

基于区间协同拍卖策略的改进 多Agent车间调度模型研究*

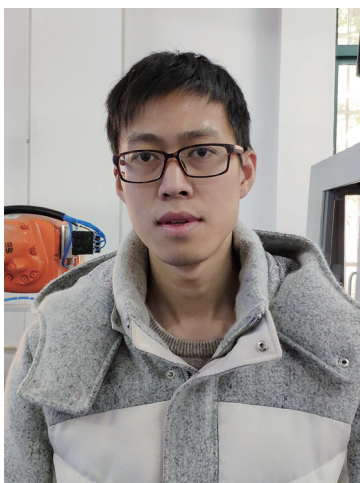
管晨丞,唐敦兵,魏 鑫,沈小雨

(南京航空航天大学机电学院,南京 210016)

[摘要] 基于合同网协议的传统多 Agent 方法 (Traditional Multi-Agent Way, TMAW) 求解作业车间调度问题,一般以单一的完工时间为优化目标,忽略了调度多目标性的要求;同时,招投标机制下 Agent 之间的任务优化分配本质上是单步优化,优化区间过小导致对系统整体调度性能的提升非常有限。针对上述问题,重新规划了多 Agent 调度模型,提出一种区间协同拍卖的动态调度策略 (Interval-Synergy-Auction Scheduling Strategy, ISASS),该策略实现了一定时间窗口内时间、成本、设备负载和能耗的全局多目标优化,并可通过设置权重系数来调节优化目标倾向,很好地规避了上述传统多 Agent 方法的不足。最后,通过仿真测试验证了上述策略的高效性,同时研究了不同时间窗口和权重系数对调度性能的影响,可较好地指导实际生产。

关键词: 多Agent; 作业车间调度; 区间协同拍卖; 多目标优化; 时间窗口; 权重系数

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2019.07.034



管晨丞

硕士研究生,研究方向为作业车间动态调度及多 Agent 智能体系统。

柔性作业车间调度问题 (Flexible Job Shop Scheduling Problem, FJSP) 作为一种典型的

NP-hard 问题^[1],突破了资源唯一性的限制,更符合实际生产^[2],是当今车间调度领域的研究热点。学者们将各种启发式算法及其改进算法用于求解 FJSP,取得了丰硕的研究成果^[3-6]。然而,随着智能制造理念的提出和发展,上述方法越来越显示出其弊端:一方面,诸如遗传算法等的启发式算法将机床等车间生产资源全部当作优化算法的约束输入条件而使之完全处于被动地位,这有悖于当今智能制造所倡导的“智能个体”、“自组织”、“自协调”的理念;另一方面,此类方法多指定一个上层的计算机进行全局的信息采集和单点、集中式的优化计算,而这种集中串行的控制方式使得底层生产资源状态的改变难以及时反馈至上层计算机,由此造成计算得出的调度方案与系统当

前状态的“异步”与“不适”。

随着分布式人工智能的发展,多 Agent 系统 (Multi-Agent System, MAS) 已经成为智能调度研究领域的前沿和热点^[7]。MAS 通过一系列分散、独立的个体 Agent 之间的竞争、协商来解决一项复杂的调度问题,是符合现代智能制造系统的一种调度模式^[8]。目前基于 MAS 的车间调度研究通常采用基于市场招投标机制的合同网协议 (Contract Net Protocol, CNP) 作为 Agent 间的协商机制,但是单纯的 CNP 从时间上割裂了各 Agent 目标之间的组合优化关系,使得优化区间过小,系统整体调度性能不佳;同时,为简化 Agent 间的招投标协商,往往采用单一报价的原则,由此导致系统优化目标过于单一,不符合生产实际。为解决传统多 Agent 方法 (TMAW) 的不足,潘颖^[9]设计了一种改进的遗传算法

* 基金项目: 国家自然科学基金 (U1637211); 江苏省青蓝工程。

并封装在策略 Agent 之中,实现了完工时间、系统总负载、单个设备最大负载和加工成本的多目标优化,解决了 TMAW 优化目标过于单一的问题。但是,模型仍然以简单的 CNP 作为 Agent 之间的协商机制,优化区间过小的问题仍然没有解决;赵良辉^[10]完全摒弃了合同网协议,设计了一种基于时间流的多 Agent 动态调度策略。该策略通过抽取各个设备 Agent 的可用工时对一段时间内的作业 Agent 进行集中的优化调度,虽然解决了 CNP 下的 TMAW 优化区间过小的问题,提升了全局规划性能,但是以单一的流动比作为全局优化目标仍然没有满足调度多目标性的要求。

基于对 TMAW 缺陷的分析,本文重新规划了多 Agent 动态调度模型,提出了一种区间协同拍卖的动态调度策略(ISASS),多 Agent 通过在一段时间区间内基于拍卖机制进行协同合作,通过设置时间区间规避了传统多 Agent 任务分配本质上只是单步优化的缺陷。实现了一定时间窗口内时间、成本、设备负载和能耗的全局多目标优化。最后,通过仿真测试验证了 ISASS 的有效性,同时研究了不同时间窗口和权重系数对调度性能的影响,以指导实际生产。

问题描述

在基于简单 CNP 的传统多 Agent 调度模型(Traditional Multi-Agent Model, TMAM)中,通常由两类 Agent 分别模拟任务和机器,通过任务 Agent (Task Agent, TA)和机器 Agent (Machine Agent, MA)之间招投标交互,完成任务在机器间的优化分配,最终形成调度方案。本文称此类方法为传统多 Agent 方法 TMAW。在完工时间最优原则的生产调度中, TMAW 导致劣质调度的一个典型示例如下:

t_1 时刻 MA (MA_1 与 MA_2) 的生产计划如图 1(a) 所示, t_2 时刻, TA_3 进入生产系统并针对其第 1 道工序 O_{31} 向 MA_1 与 MA_2 发起招标; MA_1 与 MA_2 响应 TA_3 的招标并分别将 10、13 作为自身报价封装至招标书中参与竞标; TA_3 对 MA_1 与 MA_2 的报价进行评估,由于 MA_1 的报价优于 MA_2 , O_{31} 能较早获得加工,所以 MA_1 赢得竞标,此时两 MA 的生产计划如图 1(b) 所示。 t_3 时刻, TA_4 进入生产系统并针对自身工序 O_{41} 向 MA_1 与 MA_2 发起招标,重复上述相同招投标流程, MA_2 获得 O_{41} 的加工任务。由此两轮招投标活动,最终形成如图 1(d) 所示的任务调度甘特图。在上述每一轮招投标中,

调度系统都对当前任务做出了全局最优(完工时间最早)的调度分配,但是从生产全程来看,单步最优并不能保证全程的最优。如图 1(c) 所示, MA_1 加工工序 O_{41} , MA_2 加工工序 O_{31} ,其总完工时间为 23,优于前者的 26。

出现上述调度结果欠优的原因在于每次任务释放后,调度系统便立即开始一轮招投标活动,此种行为虽能确保工序加工的及时性,但是瞬时响应的行为机制从时间上割裂了任务之间隐含的组合优化关系,个体 MA 只根据自身局部信息和当前状态做出决策,缺乏全局信息和全局连贯性,由此造成招投标机制下 MA 之间的任务优化分配本质上是局部性质的单步优化,优化区间过小导致对系统整体调度性能的提升十分有限。

同时,在实际的生产活动中,为满足各部门的生产需求,提高企业的综合效益,需要集中考虑时间、能耗等多目标的优化,多目标性是车间调度的一个基本属性^[11]。TMAW 大多只考虑诸如时间等的单一指标,优化目标过于单一造成了理论研究与现实应用的差距。

区间协同拍卖策略

针对上述问题,本文提出了一种区间协同拍卖的动态调度策略

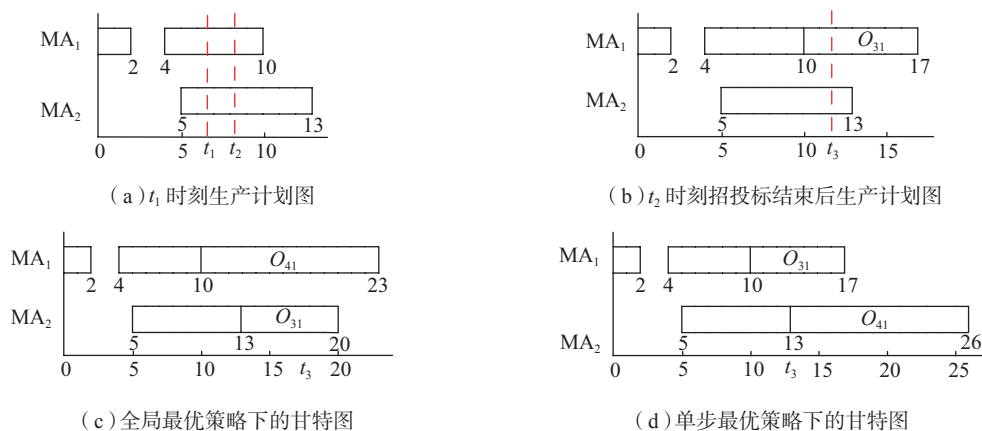


图1 TMAW劣质调度示例

Fig.1 TMAW poor quality scheduling example

(ISASS)。在建立多目标优化数学模型的基础上, ISASS 重新规划了多 Agent 调度模型和 Agent 协商机制, 并设计了多目标优化算法, 较好地解决了 TMAW 单目标优化和优化区间过小的问题。

1 作业车间多目标优化数学模型

1.1 符号定义

符号定义 n 为工件数量; p_i 为工件 i 的工序数量; m 为设备数量; C_x^k 为工序 x 在设备 k 上的加工系数; O_{ij} 为工序编号; T_{ij}^k 为工序 O_{ij} 在设备 k 上的实际加工时间; T_{ij} 为工序 O_{ij} 加工时间的期望值; F_{ij}^k 为决策变量, 若工序 O_{ij} 在设备 k 上加工, 则 F_{ij}^k 取 1, 否则取 0; f_1 为完工时间; f_2 为总成本; f_3 为设备总负载; f_4 为生产能耗; w_t ($t=1, 2, 3, 4$) 为各优化目标的权重系数; ST_{ij} 为工序 O_{ij} 的加工开始; ET_{ij} 为工序 O_{ij} 的完成时刻; mc_i 为工件 i 的原料成本; C_{ost}^k 为设备 k 的工时成本; PA_k 为设备 k 的空转功率; $X_{ii'}^k$ 为选择系数, 若工件 i 比 i' 在设备 k 上先加工, $X_{ii'}^k$ 取 0, 反之取 1。

1.2 数学模型

设生产系统有 n 个工件, 每个工件 J_i ($i \in N=\{1, 2, \dots, n\}$) 有 p_i 道工序, 各工序可在 m 台设备中的一台或者多台设备上加工。由于各台设备性能、特点不同, 不同设备对同一工序的加工时间也不同, 即存在一加工系数 C_x^k (x 为工艺代号, k 为设备代号), 使得工序 O_{ij} 在设备 k 上的实际加工时间为 $T_{ij}^k = T_{ij} C_x^k$ (T_{ij} 为工序 O_{ij} 加工时间的期望值, 工件号 $i \in N$, 工序号 $j \in P=\{1, 2, \dots, p_i\}$, 设备号 $k \in M=\{1, 2, \dots, m\}$)。

取设计变量:

$$F_{ij}^k \in \{0, 1\}; i \in N, j \in P, k \in M \quad (1)$$

车间多目标优化数学模型如下: 完工时间以全部工件的最大完工时间 f_1 度量, 总成本用材料成本和设备加工成本之和 f_2 度量, 设备总负载以全部设备的加工时间之和 f_3 度量, 生

产能耗以全部设备的总能耗 f_4 度量。在实际的生产中, 设备切削能耗占总能耗的比例很小, 以空转功率计算得到的设备功耗和实际生产能耗相差不大^[12-13], 故 f_4 以设备空转功耗计算。

$$\min f = \min[f_1, f_2, f_3, f_4] = \min(w_1 f_1 + w_2 f_2 + w_3 f_3 + w_4 f_4) \quad (2)$$

$$\sum_{t=1}^4 w_t = 1, w_t \geq 0 (t=1, 2, 3, 4)$$

$$f_1 = \max(ET_{ij}); i \in N, j \in P$$

$$f_2 = MC + WC$$

$$f_3 = TML$$

$$f_4 = \sum_{k=1}^m EA_k$$

$$ET_{ij} = ST_{ij} + \sum_{k=1}^m F_{ij}^k T_{ij}^k; i \in N, j \in P \quad (3)$$

$$MC = \sum_{i=1}^n mc_i \quad (4)$$

$$WC = \sum_{k=1}^m \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{p_i} F_{ij}^k T_{ij}^k C_{ost}^k \quad (5)$$

$$TML = \sum_{k=1}^m \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{p_i} T_{ij}^k F_{ij}^k \quad (6)$$

$$EA_k = PA_k \times \max(F_{ij}^k ET_{ij}); i \in N, j \in P, k \in M \quad (7)$$

$$ST_{ij} - (ST_{i'j'} + T_{i'j'}^k) + G(1 - X_{ii'}^k) \geq 0 \quad (8)$$

$i \neq i', j \neq j', G \rightarrow +\infty$

$$ST_{i'j'} - (ST_{ij} + T_{ij}^k) + GX_{ii'}^k \geq 0 \quad (9)$$

$i \neq i', j \neq j', G \rightarrow +\infty$

$$\sum_{k=1}^m F_{ij}^k = 1; i \in N, j \in P \quad (10)$$

$$ST_{i(j+1)} - (ST_{ij} + T_{ij}^k) \geq 0; i \in N, j \in P, k \in M \quad (11)$$

其中, 式(2)为车间多目标优化目标函数; 式(3)表示任何工序的完成时间取决于其在某设备上的开始时间和加工时间; 式(4)表示总材料成本为各工件材料成本之和; 式(5)表示总设备加工成本为各设备加工成本之和; 式(6)表示设备总负载为所有工件的工序实际加工时间之和; 式(7)表示设备 k 能耗; 式(8)~(11)为约束条件。式(8)和(9)确保设备 k 同一时刻只能加工一道工序, 其中式(8)表示如果工序 O_{ij} 比工序 $O_{i'j'}$ 在设备 k 上先加工, 则工序 O_{ij} 的开始加工时间必须大于或者等于工序 $O_{i'j'}$ 的结束加工时间; 式(9)表示如果工序 $O_{i'j'}$ 比工序 O_{ij} 在设备 k 上先加工, 则工序 $O_{i'j'}$ 的开始加工时间必须大于或者等于工序 O_{ij} 的结束加工时间, 其中 G 是一个调整系数。式(10)表示一道工序只能在一台设备上加工。式(11)表示同一工件各工序加工顺序的约束要求, 即工件的 $j+1$ 道工序的开始加工时间必须大于或者等于该工件的第 j 道工序的完工时间。

2 基于MAS的动态调度模型

如图 2 所示, 基于 MAS 的动态调度模型共由作业 Agent (Task Agent, TA)、机器 Agent (Machine

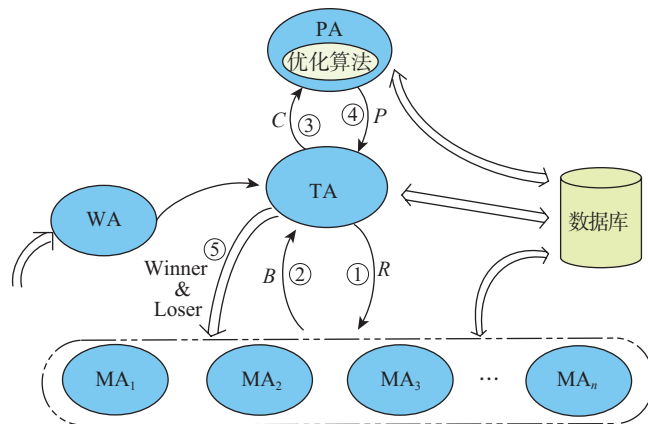


图2 基于MAS的动态调度模型

Fig.2 Dynamic scheduling model based on MAS

Agent, MA)、仓库 Agent (Warehouse Agent, WA) 和规划 Agent (Plan Agent, PA) 组成。和 TMAM 的主要区别是,该调度模型设立了一个软体 Agent——PA,其在生产系统中没有对应的物理实体。PA 封装了多目标优化算法,完成多目标优化调度。各 Agent 主要的职能如下。

仓库 Agent : WA 的职能比较单一,负责为每项进入调度系统的作业动态地生成与之对应的作业 Agent,其与 PA、MA 并无通信交流,对应生产系统中的实体仓库。

作业 Agent : TA 的目的是向 MA 发送招标书 R ,以尽可能早地释放自身工序加工任务,和 TMAM 中的 TA 不同的是,其在 PA 的约束下能够考虑与系统中的其他 TA 目标的组合优化关系,生成较 TMAW 更优的调度方案;TA 在收到 MA 的投标书后,将提取各个投标书中的报价组成报价集,该报价集称为 TA 当前工序对应的可行集 C 。理论上 C 中的每个元素都为该工序的可行加工方案。之后,TA 将可行集 C 发送给 PA,进行统一的规划调度。

机器 Agent : MA 的目标是响应 TA 的招标以获得尽可能多的加工任务。每次收到 TA 的招标书后,MA 将查询自身数据库并生成一个报价 B ,该报价 B 为一个五元组,定义为:

$$B = \langle p_{id}, ID, s_t, status, cost \rangle$$

式中, p_{id} 为对应工序的编号, ID 为机器编号; s_t 为机器最早加工时间; status 为机器当前状态集合,包含当前设备总负载 T_L 、总成本 T_C 和总能耗 T_E 3 项; cost 为机器的成本集合,包括完成对应工序 p_{id} 所需的加工时间 p_t 、生产成本 p_c 和生产能耗 p_e 。例如, $B < O_{31}, 05, 40, \{35, 600, 65\}, \{5, 20, 2.5\} >$ 表示 05 号机床当前累计负载为 35, 累计生产成本为 600, 累计能耗为 65, 可进行工序 O_{31} 加工的最早时间为 40, 需要 5 单位的加工工时、20 单位的生产成本和 2.5

单位的能耗; MA 将 B 封装至投标书中, 发送给 TA 参与竞标。

规划 Agent : PA 中封装了多目标优化算法,以时间窗口作为基本的工作机制,完成本窗口内的多目标优化计算,并将生成的调度方案 P 发送给对应的各个 TA, TA 读取 P , 宣布竞标结果,完成自身工序的释放。

3 区间协同拍卖动态调度策略

图 3 是区间协同拍卖策略下的多 Agent 协作模型。TA、MA、PA 相互协作,共同求解出基于时间、负载、成本和能耗的全局多目标优化调度方案,下面将从策略流程和多目标优化算法两个方面对该动态调度策略进行论述。

3.1 基于区间协同拍卖调度策略的 Agent 协商流程

区间协同拍卖策略下多 Agent 协商的具体步骤为:

(1) 作业订单进入生产系统, WA 封装订单工艺信息,生成作业 Agent TA。

(2) TA 查询数据库,释放自身工序加工任务,具体包括: TA 查询数据库获取待释放工序的工艺信息,包括工艺类型 type 和期望加工时间 T_{ij} ; TA 根据工艺类型 type 从 Agent 黄页目录中获取满足工艺加工能力的 MA 名单列表; TA 将工序号、type

和 T_{ij} 封装至招标书 R 中并发送给名单列表中的各 MA。

(3) MA 提取 R 中的招标信息,计算出完成此工序加工任务所需要的 p_t 、 p_c 和 p_e ,并查询数据库获取自身最早空闲时间,即 s_t ,以及 TE、TL、TC,生成报价 B ,封装至投标书中发送给 TA 参与竞标。

(4) TA 提取各个 MA 发送的投标书中的报价 B 构造成可行集 C ,发送给 PA。

(5) PA 在收到第一个 TA 发送来的作业调度请求后,将插入一个时间窗口 T_w ,并依据多目标优化算法模块对本窗口内收到的多个作业调度请求进行集中的优化计算,生成调度方案 P 并发送给 TA。

(6) TA 公布竞标结果,完成本道工序的释放。

该协商流程简单高效,其在 CNP 环节中添加了一步协同优化的过程,除了保持 CNP 协议简洁、灵活性,还能够解决 TMAW 全局优化能力欠缺和单目标优化的不足,在调度效率和质量上都将超过 TMAW。时间窗口 T_w 的设定可根据系统负载的情况灵活确定,并确保不超过全部工件工序的最小额定加工时间,同时,每当本道工序开始加工时,TA 便开始下一道工序的招标工作,以满足

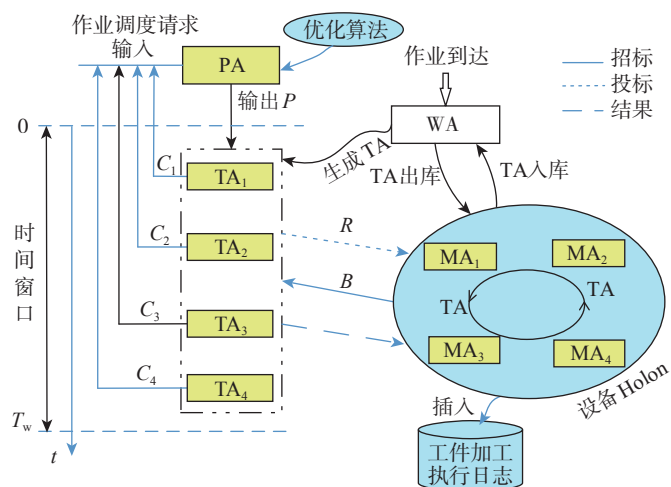


图3 区间协同拍卖策略下的多Agent协作模型

Fig.3 Multi-agent collaboration model under interval-synergy-auction strategy

PA 接收的多个 TA 作业调度请求在可被迅速处理的范围内,避免工序加工延迟。

3.2 多目标优化算法

调度的软实时特性允许 PA 在接收到 TA 的作业调度请求后不马上处理该申请,而是等待一定的时间 T_w 后运用优化算法对该时间窗口内收到的多个作业调度请求进行集中的优化计算,以寻找较优的全局调度方案^[10]。区间协同拍卖策略下的多目标优化算法流程如图 4 所示,其中,PA 从每个可行集 C 中抽取一条报价 B ,组成了对应该批作业的一个可行调度方案,此处称之为一个可行解。由于一个时间窗口内只有部分 TA 针对自身的某一道工序提出作业调度请求,作业请求数量较少,解空间也小,故可采用穷举思想寻找较优解^[13],以降低算法代码的实现难度。当然也可采用其他搜索算法如 GA、SA 等,但在待优化对象较少的情况下,采用更加复杂算法的时间复杂度与本算法的相差不大。

由于各优化目标量纲之间的差异,且数值相差较大,不具备可比性。受文献 [3] 和文献 [14] 的启发,本算

法对 4 个优化目标进行去量纲处理,即先对 4 个目标单独优化 10 次,取优化过程中的最大值和最小值,去量纲后的优化目标为:

$$\min f = \sum_{t=1}^4 W_t (f_t - f_{t\min}) / (f_{t\max} - f_{t\min})$$

$$\sum_{t=1}^4 W_t = 1, W_t \geq 0 (t = 1, 2, 3, 4)$$

(12)

通过控制时间窗口 T_w 的长短及各优化目标的权重系数,优化的“深度”和“重点”根据实际情况灵活调整,提升了调度模型的环境适应能力。

试验验证与分析

借助 NetBeans 工具在 JADE (Java Agent Development Framework, JADE) 平台上分别构建基于简单 CNP 的传统多 Agent 调度模型 TMAM 以及本文提出的基于区间协同拍卖策略的多 Agent 调度模型,以测试 TMAW 和 ISASS 两种方法的调度性能,并研究不同时间窗口 T_w 和不同权重系数下的 ISASS 调度性能。测试的硬件环境为 CPU Intel Core TM3、8GB 内存;软件环境: Windows 10 操作系统, Java 编译环境 JDK1.8.0, 集成开发环境 NetBeans

IDE 8.2, JADE 版本 JADE4.3.3, 数据库 MySQL Server 5.5。

表 1 为模拟普通作业车间构造的机器生产环境。其中共有机床 8 台,可完成 $T_1、T_2、T_3、T_4、T_5$ 共 5 类工序的加工。同一机床对不同的工艺类型具备同样的空转功率 PA_k 和工时成本 C_{ost}^k 。各机床加工系数 C_x^k 和 $PA_k、C_{ost}^k$ 的具体设定如表 1 所示。

试验中使用 WA 动态地生成 TA 来模拟作业的到达。作业到达的平均时间间隔设定为与文献 [15] 相同,即服从参数为 λ 的指数分布 $\lambda = \mu_g \mu_p / (U_m)$,其中 U 为车间利用率, m 为机床数, $\mu_g、\mu_p$ 分别表示作业的平均工序数和工序的平均加工时间。试验设定车间利用率设定为 0.9, μ_g 为 3, 每道工序的工艺类型从 $T_1 \sim T_5$ 中随机生成;各工序的平均加工时间 μ_p 取为 3。测试得当 $\mu_g=3, U=0.9, \mu_p=3$ 时,大多数作业在最后一项作业到达之时均已加工结束或已进入加工后半段,系统最大的完工时间往往由最后一件作业的完工时间决定,即 TMAW 和 ISASS 对最后一件作业的优化程度决定着系统的整体调度性能,但同一作业各工序之间存在时

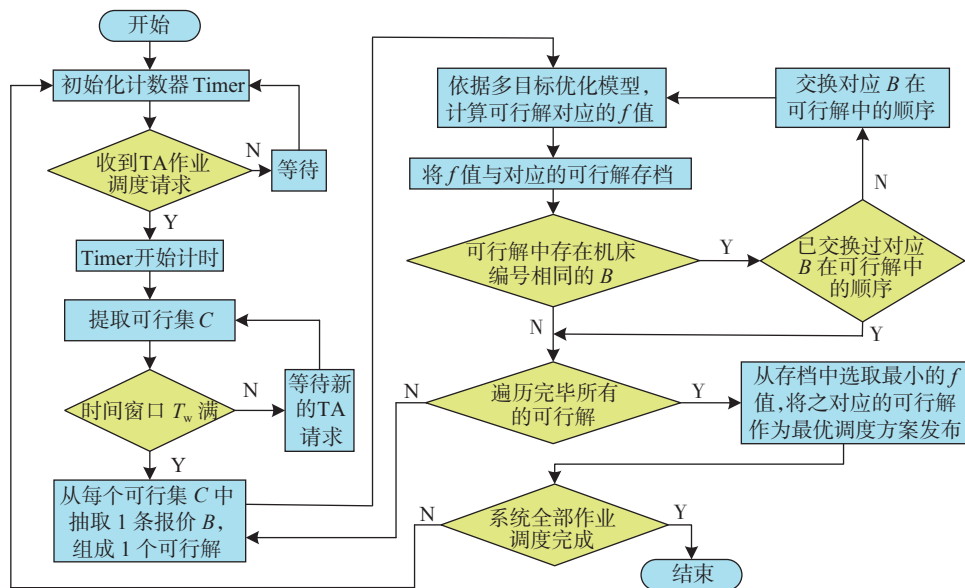


图4 算法流程

Fig.4 Algorithm flow

间上的约束关系,使得同一批作业在上述两种方法的调度下完工时间近乎一致。为方便课题研究,使作业到达更加频繁,以充分挖掘 TMAW 和 ISASS 的调度性能,本文测试实例在 λ 原值的基础上乘以一个修正系数 ε ,并取 $\varepsilon=0.4$ 。

1 不同时间窗口下ISASS与TMAW调度性能对比

为测试 TMAW 和 ISASS 两种方法的调度性能,首先将 ISASS 多目标优化函数(2)中 f_1 的权重设为 1。试验中, $T_w=0:0.5:3.5$,共 8 组,每组依据上述试验设定产生一批数量为 20 的作业,为减小偶然因素的影响, TMAW 与 ISASS 分别针对该批作业运行 10 次,取其均值作为各自的完工时间。最终得到图 5 所示的基于 T_w 的调度优化对比曲线。

从图 5 中可以看出, ISASS 时间窗口 T_w 的大小对系统调度性能有直接的影响。理想的情况是在一个窗口内有个位数的作业调度请求。太少无法实现方案优选,太多则会增大计算量,响应系统的效率。经试验发

表1 机床工艺能力信息表

Table 1 Machine tool process capability information table

设备编号	加工工艺数 QTY	加工工艺类型 TYPE	加工系数 C_x^k	空转功率 PA_k	工时成本 C_{ost}^k
M1	1	T_1	1.0	1.5	7
M2	1	T_2	1.0	1.7	10
M3	1	T_3	1.0	2.4	11
M4	1	T_4	1.0	4.0	14
M5	1	T_5	1.0	5.0	12
M6	2	T_1	0.8	4.0	7
		T_2	1.3		
M7	3	T_3	1.0	7.5	15
		T_4	1.0		
		T_5	1.0		
M8	3	T_1	1.0	2.2	8
		T_2	1.0		
		T_3	1.2		

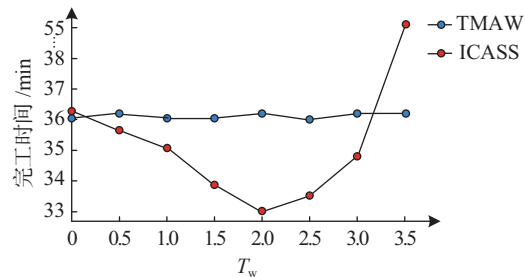
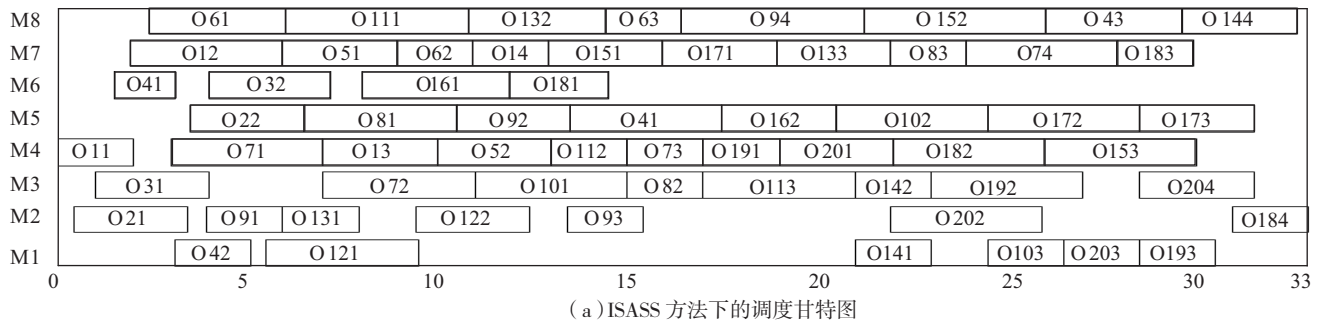
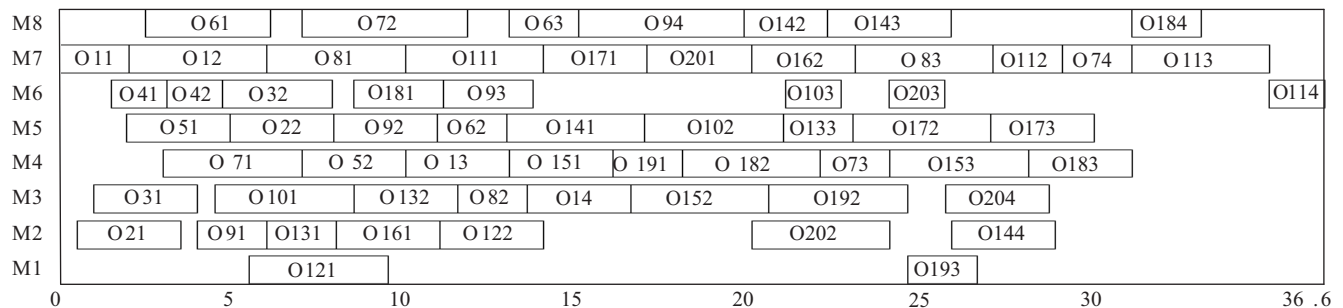


图5 不同 T_w 下 ISASS 与 TMAW 完工时间动态对比曲线

Fig.5 Dynamic comparison curve of ISASS and TMAW completion time under different T_w



(a) ISASS 方法下的调度甘特图



(b) TMAW 方法下的调度甘特图

图6 T_w 取2时ISASS与TMAW的一组调度甘特图

Fig.6 A set of scheduling Gantt charts of ISASS and TMAW when T_w takes 2

现,当 T_w 小于 0.5 时,系统退化为简单的 TMAM 模型,即工件提出作业调度请求后立即响应请求,表现为先来先到的服务机制;随着 T_w 取值的增大,PA 收到的作业调度请求逐渐增多,可以考虑各个作业之间的组合优化关系实现全局信息集合下的方案优选,从而提升系统调度性能;当 T_w 取 2.0 时,模型在一个时间窗口内能够取得 3~10 个作业调度请求,ISASS 在作业请求个数与计算速度方面取得了最佳的平衡,模型调度性能最佳,并全面超越 TMAW,此时两者的一组调度甘特图如图 6 所示,TMAW 的完工时间为 36.6h,ISASS 的完工时间为 33h,比 TMAW 少用时 3.6h,调度性能提升近 10%;随着 T_w 继续增大,模型调度性能逐渐下降。这是因为,一方面窗口 T_w 太大导致部分工序加工时间推迟;另一方面作业请求数量过多导致模型的优化计算时间急剧增长,系统运行出现停滞,ISASS 优化性能已到极限。因此将 T_w 固定为 2,后续数据都以此为基础获得。其他测试环境下, T_w 可能要重新测定以获取最佳时长。

2 不同权重系数下各优化目标约束关系

一方面,多目标优化数学模型显示系统负载、成本和能耗均是时间相关的函数;另一方面,实现 4 个优化目标之间所有可能权重系数的分配不可能也不必要。为着重分析负载、成本、能耗与完工时间之间的约束关系同时简化权重系数的分配,本试验中将单独研究负载与完工时间、成本与完工时间、能耗与完工时间 3 个场景下的优化约束关系。为减少不确定性因素的影响,3 个场景下的试验结果数据均基于表 2 所示的同一组算例获得。

每个场景中,完工时间权重系数 $W_1=0:0.25:1$,共 5 组,每组运行 10 次,对应的优化指标取各自的平均值,试验结果如图 7 所示。

从图 7 可以看出,在本试验设定下,系统负载、生产成本和能耗均与系统的完工时间近似呈负相关性。随着完工时间权重系数 W_1 的增大,系统的优化中心逐渐向时间指标转移,当 W_1 取得最大值 1.0 即系统变为单一的时间指标优化时,3 个

场景取得了近似相等的完工时间最优值,约为 19,此时,负载、成本和能耗三者的优化值较劣,分别为 98.4、1595.4 和 462.58;当 W_1 取 0,即 3 个场景分别变为负载、成本和能耗的单一目标优化时,场景 1、场景 2 和场景 3 分别取得了 90、1437.2 和 243.9 的

表2 实例数据
Table 2 Instance data

工件 J_i	工序 O_{ij}	到达时刻	工艺类 TYPE	额定工时 RT	材料成本 mc_i
J_1	O_{11}	0	T_5	3	30
	O_{12}		T_3	4	
	O_{13}		T_5	3	
	O_{14}		T_2	2	
J_2	O_{21}	0.5	T_1	2	40
	O_{22}		T_2	3	
	O_{23}		T_4	4	
J_3	O_{31}	0.7	T_4	4	30
	O_{32}		T_1	2	
J_4	O_{41}	1.5	T_1	4	60
	O_{42}		T_5	3	
	O_{43}		T_3	4	
	O_{44}		T_4	2	
J_5	O_{51}	2.0	T_2	3	45
	O_{52}		T_5	2	
J_6	O_{61}	2.6	T_2	4	56
	O_{62}		T_2	2	
	O_{63}		T_4	3	
	O_{64}		T_3	2	
J_7	O_{71}	3.0	T_3	3	77
	O_{72}		T_4	2	
	O_{73}		T_5	3	
	O_{74}		T_1	4	
J_8	O_{81}	3.3	T_1	2	38
	O_{82}		T_5	4	
	O_{83}		T_4	3	
	O_{84}		T_3	2	
J_9	O_{91}	3.8	T_2	4	29
	O_{92}		T_5	4	
J_{10}	O_{101}	4.2	T_1	3	92
	O_{102}		T_3	3	
	O_{103}		T_2	4	

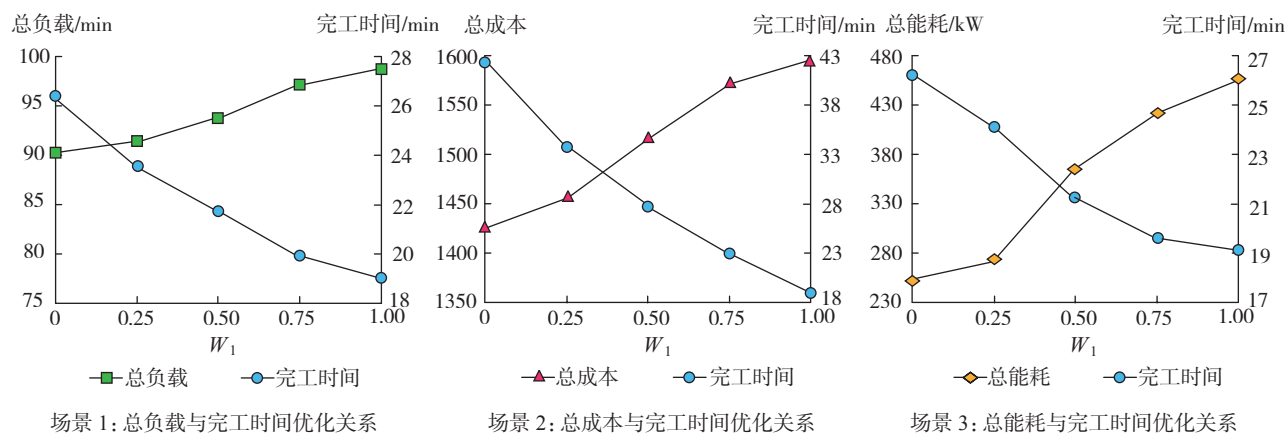


图7 不用权重系数下各目标优化约束关系

Fig.7 Each target optimization constraint relationship without target weight coefficient

最优值。与此同时,3个场景下的系统完工时间分别在最优值19的基础上增加了7.2、23.5和7.5,即系统取得最优负载、最优成本和最优能耗所耗费的时间代价不同。

定义平均效率比 r 来描述单位时间增量下的优化指标(负载、成本和能)提升率:

$$r = \frac{(\theta_{\max} - \theta_{\min}) / \theta_{\max}}{T_{\max} - T_{\min}} \times 100\% \quad (13)$$

式中, T_{\min} 、 T_{\max} 、 θ_{\min} 、 θ_{\max} 分别为3个场景下的时间最优、最劣值和优化指标最优、最劣值。经计算,3个场景中,负载、成本和能耗的平均效率比分别为1.2%、0.42%和6.3%。由此可见,在本试验设定下,成本对时间投入的敏感性较差,而较小的时间增长投入可以获得较高的生产能耗和系统负载的下降,进一步计算得到时间与能耗降低指标的投入产出比达到了1:1.7,这在节能降噪、绿色生产的今天具有十分重要的现实意义。

结论

本文在分析基于简单CNP的传统多Agent方法求解作业车间调度问题不足的基础上,重新规划了多Agent调度模型,提出了区间协同拍卖的动态调度策略,策略通过设立规划Agent、封装多目标优化算法并插

入时间窗口,协调了同一窗口下各Agent目标的组合优化关系,在保证多Agent系统智能性、分散自治性、网络合作性和CNP灵活性的基础上较好地解决了TMAW单目标优化的不足,以及优化区间过小使得模型整体调度性能欠佳的问题。可变的时间窗口和可调的权重系数提高了模型的灵活性和针对不同生产环境的适应能力。进一步研究了不同时间窗口和不同权重系数对系统调度性能的影响,较好地指导了实际生产活动,提高了模型的实用性。

区间协同拍卖策略下的多Agent调度模型逻辑结构简单,因此便于实现,具有较强的实用价值。然而,时间窗口的工作机制可能会影响模型对外部随机扰动响应的及时性。尽管扰动响应与处理问题不在本文的讨论范围之内,但个性化定制与生产的动态扰动处理是一个不可避免的问题;同时,针对扰动的敏捷、高效的处理也是智能制造特性的重要体现。今后,可在本文已有研究的基础上,重点讨论模型针对扰动的处理策略,进一步提高模型的实用性。

参考文献

[1] BLAZEWICZ J, FINKE G, HAOPT G, et al. New trends in machine scheduling[J]. European Journal of Operational Research,

1988, 37(3): 303-317.

[2] 吴秀丽,孙树栋,余建辉,等.多目标柔性作业车间调度优化研究[J].计算机集成制造系统,2006,12(5):731-736.

WU Xiuli, SUN Shudong, YU Jianhui, et al. Research on multi-objective optimization for flexible job shop scheduling[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2006, 12(5): 731-736.

[3] DAI M, TANG D, GIRET A, et al. Energy-efficiency scheduling for a flexible flow shop using an improved genetic-simulated annealing algorithm[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2003, 29(5): 418-429.

[4] 鞠全勇,朱剑英.批量生产柔性作业车间优化调度[J].机械工程学报,2007,43(8):148-154.

JU Quanyong, ZHU Jianying. Multi-objective flexible job shop scheduling of batch production[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2007, 43(8): 148-154.

[5] ZHANG G, SHAO X, LI P, et al. An effective hybrid particle swarm optimization algorithm for multi-objective flexible job-shop scheduling problem[J]. Computers & Industrial Engineering, 2009, 56(4): 1309-1318.

[6] 张超勇,董星,王晓娟,等.基于改进非支配排序遗传算法的多目标柔性作业车间调度[J].机械工程学报,2010,46(11):156-164.

ZHANG Chaoyong, DONG Xing, WANG Xiaojuan, et al. Improved NSGA-II for the

multi-objective flexible job-shop scheduling problem[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(11): 156-164.

[7] 饶运清, 谢畅, 李淑霞. 基于多 Agent 的 Job Shop 调度方法研究[J]. 中国机械工程, 2004, 40(10): 873-877.

RAO Yunqing, XIE Chang, LI Shuxia. Research on multi-agent based scheduling for job shop scheduling[J]. China Mechanical Engineering, 2004, 40(10): 873-877.

[8] 陈勇, 吴国献, 林飞龙. 多品种多工艺车间作业调度的 multi-Agent 建模[J]. 浙江大学学报(工学版), 2009, 43(9): 1672-1678.

CHEN Yong, WU Guoxian, LIN Feilong. Multi-Agent modeling on scheduling of multi-variety and multi-process job-shop[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2009, 43(9): 1672-1678.

[9] 潘颖, 孙伟, 马跃, 等. 基于多 Agent 的柔性作业车间调度研究[J]. 大连理工大学学报, 2011(5): 667-674.

PAN Ying, SUN Wei, MA Yue, et al. Research on flexible job shop scheduling based on multi agent[J]. Journal of Dalian University of Technology, 2011(5): 667-674.

[10] 赵良辉. 无拍卖的动态 Agent 调度模型[J]. 计算机集成制造系统, 2013, 19(11): 2893-2899.

ZHAO Lianghui. Dynamic Agent scheduling model without contract net protocol[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2013, 19(11): 2893-2899.

[11] 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 scheduling under different reschedule periods[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2014, 20(10): 2470-2478.

[12] 刘爱军, 杨育, 邢青松, 等. 柔性作业车间多目标动态调度[J]. 计算机集成制造系统, 2011, 17(12): 2629-2637.

LIU Aijun, YANG Yu, XING Qingsong, et al. Dynamic scheduling on multi-objective flexible job shop[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2011, 17(12): 2629-2637.

[13] 肖海宁, 楼佩煌, 严伟国, 等. 柔性作业车间中机床与自动导引小车在线调度

方法[J]. 农业机械学报, 2013, 44(4): 280-286.

XIAO Haining, LOU Peihuang, YAN Weiguang, et al. On-line scheduling method for simultaneous scheduling of machines and automated guided vehicles in flexible job shop[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(4): 280-286.

[14] 曹华军, 刘飞, 何彦. 机械加工系统节能降噪型综合任务分配模型及其应用[J]. 机械工程学报, 2006, 42(5): 97-102.

CAO Huajun, LIU Fei, HE Yan. Integrated task-assignment model of energy saving and noise reduction in the machining systems and its application[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2006, 42(5): 97-102.

[15] KARSITI M N, CRUZ JR J B, MULLINGAN J R J. Simulation studies of multilevel dynamic job shop scheduling using heuristic dispatching rules[J]. Journal of Manufacturing Systems, 1992, 11(5): 346-358.

通讯作者: 唐敦兵, 教授, 博士生导师, 研究方向为智能制造系统、制造系统与自动化、数字化设计与制造, E-mail: d.tang@nuaa.edu.cn。

Research on Modified Multi-Agent Model for Job-Shop Scheduling Based on Interval-Synergy-Auction Scheduling Strategy

GUAN Chencheng, TANG Dunbing, WEI Xin, SHEN Xiaoyu

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

[ABSTRACT] In general, only time is optimized when using the traditional multi-Agent way (TMAW) to solve the job-shop scheduling problem based on contract net protocol, which ignores the requirement of multi-objective optimization for scheduling system. In essence, task optimum allocation between Agents is single-step optimization. Thus very limited boost is made to the performance of the scheduling system. To solve the problems, the multi-Agent scheduling model is re-planned and an interval-synergy-auction scheduling strategy (ISASS) is proposed in this paper. Time, cost, machine load and energy consumption are optimized globally in a certain time window in this strategy. And different optimal trends can be got by changing weighting factors. Finally, a simulation test validates the effectiveness. Influence on the scheduling performance under different time windows and different weighing factors is also studied so as to guide the actual productive practices.

Keywords: Multi-Agent; Job-shop scheduling; Interval-synergy-auction; Multi-object optimization; Time window; Weighing factor

(责编 大漠)