

不同市场条件下金属露天矿分期方案动态优化

王 青, 田维西, 顾晓薇, 秦宗琛
(东北大学 资源与土木工程学院, 辽宁 沈阳 110819)

摘 要: 基于浮锥排除法基本原理以及动态规划法进行露天矿分期方案动态优化. 采用2 000万t矿量作为境界增量, 使用锥体排除法产生一系列地质最优候选境界, 以净现值最大为目标函数, 对候选境界序列进行动态规划, 得出不同市场价格条件下的最优分期方案. 研究表明, 当价格平均年增长率分别为1.5%, 3%, 4.5%, 其所对应的生产成本年增长率分别为0.5%, 1%, 2%时, 给出的最佳方案为分两期开采方案和分三期开采方案, 其中分两期开采方案比分三期开采方案产生的经济净现值分别多1.2%, 3%, 4.3%; 但分两期开采方案比分三期开采方案采出的矿石量分别少9.2%, 7.9%, 13.1%. 由此可见, 以净现值或者矿石资源量作为生产决策指标对最优分期方案的选取有很重要的影响.

关 键 词: 露天矿; 分期开采; 地质最优序列; 动态规划; 最优分期方案
中图分类号: TD 804 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-3026(2018)07-1044-05

Dynamic Optimization of the Staging Scheme of Open-Pit Metal Mines in Different Market Conditions

WANG Qing, TIAN Wei-xi, GU Xiao-wei, QIN Zong-chen
(School of Resources & Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China. Corresponding author: TIAN Wei-xi, E-mail: 2251483106@qq.com)

Abstract: Based on the theory of floating cone exclusive and dynamic programming method, dynamic optimization of the staging scheme was used in open-pit mines. The optimal installment scheme could be obtained under the conditions of the different iron ore market by using 20 million tons of ore quantity as boundary increment to produce a series of geological optimal candidate boundaries by using cone elimination, and dynamic programming for the maximum of the net present value. The results showed that when the average price growth rate are 1.5%, 3% and 4.5%, and the corresponding annual growth rate of production costs are 0.5%, 1% and 2%, the best scheme is divided into two stages and three stages. The economic net present value of the two stages of mining scheme is 1.2%, 3% and 4.3% more than that of the three stage mining scheme, but the amount of ore is 9.2%, 7.9%, and 13.1% less than that of three stage mining scheme. It can be seen that the net present value or the amount of mineral resources has a very important influence on the selection of the optimal scheme.

Key words: open-pit mine; phase mining; geological optimal sequence; dynamic programming; the optimal staging scheme

采用分期开采的大型露天矿, 最佳分期数、各分期境界的最佳位置、大小和形状直接影响到分期开采的整体经济效益. 实际设计中, 分期方案设计方法一般是先设计出最终境界, 然后通过逐步降低矿床价值模型中各模块的价值并在每次降价后进行一次境界设计, 从而在最终境界中得出的一系列逐步变小的境界, 最后依据境界之间的水平距离是否满足最小工作平盘宽度、境界之间增量

的开采时间长度是否合理等技术条件,从中选出合理者为分期境界^[1-2].这种先行确定最终境界然后进行分期划分限定了寻优空间,在绝大多数条件下得不到全局最优方案,只能得到局部最优方案.对露天矿分期方案的优化,国内外主要围绕最终境界优化和生产计划优化,如 Jalali 等考虑境界形态的不确定性建立了马尔可夫随机模型^[3],Latorre 等^[4]在境界确定中考虑资金的时间价值,Castillo 等^[5]和 Armstrong 等^[6]采用不同标准的大模块 (macro-block) 来提高计划优化的求解效率.研究其整体优化的成果较少,Wang 等^[7]通过产生一个增量可控的金属量最大的境界系列,利用动态排序建立了分期开采的优化模型.这一方法是露天分期开采多要素整体优化的一个重要进展.本文以此方法为基础,建立同时考虑分期数、分期境界和最终境界这 3 个要素的动态规划模型,并考虑资金的时间价值,以总净现值最大为目标函数,在不同的市场条件下优化出最佳分期开采方案.

1 分期方案动态优化模型

分期境界优化的基本思想是:首先对于一系列的采剥量,找出对每一采剥量而言含有用矿物量最大的境界,作为候选境界序列;然后对这些候选境界进行动态经济评价,确定最佳分期数和各个分期境界(最后一个分期境界即为最终境界).候选境界序列产生原理及模型构建可以参考文献[8].

把产生的地质最优境界序列 $\{p_N^*\}$ 置于一个如图 1 所示的动态规划网络中,一个阶段上的不同状态就是这些地质最优境界,从最小到最大排列.

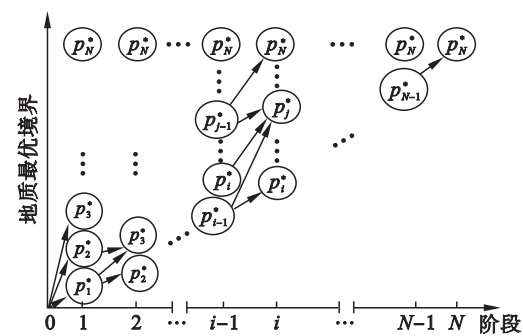


图 1 分期境界优化的动态规划网络图

Fig. 1 Dynamic programming network diagram of stage optimization

为叙述方便,定义以下符号: r_m 为矿石回采率; r_p 为选矿金属回收率; g_p 为精矿品位; p_i 为阶段 i 的精矿售价,可以是常数; y 为废石混入率; c_m, c_p, c_w 分别为采矿、选矿和剥岩的单位成本; A 为矿石年生产能力; d 为折现率.

一般地,阶段 i 上的状态为 j , 设该状态对应的境界为 p_j^* , 该境界所含金属量为 M_j , 所含原地矿石量为 Q_j , 所含原地废石量为 W_j , 它可以从前一阶段 $i-1$ 上对应于比 p_j^* 小的境界 p_k^* (金属量为 M_k , 矿石量为 Q_k , 废石量为 W_k) 的那些状态转移而来(图 1 中箭头线代表状态的转移), 这一转移开采的矿石的金属量 $m_{i,j}(i-1, k)$ 、矿石量 $q_{i,j}(i-1, k)$ 和废石量 $w_{i,j}(i-1, k)$ 分别为

$$m_{i,j}(i-1, k) = M_j - M_k, \quad (1)$$

$$q_{i,j}(i-1, k) = Q_j - Q_k, \quad (2)$$

$$w_{i,j}(i-1, k) = W_j - W_k. \quad (3)$$

设所研究的矿山企业的最终产品为精矿, 若假设废石的品位为 0, 这一状态转移获得的利润为

$$P_{i,j}(i-1, k) = \frac{m_{i,j}(i-1, k)r_m r_p}{g_p} p_i - q_{i,j}(i-1, k)r_m(1+y)(c_m + c_p) - w_{i,j}(i-1, k)c_w. \quad (4)$$

假设矿石开采能力、剥岩能力和选矿能力完全匹配, 那么这一状态转移需要的时间长度为

$$t_{i,j}(i-1, k) = \frac{q_{i,j}(i-1, k)}{A}. \quad (5)$$

如果上述能力不匹配, 应该用采矿、剥岩和选矿时间中的最长者.

从阶段 $i-1$ 上的境界 p_k^* 转移到阶段 i 上的境界 p_j^* 时, 到达阶段 i 上境界 p_j^* 的累计时间长度为

$$T_{i,j}(i-1, k) = T_{i-1, k} + t_{i,j}(i-1, k). \quad (6)$$

式中, $T_{i-1, k}$ 为沿着图 1 所示网络中最佳路径(策略)到达阶段 $i-1$ 上的境界 p_k^* 的累计时间长度.

这样, 当从阶段 $i-1$ 上的境界 p_k^* 转移到阶段 i 上的境界 p_j^* 时, 实现的累计净现值为

$$NPV_{i,j}(i-1, k) = NPV_{i-1, k} + \frac{P_{i,j}(i-1, k)}{(1+d)} + \frac{P_{i,j}(i-1, k)}{(1+d)^2} + \frac{P_{i,j}(i-1, k)}{(1+d)^3} + \cdots + \frac{P_{i,j}(i-1, k)}{(1+d)^{T_{i,j}(i-1, k)}}. \quad (7)$$

式中, $NPV_{i-1,k}$ 为沿最佳路径到达阶段 $i-1$ 上的境界 p_k^* 的累计净现值.

由于阶段 i 上的境界 p_j^* 从前一阶段 $i-1$ 上的多个境界转移,导致所开采的金属量、矿量和废石量不同,时间长度和利润也不同. 因此,阶段 i 上境界 p_j^* 处的累计 NPV 随不同的状态转移(决策)而变化. 具有最大累计 NPV 的那个转移是最佳转移(最优决策),从而有如下递归目标函数:

$$NPV_{i,j} = \max_{k \in [i-1,j-1]} \{NPV_{i,j}(i-1,k)\}. \quad (8)$$

不考虑初始投资,那么时间为零处 $M_0, Q_0, W_0, T_{0,0}, NPV_{0,0}$ 都为零.

运用式(1)~式(8),从第一阶段开始,逐阶段评价各境界(状态)直到图 1 上所有阶段的所有境界被评价完毕. 在所有状态中选出具有“最大累计净现值”的状态,则该状态对应的技术最优境界为最佳最终境界;从这一最终境界开始,逆

向追踪最佳转移,直到第一阶段,就可找出最佳路径. 这一最佳路径上各个状态对应的开采境界构成了序列 $\{p_N^*\}$ 的一个子序列,即最优分期方案,它同时给出分期数、每个分期境界(包括最终境界)的形态和位置、每一分期的采矿和剥岩量.

2 产生地质最优候选境界序列

本文以我国某铁矿为例,利用上述分期方案动态优化模型,对其进行分期方案优化. 根据矿山设计的年生产能力将相邻境界之间的矿石增量设置为 2 000 万 t(1 年产量),产生地质最优境界序列中,最小境界的矿量控制在 40 000 万 t(现在年产量的 20 倍)以内,产生地质最优候选境界序列见表 1. 结果表明,相邻境界之间的矿石增量基本上都控制在了 2 000 万 t 左右,且误差不超过 1%.

表 1 地质最优候选境界序列

Table 1 Geological optimal candidate boundary sequence

序号	原地矿石量	原地废石量	矿石品位	平均剥采比	增量剥采比
	万 t	万 t	%	$t \cdot t^{-1}$	$t \cdot t^{-1}$
1	9 363	5 130. 5	28. 073	0. 548	0. 548
2	11 369. 8	7 369. 3	27. 958	0. 648	1. 116
3	13 374. 1	10 087. 7	27. 741	0. 754	1. 356
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
21	49 439. 6	127 158. 2	27. 471	2. 572	4. 725
22	51 440. 8	138 502. 3	27. 448	2. 692	5. 669
23	53 440. 6	154 497. 6	27. 442	2. 891	7. 998

3 分期开采方案优化

虽然目前全球铁矿石价格处于低迷状态,但很多研究者认为未来铁矿石价格仍会缓慢增长^[9-10]. 若铁精矿价格以目前 480 元/t 上升到 650 元/t(近 10 年铁精矿价格最低值),这期间平均价格 560 元/t,价格平均年增长率 1. 5%,生产成本年增长率 0. 5%,记为方案一,其他技术经济参数不变,运用上述模型进行动态优化,优化结果如表 2 所示. 同样若价格平均年增长率 3. 0%,生产成本年增长率 1%,记为方案二;价格平均年增长率 4. 5%,生产成本年增长率 2%,记为方案三. 优化结果如表 2 所示.

从表 2 中可以看出,方案一中,分两期开采方案的 1 期境界比 2 期境界多采矿石量 16. 8%,而产生的经济净现值(NPV)比 2 期境界多 268%;分三期开采方案的 1 期境界比 2 期境界少采矿石

量 34. 73%,而产生的经济净现值比 2 期境界多 229%,即两期境界相比较,采出的矿石量相差不大,但产生的经济净现值相差很大. 方案二和方案三的各分期境界也是类似规律. 主要原因从境界平均剥采比的比较可以看出,方案一的分两期开采的 2 期境界的平均剥采比是 1 期境界的 3. 02 倍,分三期开采的 2 期境界的平均剥采比是 1 期境界的 2. 68 倍,明显后期境界的剥采比较大,导致采出的废石量比上一期多很多. 这说明采用分期开采的矿山盈利部分(即净现值)产生在前期.

从经济净现值比较,方案一、二、三的分两期开采方案比分三期开采方案净现值分别多 1. 2%, 3%, 4. 3%;从采出的矿石量比较,方案一、二、三的分两期开采方案比分三期开采方案矿石量分别少 9. 2%, 7. 9%, 13. 1%. 即每个方案中都是分两期开采方案经济净现值产生的要大,而分三期开采方案采出的矿石量多. 即从经济角度出

发,以盈利为目的,分两期开采的方案比分三期开 角度发出,分三期开采方案带来更多的矿石资源. 采带来更多利润;如果考虑长远发展,从资源利用

表 2 分期开采优化结果
Table 2 Results of stage mining optimization

方案		分期数	NPV 万元	采出矿石量 万 t	采出废石量 万 t	采出矿石 平均品位/%	境界平均剥 采比/(t·t ⁻¹)
方案一	分两期 开采	1	301 493.1	23 212.4	28 685.1	25.961 4	1.217 2
		2	81 890.1	19 875.6	70 725.4	25.632 1	3.625 4
		合计	383 383.2	43 088.0	99 410.5	25.796 8	2.387 3
	分三期 开采	1	289 139.4	13 213.6	11 314.2	26.268 4	0.837 3
		2	87 817.3	17 802.3	40 928.8	25.716 6	2.247 1
		3	1 880.4	13 845.5	58 136.7	25.597 3	4.107 1
		合计	378 837.1	44 861.4	110 379.7	25.860 7	2.822 1
方案二	分两期 开采	1	538 230.8	23 212.4	28 685.1	25.961 4	1.217 2
		2	72 017.9	21 875.6	80 425.4	25.632 1	3.625 4
		合计	610 248.7	45 088.0	109 710.5	25.796 8	2.387 3
	分三期 开采	1	538 230.8	23 212.4	28 685.1	25.961 4	1.217 2
		2	44 972.1	11 721.5	37 560.2	25.786 3	3.095 1
		3	8 995.9	13 735.4	61 887.3	25.624 3	4.380 2
		合计	592 198.8	48 669.3	128 232.6	25.790 7	2.573 2
方案三	分两期 开采	1	661 218.7	23 212.4	28 685.1	25.961 4	1.217 2
		2	118 006.7	21 875.6	80 425.4	25.632 1	3.625 4
		合计	779 225.4	45 088.0	109 710.5	25.796 8	2.387 3
	分三期 开采	1	661 218.7	23 212.4	28 785.1	25.96	1.217 2
		2	78 601.7	15 897.3	55 504.6	25.71	3.435 7
		3	7 372.3	11 876.5	55 901.5	25.65	4.614 9
		合计	747 192.7	50 986.2	128 232.6	25.773 3	2.704 3

4 结 论

1) 结合浮锥排除法和动态规划法建立露天矿分期方案动态优化模型,同时考虑了分期数、各分期境界和最终境界三大要素,并考虑了资金的时间价值,体现了时间和空间的动态性.

2) 优化结果表明,每个方案的每个分期采出的矿石量相差不大,而第 2 分期和第 3 分期剥离的岩石量远多于第 1 分期,导致其净现值远小于第 1 分期.说明矿山的盈利部分主要产生在前期,其主要原因是前期的境界平均剥采比最小,剥离岩石量少.

3) 每种方案优化结果都是分两期开采的总净现值大,而分三期开采的采出矿石量多.可以说明,对决策者而言,选取净现值作为决策指标,还是选取矿石资源量作为决策指标对最优分期方案的选取有很大影响.如果以经济盈利作为方案决策指标,应考虑两期开采方案;而以资源战略作为方案决策指标,应考虑三期开采方案.

参考文献:

[1] 任红岗,张长锁,赵旭林.大型深凹露天金属矿倾斜条带式短分期开采工艺及应用[J].有色金属(矿山部分),2015(4):9-12,23.
(Ren Hong-gang, Zhang Chang-suo, Zhao Xu-lin. Inclined strips and short stage mining technology and its application in large-scale deep open-pit mental mine[J]. *Nonferrous Metals (Mine Section)*, 2015(4):9-12,23.)

[2] Yane X. Application of open pit mining by stages in Taihe iron ore mine reconstruction and expansion project [J]. *Engineering Construction*, 2008, 40(3):24-27.

[3] Jalali S E, Ataee-Pour M, Shahriar K. Pit limits optimization using a stochastic process[J]. *Canadian Institute of Mining Magazine*, 2006, 1(6):90-94.

[4] Latorre E, Golosinski T S. Definition of economic limits taking into consideration time value of money [J]. *CIM Journal*, 2011, 2(3):162-170.

[5] Castillo M F D, Godoy M C, Dimitrakopoulos R. Optimal mining rates revisited: managing mining equipment and geological risk at a given mine setup[J]. *Journal of Mining Science*, 2015, 51(4):785-798.

[6] Armstrong M, Galli A. New approach to flexible open pit optimisation and scheduling[J]. *Mining Technology*, 2012, 121(3):132-138.

(下转第 1064 页)