

# 基于规则调整的多 Agent 制造系统调度研究

潘俊峰,唐敦兵,张泽群,伍健民,冯俊  
(南京航空航天大学 机电学院,江苏 南京 210016)

**摘要:**针对客户个性化需求的增加所带来的订单不确定性等问题,提出一种离散制造车间内的多 Agent 制造系统可行架构。通过分层控制的方式实现底层实体自组织控制协商来完成加工任务,有效解决订单的动态性问题;系统上层监控调控层实时感知系统状态,对局部决策实体进行规则调整,以保证系统的全局性能。通过部署到实际车间进行随机订单下放,验证该系统架构的有效性。

**关键词:**离散制造车间;多 Agent 制造系统;系统调度;规则调整;监控层

**中图分类号:**TH165 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2021)05-0160-04

## Reserch on Multi-Agent Manufacturing System Scheduling Based on Rule Adjustment

PAN Junfeng, TANG Dunbing, ZHANG Zequn, WU Jianmin, FENG Jun

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

**Abstract:** In regard to order uncertainty caused by increasing customer personalized demand, a feasible architecture of a multi-Agent manufacturing system in a discrete manufacturing workshop was proposed. The self-organizing control negotiation of the underlying entities was conducted to complete the processing tasks by hierarchical control to solve the dynamic of the order effectively. The real-time system status was perceived via upper-level monitoring and adjustment, and the local decision-making entities were adjusted to ensure the globe performance of the system. Random order placement to the actual workshop was deployed and implemented, which verified the effectiveness of the system architecture.

**Keywords:** discrete manufacturing workshop; multi-Agent manufacturing system; system scheduling; rule adjustment; monitoring level

## 0 引言

随着制造业走向社会化和个性化,客户的个性化需求不断增长。对于企业而言,订单变得数量不确定、时间不确定、优先级也不确定。离散制造车间(discrete manufacturing workshop, DMW)作为制造系统中的加工处理环节,有望更加灵活、快速地适应环境变化,并根据资源条件动态处理生产任务<sup>[1]</sup>。

为了充分发挥 DMW 的优势,有研究学者提出了多 Agent 制造系统(multi-Agent manufacturing system, MAMS)。它将车间里的物理设备与功能抽象成可以独立决策的实体,这种设计方式让多个决策实体共同应对和解决问题,减少了请求上层控制决策的等待时间。

在 MAMS 领域,KOUIDER A 等<sup>[2]</sup>提出了一种基于协作方法的分布式多 Agent 调度系统。KROTHAPALLI N K C 等<sup>[3]</sup>将车间实体抽象成两种典型的 Agent,即设备智能体(machine agent, MA)和工件智能体(part agent, PA)。在后续的研究中,研究者们通常使用这两类典型

Agent。为了提高系统的整体性能,研究人员进一步提出了各类功能 Agent,包括监控智能体(supervisor agent, SA)和数据库智能体(database agent, DA)等<sup>[4]</sup>。但是,在 MAMS 研究中,绝大多数的研究均是使用软件仿真,鲜有提及将 Agent 与实际设备的集成。

尽管 MAMS 可以稳定运行,但整体运行结果通常不是全局最优的。在分层/集中式控制系统中,Agent 可以基于当前状态和知识做出快速响应决策,但是很难实现全局推论,进而选取最佳策略。因此,多层混合控制架构和 SA 被广泛地应用以确保 MAMS 的整体性能。例如文献[4]中的实例,在 SA 和系统底层 Agent(如 MA、PA)之间建立了严格但可调整的层次架构,SA 有权禁止或者更改下层 Agent 的决策结果。

在大多数提高 MAMS 整体性能的研究中,作者通常提出两种控制方式的系统架构,分别称为上层控制系统和下层控制系统。一组负责在正常条件下运行,另一组负责在发生干扰或性能指标出现问题时运行。在 LEITÃO P 等<sup>[5]</sup>设计的系统中,上层控制系统管理与基本实体之间的协调并确保全局性能。如果发生扰动,则下层实体进入

**基金项目:**国家自然科学基金资助项目(52075257);国家重点研发计划项目(2018YFE0177000);船舶总装建造成套装备项目(TC190H47J);国防基础科研项目(JCKY201805C003)

**第一作者简介:**潘俊峰(1996—),男,福建福州人,硕士研究生,研究方向为物联环境下的智能制造系统研究。

反应模式,并使用信息素管理而不询问上层。WONG T N 等<sup>[6]</sup>提出了另一种模式切换方法,当出现干扰或难以保证整个系统性能时,SA 将介入。通常情况下,车间是由下层的多 Agent 系统自组织的,然而在实际应用中,上述模式切换方法通常难以实施。首先,切换模式的时间点难以把握;其次,切换模式时通常会伴随显著的延迟。而且最主要的困难在于绝大多数关于 Agent 的研究都是使用软件仿真模拟,没有与实际设备相结合。

随着个性化定制的流行,订单的不规则性变得越来越大。在设计 MAMS 的整体性能保证系统时,需要考虑如何在不影响 MAMS 的重要功能(例如反应性、鲁棒性和自治性)的情况下实现这一目标。

针对这一问题,本文进行了两项研究。一方面,构建了易于部署的 MAMS 体系结构,可以在不同的 DWM 中重新实现。另一方面,本文提出了以自组织规则中决策参数的系数作为调整目标来保障全局性能的方法。在决策过

程中,指导分层控制架构中的 Agent 做出有利于全局性能的决策。在本文中,简要叙述第一部分工作,着重于第二部分的研究。

## 1 结合设备的 Agent

首先将车间中的设备按照特定功能进行分割组合,形成功能单元(functional unit, FU),FU 是构成 DWM 的基本组件。图 1 显示了位于 DMW 实验室的铣削 FU。该铣削 FU 主要由 CNC 铣床及其对应的工位台、RFID 读/写设备和各类传感器构成。在分布式人工智能的启发下,设计并提出了智能体计算节点(agent computing node, ACN)的概念<sup>[7]</sup>。本文基于 JADE(java agent development)框架,设计开发了整体系统,搭载于 ACN 上,并通过物理连接与 FU 建立联系。

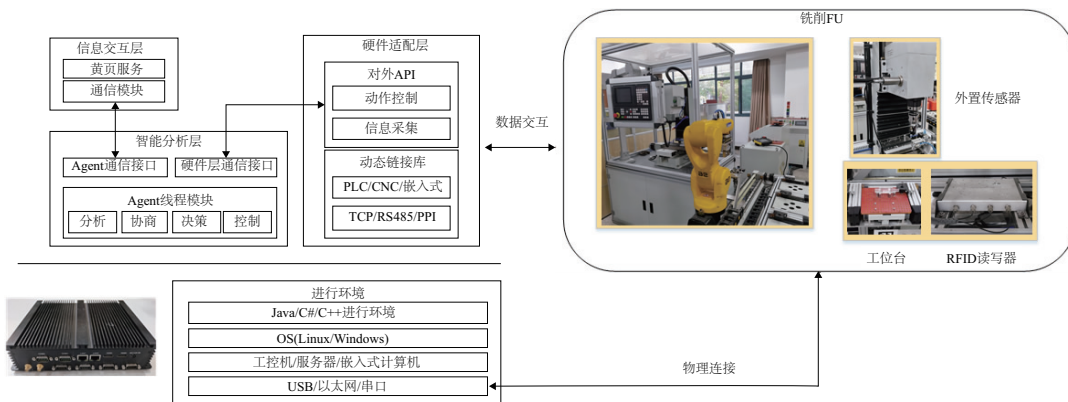


图 1 铣削 FU 示例

ACN 的物理硬件载体可以是车间服务器或嵌入式工控机。在开发阶段,将单个 ACN 程序植入到小型嵌入式计算机中,该程序可以智能地控制单个 FU。ACN 软件由硬件适配层、智能分析层和基于 JADE 的信息交互层三层组成。

1) 硬件适配层用于与机器互连,链接库根据不同设备的通信协议提供功能支持,硬件适配层用于完成设备的动作控制和信息采集。

2) 智能分析层是基于边缘计算思想构建智能体的核心部分,此处收集了来自 FU 和车间环境的信息,Agent 线程模块通过这些信息进行分析、协商、决策、控制 FU。

3) 基于 JADE 的信息交互层用于与其他 ACN 的交互。JADE 是基于 JAVA 语言的 Agent 开发框架,它封装了消息交换的接口,该接口符合 FIPA (the foundation for intelligent physical agents) 提出的 Agent 交互技术规范。

在本文的研究环境中,RFID 读写器的天线安装在与 FU 相连的工位台中。RFID 读写器作为信息的传感节点,通过 TCP/IP 或 RS232/RS485 通信协议实现与 ACN 的互连,从而构建了获取和传输生产信息的通道。自动仓储系统的 ACN 从云端系统获取订单信息,并通过 RFID 读写器将信息写入工件托盘的 RFID 标签。FU 通过位于工位台

上的 RFID 读写器来感知工件的到达,并通过存储在 RFID 标签中的信息来分析处理任务。通过 ACN 的感知,FU 之间的工件传输相当于在 ACN 之间信息传输。

ACN 是执行 MA 和 PA 的容器。如图 2 所示,以铣削 FU 为例,ACN 中的 MA 程序负责单元本身的操作。当工件到达时,当前的 ACN 会将其视为一项任务,与此部分对应的 PA 程序此时处于静默状态。对于 ACN 而言,该部分等价于一串数据,其中包括任务 ID 和工艺矩阵。

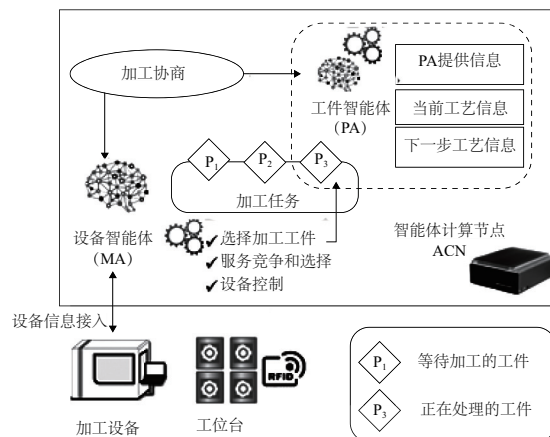


图 2 PA 与 MA

通过任务 ID, ACN 从车间服务器获取与任务相关的信息。通过工艺矩阵, ACN 可以获取当前工艺步骤。当加工设备中没有任务时, ACN 将从待加工的工位台中选择任务来进行处理。选择工件后, 工件的数据将与相应程序结合在一起以生成 PA 程序。ACN 将充当此 PA 运行的容器, 直到处理完该工件, 并通过协商和交互确定下一步工艺的承担设备。此后, 该 PA 程序将停止运行, 该部分将再次转换成一条数据的形式存在。

PA 通常以一串数据的形式存在, 并在需要时由 ACN 生成运行程序。ACN 的智能分析层负责管理 MA 和 PA 的线程。在这种模式下, PA 不会总是占用计算空间和内存, 只存储必要的在 RFID 标签中用于生成 PA 线程, 并与车间中的工件一起流动。

## 2 规则调整策略

使用 ACN, 可以实现对 DMW 的性能改进。如图 3 所示, 多个带有 ACN 的 FU 共同构成了一个分层控制系统。在该系统中, ACN 的软件程序可以抽象为一个虚拟操作层, 称为“自组织控制层”。该层主要负责个体自主和群体协商行为。从混合控制策略中可以得知, 增加“监视调控层”, 以监控车间整体信息, 并且能对车间进行调控, 这样可以保障全局性能。在本文的设计中, 此“监视调控层”将不会直接控制车间的决策, 而只是影响 ACN 决策因子, 从而间接控制车间决策, 这保证了 ACN 是车间内部的唯一控制者。

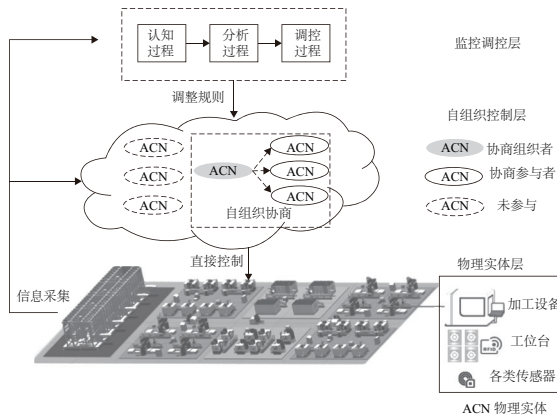


图3 系统整体架构

将车间内的一组加工单元抽象成 FU, 通过 ACN 控制, 以这样的方式组成了一套 MAMS。从传统的角度来看, 在 MAMS 中, MA 和 PA 是基本组件, ACN 的智能分析层负责管理 Agent 线程。作为决策节点, ACN 遵从设计人员制定的决策方式, 并根据设计的流程完成决策过程。本文以实验室环境中的系统为例。无论 ACN 如何控制机床本身, 仅从调度的角度来看, 系统操作都可以简化为几种类型的决策活动。本文重点介绍系统运行中的性能保证, 并选择以下两个决策过程作为监视调控层的调整对象。

1) 工件选择机床: 当数据形成 PA 后, 将监视相应工件当前工艺流程的处理状态, 并在即将完成处理时启动一轮协商决策。系统中具有相应功能的 MA 将成为该协商

的参与者, 而 PA 是协商发起人与裁定者。在本文中, 每个 FU 的负载、单位时间能耗以及工位台使用率将作为决策因素。

2) 机床选择工件: 当加工机床完成当前的工件加工任务时, 根据协商规则, 它将在工位台中选择下个工件进行加工。在本文中, 将选择交货日期、订单日期和工件到达此 FU 的时间作为决策因素。

对于上述决策因子, 进行归一化处理, 并赋予不同权重, 本文设计的监控调控层将根据实际情况实时调整这些权重。如图 3 所示, 监视层包含 3 个过程, 认知过程、分析过程和调控过程。以下基于 3 个过程分别叙述决策过程。

认知过程: 该过程负责统计和分类每个 ACN 上传数据, 并将用于获取工件信息列表和 FU 信息列表。工件信息列表记录了每个工件的当前处理进度, 而 FU 信息列表则负责记录每个 FU 的工位台和机器负载。

分析过程: 根据需求设计各种指标并设置相应的参考值。分析过程是通过认知过程中的数据来计算指标的, 并将其与相应的参考值进行比较, 以确定是否执行自组织规则修改。在本文中, 使用一个设计指标 (临近超时指标, near-delivery index, NDI) 进行说明。NDI 用于确定生产活动中是否存在超时风险以及该超时风险的具体值。单个工件的 NDI 计算过程如下:

$$N_{DI_i} = \begin{cases} 0 & Et_i \leq 0 \\ \frac{Et_i}{R_{DI_i}} & Et_i > 0 \\ 1 + \frac{Et_i}{R_{DI_i}} \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $Et_i$  表示第  $i$  个工件的交货日期与预估完工日期的差值;  $R_{DI_i}$  表示第  $i$  个工件预估的剩余处理时间, 即预估完工日期与当前时刻的差值;  $N_{DI_i}$  表示第  $i$  个工件的 NDI 值。NDI 的取值范围是  $[0, 1]$ , NDI 的值越小, 过期任务的风险越大。系统时刻  $t$  的 NDI 值取正在进行的工作的最小值, 用  $N_{DI_t}$  表示。将在分析域中设置参考值, 以确定是否需要根据  $N_{DI_t}$  调整当前规则。

调控过程: 本文通过 NDI 对“工件选择机床”和“机床选择工件”决策中各种决策因素的权重进行调整。交货日期越紧急, 对生产资源能源消耗的考虑就越少, 那么选择负荷少、等待零件少的机器的可能性就越大。同时, 当交货日期更为紧急时, 处理单元优先选择交货日期较短的零件进行处理。总结上述各项因素, 可以得出 NDI 与每个决策因子权重之间的相关性, 设计调整函数, 或者当 NDI 处于不同区间时直接设计权重值。

## 3 车间部署 MAMS

通过 ACN 在准工业环境中实现了 DMW 的雏形, 并形成了 MAMS, 车间布局如图 4 所示。按照上一节的思路设计了监控调控层, 以调整生产过程中两个决策过程 (即“工件选择机床”和“机床选择工件”) 中每个因素的权重。决策过程中每个因素的数值 (例如能耗、各个时间点和负载) 将由 ACN 在实际条件下实时计算。同时, 这些参数将



被归一化处理。为每个 FU 准备了一个能耗采集设备,并将其连接到相应的 ACN。在系统运行期间,将基于先前的

能耗值来预测下一步所需的能耗。节点的机床负载和加工时间等信息将通过 Agent 程序进行收集统计。

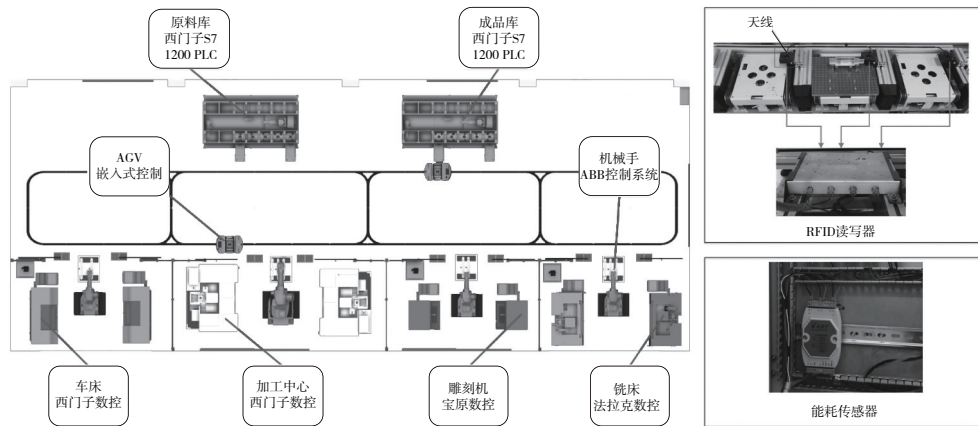


图4 工业环境实际部署样例

本文通过重复执行相同订单的生产以验证多 Agent 制造系统的实际生产效果,比较3种模式之间的差异,包括无规则模式,即ACN在做出选择时遵循先到先服务的原则、没有监控调控层的固定规则和本文提出的模式。通过计算超期时间和总能耗的总和,并将多次运行后的平均值作为标准,结果如图5所示。在实际操作中,通过实时调整规则,可以更好地保持MAMS的整体性能。

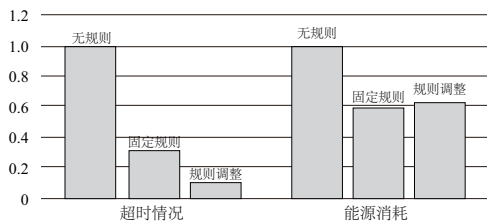


图5 实验结果

## 4 结语

在现代制造环境中,DMW有望更灵活、更快速地适应环境变化,并能动态处理生产任务。MAMS被认为是解决这类问题的重要方法。但是,部署困难和缺乏全局性能保证措施限制了分层控制系统在实际工业现场的使用。而且最主要障碍之一是大多数基于Agent的研究仅仅使用软件仿真模拟而不集成物理设备。

针对这些问题,本文提出了一种ACN概念,以改进DMW中MAMS的实现。然后,研究监控调控层以实时优化ACN的自组织规则。通过监控层,可以指导ACN做出有利于整体性能的决策。

## 参考文献:

- [1] 黄腾霄,唐敦兵,张海涛,等. 基于Agent的智能制造系统实时动态调度机制研究[J]. 机械制造与自动化, 2017, 46(6): 164-168.
- [2] KOUIDER A, BOUZOUIA B. Multi-agent job shop scheduling system based on co-operative approach of idle time minimisation[J]. International Journal of Production Research, 2012, 50(2): 409-424.
- [3] KROTHAPALLI N K C, DESHMUKH A V. Design of negotiation protocols for multi-agent manufacturing systems[J]. International Journal of Production Research, 1999, 37(7): 1601-1624.
- [4] RĂILEANU S, ANTON F, BORANGIU T, et al. A cloud-based manufacturing control system with data integration from multiple autonomous agents [J]. Computers in Industry, 2018, 102: 50-61.
- [5] LEITÃO P, RESTIVO F. ADACOR: a holonic architecture for agile and adaptive manufacturing control [J]. Computers in Industry, 2006, 57(2): 121-130.
- [6] WONG T N, LEUNG C W, MAK K L, et al. Dynamic shopfloor scheduling in multi-agent manufacturing systems [J]. Expert Systems With Applications, 2006, 31(3): 486-494.
- [7] ZHANG Z Q, TANG D B, ZHU H H, et al. A practical approach for multiagent manufacturing system based on agent computing nodes [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 2020:095440622090862.

收稿日期:2020-10-19