

文章编号:1000-582X(2011)07-039-07

面向炼钢厂多机多任务天车调度的仿真方法

陈开, 郑忠, 周超

(重庆大学材料科学与工程学院, 重庆 400044)

摘要:天车调度对于炼钢厂车间中各生产工位间物流的衔接、顺行以及整个企业生产节奏的调控具有重要意义,且同时受到时间、空间约束以及生产计划等的限制,是典型的多机多任务约束问题。为此,建立了一种时空约束下基于规则演化的仿真模型,以优先保证炼钢-连铸生产作业任务的完成为目标,合理安排多任务在车间作业跨中多台天车上的分配,并考虑多任务之间的时间约束和多台天车之间的空间约束问题,设计基于任务分配规则、冲突处理规则、任务结束规则的仿真模型运行规则用于控制天车执行任务的运行过程。该方法可避免对调度问题进行理论求解的困难,通过对某炼钢厂炼钢-连铸生产作业计划的离线模拟测试表明:能够避免天车运行过程中的时间空间冲突,以获得合理的天车运行调度方案,为生产调度提供指导。

关键词:多机多任务;天车调度;仿真模型;时空约束;演化规则

中图分类号:TP391.9

文献标志码:A

Simulation method for multi-machine and multi-task crane scheduling in steelmaking plant

CHEN Kai, ZHENG Zhong, ZHOU Chao

(College of Materials Science and Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China)

Abstract: It is of great significance in steel complex to link production flow between work stations and control production rhythm by cranes. Crane scheduling is a multi-machine multi-task problem which limits temporal and spatial constraints and production plan. A simulation model based on evolution rules to solve temporal and spatial constraints is proposed. Its objective is to guarantee execution of production plan in steelmaking plant. And match between cranes and production task on working span is conducted to fulfill temporal constraints between multi-tasks and spatial constraints among multi-cranes. Simulation rules including task allocation, conflicts eliminating and task finishing are also proposed to dominate simulation process. This model avoids difficulties of theoretical calculation for crane scheduling problem. Offline test in a steelmaking plant shows that it is available to make a crane scheduling without conflicts between cranes and plans, which provides a guideline for production scheduling.

Key words: multi-machine and multi-task; crane scheduling; simulation model; temporal and spatial constraint; evolution rules

在钢铁企业中,运输系统对物流的通畅和高效运转起着重要作用。天车具备起重量大、运行相对

平稳、不占用地面空间的优点以及起吊、搬运、卸载等功能,从而成为车间内物料运输的主要手段^[1]。

收稿日期:2011-03-15

基金项目:国家高技术研究发展计划资助项目(2007AA04Z 161);国家自然科学基金资助项目(50574110)

作者简介:陈开(1982-),男,重庆大学博士后,主要从事冶金信息与系统工程的研究,(E-mail)chenk@cqu.edu.cn。

钢厂炼钢-连铸车间天车调度是指在满足天车运行时的资源约束和空间约束条件下,为使整体物流运输效率与生产目标相一致,保证生产任务有序、紧凑的推进,而合理地分配天车,完成生产物流吊运作业的过程^[2]。天车调度是整个钢铁企业生产调度的重要组成部分,是工序间物流匹配、衔接、调控的“枢纽”。合理、有效地进行天车调度,有助于提高单元工序的生产效率,从而为上层生产调度的实施奠定基础,对提高钢厂系统整体效益起着至关重要的作用^[3]。

钢厂炼钢-连铸车间调度问题是离散和连续相结合的混合作业方式,并且为满足铸机连续浇铸等条件,对生产节奏要求较高,因而其生产调度比一般车间作业问题更为复杂^[4-5]。天车调度作为底层调度之一,在时间上受到生产计划与调度的限制,在空间上受天车空间位置关系以及任务工位点的限制,求解难度更大。Mura^[6]和 Ge^[7]分别对 Job-Shop 和 Flow-Shop 车间天车调度问题进行研究,Matsuo^[8]也对车间单台天车调度问题提出了循环调度方法。Tang^[9]采用混合整数优化方法解决冷轧车间罩式退火的天车调度问题,该方法能实现完工时间和设备利用率的平衡,但该模型只针对单机天车,对多机多任务无法处理。刘青等^[10]考虑运输过程中的时间、温度和物质量的关系,建立钢厂物流系统中各单元工序的时间-温度因素图,再绘制各单元工序间的天车运行、作业图,该方法没有考虑天车空间约束和冲突,具有一定的局限性。郑忠等^[2-3]建立天车调度的细胞自动机模型,通过模型中物流在天车作用下的运动表征天车调度运行,但模型未考虑生产作业计划的执行问题。

因此,笔者提出了一种面向炼钢厂车间多机多任务天车调度问题的基于规则演化的仿真模型方法。建立天车调度仿真模型,首先定义模型的基本要素及类别,生产作业计划(炉次)任务类、天车任务类、工位类和天车类,用以表征钢厂炼钢-连铸车间天车调度的基本特征;将天车运行的多机多任务特点和时空运行约束描述为模型的约束条件;设计模型仿真演化的运行规则;天车分配规则用于对天车调运任务分配天车,冲突消解规则用于对仿真过程天车执行任务时的时间或空间约束不满足而出现冲突的处理,任务结束规则用于当前任务完成后天车属性的改变。以某炼钢厂板坯连铸跨的天车完成生产作业计划任务的天车调度实例,检验模型的可靠性和正确性。

1 天车调度仿真模型

仿真是通过建立模型来研究分析对象系统的一种手段,通过对实际环境建模模拟实际系统,以及解析模型无法描述的因素,从而实现对系统性能、状态方面的分析,提供系统测试的手段,为决策提供支持^[11]。仿真方法可避开对存在 NP 难题的调度问题进行理论分析的困难,而成为一种解决复杂调度问题的实用和有效的方法。针对钢铁企业生产调度的仿真方法包括:基于排队论的模型方法^[12],Petri 网模型方法^[13-14],元胞自动机方法等^[15]。但由于天车运行过程中时空约束条件的复杂多变,使得排队论和 Petri 网模型难以应用。

1.1 炼钢厂天车调度特点

钢铁生产是典型的离散-连续相混合的作业流程,被加工的高温铁水或者钢水因钢种不同而具有不同的工艺路线。在炼钢厂中,凡是物流经过的地方,一般都在跨内架设天车运行的轨道,天车轨道一旦确定,其运行范围就限制在轨道平面范围内。炼钢厂一般包括转炉-精炼-连铸 3 工序,对应的天车运输跨包括铁水预处理跨、转炉原料跨和转炉-铸机跨,各跨中的天车运输特点类似,笔者以转炉-铸机跨为对象进行研究。如图 1 所示为炼钢厂转炉-铸机跨的主要设备布局示意图,该跨的转炉炼钢钢水经过精炼后,吊运至铸机连续浇铸,以获得满足成分和性能要求的铸坯。B1、B2 为转炉,即出钢工位, A、B、C 共 3 台天车可在跨上左右行驶;LF1 为精炼工位,CC1 和 CC2 为板坯连铸工位,辅助工位 1、2、3 包括空包堆放,空罐预热和扒渣处理等辅助工作。跨中天车需要完成的最主要作业任务是基于炉次任务生成的天车吊运任务。

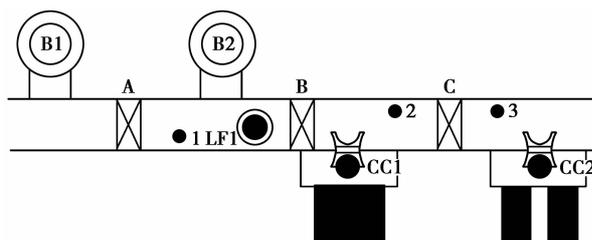


图 1 转炉-铸机跨主要设备布局图

B1, B2: 转炉; A, B, C: 天车; LF1: 炉外精炼工位;
CC1, CC2: 板坯铸机; 1, 2, 3: 辅助工位

根据炉次任务,若某时刻该车间 B1 转炉有一炉次 H 需要吊运至 2[#] 铸机(CC2)连续浇铸,则一种可

行的作业过程为:1)指派空闲天车 A,让 A 空行至 B1 位置;2)天车吊起装有钢水的钢包,向右运行至 LF1 工位;3)精炼完成后,指派天车 B 将炉次 H 由 LF1 运送至 CC1;4)浇铸完成后,指派天车 C 将铸机上空罐运送至空包堆放工位。因此,对于炉次 H 从转炉炼钢结束至铸机浇铸完毕这一生产任务,在转炉-铸机跨上对应的天车吊运任务包括:B1=》LF1 的重罐钢水运输,LF1=》CC1 的重罐钢水运输,以及 CC1=》2 工位的空罐运输任务。

炼钢厂天车调度是典型的多机多任务作业过程。其多机体现在:在天车作业跨上,同一炉次的吊运任务可由多台天车(如图 1 中 A、B、C 天车)完成,任务与天车之间存在选择性;多任务体现在:天车吊运任务主要来源于炉次任务,对某一生产任务存在多个可行天车任务与之对应,天车任务与炉次任务之间是多对多的映射关系。

炼钢厂天车运行存在如下特点:1)各天车空间排列顺序相对固定,每台天车在运行过程中都不能越过两边的天车;2)天车之间以及天车和工位之间存在空间约束,两台天车要避免因空间位置过近而产生碰撞,并且任务的起点、终点存在位置限制;3)天车运行存在时间冲突,即不能在同一时刻给天车安排两个任务;4)天车运行存在任务冲突,即一个天车处于任务状态同时,不能安排新的任务;5)重罐作业任务不可打断,天车在运输钢水时,应保证该运输任务优先完成。

1.2 天车调度仿真模型

天车调度过程中的任务及其定义如下:

生产计划任务(炉次任务):由生产作业计划确定的炉次在工序上的工位选择以及开始作业时间和终止作业时间。如图 1 中,可由生产作业计划获得的炉次 H 在转炉工序上的生产计划任务为:工位选择(转炉 1(B1)),作业开始时间 T1,作业结束时间 T2。生产计划任务是进行天车调度的基础。假设生产作业计划已知。

天车吊运任务:为满足炉次任务而确定的该炉次在跨间的天车起吊、运行和下降的任务。如由图 1 中 H 炉次计划确定在转炉上生产计划 P1,在铸机上生产计划 P2,则由 P1,P2 可确定炉次 H 在转炉-铸机跨间的天车吊运任务包括,B1=》LF1,LF1=》CC1。天车吊运任务是天车调度的目标。

天车运行任务:在天车吊运任务约束下天车的任务分配以及天车起吊、下降时间。除天车吊运任务对应的运行任务外,还包括天车空载运行,被动运行以及铸机浇铸完成后的空罐运行。

天车调度仿真模型如下:

$$\Omega = \{\omega_{m,n,\omega,t} \mid m \in M, n \in N, \omega \in W, t \in T\}, \quad (1)$$

$$R_{\text{crane}} = \{P_m \mid P_m \leq L_{\text{span}}, |p_m - p_{m'}| > L_{\text{safe}}\}, \quad (2)$$

$$F = \text{Min}\{\sum_{\omega=1}^{\omega_{\text{complete}}} \sum_{m=1}^M \Delta s_{\text{passivity}}\}, \quad (3)$$

式中: Ω 为由炉次计划集合确定的天车吊运任务的集合,称为一套天车调度计划; ω 为单个天车吊运任务,即一条调度任务; m 为任务天车; n 为待吊运物料; ω 为工位点; $P_m, P_{m'}$ 为两天车 m 和 m' 位置; L_{span} 为跨长度; L_{safe} 为天车间安全距离; $\Delta s_{\text{passivity}}$ 为某任务完成时一台天车的被动路程。相关变量受到的约束为:

天车集 $M = \{m \mid m \in [1, m_{\text{max}}]\}$;

物料集 $N = \{n \mid n \in [1, n_{\text{max}}]\}$;

工位集 $W = \{\omega \mid \omega \in [1, \omega_{\text{max}}]\}$ 。

一个天车运行任务有起始 ω_1 和目的 ω_2 两个工位,需满足 $\omega_1 \neq \omega_2$;时间集 $T = \{t \mid t_{\text{begin}} < t < t_{\text{end}}\}$, t_{end} 等于物料 n 在目的工位 ω_2 开始作业时间,开始时间 t_{begin} 满足 $t_{\text{planBegin}} \leq t_{\text{begin}} \leq t_{\text{latestBegin}}$, $t_{\text{planBegin}}$ 等于物料 n 在起始工位作业结束时间, $t_{\text{latestBegin}}$ 等于 t_{end} 减去天车在 $\omega_1 \omega_2$ 最快运输时间,式(1)表明天车调度即分配资源完成任务的过程。公式(2)表示天车在运行中受到一定的空间约束:其位置不能超过跨的长度公式,相邻天车距离必须大于安全距离。公式(3)表示天车调度仿真模型的目标函数 F 由所有天车的被动路程之和构成。

1.3 天车调度仿真流程

天车调度仿真模型演化流程如图 2 所示,包括仿真输入、仿真运行和仿真输出 3 部分。仿真输入完成模型的初始化以及天车作业计划的输入,然后在天车运行规则的约束下,仿真模型随仿真时钟向前推进进行模拟,最后输出仿真结果。仿真模型的输入包括天车任务集和天车序列。天车任务集是从车间生产作业计划所生成的炉次任务集合,并将炉次任务转换为天车吊运任务。天车序列为天车吊运任务所分配的天车号。对于某一确定的炉次任务集合,可通过对多个天车序列的仿真演化运行,以确定优化的天车调度方案。

天车在规则约束下的仿真运行,即可获得满足炉次任务的所有天车运行任务。定义炉次任务类、天车任务类、工位类和天车类来表征天车调度过程中的属性关系,如图 3 所示。

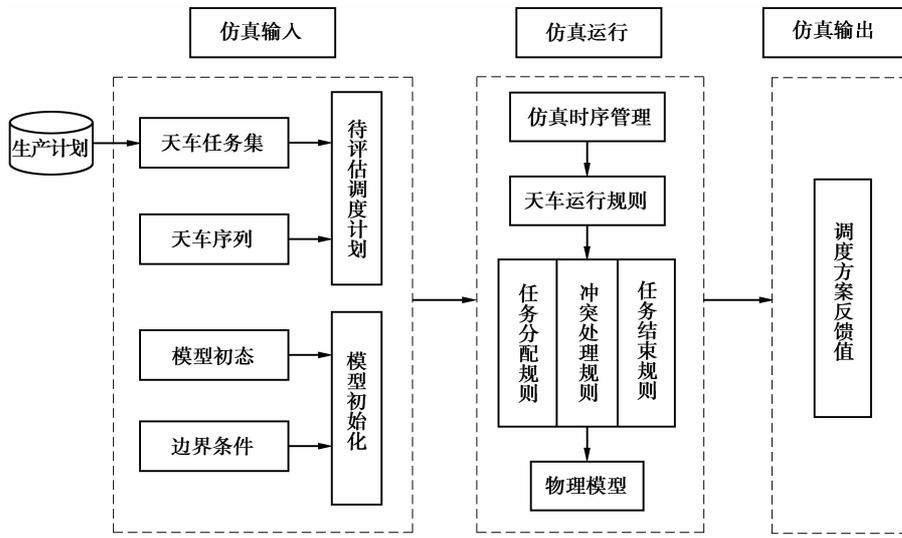


图 2 天车调度仿真演化流程

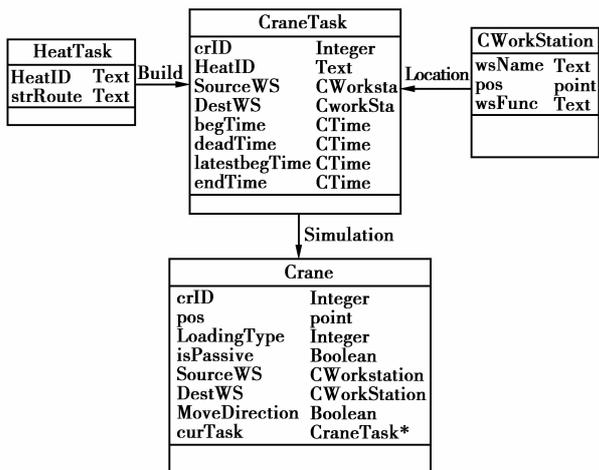


图 3 天车调度属性关系图

炉次任务 HeatTask 包括某炉次从入厂直至铸机浇铸完毕,在各工序上的工位选择以及在工位上的开始时间和结束时间。天车任务类 CraneTask 包括炉次号,天车序列确定的天车号,起始工位和结束工位,以及在炉次任务约束下的天车调度时间:开始时间 begTime,最迟开始时间 latestbegTime,最迟结束时间 deadTime,结束 endTime。开始时间为炉次在开始工位的计划结束时间,最迟开始时间为炉次在结束工位计划开始时间减去运输时间,最迟结束时间是炉次在目标工位的计划开始时间。结束时间即通过仿真运行获得任务执行完毕的时间。工位类表征工位属性:工位名称、坐标和功能等。天车类与天车对应,用于设定仿真过程中当前时刻天车状态,包括位置(pos)、吊运属性>LoadingType)、被动运输(isPassive)、起始工位(SourceWS)、目标工位

(DestWS)、运动方向(MoveDirection)、当前天车任务(curTask)。

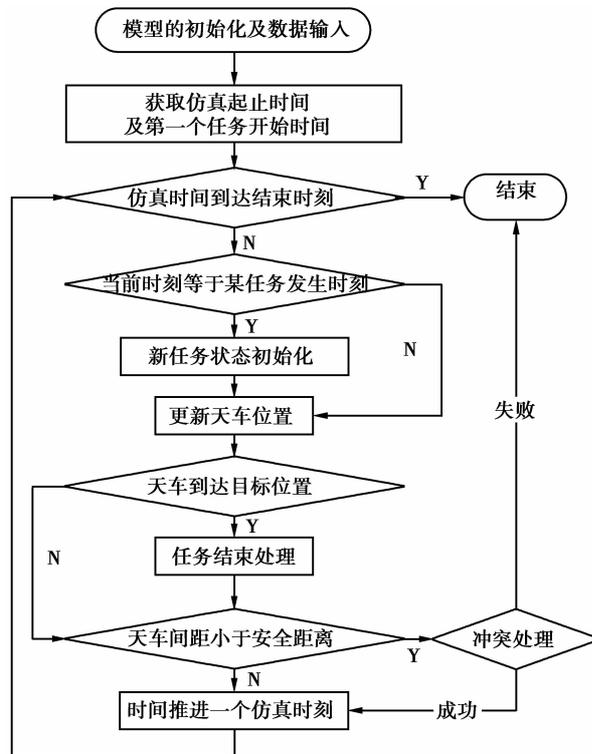


图 4 仿真演化图

仿真演化如图 4 所示,“模型初始化”用于设定天车和工位的初始化信息,如天车的位置、优先级、速率、工位的空间位置等。仿真模型根据待评估计划制定的任务与天车的匹配方式进行模拟运行。“新任务状态初始化”即图 2 仿真模型系统结构中的“任务分配规则”下为天车设置任务属性,该过程完

成了任务与天车资源的匹配,为任务的执行提供了前置条件。“天车到达目标位置”后,进行“任务结束处理”,即在图 2 中的“任务结束规则”下给相应天车解除任务属性,这表示一条天车吊运任务顺利的执行完毕,此时需要赋予天车初始化的信息。“冲突处理”在相邻天车距离小于安全距离时触发,依据“冲突处理规则”而执行。仿真运行结束后即获得当前天车调度计划的评价值。

2 仿真模型运行规则

仿真模型运行规则包括任务分配规则,冲突消解规则和任务结束规则。

任务分配规则实现任务与资源的匹配。天车吊运任务的产生如图 3 中 HeatTask 和 CraneTask 关系所示。天车吊运任务与天车序列实现了任务与天车的一一对应关系,但在仿真过程运行过程中,需要根据当前时刻系统状态,给天车赋吊运任务。匹配流程如下。

Step1: 获取当前时刻触发的吊运计划和关联的天车状态,判断天车的负载类型,如果是重车或轻车,则当前时刻任务和天车不匹配,等待进入下一仿真时刻。否则进入 Step2。

Step2: 如果天车不在开始工位,则生成一个临时空载轻车任务,等待进入下一仿真时刻。否则进入 Step3。

Step3: 将吊运任务与天车关联,修改 CraneTask 和 Crane 类的属性,等待进入下一仿真时刻。

冲突处理规则采用可变的实时任务优先级。天车存在重车、轻车、空车 3 种负载,主动、被动 2 种运动关系,以及运行、停止状态。各任务的优先级如表 1 所示。

轻车和空车可以被驱动而重车因其负载大,设置其具备最高优先级不能被驱动。类别 5 和 6 的任务优先级是可变的,例如停止的空车优先级是 3,当

它被一台重车驱动时,其优先级提升为 0,而当它被一台轻车驱动时,其优先级提升为 1。这样可以防止低优先级的天车在多次冲突处理中频繁的更改运输状态。天车因其关联任务的优先级而在冲突处理中处于不同的地位,当任务完成,天车与任务分离后,天车优先级被置为最低。具体处理过程是,当两台天车距离小于安全距离时,仿真模型进入冲突处理流程,低级别的天车经过冲突处理后与高级别天车的运行状态(速度、方向)保持一致,同时,两台天车具有相同的较高优先级且互相为彼此的关联天车。优先级较高的天车到达目的工位,其关联天车立即恢复冲突处理之前的运行状态和优先级。

表 1 天车任务分类及优先级

类别	负载	主动或被动	运行或停止	优先级
1	重车	主动	运行	0
2	轻车	主动	运行	1
3	空车	主动	运行	2
4	空车	主动/被动	停止	3
5	轻车	被动	运行	0 或 1
6	空车	被动	运行	0 或 1 或 2

任务结束规则在吊运任务完成后,实现天车与关联的任务分离,同时把天车相关属性设置为初始状态,直到给其分配下个任务。其规则如下:1)根据天车关联任务属性在天车调度计划中找到相应的调度任务;2)把当前时间写入吊运任务的结束时间;3)设置天车相关属性为初始化状态,设置天车关联任务为空。

3 模型测试

利用 Visual Studio 2005 C++ 建立钢厂炼钢-连铸车间天车调度仿真程序,并将其应用于某钢厂板坯连铸作业跨,该跨布局如图 5 所示,其中 1、2、3 号转炉钢水通过轨道运送至转盘 1,2,3。

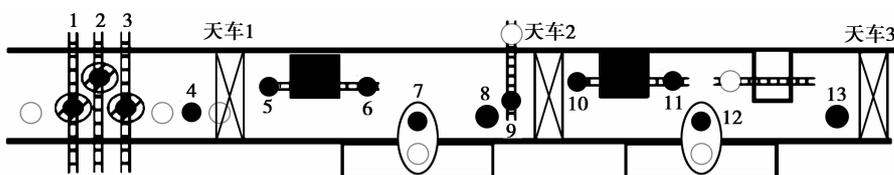


图 5 板坯连铸作业跨生产布局

1. 转盘 1; 2. 转盘 2; 3. 转盘 3; 4. 清罐工位 1; 5, 6. LF 工位 1; 7. 板坯工位 1; 8. 清罐工位 2; 9. RH 工位; 10, 11. LF 工位 2; 12. 板坯工位 2; 13. 清罐工位 3

以某天8 h(16:00~24:00)生产作业计划(见表2)14个炉次为测试数据,对模型进行验证。

生产作业计划对应的天车吊运任务共46个,设

天车编码为1,2,3(12132311 21233223 13322233 21211122 13122122 112311)为吊运任务的天车分配序列,仿真计算结果如图6。

表2 生产作业计划(炉次计划)

炉次号	钢种	转炉	LF	RH	铸机
117737	Stw22	转炉 2 15:33~16:04	LF2 16:59~17:31	—	连铸 2 17:35~17:37
117742	SS330	转炉 3 23:01~23:33	LF1 00:39~1:12	RH1 01:40~01:56	连铸 1 02:04~02:36
117743	SS330	转炉 2 20:48~21:29	LF1 22:22~22:32	RH1 22:42~22:52	连铸 1 23:18~23:59
117744	SS330	转炉 2 19:05~19:43	LF1 20:17~20:27	RH1 20:45~20:55	连铸 1 21:08~21:44
117817	Q235B	转炉 1 17:48~18:25	LF1 19:04~19:17	—	连铸 2 19:29~20:13
117818	Q235B	转炉 1 17:07~17:36	LF1 18:04~18:30	—	连铸 1 18:35~19:14
286267	YQ450	转炉 2 21:59~22:31	LF1 23:12~00:03	—	连铸 1 00:09~00:55
286268	YQ450	转炉 2 19:57~20:34	LF1 21:04~21:36	—	连铸 1 21:45~22:28
286269	YQ450	转炉 2 18:14~18:52	LF1 19:28~19:44	—	连铸 1 19:49~20:22
286277	37Mn2	转炉 3 16:19~17:01	LF2 17:35~18:16	—	连铸 2 18:20~18:55
286302	35	转炉 2 22:45~23:25	LF1 00:06~00:32	RH1 00:41~1:11	连铸 1 01:20~02:02
286303	35	转炉 1 20:04~20:43	LF1 21:38~22:20	—	连铸 1 22:29~23:17
286304	35	转炉 3 18:40~19:14	LF1 19:45~20:15	—	连铸 1 20:23~21:07
286306	35	转炉 2 17:28~18:04	LF1 18:35~19:03	—	连铸 1 19:15~19:48

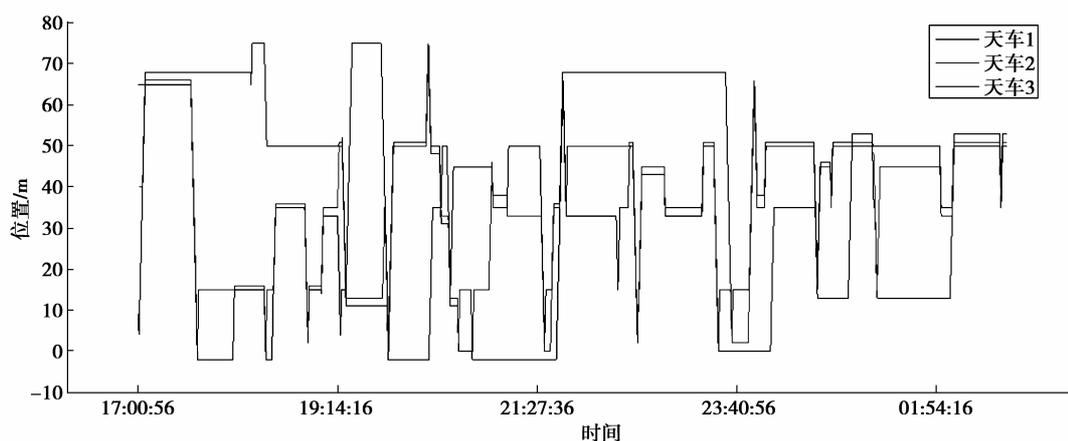


图6 天车运行轨迹图

图6横坐标为时间,纵坐标为空间位置。1[#]天车、2[#]天车、3[#]天车在生产过程中相对位置始终保持不变,运行轨迹没有交叉,满足天车运行空间约束。表3为1[#]天车相关的部分吊运任务,与表2生产计划数据相比较,如炉次286306从转炉至LF的吊运过程,开始时间大于转炉冶炼结束时间,吊运结束时间小于LF精炼开始时间,满足生产作业计划时间约束。该调度方案能够满足多机多任务的天车调度时间、空间约束。因此,该仿真模型应用于炼钢厂板坯连铸跨,进行天车调度模拟是可行的。

表3 与吊运相关的1[#]天车部分运输任务

炉次号	开始时间	结束时间	开始工位	结束工位
286277	17:01:24	17:05:24	转炉 3	LF2
286306	18:04:16	18:05:04	转炉 2	LF1
117818	18:31:08	18:32:32	LF1	连铸 1
286303	22:21:12	22:22:28	LF1	连铸 1
286267	22:34:12	22:35:00	转炉 2	LF1
286267	0:04:00	0:05:16	LF1	连铸 1

4 结 语

笔者分析了炼钢厂车间天车调度多机多任务特点,建立了基于时间约束与空间约束的天车仿真模型,将天车运行过程中的约束关系转化为任务分配,冲突消解和任务结束等演化规则,用于指导仿真模型的运行,从而获得在生产作业计划方案下的天车作业调度方案。在某炼钢厂板坯连铸跨的测试表明,该方法满足生产中时空约束与生产计划限制,能够为生产计划调度提供指导。通过仿真模型可实现炼钢厂天车调度方案的求解,从而避免理论求解的困难。但是仿真方法缺少对调度方案的优化,因此,下一步可考虑将仿真方法与高效的智能优化方法结合,以快速生成优化的调度方案;同时,炼钢厂生产是一个动态变化的过程,存在多种扰动,可通过建立天车运行重计划与重调度模型,实现实时在线的炼钢厂车间天车调度。

参考文献:

- [1] 刘青,田乃媛,殷瑞钰. 炼钢厂的运行控制[J]. 钢铁, 2003,38(9):14-18.
LIU QING, TIAN NAI-YUAN, YIN RUI-YU. Running control for steelmaking workshop[J]. Iron and Steel, 2003,38(9):14-18.
- [2] 郑忠,徐乐,高小强. 基于元胞自动机的车间天车调度仿真模型[J]. 系统工程理论与实践, 2008, 28(2): 137-142.
ZHENG ZHONG, XU LE, GAO XIAO-QIANG. Simulation model of crane scheduling in workshop based on cellular automata[J]. Systems Engineering Theory and Practice, 2008,28(2):137-142.
- [3] 徐乐. 基于元胞自动机的钢厂天车调度仿真方法研究[D]. 重庆:重庆大学, 2008.
- [4] JAIN A. S, MEERAN S. Deterministic job-shop scheduling: past, present and future [J]. European Journal of Operational Research, 1999, 113(2): 390-434.
- [5] TANG L, LIU J, RONG A, et al. A review of planning and scheduling systems and methods for integrated steel production [J]. European Journal of Operational Research, 2001,133(1):1-20.
- [6] TAMAKI H, MURAO H, KITAMURA S. Simulation-based optimization model and metaheuristic solution of multiple crane scheduling problems[C] // 2004 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, October 10-13, 2004, The Hague, Netherlands. [S. l.]:IEEE, [2005-02-07]:1469-1472.
- [7] GE Y, YIN Y. Crane scheduling with time windows in circuit board production lines[J]. International Journal of Production Research, 1995,33(5):1187-1199.
- [8] MATSUO H, SHANG J S, SULLIVAN R S. A crane scheduling problem in a computer-integrated manufacturing environment[J]. Management Science, 1991,37(5):159-172.
- [9] TANG L X, XIE X, LIU J Y. Scheduling of a single crane in batch annealing process [J]. Computer and Operational Research, 2009,36(10):1853-2865.
- [10] 刘青,田乃媛,王英群,等. 天车调度在优化钢厂物流管制中的重要作用[J]. 北京科技大学学报, 1998,20(1): 36-40.
LIU QING, TIAN NAI-YUAN, WANG YING-QUN, et al. Important role of crane schedule in optimizing mass flow control of steel plant [J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 1998, 20(1):36-40.
- [11] 董绍华,周晓光,赵宁,等. 物流系统仿真[M]. 北京:北京邮电大学出版社, 2008.
- [12] 孟玉珂. 排队论基础及应用[M]. 上海:同济大学出版社, 1989.
- [13] 李霄峰,徐立云,邵惠鹤,等. 柔性炼钢连铸仿真调度系统及其关键技术[J]. 系统仿真学报, 2002, 14(2): 207-210.
LI XIAO-FENG, XU LI-YUN, SHAO HUI-HE, et al. Flexible simulating and scheduling system for steel-making and continuous-casting process and critical problems [J]. Journal of System Simulation, 2002, 14(2): 207-210.
- [14] JAIN S, CHAN S. Experiences with backward simulation based approach for lot release planning[C] // The 29th Conference on Winter Simulation, December 7-10, 1997, Atlanta, USA. New York: ACM Press; 773-780.
- [15] 郑忠,何腊梅,高小强. 炼钢生产物流系统仿真的元胞自动机模型[J]. 钢铁, 2004,39(11):75-78.
ZHENG ZHONG, HE LA-MEI, GAO XIAO-QIANG. Cellular automata model for simulating logistics systems in steelmaking process [J]. Iron and Steel, 2004, 39(11): 75-78.