

矿山生产能力可信度的 Monte Carlo 模拟与应用研究

杨蕾琦^{1,2}, 刘文君^{1,2}, 文磊³, 李兵³

(1. 南华大学经济管理学院, 湖南 衡阳 421001; 2. 南华大学核能经济与管理研究中心, 湖南 衡阳 421001; 3. 南华大学核资源工程学院, 湖南 衡阳 421001)

摘要: 地下矿山生产能力的设计具有广泛的不确定性,为减少生产能力决策风险,建立了矿山生产能力可信度的 Monte Carlo 模拟方法。以黑龙江某钼矿首采中段的生产能力方案模拟为例,分别进行了按同时回采矿块数、矿山开采年下降速度和新水平准备时间的生产能力可信度的 Monte Carlo 方法模拟,综合分析表明, 300×10^4 t/a、 500×10^4 t/a、 750×10^4 t/a 的矿山生产能力方案的可靠度分别为 100%、99.1%~88.4%、84.0%~9.85%,模拟结果可为生产能力设计提供参考。

关键词: 矿山生产能力可信度; Monte Carlo 法; 同时回采矿块数; 年下降速度

中图分类号: TD214 **文献标识码:** A **文章编号:** 1004-4051(2017)09-0038-04

Monte Carlo simulations of the reliability of mine capacity and its application

YANG Lei^{1,2}, LIU Wenjun^{1,2}, WEN Lei³, LI Bing³

(1. School of Economics and Management, University of South China, Hengyang 421001, China;

2. Research Center of Nuclear Energy Economics and Management, University of South China, Hengyang 421001, China;

3. School of Nuclear Resources Engineering, University of South China, Hengyang 421001, China)

Abstract: There is great uncertainty in the process of design underground mine's capacity. In order to reduce its decision risk, the Monte Carlo simulations of the reliability of mine capacity is established. Taking the capacity simulations of initial mining level of a molybdenum mine in Heilongjiang as an example, the Monte Carlo simulations of the reliability of mine capacity is separately carried out with the design method of the numbers of simultaneously mining block, and the design method of mining decreasing speed per year and the design method of new level preparation time. Comprehensive analysis shows that the reliability of mine capacity of 300×10^4 t/a, 500×10^4 t/a and 750×10^4 t/a are respectively 100%, 99.1%~88.4% and 84.0%~9.85%, and the simulation results can provide a reference for mine capacity design.

Keywords: reliability of mine capacity; Monte Carlo simulation; numbers of simultaneously mining block; mining decreasing speed per year

0 引言

矿山生产能力是矿山企业建设与生产的关键指标,直接影响矿山投资规模、基建工程量大小、投产和投产时间及矿山企业的运营效益等。矿山生

产能力的确定主要考虑以下因素^[1-4]:①矿床开采自然条件,如储量、品位、矿床产状及分布等;②矿床开采技术经济条件,如投资,水、电、设备供应,外部运输等;③市场需求,如资源区域分布、产品需求分布、产品价格走势等。其中,矿床开采自然条件和技术经济条件主要是从技术上分析可能达到的生产能力,而市场需求主要从经济上优化生产能力。目前,金属矿山按技术可能性确定生产能力的方法主要有三种:按可布矿块数、按矿山开采年下降速度和按新水平准备,最终设计的矿山企业的生产能力应同时满足以上三个条件,本文仅从技术方面考虑矿山实现生产能力的可能性,以供矿山生产能力决策提供参考。

收稿日期: 2017-01-02 责任编辑: 赵奎涛

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(编号:71540011,50974076)

第一作者简介: 杨蕾琦(1993-),女,湖南衡阳人,硕士研究生,攻读南华大学应用经济学专业,主要从事矿业经济与核能经济与系统工程方面的研究工作,E-mail:544528641@qq.com。

通信作者简介: 刘文君(1978-),男,博士,陕西山阳人,2011年毕业于日本神户大学经济学专业,副教授,硕士生导师,主要从事核能经济与系统工程方面的研究工作,E-mail:liuwenjun@usc.edu.cn。

由于影响矿山生产能力的因素(如年下降速度、地质储量、矿床产状等)具有不确定性,学者们用BP神经网络、模糊综合评价法、灰色理论、遗传算法等方法优化和确定矿山生产能力^[5-7]。同时, Monte Carlo 方法被广泛用来进行随机事件的模拟、分析和评价^[8-11]。与BP神经网络、遗传算法等方法相比, Monte Carlo 模拟方法的优点是模拟的精度高,方法简单,缺点是模拟次数多,一般当模型不复杂时,可选用 Monte Carlo 模拟方法。为此,本文采用 Monte Carlo 方法模拟矿山生产能力,并开展应用研究。

1 基于 Monte Carlo 方法的矿山生产能力可信度数值模拟

Monte Carlo 方法的实质是通过大量随机试验,利用概率论解决问题的一种数值方法。基本思想是当所求解问题是某种随机事件出现的概率,或者是某个随机变量的期望值时,通过某种“实验”的方法,以这种事件出现的频率估计这一随机事件的概率,或者得到这个随机变量的某些数字特征,并将其作为问题的解。

矿山生产能力可信度 Monte Carlo 数值模拟计算步骤如下。

1) 确定矿山生产能力的计算模型,见式(1)。

$$A = f(X_1, X_2, \dots, X_n) \quad (1)$$

式中: A 为矿山生产能力, 10^4 t/a; f 为矿山生产能力的计算模型, X_1, X_2, \dots, X_n 分别为影响生产能力的因素。常用的技术可能性确定生产能力的模型有可布矿块数模型、开采年下降速度模型和新水平准备模型,分别见式(3)、式(4)和式(5)。

2) 拟订目标中段生产能力,根据矿山综合技术开采条件和市场经济分析,初步拟订目标中段生产能力的几种方案,以 Y^j 表示第 j 种方案,生产能力为 Y 。

3) 分析确定影响生产能力因素的概率分布 $\Psi(X_i)$ 。

4) 依据概率分布 $\Psi(X_i)$ 生成随机样本向量 $(X'_1, X'_2, \dots, X'_n)$,代入生产能力公式,计算 $f(X'_1, X'_2, \dots, X'_n)$ 。

5) 将 $f(X'_1, X'_2, \dots, X'_n)$ 与期望的值 Y^j 进行比较,如果 $f(X'_1, X'_2, \dots, X'_n) > Y^j$,则结果 n 加1(开始 $n=0$)。

6) 循环第4步和第5步,到达停止条件后退出。停止条件为设定最多生成 N 个 $(X'_1, X'_2, \dots, X'_n)$,数量达到后即退出,统计获得满足 $f(X'_1, X'_2, \dots, X'_n) > Y^j$ 的个数 m^j 。

7) 矿山中段生产能力可信度按式(2)计算。

$$p^j = \frac{M^j}{N^j} \times 100\% \quad (2)$$

式中, p^j 为第 j 种目标生产能力方案的实现概率。

2 应用研究

2.1 工程概况

黑龙江某钼矿山为新建矿山,选择380~80 m作为首采区,阶段高度为60 m,320 m中段为首采中段,320 m中段矿体资源储量($Mo \geq 0.1\%$)为 $1\,435.91 \times 10^4$ t,平均品位为0.145 4%,钼金属量20 871.67 t。采用大直径深孔阶段空场嗣后充填采矿,采场铲运机出矿、中段汽车运输、斜井胶带连续提升至选矿厂。

根据矿山企业发展需求,提出了 300×10^4 t/a、 500×10^4 t/a和 750×10^4 t/a三种生产能力方案,通过生产能力方案可信度的 Monte Carlo 数值模拟,确定矿山生产能力方案。

2.2 基本假设

1) 矿山主要生产机械设备生产能力满足设计要求,不考虑充填系统与选矿系统对生产能力的制约。

2) 考虑建设工程推进速度,首采中段采用单中段生产,待矿山达产后,可考虑2个中段同时生产。

3) 生产能力模型中所有不确定性参数假设服从标准正态分布。

2.3 按可布矿块数的生产能力的模型与参数

2.3.1 可布矿块数的生产能力模型

首采中段选在320 m,各主要回采工艺不同时进行,同时回采矿块数确定生产能力按式(3)计算。

$$A = \frac{NqkEt}{1-z} \quad (3)$$

式中: A 为矿山年生产能力,t/a; N 为生产中段可布的矿块总数,个; k 为矿块利用系数; q 为矿块生产能力,t/d; z 为副产矿石率,%; E 为地质影响系数; t 为年工作日,d, $t=330$ d。

2.3.2 模型参数取值

N :首采中段矿块布置如图1所示,可布置的块矿数经计算大致范围为25~45块。

q :根据采矿方法和设备等条件,设定矿块的生产能力为3 600 t/a,由于受到开采条件和工程设备的影响,矿块生产能力有一定的波动性,本设计矿块生产能力取值在2 000~4 000 t/a。

k :采用大直径深孔嗣后充填采矿法,矿山矿块布置的比较疏松,矿块的利用系数比较高,参考相似大型金属矿山资料选择矿块利用系数取0.25~0.35。

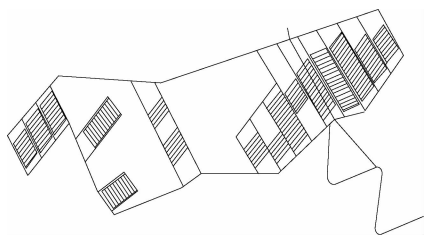


图1 矿块布置图

z :该矿山是钼铅锌多金属大型矿山,在300 m标高以上矿体夹石含量比较高,副产矿石率波动比较大,取5%~20%。

E :该矿山处在东北地区,由于地质构造和温度等原因对矿山开采有一定的影响,取地质影响系数0.8~1.0。

2.4 按年下降速度的生产能力的模型与参数

2.4.1 年下降速度的生产能力模型

按开采年下降速度确定中段生产能力按式(4)计算。

$$A = \frac{VS\gamma\alpha}{1-\beta} \quad (4)$$

式中: A 和 E 同式(3); V 为开采可行的年下降速度,m/a; S 为中段可利用矿体水平面积,m²; γ 为矿石容重,2.72 t/m³; α 为综合回收率,%; β 为矿石贫化率,%; Z 为矿体倾角修正系数。

2.4.2 模型参数取值

V :该矿山是钼铅锌多金属大型矿山,矿体水平面积比较大,使开采年下降速度不大,但由于采用了大型的采掘设备使年下降速度有所增快,所以取开采可行的年下降速度在12~20 m。

S :首采中段的可利用矿块不是连续的,这就给连续开采带来了一定的困难,在开采矿块选择上要考虑矿石含量、开采成本等问题,就需要对分散的不能构成规模生产的矿块先不予开采,使中段可利用矿体水平面积难以精确计算,取 $16 \times 10^4 \sim 22 \times 10^4$ m²。

α :采用的是大直径深孔嗣后充填采矿法,该方法使矿石的综合回收率很高,可以达到85%~95%。

β :矿房回采后采用采用胶结充填体,矿房的贫化率在5%~10%,矿柱回采后采用非胶结充填,矿柱贫化率在5%~15%,综合考虑矿石贫化率取5%~15%。

Z :该矿山矿体随着开采深度加大倾角也越来越大,深部矿体倾角几乎达到了90°,该矿体修正系数取在0.85~0.95较合理。

2.5 按新中段准备时间的生产能力的模型与参数

2.5.1 新中段准备时间的生产能力模型

为保证矿山能持续生产,必须使新阶段开拓、采准等准备时间小于开采一个阶段所需的时间,因此,矿山生产能力受到新阶段准备时间的限制。

新阶段开拓、采准等准备时间,根据设计矿山实际采用的机械水平和掘进工作条件及技术管理水平等情况,通过排采掘进度计划得出。

新中段巷道布置如图2。辅助斜坡道长502 m,两条穿脉巷道长973 m,回风石门长22.5 m,运输大巷长513 m,回风大巷长505 m。新中段采掘总长度 S 为2 515.5 m。

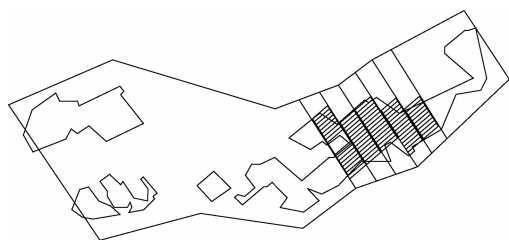


图2 开拓巷道布置图

新中段巷道掘进不能平行进行,一年工作11个月,新阶段准备时间 T 按式(5)计算,中段生产能力 A 按式(6)计算。

$$T = \frac{S}{11v} \quad (5)$$

式中: T 为新阶段准备时间,a; v 为井巷掘进速度,m/月。

$$A = \frac{Q\alpha E}{T(1-\beta)\omega} \quad (6)$$

式中: A 、 α 、 β 和 E 同式(3)、式(4)和式(5); Q 为生产中段可利用矿量,1 435.9万t。

2.5.2 模型参数取值

V -根据设计单位提供的井巷掘进进度和实际井巷掘进进度综合确定,取120~180 m/月; α 、 β 、 E 取值同式(4); ω 超前系数值视矿床埋藏要素稳定情况而定,矿床埋藏要素稳定,有用矿物分布均匀, $\omega=1.2 \sim 1.5$ 。

2.6 首采中段生产能力 Monte Carlo 模拟与分析

按照上面介绍的矿山生产能力可信度 Monte Carlo 数值模拟计算程序和步骤,模拟生产能力见表1。

从表1中可看出:①首采区设在320 m,达到 300×10^4 t/a 生产规模设计要求的可信度均为100%;②达到 500×10^4 t/a 生产规模设计要求的可信度均达到88.4%以上;③按年下降速度和新中段

准备时间模拟的年生产能力达到 750×10^4 t/a 的生产规模设计要求的可信度很小,需多中段作业。

表 1 矿山生产能力可信度

生产能力/($\times 10^4$ t/a)	300 方案	500 方案	750 方案
按可布矿块数验证的概率/%	100	99.1	84.0
按年下降速度验证的概率/%	100	90.8	25.7
按新中段准备验证的概率/%	100	88.4	9.85

综合矿山的采矿工艺、设备条件、矿体赋存条件,建议首采区采用 $300 \times 10^4 \sim 500 \times 10^4$ t/a 生产规模,待具备多中段生产条件时,将矿山生产能力提高到 750×10^4 t/a。

3 结 论

1)用 Monte Carlo 模拟矿山生产能力可信度,综合考虑了各种不确定性因素,对矿山生产能力设计更为科学合理。

2)用 Monte Carlo 模拟了黑龙江某钼矿首采中段生产能力的可信度,首采区采用 300×10^4 t/a、 500×10^4 t/a、 750×10^4 t/a 的矿山生产能力方案的可信度分别为 100%、99.1%~88.4%、84.0%~9.85%,模拟结果可为生产能力设计提供参考。

参考文献

[1] 罗周全,管佳林,王益伟,等.地下金属矿山生产规模优化确定方法[J].中南大学学报:自然科学版,2013,44(7):

2875-2880.
 [2] 张幼蒂,姬长生.大型矿山生产规模及其相关决策要素综合优化[J].中国矿业大学学报,2000,29(1):15-19.
 [3] 郑明贵,蔡嗣经.地采金属矿山生产规模确定的泰勒公式研究[J].江西理工大学学报,2007,28(3):21-25.
 [4] 王革民,陈建宏,刘浪.现代矿山开采生产规模优化准则综述[J].矿业研究与开发,2012,32(5):1-5,19.
 [5] 张诚,黄彬.基于 BP 神经网络的金属矿山生产规模优化研究[J].采矿技术,2016,16(1):73-74.
 [6] Gligoric Z, Beljic C, Gluscevic, et al. Hybrid model of evaluation of underground lead-zinc mine capacity expansion project using Monte Carlo simulation and fuzzy numbers[J]. Simulation-Transactions of the Society for Modeling and Simulation International,2011,87(8):726-742.
 [7] 饶运章,黄凯龙,李闯,等.露天矿山转地下开采过渡时期生产规模的模糊综合优化[J].有色金属科学与工程,2011,2(5):61-64.
 [8] 关维娟,陈明强,何刚,等.基于 MonteCarlo 随机模拟的煤矿工作面环境评价模式研究[J].安全与环境学报,2016,16(3):326-330.
 [9] 周雨凡,胡明华,张颖,等.基于 Monte-Carlo 模拟的进场排序不确定性研究[J].交通信息与安全,2016,34(4):22-28.
 [10] Booth AJ, Marshall AM, Stace R. Probabilistic analysis of a coal mine roadway including correlation control between model input parameters [J]. Computers and Geotechnics, 2016,74:151-162.
 [11] Viveros P, Zio, E, F Kristjanpoller, et al. Integrated system reliability and productive capacity analysis of a production line. A case study for a Chilean mining process[J]. Journal of Risk and Reliability,2012,226(3):305-317.

(上接第 37 页)

最低;如一定要采用平行断面法,必须慎重考虑勘查线剖面布置位置,不能强行重合采矿权边界,并在两条边界勘查线剖面之间等距离布置勘查线剖面。

参考文献

[1] 肖玉华,吴干华.固体矿产地质勘查资源/储量估算的几种方法[J].西部探矿工程,2012,24(5):117-118,121.
 [2] 刘金辉,王京彬,李峰,等.矿产资源估算中定量邻域分析与优化研究[J].中国矿业,2016,25(3):154-157.
 [3] 郭慧锦.块段法与地质统计相结合的矿产储量计算方法研究[D].北京:中国地质大学(北京),2010.
 [4] 曹建洲,赵远由,谢环宇.地质块段法在固体矿产资源储量估

算的应用探讨[J].矿产勘查,2015,6(4):144-148.
 [5] 白瑞和.固体矿产资源储量计算方法的探讨[J].中国非金属矿工业导刊,2010(6):59-61,12.
 [6] 于淑燕.资源储量计算误差探讨[D].北京:中国地质大学(北京),2012.
 [7] 程小娜,张博,董晓方.我国砂石土矿开采现状及对策研究[J].中国矿业,2015,24(5):23-26.
 [8] 姚震,肖劲奔.建筑石料矿山可持续发展评价指标体系的构建及应用[J].中国矿业,2013,22(11):27-31,45.
 [9] 国土资源部储量司.矿产资源储量计算方法汇编[M].北京:地质出版社,2000.
 [10] 李俊.固体矿产资源/储量估算方法研究现状及主要方法评价[J].中国非金属矿工业导刊,2005(2):53-55.