

文章编号: 1001-0920(2001) 02-0141-05

# 动态调度的研究方法综述

钱晓龙, 唐立新, 刘文新

(东北大学 信息科学与工程学院, 辽宁 沈阳 110004)

**摘 要:** 介绍了动态调度的研究方法和最新进展。将动态调度的研究方法分成两类: 一类是传统方法, 如最优化方法、启发式方法和仿真方法等; 另一类是智能方法, 如专家系统、神经网络、智能搜索以及 Multi-agent 等。对动态调度的各种研究方法逐一进行分析, 并指出该领域应进一步研究的问题和未来的可能发展方向。

**关键词:** 动态调度; 数学规划; 仿真; 人工智能

**中图分类号:** TP 29

**文献标识码:** A

## Dynamic Scheduling: A Survey of Research Methods

QIAN Xiao-long, TANG Li-xin, LIU Wen-xin

(School of Information Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang 110004, China)

**Abstract:** A systemic introduction of existing research methods and latest development of dynamic scheduling are given. The research methods are divided into two classes from a new point of view. Methods such as optimization, heuristic and simulation belong to the traditional class. While methods such as expert system, artificial neural network, intelligent search and multi-agent belong to the intelligent class. Characters of each method are analyzed and compared here. At last, problems which need further research and possible research directions are pointed out.

**Key words:** dynamic scheduling; mathematical programming; simulation; artificial intelligence

## 1 引 言

在当今的市场中, 制造企业的竞争主要取决于产品的供货周期、质量和售后服务水平。先进的生产管理是实现上述目标的一个重要手段。生产调度是生产管理的核心内容和关键技术, 其任务是在企业车间有限的资源约束下, 确定工件在相关设备上的加工顺序和加工时间, 以保证所选定的生产目标最优。科学地制定生产调度方案, 对于控制车间的在制品库存, 提高产品交货期满足率, 缩短产品供货周期

和提高企业生产率起着至关重要的作用。

传统的对生产调度的研究是在如下假设条件下进行的: 1) 被调度的工件集合是确定的; 2) 工件的加工时间是确定的, 并且在安排计划时全部工件都已到达; 3) 加工工件的机器是连续可用的。这类调度问题是静态调度问题。

实际生产中的大量问题是随机发生的。如在机械制造业中, 由于工件随机到达, 加工机器出现故障等随机事件, 使得预调度不能正常执行, 这就需要安

收稿日期: 2000-02-23; 修回日期: 2000-07-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(79700006); 中国科学院机器人学开放实验室课题(A970111)

作者简介: 钱晓龙(1966—), 男, 辽宁鞍山人, 讲师, 硕士, 从事现场总线和智能控制研究; 唐立新(1966—), 男, 黑龙江兰溪人, 教授, 博士, 从事系统工程和智能控制研究。

排重调度。同样,在钢铁企业的炼钢-连铸-热轧一体化生产工艺中,由于要求工序之间的物流衔接和节奏匹配协调一致,且高温连续运作,故其生产调度系统具有以下特点:1)能够在线产生实时调度;2)对随机扰动实现在线辨识,并能快速进行自动重调度。这类问题是动态环境下生产调度问题。

动态调度的概念出现较早, Jackson<sup>[1]</sup>于1957年便对静态调度和动态调度的概念做了区分。最初的研究主要采用启发式方法或仿真方法,与实际应用有较大的距离。近年来,计算机技术的迅速发展以及人工智能、神经网络、遗传算法和仿真技术等新方法的产生和发展,为动态调度的研究开辟了新思路,也为生产调度的实用化奠定了基础。目前,动态调度已成为生产调度研究中的热点之一。

本文对动态调度的研究方法和最新进展进行系统的介绍,对动态调度的各种研究方法做了分类,并对各种方法逐一地进行分析。最后指出应进一步研究的问题和未来可能的发展方向。

## 2 动态调度与动态事件

### 2.1 动态调度相关概念辨析

1) 反应(反馈)调度<sup>[2]</sup>:反应(反馈)调度是近几年新出现的一个概念,但至今尚无一个公认的严格定义,常与动态调度不加区分。反应(反馈)调度是动态和随机环境下的调度,但它强调环境变化时的响应能力,因此可将其看成是动态调度的一种处理方式或响应机制。

2) 自适应调度<sup>[3]</sup>:自适应调度是基于以下事实提出的:如果原调度有较好的调度效果和鲁棒性,则当扰动发生时,过于频繁的重调度不仅不必要而且容易造成系统不稳定,因而应减少重调度的次数以尽量恢复原有调度。自适应调度可认为是动态调度的一种实现思想。

3) 实时调度:相对于批处理调度而言,实时调度强调在条件发生变化时能及时有效地做出反应。实时调度是典型的事件驱动方式。

4) 在线调度:相对于离线调度而言,在线调度要求在生产连续进行的情况下,对环境变化做出及时的决策。在线调度是一种连续调度方式。

### 2.2 动态事件

引起调度环境变化从而需要进行动态调度的事件称为动态事件。动态事件的种类有多种, Suresh等<sup>[4]</sup>将动态事件分成以下4类:

1) 与工件相关的事件:包括工件随机到达,工件加工时间不确定,交货期变化,动态优先级和定单变化;

2) 与机器相关的事件:包括机器损坏,负载有限,机器阻塞/死锁和生产能力冲突;

3) 与工序相关的事件:包括工序延误、质量否決和产量不稳定;

4) 其它事件:如操作人员不在场,原材料延期到达,原材料有缺陷,动态加工路线等。

## 3 动态调度的研究方法

目前,关于动态调度研究方法的综述性文献仅对动态调度的某类研究方法进行综述。例如: Ramash<sup>[5]</sup>对动态调度仿真研究方法的综述, Szelde等<sup>[2]</sup>对基于知识的反应调度方法的综述; Suresh等<sup>[4]</sup>对单件车间动态调度的综述。这些文献不但没有对动态调度的各类研究方法进行全面的综述,而且对每种方法的适用条件也缺乏必要的分析。近年来,动态调度的理论和应用研究都取得了很大进展,因此有必要对动态调度的研究方法进行系统的分类和评价。

本文将研究动态调度的方法分成两大类,即传统方法和智能方法。传统方法包括最优化方法、仿真方法和启发式方法;智能方法包括专家系统、人工神经网络、智能搜索算法和 Multi-agent 方法。

### 3.1 传统的研究方法

#### 3.1.1 最优化方法

最优化方法主要包括数学规划(动态规划、混合整数线性规划等)、分支定界法和消去法等。这类方法通常基于某些简化的假设,并能产生一个最优调度方案。

现已证明,绝大多数调度问题是 NP 问题,随着调度问题规模的增大,上述方法的求解难度将急剧增加,因而最优化方法往往不能适应生产实际对实时性的要求。此外,该类方法大多基于某些理想化的假设,远不能充分反映实际生产环境的复杂性,而且要充分表达实际生产环境的随机性和动态性也极为困难,所以单独使用此类方法来解决动态调度问题是不现实的。

目前在动态调度的研究中,通常将最优化方法同其它方法相结合,用来解决一定的问题。例如 Matsuura<sup>[6]</sup>提出的重调度算法,首先用分支定界法产生一个调度,当工况发生变化时,再用调度规则来

分配工件。

### 3.1.2 启发式方法

启发式方法针对调度问题的 NP 特性, 并不企图在多项式时间内求得问题的最优解, 而是在计算时间和调度效果之间进行折中, 以较小的计算量来得到近优或满意解。启发式方法通常称为调度规则。

关于调度规则的研究在很早以前便开始了, 例如 Johnson<sup>[7]</sup> 于 1954 年提出的 Johnson 算法等。Panwalker 等<sup>[8]</sup> 对 113 个调度规则做了经典的分类, 将调度规则分成 3 大类, 即优先级规则(包括简单的优先级规则、简单优先级规则的组合和加权优先级规则)、启发式调度规则及其它规则, 并对各规则的适应情况做了总结。关于调度规则比较经典的综述性文献还有文献[9]。

由于调度规则计算量小、效率高、实时性好, 因而在动态调度研究中被广泛采用。但由于它通常仅对一个目标提供可行解, 并且缺乏对整体性能的有效把握和预见能力, 因而在实际应用中常将它与其它方法结合使用, 利用其它方法根据具体情况选择合适的调度规则。此外, 新的启发式方法也不断提出。例如 Abumizar 等<sup>[10]</sup> 提出一种重调度算法, 当扰动发生时, 不是全部重新调度也不是等扰动解除后再继续原调度, 而是仅仅重新调度那些直接或间接受扰动影响的工件, 从而减少了由于扰动引起的生产周期的增加, 同时也减少了与初始调度的偏差, 效率和稳定性都较好。

### 3.1.3 仿真方法

仿真方法是动态调度研究中最常用的方法。该方法通过对实际生产环境的建模来模拟实际生产环境, 从而避开对调度问题进行理论分析的困难。目前, 仿真方法在动态调度研究中主要有以下两方面内容:

1) 研究各种仿真参数对仿真结果的影响, 以便在进行仿真实验时能做出恰当选择, 从而使仿真所取得的结论更全面、更具说服力。Ramash<sup>[5]</sup> 总结了大量的相关文献, 对仿真时应考虑的参数及各参数的取值范围做了详细介绍。

2) 将某些方法应用于某个仿真环境, 通过仿真评价现有方法之间或新方法与现有方法之间的优劣, 从而总结出各方法的适用范围, 或根据结论数据建立知识库或产生神经网络的训练样本。Liu 等<sup>[11]</sup> 做了大量仿真实验, 从仿真数据中产生出训练样本用于训练神经网络, 并将训练后的神经网络用于动态调度。

由于仿真方法在模拟实际环境时做了某些假设和近似, 而且仿真模型的建立较多地依赖于诸如随机分布等参数的选择, 因而仿真结论往往因模型的不同而不同, 很难取得一个一致的结论。然而, 对多数生产调度问题而言, 在缺乏有效的理论分析的情况下, 仿真仍不失为一种最受欢迎的方法。

## 3.2 智能的调度方法

### 3.2.1 专家系统

专家系统在动态调度研究中占有重要地位, 目前已有一些较成熟的调度专家系统, 例如 ISIS 和 OPIS 等。调度专家系统通常将领域知识和现场的各种约束表示成知识库, 然后按照现场实际情况从知识库中产生调度方案, 并能对意外情况采取相应的对策。

有效的领域模型和知识表示对于动态调度专家系统的设计十分重要。此外, 约束在调度知识库中也占据重要地位, 因为调度的好坏在很大程度上依赖于其对约束的满足程度。动态调度的决策参数具有很强的不确定性, 为了有效地表示这种不确定性, 许多学者选择了概率论, 而应用模糊集理论则是一种更为有效的方法。在调度问题中应用模糊方法的优点在于, 可为不精确约束的表示和应用提供丰富的表述语言和系统的框架, 并且能对模糊目标进行评价<sup>[2]</sup>。

ISIS<sup>[12]</sup> 是最早的基于 AI 的调度系统之一。该系统采用约束指导的搜索方法产生一个调度, 动态情况则由重调度组件进行处理, 当冲突发生时, 它通过有选择地放松某些约束来重新调度那些受影响的定单。基于 ISIS 开发的 OPIS<sup>[13]</sup> 是现有的基于知识的车间调度系统中最成熟的系统之一, 它根据情况使用面向资源或面向定单的动态调度策略。SONIA<sup>[14]</sup> 是一个包含预测和反应调度组件的单件车间调度系统, 反应组件用于解决由于各种原因产生的调度效果与预期效果间的偏差, 系统考虑的意外事件有操作延误、容量冲突和机器故障。OPAL<sup>[15]</sup> 也是一个为单件车间设计的调度系统, 它采用调度规则和启发式方法进行调度。尽管 OPAL 中没有反应调度组件, 但是当调度延误时, 它可以根据车间的当前状态重新产生一个调度。

### 3.2.2 神经网络方法

神经网络应用于调度问题已有十多年的历史, 它在动态调度研究中的应用主要集中在以下两方面: 1) 将调度问题看成一类组合优化问题, 利用其并行处理能力来降低计算的复杂性; 2) 利用其学习和

适应能力将它用于调度知识的获取,以构造调度决策模型。目前,利用神经网络解决动态调度问题已成为动态调度研究的一个热点。在动态调度研究中应用最多的是BP网,通过对它的训练来构造调度决策模型。

Sim等<sup>[16]</sup>提出一种专家神经网络方法,该方法用16个神经网络分别从相应的训练样本集中获取调度知识,用专家系统确定各子网的输入。由于神经网络的训练由16个子网分担,并且各子网可以并行训练,从而减少了训练时间。Cho等<sup>[17]</sup>提出一种基于神经网络和仿真的鲁棒自适应调度器,该方法根据他人研究的结论确定神经网络的结构和训练样本。尽管该网络结构具有较强的通用性,但由于每个人研究的背景不尽相同,因此通过量化他人结论来产生训练样本必然会对网络性能造成影响。Jones等<sup>[18]</sup>提出一种解决实时排序和调度问题混合方法的框架,综合运用了神经网络、遗传算法和实时仿真等方法。但只是提供了一个框架,真正实施起来还需进一步研究。Liu等<sup>[11]</sup>提出一种用神经网络选择调度规则的方法,神经网络的输入对应于所有待调度工件的加工路线和加工时间信息,输出对应于待选的调度规则。但该方法需要大量的训练样本和很长的训练时间才能保证调度的效果;另外,随着问题规模的增大,网络的规模也将急剧增大。

### 3.2.3 智能搜索算法

应用于调度问题的智能搜索方法包括模拟退火、禁忌搜索和遗传算法等。目前在动态调度中使用最多的是遗传算法。遗传算法解决调度问题的优势在于它可以随机地从一个调度跳到另一个调度,从而可以解决其它方法易于使解陷入局部最优的问题。此外,它还具有计算速度快且易与其它算法相结合的优点,非常适合于解决动态调度问题。

应用遗传算法解决动态调度的文献较多,其中大多将遗传算法与其它方法结合使用。Lee等<sup>[19]</sup>用遗传算法和机器学习来解决单件车间的调度问题,用机器学习来产生将工件下发到车间层的知识库,而用遗传算法在各台机器上分配工件。Jian等<sup>[20]</sup>提出一种FMS的调度和重调度算法,该算法考虑了4种动态事件,即机器损坏、定单优先级提高、紧急定单下达和定单取消,用稳态遗传算法产生一个初始调度,当意外事件发生时,根据具体情况仅重新调度那些直接受影响的工序。Jones等<sup>[18]</sup>提出一种实时排序和调度算法,它集成了神经网络、实时仿真和遗传算法等方法,其中遗传算法主要用于对几个备选

的调度规则进行优选。

### 3.2.4 Multi-agent 方法

Multi-agent通过在一系列分散的智能单元(Agent)间进行协调来解决问题。这些单元有各自的目标和自治的行为,并且可以有子单元。但是没有—个单元能够解决全局问题,因而它们之间必须进行协调。

关于Multi-agent系统的结构,不同的人有不同的观点。例如Kouiss等<sup>[21]</sup>根据车间的物理布局来确定系统的结构,为每一个加工中心配备了一个Agent,用于解决对应加工中心内的调度。另外还设计了一个全局Agent,用于监视整个制造系统的状态,必要时为满足全局的需要可在各Agent间进行协调。Nof等<sup>[3]</sup>提出了自适应/预测调度系统框架,将调度系统按功能划分成5个模块:调度器/重调度器、监视器、比较器、分辨器和调度恢复适应器。

关于每个Agent的结构,不同的人有不同的理解。但是每个Agent至少应有以下3个组成部分:1)知识库,包含Agent执行其功能所必需的知识 and 数据;2)控制功能,根据环境状态及与其它Agent间的相互作用,从知识库中提取知识来完成调度功能;3)通讯功能,用来与其它Agent和环境之间进行信息传递。

研究表明,Multi-agent特别适用于解决复杂问题,尤其是那些经典方法无法解决的单元间有大量交互作用的问题。其优点是速度快、可靠性高、可扩展性强、能处理带有空间分布的问题、对不确定性数据和知识有较好的容错性;此外,由于是高度模块化系统,因而能澄清概念和简化设计。

## 4 未来的发展方向

传统方法中应用最多的是调度规则(启发式算法)和仿真方法。仿真方法几乎在每种方法中都有应用。由于调度规则具有计算量小、效率高和实时性好等优点,非常适用于动态调度。但它也有明显的缺点,因而通常需要与智能方法结合使用,通过智能方法根据情况在备选规则间进行选择。典型的研究方法通常同时使用某种智能方法、仿真方法和调度规则。

智能调度方法如专家系统、神经网络和遗传算法等,既有许多优点,也有各自的缺点。例如:神经网络的训练时间较长,对结果缺乏解释能力,并且网络结构及算法参数不易确定;专家系统知识获取的难

度大且扩展性较差, 当问题偏离知识领域时系统的性能将急剧下降; 遗传算法的适应函数较难选取, 处理实际问题时有时不能满足实时性和调度效果的要求。因此上述方法经常结合在一起使用, 如专家系统与神经网络相结合<sup>[16]</sup>, 遗传算法与神经网络相结合<sup>[18]</sup>, 遗传算法与专家系统相结合等<sup>[19]</sup>。由于 Multi-agent 方法具有速度快、可靠性高、可扩展性强等优点, 将成为研究的热点之一。

动态调度不仅是钢铁集成调度的关键技术, 也是机械、化工等流程型行业中的必备技术。在科技日益发达的信息技术时代, 动态调度问题必将大量应用于信息流处理。在充分了解现有研究方法优缺点的基础上, 开发新的更有效的动态调度问题的解决方法十分必要。目前绝大多数调度系统还处于研究原形阶段, 工业原形系统也大多由大学或研究机构承担, 真正应用于实际生产的调度系统并不多。因而今后应以研究能在实际中应用的调度系统为重点。

#### 参考文献:

- [1] Jackson J R. Simulation research on job shop production[J]. Naval Res Log Quart, 1957, 4(3): 287-295.
- [2] Szelde Elizabeth Kerr, Roger M. Knowledge-based reactive scheduling[J]. Prod Plan & Contr, 1994, 5(5): 124-145.
- [3] Nof S Y, Grant F H. Adaptive/ predictive scheduling review and a general framework[J]. Prod Plan & Contr, 1991, 2(4): 298-312.
- [4] Suresh V, Chandhuri D. Dynamic scheduling—A survey of research[J]. Int J of Prod Econ, 1993, 32(1): 53-63.
- [5] Ramash R. Dynamic job shop scheduling—A review of simulation research[J]. OMEGA Int J of Manag Sci, 1990, 18(1): 43-57.
- [6] Matsuura H, Tsubone H, Kanezashi M. Sequencing, dispatching and switching in dynamic manufacturing environment[J]. Int J of Prod Res, 1993, 31(7): 1671-1688.
- [7] Johnson S M. Optimal two- and three- stage production schedules with setup times included[J]. Naval Res Log Quart, 1954, 1(1): 61-68.

- [8] Panwalker S S, Iskander Wafik. A survey of scheduling rules[J]. Oper Res, 1977, 25(1): 45-61.
- [9] Blackstone J H, Philips D T, Hogg G T. A state-of-the-art survey of dispatching rules for manufacturing job shop operations[J]. Int J of Prod Res, 1982, 20(1): 27-46.
- [10] Abumaizar R J, Svestka J A. Rescheduling job shops under random disruptions[J]. Int J of Prod Res, 1997, 35(7): 2065-2082.
- [11] Liu H J, Dong Jian. Dispatching rule selection using artificial neural networks for dynamic planning and scheduling[J]. J of Intel Manuf, 1996, 7(2): 243-250.
- [12] Fox M S, Smith S F. ISIS: A knowledge-based system for factory scheduling[J]. Expert Syst, 1984, 1(1): 25-49.
- [13] Smith S F, Hynyen J E. Integrated decentralization of production management for factory scheduling [A]. Symp on Integ and Intel Manuf[C]. Boston, 1987.
- [14] Collinot A, Pape C L, Pinoteau G. SONIA: A knowledge-based scheduling system[J]. AI Eng, 1988, 3(2): 86-94.
- [15] Bensana E, Dubois D. OPAL: A multi knowledge-based system for industrial job-shop scheduling[J]. Int J of Prod Res, 1988, 26(5): 795-819.
- [16] Sim S K, Yeo K T, Lee W H. An expert neural network system for dynamic job shop scheduling[J]. Int J of Prod Res, 1994, 32(8): 1759-1773.
- [17] Chu H, Wysk R A. A robust adaptive scheduler for an intelligent work-station controller [J]. Int J of Prod Res, 1993, 31(4): 771-789.
- [18] Jones Albert, Rabelo Kuis Yih, Yuehwern Y. A hybrid approach for real-time sequencing and scheduling [J]. Int J of Comp Integ Manuf, 1995, 8(2): 145-154.
- [19] Lee C Y, Piramuthu S, Tsai Y K. Job shop scheduling with a genetic algorithm and machine learning[J]. Int J of Prod Res, 1997, 35(4): 1171-1191.
- [20] Jian A K, Elmaraghy H A. Production scheduling/rescheduling in flexible manufacturing [J]. Int J of Prod Res, 1997, 35(1): 281-309.
- [21] Kouiss Khalid, Pierreval Henri, Nasser Mebarki. Using multi-agent architecture in FMS for dynamic scheduling[J]. J of Intel Manuf, 1997, 8(1): 41-47.