

基于混合整数规划法的地下矿采掘计划编制

刘晓明, 徐志强, 陈鑫, 钟德云

(中南大学资源与安全工程学院, 湖南长沙 410083)

摘 要: 矿山采掘计划编制对企业总体经济效益具有深远的影响, 手动编制技术已难以满足矿山的需求. 为有效提高计划编制的高效性和合理性, 通过对无底柱分段崩落法的研究分析, 建立了以出矿品位波动最小为目标函数的混合整数规划(MIP)模型. 模型包含了生产开采的全过程, 以保证井下各工序的合理衔接. 对北洺河铁矿采掘计划编制的试验结果表明, 该方法具有编制时间短、工序衔接更合理、计划结果较手动方法更优越的特点. 研究表明采用该方法能有效提高计划的合理性, 使企业获得更大经济效益.

关 键 词: 地下矿山; 无底柱分段崩落法; 采掘计划编制; 混合整数规划; 品位波动最小

中图分类号: TD 214

文献标志码: A

文章编号: 1005-3026(2017)06-0880-06

Production Scheduling in Underground Mining Using Mixed Integer Programming

LIU Xiao-ming, XU Zhi-qiang, CHEN Xin, ZHONG De-yun

(1. School of Resources and Safety Engineering, Central South University, Changsha 410083, China.

Corresponding author: XU Zhi-qiang, E-mail: 1184609635@qq.com)

Abstract: Production scheduling has a profound influence on the overall economic benefits of the mining enterprise, and the manual technology has difficulty to meet the needs of mine. To improve the efficiency and rationality of scheduling, we studied the non-pillar sublevel caving method, and presented a mixed integer programming (MIP) model. This model makes minimum fluctuations of ore grade as the objective function, and it contains the whole process of mining to ensure all procedure could be more reasonable connected. In the test of the production scheduling of the Beiminghe iron mine, the results show that it spent shorter time and the procedure was more reasonable, what's more, the results are better than the manual method. The study shows that this method can effectively improve the rationality of schedule and make the enterprise get more economic benefits.

Key words: underground mine; non-pillar sublevel caving method; production scheduling; mixed integer programming; minimum fluctuations of ore grade

地下矿采掘计划编制是矿山生产经营管理中一项极其重要的内容, 计划编制是否合理, 将直接影响到矿山企业的总体经济效益^[1-2]. 传统的手动编制方法不仅耗时长、强度大, 而且准确性差, 修改难度大^[2]. 究其原因, 主要是在编制计划过程中, 需要综合考虑各生产工序和采场之间的时空制约性及其连续性, 同时还应尽可能使企业经济效益最大化. 随着计算机三维可视化技术的迅速发展, 地下矿三维可视化技术给矿山采掘计

划编制提供了一个良好的环境.

关于自动编制矿山采掘计划, 国内外学者运用多种方法对其进行了研究^[2-9], 大体可分为三类: 计算机模拟技术、人工智能和数学规划法. 文献[1]应用计算机模拟技术对冬瓜山铜矿未来两年的回采过程进行了模拟分析, 不足是需要有预演的计划方案. 文献[2]运用人工智能中的遗传算法对矿山采掘计划进行了研究分析, 但方法存在初始群体选取困难和可能因迭代次数不够而错

失最优方案的风险. 数学规划法通过建立数学模型来求解目标函数进而得到矿山采掘计划, 如 Dónal 等^[9]提出了以贴金属量最大为目标函数的回采顺序优化模型; Kumral^[4,6]基于启发式和混合整数规划法提出了以净现值最大为目标函数的数学模型; Nehring^[3]提出了新的优化矿山短期生产调度和设备布置模型. 这些模型的求解结果均是在井下其他工序能很好相互衔接的基础上得到的, 然而矿山的生产开采是一个系统性工程, 井下采掘计划有其固有的特殊性和复杂性, 单一考虑矿块回采顺序最优, 难以保证井下其他工序的进度能跟得上矿块的回采顺序, 导致工序之间无法衔接而影响进度计划的实施. 因此, 一个完备的采掘计划应当包含矿山生产过程的各工序.

本文综合分析了无底柱分段崩落法的生产开采, 提出了一个包含采掘生产全过程的混合整数规划模型, 以每月出矿品位波动最小为目标函数. 将该模型运用于北洛河铁矿 2016 ~ 2018 年采掘计划的编制.

1 计划编制混合整数规划模型

1.1 计划编制原理

矿山在回采井下矿石之前, 需要先完成开拓、探矿、采准和切割等准备工作. 计划的目的是将这些工作在时间上按一定的先后顺序进行排列, 并尽可能使矿山企业获得最大效益. 而以无底柱分段崩落法开采的矿山井下生产开采可划分为掘进、中深孔和回采三个阶段, 掘进阶段又可分为系统工程掘进和采准掘进. 系统工程掘进主要指开拓巷道、探矿巷道以及溜井的掘进; 采准掘进是指采场进路、切割巷和切割井的掘进; 中深孔阶段是在采场内钻凿中深孔; 回采阶段包括落矿和矿石运搬等回采作业. 因此可根据各阶段开采特点和工序的回采顺序构建出混合整数规划计划模型.

1.2 混合整数规划模型

1.2.1 目标函数

在计划模型中, 选取计划期内每月出矿品位波动最小为目标函数以确保出矿品位均匀, 进而降低配矿和选矿成本, 提升企业经济效益.

$$\min \sum_{t \in T} (g_{n1} + g_{n2}). \quad (1)$$

式中: T 为时间 t 的集合; 定义 g_{n1} 和 g_{n2} 分别为 t 时期出矿品位高于和低于入选品位的偏差量, 且均取值为正.

1.2.2 决策变量

通过对无底柱分段崩落法开采过程的划分, 选取回采、中深孔、采准掘进和系统工程掘进为计划模型的二元决策变量, 并定义当一个采场或一段系统工程在 t 时期开始推进时, 取值为 1, 否则为 0.

$$H_{at} = \begin{cases} 1, & a \text{ 采场在 } t \text{ 时期开始回采;} \\ 0, & \text{其他.} \end{cases} \quad (2)$$

$$Z_{at} = \begin{cases} 1, & a \text{ 采场在 } t \text{ 时期开始中深孔;} \\ 0, & \text{其他.} \end{cases} \quad (3)$$

$$J_{at} = \begin{cases} 1, & a \text{ 采场在 } t \text{ 时期开始采准掘进;} \\ 0, & \text{其他.} \end{cases} \quad (4)$$

$$X_{lt} = \begin{cases} 1, & \text{系统工程 } l \text{ 在 } t \text{ 时期开始推进;} \\ 0, & \text{其他.} \end{cases} \quad (5)$$

1.2.3 约束条件

回采约束:

1) 逻辑约束: 计划期内 a 采场只开采一次.

$$\sum_{t \in T} H_{at} \leq 1, \quad \forall a \in A, t \in T. \quad (6)$$

式中: A 为采场 a 的集合.

2) 变量非负, 二元变量.

$$H_{at} = 1 \text{ 或 } 0, \quad \forall a \in A, t \in T. \quad (7)$$

3) 每月出矿品位约束.

$$\sum_{a \in A} \sum_{\substack{t' \in T \\ t-h_a+1 \leq t' \leq t}} g_a H_{at'} \gamma / P + g_{n2} - g_{n1} = g. \quad (8)$$

$$\forall a \in A, t \in T.$$

式中: h_a 为 a 采场回采持续时间; g 为矿石的入选品位; g_a 为 a 采场矿石平均品位; γ 为 a 采场每月采下的矿石量; P 为矿山每月采下矿石总量.

4) 分段回采设备数量约束.

$$\sum_{a \in A_v} \sum_{\substack{t' \in T \\ t-h_a+1 \leq t' \leq t}} H_{at'} \leq N_{vt}, \quad \forall v \in V, t \in T. \quad (9)$$

式中: V 为分段 v 的集合; A_v 为分段 v 内采场 a 的集合; N_{vt} 为分段 v 在 t 时期最多能容纳的回采设备数量.

5) 回采设备总量约束.

$$\sum_{a \in A} \sum_{\substack{t' \in T \\ t-h_a+1 \leq t' \leq t}} H_{at'} = N_h, \quad \forall t \in T, \quad (10)$$

式中: N_h 为回采设备总数.

6) 水平约束.

$$H_{at} \leq \sum_{\substack{t' \in T \\ t' \leq t-h_{a'}}} H_{at'}, \quad \forall a \in A, a' \in A_{at}, t \in T. \quad (11)$$

式中: A_{at} 为水平约束矩阵, 规定当采场 a' 必须优先于采场 a 回采时取值为 1, 否则为 0.

7) 垂直约束.

$$H_{at} \leq \sum_{\substack{t' \in T \\ t' \leq t-0.5ha''}} H_{at'}, \forall a \in A, a'' \in A_{av}, t \in T. \quad (12)$$

式中: A_{av} 为垂直约束矩阵,并规定当采场 a'' 必须优先于采场 a 回采时取值为1,否则为0.

8) 回采设备调度约束.

$$\sum_{v' \leq v} \sum_{a \in Av'} \sum_{\substack{t' \in T \\ t-ha+1 \leq t' \leq t}} H_{at'} \leq \sum_{v' \leq v} \sum_{a \in Av'} \sum_{\substack{t'' \in T \\ t-ha \leq t'' \leq t-1}} H_{at''}, \quad \forall t \in T, v \in V, \quad (13)$$

中深孔约束:

1) 逻辑约束:计划周期内 a 采场中深孔只钻凿一次.

$$\sum_{t \in T} Z_{at} \leq 1, \forall a \in A, t \in T. \quad (14)$$

2) 变量非负,二元变量.

$$Z_{at} = 1 \text{ 或 } 0, \forall a \in A, t \in T. \quad (15)$$

3) 采场内中深孔超前回采约束.

$$H_{at} \leq \sum_{\substack{t' \in T \\ t' \leq t-Z_a}} Z_{at'}, \forall a \in A, t \in T. \quad (16)$$

式中: Z_a 为 a 采场钻进中深孔的时长.

4) 中深孔设备数量约束.

$$\sum_{a \in A} \sum_{\substack{t' \in T \\ t-Z_a+1 \leq t' \leq t}} Z_{at'} = N_z, \forall t \in T. \quad (17)$$

式中: N_z 为中深孔设备总数.

5) 中深孔设备调度约束.

$$\sum_{v' \leq v} \sum_{a \in Av'} \sum_{\substack{t' \in T \\ t-Z_a+1 \leq t' \leq t}} Z_{at'} \leq \sum_{v' \leq v} \sum_{a \in Av'} \sum_{\substack{t' \in T \\ t-Z_a \leq t' \leq t-1}} Z_{at'}, \forall t \in T, v \in V. \quad (18)$$

采准掘进约束:

1) 逻辑约束:计划期内 a 采场采准掘进只掘进一次.

$$\sum_{t \in T} J_{at} \leq 1, \forall a \in A, t \in T. \quad (19)$$

2) 变量非负,二元变量.

$$J_{at} = 1 \text{ 或 } 0, \forall a \in A, t \in T. \quad (20)$$

3) 采准掘进超前中深孔约束.

$$Z_{at} \leq \sum_{\substack{t' \in T \\ t' \leq t-j_a}} J_{at'}, \forall a \in A, t \in T. \quad (21)$$

式中: j_a 为 a 采场进行采准掘进的时长.

4) 采准掘进设备数量约束.

$$\sum_{a \in A} \sum_{\substack{t' \in T \\ t-j_a+1 \leq t' \leq t}} J_{at'} = N_j, \forall t \in T. \quad (22)$$

式中: N_j 为采准掘进设备总数.

5) 采准掘进设备调度约束.

$$\sum_{v' \leq v} \sum_{a \in Av'} \sum_{\substack{t' \in T \\ t-j_a+1 \leq t' \leq t}} J_{at'} \leq$$

$$\sum_{v' \leq v} \sum_{a \in Av'} \sum_{\substack{t' \in T \\ t-j_a \leq t' \leq t-1}} J_{at'}, \forall t \in T, v \in V. \quad (23)$$

系统工程约束:

1) 逻辑约束:计划期内系统工程 l 只掘进一次.

$$\sum_{t \in T} X_{lt} \leq 1, \forall t \in T, l \in L. \quad (24)$$

式中: L 为系统工程 l 的集合.

2) 变量非负,二元变量.

$$X_{lt} = 1 \text{ 或 } 0, \forall t \in T, l \in L. \quad (25)$$

3) 系统工程超前采准掘进约束.

$$J_{at} \leq \sum_{\substack{t' \in T \\ t' \leq t-X_l}} X_{lt'}, \forall a \in A, t \in T, l \in X_{al}. \quad (26)$$

式中: x_l 为掘进系统工程 l 的时长; X_{al} 为 a 采场的采准与系统工程 l 之间的约束矩阵.当系统工程 l 优先于 a 采场的采准时取值为1,否则为0.

4) 系统工程间相互约束.

$$X_{lt} \leq \sum_{\substack{t' \in T \\ t' \leq t-X_{l'}}} X_{l't'}, \forall t \in T, l \in L, l' \in X_{ll}. \quad (27)$$

式中: X_{ll} 为系统工程之间的约束矩阵.规定当系统工程 l' 优先于 l 掘进时取值为1,否则为0.

5) 系统工程设备数量约束.

$$\sum_{l \in L} \sum_{\substack{t' \in T \\ t-X_l+1 \leq t' \leq t}} X_{lt'} = N_x, \forall t \in T. \quad (28)$$

式中: N_x 为系统的设备总数.

2 模型分析

2.1 约束条件分析

在创建的计划模型中,选取井下各生产工序在时空间上存在的相互关系为约束条件.式(8)是用于衡量 t 时期内出矿品位与入选品位之间的偏差量,所得值 g_{n1}, g_{n2} 将为目标函数的求解提供基础数据,其余约束条件可分为以下五类:

1) 逻辑约束:式(6),(14),(19),(24)限制的是每个采场和每段系统工程在计划期内不能重复开采,而式(7),(15),(20),(25)则是保证当其参与计划编制时,取值为1,否则为0.式(27)是系统工程之间的约束关系,其定义如图1所示,即按照推进方向只有当1号系统工程完成后才可以进行2号和3号的掘进,也只有当3号系统工程完成后才可以进行5号的掘进,该约束目的是防止编制的计划出现逻辑上的错误.

2) 设备数量约束:式(9)和(10)都是对回采设备数量的约束,不同之处在于式(9)限制的是同一分段内回采设备的数量,以防止回采设备在同一分段内过度集中,而式(10)限制的则是整个

矿山可用于回采作业的设备数量. 同理,式(17), (22), (28) 分别限制的是矿山用于推进中深孔、采准掘进以及系统工程掘进的设备数量.

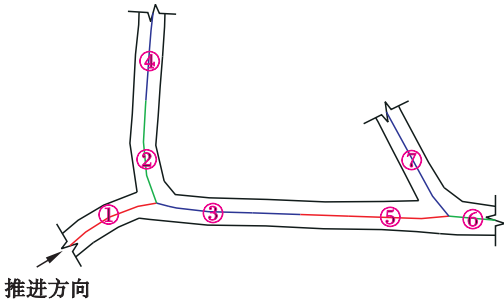


图1 系统工程之间约束关系

Fig. 1 Constraints relationship between systems engineering

3) 空间约束:由无底柱分段崩落法开采特点可知,回采中为降低矿石的损失贫化以及保证生产安全,开采采场在水平和垂直方向上均会受到一定的约束. 因此模型中分别用式(11)和式(12)对水平和垂直方向进行限制(图2),并定义水平方向上限制采场 a 开采的采场 c 和 c' 未完成时,采场 a 不能开采;垂直方向上限制采场 b 开采的采场 a 未完成其50%时,采场 b 不能开采.

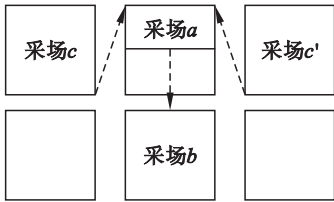


图2 采场空间约束关系

Fig. 2 Space constraints of stopes

4) 时间约束:井下各工序的开采在时间上都具有一定的逻辑性,即一个采场在开始回采时,中深孔已完成;一个采场在开始钻凿中深孔时,采准掘进已完成;一个采场在开始采准掘进时,相关的系统工程已完成. 因此模型中利用式(16), (21), (26)来保证各工序在时间上的连续性.

5) 设备调度约束:由于无底柱分段崩落法开采的矿山其分段的开采顺序为下行式,因此为避免设备出现向上调度的问题,模型中分别用式(13), (18), (23)来限制回采、中深孔、采准掘进设备的调度方向,其原理是:对于第一个分段: t 时期生产采场数之和不大于 $t-1$ 时期生产采场数之和;对于第一、二个分段: t 时期生产采场数总和不大于 $t-1$ 时期生产采场数总和;对于第一、二、三个分段: t 时期生产采场数总和不大于 $t-1$ 时期生产采场数总和,并依此类推直至所有计划分段.

通过上述约束条件,能够很好地描述出生产开采过程中井下各工序在时空间上的相互关系,

也能够有效保证工序间的合理衔接,因此模型的约束条件是可行的、合理的和完备的.

2.2 回采顺序优化路线

通过对无底柱分段崩落法采掘生产过程及计划编制理论的研究分析,采场回采顺序优化的技术路线如图3所示.

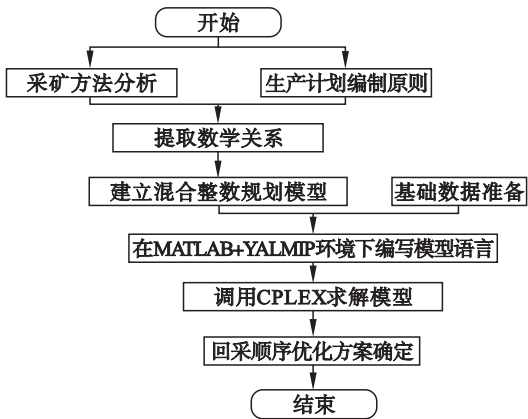


图3 回采顺序优化路线

Fig. 3 Optimization route of extraction sequence

3 工程实例

3.1 工程概况

北洛河铁矿是五矿邯郸矿业有限公司的一座大中型地下矿山. 矿床产于燕山期闪长岩与奥陶纪石灰岩接触带,为接触交代型磁铁矿床,矿物以磁铁矿、黄铁矿为主,伴有少量赤铁矿、褐铁矿、硫、钴等. 矿床埋藏深度为265~679 m,铁矿石平均品位为49.79%,入选品位为40%,设计年产量为180万t,采用无底柱分段崩落法开采.

矿山在2015年末回采、中深孔、掘进的生产现状为:回采和中深孔主要集中于-140和-155 m分段;采准掘进主要集中于-140,-155,-170 m分段;系统工程除-170 m分段剩余少量外,主要集中于-185 m分段系统工程的推进. 矿山2016年采掘计划目标为217万t铁矿石,其中主采场为181.2万t,外委矿为14.4万t,掘进带矿为21.4万t. 井下各工序设备数量及其生产能力如表1所示.

表1 设备及其生产能力				
Table 1 Equipments and production capacity				
工序名称	设备数量/台	设备型号	月产能	备注
回采	6	TORO400E	3.1万t	1台备用
中深孔	5	SIMBA	8 000 m	1台备用
采准掘进	5	YT23 型	113 m	1台备用
系统工程	2	7655 型	135 m	-

3.2 数据准备

现利用创建的计划模型编制矿山 2016 ~ 2018 年的采掘计划,预计参与回采的采场有 -140, -155, -170, -185, -200 m 分段,共 56 个采场,计划周期为 36 个月,即

$$A = [1, 2, \dots, 56], A_v = \begin{bmatrix} 5, 6, \dots, 11 \\ 1, 2, \dots, 11 \\ 1, 2, \dots, 13 \\ 1, 2, \dots, 14 \\ 1, 2, \dots, 11 \end{bmatrix}, T = [1, 2, \dots, 36].$$

a 采场矿石的平均品位 $g_a = [0.44, 0.47, \dots, 0.35]$, 矿石入选品位 $g = 0.40$. 系统工程以一个周期内系统工程的推进长度进行量化,可得 $L = [1, 2, \dots, 46], x_i = [1, 1, \dots, 1]$, 而中深孔和采准掘进均以采场为单元进行量化,所以采场各工序剩余工作量的持续时间 $h_a = [1, 8, \dots, 4], Z_a = [0, 0, \dots, 3], j_a = [0, 0, \dots, 4]$. 回采过程中一个采场只配备 1 台回采设备,因此采场每月采下的矿石量为 1 台回采设备的生产能力,即 $\gamma = 3.1$ 万 t, 矿山每月采下矿石总量等于所有回采设备生产能力的总和, $P = 15.5$ 万 t. 分段 v 在 t 时期最多能容纳的回采设备数 $N_{vt} = 3$, 由表 1 可知,每月用于回采、中深孔、采准掘进的设备数量分别为 5 台、4 台、4 台,即 $N_h = 5, N_z = 4, N_j = 4$, 用于掘进系统工程的设备在矿山实际运用中有时为 1 台,有时为 2 台,因此有 $1 \leq N_x \leq 2$. 根据水平约束、垂直约束、采场与系统工程间约束以及系统工程之间相互约束的定义并查分段平面图可知:

$$A_{al} = \begin{bmatrix} \alpha_{1,1} & \dots & \alpha_{1,56} \\ \vdots & & \vdots \\ \alpha_{56,1} & \dots & \alpha_{56,56} \end{bmatrix}, A_{av} = \begin{bmatrix} \beta_{1,1} & \dots & \beta_{1,56} \\ \vdots & & \vdots \\ \beta_{56,1} & \dots & \beta_{56,56} \end{bmatrix},$$
$$X_{al} = \begin{bmatrix} \varepsilon_{1,1} & \dots & \varepsilon_{1,46} \\ \vdots & & \vdots \\ \varepsilon_{56,1} & \dots & \varepsilon_{56,46} \end{bmatrix}, X_{ll} = \begin{bmatrix} \varphi_{1,1} & \dots & \varphi_{1,46} \\ \vdots & & \vdots \\ \varphi_{46,1} & \dots & \varphi_{46,46} \end{bmatrix}.$$

其中: $\alpha, \beta, \varepsilon, \varphi$ 取值为 1 或 0.

3.3 模型求解

在 MATLAB + YALMIP 环境中编写完模型语言后,调用 CPLEX 求解器求解. 计算机为: Windows7 操作系统, Intel(R) i5 处理器, 4 GB 内存. 软件版本为: MATLAB2014, CPLEX12.5.1, YALMIP2013. 模型求解时长 8 095 s, 变量个数为 7 704, 约束个数为 21 306, 月最大品位偏差量为 0.035, 目标函数值为 0.267. 采场回采顺序 H_{at} 如表 2 所示.

表 2 采场回采顺序 H_{at} 求解结果

Table 2 Results of stopes extraction sequence H_{at}

采场 a	时间/月									
	1	2	3	4	...	33	34	35	36	
-140 m5#	1	0	0	0	...	0	0	0	0	
-140 m6#	1	0	0	0	...	0	0	0	0	
-140 m7#	0	0	0	0	...	0	0	0	0	
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	
-200 m9#	0	0	0	0	...	0	0	0	0	
-200 m10#	0	0	0	0	...	0	0	0	0	
-200 m11#	0	0	0	0	...	0	0	0	0	

根据 H_{at} 的求解结果以及各采场的回采持续时长,可编制出北洛河铁矿 2016 ~ 2018 年采场回采网络衔接甘特图,如图 4 所示.

图 4 中,红、绿、黄、蓝、紫色分别代表 5 台回采设备的调度情况,可知首采地段分别为 -140 m 分段的 5 号、6 号、8 号采场以及 -155 m 分段的 1 号、4 号采场,设备调度方向均为自上而下,且在任何时间 t 内都有 5 台设备在回采作业,计划周期内没有出现设备闲置的问题.

3.4 结果对比分析

设备参数和生产能力将混合整数规划模型求得的每月出矿品位偏差量 g_{n1} 和 g_{n2} 值与手动编制的品位偏差量进行对比,并用折线图表示出来,其结果如图 5 所示. 再根据每月出矿品位,便可求得北洛河铁矿计划期内的年回收金属量(图 6).

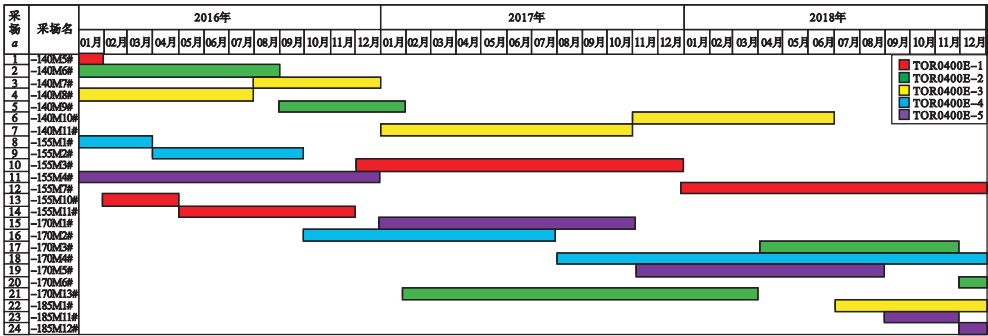


图 4 回采网络衔接甘特图

Fig. 4 Gantt chart of stopes extraction sequence

注:图中只展示了计划期内参与开采的采场,未参与开采的采场未加以显示.

由图 5 可知,当采用手动编制进度计划时,出矿品位整体波动很大,在前两年内,出矿品位均高于入选品位,且上向偏差在 2% 左右,到第三年时,全年采出矿石的品位又整体低于入选品位,下向偏差也基本维持在 1%。而利用混合整数规划模型编制的采掘计划,前期 7 个月品位偏差较大,后期基本稳定在入选品位 40% 上下小范围波动,出现品位偏差较大的原因主要与 2015 年底备采矿量有关,因备采矿量品位固定,且需优先回采后才能回采新生成的备采采场,另外从前期回采持续时间来看,7 个月时长能很好地与铁矿山备采储量保有期相呼应。图 6 为两种不同方法在回采计划期内金属量的回收情况,可知两种方法均能满足矿山年产生金属量的要求。

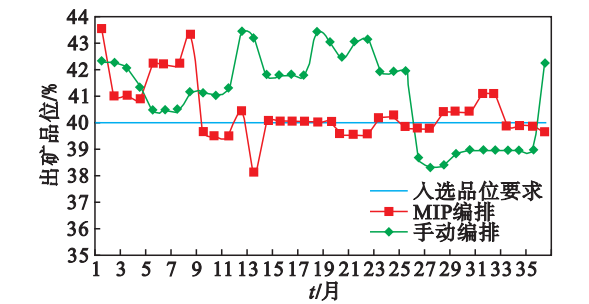


图 5 品位波动图
Fig. 5 Grade fluctuations chart

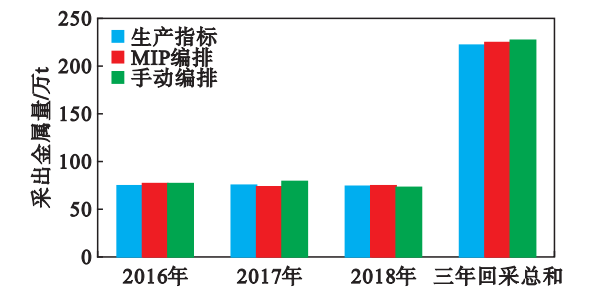


图 6 回收金属量
Fig. 6 Quantity of metal recovered

综合图 5 和图 6 的计算结果,可分别计算出两种方法在品位和金属量上偏差量的期望与标准差,结果如表 3 所示。通过数据对比可知,利用混合整数规划模型编制的采掘计划出矿品位更均衡,计划编制时间更短,因此利用混合整数规划模型编制的采掘计划较手动编制计划更优。

表 3 偏差量的期望与标准差

编制方法	Table 3 Expectation and standard deviation of deviations %			
	品位		金属量	
	期望	标准差	期望	标准差
手动编制	1. 09	1. 61	16. 96	24. 88
MIP 编制	0. 42	1. 08	6. 54	16. 76

4 结 论

1) 提出了一种编制无底柱分段崩落法采掘计划的混合整数规划模型。在总结前人研究成果的基础上,综合考虑生产开采的全过程,巧妙地将工序间存在的相互关系融入到模型中,最后通过求解模型得到矿山的采掘计划。

2) 模型充分考虑了生产开采的全过程,有效避免了计划在实施过程中工序之间难以合理衔接的问题,使编制出来的生产计划可执行性更强。

3) 将模型运用于北洛河铁矿采掘计划编制的试验结果表明,利用混合整数规划模型编制矿山的采掘计划比手动编制计划月出矿品位和金属量波动小,且计划编制时间短、强度小、准确度高,因此编制结果更能满足矿山的生产需求。

参考文献:

[1] 贾明涛,潘长良,谢学斌. 深井矿山回采过程模拟及调控研究[J]. 湘潭矿业学院学报,2003,18(3):9-12.
(Jia Ming-tao, Pan Chang-liang, Xie Xue-bin. The simulation and control of the exploitation processes in a deeper deposit [J]. Journal of Xiangtan Mining Institute, 2003, 18 (3): 9-12.)

[2] 云庆夏,高文炜,陈永锋,等. 优化地下采掘进度计划的进化算法[J]. 金属矿山,2002,31(4):11-13.
(Yun Qing-xia, Gao Wen-wei, Chen Yong-feng, et al. Evolutionary algorithm for optimizing the underground mining scheduling [J]. Metal Mine, 2002, 31 (4): 11-13.)

[3] Nehring E T P K. Dynamic short term production scheduling and machine allocation in underground mining using mathematical programming [J]. Mining Technology, 2010, 119 (4): 212-220.

[4] Kumral M. Production planning of mines; optimisation of block sequencing and destination [J]. International Journal of Mining, Reclamation and Environment, 2012, 26 (2): 93-103.

[5] Yashar P, Hooman A, Dwayne D T. A multi-step approach for block-cave production scheduling optimization [J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2013, 23(5): 739-750.

[6] Kumral M. Multi-period mine planning with multi-process routes [J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2013, 23(3): 317-321.

[7] Topal M. Implementing a production schedule at LKAB's Kiruna mine [J]. Interfaces, 2004, 34(2): 124-134.

[8] Martinez M A, Newman A M. A solution approach for optimizing long- and short-term production scheduling at LKAB's Kiruna mine [J]. European Journal of Operational Research, 2011, 211(1): 184-197.

[9] Dónal O, Sullivan A N. Optimization-based heuristics for underground mine scheduling [J]. European Journal of Operational Research, 2015, 241(3): 248-259.