

# 基于多Agent系统的 制造业生产调度模型研究

JIYU DUO AGENT XITONG DE ZHIZHAOYE  
SHENGCHAN DIAODU MOXING YANJIU

◎ 赵良辉 著



华南理工大学出版社  
SOUTH CHINA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY PRESS

# 基于多Agent系统的 制造业生产调度模型研究




ISBN 978-7-5623-5986-9



9 787562 113598 69 >

责任编辑：谢茉莉

封面设计：谢 卿

 华南理工大学出版社  
微信公众号：chcn\_scut

定价：48.00元

# 基于多Agent系统的 制造业生产调度模型研究

◎ 赵良辉 著



华南理工大学出版社  
SOUTH CHINA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY PRESS

· 广州 ·

此为试读, 需要完整PDF请访问: [www.ertongbook.com](http://www.ertongbook.com)

## 图书在版编目 (CIP) 数据

基于多 Agent 系统的制造业生产调度模型研究 / 赵良辉著. — 广州: 华南理工大学出版社, 2019. 6

ISBN 978 - 7 - 5623 - 5986 - 9

I. ①基… II. ①赵… III. ①制造业-生产调度-研究-中国 IV. ①F426.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2019) 第 091182 号

## 基于多 Agent 系统的制造业生产调度模型研究

赵良辉 著

---

出版人: 卢家明

出版发行: 华南理工大学出版社

(广州五山华南理工大学 17 号楼 邮编: 510640)

<http://www.scutpress.com.cn> E-mail: [scutel3@scut.edu.cn](mailto:scutel3@scut.edu.cn)

营销部电话: 020 - 87113487 87111048 (传真)

策划编辑: 谢茉莉

责任编辑: 谢茉莉

印刷者: 广州市人杰彩印厂

开本: 787mm × 960mm 1/16 印张: 8 字数: 153 千

版次: 2019 年 6 月第 1 版 2019 年 6 月第 1 次印刷

定 价: 48.00 元

---

版权所有 盗版必究 印装差错 负责调换

# 前 言

学术界对生产调度问题的研究虽然广泛而深入，但多数难以应用，原因在于真实调度环境过于复杂。本书尝试以多 Agent 系统的高柔性和灵活的组织结构应对调度环境的复杂性，提出两类具有实用价值的多 Agent 系统调度模型：适于优化调度的算法集成黑板模型和适于实时调度的合同网模型。

算法集成黑板模型主要用于静态调度，通过将已有的调度算法封装为 Agent，实现调度问题的优化。为给模型准备合适的封装对象，本研究对常用的非数值调度算法进行了改进，提出了针对作业车间调度的改进模拟退火算法（包括回火退火算法和快速模拟退火算法）、启发式遗传算法、小生境免疫算法和用于调度的文化算法等创新算法。仿真实验表明，与已有算法相比，改进后的算法可获得更快的计算速度和（或）优化能力。

基于改进的非数值算法，提出适于优化调度的非数值算法集成黑板模型。该模型以多 Agent 黑板结构为框架，将不同的算法封装为 Agent 以实现算法集成，形成统一、协调的求解模型；创建了基于多方博弈理论的模型求解机制，针对不同算法自身的特点制订竞争对策，激励各算法 Agent 在问题求解速度和求解质量两方面展开竞争，提高模型运行效率和求解能力。

合同网调度模型主要用于实时调度，模型中引入代表资源和作业的 Agent 作为合同双方，通过设定的谈判机制以招投标的方式完成调度，模型中加入具有调控能力的管理 Agent，以提高优化能力；对模型中各 Agent 的决策方法进行了细致的研究。模型还构建了适应敏捷调度的扩展机制，与其他模型相比，具有更好的实时性。

黑板模型和合同网模型分别体现了真实调度环境要求的两个方向：调度的实时性和优化性。两种模型结合形成的实用调度体系具有较高的应用价值。

本书围绕调度的优化和调度的实时性两个中心展开研究，其中第

二、第三章对优化进行了研究，第四章对实时性进行研究。具体结构如下：

第一章对研究背景、意义及研究内容做了简要介绍，同时提出本书的研究目标及主要创新点。

第二章讨论了几种用于调度的非数值算法，包括顺排/倒排法、模拟退火算法、遗传算法、禁忌搜索算法、免疫算法、文化算法，并分别提出了基于上述算法构建的具体算法，包括回火退火算法、快速模拟退火算法、启发式遗传算法、小生境免疫算法、文化算法。

第三章提出了集成各种非数值算法的黑板模型，详细论述了模型的组成结构，运用多方博弈思想建立其运行机制。

第四章提出了基于多 Agent 系统的合同网调度模型。该模型基于 Agent 协商模型，通过 Agent 之间的讨价还价来实现动态调度。详细描述了调度机制、调度各参与者在调度中的活动、模型在不同环境和要求下所做的适应性改变等。还讨论了面向调度系统的 MAS 软件工程，构建了以 JADE 为运行平台的应用实例。

结论部分对本文的工作做了总结，提出了进一步研究和探索的方向。

感谢广东省哲学社会科学规划办公室（GD15XGL55），广东省教育厅（2014 KTSCX130）等提供的项目和资金资助，使作者近 8 年来一直能持续、系统和深入地开展对建模与仿真、优化算法的研究；感谢华南理工大学在本文学术研究上给予的支持，感谢我的导师邓飞其教授在研究方法上给予的大力帮助。

希望本书能为从事调度系统优化、多 Agent 系统设计与建模、非数值算法设计的相关科研人员，以及从事运筹学、管理科学与工程等相关专业的教师和学生提供有益的参考。

由于算法及优化、计算机领域的研究日新月异，加之作者的研究领域有限，书中难免存在疏漏，在此恳请同行和读者批评指正。

赵良辉  
2019 年 3 月

# 目 录

|                              |     |
|------------------------------|-----|
| 第 1 章 绪论 .....               | 1   |
| 1.1 调度算法概述 .....             | 1   |
| 1.2 调度算法研究现状 .....           | 4   |
| 第 2 章 非数值调度算法及其改进 .....      | 15  |
| 2.1 预备知识 .....               | 15  |
| 2.2 顺排/倒排法 .....             | 22  |
| 2.3 模拟退火算法及其改进算法设计 .....     | 24  |
| 2.4 遗传算法及启发式遗传算法设计 .....     | 32  |
| 2.5 禁忌搜索及其应用 .....           | 43  |
| 2.6 免疫算法及小生境免疫算法设计 .....     | 47  |
| 2.7 几种算法的比较 .....            | 56  |
| 第 3 章 基于 MAS 的算法集成调度模型 ..... | 59  |
| 3.1 算法集成的思想 .....            | 59  |
| 3.2 多 Agent 系统预备知识 .....     | 60  |
| 3.3 集成调度模型设计 .....           | 65  |
| 第 4 章 基于 MAS 的合同网调度模型 .....  | 79  |
| 4.1 合同网概述 .....              | 79  |
| 4.2 模型总体设计 .....             | 81  |
| 4.3 Agent 设计 .....           | 87  |
| 4.4 模型关键技术 .....             | 91  |
| 4.5 模型功能扩展 .....             | 107 |
| 参考文献 .....                   | 113 |

# 第1章 绪论

## 1.1 调度算法概述

调度就是将稀缺资源在时间上分配给作业，从而实现一个或多个目标的优化。生产调度是制造系统中将稀缺的加工资源（机器、劳动力、工具）合理分配给工件或其他加工任务以实现生产目标优化的活动，是制造系统的基础，生产调度的优化是先进制造和现代企业管理的核心技术。

对调度问题的研究始于1954年Johnson<sup>[1]</sup>提出的两台机床的流水车间调度问题，几十年来这方面的研究长盛不衰，相关文献难以计数。与研究的深度和广度形成鲜明对比的是，生产调度问题在现实环境下一直得不到很好的解决，原因有二：

(1) 绝大多数生产调度问题是多项式复杂程度的非确定性问题（non-deterministic polynomial time problems, NP），很难找到最优解决方法，只能通过启发式算法或随机搜索算法获得近似最优解。

(2) 车间生产环境的复杂性使得生产调度的理论模型难以应用到生产实践中去。

随着学术界对组合优化问题研究的深入，上述第一个问题已能在一定程度上得到解决：最新的非数值算法和其他算法对常见理论调度问题已能获得相当满意的解，对大规模调度问题也能在可接受时间内获得近似最优解。这方面的非数值算法包括模拟退火算法、遗传算法（及演化规划）、禁忌搜索算法、免疫算法、粒子群算法、蚁群算法、分布估计算法、文化算法等。此外还有确定性最优化方法（如分支定界法、动态规划法、拉氏松弛法）、启发式方法（如移动瓶颈法）、基于知识的调度方法（如专家系统、仿真调度方法）、基于离散事件动态仿真的解析模型方法（如Petri网）、图搜索算法（如A\*算法、束搜索）、神经网络方法等，这些方法各有其特点和局限性，实际应用时难以选择。因此根据具体应用环境和问题特征选择契合的算法成为算法应用必须考虑的问题。

算法选择的一种解决方式是组合式算法，即将多种算法混合，成为综合各单纯算法特点的“鸡尾酒”算法，在结构上形成互补，增强优化能力。组合式算法可以大大增强原有算法的效率或优化能力，是当今算法研究的发展方向之一；其缺点在于须对算法结构进行极为细致的设定，算法设计者必须深刻掌握不同算法的优缺点、结构、运行规律，否则设计的结果易出现性能上的退化。

本书提出另外一种算法组合方式：集成算法模型。这种方式无须算法之间的交叉，而是将它们置于一个竞争环境中，共同求解一个问题；抢先提出解决方案或提出更优方案的算法处于竞争的优势地位；在问题求解过程中，一个算法的寻优结果可以被其他算法利用，在此基础上进一步优化，形成竞争背景下的协作。这种方式的优点在于实现算法互补的同时避免了对算法结构的破坏，省略了组合算法所要求的精细设计；模型的开放性使相似度很小的算法（难以形成组合的算法）也能集成到算法模型中实现功能上的“组合”。

对于第二个问题，也就是算法对复杂环境的适应能力问题，目前尚未出现公认解决方案。车间真实生产环境与调度理论模型的不同点主要表现在以下几个方面：

(1) 理论模型经常假定一次进行  $n$  个任务（作业），各任务的数量及时间参数固定，实际生产中各任务可能是连续到达，到达时间无法预测，也不允许所有任务到达后再开始调度。

(2) 理论模型一般假定调度确定后无须更改，而实际生产中经常出现需重新调度的问题：一个调度方案执行小部分后某个随机事件的发生（机器故障、缺料、停电、操作工人缺席等）使调度无法继续执行；此时必须对已有调度进行改动，使其仍能满足某些约束条件。

(3) 实际生产中的机器环境往往比理论模型更复杂。理论模型一般假定对于某一工序，机床要么可以加工、要么不可以加工，而不考虑工件的特征。事实上很多机床的加工范围是和工件特征有关的，例如大型机床加工的大尺寸工件，小机床根本无法加工；数控加工中心可以完成多种工序而普通机床只能完成特定工序等。

(4) 理论模型中作业的优先级往往是固定的，实际生产中作业的优先级常随时间波动（例如客户更改交货期）导致调度的优化效果降低。

(5) 理论模型不考虑调度人员的偏好，一台机器能否加工某零件是一个 0~1 问题；但实际环境中经常出现由于加工费用过高或难以操作，调度者在几台机器中避免使用某台机器的情况。

(6) 理论模型总假定机器永久有效, 事实并非如此。除了一些随机突发事件如机器故障外, 一些确定性事件如工具更换、机器保养等也会打破“机器持续可用”的假设。

(7) 多数理论模型中的惩罚函数(如果有的话)都是分段线性的, 但真实环境中的惩罚函数经常是非线性的“S”形曲线。

(8) 多数理论模型的优化是单目标的, 而实际调度常常是多目标的。不仅如此, 各个目标的权重还会随时间而变化, 或随调度者的主观意识以及生产车间的载荷情况而变化。

以上列举的“不同点”全面刻画了生产环境的“动态性”, 针对动态生产环境的调度一般称为动态调度或实时调度。虽然传统调度理论在一些相对简单的生产环境下仍具有应用价值, 但总体上难以胜任动态的、突发事件频繁的生产调度环境。

对于动态调度问题, 学术界目前的解决方案有三类:

第一类是通过对静态调度方法的改良和折中实现动态调度, 可细分为两种方式: ①通过人机交互将环境的复杂性交给人来处理, 算法(计算机)只负责它所能承担的部分; ②将动态调度问题细分为若干个小的静态调度问题, 通过滚动再调度的方式, 使用静态调度方法实现动态调度。这两种方式部分实现了动态调度问题的解决, 改良方式的静态本质使其难以适应较复杂的生产环境。

第二类方法是仿真方式, 通过离散事件仿真模型能较理想地描述复杂的制造系统, 对调度方案进行定量评估; 但由于仿真本身具有实验性质, 其成果只能针对具体环境应用, 很难从中提炼出一般规律。

第三类方法是基于人工智能的方法, 主要包括专家系统和基于多 Agent 系统的方法。专家系统能根据系统的当前状态和给定优化目标, 对知识库进行搜索, 选择最优的调度策略。但这种方法依赖于专家已有的知识, 对新环境的适应性差, 而且开发周期长、成本高。多 Agent 系统是近年来兴起的分布式人工智能理论的分支, 它为了解决动态调度问题开辟了一条全新的道路。多 Agent 系统用模拟人类社会系统的运作机制来提高计算机系统解决复杂问题的能力, Agent 软件环境特有的对外界的高度适应性使得调度方案以动态的方式生成, 并可根据现实情况随时更改。

Agent 系统用于生产调度的研究虽然才刚刚起步, 但已呈现出诱人的发展前景。本书提出基于多 Agent 系统的合同网调度模型, 将生产调度环境映射为多 Agent 系统, 通过 Agent 的高柔性、智能性适应环境的复杂性, 应对突发事件; 利

用多 Agent 系统的分布式特点迎合实时调度的要求。合同网模型可以有效应对生产环境的复杂性，主要表现在以下几个方面：

(1) 所构建的实时调度系统可以为随时到达的作业进行在线调度，最大限度满足快速加工要求；指定的调度方案可以随时更改，生产过程不受影响。

(2) 由于机器被封装为 Agent 参与调度，复杂的机器环境被映射为机器 Agent 内部规则（在合同网模型中表现为机器只对适合自身加工的作业进行投标），对调度过程几乎不造成障碍。

(3) 所构建的实时调度系统中，作业的优先级可以随时被调整（由管理 Agent 执行），调度人员的偏好也可以快捷地反映到调度过程中（通过管理 Agent 的学习和人机接口）。

(4) 所构建的实时调度系统可以很好地处理机器故障问题，只需简单地将故障机器承揽的任务重新招标寻找新的加工者。一旦机器修复，可以无阻碍地重新加入任务投标过程。

(5) 多目标优化调度可以通过指定调度规则来实现，这些规则是管理 Agent 在调度过程中进行调控的依据。

(6) 实时系统在线处理数据，加减班引起的机器失效和恢复可以实时反映到调度过程中；工时变化可实时反映到 Agent 谈判参数中。

## 1.2 调度算法研究现状

### 1.2.1 问题概述

如前所述，生产调度就是将稀缺资源在时间上分配给作业（加工任务），从而实现一个或多个目标的优化；它是生产过程的作业计划，例如工件在机器上的加工顺序、生产批量的划分等。

从不同的角度可以对调度做出不同的分类。最常见的分类标准有两种：调度特征参数和对调度时间性的要求。

#### 1. 非实时调度

非实时调度又称静态调度，调度方案确定时所有作业的时间参数都是已知的，包括各作业的到达时间、加工时长、交货期等。所有作业和机器的组合构成一个确定型系统。静态调度在任务运行之前完成调度方案，系统实际运行时根据该方案来决定下一时刻如何选择加工对象。此类调度适合于问题需求确定，在运行过

程中不出现较多变化的情况。静态调度的优点是运行开销小，系统可预测性强，可获得很高的优化效果。但它灵活性较差，不适合复杂多变的环境。

## 2. 实时调度

与非实时调度相反，实时调度必须在系统运行中进行调度，系统不能因等待调度决策而暂停，因此调度必须快速，确切地说必须“实时”。调度实时性的要求来自于系统的实时性，即系统对外部事件的及时响应至关重要，系统操作的准确性不仅取决于输出结果的逻辑正确性，还取决于结果的产生时间。如果结果的产生时间不符合应用的时间需求，该结果可能毫无用处，甚至是灾难性的。

实时调度也称为动态调度。调度环境中作业特征从未知到已知的过程称为“到达”，作业的到达时间是调度环境中最常见的动态因素，作业到达的随机性是对实时调度最重要的挑战。

实时调度环境同时还包括了其他环境因素的动态性，例如机器的随机故障。学术界研究的实时环境林林总总，对实时性（从事件发生到事件被处理之间的时间要求，也就是反应速度）有不同的要求，例如自动化设备的实时性要求就远远高于机场调度。与其他实时系统比较而言，生产调度系统对实时性的要求不高（软实时系统），实时调度的主要考虑方向在于面对动态变化的环境制定合适的加工策略以保证系统运行的稳定性，同时尽可能实现系统整体目标的优化。

一般的实时调度并不考虑除作业到达时间外其他参数的动态变化问题。在更深刻的随机型作业环境中，作业的各种参数如作业加工时间、交货期等皆为随机变量；多数文献对于这种作业环境的研究还停留在纯理论的、简单化的研究，例如只研究单机随机调度问题，并且假设某些作业参数满足某种随机分布等。在实际生产环境中，这种随机性虽然存在（例如原材料质量不稳定、工人操作速度不稳定等导致的随机性），但可通过少量放宽调度精度来承受。

### 1.2.2 研究现状及发展趋势

调度在制造业中受到重视始于20世纪初 Henry Gantt 及其他研究者所做的工作。不过直到20世纪50年代才有这方面的文献发表<sup>[1][2]</sup>。目前关于调度问题的文献已难以计数，其中具重大意义的有 Muth 和 Thompson<sup>[3]</sup>提出的包括 MT10 在内的一系列著名算例；Conway、Maxwell 和 Miller 有关调度的研究<sup>[4]</sup>被普遍认为是调度理论研究的开始；关注调度复杂性问题的研究，Miller<sup>[5]</sup>提出了用于研究算法有效性和问题难度的计算复杂度理论。此外，Baker<sup>[6]</sup>、French<sup>[7]</sup>、Rinnooy<sup>[8]</sup>、Coffman<sup>[9]</sup>、Blazewicz<sup>[10]</sup>对调度问题进行了总结和探讨；Giffler 和 Thompson<sup>[11]</sup>提

出了活动调度 (active schedule) 的概念和获得活动调度的方法; Balas<sup>[12]</sup> 提出了通过析取图进行调度的方法; McMahon 和 Florian<sup>[13]</sup> 提出了针对最小化最大延迟优化目标的算法; Barker 和 McMahon<sup>[14]</sup> 对通用作业车间调度问题 (job-shop scheduling problem, JSP) 问题进行了详细讨论; Carlier 和 Pinson<sup>[15]</sup> 提出了严谨的针对调度问题的移动瓶颈算法; Blazewicz 发表了第一篇关于单机、平行机、作业车间的调度问题及其复杂度分类的综述性文献<sup>[16]</sup>, 文中提出的公式为评估较难调度问题的可解性奠定了坚实的基础。

学术界对调度算法的研究非常广泛, 并且随着时代的发展日新月异。解决调度问题的方法主要如下<sup>[17][18]</sup>:

- (1) 确定性最优化方法 (运筹学方法)。
- (2) 基于启发式规则的调度方法。
- (3) 基于知识的调度方法。用专家系统自动产生调度或辅助人调度。它是将传统的调度方法与基于知识的调度评价相结合的方法。
- (4) 仿真调度方法。通过对仿真模型的运行收集数据, 对实际系统进行性能、状态方面的分析, 从而对系统采用合适的控制调度方法。
- (5) 基于 DEDS 的解析模型方法。制造系统是一类典型的离散事件动态系统 (DEDS), 可以用研究 DEDS 的解析模型和方法探讨车间调度问题, 诸如排队论、Petri 网等。
- (6) 启发式图搜索法。将调度问题以图表示, 最常用的是析取图 (disjunctive graph)。图搜索算法中最常用的是 A\* 算法。
- (7) 基于局部搜索的非数值算法, 包括模拟退火法、禁忌搜索法、遗传算法、蚁群算法、粒子群算法、免疫算法、文化算法等。
- (8) 人工智能方法, 包括专家系统、神经网络、多 Agent 系统方法及其他。
- (9) 控制论方法。
- (10) 其他方法以及上述方法的组合。

限于篇幅, 下面只讨论与本书相关的第 1、第 2、第 7、第 8 种方法。

运筹学方法中, 在调度理论的建模和测试上扮演了重要角色的是数学规划法。数学规划方法的优点是任务分配和排序的全局性较好, 所有选择同时进行, 可保证求解凸和非凸问题的全局优化; 生产调度中广泛采用的是混合整数线性规划和混合整数非线性规划方法。由于数学规划法是精确求解方法, 参数的细微变化会严重影响算法的精度, 因此不适合复杂多变的调度环境。不过数学规划法的思想可以通过与其他算法结合发挥作用, 例如 Reklaitis<sup>[19]</sup> 提出了一种将仿真与数学规

划法相结合的调度算法。分支定界法是传统运筹学理论在调度优化问题上的利器之一，与此有关的文献有 Brah 和 Hunsucker<sup>[20]</sup>，Shaukat 和 Hunsucker<sup>[21]</sup> 和 Lee<sup>[22]</sup> 等所发表的研究。由于分支定界法在计算时间上相对问题规模的指数级增长影响了它的应用，Lee 还针对特定问题的具体特性提出了可以提高计算效率的局部规则。分支定界法的效率同时还依赖于下界的强度，Santos<sup>[23]</sup> 提出了一种用于流水车间多处理器调度最小化完工时间（makespan）问题的全局下界的计算方法。用于解决调度复杂性问题的运筹学方法还包括拉格朗日松弛技术（LR），它的基本特征是将一个大问题分解为若干个更易解决的子问题。参考文献 [24] 应用 LR 解决了相同平行机的调度问题，参考文献 [25] 应用 LR 解决了平行机单分支优先级约束问题。一般意义上优先约束总是使得调度问题复杂化<sup>[26]</sup>，Hoitomt<sup>[27]</sup> 将 LR 应用到一个 JSP 中，通过松弛机器容量约束和工件优先约束来获得最优解。

基于优先规则的调度是生产实践中使用率最高的调度方法。优先规则一般被分为三类：简单规则、复合规则、启发式规则。简单规则如先到先服务（FCFS）、最早交货期优先（EDD）等可以迅速获得可行解，但优化效果差；使用复合规则可以提高解的质量；启发式规则与具体问题密切相关，可以在合理的时间内获得满意解。

随机搜索算法中，被大量用于解决调度问题的常见算法包括遗传算法<sup>[28]</sup>、模拟退火算法<sup>[29][30]</sup> 以及禁忌搜索算法<sup>[31][32]</sup>。参考文献 [29] 提出了基于模拟退火的算法解决 JSP，将寻找最小化的过程建模成一个析取图，图中各作业工序间具有先后约束；寻找最优解等同于在图中寻找一条起点到终点的最短路径。文中还证明模拟退火算法渐近收敛于全局最小解。这种较慢的收敛速度限制了模拟退火算法的应用。不过参考文献 [30] 关于模拟退火算法（simulated annealing algorithm, SA）收敛性的分析结果显示这并不对 SA 在解决 JSP 上的应用造成限制，该参考文献将 SA 方法与遗传算法（genetic algorithm, GA）结合起来，使用一个新颖的面向时间的交叉算子将每一代 SA 的解进行交叉，从而避免了不对称邻域对收敛性造成的破坏。参考文献 [28] 将分支定界法与 GA 相结合，解决多步流水车间并行机调度问题。文中遗传算法被用来在搜索过程中改进上界，实验表明两种算法的结合可以比单纯分支定界法更快地获得最优解。参考文献 [31] 提出了一个基于禁忌搜索的算法解决并行机流水车间（FSPM）调度问题，其邻域的定义基于作业连接图中关键路径的概念构造；禁忌搜索的应用显著地改善了局部搜索，加快了算法的速度。目前解决 JSP 最有效的算法依然是以复杂的分支定界搜索策略为代表的启发式算法与遗传算法的结合为主，相关综述有参考文献 [33] [34] 和

[35] 等。近几年上述几种算法的相互融合或与其他算法的融合成为主流研究方向,如参考文献 [36] 使用并行混和遗传算法,将种群分成若干个子种群分别进行遗传操作;每个子种群除了进行交叉和变异外,还在最后进行模拟退火的局部搜索;子种群的优先解将参与另一种群的交叉操作。参考文献 [37] 把简单遗传算法 (SGA) 和模拟退火算法 (SA) 有机结合解决动态车间调动问题。参考文献 [38] 将遗传算法与禁忌搜索算法 (TS) 相结合,先用 GA 进行全局搜索,再用 TS 算法进行局部搜索,改善群体质量。参考文献 [39] 将病毒进化思想与遗传算法相结合,提出病毒进化遗传算法 (virus evolution genetic algorithm, VEGA),通过病毒感染操作提高了局部搜索能力,同时利用病毒学习机制缩小了搜索空间,加快算法收敛性能和收敛速度。参考文献 [40] 提出与蚁群搜索相结合的遗传算法,算法首先通过各种群的独自遗传进化,较快地产生出较优个体,然后根据各种群的最优个体设定初始信息素,大大缩短信息素的积累过程。参考文献 [41] 将粒子群与模拟退火算法相结合,分别提出四种算法:粒子群-模拟退火算法、改进粒子群算法、粒子群和模拟退火交替算法、粒子群和模拟退火协同算法。不同的算法在质量、鲁棒性、搜索能力上分别有较大提高。参考文献 [42] 提出混和 Petri 网、遗传算法和模拟退火算法的综合算法,针对作业车间 (job-shop) 调度问题,建立了带有控制器的 Petri 网模型,利用图的广度优先遍历与 GASA 结合而得到的调度算法。参考文献 [43] 使用遗传算法和禁忌搜索算法结合的算法解决车间流控制系统中的双资源调度问题。

免疫算法也被用在调度领域,参考文献 [44] 提出了解决多目标无等待流水车间调动问题的免疫算法模型,模型使用了免疫系统和细菌优化有关理论,在解决大规模问题时能够获得帕累托近似最优解。参考文献 [45] 提出了一个解决多目标调度问题的进化免疫算法,结合了进化算法的全局搜索能力和人工免疫系统的免疫学习能力。文章采用克隆选择的方法保持算法在搜索和开发上的平衡,采用基于信息熵的浓度保留机制来保持种群的多样性。参考文献 [46] 提出了一种新颖的免疫否定选择算法,从种群中寻找较差解将其剔除,而不是寻找最优解;经过多次剔除之后种群中将只剩下优解。考虑到剔除劣解有可能丢失寻优信息,算法对编码每一位的等位基因采用了基于浓度控制的免疫原理来保持种群的多样性。参考文献 [47] 提出了针对柔性制造单元动态调度的免疫算法,不仅考虑了零件分批、工艺路线柔性可变、不相容指标协同优化等问题,还探讨了由于设备故障、加工任务临时变动等扰动因素引起的动态调度。实现动态调度的主要方式是引入了滚动-扰动混合再调度策略,如果调度系统一直没有出现扰动,则周期

性地滚动再调度；如果出现扰动（如设备故障），则立即进行一次再调度，被中断的作业可安排到其他设备上继续加工。参考文献 [48] 将免疫计算和改进的遗传算法（预防近亲结合的多重交叉策略）相结合，通过接种疫苗提高抗体的适应度，通过免疫选择防止种群的退化。针对作业车间调度问题，设计了免疫遗传计算中疫苗的提取和接种方法，即基于加工机器的基因片断抽取疫苗方法和接种方法。还采用了预防近亲结合的多重交叉策略，只有经检测在以前几代中没有共同祖先的个体才允许交叉。参考文献 [49] 中染色体采用双倍体编码以提供记忆以前有用基因块的机制，算法中还引入显性免疫算子和显隐性重排算子以延长有用基因块的生命周期和保持种群的多样性。

文化算法作为一种较新的理论，文献相对较少。参考文献 [50] 在遗传算法的种群进化层上引入文化算法的信度空间，提出一种具有知识引导功能的分层遗传算法；通过信度空间实现进化信息的有效提取和管理，并利用进化信息指导种群空间的进化过程，从而提高进化效率。

除了上面讨论的算法外，还有其他用于调度的非数值算法，包括蚁群算法<sup>[51][52]</sup>、粒子群算法<sup>[53][54]</sup>、混沌搜索<sup>[55][56]</sup>等。

专家系统和神经网络也用于解决调度问题<sup>[57]</sup>。专家系统在 20 世纪 80 年代早期和中期非常流行，它在调度方面也有应用，例如参考文献 [57] 提出了一种单元控制系统，它使用了一个基于规则的专家系统和一个黑板模型（包含多个子黑板，其中 4 个子黑板分别完成调度、加工分配、监控和事故处理功能）。专家系统的优点在于调度规则可以很复杂，可以使用定性的知识，因此调度效果常常能非常接近人工调度，但由于其结构复杂，系统的建造需要技巧；系统的通用性差，很难维护和升级。另外专家系统的优化效果差，所得方案有时严重偏离最优解。基于这些缺陷以及专家系统理论本身还有待进一步的发展，它在调度方面的应用没有成为主流。另一种常见的研究方向是神经网络，有调度应用价值的神经网络类型主要有三种：① Hopfield 神经网络（Hopfield 和 Tank<sup>[59]</sup>、Gulati 和 Lyengar<sup>[60]</sup>，Arizono<sup>[61]</sup>，Vaithyanathan 和 Ignizio<sup>[62]</sup>，Johnston 和 Adorf<sup>[63]</sup>）；② 竞争网络（Fang 和 Li<sup>[64]</sup>，Pellerin 和 Herault<sup>[65]</sup>，Min<sup>[66]</sup>）；③ 反向传播神经网络（Chryssoulouris<sup>[67]</sup>，Sabuncuoglu 和 Hommertzhaim<sup>[68]</sup>，Hayes 和 Sayegh<sup>[69]</sup>，Rabelo 和 Camarinha<sup>[70]</sup>，Yih 和 Liang<sup>[71]</sup>）。大多数人工神经网络（artificial neural networks, ANNs）的调度应用是基于 Hopfield 神经网络的。虽然模拟神经网络的调度应用显示出了美好的前景，在处理大规模调度问题时 ANNs 消耗的过多计算时间仍然成为其发展的主要障碍；一个值得研究的方向是将 ANNs 与随机搜索算

法结合起来,例如与模拟退火算法相结合,因为SA可以在最优化过程中帮助避免陷入局部最优。将Hopfield网络与拉格朗日松弛算法结合也显示出了对解的改善作用,参考文献[72]显示了拉格朗日松弛神经网络对可分离凸规划的收敛性。参考文献[73]提出了一个混合整数拉格朗日松弛神经网络,用于解决作业车间最小化加权提前/拖期总和调度问题。该问题被拉格朗日松弛法分解为若干多项式子问题,这些子问题动态规划法可解。仿真实验显示该方法可获得近似最优解。

基于多Agent系统的调度是一种新颖的、分布式的调度体系,相关文献综述见下节。

总结调度理论几十年的发展发现,静态调度研究较多,动态调度研究较少;集中式调度研究较多,分布式调度研究较少;理论研究较多,实用研究较少。今后调度问题的研究将主要向三个方向发展。

#### (1) 大规模调度问题成为主要研究对象。

随着调度理论的逐渐成熟,小规模调度问题被基本解决,动辄几百作业的大规模问题进入研究者的视野。由于多数调度问题具有NP特性,随着问题规模的扩大,计算量急剧增加,原有适应小规模问题的算法很难在可接受时间内输出满意解。大规模问题对算法的效率提出了严峻的挑战,因此采用并发或分布式计算方式的算法将成为主流。

#### (2) 调度的目标偏移。

由于市场开放对全球竞争力提升的需求,调度的重点逐渐从方案的最优化转向调度的柔性和敏捷性<sup>[74]</sup>。与此相对应,强调实时性和快速反应的动态调度逐渐成为研究热点,敏捷调度和多目标调度也越来越被学术界关注。基于人工智能的方法具有其他方法没有的灵活性优势,是很有前途的发展方向。

#### (3) 与其他系统的结合。

调度系统与其他系统的结合是调度理论的发展趋势,也是调度实用化的重要标志。虽然调度系统可以作为单独的系统而存在,与其他系统的结合将更好地发挥其对整体的促进作用。最常见的结合方式是调度作为一个模块嵌入到制造执行系统(MES)中,与其他模块(如设备管理、人力资源管理、质量管理、产品跟踪及谱系管理、绩效分析等)形成密不可分的整体。

### 1.2.3 多Agent系统(MAS)及基于MAS的调度研究现状与发展趋势

Agent的概念见于计算机和分布式人工智能的众多领域,软件Agent的概念最早可追溯到参考文献[75]。基于Agent的技术在很多行业都取得了令人瞩目的成