

地质统计学在储量估算中的应用研究

任泽琛

陕西五洲矿业股份有限公司 陕西 商洛 726403

摘要：矿产资源储量估算是矿山设计与生产决策的核心依据，传统方法难以有效刻画矿体品位的空间变异性和估算不确定性。本文系统研究地质统计学在储量估算中的核心方法与应用流程，重点阐述变异函数的结构分析、克里格插值的基本原理及普通克里格、指示克里格、协同克里格的适用条件。研究表明，地质统计学方法能够提供无偏最优估计及估算方差，量化空间不确定性，为资源储量分类与风险评价提供科学依据，显著提升了储量估算的可靠性与精细化水平。

关键词：地质统计学；储量估算；变异函数；克里格插值；不确定性量化

引言：矿产资源储量估算贯穿地质勘探到矿山开采全过程，其准确程度直接决定矿山投资决策的科学性与开发效益。传统方法包括算术平均法、地质块段法和距离反比法，虽计算简便，但无法定量描述品位的空间结构性，也缺乏对估算不确定性的数学表达。地质统计学以区域化变量理论为基础，通过变异函数刻画品位的空间相关结构，利用克里格法实现线性无偏最优估计，成为国际公认的储量估算标准方法。本文系统阐述地质统计学储量估算的理论框架、关键技术与应用流程，为矿产资源评价提供方法参考。

1 地质统计学理论基础

1.1 区域化变量理论

地质统计学的核心概念是区域化变量，即定义在空间坐标系中、随位置变化且具有局部随机性与整体结构性双重特征的变量。矿石品位正是典型的区域化变量：从局部看，任意点的品位可视为随机变量，具有不确定性；从整体看，邻近样品点的品位之间存在空间相关性，且随距离增大相关性递减。区域化变量理论突破了经典统计学要求样本独立同分布的假设限制，为空间数据的分析与插值提供了更符合地质实际的数学框架。区域化变量可以用三个核心函数进行刻画：概率分布函数描述其统计规律，协方差函数描述空间线性相关，变异函数则描述空间差异性的结构特征。在实际应用中，由于协方差函数要求数据满足二阶平稳假设（期望恒定、协方差仅与距离有关），而多数矿体数据仅满足本征假设（增量方差仅与距离有关），因此变异函数成为地质统计学中应用最广泛的工具^[1]。

1.2 变异函数理论

变异函数是地质统计学的核心工具。其理论定义是区域化变量增量方差的一半，用于量化品位等空间属性

随距离变化的规律。在实际应用中，通过对比不同距离样品点之间的品位差异，可以计算出实验变异函数。该函数的值通常随样品点间距离的增大而增大，当距离增大到某一数值后，函数值趋于稳定，该稳定值称为基台值，对应的距离称为变程。变程反映了品位的空间相关范围：在变程以内，样品点之间存在空间相关性；超出变程后，样品点之间相互独立。变异函数在原点处的行为尤为关键：若在原点处连续且通过原点，表明品位连续性好；若在原点附近出现跳跃（称为块金效应），则表明存在微观结构变化或测量误差。实验变异函数需要通过球状模型、指数模型或高斯模型等理论模型进行拟合，模型的选择与参数拟合是地质统计学应用中的关键环节，直接影响储量估算的精度。

1.3 克里格插值基本原理

克里格插值是一种最优线性无偏估计方法，其核心思想是在满足无偏性和估计方差最小化的条件下，为各已知样品点分配最优权重，对待估点进行加权线性组合。克里格方法与传统加权方法（如距离反比法）的关键区别在于：权重的确定不依赖于距离的某种经验函数，而是基于变异函数所揭示的空间结构特征，通过求解克里格方程组获得。克里格方程组由多个方程组成，其系数矩阵由各样品点之间的变异函数值构成，右侧向量由待估点与各样品点之间的变异函数值构成。求解该方程组得到的最优权重，能够保证估计值无偏且估计方差最小。克里格方法的另一优势是能够同时给出估计方差，该方差不仅取决于样品点的空间构型，还与品位的空间变异结构有关，因此可作为估算不确定性的定量指标，为资源储量分类提供客观依据。

2 储量估算中的克里格方法体系

2.1 普通克里格

普通克里格是应用最广泛的克里格方法,适用于区域化变量满足本征假设、期望未知但恒定的情形。绝大多数金属矿床的品位数据满足或近似满足这一假设,因此普通克里格成为储量估算的首选方法。普通克里格的估计权重之和为1,这一约束保证了无偏性。在实际应用中,普通克里格的计算流程包括:样品数据预处理(特高值处理、正态变换)、实验变异函数计算、理论变异函数模型拟合、克里格方程组求解、品位估计与方差计算、储量汇总。普通克里格的优势在于对数据分布要求相对宽松、计算效率较高、结果稳定性好。局限性在于无法利用与品位相关的辅助变量信息,当主变量样品稀疏时估计精度受限^[2]。

2.2 指示克里格

指示克里格用于处理非正态分布数据或评估品位超过某一临界值的概率。其基本思想是将连续型品位变量转化为二值指示变量:当品位值大于等于给定阈值时赋值为1,否则赋值为0。对指示变量进行克里格估计,得到的结果即为品位超过该阈值的条件概率。通过设置多个阈值(如边界品位、工业品位等),可以构建品位的条件累积分布函数,进而估计任意分位数的品位值。指示克里格在以下场景中具有独特优势:品位分布严重偏斜(如金矿床)、存在大量低于检测限的数据、需要评估矿化概率以辅助资源量分类。但该方法也存在缺陷:多个阈值的指示变异函数需分别计算和拟合,工作量大;指示变换损失了品位的原始数值信息,估计结果对阈值设置敏感。实际应用中常采用协同指示克里格或多指示克里格加以改进。

2.3 协同克里格

协同克里格是普通克里格的扩展,通过引入与主变量(如目标元素品位)具有相关性的辅助变量(如测井响应、磁化率、次生元素品位)来提高估算精度。协同克里格的核心优势在于:当主变量样品稀疏但辅助变量数据密集时,可以利用辅助变量的空间信息间接约束主变量的分布形态,从而弥补主变量采样不足的缺陷。协同克里格需要建立主变量自变异函数、辅助变量自变异函数以及主-辅变量交叉变异函数,求解的克里格方程组规模显著扩大。应用协同克里格需满足以下条件:主变量与辅助变量之间存在显著的相关性(相关系数绝对值大于0.5),且辅助变量的采样密度高于主变量。

2.4 不同克里格方法的适用性对比

选择何种克里格方法需综合考虑数据特征、勘探程度、估算目的和计算资源。普通克里格适用于数据分布基本对称、样品数量充足、无强相关辅助变量的场景,

是多数矿床储量估算的基础方法。指示克里格适用于品位分布严重偏斜、需要评估矿化概率或进行不确定性建模的场景,尤其适合贵金属矿床。协同克里格适用于主变量稀疏但存在高相关性辅助变量(如地球物理测井、高光谱遥感数据)的场景,在勘探早期或深部预测中具有独特价值^[3]。实际应用中也可组合使用多种方法:先用指示克里格识别矿化概率较高的区域,再在该区域内用普通克里格进行精细品位估算;或利用协同克里格进行初始估计,再用普通克里格对加密钻孔区域进行局部校正。

3 方法应用流程与关键技术

3.1 数据预处理

数据预处理是地质统计学储量估算的基础环节,直接影响后续分析的可靠性。预处理包括四个步骤。第一步是特高值处理:矿石品位常服从对数正态分布或幂律分布,少量极高品位值会对变异函数计算和克里格估计产生显著影响。通常采用经典方法或分位数法识别特高值,并以替代值(如矿床平均品位的1.5至2倍或该样品所在层位的平均品位)进行替换。第二步是正态变换:普通克里格虽不严格要求数据正态分布,但当数据严重偏斜时,变异函数的稳定性会受到影响。通过对数变换或Box-Cox变换将原始数据转化为近似正态分布,估算后再反变换回原始尺度。第三步是趋势分析:检查品位数据是否存在明显的空间趋势(如矿体自上而下品位递减),若存在显著趋势需采用泛克里格或先分离趋势再进行克里格估计。第四步是数据组合:当样品长度不一致时(如钻孔取样长度不同),需按等长组合样进行标准化处理,通常以勘探规范中的标准样长(如2米)为基准进行加权组合。

3.2 变异函数计算与拟合

实验变异函数的计算需确定三个参数:滞后距、容差和角度容差。滞后距是距离间隔的步长,通常取勘探线间距或平均样长的0.5至1倍;容差为滞后距的允许波动范围,通常取滞后距的一半;角度容差用于各向异性分析,通常取22.5度至45度。计算获得的实验变异函数点云需进行稳健统计(取中位数或截尾均值)以获得稳定的实验变异函数值。理论模型的拟合是地质统计学中最富技巧性的环节,常用模型包括:球状模型(线性增长后在变程处达到基台,适用于多数层状矿床)、指数模型(渐进趋近基台,适用于热液矿床)、高斯模型(原点处抛物线形态,适用于品位连续性好的矿床)。在理论模型拟合过程中,需特别注意块金值的确定。块金值反映了小于采样间距尺度的变异性和测量误差,其取值直接影响变程和基台值的估计精度。当块金值占基台值的比

例超过50%时,表明品位的空间结构性较弱,克里格插值结果接近于算术平均,此时应重新审视采样方案或考虑增加辅助变量。另外,不同理论模型在原点附近的行为差异显著:球状模型为线性增长,指数模型为凹形增长,高斯模型为抛物线形增长,模型选择需与矿体的实际地质连续性相匹配。拟合方法可采用人工交互拟合(基于经验判断)或加权最小二乘拟合(基于计算优化),实际生产中多采用前者的目视拟合与后者的交叉验证相结合的策略。各向异性分析需分别计算不同方向(走向、倾向、垂直方向)的变异函数,确定各方向的变程和基台值,为三维克里格插值提供几何各向异性参数^[4]。

3.3 交叉验证与参数优化

交叉验证是评估变异函数模型和克里格参数合理性的关键手段。其基本流程是:依次将每个已知样品点暂时移除,用剩余样品点通过克里格方法估计该点的品位值,计算估计值与其实测值的误差。对所有样品点完成上述操作后,统计误差指标:平均误差(ME)应趋近于0,反映无偏性;平均标准化误差(MSE)应趋近于0;均方根误差(RMSE)应尽可能小;标准化均方根误差(RMSSE)应趋近于1。若标准化均方根误差显著大于1,表明估计方差偏低(模型过于乐观);若显著小于1,表明估计方差偏高(模型过于保守)。根据交叉验证结果,可迭代调整变异函数模型参数(变程、基台值、块金值)直至各项指标满足要求。对于各向异性矿体,需分别验证不同方向的估算精度,确保模型在矿体走向和倾向方向上均表现良好。

3.4 块体模型构建与储量计算

克里格估计得到的是每个样品点的品位值,但储量估算需在规则块体模型上进行。块体模型将矿体空间划分为一系列规则立方体(块体),块体尺寸通常取勘探线距的1/5至1/8,以在估算精度和计算效率之间取得平衡。每个块体的品位值由块体中心点位置的克里格估计值代表,或通过对块体范围内多个估计点的品位进行平均获得。储量计算步骤为:首先根据矿体边界线(由地质解释确定)对块体进行筛选,仅保留完全位于或大部分位于矿体内部的块体;然后为每个块体进行克里格品位估

计和估计方差计算;最后按品位区间(如边界品位至工业品位、工业品位以上)分别统计矿石量和金属量。同时,根据估计方差和样品距离等参数,可将资源量划分为探明、控制和推断三个级别,为矿山开发设计提供可靠依据。

上述流程构成了地质统计学储量估算的完整技术链条。相较于传统方法,该技术体系的核心优势在于:变异函数能够定量刻画品位的空间结构特征,克里格插值提供最小估计方差意义下的最优权重,估算方差为资源量分类提供了客观统计依据。通过交叉验证可对模型参数进行迭代优化,确保估算结果的稳健性。这一方法体系适用于层状、脉状、透镜状等多种矿体类型,已在国内外大量矿山中得到验证,是现代资源储量评价的标准化技术路径。

结束语

地质统计学通过变异函数和克里格插值为矿产资源储量估算提供了科学系统的解决方案。本文系统阐述了从区域化变量理论、变异函数分析到多种克里格方法(普通克里格、指示克里格、协同克里格)的完整方法体系。研究表明,地质统计学方法能够实现品位的无偏最优估计,提供估算方差的定量化不确定性度量,估算精度显著优于传统距离反比法。该方法的应用提高了储量估算的科学性和可靠性,为资源储量分类、矿山设计优化和投资风险评价提供了定量依据,是现代矿产资源评价的核心技术手段。

参考文献

- [1]袁姝.地质统计学资源储量估算方法的优点和发展方向探讨[J].中国金属通报,2022(5):118-120.
- [2]张春元,李建翔,王杨.地质统计学在红牛铜矿山模型研究及储量计算的应用[J].云南地质,2023,42(1):31-36.
- [3]潘杨,江健华,祁轶宏,等.基于三维地质统计学的固体矿产资源量估算方法研究现状及应用分析[J].安徽地质,2023,33(1):1-5.
- [4]李晓晖,江健华,马良,等.三维地质统计学矿产资源量估算变异函数影响因素与参数敏感性研究[J].金属矿山,2023(10):153-161.