

传搁时间约束下的运输与批处理机生产协调调度

宫 华[†], 张二梅, 刘 芳

(沈阳理工大学 理学院, 沈阳 110159)

摘 要: 针对炼钢模铸系统钢锭高温运作的特点, 提出带有传搁时间约束的生产前运输与批处理机生产协调的调度问题. 工件的加工时间依赖于其传搁时间, 每批工件的加工时间为该批工件中加工时间最大值. 目标函数为最小化总完工时间与生产费用的线性组合. 通过复杂性分析, 证明该问题是强 NP 难解问题. 建立混合整数规划模型, 基于动态规划提出两种特殊情况的最优算法, 设计原问题的启发式算法并进行最坏情况下性能比分析. 实验仿真结果验证了所提出启发式算法的有效性与稳定性.

关键词: 批处理机; 运输; 协调; 传搁时间

中图分类号: TP301 **文献标志码:** A

Coordinated scheduling of transportation and production on batching-machine with tracking time constraint

GONG Hua[†], ZHANG Er-mei, LIU Fang

(School of Science, Shenyang Ligong University, Shenyang 110159, China)

Abstract: For the feature of the steelmaking-molding with high temperature operations in the iron and steel industry, a coordinated scheduling problem with transportation before production on a single batching machine under the tracking time constraint is addressed in this paper. The processing time of a job is dependent on its tracking time. The processing time of a batch is the largest processing time among the jobs assigned to this batch. The objective is to minimize the total completion time and the total production cost. A mixed integer programming(MIP) model with production and transportation is developed. It is proved that the problem is strongly NP-hard through complexity analysis. Based on dynamic programming, optimal algorithms for two special cases are derived, and a heuristic algorithm is presented with its worst-case performance analysis. The simulation results show the effectiveness and stability of the heuristic algorithm.

Keywords: batching machine; transportation; coordination; tracking time

0 引 言

钢铁企业是国民经济的支柱产业,其生产工艺复杂、能源消耗大、带有高温的物件连续作业、物流与生产呈交叉网状结构. 合理地进行生产物流优化是保证钢铁企业生产的连续性与稳定性的前提,也是缩短生产周期、降低物耗和能耗的关键所在. 由钢到材的多阶段生产流程包含两个系统: 模铸系统和连铸系统. 对于大型的锻造件、夹心钢锭等特殊钢种, 必须采用模铸工艺进行生产, 流程如图 1 所示. 在转炉、精炼炉所得到的钢水经过钢包等浇注设备, 注入放在台车上的模具中静置, 以待钢液在锭模内凝固. 台车

将凝固的钢水送至脱模车间脱模后形成钢锭. 带有余温的钢锭被运送到初轧车间均热炉中加热后进行初轧.

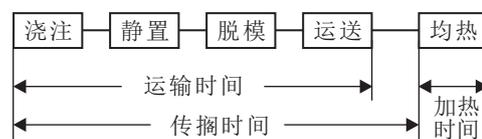


图 1 模铸-均热流程

钢锭在台车上的操作包含浇注、静置、凝固、脱模和运送过程, 钢锭的运输时间指其占用台车的时间. 钢锭的传搁时间定义为从浇注完成到均热开始

收稿日期: 2016-04-22; 修回日期: 2016-09-06.

基金项目: 国家自然科学基金项目(71101097); 辽宁省“百千万人才工程”培养项目(2014921043); 辽宁省高校优秀人才支持计划项目(LR2015056); 辽宁省先进制造技术与装备重点实验室开放基金课题(4771004kfs28).

作者简介: 宫华(1976—), 女, 教授, 博士, 从事组合优化、生产调度等研究; 张二梅(1991—), 女, 硕士生, 从事控制理论与优化算法的研究.

[†]通讯作者. E-mail: gonghua1018@sina.com

的时间间隔,包含运输时间和到达均热炉后的等待时间.同一钢级的钢锭可以放在同一批进行加热,加热炉根据传搁时间设定两种热制度:热钢锭和冷钢锭.因此,钢锭的加热时间是关于传搁时间的一个分段增函数.如果传搁时间超过限定值,则热钢锭温度下降到冷钢锭,加热时间增加.一方面,若考虑减少加热批次,将尽可能多的钢锭放在一批中加热,则可能会导致热钢锭不能被及时加热,变成冷钢锭;另一方面,为减少钢锭的等待时间,需尽早处理热钢锭,这将会增加加热批次,导致能源消耗费用的增加.因此,模铸系统需要优化钢锭的生产调度及物流管理,以此平衡库存水平和能源消耗费用.

基于上述炼钢模铸生产特点,本文以最小化库存水平与生产成本为目标,提炼出带有传搁时间限制的生产前运输与批处理机生产的协调调度问题.因一个台车上的多个钢锭需同时进行加工,故将同一台车上的所有钢锭看成一个工件.本文仅考虑同钢级的钢锭调度问题,不同规格钢锭,运输时间不同.将可同时加热多个钢锭的均热炉看成有能力限制的批处理机,工件在机器上的加工时间依赖于其传搁时间是否超过限定时间.

本文所研究的问题描述如下:初始时刻工件 $\{1, 2, \dots, n\}$ 位于存储区等待台车运输到下游批处理机生产.台车数量为1,能力为1.台车运送工件至批处理机后立刻返回存储区,工件 i 的运输时间为 t_i ,台车返回时间为 t .运输一旦开始就不能停止,直至所有工件完成运输.批处理机能力为 c ,一批的加工时间为该批中工件加工时间的最大值.工件的传搁时间 e_i 包含其运输时间和批处理机前的等待时间.若工件的传搁时间超过限定值 E ,则称之为冷工件,加热时间为 p_c ;否则为热工件,加热时间为 p_h .加工一旦开始就不允许中断,每生产一批工件需要一定的费用.目标函数为最小化总完工时间与生产费用的线性组合.为便于描述,将本文所研究的问题记为T-P.

目前,生产运输协调优化已成为生产物流管理领域的重要研究课题.根据生产与运输的位置,可将生产运输协调调度问题分为三类:生产前运输协调,半成品生产间运输协调^[4]和生产后成品运输协调^[5-7].对于生产前运输与生产的协调调度问题,Li等^[8]在单机生产环境下,研究了原材料以及成品的运输与生产的协调问题;Tang等^[9]从钢锭在均热炉加热的前后生产过程提炼出了批处理机上生产与生产前后两阶段运输的协调调度问题;Tang等^[10]从彩涂板生产过程中分析工件生产前的等待时间限制约束,

提出了一类生产前原料运输与单机生产的协调调度问题.Tang等^[11]提出了半成品运输与批处理机生产协调问题,以最小化最大完工时间与生产费用为多目标函数进行优化.

在现有文献中,涉及批处理机生产与生产前运输协调的研究较为有限,且生产运输调度协调大多涉及以时间为准则的单目标函数.本文在文献[11]的基础上研究半成品运输与批处理机生产协调问题,目标函数为最小化总完工时间与生产费用的线性组合,在建立混合整数规划模型基础上设计特殊情况的最优算法,提出一种有效的启发式算法并进行性能比分析.

1 MIP模型及复杂性分析

本文所使用的符号如下.

i :工件索引编号, $i = 1, 2, \dots, n$.

j :位置索引编号, $j = 1, 2, \dots, n$.

k :批数索引编号, $k = 1, 2, \dots, n$ (k 可能从某项开始为空批).

$\alpha(x)$:生产费用,是关于批数 x 的增函数.

λ :权重系数, $0 \leq \lambda \leq 1$.

决策变量如下.

B_k :第 k 批.

x_{ij} :为1表示工件 i 被安排在第 j 个位置运输,否则为0.

y_{ik} :为1表示工件 i 被安排在第 k 批中生产,否则为0.

z_k :为1表示第 k 批被调度,否则为0.

d_i :工件 i 从存储区出发的时间.

e_i :工件 i 的传搁时间.

p_i :工件 i 的加工时间, $p_i = \begin{cases} p_h, & e_i < E; \\ p_c, & e_i \geq E. \end{cases}$

s_k :第 k 批在批处理机上的开始时间.

P_k :第 k 批的加工时间, $P_k = \max_{i \in B_k} \{p_i\}$.

C_k :第 k 批在批处理机上的完成时间.

MIP模型为

$$\min \lambda \sum_{k=1}^n \sum_{i=1}^n y_{ik} C_k + (1 - \lambda) \alpha \left(\sum_{k=1}^n z_k \right); \quad (1)$$

$$\text{s.t.} \sum_{i=1}^n x_{ij} = 1, \quad j = 1, 2, \dots, n; \quad (2)$$

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} = 1, \quad i = 1, 2, \dots, n; \quad (3)$$

$$\sum_{i=1}^n y_{ik} \leq cz_k, \quad k = 1, 2, \dots, n; \quad (4)$$

$$s_k + z_k P_k = C_k, \quad k = 1, 2, \dots, n; \quad (5)$$

$$p_i = \begin{cases} p_h, & e_i < E; \\ p_c, & e_i \geq E; \end{cases} \quad i = 1, 2, \dots, n; \quad (6)$$

$$P_k = \max_i \{p_i y_{ik}\}, \quad k = 1, 2, \dots, n; \quad (7)$$

$$z_k - z_{k+1} \geq 0, \quad k = 1, 2, \dots, n; \quad (8)$$

$$s_k \geq (d_i + t_i) y_{ik}, \quad i, k = 1, 2, \dots, n; \quad (9)$$

$$d_i = \sum_{q=1}^{i-1} \sum_{l=1}^n x_{lq} (t_l + t), \quad i = 1, 2, \dots, n; \quad (10)$$

$$e_i = s_k y_{ik} - d_i \geq 0, \quad i = 1, 2, \dots, n; \quad (11)$$

$$C_{k+1} \geq C_k, \quad k = 1, 2, \dots, n; \quad (12)$$

$$x_{ij}, y_{ik}, z_k \in \{0, 1\}, \quad i, j, k = 1, 2, \dots, n. \quad (13)$$

其中:式(1)表示目标函数,为总完工时间与生产费用;式(2)表示台车一次只能运输一个工件;式(3)表示一个工件只能被调度一次;式(4)表示批处理机的能力限制;式(5)表示批的完成时间及开始时间的关系;式(6)、(7)分别表示工件及批的加工时间;式(8)表示批的决策;式(9)和(10)表示批的开始时间与工件运输的开始时间的关系;式(11)表示工件传搁时间与所在批的开始时间的关系;式(12)表示每批的完成时间;式(13)表示决策变量的约束。

下面通过三划分问题(强NP难解问题)的多项式时间归约进行原问题复杂性分析。

三划分问题:给定一个含有 $3h$ 个元素的集合 $H = \{a_1, a_2, \dots, a_{3h}\}$ 以及正整数 a ,且满足 $a/4 < a_j < a/2, \sum_{j=1}^{3h} a_j = ha$,问是否存在 h 个不相交的含有3个元素的子集 H_1, H_2, \dots, H_h ,使得 $\sum_{a_j \in H_i} a_j = a, i = 1, 2, \dots, h$ 。

定理1 问题T-P为强NP-难解问题。

证明 下面构造三划分问题T-P的实例:工件个数 $n = 3h + 3$,权重系数 $\lambda = 1/2$,传搁时间限定值 $E = a$,批处理机能力 $c = 3$ 。

运输时间: $t = 0; t_j = a_j, j = 1, 2, \dots, 3h; t_{3h+1} = t_{3h+2} = t_{3h+3} = 0$ 。

加工时间: $p_h = a, p_c = (h + 1)a$ 。

生产费用: $\alpha(x) = 3x(x - h)(x + 1)a/2$ 。

阈值: $y = 3(h + 1)(h + 2)a/2$ 。

只需证明当且仅当三划分问题的实例有解时所构造的问题的实例才有解。可以看出:1)批处理机能力为3,则 $3h + 3$ 个工件至少需要 $h + 1$ 批。不妨取批数 $x = h + 2$,此时生产费用为 y ,目标值超过 y 。因此批数必为 $h + 1$,且每批均包含3个工件,为满批加工。2)

由目标值及生产费用可推出,总完工时间为 y ,即所有工件均为热工件,传搁时间均不超过限定值,且批处理机从0时刻开始无空闲时间。

若三划分问题有解,则存在问题T-P的最优调度满足其目标值不超过阈值 y 。给定三划分问题的一个解 H_1, H_2, \dots, H_h ,从0时刻开始:1)台车依次运输集合 H_1, H_2, \dots, H_h 中的工件;2)批处理机依次加工工件 $3h + 1, 3h + 2, 3h + 3, H_1, H_2, \dots, H_h$ 。此时,每批工件加工时间均为常数 a ,故目标值为 y 。

反之,假设该问题实例存在一个不超过阈值 y 的调度,下面证明三划分问题实例有解。由于从0时刻开始批处理机无空闲,第1批包含工件 $3h + 1, 3h + 2, 3h + 3$,该批完工时间为 a 。由于所有工件均不能出现传搁时间超过限定值的情况,对于其余 h 批,必有 $\sum_{i \in B_l} t_i \leq a, l = 2, \dots, h + 1$ 。否则,至少有一个工件为冷工件,此时目标值必大于 y 。若 $\sum_{i \in B_l} t_i < a$,则一定存在某一批工件 B_k ,满足 $\sum_{i \in B_k} t_i > a, l \neq k$,与工件的传搁时间均不超过限定值相矛盾。因此, $\sum_{i \in B_l} t_i = a, l = 2, \dots, h + 1$,则有 B_2, B_3, \dots, B_{h+1} 为三划分实例的解。□

上述复杂性表明不可能在多项式时间内找到NP难解问题的最优算法,因而本文研究特殊情况的最优算法以及设计一般情况下的有效近似算法。

2 特殊情况的最优算法

本节研究生产中常见的两种特殊情况,并设计出特殊情况的最优算法。

情况1:工件顺序给定,企业按照订单指定顺序或者下游生产需求顺序安排生产。

情况2:忽略传搁时间限制,全部是热工件或冷工件,将其简化为加工时间为常数。

2.1 工件顺序给定

当工件的运输及生产顺序给定时,生产物流调度不需要进行工件的排序,仅需考虑如何在批处理机上进行分批决策。下述动态规划可以找到给定工件顺序情况下的最优调度,该算法也是后续启发式设计的基础。

算法DP1.

Step 1: 根据给定工件顺序 $\{1, 2, \dots, n\}$,计算工件从存储区的出发时间 $d_1 = 0$,且 $d_{i+1} = \sum_{q=1}^i (t_q + t), 1 \leq i \leq n - 1$ 。

Step 2: 定义 $f(i, j, k)$ 为调度前 $1, 2, \dots, j$ 个工件

的总完工时间最小值,且当前最后一批 B_k 包含工件 $i+1, \dots, j$, 满足 $0 < j-i \leq c$, 且 $\lceil j/c \rceil \leq k \leq j \leq n$.

Step 3: 初始条件为 $f(0, 0, 0) = 0$.

Step 4: 递归关系为

$$f(i, j, k) = \min\{f(l, i, k-1) + (j-i)(s_k + P_k) \mid 0 < i-l \leq c, \lceil i/c \rceil \leq k-1 \leq i\}.$$

其中

$$s_k = \begin{cases} d_j + t_j, & k = 1; \\ \max\{s_{k-1} + P_{k-1}, d_j + t_j\}, & k > 1. \end{cases}$$

$$P_k = \begin{cases} p_h, & s_k - d_{i+1} < E; \\ p_c, & s_k - d_{i+1} \geq E. \end{cases}$$

Step 5: 计算最优值

$$F(n) = \min\{\lambda f(i, n, k) + (1-\lambda)\alpha(k) \mid 0 < n-i \leq c, \lceil n/c \rceil \leq k \leq n\}.$$

定理2 算法DP1可以在 $O(cn^2)$ 时间内找到问题T-P工件顺序给定时的最优调度.

证明 由于工件顺序给定,从0时刻开始,台车开始运输,机器可利用,则第1批工件 $\{1, 2, \dots, j\}$ 在机器上的开始时间为工件 j 到达机器的时间,即 $s_1 = d_j + t_j$. 当前批 B_k 中,传搁时间满足 $e_{i+1} \geq e_{i+2} \geq \dots \geq e_j$, 工件 $i+1$ 的传搁时间 $e_{i+1} = s_k - d_{i+1}$ 是否超过限定值决定了该批工件在批处理机上的加工时间 P_k . 目标函数的增加量为当前批 B_k 的总完工时间 $(j-i)(s_k + P_k)$. 因而,最优性得以证明. 动态规划递归关系中满足 $0 < j-i \leq c$, 且 $\lceil j/c \rceil \leq k \leq j \leq n$, 算法的时间复杂性为 $O(cn^2)$. \square

2.2 忽略传搁时间限制

为寻求问题的有效上下界,评价启发式算法的性能,本文研究这种忽略传搁时间限定值的特殊情况. 不失一般性,假设工件在批处理机上的加工时间为常数 p (p_c 或 p_h), 当台车返回时间 $t = 0$ 时,该问题的运输阶段调度等价于单机生产调度. 对于 $1 \parallel \sum C_j$, 加工时间的非增序 (SPT) 为最优排序. 由此按照运输时间非降次序可得忽略传搁时间限定值情况的最优排序,运用动态规划可得最优分批.

定理3 对于问题T-P忽略传搁时间限制的特殊情况,存在该问题的最优调度满足工件运输时间的非降次序排序.

证明 若忽略传搁时间限制,则工件加工时间均为常数 p . 假设最优调度 π^* 不满足运输时间非降次序,不妨设存在两个工件 i 和 j 满足 $t_j > t_i$, 工件 j 在工件 i 前调度. 交换工件 i 和 j , 其余工件调度不变,得

新调度 π , 则 π^* 与 π 批数相同,工件的运输开始时间满足 $d_i < d_j^*$ 且 $d_j = d_i^*$. 若工件在同一批中调度,则交换后工件在批处理机上的开始时间没有变化,目标值不变. 若工件 i 和 j 不在同一批中,则交换工件后, π 中工件 i 所在批中所有工件在批处理机上的到达时间不会晚于 π^* 中工件 j 相应批的到达时间, π 中工件 j 所在批的到达时间与 π^* 中工件 i 所在批相同. 可见,相应的目标函数不会增加. 若 π^* 中还有其他工件的调度不满足运输时间的非降次序,则可通过工件交换使其满足该性质. \square

算法DP2.

Step 1: 按照运输时间 t_i 的非降次序排序, 即 $t_1 \leq t_2 \leq \dots \leq t_n$.

Step 2: 执行算法DP1的 Step 1 ~ Step 3.

Step 3: 递归关系为

$$f(i, j, k) = \min\{f(l, i, k-1) + (j-i)(s_k + p) \mid 0 < i-l \leq c, \lceil i/c \rceil \leq k-1 \leq i\}.$$

其中

$$s_k = \begin{cases} d_j + t_j, & k = 1; \\ \max\{s_{k-1} + p, d_j + t_j\}, & k > 1. \end{cases}$$

Step 4: 计算最优值

$$F(n) = \min\{\lambda f(i, n, k) + (1-\lambda)\alpha(k) \mid 0 < n-i \leq c, \lceil n/c \rceil \leq k \leq n\}.$$

显然,可以得到下述结论:

定理4 算法DP2可以在 $O(cn^2)$ 时间内找到问题T-P忽略传搁时间限制时的最优调度.

推论1 若忽略传搁时间限定值,当工件加工时间为常数 p_c (或 p_h) 时,则由算法DP2可得原问题T-P的上界(或下界).

3 启发式算法及性能分析

本节将基于动态规划设计问题T-P的启发式算法,并进行性能比分析. 算法设计基本思想如下:根据运输时间决策工件调度次序,通过动态规划算法决策批处理机上的分批,将相应的工件次序确定情况时的最优解转换为原问题的可行解.

3.1 启发式算法及性能比分析

算法H.

Step 1: 按照运输时间 t_i 的非降次序排序, 即 $t_1 \leq t_2 \leq \dots \leq t_n$.

Step 2: 对于上述给定顺序执行算法DP1进行分批. 所得目标值为

$$F(n) = \min\{\lambda f(i, n, k) + (1-\lambda)\alpha(k) \mid 0 <$$

$$n - i \leq c, \lceil n/c \rceil \leq k \leq n\}.$$

定理5 算法H的最坏情况性能比不超过 p_c/p_h .

证明 忽略传搁时间限定值, 当工件加工时间为常数 p_h 时, 设算法H得到松弛问题的最优调度 $\pi_L = \{B_1, B_2, \dots, B_K\}$, 每批工件在机器上的完成时间记为 $C_{L1}, C_{L2}, \dots, C_{LK}$, 每批包含的工件数记为 $|B_1|, |B_2|, \dots, |B_K|$. 该目标值 F_L 为原问题的下界, 满足 $F_H \geq F_L$. 当工件加工时间为常数 p_c 时, 目标值 F_U 为原问题的上界, 满足

$$F_U \leq |B_1|(C_{L1} + p_c - p_h) + |B_2|(C_{L2} + 2(p_c - p_h)) + \dots + |B_K|(C_{LK} + K(p_c - p_h)) + \alpha(K).$$

设 F^* 为问题T-P的最优目标函数值, 则有

$$\begin{aligned} \frac{F_H}{F^*} &\leq \frac{F_U}{F_L} \leq \frac{\sum_{k=1}^K |B_k|(C_{Lk} + k(p_c - p_h)) + \alpha(K)}{\sum_{k=1}^K |B_k|C_{Lk} + \alpha(K)} \leq \\ &\frac{\sum_{k=1}^K |B_k|C_{Lk} + (p_c - p_h) \sum_{k=1}^K |B_k|k}{\sum_{k=1}^K |B_k|C_{Lk}} \leq \\ &1 + \frac{(p_c - p_h) \sum_{k=1}^K |B_k|k}{p_h \sum_{k=1}^K |B_k|k} \leq \frac{p_c}{p_h}. \end{aligned}$$

这里满足对于任意 $z \geq 0$ 且 $0 < y \leq x$, 不等式 $(x + z)/(y + z) \leq x/y$ 成立. \square

3.2 实验仿真

为验证启发式算法的实际性能, 实验分为两部分: 1) 将启发式算法与钢铁企业实际人工调度相比较. 人工调度: 台车根据列表顺序进行依次运输, 批处理机先进行热工件加工, 即当冷热工件同时可利用时, 将冷工件移后放在一起进行调度. 2) 随机产生算例进行实验性能测试, 并将启发式产生的结果与CPLEX(V12.5)产生的最优值和下界进行比较. 启发式算法使用C++语言编程实现, 实验平台为PC机 Intel Corei3处理器, 2.3 GHz主频, 2 G内存. 实验数据如下.

1) 采用文献[11]中的企业3种钢锭数据进行测试(时间单位为min), $c = 3, t = 50$.

锭型1: t_j 为170, 330, 435, 230, 250, 240, 315, 280,

290, 310, 190, 210; $E = 540; p_h = 480; p_c = 840$.

锭型2: t_j 为190, 540, 390, 480, 490, 435, 530, 520, 515, 495, 490, 500; $E = 900; p_h = 750; p_c = 1260$.

锭型3: t_j 为340, 410, 350, 370, 380, 430, 420, 450, 435, 470, 390, 410, 420, 370, 390, 400, 415, 420; $E = 720; p_h = 490; p_c = 900$.

经测试, 启发式与人工调度目标值的比值分别为0.849 2、0.794 7、0.747 1; 最优调度与人工调度比值分别为0.804 5、0.744 3、0.708 4. 启发式算法对于人工调度的平均改进量为20.30%. 实验结果表明, 启发式算法优于人工调度方法, 该算法能够减少库存水平, 降低能源消耗费用.

2) 根据问题的规模和结构进行参数 n, c 选择, 参数产生如下:

a) 工件数量 $n \in \{15, 20, 25, 30, 50, 100, 300, 500, 1000\}$, 批处理机能力 $c \in \{3, 6, 9\}$.

b) 生产费用 $\alpha(x) = \beta x, \beta \sim U[10, 20]$ 为参数.

c) 加工时间、运输时间和传搁时间限制在如下均匀分布中随机产生:

$$t_j, t, p_h \sim U[1, 10], p_c \sim U[10, 20], E \sim U[5, 15].$$

对于 n, c 的27种组合, 随机产生10组算例进行实验. 对于规模问题, 启发式算法H产生的近似解与CPLEX产生的最优值进行比较, 记为 $r_1 = F_H/F^*$; 对于大规模问题, 启发式产生的近似解与问题下界进行比较, 记为 $r_2 = F_H/F_L$. 算法的平均误差比 $\text{avg}(r)$ 和最大误差比 $\text{max}(r)$ 如表1、表2所示.

表1 算法H与最优值的比较结果 r_1

n	$c = 3$		$c = 6$		$c = 9$	
	avg	max	avg	max	avg	max
15	1.035	1.074	1.049	1.105	1.076	1.134
20	1.024	1.047	1.022	1.054	1.045	1.097
25	1.013	1.038	1.016	1.038	1.026	1.065
30	1.006	1.045	1.004	1.017	1.013	1.041

表2 算法H与下界的比较结果 r_2

n	$c = 3$		$c = 6$		$c = 9$	
	avg	max	avg	max	avg	max
50	1.035	1.109	1.075	1.124	1.085	1.147
100	1.013	1.018	1.025	1.059	1.037	1.072
300	1.009	1.021	1.008	1.024	1.016	1.043
500	1.005	1.009	1.003	1.011	1.008	1.015
1000	1.002	1.006	1.001	1.005	1.002	1.007

对于 $n \leq 30$ 的小规模算例, CPLEX 可以在 1 200 s 内计算出问题的最优解. 当问题的规模增大时, CPLEX 无法在有效时间内求得最优解. 对于 $n = 1 000$ 的大规模算例, 启发式算法能在 300 s 内计算近似解. 启发式算法 H 与 CPLEX 产生的最优解的平均误差比为 1.027, 最大误差比为 1.134. 算法 H 与下界的平均误差比为 1.021, 最大误差比为 1.147. 对于小规模问题, 当批处理机能力较大时, 算法性能变差. 此时随机产生的加工时间 p_h 和 p_c 偏差较大, 造成了算法产生较多的批数, 生产费用较高. 结果表明, 随着问题规模的增大, 启发式与下界的误差比越来越小, 本文所提出的启发式算法能够在有效计算时间内产生较好的近似解.

4 结 论

基于钢铁企业模铸高温生产及运输特征, 本文在传搁时间约束条件下研究了生产前运输与批处理机协调调度问题. 工件由台车运送到批处理机进行组批生产, 加工时间是工件传搁时间的分段增函数. 目标函数为最小化总完工时间与生产费用, 建立了混合整数规划模型, 运用 CPLEX 软件得到了小规模问题的最优解. 运用复杂性证明了该问题是强 NP-难解问题. 基于动态规划提出了解决该问题的启发式算法, 并对算法进行了最坏情况下性能比的理论分析. 通过实验仿真, 将启发式算法与实际人工调度方法、最优解及下界分别进行了比较, 结果表明启发式算法能够产生有效近似解. 生产运输与批量生产的协调调度理论问题研究对于钢铁企业提高生产效率、降低能源消耗具有一定的指导意义. 未来可以进一步针对模铸系统其他目标函数进行研究, 也可以将问题扩展到多种运输工具衔接的生产物流协调问题.

参考文献(References)

- [1] Lee C Y, Chen Z L. Machine scheduling with transportation considerations[J]. J of Scheduling, 2001, 4(1): 3-24.
- [2] Lee C Y, Strusevich V A. Two-machine shop scheduling with an uncapacitated interstage transporter[J]. IIE Trans, 2005, 37(8): 725-736.
- [3] Gong H, Tang L X. Two-machine flowshop scheduling with intermediate transportation under job physical space consideration[J]. Computers & Operations Research, 2011, 38(9): 1267-1274.
- [4] Lushchakova I N, Soper A J, Strusevich V A. Transporting jobs through a two-machine open shop[J]. Naval Research Logistics, 2009, 56(1): 1-18.
- [5] Chen Z L. Integrated production and outbound distribution scheduling: review and extensions[J]. Operations Research, 2010, 58(1): 130-148.
- [6] Wang D Y, Grunder O, El Moudni A. Integrated scheduling of production and distribution operations: A review[J]. Int J of Industrial and Systems Engineering, 2015, 19(1): 94-122.
- [7] Liu P H, Lu X W. Integrated production and job delivery scheduling with an availability constraint[J]. Int J of Production Economics, 2016, 176(6): 1-6.
- [8] Li C L, Ou J. Machine scheduling with pickup and delivery[J]. Naval Research Logistics, 2005, 52(7): 617-630.
- [9] Tang L X, Gong H. A hybrid two-stage transportation and batch scheduling problem[J]. Applied Mathematical Modelling, 2008, 32(12): 2467-2479.
- [10] Tang L X, Guan J, Hu G F. Steelmaking and refining coordinated scheduling problem with waiting time and transportation consideration[J]. Computers & Industrial Engineering, 2010, 58(2): 239-247.
- [11] Tang L X, Gong H, Liu J Y, et al. Bicriteria scheduling on a single batching machine with job transportation and deterioration considerations[J]. Naval Research Logistics, 2014, 61(4): 269-285.

(责任编辑: 李君玲)