

极小化等待时间的热处理批调度模型与 PSO 解

申风平¹, 李京京¹, 杨玉龙², 廖世龙^{*1}

(1. 兰州理工大学 经济管理学院, 甘肃 兰州 730050;

2. 山东大学 管理学院, 山东 济南 250100)

摘要: 机加车间的工件动态到达热处理车间后因受到批处理设备合批等的约束不能及时得到加工, 基于工件动态到达的热处理车间, 以最小化工件等待时间期望为目标, 建立批调度模型。根据工件到达时间实现了粒子群算法微粒的编码以及对工件的分批, 通过仿真实验得出结论: 缩短工件的加工时间, 则在热处理车间内, 可以减小工件等待时间期望; 降低工件数规模, 工件会密集到达热处理环节, 从而减短工件等待时间; 工件的等待时间期望的大小与工件规模数量有关, 工件数规模较小时, 大尺寸工件的等待时间期望优于小尺寸工件, 规模较大时, 则相反。最后, 对比分析了本文改进的粒子群算法的效果, 发现改进的粒子群算法最优。

关键词: 动态到达; 热处理批调度; 等待时间; 粒子群算法

中图分类号: TH128 **文献标识码:** B

Batch scheduling model of heat treatment with minimization waiting time and the solution with PSO

SHEN Feng - ping¹, LI Jing - jing¹, YANG Yu - long², LIAO Shi - long^{*1}

(1. School of economics and management, Lanzhou University for Technology, Lanzhou 730050, China;

2. School of management, Shandong University, Jinan 250100, China)

ABSTRACT: After the workpiece of adding workshop reaches the heat treatment workshop dynamically, it cannot be processed immediately because of the constraint of batch processing equipment. In the paper, the heat-treatment workshop scheduling under workpieces with dynamic arrival time was considered, the batch scheduling model with expected waiting time of workpieces for the scheduling goal was built and solved by making use of particle swarm optimization algorithm. In the process of solving, particle swarm algorithm of particle coding and batch of workpieces was came true according to the arrivals time of workpiece, the conclusion was achieved by simulation experiment: the shorter the processing time of workpieces, the less the expected waiting time of workpieces; under the circumstance of tending to be a small quantity of workpieces, waiting time expectation for large size workpieces is superior to small size workpieces, under the circumstance of tending to be a large quantity of workpieces, waiting time expectation for small size workpieces is superior to large size workpieces. Finally, we make a comparison with ant colony algorithm, algorithm with FCFS and standard particle swarm algorithm. The simulation results show that the results of the particle swarm algorithm is the optimal.

KEYWORDS: Dynamic arriving; Heat treatment and batch scheduling; Waiting time; Particle swarm algorithm

1 引言

随着工业化进程的加速, 市场竞争愈发激烈, 企业必须持续缩短产品生产周期以满足不断变化的生产需求。多品

种小批量生产方式作为机械加工行业主流的生产方式, 面临着优化生产排程的巨大压力^[1]。热处理工序是机械加工行业的重要环节, 耗时长、排程复杂。热处理炉耗能高、成本投资大。这些造成了产品制造过程的主要瓶颈, 对产品的交货期和制造成本会产生重大影响^[2]。同时, 热处理车间的生产调度具有批调度特征, 如何实现热处理工序最优的批调度, 确保不同零件按时交货, 降低零件库存, 同时提升热处理炉

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(71761026; 71261022)

收稿日期: 2018-10-09 修回日期: 2018-10-10

的利用率 提高生产效率等问题引起了广大企业生产决策人员的关注。

合批加工可以节约加工时间 提高热处理炉的利用率。相同的炉膛容量、一致的工件形状材质和同一工件到达时间是合批加工必然条件 决策者可以考虑在热处理炉处理工件时进行合批处理。高永兵等^[3]指出热加工企业热处理等工序中由于生产调度存在问题 导致生产效率偏低 说明热处理等工序中生产调度问题尤为重要 并提出了遗传算法结合启发式规则的算法解决热加工工艺生产调度的问题。Uzsoy^[4]等研究了在单台批处理机器上 以最小完工时间和最大完工时间为目标 优化调度不同容量要求或尺寸的工件的问题。Melouk 等^[5-7]均以 C_{max} 为优化目标进行了相关性质的研究。国内学者程八一等^[8]使用微粒群算法对目标为极小化 C_{max} 的批调度问题进行了研究 并将问题扩展到模糊环境中^[9]。随着需求的波动 热处理车间订单呈现多样化趋势 订单数量也在持续波动 车间不断调整生产排程以加快生产速率。确保各工件尽快加工 减少工件的库存等待 为企业生产提供足够的工件需求 成为学者们研究的焦点。Kovalyo^[10]研究的批调度问题 将 n 个订单的作业分为多个批次 并在一台机器上对这些批次进行排序 从而使订单的总平均完成时间达到最小化。另外 也有学者从工件完工时间的角度来优化调度 Uzsoy 等^[11,12]为每个工件赋予了不同的权重 研究了在单台批处理机上 决策者如何调度使得加权总完工时间缩短并且重要的工件能及时得到加工的问题。

在生产实践中 往往会遇到工件进入热处理环节时 热处理炉正在加工上一批先到达的工件 新到达的工件无法立刻得到加工。此时 决策者有两种选择 一是等待上一批工件加工完成后立即进行此批次工件的热处理 二是继续等待其他类似的工件进行合批加工以提高热处理炉的利用率。这必然造成热处理车间的工件等待现象。工件等待时间过长 之后的机器加工程序对工件的需求难以及时得到满足 因工件热处理等待时间而产生的存储费用和占用的存储空间加重了企业的负担。因此 在热处理车间 缩短工件等待时间 合理安排工件加工顺序 可以提高热处理车间工件的加工效率。但是 聚焦于工件等待时间的调度优化研究十分少见。注意到 Zhou 和 Pang^[13]等提出一种改进的粒子群优化算法(MPSO) 优化单批加工问题的最大延迟问题 证明了MPSO 算法的求解质量优于其他算法。鉴于此 对标准粒子群算法进行改进 并模拟求解 在工件到达时间为动态的条件下 以最小化工件等待时间期望为目标 构建单台批处理机的热处理车间调度模型 记为 $W-NSBM$ 。

2 工件动态到达时间下的 $W-NSBM$ 模型

$W-NSBM$ 模型的符号说明及具体问题描述如下:

j : 工件集合 其中 $j \in \{1, 2, \dots, n\}$;

rt_j : 工件 j 的到达时间;

pt_j : 工件 j 的加工时间;

s_j : 工件 j 的尺寸;

ct_j : 工件 j 的完工时间;

B : 热处理炉容量;

b_k : 分批之后第 k 批工件集合;

PT_k : 批 b_k 的加工时间;

RT_k : 批 b_k 的到达时间;

ST_k : 批 b_k 的开始加工时间;

CT_k : 批 b_k 的完工时间;

dt_j : 工件 j 的等待时间;

W : n 个工件等待时间的期望。

1) 给出 n 个工件集合 $j = \{1, 2, \dots, n\}$ 其中 rt_j, pt_j, s_j 分别为每个工件的到达时间、加工时间、尺寸;

2) 热处理炉容量为 B , 各工件分批进行加工 且任意批 b_k 中的所有工件的总尺寸不大于热处理炉容量 B , 即 $\sum_{j \in b_k} s_j \leq B$;

3) 新工件必须等上一批工件处理完成后才能进入 不允许中途停止热处理炉中正在加工的工件。

4) 每批工件中的最大到达时间即为该批工件的到达时间 每批工件中的最大加工时间即为该批工件的加工时间。即 $RT_k = \max_{j \in b_k} \{rt_j\}$; $PT_k = \max_{j \in b_k} \{pt_j\}$ 其中 k 为工件批次。第 k ($k \neq 1$) 批工件的开始加工时间为 $ST_k = \max\{RT_k, CT_{k-1}\}$ 完工时间为 $CT_k = ST_k + PT_k$; 其中 $k=1$ 时 $ST_1 = RT_1$ 。

5) 工件 j 的到达时间是动态的 热处理加工过程不允许中断 就会出现工件到达后不能即时加工 产生工件等待时间。然而 热处理炉的炉膛填充清洗等工序复杂 耗时 在进行热处理时 热处理炉一般都会尽可能的装满。因此为了充分利用热处理资源 缩短工件等待时间是提高热处理效率的重要手段 成为此研究的焦点。现将每个工件 j 在热处理车间中的等待时间记为 dt_j 并且 $dt_j = ct_j - PT_k - rt_j$ 将工件等待时间的期望记为 W , 即: $W = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (ct_j - PT_k - rt_j)$ 。

根据以上约束条件 建立 $W-NSBM$ 数学模型为:

$$\text{Min } W = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (ct_j - PT_k - rt_j) \quad (1)$$

$$\text{st. } \sum_{k=1}^m Y_{jk} = 1, \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (2)$$

$$\sum_{j=1}^n s_j Y_{jk} \leq B, \quad j = 1, 2, \dots, n; k = 1, 2, \dots, m \quad (3)$$

$$PT_k \geq pt_j Y_{jk}, \quad j = 1, 2, \dots, n; k = 1, 2, \dots, m \quad (4)$$

$$ST_k \geq rt_j Y_{jk}, \quad j = 1, 2, \dots, n; k = 1, 2, \dots, m \quad (5)$$

$$ST_k \geq CT_{k-1}, \quad k = 2, 3, \dots, m \quad (6)$$

$$C_{max} \geq ST_m + PT_m \quad (7)$$

$$Y_{jk} \in \{0, 1\}, \quad j = 1, 2, \dots, n; k = 1, 2, \dots, m \quad (8)$$

$$PT_k \geq 0 \quad (9)$$

$$\sum_{j=1}^n \frac{s_j}{B} \leq m \leq n \quad (10)$$

其中 m 为分批之后的总批数, Y_{jk} 为 0-1 变量, 当工件 $j \in b_k$ 时, $Y_{jk} = 1$; 否则 $Y_{jk} = 0$; 式 (1) 表明此模型以最小化工件等待时间的期望 W 为优化目标; 为了保证式每个工件只能分配到一个批次中, 如式 (2) 所示, 设置 Y_{jk} 这一 0-1 变量; 式 (3) 对工件尺寸进行约束, 即每个批次中所有工件尺寸之和不大于 B ; 式 (4) 表明每个批次的加工时间为这一批次中所有工件的最大加工时间; 式 (5) 表示第 k 批工序的开始加工时间为当前批的所有工件到达之后; 式 (6) 表明热处理工程不允许停止当前批的加工, 新工件必须等上一批工件处理完成后才能进入; 式 (7) 为工件制造跨度; 式 (9) 表示每一批工件的加工时间至少为 0; 式 (10) 为工件分批的约束。

3 粒子群算法

3.1 PSO 算法

微粒群算法 (PSO) 是一种基于群体的演化计算技术, 能够将群体中的个体调整移动到使环境最好的位置。其原理为: n 维空间内, 微粒群中的粒子以速度 v 飞行, 它经历的最好的位置 x 是所求问题的一个解。第 i 个没有体积的点 (微粒) 的速度和位置的变化方式可以用如下方程表示:

$$v_i(t+1) = \omega v_i(t) + c_1 r_1 (pb_i(t) - x_i(t)) + c_2 r_2 (gb_i(t) - x_i(t))$$

$$x_i(t+1) = x_i(t) + v_i(t+1)$$

其中 ω 为惯性权重; c_1, c_2 称为加速常数, 通过设置 c_1, c_2 可以控制微粒飞行的步长; r_1, r_2 为随机数, 且 $r_1, r_2 \in [0, 1]$; 为控制微粒的飞行, 限制 $v_i \leq v_{max}$ 。微粒的速度和位置变化后, 比较它的适应值 (前期最好位置) 与经历过的最好位置, 并将较小的值更新为当前最好位置 pb , 同时更新全局经历最好的位置 gb 。当得到一个足够好的位置时终止。

3.2 工件动态到达下的 W-NSBM 模型的微粒编码与初始化

对于 n 个工件的调度问题, 令微粒的总数为 N , 并使用 n 维向量表示一个粒子。第 i 个微粒的位置向量 $X_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{in})$ 其中 $x_{ij} (j \in \{1, 2, \dots, n\})$ 对应工件 j 的优先值, 每个位置向量代表一个可行的工件序列。速度向量为 $V_i = (v_{i1}, \dots, v_{in})$, 每一维的速度 v 用来更新 X_i 中的对应维度 x 。

本文利用 ERF 方法生成初始微粒。在微粒 i 对应的工件序列中, 为了得到一个工件序 π_i , 则 rt_j 按照递增的顺序排列, $\pi_i(l)$ 表示 π_i 中的第 l 个工件。将 π_i 的第一个工件的优先值设置为随机数, 其他工件的优先值设置方法为^[14]:

$$\pi_i(l+1) = \pi_i(l) + rand(0, 1)$$

通过上述方法可以产生 NSBM 问题的初始微粒群。如表 1 所示, 10 个工件的 NSBM 问题, 按到达时间排序, 则工件的加工顺序为: $\pi = (4, 7, 5, 3, 9, 2, 10, 6, 1, 8)$, 于是工件的优先值向量为:

$$X_i = [6.6, 5.0, 3.5, 2.3, 3.3, 6.2, 2.7, 7.2, 4.2, 5.4]$$

表 1 10 个工件 NSBM 问题的初始示例

工件编号	1	2	3	4	5	6	7	8	9
工件到达时间	9	5	4	0	3	8	1	9	4
排序后工件顺序	4	7	5	3	9	2	10	6	1
工件的优先值	6.6	5.0	3.5	2.3	3.3	6.2	2.7	7.2	4.2

3.3 微粒适应度的计算

在初始化以及每次迭代中, 微粒 i 会获得一个工件排序 π_i , 但 π_i 不是问题的解, 需要在机器容量 B 这一约束条件下将 π_i 分批后, 才能计算出微粒的适应度。分批规则如下^[6]:

第 1 步: 确定粒子群优化算法的初始工件数 n , 通过 ERF 规则获得工件初始序列;

第 2 步: 获得排序后, 将第一个工件放入第一批次 ($\sigma_1 \in b_1$) 将工件号 ($j=1$) 和批号 ($k=1$) 初始化;

第 3 步: 判断下一个工件尺寸是否满足 B 这一约束条件, 若满足, 工件放入到批 b_k 中; 否则, 生成新的批次 b_{k+1} ;

第 4 步: 判断 j 是否满足终止约束条件, 若不满足, 转至第三步继续; 若满足, 输出结果。算法流程图如下:

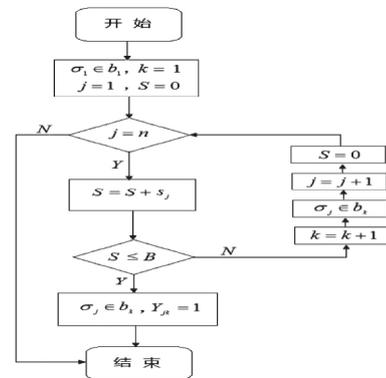


图 1 分批算法流程图

4 仿真实验

4.1 仿真参数

本文借鉴 Melouk 等提出的随机产生数据的方法获得算例^[15], 算例标准按如下几个标准划分: 工件数量 n 、工件到达时间 rt_j 、工件加工时间 pt_j 、工件尺寸 s_j , 其中 rt_j, pt_j 和 s_j 均取整数, rt_j 服从离散的指数分布, pt_j 和 s_j 服从离散的均匀分布。

①按工件数 $n = 10, n = 30, n = 80$ 将其分为 $J1, J2, J3$ 类问题;

②按工件的 rt_j 分类可以得到 $RT1$ 和 $RT2$ 两类, 其分别服从参数为 20 和 50 的指数分布;

③按工件的 pt_j 可以分为 $PT1$ 和 $PT2$ 两类, 分别为 $[1, 10]$ 和 $[10, 20]$;

④按工件的 s_j 可以分为 $S1$ 和 $S2$ 两类, 分别为 $[2, 4]$ 和 $[6, 8]$ 。

上述 4 种分类方法可得到 24 组不同的算例, 用 $J(a) RT$

(b) $PT(c)S(d)$ 来表示,其中 $a \in \{1, 2, 3\}$; $b, c, d \in \{1, 2\}$ 。例如, J1RT1PT2S1 表示的算例 $n=30$, r_{t_j} 服从参数为 20 的指数分布 p_{t_j} 为 $[1, 20]$ 上的离散均匀分布, s_j 为 $[2, 4]$ 的小尺寸工件集合。在 $B=20$, 微粒个数 $m=50$, 迭代次数 $NC_{max}=80$ 的参数条件下, 运行 30 次的平均结果的 24 组数据如下:

表 2 24 种算例工件等待时间的期望

工件组合	ACO	FCFS	标准 PSO	改进 PSO
J1RT1PT1S1	14.1	14.3	16.7	13.5
J1RT1PT1S2	7.8	8.2	7.0	4.8
J1RT1PT2S1	15.9	14.9	15.9	14.2
J1RT1PT2S2	12.1	12.0	10.6	8.9
J1RT2PT1S1	36.3	39.6	38.0	34.9
J1RT2PT1S2	9.8	10.5	9.3	8.8
J1RT2PT2S1	41.9	39.8	36.1	33.2
J1RT2PT2S2	12.3	13.9	13.4	12.0
J2RT1PT1S1	25.4	9.5	8.1	7.3
J2RT1PT1S2	29.1	18.3	14.2	12.5
J2RT1PT2S1	37.4	28.4	27.1	24.2
J2RT1PT2S2	58.9	59.0	52.5	46.8
J2RT2PT1S1	14.4	15.7	13.5	12.6
J2RT2PT1S2	12.9	15.8	11.2	9.7
J2RT2PT2S1	21.8	20.5	17.8	16.5
J2RT2PT2S2	73.4	76.5	67.3	64.9
J3RT1PT1S1	62.1	42.8	37.3	36.0
J3RT1PT1S2	91.9	77.5	65.4	62.8
J3RT1PT2S1	119.6	114.1	106.9	103.8
J3RT1PT2S2	202.0	197.0	181.4	174.8
J3RT2PT1S1	22.9	23.6	19.7	16.9
J3RT2PT1S2	94.3	92.6	76.6	73.9
J3RT2PT2S1	89.0	88.5	80.2	77.2
J3RT2PT2S2	283.7	287.2	273.9	268.7

4.2 仿真结果分析

下文给出了工件数为 10、30 和 80 的四种算法仿真结果图, 具体分析如下。

1) 算法优劣比较: ①如图 2 所示, 工件数量为 10 时, 在部分算例点处(如 J1RT1PT2S1), FCFS 规则的仿真结果优于标准 PSO 算法和 ACO 算法。但在小规模工件条件下, 改进编码后的 PSO 算法优于其他算法, 具有较高的稳定性。②如图 3 所示, 工件数量为 30 时, ACO 算法的折线图在前四个算例点处明显高于其他三种算法。表明, 在 RT1 的情况下, 对工件等待时间期望的优化中, ACO 算法最差。这是因为工件密集到达, 加工工件大量堆集, ACO 算法需要在大量堆集的待加工工件中合批新批次的加工工件, 而自身收敛速度慢等缺点, 使得其优化结果劣于其他算法; 而剩余四个算例点

处, 四条折线较为接近, 表明, 在 RT2 情况下, ACO 算法优于 FCFS 规则。工件离散间隔到达, 待加工工件的堆集程度降低, 因此处理工件分批时, ACO 算法的调度性能得到大幅度提高。

2) 调度结果分析: ①观察图 2(工件数为 10, 即小规模工件数)折线的波谷值基本相等。即, 所有大尺寸(S2)工件等待时间期望值基本相等, 表明工件到达时间和加工时间对工件等待时间没有明显的影响。从图 2 也可看出, 波峰值 $W(RT1PT1S1) < W(RT2PT1S1)$, 且有波峰值 $W(RT1PT2S1) < W(RT2PT2S1)$, 表明对于小尺寸工件来讲, 分散到达会增加工件等待时间。因此, 生产决策者可以要求工件密集到达热处理车间, 缩短小尺寸工件的等待时间。②观察图 3 和图 4(大规模工件数), 当工件的加工时间和到达类别相同时, 工件尺寸越小, 工件等待时间越短, 例如: $W(RT1PT1S1) < W(RT1PT1S2)$ 等; 表明在工件数量较多时, 小尺寸工件能得到较快加工。而图 2 工件数为 10 的仿真结果说明在工件数较少的情况下, 大尺寸工件能较快得到加工。因此, 考虑工件等待时间最短, 热处理车间决策者在接受订单之后, 可以要求小尺寸工件尽可能大规模数量到达, 大尺寸工件尽可能小规模数量到达, 以此减少工件等待时间。

3) 仿真规律总结: 缩短工件的加工时间, 可以减小工件等待时间期望; 工件的等待时间期望的大小与工件规模数量有关, 在工件数趋于小规模的情况下, 大尺寸工件的等待时间期望比小尺寸工件的短, 大规模工件数的情况下, 则相反。

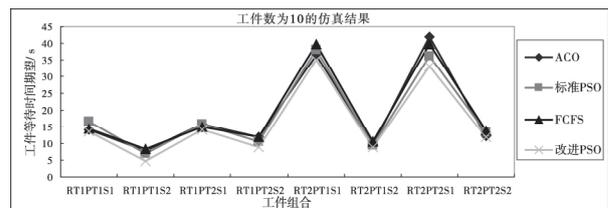


图 2 工件数为 10 的仿真结果

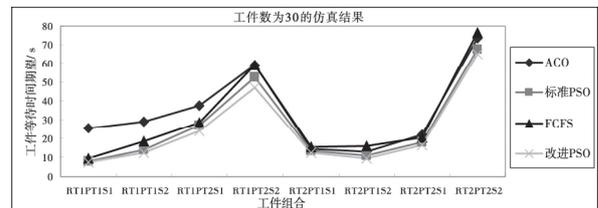


图 3 工件数为 30 的仿真结果

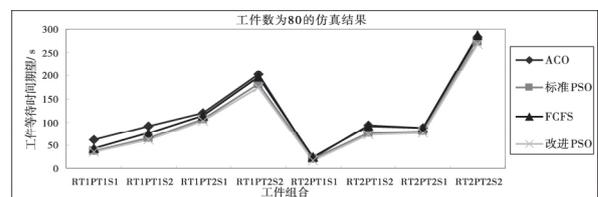


图 4 工件数为 80 的仿真结果

5 结束语

提高热处理效率,降低费用,保证工件交货期,是热处理行业需要关注的问题。在此目的下,以工件等待时间为调度优化目标,考虑工件动态到达时间下的热处理车间调度问题,设计了粒子群算法按照工件到达时间的初始化方法,并结合批调度的启发式算法实现全局的最优化。仿真结果表明,改进后的 PSO 算法在求解此类问题时优于 ACO、FCFS 和标准 PSO 算法。在此基础上,得到了缩短工件的加工时间,则在热处理车间内,可以减小工件等待时间期望;其次,工件数规模越小,工件会密集到达热处理环节,从而减短工件等待时间。

然而,在现实的生产车间,往往涉及到多机批调度的问题。考虑工件材质约束对热处理车间工件合批的影响等问题都是极具生产指导价值的课题。

参考文献:

- [1] 杨玉龙. 热处理炉批调度模型构建及其算法优化[D]. 西北民族大学, 2015.
- [2] 黄锦钿,林若波. 考虑工件外协的模具热处理车间生产计划[J]. 现代制造工程, 2018(06): 39-43.
- [3] 高永兵,马宁,胡文江,吴峰. 热加工工艺生产过程调度优化[J]. 计算机仿真, 2014, 31(05): 355-358+406.
- [4] UZSOY R. Scheduling a single batch processing machine with non-identical job sizes[J]. International Journal of Production Research, 1994, 32(7): 1615-1635.
- [5] MELOUK S, DAMODARAN P, CHANG P Y. Minimizing makespan for single machine batch processing with non-identical job sizes using simulated an annealing[J]. International Journal of Production Economics, 2004, 87(2): 141-147.
- [6] DAMODARAN P, MANJE SHWAR P K, SRIHAIR K. Minimizing makespan on a batch-processing machine with non-identical job sizes using genetic algorithms[J]. International Journal of Production Economics, 2006, 103(2): 882-891.
- [7] KASHANA H, KARIMI B, JOLAIF. Effective hybrid genetic algorithm for minimizing makespan on a single batch-processing machine with non-identical job sizes[J]. International Journal of Production Research, 2006, 44(12): 2337-2360.

(上接第 181 页)

- [9] 周尚波,王季平,尹学辉,等. 分数阶偏微分方程在图像处理中的应用[J]. 计算机应用, 2017, 37(2): 546-552.
- [10] 刘伟,徐成鸿,陈张言,等. 目标图像数据选择性自适应滤波方法仿真[J]. 计算机仿真, 2017, 34(2): 260-263.
- [11] 张煜林,孔慧华,潘晋孝,等. 基于 Split-Bregman 算法的能谱计算机层析图像重建[J]. 光学学报, 2017, 4(4): 153-161.
- [12] 王世刚,游敏娟,宋莉. 直方图均衡化图像增强的改进算法[J]. 中国医疗器械杂志, 2017, 41(3): 175-176.

- [8] 程八一,陈华平,王栓狮. 基于微粒群算法的单机不同尺寸工件批调度问题求解[J]. 中国管理科学, 2008, 16(3): 84-88.
- [9] 程八一,陈华平,王栓狮. 模糊生产系统中差异工件单机批调度优化[J]. 计算机集成制造系统, 2008, 14(7): 1322-1328.
- [10] KOVALYO M Y. A Batching Machine Model for Lot Scheduling on a Single Machine[J]. Foundations of Computing and Decision Sciences, 2018, 43(1): 37-40.
- [11] UZSOY R, YANG Y. Minimizing total weighted completion time on a single processing machine[J]. Production and Operations Management, 1997, 6(1): 57-73.
- [12] AZIZOGLU M, WEBSTER S. Scheduling a batch Processing machine with non-identical job sizes[J]. International journal of Production Research, 2000, 38(10): 2173-2184.
- [13] ZHOU H M, PANG J H, CHEN P K, CHOU F D. A modified particle swarm optimization algorithm for a batch-processing machine scheduling problem with arbitrary release times and non-identical job sizes[J]. Computers & Industrial Engineering, 2018, 123: 67-81.
- [14] CHOU F D, CHANG P C, WANG H M. A hybrid genetic algorithm to minimize makespan for the single batch machine dynamic scheduling problem[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2006, 31(3/4): 350-359.
- [15] 吴超超,顾幸生. 最优公共交货期单机提前/拖期调度和对应的批次送货[J]. 华东理工大学学报, 2004, 30(2): 211-215.

[作者简介]



申风平(1964-),男(汉族),山西河津人,教授,硕士研究生导师,主要研究领域为物流与供应链管理。

李京京(1993-),女(汉族),安徽亳州人,硕士研究生,主要研究领域为物流与供应链管理、自组织

生产系统。

杨玉龙(1990-),男(回族),山东临沂人,博士研究生,主要研究领域为生产计划与控制、批调度。

廖世龙(1980-),男(汉族),甘肃兰州人,博士,副教授,硕士研究生导师,主要研究领域为先进制造系统、自组织生产系统。(通讯作者)

[作者简介]



王素丽(1982-),女(汉族),河南商丘人,硕士,讲师,研究方向:数据管理、数字媒体、交互技术研究。