

基于贝叶斯公式的炼钢厂天车调度方法

马 湧^{1†}, 冯 凯², 杨新彬¹

(1. 中国钢研科技集团有限公司 钢铁绿色化智能化技术中心, 北京 100081;

2. 北京科技大学 冶金与生态工程学院, 北京 100083)

摘要: 针对炼钢厂天车任务具有时序性、冲突性和不确定性的特点, 提出一种基于贝叶斯公式的天车调度方法. 首先, 解析炼钢厂内天车任务的产生规律, 构建天车调度过程的贝叶斯网络; 然后, 计算各类天车任务产生的时空概率分布; 最后, 根据可用天车数量匹配运输任务, 动态生成天车调度方案. 基于天车调度仿真系统, 利用某炼钢厂 10 900 条实际的天车任务数据, 对该天车调度方法测试表明, 所提出方法可在规定时间内有效地完成所有天车任务; 与人工调度方法相比, 完成任务总时间、天车避让次数、由于天车避让导致额外的运输时间均明显减少. 在提高天车运行效率的同时, 减少天车碰撞的安全风险.

关键词: 贝叶斯公式; 天车调度; 炼钢厂; 仿真系统; 概率分布; 不确定性

中图分类号: TF345 **文献标志码:** A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2021.1424

引用格式: 马湧, 冯凯, 杨新彬. 基于贝叶斯公式的炼钢厂天车调度方法[J]. 控制与决策, 2023, 38(1): 211-218.

Crane scheduling method in steelmaking plant based on Bayesian theory

MA Yong^{1†}, FENG Kai², YANG Xin-bin¹

(1. Steel Industry Green and Intelligent Manufacturing Technology Center, China Iron and Steel Research Institute Group, Beijing 100081, China; 2. School of Metallurgy and Ecology Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: Aiming at crane tasks' characteristics of sequentiality, confliction and uncertainties in steel plants, a crane scheduling method based on Bayesian theory is proposed. Firstly, the rule of generating crane tasks in steel plants is analyzed, and the Bayesian network for crane scheduling process is constructed. Then, the corresponding time-space probability distribution of crane tasks is calculated. Finally, the number of available cranes are assigned to crane tasks, and the crane scheduling plan is generated dynamically. Based on the crane scheduling simulation system, 10 900 pieces of actual crane task data are applied. The testing result indicates that the crane scheduling method based on Bayesian theory can effectively complete all crane tasks within the scheduled time. Compared with manual scheduling methods, the total time to complete the task, the frequency of crane avoidance and the additional transportation time caused by crane avoidance are all dramatically reduced. While improving the operation efficiency of cranes, the security risk from crane collision is reduced.

Keywords: Bayesian formula; crane scheduling; steelmaking plant; simulation system; probability distribution; uncertainties

0 引言

钢铁工业是经济发展的重要基础产业, 炼钢生产过程在钢铁制造流程中处于核心地位. 在炼钢生产过程中, 高温钢水、钢包以及设备配件主要通过台车和天车进行运输, 精准、高效的天车调度是保证炼钢厂生产顺行、提高生产效率和稳定生产节奏的基础.

近年来, 炼钢过程单体工序的自动化水平和智能化水平越来越高, 但作为工序间最重要的传摺过

程——天车调度, 在绝大多数炼钢厂却仍然需要依赖人工完成, 导致物流运行效率不高、过程控制稳定性差, 直接影响钢水和钢包的运输时间. 通过对炼钢生产过程的调研和研究发现, 与一般仓储天车调度相比, 炼钢厂天车运输对象是高温钢水和钢包, 与炼钢生产密切相关, 受到工序冶炼和生产计划的双重约束和严格限制, 因此, 炼钢厂天车调度除了运输任务具有时序性、运输路径具有冲突性的一般特点外, 还具

收稿日期: 2021-08-13; 录用日期: 2022-03-31.

基金项目: 国家重点研发计划项目(2020YFB1712800).

责任编辑: 梁樑.

[†]通讯作者. E-mail: yongma@139.com.

备运输任务不确定性大、重调度难度大、容错率低等独有的困难。

目前,针对天车调度方法的研究,通常面向确定性的运输任务计划,从而获得优化的调度方案;或面向完全随机性的运输任务,仅生成可行的调度方案。前者的研究难以适应实际炼钢生产过程中运输任务会随时发生调整的情况,而后者的研究又难以兼顾调度方案的优化性。可见,要想获得能够适应实际生产过程且具有一定优化性的天车调度方案,关键在于研究炼钢厂天车运输任务时序性、冲突性和不确定性的特征。

1 文献综述

针对不同特点的天车调度问题,相关学者针对调度方法作出相应的研究工作。如针对钢铁行业中多架天车调度过程存在相互干扰的问题,Tanizaki等^[1]提出了一种短时间可获得次优解的元启发式算法用于构建天车调度模型,并通过计算机实验的方式验证了该方法的有效性。针对多台天车操作有限机器的问题,以最后一个天车运输任务完成时间最小为目标,Xie等^[2]建立了混合整数线性规划模型,并基于实际情况下的天车和机器数量,利用启发式算法进行求解,最后对求解结果进行评估,结果表明可获得较好的调度结果。针对多机多任务天车调度问题,郑忠等^[3]提出了一种基于免疫算法与遗传算法相结合的仿真模型,该仿真模型反映了自然工作环境中天车的特点,在考虑空间约束和天车运输任务优先权的情况下,解决了多机多任务冲突问题,采用仿真模型对天车调度进行评估,结果表明该模型在工业上有效、可行。针对天车调度任务繁杂和随机性的特点,朱道飞等^[4]建立了系统的需求分析模型、静态模型和动态模型,引入形式化建模工具Petri网建立系统的Petri网仿真模型,利用仿真模型指导天车调度系统,仿真结果表明,所建立的钢铁生产天车调度系统能够有效模拟天车调度,并减少了天车的被动运输,提高了天车3%左右的运行效率。

在钢铁工业中,针对不同应用场景的特点,相关学者研究不同的天车调度方法。面向钢铁企业铸坯、热轧材或成品的仓储车间天车调度问题,Maschietto等^[5]开发了两种遗传算法的调度模型,并以实际生产过程为例,研究不同的调度策略。王旭等^[6]在考虑了时间、空间以及热轧计划等实际约束下,建立了一个板坯出库天车调度模型,该模型设计了基于优先关系的天车分配编码方式、离散事件动态仿真解码、自适应交叉算子以及在交叉和变异后进行模拟退火局域

搜索的Memetic算法,通过某钢厂板坯出库过程中天车调度的实际数据对模型和算法进行仿真测试,实验结果表明,该算法具有很高的收敛性和稳定性,满足实际生产需要。针对钢卷分两级存放的仓库单台天车的调度问题,Tang等^[7]建立了混合整数线性规划模型,并提出了一种针对一般情况的启发式算法,分析其最坏情况下的性能,结果表明,所提出的启发式算法能够产生高质量的解。针对板坯库天车调度优化过程受随机性影响的问题,人们设计了循环仿真方法,通过多类模糊评价和AS-IS仿真模型与AS-IS仿真模型间的循环转换,得到优化结果。以某钢厂为例,通过实际数据验证表明了循环仿真方法对板坯场吊车调度有一定的参考价值^[8]。Dohn等^[9]将板坯库天车调度问题分为规划问题和调度问题两部分进行分解和建模,并使用模拟数据进行测试,测试结果显示,该方法比人工规划的方法可有效地减少任务延迟。

面向炼钢车间的天车调度问题,高小强等^[10]考虑重钢包和空钢包吊运任务,以所有吊运任务等待被运输时间最短、总运输时间最短、天车间负载时间差异最小为优化目标,建立了天车调度模型,并利用改进的遗传算法进行求解。采用某钢厂实际生产数据进行检验,通过与禁忌搜索法进行对比,证实了改进遗传算法的可行性和有效性,能够为生产过程中的天车调度提供指导;针对炼钢车间多机多任务的问题,提出了以任务分配、冲突消除和任务完成为主导的仿真规则,通过炼钢厂的离线实验表明,该模型为天车调度提供了指导^[11];为了最大限度地缩短整个炼钢和连铸过程的生产周期,Sun等^[12]提出了一种混合时间Petri网的天车调度建模方法,并在标准商用求解器CPLEX中使用分支切割法求解。利用某炼钢厂实际天车调度数据实验表明,与传统的人工调度结果相比,该方法的调度结果有了显著的改善;针对炼钢车间天车相互干扰的调度问题,提出了一种启发式算法,从可行解出发,在有限时间内求解问题。该算法的特点是限制搜索空间,采用深度优先搜索与宽度优先搜索相结合的方法对天车调度方案进行搜索^[13]。针对青岛特殊钢铁有限公司某炼钢车间天车调度问题,根据实际生产工艺数据,建立生产过程仿真模型,并以天车延迟等待时间最小为优化目标建立天车调度的数学模型,进而利用遗传算法进行求解^[14]。针对炼钢车间天车调度,分为静态调度和动态调度两个阶段。静态调度模型是基于生产计划提出的优化模型,并利用遗传算法进行求解,动态调度模型是基于针对生产过程中不确定因素的优先规则模型。利用仿

真系统对以上模型进行验证,结果表明了模型的有效性^[15].针对炼钢车间天车调度的特点,引入多智能体的思想,构建基于多智能体的炼钢车间天车调度仿真模型.该模型具有的动态性、局部目标优化性、全局目标导向性,可实现炼钢车间天车的动态调度,并能够有效地刻画和反映炼钢车间天车调度的基本特征.通过仿真系统进行验证,在相同作业条件下,天车平均运输时间明显减少,天车利用率有效地提升^[16].

通过上述文献的分析发现,目前针对钢铁工业应用场景中天车调度方法的研究,主要是针对天车调度过程的时序性和冲突性的特点,通过构建数学模型或使用智能算法,生成相应的调度方案.而炼钢厂的天车调度过程,除了时序性和冲突性的特点,天车任务的不确定性也是影响天车调度方案可执行的关键特征.

面向炼钢厂天车调度的应用场景,综合考虑天车任务的时序性、冲突性和不确定性的特征,所提出基于贝叶斯公式的天车调度方法,通过天车任务的时空概率分布表征任务时序性与不确定性的耦合关系,进而通过多区域的动态分配规则,消解天车任务的冲突性.通过利用某炼钢厂大批量实际天车任务,对基于贝叶斯公式的天车调度方法进行仿真验证,并与人工经验的调度方法的方法相比,表明该方法可有效提高天车运行效率和稳定性,降低天车碰撞的安全风险.

2 炼钢厂实际生产的天车调度方法

炼钢生产过程是由多个工序串联而成的间歇式冶炼过程.为了提高生产效率,不同功能的工序通常布置于不同跨区,通过台车和天车完成工序间的物流运输.由于冶炼钢种和工艺模式的差异,不同钢铁企业炼钢厂的平面布局并不一致.但一般均具有以下共性特征.

- 1) 炼钢车间内通常分布有多个跨区;
- 2) 每个跨区内通常分布多个操作工位和多架天车,跨区内物料运输主要依靠天车完成;
- 3) 不同跨区间的物流运输依靠过跨台车完成;
- 4) 各跨区的天车调度和运行,相对独立,基本不存在相互影响.

正是由于以上特征,炼钢厂的天车调度通常由各跨区分别完成.在面对天车调度问题时,通常也是针对跨区内的天车运行过程进行调度方法研究.

由于炼钢厂天车任务具有时序性、冲突性和不确定性的特点,在实际生产过程中,技术人员通常基于一定的规则安排调度方案.其中,基于区域分配规则的调度方法简单、易行,在绝大部分炼钢厂广为使

用.

基于区域分配规则的调度方法如图1所示.图1所展示的为该跨区内有 m 个操作工位和 n 架天车.按照操作工位产生任务的频率和运输距离,会将操作工位的运输任务指定给相应的天车执行.如将1#和3#操作工位的调度任务交给1#天车执行,在空间上表现为1#调度区域,同理,会形成2#调度区域,直至 n #调度区域,每个区域对应1架天车.

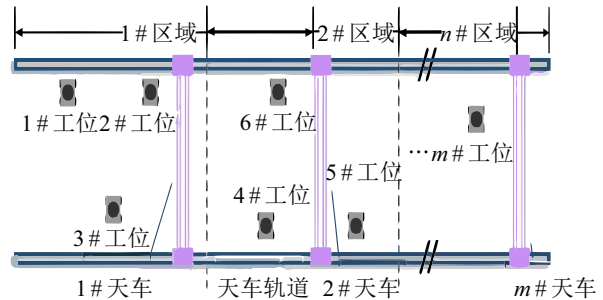


图1 基于区域分配规则的天车调度方法

基于区域分配规则的天车调度方法,具有很高的可执行性,便于技术人员对天车的指挥和调配.但是,由于大多数天车任务均需要跨区域执行,单纯以起始工位产生运输任务的频率进行划分并不合理,从而导致出现天车运行路径冲突明显、运输效率不高等问题.同时,随着生产过程的执行,各区域产生任务的频率会有明显变化,也会造成天车运输负荷出现分时段不均衡的情况.针对以上问题,如何在发挥实际生产天车调度方法的高可执行性优势的同时,弥补天车任务路径冲突、运输负荷不均衡的不足,是本文基于贝叶斯公式的天车调度方法的重点研究内容.

3 基于贝叶斯公式的天车调度方法

针对炼钢厂实际生产过程中,在各区域产生运输任务的频率存在明显变化,且存在空间不均衡的特点,本文提出利用贝叶斯公式计算天车运输任务的时空概率分布,进而生成优化调度方案的方法.

首先,构建天车任务的贝叶斯网络,并利用贝叶斯公式中条件概率关系表征天车任务的时序性关系;然后,通过计算各任务产生的条件概率,获得天车任务的时空概率分布,以表征天车任务的不确定性;最后,采用一种动态区域的天车分配方法,生成概率预判性的天车调度方案.

3.1 构建天车任务的贝叶斯网络

炼钢车间内,天车作为钢包、铁包、废钢等主要的运输载体,天车任务直接由钢水、铁水、废钢、耐材等物流运输需求所决定.钢水、铁水和废钢的运输需求进一步由生产计划和工艺路径所决定,导致主要的天

车任务间,在时间序列上存在一定的关联性.同时,由于各主要工序的冶炼时间受原料条件、控制水平等影响,具有一定的波动性,因此,无法通过生产计划获得炼钢过程天车任务的准确时刻表.鉴于此,本文提出基于贝叶斯网络的方法,对各天车任务在时间域上的关系进行表征,为利用贝叶斯公式计算各天车任务的产生概率提供基础.

天车任务贝叶斯网络如图2所示.构建该贝叶斯网络的过程为:以工艺路径和生产计划为指导,沿时间轴方向,以各天车任务产生时刻和完成时间为网络节点,以任务所在操作工位的空间连续性构建各节点间的关系,从而形成以当前时刻已完成天车任务为起点的贝叶斯网络,可描述未来一段时间内所有可能产生的天车任务在时间序列上的关联性.以图2为例,若“任务1”为在 t_0 完成1#BOF到1#RH的运输任务,则“任务1-1”“任务1-2”“任务1-3”等为在 t_1 将可能产生由1#RH到另一工位的运输任务.前后2个任务以1#RH为衔接,在时间轴上表现为时序性和关联性.

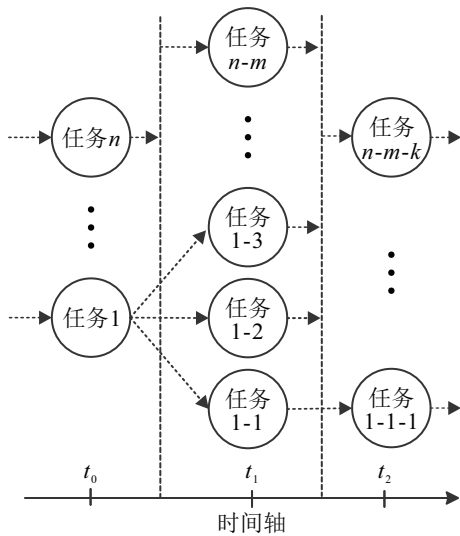


图2 天车任务贝叶斯网络

3.2 基于贝叶斯公式的天车任务时空概率分布

基于天车任务的贝叶斯网络以及实际天车任务的历史数据,利用贝叶斯公式可计算得到网络中各天车任务在时间轴上产生的概率.结合各天车任务起始位置和目标位置的空间信息,便可得到未来一段时间内,所有天车任务在时间维度和空间维度的概率分布.具体计算过程如下.

首先,获取实际天车任务的历史数据表,将起始工位位置与目标位置均相同的任务作为同一种任务,对获取的历史天车任务表中的任务进行统计,得到每种任务下一个时刻可能产生的关联任务,并计算每种任务的关联任务产生的概率、各种关联任务产生的

时间间隔的均值和方差.

通过对实际生产数据的统计分析发现,关联任务间的时间间隔基本符合正态分布,这也符合炼钢生产过程中,工序操作需要在一定时间范围内完成的工艺制度要求.为构建统一的数据分析模型,假设关联任务的时间间隔符合正态分布,作为后续统计和计算的前提.

每种任务与关联任务产生的时间间隔,为每种任务的完成时间与其关联任务的开始时间之间的时间差.根据得到的时间差,确定每种任务的各种关联任务产生的时间间隔的均值和方差.即任务 j 的目的工位为任务 i 的起始工位,则任务 i 为任务 j 的关联任务.

任务 j 与关联任务 i 产生的时间间隔,其均值为

$$u_i = \frac{\sum_k^n (st_{ik} - et_{jk})}{n} \quad (1)$$

其中: u_i 为任务 j 的关联任务 i 产生的时间间隔的均值, n 为任务 j 与其关联任务 i 组成的任务对总个数, et_{jk} 为第 k 个任务对中任务 j 的完成时间, st_{ik} 为第 k 个任务对中任务 i 的开始时间.通过式(1)计算,可获得在天车任务列表中,2个关联任务间前一任务 i 结束到后一任务开始的平均时间间隔.

任务 j 与关联任务 i 产生的时间间隔,其方差为

$$\sigma_i^2 = \frac{\sum_k^n [(st_{ik} - et_{jk}) - u_i]^2}{n} \quad (2)$$

其中: σ_i^2 为任务 j 的关联任务 i 产生的时间间隔的方差, u_i 为任务 j 与关联任务 i 产生的时间间隔的均值, n 为任务 j 与其关联任务 i 组成的任务对总个数, et_{jk} 为第 k 个任务对中任务 j 的完成时间, st_{ik} 为第 k 个任务对中任务 i 的开始时间.通过式(2)计算,可获得在天车任务列表中,2个关联任务间前一任务结束到后一任务开始的时间间隔的方差.

任务 j 与关联任务 i 产生的概率为

$$\varphi_i = \frac{n_i}{z} \quad (3)$$

$$\sum_k^n n_k$$

其中: φ_i 为任务 j 完成后,关联任务 i 产生的概率; n_i 为历史天车任务表中以任务 j 的目的工位为起始工位的关联任务 i 的个数; z 为任务 j 的关联任务 i 的种类; $\sum_k^n n_k$ 为历史天车任务表中以任务 j 的目的工位为起始工位的所有任务的总个数.通过式(3)计算,可获得在天车任务列表中,关联任务间前一任务完成后,后续任务不同路径的概率.

然后,基于当前已完成的任务,计算未来一段时

间内,在时间轴上所有可能任务产生概率的分布函数.即获取当前时刻已完成且还未从目的工位产生下一个任务的所有任务,通过式(1)~(3)计算得到的每种任务的各种关联任务产生的概率、各种关联任务产生的时间间隔的均值和方差,计算未来一段时间内,所有可能任务的产生概率.

在未来时刻 t_1 产生任务 i 的概率为

$$p_i(t_1) = \varphi_i[\phi_i(t_1 - t_0) - \phi_i(t_1 - t_0 - 1)], \quad (4)$$

$$\phi_i(\Delta t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_i} e^{-\frac{(\Delta t - \mu_i)^2}{2\sigma_i^2}}. \quad (5)$$

其中: $p_i(t_1)$ 为在当前时刻 t_0 的未来时刻 t_1 产生任务 i 的概率; φ_i 为任务 j 完成后,以任务 j 的目的工位为起始工位的任务 i 产生的概率; $\phi_i(\Delta t)$ 为在任务 j 完成后,任务 i 产生的时间间隔的正态分布函数; Δt 为时间差; σ_i 为标准差.通过式(4)对任务在时间域上的分布计算,可获得某任务在未来时刻 t_1 的产生概率;式(5)则为该任务在时间步长 Δt 内的概率计算公式.

最后,根据未来一段时间内,所有可能任务的产生概率以及任务所覆盖的空间范围,在时间和空间两

个维度上同时叠加,获得总体天车任务的时空概率分布,未来时刻 t_1 时,不同任务在空间维度上的叠加过程如图3所示,叠加结果为 t_1 时刻所有任务在空间上概率累加后的结果.

3.3 基于贝叶斯公式的天车调度方案

基于实际天车任务的历史数据表,通过式(1)~(5)计算未来一段时间内,所有可能天车任务的时空概率分布.沿时间方向,按照一定的时间步长,不断地按照可能产生天车任务的空间概率分布,将跨区内空间划分为等概率、等可用天车数量的区域,其中,时间步长的选取一般需要参考天车任务的产生时间间隔,并通过实际数据测试最终确定.按照天车排列顺序,每台天车负责1个区域.区域内产生天车任务时,任务分配给该区域的天车执行.

在运输任务与天车进行匹配后,当1个区域存在多个任务同时匹配给1辆天车,或2个天车执行任务的运输路径存在冲突,则需要依照任务优先级规则对任务进行排序.优先级高的任务先于优先级低的任务被天车执行,同时,优先级低的任务在运输路径上需要避让优先级高的任务.优先级规则依照现场操作经验和管理规程而定,通常的规则有:重包任务优先级高于空包任务,计划完成时间较早的任务优先级高于计划完成时间较晚的任务,离开主体工序冶炼工位的任务优先级高于进入冶炼工位的任务等.

基于运输任务与天车的匹配以及任务的优先级规则,即可完成天车任务的调度过程.通过在时间维度上不断更新天车任务的空间概率分布,从而可为所有不确定时间产生的天车任务,系统性生成相对优化的天车调度方案.

跨区内空间划分过程如图3所示.图3中,(a)~(c)3个区域即为4个任务的空间概率分布的叠加结果,在天车数量为3的情况下,将跨内空间以等概率、等天车数量进行划分的结果.

4 实际生产数据测试和分析

以某钢铁企业炼钢厂出钢跨大批量的实际天车任务数据为依据,利用天车调度仿真系统,对基于贝叶斯公式的天车调度方法进行测试.

该炼钢厂出钢跨的平面布局如图4所示,与该跨内天车任务相关的主要工序有:2座210t转炉、2座双工位RH、1座双工位LF、2座CAS精炼、2台双流坯连铸机、2个热修工位、2个离线烘烤位和2个在线烘烤位.该跨内天车任务涉及炼钢-精炼-连铸整个生产过程以及钢包烘烤、维修等辅助操作.跨内工位布局紧凑,天车任务繁忙,仅有3台天车可用以完成相应的

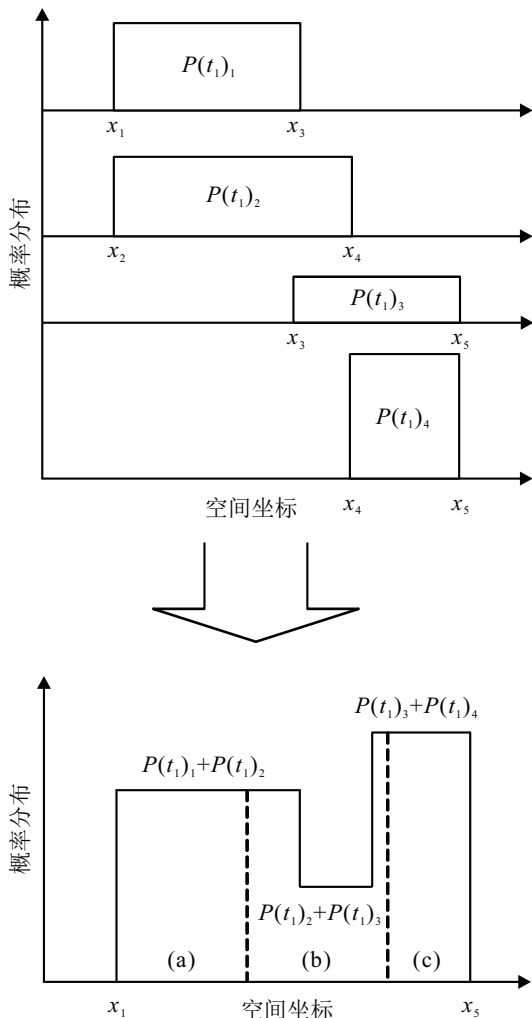


图3 时刻 t_1 天车任务在空间维度内叠加过程

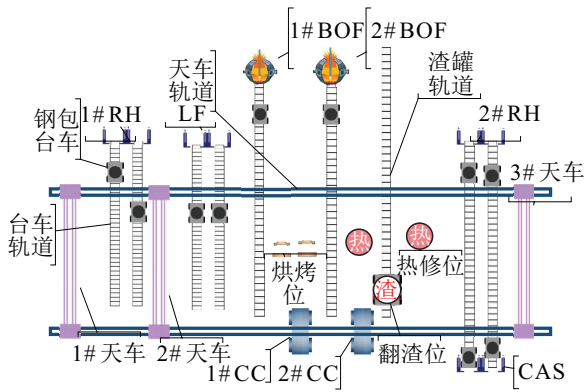


图4 某炼钢厂出钢跨平面布局

运输任务,对天车调度的要求高.一旦天车调度出现

问题,便会影响正常的炼钢生产.

该跨内天车运输对象主要为钢包,天车任务包括重包(装有钢水的钢包)运输和空包(没有装钢水的钢包)运输2个阶段,重包运输包括从转炉到精炼的钢水运输、从精炼到连铸的钢水运输以及部分从LF精炼工序到RH精炼工序的钢水运输;空包运输包括连铸结束后钢包的翻渣操作,从翻渣位到钢包热修位的运输,从热修位到烘烤位的运输,从烘烤位到转炉工位的运输等.

获取该钢厂2016年1~3月的实际天车任务数据,统计主要工序间天车任务的完成时间,如表1所示.

表1 主要工序间天车任务完成时间统计汇总表

阶段	路径	平均时间/min	最小时间/min	最大时间/min
转炉-精炼	1,2#BOF-LF	10.8	6.0	25.0
	1,2#BOF-3#RH	12.3	8.0	26.0
	1,2#BOF-4#RH	11.9	6.0	31.0
精炼-连铸	LF-3#CC	21.6	9.0	3.0
	3#RH-3#CC	27.9	13.0	24.0
	3#RH-4#CC	27.3	13.0	41.0
	4#RH-3#CC	26.9	10.0	42.0
	4#RH-4#CC	27.1	10.0	41.0
连铸-翻渣	3#CC-翻渣	9.4	4.0	17.0
	4#CC-翻渣	9.6	4.0	18.0
翻渣-钢包热修	翻渣-1#钢包热修	5.0	4.0	8.0
	翻渣-2#钢包热修	5.4	3.0	9.0
钢包热修-转炉	1#钢包热修-1,2BOF	8.5	6.5	13.0
	2#钢包热修-1,2BOF	9.1	6.9	14.0

这3个月共产生10900条天车任务,基于天车运输数据,整理为天车运输任务表,选取部分任务作为示例展示,如表2所示.需要说明的是,表2中的开始时间和结束时间是以第1个运输任务所对应炉次开

表2 天车运输任务表(示例)

序号	开始时间/min	结束时间/min	起始工位	目标工位
1	30	40	1#BOF	1#RH1
2	45	53	2#BOF	2#RH2
3	85	94	1#BOF	LF1
4	89	114	1#RH1	1#CC
5	102	127	2#RH2	2#CC
6	136	160	LF1	2#CC
7	154	162	1#CC	翻渣
8	162	170	2#CC	翻渣
9	178	182	翻渣	1#钢包热修
10	180	189	翻渣	2#钢包热修

始冶炼时间为起点,即0时刻,将实际时间节点转换为相对时间节点的结果.

4.1 炼钢厂天车调度仿真系统

为了检验基于贝叶斯公式的天车调度方法的有效性,并与实际生产中的天车调度方法进行对比,利用C#编程语言开发了该炼钢厂出钢跨的天车调度仿真系统.仿真系统实现过程的逻辑流程如图5所示.

天车调度仿真系统包括设置仿真参数,显示天车任务,动态显示天车执行任务过程3个部分.基于该仿真系统,可基于同一批天车运输,对不同天车调度方法进行对比和分析.在天车调度仿真系统中,导入天车任务列表后,随着仿真时钟的推进,依照第3.3节天车调度方法自动生成调度方案,进行连续推演,并指挥天车按照任务路径完成相应的运输任务.

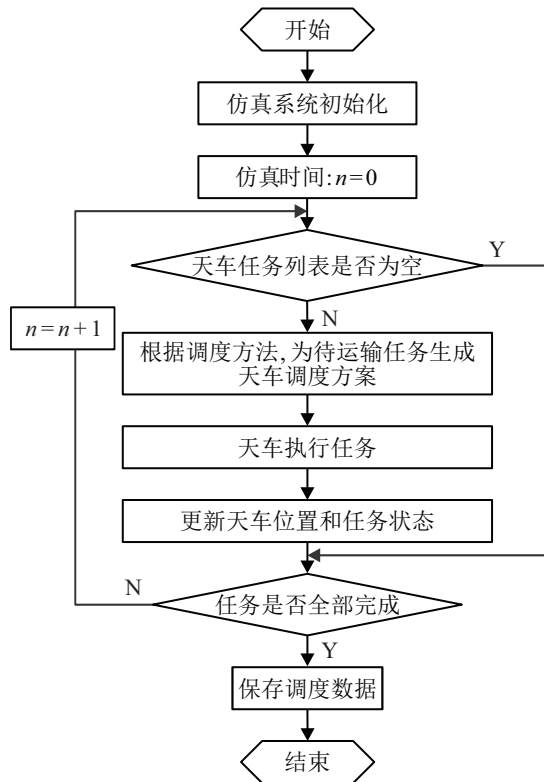


图5 天车调度仿真系统逻辑流程

4.2 实际天车任务调度结果比较

基于炼钢厂出钢跨的同一批实际天车任务数据(10900条),利用贝叶斯公式的天车调度方法和实际生产的天车调度方法,分别生成相应的调度方案,并基于第4.1节开发的天车调度仿真系统,对调度方案的执行效果进行仿真。基于仿真系统的运行结果,从完成任务比例、完成任务时间、天车避碰情况3个方面,对两种天车调度方法进行对比分析,评价天车运行效率和安全风险。仿真结果如表3所示。

表3 两种调度方案仿真结果对比

评价指标段	实际生产的 调度方法	基于贝叶斯公 式的调度方法	优化 情况
按时完成任务比例/%	100	100	0
任务平均完成时间/min	4.49	4.21	-0.28
完成所有任务总时间/min	4486	4206	-280
天车避碰次数/次	546	425	-121
天车避让导致时间损失/min	1223	1027	-196

通过两种调度方案仿真结果对比可见,与实际生产的天车调度方法相比,基于贝叶斯公式的天车调度方法在按时完成所有天车任务的同时,任务平均完成时间减少0.28 min,完成任务总时间减少280 min,有效减少天车避让次数121次,由于减少天车避让导致额外的运输时间196 min。仿真测试结果表明,基于贝叶斯公式的天车调度方法,在保证天车调度方案具有高可执行性的前提下,有效提高了天车运行效率,缓

解了天车任务路径冲突,减少了天车碰撞的安全风险。

5 结论

本文针对炼钢厂天车运输任务具有时序性、冲突性和不确定性的特点,通过解析炼钢厂内天车任务的产生规律,构建天车调度过程的贝叶斯网络,进而计算各类天车任务产生的时空概率分布,实现运输任务与天车的匹配和动态生成天车调度方案。

本研究是以实际生产过程的工艺路径为基本框架,通过对实际天车任务数据进行概率分布统计分析,形成天车调度方案的方法。通过本研究对工业生产逻辑与机器学习耦合建模方法的尝试,为解决炼钢厂天车调度问题探索了一条基于天车任务时空分布规律的动态调度方法。该方法将为其他工业生产过程天车调度问题的研究提供一条新的研究思路。

在炼钢厂生产过程中,由于转炉/电炉工序、精炼工序、连铸工序、维修工位等分布在不同跨区,通常需要多个跨区的天车联合调度,共同完成一个工序间的运输任务。如何构建多跨区天车调度过程的贝叶斯网络,进而实现整个炼钢车间的天车一体化调度,是本研究思路框架下需要进一步研究的内容。

参考文献(References)

- [1] Tanizaki T, Katagiri H, René A O N. Scheduling algorithms using metaheuristics for production processes with crane interference[J]. International Journal of Automation Technology, 2018, 12(3): 297-307.
- [2] 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.
- [3] 郑忠, 周超, 陈开. 基于免疫遗传算法的车间天车调度仿真模型[J]. 系统工程理论与实践, 2013, 33(1): 223-229. (Zheng Z, Zhou C, Chen K. Crane scheduling simulation model based on immune genetic algorithms[J]. Systems Engineering—Theory & Practice, 2013, 33(1): 223-229.)
- [4] 朱道飞, 王华, 王建军, 等. 基于Petri网和UML的钢厂天车调度系统仿真[J]. 昆明理工大学学报: 自然科学版, 2013, 38(3): 5-11. (Zhu D F, Wang H, Wang J J, et al. Simulation of crane scheduling systems for steel plant based on petri nets and UML[J]. Journal of Kunming University of Science and Technology: Natural Science Edition, 2013, 38(3): 5-11.)
- [5] Maschietto G N, Ouazene Y, Ravetti M G, et al. Crane scheduling problem with non-interference constraints in

- a steel coil distribution centre[J]. *International Journal of Production Research*, 2017, 55(6): 1607-1622.
- [6] 王旭, 刘士新, 王佳. 求解具有时空约束的板坯库天车调度问题Memetic算法[J]. *东北大学学报: 自然科学版*, 2017, 38(7): 913-917.
(Wang X, Liu S X, Wang J. Memetic algorithm for crane scheduling problem in slab yard with spatial and temporal constraints[J]. *Journal of Northeastern University: Natural Science*, 2017, 38(7): 913-917.)
- [7] Tang L, Xie X, Liu J. Crane scheduling in a warehouse storing steel coils[J]. *IIE Transactions*, 2014, 46(3): 267-282.
- [8] 赵宁, 杜彦华, 董绍华, 等. 基于循环仿真的钢铁板坯库天车作业优化[J]. *系统工程理论与实践*, 2012, 32(12): 2825-2830.
(Zhao N, Du Y H, Dong S H, et al. Optimization of crane scheduling in slab yard based on cycle simulation[J]. *Systems Engineering—Theory & Practice*, 2012, 32(12): 2825-2830.)
- [9] Dohn A, Clausen J. Optimising the slab yard planning and crane scheduling problem using a two-stage heuristic[J]. *International Journal of Production Research*, 2010, 48(15): 4585-4608.
- [10] 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 X Q, Li P, Long J Y, 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.)
- [11] 陈开, 郑忠, 周超. 面向炼钢厂多机多任务天车调度的仿真方法[J]. *重庆大学学报*, 2011, 34(7): 39-45.
(Chen K, Zheng Z, Zhou C. Simulation method for multi-machine and multi-task crane scheduling in steelmaking plant[J]. *Journal of Chongqing University*, 2011, 34(7): 39-45.)
- [12] Sun L L, Liu W, Chai T Y, et al. Crane scheduling of steel-making and continuous casting process using the mixed-timed petri net modelling via CPLEX optimization[J]. *IFAC Proceedings Volumes*, 2011, 44(1): 9482-9487.
- [13] Tanizaki T, Tamura T, Sakai H, et al. A heuristic scheduling algorithm for steel making process with crane handling(advanced planning and scheduling for supply chain management)[J]. *Journal of the Operations Research Society of Japan*, 2006, 49(3): 188-201.
- [14] 姜海远. 炼钢——连铸车间天车调度的仿真与优化[D]. 青岛: 青岛理工大学, 2016.
(Jiang H Y. Optimization and simulation on crane scheduling of steel making-continuous casting production process[D]. Qingdao: Qingdao University of Technology, 2016.)
- [15] 俞侠. 炼钢-精炼-连铸生产过程天车调度问题研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2012.
(Yu X. Research on crane scheduling of steelmaking-refining-continuous casting production process[D]. Shenyang: Northeastern University, 2012.)
- [16] 马长波. 基于多智能体的炼钢厂车间天车调度仿真方法研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2011.
(Ma C B. Research on simulation method of crane scheduling in steelmaking plant based on multi-agent[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2011.)

作者简介

马湧(1978—), 男, 正高级工程师, 博士, 从事钢铁全流程一体化计划调度、复杂过程建模等研究, E-mail: yongma@139.com;

冯凯(1988—), 男, 讲师, 博士, 从事数学建模和人工智能算法等研究, E-mail: fengkai-show@163.com;

杨新彬(1997—), 男, 硕士生, 从事炼钢生产调度的研究, E-mail: 1726932344@qq.com.

(责任编辑: 魏冰)