

控制与决策

Control and Decision

面向复杂作业车间的交互式两级调度方法

张家谔, 杨建军

引用本文:

张家谔, 杨建军. 面向复杂作业车间的交互式两级调度方法[J]. *控制与决策*, 2020, 35(9): 2285–2291.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0107>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

资源受限多项目调度问题的两阶段算法

Two-stage algorithm for resource-constrained multi-project scheduling problem

控制与决策. 2020, 35(8): 2013–2020 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2018.1540>

改进人工蜂群算法求解分布式柔性作业车间调度问题

Improved artificial bee colony algorithm for distributed and flexible job-shop scheduling problem

控制与决策. 2019, 34(12): 2527–2536 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2018.0336>

求解任务可拆分多项目协同调度问题的启发式算法

Heuristic algorithm for solving multi-project collaborative scheduling problem with activity splitting

控制与决策. 2017, 32(6): 1013–1018 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2016.0415>

具有空闲时间的云制造作业车间调度方法

Job shop scheduling method with idle time in cloud manufacturing

控制与决策. 2017, 32(5): 811–816 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2016.0447>

基于关键资源优先的三级装卸搬运分时协调策略

Time-dependent coordination strategies for key resource prioritized three-stage handling operations

控制与决策. 2015, 30(8): 1441–1446 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2014.0830>

面向复杂作业车间的交互式两级调度方法

张家谔^{1†}, 杨建军²

(1. 中国航空制造技术研究院 数字化制造技术航空科技重点实验室, 北京 100024;
2. 北京航空航天大学 机械工程及自动化学院, 北京 100191)

摘要: 针对边界不确定和具有决策偏好的大规模复杂作业车间调度问题, 提出以第 1 级为交互式约束设置求解, 第 2 级为优化求解的两级调度求解策略. 在第 1 级调度中研究交互式约束满足的基于优先级快速调度构建算法, 作为支持决策者交互式约束调整的快速响应求解方法. 在第 2 级调度中以基于优先级的快速调度构建算法为基础, 研究以优先级为决策变量的智能优化搜索算法, 作为满足第 1 级调度中的交互式约束的改进优化求解. 该方法较好地融入了决策者的经验知识和偏好, 同时结合优化搜索求解算法, 使得在满足决策者偏好的基础上进一步改进调度求解质量, 增加调度求解结果的可信度, 在实际应用中取得良好的应用效果. 最后, 通过一个案例对该两级调度求解策略的过程进行描述, 并对所提出方法的有效性进行阐述.

关键词: 复杂作业车间; 交互式调度; 约束满足; 智能优化; 优先级规则; 粒子群算法

中图分类号: TP391 文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2019.0107

引用格式: 张家谔, 杨建军. 面向复杂作业车间的交互式两级调度方法[J]. 控制与决策, 2020, 35(9): 2285-2291.

Two-stage interactive scheduling method for complex job-shop

ZHANG Jia-e^{1†}, YANG Jian-jun²

(1. Aeronautical Key Laboratory for Digital Manufacturing Technologies, AVIC Manufacturing Technology Institute, Beijing 100024, China; 2. School of Mechanical Engineering & Automation, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: Aiming at the large-scale complex job-shop scheduling problem of boundary uncertainty and decision preference, a two-stage method which contains interactive scheduling and optimal scheduling is proposed. In the stage of interactive scheduling, a priority rule-based scheduling algorithm which satisfies the multi-constraints is introduced. In the stage of optimal scheduling, the relation between priority rule-based scheduling algorithm and intelligent optimization search method is analyzed, and an intelligent optimization search algorithm combined by priority rule-based scheduling algorithm is designed for optimize the multi-constraints scheduling. The two-stage interactive scheduling method integrates the empirical knowledge and preferences of decision makers, and combines the optimized search algorithm to make the quality of the scheduling solution further improved on the basis of satisfying the decision-maker's preferences. This method has been applied to practical aviation manufacturing factories and gets good effects. Finally, the solution process of an application case is described in detail, and the effectiveness of the proposed method is illustrated.

Keywords: complex job shop; interactive scheduling; constraint satisfaction; intelligent optimization; priority rules; particle swarm optimization

0 引言

航空航天制造中的复杂作业车间具有产品种类繁多、工艺复杂以及按照批次进行生产管理等特点, 生产过程的顺畅运行严重依赖于计划与调度系统的应用^[1-4]. 然而, 实际的复杂作业车间调度问题具有边界不确定、受决策者偏好影响以及规模庞大等特点.

在边界不确定方面, 复杂作业车间调度求解之前需要对调度求解的边界条件(交付需求、工艺路线、加

工时间、加工批量等)进行确定, 构建可供调度优化的求解模型. 而某些边界条件的设置存在一定的柔性, 例如工序加工批量的设置、工艺路线的选择等. 对于具有柔性边界条件的复杂作业车间调度求解, 如果通过一个快速的可行解构造方法并结合调度分析, 则能够对边界条件设置的合理性进行快速交互式分析验证, 从而获取较为合理的边界条件, 构建可供优化求解的调度模型.

收稿日期: 2019-01-23; 修回日期: 2019-06-18.

责任编辑: 赵珺.

[†]通讯作者. E-mail: zhangjiae@hotmail.com.

在决策偏好性方面,决策者对生产作业的具体安排存在一定的偏好性,例如工序调度决策属性的决策偏好(设备选择、工序间顺序设置、工序间物流形式设置、加班设置以及抢占设置),这些偏好的满足程度是调度结果的重要指标,而这些偏好通常通过约束设置进行表述。

在规模庞大方面,由于工序任务数量规模较大,存在较多工序调度的决策,导致优化搜索空间庞大,如果能够预先利用经验知识对部分决策变量进行约束设置,则会大大减少搜索空间,降低调度优化求解的困难。因此,交互式约束设置求解是解决边界条件不确定、大规模和具有偏好决策性质的复杂作业车间调度问题预处理的一个必要和实用的技术方法。

人机交互的决策支持系统一直受到广泛的关注^[5-8],特别是在调度、规划等具有复杂决策环境中的应用。Higgins^[9]针对作业车间调度问题,开发了一套支持人机交互的车间调度系统,但是,其提出的交互式调度系统中的约束关系较为简单,主要关注人机交互的界面设计和动态信息的维护,所提供的调度算法为简单的规则算法,不具有交互优化求解性能。Palombarini等^[10]针对动态调度环境,设计了强化学习机制的调度原型系统,利用强化学习的方法对决策者的调整策略进行学习,使用学习获得的调整规则对调度方案进行调整,但是,求解的问题约束简单、规模较小,在复杂约束特点和较大规模的调度问题中的应用还需进一步研究。Radhika^[11]开发了人机交互式的人力调度系统,考虑了实际生产过程中人员的缺勤和人员负荷限制等因素,这些系统均采用了基于约束满足的方法进行求解,但是,由于约束的表达均为硬约束,通常无法找到可行解,对具有柔性约束的优化调度的求解不太适用。庞新富等^[12]针对钢铁生产中需要调度人员参与优化调整的柔性作业车间生产重调度问题,提出由基于人机协同的炉次加工设备调整,基于线性规划的炉次开工和完工时间调整两部分组成的人机协同重调度策略,给出各部分调度算法并开发了对应的重调度系统,取得了一定应用效果。

目前,人机交互的求解模式对复杂问题的求解增加了问题求解的效率及结果的置信度,受到广泛的关注并显示出了巨大的应用前景,而针对航空航天离散型复杂作业车间的调度问题,尚未有交互式决策系统的应用案例。因此,本文针对复杂作业车间调度环境,研究以约束设置为干预手段的交互式求解模式,利用基于优先级的计算分派方法构造可行解,以满足边界条件不确定、大规模和具有偏好决策性质的复杂作

业车间调度问题的交互式求解,同时,采用智能优化算法实现满足交互约束环境下的进一步优化求解。

1 两级调度求解策略

本文采用图1所示的复杂作业车间的两级调度求解策略。

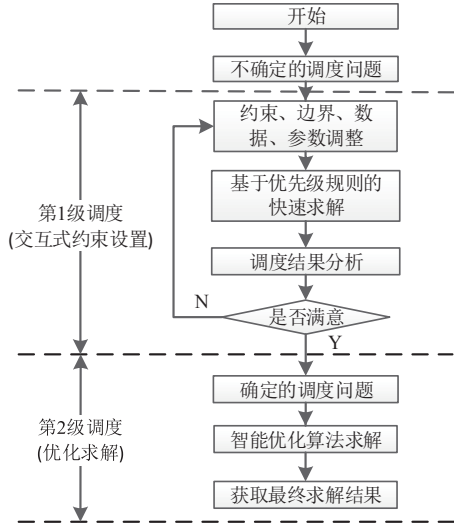


图1 两级调度求解策略

第1级: 结合灵活的交互式约束设置手段,利用基于优先级的规则算法快速获取满足交互式约束的可行解,决策者可以依据对可行解的分析,选择进行重新的约束设置或者进入下一级的优化求解。

第2级: 经过第1级的交互式约束设置后,已经确定了调度问题的边界条件,获得了可供调度优化求解的确定模型,并对部分决策变量的取值进行了约束设置,降低了问题求解的搜索空间,在第2级的求解中将利用满足约束设置的智能优化算法进行进一步的优化计算。

2 第1级调度

2.1 满足交互式约束调整的调度方案构造流程

在具有交互约束的调度求解中,需要在调度方案的构建中对约束进行处理。图2所示为约束调整与调

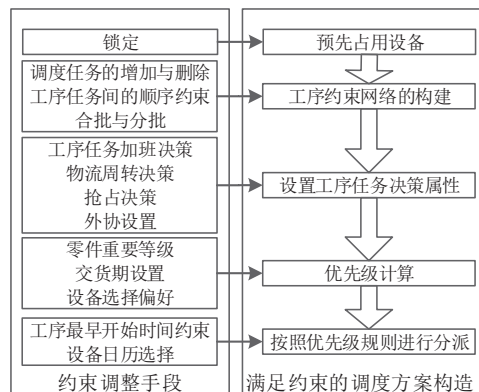


图2 约束调整与调度构造计算流程对应关系

度构造流程的对应关系,左侧表示第1级调度过程中可供决策者设置的约束,右侧表示调度方案构造的流程.调度构造的流程分为5个步骤:预先占用设备、工序约束网络的构建、设置工序任务决策属性、优先级计算以及按照优先级规则进行分派,下面分别对这5个步骤进行详细解释.

2.1.1 预先占用设备

锁定是决策者通过手动设置,把某一道工序安排到具体的一台设备上,并指定该工序的加工开始时间和结束时间.针对锁定的工序任务,其具有对设备占用的最高优先权,所以调度方案构造的第1步就是对锁定的工序任务进行设备的预先占用.在具有实际生产进度的反馈信息输入的情况下,对于已经确定的任务开始时间和实际加工进度,也可以通过预先占用设备的方式进行锁定.

2.1.2 工序约束网络构建

工序约束网络是工序之间顺序约束的表述,在交互约束设置求解的过程中,调度任务的增加与删除操作、工序间的顺序约束以及合批与分批的处理都将会影响工序约束网络的构建.

1) 调度任务的增加与删除操作.

在交互式计算过程中,决策者会对需要调度的零件任务集合进行维护,所以需要提供给决策者对参与调度的零件批次任务以及工序的增加与删除的功能,调度任务的增加与删除将会改变工序约束网络的节点集合.

2) 工序间的顺序约束.

工序间的顺序约束体现在工序间的前后置关系上,这里给出3类工序间顺序约束的设置方式:工艺路线顺序的调整、设备上工序顺序的指定以及对冲突工序之间的顺序指定.工艺路线顺序的调整用于对同一零件批次任务下的工序间的顺序进行调整;设备上工序顺序的指定用于对安排在同一设备上的工序间次序进行调整;冲突工序之间的顺序用于对具有相同设备需求的工序间顺序进行设置.

3) 合批与分批.

在批次管理的生产环境中,会存在相同零件的不同批次任务,需要对这些不同批次的任务进行合批或者分批处理.合批与分批的操作将会对工序任务集合及之间的连接关系进行重组.合批处理用于对相同零件的不同批次进行打包.合批处理可划分为全部工序的合批和部分工序合批:全部工序的合批将会删除合批前的零件批次任务,取而代之的是合批后的零件批次任务;而部分工序的合批不会删除之前

的零件批次任务,而仅把需要合批的工序进行重新组合并建立约束关系.分批处理是对一个批次任务的工序任务进行重组,分批处理会删除之前的零件批次任务,依据分批的工序重新构建零件批次任务和约束关系.

2.1.3 设置工序任务的决策属性

工序任务的决策属性是调度方案构造的主要依据,包括加班、物流周转方式、抢占、外协这几类决策.

工序任务加班决策:决策者对具体的某道工序任务是否进行加班设置.

物流周转方式决策:决策者可以通过对同一零件任务下的相邻两工序的物流周转方式进行指定,包括顺序移动和平顺移动方式的设置.

抢占决策:决策者可以对某一工序任务是否允许抢占(中断)进行指定.

外协设置:决策者可以直接对某道工序进行外协指派而不占用本部门的设备.

2.1.4 优先级计算

优先级是调度方案构造中的重要属性,包括任务优先级和设备选择优先级.

1) 任务优先级.

任务优先级确定了工序任务在调度安排中的优先顺序,不仅直接影响调度方案的构建,而且能给决策者一个对该任务轻重缓急的警示.任务交付的关键属性是优先级计算的依据,本文考虑剩余交货时间(交货期减去调度的当前时间)、交付松弛率(越小说

表1 优先级计算规则

剩余交货时间/天	松弛率	重要等级	优先级
<0	-	-	I-1
0~2	-	-	I-2
2-4	-	-	I-3
>4	0<松弛率≤1	非常重要	I-4
>4	0<松弛率≤1	很重要	I-5
>4	1<松弛率<3	非常重要	II-1
>4	1<松弛率<3	很重要	II-2
>4	0<松弛率≤1	一般	II-3
>4	1<松弛率<3	一般	II-4
>4	0<松弛率≤1	不重要	II-5
>4	1<松弛率<3	不重要	III-1
>4	3≤松弛率<5	非常重要	III-2
>4	3≤松弛率<5	很重要	III-3
>4	3≤松弛率<5	一般	III-4
>4	松弛率>5	非常重要	III-5
>4	3≤松弛率<5	不重要	IV-1
>4	松弛率>5	很重要	IV-2
>4	松弛率>5	一般	IV-3
>4	松弛率>5	不重要	IV-4

明该零件批次任务越紧迫,由剩余交货时间除以任务完成所需时间得出)、重要度(由决策者给定的交付的优先程度)这3个属性.表1所示为一实际应用的优先级规则计算方式,其取值按照分层的方式进行划分,可划分为四大类(I、II、III、IV),每一类中又可继续细分等级,数字越小,说明该任务越优先.

2) 设备选择优先级.

当一个工序任务面临多个设备可供选择时,需在可选的设备集合中选择一个设备进行加工,选择时需综合考虑决策者设置的设备选择偏好、该任务在设备上的完工时间以及设备上负荷的均衡程度这3个因素.设备选择偏好为决策者对工序任务与可选设备之间的偏好关系进行的设置,任务在设备上的完工时间为任务在该设备上的预计完工时间,设备上的负荷为设备上已经安排的任务量.

为了对这3个因素进行权衡,下面给出加权综合的计算方式对可选设备的优先级进行计算,得分越高则该设备的优先级越高:

设备选择优先级 =

$$w_1 \times \text{设备选择偏好得分} + w_2 \times \text{完工时间得分} + w_3 \times \text{设备均衡得分},$$

其中 w_1 、 w_2 、 w_3 分别为设备选择偏好得分、完工时间得分和设备均衡得分的权重.为了统一量纲,应分别对设备选择偏好得分、完工时间得分以及设备均衡得分进行归一化处理,使其取值落在 $[0, 1]$ 区间内.

设备选择偏好得分的归一化处理:由于偏好关系由决策者指定,设备选择偏好得分的归一化处理可依据偏好的等级,对应于给定 $[0, 1]$ 区间内的数值.

完工时间得分的归一化处理:完工时间得分 = (可选设备集合中最晚的完工时间 - 该设备上的完工时间) / (可选设备集合中最晚的完工时间 - 可选设备集合中最早的完工时间).

设备均衡得分的归一化处理:设备均衡得分 = (可选设备集合中最大的已占用的时间 - 该设备已占用的时间) / (可选设备集合中最大的已占用的时间 - 可选设备集合中最小的已占用的时间).

2.1.5 按照优先级进行分派

基于优先级规则的方式是决策者最容易理解的分派方式,其采用“优先级越高就越先分派”的策略,把待安排的工序任务逐一地分派到设备上,形成详细的作业计划.

首先,需要依据工序任务约束网络(工序任务约束网络是表达工序之间绝对不可违反的前后置关系),构建出可安排工序任务集合(工序约束网络中入

度为0的工序任务集合);然后,按照工序任务优先级在可安排工序任务集合中选出最优先安排的工序任务.根据选出的最优先安排工序任务选择出可安排设备集合,再按照设备选择优先级选出最优先安排设备.把优先的工序任务安排到优先的设备上之后进行设备负荷能力的更新.在可安排任务集合中去除已安排任务,加入其刚安排的工序任务的后续工序任务,进行可安排工序任务集合的更新,之后进行循环,直至所有任务安排完成.通过这样的方法,可在保证工序之间工艺约束的情况下优先安排优先级高的工序任务.给设备分派一个工序时将依据工序任务的决策属性(加班决策、物流周转形式决策)、开工时间约束和设备日历,采用工序任务占用设备的时间单元格的形式进行,详细的计算过程可参见文献[13].

2.2 调度结果分析

调度结果分析是启发决策者进行约束设置求解的重要步骤,在满足上一次交互约束的调度方案构建完成后,决策者将依据调度结果的分析作为导引,结合自己的经验知识和偏好作出相应的干预和调整.调度结果的分析将从任务和设备两个视角展开.

2.2.1 任务视角的分析

当一个零件批次任务拖期时,一般情况下可以划分为松弛率小和松弛率大两种情况.当松弛率较小时(例如小于1),导致零件拖期的原因有可能是批量过大、交货期太紧或者没有进行平顺物流的设置,决策者依据具体的原因有可能采取的策略有:对零件批次任务进行分批处理、对零件进行分期交付、对工序进行加班设置、重新设置交货期、对工序任务进行平顺设置等.当松弛率较大时(例如大于1),导致零件拖期的主要原因是与其他零件批次任务存在共同争用相同设备的冲突,具体体现为该拖期零件含有等待的工序任务.决策者可调整等待工序与影响工序之间的顺序,使得该等待工序具有更高的优先安排的可能,从而减少等待时间.决策者可以依据自己所拥有的外协资源,让某些具有等待时间的工序任务给外协单位加工.决策者可以依据具有等待时间的工序任务的可选设备情况,设置该工序的设备偏好选择,使得该工序尽可能安排到负荷较小的设备上以减少等待时间.决策者还可以通过提高该拖期任务的重要度来增加优先级别,以减少该零件批次任务下的工序任务的等待时间.

2.2.2 设备视角的分析

从设备使用的视角进行分析时,通常会出现以下几种情况:1)设备负荷率大大超过使用率,表明设备

用在生产准备的时间较多而真正加工的时间较少,在这种情况下可以通过对具有近似的生产准备需求的工序任务进行合批处理,减少其生产准备的时间;2)设备等待时间过大,这表明该设备上的工序任务拥堵严重,决策者可以通过对具有等待时间的工序任务进行外协设置以减少工序任务的等待时间,或者通过设置设备选择偏好使得具有等待时间的工序尽量选择设备负荷小的设备以减少等待时间;3)同一设备组下的设备负荷不均,表明工序任务在设备选择的过程中过于集中在某些设备上,从而导致设备负荷不均,决策者可以通过设置设备选择偏好使得高负荷设备上的工序尽量选择设备负荷小的设备以实现负荷均匀。

3 第2级调度

在第1级调度构造中,除了交互式的约束设置外,工序任务之间的排序由工序的优先级确定。优先级的确定为固定的规则形式,虽然这一规则容易被决策者理解,且具有一定的合理性,能在交互式求解中快速获取可行解,但是该算法属于贪婪式的启发式算法,具有一定的短视性,求解结果不一定具有较好的优化性能,所以需要在接下来的第2级优化求解中进行进一步的优化。

经过第1级的交互式调度求解后,决策者已经通过约束设置的方式充分表达了自己的偏好和意图,在第2级的求解中需要一个满足这些多重约束的优化计算方法。因为第1级调度中的基于优先级的构建方法是满足所有交互约束的调度构造方法,所以第2级的优化将以工序的优先级为决策变量,以满足交互约束的基于优先级的构建方法构造调度方案后进行目标评估,利用智能优化算法对工序优先级数值进行优化搜索,实现满足多重约束环境下的调度优化求解。

在第2级的调度优化求解中,智能优化算法需要以工序的优先级作为优化设计变量,把第1级调度中满足交互式约束的基于优先级调度构造方法作为解的评估,然后通过自身的智能优化机制对调度方案进行寻优。这一过程把优化算法与调度构造分隔开,一方面可以充分满足第1级调度中的交互约束,另一方面可以减少优化算法的侵入性,因此,可以应用一些成熟的通用智能优化算法。由于这里是对工序任务的优先级进行调优,粒子群优化算法是数值性调优的较佳选择。每个粒子的位置向量的维数对应于所有需要调度的工序任务数量,每个向量的分量对应一个具体的工序任务,位置的数值为该工序任务的优先级。由于粒子群优化的优势在于对连续数值的优

化,为了充分利用粒子群计算的优势,本文未对优先级数值进行特别的离散化处理,将优先级数值限定为 $[-100, 100]$ 之间的任意实数。

4 案例应用分析

本节通过一个案例对两级调度求解策略的应用进行说明。表1所示为需要进行调度的零件需求信息,包含订单的名称、数量、重要等级、交货期、松弛率以及优先级的信息。优先级的数值按照2.1.4节中的规则方法计算获得,J(1)和J(2)为对J零件的两个订单需求,调度开始的日期为08-15。

表2 零件需求信息

订单	数量	重要等级	交货期	松弛率	优先级
A	8	非常重要	08-23	2.34	II-1
B	10	非常重要	08-25	2.12	II-1
C	20	一般	08-23	1.76	II-4
D	25	很重要	08-30	3.20	III-3
E	15	非常重要	08-22	0.97	I-4
F	25	非常重要	08-30	2.80	II-1
G	10	不重要	08-23	1.85	III-1
H	20	很重要	08-26	1.71	II-2
I	25	非常重要	08-23	1.51	II-1
J(1)	15	很重要	08-25	2.45	II-2
J(2)	25	很重要	08-30	2.79	II-2

可用的设备资源中,WJ类型设备包含3台设备,LJ、LW、WZ、YB类型设备各包含2台设备,外协是一个不考虑任务占用冲突的虚拟设备,工作的班次时间均为08:00~12:00与14:00~00:00。其中同一设备类型中的设备具备相同加工能力,设备选择偏好并未做预先特殊设置,设备选择优先级中的权重 w_1 、 w_2 、 w_3 的值均为1。未在本工段加工的工序均为外协工序:如果外协部门的能力比较充足,则该工序将不受最早开始时间的限制(不用等待);如果外协部门能力有限,则需要与外协部门进行协商以确定该工序可开工时间。本案例中对4道协作工序的最早可开工日期进行了限定:D5为08-24,E8为08-18,F1为08-20,G3为08-20。

求解过程如图3所示,初始解为顺序移动和不允许加班的条件下产生的可行解,初始解中E零件拖期严重,松弛率较小且重要度最高,已是最高优先级,故应对E零件采取平顺和加班的策略,让其尽快通过。J零件的前2道工序的准备时间过长,两个批次的前两道工序进行合批处理。将B1工序固定到LJ-1设备,B2工序固定到LJ-2设备,并设置它们之间的物流移动方式为平顺移动方式。

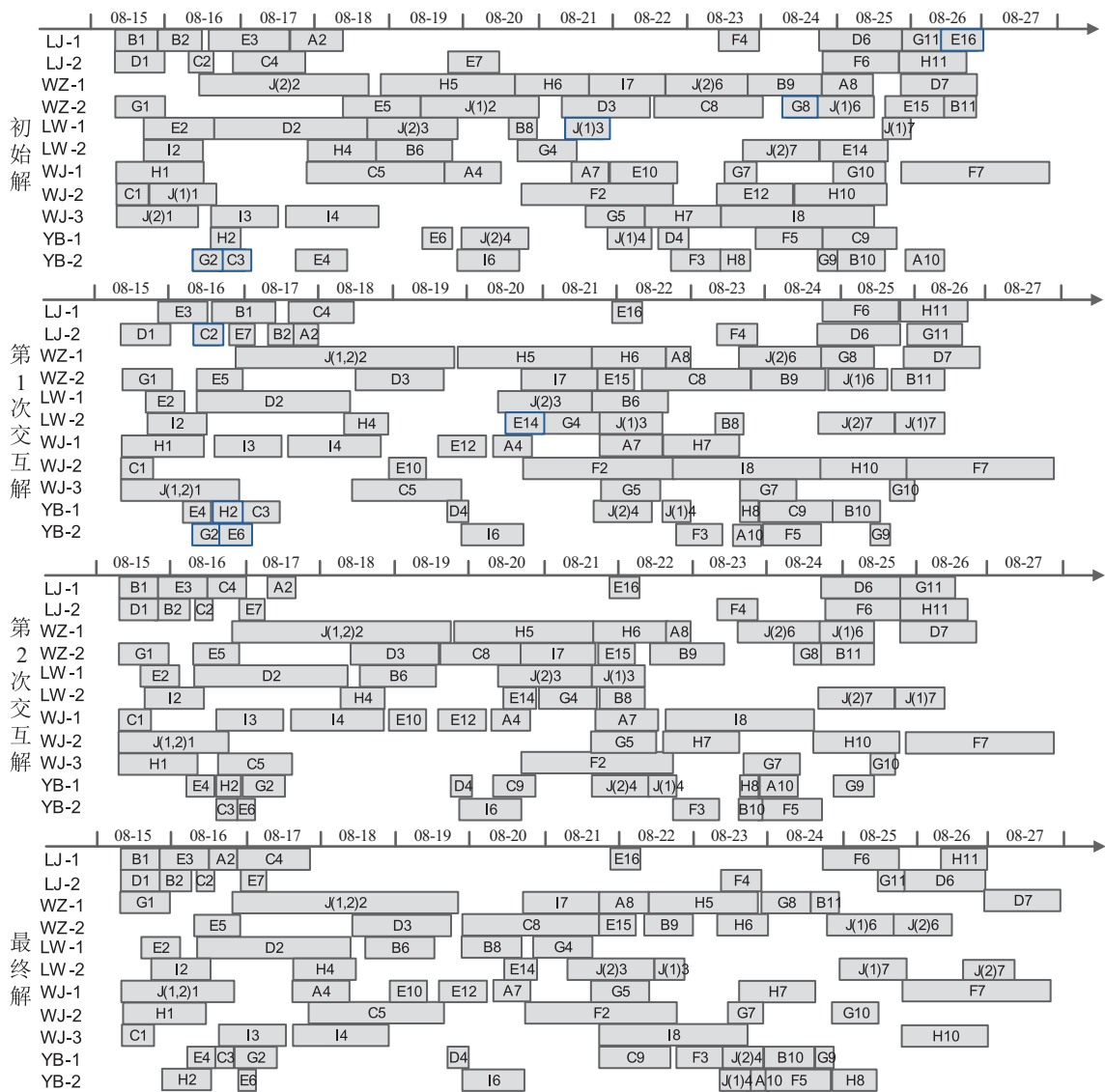


图3 交互求解过程

针对第1次交互解, E3 前面存在部分空闲, 由于 B1 优先级低于 E3, 导致 B1 在 E3 后面进行等待, 因而决定把 B1 放在 E3 的前面, 并允许 B1 进行加班. 为了保证 B 零件更快地通过, 对 LJ-2 设备中的前 4 道工序进行顺序的指定, 由目前的 D1-C2-E7-B2 改变为 D1-B2-C2-E7, 并允许 B2 进行加班. 针对第 2 次交互解, 对 E 零件的所有安排进行固定, 由于 YB-2 设备上第 1 天存在较多空闲, 设置 H 允许平顺通过, 希望把 H2 提前到 YB-2 的第 1 天内进行加工. 因为 J(1) 零件任务存在拖期, 主要原因是 J(1) 的最后两道工序 J(1)6 和 J(1)7 分别受到 J(2)6 和 J(2)7 的影响, 所以设置了 J(2)6 不能影响 J(1)6、J(2)7 不能影响 J(1)7 的约束, 同时允许 J(1)6 与 J(1)7 之间进行平顺物流. 通过这几次交互设置后, 认为可以进行第 2 级的优化求解, 最终解为以加权拖期为优化目标的 PSO 算法求解结果, 其中只有不重要的零件 G 拖期两天. 优化结果表明, 在保

证前面一级调度中所有交互设置的约束的基础上优化了零件交付的日期.

5 结论

本文提出了一种适用于边界不确定和具有决策偏好的大规模复杂作业车间调度问题的二级调度求解策略. 在第 1 级求解中利用了满足交互式约束的快速响应求解算法; 在第 2 级调度中以基于优先级规则的快速调度构建方法为目标评估的函数, 利用粒子群优化算法对优先级数值进行优化, 实现了满足第 1 级调度中交互式约束的优化求解算法. 该方法已在多家航空制造车间进行了应用验证, 并取得了较好的应用效果. 但是, 在以下 2 个方面还需进一步优化和探索:

- 1) 深入研究更为优化的启发式规则, 通过调度人员的交互操作记录自动学习, 同时把总结出来的定性的决策分析思想结构化, 构建交互式求解的知识库,

并加入到第1阶段的启发式规则中,进一步减少交互过程。

2) 进一步抽象出该类具有边界条件不确定和决策偏好性的复杂调度问题的数学问题,从理论上研究标准化的测试场景和样本,进行求解策略和算法的优化性能对比分析研究。

参考文献(References)

- [1] 刘民, 吴澄. 制造过程智能优化调度算法及其应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2008: 1-10.
(Liu M, Wu C. Intelligent optimization scheduling algorithms for manufacturing process and their applications[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2008: 1-10.)
- [2] 周龙飞, 张霖, 刘永奎. 云制造调度问题研究综述[J]. 计算机集成制造系统, 2017, 23(6): 1147-1166.
(Zhou L F, Zhang L, Liu Y K. Survey on scheduling problem in cloud manufacturing[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2017, 23(6): 1147-1166.)
- [3] 王凌. 车间调度及其遗传算法[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003: 1-8.
(Wang L. Shop scheduling with genetic algorithms[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2003: 1-8.)
- [4] 方晨, 王凌. 资源约束项目调度研究综述[J]. 控制与决策, 2010, 25(5): 641-650.
(Fang C, Wang L. Survey of study on resource-constrained project scheduling[J]. Control and Decision, 2010, 25(5): 641-650.)
- [5] 孙靖, 巩敦卫, 季新芳. 基于偏好方向的区间多目标交互进化算法[J]. 控制与决策, 2013, 28(4): 542-546.
(Sun J, Gong D W, Ji X F. Interactive evolutionary algorithms for interval multi-objective optimization problems based on preference direction[J]. Control and Decision, 2013, 28(4): 542-546.)
- [6] 陈志旺, 陈林, 白铎, 等. 求解约束多目标区间优化的交互多属性决策 NSGA-II 算法[J]. 控制与决策, 2015, 30(5): 866-870.
(Chen Z W, Chen L, Bai X, et al. Interactive multi-attribute decision-making NSGA-II for constrained multi-objective optimization with interval numbers[J]. Control and Decision, 2015, 30(5): 866-870.)
- [7] 巩敦卫, 郝国生, 周勇, 等. 交互式遗传算法原理及其应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2007: 1-20.
(Gong D W, Hao G S, Zhou Y, et al. The principle and application of interactive genetic algorithm[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2007: 1-20.)
- [8] Choi D H, Ahn B S. Eliciting customer preferences for products from navigation behavior on the web: A multicriteria decision approach with implicit feedback[J]. IEEE Transaction on System, Man, and Cybernetics-Part A: Systems and Humans, 2009, 39(4): 880-889.
- [9] Higgins P. Architecture and interface aspects of scheduling decision support[C]. Human Performance in Planning and Scheduling. Berlin, Heidelberg: Springer, 2001: 245-281.
- [10] Palombarini J, Martinez E. SmartGantt—An intelligent system for real time rescheduling based on relational reinforcement learning[J]. Expert Systems with Applications, 2012, 39(11): 10251-10268.
- [11] Radhika M. Decision on support tool for dynamic workforce scheduling in manufacturing environments[D]. Massachusetts: Department of Electrical Engineering and Computer Science, Massachusetts Institute of Technology, 2013.
- [12] 庞新富, 姜迎春, 俞胜平, 等. 人机协同的柔性作业车间炼钢——连铸重调度方法[J]. 计算机集成制造系统, 2018, 24(10): 2415-2427.
(Pang X F, Jiang Y C, Yu S P, et al. Flexible job shop rescheduling method of steelmaking—Continuous casting base on human-computer cooperation[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2018, 24(10): 2415-2427.)
- [13] Zhang J E, Yang J J. Flexible job-shop scheduling with flexible workdays, preemption, overlapping in operations and satisfaction criteria: An industrial application[J]. International Journal of Production Research, 2016, 54(16): 4894-4918.

作者简介

张家谔(1987—), 男, 高级工程师, 博士, 从事航空智能制造技术、调度优化算法的研究, E-mail: zhangjia@hotmai.com;

杨建军(1960—), 男, 教授, 博士生导师, 从事制造业信息化工程、制造执行系统等研究, E-mail: jjyang@buaa.edu.cn.

(责任编辑: 李君玲)