DOI: 10.3901/JME.2020.14.231

批量投放与交付的柔性动态 Job Shop 调度问题及其调度仿真研究*

熊禾根^{1,2} 吴健^{1,2} 阳光灿^{1,2}

- (1. 武汉科技大学冶金装备及其控制教育部重点实验室 武汉 430081;
2. 武汉科技大学机械传动与制造工程湖北省重点实验室 武汉 430081)

摘要: 基于汽车零部件生产企业制造系统, 提出一种工件批量投放与交付的柔性动态 Job shop 调度问题, 工件以批量方式动态陆续投放, 整批交付, 车间中具有多种类型的机器集合, 以批工件总拖期及拖期批工件百分比作为调度目标。由于问题属于强 NP 困难问题, 采用离散事件动态系统仿真方法对问题进行了仿真调度试验研究。提出问题的离散事件仿真建模中批工件投放时间与交货期的设置方法, 设计 6 个新的调度规则, 与选择的文献中所提出的 9 个调度规则一并纳入仿真调度试验。对仿真调度进行试验设计, 采用单因素方差分析和验后比较对试验结果进行统计处理, 并详细分析 15 个调度规则对所提调度问题的求解性能。结果表明, 所提出的 EMDD.b (Equivalent modified earliest due date for batch) 规则在各种试验参数配置下均表现出最优的性能, 所提出的其他一些新规则在两个调度目标(或某个调度目标)下也表现出较好性能。

关键词: Job shop; 动态调度; 柔性调度; 调度规则; 离散事件系统仿真

中图分类号: TH186

Scheduling Simulation for Flexible Dynamic Job Shop Scheduling Problem with Jobs Releasing and Delivering Both in Batches

XIONG Hegen^{1,2} WU Jian^{1,2} YANG Guangcan^{1,2}

- (1. Key Laboratory of Metallurgical Equipment and Control of Education Ministry,
Wuhan University of Science of Technology, Wuhan 430081;
2. Hubei Key Laboratory of Mechanical Transmission and Manufacturing Engineering,
Wuhan University of Science of Technology, Wuhan 430081)

Abstract: A flexible dynamic Job shop scheduling problem with jobs releasing and delivering both in batches, which arises from the context of auto-parts production systems, is addressed. In the problem, jobs are released to workshop successively in batches over time; a batch should be delivered as a whole when all the jobs in it are finished. In the shop, there are several types of machines, each of which consists of some identical machines. Total tardiness of all batches under consideration and the proportion of tardy batches are taken as two performance measures. For the problem being strongly NP-hard, a scheduling experiment is conducted by discrete event dynamic system simulation. In the modeling of discrete event system, setting methods of the release times and the due dates of job batches are proposed. A total of fifteen dispatching rules, including six new proposed dispatching rules and nine dispatching rules selected from literature, are put into the scheduling experiment. Performance evaluations are conducted by one-way analysis of variance and post-hoc comparisons with the experiment results. The evaluations indicate that a new proposed dispatching rule, equivalent modified earliest due date for batch(EMDD.b), has the overwhelming superiority to the other rules under consideration, and the five other new proposed rules also perform well with respect to the one or two performance measures.

Key words: Job shop; dynamic scheduling; flexible scheduling; dispatching rule; discrete event system simulation

* 国家自然科学基金资助项目(51875422)。20190730 收到初稿, 20200216 收到修改稿

0 前言

Job shop 调度(Job shop scheduling, JSS)问题是一类被广泛关注和研究的调度问题。根据调度问题中所涉及实体(通常为加工任务和加工资源)的固有属性(如加工任务的数量、内容、投放期及交货期等,以及加工资源的功能及可用性状态等)随时间变动情况, JSS 问题可分为静态问题和动态问题两类。经典的或传统的 JSS 问题默认为静态问题,问题中实体的固有属性是初始已知的、确定的和不变的;若实体某些固有属性是变动的,则相应的问题为动态 Job shop 调度(Dynamic job shop scheduling, DJSS)问题。当一个企业的加工任务来自于订单时,其制造系统调度问题属于典型的动态调度问题。汽车零部件生产企业是整车生产企业的上游企业,其生产任务通常主要来自于整车生产企业的需求订单。一个订单中包含若干种类零部件,每种零部件包含一定数量需求。汽车零部件生产企业陆续接收订单,对于其制造系统来说,相当于若干种一定数量的零部件批量动态投放;各订单任务完成后,以批量方式交付给整车生产企业。由此可见,其制造系统调度问题具有批量到达、批量交付及动态特征。另一方面,在汽车零部件生产企业中,同类型多台机器的情况也是普遍存在的,进行工序加工调度时,存在路径柔性特征。基于上述背景,提出了一种工件批量投放和交付的柔性 DJSS 问题(Batched release and delivery flexible dynamic job shop, bR&bD-FDJSS)。相比较于工件任务单件到达事件,工件任务成批投放事件对调度环境冲击程度和干扰度更大;与单件完工即交付相比,批量交付会引起完工零件的积压,调度决策时需要兼顾整批零件。基于此问题进行研究,具有较好的理论和工程实际意义。

国内外关于 DJSS 问题的研究也非常之多,大致可分为以下几类:① 考虑工件动态到达事件的常规 DJSS 问题^[1-14];② 考虑工件动态到达事件的、装设时间顺序相关的 DJSS 问题^[15-16];③ 考虑工件动态到达事件的、加工机器具有可选性的柔性 DJSSP 问题^[17-19];④ 考虑工件动态到达事件的、工件具有多级性的 DJSS 问题^[20-21];⑤ 考虑工件动态到达事件的、工件属性(如加工工时)具有模糊性的 DJSS 问题^[22];⑥ 考虑工件动态到达事件和机器停机事件的 DJSS 问题^[23-27];⑦ 考虑多种意外随机事件的 DJSS 问题^[28-31]。可以看出,工件的陆续到达几乎是关于 DJSS 问题研究中必然考虑的动态事件

之一。关于工件到达的模式方面,工件或以单件方式陆续到达,或以批量方式陆续投放。在上述各类 DJSS 问题的模型中,绝大多数都是假设待加工工件按单件方式陆续投放。在工件到达的规律方面,绝大部分研究均假设工件按 Poisson 过程到达,即相邻到达工件之间的时间间隔服从指数分布,分布参数常基于车间利用率设定^[1-8, 10, 12-17, 19-21, 23-26, 29-30]。此外,有些研究直接指定相关参数控制工件的到达速率,如 KORYTKOWSKI 等^[11]的研究中,工件的到达过程服从 Poisson 分布,到达速率指定为每单位时间 10~25 个工件,SHEN 等^[18]的研究中,将到达时间间隔指定为服从均值为 0.625 指数分布。除按 Poisson 过程规律仿真工件的到达外,也有研究按离散均匀分布^[9]或三角模糊数^[22]生成工件的不同到达时间。此外,一些文献中的 DJSS 问题是在静态 JSS 标杆问题中添加动态事件生成的,即工件的到达采用的是事件插入的方式,插入的时间点由人为指定^[28, 31]。SWEENEY 等^[27]研究了一种相邻到达任务为非独立随机事件的问题。该研究将密西西比河上游内陆航运系统视作一个复杂的动态 Job shop 制造系统,将船只视作工件,船闸与港池视作机器,其中,船闸为容量受限的机器,而港池为容量不受限的机器,将船只从一个船闸或港池至下一个船闸或港池视作一道工序。不同的船只随机但相互依赖地到达船闸或港池。

由于 DJSS 问题是一种典型的强 NP-hard 问题^[18, 31],当问题具有一定规模性,利用解析法和精确算法进行求解不具可行性^[32-35]。因此,主要采用的方法为仿真方法和启发式算法^[12, 36]。

基于仿真的方法大都是通过建立问题的离散事件动态系统模型^[5, 7, 15, 37],再采取调度规则进行仿真调度,从而分析调度结果以评价调度规则的性能。基于调度规则的仿真方法在 20 世纪 50 年代提出,即以其简便性、易用性、快速性和有效性等得到极为广泛的关注和研究^[38]。迄今为止,已有百余个调度规则被提出并有效用于各种不同的调度问题,尤其是针对更趋近于实际系统的复杂动态调度问题。其中 HOLTHAUS 等^[2-4]对基于调度规则的仿真研究进行了大量卓有成效的研究。MOHANASUNDARAM 等^[20]针对一种多级工件的 DJSS 问题设计了两个新的调度规则,通过仿真调度表明新规则在提前期和交货期相关指标方面的优越性能。VINOD 等^[15]针对加工装设时间顺序相关的 DJSS 问题提出了五个面向装设的调度规则,并通过仿真分析了其有效性。XIONG 等^[33]针对扩展工艺约束的 DJSS 问题进行了

研究, 提出了若干新调度规则, 仿真结果表明了其优越性能。范华丽等^[14]研究了基于遗传规划的 DJSS 问题调度规则设计与构造方法。由于调度规则的性能对于问题特征及调度指标具有较强的相关性, 除调度规则的设计与评价外, 对调度规则的选择方法也引起了许多学者的关注。万国华^[6]提出了一个模糊调度系统用以动态地选取启发式调度规则以求解 DJSS 问题。KAPANOGLU 等^[10]针对 DJSS 问题, 提出了一种用于根据队列长度区间选择合适调度规则的遗传算法。QIU 等^[26]将个体基因型网络模型用于进行调度规则的选择, 以求解 DJSS 问题。KORYTKOWSKI 等^[11]针对 DJSS 问题, 提出了一种基于遗传算法的仿真方法用于进行调度规则的选择。PERGHER 等^[13]将等级依赖效用理论与多属性效用理论相结合, 用于对 DJSS 问题求解的最优调度规则进行优选。AYDIN 等^[5]的研究中, 为求解 DJSS 问题, 利用一个智能 agent 进行最佳规则的选择, agent 通过改进强化学习算法进行训练 DJSS 问题。

在求解 DJSS 问题的启发式算法方面, 变邻域搜索算法作为一种改进型的局部搜索算法, 得到了较多的应用。SCHOLZ-REITER 等^[12]将变邻域搜索与移动瓶颈过程相结合求解总加权拖期的静态和动态 Job shop 调度问题。ADIBI 等^[25]研究了考虑机器故障的动态 Job shop 调度问题多目标变邻域搜索算法, 并将其与调度规则算法进行了对比。SHAHRABI 等^[28]提出了一种基于变邻域搜索算法的强化学习方法用于求解动态 Job shop 调度问题。各类进化算法及其混合算法也常有效地用于求解 DJSS 问题, 如汪双喜等^[17]对不同再调度周期下的柔性作业车间动态调度进行了研究, 设计了一种基于 pareto 概念的多目标差分进化算法。SHEN 等^[18]研究了用于求解具有机器可选性的柔性 DJSS 问题的多目标进化算法。连坤雷等^[29]提出了一种有效的改进遗传算法, 用于求解考虑车间的各种动态扰动因素的动态调度问题。王万良等^[30]针对考虑各种动态事件的动态 Job shop 问题重调度问题, 研究了基于混合差分的进化算法。KUNDAKCI 等^[31]提出了一种将遗传算法与禁忌搜索算法结合的混合遗传算法, 用于求解调度目标为最大完工时间的动态 Job shop 调度问题。

基于上述相关研究的现状可知, 在问题模型方面, 所检索的已有文献中尚未见同时考虑工件批量到达、批量交付和路径柔性的动态 Job shop 调度问题研究。在求解方法方面, 由于 bR&bD-FDJSS 问题所含特征的复杂性, 若采用进化算法等启发式算法进行问题求解, 一方面, 在模型映射、算子的适应性改进等方面具有较大难度; 再者, 由于工件的

批量陆续到达导致任务信息的不完备, 必须进行频繁的重调度, 启发式算法虽然在算法时间复杂度上较精确算法大大降低, 但面对大规模问题时, 频繁重调度的时间耗费仍然难于满足工程实际的要求。为此, 针对 bR&bD-FDJSS 问题, 进行了问题的分析和描述, 并选择基于仿真的方法, 对问题的离散事件仿真系统建模、调度规则设计、仿真调度及结果分析等方面进行了较系统的研究。

1 问题描述

本小节首先给出了问题描述和研究中所涉及变量的含义, 继而对 bR&bD-DJSS 问题进行了较详细的描述。

1.1 变量说明

本研究中所涉及的变量分为四类: 集合类变量、实体类变量、索引类变量及属性类变量。各变量符号及其说明如表 1 所示。

表 1 中, 集合变量、实体变量或属性变量的符号与某(些)索引变量符号相组合, 即形成对某一具体对象的符号表示。例如, J_i 表示第 i 个工件批, J_{ij} 表示第 i 个工件批中的第 j 个工件, 以此类推。

1.2 bR&bD-FDJSS 问题

在实际的汽车零部件生产企业中, 一个实际的订单中通常可能包含多种类型零部件, 每种零部件有若干数量需求。从问题建模及求解简便考虑, 可将一个实际订单拆分为与零部件种类数量对应的若干个批工件, 每个批工件只含一种类型零部件, 一个实际订单拆分的所有批工件投放期和交货期相同。显然, 基于这种拆分所构建的调度模型本质是相同的, 也不影响调度结果的可行性和合理性。因此, 所研究的 bR&bD-FDJSS 问题可描述如下: 有 n 个批工件 $J_i(i=1, 2, \dots, n)$ 随机陆续地投放到制造系统中, 每个批工件 J_i 包含若干工件 $J_i = \{J_{i1}, J_{i2}, \dots, J_{ij}, \dots, J_{in_i}\}$, 不失一般性, 假设同一批工件中的工件完全相同。每个批工件 J_i 具有一个投放期 r_i 和一个交货期 d_i , 每个工件 J_{ij} 包含若干道工序 $O_{ijk}(k=1, 2, \dots, n_{ij})$, 同工件的各道工序加工顺序需要符合事先设定的工艺要求, 顺序号与索引号 k 的升序一致。工序 O_{ijk} 可在事先指定的某类机器的任一加工, 加工时间为 p_{ijk} 。工件的投放时间 r_{ij} 和交货期 d_{ij} 与所在批工件的相同, 即 $r_{ij} = r_i$ 和 $d_{ij} = d_i$ 。批工件需要整体交付, 批工件 J_i 的交付时间为 D_i , 显然有 $D_i = \max\{C_{ij} | j=1, 2, \dots, n_i\}$ 。若 $D_i > d_i$, 批工件发生拖延, 其拖期为 $T_i = D_i - d_i$ 。车间中包含若干类型机器集合 $M_i(i=1, 2, \dots, q)$, 每类机器集合中包含若干完全相同的机器

表 1 变量及其说明

类型及符号	含义	取值
集合类	J 批工件集合	
	M 某类机器集合	
实体类	J 单个工件	
	$\tilde{J}$ 虚拟工件	
	M 机器	
	O 工序	
	$\tilde{O}$ 虚拟工序	
索引类	i 批工件索引	$1, 2, \dots, n$
	j 单个工件索引	$1, 2, \dots, n_i$
	k 工序索引	$1, 2, \dots, n_{ij}$
	k^* 工件或虚拟工件中当前待加工工序索引	
	l 某类机器索引	$1, 2, \dots, q$
	m 某类机器中某台机器的索引	$1, 2, \dots, q_l$
属性及参数	C 工件的完工时间	
	D 批工件的交货期	
	a 批工件的交货期宽裕度系数	
	T 批工件的拖期	
	T_{Σ} 所有批工件总拖期	
	$\%T$ 拖期批工件百分比	
	r 工件的投放期	
	d 工件的交货期	
	t 当前时刻	
	U_g 车间利用率	
	p 工序工时	
	$\tilde{P}^t$ 当前时刻虚拟工序的总工时	
	$\tilde{p}^t$ 当前时刻虚拟工序的近似工时	
	$\bar{n}$ 批工件中所含工件数量的均值, 或工件所含工序数量的均值	
	$\bar{p}$ 工序工时的均值	
	$\bar{q}_l$ 某类机器所含机器数量的均值	
	$\overline{TP}$ 批工件总工时均值	
	$\overline{\Delta t}$ 批工件投放间隔时间均值	
	Δt 相邻批工件投放时间间隔	
	z 工件优先数	

$M_l = \{M_{l1}, M_{l2}, \dots, M_{lm}, \dots, M_{lq_l}\}$ 。bB-DJSS 问题调度中, 不考虑抢占加工, 不考虑装设时间(装设时间包含在工序工时中), 不考虑机器故障及维护保养。工件加工调度过程中, 同一批工件中的各工件仍视为独立的任务单元, 一个工件的某道工序一旦完工, 即流转至其下一道工序(如果存在的话)对应机器类型中的某一台机器上。调度目标设置为两个单目标, 分别是所有批工件总拖期 T_{Σ} 的最小化和拖期批工件百分比 $\%T$ 的最小化。bB-FDJSS 问题可图形化描述如图 1 所示。

需要注意的是, 在 bB-FDJSS 问题中,

由于一个批工件集合中所有的工件完全相同, 因此必然有 $J_{ij} = J_{ij'}$, $O_{ijk} = O_{ij'k}$, 因此, 若从形式化描述来讲, 工件和工序符号中表示批工件内索引号的下标 j 均可以略去。然而, 在制造过程中, 每个工件都是唯一的, 其加工进度及所安排机器都可能不同, 为此, 在调度实施时, 下标 j 仍然是必须保留的。同理, 一个类型机器集合中的所有机器也完全相同, 即 $M_{lm} = M_{lm'}$, 但制造过程每台机器上的实时状态、其所加工的工件都可能有所不同, 因此, 当调度实施时, 下标 m 仍然必须保留。

图1 bR&bD-FDJSS 问题图形化描述

由于批工件为整体投放和整体交付,因而可视作为一个整体。出于以下描述和研究的考虑,将批工件 J_i 视为虚拟工件 $\tilde{J}_i$, $\tilde{J}_i$ 包含一系列虚拟工序 $\tilde{O}_{ik} (k=1,2,n_{ij})$, 每道虚拟工序 $\tilde{O}_{ik}$ 包含 n_i 道实际加工工序 $O_{ijk} (j=1,2,\dots,n_i)$, 在调度时刻 t , 这些实际的加工工序可能处于不同的状态: 未开工、加工中或已完工。因此,不同调度时刻,虚拟工序的内容也不同。现引入虚拟工序 $\tilde{O}_{ik}$ 所属的两个工时相关参数,待加工总工时 $\tilde{P}_{ik}^t$ 和等效工时 $\tilde{p}_{ik}^t$ 。 $\tilde{P}_{ik}^t$ 为 t 时刻 $\tilde{O}_{ik}$ 中包含的所有未开工实际工序的工时总和; 设 O_{ijk} 对应的加工机器类型为 M_k , 该类型可用机器总数为 q_k (不考虑机器被占用), 则 t 时刻 $\tilde{O}_{ik}$ 中的等效工时为 $\tilde{p}_{ik}^t = \tilde{P}_{ik}^t / q_k$ 。

2 仿真模型中投放期与交货期设置

在 bR&bD-FDJSS 问题中,工件以批量方式陆续投放到车间(制造系统),整批完工后,即以批量方式交付给客户,并对拖期情况进行评价。为采用离散事件仿真方法对 bR&bD-FDJSS 问题进行研究,需要设定批工件的投放时间和交货期。

2.1 批工件投放时间的设置

视批工件的随机陆续投放为发生在两个不重叠时间区间的独立随机事件,因而批工件的投放过程服从 Poisson 过程,相邻批工件的投放时间间隔服从指数分布。指数分布的分布参数基于车间利用率设定。车间利用率定义为一定时间内待加工任务总量与车间所有机器加工能力的比值。在 bR&bD-FDJSS 问题中,各批工件的大小可能不同,批工件中单个工件所含工时可能不同。按均值计算,可得一个批工件的总任务量(即总工时)均值如下。

$$\overline{TP} = \overline{n_i} \cdot \overline{n_{ij}} \cdot \overline{p} \quad (1)$$

由于车间内包含 q 类机器,每类机器中所含机器数量不同,均值为 $\overline{q_l}$, 因此,车间所含机器总数量可计为 $q \cdot \overline{q_l}$, 在批工件投放时间间隔均值内 $\overline{\Delta t}$, 车

间的总加工能力为 $q \cdot \overline{q_l} \cdot \overline{\Delta t}$, 因此,车间利用率

$$U_g = \frac{\overline{TP}}{q \cdot \overline{q_l} \cdot \overline{\Delta t}} \quad (2)$$

根据试验设计给定某一车间利用率 U_g , 即可计算得到相邻批工件的平均间隔时间

$$\overline{\Delta t} = \frac{\overline{TP}}{q \cdot \overline{q_l} \cdot U_g} \quad (3)$$

采用蒙特卡洛法,即可按指数分布 $E(1/\overline{\Delta t})$ 生成相邻批工件各间隔时间 Δt_i 。设第一批工件的投放时间为 $r_1 = 0$, 则此后各批工件的投放时间

$$r_i = r_{i-1} + \Delta t_i \quad i = 2, 3, \dots, n \quad (4)$$

2.2 批工件交货期的设置

关于 DJSS 问题研究中,交货期设置有多种方法,如 TWK(Total work content, TWK)方法、CON(Constant allowance for all jobs, CON)方法、SLK(Equal slack for all jobs, SLK)方法、NOP(Number of operations, NOP)方法、JIS(Job in system, JIS)方法、JIQ(Job in queue, JIQ)方法等^[39]。其中, TWK 方法仍然是最常用的方法^[1-4, 40-41]。

如前所述, J_i 视为虚拟工件 $\tilde{J}_i$, 其每一道虚拟工序 $\tilde{O}_{ik}$ 的等效工时为 $\tilde{p}_{ik}^t$ 。基于 TWK 方法的思想,虚拟工件 $\tilde{J}_i$ (即批工件 J_i) 的交货期可设置为 $\tilde{J}_i$ 所有虚拟工序在投放时刻的等效工时总和的宽裕度系数倍数加上其投放时刻,即

$$d_i = r_i + a \cdot \sum_{k=1}^{n_{ij}} \tilde{p}_{ik}^t = r_i + a \cdot \sum_{k=1}^{n_{ij}} (\tilde{P}_{ik}^t / q_k) \quad (5)$$

3 任务调度规则及机器选择规则

由于 DJSS 问题是一种典型的强 NP-hard 问题,显然, bR&bD-FDJSS 也属于强 NP-hard 问题。为此,考虑采用基于调度规则的离散事件动态系统仿真方法进行调度仿真。在迄今为止提出的大量调度规则中,某些简单调度规则被证明在许多问题中具有良

好的性能, 且也常作为新调度规则研究的对比基准规则。如 SPT(Shortest processing time, SPT)规则、FCFS(First come first serve, FCFS)规则、EDD(Earliest due date, EDD)规则、MDD(Modified due date, MDD)规则、SL(Slack time, SL)和 CR(Critical ratio, CR)等, 许多文献的研究表明, 这些简单规则在交货期相关的指标方面表现出较好的性能, 为此, 将这六个简单规则纳入仿真调度中。BLOCHER 等^[42]在研究客户订单调度问题中提出了四个基于订单的调度规则: SPT.o 规则、FCFS.o 规则、SL.o 规则和 CR.o, 由文献^[42]中对规则的定义可知, SL.o 规则与 SL 规则相同, 因此, 将 SPT.o 规则、FCFS.o 规则和 CR.o 三个规则作为评价对象纳入仿真调度, 将其中的订单等同于本研究中的批工件。此外, 基于前述对批工件的虚拟化工件处理, 并借鉴一些常用基于工件的调度规则, 设计了六个新的调度规则。其中 EMDD.b(Equivalent modified earliest due date for batch, EMDD.b)和 ECR.b(Equivalent critical ratio for batch, ECR.b)两个规则基于 MDD 规则和 CR 规则而设计, 将规则中的实际工件的剩余工时替换为虚拟工件的等效工时。需要注意的是, 由于虚拟工序中所含实际工序的完成情况是随时间动态变化的, 因此, 虚拟工件的等效工时始终从第一虚拟工序开始计算, 若某道虚拟工序中所含的所有实际工序均已完工, 则该虚拟工序的等效工时为 0。其余四个所提出的规则为加法式组合规则, 出于各简单规则的性能及前期的先导性调度初步评估的结果而设计。

所有纳入仿真调度的 15 个规则及其优先数计算式如表 2 所示, 进行仿真调度时, 将机器加工队列中优先数最小的工件选出进行加工。

在 bR&bD-FDJSS 问题中, 车间包含若干类型机器集合, 每类机器集合中包含若干完全相同的机器, 工序 O_{ijk} 可在事先指定的某类机器的任一加工, 因此, 属于柔性调度问题。关于工序加工机器多选性的柔性调度问题有较多研究^[43-45], 该类问题调度决策时, 机器选择也是关键的任务之一。调度过程中, 当一个工件被优先调度, 需要在事先指定的某类机器上(称适选类机器)选择一台具体的机器进行加工。机器选择规则如下。

(1) 为尽量缩短工件的等待加工时间, 且不浪费机器的可用时间, 首先在适选类机器中选择闲置时间最早的机器。

(2) 如果适选类机器中闲置时间最早的机器存在多台, 则选择已加工完成工时最少的机器, 以达到平衡同型机器负荷的目的。

表 2 仿真调度中的调度规则

规则类型	规则名称	工件 J_{ij} 优先数计算
传统简单调度规则	SPT	$z_{ij} = p_{ijk}$
	FCFS	$z_{ij} = r_{ijk}$
	EDD	$z_{ij} = d_{ij}$
	MDD	$z_{ij} = \max \left\{ t + \sum_{k=k_j}^{n_j} p_{ijk}, d_{ij} \right\}$
	SL	$z_{ij} = d_i - \left(t + \sum_{k=k_j}^{n_j} p_{ijk} \right)$
	CR	$z_{ij} = (d_i - t) / \sum_{k=k_j}^{n_j} p_{ijk}$
文献 ^[42] 中所提调度规则	SPT.o	$z_{ij} = \sum_{j=1}^{n_j} \sum_{k=1}^{n_j} p_{ijk}$
	FCFS.o	$z_{ij} = r_i$
	CR.o	$z_{ij} = (d_i - t) / \sum_{j=1}^{n_j} \sum_{k=k_j}^{n_j} p_{ijk}$
新提出调度规则	EMDD.b	$z_{ij} = \max \left\{ t + \sum_{k=1}^{n_j} \tilde{p}'_a, d_i \right\}$
	ECR.b	$z_{ij} = (d_i - t) / \sum_{k=1}^{n_j} \tilde{p}'_a$
	ECR.b+EDD	$z_{ij} = (d_i - t) / \sum_{k=1}^{n_j} \tilde{p}'_a + d_{ij}$
	ECR.b+EMDD.b	$z_{ij} = (d_i - t) / \sum_{k=1}^{n_j} \tilde{p}'_a + \max \left\{ t + \sum_{k=1}^{n_j} \tilde{p}'_a, d_i \right\}$
	SPT.o+EDD	$z_{ij} = \sum_{j=1}^{n_j} \sum_{k=1}^{n_j} p_{ijk} + d_{ij}$
	SPT.o+EMDD.b	$z_{ij} = \sum_{j=1}^{n_j} \sum_{k=1}^{n_j} p_{ijk} + \max \left\{ t + \sum_{k=1}^{n_j} \tilde{p}'_a, d_i \right\}$

(3) 如果适选类机器中闲置时间最早且完成工时最少的机器存在多台, 则从中随机选择一台即可。

需要注意的是, 采用基于订单和虚拟工件的规则中, 优选出来的实际上是包含若干工件的一个订单或批工件。但由于订单或批工件中各工件的加工进度不尽相同, 如某个工件当前可调度工序可能是第一道工序, 另一个工件的当前可调度工序可能是第二道工序, 等等。因此, 当进行某(类)机器任务队列调度时, 实际上优选出的是当前可调度工序与该机器匹配的某个(些)工件, 如优选出的工件有多个, 即多个相同工件具有相同的加工进度, 则随机选择其中之一即可。如图 2 所示, 设所列批工件为基于调度规则所优选出的批工件, 图中示例性地列出了该批工件中的四个工件, 其中工件 1 的当前可调度工序为第 1 道工序, 工件 2 和 4 的当前可调度工序为第 2 道工序, 工件 3 的当前可调度工序为第

3 道工序; 当前调度机器与第 2 道工序匹配, 其中有两台机器具有相同的最早闲置时间和最少完成工时。按上述规则, 可在工件 2 和 4 中任选一工件安排于两台机器中任一加工。

图2 同型工件与同型机器调度示意图

4 仿真调度试验

为了对比和评估各调度规则求解 bR&bD-FDJSS 问题的有效性及性能, 采用 JAVA 语言设计开发了一个相应的仿真调度系统, 并进行了相应的仿真调度试验。

4.1 试验设计

仿真调度试验中, bR&bD-FDJSS 问题的具体参数选取如下: 车间中包括 8 种类型机器, 每种类型所含机器数量从 2 至 6 之间随机生成; 调度初始时刻(即零时刻)所有机器空闲可用; 批工件按 Poisson 过程陆续投放至车间, 每批工件只含同一类型的工件, 工件类型随机选自事先设定的 15 种类型, 批工件大小为 10 至 30(即含 10 至 30 个完全相同的工件); 每种类型的工件所包含的工序数随机地从 2 至 4 之间产生, 工序的工时由均匀分布 $U[5, 30]$ 随机产生, 工序的加工机器随机地选自车间中的 8 类机器之一, 但避免机器的重入性。机器的投放时间基于车间利用率不同设置, 试验中考虑三个等级的车间利用率: 85%, 90% 和 95%。交货期宽裕度系数由先导性试验获得。CHANG^[39]指出, 当拖期工件百分比 50%、25% 和 10% 时, 分别对应于紧交货期、中等交货期和松交货期。考虑到交货期松紧程度评价的模糊性及先导性试验的可行性, 将三个等级对应的拖期工件百分比作适当浮动处理, 分别修正为 $50 \pm 5\%$, $25 \pm 5\%$, 和 $10 \pm 5\%$ 。选择 EDD 作为基准调度规则, 通过先导性试验所获得的宽裕度系数如表 3 所示。

基于表 3 可知, 仿真调度试验将在 9 套不同的参数配置下进行。在每套参数配置下, 均按表 2 所列 15 种调度规则进行调度。由于车间初始状态任务

表3 试验中的交货期宽裕度系数

车间利用率(%)	交货期松紧程度		
	紧交货期	中等交货期	松交货期
85	2.5	3.0	3.7
90	2.7	3.4	4.0
95	3.0	3.8	4.8

为空, 且所有机器均闲置可用, 为防止初始偏误, 设定初始投放的 100 个批工件(批工件大小均值为 20, 故大约为 2 000 个工件)为热身阶段。有效数据从第 101 个批工件开始采集, 直至第 300 个批工件完工为止。由于案例生成的随机性, 为使结果具有统计学意义, 在每套参数配置下按 15 个调度规则均进行 30 次独立的仿真调度, 对 30 次仿真下的批工件总拖期和拖期批工件百分比取均值, 并以其作为调度目标的评价指标。批工件总拖期均值 $\overline{T}_\Sigma$ 和拖期批工件百分比取均值 $\%T$ 分别计算如下

$$\begin{cases} \overline{T}_\Sigma = \frac{1}{30} \sum_{s=1}^{30} \sum_{i=101}^{300} \max\{0, C_i - d_i\} \\ \%T = \frac{1}{30} \sum_{s=1}^{30} \sum_{i=101}^{300} \frac{x_i}{200} \end{cases} \quad (6)$$

式中, s 为仿真调度次数索引号, i 为批工件索引号, x_i 为表示批工件是否为拖期的二值特征变量, 其取值为

$$x_i = \begin{cases} 0 & C_i - d_i \leq 0 \\ 1 & \text{其他} \end{cases} \quad (7)$$

4.2 试验数据统计结果

通过 9 套参数配置下各 30 次采用 15 个调度规则的仿真调度, 可获得仿真结果的各种原始数据。为评价和对比调度规则的性能, 取调度规则为因子, 指标 $\overline{T}_\Sigma$ 和 $\%T$ 为因变量, 可得到单因素方差分析及验后比较的结果。Levene 检验显著度(标识为 Sig.1)和组间效应检验显著度数值(标识为 Sig.2)如表 4 所列。由表中可看出, 在各种参数配置下, Levene 检验显著度均大于 0.05, 表明方差在显著性水平 $\alpha = 0.05$ 下满足齐次性; 组间效应检验显著度均小于 0.05, 表明 15 个调度规则的总体差异具有统计学意义。为进一步考察各规则之间的性能对比情况, 采用邓肯多重范围检验进行验后比较, 结果如表 5~7 所示。表中, V_T 和 $V_{\%T}$ 分别为指标 $\overline{T}_\Sigma$ 和 $\%T$ 的变异系数; 处于性能最好前三子集(Top1、Top2 和 Top3)的调度规则分别用上标 “a”、“b” 和 “c” 标识。

表 4 单因素方差分析显著度

显著度	$U_g=85\%, a=2.5$		$U_g=85\%, a=3.0$		$U_g=85\%, a=3.7$		$U_g=90\%, a=2.7$		$U_g=90\%, a=3.4$	
	$\bar{T}_\Sigma$	$\%T$	$\bar{T}_\Sigma$	$\%T$	$\bar{T}_\Sigma$	$\%T$	$\bar{T}_\Sigma$	$\%T$	$\bar{T}_\Sigma$	$\%T$
Sig.1	0.779	0.974	0.068	0.249	0.923	0.104	0.803	0.593	0.624	0.965
Sig.2	0.044	<0.001	0.002	<0.001	0.048	<0.001	0.025	<0.001	0.965	<0.001
显著度	$U_g=90\%, a=4.0$		$U_g=95\%, a=3.0$		$U_g=95\%, a=3.8$		$U_g=95\%, a=4.8$			
	$\bar{T}_\Sigma$	$\%T$	$\bar{T}_\Sigma$	$\%T$	$\bar{T}_\Sigma$	$\%T$	$\bar{T}_\Sigma$	$\%T$		
Sig.1	0.908	0.274	0.628	0.871	0.795	0.067	0.618	0.078		
Sig.2	0.002	<0.001	0.009	<0.001	0.020	<0.001	0.007	<0.001		

表 5 各调度规则车间利用率 $U_g=85\%$ 下的性能指标

调度规则	$a=2.5$				$a=3.0$				$a=3.7$			
	$\bar{T}_\Sigma$	V_T	$\%T$	$V_{\%T}$	$\bar{T}_\Sigma$	V_T	$\%T$	$V_{\%T}$	$\bar{T}_\Sigma$	V_T	$\%T$	$V_{\%T}$
CR	18 268	0.80	52.7	0.25	8 996	0.98	35.7	0.53	^c 3 422	1.32	13.0	0.63
CR.o	^c 17 839	0.75	58.4	0.22	8 990	0.97	39.0	0.53	^c 3 405	1.24	14.4	0.60
ECR.o	^c 17 866	0.75	85.3	0.13	9 028	0.94	75.3	0.22	3 546	1.23	32.4	0.27
ECR.o+EDD	^c 18 139	0.78	49.2	0.26	^c 8 928	1.01	31.3	0.56	^c 3 351	1.31	^c 12.2	0.64
ECR.o+EMDD.o	18 450	0.78	48.0	0.25	^{bc} 8 597	0.97	^c 30.9	0.56	^c 3 432	1.33	^c 12.1	0.64
EDD	^c 18 157	0.78	49.0	0.26	^c 8 927	1.01	31.1	0.57	^c 3 360	1.30	^c 12.2	0.63
FCFS	28 377	0.66	63.7	0.22	16 577	0.80	51.5	0.33	6 609	0.88	20.2	0.38
FCFS.o	26 180	0.69	61.1	0.22	14 858	0.80	47.1	0.33	5 783	0.96	18.5	0.39
MDD	20 186	0.79	48.0	0.25	9 910	1.00	^c 30.9	0.56	3 787	1.35	^c 12.0	0.63
EMDD.o	^a 15 929	0.79	^{ab} 39.1	0.28	^a 7 602	0.96	^a 24.4	0.61	^a 3 043	1.31	^a 9.3	0.68
SL	18 200	0.79	49.5	0.26	9 019	1.00	31.2	0.56	^c 3 350	1.30	^c 12.1	0.64
SPT	23 267	0.61	^c 45.5	0.26	14 453	0.85	35.6	0.42	5 962	0.81	14.5	0.46
SPT.o	19 083	0.68	^a 36.3	0.29	10 384	0.80	^b 26.6	0.44	4 258	0.94	^b 10.8	0.44
SPT.o+EDD	^b 17 172	0.76	^{bc} 41.7	0.27	^b 8 497	0.93	^c 29.1	0.52	^b 3 244	1.24	^b 10.7	0.62
SPT.o+EMDD.o	^{bc} 17 624	0.73	^a 37.3	0.31	^c 8 862	0.90	^{ab} 25.9	0.51	^c 3 463	1.14	^a 9.5	0.61

表 6 各调度规则车间利用率 $U_g=90\%$ 下的性能指标

调度规则	$a=2.7$				$a=3.4$				$a=4.0$			
	$\bar{T}_\Sigma$	V_T	$\%T$	$V_{\%T}$	$\bar{T}_\Sigma$	V_T	$\%T$	$V_{\%T}$	$\bar{T}_\Sigma$	V_T	$\%T$	$V_{\%T}$
CR	^c 11 790	0.91	50.7	0.35	^c 7 902	0.97	28.5	0.41	^c 4 286	1.27	14.8	0.43
CR.o	^{bc} 11 633	0.86	55.1	0.32	^c 7 804	0.86	31.1	0.39	^{bc} 4 176	1.16	16.6	0.46
ECR.o	^c 11 965	0.83	92.9	0.13	8 032	0.86	57.6	0.17	4 438	1.12	35.5	0.18
ECR.o+EDD	^c 12 021	0.91	47.8	0.36	^c 7 660	0.92	^c 25.7	0.43	^b 4 060	1.16	^c 13.0	0.49
ECR.o+EMDD.o	^c 11 911	0.86	47.5	0.36	^c 7 603	0.92	^c 25.4	0.43	^c 4 313	1.29	^c 12.8	0.49
EDD	^c 12 044	0.92	47.4	0.36	^c 7 665	0.92	^c 25.4	0.43	^b 4 067	1.16	^c 12.9	0.49
FCFS	19 442	0.68	63.5	0.26	14 286	0.69	40.5	0.23	8 741	0.76	23.4	0.26
FCFS.o	17 518	0.71	59.3	0.27	13 204	0.72	37.3	0.26	7 724	0.88	21.5	0.26
EMDD	12 981	0.84	47.2	0.36	8 344	0.91	^c 25.1	0.43	4 929	1.32	^c 12.7	0.48
EMDD.o	^a 10 363	0.86	^a 36.9	0.42	^a 6 707	0.91	^a 20.5	0.46	^a 3 801	1.24	^a 10.5	0.54
SL	^c 12 082	0.92	47.3	0.36	^c 7 740	0.92	^c 26.0	0.43	^b 4 071	1.16	^c 12.9	0.50
SPT	17 146	0.58	^c 44.7	0.28	11 471	0.73	^c 26.2	0.33	7 003	0.66	16.4	0.30
SPT.o	13 565	0.72	^a 35.6	0.40	8 822	0.77	^b 21.7	0.37	5 182	0.97	^c 12.3	0.37
SPT.o+EDD	^b 11 159	0.85	^b 39.2	0.41	^b 7 266	0.87	^b 22.5	0.40	^b 4 058	1.14	^c 12.4	0.44
SPT.o+EMDD.o	^c 11 737	0.79	^a 34.9	0.43	^c 7 668	0.84	^a 20.3	0.43	^c 4 314	1.18	^b 11.2	0.43

表 7 各调度规则车间利用率 $U_g=95\%$ 下的性能指标

调度规则	$a=3.0$				$a=3.8$				$a=4.8$			
	$\overline{T_z}$	V_T	$\overline{\%T}$	$V_{\%T}$	$\overline{T_z}$	V_T	$\overline{\%T}$	$V_{\%T}$	$\overline{T_z}$	V_T	$\overline{\%T}$	$V_{\%T}$
CR	^c 16 173	0.84	52.9	0.33	^c 9 024	1.28	31.5	0.58	4 102	1.49	^c 13.5	0.86
CR.o	^c 16 195	0.83	57.4	0.31	^c 8 960	1.25	34.5	0.56	4 073	1.44	15.0	0.80
ECR.o	^c 16 318	0.80	95.1	0.13	9 275	1.23	69.8	0.29	4 489	1.40	36.1	0.41
ECR.o+EDD	^c 15 972	0.82	^c 47.8	0.36	^b 8 679	1.28	^c 27.5	0.62	^{bc} 3 917	1.47	^b 12.4	0.92
ECR.o+EMDD.o	^c 16 215	0.84	^c 46.8	0.36	^{bc} 8 845	1.27	^c 27.5	0.62	4 336	1.51	^b 12.3	0.93
EDD	^c 16 003	0.82	^c 47.9	0.35	^b 8 660	1.28	^c 27.3	0.61	^{bc} 3 919	1.47	^b 12.3	0.93
FCFS	28 300	0.69	67.0	0.21	17 673	0.87	47.3	0.38	8 753	0.92	24.6	0.40
FCFS.o	23 933	0.71	62.6	0.21	16 029	0.92	41.8	0.35	8 238	0.94	21.9	0.40
MDD	17 919	0.82	^c 46.7	0.36	9 674	1.23	^c 27.3	0.61	4 920	1.52	^b 12.2	0.93
EMDD.o	^a 14 651	0.85	^b 39.8	0.39	^a 8 292	1.35	^a 22.7	0.66	^{ab} 3 864	1.49	^a 10.4	0.95
SL	^c 16 125	0.81	^c 48.3	0.35	^b 8 671	1.29	^c 27.5	0.61	^c 3 940	1.46	^b 12.4	0.93
SPT	21 403	0.69	^c 48.1	0.29	14 432	0.89	33.1	0.42	7 884	1.01	17.8	0.43
SPT.o	17 915	0.74	^b 40.3	0.33	10 224	1.05	^b 25.4	0.52	4 817	1.14	^c 13.5	0.62
SPT.o+EDD	^b 15 437	0.80	^b 41.9	0.36	^b 8 640	1.21	^b 25.7	0.57	^a 3 826	1.44	^b 11.9	0.83
SPT.o+EMDD.o	^c 15 924	0.81	^a 37.5	0.39	^c 8 932	1.15	^a 23.3	0.58	^{bc} 3 897	1.37	^a 10.6	0.84

5 试验结果分析

基于上节试验数据的统计结果,进一步针对两个调度指标 $\overline{T_z}$ 和 $\overline{\%T}$ 从以下三方面对 15 个调度规则性能进行分析:① 分析各规则在 9 套参数配置下性能出现在 Top3 子集的次数,以了解规则的总体性能和对 bR&bD-FDJSS 问题求解的鲁棒性;② 分析各规则在 9 套参数配置下性能指标值的对比情况,以了解各规则性能的差异情况;③ 分析各规则在 9 套参数配置下 30 次仿真调度性能指标的变异系数,以了解纳入调度的总体任务量对性能的影响情况。

5.1 各规则在 $\overline{T_z}$ 指标下的性能分析

为比较各规则在 $\overline{T_z}$ 指标下的总体性能,基于表 5~7 中的验后比较结果,统计了各规则出现在性

能 Top3 子集中的次数,结果如图 3 所示。可以看出,EMDD.b 规则在 9 套参数配置下的调度性能均处于 Top1 子集中,表明该规则对 $\overline{T_z}$ 指标下稳定而优越的性能;The SPT.o+EDD 在 7 套参数配置下的调度性能处于 Top2 子集中,在 2 套参数配置下的调度性能处于 Top3 子集中,同样表现出较稳定和优越性能;CR.o、ECR.b+EDD、ECR.b+EMDD.b、EDD、SL 和 SPT.o+EMDD.b 等规则均在性能前三的子集中有出现,也属于有效规则;而 FCFS、FCFS.o、MDD、SPT 和 SPT.o 五个规则在 9 套参数下均未出现在性能前三的子集中,表现出对于 $\overline{T_z}$ 指标而言较差的性能。图 4 所示为 15 个调度规则在 9 套参数下 $\overline{T_z}$ 指标的具体数值。可以明显看出 FCFS、FCFS.o、MDD、SPT 和 SPT.o 等五个规则的 $\overline{T_z}$ 指标值较其他规则明显更大,但其他 10 个规则的差值不显著。

图 3 $\overline{T_z}$ 指标下各调度规则处于性能前三子集的次数

图 4 各调度规则在 9 套参数下的 $\overline{T}_2$ 指标值

图 5 为各规则在 9 套参数配置下进行 30 次仿真调度(对应于随机生成的 30 个仿真案例)所得 $\overline{T}_2$ 指标值的变异系数。可以看出,在大多数参数配置下,变异系数大于 0.8,表明 30 仿真下具有较大的离散度。由于在试验参数设置中,批工件大小产生于离散均匀分布 $DU[10, 30]$,工件所含工序数产生于 2

至 4 之间,工序工时在均匀分布 $U[5, 30]$ 中产生,因此,批工件的总工时将处于 $[100, 3\ 600]$ 区间内。由此可能造成不同仿真案例的总工时具有较大差异,进而使得调度性能指标的绝对值较为离散。然而,有趣的是,从图中可以明显看出,两个性能最差的规则 FCFS 和 SPT 却有最小的变异系数。

图 5 各调度规则在 9 套参数下 30 次仿真调度 $\overline{T}_2$ 指标的变异系数

5.2 各规则在 $\%T$ 指标下的性能分析

对于 $\%T$ 指标来说,各规则出现在性能 Top3 子集中的次数统计结果如图 6 所示。可以看出,EMDD.b 和 SPT.o+EMDD.b 性能最佳,两个各规则在 7 套参数配置下处于 Top1 子集,在 2 套参数配置下处于 Top2 子集;SPT.o 和 SPT.o+EDD.o 两个规则也表现出较好的性能,它们在 9 套参数配置下均处于 Top3 子集中。此外,ECR.b+EDD、ECR.b+EMDD.b、EDD、MDD、SL 和 SPT 6 个规则也在 Top3 子集中出现若干次数,属于有效规则。然而,CR、CR.o、ECR.o、FCFS 和 FCFS.o 等规则对 $\%T$ 指标而言则表现出较差性能。

图 7 所示为 15 个调度规则在 9 套参数下 $\%T$ 指

标的具体数值。可以看出 ECR.o 规则的 $\%T$ 指标在各种参数配置下都较其他规则明显大得多,FCFS、FCFS.o、SL 和 SPT 等四个规则的 $\%T$ 指标也具有较大数值,CR、ECR.b+EDD、ECR.b+EMDD.b 和 EDD 等规则的 $\%T$ 指标值较小,且比较接近。

各规则在 9 套参数配置下进行 30 次仿真调度(对应于随机生成的 30 个仿真案例)所得 $\%T$ 指标值的变异系数如图 8 所示。可以看出,与 $\%T$ 指标相比,所有的变异系数均更小些。性能最差规则 ECR.o 的变异系数最小,其他几个性能较差规则,FCFS、FCFS.o 和 SPT 也具有较小的变异系数值。总体上,规则性能与变异系数大小之间关系的规律与 $\overline{T}_2$ 指标下表现相同。

图 6 $\overline{\%T}$ 指标下各调度规则处于性能前三子集的次数 图 7 各调度规则在 9 套参数下的 $\overline{\%T}$ 指标值 图 8 各调度规则在 9 套参数下 30 次仿真调度 $\overline{\%T}$ 指标的变异系数

6 结论

提出了一种批量交付和投放的柔性动态 Job Shop 调度问题。基于问题的复杂度,采用基于调度规则的仿真方法对该问题进行了研究。基于所提出

的虚拟工件和虚拟工序的概念,研究了批工件交货期设置的新方法;基于等效工时的概念及通过组合方式设计了 6 种新调度规则,并与所选择的 9 个文献中的规则一并纳入仿真调度中,基于仿真调度结果及其分析得出了一些有益的结论。

(1) 在 15 个调度规则中,EMDD.b 规则求解

bR&bD-FDJSS 问题在两个所考察的调度指标下均表现出最优性能。将文献所提面向订单的简单规则进行组合所得新规则 SPT.o+EDD.o 在两个调度指标下也具有较优越的性能; FCFS 和 FCFS.o 两个规则在所考察的两个指标下性能最差。SPT.o 规则对于拖期批工件百分比指标表现出优良的性能, 但对批工件总拖期指标而言则性能较差, SPT 规则的性能情况也类似, 这与 HOLTHAUS 等^[3]在研究一般动态 Job Shop 问题所得结论相吻合。与此相反的是, CR.o 和 ECR.b 规则对于批工件总拖期指标而言则性能较好, 但在拖期批工件百分比指标下却表现出较差性能。

(2) 许多关于一般 DJSS 问题的研究表明: 车间利用率和交货期松紧程度对调度规则的性能具有一定程度的影响。基于车间利用率和交货期松紧度的组合, 设定了 9 套不同的参数配置。仿真调度结果显示, 在所有参数配置下, 15 个调度规则在两个调度指标下的数值对比情况几乎相同(参考图 5 和图 7), 由此表明: 在 bR&bD-FDJSS 问题中, 以 $\bar{T}_c$ 和 $\%T$ 作为调度指标, 车间利用率和交货期松紧程度对调度规则性能影响甚微。

(3) 就两个调度指标下 30 次仿真调度结果的变异系数进行了分析, 结果表明, 性能越好的调度规则具有越大的变异系数, 而性能越差的变异系数却具有越小的变异系数。由于调度规则算法是一种确定性算法, 多次调度结果的差异性源自仿真案例生成的随机性, 由此可见, 性能优良的规则对仿真案例中任务的内容及组成情况会产生更为灵敏的响应。然而, 无论在哪个案例下, 性能优良规则所得出的调度指标绝对值都优于性能较差规则。

参 考 文 献

- [1] BAKER K R, BERTRAND J W M. An investigation of due-date assignment rules with constrained tightness[J]. *Journal of Operations Management*, 1981, 1(3): 109-120.
- [2] HOLTHAUS O. Design of efficient job shop scheduling rules[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 1997, 33(1-2): 249-252.
- [3] HOLTHAUS O, RAJENDRAN C. Efficient dispatching rules for scheduling in a job shop[J]. *International Journal of Production Economics*, 1997, 48(1): 87-105.
- [4] RAJENDRAN C, HOLTHAUS O. A comparative study of dispatching rules in dynamic flowshops and job shops[J]. *European Journal of Operational Research*, 1999, 116(1): 156-170.
- [5] AYDIN M E, ÖZTEMEL E. Dynamic job-shop scheduling using reinforcement learning gents[J]. *Robotics and Autonomous Systems*, 2000, 33(2-3): 169-178.
- [6] 万国华. 用模糊调度系统求解动态 Job Shop 问题[J]. *系统工程理论与实践*, 2001(8): 97-101.
WAN Guohua. Using fuzzy scheduling system for solving a dynamic job shop problem[J]. *Systems Engineering-Theory & Practice*, 2001(8): 97-101.
- [7] SABUNCUOGLU I, COMLEKCI A. Operation-based flowtime estimation in a dynamic job shop[J]. *Omega*, 2002, 30(6): 423-442.
- [8] DOMINIC P D D, KALIYAMOORTHY S, KUMAR M S. Efficient dispatching rules for dynamic job shop scheduling[J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2004, 24(1-2): 70-75.
- [9] 刘琳, 谷寒雨, 席裕庚. 工件到达时间未知的动态车间滚动重调度[J]. *机械工程学报*, 2008, 44(5): 68-75.
LIU Lin, GU Hanyu, XI Yugeng. Reschedluing algorithm based on rolling horizon decomposition for a dynamic job shop with uncertain arriving time[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2008, 44(5): 68-75.
- [10] KAPANOGLU M, ALIKALFA M. Learning IF-THEN priority rules for dynamic job shops using genetic algorithms[J]. *Robotics and Computer Integrated Manufacturing*, 2011, 27(1): 47-55.
- [11] KORYTKOWSKI P, WIŚNIEWSKI T, RYMASZEWSKI S. An evolutionary simulation-based optimization approach for dispatching scheduling[J]. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 2013, 35(6): 69-85.
- [12] SCHOLZ-REITER B, HILDEBRANDT T, TAN Y. Effective and efficient scheduling of dynamic job shops: Combining the shifting bottleneck procedure with variable neighbourhood search[J]. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 2013, 62(1): 423-426.
- [13] PERGHER I, ALMEIDA A T. A multi-attribute, rank-dependent utility model for selecting dispatching rules[J]. *Journal of Manufacturing Systems*, 2018, 46(1): 264-271.
- [14] 范华丽, 熊禾根, 蒋国璋, 等. 基于遗传规划的动态作业车间调度规则生成[J]. *计算机集成制造系统*, 2018, 24(4): 876-885.
FAN Huali, XIONG Hegen, JIANG Guozhang, et al. Research on the generation of dispatching rules for dynamic Job-shop scheduling problem based on genetic programming algorithm[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2018, 24(4): 876-885.

- [15] VINOD V, SRIDHARAN R. Scheduling a dynamic job shop production system with sequence-dependent setups: An experimental study[J]. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2008, 24(3): 435-449.
- [16] SHARMA P, JAIN A. Performance analysis of dispatching rules in a stochastic dynamic job shop manufacturing system with sequence-dependent setup times: Simulation approach[J]. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 2015, 10(8): 110-119.
- [17] 汪双喜, 张超勇, 刘琼, 等. 不同再调度周期下的柔性作业车间动态调度[J]. *计算机集成制造系统*, 2014, 20(10): 2470-2478.
- WANG Shuangxi, ZHANG Chaoyong, LIU Qiong, et al. Flexible job shop dynamic scheduling under different rescheduling period[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2014, 20(10): 2470-2478.
- [18] SHEN Xiaoning, YAO Xin. Mathematical modeling and multi-objective evolutionary algorithms applied to dynamic flexible job shop scheduling problems[J]. *Information Sciences*, 2015, 298(3): 198-224.
- [19] ZHOU Yong, YANG Jianjun. Automatic design of scheduling policies for dynamic flexible job shop scheduling by multi-objective genetic programming based hyper-heuristic[J]. *Procedia CIRP*, 2019, 79: 439-444.
- [20] MOHANASUNDARAM K M, NATARAJAN K, VISWANATHKUMAR G, et al. Scheduling rules for dynamic shops that manufacture multi-level jobs[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2003, 44(1): 119-131.
- [21] THIAGARAJAN S, RAJENDRAN C. Scheduling in dynamic assembly job-shops to minimize the sum of weighted earliness, weighted tardiness and weighted flowtime of jobs[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2005, 49(4): 463-503.
- [22] 边志兴. 作业车间的模糊动态调度问题研究[J]. *中国管理科学*, 2008, 16(8): 76-83.
- BIAN Zhixing. Study on the fuzzy dynamic scheduling under the job shop environments[J]. *Chinese Journal of Management Science*, 2008, 16(8): 76-83.
- [23] HOLTHAUS O. Scheduling in job shops with machine breakdowns: An experimental study[J]. *Computers and Industrial Engineering*, 1999, 36(99): 137-162.
- [24] KUTANOGLU E, SABUNCUOGLU I. Experimental investigation of iterative simulation-based scheduling in a dynamic and stochastic job shop[J]. *Journal of Manufacturing Systems*, 2001, 20(4): 264-279.
- [25] ADIBI M A, ZANDIEH M, AMIRI M. Multi-objective scheduling of dynamic job shop using variable neighborhood search[J]. *Expert Systems with Applications*, 2010, 37(1): 282-287.
- [26] QIU X, LAU H Y K. An AIS-based hybrid algorithm with PDRs for multi-objective dynamic online job shop scheduling problem[J]. *Applied Soft Computing*, 2013, 13(3): 1340-1351.
- [27] SWEENEY K D, SWEENEY II D C, CAMPBELL J F. The performance of priority dispatching rules in a complex job shop: A study on the Upper Mississippi River[J]. *International Journal of Production Economics*, 2019, 216(10): 154-172.
- [28] SHAHRABI J, ADIBI M A, MAHOOTCHI M. A reinforcement learning approach to parameter estimation in dynamic job shop scheduling[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2017, 110(8): 75-82.
- [29] 连坤雷, 张超勇, 高亮, 等. 一种基于改进遗传算法的多目标动态调度优化[J]. *中国制造业信息化*, 2010, 39(3): 13-17.
- LIAN Kunlei, ZHANG Chaoyong, GAO Liang, et al. An improved genetic algorithm for multi-objective dynamic scheduling optimization[J]. *Manufacturing Information Engineering of China*, 2010, 39(3): 13-17.
- [30] 王万良, 王磊, 王海燕, 等. 基于混合差分进化算法的作业车间动态调度[J]. *计算机集成制造系统*, 2012, 18(3): 531-539.
- WANG Wanliang, WANG Lei, WANG Haiyan, et al. Dynamic job shop scheduling based on hybrid differential evolution algorithm[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2012, 18(3): 531-539.
- [31] KUNDAKCI N, KULAK O. Hybrid genetic algorithms for minimizing makespan in dynamic job shop scheduling problem[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2016, 96(6): 31-51.
- [32] 熊禾根, 李建军, 孔建益, 等. 考虑工序相关性的动态 Job shop 调度问题启发式算法[J]. *机械工程学报*, 2006, 42(8): 50-55.
- XIONG Hegen, LI Jianjun, KONG Jianyi, et al. Heuristic method for dynamic job shop scheduling problem with operation relativity[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2006, 42(8): 50-55.
- [33] XIONG Hegen, FAN Huali, JIANG Guozhang. A simulation-based study of dispatching rules in a dynamic job shop scheduling problem with batch release and

- extended technical precedence constraints[J]. European Journal of Operational Research, 2017, 257(1): 13-24.
- [34] JACKSON J R. Jobshop-like queueing systems[J]. Management Science, 1963, 10(1): 518-521.
- [35] LENSTRA J K, RINNOOY KAN A H G, BRUCKER P. Complexity of machine scheduling problems[J]. Annals of Discrete Mathematics, 1977, 1(12): 343-362.
- [36] PERGHER I, ALMEIDA A T. A multi-attribute, rank-dependent utility model for selecting dispatching rules[J]. Journal of Manufacturing Systems, 2018, 46(1): 264-271.
- [37] KENYON G, CANEL C NEUREUTHER B D. The impact of lot-sizing on net profits and cycle times in the n-job, m-machine job shop with both discrete and batch processing[J]. International Journal of Production Economics, 2005, 97(3): 263-278.
- [38] SUBRAMANIAMV, RAMESHT, LEE G K, et al. Job shop scheduling with dynamic fuzzy selection of dispatching rules[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2000, 16(10): 759-764.
- [39] CHANG F R. A study of due-date assignment rules with constrained tightness in a dynamic job shop[J]. Computers & Industrial Engineering, 1996, 31(1-2): 205-208.
- [40] GÜÇDEMİR H, SELIMH. Customer centric production planning and control in job shops: A simulation optimization approach. Journal of Manufacturing Systems[J], 2017, 43(4): 100-116.
- [41] GÜÇDEMİR H, SELIMH. Integrating simulation modeling and multi criteria decision making for customer focused scheduling in job shops[J]. Simulation Modelling Practice and Theory, 2018, 88(11): 17-31.
- [42] BLOCHER J D, CHHAJED D, LEUNG M. Customer order scheduling in a general job shop environment[J]. Decision Sciences, 1998, 29(4): 951-981.
- [43] 徐华, 张庭. 混合离散蝙蝠算法求解多目标柔性作业车间调度[J]. 机械工程学报, 2016, 52(18): 201-212.
- XU Hua, ZHANG Ting. Hybrid discrete bat algorithm for solving the multi-objective flexible job shop scheduling problem[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52(18): 201-212.
- [44] 何彦, 王乐祥, 李育锋, 等. 一种面向机械车间柔性工艺路线的加工任务节能调度方法[J]. 机械工程学报, 2016, 52(19): 168-179.
- HE Yan, WANG Lexiang, LI Yufeng, et al. A scheduling method for reducing energy consumption of machining job shops considering the flexible process plan[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52(19): 168-179.
- [45] 李聪波, 沈欢, 李玲玲, 等. 面向能耗的多工艺路线柔性作业车间分批优化调度模型[J]. 机械工程学报, 2017, 53(5): 12-23.
- LI Congbo, SHEN Huan, LI Lingling, et al. A batch splitting flexible job shop scheduling model for energy saving under alternative process plans[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(5): 12-23.
-
- 作者简介: 熊禾根(通信作者), 男, 1966 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为制造系统优化调度, 机械现代设计方法。
E-mail: xionghegen@126.com
- 吴健, 男, 1989 年出生。主要研究方向为制造系统调度。
E-mail: 1690252028@qq.com
- 阳光灿, 男, 1995 年出生。主要研究方向为制造系统调度。
E-mail: guangcanyang@yeah.net