \frac{n(G - m)^2}{(n + 1)\sigma^2} \quad (6)$$

$$GL = \sqrt{\frac{3.84\sigma^2(n+1)}{n}} + m \quad (7)$$

式中: $I$ —识别特异值的统计量,服从 $1 \sim \infty$ 的 $F$ 分布;

$G$ —待识别的样本值;

$m$ —不包含 $G$ 的样本空间中其他样品值的计算平均值;

$n$ —不包含 $G$ 的样本空间中的其他样品数;

$\sigma^2$ —样本空间中的样品值的平均方差;

$GL$ —取代特异值 $G$ 的特异值下限;

应用时,首先通过式(6)判断 $G$ 是否属于特异值。当 $I > 3.84$ 时, $G$ 被认为是特异值,其概率为95%。特异值 $G$ 识别后,即可通过式(7)算出特异值的下限值 $GL$ ,并用之取代 $G$ 参与进行统计分析。

### 2.3 品位模式混合问题

对经过多次成矿作用形成的矿床。进行建模时,若把所有样本集合在一起进行统计分析,其分布将呈现歪曲现象,但与单次成矿作用矿床样品的分布不同,其分布直方图中通常有多个峰值。若单独分析,每一部分将表现为一种分布形态。因此在遇到此种情况时,应根据矿床成因分析报告,按照分类分区的原则,对同一次成矿作用形成的样品进行分析,并对该区段分别进行矿床建模工作。

### 2.4 歪曲分布的处理

经过以上几个方面的处理,尽管某些歪曲分布可得到克服,但对于那些在地壳中丰度较小的元素(如Au、Ag、Cu、Pt)等,其分布仍表现为高度歪曲。这反映了这些元素在地壳中含量较少的本质。

对这些歪曲分布,需要根据分布直方图的形状选择适当的方法予以正态转换。常用的转换方法有:(1)对数转换,其中包括三参数对数转换,适用于大左偏;(2)平方根转换,适用于中左偏;(3)反余弦转换,适用于弱左偏;(4)反正弦转换,适用于右偏;转换公式分别为:(1) $x_{ij}' = \ln(cx_{ij} + \alpha)$ ,当式中 $\alpha \neq 0$ 时即为三参数对数转换;(2) $x_{ij}' = \sqrt{x_{ij} + c}$ ;(3) $x_{ij}' = \cos^{-1}(\sqrt{x_{ij}/10^n})$ ( $n = 0, 1, \dots$ );(4) $x_{ij}' = \sin^{-1}(\sqrt{x_{ij}/10^n})$ ( $n = 0, 1, \dots$ )。无论选用哪种转换方法,都应该对转换后的分布形式进行研究,计算其偏度和峰度,以检验正态转换的效果。

## 3 估计块度的大小

克立格法品位推估单元块度的大小一般是根据地质勘探网度确定的,块度大小对模型精度及模型

构建时间影响很大。

如果勘探网度较稀,块度较大,则一方面会削弱品位的变异性,导致品位均化;另一方面在矿体边界附近出现体积误差和边界误差(前者指用单元块填充建模区域时包含在内的面积和排斥在外的面积之差,后者则指包含在内的面积和排斥在外的面积的平均值),导致不能精确模拟矿体边界。

对于平面问题,设 $F(R) = R \cdot P/4A$ ,其中, $R$ 单元块边长, $P$ 单元块周长, $A$ 单元块面积。研究发现,当 $F(R)$ 大于0.05时误差将迅速增加到令人不可接受的程度<sup>[7]</sup>。

虽然这一问题可通过缩小单元块大小的方法予以消除,但这样做又会导致两个方面的问题。首先,在整个建模区域内全部采用同一种较小尺度的单元块,将大大增加矿床建模时间及计算机存储容量。其次,地质统计学原理本身导致矿床建模精度与单元块大小之间的关系存在着矛盾。大量实践表明,并不是块度越小越好。就给定的任意一组观测值来说,存在着一个单元块尺寸使克立格估值结果最优。在考察了观测值的空间距离、分布和变异后,该最优尺寸是可以确定的,它要比能够被接受的可精确表达地质边界的尺寸大得多。因此,过分减少单元块尺寸,不仅不会使地质统计学估计精度提高,反而会降低。

为了较好的解决这一两难问题,在矿床建模时,不应采用同一单元块度。而应根据所研究的对象,采用变块单元,在矿体边界附近对单元块进行细分,从而使这一矛盾得到弱化<sup>[8]</sup>。

## 4 空间变异性的确定

在地质统计学方法中,品位空间变异性(或相关性)由变异函数的计算获得。一般来说,矿床在空间各个方向上的变异性有所不同,从理论上讲,应该对所有方向上的变异函数进行计算,以确定其主要方向及对应的参数。同时,在实验变异函数的计算及理论变异函数的拟合过程中,其形状和参数会受到多方面因素的影响。

### 4.1 实验变异函数的计算

对于变异函数的方向问题,在计算时,应该采用穷举的方式,在空间上每隔一定的角度选取方向进行计算<sup>[2,9]</sup>。

由于样品点并不可能完全落在空间某一计算方向上,在计算时引入“容差角”的概念,凡是落在与

该方向夹角  $\pm \frac{\Delta\theta}{2}$  范围内的样品点均参与该方向变异函数的计算。容差角  $\theta$  的大小一般在  $30^\circ$  以内,具体应该取什么值,也是一个需要穷举实验的过程。

根据经验,由所有样品参与计算得来的变异函数参数之一——变程(即相关距离)往往较大,这是由于低品位样品的存在而导致的。我们知道矿床中高品位块段范围通常较小,由高品位样品参与计算获得的变程将更能反映实际情况。因此在选择参与变异函数计算的样品点时,适当剔除低品位样品是必要的、合理的<sup>[1,2,9]</sup>。

#### 4.2 理论变异函数的拟合

实验变异函数计算完成后,得到一组实验变异函数值  $\gamma(h)$  与滞后距  $h$ ,它们之间属于什么样的关系,需要按照一定的理论模型采用的拟合方法予以确定,此时得到的即为反映该矿床品位结构性的理论变异函数参数——基台、块金及变程。

常用的理论变异函数模型可分为有基台和无基台两大类。其中有基台的模型有:球状模型、指数模型和高斯模型;无基台的有幂函数模型、对数函数模型、纯块金效应模型和空穴效应模型。其中球状模型和指数模型最为常用。

传统的理论变异函数拟合方法为线性规划中的单纯形法,这种方法从数学角度是最优的。然而在实际的应用过程中,参与拟合点的个数及拟合点的权重对理论变异函数模型的影响巨大,因此完全依靠计算机自动拟合是存在一定弊端的。研究发现,真正对理论变异函数模型有贡献的是前面的数据点,应该通过反复实验确定参与拟合的点数以及前面几个点的权系数,这项工作只能通过增加人机对话功能才能实现。

#### 5 估计临域的大小

估计临域(即推估范围)对矿床建模的影响主要体现在3个方面:(1)耗费时间及空间;(2)品位估值的精度;(3)推估的矿床范围。

从理论上讲,由理论变异函数确定的变程真实反映了品位的空间相关性,估值临域应按照变程选取。然而,由于变程通常较大,完全按照变程进行数据搜索引起的上述3个问题将变得非常突出。对于(1)、(3)两个问题其影响不言而喻。对于问题(2),主要是因为估值临域越大,参与估值的已知样品点越多,在应用克立格方程组进行推估时,外围样品点对待估点的影响权系数将为负值,当具有负权值的

样品品位与其他样品的品位差别显著时,负权值会导致克立格估值出现很大程度的偏差。

因此,尽管常规上认为参与估值的点数越多结果越精确,事实上,在估值时需要对估值临域进行限制以约束参与估值的已知样品点数。在以3个主要变异函数方向的变程确定的椭球体内,采用逐步变动法确定动态变化的搜索球半径<sup>[10]</sup>。从数据的平均疏密度出发,从最近的已知数据点开始搜索,一直到收满指定的数据点数为止。

求得最小搜索半径后,判定搜索球体内是否保证收集到指定的数据点数。如果不能保证球体内有指定点数,则依次加大  $k$  值,直到满足条件为止。

通过上述限制,(1)、(2)两个问题可有效得到克服。但是对于问题(3),此时推估的矿床区域仍然将大大超过真实区域。因此在矿床建模时,对建模范围进行限制是非常必要的,这可以通过事先借助于地质工程师的经验通过圈定矿体得以实现<sup>[8]</sup>。如果这项工作实现较难,我们认为可以采取其它的方法予以限制。具体措施为:首先将所有外围样品点提取出来,超出这些点限制范围的块段根据它们距限制范围的距离区别对待,如果距离在  $1/2$  勘探网度以内,则看作矿体进行推估,反之不进行插值。

在矿体边界区域块段的估值事实上属于外插的问题,而我们知道地质统计学方法对于内插问题较为精确。此时可以采用其他方法进行推估。具体方法为:

将边界处的块段,看作超信息域来处理,取被估点距离最近的信息点方向作为外插估值方向<sup>[11]</sup>。公式为:

$$G = G_j + \frac{L_j \cdot (G_j - G_j')}{L_j' - L_j} \quad (8)$$

式中:  $L_j = \min(L_\omega)$ ;

$\omega$ —方向序号(1,2, ..., 8);

$L_\omega$ — $\omega$  方向第一信息点到被估信息点之间的距离;

$j$ —距离最近的方向序号;

$L_j'$ — $j$  方向第二信息点到被估点距离;

$G_j$ —方向第一信息点品位值;

$G_j'$ —方向第二信息点品位值;

$G$ —被估点品位。

#### 6 结论与建议

地质统计学储量计算方法从理论上讲是一种最优无偏估计。然而在实际应用中,为了得到较准确

的矿床模型,必须采用相应的技术措施使待建模型的各项指标尽量满足地质统计学的假设,并使具体建模过程中采用的方法能够更好的反映矿床实际情况。

本文对这方面的问题进行了较为详细的论述,同时提出了相应的解决策略。当然以上论述主要是针对传统地质统计学方法而言的,随着储量估算技术的发展,在地质统计学和其他储量估算方法<sup>[12]</sup>及改进措施方面均有了长足的发展。在应用传统地质统计学方法进行储量估算的同时,还可以尝试使用其他方法进行建模<sup>[13~14]</sup>。但无论如何,最终的目的均是为了获得一个较为精确的矿床地质模型,为矿山设计、生产及管理提供准确的依据。

#### [参考文献]

- [1] 潘国成. 地质统计学储量估算方法在矿业中应用的若干实际问题(一)[J]. 国外金属矿山, 1996, 21(7): 7~12.
- [2] 贾明涛, 潘长良, 肖智政. 基于三维地质统计学的矿床建模实践研究[J]. 金属矿山, 2002, 9(9): 42~44.
- [3] 刘甸瑞. 作直方图的最优分组问题[J]. 物探化探计算技术, 1995, 17(1): 62~67.

- [4] WenLong Xu, Journal A G. Histogram and Scattering - Smoothing Using convex quadratic programing [J]. Mathematical Geology, 1995, 27(1): 83~103.
- [5] 胡小荣. 直方图的作法及平滑法处理[J]. 地质与勘探, 2000, 36(1): 75~77.
- [6] 陈慧新. 变异函数的稳健性及特异值的处理方法[J]. 内蒙古农业大学学报, 2000, 21(2): 84~90.
- [7] S 霍尔丁. 计算机构模方法的局限性和新方向[J]. 国外金属矿山, 1992, 2: 93~97.
- [8] 贾明涛, 王李管. 矿床建模中边界控制技术研究[J]. 金属矿山, 1999, 9(9): 19~21.
- [9] 贾明涛, 王李管. 集成可视化矿床建模软件在某矿山的应用[J]. 中南工业大学学报, 2000, 31(5): 396~399.
- [10] Liguan WANG, Shunhua DENG, Shigeru YAMASHITA. An Analytical Information System for Rock Slope Displacement Based on a Visualization Technique [J]. 资源的素材, 2002, 10(1): 21~27.
- [11] 孙永凡. 建立矿山地形模型的一种方法[J]. 金属矿山, 1993, 2(2): 19~23.
- [12] 王志民, 侯景儒, 童光煦. BP神经网络在储量计算中的应用[J]. 地质与勘探, 1999, 7(4): 22~24.
- [13] 王志民, 侯景儒. 协同克立格法及其在矿产储量计算中的应用[J]. 地质与勘探, 1994, 5(3): 39~48.

## THE TECHNOLOGY TO OVERCOME EFFECTS OF SUBJECTIVE FACTORS IN DEPOSIT MODELING USING GEOSTATISTICS

JIA Ming - tao, PAN Chang - liang, WANG Li - guan

(Central South University, Changsha 410083)

**Abstract:** The accurate reserves estimation is important for the design, producing and management in a mine. Geostatistics technology has been used more and more because it considered structural and random characters of regional variables. However, as the methods are based on some assumptions, additionally, affected by many objective factors in the courses of reserves estimation, the results are always inaccurate. The authors consider that the effective factors can be reduced in two aspects: the actual deposit and sampling instance that belongs to objective factors, the disposing methods in reserves estimation that belongs to Subjective factors. Based on this thought, it has been put forward that overcoming the Subjective effect is a main solution to the inaccuracy; meanwhile, a detailed discussion for the methods to solve these questions is given.

**Key words:** geostatistics theory, deposit modeling, subjective factors, reserves estimation accuracy

## 紫金矿业投资 1 亿多元控股开发新疆阿舍勒铜矿

近日,随着福建紫金矿业股份有限公司 1 亿多元投资资金全部到位,该公司已经完成对新疆阿舍勒铜矿的控股。目前,该矿山正在进行紧张的前期建设,预计明年底可以正式投产。

据福建紫金矿业股份有限公司一位高层人士介绍,新疆阿舍勒铜矿位于中国的西北部,已经探明的铜工业储量达 91.9454 万吨。该项目注册资金达 2.5 亿元,原计划开发总投资为 6 亿元,年生产规模 3 万多吨。

紫金矿业于去年受让了该铜矿 46% 的股权,成为公司的第一大股东。随后紫金矿业对开发方案进行了重大调整,使总投资减少到 5 亿元,而矿山年生产规模则增加到 4 万吨。据了解,这样的生产规模在全国单体铜矿山产量中位居前茅。