

地下金属矿山采掘作业计划优化模型

李国清¹⁾✉, 李 宝¹⁾, 胡乃联¹⁾, 侯 杰¹⁾, 修国林^{1 2)}

1) 北京科技大学土木与资源工程学院, 北京 100083 2) 山东黄金集团有限公司, 济南 250100

✉通信作者, E-mail: qqlee@ustb.edu.cn

摘 要 为了实现地下金属矿山采掘作业计划编制的实时准确与科学有效性, 针对矿山作业地点分散、生产组织复杂、矿石质量难以控制等特征, 构建了基于0-1整数规划的作业计划优化模型。通过分析开采技术经济指标及空间逻辑关系, 以最小品位偏差为目标, 将产量均衡、出矿能力以及品位高低结合开采等转化为约束条件, 考虑各采场作业工序、回采顺序、生产能力以及其他生产要素等, 运用计算机技术和整数规划方法, 得出地下矿山采掘作业计划最优方案。以国内某大型金矿为案例进行了模型的有效性验证, 解算出矿山最优的采掘作业计划, 并得出作业计划甘特图。结果表明, 模型能够指导完成生产作业任务, 且满足作业计划连续性和均衡性要求。

关键词 地下金属矿山; 作业计划; 整数规划; 计划优化

分类号 TD80-9

Optimization model of mining operation scheduling for underground metal mines

LI Guo-qing¹⁾✉, LI Bao¹⁾, HU Nai-lian¹⁾, HOU Jie¹⁾, XIU Guo-lin^{1 2)}

1) School of Civil and Resources Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China

2) Shandong Gold Group Co. Ltd., Jinan 250100, China

✉Corresponding author, E-mail: qqlee@ustb.edu.cn

ABSTRACT To realize the accurate and scientific optimization of mining production scheduling for underground metal mines, a mathematic model based on 0-1 integer programming was constructed in view of the characteristics of mining process, such as decentralized production sites, complex production organization and difficulty in controlling the quality of the ore. After the requirements of economic index and spatial sequence relationship being analyzed, an optimization model was proposed which constrained by the yield balance, ore-drawing capacity and combination of high and low grade, aiming at the minimum grade deviation. The optimal mining schedule for underground mines was obtained by computer technology and integer programming to meet the operating procedure, mining sequence, production capacity and other factors. The optimization model was verified by a case in a large gold mine. The optimal solution, expressed by the Gantt chart, indicates that the model is not only meaningful to guide the completion of production tasks in underground mine operation scheduling, but also meets the requirements of continuity and equilibrium of operation scheduling.

KEY WORDS underground metal mines; operation scheduling; integer programming; schedule optimization

矿山采掘作业计划是矿山生产和质量管理的重要环节, 主要以年度及月度计划为基础依据, 用于指导日常的生产经营活动, 完成作业任务, 保证对原矿石质量、产量的控制, 实现资源的优化利用和设备的有效调度分配。矿山生产过程工艺流程复杂, 受矿山生产作

业场所的动态性和生产单元间的时空性等制约, 地下金属矿山采掘作业计划是一个有较大复杂性与难度的系统, 其决策直接影响矿山是否能够持续、稳定均衡生产。现代矿山生产管理要求作业计划编制必须满足精细化、准确化、快速制定以及能够实时反馈调整等需

收稿日期: 2016-10-10

基金项目: 国家“十二五”科技支撑计划资助项目(2012BAB01B04); 国家自然科学基金资助项目(71573012)

求,但是作业计划涉及许多复杂工序与作业单元,传统的车间—工段长—班组长的作业管理模式下,作业计划排产、生产组织调配等环节强烈依赖于人工经验,生产的随意性强,这必然无法满足矿山高强度、大规模、高效率开采的要求。

随着优化理论、决策分析以及运筹学等在矿山中的广泛应用,国内外学者对矿山作业计划优化模型与方法进行了深入研究,并成功应用于矿山实际^[1-2]。其中较为成熟的方法是基于规划论,运用线性规划、非线性规划、动态规划等构建计划优化模型,但运算复杂,适用于模型规模较小的作业计划优化问题^[3-6]。由于现代管理理论的引入,出现了网络计划、制造资源计划、准时生产方式、最优化生产技术和约束理论等生产计划与控制的研究方法^[7-9]。其中,网络计划技术考虑到了许多工序之间的衔接关系,得到普遍运用并取得成功,但存在忽略资源约束关系、工序工期估计过长等问题。利用计算机模拟的研究方法,采用遗传算法、蚁群算法等智能优化理论方法,能够综合考虑约束条件,实现控制和调度的目的,但智能算法存在一定局限性,易陷入局部最优解,无法保证得到全局最优解^[10-17]。

矿山企业一般采用线性规划等对生产作业计划进行编制优化,但由于生产条件复杂,作业过程中限制因素较多,给实际作业计划的编制带来很多困难^[18-19]。在构建模型时,往往由于单一目标约束的不确定性,导致对生产作业过程的接续性以及空间约束等问题处理比较复杂。本文利用0-1整数规划方法,以最小品位偏差为目标,综合考虑开采约束条件、作业地点动态性、作业过程连续性以及生产单元间的时空相互制约关系,建立系统优化模型,并对模型求解、实例验证从而解决问题。

1 作业计划优化的问题分析

1.1 作业计划编制的业务边界

矿山生产作业计划是企业的具体执行计划,详细规定了生产单位在具体时期内的生产任务,具有计划期短、计划单位小、计划内容详细等特点。生产作业计划指导日常生产活动,通过计划安排与调度,保证各工序环节相互协调和衔接,组织均衡生产。矿山生产作业计划编制主要分为采出矿计划编制、掘进计划编制、充填计划编制、提运计划编制、选矿指标计划编制以及生产计划汇总等^[18]。本文主要针对矿山生产车间采出矿作业计划进行优化研究。矿山生产单位根据年度、季度生产计划及具体要求,结合本矿山实际生产情况,分解出生产作业任务,经过对生产任务指标、作业能力、采场相关信息以及作业设备等情况分析,制定出指导矿山实际生产的采出矿作业计划,确定作业采场位置、采场出矿量以及出矿品位等,具体生产作业计划业

务流程如图1所示。

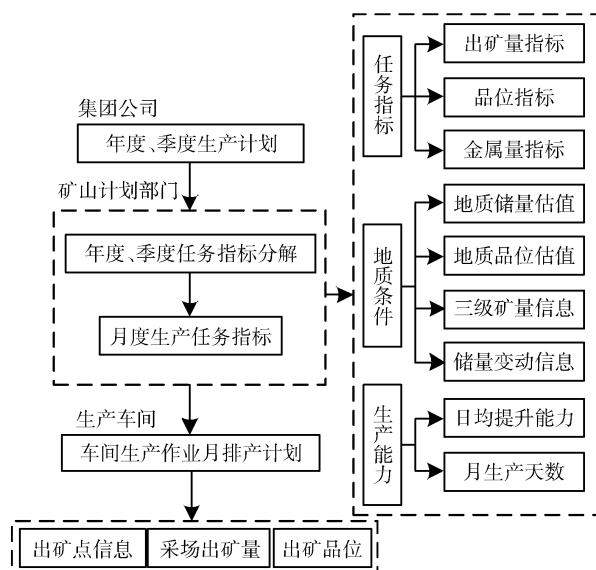


图1 生产作业计划流程

Fig. 1 Flow chart of production scheduling

作业计划编制必须满足采矿方法、开采时空顺序以及安全高效等方面的要求,还要综合考虑作业空间、设备数量与能力以及不同水平或同一水平的出矿量比例。本文在研究矿山采出矿作业计划编制规划的基础上,对月生产任务指标进行工作分解,参考当前采场资源相关信息、采出矿能力以及施工单位的生产能力等影响因素进行作业采场的选择,并制定出作业采场的采场出矿量、出矿品位及出矿金属量等指标的进度计划,完成采出矿作业计划优化。

1.2 计划编制的基本原则

地下矿山开采由于地质条件、采矿方法、生产工艺等差异很大,生产作业工序繁多,采场施工过程中所涉及到的设备、人员、能源等数量较多而且组织关系复杂,使得矿山生产作业计划编制变得非常困难,也为建立一个统一精确的优化模型造成极大的难度。地下矿山生产作业计划大多抽象成配矿或排产问题进行研究,优化调整采区各出矿点或采场出矿量,实现出矿品位的稳定。

地下金属矿山采掘作业计划编制基本原则如下:

(1) 平衡生产能力。矿山随着开采深度不断加深,采用不同的采矿方法,每个采场的作业方式不同,采场的出矿能力不同,完成任务的时间将会受到影响,而且人员、设备、开采顺序以及资源约束等严重影响采掘进度计划,容易导致工期延误、出矿量不达标等情况。在制定计划时必须考虑矿山任务与生产能力的平衡,保证各工序工期按时完成。

(2) 遵循合理的开采顺序,平衡采掘工作面。实际矿山每天的作业地点分布在不同中段的各个采场,并且工作面也是不断移动变化。一个矿块或者一个分

段回采结束后,就必须转移到其他作业地点重新进行分配作业,这给生产作业的调度安排、劳动组织增加了难度,因此必须制定合理开采顺序,有效分配资源。

(3) 坚持大小、贫富兼采,保证出矿品位均衡。矿山企业最终目标是获取最大利润,每天的出矿量以及出矿品位等都制约着企业的经济效益,生产作业计划不仅要完成出矿数量的要求,同时还要兼顾矿石质量控制。

矿山采掘作业计划编制过程中,要注意多方面的均衡,作业过程的各个环节是相互制约、相互依存的,不仅在数量和质量上有一定的比例关系,而且在时间以及空间上也有一定的顺序关系,矿山部门必须根据自身生产能力以及各采场实际情况制定切实可行的回采、出矿计划。

2 优化模型构建

地下矿山开采顺序十分复杂,矿山多个中段同时开采,每个中段细分为几个分段,各分段最终划分矿块进行回采。在作业计划内,时常出现对于不同水平采区或同一水平不同采场进行出矿,而实际出矿相互影响的采场不能太多,否则会给生产管理带来诸多困难。为建立优化数学模型,做出如下假设:假设在作业计划内,各采场连续开采,只有上、下两个水平中段出矿相互影响,各中段按照一定出矿比例由上至下进行开采。

传统的作业计划编制需要考虑开拓、采准、切割、回采以及充填等,涉及到许多繁杂工序,效率不高,而且应用到作业计划中的实际效果不佳^[20]。在构建模型时,需将采场状态简化抽象成决策变量,正在回采的采场及相应指标作为模型中已知条件,分析各个工序之间相应的时序逻辑关系,满足各采场开采连续接替性的要求,后一天优化模型分析要根据前一天优化结果进行约束调整,保证作业过程中工序衔接连续有效,同时还要考虑设备移动、资源量以及开采安全等影响因素。

2.1 目标函数

模型的构建要满足两个方面:一方面对于各个采场,其品位分布不均,在实际开采中必须坚持贫富兼采的原则,合理的搭配矿石,使得高品位和低品位资源都能得到充分利用;另一方面通过对各采场出矿能力的分析,使得日出矿量能够达到计划要求。

以决定采区某采场是否开采为变量,表示为 x_i ,其中下标 i 表示第 i 个采场,且 $i=1, 2, 3, \dots$; 各采场出矿品位表示为 p_i ($\text{g} \cdot \text{t}^{-1}$); 各采场生产能力表示为 A_i ($\text{t} \cdot \text{d}^{-1}$); 月计划出矿品位表示为 P ($\text{g} \cdot \text{t}^{-1}$); 当月具备回采条件的采场总数表示为 n ; 依据上述条件建立目标函数如下:

$$\text{Min}f(x) = \left| \frac{\sum_{i=1}^n p_i A_i x_i}{\sum_{i=1}^n A_i x_i} - P \right|. \quad (1)$$

模型目标函数属于非线性整数规划,可以将品位偏差转化为金属量偏差,最后借助数学软件工具进行求解。即目标函数简化为:

$$\text{Min}f(x) = \left| \sum_{i=1}^n p_i A_i x_i - P \sum_{i=1}^n A_i x_i \right|. \quad (2)$$

2.2 约束条件

在建立 0-1 整数规划模型时需要考虑诸多约束条件的限制,约束条件的选择要反映出矿山采掘实际作业的要求,约束条件涉及的变量应能够充分反映矿山采掘实际作业过程中的主要参数。本文主要根据生产技术指标以及生产单元间的空间关系,建立约束条件数学表达式。

(1) 作业计划内矿石产量上、下限约束。根据年计划或季度计划制定的月计划,必须满足每天矿石产量指标,建立数学表达式为:

$$K_{\min} A \leq \sum_{i=1}^n A_i x_i \leq K_{\max} C. \quad (3)$$

式中 K_{\min} 、 K_{\max} 为计划内规定日产量的上、下限系数,考虑到正常生产时矿山每天出矿量波动范围不大,取 $K_{\max} = 1$,下限系数根据实际经验取 $K_{\min} = 0.95$, C 为日矿石产量指标。

(2) 日出矿能力上、下限约束。采场作业空间或装载运输设备决定各中段的出矿能力,也制约着日出矿上限。模型不考虑提升设备的提升能力。一方面为提高装载运输设备的利用效率,避免矿石堆积的现象,另一方面考虑设备数量分配、运转能力上限等,根据出矿设备类型与出矿点关系,建立约束条件。

$$k_z L_z N_{zH} \leq \sum_{i \in H} A_i x_i \leq L_z N_{zH}, H=1, 2, \dots, \quad (4)$$

$$k_t L_t N_{tH} \leq \sum_{i \in H} A_i x_i \leq L_t N_{tH}, H=1, 2, \dots, \quad (5)$$

式中 L_z 为每天装矿设备的最大装载能力, H 为矿山可供开采中段数, N_{zH} 为第 H 中段的装载设备数量, L_t 为每天运输设备的最大运载能力, N_{tH} 为第 H 中段的装载设备数量, k_z 为铲斗装满系数,一般取 $0.8 \sim 0.9$, k_t 为运输载重利用系数,一般取 $0.8 \sim 1.0$, k_z 、 k_t 系数与矿岩块度、容重、铲装设备、操作条件等有关。

(3) 计划开采矿量较多采场优先考虑,以防止矿量积压和矿房过多引起管理困难。根据矿山实际情况,若某采场需要的开采时间超过当月正常工作天数的一半,就需要限制其提前进入开采计划。

$$x_i = 1, \text{ 满足 } \forall i \in Z = \{i | Q_i \geq d/2 \times A_i\}. \quad (6)$$

式中 Q_i 表示第 i 采场总开采矿量, d 表示当月正常工作天数, Z 表示满足条件约束的 i 集合。

(4) 品位较高与较低采场相结合优先考虑。分别

选取矿山高品位、低品位采场,进行联合开采,避免低品位采场集中在矿山后期开采。

$$x_g = a, \quad (7)$$

$$x_d = b, \quad (8)$$

$$\sum x_i \leq m. \quad (9)$$

式中 x_g 与 x_d 分别表示采区品位较高和较低采场被选择开采的个数,达到贫富兼采目的, a 与 b 值根据矿山采场实际品位分布决定, m 表示每天开采的采场上限数。

(5) 最大生产能力约束。考虑地下矿山采矿方法、开采设备能力、材料供给、人员数量及备采矿量的限制,采区日生产矿量不能超过日最大提升能力,采场日出矿量不能大于该采场剩余备采矿量。

$$\sum A_i x_i \leq k_c Q_{\max}, \quad (10)$$

$$A_i x_i \leq Q'_i. \quad (11)$$

式中 k_c 为提升富裕系数,通常指提升设备能力与矿山设计能力比值, Q_{\max} 为矿山日最大开采能力,由矿山提升能力决定, Q'_i 表示第 i 采场剩余备采矿量。

(6) 考虑上、下中段出矿比例约束。

$$\sum_{i \in H} A_i x_i = r \sum_{i \in H+1} A_i x_i, \quad H=1, 2, \dots \quad (12)$$

式中 r 为上、下中段出矿量比例。

(7) 0-1 约束。

$$x_i = 0, 1. \quad (13)$$

(8) 对于之前正在回采过程中的采场,令对应的 $x_i = 1$ 。

2.3 模型求解

通过对地下矿开采时空发展关系的分析,分时段建立作业计划优化模型^[5],有效地解决了采场开采连续性的难题,具体描述如下。

第1步:根据地下采场分布以及月计划产量和质量指标要求,划分高、低品位采场。

第2步:确定各采场 T 时段开采初始状态,对于正在开采采场,变量赋值为 1,根据采场生产能力、产量以及质量计划等指标建立一系列约束条件。

第3步:建立 T 时段的 0-1 整数规划模型,利用求解软件 LINGO 得到最优解。若有解,则转第四步;否则转第五步。

第4步:判断 T 是否为终止时段? 是,则迭代终止;否则,令 $T = T + 1$,若 $A_i > Q'_i$,则令 $x_i = 0$,转第2步。

第5步:调整模型约束参数,修改模型后再次求解,转第4步。

重复上述步骤,经过一定迭代次数后得到不同时段 T 的最优解,保证各采场回采作业工作连续,停止计算,分析结果。

运用 0-1 整数规划按时段先后顺序依次求出每天

的作业计划,具体算法流程逻辑如图 2 所示。

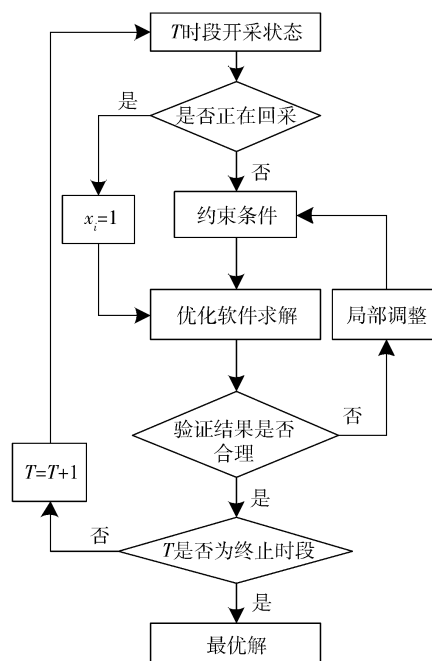


图2 模型算法流程图

Fig.2 Flow chart of the model algorithm

3 模型应用

3.1 实例应用

为了验证模型在地下矿山采掘作业计划优化应用中的可行性,以山东省某大型金矿为验证实例,该金矿矿石品位分布不均、出矿点多并且生产任务繁重,为保证出矿品位波动范围在矿山允许变化范围内,合理制定各采场出矿计划,必须对作业计划进行优化研究。目前金矿开采深度主要集中在 -465 m 中段以下,地下开采三维立体图如图 3 所示。采矿方法有点柱式上向分层充填采矿法,随着矿山开采的不断深入、矿体厚度以及矿岩稳定性条件的变化,结合生产实践,又分别采用了盘区机械化上向分层充填法、盘区机械化上向分层进路充填法。在实际生产作业过程中,采用两步骤回采方式,采场交替上升布置。

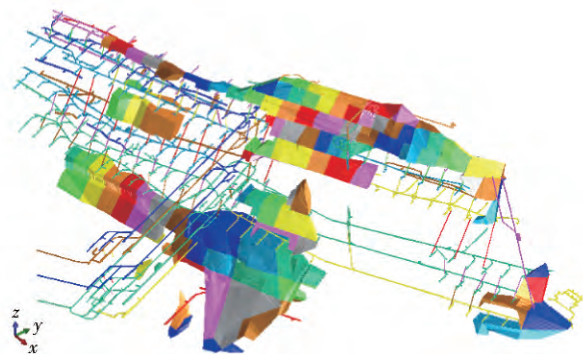


图3 地下矿山开采模型图

Fig.3 Underground mining system

矿山上级部门下达某月度生产任务指标包括出矿量、出矿品位和出矿金属量,其中计划作业天数 31 d,出矿量 72747 t,出矿品位 $1.912\text{ g}\cdot\text{t}^{-1}$,出矿金属量 139.09 kg. 矿级运营管理部通过对生产作业任务指标的分解计算,得到具体采场月出矿相关计划见表 1.

表 1 某月地下生产作业出矿计划

Table 1 Production scheduling for the underground metal mine					
中段/ m	作业采场	备采矿 量/t	品位/ ($\text{g}\cdot\text{t}^{-1}$)	出矿量/ t	采场生产能 力/($\text{t}\cdot\text{d}^{-1}$)
-420	S09166-10	1021	1.75	1010	100
	S09173-10	4610	1.81	4562	350
-465	S10216-1	1123	1.70	1111	240
	S10216-4	5600	2.06	5500	179
	S10167-5	3774	1.96	3734	155
-510	S11181-5	1123	1.73	1111	170
	S11168-12	1021	1.90	1010	150
	S11196-3	808	1.80	808	150
	S11216-8	2042	2.06	2020	353
	S12186-5	720	2.58	700	170
-555	S12149-9	715	1.90	707	150
	S12153-9	1019	2.38	1000	170
-600	S13186-8	817	2.39	808	360
	S13165-4	5159	1.77	5051	240
	S13155-5	1465	2.16	1465	360
	S13186-2	4949	2.21	4949	300
-600	S13186-6	5308	2.23	5253	360
	S13186-5	5265	2.39	5265	360
	S13186-10	3879	1.66	3838	300
	S13186-8	4593	1.68	4545	300
-645	S14160-6	1531	1.56	1515	200
	S14155-6	3981	1.68	3939	200
	S15156-4	1940	1.93	1919	100
	S15160-2	1940	1.57	1919	200
-690	S15164-2	1940	1.62	1919	179
-735	S16158-1	1633	1.69	1616	170
	S16162-1	1633	1.77	1616	170
-780	S17162-1	2323	1.69	2323	400

根据月计划采场出矿品位以及采场生产能力等,对每个采场赋予一个变量 x_i ,本月可供开采的计划采场数目为 28 个,日回采采场个数上限为 12,该矿采场相应约束参数见表 2. 其中品位约束保证高、低品位采场相互结合开采. 根据实际品位分布,各取 2 个.

在上述建立的模型和参数的基础上,利用计算机软件进行模型优化求解,可以比较方便的得到最优解

见表 3. 根据优化模型解算得到排产计划甘特图,如图 4 所示.

表 2 采场相关约束条件

Table 2 Mining field dependent constraints

采场品位	采场对应变量	品位约束
大于 $1.70\text{ g}\cdot\text{t}^{-1}$	$x_3, x_{19}, x_{20}, x_{21}, x_{22}, x_{24}, x_{25}, x_{26}, x_{28}$	选取 2 个
大于 $2.20\text{ g}\cdot\text{t}^{-1}$	$x_{10}, x_{12}, x_{13}, x_{16}, x_{17}, x_{18}$	选取 2 个

表 3 模型最优解

Table 3 Optimization result

采场 变量	第 1 天	第 2 天	第 3 天	第 4 天	...	第 29 天	第 30 天	第 31 天
x_1	0	0	0	0	...	1	1	1
x_2	0	0	0	0	...	1	1	1
x_3	1	1	1	1	...	0	0	0
\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\ddots	\vdots	\vdots	\vdots
x_{28}	1	1	1	1	...	0	0	0

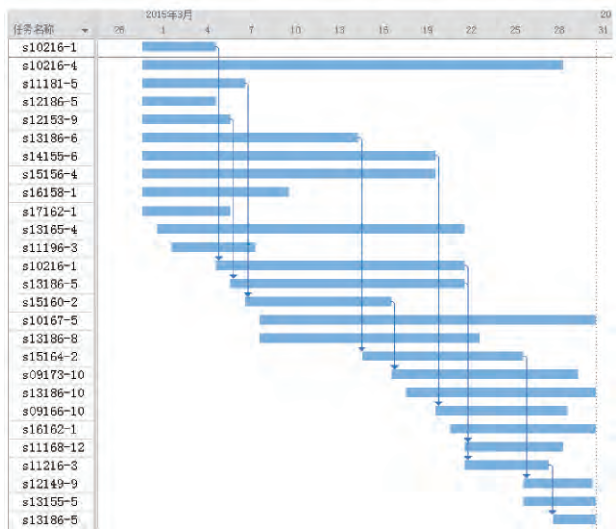


图 4 月排产作业计划甘特图

Fig. 4 Gantt chart of monthly production scheduling

3.2 优化结果

在满足开采技术经济指标要求和采场空间逻辑关系的基础上,得到地下生产作业计划优化结果分析如表 4. 该结果表明考虑品位最小偏差的 0-1 整数优化模型可以满足生产需求,验证了地下矿山作业计划优化模型的合理有效性.

表 4 优化结果对比分析

Table 4 Comparative analysis of optimization results

项目	出矿量/t	品位/($\text{g}\cdot\text{t}^{-1}$)	金属量/kg
任务指标	72747	1.912	139.09
优化结果	74631	1.927	143.81
结果差额	1884	0.015	4.72
超额量	2.59%	—	3.39%

对于出矿量以及出矿品位指标,采用概率、数理统计或者随机函数理论进行数值评价。波动极值表示矿石质量指标的最大值和最小值之差,能够明确指出偏离计划平均值正、负方向的范围,优化后的出矿品位变化以及出矿量变化如图5。

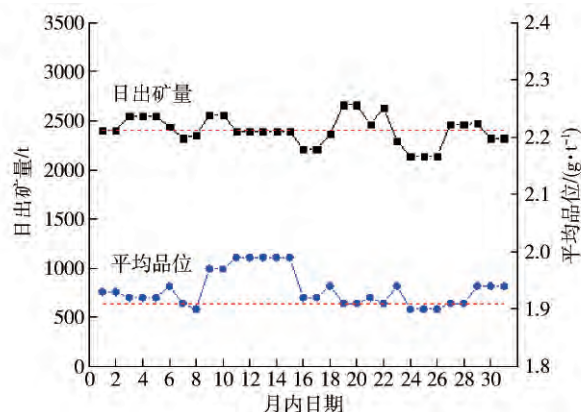


图5 优化后日出矿量与品位变化趋势

Fig. 5 Changing trend of the amount and grade of the mine for 1 d

从优化分析结果来看,该金矿出矿品位最大值为 $1.99 \text{ g} \cdot \text{t}^{-1}$,最小值 $1.90 \text{ g} \cdot \text{t}^{-1}$,波动极值 0.09 ,矿山月计划平均品位 $1.91 \text{ g} \cdot \text{t}^{-1}$,则波动范围 $1.91 (+0.08, -0.01)$,偏差分别为 $+0.08$ 和 -0.01 。经过优化后的日出矿品位波动范围不大,满足矿石质量均衡的要求,并且能够完成每天的出矿量任务,证明优化方案是切实可行的。地下矿山生产作业日出矿量稳定在 2403 t 左右,满足矿山日生产矿量需求。

3.3 效果分析

经实例应用分析,地下金属矿山采掘作业计划优化模型在实际应用中效果明显。

(1) 作业计划编制高效合理。传统的手工作业计划编制不仅工作量大,而且无法做到资源的合理分配利用,使得作业计划管理工作变得十分复杂,而引入0-1规划模型给出科学系统的定量分析,为确定采场回采顺序提供了一种很好的解决途径,使工作计划更加明细高效,对矿山资源的开采更加合理,有利于矿山整体生产作业的持续、稳定、高效。

(2) 提高矿产资源利用率。优化模型明确了作业计划中各采场的出矿量和出矿品位,综合考虑高低采场结合开采,结果证实提高了矿石品位质量,且出矿量、金属量都有明显提高,最大限度地利用了矿产资源,减少低品位资源浪费,充分地挖掘矿山资源潜力。

(3) 作业工序协调接续。模型从现场实际出发,研究分析矿质搭配与上下中段采场之间关系,科学规划生产作业计划,准确做到搭配生产,确保采场作业计划的接续性和矿石产量、品位的均衡性,避免出现矿山后期开采品位较低、矿石堆积的现象,解决了以传统经验指导矿山稳定生产和质量管理不科学的问题,在矿山

生产实践中有着很大的适用空间和应用价值。

4 结论

(1) 通过对地下金属矿山采掘作业计划模型的研究,针对地下矿作业计划的复杂性,建立了基于0-1规划模型的地下作业计划优化模型,完成细化到各个出矿点单日的生产任务分配,一方面对于各个采场,做到矿石搭配合理,保证出矿品位均衡;另一方面确保日出矿量能够达到计划要求。

(2) 0-1整数规划模型在山东某大型金矿得到有效应用,围绕日出矿品位偏差最小目标,在确定采场生产能力条件下给出相应采场出矿排产计划,确定每天回采的采场数目及地点。应用结果表明0-1整数规划模型在地下矿山采掘作业计划优化方面是可行有效的,为矿山开采更加高效、经济与合理提供了可靠依据,具有一定的科学研究价值。

参考文献

- [1] Muller G. Systems engineering research methods. *Procedia Comput Sci*, 2013, 16: 1092
- [2] Smartt C, Ferreira S. Applying systems engineering to survey research. *Procedia Comput Sci*, 2013, 16: 1102
- [3] Sun J L, Zhu M, Zhou H Z, et al. Application of linear programming in mining planning. *Ind Miner Process*, 2009(3): 18
(孙金龙,朱明,周会志,等. 线性规划在矿山生产规划中的应用. 化工矿物与加工, 2009(3): 18)
- [4] Hou J, Hu N L, Li G Q, et al. Dynamic optimization of production plans of multi-metal underground mines. *Chin J Eng*, 2016, 38(4): 453
(侯杰,胡乃联,李国清,等. 多金属地下矿山生产计划动态优化. 工程科学学报, 2016, 38(4): 453)
- [5] Sun X Y, Zhang W G, Chen Y, et al. Automatic formation of short-term plan based on the long-term plan on open-pit mine using 0-1 integer programming. *J China Coal Soc*, 2012, 37(7): 1139
(孙效玉,张维国,陈毓,等. 根据露天矿长期计划自动形成短期计划的0-1整数规划方法. 煤炭学报, 2012, 37(7): 1139)
- [6] Hu Q H. A mathematical model study on ore blending in mine production under restrictions. *Min Res Dev*, 2002, 22(6): 1
(胡清淮. 受限条件下的矿山生产配矿数模研究. 矿业研究与开发, 2002, 22(6): 1)
- [7] Qu Y N. *The Research and Design of Production Scheduling and Execution System in Workshop* [Dissertation]. Jinan: Shandong University, 2006
(屈亚宁. 车间制造计划排产与执行系统研究与设计[学位论文]. 济南: 山东大学, 2006)
- [8] Peng W Z. *Research on the Management System of Mould Production Planning based on Network Planning and Theory of Constraints* [Dissertation]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2006

- (彭卫中. 基于网络计划与约束理论的模具生产计划管理系统的研究[学位论文]. 南京: 南京航空航天大学, 2006)
- [9] Chen G S. *Evaluation on the Scheduling Algorithm based on the Technology of Network Diagram and Development of the System* [Dissertation]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2008
(陈国松. 基于网络图技术的排产算法评价及系统开发[学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2008)
- [10] Ren H B, Wang S H. Automatic adjusting method of plan of mining-excavation relay in the mine. *J Liaoning Tech Univ Nat Sci*, 2005, 24(6): 811
(任海兵, 王思华. 矿井采掘接替计划自动调整方法. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2005, 24(6): 811)
- [11] Jiang G A, Liu B G, Li X H. Markov decision programming and optimization of mining planning. *J Shandong Univ Sci Technol Nat Sci*, 2001, 20(1): 20
(蒋国安, 刘帮国, 李兴华. 马尔可夫决策规划与采掘计划优化. 山东科技大学学报(自然科学版), 2001, 20(1): 20)
- [12] Li J T, Yang R J. Research on critical chain multi-project scheduling optimization. *Comput Integr Manuf Syst*, 2013, 19(3): 631
(李俊亭, 杨睿娟. 关键链多项目进度计划. 计算机集成制造系统, 2013, 19(3): 631)
- [13] Hu N L, Li Y, Li G Q, et al. Optimization of open-pit-mining operational planning by using a particle swarm algorithm. *J Univ Sci Technol Beijing*, 2013, 35(4): 537
(胡乃联, 李勇, 李国清, 等. 用粒子群算法优化编制露天矿生产作业计划. 北京科技大学学报, 2013, 35(4): 537)
- [14] Yao X L, Hu N L, Zhou L H, et al. Ore blending of underground mines based on an immune clone selection optimization algorithm. *J Univ Sci Technol Beijing*, 2011, 33(5): 526
(姚旭龙, 胡乃联, 周立辉, 等. 基于免疫克隆选择优化算法的地下矿山配矿. 北京科技大学学报, 2011, 33(5): 526)
- [15] Wu H, Ni Z W, Wang H Y. MapReduce-based ant colony optimization. *Comput Integr Manuf Syst*, 2012, 18(7): 1503
(吴昊, 倪志伟, 王会颖. 基于 MapReduce 的蚁群算法. 计算机集成制造系统, 2012, 18(7): 1503)
- [16] Song D L, Zhang J. Batch scheduling problem of hybrid flow shop based on ant colony algorithm. *Comput Integr Manuf Syst*, 2013, 19(7): 1640
(宋代立, 张洁. 蚁群算法求解混合流水车间分批调度问题. 计算机集成制造系统, 2013, 19(7): 1640)
- [17] Liu Y, Ma L, Xu Q Y. Solving multi-objective 0-1 programming by cellular ant algorithm. *Syst Eng*, 2009, 27(2): 119
(刘勇, 马良, 许秋艳. 多目标 0-1 规划问题的元胞蚁群优化算法. 系统工程, 2009, 27(2): 119)
- [18] Zhao C Q, Wang H W, Wang H Y. Application of program model in the short period production plan in gold mine. *Nonferrous Mines*, 2003, 32(5): 11
(赵传卿, 王华伟, 王洪岩. 规划模型在黄金矿山短期生产作业计划的应用. 有色矿山, 2003, 32(5): 11)
- [19] Wang L J. Compilation and management of mining technical plan. *Gold*, 1990, 11(9): 50
(王利江. 矿山采掘技术计划的编制和管理. 黄金, 1990, 11(9): 50)
- [20] Nehring M, Topal E, Little J. A new mathematical programming model for production schedule optimization in underground mining operations. *J S Afr Inst Min Metall*, 2010, 110(8): 437