

引 言

从地质勘探评价到矿床开采的整个工作过程,各个阶段都需要根据不同任务的要求,对矿床进行多次储量计算。储量计算工作不仅仅限于矿石埋藏量的计算,而且还涉及到矿石质量、矿体形态、规模、复杂程度、工作程度、开采条件以及经济价值等诸问题。因此,储量计算一直被列为地质勘探各阶段极其重要的工作。

储量计算方法与勘探方法是相辅而行的。一套勘探方法常伴随着相应的储量计算方法。由于矿床的多样性和矿体的复杂性,使得勘探方法也多种多样,伴之的便有不同的储量计算方法。就固体矿产储量计算而言,其方法已达数十种。国内用得最广的是传统几何法(传统储量算法)。它是50年代从苏联引入的一套较为简易的计算方法,一直沿用至今。它对我国矿床勘探、开采起着重要作用。不过,通过30多年来的地质勘探工作的实践,人们已越来越感觉到传统几何法的落后,它已不能适应现代生产发展的要求。这种方法的缺点是可靠性差,其结果常会出现不可预计的误差,这对以后的工作可能会造成不同程度的损失。因此,从根本上改革传统储量算法,十分必要。

随着生产科学技术的发展,特别是电子计算机的发展,储量计算方法亦日趋科学化。目前,国外主要应用地质统计学方法进行储量计算,这种方法比传统几何法科学得多。克立格法(地质统计学的储量计算方法)是目前国外广泛使用的储量计算方法,尤其在美国、法国、加拿大等国已形成庞大的研究和应用体系。这种方法,目前在我国也在推广和应用。此外,也有人研究和应用样条函数、最小距离法、距离幂次反比法等方法进行储量计算。

笔者从我国的地质勘探、矿山设计、矿山生产以及储量报告审查的需要出发,于80年代初开展了一种新的储量计算方法——

SD 储量计算法(简称 SD 法)的研究。

任何方法的改革和创新都有继承性。SD 法立足于传统储量计算法,吸取了地质统计学中关于地质变量具有随机性和规律性的双重性质的思想和“一条龙法”^①中提出的由直线改曲线的思想,用稳健样条函数及分维几何学作为数学工具,对传统断面法进行了深入系统地改造。

事实上,在许多储量计算方法中,断面法与块段法是两种最常用的方法,而尤以断面法最易被人们接受,并用得最广。这是因为在许多方面断面法具有其他方法不可比拟的优点。譬如,断面法用的断面图能清楚地反映出矿体断面形态和地质构造特征;使用断面图可灵活而准确地编制出若干有用图件;断面法与断面地质图能很好地结合,它们的一致性使得计算量便于地质分析。而且,断面法几乎适用于任何类型矿床,这就使得它在储量计算方法选择上,不受限制。SD 法不失传统断面法的优点,并在它的基础上,试图克服其计算粗略、不准确、可靠性差以及由于缺乏自检功能而给地质工作带来的盲目性等种种弊端和不足,使断面法更加科学化,从而提高了储量计算方法的经济效益和社会效益。

SD 法的全称是最佳结构曲线断面积分储量计算及储量审定计算法。“SD”代表三种含意。其一:最佳结构曲线是由 Spline 函数(三次样条函数)拟合的,取 Spline 的第一个字母 S,取断面积分一词的汉语拼音的第一个字母 D,亦即“SD”,其二:SD 法计算过程,主要采用搜索递进法,取“搜索”一词的汉语拼音的第一个字母 S,

① 云南地质矿产局龙之中工程师于 1979 年发表了“一条龙式断面法储量计算的理论与实践”一文,文中将数值积分原理用于储量计算,得出“一条龙公式”和“一条龙曲线”,使传统的断面法储量计算由直线法改为曲线法。该法的思路是极可取的,但是,处于萌芽中的“龙法”存在不少弊病。第一,一条龙曲线具有多解性,实际上它是一条因人而异的随机曲线,凭经验手工绘制而得,难以用数学模拟,自然不易电算;第二,地质变量是具有规律性和随机性双重性质的变量,如果不经过科学处理,直接将它作为确定性量运算,显然是不恰当的。“龙法”在这方面采用了传统储量计算法的不足之处,这便是它难于被人接受、推广的主要原因。

取“递进”一词的汉语拼音第一个字母 D,亦即“SD”;其三:SD 法具有从定量角度审定储量的功能,取“审定”一词汉语拼音声母的第一个字母,亦即“SD”。由此,“SD”具有原理、方法、功能几方面的含义,SD 储量算法也由此而命名。

SD 法是以方法简便灵活为准则,以储量精确可靠为目的,以最佳结构地质变量为基础,以断面构形为核心,以 Spline 函数及分维几何学为主要数学工具的储量计算方法。它有别于地质统计学储量算法,是一种比传统储量算法更深入、更可靠的自动化储量计算方法。

SD 法的研究基于理论与实践相结合的原则,从实际出发,设计和引用了一些数学模型,然后将这些模型用于一些已探已采的矿区矿山进行验证,从实际效果中分析和评述该方法。几年来,SD 法对已经开采和正在开采的国内四个省,八个矿种,六个矿床类型,十三个矿山(区)五十多个矿段(块)进行了试算和投产计算,取得了很好的效果,实践证明了 SD 法理论的正确性。

上文提到的八个矿种是:铁、锰、铜、铅、锌、锡、钴以及石灰岩。六个矿床类型是:热液、砂卡岩、沉积、沉积变质、风化壳、砂矿等诸类型矿床。所计算的矿山(区)是:云南易门里士铜矿、凤山铜矿、狮山铜矿、老厂钴矿,云南个旧马拉格老阴山铅矿、老厂锡矿、松树脚锡矿,云南会泽铅锌矿、云南建水锰矿、四川会理锌矿,四川拉拉铜矿,贵州 GC 石灰岩矿,山东淄博黑旺铁矿。

SD 法的电算程序主要用 FORTRAN-IV 编写,部分计算及绘图程序用 BASIC 编写。SD 法试算的电算过程,分别在四川、云南两省的计划经济委员会电子计算中心的 WANG-2200VS80 和 VS100 机上进行。蓝运蓉同志担任程序的编制、调试的主要任务。在这过程中,四川、云南两省计划经济委员会电子计算中心给予了很大支持和帮助。在收集资料过程中,得到有色金属工业总公司滇川两省的分公司、昆明有色金属设计研究院、易门铜矿、云锡公司、云南 313 地质队、会泽铅锌矿、建水锰矿、会理锌矿、淄博黑旺铁矿等单位同志的大力帮助。在 SD 法理论探讨过程中,云南大学数学系王

学仁教授、保明堂副教授、中国地质大学(武汉)校长赵鹏大教授、中国科学院系统所苏玉田副研究员等予以支持和帮助。国家矿产储量管理局尹镇南高级工程师对SD法研究成果进行了认真的审核。此外,SD法整个研究过程中得到了地质矿产部科技司、国家储量管理局、云南地质矿产局科技处以及云南地质矿产局职工大学的全力支持。对以上参与、帮助和支持研究工作的单位和个人,笔者在此表示衷心感谢!

SD法经国家矿产储量管理局组织有关数学、数学地质、矿床勘探、计算机软件等方面的专家进行评审,并通过。评审意见认为:SD法在理论上构思新颖、有独创性,这套方法在实践上是可行的,具有实用价值,达到了国内先进水平。

SD法涉及的内容很广。本书侧重于SD法研究成果,突出新概念、新观点的提出。采用论述和实例相结合的手法阐述其理论和方法。尽量减少繁琐的公式推导,使其简明易懂。

本书的第一篇由唐义撰写;第二篇由蓝运蓉撰写;附篇由唐义、蓝运蓉合写。

本书中的一些概念、观点多是笔者首先提出,不当或错误之处,恳请读者批评指正。

第一篇 SD 储量计算法基本理论

绪 论

所谓矿产储量计算狭义地说,是依据矿床地质勘探过程中所获取的有限地质信息来对地下矿藏量进行估算,即依据各种地质工程取样的样品数据来估算矿体的埋藏量。矿体的复杂性、取样的有限性以及所采用的不同储量计算方法本身的局限性,这三种因素使得这种估算必然存在不同程度的误差,而这种误差有时是不可预测的。这三种因素也是相互影响、相互制约的。如果能改进储量计算方法,减小其局限性,增强其适用功能,即可削弱其它两种因素对储量计算的影响。

一、储量计算方法评述

如果矿体形态简单、矿化均一或工程控制非常密集,则无论使用何种储量计算方法,其储量误差都不会太大。反之,如果矿体形态和矿化复杂或工程控制稀疏,则使用不同的储量计算方法,其结果可能差别甚大。每一种储量计算方法都有它各自的适用条件,忽略这个条件,效果可能会很差。

在阐述 SD 法之前,先介绍几种与 SD 法有关的储量计算方法。

1. 传统几何法

传统几何法(或称传统法),是我国建国以来用得最广的储量计算方法。传统几何法,一般是指固体矿产储量计算中常用的算术平均法、块段法、断面法、多角形法或多边形法等。虽然,这些方法的特点和功能不同,但它们都是遵循一个基本原则,即把形状复杂的

或未知的矿体描绘成与该矿体体积大致相等的简单形体,并将矿化复杂状态变为在影响范围内的匀化状态,从而计算其体积、矿石量、平均品位、金属量等。传统法的优点在于简便、易于掌握、不使用计算机也可以进行计算,因而该法一直沿用至今。特别,当工程数很少,只对矿产储量进行概略估计时或初勘阶段对储量精度要求不高时,采用该法是可行的,并且非常方便灵活;当矿体形态简单或品位变化不大,或者工程数非常之多、控制程度相当高时,传统几何法也是可行的。但当矿体形态和矿化复杂、工程控制不是特别密集时,而想用传统法计算得到精度较高的储量是很困难的。这是因为,根据很有限的工程资料编绘的简单矿体形体,很难说是与真实复杂形体的体积大致相等,并且,把取样点的品位延拓到它的所谓的影响范围(块段)而作为该范围品位的均值,这种影响范围也很难说是它的真正影响范围。这样,由此计算的矿石储量和品位便会产生事先无法得知的随机误差。这就是传统法可靠性差的原因所在。并且这种可靠性或误差还无法进行自身估计。

如果能够使传统法比较真实地把形状复杂或未知的矿体描绘成与之体积大致相等的简单形体,那么,计算的效果显然会好些。如果再解决误差(或精度)的自审功能,则这种储量计算方法将是很可行的。SD法正是在这些方面取代传统法的。

2. 样条函数法

样条函数是近二十年来发展起来的一门数学分支学科,它主要应用于飞机、船舶制造业。将它用于矿产储量计算,是基于某些矿体矿化是连续的、甚至是可导的条件。例如某些矿化均匀的沉积矿床、层控矿床等。当稀疏地施以工程后,将得到的各工程观测点连接起来,可以认为连接的曲线是一条光滑曲线,于是用样条函数拟合,并进行样条函数积分,从而计算储量。此即样条函数储量算法。在样条函数中,储量计算一般采用 Spline 函数,亦叫三次样条函数。知道或给定各观测点的一阶导数的样条函数亦称埃米尔特函数,由此定义可以知道埃米尔特函数储量算法实质上是样条函数法的一种类型。

样条函数法在我国运用时间不长,应用范围也不广。它是 70 年代末 80 年代初在我国地质、煤炭系统发展起来的。这种方法适用于断面图上连续变化的矿体圈定和计算。对于形状和矿化复杂的矿体,其效果较差。SD 法最初也是在 70 年代末从研究样条函数开始而发展起来的,即用样条函数进行数值积分而着手改造传统法。当时尚未出现样条函数储量计算法。样条函数法类似于 SD 法中的普通 SD 法,但普通 SD 法还适用于形状和矿化复杂的矿体的储量计算。

3. 距离幂次反比法

距离幂次反比法,与前面两类方法截然不同。它不考虑观测值的厚度、矿体形态和体积,是一种类似于后面将讨论的克立格法的品位局部估计方法。

距离幂次反比法以品位变化是距离的函数为依据而建立的一种方法。某一个点的品位值可用它周围不同距离点的已知品位对它进行估计。离被估计点距离越远,估计作用越小,距离越近,估计作用越大,即呈现出距离幂次的反比函数关系。幂次可以是一次、二次,也可是多次。但一般采用二次,称为距离平方反比法。

一般认为,距离平方反比法如果用得恰当,其效果是较好的。但是,这种“恰当”,却不容易掌握,同时,它的幂次用多大合适?也常是凭经验。不过,距离平方反比法在考虑变量空间相关权时,距离越远权越小,距离越近权越大的思想是可取的。SD 法在一定程度上吸取了这种思想。

4. 地质统计学储量计算法

地质统计学储量计算法(克立格法)被认为是目前世界上最先进、最科学的储量计算法。它是建立在概率统计学基础之上而发展起来的一门学科。

地质统计学区别于经典统计学的重要标志是地质统计学将变量区域化。它以区域化变量作为理论基础,系统地研究区域化变量增量的空间相关性及其变化规律,从而对被估块段进行无偏估计,并可以提供估计值的置信区间。这种方法的出现,使矿产储量计算

方法研究进入了一个新阶段。

在最大限度地利用勘探工程所提供的信息方面,克立格法不失为一种理想的储量计算方法。但在勘探资料不理想的情况下,例如当工程数或取样点过多或过少,用克立格法计算储量却不太适宜。取样点过多,用一般的传统法不仅简便易行,而且效果也较好。D. G. Krige 本人也承认(潘恩沛等,1988):如果在块段中有许多可用数据点,一般说,这时用地质统计学原理获益较少;如果数据点相当丰富而且分布均匀,这时应用地质统计学估计整个矿床获益也很小。他认为,对于这样的样品,直接取平均值就够了;取样点过少,运用地质统计学,信息量就不足,很难得到可靠的估计。法国学者 R. G. Wadley 说(潘恩沛等,1988):“当远景估算是建立在仅有数十个钻孔基础上的时候,应用地质统计学是不恰当的”。笔者在实践中也遇到类似的问题,本书将在其它章节中讨论。D. G. Krige 还认为(潘恩沛等,1988):“只有当根据有限数据估量单个矿石块段,而且估计误差很大,这时克立格法才会显示出明显的优点”。由此可以看出,克立格法的应用是有条件的。

SD 法对克立格法这一应用条件可以适当放宽,该法对于工程数不苛求,一般只要有数十个至百余个钻孔,就能取得较好的效果。而且在适用范围上,SD 法也有较大的适应性。当工程数较多时,SD 法效果更好,而且计算工作量也不会增加很多。

二、SD 法的基本思想及概貌

所有储量计算方法都会由于矿体复杂性和取样的有限性,而会不同程度地遇到障碍。SD 法也不例外。

矿体的复杂性,这里主要指矿体形态的复杂程度和品位空间变化程度。对于大多数矿床矿体说来,矿体形态是复杂的,品位的空间变化亦很大。在某些储量计算方法中用某一位置上取样的量值(如厚度、品位等)代替周围一定范围的量值。这种将取值作为均值的统计学思想,经过多年实践目前已被公认为是不合理的。但是,什么样的储量计算方法能对取值的处理更为合理呢?许多人正在做这方面的研究。人们已经认识到,矿体空间任一点的地质变量

(如厚度、品位等)都具有规律性和随机性的双重性质。仅仅注意地质变量的规律性而忽视其随机性,如果采用确定性模型,则矿体越复杂其储量误差越大;仅仅考虑地质变量的随机性而忽视其空间变化规律性,如果采用纯统计模型,就失去了储量计算的地质意义。既考虑规律性又考虑随机性,是目前一些新的储量计算法普遍注意到的问题。为了克服表现矿体复杂性的地质变量随机因素干扰,SD法引出了结构地质变量概念。

取样的有限性,是指地质勘探工作受到经济效益的约束,而不可能随意取样。一般说来工程越多,勘探程度亦越高,从而对地质现象认识越深入,储量计算亦越准确。但是,工程过多,不仅经济不合理,而且延长了勘查周期。在地质勘查整个过程(各个阶段)中,工程数和取样数都有一定的局限性,用较少的已知数据去估计复杂矿体的总体,而使其吻合勿误,这是难以实现的。不过,对于一个具体的矿体而言,施以一定量的工程,就已经体现了它的某种控制程度。只是在具体地从定量角度指明工程控制程度和储量计算精度问题上遇到了困难。然而,我们可以看到,工程控制程度常是由矿体的复杂程度来决定的,而矿体的复杂程度又是在一定数量的工程控制条件下去描述的。利用这种相依关系,SD法采取了一系列从数据取值直到整个运算的稳健步骤,导出了搜索递进计算法,以及极限精度法——SD精度法。从而实现SD动态审定一体化储量计算,使得SD法能根据地质工作阶段划分的要求,正确掌握取样的有限性,确定工程控制程度。

动态计算,是基于矿体既是地质体,又是经济体的事实,对于在各种条件下随经济变动引起变化的矿体储量计算。因此,矿产储量应是动态的,例如动态地确定工业指标,动态地圈定矿体,动态地计算储量和精度预测以及经济评价等。

审定计算,是指对储量精度、储量级别的审定。这是当今其它一些储量计算方法尚未解决好的重要问题(潘恩沛等,1988)。SD法在解决这个问题时引入了分数维的概念,将矿体降维后,由分维数来刻画储量精度。对于同一矿体,随着观测点的增多,分维数逐

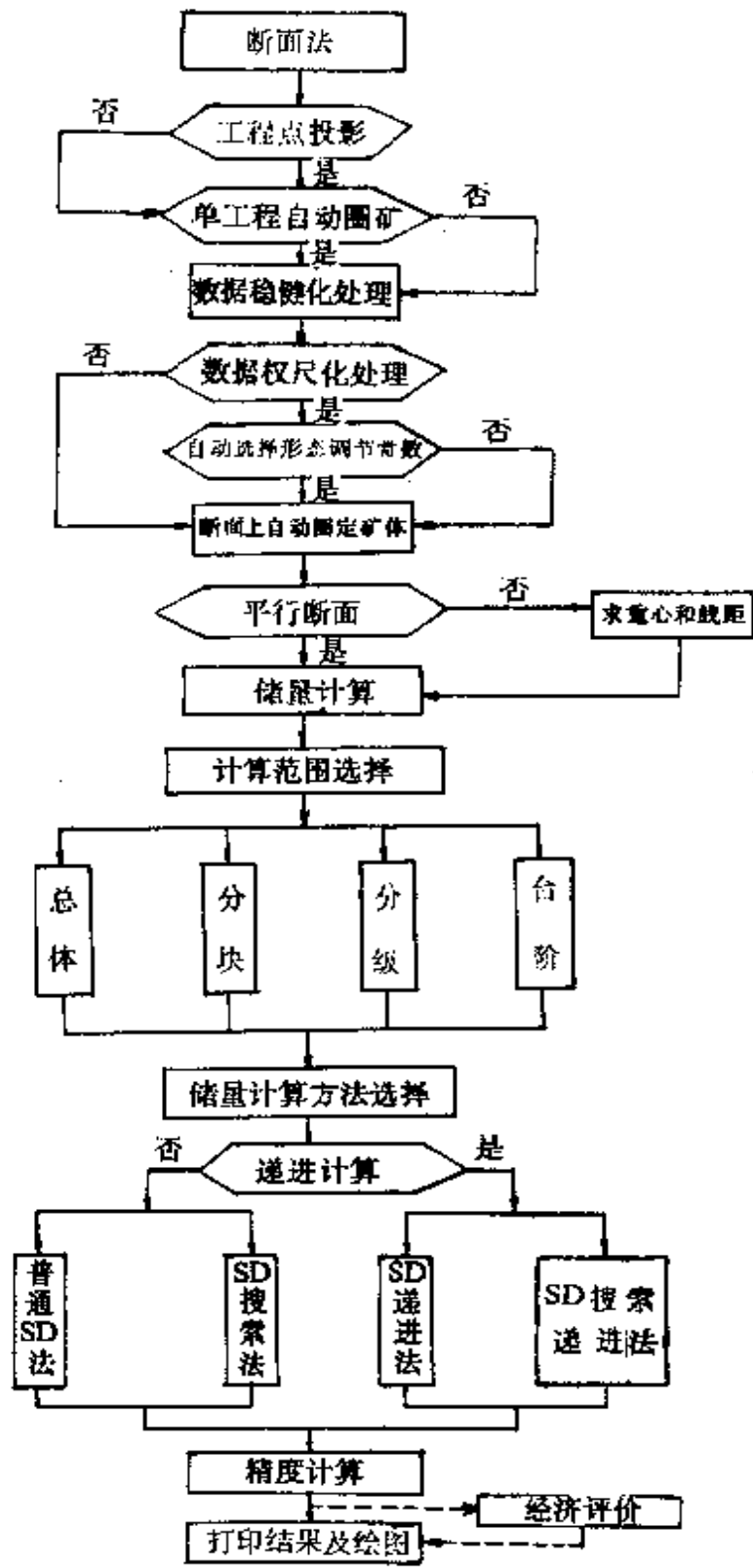
步增大,它的精度也相应随观测点的增多而增高。只要较好地找出这种相应关系,就能比较准确地预测它的精度。SD法通过对7个矿区47种情况的试算,取得了良好的效果(表1-4-8),这说明了SD精度法对储量精度及储量级别具有审定作用。

一体化储量计算,是指从勘查地质工作到矿山地质工作全过程的储量计算一体化,在该计算过程中,始终贯穿差动态计算和审定计算。这种计算减少了储量多层次繁琐的改算工作。

这样,SD法的一套动态审定一体化储量计算,不仅灵活多用,而且计算结果准确可靠。SD精度法对解答储量计算中的这一技术难题做出了突破,显示了SD法的优越性。应该说,SD法是适合我国实情的一种科学的储量计算方法。

矿床技术经济评价是矿产勘查评价工作中的重要内容,也是提交矿产储量报告不可缺少的部分。其内容已超出储量计算法的范围,因而本书只将与SD法有直接关系的合理制定工业指标部分,作为经济评价的内容列入第二篇中。

SD法计算过程可概括为下页流程图。



SD 法流程图

第一章 结构地质变量

结构地质变量是SD法计算矿产储量及其精度的基础变量。构造结构地质变量的目的在于使地质变量的原始数据稳健化,使SD法的计算结果更加准确可靠。本章将引出结构地质变量概念,介绍结构地质变量的形成过程,阐述结构地质变量曲线拟合问题。最后还将讨论地质变量的风暴值问题。

第一节 结构地质变量的概念

矿产储量计算中的地质变量,即储量计算中常用的几个参数,如矿体厚度、矿石品位、有益有害成分、体重等变量,均具有规律性与随机性的两个互相矛盾的性质。规律性反映出地质变量在矿体整体中的变化,这种变化具有空间结构性;随机性反映出各种干扰因素所引起的局部变化,这种变化表现空间离散性。对仅反映出某种地质特征的空间结构及其规律性变化的地质变量,我们称为结构地质变量,简称结构量,记为 \bar{Y} 。结构量所在的空间称结构空间,表述结构空间状态的维^①称结构空间维,记为 $f(\bar{Y})$ 。若 $1 < f(\bar{Y}) < 2$,则结构量的结构空间是一条圆滑的曲线;若 $2 < f(\bar{Y}) < 3$,则它的结构空间是一个起伏的圆滑曲面。结构量是排除随机干扰为着提高储量精度而采用某种计算方法从观测值 y_i 中提取出来的量值。于是,地质变量等于结构量与随机量之和。即

$$y_i = \bar{Y}_i + \varepsilon_i \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (1.1.1)$$

可见,结构量是从地质变量稳健性出发简化了的地质变量。但是,

① 附篇,矿体的分维概念。

地质变量的双重性质绝非简单的加减而能准确地分离的。许多常用的分离方法,多是建立在概率统计学基础上的方法。在概率统计学中,不仅将地质变量视为独立变量,而且要求数据量大,因而必须从大量数据中寻求其规律。地质变量不仅不是独立变量,而且,地质勘查过程中,工程数和取样数也不可能太多,于是,简单地运用概率统计学对其进行分析便遇到了困难。SD法是将地质变量看作是在一定空间范围内相互影响的结构量,它既与它所在空间位置有关,也与它周围的地质变量的大小和距离有关,SD法不是去寻求统计规律,而是用数据稳健处理的方法,将原始数据处理成有规律的数据,将离散型变量转换成连续型变量。为此,SD法不是建立原始数据模型,而是建立权尺化处理后的数据模型。经过权尺化处理后的地质变量即为结构地质变量。其数据模型即是结构变量结构空间的表征。这样,对地质变量进行统计分析,便成为可能。

第二节 权 尺

在讨论权尺化过程之前,首先要建立一种权尺,这种权尺是用来分配地质变量“权”的大小的尺度,权尺使原始地质变量权尺化,形成结构量。

我们知道,对时空序列的连续数据或离散数据,人们常采用平滑手段来消除它的各种误差干扰。几乎所有这些手段,即是求得一种权函数来进行数据平滑。这种函数通常称为窗函数。人们在解决实际问题时,常常根据实际经验采用比较适合的窗函数。因此,在由窗函数确定权的时候,便是多种多样的。在这些窗函数中,除边缘突变的矩形窗,特别三角窗外,几乎都是近似于钟形曲线。表明绝大多数的时空序列数据,均可采用不同的钟形曲线作为权函数进行平滑。我们统称这种钟形曲线为钟形曲线窗。并且,采用这种钟形曲线窗来将地质变量构造成结构地质变量。

地质变量的空间状态,可以看作时间序列。它的空间相关,是“权”的函数。“权”在空间的分布,定义为“同方向上的浓度扩散

态”，中心浓度最大，以非直线型向外减小。例如求空间地质变量 y_i 的结构量 \bar{Y} 时，它本身赋的权最大，逐步向外作非直线型减小。对于在一条线上的测点说来，相隔等间距，距离为 Δh 的两邻相关地质变量 y_1 和 y_2 的空间相关权 λ_k 令其各为 $1/2$ ，相隔等间距，距离为 Δh 的三个相邻相关地质变量 y_1, y_2, y_3 的空间相关权，分别为 $1/4, 2/4, 1/4$ ；距离为 Δh 的同一直线上的四个相邻相关地质变量 y_1, y_2, y_3, y_4 的空间相关权依次为 $1/8, 3/8, 3/8, 1/8$ 。依此类推，当地质变量相关个数在一条线上为 M 个时，它们的空间相关权则为二项式展开后各项系数 C_{M-k}^M 与 2^{M-1} 之比，即

$$\lambda_k = \frac{C_{M-k}^M}{2^{M-1}} \quad k = 0, 1, 2, \dots, M-1$$

M 值称二项式系数直径。空间相关权之和为 1，即

$$\sum \lambda_k = 1$$

这样，在一个方向上空间相关权的分布曲线，近似一条钟形曲线。这就是上述之钟形曲线窗，其权称钟形权，它是空间相关权形态的描述，并用 M 来调节钟形权的形态。空间相关权确定后，即可求得结构地质变量：

$$\bar{Y}_i = \sum \lambda_k y_{i+k} \quad k = 0, 1, 2, \dots, M-1$$

然而，实际取样间隔（如工程、断面）常不等距，上式便受到了限制。由于权分布于整个空间，所以空间任一位置的地质变量（观测值）均能得到权的分配。于是，我们用空间相关权 λ_k 作为此钟形曲线的“解”，将“解”的反函数值投影在一直尺上。此尺便称结构地质变量的权分配尺，简称权尺（为便于区别，称 SD 权尺）。例如，沿一方向（图 1-1-1）有 n 个观测点，欲求第 i 个变量 y_i 的结构变量，则需先求出 y_i 及它两侧各变量权分配的大小。

如图 1-1-1，权尺以中心点 a_0 向左右分别对称地刻有一定距离的刻度，刻点往右依序记为 a_1, a_2, a_3, a_4, a_5 ，往左依序记为 $a_{-1}, a_{-2}, a_{-3}, a_{-4}, a_{-5}$ 。如果实际标准间距为 h ，则诸刻点对于中心点 a_0 的距离 a_i 为：

$$a_i = p_i h \quad (1.1.2)$$

$$i = -5, -4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4, 5$$

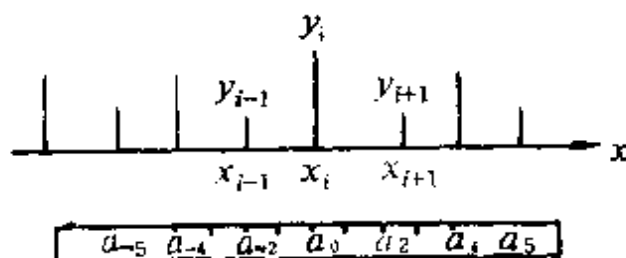


图 1-1-1 用权尺度度各观测值的分配权图

p 是距离系数, 随 M 变化。它是不同 M 值的各空间相关权匹配的权系数。对于某一断面上 n 个观测点来说, 其实际标准间距 h 为:

$$h = (x_n - x_1) / (n - 1) \quad x_1 < x_n$$

对于 x 轴, 可令

$$H_{\pm k} = |x_{i \pm k} - x_i|$$

$i = 1, 2, \dots, n; +k = 0, 1, \dots, n - i; -k = 1, 2, \dots, i - 1$ 。对于区间 $[a_{i-1}, a_i]$ 内的对应权记为 λ_{a_i} 。对于 x 轴上 $H_{\pm k}$ 点以及它的地质变量 ($y_{i \pm k} = f(H_{\pm k})$) 的对应权, 分别记为 $\lambda_{H_{\pm k}}$ 及 $\lambda_{y_{i \pm k}}$; 当

$$a_{i-1} < H_{\pm k} \leq a_i$$

各对应权的相关权为 λ_i , 则

$$\lambda_0 = \lambda_{y_i} = \lambda_{H_0}$$

$$\lambda_1 = \lambda_{y_{i \pm 1}} = \lambda_{y_{i+1}} = \lambda_{H_{\pm 1}}$$

相关权求出后, 即可由下式求出每个断面上各观测值的结构量 \bar{Y}_i 。

$$\bar{Y}_i = \frac{\sum [\lambda_{y_{i \pm k}} \cdot y_{i \pm k}]}{\sum \lambda_{y_{i \pm k}}} \quad (1.1.3)$$

就是说, 地质变量 y_i 的结构地质变量 \bar{Y}_i 等于地质变量 y_i 左右影响范围内诸地质变量与它的对应权的乘积之和除以它的对应权之和。

(1.1.3) 式仅仅是各个断面上诸结构量。对于整个矿区而言,

各断面上各观测点的结构量 \tilde{Y}_i 只是线结构量, 当它能构成自然圆滑的空间分布曲面时, 便是空间结构量。线结构量是在断面线上对观测值(地质变量)经权尺化后的结构量, 它只体现直线上观测点间的结构关系; 空间结构量, 是在线结构量基础上沿其正交方向再权尺化的结构量, 它体现出诸观测点间的空间结构关系。SD 法需要求取空间结构量。

设有 m 条断面, 于是:

1. 对每一断面上的 \tilde{Y}_i 积分, 得断面的线结构量 S_j ;
2. 仿(1.1.3)式, 对 m 个断面的 S_j 求各个断面的结构量 \bar{S}_j ;
3. 最后, 则可得出空间结构量为 \tilde{Y}_{ij} 。

$$\tilde{Y}_{ij} = \frac{\tilde{Y}_i \cdot \bar{S}_j}{S_j} \quad (1.1.4)$$

$$j = 1, 2, \dots, m; i = 1, 2, \dots, n$$

第三节 M 值的求取

前述二项式系数直径 M 值, 是用来作调节钟形权曲线窗形态的参数。钟形权构成的钟形曲线窗的形态应由矿体地质变量的变化程度来确定, 因此, 钟形曲线窗的形态是变化的, 用 M 值对它调节后能够获得理想的结构地质变量。它是后面要讨论的稳健样条曲线的基础。

可见, 权的分配, 必须考虑地质变量的空间相关。可以认为, 地质变量的空间变化较小时, 其空间相关性大, 反之则相反。这样, 可用大家熟悉的基本能够反映地质变量的变化复杂程度的差商原理, 求取 M 值。为了量纲的统一, 采用差商正规化原理处理。

设空间有序的取样系列为 Y :

$$Y = \{y_1, y_2, \dots, y_n\}$$

对应的坐标为 X :

$$X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$$

观测值差商为 Δy_i :

$$\Delta y_i = \frac{y_{i+1} - y_i}{x_{i+1} - x_i} \quad (1.1.5)$$

其差商正规化后为 Δy_i^* ,对于每断面之差商正规化值求均值 $\overline{\Delta y_j^*}$:

$$\overline{\Delta y_j^*} = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^{n-1} \Delta y_i^*$$

对于计算总体(矿体)的均值 $\overline{\Delta y^*}$:

$$\overline{\Delta y^*} = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m \overline{\Delta y_j^*} \quad (1.1.6)$$

m 为断面线数, n 为每条断面线上的工程数。 $\overline{\Delta y^*}$ 是计算总体观测值差商正规化值之均值。 $\overline{\Delta y^*}$ 是在 0—1 之间的变化量。它的大小反映地质变量在相邻空间的离散程度,为削减由这种“离散”引起的误差,而将 0—1 区间划分为若干个子区间。 $\overline{\Delta y^*}$ 若靠近 1 的子区间,则表明矿体变化较大,矿化连续性较差,此时应采用较小的 M 值。不同之计算总体的 $\overline{\Delta y^*}$ 在 0—1 区间落点频率并非均等,而常呈加速度变化。于是,可以设计出在等时区内的 $\overline{\Delta y^*}$ 落点频率区间——差商正规化区间。令 T 为差商正规化区间端点值。则

$$T_l = \left(\frac{1}{k}l\right)^2 \quad l = 1, 2, \dots, k \quad (1.1.7)$$

k 为区间数。当 k 值增大时,即区间数增多,区间范围则缩小。若 k 值越大,选取 M 值可靠程度越大。经大量实际计算证明,可靠程度随着 k 值递增而变化较慢。因此,没有必要设用较大的 M 值。一般说来,设四个区间,即能满足要求,即 $k=4$ 时,(1.1.7)式变为:

$$T_l = \frac{1}{16}l^2 \quad l = 1, 2, 3, 4 \quad (1.1.8)$$

有 $T_1 = 0.0625, T_2 = 0.25, T_3 = 0.56, T_4 = 1.00$ (图 1-1-2)

于是令

$$M = \begin{cases} 11, & 0 < \overline{\Delta y^*} \leq 0.0625, \\ 9, & 0.0625 < \overline{\Delta y^*} \leq 0.25, \\ 7, & 0.25 < \overline{\Delta y^*} \leq 0.56, \\ 5, & 0.56 < \overline{\Delta y^*} \leq 1.00. \end{cases}$$

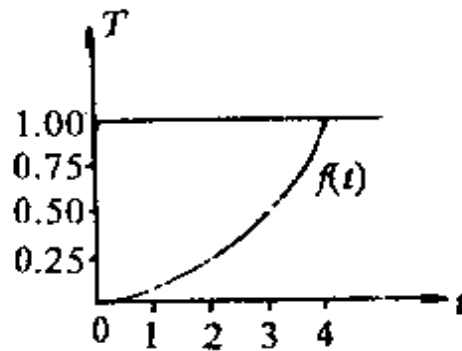


图 1-1-2 差商区间端点值曲线图

依据前面权尺原理,求得四组 M 值的权系数 p_i (见表 1-1-1)。

表 1-1-1 权尺比值及权尺分配表

j	λ_j	a_j	M			
			5	7	9	11
0	$\lambda_0=5$	a_0	0	0	0	0
1	$\lambda_1=4$	$a_1=a_{-1}$	0.75	0.80	1.00	1.10
2	$\lambda_2=3$	$a_2=a_{-2}$	1.10	1.25	1.50	1.70
3	$\lambda_3=2$	$a_3=a_{-3}$	1.45	1.70	2.00	2.20
4	$\lambda_4=1$	$a_4=a_{-4}$	1.90	2.30	2.65	2.85
5	$\lambda_5=0$	$a_5=a_{-5}$	>1.90	>2.30	>2.65	>2.85

第四节 结构地质变量曲线

结构地质变量的求得,仅仅是为储量计算提供可靠基础数据,SD 法储量计算还需要通过结构地质变量曲线来实现。

结构地质变量曲线,就是在工程坐标或断面坐标上过已知的以结构地质变量为点列所作的光滑曲线。简称结构量曲线,前者称面结构量曲线,后者称体结构量曲线。它们的形态反映地质变量在空间的变化规律。构造出结构地质变量曲线,是 SD 法储量计算中

第二个重要课题。

求过结构地质变量的点列的曲线,是数学拟合问题。既然结构地质变量是自然光滑曲线,我们就可以采用三次样条函数(Spline)拟合。

如果结构地质变量曲线 $F(X)$ 存在,则可用三次样条函数 $S_d(X)$ 逼近。

$$S_d(X) \approx F(X)$$

三次样条函数数学表达式(利用节点 x_i 上对应型值点 y_i 的二阶导数 M_i 表达):

$$\begin{aligned} S_d(X) = & M_{i-1} \frac{(x_i - x)^3}{6h_i} + M_i \frac{(x - x_{i-1})^3}{6h_i} \\ & + (y_{i-1} - \frac{M_{i-1}h_i^2}{6}) \frac{x_i - x}{h_i} \\ & + (y_i - \frac{M_i h_i^2}{6}) \frac{x - x_{i-1}}{h_i} \end{aligned} \quad (1.1.9)$$

$x_{i-1} \leq x \leq x_i$, $i = 2, 3, \dots, n$, h_i 为节点间距。

(1.1.9)式的 M_i 用追赶法求得(请参看有关样条函数书籍)。一条线上有几个节点,共有 $n - 2$ 个方程,要唯一地确定一组 M_i , 并要给出两个端点条件。

端点条件是指曲线两端弯曲及弯曲的情况。不同情况的差异对曲线形态影响极大。

端点条件是根据曲线代表的具体内容而定。数学上是指曲线端点的一阶、二阶导数值,或其它曲线性状的值。对于矿体,我们表示它的厚度、品位、体重、储量、面积等量值在边部变化的情况。当端点条件已知时,即可给出。但矿体的勘探过程中,这些端点条件常是未知的。因此,我们常用自然端点条件,即假设它的两边端点的二阶导数为零。

当设备条件差,没有电子计算机及辅助设备时,结构曲线可以人工绘制,一般用压铁法、钉钉法,即绘图员将一批给定点固定在图板上用有机玻璃条、细钢条、竹条、木条等(统称样条),沿这些点连成一条光滑曲线。

我们利用直角坐标原理,设计了样条仪,并用此仪绘制了贵州省 GC 石灰岩矿床储量计算中的全部曲线,同时,它的储量计算也是以这些曲线为依据的。计算结果尚好。

电算过程中,一切自然结构量曲线均由机器绘出,无需人工绘制。

第五节 原始数据的稳健性处理研究

数据权尺化, M 值的求取,以及曲线拟合过程,均属数据稳健性处理过程。本节的稳健性研究,重点讨论风暴值的处理过程。其风暴值主要指风暴品位值。

一、风暴品位值的识别与处理

SD 法虽然不去寻求原始数据的统计规律,而用稳健处理数据的方法,将原始数据处理成有规律的数据,但是,SD 法仍然要求取所给数据的合理均值。

所谓风暴品位值,相当于习惯上称的特高品位值。但是特高品位值的“特高”仅对平均品位而言,而风暴品位,不仅对平均品位,还对相邻品位而言。某些时候,特高品位不一定是风暴品位,而风暴品位必定是特高品位。

储量计算中,一般都要采取对风暴品位的处理措施。目前处理方法多种多样,基本上分为两类,或是修改数据以适应方法,或是修改方法以适应数据。如果只是为了总体均值的稳定性,单独采用哪类方法,一般说来效果都不会差。

SD 法计算储量的精确程度与数据所处的空间位置有关。因此,必须修改数据以适应 SD 法的特定方法。

1. 风暴品位值的识别

处理风暴品位值,首先应识别什么样的品位值算是风暴品位值。

据前所述,这里说的风暴品位值,不管它的成因如何,是否是异常值? 只要同时具备以下两个条件,便可视为风暴品位值。

(1)将全体品位由小到大排序,若有风暴值,必位于序尾。由统计学得知,它的个数,一般不会大于总体样本数的3%。由于SD法不是从统计规律而是从样本的空间位置状态出发,考虑到不致于计算结果的失真,于是,以总样个数的3%为风暴品位值的可疑区。如图1-1-3所示。划入此可疑区的样品值被认为是风暴可疑值。

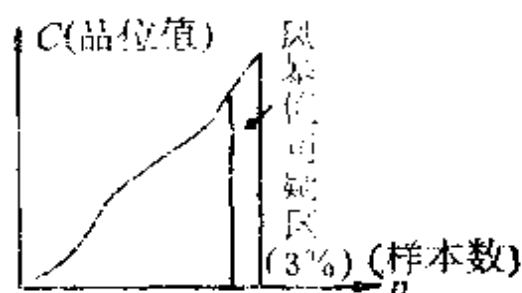


图 1-1-3 序列品位曲线图

(2)风暴值不仅“特高”,还必须是在它的具体位置上形成“风暴”。当风暴可疑值的观测点与它邻域观测点的距离小于各观测点间的平均距离,并且风暴可疑值与它邻域内的样品值构成样条曲线时,如果曲线强烈震荡,以致出现负值,此风暴可疑值,即可确认为风暴值,如图1-1-4所示。 c_4 即为风暴值。

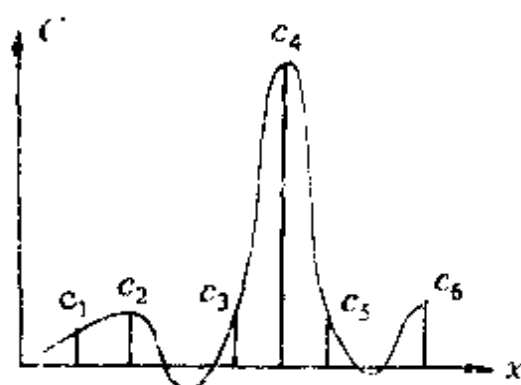


图 1-1-4 风暴品位曲线图

例如云南个旧马拉格老阴山铅矿,计算范围内 119 个工程取样点。将 6 个最高品位值列为风暴样品可疑值。然后再将此 6 个值,分别置于它的取样位置上,进行样条函数“扫描”。结果,只有第二条勘探线的最后一个工程品位值 49.75%使曲线强烈震荡而呈

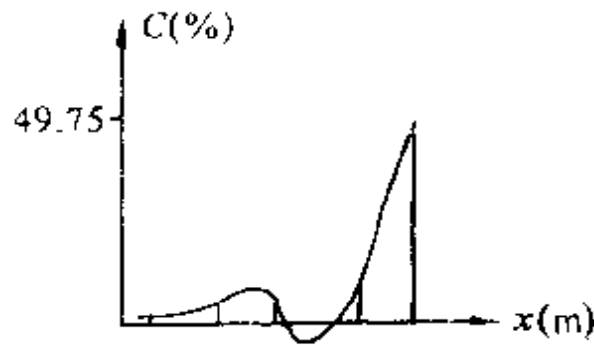


图 1-1-5 老阴山铅矿第二线品位曲线图

负值(图 1-1-5)。因此,可以判定 49.75%为这个矿体的风暴品位值。

2. 风暴品位值的处理

SD 法修改风暴品位值的办法是,在权尺化过程中将风暴品位值削减,然后将削减值替代风暴值,置于原始数据中,参与计算。

众所周知,削减风暴值,不是否定风暴值的存在及它对矿区的有益贡献,而仅仅是为着计算的稳健性、增强计算结果的可靠性采取的一种技术措施。风暴值的存在具有特殊的地质和经济意义,是地质人员重点分析研究的问题。

二、数据处理的稳健性效果

地质变量的随机性必然会导致计算结果出现误差。这种误差是由于计算方法不能完全适应随机性而引起的。误差越大,说明它的适应能力越差。这种适应能力的研究,就是数据处理的稳健性研究问题。对于有风暴值存在的一组数据,如果用算术平均求均值,这种均值的误差一定很大,显然,在这种情况下,算术平均的稳健性是很差的。

稳健统计学是近 20 年才迅猛发展起来的一门学科,它对于一

个总体内隐含有风暴值的变量,有很好的统计识别能力(请参看有关稳健统计学方面书籍)。我们对老阴山铅矿第二线不等间距的五个工程平均品位值(3.462%, 3.430%, 5.000%, 8.750%, 49.750%),用不同方法计算均值(表 1-1-2)。

可看出,稳健统计学的稳健回归分析,对这种点列数据,不仅能鉴别出第五点的值(49.75%)为风暴值(稳健统计学称异点),而且由它参予计算的平均品位(6.016%)也是十分理想的。它与 SD 法权尺化系列数据的均值(6.175%)很相近。显然,数据由稳健回归计算或者经过 SD 法处理之后,均能得到理想的结果。

表 1-1-2 老阴山铅矿第二线平均品位计算对比表

计算方法		平均品位(%)	备注
算术平均	全部样品	14.0780	
	剔除第五个样品	5.1600	
算术加权平均	全部样品	9.1410	
最小二乘法	同上	14.1950	
中位数	同上	5.0000	
稳健统计回归	正弦估计 $C=1.0$	同上	C 为调节常数,此品位由周蒂博士计算
	双平方估计 $C=3.5$	同上	
SD 法计算	原始数据系列	同上	
	权尺化数据系列	同上	

上述例子,是点列数据比较简单情况。当点列数据较为复杂时,稳健回归计算的效果就不一定好。这时,用稳健样条函数便能获得好的效果。

稳健样条函数在国外目前还处于探索阶段,它的理论和应用均不够成熟。我们所作的SD法权尺化数列的样条函数调节拟合,应归属于稳健样条函数。它无论对大挠度曲线,或小挠度曲线,无论对小样本数据或大样本数据,都能获得较好的效果。

下面用一个不含风暴值的例子——云南里士铜矿A矿段进行分析。

这个矿段有29个工程取样点,数据结构比上述例子复杂得多。用不同方法计算的结果如表1-1-3。

表 1-1-3 里士铜矿 A 矿段平均品位计算表

资料来源	计算方法	平均品位(%)
勘 探 资 料	算术平均	1.796
	中位数	1.811
	稳健 M 估计	1.730
	稳健 R 估计	1.850
	克立格法	1.855
	传统储量计算法	2.230
	SD 法	原始数据系列
权尺化数据系列		2.027
生助资料	开采统计均值	2.050

由此看出,不同的计算方法的稳健性是不同的。SD法均值小于传统储量计算法均值,大于其它方法均值,并且十分理想地接近开采时大量数据的统计均值。此时,稳健M估计、稳健R估计、克立格法等估计均值是偏小的。29个样本属小样本。克立格法对小样本的估值不一定理想,在这里得到证实。稳健统计学对均值的M估计和R估计,在此只是当成独立变量进行稳健统计的估计,没考虑29个点的空间相关性。这样,除因29个样本属小样本外,其取样点位的不均匀性,使得它的估计均值与开采过程中的大量取样统计均值相差甚大。这里的稳健统计估计均值,在稳健统计学中称“位置”,它是指一个数据总体分布中心的位置。

从本书后面的几个矿床储量计算例子中,也可以看出,SD 法计算品位均值,是符合客观实际的。

由此看来,结构地质变量,是采用一系列稳健性处理措施将原始地质变量匀化了的变量。它不是客观存在的具体变量,客观存在的变量仍是由随机性和规律性组构的地质变量。使用结构地质变量,除了为着计算结果精确可靠外,还在于摆脱使用概率统计方法的置信度而代之于 SD 法精度。后一个问题将在第四章讨论。

第二章 矿体圈定

所谓矿体圈定是指:在地质体中圈出化学元素或矿物具有异常含量的矿体,在矿体中圈出各品级矿石、不同矿石类型、以及不同储量级别、表内表外矿段。除储量级别是按照多种因素来圈定外,其它都是按照矿产工业指标来圈定。例如,按照边界品位和最低工业品位圈定表内、表外储量的矿体。本章只讨论按工业指标来圈定矿体。不同储量级别的矿体圈定,将在第四章讨论。

第一节 工业指标与矿体圈定

在实施SD法的过程中,工业指标的含义与传统储量计算法基本一致,而在矿体圈定的具体处理过程中则与传统法有所不同。

SD法选用了以下指标:边界品位、最低工业品位(工业品位)、最低(小)开采厚度(可采厚度)、夹石剔除厚度、最低工业米百分率(米百分值)以及有害组分含量等。最低工业米百分率不仅用于脉状矿的储量计算,在其它矿床的储量计算中,也可用来处理工业矿体的划分及表内表外储量块段的划分。

这些指标,一般是在储量计算前根据实际需要而给定。SD法不讨论工业指标的确定问题,而仅仅提供一些确定工业指标的依据。

给定工业指标后,即可圈定矿体。

在国外,一般采用单一的边际品位。它近似于传统法的最低工业品位,或入选品位。这种边际品位不用来圈定矿体自然边界和确定矿体形态,而作为衡量某一矿房(块)中品位的尺度。矿房(块)是人为规定的规则几何体,如正方体、长方体等。由于传统法要圈出矿体的形态,所以它一般规定边界品位、最低工业品位两个品位指

标作为衡量尺度。在储量计算圈定工业矿体时,一般的文献对边界品位的定义为“对单个样品中有益组分含量的最低要求”。就是说,这一定义,只体现出边界品位对单个样品品位起作用的职能。实际上,边界品位不仅仅是对单个样品品位的最低要求,而且也是对在圈定矿体边界时的品位最低要求。因此,它具有既对单个样品品位起作用,也对整个矿体(或矿段)品位起作用的两个职能。并且,在圈定矿体时,后一职能比前一职能显得更为重要。SD法特别强调了后一职能的作用,在圈定矿体时SD法采取了两种方案。第一种方案是:如果单工程样品中有品位达到最低工业品位者,则此工程圈定的平均品位,在保证最小可采厚度的条件下,应大于或等于最低工业品位。这种方案基本上传统法的方案。但是,SD法一般不作权尺化处理,它的矿体连结法是曲线连接,并由样条函数拟合计算,故而它比传统法要精确。第二种方案是:不考虑样品中是否有达到最低工业品位的样品,而笼统地只用边界品位、夹石剔除厚度和可采厚度为指标来圈定矿体。这种方案近似于国外的单指标圈定矿体的方案。圈出的单工程平均品位可能大于最低工业品位,也可能低于边界品位。使用这种方案圈定矿体,SD法一般要进行权尺化处理,然后进行储量计算。此外,考虑到矿体的连续完整性和计算的准确性,SD法对那些不同于零值(无矿化)的工程,而低于边界品位又高于背景值的工程圈出了矿化体。零值工程、矿化工程和矿体工程在储量计算中起着同等信息的作用。但三者的性质各不相同。

单工程矿体圈定后,接着是工程间(断面上)圈定矿体。

在单工程中,如果矿体矿化体严格受层位控制,或者它的矿化标志在空间延展上十分明显,则采用上述第一种方案圈出的矿体

应划定表内表外矿界线,这时在断面上就可圈定出表内表外矿体^①(图 1-2-1)。矿体圈定主要是根据构造或地层的“界限层”来确定。

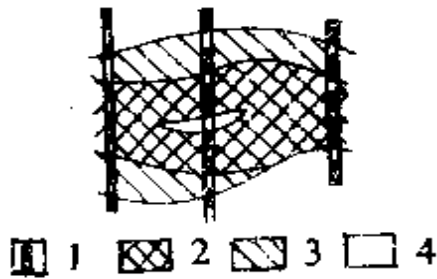


图 1-2-1 断面上表内表外矿体圈定图
1—取样位置;2—表内矿;3—表外矿;4—夹石

如果矿体矿化不严格地受层位控制,矿体形态也不是规则地呈层状、似层状产出,则矿体圈定就比较复杂。对于这种空间上矿化强弱极不均匀的矿体(图 1-2-2),倘若一定要在单工程中圈出表内表外矿,并与邻工程相连圈出矿体,则圈出的这种矿体形态常是假态的。



图 1-2-2 矿化极不均匀的矿体圈定图
1—取样线;2—矿体;3—矿化

譬如,一些内生金属矿床,许多情况下它具有“层”的状态,但这个“层”是极不稳定的。其“层”的状态可用自然界的云层来形容,云层的浓淡厚薄各处差异甚大,云层的“浓淡”比喻品位的高低,云

^① 通常把工业上能利用的矿石储量,称为表内储量。属暂不能利用的矿石,它的储量作暂不能利用储量,并称之为表外储量。而对于“能利用矿石”没有简称。本书为叙述方便,分别称表内储量的矿石(体)为“表内矿(体)”,表外储量的矿石(体)为“表外矿(体)”。

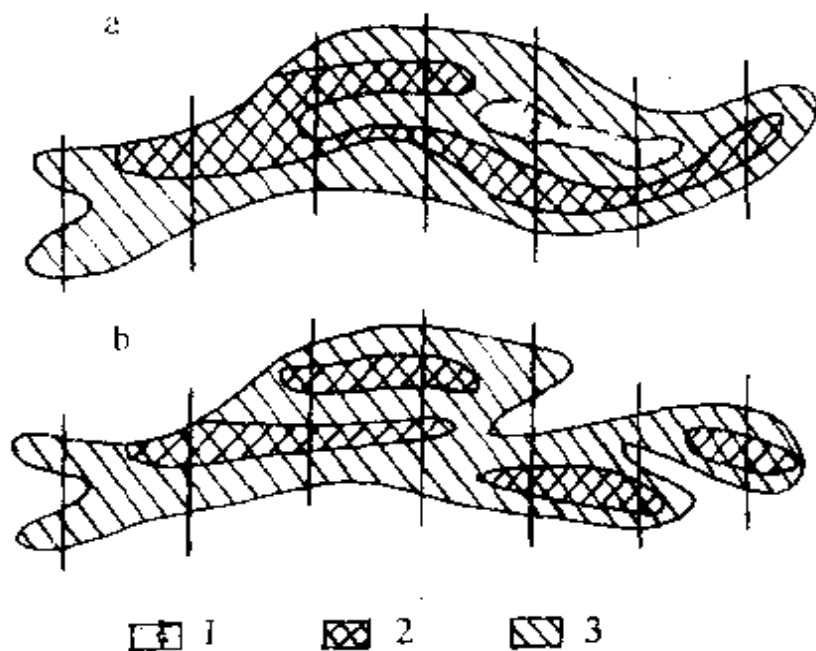


图 1-2-3 断面上采用不同连接法绘成的矿体图
1- 工程取样线; 2- 表内矿; 3- 表外矿

层的厚薄比喻矿体的厚度。取样见矿的工程多是一孔(井)之见, 离它之外, “浓淡厚薄”立刻发生变化, 即使用工程中的表内表外矿向外拓延连成规则形体, 人为因素也很大。由这种状态计算出来的表内表外储量, 常是不可靠的。但是, 为了直观起见, 又不能不在图上绘出矿体来。

对矿体的不同认识可产生不同的矿体连接法。如图 1-2-3a、b 两种矿体连接法。二者矿态各异, 哪一种连接法更符合实际, 还很难说。但无论何种方式绘出的矿体图只能作为分析研究时的参考和借鉴。除非地质研究过程对此矿体形态认识十分清楚, 一般说来, 其形态是难以肯定的。

SD 法主要是以第二种圈矿方案为出发点, 根据工程取样提供的的数据信息, 经过处理, 直接用数学模型计算储量。而不是根据图上绘成的矿体面积、甚至画出的表内表外矿体面积来计算储量。SD 法是建立在结构地质变量的思想基础上的, 认为矿体矿化在空

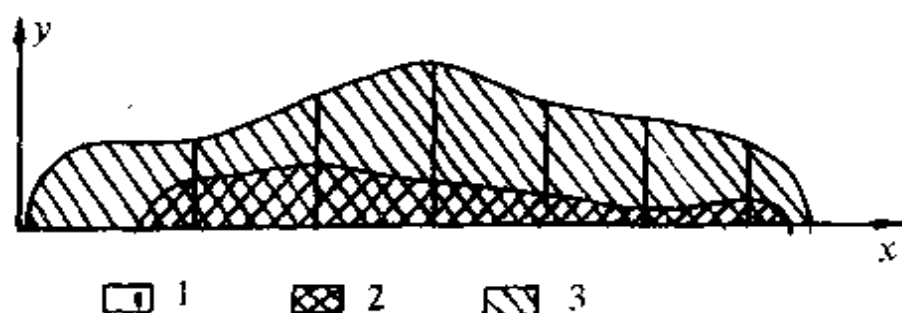


图 1-2-4 矿体厚度坐标曲线图
1—矿体厚度；2—表内矿；3—表外矿

间具有连续性,矿体在它各个部位的厚度和品位变化,应满足一定曲线关系式。如果说,断面上绘出的矿体合理的话,则工程间大范围内矿体总体厚度的变化应该由曲线插值得到检验。图 1-2-4 是以图 1-2-3 断面上工程揭露的矿体累积厚度作为观测值的厚度坐标曲线图。曲线上任一点的插值,对应于矿体断面图中相应位置上的厚度。经过插值检验可确认矿体连接的合理性。这样,不仅能使 SD 法的计算值与断面上绘成的矿体面积值基本吻合,做到文图一致,而且能使绘出的矿体断面比较准确地反映客观实际。

由上述可知,SD 法在确定矿体形态时,不是从边界品位才开始的,而是从矿化就已经开始了,边界品位是人为确定的界限,而矿化是自然现象。矿化与矿体之间是连续的,它们之间的界线是由品位的工业指标来确定。如图 1-2-5,设 $f(x)$ 表示品位沿着空间 x 方向的变化曲线。如果边界品位定为 C_1 时(图 1-2-5a),则 $f(x) \geq C_1$,曲线 $f(x)$ 下面围成的面积构成一个矿体。如果边界品位定为 C_2 时(图 1-2-5b),使得有两部分的 $f(x) \geq C_2$,故此时已为两个矿体,而画点部分的 $f(x) < C_2$,由原来的矿体域变为矿化域。如果 C_1 代表边界品位, C_2 代表最低工业品位(图 1-2-5c),则曲线的斜线部分就成了表外矿体域,网格线部分为表内矿域。同样,也可视 C_1 和 C_2 为不同的品级、贫富矿石的界限,若 C_1 为贫矿下限, C_2 为富矿下限,则图 1-2-5c 中斜线部分为贫矿域,网格线部分为富矿域。由此可知,矿体随动态的边界品位而变化。若动态地确定工业指

标,就可动态地圈定矿体,也就可计算动态的矿体储量和精度。

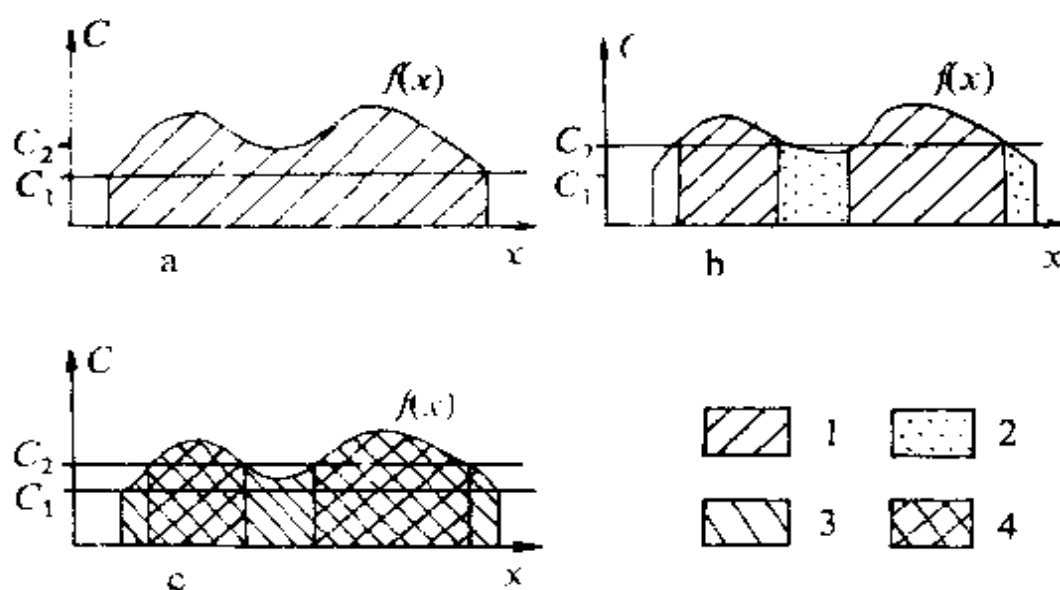


图 1-2-5 矿化矿体动态变化曲线图

1—矿体域;2—矿化域;3—表外矿域;4—表内矿域

以上仅仅是从品位角度讨论了矿化和矿体以及矿体的贫富和品级的问题。实际上,我们在断面上确定矿体域和非矿域或矿化域,表内矿域和表外矿域等,皆是由几个工业指标同时确定,亦即需要满足各个指标条件才能定义各种相应的“域”。

图 1-2-6 是用断面上矿体的品位、厚度值投影到直角坐标系的品位曲线和厚度曲线图。用最低工业品位、边界品位和可采厚度等工业指标作为衡量的尺度,对其进行扫描(搜索),曲线各部位的取值与相应指标进行比较,确定矿与非矿的“域”。图 1-2-6 中 a、b、c、d 表示 x 轴上各区间与厚度曲线构成的 a、b、c、d 域。a 区间内厚度曲线取值大于可采厚度 H ,品位曲线取值大于或等于最低工业品位 C_2 ,故由对应的品位、厚度曲线及 a 区间构成表内矿域。b 区间内品位曲线取值均小于最低工业品位 C_2 ,大于边界品位 C_1 ,同时厚度曲线取值大于等于可采厚度 H ,而构成表外矿域。d 区间品位曲线取值小于工业品位 C_2 ,同时厚度曲线取值小于可采厚度 H ,构成非矿域。c 区间的品位曲线取值虽大于最低工业品位 C_2 ,但厚度曲线取值小于可采厚度 H ,形成可疑矿域,需由米百分率

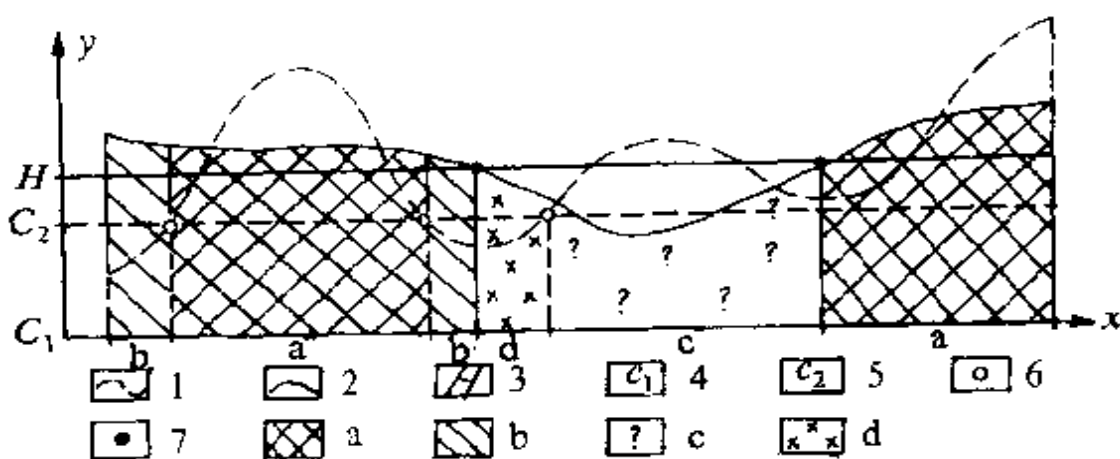


图 1-2-6 断面上由工业指标圈定的矿块曲线图

1—品位曲线；2—厚度曲线；3—可采厚度线；4—边界品位线；
5—工业品位线；6—品位曲线与工业品位线交点；7—厚度曲线与可采厚度线交点
a—表内矿域；b—表外矿域；c—可疑域；d—非矿域（或矿化域）

或其它指标来确定是矿域或非矿域。

下面举一个由可采厚度、夹石剔除厚度、边界品位、最低工业品位等四个指标来动态圈定矿体的例子。如里士铜矿 A 块段，当可采厚度为 1m，夹石剔除厚度为 2m，最低工业品位定为 0.5%，分别取不同的边界品位，如 0.3%、0.4%、0.5%时，SD 搜索法计算出对应的动态总储量及动态的表内外储量。当边界品位分别定为 0.3%、0.4%、0.5%时，变动工业品位后计算出相应各边界品位动态的总储量及动态的表内表外储量，详见本书的表 2-3-4。类似地，任意变动各种工业指标，也可得各种相应的储量。这对合理地确定工业指标及矿床技术经济评价，对矿山设计和生产管理都十分有用。

值得指出的是：不管是否先在单工程中圈出表内表外矿体，使用同样的边界品位和工业品位计算出的矿石量及总金属量、品位结果是一样的，但表内表外矿石量及金属量、品位值却有差异。如表 1-2-1。

表 1-2 1 里士铜矿 A 块段不同圈定方案储量计算对比表

矿体圈定方案	边界品位 (%)	工业品位 (%)	SD 法计算量	矿石量 (±)	品位 (%)	金属量 (±)
SD 搜索法 第一种方案	0.4	0.5	总量	403915.80	2.179	8800.493
			表内量	388255.00	2.249	8732.500
			表外量	15660.80	0.434	67.990
SD 搜索法 第二种方案	0.4	0.5	总量	403915.80	2.179	8800.490
			表内量	401966.50	2.187	8791.721
			表外量	1949.25	0.450	8.772

表 1-2-1 是里士铜矿 A 块段在同样的工业指标的状况下,单工程中先圈矿(SD 法第一种方案)和单工程中不圈矿(SD 法第二种方案)两种方案对比计算的结果。后者(第二种方案)比前者(第一种方案)获得更多的表内储量,减少较多的表外储量。事实上,该矿的 A 块段在备采量中几乎全是表内储量,说明在此采用第二种方案比第一种方案更符合实际。这是因为,里士铜矿虽具有一定层位,但表内表外储量的矿体并不严格受层位控制,断面上工程之间的矿体分层是困难的,所以,在单工程中圈出表内表外储量的矿体,意义不是很大,对于这类矿床,用第二种方案圈矿才是正确的。

第二节 矿体边界线的圈定

能否准确地圈定矿体边界,对于矿体储量计算的精确程度是十分重要的。因此,储量计算涉及到矿体边界的确定。

矿体边界的确定,取决于厚度和品位两个因素,即是说,它的厚度和品位要满足工业指标要求,其边界才有意义。据此,应首先设法计算出外推点,即圈定范围边界上的厚度、品位,然后考虑它是否满足工业指标要求。当它满足时,则承认外推边界;当它不能满足时,则要重新计算矿体边界,直到此边界上的厚度、品位满足工业指标要求为止。为此,要求构造出合理的求工程外矿体边界厚

度、品位的边值数学模型。

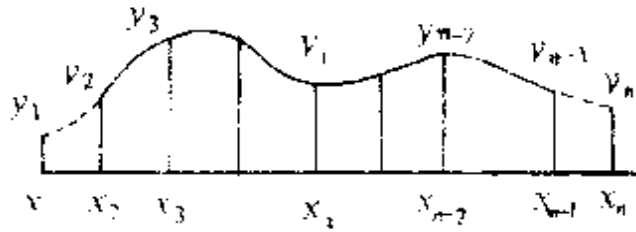


图 1-2-7 结构曲线外推预测点图

在前文中求得的结构地质变量曲线只是在工程控制范围内的曲线,既然结构曲线是连续光滑的,那么,它在端点上向外延伸也应是连续光滑的,也即它的结构曲线存在。如图 1-2-7, x_1 为左端外推点, y_1 为 x_1 处的厚度(或品位), x_2 、 y_2 分别为已知左端点坐标和该端点处的厚度(或品位)值, x_3 、 y_3 分别为左端点内第一个节点坐标和节点上的厚度(或品位)值。根据上面的外推原理, (x_1, y_1) 、 (x_2, y_2) 、 (x_3, y_3) 三个邻点是在一单调下降或上升的曲线上。于是我们有如下外推点数学模型: $y_1 = y_2 + k_1$

根据定义可以看出, k_1 是修正值,

$$k_1 = \frac{h_1}{\beta(h_1 + h_2)}(y_2 - y_3)$$

其中:

$$k_1 \begin{cases} < 0, & y_3 > y_2 \\ = 0, & y_3 = y_2 \\ > 0, & y_3 < y_2 \end{cases}$$

于是:

$$y_1 = y_2 - \frac{h_1}{\beta(h_1 + h_2)}(y_2 - y_3) \quad (1.2.1)$$

β 为校正系数, $\in [2, 4]$ 。

(1.2.1)式是左端边界公式,同理,可得右端边界公式:

$$k_n = \frac{h_n}{\beta(h_{n-1} + h_n)}(y_{n-1} - y_{n-2})$$

$$y_n = y_{n-1} + \frac{h_n}{\beta(h_{n-1} + h_n)}(y_{n-1} - y_{n-2}) \quad (1.2.2)$$

外推点预测值 y_1 (或 y_n) 代表了矿体厚度和品位两重含义, 那么, 求取 y_1 (或 y_n), 应同时满足边界品位和可采厚度的要求, 或者米百分率的要求, 若不能满足, 则调节外推点, 直到能满足为止。

第三节 断面投影误差

前面讨论的矿体圈定, 是在断面(剖面)已经构成的情况下进行的, 就是说, 所有观测点以及矿体的界线, 都是置于断面上的。然而, 实际情况没有这么理想, 观测点(工程中的见矿点)常常偏离规定的断面。传统法是将这些不在断面上的点按最短距离法投影在断面上。这样, 不免造成人为的误差。这就是断面法的不足之处。误差的大小, 是对偏离程度的描述。偏离程度越大, 误差也越大。这种误差的正负误差可以自然抵消。因此, 传统法不太考虑它的误差, 而只是规定了投影的距离不能太远。但在很多情况, 这种误差未必会自然抵消。看来难于找到一种万能而无缺陷的储量计算方法。SD 法在处理这个问题时引入了从定量角度来描述偏离程度大小的尺度——投影误差 e 。这种误差受以下因素的影响:

(1) 投影的距离 Δh 越大, 误差 e 越大。误差 e 与投影距离 Δh 成正相关。

(2) 如果诸见矿点的累计投影距离 h 和平均投影距离 $\bar{\Delta h}$ 越大, 则误差越大。

(3) 在累计投影距离相等条件下, 计算范围越小, 则误差越大。

误差 e 与范围(用面积 S 表示)成反相关。 Δh 的影响范围应该是 $(\Delta h)^2$, 累计投影距离 h 的影响范围应该是 $\Sigma(\Delta h)^2$ 。于是有:

$$e = \frac{\Sigma(\Delta h)^2}{S}$$

若 $e \geq 0.1$, 则断面法计算效果较差。此时可结合其它储量算法, 如克立格法或最短距离法作储量计算, 综合分析, 得到判别结果。

第三章 储量计算

从前文的 SD 流程图得知,储量计算范围的选择和计算方法的选择是 SD 法储量计算重要的两部分内容。范围的选择,体现了 SD 法应用的灵活性,即可以满足使用部门对储量计算块段范围、品级、级别等多种多样的要求。计算方法的选择,表现了 SD 法的适应能力。对不同矿床类型,矿体规模、产状,不同地质勘查工作阶段以及各种计算范围的划分,几种 SD 计算方法均能适应。本章重点讨论这几种 SD 计算方法——普通 SD 法,SD 搜索法,SD 递进法。

第一节 储量计算中基本参数的求取方法

一、基本公式及其求取方式

在我国,储量计算中常用的基本公式是:

$$\begin{cases} Q = VD \\ P = CQ \end{cases} \quad (1.3.1)$$

式中 Q 为矿石(储)量; P 为金属(储)量,或有用组分(储)量; V 为矿体体积; D 为矿石体重; C 为矿石品位。

其中 V 、 D 、 C 三个参变量最为重要,几乎所有的储量计算法都必须求取这三个量。进而,如何准确地求得这三个量是判别储量计算法优劣的重要标准。

在对传统断面法做了全面改造的同时,SD 法仍然沿用这基本公式,必须求取 V 、 D 、 C 这三个变量。不过,SD 法的求取方式与传统法不同。这就是说,在储量计算中,SD 法立足于传统法而又改造传统法。

我们知道,地质矿体的空间构形均可用断面来表示,地质变量

的空间结构也可用断面来表示。这种以断面构形代替空间构形的思想,是SD法立足于传统的核心思想,故而SD法也是一种断面储量计算法。

断面线(勘探线)可以是平行的,也可以是不平行的,或呈扇形分布。SD法不受它们分布状态的限制。

对于矿体的诸地质变量,如品位、体重、矿石量、金属量以及空间量等,都可以将它们转化为点、线、面、体结构量。对于点、线量,可沿用传统的加权法求得,再将求得的结果处理成点、线结构变量。对结构变量及结构变量曲线积分可得到面、体结构量。一次积分得到面结构量,二次积分得到体结构量。

SD法在断面上求矿体面积时,不是直接用它的形态,而是用施行几何形变后的形态。如图1-3-1。这种形变,并不直接绘出形变过程,原始形态也不一定确知,我们只要知道几何形变后的形态。这种形态是在储量计算后得出的。

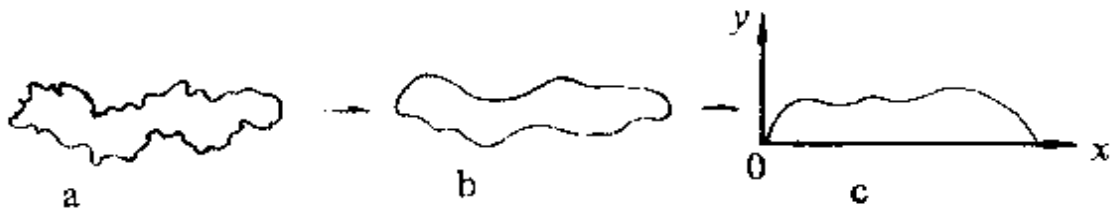


图 1-3-1 矿体形态的几何形变过程

a—矿体原始形态;b—边界圆滑后的形态;c—几何形变后的形态

可以证明,经几何形变的 XOY 坐标系统的圆滑曲线下的面积与形变前的面积等同。一次积分和二次积分是对图1-3-1c的曲线积分。原始形态(图1-3-1a)并不一定是地质断面图上人工绘成的矿体的形态,有可能是矿体在断面上的实际形态,虽然地质勘探过程不能确知它,但可通过几何形变表述它。因此,我们可以用几何形变后的形态、粗略地检验一下地质断面绘成的矿体图是否准确。

这里需要强调的是,对矿体施行几何形变,即将矿体诸结构地质变量进行空间积分的直观表示,只是为了数学运算的需要和便于理解。除矿体厚度积分的面积、体积具有物理意义外,其它诸如

品位、体重、品位厚度之乘积等变量积分的面积、体积不具有物理意义。几何形变可反映出诸变量的空间变化状态。因而,SD法对矿体施行几何形变的本意,不排除矿体形态图件的绘制和应用。几何形变后的断面图,不能替代矿体形态断面图。矿体形态断面图是矿体形态的图式模拟,它是在某一工程控制程度前提下对矿体认识程度的反映。工程控制程度越高,对矿体形态认识亦越清楚,从而绘成的矿体断面图越接近矿体原始形态。因此,绘制矿体形态断面图是十分必要的。

二、参数的积分表达式

如图 1-3-2,将矿体置于直角坐标系中分析,设垂直矿体厚度的投影面(LOU)上的矿体面积为 S ,此投影面上有 m 条断面线,每条线上有 n 个工程。 L 为矿体长度方向, l 为矿体宽度方向,其矿体宽度函数为 $f(L)$,厚度函数为 $f(L,l)$, $F(L,l)$ 表示厚度和品位乘积的函数, D 表示矿石体重。矿体几何空间、金属量、品位等参数的求取过程可用下列积分式表达。

1. 矿体几何空间

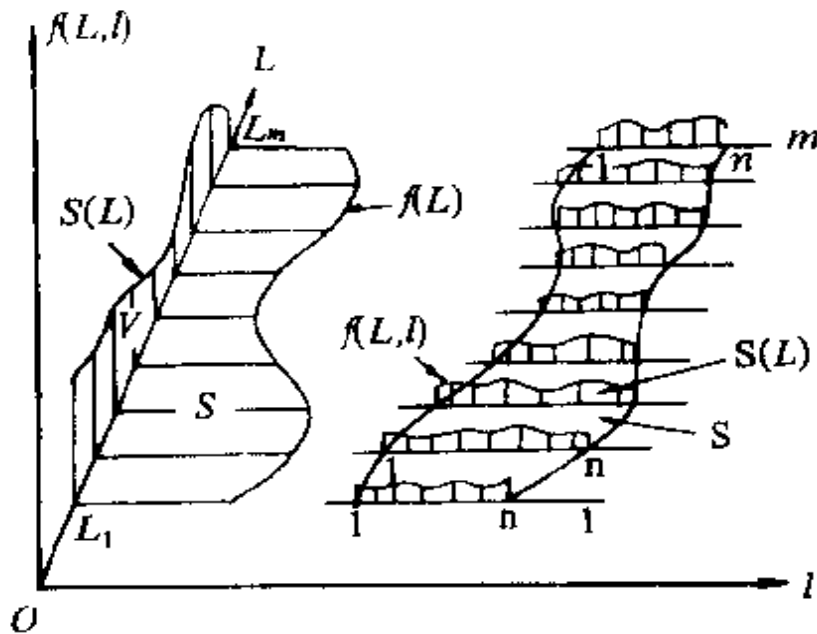


图 1-3-2 参数积分关系图

断面面积 $S(L)$:

$$S(L) = \int_{l_1}^{l_2} f(L, l) dl \quad (1.3.2)$$

投影面面积 S :

$$S = \int_{L_1}^{L_n} f(L) dL \quad (1.3.3)$$

体积 V :

$$V = \int_{L_1}^{L_n} S(L) dL \quad (1.3.4)$$

断面平均厚度 H_s :

$$H_s = S(L)/(l_2 - l_1) \quad (1.3.5)$$

体平均厚度 H_v :

$$H_v = V/S \quad (1.3.6)$$

2. 矿石量 Q

$$Q = DV = D \int_{L_1}^{L_n} f(L) dL \quad (1.3.7)$$

3. 金属量

面金属量 P_s :

$$P(L) = \int_{l_1}^{l_2} F(L, l) dl$$
$$P_s = DP(L) \quad (1.3.8)$$

体金属量 P :

$$P = P_v = D \int_{L_1}^{L_n} P(L) dL \quad (1.3.9)$$

4. 品位

面平均品位 C_s :

$$C_s = P(L)/S(L) \quad (1.3.10)$$

体平均品位 C :

$$C = C_v = P/Q \quad (1.3.11)$$

对于体重,许多矿区在勘探过程中体重样的采取数量较少,一个矿体内同类型矿石的体重一般较稳定。因此,用算术平均或数理统计的方法即可求取。

以上给出的积分表达式适用于确定性函数的积分。当给出的地质变量不是确定性函数时,它很难用某一完全确定的函数式或函数组合式给出来。它们是有序点列数,而结构地质变量曲线是一条光滑连续的点列函数曲线,分段连续的样条函数能恰当地给出其函数表达式。这是因为样条函数对于空间有序连续型函数,无论点列间隔等距或不等距,均能适用。因此,上述积分公式中函数完全可用样条函数 $S_s(x)$ 代入进行积分, $S_s(x)$ 为三次样条函数。

第二节 普通 SD 法

普通 SD 法,亦称样条函数储量计算法。它是将结构地质变量,作为点列函数,进行样条函数拟合,由三次样条函数积分,求取储量(矿石量、金属量)。

三次样条函数近似计算积分公式是:

每个子区间 $[x_{i-1}, x_i]$ 的面积 S_i 为:

$$S_i = \frac{y_{i-1} + y_i}{2} h_i - \frac{M_{i-1} + M_i}{24} h_i^3 \quad (1.3.12)$$

整个区间的面积(断面上) $S(L)$ 为:

$$S(L) = \sum_{i=2}^n \frac{y_{i-1} + y_i}{2} h_i - \sum_{i=2}^n \frac{M_{i-1} + M_i}{24} h_i^3 \quad (1.3.13)$$

式中 $i = 2, 3, \dots, n$ 。

积分次数不同,(1.3.13)式中 $S(L)$ 代表的意义也不同。如前文所述,一次积分的面积 $S(L)$ 表示断面面积,对面积 $S(L)$ 再积分则得到体积 V 。这里的面积或体积,不光指矿体的几何空间量,也指各参变量的空间量,例如,若 y_i 表示品位和厚度的乘积,则公式(1.3.12)、(1.3.13)积分的面积 S_i 、 $S(L)$ 表示品位和厚度乘积和,它们没有物理意义,只是计算过程的中间变量。

(1.3.13)式由两部分组成:等号右边的第一项是主项,实际是复合梯形公式;第二项是梯形公式的修正项。参变量之二阶导数 M_i 的值在(1.1.9)式中已经应用,此处可以借用,不需再计算。

普通 SD 法主要适用于形态简单,矿化连续性较好的矿体的储量计算,它既可总体计算,也可分块段计算,并可求取储量精度。该法也可用于先在单工程圈定矿体后的储量计算,并可检验传统法的计算结果。

第三节 SD 搜索法

当矿体比较复杂时,用普通 SD 法计算储量,其结果就不一定理想。例如,当矿体中间出现非矿地带或者改变工业指标时,普通 SD 法便难于适应其计算的灵活性。为了使矿体各部位都能灵活地满足几个工业指标条件,便可改用 SD 搜索法,简称搜索法如图 1-2-6 的情况,单独用普通 SD 法,不能达到目的。如果用搜索法,就能将其中满足工业指标的属于矿体部分的矿量计算出来,而舍去非矿部分。

所谓搜索法,就是用三次样条函数求它的“根”。即令(1.1.9)式的 $S_3(x)$ 等于给定的工业指标 W ,然后解方程。但解此方程十分繁琐,还会得出多个根,难于判别诸根归属。为了克服这些弱点,又不失其计算的精确性,可以改变求根的方式,即进行根的搜索。见图 1-3-3。

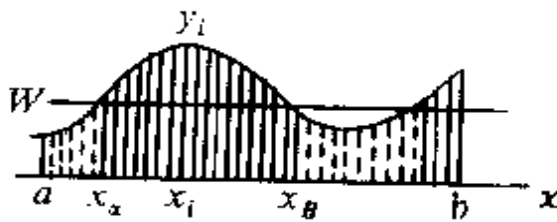


图 1-3-3 根的搜索图

从区间 $[a, b]$ 的左端点 $x_0 = a$ 出发,按某个约定的步长 h_s 一步步向右跨,每跨一步进行一次根的搜索,

即检查节点 $x_i = a + ih_s$ 上的函数值 $y_i = f(x_i)$ 。

当 $f(x_i) < W \rightarrow f(x_{i+1}) \geq W$ 时,

或 $f(x_i) > W \rightarrow f(x_{i+1}) \leq W$ 时,

则 x_{i+1} 为所求之根。 i 为步数。当相邻之两根之间构成的区间 $[x_n,$

x_j]的函数值 $f(x) > W$ 时,则此区间的积分值即为需要求取的有益面积值,即 $S = \int_{x_a}^{x_b} f(x)dx$ 。第 j 个区间 $[x_a, x_b]_j$ 的有益面积值 S_j^* 可由(1.3.13)式改写成

$$S_j^* = \sum_{i=2}^{n^*} \frac{y_{i-1} + y_i}{2} h_{\Delta} = \sum_{i=2}^{n^*} \frac{M_{i-1} + M_i}{24} h_{\Delta}^3 \quad (1.3.14)$$

求得。 h_{Δ} 是搜索步长, y_i 是第 i 步上的搜索值, n^* 为区间 $[x_a, x_b]$ 内按步长 h_{Δ} 搜索次数。当步长很小时,可由龙式积分公式^① 替代。

$$S_j^* \doteq h_{\Delta} [0.4(y_1 + y_{n^*}) + 1.1(y_2 + y_{n^*-1}) + \sum_{i=3}^{n^*-2} y_i] \quad (1.3.15)$$

由于步长 h_{Δ} 值较小,所以(1.3.15)式与(1.3.14)式的计算结果相差极小。

如果一断面有 k 块有益面积,求其和,则得到此断面全部有益面积 S

$$S = \sum_{j=1}^k S_j^* \quad (1.3.16)$$

如果有益面积值代表矿体面积,则结果是矿体面积;如果有益面积代表矿体体积,则结果是矿体体积;如果有益面积代表金属量,则结果是面金属量或体金属量。

搜索步长 h_{Δ} 为计算范围内工程平均间距的 $1/20$ 。步长的大小,影响面积精度的高低。步长越大,精度越低;步长越小,精度越高。但是,步长过小,计算的工作量增大,而精度增高不多。一般说来,取工程平均间距的 $1/20$,已能满足精度要求。并且计算量不会增加太大。如表 1.3-1,搜索计算里士铜矿储量时,与普通 SD 法采用的地勘资料相同,两种方法有着相同的效果,并且都与同一范围内的闭坑量接近。由此说明,此步长效果是好的。

① 龙之中,1979年,《一条龙式断面法储量计算的理论与实践》,云南省地质矿产局第十三地质队、云南省地质矿产局科技情报网合编。

表 1-3-1 里士钢矿 A 块段储量计算对比表

计算方法	矿石量(t)	品位(%)	金属量(t)
传统法 (闭坑量)	492025	2.05	10095.04
普通 SD 法 (勘探资料)	474541.0	2.005	9515.85
SD 搜索法 (勘探资料)	473556.1	2.062	9756.722

第四节 SD 递进法

储量计算是由已知的有限个工程、观测点(取样点)提供的信息对矿藏量进行估计。根据认识深化原则,观测点越多,计算之储量应该越接近客观实际真量。随着观测点数递增利用依次提供的信息进行相应地计算储量的过程,称为储量递进计算过程,这一过程是进一步深化分析的过程,这种递进计算方法即为 SD 递进法。具体地说,当工程数为 k 个时,矿体地质变量的总体空间变化程度是由这 k 个观测值来刻画的。如果这 k 个工程的观测值提供的信息能够真实地反映客观总体的变化规律的话,则无须再增加工程的观测值,此时,无论用什么储量计算方法,几乎都可得到较为准确的储量计算结果。然而事实上,这种可能性很小。往往是用不同的工程密度,对矿体变化程度的描述可能不一样。这在一定意义上说来,矿体变化程度是工程控制程序的函数。就是说,矿体的复杂形态虽然是客观存在,但它的复杂程度,却是在某一工程数的条件下来描述的。随着工程数的增多,矿体形态越趋复杂。这样,对于具有随机性质的地质变量,仅用某一固定工程数的观测值计算储量实际并非可靠。只有逐步增加工程数,依次进行计算,用众多的有序计算值做出科学的估计,才可能达到比较接近真量,这就是递进计算的意义所在,也是 SD 递进法的意义所在。SD 法递进系列储量的出现,对分析认识客观地质体和工程控制程度有很大帮助。

如半球台,设半径为 40m。由几何公式计算得到理论值(也是实际值) $V = 122522.113\text{m}^3$,用系列观测值进行 SD 法递进计算,如表 1-3-2,随着观测点数的增多,半球台的体积值越接近真量。

表 1 3 2 半球台递进计算表

观测点数	体积(m^3)
28	81665.62
33	90362.68
38	90745.18
45	90419.31
52	92365.25
59	102858.25

对于复杂的矿体说来,由于多种因素的干扰,即使观测点增多,储量也不一定会增多,并且接近客观真量的路径不会平稳,往往出现波动。在递进计算过程中, $t+1$ 时刻的储量 Q_{t+1} 不一定比 t 时刻的储量 Q_t 更接近实际真量。如里士铜矿 A 块段硫化矿,实际真量(开采闭坑矿量) Q 为 391206t,品位 C 为 2.05%,金属量 P 为 8783.63t。勘探时,27 个工程的取样,得到矿石储量 $Q_{27} = 376512.3\text{t}$,32 个工程的取样,得到矿石储量 $Q_{32} = 372931.3\text{t}$,从而有 $Q_{27} > Q_{32}$, Q_{27} 更接近真量。品位和金属量亦如此。就是说,勘探程度低比勘探程度高计算的储量更接近客观真量。这只能表明它随工程数的增加,其储量接近客观真量的路径是波动的、不平稳的。虽然如此,我们却看到总的系列是比较平稳的,见表 1-3-3。

表 1-3-3

工程数(N)	矿石量(t)	品位(%)	金属量(t)
16	354971.3	1.885	6691.94
20	372828.1	1.910	7121.04
21	374416.8	1.901	7116.85
22	374379.6	1.904	7128.04
23	374638.5	1.904	7134.56
24	374986.0	1.905	7126.13
27	376512.3	1.967	7406.14
32	372931.3	1.962	7315.60
37	372743.0	1.978	7372.77

一、递进计算储量

递进计算,是在计算范围不变的条件下,首先控制边界工程,然后逐次在内增加工程,每增加一次(一批工程)计算一次。例如有

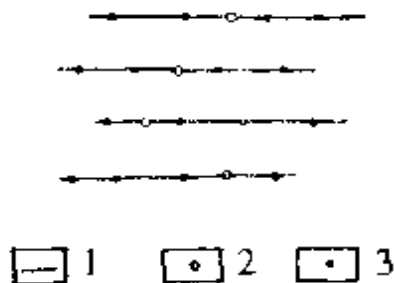


图 1-3-4 递进计算

工程分布图

1—勘探线; 2—新增
钻孔; 3—原有钻孔

四条勘探线,每条线有四个工程,如图 1-3-4。由首批 16 个工程可以计算一次储量,然后分批增加工程数,再逐次计算储量,当增加到第 k 批工程时,作第 k 次储量计算。

设 N_1 为第一批工程施工后的工程数, N_i 为第一批至第 i 批工程施工后累计的工程数, $i = 1, 2, \dots, k$ 。有

$$N_i = N_{i-1} + \Delta N_i$$

ΔN_i 为第 i 批新增加的工程数, N_{i-1} 为第 i 批增加工程前已有的工程总数。这样,每批施工后累计工程数便形成一个递进的有序数列:

$$N_1, N_2, \dots, N_i, \dots, N_k \quad (N_i > N_{i-1})$$

由这些有序工程数列各自的信息,可以分别计算储量得到有序的储量系列:

$$Q_{N_1}, Q_{N_2}, \dots, Q_{N_i}, \dots, Q_{N_k}$$

二、递进预测储量储量的客观真量

上述点列 Q_{N_i} 的取值,虽然不一定随着工程数 N 的增多而相应地增大或减小,但总可以用一函数关系式拟合。现在的议题是,根据工程数 N 增多,对地质体认识越清楚准确的原则,可以得出:当 $N \rightarrow \infty$ 时,矿量 Q_{N_i} 趋于某一定值 Q^* 。这一定值,即被近似地认为客观真量。为此,必须使它满足一个有界的单调的非线性函数。由于矿体的差异,这种函数应从多个这类函数中自由选择。SD 法采用的函数是:

- (1) $f(N) = Y = ae^{\frac{b}{N}}$ (指数函数)
- (2) $f(N) = 1/Y = a + b/N$ (双曲线函数)
- (3) $f(N) = Y = a + b/N$ (单元函数)
- (4) $f(N) = Y = \frac{a}{1 + \beta e^{-rN}}$ (罗吉斯谛曲线函数)

这几种数学模型,将在本篇第四章中讨论。现假设已经选择了某一函数 $f(N)$ 。则有:

$$\lim_{N \rightarrow \infty} f(N) = Q^* \quad (1.3.17)$$

(1.3.17)式即递进计算极限表达式。按求极限阶次的多少,可分为一阶递进,二阶递进,以至多阶递进。如果此点列数据排成的是无震荡而稳健的序列,则此极限值便可以认为是理想的真量预测值。这样,仅作一次递进而得到预测结果的递进,称一阶递进。对于变化不大的矿体,且点列数据较长,一般由一阶递进即可得到储量客观真量近似值。若点列数据构成的点列序列稍有震荡,则其真量预测值可靠性就差些。而这种震荡是经常出现的。为了消除这种震荡,点列数据经SD法权尺化处理,需进行多阶递进。

上述储量值点列数据构成行矩阵,即:

$$[Q_{N_1} \quad Q_{N_2} \quad Q_{N_3} \quad \dots \quad Q_{N_i} \quad \dots \quad Q_{N_k}] \quad (1.3.18)$$

将此行矩阵分解后列成三角阵式：

$$\begin{array}{ccccccc}
 Q_{x_1} & & & & & & \\
 Q_{x_1} & Q_{x_2} & & & & & \\
 Q_{x_1} & Q_{x_2} & Q_{x_3} & & & & \\
 \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \\
 Q_{x_1} & Q_{x_2} & Q_{x_3} & \dots & Q_{x_k} & & \\
 \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \\
 Q_{x_1} & Q_{x_2} & Q_{x_3} & \dots & Q_{x_k} & \dots & Q_{x_n}
 \end{array}$$

从第三行到第 k 行，各行分别用非线性回归模型作回归预测，求出其优选回归极限值 Q_j^* ；

$$\lim_{(x_j)_j \rightarrow \infty} Q_{(x_j)_j} = Q_j^* \quad j = 1, 2, \dots, k-2 \quad (1.3.19)$$

此极限值为各批工程计算的储量预测值，由此一阶递进极限值 Q_j^* 的点列数据构成新的行矩阵，分解后列成新的三角阵式。类似上面的作法，从新三行到新 k 行，分别求出其新的优选回归极限值——新的 Q_j^* ，称为二阶递进极限值。以此类推。一般二阶递进极限值即为递进极限储量值 Q 。此储量 Q 即为预测的客观真量 Q^* 。不难看出，预测的客观真量 Q^* 实际只是真量的估计量。有不同的递进储量系列值，就有不同的真量估计量。即不同的工程数得到不同的估计量。在作回归预测时，可以在一定的显著水平下求得一个预测区间来确定估计真量的范围。不过，对 SD 法来说，求这样的区间无实际意义。SD 法递进计算储量，一方面是观察它的稳定性，另一方面是为下一步的精度计算提供依据。例如马拉格老阴山铅矿，分五批施工后，作递进计算，结果见表 1-3-4。将此表之储量列成三角阵式后递进计算，结果见表 1-3-5。

表 1-3-4 马拉格老阴山铅矿递进计算储量(矿量)表

工程批数 i	工程数 N_i	储量(t) Q_{N_i}
1	40	81951.75
2	59	96661.563
3	84	99804.813
4	102	102472.25
5	119	101451.25

表 1-3-5 三角阵式递进计算表

计算方法	递进储量值 Q_{N_i}	极限值 Q_i^*
一阶递进极限	81951.75	
	81951.75 96661.563	
	81951.75 96661.563 99804.813	122251.437
	81951.75 96661.563 99804.813 102472.25	119468.954
	81951.75 96661.563 99804.813 102472.25 101451.25	116146.730
二阶递进极限	122251.437 119468.954 116146.730	103274.705

从第三行开始作一阶递进极限计算,优选公式为:

$$f(N) = ae^{\frac{1}{N}}$$

将一阶递进极限值再作二阶递进极限计算,得递进极限储量值 $Q = 103274.705t$ 。本矿实际开采矿量 $Q = 101133t$,于是二阶递进求得矿量极限值的实际精度达到 97.88%。由此可以说明,SD 法的递进计算是可行的。这里没有必要指出 103274.7 t 是在多大

概率置信区间内。从后面精度计算表明,实际闭坑量应采用SD法的计算值 $Q = 101451.25t$ 较合理,而实际开采量的传统法计算值 $Q = 101133t$,略偏小 0.3%。

递进时的工程数的间隔越大,效果越好,如果间隔太小,路径可能偏离较大,极限值则不稳定,预测效果较差。

三、回溯计算

在实际矿产勘查过程中,随着工程数由少到多地递增而进行的递进计算,其前后延续的时间较长,有诸多不便之处。实际上在许多情况下,可以进行回溯计算。即施工一定工程取得相当多的数据后,利用这些数据,朝着施工进度相反的时间方向重新组合数据系列,然后由此数据系列作递进计算。由此看来,回溯计算实质上也是递进计算。这就是,在不改变总体计算范围条件下,将工程逐次抽稀后分别进行的储量计算。上例中先将 119 个工程(孔)抽稀到 102 个工程,再由 102 个工程抽稀到 84 个工程,依次形成 $119 \rightarrow 102 \rightarrow 84 \rightarrow 59 \rightarrow 40$ 节点系列。按此系列计算每个结点上的值(储量)。此过程即称回溯计算。当得到这些值之后,又将此节点系列再转为相反方向,形成 $40 \rightarrow 59 \rightarrow 84 \rightarrow 102 \rightarrow 119$ 节点系列。即变成与前面的递进计算一样。为此,无论是回溯计算或是递进计算,SD法统称它们为递进计算。

第五节 任意矿段(块段)的储量计算

SD法不仅可计算矿体(或矿段)总体的储量,而且能够计算矿体中任意形状大小块段的储量。这是SD法方便灵活的优点之一。

一、任意分块计算

如图 1-3-5,假设图中 I、II、…、VII 代表不同情况的任意地段体积。只需求出储量的几个参数,任意地段的储量也就得到了。图中 x_i 为节点,共有 n 个节点, T_i 表示任意块段的边界点(插值点),这些条件给出后,如果还知道它的三次样条函数 $S_3(x)$,就可以求出任意块段的面(或体)量了。所有任意块段的情况,不外乎如图

1-3-5 的七种情形。其中第Ⅶ块是不靠节点的一块,其它均靠节点或含节点,靠左或右,只是含节点的多少各不相同。对这众多情形,下文将推导出计算任意块段面积的统一公式。

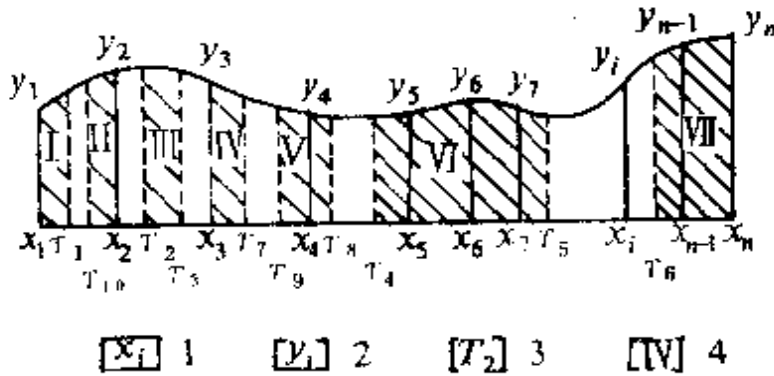


图 1-3-5 任意块段划分图

1—节点;2—型值点;3—任意块段的边界点;4—任意块段号

我们知道,三次样条函数是分段连续多项式。两节点间为一段。积分是每段分别积分,将这些小段积分面积作算术相加,即得三次样条函数的整体积分面积。因此,我们在计算任意块段面积时,只须求出它的边界点(插值点) T_i 的函数值和导数以及由 T_i 与它紧靠的节点围成的面积,然后加减与 T_i 有关的小区间面积,即得到任意块段面积。

设有 l 个插值点 T_k 及 T_{k+u} , k 及 $k+u$ 为给定插值点 T_k 及 T_{k+u} 的脚标任意序号, k,u 为给定整数($k=1,2,\dots,l-1;u=1,2,\dots,l-1$), $(k)^*$ 及 $(k+u)^*$ 为插值点 T_k 及 $k+u$ 所在小区间序号; $v=1,2,\dots,[(k+u)^*-(k)^*]$ 。两插值点的面积公式为:

$$S = S_{(k)^*,(k)^*} - S_{(k+u)^*,(k+u)^*} + \sum_{(k)^*+v=(k)^*+1}^{(k+u)^*} S_{((k)^*+v)} \quad (1.3.20)$$

式中:

$$S_{(k)^*,(k)^*} = \int_{x_k}^{x_{(k)^*}} S_1(x) dx$$

$$S_{(x, (x+v)^*)} = \int_{x_{i+v}}^{x_{i+v+1}^*} S_d(x) dx$$

$$S_{((x)^* + v)} = \int_{x_{(x)^* - v}}^{x_{(x)^* + v+1}} S_d(x) dx$$

(1.3.20)式即为SD法任意块段面积计算公式。

二、台阶(中段)储量计算

由于矿山设计和开采的需要,常常要计算台阶或中段储量。SD法除了可以计算总储量、分品级分块段计算储量外,还可以计算台阶或中段储量。

根据矿体产出情况,台阶可分为A型台阶和B型台阶两类。矿体产状平缓,探矿手段以钻孔为主,划为A型台阶,如图1-3-6;矿体产状陡倾,探矿手段以钻孔为主,划为B型台阶,如图1-3-7。如果探矿手段以坑道为主,则不以A、B型台阶论,而以中段断面为界采用任意分块法求取储量。

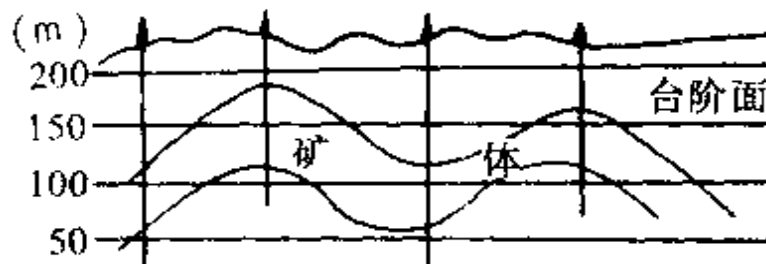


图 1-3-6 A型台阶断面图

1. A型台阶计算储量

- (1) 首先划定台阶面,然后将空间的取样位置定位于各台阶内。
- (2) 计算各工程在各台阶内的矿厚和品位。
- (3) 各台阶根据所得矿厚和品位,用搜索法即可求得台阶的储量。

2. B型台阶计算储量

B型台阶诸工程在同一个台阶内出现的矿样很少,常常只有

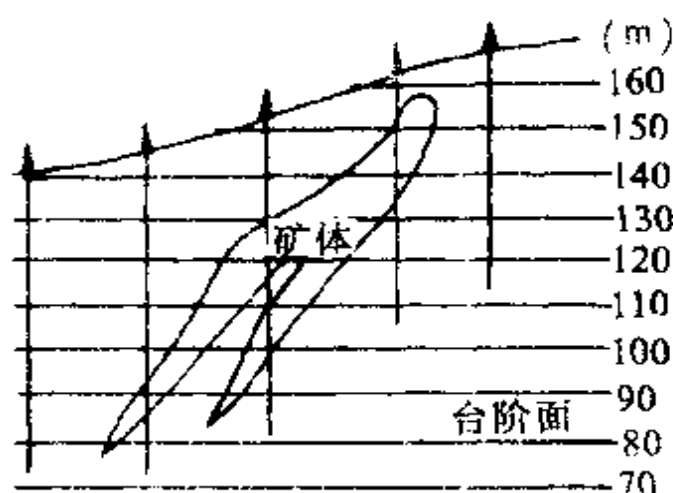


图 1-3-7 B型台阶断面图

一两个孔线上有矿样。计算台阶储量，必须将矿体铅直厚度转换成水平厚度。不然不能得到断面上某一台阶内的矿体面积。作图法虽然可直接从图上得到水平方向上的厚度，但人为因素很大。SD法在转换厚度时，考虑相邻工程的影响，进行距离加权。如图 1-3-8，a 为垂直断面上矿体，b 为水平方向矿体的几何变形形态，c 为铅直方向矿体的几何变形形态。

图 1-3-8 中，已知第 i 个铅直工程中，矿体铅直长为 l_i ，品位 C_i ，矿顶坐标 (u_i, v_i) 。求水平厚度 \bar{l}_i 及水平方向品位 \bar{C}_i 。

(1) 求出矿长 l_i 的中心点的坐标：

$$V_i = v_i - l_i/2$$

$$U_i = u_i$$

(2) 求出该中心点的一阶导数 m_i ：

$$m_i = \left(\frac{V_{i+1} - V_i}{U_i - U_{i+1}} + \frac{V_i - V_{i-1}}{U_{i-1} - U_i} \right) / 2 \quad (1.3.21)$$

(3) 令 $l_i = l_i^{(1)} + l_i^{(2)}$

有

$$\begin{cases} l_i^{(1)} = l_i \sqrt{m_i^2 + 1} / 2m_i \\ l_i^{(2)} = \sqrt{(V_{i+1} - V_i)^2 + (U_i - U_{i+1})^2} - l_i^{(1)} \end{cases}$$

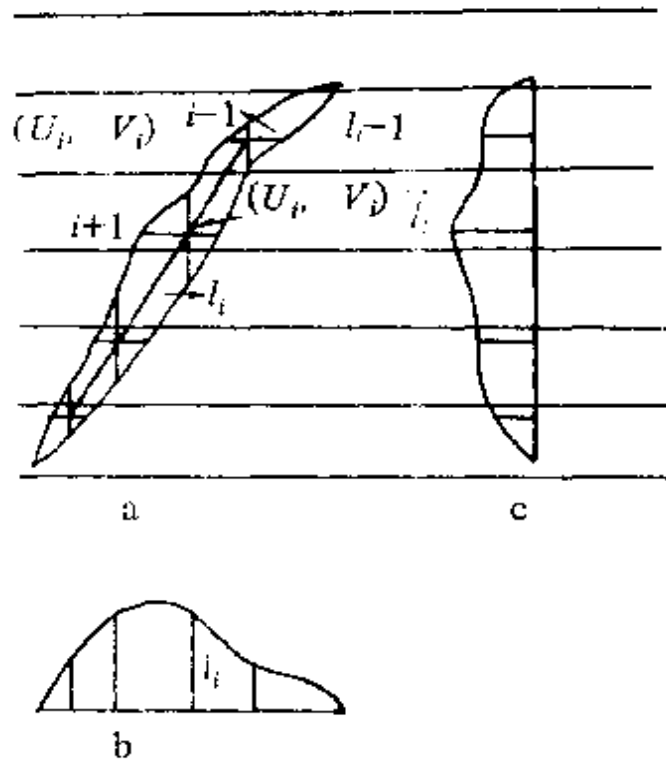


图 1-3-8 垂直断面上矿体几何形态变化图

(4) 标高 V_i 的水平矿厚 \bar{l}_i 和品位 \bar{C}_i 为:

$$\bar{l}_i = l_i / m_i \quad (1.3.22)$$

$$\bar{C}_i = \frac{l_{i-1}^{(2)} C_{i-1} + l_i^{(1)} C_i}{l_{i-1}(l_{i-1} + l_i)} l_i + \frac{l_i^{(2)} C_{i+1} + l_{i-1}^{(1)} C_i}{l_i(l_{i-1} + l_i)} l_{i-1} \quad (1.3.23)$$

式中 $l_i^{(1)}$ 和 $l_i^{(2)}$ 是中间变量, 起权的调节作用, \bar{l}_i 仅表示矿体样长在标高 V_i 的水平长度, 而点 (U_i, V_i) 不一定在水平长度的位置中心。

(5) 将各标高上的水平长度, 投影至铅直方向上, 形成铅直方向上的有序点列, 用样条函数拟合后, 以台阶面为划分矿体块段界线, 用任意分块计算法, 即得到台阶储量。

第六节 不平行断面储量计算

矿体勘探线布置有的是不平行的, 甚至有呈扇形布置的。如图 1-3-9, 勘探线呈扇形, G_j 为第 j 条断面上矿体重心在线上垂直投

影。对不平行断面求体积：首先找重心 G_j ，再以重心为出发点求二断面间的距离，然后作积分即得之。

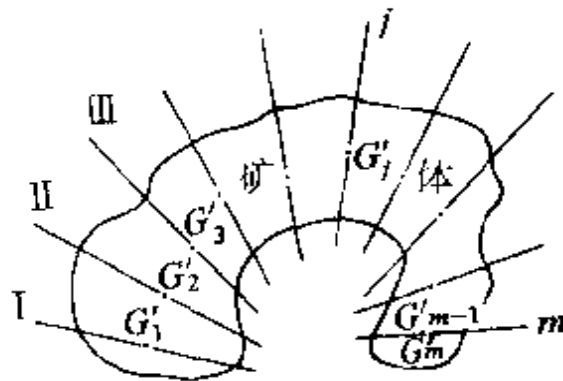


图 1-3-9 扇形勘探线图

一般情况下，第一次积分求面积以及这以前的一系列计算均如前所述，只是在第二次积分时才另行处理。

一、求断面线上矿体的重心

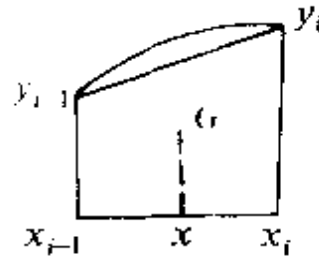
矿体是具有一定质量的几何体。这质量一般表现为含量、体重等。矿体重心，在这里是指具有矿石体重的几何体的重心。SD 法是以断面来表示几何体的图形的，于是 SD 法在于求矿体断面的重心，通常取体重为常数，则断面的重心即为断面图形的重心。

断面上的矿体经形变置于直角坐标系后，即将所有的观测值 y (连续函数) 全部投影在 x 轴上，矿体断面重心也投影在 x 轴上。此时，称 x 轴是具有一定密度的“质量棒”，此棒的重心就是矿体断面重心在 x 轴上的投影。图 1-3-9 中的 G'_j 即为第 j 条勘探线上矿体断面重心的投影。 G_j 为：

$$G_j = \frac{\sum_{i=1}^n x_i S_i}{\sum_{i=1}^n S_i} \quad (1.3.24)$$

(1.3.24) 式表明，整棒(或断面)的重心是由各子区间重心求来，而子区间的重心难于用三次样条函数求出，可用梯形的重心近似代替。

图 1-3-10 中 G 点为子区间 $[x_{i-1}, x_i]$ 面积的重心，它的投影坐



1-3-10 子区间面积重心图

标为 x , 有:

$$x = \frac{(x_i + 2x_{i-1})y_{i-1} + (x_{i-1} + 2x_i)y_i}{3(y_{i-1} + y_i)} \quad (1.3.25)$$

将(1.3.25)式的 x 用 $G_{G_{x_i, x_{i-1}}}$ 表示, 即表示区间 (x_{i-1}, x_i) 的重心投影点。则第 j 条质量棒的重心 G_j 可表示为:

$$G_j = \frac{\sum_{i=2}^j G_{G_{x_i, x_{i-1}}} S_i}{\sum_{i=2}^j S_i} \quad (1.3.26)$$

$j = 1, 2, \dots, m$, 表示参加 SD 储量计算的勘探线数。 S_i 为子区间面积, 由(1.3.12)式求出。

这里 G_j 是断面线上的相对坐标, 应将它转换成平面上的坐标 $G_{j(x, y)}$, 于是重心表示为:

$$\begin{cases} G_{j_x} = U_{j_i} + \frac{G_j}{x_{j_i} - x_{j_1}} (U_{j_i} - U_{j_1}) \\ G_{j_y} = V_{j_i} + \frac{G_j}{x_{j_i} - x_{j_1}} (V_{j_i} - V_{j_1}) \end{cases} \quad (1.3.27)$$

二、断面间的距离

当每条断面线重心 $G_{j(x, y)}$ (简写成 G_j) 求出后, 由重心点向它的两侧的断面线作垂线, 两断面线间出现两个距离 $h_{j, j+1}$ 和 $h_{j+1, j}$, 如图 1-3-11 ($h_{j+1, j}$ 表示第 j 条断面线的重心 G_j 向第 $j+1$ 条断面线作垂线的距离, $h_{j, j+1}$ 表示由第 $j+1$ 条断面线的重心点 G_{j+1} 向第 j 条断面线作垂线的距离)。取二值的平均值, 即为两断面的距离值, 即:

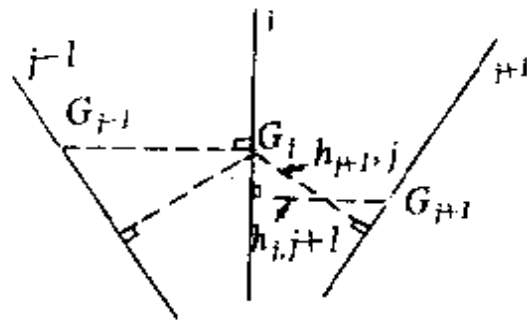


图 1-3-11 不平断面间距离图

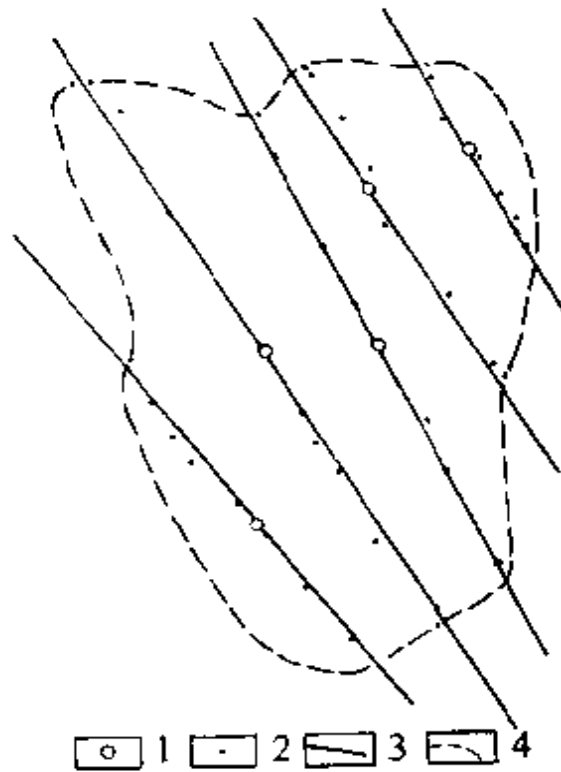


图 1-3-12 会泽 BKS 铅矿 N 块段矿体水平投影图

1—重心; 2—工程位置; 3—勘探线; 4—矿体边界线

$$h_j = \frac{h_{j,j+1} + h_{j+1,j}}{2} \quad (1.3.28)$$

式中:

$$h_{j+1,j} = \frac{A_j U_{j+1} + B_j V_{j+1} + C_j}{\sqrt{A_j^2 + B_j^2}}$$

$$h_{j,j+1} = \frac{A_{j+1}H_j + B_{j+1}V_j + C_{j+1}}{\sqrt{A_j^2 + B_j^2}} \quad (1.3.29)$$

A_j, B_j, C_j 为线性方程的待定系数,以 h_j 作间距,以面积为函数值,建立新的直角坐标系后,不平行断面之储量计算即与 SD 平行断面法储量计算相同。云南会泽 BKS 铅矿 N 块段,为不平行勘探线(图 1-3-12),经 SD 法计算储量(矿量) $Q = 412809.8t$,计算精度为 89.16%,经矿山初步验证,认为此计算结果比较符合实际。

第七节 品位吨位曲线

一个矿区圈定矿体,以至提交储量报告,恰当的工业指标,一般应由上级下达。不过,过去的做法往往是,对不同的矿床,尽管其地质条件、开采选冶条件和方法以及成本等方面如何的不同,而采用的工业指标却是规范统一的,而且工业指标一旦确定后,常是不变的。这种缺乏经济的、动态的定指标办法,已不适应当前国民经济发展的要求。过去这样做,其中一个重要因素是由于计算技术难于提供动态分析的储量计算结果。如今电子计算机的发展,使这种任意改变工业指标,仍可方便灵活地计算储量的运算已成可能。因此,对于不同的具体矿床来说,在地质勘探过程中,可以计算出各种指标状态的储量,以供合理确定工业指标提供可靠依据。SD 法,具有改变不同工业指标连续电算的功能,并且不难作出品位吨位曲线图来,为动态分析选择工业指标提供了有利条件。图 1-3-13 为四川拉拉 XLT 铜矿品位吨位曲线图。此图是以边界品位为横坐标,以矿石量、金属量为纵坐标的曲线图,由它可以内插出某一个边界品位相应的矿石量、金属量吨位,也可内插出某个工业品位的相应矿石量、金属量吨位来。由此图的金属量曲线和矿石量曲线结合其它因素进行科学优选,可确定最合理的工业指标,或用作其它经济分析。

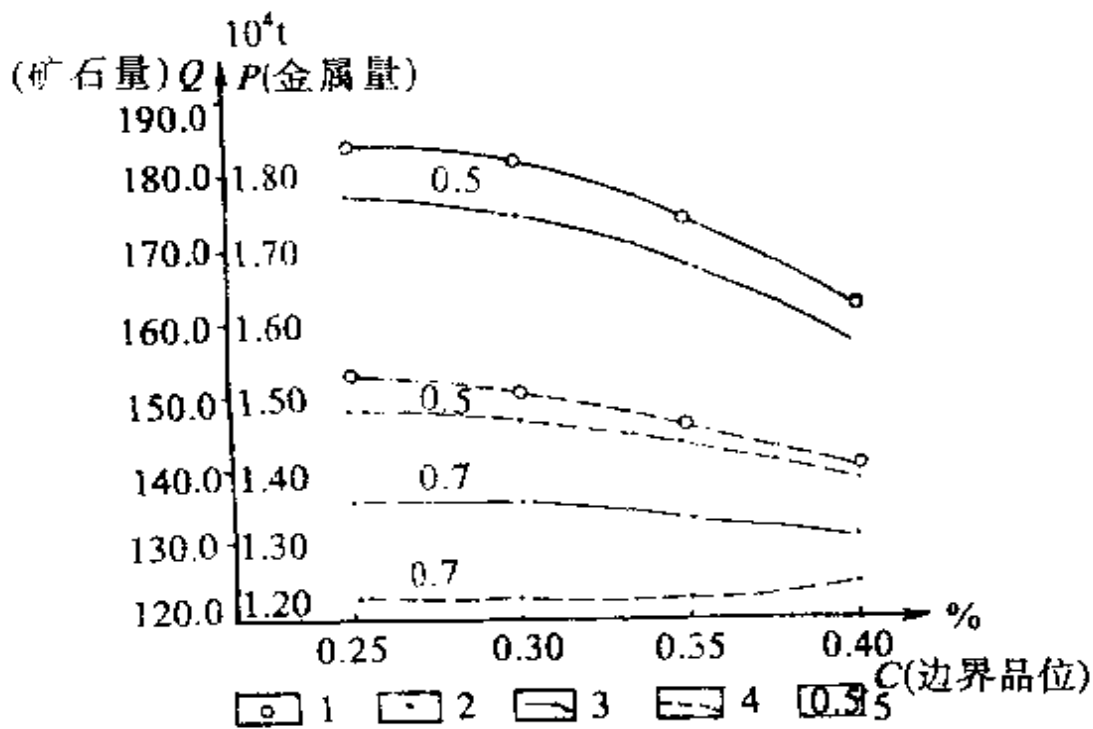


图 1-3-13 四川拉拉 XLT 铜矿品位吨位曲线图

1—总量; 2—表内量; 3—矿石量; 4—金属量; 5—工业品位取值

第四章 SD 精度法

第一节 概述

矿产储量按其可靠程度分为不同级别。目前,一般分为 A、B、C、D 四级。但是,如何衡量各级储量的可靠程度,仍是储量分级中一重要课题。人们习惯于用定性标准进行类比。这样,人们在理解和解释上各不相同,使其储量级别界限难以掌握,常造成勘探、设计、生产过程的被动局面,以至达到不可估量的经济损失。于是,有人提出了划分储量级别的定量标准,如 1959 年全国矿产储量委员会制定的“矿产储量分类暂行规范(总则)”中指出生产与勘探储量之间的误差为:A 级不大于 20%,B 级不大于 30%,C 级不大于 45%。在 1977 年储量级别划为四级后,主张各级储量与备采储量之间的误差为:A 级 $<10\%$,B 级 $<30\%$,C 级 $<40\%$,以下为 D 级储量。也就是说,各级储量相对于备采储量的精度为:A 级 $>90\%$,B 级 $>70\%$,C 级 $>60\%$ 。这样,储量计算精度就与储量级别紧密相关,它给予储量级别定量尺度,也给勘探程度提供了定量指标。但需要指出,储量误差不能作为划分储量级别的唯一指标。这是因为,地质变量及其取样的随机性,很可能使得在工程控制程度低时计算的储量反而比在工程控制程度高时计算的储量更接近客观真实储量,前者比后者的精度高,误差小。这样,如果单纯以储量误差来衡量储量级别,势必会得出错误的结论。

储量级别的划分主要还应考虑矿体外部形态、内部质量和地质构造等诸因素的控制和地质勘查研究程度及技术经济可行程度。储量级别是对矿体的控制程度和研究程度的模糊集刻画。特别是研究程度,目前还没有理想的定量尺度。

应该看到,当利用工程取样信息确定矿石储量的储量误差或

精度时,它已经隐含着工程控制程度的因素。一种科学的储量计算方法,应该从工程控制程度和矿体的变化程度出发来预测储量误差或精度,并由此确定储量级别,而不单纯是以计算出的储量与客观的储量之比来确定储量级别。

值得注意的是,矿量之真量(客观储量)常是未知的,甚至永远是未知的。人们常将备采储量当成矿藏量真量,采用计算储量与备采储量之比作为计算储量的精度。我们知道,备采储量远比勘探储量更接近矿藏真量,其它诸如采出矿石量,限于矿山生产及管理水平,也不一定比备采储量更接近矿藏真量。这样,在许多场合,备采储量客观上替代了矿藏量之真量,它已能满足矿山生产对储量精度的要求。为此,我们称上述精度为实际精度 η' 。这种精度,只能作为检验储量级别的定量尺度,不能作衡量工程控制程度和在计算储量时划分储量级别的定量尺度。因为实际精度不仅不能准确反映工程控制程度,而且以备采储量为标准,用后期的工作去检验前期的工作,对于勘查工作各阶段说来,这种后检尺度,便失去了最可贵的当前价值。目前一些储量计算方法,一般出于经验或采取类比法求精度。对于复杂的地质体说来,这种类比是不太可靠的。

SD 精度法从另一角度——分维概念来研究矿产储量的精度。

第二节 基本思想

储量精度计算,主要是指计算矿体矿石量、品位、金属量的精度。它们的精度,主要取决于工程控制程度和它们在空间变化的复杂程度。

SD 法对矿石量、品位等的计算,是在已有工程控制条件下对其相应的结构地质变量积分得来的。积分过程,要计算它们的三维空间(体积)。其三维空间(体积)的物理意义虽不相同,但数学意义是等同的。因此,储量精度计算在于对变量之“体积”的精度计算。

矿体体积的精度与矿体形态有关。对形态认识越清楚,计算的体积精度越高。不同的工程控制程度,圈定的矿体形态不一样。假

设工程“极端”密集,可认为此工程控制的矿体形态是真态。真态的面(体)积是真量,毫无疑问,以实际施工的有限工程计算的面(体)量与真量之比,即为SD法的预测精度。但是,受时间和经济效益的约束,勘探中不可能使工程“极端”密集,而只能根据不同的勘探阶段,用较少的工程揭露,达到认识和圈定矿体的目的。因此,矿体形态是未知的,它的真量也是未知的。不过,随着工程数 N 的逐渐增多,网度逐渐加密,工程间平均间距 h 越小,应该说计算的面(体)量越接近真量。地质空间是宏观量。可以认为,对于不同矿床,当工程间平均间距缩小至某一定值 H_0 时,即当 $h = H_0$ 时,计算的面(体)量是真量。这是SD法精度预测的思想基础。



图 1-4-1
半径相同半
圆内,间距
不同的梯形
面积图

譬如,有一半径为 r 的半圆,用理论公式 $S = \pi r^2/2$ 求其面积 S 。当 π 值取得足够精确时(例如 $\pi = 3.14159\dots\dots$),则可得到足够精确的半圆面积 S 的理论值,当 π 值取得较粗略时(例如 $\pi = 3.1416$),可得到较粗略的半圆面积 S 的理论值。无论是足够精确的理论值,或是较粗略的理论值,都可视为半圆面积真值。这是因为:(1)绝对真值是永远不可知的;(2)真值常是根据实际需要来求取的,真值本身具有相对性。现在,我们不用理论公式 $S = \pi r^2/2$,而由所给出的节点观测值来计算它的面积,如图1-4-1所示,将观测值顶点间连成直线,于是从 a 到 b 得到一系列梯形面积。诸梯形面积之和即为半圆面积 S 的真值近似值。不难看出,图1-4-1b比图1-4-1a的梯形面积和更接近半圆真面积。因此,也无需证明,间距 h 越小,计算的面积近似程度越高。当 $h \rightarrow 0$ 时,梯形面积的极限,即为半圆面积 S 之足够精确的理论值——真值。如果取值粗略一点,即当 $h \rightarrow H_0$ 时,亦可视为诸梯形面积之和为半圆面积之真值。 H_0

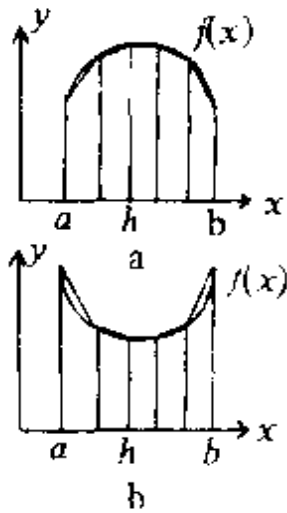


图 1-4-2 半圆曲线图

- a—上半圆曲线;
- b—下半圆曲线

称基距,它是当工程控制到一定程度,被认为可以确认矿体是真量的一个标准距。 H_0 将在本章第五节讨论。因此,对取值的精度要求,必须从研究问题的实际意义出发。图 1-4-2a,上半圆曲线 $f(x)$ 是上凸曲线,曲线下围的面积是随着 h 值减小而增大的,逐渐接近面积真量,故而面积精度随 h 值减小而增高。而下半圆曲线 $f(x)$ 如图 1-4-2b 所示,是上凹曲线,曲线下围的面积是随着 h 值减少而减小的,逐渐逼近面积真量,故而它的面积精度亦随着 h 值减小而增高。

推广到一般,由单一的上凸函数或上凹函数曲线可得到上述上半圆曲线或下半圆曲线同样的结论。

如果有可能求得当 $h \rightarrow H_0$ 时的面积 S_N 的话,则时刻 k 的面积 S_k 对于面积 S_N 的比,即为 S_k 的精度 η_k :

$$\eta_k = \begin{cases} S_k/S_N & \text{上凸曲线} \\ S_N/S_k & \text{上凹曲线} \end{cases} \quad (1.4.1)$$

如果不是单一的上凸曲线或上凹曲线,而是凸凹结合的曲线,在计算过程中要将凹函数计算多的部分,填补在凸函数计算少的部分,使得它在总体上差值变小。无论这种凸凹曲线相差多大,在总体上差值也可能很小。于是它的总体比值 S_k/S_N 会无形地增高,此时继续用 S_k/S_N 作为精度的话,显然不够恰当。如图 1-4-3,节点区间 $[x_1, x_2]$ 的面积比值 η_1 :

$$\eta_1 = S_t/S_v < 1$$

而节点区间 (x_i, x_{i+1}) 的面积比值 η_i :

$$\eta_i = S_t/S_v > 1$$

其精度平均值 η :

$$\eta = (\eta_1 + \eta_n)/2 \approx 1$$

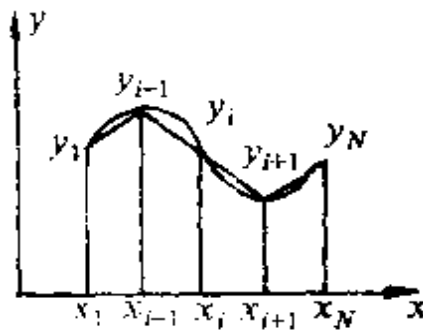


图 1-4-3

这样,无形之中提高了精度,可见这是不够合理的。一般地说,当凸凹函数多次交叉出现而又各异时,情况变得复杂得多。随

着工程数 N 的增加,平均间距 h 值的减小,它的面积值 S 不一定单向增高或减小,常是时大时小。对于这种情况,求取真量 S_v 便十分困难。比值 S_t/S_v 亦难于得到。

但是,我们看到,无论凹凸函数曲线如何复杂,它的型值点 y_i 间连线(各直线连线形成的折线)长度 L 却总是随着工程数的增加(或平均间距 h 的减小)而逐步增长的。当 $h \rightarrow 0$ 时,则折线长 L 即为曲线真长 L^* ;用时刻 k 的折线长 L_k 与曲线真长 L^* 的某种比,即能刻画 k 时刻面积的精度。但是,从分维概念出发,导出当 $h \rightarrow 0$ 时,此折线长 $L \rightarrow \infty$ 。由此表明,我们无需取平均间距 $h \rightarrow 0$,而只当 $h = H_k$ 时即可。

例如,取一系列平均间距 $\{h_i, h_1 > h_2 > h_3 \dots > h_n\}$,相应可得到一系列的型值点间连线长 $\{L_i, L_1 < L_2 < L_3 \dots < L_n\}$ 。本书在附篇“矿体的分维概念”中,论述了型值点间连线长 L 的增长速率与平均间距 h 减小速率的关系。对于一段过型值点的复杂曲线,去量度它的长度,是用单位量尺 l 沿曲线依次度量,单位量尺 l 越长,度量出的曲线长度越短,度量次数 p 也越少;反之,单位量尺 l 越短,

度量出的曲线长度越长,度量次数 p 却剧增。据德国数学家 B. B. Mandelbrot 的经验,这种增长速度与 $1/l^n$ 成正比,即

$$p = R \frac{1}{l^n} \quad (1.4.2)$$

那么,折线长度 L 为:

$$L = R \frac{1}{l^{n-1}} = Rl^{1-n} \quad (1.4.3)$$

R 为比例常数, n 为豪斯道夫维数。只要给定量尺 l , 又知道度量次数 p , 折线长 L 也就得到了。

这里,豪斯道夫维数 n 是未知数,度量次数 p 自然也是未知数。不过,对于这种非线性的单调递增(减)函数,总可用某个函数 $f(l)$ 来表述。当观测值增量 ΔZ 变化稳定时,可由直角坐标(图 1-4-4)求得 l :

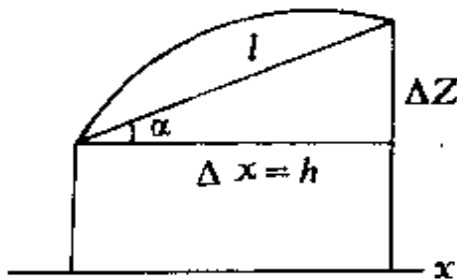


图 1-4-4

$$l = \sqrt{h^2 + \Delta Z^2} \quad (1.4.4)$$

h 为观测点平均间距,称为位移距,它反映工程控制程度,在同一范围内,位移距越小,工程控制程度

就越高。工程数增多,位移距就越小。 ΔZ 是相邻观测值增量绝对值均值,称为位移离差,它反映出矿体空间变化的复杂程度。可见,单位量尺 l 量度出的曲线长度,既体现了工程控制程度,又反映出矿体空间变化的复杂程度。由于假设曲线是连续的,根据连续函数定义,有:

$$\lim_{h \rightarrow 0} \Delta Z = 0$$

可见, ΔZ 是 h 的函数,即是说,当 $h \rightarrow 0$ 时,则(1.4.4)式 $l \rightarrow 0$ 。于是,折线长 $L \rightarrow \infty$,说明当 $h \rightarrow 0$ 时求曲线长是没有意义的。那么,

对于宏观的地质体说来,可以认为,无论任何矿床,当 $h \rightarrow H_0 = 1\text{m}$ 时,由此而计算的矿量是真量。由此而量度(计量)的曲线长是真长。于是,曲线 $f(h)$ 与直线 $h = 1$ 的相交点便是指示储量达到真量之标志。图1-4-5中,C点即为真量的表征点。

由豪斯道夫关于维的定义引伸出:当始末两点固定时,两端点间的曲线随工程数的增多而增长。曲线增长速率越快,反映出矿体形态越复杂;反之,曲线增长速率越慢,反映出矿体形态越简单。这样,我们便可用曲线增长速率来确定合理的勘探网度。对于不同的矿床或矿体,曲线增长速率快的其网度应密些,反之,其网度应稀些。此时,才可能说它们有相同的工程控制程度。分维图形的自我相似性质,使得我们对于图1-3-1c 曲线下围的面积,有理由用有限个梯形斜边长之和逼近曲线真弧长,来刻画有限信息条件下得的

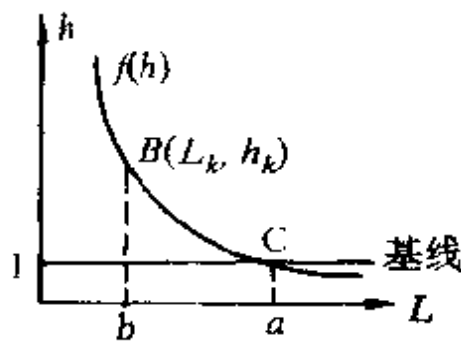


图 1-4-5

面积的精度。就是说,随着工程数或断面数(统称节点数 N) 的增加,间距 h 逐渐缩短,型值点连线(折线)长 L 逐步逼近曲线真长 L^* 。我们知道,相似图形面积之比,等于对应边长的平方比。如果二者的对

应边长度相近或相等,则二者的面积亦近乎相等,若用前一图形为衡量标准,则说后一图形对于前一图形的面积精度很高,这种面积相近的程度,无疑是面积相对精度的刻画。我们就是用这种逼近程度来定量刻画面积的精度,对于储量来说,就是刻画储量的精度。

综上所述,SD 精度法是以分维几何学的分数维为数学工具、以曲线逼近某一定值为极限目标,去表征矿体在有限工程控制条件下储量计算值的精度的。因此,SD 精度法,也可称极限精度法。

第三节 预测精度的基本表达式

本节将对SD精度法作概略的数学表述。

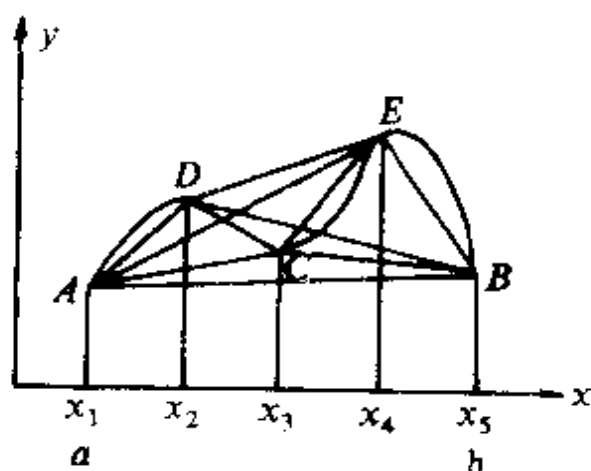


图 1-4-6

举例,如图 1-4-6,区间 $[a, b)$ 内共有5个节点,即 $N = 5$,有4个子区间(记区间数为 k)。现由稀到密考查,即有子区间数 k 由少到多,间距 h 由大到小。当

$k = 1$ 时

$$h = x_5 - x_1$$

$$\overline{AB} \ll \widehat{AB}$$

$k = 2$ 时

$$h = \frac{x_5 - x_1}{2}$$



$k = 3$ 时

$$h = \frac{x_5 - x_1}{3}$$

$$\overline{ADC EB} \quad \widehat{ADC EB}$$

$k = 4$ 时

$$h = \frac{x_5 - x_1}{4}$$

(折线长) (曲线长)

一般地,当 $k = N - 1, h = \frac{1}{N - 1}(x_N - x_1)$ 时,折线连线长最逼近曲线长。

折线长与型值点连线组合形式有关。不同的 N 值,有不同的组合形式。其组合数为 C_{N-1}^{N-1} (二项式展开系数)。图 1-4-6 有四种组合形式,如表 1-4-1。

从图 1-4-6 及表 1-4-1 可以看出,组合数与连接法的数量是对应的。有多少组合数,就有多少种连接法,如组合数为 3 种,则有 3 种连接法。三种连接法表现出三种状态。因此,组合数即状态数。

表 1-4-1

区间数 (k)	组合数 (C_{N-2}^k)	折线连法	折线平均长 (L_k)	平均间距 (h_k)
1	$C_1^1 = 1$	\overline{AB}	$L_1 = \overline{AB}$	$h_1 = x_2 - x_1$
2	$C_2^2 = 3$	$\overline{ADB}, \overline{ACB},$ \overline{AEB}	$L_2 = \frac{1}{3}(\overline{ADB} + \overline{ACB} +$ $\overline{AEB})$	$h_2 = \frac{1}{2}(x_2 - x_1)$
3	$C_3^3 = 3$	$\overline{ADCB}, \overline{ACEB},$ \overline{ADEB}	$L_3 = \frac{1}{3}(\overline{ADCB} + \overline{ACEB}$ $+ \overline{ADEB})$	$h_3 = \frac{1}{3}(x_2 - x_1)$
4	$C_4^4 = 1$	\overline{ADCEB}	$L_4 = \overline{ADCEB}$	$h_4 = \frac{1}{4}(x_2 - x_1)$

给定断面上实际工程数或断面数 N (均指与储量计算有关的工程数、断面数), 得区间数 k :

$$k = 2, 3, \dots, N - 1$$

若任意两型值点间的直线连线长为 $D_{r,r+1}$:

$$D_{r,r+1} = \sqrt{(y_{r+1} - y_r)^2 + (x_{r+1} - x_r)^2} \quad (1.4.5)$$

则第 k 个区间数时的平均折线长为 L_k :

$$L_k = \frac{1}{C_{N-2}^{k-1}} \sum_{i=1}^{C_{N-2}^{k-1}} \left[\sum_{j=1}^k D_{r,r+1} \right]_i \quad (1.4.6)$$

式中 $r_j = j, \dots, N - (k - 1); j = 1, 2, \dots, k; i = 1, 2, \dots, C_{N-2}^{k-1}$ 。

定义 $r_j < r_{j+1}$, 且令 $r_1 = 1, r_{k+1} = N$, j 为节点序号 r 的序号, 它制约 r 的个数, 而 j 本身的个数又受 k 的约束, 当 N 给定后, k 即确定; i 为状态数, 受 k 和 N 的数目制约, 其数目为 C_{N-2}^{k-1} 。由此可见, 当 N 给定后, k, j, r_j, i 等都被确定。设断面区间直线长 L' :

$$L' = x_N - x_1$$

第 k 个区间数时的平均间距为 h_k :

$$h_k = L' / k \quad (1.4.7)$$

对应的平均折线长即为 L_k 。

建立直角坐标系, 有点集 $\{L_k, h_k\}$ 。由于平均间距 h_k 是随 k 值

成自然数增大而减少,其减小速度开始快,往后逐渐放慢。而折线长 L_k 是随 k 值的增大而逐渐增大,增大的快慢,取决于观测值的大小和它们之间的离散程度。

(1.4.3)式中,若令 $R = a, 1 - \alpha = b$, 则(1.4.3)式即为一般幂函数公式:

$$L = a l^b \quad (1.4.8)$$

图形如图1-4-7, 曲线 $f(l)$ 随着量尺 l 的缩小无穷地逼近横坐标 L 。

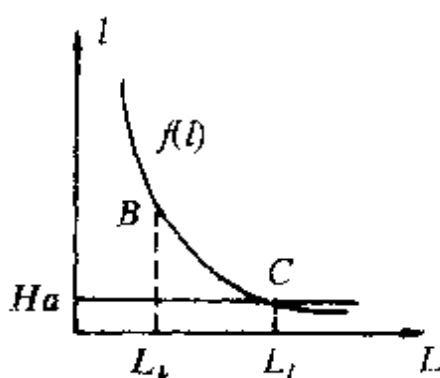


图 1-4-7

从分维概念可知, B 点的豪斯道夫维数 n_B 为:

$$n_B = \omega_B \frac{\ln L_k}{\ln l} \quad (1.4.9)$$

C 点的豪斯道夫维数 n_C 为:

$$n_C = \omega_C \frac{\ln L_l}{\ln l} \quad (1.4.10)$$

L_l 是当量尺 $l = H_a$ 时折线长度, L_k 是时刻 k 的折线长度。既然 C 点是真量的表征点, 那么 n_C 便能刻画客体真实的复杂程度, 而 n_B 只刻画时刻 k 的复杂程度。这种复杂程度之比, 无疑能刻画客体的精确程度。此精度即为 SD 法预测精度, 记为 η , 则:

$$\eta = \rho \frac{n_B}{n_C} = \rho \frac{\ln L_k}{\ln L_l} \quad (1.4.11)$$

(1.4.11)式即为 SD 法精度公式。我们称 ρ 为框架指数, 将在 1.4.6 节讨论。式中 L_k 及 L_l 可由量尺 l 计算出来, 但 l 是一个未知数, 而且确定 l 值十分复杂, 那么, SD 法预测精度很难由(1.4.11)式立即求出。

由(1.4.4)式、(1.4.8)式可写成:

$$L = a(\sqrt{h^2 + \Delta Z^2})^b = a(h \sec \alpha)^b \quad (1.4.12)$$

b 是一个分数值。 $h \sec a$ 起着量尺的作用。根据实际需要,令 $\sec a = 1$, 于是(1.4.8)式中量尺 l 由观测点间距 h 替代。有

$$L = ah^b \quad (1.4.13)$$

则时刻 k 的折线长 L_k 为:

$$L_k = ah_k^b \quad (1.4.14)$$

图1-4-5的曲线 $f(h)$ 比图1-4-7的曲线 $f(l)$ 平缓。当待定系数 a, b 求得后,即可得到豪斯道夫维数 n , 即

$$n = 1 - b \quad (1.4.15)$$

很明显,这里 n 值不是严格的豪斯道夫维数。因为(1.4.14)式中的 h_k 不是量度曲线(折线)的量尺 l , 而是时刻 k 的观测点平均间距, L_k 亦不是曲线长,而是折线长,它的增长速率按一定比值减慢。这里仍用豪斯道夫维数称谓,可视其为它的延拓。假设,有甲乙两个体积相等的矿体,勘探网度和工程数也相同,如果甲矿体的分数维 n 比乙矿体分数维 n 大,说明甲矿体比乙矿体复杂。甲矿体的预测精度比乙矿体预测精度应低。为此,我们用分数维 n 来刻画矿体复杂程度的同时,也用来预测其精度。

以图1-4-5为例,当 $h = 1$ 时, $L = a$, 曲线 $f(h)$ 与 $h = 1$ 的交点 C 可视为客观真量的表达点。有限工程的信息点 B 对 C 点的逼近程度即为 B 点之精度。

此时 B 点的豪斯道夫维数 n_B 为:

$$n_B = \omega_B \frac{\ln L_k}{\ln h} \quad (1.4.16)$$

C 点的豪斯道夫维数 n_C 为:

$$n_C = \omega_C \frac{\ln L}{\ln h} \quad (1.4.17)$$

于是:

$$\eta = \rho \frac{n_B}{n_C} = \rho \frac{\ln L_k}{\ln L} \quad (1.4.18)$$

令 $\rho = 1$, 便称只考虑变量 h 求取的精度为原始精度,记为 η_0 , 则

$$\eta_0 = \frac{n_B}{n_C} = \frac{\ln L_k}{\ln L} \quad (1.4.19)$$

由 $k = N - 1$, 有 $L_k = L_{N-1}$, L_k 为 k 取最大值时的折线长。因令 $k = 1$, 对(1.4.13)式取对数。

$$\ln L = \ln a + b \ln h$$

使得 $\ln L = \ln a$, 则 $\frac{\ln L}{\ln a} = 1$ 为精度最大值。于是, 原始精度 η_0 为:

$$\eta_0 = \frac{\ln L_{N-1}}{\ln a} \quad (1.4.20)$$

其图形如图1-4-8所示。

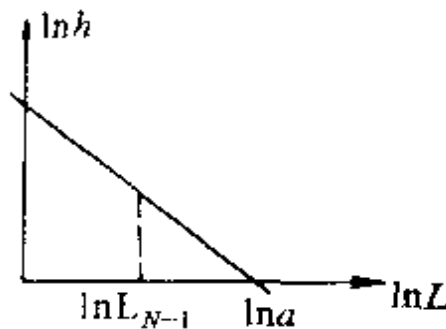


图1-4-8

由(1.4.13)式至(1.4.20)式, 可得出原始精度与豪斯道夫维数 n 的关系式:

$$\eta_0 = 1 + (1 - n)F \quad (1.4.21)$$

式中 F 为 B 点的比例常数。 $F = (\ln h_k / \ln a) < 1$, 并且 $1 < n < 2$, $-1 < (1 - n)F < 0$ 。于是, n 越大, 则 η_0 越小。即原始精度 η_0 与豪斯道夫维数 n 成反相关。

图1-4-9是云南马拉格老阴山铅矿利用勘探资料, 由不同工程数算出的原始精度 η_0 与豪斯道夫维数 n 的对比图。为便于对比, 豪斯道夫维数 n 曲线改为相应的 $1/n$ 曲线, 其结果是 $1/n$ 曲线与 η_0 曲线形态十分相似。

既然原始精度 η_0 没有体现变量 $\sec \alpha$ 的影响因素, 那么, 它只能用于特定条件下的精度预测。例如等间距取样, 矿体变量的空间变化具有明显规律性等, 此时, 原始精度预测效果一般说来是好的。否则, η_0 值常是系统地偏高。为了增强精度预测的适应能力,

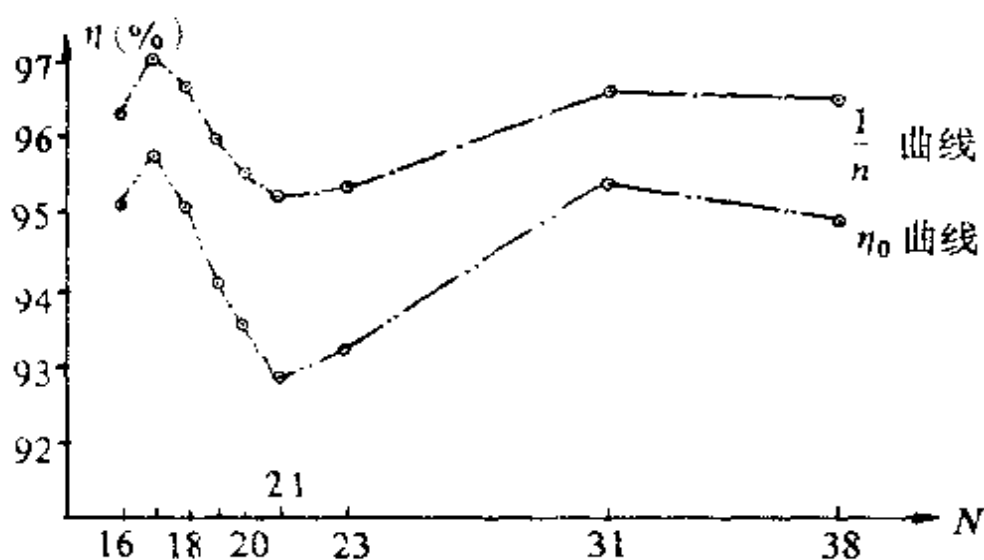


图 1-4-9 原始精度 η_0 与豪斯道夫维 n 的倒数曲线对比图
云南马拉格老阴山铅矿

提高预测的准确度，必须考虑因素 $\sec\alpha$ 。

第四节 取样工程的分布均匀程度 对储量预测精度的影响

既然位移距被定义为观测点平均间距，那么，它只体现工程控制程度，不表现工程的分布形式。等间距取样只是位移距的特殊分布形式，而不等间距取样的分布形式多种多样。如果两个位移距相等的复杂实体，用等间距的位移距和不等间距的位移距计算精度，其效果是不一样的。

在运用分维概念度量曲线长度时，同一 k 时刻的量尺必须是不变的。不同的 k 时刻的量尺是不一样的。但每个 k 时刻内必须是同一量尺来度量。对于取样工程来说，要在等距条件下才能比较曲线的复杂程度。

下面以等间距和不等间距取样来讨论 SD 精度问题。

一、等间距取样的精度预测

如果矿体的地质变量，在空间呈明显规律性变化，而又是等间

距取样,意味着相邻观测值的增量变化是稳定的。前面已经说到,在这种情况下用原始精度作预测,效果很好。

为便于说明问题,先以规则的几何体为例。规则的几何体的理论值(真量)是可以由确定性公式准确地计算出来。可以认为它的体积真量是可知的。SD法用有限的稀疏的观测点为信息计算它的体积,然后求它与体积真量之比,即得实际精度。用实际精度验证由SD法计算的预测精度无疑是合理的。如果SD法预测精度 η 与实际精度 η' 吻合或者接近,即 $\eta \leq \eta'$ 则说明SD精度预测是成功的。

例1:假设有A、B、C三个半径分别为2m、4m、40m的半圆。半圆A面积理论值为6.283m²,半圆B面积理论值为25.133m²,半圆C面积理论值为2513.274m²。现对三个半圆均用等间距位移距为1m取观测点,然后用SD法计算面积和精度。计算结果列于表1-4-2中:

表 1-4-2 半圆面积计算表

半圆代号	圆半径 r (m)	间距 h (m)	理论 面积 值 (真值) m^2	SD法计算面积		SD 法 预测 精度 (%)	实际 精度 (%)	预测 精度 与实 际精度 之差(%)
				端点条件	m^2			
A	2	1	6.283	假设端点条件	6.142	99.74	97.75	1.99
				实际端点条件	6.294			
B	4	1	25.133	假设端点条件	24.960	99.44	99.31	0.13
				实际端点条件	25.280			
C	40	1	2513.274	假设端点条件	2508.221	99.90	99.80	0.10
				实际端点条件	2515.167			

由表中可以看出:当观测点间距相等、观测值增量变化稳定时,无论圆半径(观测值)如何变化,SD法原始精度与实际精度基本吻合。此时用原始精度作预测的效果好。此外,预测精度更接近实际端点条件下的实际精度,而略疏于假设端点条件下的实际精度。这是因为预测精度是在实际端点条件下的预测。实际端点条件不明确的情况下使用假设端点条件。这里的假设端点条件是指样

条函数中的自然端点条件,即设端点的二阶导数为零。隐伏地质体的实际端点条件常常是未知的。因此,SD法一般是采用假设端点条件下的计算。这使SD法预测精度略有误差。如圆半径为2m时,在实际端点条件下,预测精度为99.74%,不仅是在该条件下计算的面积值的实际精度99.82%的范围内(即预测精度小于实际精度),而且基本吻合,仅差0.08%。而在假设端点条件下计算的面积值的实际精度为97.75%,预测精度达到99.74%,已大于实际精度,其预测效果相对较差。显然,实际端点条件下的预测精度比假设端点条件下的预测精度效果好。

总之,由表1-1-2可见,观测点等间距的情况下,半径不同,位移距相同时,计算的预测精度,随着圆半径增大,它与实际精度的误差更小。虽然假设端点条件下的预测精度有一定误差,但它仍然不失为一较准确的预测值。

下文将讨论对在等间距取样条件下,半径相同,位移距不同的规则形体计算预测精度问题。

例2:有一半球,两边对称地各截去一部分(图1-4-10),称半球台。取不同位移距计算它的体积和精度。

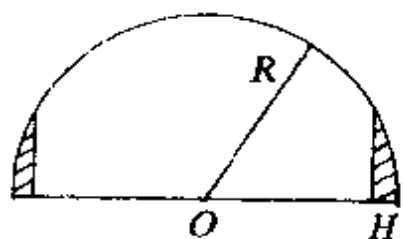


图 1-4-10 半球台断面图

设球半径 $R = 4\text{m}$, 以球冠高 $H = 1\text{m}$ 各截去一部分构成半球台。用确定性公式计算得出它的体积理论值:

$$V = \frac{\pi}{3} [(2R^3 - H^2(3R - H))] = 122.522\text{m}^3$$

现分别以不同的等间距位移距分别计算其体积和精度。先以位移距 $h = 2\text{m}$ 对此半球台截取4个半圆面,每个半圆面上相应的又以位移距 $h = 2\text{m}$ 取观测点,接着,又以位移距 $h = 1\text{m}$ 对此半球台共

截取7个半圆面,每个半圆面上相应的再以位移距 $h = 1\text{m}$ 取观测点。对这两种情况计算各自的体积和精度。计算结果列入表1-4-3:

表 1-4-3 半球台体积计算及其精度表

半径(R) m	位移距(h) m	端点条件	体积(V) m ³	实际精度(%)	预测精度 (原始精度)(%)
4	h = 2	假设端点条件	112.376	91.72	92.84
		实际端点条件	113.966	93.02	
	h = 1	假设端点条件	120.517	98.36	99.07
		实际端点条件	122.170	99.71	

从例2中仍可看出:

(1)随着观测点增多,位移距 h 变小,SD 法体积值越接近理论体积值(真值)。也就是说,实际精度值是随 h 的减小而增高。

(2)预测精度值也是随 h 减小而增高。

(3)无论位移距 h 如何变化,预测精度与实际精度都十分接近。

(4)实际端点条件下的实际精度仍是高于假设端点条件下的实际精度。预测精度总是更接近实际端点条件下的实际精度。也就是说,实际端点条件下的体积计算和精度计算总是优于假设端点条件下的体积计算和精度计算。

(5)假设端点条件下的计算和预测是可用的。

按表1-4-3计算结果,可进一步预测半球台的体积真量。由于它是上凸函数,故它的体积真量的估计量应是SD法计算体积除以预测精度,见表1-4-4。

由此可见,如果一个比较规则的、观测值稳定的实体,用原始精度预测,也能取得较好的效果。对于矿体说来,一般不会是像半球台那样规则稳定的实体,因此不可望用原始精度取得如半球台那样好的预测效果。但是,只要比较稳定,效果依然是好的,随着不稳定因素的增多,其预测效果相对差些。如里士铜矿(表2-3-2), U 量是经权尺化处理后的各计算量,预测效果就好,而未经权尺化处理的 T 量,相对差些。虽然实际精度(90.72%)在预测精度

(62.20%)范围之内,但预测范围过大,效果相对稍差。

表 1-4-4 半球台体积真量预测值及预测精度误差值表

预测体积真量(m ³)	预测体积真量与体积理论值之绝对差	预测精度与实际精度相对误差(%)
$112.376 \div 92.84\% = 121.043$	-1.479	-1.120
$113.966 \div 92.84\% = 122.755$	+0.233	+0.180
$120.517 \div 99.07\% = 121.648$	-0.874	-0.710
$122.170 \div 99.07\% = 123.317$	+0.795	+0.640

二、不等间距取样的精度预测问题

下面以不等间距的观测点为信息讨论精度预测问题。

例3:对于例2之半球台,在不改变体积大小情况下,分别在不等间距的不同位移距状况下进行体积计算。不同位移距有不同的观测点数。现取六种观测点数,它们分别为28、33、38、45、52、59。如果它们不受不等间距因素影响的话,则其精度计算结果应得到例2同样结论。表1-4-5的计算结果可以看出,它们并不完全如此。它们虽然随着观测点数的增多(即位移距 h 的减小)而原始精度增大,但增大过度,使得实际精度与预测精度之差成为负值,以至预测精度比实际精度大10—20%。

表 1-4-5 不等间距、不同观测点数计算半球台体积及其精度对比表

计算范围	观测点数	计算体积(m ³)	预测精度(%) (原始精度)	实际精度(%)	预测精度与实际精度之差(%)
球体半径 $R = 4m$ 球冠高 $H = 1m$ 理论体积值 $V = 122.523$ m^3	28	94.580	95.145	77.194	-17.951
	33	104.885	96.134	85.605	-10.529
	38	105.210	97.334	85.870	-11.464
	45	104.800	98.914	85.536	-13.384
	52	107.244	99.468	87.530	-11.938
	59	110.425	100.000	90.127	-9.873

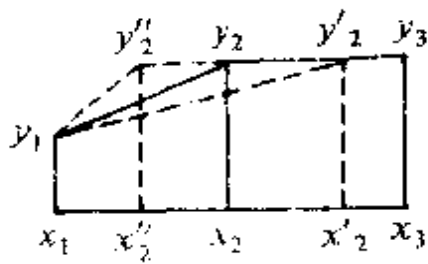


图 1-4-11

再如前述的云南马拉格老阴山铅矿例子。工程数由少逐渐增多时，其原始精度并不随之增大，而是呈波状变化。一个重要因素就是观测点间不等距，观测点距的

随机性，增加精度预测的干扰因素。因此，观测点不等距，无法在同等条件下比较曲线的复杂程度。就是说，多种多样的位移距分布形式常造成精度预测的困难。如图 1-4-11。断面线上有三个等间距取样（观测）点 x_1, x_2, x_3 ，相应的观测值是 y_1, y_2, y_3 ，且 $y_2 = y_3$ 。当区间 $[x_1, x_3]$ 和观测值 y_1, y_2, y_3 不改变时，移动观测点 x_2 的坐标为 x'_2 或 x''_2 。相应地可得到 $A' = \{y_1, y'_2, y_3\}$ ， $A'' = \{y_1, y''_2, y_3\}$ 以及初始的 $A = \{y_1, y_2, y_3\}$ 三种状态。它们的位移距皆相等。在各状态中，观测值顶高间的连线（折线）长度，状态 A' 最短，状态 A'' 最长，状态 A 居中。SD 精度法的基本思想是，在某一确定的观测域内位移距相等时，折线长的较折线短的精度低。由此可以认为，如果以状态 A 的精度为适中的话，则状态 A' 的精度偏高，状态 A'' 的精度偏低。对于这种不可具体预料的随机性观测值，在 (1.4.6) 式的交叉计算折线长后求其均值，削弱了随机性的干扰。但当观测点较少，而位移距 h 值离散性又大，它的随机干扰几乎是无法排除的。因此，一般说来，施工工程若不能等间距，至少应均匀地布置。

对于矿体的勘探工作说来，大多数情况下，施工的工程是不等间距的。这样，在许多场合下单独运用原始精度作预测是不够的。

第五节 精度参数

从公式 (1.4.13) 我们已经认识到，具体影响着 SD 精度预测的重要参数是 h 和 $\sec \alpha$ 。§ 1.4.4 节实质上就是讨论位移距 h 内部

结构变化对精度的影响问题。本节继续讨论参数 $\sec\alpha$ 。 $\sec\alpha$ 尚可分解为位移离差 ΔZ 和斜率角 α 。

便于直观分析问题,先作出精度参数分解图(图1-4-12)。

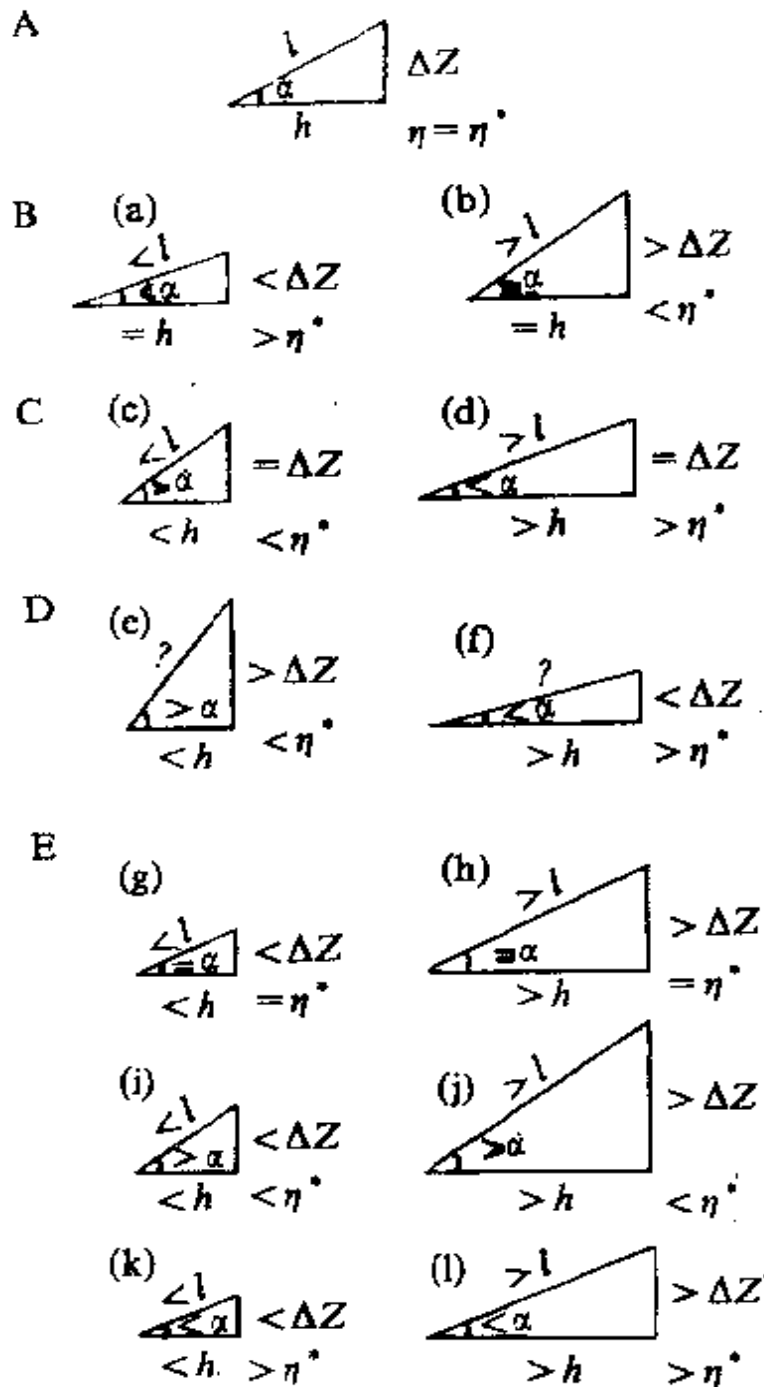


图 1-4-12 精度参数关系分解图

图中分解图共12个状态,有 B、C、D、E4个类型。它均是由四个精度

参数构成的直角三角形,并假定各三角形(包括A栏三角形)表征的都是形态相同和大小一样的矿体范围。A栏图形为标准图形,并假设它的精度 η 为已知精度 η^* ,下文将用B、C、D、E各栏的图形与之比较来阐述各精度参数的作用。

四个参数中,参数 l 取决于其它三个参数的取值。故这里不讨论参数 l 。

SD法预测精度,不仅反映储量的精确程度,而且还体现工程控制程度,可以用作于工程控制程度的定量尺度。为此本节除上述参数外,还将讨论框格系数。

一、位移离差

位移离差 ΔZ 定义为约定区域内相邻观测值增量绝对值的均值,即空间某位置 x_i 的地质变量 $Z(x_i)$ 与该点相距为 h_i 的相邻另一地质变量 $Z(x_{i+1})$ 间的增量绝对值的均值 ΔZ :

$$\Delta Z = E(|Z(x_i) - Z(x_{i+1})|) \quad (1.4.21)$$

位移离差 ΔZ 相当于常用的平差绝对值均值。位移离差只是相邻观测值增量的非负数学期望。它与相邻距离大小无关。这样,位移离差与工程数无关,是一个不确定量。

对于等同范围的两个矿体,如果工程控制数相等,在地质变量的量纲一致条件下,其位移离差越大则矿体越复杂。由此计算的储量,其可靠性相对差些,预测精度应该较低。如图1-4-12中B栏,图(a)和图(b)的 h 值均等于A栏中的 h 值,表示两个相同范围的矿体,用了相等的工程数。图(b)比图(a)的位移离差 ΔZ 要大些,于是可以推断图(b)矿体比图(a)矿体复杂,因此由图(b)计算的精度相对低些。

图1-4-13是分别取两个矿体相同范围的断面线,a断面与b断面各自有四个工程,二者不仅工程数相等,而且间距、观测值也相等,只是构型不同,使得它们的位移离差却不等。

a断面比b断面的位移离差小,图1-4-13a断面相当于图1-4-12中B栏的图(a),图1-4-13b断面相当图1-4-12B栏的图(b)。如果作精度预测的话,图1-4-13的b断面的预测精度应比a断面的预

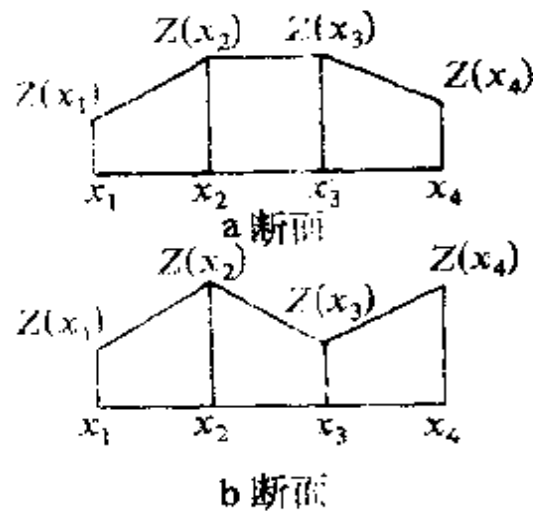


图 1-4-13 两个相等的等距位移距、不等的位移离差断面图

测精度低。

对于等同范围的两个矿体，若工程数各不同，而位移离差相等或相近，则表明工程数多的，其矿体较复杂，其储量计算可靠程度较差，其预测精度亦应低。图 1-4-12 中 C 栏中两图形，位移离差均相等， h 值大的 (d) 图其预测精度比 h 值小的 (c) 图的预测精度高。

图 1-4-14 a 断面与 b 断面的位移离差是相等的，但 b 断面比 a 断面复杂，因此由 b 断面预测之精度应比 a 断面精度低。

综上所述，在范围相同条件下，若位移距相等，位移离差越大，则预测精度越低 (B 栏)。若位移离差相同，位移距越大，则预测精度越高 (C 栏)。这后一种情况 (C 栏)，对于同一矿体来说，与实际要求是相反的。就是说，同一矿床，随着工程加密，它的位移离差常常变化不大。这时，工程越密，预测精度不仅不会增高，甚至还会降低。显然是不合理的。这一问题将由下文讨论。

二、斜率角

从图 1-4-12 中可以看出，决定精度大小，除 ΔZ 值外，还受到位移距 h 的约束，而斜率角 α 正好描述了二者的关系。

斜率角 α 是由位移离差 ΔZ 和位移距 h 构成的正切函数角。 α 值的大小，可以描述观测值变化的复杂程度。它也是刻画精度的一

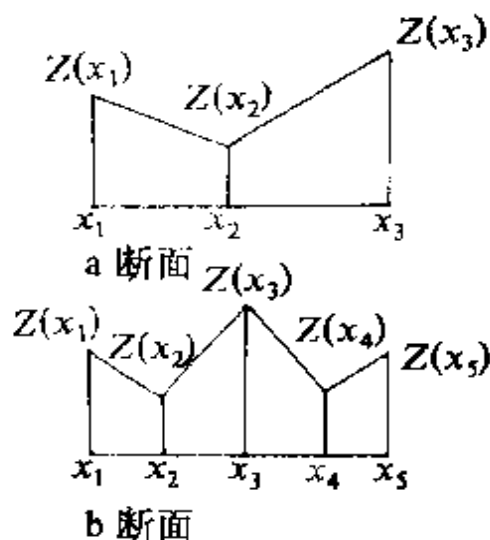


图1-4-14 位移距不等、位移高差相等断面图

个参数。由公式(1.4.13)式可知,当 h 值固定时, α 越大,则 l 越长,表明矿体越复杂,预测精度越低。

既然位移高差 ΔZ 不一定随位移距 h 的增大而增大或减小,那么,取决于位移距 h 和位移高差 ΔZ 的斜率角

α ,也不一定随着工程数的增加而递增变大或变小。于是,斜率角 α 参与刻画的各个 k 状态的精度,它们也不存在递增或递减的确定性函数关系。即 k_i 状态与 k_{i+1} 或 k_{i-1} 状态不存在递增递减的确定性函数关系。

在求原始精度 η_0 时,无论 ΔZ 、 h 值如何变化,凡 α 相等,其精度就相等。就是说,相似图形的复杂程度相同。反之,凡图形相似,其精度都相等。其结论是不一定成立的。例如同一成矿环境的同一成因矿种的两个矿体,在观测值量纲一致的情况下,欲求得同等精度,必须要求形态或矿化复杂的矿体比简单的矿体的位移距要大些,工程数更少些。显然这是不合理的。

计算原始精度 η_0 时,令 $\sec\alpha=1$,便没有考虑斜率角 α 的作用。但是,在求取折线长 L 时,利用的(1.4.5)公式中,却涵有 $\sec\alpha$ 的作用。它使得原始精度不随着工程数的增加而递增,使原始精度的预测作用受限制。由此,不能忽视 α 对精度预测的影响作用。

三、框格系数

前面提到,由于工程加密,有时候预测精度降低,这种情况是

不合理的。出现这种情况的原因是由于位移离差的大小是由客观的地质现实所决定的，所以它不一定随着工程数的增加、位移距减小而相应地减小。即使减小，其减小速率远远没有位移距减小的速率大。使得原始精度不一定随工程数增加而增高。原始精度只在一定条件下反映储量精度，而任何时候都不体现工程控制程度。特别对于复杂矿体，加密工程后，矿化或矿体形态很可能表现为更复杂，变化更大。自然，由加密后的工程参与计算的原始精度也不会因此而增高。SD 精度法要求预测精度不仅要反映储量精度，还要体现工程控制程度，这样的预测精度才具有适用意义。因此，预测精度应该随着工程数的增多而相应的增高。要达到这一目的，只有当位移距减小的速率小于位移离差减小的速率时，才会如此。这对矿化或形态变化十分稳定的矿体说来是可能的，矿体变化越稳定，位移离差随位移距减小而减小，其减小速率增大。所以预测精度就会随工程数增多而增高。这种情况是不多的。往往是随工程数的增多，位移离差 ΔZ 变化不是很大。这就决定了在作精度预测时，必须消除速率减小过快的位移距影响，使之适应对精度预测的要求，使预测精度既能体现储量的精度，也使它能反映工程控制程度。为此，我们在这里引出框格系数 ϕ ，用以调节位移距变化的影响。

当一勘探对象(矿体)的范围不变，施工数目由稀而密，它的某一阶段的工程数为 N ，此时，由 N 个工程在其点位上构成了平面框架，其单位框架称框格。随着勘探阶段的深入， N 逐渐增大，其框格变小。 N 越大，框格越小。不难看出，框格相当于勘探网度，指网度的方格化。例如网度为 $50\text{m} \times 100\text{m}$ ，则框格为 $\sqrt{50 \times 100} \times \sqrt{50 \times 100} = 70.71\text{m} \times 70.71\text{m} = (70.71\text{m})^2$ 。框格记为 H^2 。由于 H 恰是框格的一棱，便称 H 为框棱。此例中框棱 $H = 70.71\text{m}$ 。它的具体表示是：

第 j 条勘探线工程平均间距：

$$h_j = \frac{x_j - x_i}{n_j - 1} \quad (1.4.22)$$

勘探范围的工程平均间距：

$$\bar{h} = \frac{1}{\sum_{j=1}^m (n_j - 1)} \sum_{j=1}^m (n_j - 1) h_j \quad (1.4.23)$$

勘探线间的平均间距：

$$\bar{l} = \frac{X_m - X_1}{m - 1} \quad (1.4.24)$$

则框棱为：

$$H = \sqrt{m} \quad (1.4.25)$$

上述式中， n_j 为第 j 条线上工程数， x 为工程投影坐标， m 为勘探线数， X 为勘探线投影坐标。

从式中可知，框棱的大小，不仅与勘探对象（矿体）范围的大小有关，而且也与工程控制程度有关，因而在这里它只是相对的。当工程数最少时， H 最大，亦即框棱最大，当工程数最多时， H 最小，亦即框棱最小。理论上当 $N \rightarrow \infty$ 时，框棱为零。此时，框格体积对精度无影响，则令其影响精度为 1，如图 1-4-15。 H 最大时，框格体积对精度影响亦最大。

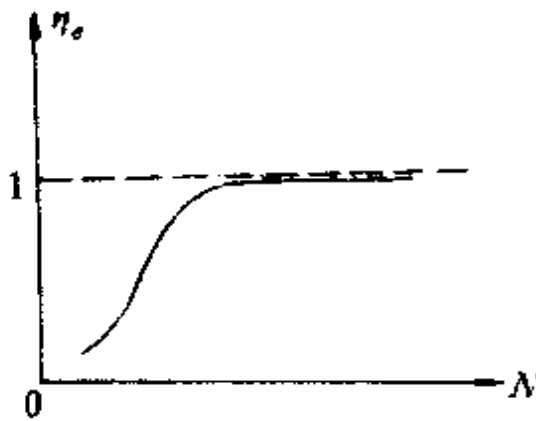


图 1-4-15 影响精度 η_0 与工程数 N 关系图

由于各个矿体大小以及勘探范围不同，即使工程数 N 相同，它的框格大小却不尽相等。这不相等的框格，对不同的矿床，其影响程度可能是一样。

这样，如果只取

框棱的相对性，则它起不到消除不同矿床不同体积对精度产生影响之作用。为了确定框格绝对大小的影响，还可用框格系数 ϕ 来调节不同类型的矿床，使其采用不同勘探网度影响精度的参数。例

如,同一矿床,同样的工程数,划分大的矿段比划分小的矿段,精度计算相对高些。或者,如前述,同一矿段,当观测值的空间构型不变,当放宽网度获取观测值时,其计算精度随网度放稀还会增高。可见,矿体块段大小是精度的影响函数。

如果能够知道某一约定基本矿块体积 V_0 的精度,当其体积缩小或增大至 V_1 时,它的精度增长,应与其体积比有关:

$$\eta = f(H_1, H_0) \quad (1.4.26)$$

式中 H_0 为基本矿块的平均间距, H_1 为工程加密或放稀到 k 状态时的平均间距(框棱)。设放宽到最宽状态时的平均间距为 H_{\max} , 加密到最密状态时的平均间距为 H_{\min} 。 H_{\max} 和 H_{\min} 为 H_0 的两个极端状态的平均间距。中间状态的平均间距 $\bar{H} = (H_{\max} + H_{\min})/2$ 。

H_0 是基本矿块的框棱,称基距,它是工程控制到一定程度,被认为可以确认矿体是真态的最小框格的框棱。在地质勘探及开发勘探过程中,一般网度的框棱大约在20—1000m范围内,写成指数形式,即大约在 e^0 — e^3 m 范围内,框棱的大小取决于不同类型矿床和勘探程度。矿产储量规范中,有关网度的规定,是根据多年的实践经验得来的。它关于不同矿种、不同矿床类型的同一勘探程度(储量级别)采用不同网度的思想是科学的。例如,同是B级储量,锡矿I类的网度为50m×50m,而高岭土I类网度则为100m×100m,等等。虽然尺度不是十分准确可靠,但它在许多场合下是合理的。SD法是在确认它基本合理的前提下,来确定合理的基距 H_0 。如果认为框棱 $H_1 = \sqrt{\text{网度}}$ (如锡矿框棱 $H_1 = \sqrt{50 \times 50}$ m),则取框棱的1/20即能满足基距 H_0 的要求(锡矿在此时的 $H_0 = 2.5$ m)。由前文所述可知此基距大致相当于搜索步长,但无论如何,基距 H_0 不应大于框棱的最小值(e^0 m),否则,它将失去基距的意义。于是, H_0 应在 e^0 — e^3 m 范围内变化,如图1-4-16所示。可见,框棱最小值的指数比基距最小的指数大3,故由它的对数关系可以求得基距 H_0 。有:

$$\ln H_0 = \ln H - 3 \quad (1.4.27)$$

令
于是
则

$$H_0 = e^{x_2}, H = e^{x_1}$$

$$\ln e^{x_2} = \ln e^{x_1} - 3$$

$$x_2 = x_1 - 3$$

由前面定义得：

$$x_2 = \begin{cases} x_1 - 3 & 3 \leq x_1 \leq 6 \\ 3 & x_1 > 6 \end{cases}$$

代入前式，即得到 H_0 。

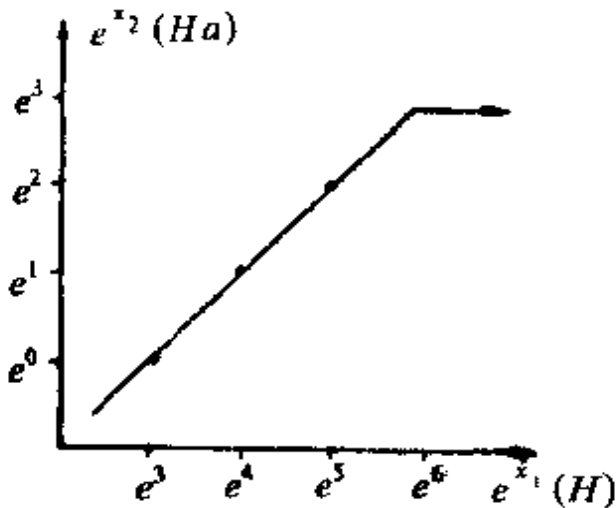


图 1-4-16 基距与框格关系图

定义框格系数 ϕ 为 H_0 与 H_{min} 的对数比值，即：

$$\phi = \ln H_0 / \ln H_{min} \quad (1.4.28)$$

又令 $\tau = H_0 / H_{min}$ ， τ 是 k 状态时平均间距 H_0 相对于基距 H_{min} 的

倍数。用 τ 来调节 H_0 与 H_{min} 的对数比值。目的在于得到绝对体积的影响，而不是相对体积的影响。于是：

$$\phi = \ln(H_0/\tau) / \ln(H_{min}/\tau)$$

化简得：

$$\phi = \ln H_0 / (\ln H_{min} - \ln H_0 + \ln H_0) \quad (1.4.29)$$

由框格系数 ϕ 得到影响精度 η_0 ：

$$\eta_0 = \eta_0 / \phi \quad (1.4.30)$$

影响精度 η_0 体现着工程控制程度，它是随着工程数的增加，

精度增高的量度,也是网度的量度。但是,不能笼统认为,投入了多少工程就应得到相应的控制程度的结论,它只能言及一个具体的矿床(体)的工程控制程度。

以上所述,尚未全部排除干扰精度的因素,只当全部排除干扰后,才能得到既反映储量精度又体现工程控制程度的预测精度。

第六节 框架指数及 SD 预测精度

一、地质变量大小的影响及框柱系数

在计算精度求取曲线(折线)长度过程中,可以觉察到,(1.4.13)式与地质变量 $Z(x)$ 自身大小无关。由此而导出的精度计算——无论是原始精度计算或影响精度计算,都没有考虑地质变量 $Z(x)$ 自身大小的影响。

不同矿山的品位值,由于计量单位不同,它们的值往往不是同一数量级。例如一些黑色金属矿山的品位用百分比来表示,比值常在20%—70%,以至更高,各不等。而一些有色金属矿山的品位值常在10%以下,有的甚至更低。它们之间的数值相差是大的。又例如,矿体厚度有时相差也很大,薄至1米以下,厚可达数十米以至百米以上。于是,在描述观测值 Z 时,求得的位移离差 ΔZ 相互差别可能很大。一般说来,观测值相差一个数量级的两个实体,大数量级观测值的位移离差,比小数量级观测值的离差也要相差一个数量级。当随着工程控制程度增高,位移距减小的时候,大数量级的位移离差比小数量级的位移离差变化速率快。由此计算的精度,前者的精度会比后者的低;如果变化速率过快,则其精度可能比实际精度偏低。而由小数量级观测值的位移离差计算的精度可能比实际精度偏高。

假设有两个实体,均取位移距 $h = 1\text{m}$, 而位移离差 $\Delta Z_1 = 19.5\% - 19.0\% = 0.5\%$ 和 $\Delta Z_2 = 1.5\% - 1.0\% = 0.5\%$, 这两个相差一个数量级的两类不同观测值的实体,依前计算,可以得到相

同的精度。而实际上,它们与实际精度相差的程度不会一样。为说明问题,现将表1-4-5中半球台半径由 $R=4\text{m}$ 放大10倍,让其相差一个数量级进行比较。计算结果列于表1-4-6中,将此表与表1-4-5对比就可以清楚地知道,表1-4-6的精度更接近实际精度,即表1-4-5的结果是将数量级较小的实体(半球台)的精度系统地计算高了。

表 1-4-6 半径增大10倍的半球台体积及其精度表

计算范围	观测 点数	计算体积(m^3)	预测精 度(原始 精度) (%)	实际精 度(%)	原 始 精 度 与 精 度 之 差 (%)
球 体 半 径 $R = 40$	28	81665.62	75.960	66.665	-9.295
	33	90362.68	77.148	73.752	-3.396
球 冠 高 $H = 10$	38	90975.18	78.129	74.064	-4.065
	45	90419.31	79.974	73.798	-6.176
理论体积值 $V = 122522.1135$ (m^3)	52	92365.25	79.947	75.386	-4.561
	59	102858.80	88.503	83.951	-4.554

由此可见,精度预测,除了前面诸因素外,还必须考虑观测值大小的影响。为此,引出框柱系数 ψ 。它的作用在于调整系统地偏高或系统地偏低的预测精度。在排除其它干扰因素的基础上,排除地质变量 $Z(x)$ 本身的影响后的预测精度为:

$$\eta = \frac{1}{\Phi\psi} \eta_0 \quad (1.4.31)$$

令 $\rho = \frac{1}{\Phi\psi}$, 则上式为:

$$\eta = \rho \eta_0 \quad (1.4.32)$$

不难看出, (1.4.32)式即为(1.4.11)式的另一形式。 ρ 是框架指数,是框格系数与框柱系数乘积的倒数。 η_0 是原始精度,是折线长度的对数比值,实质上是不固定的框架的比值。 ρ 与 η_0 的乘积在于固定框架比值。而 ρ 又是对数真数的指数,框格与框柱构成框架,故称 ρ 为框架指数。它调节变量所构成的空间对精度预测的影响而得到SD预测精度 η 。为了计算的方便,(1.4.32)式可写成:

$$\eta = \frac{1}{\psi} \eta_0 \quad (1.4.33)$$

这样,只要能够恰当地给出 ψ ,预测精度即可得到。

SD法递进计算为求取框柱系数提供了信息。如果将状态 k 称当前状态,则状态 $k-i$ ($i=1, \dots, N-1$)便称历史状态。我们知道,当前状态的所有信息,都是过去各个时期(或阶段)信息的累积。将当前状态的信息重列于历史各阶段的信息,进行回溯分析,则当前单一状态变成了历史的多个状态,形成了“时间信息流”。上文介绍的储量的递进算法,就是这种“时间信息流”方法。不过,它的终止状态与精度预测的终止状态是不同的。所谓终止状态是指一个收敛函数的极限值。储量计算的终止状态的取值是当工程数 $N \rightarrow \infty$ 时的极限值。对于精度来说,“时间信息流”的终止状态的取值,无疑是当工程数 $N \rightarrow \infty$ 时,精度 $\eta=1$ 。同时,也只当终止状态的精度 $\eta=1$ 时,此预测才是合理而可靠的。倘若能满足这一条件,则说此“时间信息流”精度预测是成功的。

$$\lim_{N \rightarrow \infty} \eta = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{\psi} \eta_0 = 1 \quad (1.4.34)$$

ψ 在此取常数,则:

$$\lim_{N \rightarrow \infty} \eta_0 = \psi \quad (1.4.35)$$

“时间信息流”中某一时刻的原始数据取值均是继承前一刻的取值,这些取值是由数列组合交叉计算得来,削减了随机干扰因素,因此“时间信息流”所形成的曲线是比较光滑的。这给有效地利用回归方程作精度预测创造了条件。选用回归模型应注意:

(1)当 $\lim_{N \rightarrow \infty} \eta > 1$ 时,原 k 状态下的预测精度可能偏高。

(2) 当 $\lim_{N \rightarrow \infty} \eta < 1$ 时, 原 k 状态下的预测精度可能偏低。

于是强令 $\lim_{N \rightarrow \infty} \eta = 1$, 然后作回归, 得 SD 预测精度。

二、优选回归精度与套合精度

通过前面几个步骤, 消除诸因素干扰后, 为下面进行 SD 预测精度——优选回归精度和套合精度提供了条件。优选回归精度和套合精度为 SD 法最可靠的预测精度。

作为精度预测的回归模型, 应具单调性和收敛性。因此, 采用非线性回归模型。在这里采用了用有限数列取代无限空间, 用离散数据取代连续函数。从而使回归模型进行预测成为可能。这里, 主要采用了四种回归模型。

(1) 指数回归模型(图 1-4-17):

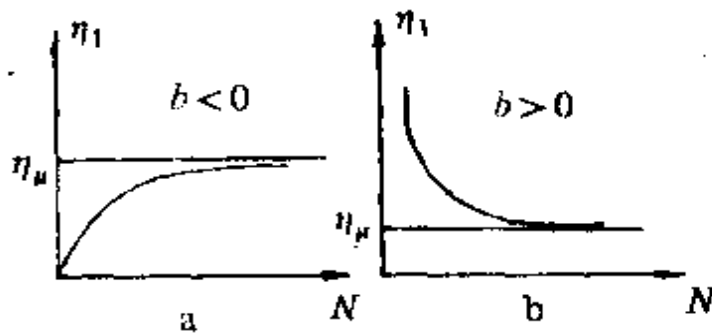


图 1-4-17

精度随着工程数的增加而增加或减少的变化过程, 可以看作是某种确定函数过程。例如, 某一时刻位移距为 h 时, 预测精度为 η 。若位移距减少 Δh 后, 精度变为 $\eta + \Delta\eta$, 这里 $\Delta\eta = b\eta\Delta h$, 由此, 得

$$\frac{d\eta}{d\eta} = b\eta$$

b 是常数, 由这一微分方程即可得到精度 η 随位移距的变化(减小)的方程:

$$f(h) = \eta = \eta_0 e^{bh} \quad (1.4.36)$$

当 $b > 0$ 时, $f(h)$ 为上升指数曲线; 当 $b \leq 0$ 时, $f(h)$ 为下降曲线。当工程数 $N \rightarrow \infty$ 时, 位移距 $h \rightarrow 0$, 则 $\eta = \eta_0$, 此时, η_0 即为极限值。可视为

客观精度理论值。将 $b = \frac{L}{N-1}$ 代入(1.4.36)式,即

$$\eta = \eta_{\mu} e^{\frac{L}{N-1}}$$

L 是常数,于是令 $b^* = bL, N^* = N - 1, b^*$ 为待定系数, N^* 为工程数,它们的意义分别与 b 和 N 相同,故 $b^* \rightarrow b, N^* \rightarrow N$,则有:

$$\eta_1 = f(N) = \eta_{\mu} e^{\frac{b}{N}} \quad (1.4.37)$$

于是,精度与位移距的函数关系,换成了精度与工程数的函数关系,这样更为直观,使用更方便。

当 $N \rightarrow \infty$ 时, $\eta_1 = \eta_{\mu}$, 而且 $\eta_{\mu} = 1$, 这样,如果 $N = k$ 时的中间状态提供的信息足够多,以至能满足这一函数关系时,则可较为准确地计算出当前状态的精度预测值来。

(2) 逆元回归模型(图1-4-18):

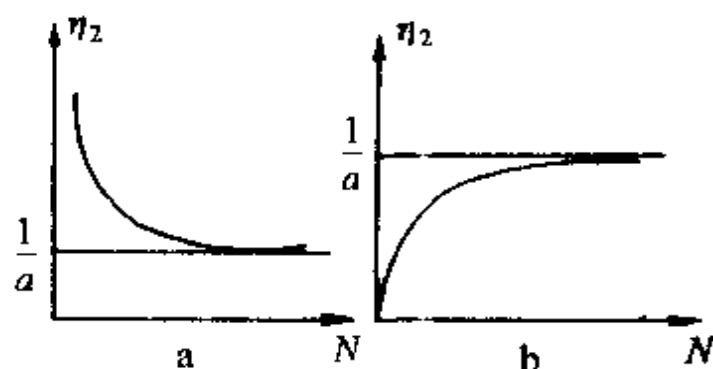


图 1-4-18

η_2 与 N 的倒数成线性关系的模型称逆元回归模型,即:

$$1/\eta_2 = a + b/N \quad (1.4.38)$$

其曲线开始上升或下降时速度较快,而后逐渐缓慢延伸地单调上升或下降。当 $N \rightarrow \infty$ 时, $\eta_2 = 1/a$ 。

(3) 非线性单元回归模型:

$$\eta_3 = a + b/N \quad (1.4.39)$$

它是与逆元回归近似的回归模型,为了增强模型的优选性,故列之。

(4) 罗吉斯谛曲线模型(logistic curve, 图1-4-19):

$$\eta_4 = \frac{a}{1 + \beta e^{-\gamma N}} \quad (1.4.40)$$

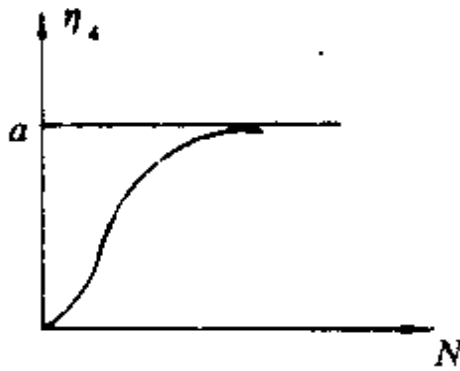


图 1-4-19

这是生物生长曲线,它的生长速度开始很快,而后迅速到达稳恒态。在储量计算及精度预测中,随着工程数 N 的增加,一般说来,不可

能增长如此之快,因此,它不能单独作为回归模型选用。但稳恒态值可表明数学增长过程的平衡态,如果它不随着工程数的递增而改变的话,则平衡态值就是极限值。由于工程数的有限性,很难说这种平衡态不发生改变。因此,不单独将它作为极限来进行预测,而是用它与前三种回归模型套合,使前面因 $\eta_2 \rightarrow \eta_3$ 过程中,沿过去“时间信息流”使其升高或降低了的预测精度,得到合理补偿。

前三种回归模型,经选优使用其中一种,从而得到优选回归精度。当它与模型(4)套合时,则得到套合精度,记为 η_T 。

模型(4)与其它三个模型中被优选者,用各自的残差作权,作加权套合。倘若模型(2)被优选,它的残差 δ_2 ,预测精度 η_2 ,模型(4)的残差 δ_4 ,预测精度 η_4 ,此时,用模型(2)与模型(4)作加权套合。得套合精度

$$\eta_T = \frac{\eta_2 \delta_4 + \eta_4 \delta_2}{\delta_2 + \delta_4}$$

模型(4)参与选优时,不计“名次”,其它模型以残差最小而被选中。故当模型(4)被选中时,则由它与另三种模型之次优者进行套合。由此而得的套合精度,即为SD法采纳之预测精度。若模型(4)未被选用,其预测精度采用优选之回归精度,如里士、老阴山、BKS等矿均采用优选回归精度,效果都很好。

表1-4-5和表1-4-6中,模型(4)未被选中,不能用套合精度,同

时它均小于对应的影响精度,因此,它只能采用优选回归精度。选择结果见表1-4-7:

表 1-4-7 递进计算半球台体积及其优选回归精度表

计算范围	观测点数(N)	计算体积V(m ³)	预测精度(%)	实际精度(%)
球半径	28	94.58	76.903	77.194
R = 4	33	104.885	79.692	85.605
球冠高	38	105.210	81.880	85.870
H = 1m	45	104.800	84.255	85.535
理论体积值	52	107.244	86.079	87.530
V = 122.522m ³	59	110.425	87.525	90.126
球半径	28	81665.62	63.0817	66.665
R = 40m	33	90362.68	68.581	73.752
球冠高	38	90745.18	70.826	74.064
H = 10m	45	90419.31	73.658	73.798
理论体积值	52	92365.25	75.845	75.389
V = 122522.1135m ³	59	102858.80	77.658	83.951

由表1-4-7可以看出,通过精度优化后,表1-4-5和表1-4-6的结果无法与此媲美。此预测精度与实际精度十分接近,并且其相对差均是正值,即 $\eta < \eta'$,且 $\eta \approx \eta'$ 。说明用不同观测点数计算的各个体积全部在预测范围内,而且随着观测点数的增加,精度越来越高。

第七节 SD 预测精度分析

SD 预测精度是由原始精度→影响精度→优选回归精度或套合精度演变而来。原始精度只反映矿产储量的精度,由它作预测,只能对一些简单矿体作储量精度预测,而且大多数情况下,只能对矿石量作预测,而不能对品位等作预测。因此,一般情况不用原始精度。

影响精度是在原始精度的基础上,为了适应不同勘探网度对精度所起的作用,而考虑了网度自身对精度的影响求得的精度。因此,影响精度在反映储量精度的同时,重点在于体现工程控制程

度。

优选回归精度和套合精度,是在影响精度的基础上,消除观测值自身的影响,经多种回归模型优选或套合后求得的预测精度。这种精度称 SD 预测精度。它在最优状态下,既反映储量精度又体现工程控制程度。因此,它在有限工程控制条件下,对储量真量的预测是十分有用的,对工程控制程度提供了定量依据。

一、预测精度靶区

SD 预测精度可指出地下矿藏量真量在一定的取值范围内,这范围就是靶区。这里所说的靶区,不是概率统计所描述可信程度的置信区间,而是估计客观真量的精度取值范围。概率统计强调变量的独立性。计算待估值真量时,要指出它的置信区间,其实质是标明置信概率。这种置信概率,对于一个具体已知矿床的储量计算说来,实际意义不是很大。

SD 精度法在运用地质变量时,尽量削减它的随机性,强调它的结构相关性。由计算精度可以得到预测储量真量的靶区。图 1-4-20 是 SD 精度预测靶区图。靶心 o 是储量计算值 Q (矿石量、品位、金属量等) 的点位,取储量预测误差 r_1 和 r_2 为靶区半径。由靶心向右到半径为 r_1 的右端点的靶区叫右靶区,由靶心向左到半径为 r_2 的左端点的靶区叫左靶区。由 r_1 、 r_2 和 Q 构成的靶称 SD 精度预测

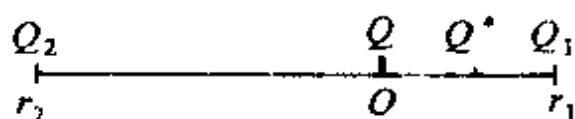


图 1-4-20 SD 精度预测靶区图

靶。它既指明了所计算之储量的数量,也指出了储量计算值的质量。其数量是指在有限工程控制情况下计算的储量值,其质量是指此储量值的可靠程度(预测精度)和工程控制程度。半径 r_1 、 r_2 越大,即靶区越大,储量计算值的质量越低,即可靠程度(预测精度)和工程控制程度越低。

半径 r_1 、 r_2 与预测精度 r 的关系是:

$$\begin{cases} r_1 = 1 - \eta \\ r_2 = \frac{1}{\eta} - 1 \end{cases} \quad (1.4.41)$$

据此,得右端点的预测限:

$$Q_1 = (1 - r_1)Q = \eta Q \quad (1.4.42)$$

左端点的预测限:

$$Q_2 = (1 + r_2)Q = \frac{1}{\eta}Q \quad (1.4.43)$$

$$\because 0 < \eta < 1 \quad r_2 > r_1$$

$$\therefore Q_2 > Q > Q_1$$

直线段 $\overline{r_1 r_2}$ 是以靶心 o 为中心的不对称靶直径。由靶直径两端点的 Q_1, Q_2 形成的预测区间 $[Q_1, Q_2]$, 用以捕捉客观真量 Q^* , 故区间 $[Q_1, Q_2]$ 又称真量预测靶区。它指出客观真值 Q^* 应在此靶区内。直径越小, 预测靶区越小, 越易捕捉客观真量。直径为零, 则计算值即为客观真量。

捕捉客观真量, 不是 SD 精度法的目的。我们的目的在于作储量计算值的精度预测。因此, 并不是 r_1, r_2 越小越好, r_1, r_2 越小, 固然说明预测精度 η 越高, 但它也表明工程控制程度也越高。我们的目的不是要预测精度 η 越高越好, 而是要知道预测精度值 η 究竟是多高? 由预测精度值来判定工程控制程度, 指导工作进程, 为划分储量级别提供定量依据, 增强矿山设计、开采的把握性。因此, SD 精度预测靶为选择未来的工作目标提供了依据。

检验 SD 精度预测靶, 最牢靠的办法是作探采对比。就是说, 如果客观真量 Q^* 已知, 便可用它进行检验。当已知真量 Q^* 落在靶区 $[Q_1, Q_2]$ 内, 表明预测精度 η 小于实际精度 η' , 即 $\eta \leq \eta'$, 此时便说 SD 储量预测是成功的。若 Q^* 不仅落在靶区 $[Q_1, Q_2]$ 内, 而且与端点预测限十分靠近, 则说 SD 精度预测是最成功的。因此, 也可用实际精度 η' 来检验 SD 预测精度 η 。当 $\eta \leq \eta'$, 则真量 Q^* 就一定会落入区间 $[Q_1, Q_2]$ 内, 也即实际精度在预测靶区内, 就说 SD 精度法预测是成功的。 Q^* 不仅落在靶区 $[Q_1, Q_2]$ 内, 且与端点预测限十

分靠近的情况, 等同于实际精度不仅在预测靶区内, 且预测精度与实际精度十分接近的情况。亦即不仅 $\eta < \eta'$, 且 $\eta \approx \eta'$ 。此时的精度预测便是最成功的。因此, 最成功的预测, 是真量 Q^* 接近 Q_1 或 Q_2 , 而不是真量 Q^* 靠近靶心的储量计算值 Q 。这就是当 $\eta < \eta'$ 且 $\eta \approx \eta'$ 时, 预测是最成功的。

储量计算中, 如果样条函数曲线在总体上是上凸曲线, 则它的预测靶区应是右靶区。图 1-4-21 为半球台体积预测靶区图。半球台是一规则几何体。它的观测值的样条函数曲线是上凸曲线, 其体积应随着观测点数的增多而增大, 预测精度亦应随着观测点数的增

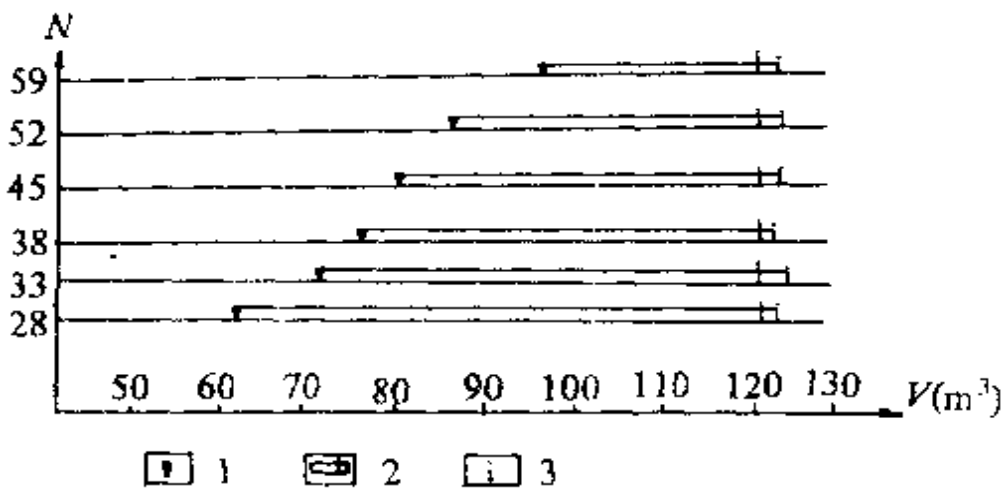


图 1-4-21 半球台体积预测靶区图

1—体积计算值; 2—右靶区及体积真值; 3—体积真值右预测限

多相应地增高。当观测点数 $N \rightarrow \infty$ 时, 由 SD 法计算的半球台体积达到最大值, 即等于由理论公式计算的体积(真值)。从图中看出, 理论值(真值)正是落在右靶区内, 而且与右端点的预测限十分靠近。就是说, 预测精度 η 十分接近实际精度 η' 。表明 SD 精度预测十分成功。

从图中还可看出, 随着观测点数的增多, 靶区越来越小, 说明预测精度 η 也越来越增高。反映出精度的增长与观测点数(工程数)的消长关系。因此, 可由精度的大小和它的增长程度来描述工程控制程度。

半球台是规则几何体,形体较简单。较复杂形体情况怎样呢?如图1-4-22,是里士铜矿A块段硫化矿储量靶区图,其样条函数曲线基本上是凸函数曲线,它的预测精度的靶区亦应是右靶区,它的储量真量值应在储量计算值的右方靶区内,即计算值在靶区的左方。而且,随着工程数 N 的增多,其靶区基本上越来越缩小,右端预测储量限越来越靠近开采储量。

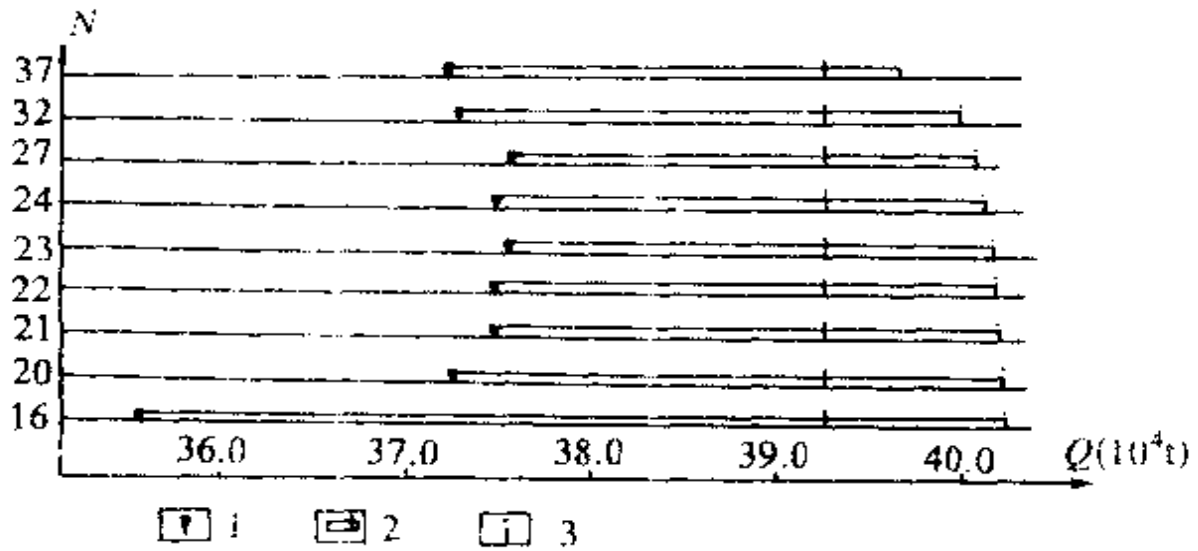


图 1-4-22 里士铜矿 A 块段硫化矿储量靶区图

1—储量计算值;2—右靶区及备采矿量;3—储量真量右预测限

如果总体上是凹曲线,则它的预测精度的靶区应是左靶区,其计算值均应在理论值的右方,靶区在计算值的左方。复杂的矿体,不能确知它的凸凹函数关系。如果经递进计算,储量依次增大,说明是凸函数关系式;如果储量依次减少,则说明是凹函数关系式;如果储量是跳动的,则难判定它的实际储量是在计算储量值的左方还是右方。此时,只能取左右靶区。SD 法对 11 个矿区作过精度预测。目前可以得到实际验证的有 7 个矿区, 12 个矿段。表 1-4-8 即为各矿区(块)得到证实的储量精度预测效果表。表中 47 个预测值,有 44 个预测值完全落在预测靶区内,有 3 个虽然在靶区之外,但误差仅在 1—2% 之间。就是说,它们虽在靶区之外,但它却紧邻靶区边缘。倘若把其它诸如假设端点条件的误差工程数和数据质量影响

因素产生的误差,允许限定为5%的话,那么,这些可对比的47次预测精度将全部在预测范围之内。由此证明SD法精度预测是可行的。其它一些矿区(块)的预测要在未来的矿山生产中反馈证实。

二、储量级别问题的讨论

储量级别的划分,实质上是对矿床勘探中工程控制程度和探明储量可靠程度的划分。是勘探工作阶段划分的体现。同时,储量

表 1-4-8 SD法储量精度预测效果简表

序号	名称	工程数	预测精度 (%)	实际精度 (开采) (%)	是否在预测范围内	在预测范围外的误差 (%)
1	云南里士铜矿 A 块段(勘探资料)	16	89.975	92.296	是	
		20	91.815	92.670	是	
		24	93.085	94.461	是	
		26	93.583	94.118	是	
		29	94.208	94.156	是	
2	里士铜矿 A 块 段中硫化矿 (生勘资料)	16	87.705	90.738	是	
		20	89.916	95.302	是	
		21	90.350	95.708	是	
		22	90.748	95.699	是	
		23	91.114	95.765	是	
		24	91.453	95.624	是	
		27	92.330	96.244	是	
		32	93.450	95.329	是	
37	94.428	95.281	是			
3	里士铜矿 2040— 1998米中段 (生勘资料)	三 01 采场	83.91	99.19	是	
		三 02 采场	93.58	95.85	是	
		三 03 采场	90.72	93.97	是	
		三 04 采场	95.95	96.96	是	
4	凤山铜矿 45号矿体 119号矿体		94.44	99.01	是	
			91.15	97.94	是	
5	老厂村钴矿 (初勘资料) (生勘资料)		72.76	76.57	是	
			78.28	82.64	是	

续表

序号	名称	工程数	预测精度 (%)	实际精度 (开采) (%)	是否在预测范围内	在预测范围外的误差 (%)
6	云南个旧老阴山铅矿 (生勘资料)	16	74.426	87.954	是	1.22% 1.68%
		20	78.292	98.304	是	
		24	81.231	94.842	是	
		28	83.469	96.770	是	
		32	85.230	96.353	是	
		33	85.613	96.801	是	
		36	86.652	99.568	是	
		39	87.551	98.301	是	
		42	88.336	93.741	是	
		47	89.446	96.418	是	
		54	90.687	94.271	是	
		62	91.790	92.046	是	
		72	92.849	94.863	是	
		83	93.737	96.092	是	
94	94.429	94.506	是			
105	94.983	93.835	是否			
119	95.547	93.966	否			
7	四川拉拉XLT铜矿 (详勘资料)	16	82.023	89.393	是	0.30%
		20	85.082	88.348	是	
		24	87.251	89.529	是	
		28	88.870	88.040	是否	
		30	89.534	90.440	是	
		34	90.650	92.519	是	
40	91.940	99.438	是			
8	云南个旧松树脚锡矿 (生勘资料)		97.12	97.23	是	

级别的划分也是储量精确程度的划分。不同储量级别应对所计算的储量的精确程度有不同的要求。因此,储量级别既体现工程控制程度,又体现储量的精确程度。这正与SD精度法的预测精度的内涵是一致的。只要给定储量级别衡量尺度,我们就可用SD精度法为划定一个勘探矿区的储量级别提供定量的依据。

储量级别的划分,不能仅仅以计算储量与客观储量之比值为判定标准,否则,会得出错误结论来。譬如,某矿段详勘时施工50个工程,求得C级储量100万吨,补勘时增加了30个工程,共80个工程,把C级储量上升为B级储量,求得储量130万吨。后来开采验证该矿的实际储量为80万吨。则原详勘储量精度为 $80/100=80\%$,若以60%为C级储量的精度最低要求,以75%为B级储量的精度

最低要求,则原储量精度已达到 B 级储量精度,远超出 C 级储量精度,而补勘增加工程后的储量精度为 $80/130=61.5\%$,不仅达不到 B 级储量的精度要求,反而下降到刚好 C 级储量精度水准上。这工程控制程度高的比工程控制程度低的储量精度反而降低的现象,绝对是不合理的。应该说,随着工程数的增加,储量精度相应提高。这样的储量精度才能反映工程控制程度和储量级别。SD 精度法克服了上述存在的问题。由 SD 精度法计算的预测精度,即可从定量角度正确判别勘探程度,从而确定储量级别。例如图 1-4-23 (a),当施工 16 个工程时,为 C 级储量。图 1-4-23 (b),当工程增加至 25 个后,为 B 级储量,此时应考虑从增加工程的范围内,圈出 B 级储量来,图 1-4-23 中封闭部分即是。其余部分仍为 C 级。相反,如果在得到图 1-4-23 (b) 的状况时,发现它达到 B 级,经抽稀后到图 1-4-23 (a) 状态,而为 C 级时,可以认定,参与抽稀的工程与它邻近工程构成 C 级的封闭圈即为 B 级,其余的为 C 级,而工程之外剩余部分为更次一级。

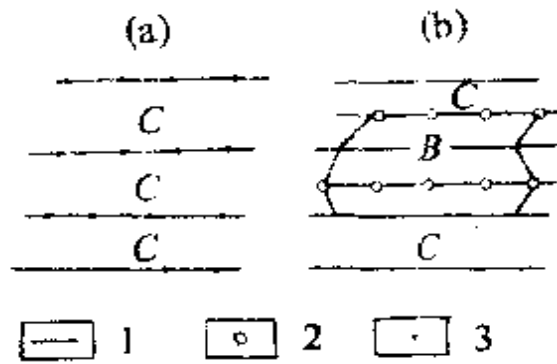


图 1-4-23 储量级别划分图

1—勘探线;2—新增钻孔;3—原有钻孔

图 1-4-24 是老阴山铅矿精度预测与工程数关系图,可以看出,随着工程数 N 增多,优选回归预测精度增高,储量级别也随之提高,不过,这只是从矿区整体而言。

上述储量级别的划分,未考虑其它地质的、工业的、经济等方面的因素,而仅仅从与某一工程控制程度有关的储量精度的角度

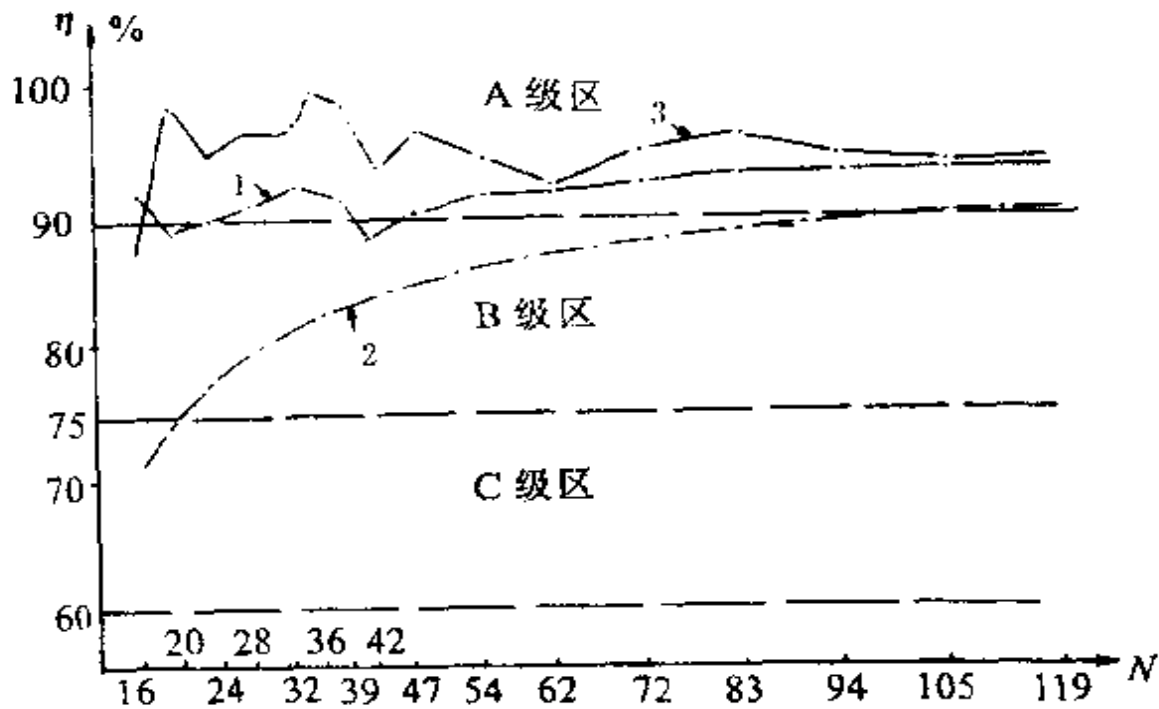


图 1-4-24 马拉格锡矿老阴山铅矿段储量精度对比及储量级别划分与工程控制程度关系图

1—原始精度曲线;2—优选回归预测精度曲线;3—实际精度曲线

出发的。

储量级别应有一个统一的认识尺度——定量尺度。长期以来,许多国家制定的储量级别的定量尺度——误差标准(或精度标准),几乎都无法在勘探阶段实现,只是在矿体面目完全暴露之开采阶段,才可能得到检验。为此有人建议取消储量级别的定量尺度。从1939年就设有储量级别定量尺度的苏联,至今也取消了其定量尺度,相继美国也取消了。本书论证的储量精度,目的是希望在地质勘探阶段提供的矿石储量更能满足矿山建设的需要,这对于储量计算法本身或是对地质勘查、矿山生产都是有益的。

结 论

本篇重点阐述了地质变量的稳健构置,储量计算的基本原理和SD精度法的理论和方法等三个方面的内容。

1. 地质变量的稳健构置能为更加准确地计算储量和精度提供可靠的基础数据,增强计算的稳定性,稳健构置的基本步骤是:

(1)识别和处理风暴值,是稳健构置的首要步骤。地质变量观测值的风暴值一定是观测值的特高值,但观测值的特高值不一定是风暴值。只有当找出特高值又放到具体空间去比较后,才能识别。

(2)审查每个地质变量的随机性和结构性。采用一种动态钟形曲线窗设计的数字权尺,使地质变量稳健化而得到结构地质变量。

(3)所有的观测数对于地质体总体都是有限的,而且这有限数在各个位置的取样只是一个现实,仅凭一次有限观测数,无论如何也是不可能无误地进行计算和预测。为此,利用观测值构置成逆步数据计算和预测,从而达到稳健的目的。

2. 以样条函数为主的数学工具对断面的数值积分,是SD储量计算方法的基础。由此进行总体、分块、分级、台阶等多种形式的储量计算。普通SD法、SD递进法和SD搜索法是三个具体的SD储量计算方法。

普通SD法主要用于总体储量计算;SD递进法用于矿化和矿体形态变化较大的不同网度的总体储量计算;SD搜索法用于台阶储量和多品级动态储量以及为制定合理工业指标提供基础数据的计算。

此外,还有任意分块计算,不平行断面计算等方法。

3. SD法精度预测模型是一个优化储量精度预测模型。它是以分维几何学的分数维为数学工具,首先建立起储量精度预测模型

的原型——原始预测精度模型,然后提出框架指数,用以排除各种干扰最后确立的优化精度预测模型。分数维的一个重要特点是随着工程控制程度的提高,分维值逐步增大,它是工程数的函数。因此,可用分数维来刻画矿体的复杂程度。SD 法的框架指数拓延了分数维的几何意义。使分数维进而能刻画储量的精度和工程控制程度。因此,SD 预测精度便是储量级别的定量尺度。

第二篇 SD 储量计算法的实施 及矿区实例分析

SD 法研究过程是从理论到实践,又从实践到理论的反复提高升华的过程。SD 法的理论和方法的实施,已由 SD 法软件系统完成。本书重点在于突出 SD 法理论及其效果。若详述方法步骤及其程序,必使本书显得冗长。我们将在另外著作中详述 SD 法的方法步骤及其程序,为了 SD 法的完整性,本篇仍将 SD 法的方法步骤和程序说明简要列入。本篇重点在于矿区实例分析。

第一章 SD 储量计算法步骤

由 SD 法流程图(图1),可以将 SD 法计算步骤概括为:
储量计算方法的选择;
计算数据的形成;
储量的计算;
储量精度的计算;
经济评价;
图件绘制。

第一节 方法的选择

对适于 SD 法计算的矿产及以勘探线为主的矿区(山),在采用 SD 法计算之前,可根据地质勘探、矿山设计、矿山勘探及开采的各种不同需要,可方便灵活地选择使用 SD 储量计算的各种方

法。

一、总体计算

对于矿床(体),当只需要求得一个总储量及精度时,可选择总体计算的方法。这种方法同时也可得到各储量计算参数在断面上的面量和各勘探线间的体量,包括工程范围内及舍外推范围的量。

总体计算包括:

(1)普通 SD 法(或狭义的 SD 样条法),适于简单矿体的总储量计算;

(2)SD 搜索法,适于复杂矿体,除求总储量外,还含表内、外储量计算;

(3)SD 递进法(或称回溯递进法),适用于对复杂矿体求不同网度之总储量计算。

二、分块计算

大型、特大型矿床按不同区段划分为分段(块段)的总储量计算是属总体计算范围,而不属分块计算。此处所述的分块计算包含两个方面内容:

1. 计算矿体(段)内任意分割块段的储量。这些块段是储量计算范围内可不以已知断面或已知工程为界而任意划分的小块段。它们可以是任一中段、分层、台阶、采场、矿房等块段,也可以是任一不规则几何体。

2. 计算矿体(段)内各矿石类型在空间的任意范围内的各类型矿石储量。

分块计算除需准备特定格式的数据文件外,还必须先要进行总体计算,由它提供分块计算所需之磁盘数据文件。

三、台阶计算

一般以坑探为主的矿体的台阶、中段、分层储量,用上述分块计算是可达目的的。而以钻探为主的矿体,应采用台阶计算法求台阶储量。根据矿体产状台阶计算分为两种类型:

1. A 型台阶计算:适于求取以铅直工程为主、产状平缓的矿体的台阶储量。

2. B型台阶计算:适于求取以铅直工程为主、产状陡倾的矿体的台阶储量。此法关键是将铅垂厚度转换成水平厚度。

四、分级计算

分级计算指分不同工业指标和分不同矿石品级的储量计算。

当提供优选最佳开采边界品位及最低工业品位指标的信息时,或对矿产资源技术经济评价时,都需要对矿体作多个不同工业指标或不同矿石品级的储量计算,此即分级计算。用搜索递进计算可达目的。

第二节 计算步骤

第一步:形成SD法计算数据

根据需要选择了适当的SD法的某一算法后,按SD法要求的格式建立各种原始数据文件,通过程序处理形成计算数据文件。

计算数据类型包括:

1. 综合数据;
2. 权尺化数据;
3. 逆步数据(或称回步数据、回溯数据)。

各数据类型之间的关系如图2-1-1:

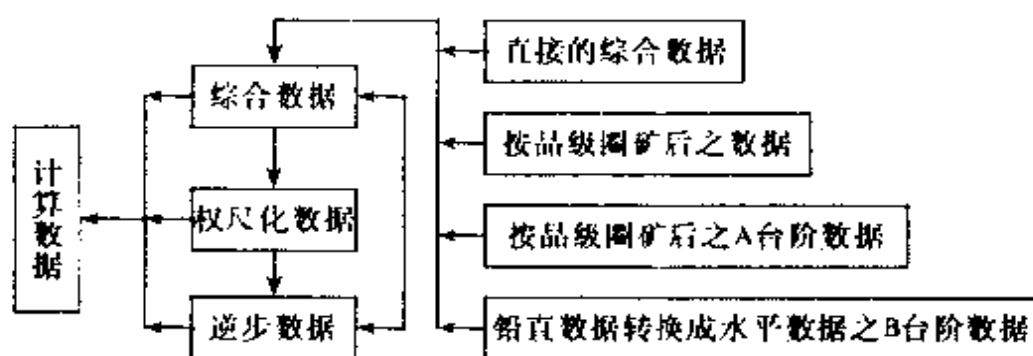


图 2-1-1 计算数据类型图

以上各种计算数据的形成过程见下列各流程图(图2-1-2,图2-1-3,图2-1-4)。

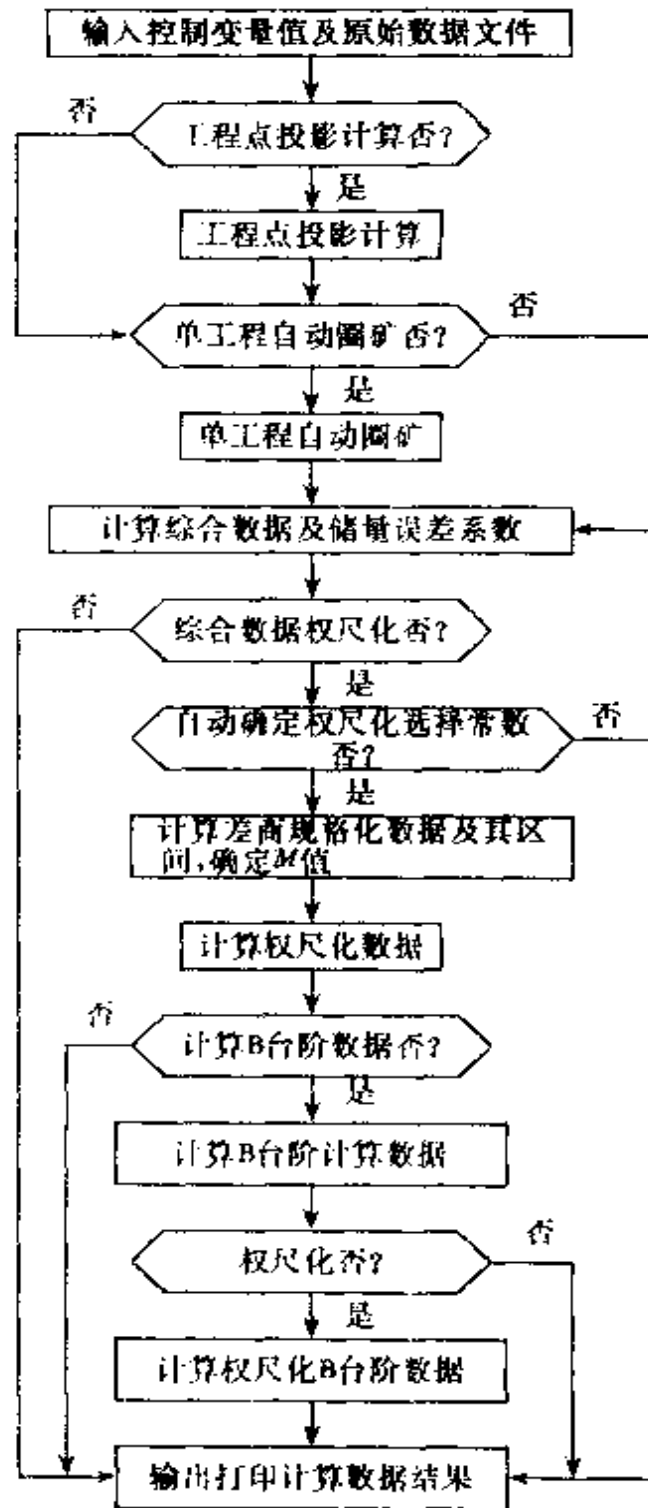


图 2-1-2 形成计算数据流程图

第二步：选用 SD 储量计算方法程序系列

SD 法的储量计算过程与传统的断面法相似。在横断面上圈定矿体后，计算其面量，在纵断面上圈定矿体后，计算其体量，计算公式及处理上与传统法不一样。恰当的运用各种储量计算方法程序

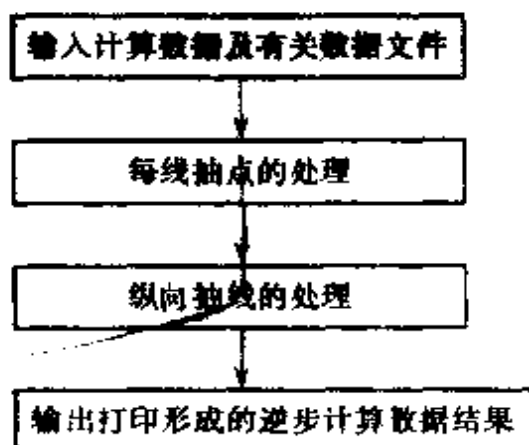


图 2-1-3 形成逆步数据流程图

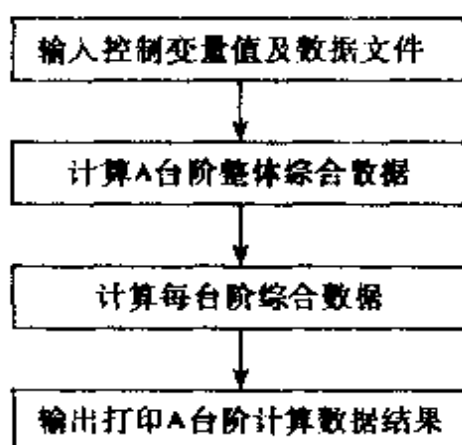


图 2-1-4 形成 A 台阶计算数据流程图

系列,能得到满意结果。

SD 法有以下计算系列:

普通 SD 法→HJTLL 系列——总体储量计算;

SD 递进法→H\$ 系列——动态总体储量计算;

SD 多功能搜索递进法→SD4 系列——动态总体储量计算,多品级表内、外储量递进计算,多品级 A、B 台阶储量计算;

SD 分块计算→SPTL7——中段量、分层量、采场量、矿石类型量计算。

各储量计算过程见下列流程图(图2-1-5,图2-1-6,图2-1-7):

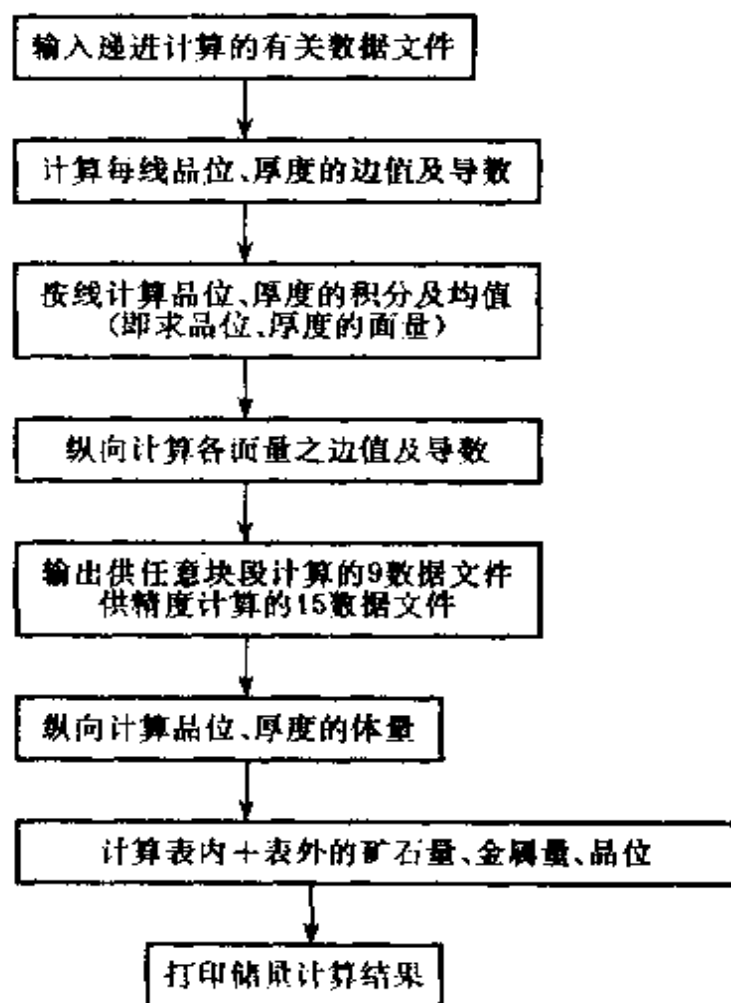


图 2-1-5 递进计算流程图

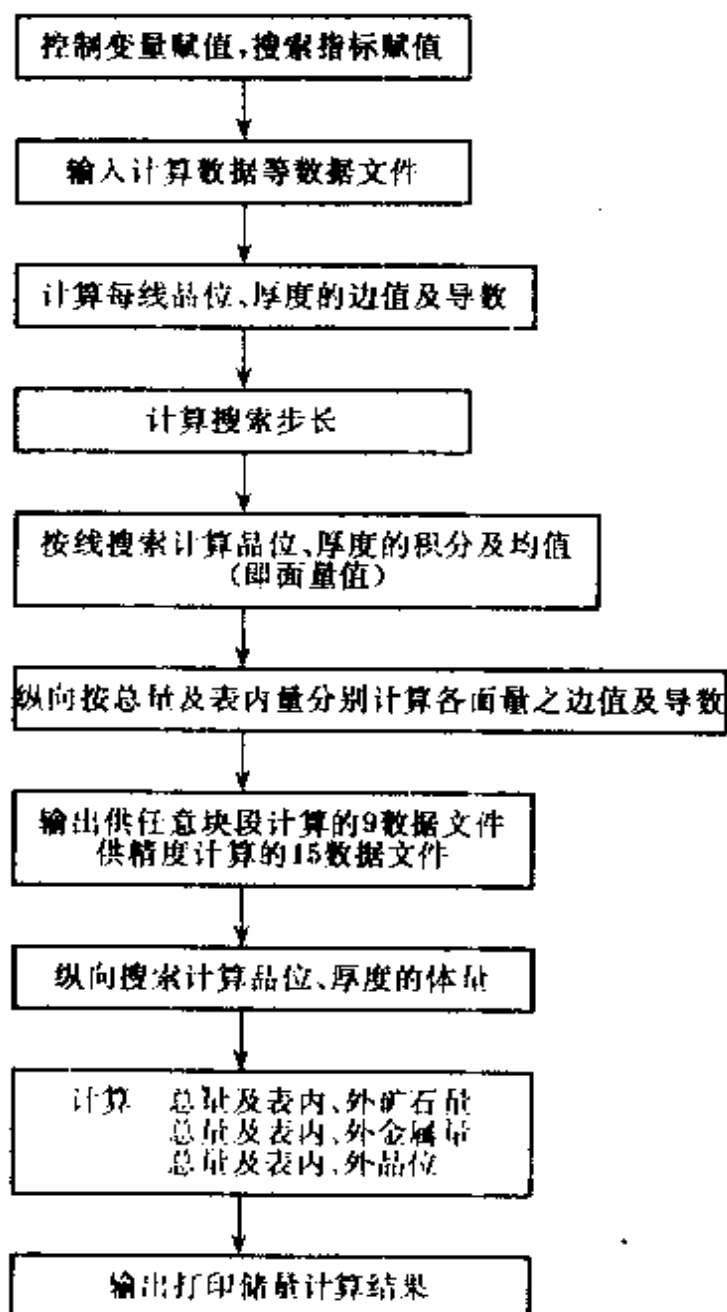


图 2-1-6 搜索计算流程图

第三步: 计算 SD 预测精度

目前, SD 法已能对多品级储量、递进储量、台阶储量、总体储量运用精度计算程序系列计算出原始精度、影响精度, 用最优化回归计算程序优选出精度, 用套合精度程序计算出套合精度, 最后确定出 SD 预测精度。

精度计算过程见图2-1-8。

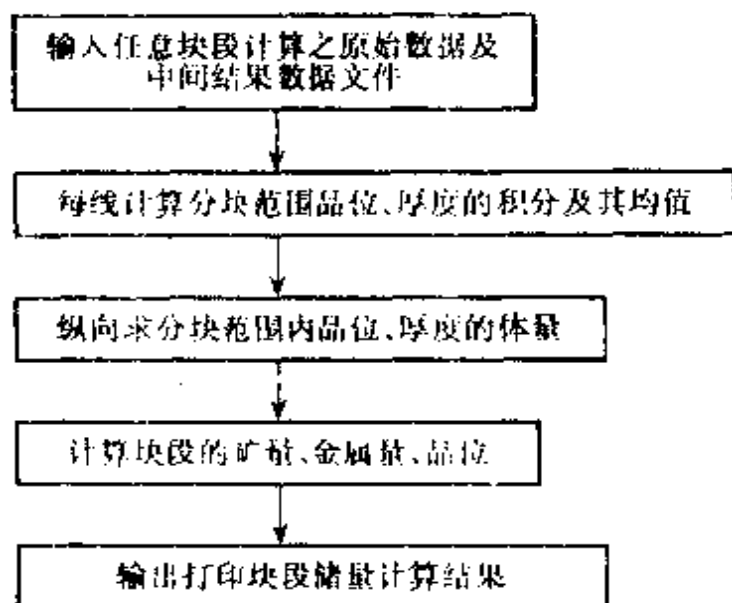


图 2-1-7 分块计算流程图

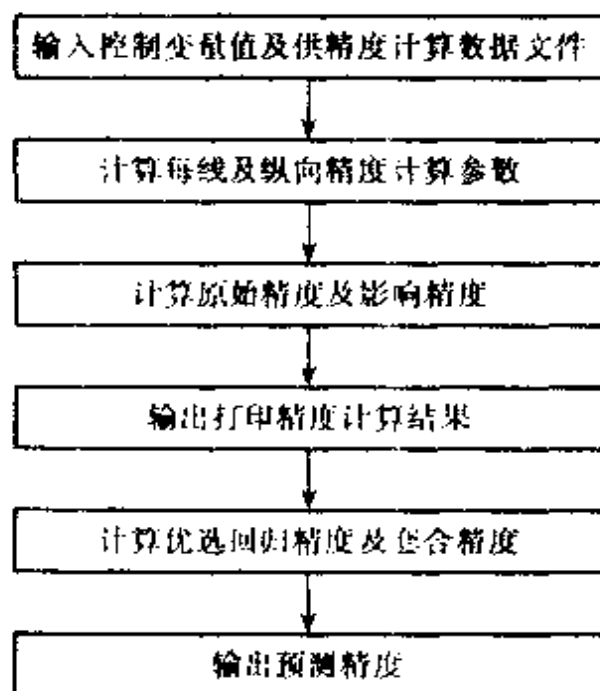


图 2-1-8 精度计算流程图

到此为止,可以认为 SD 法储量计算完毕。

为了增强 SD 法的适用性,还可根据需要,进行第四和第五计算步骤。

第四步:矿床技术经济评价

矿床技术经济评价内容很多,涉及面也很广。SD 法动态储量计算的结果为合理制定工业指标提供了基础数据。本文只介绍作合理制定工业指标的计算。计算方法采用方案对比法。其计算步骤见图2-1-9。

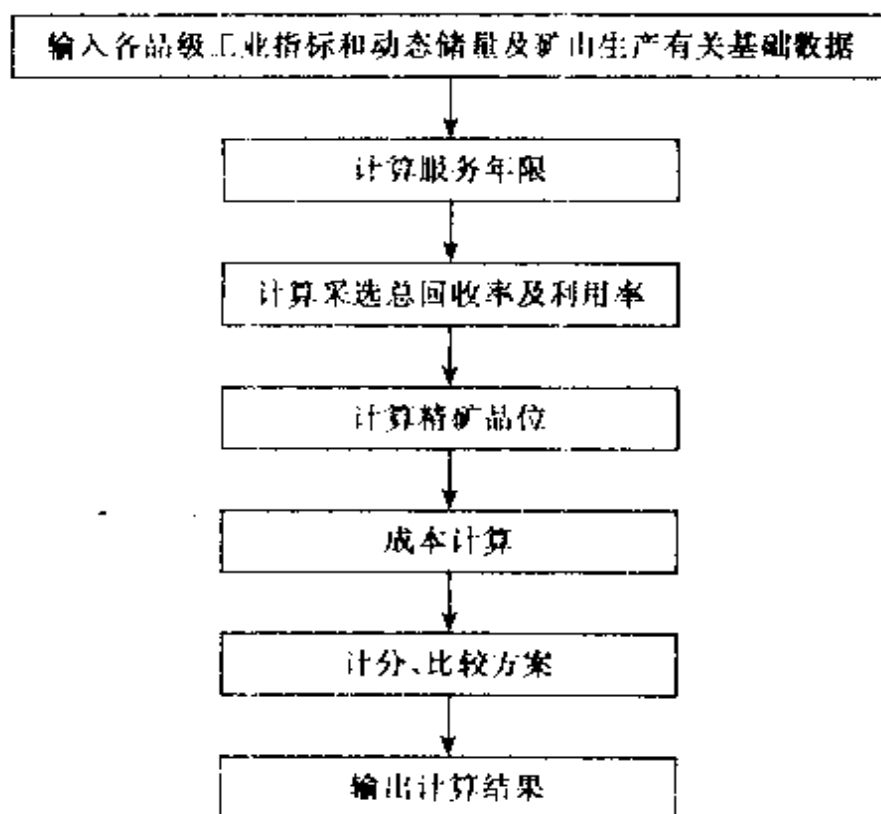


图 2-1-9

第五步:绘图参数计算

目前,SD 法只绘储量及其精度的曲线图。它通过绘图参数的计算而实现。

第二章 SD 储量计算法程序包说明

第一节 SD 储量计算法程序包

SD 储量计算法的电算程序包,适合多种类型固体矿产的储量计算。在 WANG-2200-VS80 和 VS100 型机上调试,且通过源程序主要用 FORTRAN IV 语言编写,使用 FORTRAN 77 编译系统进行编译和运行。用 BASIC 语言编写了有关数据的计算程序,在 WANG-T 机和 PC-1500 A 袖珍机上运行。此外,在微机和 2232A 型大平板仪上绘制曲线图。

程序包包括 16 个程序系列。应用时,根据不同需要,选择程序包中程序系列,分别独立运行或联用。每种程序是按多种要求采用人机对话形式设计的,计算准确,使用方便、灵活。运行目标程序后,除产生结果文件外,还形成了矿区储量计算所需的数据文件(以磁盘文件形式存入数据库)可供长期使用。

一、程序包功能

1. 按各种工业指标自动圈定矿体,形成 SD 储量计算数据——原始系列或权尺化系列数据。运行一次可产生多个品级的计算数据。

2. 自动形成综合逆步数据或权尺化逆步数据。

3. 递进计算单品级总体储量及其精度。

4. 搜索递进计算多个品级表内、外储量及其精度。

5. 计算台阶(中段)储量及其精度。

6. 计算矿区任意块段和任意个最小开采块段的储量。

7. 稳健计算储量精度。

8. 制定合理的工业指标。

9. 绘制储量、品位、厚度、精度等曲线图。

程序包中各程序系列可按需要组合联用。程序形成之数据皆

以文件形式存入磁盘,计算结果文件可存入磁盘保留或由宽行打印机按要求的格式打印。

二、程序包结构

SD 法程序包为分块结构,包括 16 个程序系列、25 个子程序。按功能可分三种类型。一种是提供储量计算数据的数据处理程序,如 PD4,UPD1 系列,UPD01 系列,UPD02 系列,DJ7,ATJ6,DFC1,HBR 等。一种是各种计算程序,如 HJTLL 系列,H\$ 系列,HSDY 系列,SD4 系列,SPTL7,JDL9 系列,ZYHG,TAXOJD,GYZB 等。一种是绘图程序,如 HTC 等。详见表 2-2-1。

表 2-2-1 SD 程序包关系表

序号	程序名及代号	主段代号	子段代号	程序联用组合
1.	原始数据处理程序 PD4	PD4		1
2.	权尺化数据处理程序系列 UPD1 系列 UPD01 系列 UPD02 系列	UPD UPD01 UPD02	UP,SPC,SPI UP,SPC,SPI UP,SPC,SPI	1,2
3.	多功能储量计算数据程序 DJ7	DJ7, K	SPC, SPI, ZSG, CHS2, UDP, UPS	3, 3.2
4.	A 台阶储量计算数据程序 ATJ6	ATJ6		3, 4, 4
5.	逆步数据处理程序 DFC1	DFC1		1, 5, 2, 5, 3, 5
6.	绘图参数数据程序 HBR	HBR	RA	7, 6
7.	普通 SD 法储量计算程序系列 HJTLL	HJTLL	TB, SPC, SPI, TBV, ABC, BAC	1, 7, 2, 7, 3, 7
8.	SD 递进法储量计算程序系列 H\$	H\$	TB, SPC, SPI, TBV, ABC, BAC	1, 8, 2, 8, 3, 8, 1, 5, 8, 2, 5, 8, 3, 5, 8

续表

序号	程序名及代号	主段代号	子段代号	程序联用组合
9.	SD 搜索递进法储量计算程序一系类 HSDY	HSDY	TB87, SPC, ZUZ, ZUZI, TBV87, AA, ZUZI	1, 9, 2, 9, 3, 9, 1, 5, 9, 2, 5, 9, 3, 5, 9
10.	SD 搜索递进法储量计算程序二系类 SD4	SD4	TB87, SPC, ZUZ, TBV87, AA, ZUZI, ZUZJA, ZUZIA, ZUZI	1, 10, 2, 10, 3, 10, 4, 10, 1, 5, 10, 2, 5, 10, 3, 5, 10, 4, 5, 10
11.	SD 任意块段储量计算程序 SPTL7	SPTL7, K	SPZ, SPC, TBV, ABC, BAC	7, 11, 8, 11, 9, 11, 10, 11
12.	精度计算程序系列 JDL9	JDL9	MJD, LCHA	7, 12, 8, 12, 9, 12, 10, 12
13.	绘图程序	HTC		7, 6, 13
14.	SD 优化回归精度计算程序系列 ZYHG	ZYHG		8, 14, 9, 14, 10, 14
15.	套合精度计算程序 TAXQJD	TAX- QJD		14, 15
16.	经济评价(合理确定工业指标)程序 GYZB	GYZB		9, 16, 10, 16

三、主要程序系列分述

由于SD法程序包是分块结构,同一参变量,在不同程序中往往有不同的标识符,而同一标识符在各处的意义也不都相同。因此,分别对每个程序的标识符说明,显得繁冗,故省略。为节省篇幅,将输入数据及输出数据结果顺序也省略。以下仅叙述程序系列的功能。此处称呼的程序系列,指包含一个以上,解决同一问题之

相似的程序组合。

(一) 数据处理程序

1. PD4 程序

用于计算已知断面上各工程矿体的厚度、加权平均品位,形成综合数据文件。

2. 权尺化数据处理程序系列

包括 UPD01 系列(原型),UPD01 系列(01 系列),UPD02 系列(02 系列)。每个系列又由于选择二项式系数直径 M 值的不同,而权系数不同,分为 UPD05、UPD07、UPD09、UPD11;UPD015、UPD017、UPD019、UPD011;UPD025、UPD027、UPD029、UPD0211 等程序,几个系列之不同点,在于赋予的权和纵向权尺化处理时所用的参数不一致。它们皆是对各断面上的已知工程的厚度、品位作权尺化的变换。即由综合数据转换成权尺化数据。

3. 多功能计算数据处理程序

DJ7 程序——具有以下功能:

(1) 对偏离断面的工程作投影计算,求工程在断面上的相对位置;

(2) 按不同品级自动圈定单工程的矿体,计算每个工程矿体的厚度及品位,形成多品级计算数据;

(3) 求不平行断面的重心,计算不平行断面间的距离;

(4) 计算断面投影误差;

(5) 形成 B 台阶计算数据或权尺化 B 台阶数据;

(6) 用数据差商规格化处理,求权调节系数和权尺选择常数,自动选取 M 值并形成 M 对应的权尺化数据。

根据需要,人为键入控制变量控制转向,可实现以上各功能,见表 2-2-2。

4. A 台阶计算数据处理程序

ATJ6——计算所有台阶矿体的综合数据;计算每个台阶各断面上工程样品的厚度及平均品位,形成每个台阶的综合数据。程序运行一次可同时得到多个品级多个台阶的计算数据。

