

考虑外委的露天矿剥岩计划的优化研究

王 青, 张志彤, 顾晓薇, 胥孝川

(东北大学 资源与土木工程学院, 辽宁 沈阳 110819)

摘 要: 针对“剥岩高峰”对矿山生产带来的不利影响,研究了设备配置更新策略与露天开采外委剥离的优化问题. 基于铲运设备的运营成本与生产能力随设备役龄变化的关系,建立了决策单台设备退役时间的动态经济寿命计算模型,并根据此模型给出了具体的设备配置算法步骤. 设置一系列不同的矿山自剥离量与外委剥离量的分界水平,计算各分界水平条件下的外委单价可行区间,然后在区间内确定外委商谈价格并分析得出与之对应的总成本净现值最低的外委方案. 实例计算证明,采用该方法减少设备投资的成本要高于外委岩石剥离成本.

关 键 词: 剥岩高峰;外委;经济寿命;设备配置更新;单价可行区间

中图分类号: TD 854.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-3026(2018)01-0123-05

Optimization on Stripping Plan of Outsourced Open-Pit Mines

WANG Qing, ZHANG Zhi-tong, GU Xiao-wei, XU Xiao-chuan

(School of Resources & Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China. Corresponding author: ZHANG Zhi-tong, E-mail: zhangzhitong8776 @ 163. com)

Abstract: Since the "stripping peak" has a negative effect on mine production, the tactics of equipment update and the optimization on stripping plan of outsourced open-pit mines were studied. Based on the relation between the cost of stripping equipment, the production capacity and the changing of the service age, a dynamic economic life model was established to decide the retire time of a single equipment. Meanwhile, the configuration algorithm steps of a specific equipment was also given out. First, a series of different levels of mine stripping and outsourced stripping boundaries were set to calculate the feasible range of unit cost for the outsourced program, then the outsourced contract price was determined in the feasible range; Finally, based on the contract price, the net present value of the total cost was analyzed to get the optimized outsourced plan. It is proved that the cost of reducing equipment investment by this method is higher than the cost of outsourced rock stripping.

Key words: stripping peak; outsourcing; economic life; equipment update; feasible range of unit cost

露天开采是一个复杂的系统工程,影响开采经济效益的要素众多,其中,设计方案要素和主体设备的配置对露天开采的总体经济效益起决定性作用,也是露天开采优化领域的研究重点^[1]. 露天矿生产过程中,生产剥采比随深度一般都经历一个由小到大,达到高峰后再逐渐减小的变化过程. 其中,岩石剥离高峰期会导致矿山短期内需要

集中大量的设备并配备足够多的工作人员. 然而,这些设备和人员在高峰过后又要削减. 这样短期的增减会导致设备利用率降低、基建费用增大、生产成本增高,并且使露天矿的生产组织工作复杂化. 因此,为了得到较稳定的生产剥采比,在生产计划中常进行剥采比的均衡. 然而,对于一定的矿体形态、最终境界和开采方式,剥采比均衡的结果

收稿日期: 2017-05-12

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51474049, 51674062); 国家自然科学基金青年基金资助项目(51604061); 辽宁省自然科学基金资助项目(2014020040); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(N160104009).

作者简介: 王 青(1962-),男,内蒙古兴和人,东北大学教授,博士生导师; 顾晓薇(1971-),女,辽宁凤城人,东北大学教授,博士生导师.

往往是将剥离高峰期的岩石提前剥离. 由于资金的时间价值, 大量提前剥离会降低总体经济效益^[2].

在 20 世纪 80 年代初期, 云庆夏教授首次提出了动态存储规划均衡生产剥采比的理论方法, 该方法考虑了剥岩量和剥岩费用随时间的动态变化及剥岩费用的时间价值, 以露天开采总剥离费用最小为原则均衡生产剥采比^[3]. 但该方法需要获取的未知量, 要通过传统的手工设计方法是很难实现的, 因此, 至今尚未在生产设计中得到实际应用^[4]. Alarie 等就露天矿调度优化方法做了系统的综述^[5], 但露天矿装运系统的运营效率仍有改进空间, 优化方法的研究仍在继续^[6]. Çelebi 对于露天开采计划优化的问题, 建立了设备的选择和评估模型^[7]. 但是, 该动态规划模型没有考虑剥离设备的运营成本与生产能力随设备役龄的变化问题, 也没有考虑设备更新策略. Hartman 等是当前设备更新问题研究的最前沿与集大成者, 基本涉及到设备更新问题的各个研究角度^[8-9]. Sevim 等应用动态规划研究了露天矿开采中外委(合同)剥离的优化问题, 确定每年最佳合同剥离量以及矿山自己应拥有的剥离生产能力^[10]. 本文结合某露天矿山的采剥计划, 在剥离的高峰期雇佣公司外部的作业队承担部分岩石的剥离工作, 并在剥离计划优化中纳入了设备的更新问题.

1 按动态经济寿命进行岩石采剥与运输设备配置计划的算法

从设备的投资看, 使用寿命越长, 同样的投资可以完成的总作业量越多, 那么分摊到单位作业量上的投资费用就越低. 从设备运营成本看, 使用寿命越长, 年运营成本越高, 而年作业量(生产效率)越低, 导致分摊到单位作业量上的运营成本越高. 单独考虑一台设备更新时, 最好的标准是在设备的整个服役期间内单位产量的总费用现值最低, 而现值的计算要将设备运行期内每一年的年生产能力、年运行成本和设备残值计算在内, 同时要考虑成本的变化对计算带来的影响. 考虑到实际情况, 如果设备更新太早, 服役年数太少, 总产量低, 单位产量分摊的投资费用很高, 使单位产量的总费用也高; 如果更新太晚, 服役年数太长, 总产量高且分摊到单位产量的投资低, 但运行成本很高, 单位产量的总费用还是高. 因此, 有一个最佳的更新时间, 即最佳服役年数.

使用寿命期内分摊到单位作业量上的费用现

值, 定义为单位折现成本, 它是使用寿命 n 的函数, 记为 $c(n)$; 使单位折现成本 $c(n)$ 达到最小时的使用寿命称为动态经济寿命 n_e .

$$n_e = \min_{1 \leq n \leq N} \{ c(n) \} = \min_{1 \leq n \leq N} \left\{ \frac{I + \sum_{t=0}^{n-1} \frac{C(t)(1+r)^{t+1}}{(1+d)^{t+1}} - \frac{S(n)(1+r)^{n+1}}{(1+d)^n}}{\sum_{t=0}^{n-1} Q(t)} \right\} \quad (1)$$

式中: I 为设备投资; $Q(t)$ 为役龄为 t 的设备的年作业量; $C(t)$ 为役龄为 t 的设备的年运营成本; N 为设备的技术寿命; $S(n)$ 为使用寿命为 n 时的设备残值; d 为折现率; r 为真实成本上升率.

按照设备动态经济寿命进行更新配置, WK-10B 型电铲负责铲矿作业, TR-100 型卡车负责运输作业, 两种设备各自进行更新配置. 以电铲设备为例, 计算步骤如下:

步骤 1 输入已知的露天矿采剥计划, 包括矿山需自己剥离的岩石量 (W_i) 和矿山开采寿命 (N), 计算电铲、卡车设备的动态经济寿命 n_e .

步骤 2 令 $i=1$, 首先根据矿山第 1 年采剥计划确定所需电铲设备的数目, 满足:

$$0 < \sum_{k=0}^n P_1(x_{1,k}) - W_1 = V_{w,1} \quad (2)$$

其中, $\sum_{k=0}^n P_1(x_{1,k})$ 表示开采第一年时, 当役龄为 0 年时的所有设备的实际工作能力之和, 且 n 的取值从 1 开始, 直到出现满足式(2) n 的取值, 即是第一年所需电铲台数 n_1 .

步骤 3 令 $i=2$, 矿山第 1 年采剥计划确定所需电铲设备数目 n_1 , 设备的役龄相应为 1 年. 满足:

$$0 < \sum_{k=1}^n P_2(x_{2,k}) - W_2 + V_{w,1} = V_{w,2} \quad (3)$$

其中, 若根据步骤 3 中确定出的电铲设备数目 n_1 满足式(3), 则无需增加设备, 即设备数目仍为 n_1 ; 若不满足式(3), 则需要增加 1 台或多台设备, 直到满足式(3), 新增的设备役龄为 0 年.

步骤 4 令 $i=i+1$, 如果 $i < n_e + 1$, 执行步骤 4, 否则转入步骤 5.

当矿山开采到第 i 年时, 满足:

$$0 < \sum_{k=i}^n P_i(x_{i,k}) - W_i + V_{w,i-1} = V_{w,i} \quad (4)$$

当开采到第 $i=n$ 年时, 若电铲设备数目 n_i 满足式(4), 则无需增加设备, 即设备的数目仍为 n_i ; 若不满足式(4), 则需要考虑增加 m 台设备, 直到满足式(4), 新增的设备役龄为 0 年.

步骤 5 如果 $i = n_e + 1$, 即设备达到动态经济寿命, 则该设备应该选择退役, 令电铲设备的生产能力 $P_i(x_{i,k}) = 0$.

步骤 6 当 $i > n_e + 1$ 时, 这时候达到动态经济寿命的设备已经退役了, 其他设备仍按照上面步骤 4 进行计算, 直至 $i = N$, 即矿山开采结束年份.

步骤 7 算法结束, 输出该生产计划设备配置方案, 计算出在矿山整个服务期内总的矿山剥岩和运输的成本现值.

2 矿山自剥离与外委剥离最优方案的确定方法

2.1 优化原理

不进行生产剥采比均衡, 基建后每年的剥岩量变化如图 1 所示. 按照一定的变化步长, 分别设置不同的自剥离与外委剥离界线值 Q_1, Q_2, Q_3 . 如果矿山自己剥离与外委剥离的分界线设置在 Q_1 水平, 那么 Q_1 线以上的岩石量就是需要外委剥离的部分, 外委开始于第 t_1 年, 结束于第 t_2 年, 每年的外委剥离量和外委剥离总量都可计算出来, 留给矿山自己每年需要承担的剥离量也随之而定; 如果这一分界线从 Q_1 变为 Q_2 , 那么, 每年的外委剥离量和外委剥离总量都相应地增加, 外委的时间段增长; 反之, 每年的外委剥离量和外委剥离总量都相应减少, 外委的时间段缩短. 总的优化思路是, 以一定的增量设置一系列不同水平的矿山自剥与外委剥离的分界水平, 计算各分界水平条件下外委剥离部分的成本现值与矿山自剥离部分的运营成本现值之和, 成本现值总额最低者即为最优方案.

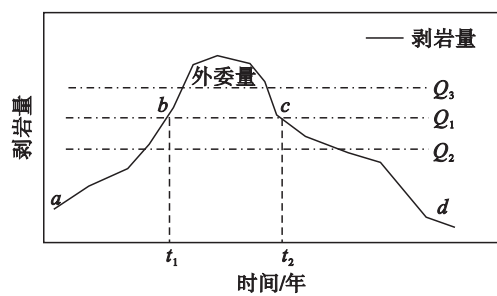


图 1 剥岩量随时间变化的曲线
Fig. 1 Changing of the stripping rock with time

剥离高峰一般都不是出现在矿山开采的前几年中, 如果设定的某个矿山自有剥离能力是一个等于分界水平的常数, 仍然意味着大量的提前剥岩, 考虑到资金的时间价值, 这样做会降低矿山的

整体经济效益^[11]; 如果只考虑矿山单位剥岩成本, 就不能反映短期的剥离高峰带来的不经济性. 这种不经济性主要体现在剥离设备数量的突然大量增加, 高峰过后又有多台剥离设备在未“退役年龄”时提前退役. 因此, 矿山的自有剥离能力必须转化为矿山剥离设备的配置, 并考虑设备退役和更新问题, 使所配置设备的生产能力尽量沿着对应于分界水平的自剥量变化, 如图 1 所示, 对应于分界水平取为 Q_1 值的自剥离量即为曲线 $abcd$.

2.2 优化算法的步骤

首先, 按照矿山采剥计划, 计算每年需要的岩石剥离量, 设置矿山自有剥离与外委剥离分界水平初始值 Q_0 及变化步长 ΔQ , 把矿山的自有剥离能力转化为矿山剥离设备的配置, 并考虑设备退役和更新问题.

第一年: 根据当年需要的岩石剥离量, 为矿山配置设备, 使其超前剥离量等于或大于 0.

第二年: 第一年的剥岩和运输设备每台的役龄增加 1 年, 成为第 2 年初的生产设备, 如果有达到动态经济寿命的设备, 根据具体情况, 更新或直接退役, 目的是使前 2 年的实际剥离量减去前 2 年的需要剥离的岩石量大于或等于 0. 如果把所有到了动态经济寿命的设备都更新还不够, 就得投入一台或多台新设备.

第三年: 第二年的设备每台的役龄增加 1 年, 与第二年相同的算法, 得到第三年的设备队伍以及其累积超前剥离量.

如此每年进行下去, 直到最后一年.

在上述计算过程中, 为矿山自己的剥离量配置设备后, 每年外委剥离岩石量及其发生的时间段都可以相应地确定出来. 其中, 必须保证任何一年的矿山自有剥离量与外委剥离量之和不低于当年的累计需求剥离量, 否则, 矿石就无法达到生产目标. 计算这一方案的运营成本现值总额, 然后, 根据之前确定的外委界线变化步长 ΔQ , 改变分界水平, 重复上述步骤, 得出最佳方案. 本文应用的矿山自有剥离量与外委剥离量分界线的优化算法中, 降低了矿山的基建投资成本, 充分考虑到了资金的时间价值对矿山整体经济效益的影响; 提高了矿山设备的使用效率, 使矿山的总投资额大大减少.

3 实例应用

以某露天矿设备运营数据为基准. 电铲型号

为 WK-10B,购置价格 I 为 1 885 万元,技术寿命 N 为 20 年;卡车型号为 TR100,购置价格 I 为 800 万元,技术寿命 N 为 12 年.折现率取 6.8%,年均真实成本上升率取 1.5%.结合式(1)计算单位折现成本随使用寿命 n 的变化函数 $c(n)$,求得电铲和卡车的动态单位成本现值.其中,WK-10B 型电铲的动态经济寿命为 15 年,TR100 型卡车的动态经济寿命为 8 年.

根据当前技术经济参数,对该露天矿进行开采计划优化,优化结果如图 2 所示^[12].岩石剥离量的高峰出现在第 4 年到第 12 年.

本算例按照动态经济寿命进行更新,卡车设备配置方案如表 1 所示.表中“自剥离与外委剥离界线”表示矿山自行剥离岩石量的上限,例如

将该界线设置为 1 000 万 t 时,矿山自行剥离岩石量的上限为 1 000 万 t;该界线设为 3 800 万 t 时,表示矿山完全采取自行剥离的方案,即外委岩石量为零.

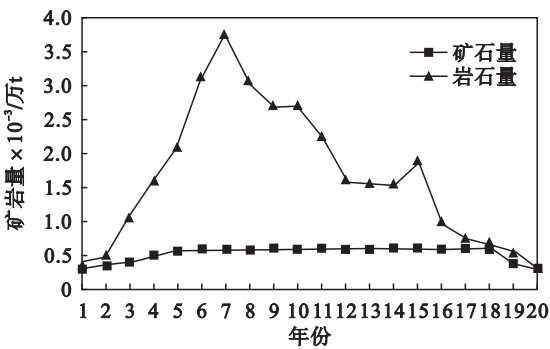


图2 某露天矿开采计划优化结果
Fig. 2 Mining optimization result for the open-pit mine

表 1 卡车设备配置方案
Table 1 Dispatching plan of transportation equipment

自剥离与 外委剥离 界线/万 t	投入设备/台		设备更新计划	
	基建 台数	工作台数	更新台数	更新时间/年
1 000	2	4,2,4,3,4	+2,-2,+2,(-2,+1),+1	3,9,10,11,12
1 500	2	4,5,6,6,5,5,6,5,3,2	+2,+1,+1±2,(-2,+1),±1,+1,-1,-2,-1	3,4,7,9,11,12,13,15,17,19
2 000	2	4,5,7,8,8,7,6,5,6,7,6,4	+2,+1,+2,+1,±2,(-2,+1),-1,-1,+1,+1,-1,-2	3,4,5,8,9,11,12,13,14,15,16,17
2 500	2	4,5,7,9,10,9,9,8,6,4,7,6,5	+2,+1,+2,+2,+1,-2,±1,-1,-2,-2,+3,-1,-1	3,4,5,6,8,9,11,12,13,14,15,16,17
3 800	2	4,5,7,12,11,9,13,11,6	+2,+1,+2,+5,(-2,+1),-2,(-1,+5),-2,-5	3,4,5,6,9,11,12,13,14

如表 1 所示,“+”表示投入新设备;“-”表示退役设备;“±”表示退役设备的同时又投入了新设备;符号后面的数字为更新的台数.更新台数与投入设备的工作台数以及更新时间是一一对应的.例如表 1 中,当“自剥离与外委剥离界线”取 1 000 万 t 时,更新台数“(-2,+1)”表示在开采的第 11 年年初,退役 2 台设备的同时,投入了 1 台新设备,此时的工作台数为 3 台.

在矿山自剥离与外委剥离最优方案的计算模型中,设置完成不同的自剥离与外委剥离界线的值后,可计算出各分界水平条件下,除去外委剥离岩石的部分,矿山完全靠自身剥岩的成本现值为 $C_{z,i}$;矿山不采取外委方式,完全靠自身进行剥离工作时的剥岩成本现值为 $C_{w,i}$.如式(5)所示,为矿山外委方案的最高外委单价,因为若承包商提出的外委价格高于该值,那么外委出对应方案中的岩石量所需的费用要高于矿山完全靠自身剥离时的运营成本,这样外委的方式就不能起到降低矿山建设投资的作用了.

$$P_0 = \frac{\sum_{i=1}^N C_{w,i} - \sum_{i=1}^N C_{z,i}}{\sum_{i=1}^N W_Q \times \frac{(1+r)^i}{(1+d)^i}} \quad (5)$$

式中: P_0 为外委单价; W_Q 为矿山的外委剥岩量.

外委的最低单价应该为各分界水平条件下, $C_{z,i}$ 与对应的矿山靠自剥离的岩石量的比值.因为若承包商的定价小于该值,那么最经济的方式应该是把所有的剥岩工作都给承包商完成,这样研究就变得没有意义.给出不同的矿山自剥离与外委剥离界线条件下的外委单价可行区间,以及在可行区间内取不同外委商谈价格时,各方案的运营成本现值总额如表 2 所示.

在计算出的外委单价区间内,针对确定出的外委商谈价格,有与之对应的唯一的最佳外委剥离界线值.例如,当外委商谈价格定为 3.5 元/t 时,自剥离与外委剥离界线设置在 1 500 万 t 水平时,是最佳的方案,该方案的运营成本现值比矿山完全靠自身剥离的方式的成本要节省约 12.82%.由此可知,最佳的外委剥离界线值需要

根据矿山与合同商共同商订的外委单价进行 确定.

表 2 不同外委方案运营成本现值对比
Table 2 Comparison of the cost present value with different outsourced projects

自有与外委 剥离界线	自有设备运 营成本现值	外委单价可行区间	外委商谈价格/(元·t ⁻¹)		
			2.5	3.0	3.5
			运营成本现值 总额/万元	运营成本现值 总额/万元	运营成本现值 总额/万元
万 t	万元	元·t ⁻¹			
1 000	56 198.846 63	1.71 ~ 3.70	90 251.679 2	97 062.245 7	98 694.425 6
1 500	75 802.436 2	2.31 ~ 3.64	96 998.722 7	101 237.980 0	92 975.905 8
2 000	89 036.329 08	2.71 ~ 3.60	101 270.123 6	103 716.882 5	102 248.827 2
2 500	96 230.037 78	2.93 ~ 4.32	102 261.801 0	103 468.153 7	102 744.342 1
3 800	106 650.323 3	—	106 650.323 3	106 650.323 3	106 650.323 3

4 结 论

1)根据矿山设备的动态经济寿命模型,分别计算出某矿山 WK-10B 型电铲设备的动态经济寿命是 15 年,TR-100 型卡车的动态经济寿命是 8 年.

2)结合某矿山的采剥计划,给定矿山自行剥离量与外委剥离量分界线的变化步长,确定出一系列岩石自行剥离量与外委剥离量的分界水平,计算得出与之对应的各方案的矿山铲运设备的更新策略以及自有设备运营成本现值总额.

3)实例计算结果表明,一方面,不同的岩石自行剥离量与外委剥离量的分界水平对应的外委价格可行区间不同,要根据各方案对应的可行价格区间来确定外委商谈价格;另一方面,外委商谈价格确定后(分别取外委商谈价格为 2.5,3.0,3.5 元/t),得出的总成本净现值最低的岩石外委与自行剥离分界线,即最优方案也随之确定(分别为 1 000,1 000,1 500 万 t).

参考文献:

[1] Newman A M, Rubio E, Caro R, et al. A review of operations research in mine planning[J]. *Interfaces*, 2010,40(3):222-245.

[2] 陈俊智. 露天矿生产剥采比的优化与控制[D]. 昆明:昆明理工大学,2001.

(Chen Jun-zhi. Optimization and regulation for stripping-ratation of open-pits mines[D]. Kunming:Kunming University of Science and Technology,2001.)

[3] 云庆夏. 均衡露天矿剥离工作的新方法[J]. 有色金属(矿山部分),1984(4):15-18.

(Yun Qing-xia. A new method to balance open-pit mine stripping work[J]. *Nonferrous Metals (Mining Section)*, 1984(4):15-18.)

[4] 左瑞. 露天矿生产剥采比的优化调控[D]. 武汉:武汉理工大学,2011.

(Zuo Rui. Optimization and regulation of open-pit stripping ratio[D]. Wuhan:Wuhan University of Technology,2011.)

[5] Alarie S, Gamache M. Overview of solution strategies used in truck dispatching systems for open pit mines[J]. *International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment*, 2002,16(1):59-76.

[6] Ercelebi S G, Bascetin A. Optimization of shovel-truck system for surface mining[J]. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*,2009,109(7):433-439.

[7] Çelebi N. An equipment selection and cost analysis system for open-pit coal mines[J]. *International Journal of Surface Mining Reclamation and Environment*,1998,12(4):181-187.

[8] Hartman J C, Rogers J. Dynamic programming approaches for equipment replacement problems with continuous and discontinuous technological change[J]. *IMA Journal of Management Mathematics*,2006,17(2):26-30.

[9] Rogers J L, Hartman J C. Equipment replacement under continuous and discontinuous technological change[J]. *IMA Journal of Management Mathematics*,2005,16(1):23-36.

[10] Sevim H, Wang Q, de Tomi G. Economics of contracting overburden removal[C]//Proceedings of the International Symposium APCOM. Berlin,1990:573-584.

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

[12] Gu X W, Wang Q. Dynamic phase-mining optimization in open-pit metal mines[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2010,20(10):1974-1980.