

# 炼钢车间多天车动态调度仿真方案

李 稷, 徐安军

(北京科技大学 冶金与生态工程学院, 北京 100083)

**摘 要:** 针对炼钢车间多天车动态调度问题,提出了一种滚动调度策略下的仿真调度方案.模型目标函数考虑了最小化天车调度与工序调度在时间节奏上的偏离度,同时考虑了最小化天车工作量及其差异;约束条件在遵守天车避让约束的同时,考虑了工位容量约束和重调度各种初始条件对天车调度的约束.模型以基于仿真的启发式方法求解.以某炼钢车间双天车调度为实例进行了仿真实验.实验结果表明,该天车调度方案能够维护工序调度稳定,减少和均匀天车工作量.滚动调度策略下,提出的启发式方法所得解的优化性能最高能达到最优解的96.3%.提出的滚动调度策略下的启发式方法相比于现场采用的实时规则调度方法,调度优化性能提高26.4%.

**关 键 词:** 天车调度;仿真;启发式方法;炼钢-连铸;滚动调度

**中图分类号:** TP 391.9      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1005-3026(2020)12-1699-09

## Simulation-based Solution for Multi-crane Dynamic Scheduling in Steelmaking Shop

LI Ji, XU An-jun

(School of Metallurgical and Ecological Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China. Corresponding author: XU An-jun, E-mail: anjunxu@126.com)

**Abstract:** A simulation-based solution under the rolling scheduling strategy was provided for a multi-crane scheduling problem deriving from the steelmaking shop. The objective function of the model is to minimize the temporal deviation of the crane scheduling from the process scheduling and the workloads of the cranes. The constraints feature the non-interference constraints between cranes, the station capacity constraint and the constraints caused by varied initial conditions. The model was solved by a simulation-based heuristic. The simulation experiments were conducted based on a twin-crane scheduling instance in a steelmaking shop. The results show that the crane scheduling solution can maintain the stability of the production schedule. In addition, it can also balance and reduce the workloads of the cranes. In the rolling scheduling strategy, the solution obtained by the proposed heuristic method can reach, at most, 96.3% of the optimal one in optimization performance. Compared with the real-time rule scheduling method employed in the production field, the optimization performance was improved by 26.4% with the proposed heuristic method under the rolling scheduling strategy.

**Key words:** crane scheduling; simulation; heuristic method; steelmaking - continuous casting; rolling scheduling

天车是炼钢车间钢包在各个工序间周转的主要运输工具.天车调度须服务于工序调度,良好的天车调度是工序调度稳定进行的有力保证.同时,天车调度受制于工序调度且天车调度具有更高的时间精度要求,生产工序上分钟级别的扰动可能

造成天车调度结果的改变.目前炼钢车间中,频繁的动态调度是天车调度的必然选择.

图1给出了某钢厂钢水精炼跨天车调度环境的平面图.钢包的物流过程可由图中步骤①~④描述:钢包从转炉(工序1)盛接钢水,钢包车将钢

包从转炉位运输至吊包位(步骤①);天车将钢包从吊包位吊起,运输至某精炼(工序 2)工位对应的落包位,并将钢包放置于对应的钢包车上(步骤②);钢包车将钢包运输至精炼位处理(步骤③);处理结束后运输至下一跨(步骤④).天车的运输任务(步骤②)即是将钢包从一个工序运输至下一工序.另外,由于双精炼工艺的存在(钢水需要在两个精炼工位处理),钢包还可能从某精炼工位运输至另一精炼工位.

安装在同一轨道( $X$ 轴)的天车相互之间不能跨越且必须保持安全距离,称之为避碰约束,这是天车调度区别于其他机器调度的基本特征约束.同时,工位容量约束要求一个工位最多容纳一个钢包.最后,频繁的天车重调度必然面临不同的调度初始条件(不同的天车、任务、工位的初始状态),从而对天车调度形成约束.

由于天车调度环境物理布局以及天车运行方式的不同,天车调度问题有不同的解决方案.目前国内外对天车调度的研究主要集中于集装箱口岸桥和场堆龙门吊的调度.文献[1-2]对近年来该问题的研究进行了整体分析.岸桥在执行任务时,主体静止在任务 $X$ 轴对应位置,沿着 $Y$ 轴方向装卸货物.本文称这类天车为 $Y$ 轴作业天车. $Y$ 轴作业天车将任务定义为在货物位置对货物的操作.受其影响,许多需要沿 $X$ 轴将物品从 $A$ 处运输到 $B$ 处的天车调度问题,定义了同样的任务内涵,即将物品吊起和落下的操作分别定义为一个任务.这种任务定义方式能公式化推导避碰约束下任务的开始、结束时刻,适用于非仿真方法.但该定义增加了额外的求解约束,如吊起任务和落下任务需要同一辆天车连续执行.在该类任务定义下,Peterson 等<sup>[3]</sup>对某制造车间多天车调度问题建模,设计了天车最优路径方案,并利用启发式算法快速求得近优解.Cheng 等<sup>[4]</sup>对某仓库两天车调度问题建立了 MIP 模型,并用分支裁剪法求解. $X$ 轴作业天车任务的第二种定义将物品从 $A$ 点到 $B$ 点的整个运输过程作为一个任务.这种定义方式符合常规认知且能够利用简单的启发式规则快速求得近优解,但在避碰约束下推导任务开始时刻较为困难,一般采用仿真手段.王旭等<sup>[5]</sup>、高小强等<sup>[6]</sup>研究了制造车间天车调度问题.两者都设计了启发式天车分配和冲突消解规则,并利用仿真手段和改进的遗传算法进行求解;在时间目标函数方面,分别或共同考虑了最小化等待被运输时间,最小化天车对任务的响应时间和最短完工时间.Xie 等<sup>[7]</sup>对一个钢卷热处理工序的多

天车调度问题建立了 MIP 模型并用一种启发式算法求解.求解过程中,为避免起重机的干扰,规定了天车的行为规范.实验结果表明提出的启发式方法可以生成高质量的解.Hirsch 等<sup>[8]</sup>设计了某制造车间两天车的运行方案,并利用蚁群算法求解了该调度问题.周炳海等<sup>[9]</sup>提出一种全新的天车轨迹映射模型,结合传统差分进化方法,将库位分配规则和天车分配算法融合到调度算法的每一次迭代过程中以指导算法寻优.在自动化存储仓库的天车调度问题中,Kung 等<sup>[10]</sup>设计了一种启发式的天车运行方案以解决天车避碰,并提出一种基于动态规划的订单调度方法.李维刚等<sup>[11]</sup>同样设计了任务分配规则,并采用改进的 $A^*$ 算法计算天车路径,调度方案具有可靠性和高效性.

以上针对车间或仓库的天车调度研究,多以静态调度为主.其调度初始条件人为假设,无法解决动态条件下面临的任务、天车、工位各种初始状态对调度的影响;而动态调度的研究多采用实时调度策略,即每当一个任务到达时,根据任务分配规则将任务分配给某台天车.该策略具有较为严重的调度短视性.同时,以上车间天车调度研究忽略了工位容量,有可能产生不可行解.针对以上情况,本文利用滚动调度策略对炼钢车间天车调度问题进行了仿真研究.滚动调度实时对未来一小段时间内的任务进行预测,采用优化算法进行调度求解.又可以随着新任务的到来,不断进行重调度,进行快速响应.

本文首先针对任一重调度过程进行了建模.模型目标函数考虑了天车调度在时间节奏上需服从工序调度,同时考虑最小化天车工作量及其差异.约束条件在遵守天车避碰约束的同时,还考虑了工位容量约束和重调度初始条件对天车调度的约束.随后,提出了一种基于仿真的启发式方法对模型进行了求解,对图 1 所示双天车调度进行了实例分析.

## 1 问题建模

### 1.1 问题描述

本文研究的多天车动态调度问题(简称 DMCSPP)中,天车的运输任务定义为将一个钢包从起点工位运输至终点工位.其包括 3 个过程:在起点工位吊起钢包;将钢包运输至终点工位;将钢包放置于终点工位.由于每次重调度中任务数量不多且天车数量有限,故重调度方式采用完全重调度,即对所有未完成任务和新到的任务重新分

配天车.

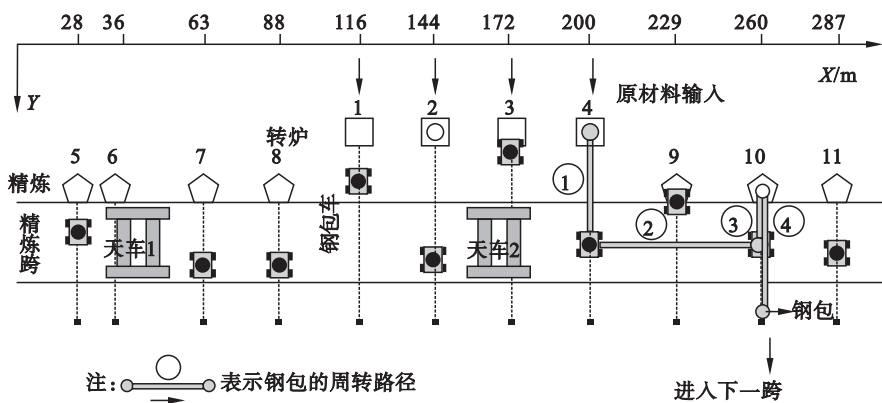


图 1 天车调度跨布局

Fig. 1 Plan sketch of the crane scheduling span

假设某次重调度过程中任务数量为  $N$ . 工位数量为  $M$ , 工位首先以工序号排序, 工序内工位从左向右排序. 故图 1 中工位 1~4 为转炉工位, 5~11 为精炼工位; 工位在  $X$  轴上的位置已在图 1 中标识. 天车数量为  $K$ , 天车从左向右排序. DMCSPP 中仅考虑天车沿  $X$  轴的移动 (沿  $Y$  轴的移动忽略, 沿高度方向的移动以固定的起吊时间和落包时间代替), 且移动速度固定. 天车避让时的优先级与其当前任务在任务排序序列中的序列号一致; 任务序列号越小, 天车优先级越高.

DMCSPP 的每次重调度可描述为: 对于  $N$  个任务,  $K$  台天车, 在遵从天车移动行为约束、工位容量约束、初始条件约束的前提下, 确定一个任务排序序列以及对应的天车分配序列作为问题解, 以最小化完成  $N$  个任务时的时间惩罚值以及对天车工作量增加和差异的惩罚值.

DMCSPP 模型涉及的数学符号如下.

$t$ , 仿真系统时间,  $t=0, 1, 2, \dots$ ;

$t_0$ , 当前重调度时刻;

$N$ , 任务数量;

$K$ , 天车数量;

$M$ , 工位数量;

$\delta$ , 天车安全距离, 天车中线之间的距离,  $\delta = 26 \text{ m}$ ;

$\Delta_{k,l}$ , 任意两天车之间的最小的安全距离,  $k, l=1, 2, \dots, K, k \neq l; \Delta_{k,l} = |k-l|\delta$ ;

$v$ , 天车移动速率,  $v=2/3 \text{ m/s}$ ;

$O_m, t_0$  时刻工位  $m$  中的钢包数量,  $m=1, 2, \dots, M; O_m=0, 1$ ;

$L_m$ , 工位  $m$  在  $X$  轴的位置,  $m=1, 2, \dots, M$ ;

$a_i, b_i$ , 任务  $i$  的起点、终点工位索引号,  $i=1, 2, \dots, N, a_i, b_i=1, 2, \dots, M$ ;

$r_i$ , 任务  $i$  的释放时刻 (到达吊包位的时刻),  $i=1, 2, \dots, N$ ;

$r'_i$ , 任务  $i$  的计划释放时刻, 从车间工序调度中获取;

$s_i, e_i$ , 任务  $i$  的开始、结束时刻,  $i=1, 2, \dots, N$ ; 如果任务  $i$  重调度时未开始,  $s_i, e_i=0$ ;

$\alpha_i, \beta_i$ , 任务  $i$  中钢包起吊、落下所需时间,  $\alpha_i=180 \text{ s}, \beta_i=240 \text{ s}$ ;

$C_i$ , 任务  $i$  所分配天车的索引号,  $i=1, 2, \dots, N, C_i=1, 2, \dots, K$ ;

$R_i$ , 任务  $i$  在任务序列中的排序序号 (相当于任务  $i$  的优先级序号),  $i=1, 2, \dots, N$ ;

$R_{k,i}$ , 在所有分配给天车  $k$  的任务中, 任务  $i$  的排序序号,  $i=1, 2, \dots, N; k=1, 2, \dots, K$ ;

$I_{k,t}^1$ ,  $t$  时刻天车  $k$  任务的索引号,  $k=1, 2, \dots, K; t=1, 2, \dots$ ; 如果  $0 < s_i \leq t_0, I_{k,t_0}^1=1, 2, \dots, N$ ; 否则,  $I_{k,t_0}^1=0$ , 表示  $t_0$  时刻任务还未被天车  $k$  执行;

$I_{k,j}^2$ , 分配给天车  $k$  的第  $j$  个任务的索引号,  $j=1, 2, \dots, N_k^c; k=1, 2, \dots, K$ ;

$P_{k,t}$ , 天车  $k$  在  $t$  时刻的位置,  $k=1, 2, \dots, K; t=1, 2, \dots$ ; 天车初始位置  $P_{k,0}=(k-1)\delta$ ;

$Z$ , 多目标函数.

## 1.2 数学模型

天车调度应服务于工序调度以稳定工序生产节奏, 表现为最小化  $\sum_{i=1}^N \max\{0, e_i - r'_i\}$ . 天车调度结果 (记为  $K_i = \max\{0, e_i - r'_i\}$ ) 对工序调度的影响 (记为  $F_i$ ) 是非线性的<sup>[12]</sup>, 本文以指数形式量化该影响:

$$F_i = \int_0^{K_i} a^x dx = \frac{1}{\ln a} (a^{K_i} - 1). \quad (1)$$

根据多次仿真实验, 参数  $a$  赋值 1.002.

第一个目标函数表述为

$$Z_1 = \sum_{i=1}^N F_i. \tag{2}$$

另外,目标函数还考虑了天车的工作量增量和不同天车历史总工作量之间的差异. 天车历史总工作量,记为  $W_k$ ,主要体现在其吊包、落包次数和负载、空载移动距离. 本文将  $W_k$  量化为时间值:

$$W_k = W_{k,t_0} + \sum_{i=1}^{N_k^c} (\alpha_{I_{k,i}^c} + \beta_{I_{k,i}^c}) + (\lambda_1 D_{k,1} + D_{k,2})/\nu. \tag{3}$$

其中:  $W_{k,t_0}$  是重调度开始时天车  $k$  的工作量;  $D_{k,1}$ ,  $D_{k,2}$  是当  $N$  个任务完成时,天车  $k$  空载、负载移动距离;  $\lambda_1$  (设  $\lambda_1 = 0.4$ ) 为权重系数.

目标函数  $Z_2$  表述为

$$Z_2 = \sum_{k=1}^K (W_k - W_{k,t_0}) + \lambda_2 (\max\{W_k\} - \min\{W_k\}). \tag{4}$$

其中  $\lambda_2$  (设  $\lambda_2 = 0.3$ ) 为权重系数.

最终,多目标函数表述为

$$Z = Z_1 + Z_2. \tag{5}$$

综上,本文的 DMCSP 数学模型可表述为

$$\min Z. \tag{6}$$

服从于约束(7)~(13):

$$C_i = k, \text{ 当 } I_{k,t_0}^c = i \ \forall i = 1, 2, \dots, N. \tag{7}$$

$$R_{k,i} = 1, \text{ 当 } I_{k,t_0}^c = i \ \forall k = 1, 2, \dots, K. \tag{8}$$

$$R_i < R_j, \ \forall i, j, \ i \neq j, \ Oa_i = 1 \text{ 且 } a_i = b_j. \tag{9}$$

$$P_{k,t} - \nu \leq P_{k,t+1} \leq P_{k,t} + \nu, \ \forall k = 1, 2, \dots, K; \ \forall t = 1, 2, \dots \tag{10}$$

$$P_{k-1,t} \leq P_{k,t} - \delta \ \forall k = 2, 3, \dots, K; \ \forall t = 1, 2, \dots \tag{11}$$

$$s_i + \alpha_i + |L_{a_i} - L_{b_i}|/\nu + \beta_i + \Delta_1 = e_i, \ \forall i = 1, 2, \dots, N. \tag{12}$$

$$\max\{e_{I_{k,j-1}^c} + |L_{b_{I_{k,j-1}^c}} - L_{a_{I_{k,j}^c}}|/\nu + \Delta_2, r_{I_{k,j}^c}\} \leq s_{I_{k,j}^c}, \ \forall k = 1, 2, \dots, K; \ \forall j = 2, 3, \dots, N_k^c. \tag{13}$$

约束(7)~(9)由重调度时的不同初始条件产生. 初始约束(7)和约束(8)要求若重调度时某任务正在被某天车执行,那么该任务仍分配给该天车,且必须作为该天车的第一个任务,否则不符合现实. 约束(9)是工位容量约束,即若任务  $i$  的起点是任务  $j$  的终点,且任务  $i$  起点被占据,那么,任务  $i$  必须先执行,任务  $j$  才能执行.

约束(10)~(13)为天车移动行为约束. 约束(10)要求天车的运行轨迹必须是连续的;约束(11)是避碰约束,要求相邻两台天车必须保持安全距离且不能相互跨越. 约束(12)表明天车实际完成一个任务的时间,由于天车避让等原因,必然

不小于该任务的理论完成时间. 约束(13)规定一台天车在完成当前任务后,必须到达下一任务的起点且下一任务已经释放后,下一任务才能开始执行. 约束(12)和约束(13)中  $\Delta_1$  和  $\Delta_2$  通过仿真获得.

2 实验方法

2.1 仿真过程总体方案

仿真平台分为两部分,如图 2 所示. 一部分为现实仿真模块,其模拟真实天车运行环境,同时管理任务,记录天车、任务、工位状态. 另一部分为算法,当需要调度决策时,其首先从仿真模块获取当前仿真时刻天车、任务、工位的初始状态作为初始条件. 然后算法模块生成有效解(调度方案)集合,并将每一个有效解以当前初始条件进行仿真运行. 最终选取拥有最小目标函数值的解为最优解. 该最优解将反馈给现实仿真模块,天车根据该解继续执行任务. 如此,形成了一种滚动调度的动态调度模式.

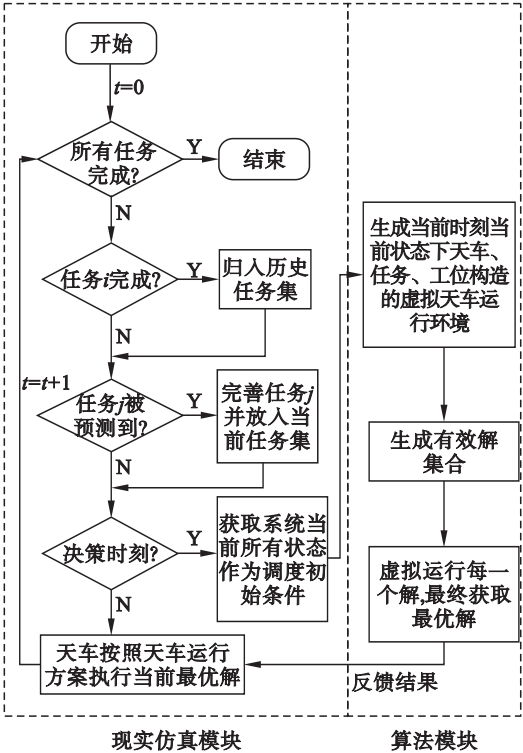


图 2 天车调度仿真平台运行模式  
Fig. 2 Operation mode of crane scheduling simulation platform

在动态调度环境下,仿真平台需要对任务进行预测. 由于任务产生与天车调度非同层次问题,故仅在此简要描述. 设定任务  $i$  的获知时刻为  $p_i$ ,由任务  $i$  引发的重调度时刻为  $d_i$ .  $p_i$ ,  $d_i$  和  $r_i$  对



应车间某些关键事件发生节点. 在  $p_i$  时刻, 可以较为精确预测  $d_i$  和  $r_i$ , 预测值分别记为  $\bar{d}_i$  和  $\bar{r}_i$ . 同时, 在  $p_i$  时刻仿真平台将模拟从上级工序调度中获取任务  $i$  的起点、终点, 从而产生完整的任务信息. 任务预测所用数据为炼钢车间历史生产数据, 从数据中共获取 30 个运输任务, 跨度约 10 h, 完整信息见表 1. 仿真平台利用任务时间参数的到来, 模拟对应事件的发生, 从而释放任务.

## 2.2 天车运行方案

天车运行方案控制仿真过程中天车的运行行为. 提出的天车运行方案适用于任意数量的天车, 具有较好的拓展性. 其包含一个主动运行方案和一个避让运行方案.

### 2.2.1 主动运行方案

天车在无干扰的情况下, 完成一个任务需要经历 5 个步骤, 本文称为天车的 5 个状态, 如图 3 所示. 其中, 细线表示天车处于空载状态 ( $S_{k,t} = 0, 1$ ), 粗线表示天车处于负载状态 ( $S_{k,t} = 2, 3, 4$ ). 其中,  $S_{k,t} = 0$  表示任务  $i$  的  $d_i$  时刻未到达, 或天车没有任务;  $S_{k,t} = 1$  表示天车从当前位置移向任务  $i$  起点工位;  $S_{k,t} = 2$  表示天车起包过程;  $S_{k,t} = 3$  表示天车吊运钢包至任务  $i$  终点工位;  $S_{k,t} = 4$  表示天车落包过程.

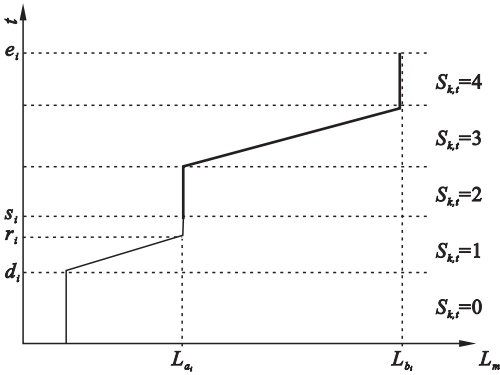


图 3 天车的 5 个状态

Fig. 3 5 statuses of a crane

天车  $k$  在执行任务  $i$  时, 其状态变更逻辑流程如图 4 所示, 图中  $T_c$  为天车当前状态的变更时刻. 图 4 给出了天车状态变更的判断逻辑, 也给出了天车位置变更的函数. 当天车  $k$  处于  $S_{k,t} = 1$  或者 3 时, 须向当前状态下的目标点 (任务起点或终点) 移动:

$$P_{k,t} = f(P_{k,t-1}, L_{\text{dest}}) = P_{k,t-1} + \text{sign}(L_{\text{dest}} - P_{k,t-1})v. \quad (14)$$

其中:  $L_{\text{dest}}$  是目标点所在位置;  $\text{sign}(x)$  是符号函数:

$$\text{sign}(x) = \begin{cases} 1 & \text{当 } x > 0; \\ 0 & \text{当 } x = 0; \\ -1 & \text{当 } x < 0. \end{cases} \quad (15)$$

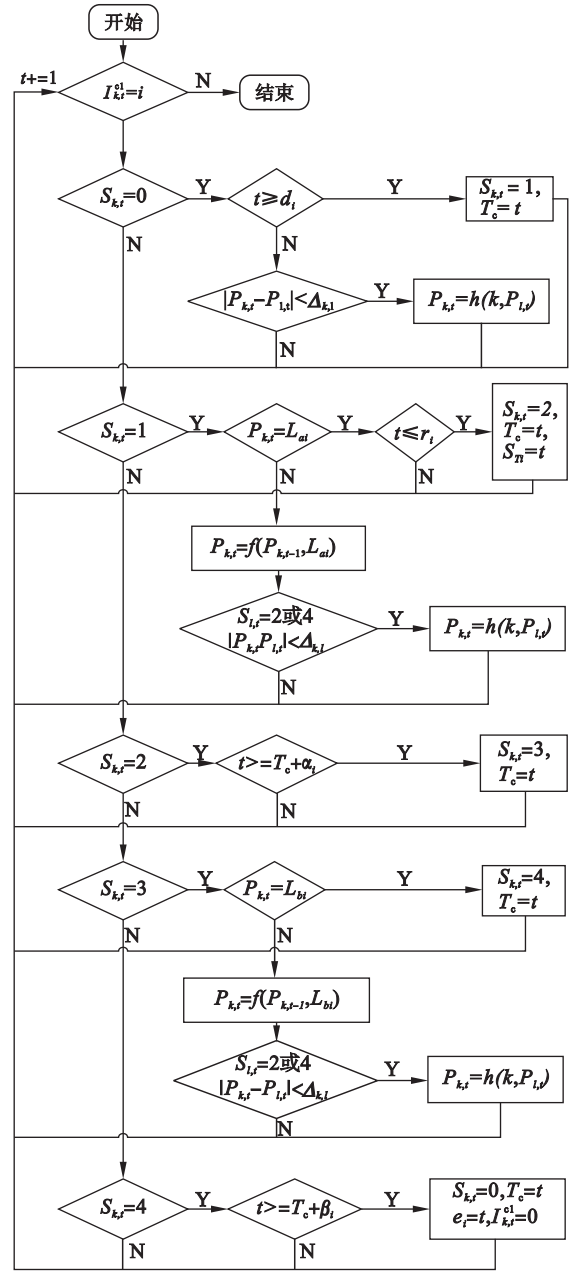


图 4 天车状态变更逻辑流程

Fig. 4 Logical flow for a crane to change its status

重调度时某低优先级天车  $l$  可能处于  $S_{l,t} = 2$  或 4, 当前过程无法中断. 若此时高优先级天车  $k$  向天车  $l$  移动, 且  $|P_{k,t} - P_{l,t}| < \Delta_{k,l}$  时, 天车位置更新为

$$P_{k,t} = h(k, P_{l,t}) = P_{l,t} + \text{sign}(k - l)\Delta_{k,l}. \quad (16)$$

另外, 当拥有高优先级任务的天车  $k$  处于  $S_{k,t} = 0$  时, 规定其须避让其他天车, 表述为  $P_{k,t} = h(k, P_{l,t})$ .

### 2.2.2 避让运行方案

低优先级天车在执行任务的过程中, 为避让

高优先级天车,可能需要经过多个中间过渡点,记为  $P_{mid}$ . 以某两天车(低优先级天车  $l$  和高优先级天车  $k$ ) 为例,天车  $l$  在完成任任务过程中最多需要经过 1 个  $P_{mid}$ ,可能的情况如图 5 所示. 图 5a 中两天车任务区域不重叠,天车各自按其主动运行方案移动;图 5b 中天车  $l$  须在  $S_{l,t}=1$  阶段移动到  $P_{mid}$  以避让天车  $k$ ; 而图 5c 中天车  $l$  须在  $S_{l,t}=3$  阶段移动到  $P_{mid}$  以避让天车  $k$ . 故天车  $l$  的避让运行方案可描述为:天车  $l$  按主动运行方案移动→如果需要,在特定  $S_{l,t}$  下移动到  $P_{mid}$ →等待继续执行任任务的条件判断→继续按主动运行方案完成任任务剩余部分. 当有  $n$  台天车优先性高于天车  $l$  时,天车  $l$  最多需要经过  $n$  个  $P_{mid}$ ,该逻辑流程可由以上描述拓展得到.

由于  $P_{mid}$  的限制,低优先级天车会提前避让潜在冲突从而避免在现实中较为常见的无效折返跑. 并且  $P_{mid}$  的限制也使得高优先级天车在  $S_{k,t}=0$  时即使避让低优先级天车,也不会导致其无效折返跑而增加额外工作量,更加符合现实天车运行行为.

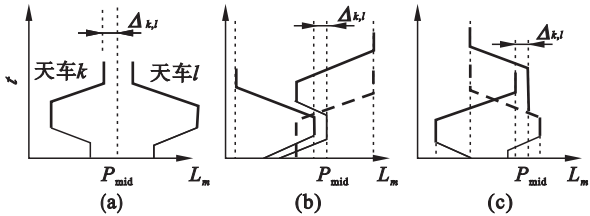


图 5 天车避让运行方案示例

Fig. 5 Instances for a crane to move in the evasive mode

(a) —天车  $l$  无须经过  $P_{mid}$ ;

(b) —天车  $l$  须在  $S_{l,t}=1$  时经过  $P_{mid}$ ;

(c) —天车  $l$  须在  $S_{l,t}=3$  时经过  $P_{mid}$ .

注: ① 若天车  $k$  执行任任务  $i$ ;  $P_{mid} = \begin{cases} \min\{La_i, Lb_i\} - \Delta_{k,l} & \text{当 } k > l \\ \max\{La_i, Lb_i\} + \Delta_{k,l} & \text{当 } k < l \end{cases}$ ; ② 虚线为天车  $l$  在无干扰情况下的路径,实线为实际路径.

2.3 启发式方法

每一个重调度的解包括一个任任务排序序列和对应的天车分配序列.

记  $I_{[i]}$  表示任任务序列中第  $i$  个任任务的索引号. 构建任任务序列的方法如下:

1) 以  $\bar{r}_i$  升序排列  $N$  个任任务,构成第一个任任务序列. 以约束(7)~(9)检验和调整任任务序列,得到第一个合法的任任务序列.

2) 若两个相邻任任务所在区域发生重叠,两任任务的  $\bar{r}_i$  相差 5 min(经验值)且未违背约束(7)~(9),则允许其交换顺序. 任意合法的任任务排序交

换都生成新的任任务序列.

对于每个任任务序列,其所有天车分配序列构建如下:

1) 根据约束(7),正在被执行的任任务将继续分配给执行该任任务的天车;

2) 其他任任务按照穷举法分配天车.

对于以上构造的天车分配序列,不符合下列规则的序列将被排除:

1) 连续 3 个任任务不能分配给同一天车;

2) 如果任任务区域不重叠,则天车不可交叉分配,如图 5a 所示. 这符合已被证明存在最优解的单向调度策略<sup>[13]</sup>,即若  $\max\{a_{l[i]}, b_{l[i]}\} + \Delta_{k,l} < \min\{a_{l[i+1]}, b_{l[i+1]}\}$ ,则  $C_{l[i]} < C_{l[i+1]}$ ; 或者  $\{a_{l[i]}, b_{l[i]}\} - \Delta_{k,l} < \max\{a_{l[i+1]}, b_{l[i+1]}\}$ ,则  $C_{l[i]} > C_{l[i+1]}$ .

3 实验结果及分析

仿真平台利用 C# 语言在 Microsoft Visual Studio 2013 软件上编写. 计算机安装 Win 10 系统,8 GB 内存,CPU 型号为 Intel(R) Core(TM) i3-6100 @ 3.7 GHz.

仿真实验中天车数量根据现场实际设定为 2 台,任任务见表 1. 动态调度的结果展示于图 6a,其为天车在各个工位间执行任任务的轨迹. 轨迹图可以得到任任务分配方案和任任务开始、结束时刻. 下部轨迹属于天车 1,而上部轨迹属于天车 2. 两条轨迹中,粗线部分天车处于负载状态( $S_{k,t} > 1$ )而细线部分处于空载状态( $S_{k,t} \leq 1$ ). 图中两天车轨迹不相交,满足避让约束. 天车到达任任务起点时,大多数任任务并未释放,不会造成额外的任任务延迟. 表 1 中 30 个任任务的调度过程计算耗时为 0.22 s,每个重调度过程则更少,完全满足实际调度的实时性要求. 炼钢车间天车任任务是随着主工序的生产节奏而产生,故不会导致批量任任务同时释放. 在滚动调度策略下,每次重调度的任任务规模不超过 5 个. 总的任任务规模增大,仅会导致重调度的次数和整个仿真过程耗时增加,而对每次重调度的实时性影响较小.

模型目标函数使得本文天车调度方案具有维护生产调度稳定性和平衡天车工作量的作用. 例如,人为调换任任务 2 和任任务 3 的计划释放时刻以模拟任任务 3 因某种原因导致落后于工序调度计划,此时任任务 3 优先级将提升而高于任任务 2,执行结果如图 6b 所示. 又如,设置天车 2 在  $t=0$  时的初始工作量为 50 min,则在后续调度中,任任务将趋向于分配给天车 2 以平衡两车的工作量,如图 6c 所示.

表 1  仿真实验任务集合  
Table 1  Set of jobs for the simulation experiment

任务	$a_i$	$b_i$	$p_i$	$d_i$	$\bar{d}_i$	$r_i$	$\bar{r}_i$	$r'_i$
1	4	7	349	769	829	1 009	1 069	660
2	3	6	2 582	3 002	3 062	3 242	3 302	2 060
3	2	10	2 613	3 033	3 093	3 273	3 333	3 180
4	1	8	3 601	4 201	4 081	4 561	4 321	4 200
5	3	5	4 947	5 367	5 427	5 607	5 667	5 220
6	2	9	6 075	6 435	6 555	6 675	6 795	6 540
7	1	7	6 414	7 014	6 894	7 374	7 134	7 320
8	5	11	7 200	7 535	7 560	7 754	7 800	7 500
9	3	5	7 475	7 955	7 835	8 195	8 075	7 800
10	4	9	8 698	9 058	9 058	9 298	9 298	9 180
11	1	8	9 367	9 967	9 727	10 327	9 967	10 080
12	3	5	10 061	10 601	10 421	10 841	10 661	10 380
13	5	10	10 500	10 860	10 740	11 183	10 980	10 800
14	4	9	11 385	11 745	11 745	11 985	11 985	11 700
15	2	7	11 969	12 329	12 329	12 569	12 569	12 480
16	3	5	13 078	13 558	13 438	13 798	13 678	13 200
17	6	11	13 200	13 620	13 440	13 905	13 680	13 920
18	4	9	14 030	14 450	14 390	14 690	14 630	14 760
19	2	8	14 841	15 321	15 201	15 543	15 441	15 300
20	5	10	16 312	16 672	16 552	16 863	16 792	17 100
21	4	9	16 700	17 240	17 060	17 449	17 300	17 280
22	3	5	17 057	17 537	17 417	17 678	17 657	17 400
23	2	7	18 250	18 730	18 610	18 957	18 850	18 780
24	1	9	19 164	19 644	19 524	19 921	19 764	19 800
25	6	11	19 190	19 550	19 430	19 802	19 670	20 100
26	3	6	19 427	19 847	19 787	20 106	20 027	20 100
27	1	8	21 188	21 608	21 548	21 851	21 788	21 600
28	4	9	22 100	22 580	22 460	22 794	22 700	22 620
29	5	10	22 104	22 440	22 344	22 695	22 584	22 800
30	2	5	23 658	24 138	24 138	24 341	24 378	24 300

表 2 对比了滚动调度策略与实时调度策略下的天车调度结果,滚动调度策略下分别采用了提出的启发式方法和枚举法进行了对比.枚举法因能遍历所有解,其取得的解是局部最优解.同时,在实时调度策略下对比了提出的启发式方法(此时相当于一种贪婪算法)和规则调度(向左任务由左边天车执行,向右任务由右边天车执行).

从各种指标看,在滚动调度策略下,提出的启发式算法相对于枚举法,其惩罚值增加了 3.7%.即提出的启发式算法优化性能达到枚举法的 96.3%,说明提出的启发式方法能够获得良好的

近优解.同样的启发式方法下,滚动调度策略总惩罚比实时调度策略下总惩罚降低了 17.8%,表明本文采用的滚动调度策略具有一定前瞻性,其调度性能优于实时调度策略.而在滚动调度策略下,提出的启发式方法相较于规则调度方法,惩罚值下降了 10.5%.现场一般采用实时调度策略下的规则调度,提出的滚动调度策略下的启发式方法相对于现场采用的实时规则调度,调度优化性能提高 26.4%.偏离度的存在是由于调度决策时任务时间信息采用了预测值,而实时调度发生于任务真实释放时刻,从而导致滚动调度下偏离度大

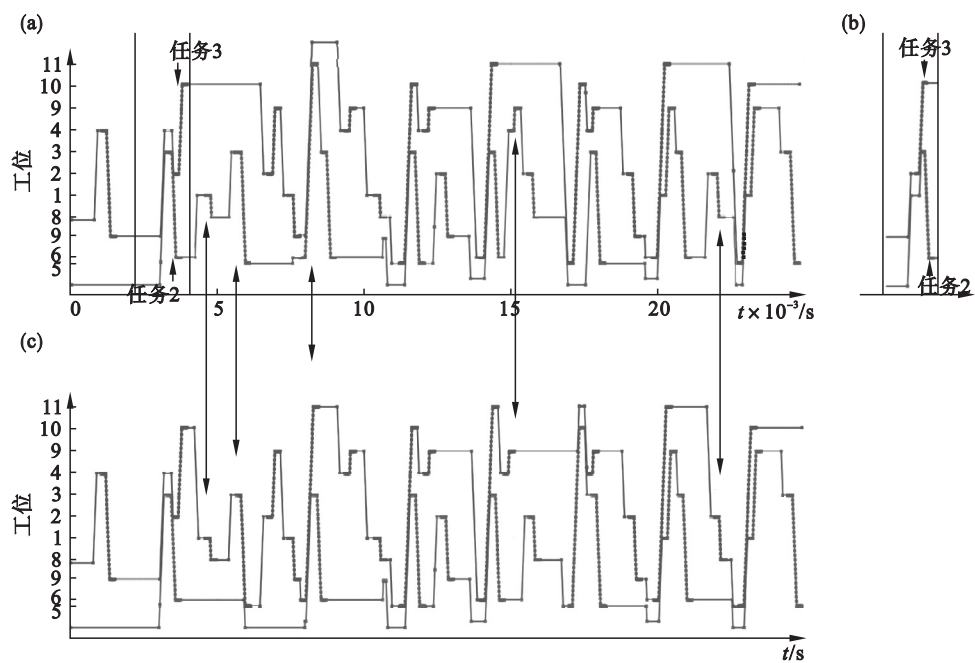


图 6 天车运行轨迹  
Fig. 6 Moving trajectories of the cranes

(a)—天车原始轨迹；(b)—任务 2 和任务 3 交换优先级；(c)—设定初始  $W_1 = 50\text{ min}$  的天车轨迹.

于 0 而实时调度策略下偏离度等于 0. 滚动调度仿真实验中  $\bar{d}_i$  和  $\bar{r}_i$  较为正常,其偏离度相对于每个任务的平均值仅为  $169/30 = 5.6\text{ s}$ ,现实情况下该平均值可能会较大. 对于任务执行效率  $E$ ,由于天车需要从上一个任务终点移动到下一个任务起点,且由于避碰约束,天车执行任务的效率不能达

到 100%. 现场一般要求天车利用率  $Q$  小于 70%,从实验结果分析,两种策略均满足要求,且实时调度策略表现更优. 目标函数中,天车空载移动折算的工作量较小,本文天车调度方案更加注重通过较多的空载移动以均衡工作量,从而使得在利用率指标上处于较小劣势.

表 2 性能对比实验结果  
Table 2 Results of the performance comparison experiments

重调度策略	算法	$Z'/\text{min}$	$U/\text{s}$	$E/\%$	$Q/\%$	
					天车 1	天车 2
滚动	启发式	1 035. 1	169	59. 8	49. 0	39. 0
滚动	枚举法	997. 2	174	59. 8	47. 8	38. 9
实时	启发式	1 258. 8	0	60. 0	46. 4	35. 7
实时	规则	1 407. 1	0	58. 2	40. 7	43. 1

注: $Z'$ 为总惩罚值, $Z'$  = 以目标函数  $Z$  计算所有任务的结果; $U$  为偏离度,所有任务实际开始时刻( $\bar{s}_i$ )与计划开始时刻( $s_i$ )之绝对差,即  $U = \sum |s_i - \bar{s}_i|$ ;  $E$  为任务执行效率, $E$  = 所有任务的理论完成时间/(天车空载移动时间 + 天车负载时间);  $Q$  为天车利用率,  $Q = 1 - \text{某天车空载静止时间}/\text{仿真时长}$ .

4 结 论

1) 本文提出的炼钢车间天车动态仿真调度方案能够促进工序调度的稳定,减少和均衡天车工作量. 提出的启发式算法的实时性保证了本方案的可行性,天车利用率满足现场要求.

2) 滚动调度策略下,提出的启发式方法所得

解的优化性能最高能达到最优解的 96. 3% .

3) 提出的滚动调度策略下的启发式方法相比于现场采用的实时规则调度方法,调度优化性能提高 26. 4% .

参考文献:

[ 1 ] Boysen N, Briskorn D, Meisel F. A generalized classification scheme for crane scheduling with interference[ J ]. *European Journal of Operational Research*, 2017, 258( 1 ): 343 – 357.



[ 2 ] Bierwirth C, Meisel F. A follow-up survey of berth allocation and quay crane scheduling problems in container terminals [ J ]. *European Journal of Operational Research*, 2015, 244 ( 3 ) : 675 – 689.

[ 3 ] Peterson B, Harjunkoski I, Hoda S, et al. Scheduling multiple factory cranes on a common track [ J ]. *Computers & Operations Research*, 2014, 48 ( 8 ) : 102 – 112.

[ 4 ] Cheng X, Tang L X, Pardalos P M. A Branch-and-Cut algorithm for factory crane scheduling problem [ J ]. *Journal of Global Optimization*, 2015, 63 ( 4 ) : 729 – 755.

[ 5 ] 王旭, 刘士新, 王佳. 求解具有时空约束的天车调度问题 Memetic 算法 [ J ]. *东北大学学报 ( 自然科学版 )*, 2014, 35 ( 2 ) : 190 – 194.  
( Wang Xu, Liu Shi-xin, Wang Jia. Memetic algorithm for crane scheduling problem with spatial and temporal constraints [ J ]. *Journal of Northeastern University ( Natural Science )*, 2014, 35 ( 2 ) : 190 – 194. )

[ 6 ] 高小强, 李盼, 龙建宇, 等. 时空约束下连铸车间天车调度的多目标建模与求解 [ J ]. *系统工程理论与实践*, 2017, 37 ( 9 ) : 2373 – 2383.  
( Gao Xiao-qiang, Li Pan, Long Jian-yu, et al. Multi-objective modelling and solving for crane scheduling with spatio-temporal constraints in casting workshop [ J ]. *Systems Engineering — Theory & Practice*, 2017, 37 ( 9 ) : 2373 – 2383. )

[ 7 ] Xie X, Zheng Y Y, Tang L X, et al. Multiple crane scheduling in a batch annealing process with no-delay constraints for machine unloading [ J ]. *Applied Mathematical Modelling*, 2017, 49 : 470 – 486.

[ 8 ] Hirsch P, Palfi A, Grönl T M. Solving a time constrained two-crane routing problem for material handling with an ant colony optimisation approach: an application in the roof-tile industry [ J ]. *International Journal of Production Research*, 2012, 50 ( 20 ) : 6005 – 6021.

[ 9 ] 周炳海, 廖秀梅. 基于轨迹映射模型的天车多目标调度方法 [ J ]. *湖南大学学报 ( 自然科学版 )*, 2019, 46 ( 4 ) : 10 – 16.  
( Zhou Bing-hai, Liao Xiu-mei. Multi-objective scheduling method for workshop cranes based on projection model of trajectories [ J ]. *Journal of Hunan University ( Natural Sciences )*, 2019, 46 ( 4 ) : 10 – 16. )

[ 10 ] Kung Y, Kobayashi Y, Higashi T, et al. Order scheduling of multiple stacker cranes on common rails in an automated storage/retrieval system [ J ]. *International Journal of Production Research*, 2014, 52 ( 4 ) : 1171 – 1187.

[ 11 ] 李维刚, 王肖, 赵云涛, 等. 基于栅格法的钢厂无人天车调度系统 [ J ]. *系统仿真学报*, 2020, 32 ( 4 ) : 687 – 699.  
( Li Wei-gang, Wang Xiao, Zhao Yun-tao, et al. Unmanned crane dispatching system based on grid method in steel works [ J ]. *Journal of System Simulation*, 2020, 32 ( 4 ) : 687 – 699. )

[ 12 ] Yin R Y. Theory and method of metallurgical process integration [ M ]. New York : Academic Press, 2013.

[ 13 ] Lim A, Rodrigues B, Xu Z. A m-parallel crane scheduling problem with a non-crossing constraint [ J ]. *Naval Research Logistics*, 2007, 54 ( 2 ) : 115 – 127.