

基于合同网协议交互投标的动态调度方法研究^{*}

魏英姿^{1,2} 曲艳丽² 胡玉兰¹

(沈阳理工大学信息学院 沈阳 110168)¹ (中国科学院沈阳自动化所 沈阳 110016)²

摘要 柔性制造系统使生产加工路径有很多可选性,所以调度系统必须考虑机器调度问题。分配规则调度是一种最基本、最具影响力的动态调度方法。然而,分配规则调度方法很少考虑机器顺序选择。兼顾工件选择和机器选择两方面,本文运用交互投标过程,构建基于合同网协议调度的协商规则。研究作业车间动态调度问题,提出并构建了5种合同网规则调度方法。通过实验分析结果表明,基于合同网交互投标模式的规则调度能够大大改善调度系统性能,提高设备的利用率和设备负荷平衡指标。

关键词 合同网协议,分配规则,生产调度

Dynamic Scheduling Approach Based on Interactive Bidding in Contract Net Protocol

WEI Ying-Zi^{1,2} QU Yan-li² HU Yu-Lan¹

(Shenyang Ligong University, Shenyang 110168)¹ (Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Science, Shenyang 110016)²

Abstract Flexible manufacturing system provides alternative processing routes to produce the same product. So the scheduling systems must take into account machine scheduling. Dispatching rules (DRs) are the most common and significant approach in the dynamic scheduling system. Existing rule-based scheduling approaches seldom address the machine selection in the scheduling process. Considering both the job selection and machine selection, we present the contract net protocol rule (CNP-rule) through the interactive bidding process. Five CNP-rules approaches are proposed and constructed using dispatching rules for solving job-shop scheduling problems. We provide the experimental results and analyses of multiple CNP-rules based scheduling. Competitive results demonstrate that the CNP-rule approach not only yields evident increase in the system performance, but also gets better equipment utilization and load balancing level for the scheduling system.

Keywords Contract net protocol(CNP), Dispatching rules, Production scheduling

1 引言

调度是指在满足指定约束的条件下,利用有限的资源完成加工任务,以获得某种目标的优化,这类问题通常属于 NP 完全问题。实际的作业车间往往出现一些不确定性的情况,如,机器故障、工具或原材料短缺以及运输障碍等等,使调度问题变得更加复杂。因此,研究动态调度系统比静态调度系统更具有实际意义。动态调度比静态调度更强调算法的鲁棒性及算法对扰动的快速响应能力。

在研究动态调度问题的方法中,分配规则(Dispatching Rules)调度是最基本、最具影响力的方法。分配规则根据某个准则从机器的待加工队列中选择一个作业进行加工,这种局域决策会很快得出结果,因此适用于动态调度环境。由于分配规则简单、易于理解和实现、计算复杂度低,在实际生产加工任务中进行调度的最传统方法也是分配规则。制造系统完成工件加工任务就必须解决任务的分解、分配,资源的利用,冲突和死锁的处理等问题。目前对于任务、制造资源的调度分配协商策略大多采用多智能体模型、合同网、熟人模型、搜索算法等方法^[1,2]。基于合同网的谈判用简单的工作过程实现动态任务分配,自然地实现各 agent 负荷平衡^[3,4]。因此,基于合同网的谈判是目前唯一被广泛研究、应用的协调方

法,在分布式制造系统以及其他领域中有着许多应用或原型系统,但单纯的合同网协议系统忽略了 agent 之间的隐含关联和约束关系,系统的调度方案不优化,任务的完成质量不是最佳。在执行合同网协议的体系中,投标 agent 和招标 agent 的身份并不是固定的,某些时候,投标 agent 是其他 agent 的招标 agent,招标 agent 也可以成为投标 agent。本文在合同网协议交互投标的模式下,利用分配规则构建动态调度方法。

2 调度问题模型

作业车间调度问题(Job-shop Scheduling Problem, JSP)是最普通的调度类型,是指由 m 台机器加工 n 个工件,不同工件的工序间没有顺序约束,根据每个工件的加工工艺要求,通过调度确定每台机器上的工件加工顺序,使得某个指标(如,平均拖期)最优。本文研究的作业车间动态调度问题模型:工件到达系统,在机器前的队列中等待,然后被加工并送到下一台机器,机器可以有空闲。工件到达时间、加工时间是 $[G_1, G_2]$ 范围内按某种随机分布规律变化而定义的,交货期根据下面公式确定:

$$DD_i = g_i + k \sum_{j=1}^m du_j^i \quad k \in [-1, 4] \quad (1)$$

其中 DD_i, g_i, m, k 和 du_j^i 分别表示交货期时间、工件到达时

^{*} 基金项目:973 计划课题(2002CB312200)资助项目。魏英姿 博士,副教授,主要从事机器学习方法、分布系统研究;曲艳丽 博士,副研究员,主要从事机器人学、分布式系统研究。

间、操作数目、时间紧张系数和 j 操作的加工时间。 k 可以取负值意味着系统允许工件在其可以加工时已经超过工件到期时间,这是由于在实际工厂车间经常会遇到这样的情况:某工件在其先前工步完成之前,该工件当前时间已经超过交货期时间。

1.1 调度性能指标

衡量调度系统的性能指标应包括:设备关联指标和工件关联指标。设备关联指标主要包括机器平均利用率、机器负荷平衡率等,这些指标都与整个生产周期中的实际加工时间相关联。工件关联指标主要包括工件完工指标和工件流动指标。前者主要与工件交货期有关,后者与制造系统生产成本有关^[5]。

调度系统的工件关联优化目标为最小化系统作业的平均拖期时间,计算工件 i 完成时的拖期时间,如式(2)。

$$T_i = \max\{FT_i - DD_i, 0\} \quad (2)$$

式(2)中 FT_i 表示工件 i 的加工完成时间。

计算系统的平均拖期,如式(3)。

$$\bar{T} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n T_i \quad (3)$$

为考察制造系统设备关联的性能指标,本文给出如下概念:

定义 1 机器利用率 (Machine Utilization percentage, MU) 是指在给定时间内,机器的工作时间与机器可用时间的比率。

定义 2 平均机器利用率的计算,如式(4):

$$\overline{MU} = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m MU_j \quad (4)$$

定义 3 机器负荷平衡率 (Load Balancing Ratio), 如式(5)。

$$balance_ratio = 100\% - \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m |MU_j - \overline{MU}| \quad (5)$$

式(4)、(5)中 MU_j 为 j 机器的利用率。本文调度的优化目标是极小化平均工件拖期时间、极大化平均机器利用率。

3 双向投标协商的规则调度方法

3.1 分配规则调度与机器调度

分配规则的工作原理是:由系统的某个属性(状态)触发调度指令,再由生产调度指令直接控制生产过程^[4,5]。由于调度指令的生成依赖于系统的某个属性,因此,实现了对生产过程的单属性闭环控制,规则调度属于典型的动态控制方式。分配规则调度本质上是一种局域内的贪心优化方法。在当前调度点,分配规则按本规则评价指标选出最好的操作,不同的调度规则只是在评价调度的性能指标上有所不同。

工件由一组确定的离散工程零件组成,每个零件需要一个或多个机器加工以满足订单需要。随着多功能加工装备(如,激光加工机等)的使用,制造系统增大了加工柔性,使系统在生产同一个产品时有多种可选路径。因此,调度问题的研究必须处理好工件的加工路径问题。目前的调度方法主要应用在对机器前的加工工序进行选择,按照某个标准确定工序的优先次序,而对机器次序的安排,大多采用随机选择或遵照固定顺序。在实际的动态作业车间中,机器故障的发生和工件到达系统的时间都存在随机性,还有,一种机器具有多种加工能力,但不同机器加工某工件的同一工序花费却有所不同,因此,对于机器高负荷、作业期限紧张的调度系统,机器选择也很关键^[5-8]。常用调度规则大多强调工件关联调度性能

指标,而与设备关联指标间缺乏明确的关系,所以,本文运用面向机器的分配规则以期改善调度系统性能,避免传统规则调度方法固定地或随机性选择机器的缺点。

3.2 分布式调度系统体系结构

计算机网络技术向工业现场设备的延伸,智能制造单元(机器人、数控机床等)和材料处理系统通过计算机网络互连,使现场总线控制系统分布式控制体系结构得以实现,本文采用分布式控制体系结构,如图 1 所示。在分布式制造执行系统调度部分中,每个设备(agent)有自己的控制器,能够实现分布式信息的分布式决策。本文的调度系统中,没有运用监督 agent,不同 agent 之间的合作通过基于合同网的招标方式协商,采用了双向选择的交互投标。交互投标的方案同时考虑工件 agent 和机器 agent 双方面的性能,实现面向工件 agent 和机器 agent 调度的双向选择,有利于达到制造过程中的高效、有力的调度。交互投标的调度方案实现了这两方面的结合。

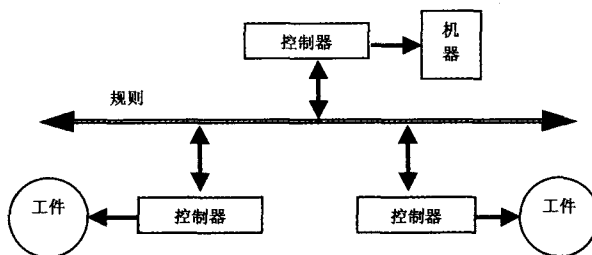


图 1 调度控制器分布式体系结构

3.3 交互投标的合同网调度协商过程

在分布式控制体系中,通过交互竞标过程实现合作协商,并通过合作协商策略形成生产调度。

(1)以工件 agent 为中心的协商,如图 2 所示。由机器 agent 发起竞标,机器投标相互竞争以争取得到工件加工。在投标过程中,机器尽量使自身性能度量最优化,如,保持机器使用率在某个期望区间内,保持缓冲区水平较低(一般指进程中的工件数目 work in progress, WIP)。工件通常选择出价最高的机器进行加工。

(2)以机器 agent 为中心的协商,如图 3 所示。工件 agent 向制造系统中的机器 agent 投标,投标的目的是获得机器提供的操作或服务,工件投标应反映工件加工自身要求指标,例如,交货时间和优先级约束等。工件投标越高,机器选择该工件的几率越大。

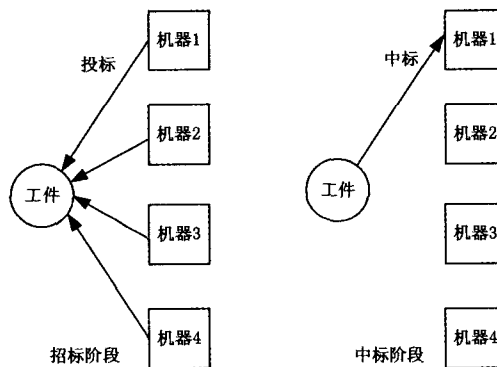


图 2 以工件 agent 为中心的竞标协商示意图

合同网协议中的谈判是一个局部过程,不涉及中央控制,谈判双方进行双向信息交换,并按本方的价值观念评价所获

得的信息,最后通过双向选择达成最后契约。因此,这种谈判形式完全依赖于各求解节点自主的决策和控制策略,采用分布式控制方式实现系统的自适应任务分配。以优化的资源配置和代价完成特定任务,在局部优化基础上达到全局优化。由于不同节点间可以共享任务和解决结果,因此多个节点很容易地通过合作完成一项复杂任务。

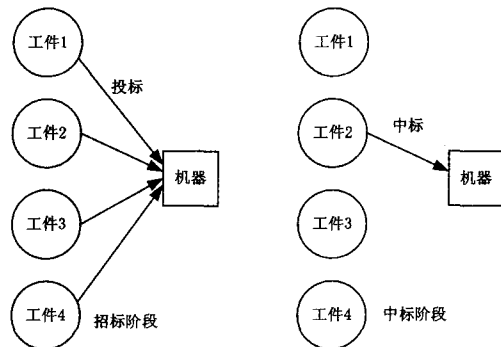


图3 以机器 agent 为中心的竞标协商示意图

3.4 合同网协议规则调度方法

多 agent 之间的协商采用基于合同网规则的协商策略,根据本文提出的合同网规则调度方法确定系统内 agent 之间协商的成交或不成交。制造系统是一类复杂的离散事件动态系统,调度规则与系统性能之间没有简单的对应关系,而且,即使在同一规则调度下,不同制造系统的性能往往大相径庭。为作对比研究,在合同网交互投标模式下,对同一调度问题运用不同调度方法,本文构建了 5 种合同网规则(CNP-RULE)调度方法。

CNP-CR 规则:调度过程分为两步。首先以机器为中心,工件 agent 进行竞标,调度系统选择工件,优先选择具有最小 CR 比值的工件(即,根据 CR 规则选择工件)。然后,根据工件在各机器上工序的可能完成时间先后,选择最早完成的机器进行加工,也就是说,依据面向机器的 EFT 规则调度机器,选择一台机器尽早加工完已选定工件的某道工序。

CNP-FCFS 规则:调度系统通过协商,在以机器为中心进行投标时,利用 FCFS 规则选择工件,然后,根据工件在各机器上工序完成时间先后调度机器(即,运用面向机器的 EFT 规则),优先选择能够最早完成该工件所需加工工序的机器进行加工。

CNP-EFT 规则:优先选择机器空闲时间最早的机器(即,运用面向机器的 FCFS 规则),尽量使机器不空闲,提高机器的利用率,再选择能在该机器上尽早加工完的工件(即,运用 EFT 规则)。

CNP-EDD 规则:运用面向机器的 FCFS 规则调度机器,然后,在该机器前缓冲区内选择期限要求最早的工件,使被加工工件尽量不超过到期时间(即,运用 EDD 规则)。

CNP-SPT 规则:运用面向机器的 FCFS 规则调度机器,然后,在该机器前缓冲区内选择在该机器上最少加工时间工件进行加工(即,运用 SPT 规则)。

4 实验设计与分析

对照文[9]中的算例(5 工件 9 机器问题),本文设计一个更为复杂的算例。15 种工件在 9 台机器进行加工,每个工件必须经过所有机器完成一道加工工序,才能最终成品,工序之

间没有顺序约束。不同工件到达时间和工件在某台机器上的加工时间按照[2, 9]区间的均匀分布随机数确定。

在式(1)中时间紧张度系数 $k=1$ 条件下,调度系统运行 10 次得到的调度结果的一次中间值,如表 1 所示。由于基于规则的合同网调度方法是依照确定性准则选择资源的调度方法,因此,算法的计算结果具有稳定性,随机性只存在于分配规则在随机选择机器的过程中。表 1 分别给出了不同调度方法的工件关联、设备关联性能指标对比列表,结果表明,考虑了机器选择的合同网规则调度方法性能会远远好于传统的分配规则。表 1 给出了分配规则随机组合的调度与合同网规则随机组合的调度性能对比,主要是为了显示两类调度方法总体上性能的差别。为达到系统性能最优化,运用机器学习方法动态选择规则的调度方法可以改善系统调度性能^[9]。

按平均机器利用率评价下列调度方法的性能,合同网规则调度方法性能好坏的顺序为: CNP-FCFS > CNP-EFT > CNP-CR > CNP-SPT > CNP-EDD。系统的设备负荷平衡率最高的是 CNP-FCFS,说明 CNP-FCFS 方法在每一个调度点,都是面向机器时间来调度的,机器一旦有空闲,调度系统就将工件送到该机器进行加工,使机器充分利用其加工能力。以系统加工平均拖期时间为评价标准,CNP-EFT 规则调度方法具有最好的调度性能。图 4、5 分别给出 EFT 规则、CNP-EFT 方法调度的 gantt 图,从中发现,EFT 规则总是选择较短加工时间的工步优先调度,这种局域内的贪心选择调度使问题的解很容易陷入局优解。从表 1 看出,EDD 规则调度实现较低的拖期工件率,使制造系统有较高的产出量,然而,这种高产量的改善是以增加制造系统总体的平均拖期为代价换取的,这是由于 EDD 规则调度使交货期较长的工序加工优先级降低而造成制造系统加工的总延误时间较长。

表 1 不同调度方法的性能对比表

调度方法	平均拖期	延迟工件数	机器平均利用率(%)	负荷平衡率(%)
CR	103.13	15	51.9	84.4
FCFS	42.20	15	75.5	90.0
EFT	43.07	15	78.1	85.3
EDD	99.93	14	32.6	94.1
SPT	131.80	15	48.8	89.1
分配规则随机组合	57.67	15	55.7	92.9
CNP-CR	30.87	15	81.5	92.8
CNP-FCFS	32.33	15	90.7	97.8
CNP-EFT	28.73	15	88.1	96.6
CNP-EDD	44.47	13	70.6	89.7
CNP-SPT	51.60	15	74.5	93.6
合同网规则随机组合	39.00	14	73.4	95.4

合同网规则在调度过程中,每次只对可行方案按本规则评价准则进行排序从优选择,避免了传统合同网协商过程全面覆盖式的通信带来的系统计算负担,从而大大减少调度所用的时间,适合实际生产需要。根据在 Pentium IV CPU1.5GHz、RAM128MHz 计算机 BorlandC++ 3.1dos 环境下对算例的计算,合同网规则调度方法在 2 秒内即可得到调度结果,完全可以满足动态调度的要求。

结论 随着制造业趋向于地理位置分散分布的发展方向,易于在分布式系统应用的合同网协议调度方法,得到了更大的发展空间。本文提出的合同网规则调度方法原理简单,易于理解和实现,它使制造系统中的所有设备得以充分利用,

使系统达到了较好的负荷平衡。合同网规则调度方法在运用传统分配规则调度的基础上,兼顾了设备关联调度性能指标,尽管不能保证得到问题的最优解,但它总是能够给出合理、可

接受的满意解。与其他智能调度方法相比,合同网规则调度方法具有较低的计算复杂性,更适用于实际车间生产环境。

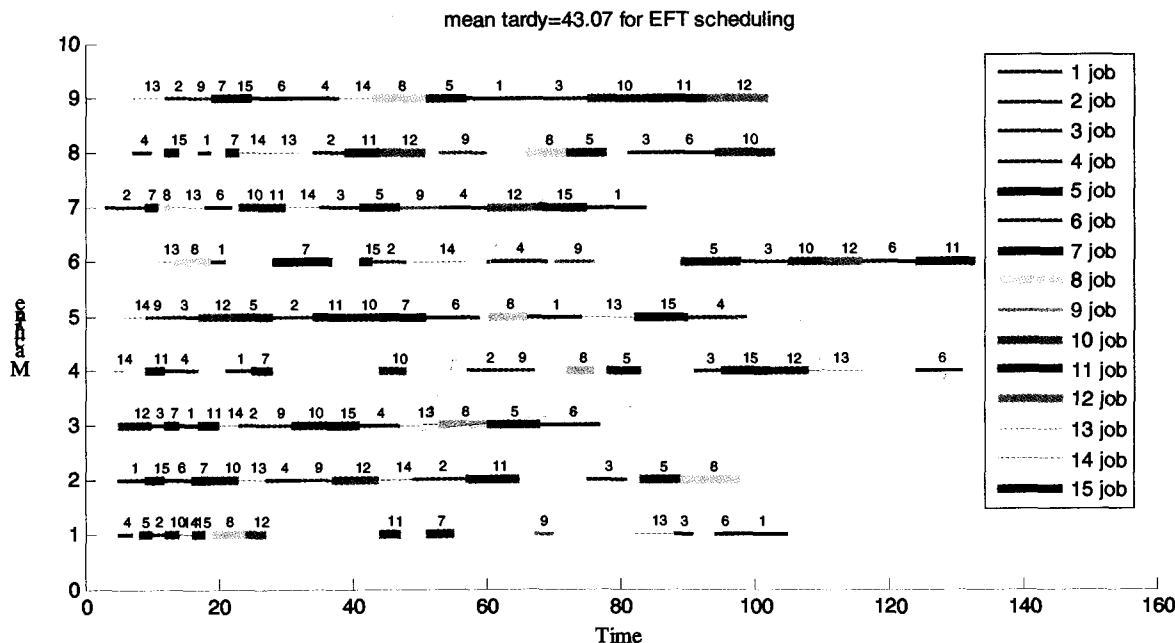


图4 EFT方法调度的 gantt图

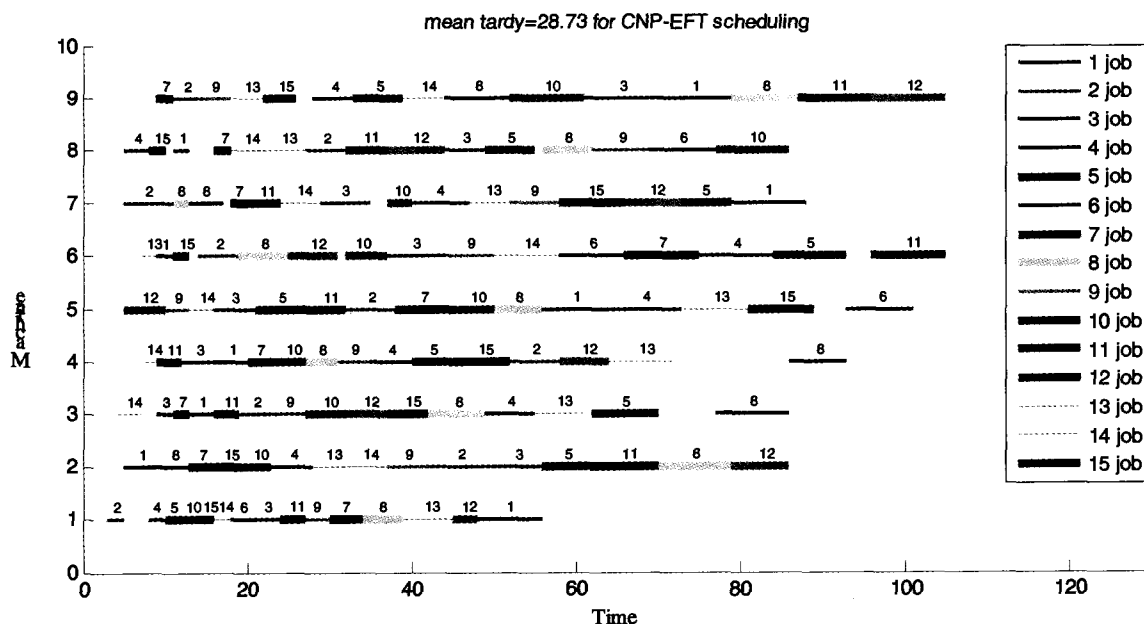


图5 CNP-EFT方法调度的 gantt图

参考文献

- 1 赵新宇,林作铨. 合同网协议中的 Agent 可信度模型. 计算机科学, 2006, 33(6):150~153
- 2 徐俊刚,戴国忠,王安安. 生产调度理论和方法研究综述. 计算机研究与发展, 2004, 41(2): 257~267
- 3 Saad A, Kawamura K, Biswas G. Performance Evaluation of Contract Net-Based Heterarchical Scheduling for Flexible Manufacturing Systems. Intelligent Autonomous and Soft Computing, 1997, 3(3): 229~248
- 4 Kanchanasevee P. Contract-net-based scheduling for holonic manufacturing systems:[Ph. D. Dissertation of Vanderbilt University]. 1999

- 5 孙容磊,熊有伦,杜润生,丁汉. 规则调度迭代优化. 计算机集成制造系统, 2002, 8(7): 546~550
- 6 Mohanasundaram K M, Natarajan K, Viswanathkumar G, et al. Scheduling rules for dynamic shops that manufacture multi-level jobs. Computers & Industrial Engineering, 2003, 44(1): 119~131
- 7 Sun D, and Lin L. A dynamic job shop scheduling framework: A backward approach. International Journal of Production Research, 1994, 32(4): 967~985
- 8 Subramaniam V, Lee G K, Ramesh T, et al. Machine Selection Rules in a Dynamic Job Shop. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology Springer, 2000 (16): 902~908
- 9 Aydin M E, Oztemel E. Dynamic Job-Shop Scheduling using Reinforcement Learning Agents. Robotics and Autonomous Systems, 2000, 33(2): 169~178