

## 露天矿山燃油卡车实时调度算法研究

雷志勇

国家能源集团陕西神延煤炭有限责任公司 陕西榆林

**【摘要】**运输作为智慧矿山生产过程中的纽带环节发挥着举足轻重的作用，运输成本占露天矿总成本的 50%~65%，燃料消耗占总能耗的 60%~72%。运输效果一方面取决于运输主要载体——卡车的质量，如运行的可靠性，智能化程度等，另一方面取决于矿卡作业的调度算法。致力于提高矿卡作业调度效果，助力实现矿山智能化和可持续化，本文主要对矿卡作业的调度算法展开研究。针对矿卡作业实时调度算法模型研究较少的情况，将卡车调度分为重车调度和空车调度，主要考虑车流规划、运输成本和卡车运行效率等影响矿山生产的因素，为了验证调度模型的效果，通过 MATLAB 软件仿真，利用遗传算法求解一个班次内的调度结果与最大卡车法、最早装卸法和车流规划法比较来评价调度算法优劣。对比各调度方案效果指标，本文调度方案目标函数中考虑运输成本后，相较于最大卡车法和车流规划法，每吨矿物运输成本有效降低，并且在车流规划耦合度，运输能力方面表现突出。

**【关键词】**露天矿山；燃油卡车；实时调度；遗传算法

**【基金项目】**国家重点研发计划（2021YFB2501800）

**【收稿日期】**2024 年 8 月 12 日      **【出刊日期】**2024 年 9 月 27 日      **【DOI】**10.12208/j.jer.20240033

### Research on real-time scheduling algorithm for open-pit mine trucks

Zhiyong Lei

China Energy Group, Shanxi Shenyan Coal Co., Ltd, Yulin, Shanxi

**【Abstract】**Transportation plays a crucial role as a link in the production process of smart mines, with transportation costs accounting for 50% to 65% of the total cost of open-pit mines and fuel consumption accounting for 60% to 72% of the total energy consumption. The transportation effect depends on the quality of the main carrier of transportation - trucks, such as the reliability and intelligence of operation, and on the scheduling algorithm of mining truck operations. Dedicated to improving the scheduling efficiency of mining truck operations and helping to achieve intelligent and sustainable mining, this article mainly conducts research on scheduling algorithms for mining truck operations. In response to the lack of research on real-time scheduling algorithm models for mining truck operations, truck scheduling is divided into heavy truck scheduling and empty truck scheduling, mainly considering factors that affect mining production such as traffic flow planning, transportation costs, and truck operating efficiency. In order to verify the effectiveness of the scheduling model, MATLAB software simulation is used to solve the scheduling results within a shift using genetic algorithm and the maximum truck method. Compare the earliest loading and unloading method with the vehicle flow planning method to evaluate the superiority and inferiority of scheduling algorithms. Comparing the performance indicators of various scheduling schemes, considering transportation costs in the objective function of this article's scheduling scheme, compared to the maximum truck method and traffic flow planning method, the transportation cost per ton of minerals is effectively reduced, and it performs outstandingly in the coupling degree of traffic flow planning, transportation capacity.

**【Keywords】**Open pit mines; Fuel trucks; Real time scheduling; Genetic algorithm

\*通讯作者：雷志勇（1974-）男，中国矿业大学硕士研究生，高级工程师，主要从事矿山方面的研究。

## 前言

我国的矿山资源丰富,有超过十多万处的矿山,种类有 160 多种<sup>[1]</sup>。依据《中国矿产资源报告》,我国矿山行业投资连续增加,已经超过 12000 亿元,但是也伴随着问题有待解决。在露天矿山生产经营中,卡车运输成本占露天矿运营总成本的 50%~65%,矿卡燃料消耗占总能耗的 60%~72%<sup>[1-3]</sup>,因此,矿卡调度管理系统显得十分必要。

美国 Modular 公司在 20 世纪 80 年代开发出了 DISPATCH 矿卡调度系统<sup>[4]</sup>,显著提高了矿山产量,调度模型具备了路径优化、控制矿石品位等功能。DISPATCH 矿卡调度系统通过与 GPS 结合得到进一步升级,能够快速、高精度获取矿卡位置信息,全天候监控矿山资源的运动状态,为调度决策提供了准确、全面的数据信息。

此后,Elbrond<sup>[5]</sup>等人利用启发式规则,基于最小化矿卡和电铲等待时间方差,使用混合整数、非线性规划的组合建立运输模型。Askari-Nasab<sup>[6]</sup>提出两阶段决策模型,分为生产优化阶段和实时调度阶段,上阶段确定矿山内各个路径的最优流量,下阶段以最优流量为基础,结合矿卡、道路等因素动态调度矿卡,原理如图 1 所示。Afrapoli<sup>[7]</sup>等人开发了两段线性规划模型,在上阶段中,通过最小化总材料处理成本,使电铲的挖掘速率最大化,然后确定路径最优流量,对于下阶段矿卡调度问题的模型在文献中是有限的,需要考虑到矿山实际生产中的诸多限制条件。

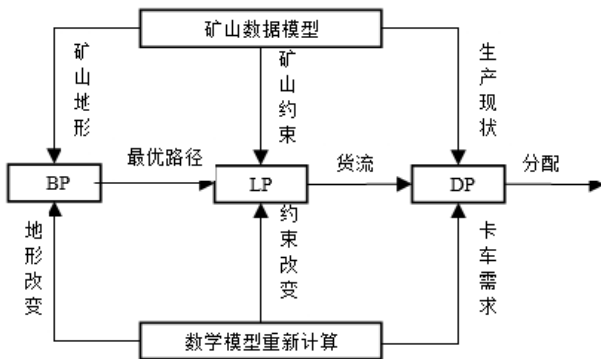


图 1 两阶段法原理

露天矿山车辆调度模型和求解方法持续优化,但是研究多集中于最佳车流方面,矿卡实时调度方面的研究较少,且集中于求解方法的优化上,如改进遗传算法和蚁群算法等<sup>[1,4,8,9]</sup>。相关的调度模型目

标单一,未能考虑到矿山多目标,多约束的特点。

本文采用的调度方案为多阶段调度方式,主要研究内容为根据上阶段结果,综合考虑生产效率、运输成本、车流规划的完成度等因素,对矿卡进行多目标函数实时调度模型的建立,给出矿卡调度的最佳路径。然后,通过进行仿真和模型求解,并对结果做出对比分析。

## 1 矿卡实时调度方案的确定

### 1.1 矿卡调度原则

大多数实时调度模型以矿卡前往装载点为主要考虑环节,忽略了装,运,卸的整体循环。因此,以矿卡工作过程为研究对象,矿卡在整个循环中主要分为两种状态——满载和空载,根据矿卡装载情况,将调度模型分为重车调度和空车调度,重车调度负责在运输途中满载矿卡的分配,空车调度负责在运输途中空载矿卡的分配,车辆状态在两种调度方案中切换,以寻求矿卡时调度在整个循环中的最优解,调度关系如图 2 所示。

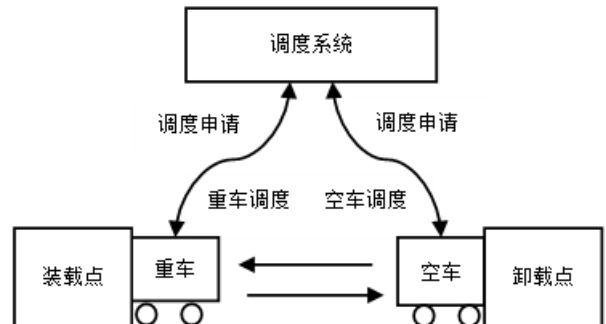


图 2 调度关系图

本模型中调度的原则如下:

原则一:减少实际生产与车流规划中的路径车流率偏差,追求矿山调度运输平衡性,平行完成上阶段要求,保证矿石品位和采剥率在误差允许范围内。

原则二:在满足生产约束的前提下,提高设备运行效率,减少等待时间和空闲时间,充分利用现有车队获得最大产量

原则三:生产任务完成的过程中,减少油耗、损耗,降低运输成本。

从三个原则可以看出,矿山调度的标准之间存在着矛盾。单个目标的调度模型显然不符合矿山实际的生产需求,所以建立多目标调度模型。通过设

置参数比例, 协调调度目标, 满足调度原则。

### 1.2 符号规定

为了更好的对矿山运行做出描述, 现对模型中重要节点符号做出如表 1 的规定及说明。

表 1 符号规定及说明

| 符号  | 意义说明                                       |
|-----|--------------------------------------------|
| $i$ | 卸载点的编号, 表示第 $i$ 号卸载点, $i = 1, 2, \dots, I$ |
| $j$ | 装载点的编号, 表示第 $j$ 号装载点, $j = 1, 2, \dots, J$ |
| $k$ | 矿卡的编号, 表示第 $k$ 辆矿卡, $k = 1, 2, \dots, K$   |

### 1.3 重车实时调度模型

重车调度采用多目标实时调度模型, 目标函数包含最小化路径车流率误差、最小化运输成本、最小化矿卡等待时间, 是一个多目标组合优化问题, 目标函数如下:

$$F(s) = \min[F_1(s), F_2(s), F_3(s)] \quad (1)$$

#### 1.3.1 最小化路径车流率误差

最小化路径车流率误差是从矿卡的角度来贴近上阶段规划, 实际生产与车流规划中的误差用欠车时间来表示, 则

$$F_1(s) = -\sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^I O_{ji} x_{kji} \quad (2)$$

式中:  $x_{kji}$  为 0~1 型决策变量;  $O_{ji}$  为路径  $ji$  的欠车时间 (h)。

路径  $ji$  的欠车时间  $O_{ji}$  的计算公式为:

$$O_{ji} = T_{now} - (T_{ji} + \frac{C_{ji}}{P_{ji}}) \quad (3)$$

式中:  $T_{now}$  为当前时刻;  $T_{ji}$  为装载点  $j$  到卸载点  $i$  路径中上一次的派车时刻;  $C_{ji}$  为装载点  $j$  到卸载点  $i$  路径中上一辆矿卡容量 (t);  $P_{ji}$  为装载点  $j$  到卸载点  $i$  路径中的最佳车流率 (t/h)。

#### 1.3.2 最小化矿卡等待时间

等待时间的计算公式为:

$$F_2(s) = \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^I W_{kji} x_{kji} \quad (4)$$

式中:  $W_{kji}$  为矿卡  $k$  从装载点  $j$  前往卸载点  $i$  的等待时间 (h)。

对以装载点  $i$  为目的地的准备装载矿卡预测到

达时间, 计算公式为:

$$T_{ki} = T_{now} + T_{krb} + T_{zk} + \frac{D_{ji}}{V_{k1}} \quad (5)$$

式中:  $T_{ki}$  为装备装载矿卡  $k$  预计到达卸载点  $i$  的时刻;  $T_{krb}$  为剩余准备时间 (h);  $T_{zk}$  为矿卡  $k$  预计装载时间 (h);  $D_{ji}$  为路径  $ji$  的最佳行驶距离 (km);  $V_{k1}$  为矿卡  $k$  重车平均行驶速度 (km/h)。

对以卸载点  $i$  为目的地的正在装载矿卡预测到达时间, 计算公式为:

$$T_{k'i} = T_{now} + T_{k'ij} + \frac{D_{ji}}{V_{k'1}} \quad (6)$$

式中:  $T_{k'i}$  为正在装载矿卡  $k'$  预计到达卸载点  $i$  的时刻;  $T_{k'ij}$  为矿卡  $k'$  剩余装载时间 (h);  $D_{ji}$  为路径  $ji$  的最佳行驶距离 (km);  $V_{k'1}$  为矿卡  $k'$  重车平均行驶速度 (km/h)。

对以卸载点  $i$  为目的地的在途矿卡预测到达时间, 计算公式为:

$$T_{k''i} = T_{now} + \frac{D_{k''i}}{V_{k''1}} \quad (7)$$

式中:  $T_{k''i}$  为行驶途中矿卡  $k''$  预计到达卸载点  $i$  的时刻;  $D_{k''i}$  为矿卡  $k''$  剩余行驶路程 (km);  $V_{k''1}$  为矿卡  $k''$  重车平均行驶速度 (km/h)。

对于在卸载点  $i$  正在卸载矿卡取实际到达时间  $T_{k''i}$ 。

将上述以卸载点  $i$  为目的地的矿卡的到达时间组成集合  $\{T_{ki}, T_{k'i}, T_{k''i}, T_{k''i}\}$ , 并根据时间由小到大进行排序组成新的时间集合,  $\{T_1, T_2, \dots, T_g, \dots\}$ , 对于同时到达的车辆按车辆编号由小到大排队, 待调度的矿卡预计到达时间为  $T_g$ 。卸载点规则: 卸载点同时时间内, 只能服务一辆矿卡。因此, 卸载点服务正在卸载矿卡时, 后面车辆都需要排队等待。依据新时间集合  $\{T_1, T_2, \dots, T_g, \dots\}$ , 等待时间为  $\{W_1, W_2, \dots, W_g, \dots\}$ , 当中  $W_g$  为待调度矿卡的预计等待时间  $W_{kji} = W_g$ , 是运输调度方案中的调度目标之一。

由实际调度意义可知, 等待时间集合中各等待时间分别为:

$$W_1 = 0 \quad (8)$$

$$W_2 = \max(T_1 + T_{x1} - T_2, 0) \quad (9)$$

$$W_3 = \max(T_2 + W_2 + T_{x2} - T_2, 0) \quad (10)$$

由此递推, 不难发现

$$W_g = \max(T_{g-1} + W_{g-1} + T_{xg-1} - T_g, 0) \quad (11)$$

式中,  $T_{xg-1}$  为矿卡的卸载所用时间 (h);  $T_{g-1}$  为矿卡预计到达时刻。

卸载所用时间  $T_{xg-1}$  计算方法为:

$$T_{xg-1} = \frac{C_{g-1}}{V_i} \quad (12)$$

式中,  $C_{g-1}$  为矿卡的载重量 (t);  $V_i$  为卸载点  $i$  处的卸载速度 (t/h)。

### 1.3.3 最小化运输成本

本模型中运输环节包含装、卸载点的等待过程, 计算公式如下:

$$F_3(s) = \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^I M_{kji} x_{kji} \quad (13)$$

式中,  $M_{kji}$  为矿卡  $k$  从装载点  $j$  到卸载点  $i$  的调度成本 (元)。

运输成本  $M_{kji}$  的计算公式为:

$$M_{kji} = M_{ky} + M_{km} \quad (14)$$

式中,  $M_{ky}$  为重车运输油耗成本 (元);  $M_{km}$  为重车运输损耗成本 (包含故障维修成本) (元)。

重车运输油耗成本  $M_{ky}$  由正常行驶油耗成本和怠速油耗成本两部分组成, 计算公式为:

$$M_{ky} = D_{ji} \times Q_{k1} \times Y + (T_b + T_{zk} + W_{ki}) \times Q_{k3} \times Y \quad (15)$$

式中,  $D_{ji}$  为路径  $ji$  的最佳行驶距离 (km);  $Q_{k1}$  为矿卡  $k$  重车行驶单位距离的油耗 (L/km);  $Y$  为燃油单价 (元/L);  $T_b$  为准备装载时间 (h);  $T_{zk}$  为矿卡  $k$  的预计装载时间 (h);  $W_{ki}$  为矿卡  $k$  预计等待时间 (h);  $Q_{k3}$  为矿卡  $k$  怠速单位时间油耗 (L/h)。

重车运输损耗成本的计算公式为:

$$M_{km} = (T_{0kj} - T_{0ki}) \times C_{k1} \quad (16)$$

式中,  $T_{0kj}$  为矿卡  $k$  进入下一步空车调度的时刻 (在卸载点处的等待时间为 0 时刻);  $T_{0ki}$  为矿卡  $k$  进入重车调度时刻 (在装载点的等待时间为 0 时刻);  $C_{k1}$  为矿卡  $k$  重车行驶单位时间的设备损耗成本 (元/h)。

### 1.3.4 目标函数整合与约束条件

重车调度模型中, 采用的三种目标函数的量纲各不相同, 为了消除这类影响, 对目标函数进行常用的 min-max 归一化处理, 具体公式如下:

$$\bar{F} = \frac{F - F_{\min}}{F_{\max} - F_{\min}} \quad (17)$$

$$F(s) = \min(f_1 \bar{F}_1 + f_2 \bar{F}_2 + f_3 \bar{F}_3) \quad (18)$$

式中,  $f_1, f_2, f_3$  为欠车时间, 等待时间, 运输成本在目标函数中所占权重, 均为非负数且  $f_1 + f_2 + f_3 = 1$ 。

重车调度中的约束条件:

(1) 对于任意一辆矿卡只存在两种调度情况: 去往卸载点或者不去, 用公式表示为:

$$x_{kji} \in \{0, 1\}, \forall k \in K, \forall j \in J, \forall i \in I \quad (19)$$

(2) 同一辆矿卡在同一时间只能从一个装载点  $j$  去往一个卸载点  $i$ , 用公式表示为:

$$\sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^I x_{kji} = 1, \forall k \in K \quad (20)$$

(3) 所有在重车调度中的矿卡数量不会超过总矿卡数, 用公式表示为:

$$\sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^I x_{kji} \leq K \quad (21)$$

(4) 在一次重车调度中, 同一装载点最多只能有一辆矿卡被调度到卸载点, 不能同时调度两辆及以上, 用公式表示为:

$$\sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^I x_{kji} \leq 1, \forall j \in J \quad (22)$$

(5) 矿卡剩余油量不能低于最低要求, 用公式表示为:

$$E_{rk} - \sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^I Q_{sji} x_{kji} \geq E_{\min}, \forall k \in K \quad (23)$$

式中,  $E_{rk}$  为矿卡  $k$  上一次调度剩余油量 (L);  $Q_{sji}$  为从装载点  $j$  前往卸载点  $i$  预计消耗油量 (L);  $E_{\min}$  为油箱最低保持油量 (L)。

(6) 对于从装载点  $j$  出发去往卸载点  $i$  的矿卡  $k$ , 若三者任意一项出现故障, 则从调度中删除, 直至维修成功, 用公式表示为:

$$\sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^I x_{kji} = 0, \exists k \in K' \quad (24)$$

$$\sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^I x_{kji} = 0, \exists j \in J' \quad (25)$$

$$\sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^J x_{kji} = 0, \exists i \in I' \quad (26)$$

#### 1.4 空车矿卡调度模型

空车实时调度采用多目标实时调度模型, 目标函数由最小化矿卡等待时间、最小化矿卡行驶成本和减少电铲任务完成度差异三者组成, 多目标组合优化模型目标函数如下:

$$F'(s) = \min[F_4(s), F_5(s), F_6(s)] \quad (27)$$

其中, 重点介绍最小化电铲任务完成度差异, 其他指标与重车调度类似。

##### 1.4.1 最小化电铲任务完成度差异

电铲任务完成度是从电铲角度对车流规划的执行情况的衡量, 缩小电铲任务完成度差异一方面能够保持各电铲工作进度相似, 矿山生产调度协调稳定, 另一方面严格遵守车流规划指派的任务, 其计算公式如下:

$$F_6(s) = \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^I H_j x_{kji} \quad (28)$$

式中,  $H_j$  为装载点  $j$  处的任务完成度。

任务完成度  $H_j$  计算公式如下:

$$H_j = \frac{P'_j}{P_j} \quad (29)$$

式中,  $P'_j$  为电铲  $j$  已经完成的装载量 (t);  $P_j$  为电铲  $j$  一个班次的目标产量 (t)。

电铲  $j$  的目标产量  $P_j$  计算公式如下:

$$P_j = \sum_{i=1}^I P_{ji} T \quad (30)$$

式中,  $P_{ji}$  为车流规划中路径  $ij$  的最佳流率 (t/h);  $T$  为一个班次的工作时间 (h)。

## 2 调度模型仿真

求解模型最优解或近似最优解的方法主要有: 精确算法、启发式算法和改进启发式算法。

在实时调度问题中, 随着实时调度问题的复杂化, 例如装、卸载点的增加, 矿卡数量的增加以及多目标调度问题, 可行解的数量呈几何级数的增长, 带入数值计算量和比较量相应激增, 从而导致大量

的时间和资源消耗, 最后甚至得不到解, 缺乏快速性, 时效性。

在工业生产过程中, 求解模型的最优解大多数情况下难以实现, 且需要花费大量的时间和费用。相较最优解带来的效益, 找到近似最优解更有实际工程意义。

启发式算法旨在寻求目标函数的近似最优解, 通过寻找一种能够产生可行解的规则, 逼近最优解, 但因每个模型产生可行解的规则不同, 构造出的算法也不一样, 因而启发式算法的缺点在于不具备通用性, 难以保证精确度。

改进的启发式算法主要有遗传算法、蚁群算法、模拟退火算法等。遗传算法借鉴物竞天择, 优胜劣汰的生物演化法则, 进行全局优化搜索, 选择种群中部分适应度高的个体配对遗传, 进行下一代竞争。此外, 个体有一定概率的变异, 避免陷入局部最优解的情况。

### 2.1 调度模型参数设置及问题分析

#### 2.1.1 调度模型参数设置

参考某金属矿山设置调度参数如表 2 所示。

各装、卸载点间的最短距离如表 3 所示。

表 2 矿卡实时调度参数

| 相关参数 | 含义及取值              |
|------|--------------------|
| $K$  | 矿卡数量, 20 辆         |
| $J$  | 装载点数量, 6 个         |
| $I$  | 卸载点数量 (包含停车点), 4 个 |
| $C$  | 矿卡装载能力, 50t        |
| $T$  | 一个班次的总时间, 8h       |

表 3 装、卸载点间最短距离

|       | 停车点  | 卸载点 1 | 卸载点 2 | 卸载点 3 |
|-------|------|-------|-------|-------|
| 装载点 1 | 2.32 | 2.47  | 3.77  | 2.54  |
| 装载点 2 | 3.02 | 1.51  | 2.56  | 2.12  |
| 装载点 3 | 1.98 | 1.83  | 2.80  | 2.20  |
| 装载点 4 | 3.21 | 0.91  | 1.08  | 1.76  |
| 装载点 5 | 2.44 | 1.62  | 2.93  | 1.64  |
| 装载点 6 | 2.30 | 1.52  | 2.21  | 1.45  |

#### 2.1.2 调度问题分析

在本文的调度模型中, 第一次调度即矿卡由停车点去往装载点, 该过程停车点 20 辆矿卡需要同时

调度，每辆矿卡有 6 条路径可供选择。因此有  $6^{20}$  种路径选择方法，调度路径的选择数量非常庞大，使用精确算法耗时长，消耗资源多，且运行计算得到结果困难，不易实现。因此采用遗传算法进行全局优化搜索，寻找最优解。第一次调度完成后，同一时间点，一个装、卸载点最多只能派出一辆矿卡。因此，对于重车调度，最多有 6 辆矿卡同时需求调度，且每辆矿卡有 3 种可能去向，即说明重车调度最多存在 729 种调度方案。对于第一次之后的空车调度，同一时间最多有 3 辆矿卡需求调度，而每辆矿卡有 6 种可能选择的路径，即说明空车调度最多存在 216 种方案。在枚举法的适用范围内，能够快速计算得到结果。

3 仿真结果分析

3.1 调度方案效果分析

3.1.1 车流规划耦合度

每条路径与车流规划的耦合度用每条路径重车调度次数与车流规划中重车调度次数的比值来表示，计算公式如下：

路径耦合度 =  $\frac{\text{实际重车调度次数}}{\text{车流规划重车调度次数}}$  (31)

通过公式 (31) 可以计算得出本文方案中各路径与车流规划的耦合度，如表 4 所示。

表 4 本调度方案与车流规划耦合度

|       | 停车点 | 卸载点 1  | 卸载点 2  | 卸载点 3  |
|-------|-----|--------|--------|--------|
| 装载点 1 | /   | 71.43% | 52.63% | 70.00% |
| 装载点 2 | /   | 60.61% | 61.54% | 61.11% |
| 装载点 3 | /   | 44.12% | 55.56% | 46.67% |
| 装载点 4 | /   | 56.52% | 54.17% | 54.17% |
| 装载点 5 | /   | 73.68% | 52.63% | 75.00% |

表 5 各方案整体耦合度

|          | 本文方案   | 最大卡车法  | 最早装卸法  | 车流规划法  |
|----------|--------|--------|--------|--------|
| 平均耦合度    | 58.93% | 51.38% | 52.14% | 59.18% |
| 整体耦合度标准差 | 8.74%  | 74.72% | 75.83% | 13.54% |

表 6 运输能力

|        | 本文方案  | 最大卡车法 | 最早装卸法 | 车流规划法 |
|--------|-------|-------|-------|-------|
| 重车调度车次 | 234   | 203   | 234   | 227   |
| 空车调度车次 | 248   | 214   | 248   | 238   |
| 运输总量/t | 11700 | 10150 | 11700 | 11350 |

|       |   |        |        |        |
|-------|---|--------|--------|--------|
| 装载点 6 | / | 58.33% | 50.00% | 62.50% |
|-------|---|--------|--------|--------|

根据表 4 数据计算除停车点外各条路径平均耦合度为 58.93%，最后利用求出的平均耦合度计算耦合度标准差来表示整体耦合度离散程度，计算公式如下：

整体耦合度标准差 =  $\sqrt{\frac{\sum(\text{各路径耦合度}-\text{平均耦合度})^2}{\text{路径总数}}}$  (32)

最终计算得到本文调度方案的整体耦合度标准差为 8.74%。

同理计算最大卡车法、最早装卸法和车流规划法，整理各方案整体耦合度标准差如所示。

根据表 5 数据信息，在整体耦合度标准差上，本文调度方案的标准差最小，效果最好，其次为车流规划法，与最大卡车法和最早装卸法相差较大，超过了 60%。总体重车调度车次相差不大，但是本调度方案和车流规划法与车流规划匹配度较高，各条路径车流分布均匀，在一定程度上能够满足上阶段要求，而最大卡车法和最早装卸法，未能达到车流规划预期效果，车流过分集中于某些道路，有较高出现矿石品位和交通拥堵等问题的风险。

3.1.2 运输能力分析

本文中用每小时运输矿物的量及运输速率来表示各方案运输能力，具体数值如表 6 所示。

通过表 6 可以看出，在一个班次 8 小时的工作循环内，本文调度方案和最早装卸法的生产调度运输能力最强，达到 1462.50 (t/h)，最大卡车法的生产调度运输能力最弱，每小时少运输约 200t 矿物。

3.1.3 运输成本分析

运输成本用每吨矿物的运输费用作为衡量指标，具体数值如表 7 所示。

|            |         |         |         |         |
|------------|---------|---------|---------|---------|
| 运输速率/(t/h) | 1462.50 | 1268.75 | 1462.50 | 1418.75 |
|------------|---------|---------|---------|---------|

表 7 运输成本

|                |        |        |        |        |
|----------------|--------|--------|--------|--------|
|                | 本文方案   | 最大卡车法  | 最早装卸法  | 车流规划法  |
| 重车运输成本/元       | 27518  | 26395  | 23508  | 27671  |
| 空车行驶成本/元       | 10015  | 8700   | 9853   | 10325  |
| 总成本/元          | 37533  | 35095  | 33361  | 37996  |
| 运输总量/t         | 11700  | 10150  | 11700  | 11350  |
| 每吨矿物运输成本/(元/t) | 3.2079 | 3.4576 | 2.8514 | 3.3477 |

表 8 电铲任务完成度

|       |        |        |        |        |
|-------|--------|--------|--------|--------|
|       | 本文方案   | 最大卡车法  | 最早装卸法  | 车流规划法  |
| 电铲 1  | 68.33% | 60.00% | 68.33% | 61.67% |
| 电铲 2  | 65.63% | 54.69% | 65.63% | 60.94% |
| 电铲 3  | 62.28% | 53.38% | 62.28% | 60.79% |
| 电铲 4  | 57.75% | 49.30% | 56.34% | 60.56% |
| 电铲 5  | 70.69% | 62.07% | 70.69% | 62.07% |
| 电铲 6  | 60.29% | 52.94% | 61.76% | 61.76% |
| 平均完成度 | 64.16% | 55.40% | 64.17% | 61.30% |
| 标准差   | 4.51%  | 4.35%  | 4.70%  | 0.56%  |

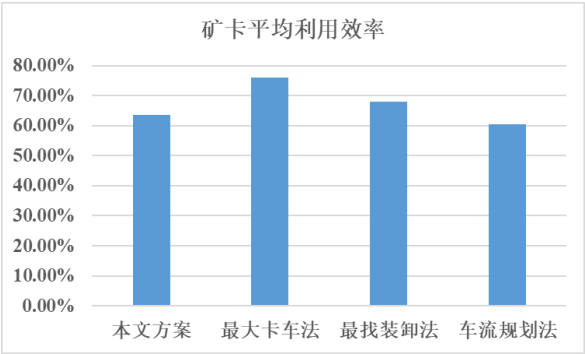


图 3 矿卡利用效率图

从表 7 可以看出，一个班次的调度内，最早装车法的运输成本最低，约为 2.85（元/t），且运输总量最大，其次为本文调度方案约为 3.21（元/t），最大卡车法的运输成本最高。

3.1.4 矿山调度运输任务完成平衡性分析

在矿山调度运输中，每个班次给电铲分配一定的矿物量作为任务，因此评价任务完成平衡性，主要根据电铲任务完成度。将算法仿真求解结果进行整理和计算，得到各方案电铲任务完成度及相关数据如表 8 所示。

根据表 8 的数据可以看出，各方案中车流规划

法中的电铲任务完成度标准差最小，为 0.56%，说明各电铲的任务完成进度很相近，任务进行程度几乎呈现出等比例推进的趋势。剩余三种方法电铲任务完成度标准差均在 4.5%左右，电铲任务完成度最大差值超过 12%。

3.1.5 卡车利用效率分析

减少设备的非工作时间，提高其利用效率，在一定程度上能够提高矿山调度运输效率，提高矿山产量。在露天矿山生产经营中，设备效率分析针对矿卡和电铲展开。其中，设备的利用效率计算公式如下：

$$\text{设备利用效率} = \frac{\text{一个班次时间} - \text{设备非工作时间}}{\text{一个班次时间}} \quad (33)$$

各方案矿卡利用率结果如图 3 所示。

根据图 3 矿卡平均利用率可以看出, 最大卡车法矿卡利用效率最高, 显著减少了矿卡等待时间, 比其他方案高出 8%~15%, 达到了最大卡车法的效果, 车流规划法中矿卡利用率最低, 在一定程度上

说明, 车流规划法为了实现车流规划结果, 考虑矿山生产均衡, 牺牲了部分矿卡利用效率。

### 3.1.6 调度效果总体分析与评价

将车流规划耦合度, 运输能力, 运输成本, 矿山调度运输任务完成平衡性和设备利用效率五个方面的评价指标及其相关参数汇总, 如表 9 所示。

表 9 调度效果指标参数

|                | 本文调度方案  | 最大卡车法   | 最早装卸法   | 车流规划法   |
|----------------|---------|---------|---------|---------|
| 车流规划耦合度标准差     | 8.74%   | 74.72%  | 75.83%  | 13.54%  |
| 平均运输速率/(t/h)   | 1462.50 | 1268.75 | 1462.50 | 1418.75 |
| 每吨矿物运输成本/(元/t) | 3.2079  | 3.4576  | 2.8514  | 3.3477  |
| 电铲任务完成度标准差     | 4.51%   | 4.35%   | 4.70%   | 0.56%   |
| 矿卡平均利用率        | 63.52%  | 75.97%  | 67.88%  | 60.48%  |

最大卡车法中, 矿卡的运输能力最低, 意味着虽然减少了矿卡等待时间, 最早装卸法未考虑车流规划结果和矿山生产平衡性, 在这两方面表现很差, 在实际调度中很难被采纳。车流规划法的优势体现在车流规划耦合度和电铲任务完成度平衡性上, 但选择性降低了设备利用效率。

本文调度方案在此次配置的矿山中, 车流规划耦合度, 运输能力方面表现突出, 均为最佳。相较于单纯考虑等待时间的最大卡车法和只考虑车流规划结果的车流规划法, 目标函数中考虑运输成本后, 运输成本出现了降低。

## 4 结论

本文从露天矿山矿卡调度背景和发展意义出发, 矿卡作业调度系统算法中的实时调度过程展开研究, 建立了矿卡作业实时调度模型, 包含重车调度, 空车调度以及约束条件。然后设置矿山相关参数, 根据调度情况选择合适的求解算法并应用仿真求解模型, 最后根据仿真结果, 分析各方案调度效果。本文调度方案在车流规划耦合度, 运输能力评价指标均为最优, 运输成本次优, 证明了本文调度方案优异性。

## 参考文献

[1] 韩磊.基于卡调实时调度方式提升露天矿设备作业效率[J].露天采矿技术,2021,36(02):44-47.

[2] HANLei. Improving the working efficiency of equipment based on real-time dispatching way of truck dispatching system in open-pit mine[J]. Opencast Mining Technology, 2021,36(02):44-47.

[3] Zhang S, Lu C, Jiang S, et al. An unmanned intelligent transportation scheduling system for open-pit mine vehicles based on 5G and big data[J]. IEEE Access, 2020, 8: 135524-135539.

[4] Afrapoli A M, Tabesh M, Askari-Nasab H. A Transportation Problem-Based Stochastic Integer Programming Model to Dispatch Surface Mining Trucks under Uncertainty[C]. Proceedings of the 27th International Symposium on Mine Planning and Equipment Selection-MPES 2018. Springer, Cham, 2019: 255-264.

[5] 赵波,高宇,王梓羽.露天矿重车调度的最早卸车法[J].矿山机械,2020,48(07):22-25.

[6] ZHAO Bo, GAO Yu, WANG Ziyu.Earliest dumping method for loaded-truck scheduling in strip mine[J].Mining&Processing Equipment ,2020,48(07):22-25.

[7] Patarawan Chaowasakoo et al. Digitalization of mine operations: Scenarios to benefit in real-time truck dispatching[J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2017, 27(2) : 229-236.

[8] Moradi Afrapoli and Askari-Nasab. Mining fleet management systems: a review of models and algorithms[J].



- International Journal of Mining, Reclamation and Environment, 2019, 33(1) : 42-60.
- [9] Ali Moradi Afrapoli and Mohammad Tabesh and Hooman Askari-Nasab. A multiple objective transportation problem approach to dynamic truck dispatching in surface mines[J]. European Journal of Operational Research, 2019, 276(1): 331-342.
- [10] Burak Ozdemir and Mustafa Kumral. Simulation-based optimization of truck-shovel material handling systems in multi-pit surface mines[J]. Simulation Modelling Practice and Theory, 2019, 95 : 36-48.
- [11] Ali Moradi Afrapoli and Mohammad Tabesh and Hooman Askari-Nasab. A stochastic hybrid simulation-optimization approach towards haul fleet sizing in surface mines[J]. Mining Technology, 2019, 128(1) : 9-20