

第 五 届
矿山系统工程学术会议
论 文 集

中国有色金属学会采矿学术委员会
中国煤炭学会煤矿系统工程专业委员会
中国金属学会采矿学会

一九九〇年十月·长沙

序 言

经过一年多的筹备,由中国有色金属学会采矿学术委员会、中国煤炭学会煤矿系统工程专业委员会和中国金属学会采矿学会联合举办的第五届矿山系统工程学术会议于一九九〇年十月在长沙召开。这次会议得到了许多单位的赞助(名单另列)和矿业战线上广大科技工作者与领导的支持,在此,我们代表会议筹备组表示衷心的感谢。

本论文集汇编了这次学术会议上发表的绝大多数论文,共九十篇。它反映了近年来我国矿山系统工程研究与应用的可喜进展,其中不少论文是系统工程理论有效应用于矿山生产实践的成果总结,具有一定的学术水平和应用价值;同时,我们也可从这些论文中看到我国矿山系统工程研究与应用的方向。我们希望借此推动这一新兴学科向更高的水平迈进。

由于我们水平有限,人手不足,论文集的编辑工作难免存在不足之处,欢迎批评指正。

编 者

第五届矿山系统工程学术会议赞助单位:

- 地质系统工程(国际)有限公司
- 有色冶金设计研究总院
- 铜陵有色金属公司
- 中南工业大学
- 北京矿冶研究总院
- 中国矿业大学北京研究部

金鹏有色金属矿业开发公司
北京三迪高技术联合开发公司

煤矿开采系统优化与模拟的研究现状及展望

中国矿业大学 王玉浚

内容提要:本文概括的介绍十年来系统工程和电子计算机应用于矿井开采系统的研究中,所编制的优化模拟模型,及其在实际应用中的情况和发挥的作用,并在此基础上探讨研究和应用中存在的问题和今后的发展趋势。

我国煤炭工业部门对系统工程和电子计算机在矿井开采方面应用的研究,自七十年代末开始,八十年代中得到迅速发展,已发表论文近百篇,出版专著至少有五本,并在实际生产和设计中进行了一些应用,在受到重视的同时也提出了更高的要求 and 期望,有待热心开展这一工作的同志作出更大的努力。

一、煤矿矿井开采系统的特点

煤矿矿井的开采系统是一个动态的复杂系统具有以下特点:

1. 矿井开采系统包括开拓、准备和回采系统,三者相互联系相互影响,各部分又有相对的独立性。
2. 煤层赋存状态和矿井地质条件在不同矿区和不同矿井之间存在着很大差异,开采系统必须适应不同的煤层地质条件,因此它的类型较多。
3. 随着时间推移生产地点改变,开采系统既要在技术上适应这些变化的要求,又要达到经济上合理。
4. 在给定的条件下开采系统普遍存在着多种可能的定性和定量方案,也就存在着力求从中选取最佳方案的问题。
5. 开采系统的选择受地质条件、技术水平、经济效果等多种因素影响,其中很多因素的产生和变化带有明显的随机性。

二、研究工作的进展和成果

应用系统工程的观点和方法,藉助电子计算机技术,解决矿井的开采系统的合理选择问题,十年来许多人作了大量的探索和研究工作。从不同的方面、用不同的方法在不同的范围内编制了系统优化和系统模型及其计算机程序软件。主要有以下一些。

1. 采区巷道布置系统和主要参数的综合优化

我国煤矿矿井普遍采用划分采区的方法进行开采。矿井的设计和生产矿井开采期间经常要作采区设计。为了在采区设计中合理地选择采区巷道布置形式和主要参数,编制有利于煤层倾角小于

30 度的比较通用的采区设计方案优化模型,一般以采区的吨煤费用最小作为目标函数,以技术上允许的参数取值作为约束条件,编写成非线性规划的表达式。也有以采区产量(生产能力)、准备工程量、服务年限、吨煤费用等几项目标为准,按目标规划方法编制模型和求解的。采区类型有向长壁开采采区、倾斜长壁开采采区和跨越式开采的采区,每一类型中都含数十种定性方案和数百种参数方案。计算机程序有针对不同采区类型单独使用的,有将三种类型编在一起使用的。这一优化模型主要用在给定的煤层条件下选取采区设计的最优的定性方案和主要参数取值范围,通过不同方案的对比也可以用采区类型的选择和矿井内采区的合理划分问题。

2. 矿井设计中井型和开拓方案的优选

以矿井生产能力、开拓系统、采区划分等为主要内容的矿井设计方案,是反映矿井设计质量和水平的关键性问题。它不仅关系着矿井建设速度和投资利用,而且对矿井投产后的生产面貌和技术经济效益具有长远影响。为了确定矿井设计方案,需要综合考虑施工和生产中的多方面问题,从较多的可行方案中选取最优方案。

矿井设计方案优化模型采用多目标决策的方法,其最优化准则选为建井工期、初期投资、初期工程量、矿井生产能力、吨煤折算费用、服务年限、资源回收率和占地面积 8 项指标。模型计算的内容较多,从储量、工程量、工期和各项费用,到巷道断面、设备选型对比选优计算,几乎包括生产系统的各个方面,分别编制子系统模型,并适应其各自的特点和要求采用多种计算和求解方法,有几何作图计算、回归分析表达式、数据文件检索、拉格朗日乘数法、规划法、网络分析方法等。

最早研制出的矿井设计方案优化模型是用于近水平煤层矿井的,基本上形成了可以在微机上进行的应用软件。随后开发了用于缓斜煤层矿井的,能够自动产生一部分开拓方案的功能有所改进的优化模型。

3. 矿井采运系统计算机模拟

矿井开采系统中,自回采工作面采出的煤炭数量,在生产过程中受设备能力、故障、生产组织管理诸因素影响,随时间不断变化,并在井下经过许多环节转换后运到地面,各运输提升环节也有停顿和间断。为了正确地反映和描述矿井煤流的状态,从中研究分析生产系统的合理性和设备的选择,采用了随机系统的计算机模拟分析。

通过一些实际观测得到矿井采运系统中,采煤机运行工作的速度和工作面出煤量服从正态分布;采煤和运输设备的连续运行时间和故障间断时间服从负指数分布。在此基础上编制出的模拟模型和计算机程序有:回采工作面生产状况的模拟模型,用于确定单产水平、开机率,分析研究工作面布置、长度、工作制度等的合理选择问题;有采区生产状况的模拟模型用于确定采区产量、采区内工作面和运输设备的配置、煤仓容积;有大巷运输系统的模拟模型,用于分析研究大巷运输系统和设备的选择、生产能力、井下煤仓的设置及其容积;有包括上述几项内容的整个矿井的采运系统模拟模型,模拟内容以子系统形式描述各种采煤方法的工作面出煤情况,胶带和矿车运输的情况,箕斗和罐笼提升的情况等。

这些模拟模型中以矿井采运系统整体模拟的模型内容完整全面,但模型程序规模较大,其编制方法有将所有子系统联结在一起的和分块组合式结构的二种。考虑到这样的模型使用中占用计算机内存多、模拟时间长,为了便于在微机上使用,有采用分为若干环节分别单独模拟分析局部内容的模型和程序如SSPOL程序集。计算机程序基本上都是采用FORTRAN语言,已通过评议鉴定的有三个,形成了应用软件。

4. 采掘工作面生产接替计划的模拟

煤矿开采过程中经常需要考虑、安排和调整工作面接替,编制年度的或若干年的回采工作面开采计划。应用电子计算机安排采掘工作面接替可以节省人力和时间,它的实质是采用最小时间步长的模拟方法,按照人工安排接替时所需考虑的因素和所要解决的问题,由计算机依次寻找,逐个对照要求,得出满足条件的工作面作为接替工作面。这类模型和程序有三种,一是用于长远计划的矿井工作面接替计划编制,二是生产矿井年度采掘计划的编制。

编制长远规划的工作面接替模型和程序的功能,是在输入回采工作面条件和接替类型之后,按不同的约束条件对照、选择接替工作面,从而安排出十年或几十年的接替计划,输出每个工作面生产的起止时间,工作面接替图表和采区接替图表。利用这一模拟模型,当输入不同的矿井产量或生产工作面数目时,可以通过模拟得出在保证工作面采区正常接替条件下的矿井最大产量,论证矿井增产的可能性。

生产矿井年度采掘接替计划编制的模型和软件,目标是要求每月均衡的生产、均衡的采煤和掘进,以便完满地完成全年的煤炭产量和掘进进度计划。模拟进行中考虑了采煤、掘进、采掘工作面之间的、生产队组安排上的一系列约束条件,并采用人机对话方式吸收计划编制人员的意见。最后输出的结果全部用现行矿上通用的汉字采掘计划报表的格式和内容。

5. 矿井开采系统技术改造方案优选

生产矿井新水平准备时,往往结合开拓延深考虑是否改扩建或开采系统进行技术改造,以及选用何种延深或改造方案为最优的问题。由于各矿井的煤层地质条件和已有的开拓系统不同,生产技术和已有的主要装备能力状况不同,难以编制出通用的矿井技术改造方案优选模型,一般采用专用的模型和程序,其中部分内容可以利用已有的某些通用程序。

专用模型和程序的编制并不困难,一般采取的步骤和方法为:(1)列出所有技术可行的不同巷道系统的定性方案和不同的参数的定量方案;(2)列出与之有关的(不同部分的)工程量、费用项目和数学表达式;(3)对不同改造方案编号,将定量参数作为变量,编写计算机程序;(4)上机运算输出不同方案的结果和其间大小的对比分析,从中选优。

6. 矿区最优规划方案的选择

煤矿矿区是一个发展着的复杂系统,担负着煤炭生产、洗选加工和综合利用等职能,受自然、地质条件、开采技术、地区经济发展等多方面因素的约束,要达到高产、稳产、安全、低耗、经济和社会效益好的多个目标,存在着以不同方案建设发展矿区的可能性。运用煤矿开采专业技术知识和系统

工程的一些方法,从多个可行方案中选取最佳方案,已初步形成了矿区最优规划的理论和方法。

矿区最优规划中综合运用系统工程的主要内容和方法有:矿区及矿井主要技术经济指标的GM(1,1)灰色预测模型;生产矿井改扩建规模技术可行性分析,新建矿井最优方案选择;矿区发展方案选择的多目标分层次0—1规划模型、目标规划模型和层次分析模型;矿区发展动态模拟的系统动态学(SD)模型。

三、应用情况和存在问题

围绕煤矿开采系统开发研制的系统优化与模拟模型及其计算机程序,绝大部分都是结合矿井生产或设计的需要,作为科研项目精心进行和完成的,都附有应用实例和效果。例如,矿区最优规划模型已有平顶山矿区和兖州矿区长远规划中应用;矿井采运系统模拟模型已在济宁二号井设计中应用,在西山西铭矿、开滦唐山矿、晋城王台铺矿、淮北杨庄矿、义马千秋矿等矿井的生产系统分析中应用;矿井设计方案等优化模型已在古交电兰、焦作古汉山、杨泉梁庄、路安屯留、晋城大宁等矿井设计中应用;生产矿井技术改造方案选择模型已在平顶山一矿、鸡西二道河子矿应用;采区设计优化模型已在淮北、兖州、平顶山、鸡西、徐州、新汶、淮南等矿区内的某些采区中应用。总的来看应用的范围和论证分析的正在逐渐扩大。

由于所研究问题的复杂性、条件多变性和原始数据积累收集上的难度,尽管所作的一些研究工作都很努力,但仍然存在一些有待进一步研究解决的问题,概括起来主要有以下几点:

1. 开采系统的合理选择在很大程度上取决于煤层地质特征及其变化规律,目前还缺少比较适用的地质条件开采工艺性评价模型,用来作为进行系统优化的技术可行性依据,以便使优化模拟的基础更为坚实可靠。

2. 开采系统的研究所侧重的巷道布置和生产系统,与采煤工艺、矿山压力显现规律、巷道支护形式的关系十分密切,目前还没有紧密的联系在一起共同考虑分析和解决所面临的问题。

3. 优化模型缺乏对随机因素的考察,是确定型的模型,其基础数据的准确程度不高,影响着结果的可信程度,对优化准则的论证也不够充分。

4. 模拟模型所依据的系统参数随机性变化规律特征值的确定中,实测数据的积累和分析尚嫌不足,模拟结果缺少优化分析内容,用FORTRAN语言编写的程序可读性差,难以在应用中根据需要略加改动。

5. 所有的研究成果尚未形成真正的实用性强、功能齐全使用方便可靠的应用软件。

四、发展趋势展望

系统工程在煤矿开采系统中的应用将会出现一些重要的转变,即从少数几个技术方案的比选,到多方案、多目标的优化设计;从技术方案的定性分析到定性问题的定量解决;从按理想的简化的确定条件下决策,到考虑复杂多变随机因素的动态影响;从凭借个人经验和水平领导生产,到实现

科学管理与最优控制,从单纯依靠人工计算分析,到充分利用现代化手段的电子计算机。

今后的发展可能出现的情景有:对已开发的模型和程序进行修改完善,使之形成真正实用的软件,在生产中发挥应有的效果,在优化与模拟方法的结合上,在系统优化与技术工艺分析的结合上,向综合分析研究方向发展,以适应现实的需要;正在开发的计算机绘图技术已初见成效,必将与开采系统的优化模拟相配合得出迅速发展和广泛应用;与专家系统、计算机绘图相结合的 CAD 技术,可能受到极大的重视和较大的发展。

主要参考文献

- (1)缓倾斜煤层采区设计优化,王玉浚,煤炭工业出版社,1985
- (2)近水平煤层矿井设计方案优化,王玉浚、陈永祥等,煤炭工业出版社,1988
- (3)矿井开采设计,孙宝铮,刘吉昌等,中国矿业学院出版社,1986
- (4)电子计算机在煤矿的应用,刘吉昌,宗大华等,山西科学教育出版社,1986
- (5)采矿系统优化与模拟,王玉浚,徐永圻等,中国矿业大学出版社,1989

建立三维矿床模型的优化方法

沈阳煤矿设计院 林梧松

内容提要:本文在探讨国内外现行的三维矿床模型的基础上,提出用多级的线性约束非线性规划法求实验半变异函数的最佳拟合、用概率统计法进行 $\hat{\gamma}(v, v)$ 的计算、用动态法搜索参估点及用多个空间平面拟合、断层曲面等新的见解和优化方法,并在实际矿山设计中得到了应用。

建立三维矿床模型的目的,是使矿产资源埋藏的真貌得以按空间形态真实并数值化地展现出来。这种地质仿真过程为矿山设计和生产管理提供了直观可靠的依据。自七十年代以来,国内外学者建立了各种矿床模型的软件系统,本人通过长期的矿山设计实践和对三维煤矿床模型软件系统的研究,在总结前人经验的基础上,对以下几方面问题进行了优化探讨。

一、网格化估值模型的优化方法

1. 用地质统计法和距离幂次倒数加权法建立综合优化估值模型

目前普遍认为建立网格化估值模型最佳方法是地质统计法。其优点是:理论先进,计算精度高,不仅能取得估计值,而且提供估计方差;在估值时能充分利用已知信息(不但使用邻近的,而且考虑全矿区的信息)。但该方法操作复杂,机时耗费大。因此应根据矿床赋存特点,对不同地质变量采用不同的估值方法,采用地质统计法和距离幂次倒数加权法综合模型是理想的优化方法,两者相辅相成配合使用既保证估值精度,又使不同变量的估值可采用不同的方法,以达到简便灵活,节省机时,有关这两种方法的理论论述,已发表的文章很多,这里不加阐述。

2. 在地质统计法中,用多级的线性约束非线性规划法求实验半变异函数的最佳拟合

本方法的优选准则是通过已知的实验半变异函数的有关值点,拟合一个球状模型,要求在已知点上该函数的值与已知值的离差的平方和最小,即最小二乘原则。拟合实验半变异函数曲线的数学模型,目前常用的球状模型为:

$$\gamma(h) = \begin{cases} C_0 + C_1 \left[1.5 \frac{h}{a} - 0.5 \left(\frac{h}{a} \right)^3 \right], & \text{当 } |h| < a \text{ 时} \\ C_0 + C_1, & \text{当 } |h| \geq a \text{ 时} \end{cases} \quad (1)$$

式中, C_0 ——块金效应,表示在原点处不连续的幅度,即地质变量在短距离内的变异性;

C_1 ——结构系数;

a ——变程,即半变异函数到达平稳时与原点之间的距离,亦即相关范围的直径。

在煤矿床条件下可忽略块金效应,所以(1)式可改写为

$$\gamma(h) = \begin{cases} C(\frac{3h}{2a} - \frac{h^3}{2a^3}) & \text{当 } |h| < a \text{ 时} \\ C & \text{当 } |h| \geq a \text{ 时} \end{cases} \quad (2)$$

式中, $C=C(0)$, 为基台值。

上述准则的目标函数为

$$\min f(a, c) = \min_{i=1}^n [\gamma(h_i) - \gamma^*(h_i)]^2 \quad (3)$$

$$(a, c) \in R$$

式中, R ——研究域, $R = \{(a, c) | a > 0, c > 0\}$; $\gamma(h_i)$ ——当步长为 $|h_i|$ 时的理论半变异函数值;

$\gamma^*(h_i)$ ——当步长为 $|h_i|$ 时的实验半变异函数值;

n ——在 h 方向上实验半变异函数的值点数。

设子域: $R_K = \{(a, c) | h_K \leq a \leq h_{K+1}, C > 0\}$, $K=0, 1, \dots, n-1$ 。

其中, 令 $h_K < h_{K+1}$, $h_0 = 0$, h_n 为研究域中最大步长, 它受研究域大小及已知信息分布状况的约束, 那么

$$R_i \cap R_j = \varnothing (i \neq j, \leq_j \leq_i \leq 1);$$

$$R = \bigcup_{k=0}^{n-1} R_K$$

于是上述问题可变为

$$\min f(a, c) = \min f_K(a, c) \quad (4)$$

$$(a, c) \in R \quad (a, c) \in \bigcup_{K=0}^{n-1} R_K$$

设 (a_K, c_K) 是问题:

$$\min f(a, c), K = 0, 1, \dots, n-1$$

$$(a, c) \in R_K$$

的一个最优解, 则有:

$$\min f(a, c) = \min \{f(a_K, c_K)\}$$

$$(a, c) \in R \quad (a_K, c_K) \in W$$

其中, $W = \{(a_K, c_K) | K=0, 1, \dots, n-1\}$

于是原问题可化为一串问题

$$\min f_K(a, c)$$

$$\text{满足} \begin{cases} h_K \leq a < h_{K+1} \\ C > 0 \end{cases} \quad (5)$$

因为球状模型是分段函数,对此

$$f_K(a, c) = \sum_{i=1}^K [C(\frac{3h_i}{2a} - \frac{h_i^3}{2a^3}) - \gamma_i^*]^2 + \sum_{i=K+1}^n [C - \gamma_i^*]^2 \quad (6)$$

其中, $\gamma_i^* = \gamma^*(h_i)$, $i=1, 2, \dots, n$ 。

把 $f_K(a, c)$ 函数展开,得

$$\begin{aligned} f_K(a, c) &= \sum_{i=1}^K [C^2(\frac{2h_i}{2a} - \frac{h_i^3}{2a^3})^2 - 2C(\frac{3h_i}{2a} - \frac{h_i^3}{2a^3})\gamma_i^* + \gamma_i^{*2}] \\ &\quad + \sum_{i=K+1}^n [C^2 - 2C\gamma_i^* + \gamma_i^{*2}] \\ &= \frac{1}{4}c^2a^{-6} \sum_{i=1}^K h_i^6 - \frac{3}{2}c^2a^{-4} \sum_{i=1}^K h_i^4 + ca^{-3} \sum_{i=1}^K h_i^3 \gamma_i^* + \frac{9}{4}c^2a^{-2} \sum_{i=1}^K h_i^2 \\ &\quad - 3ca^{-1} \sum_{i=1}^K h_i \gamma_i^* + \sum_{i=1}^n \gamma_i^{*2} + (n-K)c^2 - 2c \sum_{i=K+1}^n \gamma_i^* \end{aligned} \quad (7)$$

显然,上述问题是一个多级的“线性约束非线性规划问题”,解这类问题,经典方法是用 FRANK-WOLFF 方法。但是,该方法在解本具体问题时,将遇到两个困难:(1)该方法必须经过一维搜索(至少一次),对于目标函数比较复杂的情况是很难做到。

(2)对于目标函数非凸的情况,寻找最优点是困难的。

为了解决上述问题,我们采取以下作法:

(1)对研究域的处理

从理论上讲,研究域范围应为 $R = \{(a, c) | a \geq 0, c \geq 0\}$,但是对于某一矿床的研究域来说,超出该矿床范围的结构分析是没有意义的。因此有必要确定一个合理的研究域,令

$$R = \{(a, c) | h_0 \leq a \leq h_n, S_{\min} \leq C \leq S_{\max}\},$$

其中, $S_{\min} = \min_i \{\gamma_i^*\}$; $S_{\max} = \max_i \{\gamma_i^*\}$ 在第 k 级,问题变为

$$\begin{aligned} &\min f_K(a, c) \\ &\text{满足} \begin{cases} h_K \leq a \leq h_{K+1} \\ S_{\min} \leq C \leq S_{\max} \end{cases} \\ &K = 1, 2, \dots, n-1 \end{aligned} \quad (8)$$

由 $f_K(a, c)$ 的连续性,我补充定义

$$f_K = (h_{K+1}, c) = \lim_{a \rightarrow h_{K+1}} f_K(a, c)$$

(2),对于问题(8),我们发现,当把可行解的定义域分成几个互不相交的域的同时,问题可得到简化。

由 $R_K = \{(a, c) | h_K \leq a \leq h_{K+1}, S_{\min} \leq C \leq S_{\max}\}$; 令

$$R_K^{(1)} = \{(a, c) | h_K < ah_{K+1}, S_{\min} < C < S_{\max}\};$$

$$R_K^{(2)} = \{(a, c) | a = h_K, S_{\min} < C < S_{\max}\};$$

$$R_K^{(3)} = \{(a, c) | a = h_{K+1}, S_{\min} < C < S_{\max}\};$$

$$R_K^{(4)} = \{(a, c) | C = S_{\min}, h_K < a < h_{K+1}\};$$

$$R_K^{(5)} = \{(a, c) | C = S_{\max}, h_K < a < h_{K+1}\};$$

$$R_K^{(6)} = \{(a, c) | a = h_K, a = h_{K+1}, C = S_{\min}, C = S_{\max}\}.$$

显然, $R_K = \bigcup_{i=1}^6 R_K^{(i)}$; $R_K^{(i)} \cap R_K^{(j)} = \varnothing, i \neq j, 1 \leq j \leq 6$.

(3) 求解问题

$$\min f_K(a, c) \quad i = 1, 2, \dots, 6$$

$$(a, c) \in R_K^{(i)}$$

上述问题的求解可分以下四种情况进行计算。

i. 当 $(a, c) \in R_K^{(1)}$ 时, 若 f_K 在 $R_K^{(1)}$ 中有极点, 必满足 $\frac{\partial f_K}{\partial a} = 0, \frac{\partial f_K}{\partial c} = 0$; 否则最小值一定在 R_K 的边界上。其中:

$$\begin{aligned} \frac{\partial f_K}{\partial a} &= -\frac{3c^2}{2a^2} \sum_{i=1}^K h_i^6 + \frac{6c_2}{5a^2} \sum_{i=1}^K h_i^4 - \frac{3c}{a^4} \sum_{i=1}^K h_i^3 \gamma_i^* - \frac{9c^2}{2a^3} \sum_{i=1}^K h_i^2 \\ &\quad + \frac{3c}{a^2} \sum_{i=1}^K h_i \gamma_i^*, \\ \frac{\partial f_K}{\partial c} &= \frac{c}{2a^3} \sum_{i=1}^K h_i^6 - \frac{3c}{a^4} \sum_{i=1}^K h_i^4 \gamma_i^* + \frac{1}{a^3} \sum_{i=1}^K h_i^3 \gamma_i^* + \frac{9c}{2a^2} \sum_{i=1}^K h_i^2 - \frac{3}{a} \sum_{i=1}^K h_i \gamma_i^* \\ &\quad + 2(n-K)c - 2 \sum_{i=K+1}^n \gamma_i^* \end{aligned}$$

令 $\frac{\partial f_K}{\partial a} = 0, \frac{\partial f_K}{\partial c} = 0$, 得方程组

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^K [c(3a^2 - h_i^2)h_i - 2a^3 \gamma_i^*] (h_i^2 - a^2) h_i = 0 \\ \sum_{i=1}^K [c(3a^2 - h_i^2)h_i - 2a^3 \gamma_i^*] (3a^2 - h_i^2) h_i + 4a^3 \sum_{i=K+1}^n (c - \gamma_i^*) = 0 \end{cases}$$

解得:

$$\begin{aligned} g_K(a) &= 2a^6(n-K) \sum_{i=1}^K h_i \gamma_i^* - 3a^5 \sum_{i=1}^K h_i^2 \sum_{i=K+1}^n \gamma_i^* - 2a^4(n-K) \sum_{i=1}^K h_i^3 \gamma_i^* \\ &\quad + 4a^3 \sum_{i=1}^K h_i^4 \sum_{i=K+1}^n \gamma_i^* + 3a^2 \left[\sum_{i=1}^K h_i^4 \sum_{i=1}^K h_i \gamma_i^* - \sum_{i=1}^K h_i^2 \sum_{i=1}^K h_i^3 \gamma_i^* \right] \\ &\quad - a \sum_{i=K+1}^n \gamma_i^* \sum_{i=1}^K h_i^6 - \left[\sum_{i=1}^K h_i^6 \sum_{i=1}^K h_i \gamma_i^* - \sum_{i=1}^K h_i^4 \sum_{i=1}^K h_i^3 \gamma_i^* \right] = 0 \end{aligned}$$

上式为关于 a 的一元六次方程, 由笛卡尔判别法可知 $g_K(a)$ 在 $(0, \infty)$ 上有一个或四个实根, 可用对分区间段的方法求出该方程在 (h_K, h_{K+1}) 上的根, 求得 a 值后再代入方程组中的任一方程中, 则可求得可行解 (a, c) , 取其最小者即为该问题的最优解。

ii. 当 $(a, c) \in R_K^{(2)} \cup R_K^{(3)}$ 时, 这时 a 为定数 ($a = h_K$ 或 $a = h_{K+1}$), 则 $f_K(a, c) = g_K(c)$ 。因为 $g_K(c) \geq 0$, 所以其内点的极值只能在 $g_K'(c) = 0$ 的根处, 否则就在端点处。求 $g_K'(c) = 0$ 的根得:

$$C = \frac{2a^3 \sum_{i=K+1}^n \gamma_i^* + 3a^2 \sum_{i=1}^K \gamma_i^* h_i - \sum_{i=1}^K \gamma_i^* h_i^3}{0.5a^{-3} \sum_{i=1}^K h_i^6 - 3a^{-1} \sum_{i=1}^K h_i^4 + 4.5a \sum_{i=1}^K h_i^2 + 2(n-K)a^3}$$

iii. 当 $(a, c) \in R_K^{(5)} \cup R_K^{(6)}$ 时, 这时 c 是固定值 ($C=S_{\min}$ 或 $C=S_{\max}$), $f_K(a, c) = g_K(a)$, 求 $g_K'(a) = 0$ 得:

$$2a^5 \sum_{i=1}^K h_i \gamma_i^* - 3a^4 c \sum_{i=1}^K h_i^3 \gamma_i^* + 4a^2 c^2 \sum_{i=1}^K h_i^4 - c \sum_{i=1}^K h_i^5 = 0$$

这是关于 a 的一元五次方程, 由笛卡尔判别法可知该方程在 $(0, \infty)$ 上有一个或三个实根, 用对分区间法可求得它的根, 并满足 $h_K < a < h_{K+1}$ 的要求。

iv. 当 $(a, c) \in R_K^{(6)}$ 时, 可行解定义在四个端点上, 求出它们的 $f_K(a, c)$ 值, 比较其大小, 取最小者即为它的最优解。

通过对伊敏河二号露天煤矿的实际应用, 验证了方法本身的可靠性。图 1、2 为该矿 16 号煤层, 煤厚的实验半变异函数曲线及其理论模型的拟合。其中“#”为实验半变异函数值点; “*”为拟合后最佳的理论半变异函数曲线。用该曲线计算它的储量和灰分值, 均达满意结果。该理论半变异函数的基本参数如下表所示:

方向	块金 c_0	变程 a (米)	基台 $c+c_0$
0	0	1873.6	178.5
$\pi/4$	0	2160.3	255.6
$\pi/2$	0	2007.1	113.3
$3\pi/4$	0	2623.8	141.8

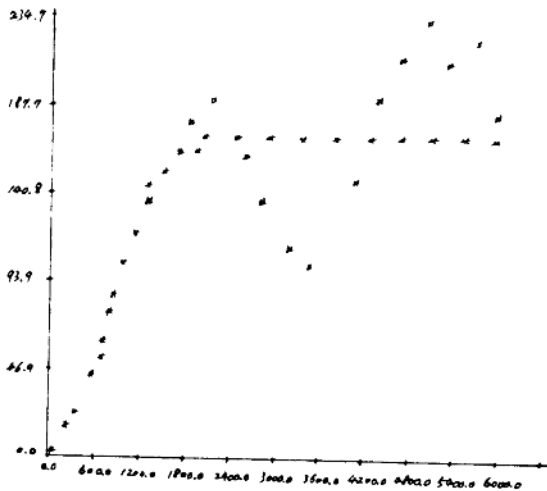


图 1 伊敏河二号露天煤矿 16 号煤层(煤层)实验半变异函数($\alpha=0^\circ$)及其理论拟合

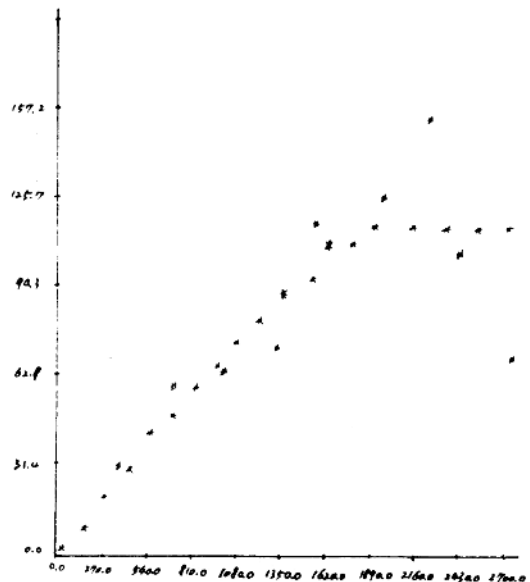


图 2 伊敏河二号露天煤矿 16 号煤层(煤层)实验半变异函数($\alpha=90^\circ$)及其理论拟合

3. 解克里金方程组时,对待估块自身的半变异函数平均值 $\bar{\gamma}(v, v)$ 计算方法的优化。

$\bar{\gamma}(v, v)$ 是待估块自身的半变异函数的平均值。其表达式为:

$$\bar{\gamma}(v, v) = \frac{1}{v^2} \int v dx \int v y |x - y| dy$$

其中, x, y 为 v 中任意两点, $\bar{\gamma}(v, v)$ 为两端点在 v 中的向量(如端点为 x 和 y)遍扫 v 时所得的半变异函数平均值。实际应用中多采取离散化的方法来处理,其模型为:

(1) 将被估块段 v 等分,形成网格点阵,设为点 $P_i, i=1, 2, \dots, K$ 。

(2) 各网格点两两成对,形成 h_{ij} , 即 P_i 点到 P_j 点的向量,求 $\gamma(h_{ij})$ 。

(3) $\bar{\gamma}(v, v) = \frac{1}{K^2} \sum_{i=1}^K \sum_{j=1}^K \gamma(h_{ij})$, 即 $\bar{\gamma}(v, v)$ 为所有 $\gamma(h_{ij})$ 的算术平均值。

按上述方法计算 $\bar{\gamma}(v, v)$, 我们发现,从 $\bar{\gamma}(v, v)$ 定义看,由于向量 $\vec{h}$ 的长度 $|\vec{h}|$ 的不同,在被估块段 v 中构成 $\vec{h}$ 的点对集可能不同;其次在网格点阵中同方向同长度的向量的重复计算可能产生。为此,推出以下算法,以弥补过去算法的不足之处。

记 v 中所有点对形成的向量集合为 v^* , h_x 为 v^* 中的一元素,命 v_x 为 v^* 中所有与 h_x 平行且长度相同的向量所组成的子集, h_x 为 v_x 的代表元。这样,我们可以得到 v^* 的一个部分:

$$v^* = \bigcup_x v_x, v_x \cap v_y = \varnothing, \text{当 } h_x \neq h_y \text{ 时,有}$$

$$\bar{\gamma}(v, v) = \int_x a_x \gamma(h_x)$$

在离散状态下为 $\bar{\gamma}(v, v) = \sum_x a_x \gamma(h_x)$, 其中, $a_x = |v_x| / |v^*|$, $|v_x|$ 表示子集 v_x 中向量的个数, a_x 实际是一个比率,即 v 中长度为 $|h_x|$ 方向角为 α_x (α_x 为 h_x 的方向角)的向量个数与 v 中所有向量总个数之比,其含意为权系数。

依据概率统计可导出一个实际可行的计算模型。以变量 A_x 表示 v 中长度为 $|h_x|$ 、方向角为 α_x 的向量, Ω 表示 v 中所有向量。 $P(A_x) = |v_x| / |v^*|$ 满足概率的定义,则权系数 a_x 等于概率 $P(A_x)$ 。

$\xi = (\xi\eta)$ 为 Ω 的随机变量, ξ 为 v 中向量 $\vec{h}$ 的长度 l , η 表示向量 $\vec{h}$ 的方向角 α , ξ 表示 v 中同长度同方向的向量的半变异函数值。

设被估块段 v 为二维空间一矩形, $v = [0, d_1; 0, d_2]$, v 满足内蕴假设,则对于任何向量 $h \in v$ 有

$$\begin{aligned} P(\xi = \gamma(h)) &= P(\xi = l, \eta = \alpha) \\ &= (d_1 - l \cdot \cos \alpha) \cdot (d_2 - l \cdot \sin \alpha) / 2A \end{aligned}$$

其中, $l = |\vec{h}|$, α 为向量 $\vec{h}$ 的方向角,

$$A = \frac{\pi}{2} d_1 d_2 \sqrt{d_1^2 + d_2^2} - \frac{d_1 + d_2}{2} (d_1^2 + d_2^2) + \frac{1}{6} (d_1^2 + d_2^2)^{\frac{3}{2}}$$

如图 3 所示, h 是 v 中任一向量, $|\vec{h}| = l$, α 是 $\vec{h}$ 的方向角, $0 \leq \alpha \leq \frac{\pi}{2}$ 。显然当 h 的始点落在 $v_x = [0, d_1 - l \cdot \cos \alpha; 0, d_2 - l \cdot \sin \alpha]$ 中时(图中阴影部分), h 落在 v 中, 故

$$|v_x| = (d_1 - l \cdot \cos \alpha)(d_2 - l \cdot \sin \alpha), |v^*| = \left| \bigcup_{h \in v} v_h \right| = \int_x |v_h| dh$$

$$= 2 \int_0^{\frac{\pi}{2}} \int_0^{\sqrt{d_1^2 + d_2^2}} (d_1 - l \cdot \cos \alpha)(d_2 - l \cdot \sin \alpha) dl d\alpha = 2A, \text{求得:}$$

$$A = \frac{\pi}{2} d_1 d_2 \sqrt{d_1^2 + d_2^2} - \frac{d_1 + d_2}{2} (d_1^2 + d_2^2) + \frac{1}{6} (d_1^2 + d_2^2)^{\frac{3}{2}}$$

故

$$p(\xi = l, \eta = \alpha) = |v_h|/|v^*| = (d_1 - l \cdot \cos \alpha)(d_2 - l \cdot \sin \alpha)/2A$$

实际应用时其计算步骤为:

(1)按已建立半变异函数模型的方向,在各方向上形成网格点阵,设向量 $h_i, i=1, 2, \dots, n$;

(2)求 $P_i = (d_1 - l_i \cos \alpha_i)(d_2 - l_i \sin \alpha_i)$, $l_i = |h_i|$, α_i 为 h 方向角;

$$(3) \text{令 } P_i^* = P_i / \sum_{j=1}^n P_j^* ;$$

$$(4) \bar{\gamma}(v, v) = E(\xi) = \sum_{i=1}^n P_i^* \gamma(h_i)$$

4. 网格化估值时搜索参估点的优化方法。

在进行块段估值时,要搜索估值域内的信息,被搜索到的信息称谓参估点。显然,参估点的数量及分布状对估值精度均有很大影响。

前人处理这个问题时有以下两种方法:

(1)事先给定搜索半径,确定估值域,在估值域内的信息均作参估点参加估值。

(2)按固定方位取近点。等分全平面,在每一角度区间内取一最近信息作为参估点。

以上两种方法,虽然后者较前者有很大进步,但对于相邻区间的两个最近点距离很近,而且它与待估点连线几乎在同一方向时,将存在信息分布结构不合理现象。如图4中 S_1 与 S_2 点,虽然它们分属两个区间,但相距很近,实际上只起到一个点的作用,这种信息结构是不理想的。

为了克服上述两种方法的不足,这里推荐一种动态的按方位取最近点的搜索法,其步骤是:

(1)给定搜索角 α ; (2)令 $K=1$; (3)在可搜索的信息

中,设 DR_K 是距离被估块中心 P 最近的信息,作 DR_K 到 P 点的连线 l_K ; (4)淘汰掉 l_K 左、右各 α 角扇形 F_K 内的信息点不参加下一轮的搜索(见图5); (5)令 DN_K 等于 F_K 内的信息个数,若 $\sum_{i=1}^K DN_K$ 等于研究域内的信息总个数, $DR_K (i=1, 2, \dots, K)$ 即为所搜索到的参估点。否则; (6) $K=K+1$, 转(3)。

显然该搜索法能克服参估点结构不合理的缺陷,对 α 角取值范围,可根据信息分布情况而定,一般为 $(\frac{1}{6} \sim \frac{1}{4})\pi$ 。

对此搜索法,有命题:

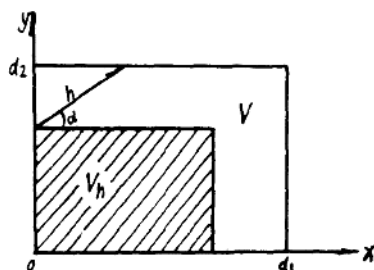


图3 二维矩形待估块 $\bar{\gamma}(v, v)$ 求解图示

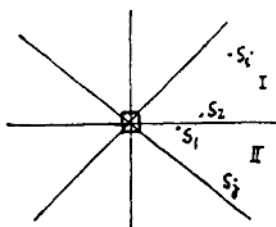


图4 搜索参数估点图示一

将相邻两个参估点分别与被估块中心点连线,若两连线之间的夹角为 β ,则当 $\alpha \leq \beta \leq 2\alpha$ 时,这种参估点的结构较优。

二、建立矿床赋存特征模型的优化方法

1. 用“临界点”与“有效边界点”处理露头带和剥蚀“天窗”的优化方法

线性克里格法估值是在内蕴假设下进行的。这一假设要求研究域内随机变量增量的平稳性及离差方差的有限性。根据实验半变异函数的生成办法,边界环境不能满足这一要求,而

露头带正是一种特定的边界环境,因此不能直接用边界处信息来进行估值,需要加以处理。为阐明边界环境,我们把处于边界环境的点分为临界点和有效边界点。

临界点定义:

设第 i 钻孔不含有某煤层的信息,但在以第 i 钻孔为圆心, R 为半径的园内存在含该煤层信息的钻孔,则称第 i 钻孔为该煤层关于半径 R 的临界钻孔(或临界点)

有效边界点定义:

设第 j 钻孔位于临界点 i 的半径 R 的园内,而第 j 钻孔含有该煤层的信息,则称第 j 钻孔为关于临界点 i 的有效边界钻孔(或有效边界点)。

临界点和有效边界点的建立,使我们得以实行如下模拟露头带和“天窗”的方法

设第 I 钻孔是第 L 层煤某信息 Z 的临界点, $I_j(j=1,2,\dots,n)$ 是关于 I 的有效边界点,设有断层影响,那么:

i. 第 I 钻孔的第 L 层煤的信息 Z_i ,由 $I_j(j=1,2,\dots,n)$ 钻孔的局部趋势的均值决定,并取其相反的数,即

$$Z_i = -\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n Z_{Ij}$$

其中, Z_{Ij} 是第 I_j 钻孔对于 I 钻孔的该信息趋势值。

ii. 若 Z 表示底板标高或其它地理标高,则

$$Z_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n Z_{Ij}$$

由以上步骤,可求得该煤层的沉积边界,即露头带或“天窗”。

我们定义,当参估点中出现临界点时,称该待估块进入了边界环境。在边界环境中,对于煤层底板标高,它将按局部趋势自然延伸,模拟了底板自然状态。一旦出现煤层尖灭时,底板的延伸将中止。

2. 用多个空间平面拟合断层曲面进行断层仿真的优化方法。

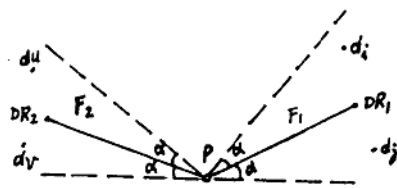


图5 搜索参估点图示二

网格化估值的一般特点是利用待估块周围的钻孔信息来估算该块的信息。由于断层的出现破坏了信息的相关性,给断层附近区域的估值带来了极大的困难。另一方面,断层本身的模拟也是一件极其困难的工作。

目前国内多采取“降维”处理的方法,即把断层近似地看作一条直线或曲线,然后在平面上进行处理。

这里推荐的是在三维空间模拟断层,目标是尽力体现出断层的原始面貌,包括断层本身的模拟和其周围区域的模拟。具体处理过程为:

i. 根据地质报告,经过研究,用若干个空间平面去拟合研究域内的断层曲面,此平面称谓“断层面”,实施时首先要确定各平面的四个端点。

ii. 提供断层的分离状况,按不同的分离状况分别处理。

iii. 连接待估点 P 与参估点 P_i ,得连线 $l_i (i=1,2,\dots,NDE)$,其中 NDE 是参估点总数。

iv. 判别 l_i 是否被“断层面” π_K 隔开 ($1 \leq K \leq NF$), NF 是该研究域内“断层面”总数。

若未被隔开,则 $i=i+1$,转 iii。

若 $i=NDE$ 停

否则转 v。

v. 进入断层处理状态:

(i) 求出 l_i 与 π_K 的交点 S_a ,计算该交点的虚拟信息;

(ii) 若断层分离度大(落差大),采用虚拟信息参估,若断层分离度小(落差小),采用原参估信息参估。对各种高程均用虚拟信息参估。

(iii) 在断层处理上均采用距离倒数加权法进行估值。

本模型的优点是:

(i) 用一系列平面去逼近一个曲面,能在三维空间中充分准确地模拟断层曲面,更能真实表现断层的赋存状态;

(ii) 本模型不用人工增加断层信息,计算和操作简便易行。

(iii) 虚拟点信息是由“断层面”与待估点同侧的参估点确定的。这样,既真实地反映了断层附近区域的真实状态,又弥补了断层对信息结构的破坏,提高了模拟的精确必性。

当我们建立伊敏河露天煤矿二号矿区 16 煤层的模型时,用 7 个平面去拟合 F_6 断层,用 4 个平面去拟合 F_8 断层,用 5 个平面去逼近 F_4 断层,均取得了令人满意的结果。

三维普通克里格法与CAD技术在铅硐山 铅锌矿储量计算中的应用实践

兰州有色冶金设计研究院 马育功

内容提要:

目前,克里格法在大型矿山的应用已趋于成熟,但在中小型矿山和有色矿山中的应用尚无重大突破,一般只能局限于二维克里格法,本文提出了一些新方法;矿体形态的数学处理与变换,组合样长的变化与多次组合,CAD技术和克里格法的并联,使三维克里格法在铅硐山铅锌矿完全得以实现,获得了比较满意的效果。

一、克里格法基本原理

地质统计学是地质变量既有随机性又有结构性的条件下,解决各种估值预测问题的统计方法,此也即它和经典统计学、传统储量计算方法的根本不同之处。区域化变量理论、变差图是其理论基础,普通克里格法则是其基本方法——一种由已知信息估计待估点或块段值的最佳线性无偏估计方法。

设待估块段邻域有诸样品 $E_i (i=1, \dots, n)$, 待估块段估计值为 Z_v , 真实值为 Z_v^* , 则 Z_v^* 是 Z_i 的线性组合:

$$Z_v = \sum_{i=1}^n \lambda_i \cdot Z_i \text{ 同时要求满足以下条件:}$$

(1) 无偏条件 $E\{Z_v - Z_v^*\} = 0$

即估计误差 $(Z_v - Z_v^*)$ 的数学期望为 0, 引入平稳性假设条件, 可推导出只有 $\sum_{i=1}^n \lambda_i = 1$ 方能满足上述要求, 即各权系数之和为 1。

(2) 克里格估计方差最小, 即

$\sigma_k^2 = E\{(Z_v - Z_v^*)^2\} \rightarrow \text{最小}$, 使估计值的准确性最高, 误差范围最小。显然, 估值问题的要核是求解满足上述条件的 $\lambda_i (i=1 \dots n)$ 。根据上述估计方差公式, 在无偏条件 $\sum_{i=1}^n \lambda_i = 1$ 限制下, 采用拉格朗日乘数法求条件极值, 即可得出求解 λ_i 的方程组:

$$\begin{bmatrix} \bar{C}_{11} & \bar{C}_{12} & \cdots & \bar{C}_{1n} & 1 \\ \bar{C}_{21} & \bar{C}_{22} & \cdots & \bar{C}_{2n} & 1 \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots & \vdots \\ \bar{C}_{n1} & \bar{C}_{n2} & \cdots & \bar{C}_{nn} & 1 \\ 1 & 1 & \cdots & 1 & 0 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \vdots \\ \lambda_n \\ \mu \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{C}_{1v} \\ \bar{C}_{2v} \\ \vdots \\ \bar{C}_{nv} \\ 1 \end{bmatrix}$$