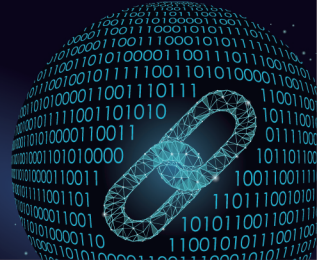




中国科技期刊卓越行动计划项目入选期刊

控制与决策

CONTROL AND DECISION



多产品两阶段批处理流水线调度策略及性能分析

闫飞一, 王军强

引用本文:

闫飞一, 王军强. 多产品两阶段批处理流水线调度策略及性能分析[J]. 控制与决策, 2024, 39(11): 3791–3800.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2023.0931>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

离散蝙蝠算法在三阶段装配流水线调度问题的应用

Discrete bat algorithm in three-stage assembly flowshop scheduling problem

控制与决策. 2021, 36(9): 2267–2278 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0054>

基于机床超低待机状态的流水车间能耗调度

Energy consumption scheduling in flow shop based on ultra-low idle state of numerical control machine tools

控制与决策. 2021, 36(1): 143–151 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0433>

区间数可重入混合流水车间调度与预维护协同优化

Collaborative optimization of interval number reentrant hybrid flow shop scheduling and preventive maintenance

控制与决策. 2021, 36(11): 2599–2608 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0973>

带峰值能耗约束流水线调度的协同群智能优化

Cooperative memetic optimization for flowshop scheduling with peak power consumption constraint

控制与决策. 2021, 36(10): 2350–2358 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0429>

超启发式交叉熵算法求解模糊分布式流水线绿色调度问题

Hyper-heuristic cross-entropy algorithm for green distributed permutation flow-shop scheduling problem with fuzzy processing time

控制与决策. 2021, 36(6): 1387–1396 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1681>

多产品两阶段批处理流水线调度策略及性能分析

闫飞一¹, 王军强^{2,3†}

(1. 南京工业大学 经济与管理学院, 南京 210009; 2. 西北工业大学 生产与运作系统性能分析中心, 西安 710072; 3. 西北工业大学 机电学院, 西安 710072)

摘要: 以多产品两阶段批处理流水线为研究对象, 探究不同调度策略对流水线性质的影响, 量化分析产线生产率、在制品水平等性能。首先, 针对上游机器效率最高优先加工策略、下游机器效率最高优先加工策略、最长队列优先加工策略、循环加工策略等 4 种不同调度策略, 分别刻画系统状态空间, 基于马尔可夫过程建立性能评估模型, 量化生产率等性能指标。然后, 考虑缓冲区容量与批容量关系, 对比 4 种调度策略对系统性能指标的影响。结果表明: 在缓冲区容量与批容量无关的情形下, 循环加工策略表现优于其他 3 种调度策略; 在缓冲区容量与批容量正相关的情形下, 最长队列优先加工策略表现优于其他 3 种调度策略。

关键词: 性能分析; 调度策略; 多产品; 批处理; 流水线

中图分类号: TP273

文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2023.0931

引用格式: 闫飞一, 王军强. 多产品两阶段批处理流水线调度策略及性能分析 [J]. 控制与决策, 2024, 39(11): 3791-3800.

Scheduling policy and performance analysis of multi-product two-stage serial lines with batch machines

YAN Fei-yi¹, WANG Jun-qiang^{2,3†}

(1. School of Economics and Management, Nanjing Tech University, Nanjing 210009, China; 2. Performance Analysis Center of Production and Operations Systems, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China; 3. School of Mechanical Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: Aiming at multi-product two-stage serial lines with batch machines, the impact of different scheduling policies on system performance is studied, performance indicators such as productivity and work-in-process level are analyzed analytically. First, the system state space is described for four different scheduling policies, namely highest upstream machine efficiency policy, highest downstream machine efficiency policy, longest queue policy, and cyclic policy. The analytical model is established based on Markov process to quantify the performance indicators such as productivity. Then, considering the relationship between buffer capacity and batch capacity, the impact of four scheduling policies on system performance is compared through numerical experiments. The results show that when buffer capacity and batch capacity are independent, the cyclic policy has better performance than the other three policies. However, when there is a positive correlation between buffer capacity and batch capacity, the longest queue priority policy has the best performance.

Keywords: performance analysis; scheduling policy; multi-product; batch machines; serial lines

0 引言

批处理机 (batch machine) 按一定加工批量同时加工多个工件, 突破了单件处理机 (single-item-machine) 每次只加工一个工件的限制, 减少了单位产品的设备投资, 提高了生产线的经济效益^[1]。多产品批处理生产线将批处理机和缓冲区按照一定方式连接起来, 实现资源和产品的有效转换。以汽车喷油器

生产线和半导体生产线为例, 中央清洗机和扩散炉都是批处理机。在汽车喷油器生产线上, 电枢、针或阀座分别存放在专用缓冲区, 等待进入中央清洗机。在半导体生产线上, 不同温度需求的晶圆分别存放在专用缓冲区, 等待进入扩散炉。批处理加工方式不同于单件加工方式, 生产系统投入产出过程更难分析。

面对多产品生产任务, 调度通过对有限的设备能

收稿日期: 2023-07-03; 录用日期: 2023-12-19.

基金项目: 国家自然科学基金项目 (52075453, 71931007); 国家社会科学基金项目 (20BGL025); 高校哲学社会科学基金项目 (44205270).

责任编辑: 刘士新.

†通讯作者. E-mail: wangjq@nwpu.edu.cn.

力进行合理分配,以保障产线的有序、平稳、高效运转,因而成为产线过程管控、性能提升的核心模块.不合理的调度策略不仅会为机器带来不必要的空闲,还会引起系统频繁饥饿或阻塞造成产能损失.现有研究对象多为单产品生产系统,不存在产品调度问题,无需考虑调度策略对性能评估的影响.本文研究对象为多产品生产系统,调度问题无法回避,如何考量调度策略的适用性以及产线性能的影响,是产线性能分析领域亟待研究的关键问题.

本文面向多产品并行批处理流水线,综合考虑多品种、机器不可靠、批处理机和独立缓冲区等因素,建立性能分析解析模型,探索调度策略的适用性以及产线运营管理的影响,为产线性能评估、调度策略制定、产能持续提升等提供科学的决策依据.具体地,考虑了上游机器效率最高优先加工策略、下游机器效率最高优先加工策略、最长队列优先加工策略、循环加工策略等4种调度策略.针对每种调度策略,分别剖析其对系统运行的影响,并基于马尔可夫过程刻画系统状态转移过程,量化系统性能指标.进一步地,以所建立的解析模型为基础,考虑缓冲区容量与批容量无关和相关两种情形,对比4种不同调度策略对系统性能指标的影响.

1 文献综述

生产系统性能评估旨在利用数学模型刻画生产过程,分析系统演化性质和运行规律以进行性能提升、持续改进.常用的方法包括解析方法和仿真方法^[2].相较于仿真方法,解析方法优势在于能够建立通用的解析模型,节约反复实验所花费的时间,不足在于需要简化生产线.

已有学者针对不同类型生产系统,基于马尔可夫过程研究了性能分析解析方法^[3].裴植等^[4]针对典型的仿生软夹生产系统,研究了不同控制策略对能耗的影响.黄龙珠等^[5]以多批次串行生产线为对象,研究了生产系统性能分析及任务调度问题.崔鹏浩等^[6]考虑机器劣化过程,建立了瞬态性能分析模型,并基于深度强化学习,获得了有效维修策略.

近年来,调度策略对生产系统性能影响的相关研究引起了学者的广泛关注.然而,现有研究大多面向单件处理机的生产系统.进一步地,可分为单阶段生产系统和多阶段生产系统两方面.

针对单阶段多产品生产线,Dasci等^[7]建立了考虑两种循环服务策略的轮询模型.Feng等^[8]考虑7种不同的调度策略,分别建立了连续时间马尔可夫链解析模型.Feng等^[9]研究了对系统参数变化具有较

好鲁棒性的调度策略.Kang等^[10]将机器加工时间拓展为服从任意分布,建立了嵌入式马尔可夫链解析模型.上述相关研究均考虑机器不会发生故障.

针对多阶段多产品生产线,相关研究包括设置共享缓冲区和独立缓冲区两方面.在共享缓冲区方面,Zhao等^[11]基于聚合方法建立了多产品生产线性能评估模型.Wang等^[12]考虑小批量生产模式,建立了多产品生产线瞬态性能评估模型.在设置独立缓冲区方面,Park等^[13]考虑3种不同的调度策略,分别建立性能分析解析模型.Kang等^[14]研究了多产品生产线性能分析问题,并提出了多产品切换调度的次优控制策略.杨喜娟等^[15]针对考虑准备时间和缓冲区故障的多产品生产系统,建立了性能分析解析模型,并分析了参数对生产率的影响.

针对批处理机生产系统性能分析的解析方法相关研究较少,Chang等^[16]考虑两种批处理策略,研究了两阶段批处理流水线性能分析问题.Wang等^[1]以多阶段并行批处理流水线为研究对象,提出系统状态转移基本规则,给出了性能指标解析表达式.Liu等^[17]通过引入虚拟缓冲刻画批处理加工特性,建立了性能分析解析模型.Cui等^[18]针对考虑机器劣化的批处理流水线,建立了事件驱动的节能控制优化模型,并提出深度Q网络求解算法.需要指出的是,针对批处理机的研究成果主要集中在调度领域.例如,Wang等^[19]提出了一种新型混合批处理(m-batch)模型,拓展了并行批(p-batch)、串行批(s-batch)和半连续批(c-batch)等经典模型,丰富了批处理调度优化理论.Zhao等^[20-21]研究了串行批成组调度问题.轩华等^[22]研究了不相关并行机调度问题.

综上所述,当前研究多集中于单件处理多产品生产系统,尚未有文献研究调度策略对多产品批处理生产系统性能的影响.本文建立多产品批处理生产系统性能评估解析模型,研究不同调度策略对系统性能指标的影响并给出优化的调度策略.

2 问题提出

2.1 问题描述

本文研究对象如图1所示.第1阶段有 K 台单件处理机,用无填充的圆圈表示.工件完成第1阶段加工后,存放在独立缓冲区,用无填充的矩形表示.第2阶段有一台柔性批处理机,用有填充的圆圈表示.

2.2 模型假设

1) 工件.该生产线加工 K 种互不相容的产品 $J_k, k = 1, 2, \dots, K, k$ 表示产品 J_k 的序号.假设优先级最高的产品序号为 u .

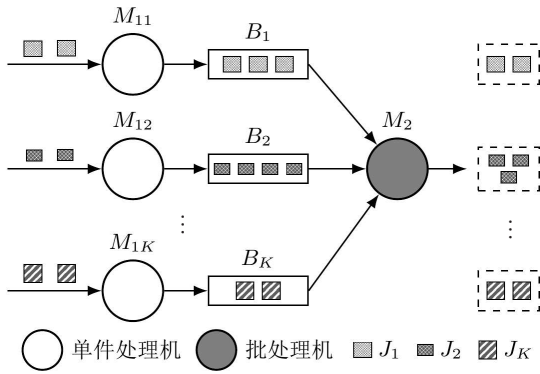


图 1 多产品批处理流水线

2) 机器. 单件处理机器 M_{1k} 只能加工产品 J_k , $k = 1, 2, \dots, K$, 且其处于工作状态的概率为 p_{1k} . 令 β_k 表示 M_{1k} 的状态, $\beta_k = 1$ 表示处于工作状态, $\beta_k = 0$ 表示处于故障状态. 批处理机 M_2 加工产品 J_k 时, 处于工作状态的概率为 p_{2k} . M_2 采用非空批处理策略, 即只要缓冲区非空, 就加工一批不超过批容量 C_k 的尽可能多的工件. 本文假设机器故障模式为时间相关故障, 且服从伯努利分布.

3) 缓冲区. 该生产线有 K 个缓冲区 B_k , $k = 1, 2, \dots, K$. 产品 J_k 由 M_{1k} 逐个加工后放入缓冲区 B_k , B_k 的缓冲区容量为 N_k . B_k 的在制品个数由 h_k 表示, $0 \leq h_k \leq N_k$.

4) 调度策略. 当多个队列在制品非空时, 批处理机 M_2 考虑以下几种调度策略选取某个队列产品进行加工.

上游机器效率最高优先加工 (upstream machine highest efficiency, UMHE) 策略^[23]: 优先选取上游机器加工效率最高的产品加工, 如果最高效率的非空队列有若干个, 则选取序号小的产品加工.

下游机器效率最高优先加工 (downstream machine highest efficiency, DMHE) 策略^[23]: 优先选取下游机器加工效率最高的产品加工, 如果最高效率的非空队列有若干个, 则选取序号小的产品加工.

最长队列优先加工 (longest queue, LQ) 策略^[24]: 优先选取队列最长的产品生产, 如果最长队列有若干个, 则选取序号小的产品加工.

循环加工 (cyclic) 策略^[7]: 按照产品序号 $1, 2, \dots, K$ 循环生产所有产品, 如果轮到 M_2 生产产品 J_k , 但产品 J_k 队列为空, 则 M_2 加工产品 J_{k+1} .

3 系统性能分析

3.1 状态空间和转移概率

3.1.1 UMHE 策略

针对 UMHE 策略, 将系统状态表示为 $s = (h_1, h_2, \dots, h_K)$, 将状态空间表示为

$$\Omega = \{(h_1, h_2, \dots, h_K) | 0 \leq h_i \leq N_i, 1 \leq i \leq K\}.$$

该系统共有 NS 个状态, 其中

$$NS = \prod_{k=1}^K (N_k + 1).$$

令 $\text{Num}(s)$ 表示状态 s 的编号, 则

$$\text{Num}(s) = \sum_{k=1}^K h_k U_{k+1} + 1.$$

其中

$$U_k = \begin{cases} \prod_{i=k}^K (N_i + 1), & k = 1, 2, \dots, K - 1; \\ 1, & k = K. \end{cases}$$

根据上游机器的效率由高到低对产品进行排序, 得到集合

$$U\text{Index} = (UI_1, UI_2, \dots, UI_i, \dots, UI_K).$$

其中: UI_i 表示将产品按照上游机器加工效率从高到低排序后, 排在第 i 位次的产品所对应的序号.

该集合的元素满足以下公式:

$$p_{1UI_i} \geq p_{1UI_{i+1}}.$$

若 $p_{1UI_i} = p_{1UI_{i+1}}$, 则 $UI_i < UI_{i+1}$.

由假设可知 $u = UI_j$, 如果 $h_{(UI_i)} < 1, \forall i < j$.

令 $P_{\text{Num}(s')\text{Num}(s)}$ 表示从状态 s 转移到 s' 的概率. 将系统状态分成以下 3 类, 分别分析转移概率.

1) 下游机器对所有产品都饥饿, 即 $s = (h_1, \dots, h_k, \dots, h_K), h_k = 0, k = 1, 2, \dots, K$.

$$s' = (h_1 + \beta_1, \dots, h_k + \beta_k, \dots, h_K + \beta_K),$$

$$P_{\text{Num}(s')\text{Num}(s)} =$$

$$P_{\text{Num}(s')\text{Num}(s)} + \prod_k \{p_{1k}^{\min(1, \beta_k)} (1 - p_{1k})^{\min(1, 1 - \beta_k)}\}.$$

2) 上游机器不阻塞, 下游机器不饥饿, 即 $s = (h_1, \dots, h_k, \dots, h_K), 1 < h_k < N_k, k = 1, 2, \dots, K$.

当下游机器不加工产品 u 时, 有

$$s' = (h_1 + \beta_1, \dots, h_k + \beta_k, \dots, h_K + \beta_K),$$

$$P_{\text{Num}(s')\text{Num}(s)} =$$

$$P_{\text{Num}(s')\text{Num}(s)} +$$

$$\prod_k \{p_{1k}^{\min(1, \beta_k)} (1 - p_{1k})^{\min(1, 1 - \beta_k)}\} (1 - p_{2(u)}).$$

当下游机器加工产品 u 时, 有

$$s' = (h_1 + \beta_1, \dots, h_u - \min(h_u, C_u) +$$

$$\beta_u, \dots, h_K + \beta_K),$$

$$P_{\text{Num}(s')\text{Num}(s)} =$$

$$P_{\text{Num}(s')\text{Num}(s)} + \prod_k \{p_{1k}^{\min(1, \beta_k)} (1 - p_{1k})^{\min(1, 1 - \beta_k)}\} p_{2(u)}.$$

3) 上游机器会发生阻塞,下游机器不饥饿,即 $s = (h_1, \dots, h_k, \dots, h_K), 0 \leq h_k \leq N_k, k = 1, 2, \dots, u - 1, u + 1, \dots, K, 0 < h_u \leq N_u$.

当下游机器不加工产品 u 时,有

$$s' = (h_1 + \min(\beta_1, N_1 - h_1), \dots, h_u + \min(\beta_u, N_u - h_u), \dots, h_K + \min(\beta_K, N_K - h_K)),$$

$$P_{\text{Num}(s')\text{Num}(s)} = P_{\text{Num}(s')\text{Num}(s)} + (1 - p_{2(u)}) \prod_k \{p_{1k}^{\min(N_k - h_k, \min(1, \beta_k))} \times (1 - p_{1k})^{\min(N_k - h_k, \min(1, 1 - \beta_k))}\}.$$

当下游机器加工产品 u 时,有

$$s' = (h_1 + \min(\beta_1, N_1 - h_1), \dots, h_u - \min(h_u, C_u) + \beta_u, \dots, h_K + \min(\beta_K, N_K - h_K)),$$

$$P_{\text{Num}(s')\text{Num}(s)} = P_{\text{Num}(s')\text{Num}(s)} + p_{1u}^{\min(1, \beta_u)} (1 - p_{1u})^{\min(1, 1 - \beta_u)} \times p_{2(u)} \prod_{k \neq u} \{p_{1k}^{\min(N_k - h_k, \min(1, \beta_k))} \times (1 - p_{1k})^{\min(N_k - h_k, \min(1, 1 - \beta_k))}\}.$$

3.1.2 DMHE 策略

系统状态表示方法及编号方法与 UMHE 策略类似. 根据下游机器的效率由高到低对产品进行排序, 得到集合

$$D\text{Index} = (DI_1, DI_2, \dots, DI_i, \dots, DI_K).$$

其中: DI_i 表示将产品按照下游机器加工效率从高到低排序后, 排在第 i 位次的产品所对应的序号.

该集合的元素满足如下公式:

$$C_{DI_i} p_{2DI_i} \geq C_{DI_{i+1}} p_{2DI_{i+1}}.$$

若 $C_{DI_i} p_{2DI_i} = C_{DI_{i+1}} p_{2DI_{i+1}}$, 则 $DI_i < DI_{i+1}$.

由假设可知 $u = DI_j$, 如果 $h_{(DI_i)} < 1, \forall l < j$.

令 $P_{\text{Num}(s')\text{Num}(s)}$ 表示从状态 s 转移到 s' 的概率, 与 UMHE 策略类似将系统状态分成3类求解转移概率.

3.1.3 LQ 策略

LQ 策略与 UMHE 策略系统状态表示方法类似, 但 LQ 策略根据在制品水平决定产品加工顺序. 即

$$h_i < h_u, i = 1, 2, \dots, u - 1;$$

$$h_l \leq h_u, l = u + 1, u + 2, \dots, K.$$

令 $P_{\text{Num}(s')\text{Num}(s)}$ 表示从状态 s 转移到 s' 的概率,

与 UMHE 策略类似将系统状态分成3类求解转移概率.

3.1.4 Cyclic 策略

在 Cyclic 策略下, 当前时刻待加工产品受上一时刻已加工产品影响, 因此, 将系统状态表示为 $s = (h_1, \dots, h_k, \dots, h_K, u)$, 将状态空间表示为

$$\Omega = \{(h_1, \dots, h_k, \dots, h_K, u) | 0 \leq h_k \leq N_k, 1 \leq k \leq K, 0 \leq u \leq K\}.$$

引理1 在 Cyclic 策略下系统的有效状态总数为

$$NS = K \prod_{k=1}^K (N_k + 1) - K \sum_{k=1}^K \prod_{1 \leq j \leq K, j \neq k} (N_j + 1) + 1.$$

证明 通过从总状态空间剔除无效状态, 得到有效状态总数. 由 $0 \leq u \leq K, 0 \leq h_k \leq N_k$, 得到所有可能的状态个数为 $(K + 1) \prod_{k=1}^K (N_k + 1)$. 但是考虑到若 $u = k, h_k = 0, 1 \leq k \leq K$, 则该状态无意义, 且在这种情形下其余缓冲区的状态组合有

$$\prod_{1 \leq j \leq K, j \neq k} (N_j + 1) \text{ 种可能, 从而得到无效状态个数 } \prod_{k=1}^K \prod_{1 \leq j \leq K, j \neq k} (N_j + 1).$$

另外, 考虑到当所有缓冲区都为空时, $u = 0$ 才有意义. 因此, 有效状态总数为 $K \prod_{k=1}^K (N_k + 1) - K \sum_{k=1}^K \prod_{1 \leq j \leq K, j \neq k} (N_j + 1) + 1$. \square

令 $\text{Num}(s)$ 表示状态 s 的编号, 状态编号算法如表1所示.

表1 Cyclic 策略下状态编号算法

输入: $K, N_k, k = 1 : K$;
输出: 状态编号矩阵 Num.
1) 初始化: $n = 0$;
2) if $k = 1 : K$ then
3) if $h_k = 0 : N_k$ then
4) if $u = 0 : K$ then
5) if $\sum_k h_k = 0$ and $u = 0$ then
6) $n = n + 1$;
7) $\text{Num}(s) = n$;
8) else if $h_u > 0$ and $u > 0$ then
9) $n = n + 1$;
10) $\text{Num}(s) = n$;
11) end if
12) end if
13) end if
14) end if

令 $P_{\text{Num}(s')\text{Num}(s)}$ 表示从状态 s 转移到 s' 的概率, 假设状态 s' 中待加工产品为 v , 则

$$v = \begin{cases} 0, & \sum_{k=1}^K s'(k) = 0; \\ \text{NU}(l), & l = \min\{i | s'(\text{NU}(i)) > 0\}, \text{ otherwise.} \end{cases}$$

其中: $\text{NU} = [u + 1, \dots, K, 1, \dots, u - 1, u]$, $s'(k)$ 表示第 k 个缓冲区在制品水平.

将系统状态分成以下 3 类求解转移概率.

1) 下游机器对所有产品都饥饿, 即 $s = (h_1, \dots, h_k, \dots, h_K, u)$, $h_k = 0, u = 0, k = 1, 2, \dots, K$.

$$s' = (h_1 + \beta_1, \dots, h_k + \beta_k, \dots, h_K + \beta_K, v),$$

$$P_{\text{Num}(s')\text{Num}(s)} =$$

$$P_{\text{Num}(s')\text{Num}(s)} + \prod_k \{p_{1k}^{\min(1, \beta_k)} (1 - p_{1k})^{\min(1, 1 - \beta_k)}\}.$$

2) 上游机器不阻塞, 下游机器不饥饿, 即 $s = (h_1, \dots, h_k, \dots, h_K, u)$, $1 < h_k < N_k, k = 1, 2, \dots, K$.

当下游机器不加工产品 u 时, 有

$$s' = (h_1 + \beta_1, \dots, h_k + \beta_k, \dots, h_K + \beta_K, v),$$

$$P_{\text{Num}(s')\text{Num}(s)} =$$

$$P_{\text{Num}(s')\text{Num}(s)} +$$

$$\prod_k \{p_{1k}^{\min(1, \beta_k)} (1 - p_{1k})^{\min(1, 1 - \beta_k)}\} (1 - p_{2(u)}).$$

当下游机器加工产品 u 时, 有

$$s' = (h_1 + \beta_1, \dots, h_u + \beta_u - \min(h_u, C_u), \dots, h_K + \beta_K, v),$$

$$P_{\text{Num}(s')\text{Num}(s)} =$$

$$P_{\text{Num}(s')\text{Num}(s)} + \prod_k \{p_{1k}^{\min(1, \beta_k)} (1 - p_{1k})^{\min(1, 1 - \beta_k)}\} p_{2(u)}.$$

3) 上游机器会发生阻塞, 下游机器不饥饿, 即 $s = (h_1, \dots, h_k, \dots, h_K)$, $0 \leq h_k \leq N_k, k = 1, \dots, u -$

$1, u + 1, \dots, K, 0 < h_u \leq N_k$.

当下游机器不加工产品 u 时, 有

$$s' = (h_1 + \min(\beta_1, B_1 - h_1), \dots,$$

$$h_u + \min(\beta_u, B_u - h_u), \dots,$$

$$h_K + \min(\beta_K, B_K - h_K), v),$$

$$P_{\text{Num}(s')\text{Num}(s)} =$$

$$P_{\text{Num}(s')\text{Num}(s)} + (1 - p_{2(u)}) \times$$

$$\prod_k \{p_{1k}^{\min(N_k - h_k, \min(1, \beta_k))} (1 - p_{1k})^{\min(B_k - h_k, \min(1, 1 - \beta_k))}\}.$$

当下游机器加工产品 u 时, 有

$$s' = (h_1 + \min(\beta_1, B_1 - h_1), \dots,$$

$$h_u - \min(h_u, C_u) + \beta_u, \dots,$$

$$h_K + \min(\beta_K, B_K - h_K), v),$$

$$P_{\text{Num}(s')\text{Num}(s)} =$$

$$P_{\text{Num}(s')\text{Num}(s)} + p_{1u}^{\min(1, \beta_u)} (1 - p_{1u})^{\min(1, 1 - \beta_u)} \times$$

$$p_{2(u)} \prod_{k \neq u} \{p_{1k}^{\min(N_k - h_k, \min(1, \beta_k))} \times$$

$$(1 - p_{1k})^{\min(N_k - h_k, \min(1, 1 - \beta_k))}\}.$$

3.2 系统性能指标表达式

令 π_i 表示编号为 i 的状态 s_i 的稳态概率分布, 系统状态的演化过程可由以下平衡方程描述:

$$\pi_i = \sum_{j=1}^{NS} P_{ij} \pi_j, \quad (1)$$

$$\sum_{i=1}^{NS} \pi_i = 1. \quad (2)$$

对上述方程组进行求解得到系统状态稳态概率分布 $\pi_i, i = 1, 2, \dots, NS$, 进而将生产率、在制品水平、饥饿率和阻塞率的计算公式表示如下:

$$\text{PR}_k = \sum_{s_i \in V_1} p_{2k} \pi_i, \quad k = 1, 2, \dots, K. \quad (3)$$

$$V_1 = \begin{cases} \bigcup_l \{s_l | h_k \geq 1, h_{\text{UI}_j} < 1, k = \text{UI}_w, \forall j < w\}, & \text{UMHE 策略;} \\ \bigcup_l \{s_l | h_k \geq 1, h_{\text{DI}_j} < 1, k = \text{DI}_w, \forall j < w\}, & \text{DMHE 策略;} \\ \bigcup_l \{s_l | h_k \geq h_j, \forall j \neq k\}, & \text{LQ 策略;} \\ \bigcup_l \{s_l = (h_1, h_2, \dots, h_K, k) | h_K > 0\}, & \text{Cyclic 策略.} \end{cases}$$

$$\text{WIP}_k = \sum_{s_i \in \Omega} h_k \pi_i, \quad k = 1, 2, \dots, K. \quad (4)$$

$$\Omega = \begin{cases} \bigcup_l \{s_l = (h_1, \dots, h_k, \dots, h_K) | 0 \leq h_k \leq N_k, 1 \leq k \leq K\}, \text{ UMHE 策略;} \\ \bigcup_l \{s_l = (h_1, \dots, h_k, \dots, h_K) | 0 \leq h_k \leq N_k, 1 \leq k \leq K\}, \text{ DMHE 策略;} \\ \bigcup_l \{s_l = (h_1, \dots, h_k, \dots, h_K) | 0 \leq h_k \leq N_k, 1 \leq k \leq K\}, \text{ LQ 策略;} \\ \bigcup_l \{s_l = (h_1, \dots, h_k, \dots, h_K, u) | 0 \leq h_k \leq N_k, 1 \leq k, u \leq K\}, \text{ Cyclic 策略.} \end{cases}$$

$$ST_k = \sum_{s_i \in V_2} p_{2k} \pi_i (C_k - h_k + 1) / C_k. \tag{5}$$

$$V_2 = \begin{cases} \bigcup_l \{s_l | C_K > h_k \geq 1, h_{UI_j} < 1, k = UI_w, \forall j < w\}, \text{ UMHE 策略;} \\ \bigcup_l \{s_l | C_K > h_k \geq 1, h_{DI_j} < 1, k = DI_w, \forall j < w\}, \text{ DMHE 策略;} \\ \bigcup_l \{s_l | C_K > h_k \geq h_j, h_k < C_k, \forall j \neq k\}, \text{ LQ 策略;} \\ \bigcup_l \{s_l = (h_1, h_2, \dots, h_K, k) | C_K > h_K > 0\}, \text{ Cyclic 策略.} \end{cases}$$

$$BL_k = \sum_{s_i \in V_3} p_{1k} \pi_i (1 - p_{2k}) + \sum_{s_i \in V_4} p_{1k} \pi_i. \tag{6}$$

$$V_3 = \begin{cases} \bigcup_l \{s_l | h_k = N_k, h_{UI_j} < 1, k = UI_w, \forall j < w\}, \text{ UMHE 策略;} \\ \bigcup_l \{s_l | h_k = N_k, h_{DI_j} < 1, k = DI_w, \forall j < w\}, \text{ DMHE 策略;} \\ \bigcup_l \{s_l | h_k \geq h_j, h_k = N_k, \forall j \neq k\}, \text{ LQ 策略;} \\ \bigcup_l \{s_l = (h_1, h_2, \dots, h_K, k) | h_k = N_k\}, \text{ Cyclic 策略.} \end{cases}$$

$$V_4 = \begin{cases} \bigcup_l \{s_l | h_k = N_k, k = UI_w, \exists h_{UI_j} > 1, j < w\}, \text{ UMHE 策略;} \\ \bigcup_l \{s_l | h_k = N_k, k = DI_w, \exists h_{DI_j} > 1, j < w\}, \text{ DMHE 策略;} \\ \bigcup_l \{s_l | \exists h_j > h_k, h_k = N_k, j \neq k\}, \text{ LQ 策略;} \\ \bigcup_l \{s_l = (h_1, h_2, \dots, h_K, w) | h_k = N_k, w \neq k\}, \text{ Cyclic 策略.} \end{cases}$$

其中: w 表示将产品按照机器加工效率从高到低排序后, 产品所占的位次; UI_w 表示将产品按照上游机器加工效率从高到低排序后, 排在第 w 位次的产品所对应的序号; DI_w 表示将产品按照下游机器加工效率从高到低排序后, 排在第 w 位次的产品所对应的序号.

4 数值实验

为了验证所提出解析方法的准确性, 随机生成 10 000 条三品种批处理流水线进行数值实验. 针对每条生产线, 考虑 4 种不同的调度策略, 通过解析方法和仿真方法分别求解性能指标, 并以仿真结果为基准计算解析结果的误差. 生产线参数从以下取值范围等概率随机选取

$$p_{1k} \in [0.5, 1), p_{2k} \in [0.5, 1), C_k \in [2, 4],$$

$$N_k \in [5, 15], k = 1, 2, 3.$$

仿真步骤如下:

- 1) 设置机器 M_{1k} 和 M_2 , 分别针对产品 J_k 以 p_{1k} 和 p_{2k} 的概率正常工作;
- 2) 设置缓冲区初始在制品水平为 0;
- 3) 针对每条生产线, 在不同的调度策略下, 分别用仿真程序运行 20 次;
- 4) 在每次运行过程中, 前 20 000 个时间段用作预热, 接下来的 400 000 个时间段用来统计 PR、WIP、BL 和 ST 等性能指标. 针对每条线, 输出的性能指标是 20 次运行的平均值.

性能评估方法的准确性通过下式所定义的相对误差验证:

$$\delta_{PR} = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \left| \frac{\widehat{PR}_k - PR_k}{PR_k} \right| \times 100\%,$$

$$\delta_{WIP} = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \left| \frac{\widehat{WIP}_k - WIP_k}{N_k} \right| \times 100\%,$$

$$\delta_{ST} = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K |\widehat{ST}_k - ST_k| \times 100\%,$$

$$\delta_{BL} = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K |\widehat{BL}_k - BL_k| \times 100\%.$$

针对所生成的10 000条生产线,由4种策略得到的准确性分析结果如表2所示.4种策略关于 \widehat{PR} 的平均误差和最大误差均低于0.22%和1.90%,关于 \widehat{WIP} 的平均误差和最大误差均低于0.09%和1.19%,关于 \widehat{ST} 的平均误差和最大误差均低于0.03%和0.19%,关于 \widehat{BL} 的平均误差和最大误差均为0.

表2 三品种批处理流水线准确性分析结果

策略	$\delta_{PR}/\%$		$\delta_{WIP}/\%$		δ_{ST}		δ_{BL}	
	Ave	Max	Ave	Max	Ave	Max	Ave	Max
LQ	0.21	1.89	0.04	0.65	0	0	0	0
UMHE	0.07	1.86	0.03	0.66	0.01	0.17	0	0
DMHE	0.19	1.67	0.04	0.39	0.02	0.18	0	0
Cyclic	0.11	0.66	0.08	1.18	0	0.05	0	0

5 调度策略对比

考虑缓冲区容量与批容量无关和相关两种情形,基于所提出的解析方法探究不同调度策略对系统性能指标的影响.

5.1 缓冲区容量与批容量无关

随机生成10 000条三品种生产线,生产线的参数从以下取值范围内以相同的概率随机选取:

$$p_{1k} \in [0.5, 1), p_{2k} \in [0.5, 1), C_k \in [2, 4],$$

$$N_k \in [5, 15], k = 1, 2, 3.$$

将不同策略下得到的生产率、在制品水平分别记为 PR^γ 、 WIP^γ , $\gamma = \{LQ, UMHE, DMHE, Cyclic\}$.对比结果如表3和表4所示.

对于生产率,Cyclic策略的表现优于其他3种策略.原因是:循环加工策略使得每种产品在缓冲区积累一定在制品,提高了下游机器每批次加工产品的数量.对于在制品水平,DMHE策略优于LQ策略和Cyclic策略的情形都达到82.7%以上.原因是:优先考虑加工下游机器效率较高的产品,有效降低了在制品水平.

5.2 缓冲区容量与批容量正相关

随机生成10 000条三品种生产线,并假设批容量大的产品所对应的缓冲区容量更大.生产线的参数从以下取值范围内以相同的概率随机选取:

$$p_{1k} \in [0.5, 1), p_{2k} \in [0.5, 1),$$

$$C_1 \in [2, 3], C_2 \in [2, 3], C_3 \in [4, 5],$$

$$N_1 \in [5, 10], N_2 \in [5, 10], N_3 \in [12, 15].$$

对比结果如表5和表6所示,结论如下.

表3 4种策略的生产率对比(缓冲区容量与批容量无关)

情形	比例/%	情形	比例/%	情形	比例/%
$PR^{UMHE} > PR^{DMHE}$	9.9	$PR^{UMHE} > PR^{LQ}$	18.1	$PR^{UMHE} > PR^{Cyclic}$	3.7
$PR^{DMHE} > PR^{UMHE}$	72.3	$PR^{DMHE} > PR^{LQ}$	30.9	$PR^{DMHE} > PR^{Cyclic}$	6.1
$PR^{LQ} > PR^{UMHE}$	82.0	$PR^{LQ} > PR^{DMHE}$	69.15	$PR^{LQ} > PR^{Cyclic}$	42.7
$PR^{Cyclic} > PR^{UMHE}$	96.35	$PR^{Cyclic} > PR^{DMHE}$	93.9	$PR^{Cyclic} > PR^{LQ}$	57.3

表4 4种策略的在制品水平对比(缓冲区容量与批容量无关)

情形	比例/%	情形	比例/%	情形	比例/%
$WIP^{UMHE} < WIP^{DMHE}$	14.85	$WIP^{UMHE} < WIP^{LQ}$	64.35	$WIP^{UMHE} < WIP^{Cyclic}$	56.55
$WIP^{DMHE} < WIP^{UMHE}$	67.35	$WIP^{DMHE} < WIP^{LQ}$	82.7	$WIP^{DMHE} < WIP^{Cyclic}$	87
$WIP^{LQ} < WIP^{UMHE}$	35.65	$WIP^{LQ} < WIP^{DMHE}$	17.3	$WIP^{LQ} < WIP^{Cyclic}$	46.3
$WIP^{Cyclic} < WIP^{UMHE}$	43.45	$WIP^{Cyclic} < WIP^{DMHE}$	13	$WIP^{Cyclic} < WIP^{LQ}$	53.7

表5 4种策略的生产率对比(缓冲区容量与批容量正相关)

情形	比例/%	情形	比例/%	情形	比例/%
$PR^{UMHE} > PR^{DMHE}$	20.8	$PR^{UMHE} > PR^{LQ}$	0	$PR^{UMHE} > PR^{Cyclic}$	0
$PR^{DMHE} > PR^{UMHE}$	64.6	$PR^{DMHE} > PR^{LQ}$	0	$PR^{DMHE} > PR^{Cyclic}$	0
$PR^{LQ} > PR^{UMHE}$	100	$PR^{LQ} > PR^{DMHE}$	100	$PR^{LQ} > PR^{Cyclic}$	94.65
$PR^{Cyclic} > PR^{UMHE}$	100	$PR^{Cyclic} > PR^{DMHE}$	100	$PR^{Cyclic} > PR^{LQ}$	5.35

表6 4种策略的在制品对比(缓冲区容量与批容量正相关)

情形	比例/%	情形	比例/%	情形	比例/%
$WIP^{UMHE} < WIP^{DMHE}$	3.75	$WIP^{UMHE} < WIP^{LQ}$	15	$WIP^{UMHE} < WIP^{Cyclic}$	11.4
$WIP^{DMHE} < WIP^{UMHE}$	81.65	$WIP^{DMHE} < WIP^{LQ}$	57.4	$WIP^{DMHE} < WIP^{Cyclic}$	60.4
$WIP^{LQ} < WIP^{UMHE}$	85	$WIP^{LQ} < WIP^{DMHE}$	42.6	$WIP^{LQ} < WIP^{Cyclic}$	41.4
$WIP^{Cyclic} < WIP^{UMHE}$	78.6	$WIP^{Cyclic} < WIP^{DMHE}$	39.6	$WIP^{Cyclic} < WIP^{LQ}$	49.6

在生产率方面,LQ策略的表现优于其他3种策略的情形达到94.65%以上.原因是:根据批容量设置缓冲区容量,增加了下游机器每批次加工产品的数量,提高了下游机器的利用率.在在制品水平方面,DMHE策略的表现优于其他3种策略.原因是:优先考虑加工下游机器效率较高的产品,有效降低了在制品水平.

由上述分析可知,LQ策略对生产率的影响依赖于缓冲区容量,当缓冲区容量与批容量不相关时,Cyclic策略表现最好;当缓冲区容量与批容量正相关时,LQ策略表现最好.

5.3 实例验证

考虑一条参数如下的生产线:

$$K = 4, C = [3, 2, 1, 2], N = [3, 3, 3, 3],$$

$$p_1 = [0.9, 0.9, 0.9, 0.9], p_2 = [0.9, 0.9, 0.9, 0.9].$$

分别将缓冲区 B_1 和 B_3 容量从3增加到8,并保持其他缓冲区容量不变,对比5条生产线的结果如图2和图3所示.

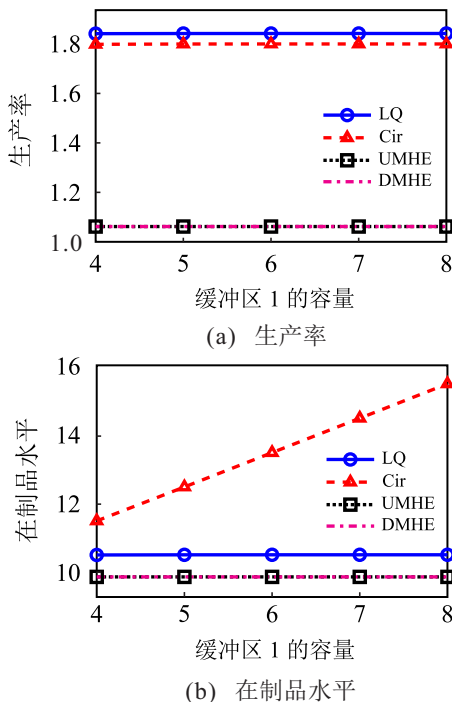


图2 4种策略的生产率和在制品水平比较(增加缓冲区 B_1 的容量)

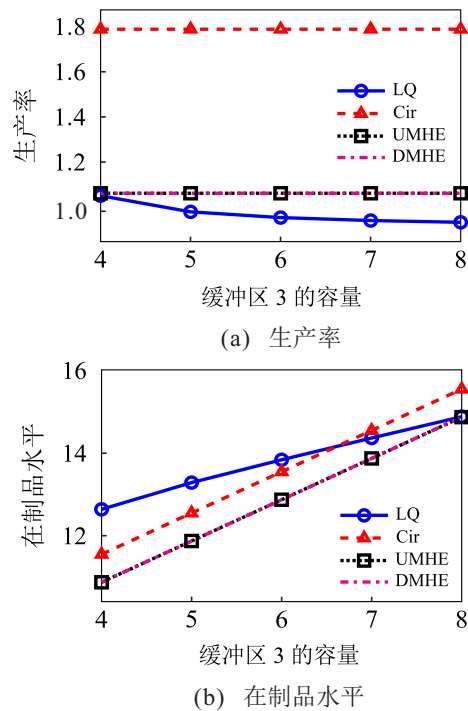


图3 4种策略的生产率和在制品水平比较(增加缓冲区 B_3 的容量)

由图2(a)和图3(a)可知:随着缓冲区 B_1 容量递增,LQ策略表现最优,生产率最高达到1.84;随着缓冲区 B_3 容量递增,Cyclic策略表现最优,生产率最高达到1.78,LQ策略的生产率呈现递减趋势.这说明:对批容量较大的产品分配较大缓冲区容量时,LQ策略对生产率的表现更优.

由图2(b)和图3(b)可知:随着缓冲区 B_1 和 B_3 容量递增,DMHE策略的在制品水平都低于其他3种策略.另外,随着缓冲区 B_1 容量递增,LQ策略的在制品水平始终保持在10.52以下;而随着缓冲区 B_3 容量递增,LQ策略的在制品水平从12.63增长到14.88.这说明,对批容量较大的产品分配较大缓冲区容量时,LQ策略不仅有利于生产率提升,还不会造成在制品水平无限增大.

6 结论

本文面向多产品批处理流水线,研究了上游机器效率最高优先加工策略(UMHE)、下游机器效率最高优先加工策略(DMHE)、最长队列优先加工策略

(LQ)、循环加工策略(Cyclic)等对流水线性质的影响,量化分析了产线生产率、在制品水平等性能.针对4种调度策略,分别刻画了系统状态空间,给出了每种策略下产品加工优先级的衡量方法,建立了马尔可夫模型,揭示了系统状态转移规则.对比了4种调度策略对系统生产率、在制品水平等性能的影响.结果表明:在缓冲区容量与批容量无关的情形下,Cyclic策略的表现优于其他3种策略;在缓冲区容量与批容量正向关的情形下,LQ策略的表现优于其他3种策略.

未来将研究更多可靠性模型,如几何可靠性、指数可靠性、一般分布可靠性模型等,以及多阶段多产品批处理流水线.

参考文献(References)

- [1] Wang J Q, Yan F Y, Cui P H, et al. Bernoulli serial lines with batching machines: Performance analysis and system-theoretic properties[J]. *IIE Transactions*, 2018, 51(6): 1-33.
- [2] Tu J C, Zhang L. Performance analysis and optimisation of Bernoulli serial production lines with dynamic real-time bottleneck identification and mitigation[J]. *International Journal of Production Research*, 2022, 60(13): 3989-4005.
- [3] Papadopoulos C T, Li J S, O'Kelly M E J. A classification and review of timed Markov models of manufacturing systems[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2019, 128: 219-244.
- [4] 裴植, 王玉娟, 杨佩琪, 等. 考虑能耗的仿生软夹生产线瞬态性能分析[J]. *计算机集成制造系统*, 2023, 29(5): 1491-1505.
(Pei Z, Wang Y J, Yang P Q, et al. Transient analysis of the soft robotic clip production line with energy consumption constraint[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2023, 29(5): 1491-1505.)
- [5] 黄龙珠, 贾之阳, 王遵君, 等. 基于退化机器模型的分布式柔性生产系统: 性能分析、任务调度及预测性维护[J]. *控制与决策*, 2023, 38(9): 2641-2652.
(Huang L Z, Jia Z Y, Wang Z J, et al. Distributed flexible systems with degenerate machines: Performance analysis, production scheduling, and predictive maintenance[J]. *Control and Decision*, 2023, 38(9): 2641-2652.)
- [6] 崔鹏浩, 王军强, 张文沛, 等. 基于深度强化学习的流水线预测性维护决策[J]. *计算机集成制造系统*, 2021, 27(12): 3416-3428.
(Cui P H, Wang J Q, Zhang W P, et al. Predictive maintenance decision-making for serial production lines based on deep reinforcement learning[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2021, 27(12): 3416-3428.)
- [7] Dasci A, Karakul M. Performance evaluation of a single-stage two-product manufacturing system operating under pull-type control[J]. *Computers & Operations Research*, 2008, 35(9): 2861-2876.
- [8] Feng W, Zheng L, Li J S. Scheduling policies in multi-product manufacturing systems with sequence-dependent setup times[C]. *Proceedings of the Winter Simulation Conference*. New York: ACM, 2011: 2055-2066.
- [9] Feng W, Zheng L, Li J S. The robustness of scheduling policies in multi-product manufacturing systems with sequence-dependent setup times and finite buffers[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2012, 63(4): 1145-1153.
- [10] Kang N X, Zheng L, Li J S. Analysis of multi-product manufacturing systems with arbitrary processing times[J]. *International Journal of Production Research*, 2015, 53(3): 983-1001.
- [11] Zhao C, Li J S. Analysis and improvement of multiproduct bernoulli serial lines: Theory and application[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 2015, 45(9): 1218-1230.
- [12] Wang M Y, Huang H X, Li J S. Transients in flexible manufacturing systems with setups and batch operations: Modeling, analysis, and design[J]. *IIE Transactions*, 2020, 53(5): 523-540.
- [13] Park K, Li J S, Feng S C. Scheduling policies in flexible Bernoulli lines with dedicated finite buffers[J]. *Journal of Manufacturing Systems*, 2018, 48: 33-48.
- [14] Kang N X, Zhao C, Li J S, et al. A sub-optimal control policy in a two-product door manufacturing line with geometric reliability machines[J]. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2017, 2(1): 157-164.
- [15] 杨喜娟, 黎锁平, 彭铎, 等. 考虑缓冲区故障的多产品生产系统的性能分析[J]. *控制与决策*, 2019, 34(4): 699-708.
(Yang X J, Li S P, Peng D, et al. Performance analysis of multi-product manufacturing system with buffer breakdown[J]. *Control and Decision*, 2019, 34(4): 699-708.)
- [16] Chang S H, Gershwin S B. Modeling and analysis of two unreliable batch machines with a finite buffer in between[J]. *IIE Transactions: Institute of Industrial Engineers*, 2010, 42(6): 405-421.
- [17] Liu L C, Yan C B, Li J S. Modeling, analysis, and improvement of batch-discrete manufacturing systems: A systems approach[J]. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2022, 19(3): 1567-1585.

- [18] Cui P H, Wang J Q, Li Y. Data-driven modelling, analysis and improvement of multistage production systems with predictive maintenance and product quality[J]. *International Journal of Production Research*, 2022, 60(22): 6848-6865.
- [19] Wang J Q, Fan G Q, Liu Z X. Mixed batch scheduling on identical machines[J]. *Journal of Scheduling*, 2020, 23(1): 487-496.
- [20] Zhao Z Y, Liu S X, Zhou M C, et al. Dual-objective mixed integer linear program and memetic algorithm for an industrial group scheduling problem[J]. *CAA Journal of Automatica Sinica*, 2021, 8(6): 1199-1209.
- [21] Zhao Z Y, Liu S X, Zhou M C, et al. Heuristic scheduling of batch production processes based on petri nets and iterated greedy algorithms[J]. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2022, 19(1): 251-261.
- [22] 轩华, 李文婷, 李冰. 混合离散人工蜂群算法求解含不相关并行机的分布式柔性流水线调度[J]. *控制与决策*, 2023, 38(3): 779-789.
- (Xuan H, Li W T, Li B. Hybrid discrete artificial bee colony algorithm for distributed flexible flowline scheduling with unrelated parallel machines[J]. *Control and Decision*, 2023, 38(3): 779-789.)
- [23] Bahaji N, Kuhl M E. A simulation study of new multi-objective composite dispatching rules, CONWIP, and push lot release in semiconductor fabrication[J]. *International Journal of Production Research*, 2008, 46(14): 3801-3824.
- [24] Gong X, Kiyavash N. Quantifying the information leakage in timing side channels in deterministic work-conserving schedulers[J]. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 24(3): 1841-1852.

作者简介

闫飞一(1992—), 女, 讲师, 博士, 从事生产系统性能分析与优化的研究, E-mail: yanfy0727@163.com;

王军强(1977—), 男, 教授, 博士生导师, 博士, 从事复杂装备生产管控理论与应用等研究, E-mail: wangjq@nwpu.edu.cn.