

Intelligent manufacturing critical enabling technology

Modeling technology, reconfiguration method and
optimization theory of dynamic HOLONIC
manufacturing system

智能制造 关键使能技术

动态HOLONIC制造系统建模技术、
重构方法及优化理论

赵付青 宋厚彬◎著

智能制造关键使能技术

——动态 HOLONIC 制造系统建模技术、
重构方法及优化理论

赵付青 宋厚彬 著

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书通过引入 Holonic Manufacturing Systems (HMS) 制造哲理的概念, 对基于 Holonic 制造系统的制造单元交互机制、控制策略和算法、系统设计方法以及关键使能技术进行研究; 提炼形成了 HMS 系统中 Holon 内部资源与任务的动态调度方法, 系统阐述了 HMS 制造系统建模及调度的有关原理及其应用。全书共分为 7 章, 第 1 章介绍 HMS 调度系统及研究现状; 第 2 章重点讨论了动态 Holonic 制造系统建模及重构方法; 第 3 章讨论了混合流水车间调度模型及其仿真计算方法; 第 4、5 章分别就 HMS 系统中典型 Job Shop 调度问题求解方法和置换 Flow Shop 调度算法进行研究; 第 6 章对上述模型及实现技术进行了验证; 第 7 章为结论。

本书可作为高等学校自动化、机电工程、制造业信息化、计算机及其他相关专业研究生和本科高年级系统工程或制造系统建模的课程教材, 还可供从事制造系统建模方面的科技工作者参考。

未经许可, 不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。
版权所有, 侵权必究。

图书在版编目 (CIP) 数据

智能制造关键使能技术: 动态 HOLONIC 制造系统建模技术、重构方法及优化理论 / 赵付青, 宋厚彬著. —北京: 电子工业出版社, 2017.9

ISBN 978-7-121-32785-8

I. ①智… II. ①赵… ②宋… III. ①智能制造系统—研究 IV. ①TH166

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 238282 号

责任编辑: 杨秋奎 特约编辑: 刘广钦

印 刷: 三河市双峰印刷装订有限公司

装 订: 三河市双峰印刷装订有限公司

出版发行: 电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本: 720×1 000 1/16 印张: 10.25 字数: 162 千字

版 次: 2017 年 9 月第 1 版

印 次: 2017 年 9 月第 1 次印刷

定 价: 45.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题, 请向购买书店调换。若书店售缺, 请与本社发行部联系, 联系及邮购电话: (010) 88254888, 88258888。

质量投诉请发邮件至 zltz@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

本书咨询联系方式: (010) 88254694。

致 谢



本书的相关研究得到了国家自然科学基金项目（批准号：No. 61663023, No.61064011）、甘肃省科技重点研发计划（国际科技合作类）（17YF1WA160）、陇原青年人才扶持计划（LYQN2013003）、兰州市科技计划项目（2013-4-64）、中国博士后特别资助项目（批准号：No. 2013T60889）、中国博士后基金面上项目（2012M521802）、甘肃省留学回国人员项目等的支持。

衷心感谢作者单位兰州理工大学计算机与通信学院同事们的大力支持，才使本人有更多精力投入到博士后研究工作中。

感谢同课题组的杨亚红、何继爱、姚毓凯、丁凡、唐建新、张建林、霍明明等的帮助，感谢几位素未谋面的审稿专家，在若干次文章修改中，本人对所研究的问题和方法又有了新的思路。

还有许多曾经关心过我的同学、师长、亲人、朋友，在此无法一一列出，谨真诚地感谢和祝福他们。

前 言



Holonic 制造单元的调度策略及实现方法是制造系统调度性能和系统稳定性等方面最重要的基础问题之一,但由于调度计算的复杂性和对干扰的鲁棒性差等原因,高性能调度方法很少被应用于实际生产中。本书拟引入 Holonic Manufacturing Systems (HMS) 制造哲理的概念,对基于 Holonic 制造系统的制造单元的重构机制及调度单元典型问题进行研究;重点实现 HMS 系统中调度单元与任务的动态调度方法,以及算法求解效率的定量分析;对制造单元中 JSP (Job Shop Problem)、FSP (Flow Shop Problem) 和混合系统问题进行了深入分析,提出了确定性演化算法求解这类问题的算法框架。本书的主要内容和贡献如下:

(1) 通过企业业务流程及 HMS 系统的深入分析和研究,提出了动态 Holonic 制造系统 (Dynamic Holonic Manufacturing System, DHMS) 重构模型及其实现方法,该模型从整个制造系统价值链,以及企业级运作的对象、过程、资源、信息等方面进行建模,为 Holon 体系开发了新的应用领域,将 Holonic 制造的研究提升到了一个新的高度;同时也拓展了企业业务流程的范畴,使企业间业务的战略考虑与具体的操作层实施结合起来。在基于 PSORA 参考模型的基础上确定了 DHMS 中 Holon 的种类:虚拟企业 Holon、成员企业 Holon、产品 Holon (PH)、任务 Holon (TH)、运行 Holon (OH) 及在线监控 Holon (SH),并对其重构及实现技术进行了定义。

(2) 提出了基于排队论的混合流水车间调度模型,将串行与并行排队系统相结合,对其调度规则进行形式化描述,证明了系统的稳定性,并对系统达到稳态工作状态的各目标参量所需条件及其概率特性进行了分析。以最小化工件等待时间为目标函数,通过上述方法对系统模型进行仿真计算,验证了该方法对混合流

水车间调度问题是有效的。同时研究了可修排队系统,用概率母函数法对可修排队系统达到稳态工作状态的各目标参量所需条件及其概率特性进行了分析。最后通过数值运算验证了该方法用于这类车间调度问题的分析是有效的。

(3) 对 JSP 问题进行深入分析,以求解 JSP 中工件的最小、最大完成时间为目标,通过序列映射方式将连续定义域空间中的变量映射到离散的组合优化问题空间中,采用基于工序编码的方式进行编码,使用顺序插入解码机制对其解码。将改进的 SCE 算法用于求解经典 Job Shop 调度问题,并将结果与基本 SCE 算法进行比较。结果表明,改进的 SCE 算法在解决 Job Shop 调度问题上相比基本 SCE 算法更加有效。

(4) 研究了典型置换 Flow Shop 调度问题,以求解工件的最小、最大完成时间为目标,通过 LOV 机制将连续定义域空间中的变量映射到离散的组合优化问题空间中,对工件变量采用基于实数的编码方式编码。将 SCE 算法用于求解 29 个典型置换 Flow Shop 调度问题,并将其与已有的智能优化算法 PSO、DE、GA、NEH 等进行比较,结果表明, SCE 算法在求解该类调度问题上的整体性能要高于其他智能算法,验证了 SCE 算法在置换 Flow Shop 调度问题中的有效性。

(5) 对 HMS 系统预测调度问题进行了研究,针对预测调度模型的动态特性,引入数理统计预测方法来构建预测模型,利用 Scatter Search (SS) 算法对预测模型中的 3 个参数求最优解,优化的参数可以帮助预测模型得到精确的预测结果,预测结果可以提高预测调度的精确性。

本书通过较深入的建模研究、算法设计、分析计算及仿真系统的开发,取得了一些很有价值的结论。

本书是作者在近年来研究工作的基础上撰写完成的,特别是在西安交通大学系统工程研究所、西北工业大学航空宇航科学与技术进行博士后研究工作的经历,提高了作者对这一领域深入的理解,特别感谢西安交通大学的邹建华教授、西北工业大学的王俊彪教授的指导和鼓励。衷心感谢作者单位兰州理工大学计算机与通信学院同事们的大力支持,使本人有更多精力投入科学研究工作中,才使这些不很成熟的见解得以面世。

由于时间仓促,加之作者水平有限,本书难免会有错误和不足,敬请读者不吝指正。

著者

2017年7月

反侵权盗版声明

电子工业出版社依法对本作品享有专有出版权。任何未经权利人书面许可，复制、销售或通过信息网络传播本作品的行为；歪曲、篡改、剽窃本作品的行为，均违反《中华人民共和国著作权法》，其行为人应承担相应的民事责任和行政责任，构成犯罪的，将被依法追究刑事责任。

为了维护市场秩序，保护权利人的合法权益，我社将依法查处和打击侵权盗版的单位和个人。欢迎社会各界人士积极举报侵权盗版行为，本社将奖励举报有功人员，并保证举报人的信息不被泄露。

举报电话：(010) 88254396；(010) 88258888

传 真：(010) 88254397

E-mail: dbqq@phei.com.cn

通信地址：北京市万寿路 173 信箱

电子工业出版社总编办公室

邮 编：100036

目 录



第 1 章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 HMS 研究现状	4
1.3 HMS 调度系统	6
1.4 课题研究意义	8
1.4.1 问题的提出	8
1.4.2 研究内容	9
1.4.3 研究意义	11
1.5 拟解决的关键科学问题与方法	12
1.5.1 关键科学问题	12
1.5.2 研究方案	13
1.5.3 可行性分析	17
第 2 章 动态 Holonic 制造系统建模及重构方法	19
2.1 基于 DHMS 参考模型的车间内部工作流程建模技术	19
2.1.1 产品 Holon (PH)	21
2.1.2 任务 Holon (TH)	21
2.1.3 运行 Holon (OH)	22
2.1.4 在线监控 Holon (SH)	23
2.2 Holon 之间的交互	24

2.2.1	企业全局的多 Holon 系统交互	24
2.2.2	成员企业局部的多 Holon 系统交互	25
2.3	Holonic 制造系统参考体系结构研究	26
2.3.1	Holonic 制造系统的参考体系结构	26
2.3.2	Holonic 制造系统的控制策略	29
2.4	DHVE 参考模型的映射	33
2.4.1	物理层	34
2.4.2	实现层	35
2.4.3	应用层	37
2.5	基本 Holon 的建模	38
2.5.1	基本 Holon 的结构及工作原理	39
2.5.2	基于 Agent 的基本 Holon 模型	40
2.6	DHMS 系统的分布式决策过程及实现研究	46
2.6.1	DHMS 系统中任务的分布式决策过程	47
2.6.2	订单/任务单元模型	47
2.6.3	单元 Holon 向 DHMS 系统的映射	50
2.6.4	Holon/Agent 协调算法	53
2.6.5	递阶式的投标和重配置	58
2.7	重构选项的识别、模拟及评估	64
2.7.1	通用配置的识别	64
2.7.2	离散事件的模拟及评估	66
2.7.3	系统层次结构	67
2.8	车间调度系统的实现	68
2.9	小结	72
第 3 章	混合流水车间调度模型及其仿真计算方法	74
3.1	并行机调度模型	76
3.1.1	基本定义	76
3.1.2	模型描述	77
3.1.3	模型假设条件	78

3.2	模型稳定性证明	78
3.3	带缓冲区的混合流水车间模型及其性能分析	81
3.3.1	带有多个缓冲区的单级并行加工系统	81
3.3.2	带有一个缓冲区的单级并行加工系统	82
3.3.3	数值分析	84
3.3.4	模型性能分析	84
3.3.5	实验仿真与结果分析	88
3.4	可修混合排队调度模型及其性能分析	91
3.4.1	混合排队调度模型	91
3.4.2	数值模拟及分析	96
3.5	小结	99
第 4 章	典型 Job Shop 调度问题求解方法	100
4.1	Job Shop 调度问题	101
4.1.1	问题描述	101
4.1.2	Job Shop 调度数学模型	101
4.2	JSP 问题求解算法	102
4.2.1	SCE 算法	102
4.2.2	改进的 SCE 算法	105
4.2.3	马尔可夫模型及收敛性分析	107
4.2.4	实验仿真与结果分析	110
4.3	基于改进 SCE 算法的 Job Shop 调度问题	113
4.3.1	编码机制	113
4.3.2	解码机制	114
4.3.3	适应度函数	115
4.3.4	SCE 算法参数分析	115
4.3.5	基于改进 SCE 算法的 Job Shop 调度算法	116
4.4	算法复杂度分析	117
4.5	实验仿真与结果分析	118
4.6	小结	121

第 5 章 置换 Flow Shop 调度算法	122
5.1 置换 Flow Shop 调度问题	122
5.1.1 问题描述	122
5.1.2 数学模型	123
5.2 基于 SCE 算法的置换 Flow Shop 调度算法	123
5.2.1 编码策略	123
5.2.2 映射策略	124
5.2.3 适应度函数	124
5.2.4 算法复杂度分析	125
5.3 实验仿真与结果分析	125
5.4 小结	130
第 6 章 动态预测调度模型求解方法	131
6.1 预测调度模型	131
6.2 预测调度方法	132
6.3 预测模型和 Scatter Search 算法	132
6.3.1 预测模型	132
6.3.2 Scatter Search 算法	133
6.4 实验仿真与结果分析	138
6.4.1 实验相关参数	138
6.4.2 预测结果	139
6.5 小结	140
第 7 章 结论	141
7.1 研究总结	141
7.2 研究展望	143
参考文献	144
附录 A 发表的学术论文目录	152

第 1 章

绪 论



1.1 引言

先进制造技术（Advanced Manufacturing Technology, AMT）是一个国家繁荣昌盛的核心基础技术之一，是直接创造社会财富的重要手段，是一个国家经济发展的主要技术支撑。21 世纪制造业仍将在国民经济的发展中占有重要的战略地位与作用，是国民经济的基础，其发展水平在很大程度上体现了一个国家的综合实力。

在研究历史上，CAX、FMS 和 CIMS 等制造技术的重点是通过信息技术提高系统的自动化水平，并通过系统集成提高系统的运行效率，降低运行成本。它们都注重对系统功能构成和静态控制结构的研究，适于某种可预测的、相对稳定的经营环境，随着制造环境由静态向动态转变，制造业需要不断更新产品设计，不断改变经营过程和重构制造系统。从系统论的观点出发，虽然可通过协调与控制来减少各种扰动对系统性能的影响；但由于建立在传统组织理论与运筹学基础上的生产计划和调度控制方法，都以系统具有稳定的运行环境为前提，因此，它们在理论上和实践上都面临

着巨大的挑战。

制造单元的性能对企业快速响应市场变化及提高核心竞争力起着至关重要的作用，而现有的制造单元控制系统尚缺乏实时动态重构能力，难以在动态变化的市场环境或异常生产扰动条件下进行实时配置、构型调整及调度。

与传统制造系统的构型（指一定时期内系统的状态，表现为厂房内的机床等设备类型、数量和布局等）在规划设计后相对固定不同，以模块化和可转换性为重要特征的 HMS（Holonc Manufacturing System）可通过重构改变其构型，以准确地提供各生产周期所需的功能和产能。因而，对 HMS 运行控制而言，除传统的生产调度外，还需确定生产周期内的系统构型（构型选择）。在实际生产中经常发生不可预知的动态事件，如设备故障、订单变化、急件插入等。为响应动态事件，HMS 不仅可对原调度进行调整，而且还可对 HMS 的构型进行调整。由于生产调度和构型选择紧密关联且相互耦合，为提高系统运行效率，对处于动态环境中的 HMS 必然要将动态调度和构型选择进行整体考虑。现有研究表明制造系统调度和构型选择分别为 NP-完全和 NP-难的组合优化问题，因而集成优化问题将更加复杂。由于 HMS 动态调度和构型选择集成优化问题的复杂性，目前尚缺少有效的求解方法，但不解决 HMS 中动态重构和调度控制这个关键问题，HMS 的自适应重构能力就无法真正得到应用。

HMS 是国际智能制造系统(IMS)研究六个项目的第五项，称为“Holonc 制造系统：自治的模块化系统元件及其分布式控制（Holonc Manufacturing Systems: System Components of Autonomous Modules and Their Distributed Control）”，是针对未来制造系统的要求和现有制造系统的缺陷而提出的体系结构。HMS 具有分布式的系统结构和决策职责，通过制造 Holon 间的协调来实现系统重构和优化，是适于敏捷制造环境的制造模式。Holonc 制造系统涉及制造 Holon 的定义、Holonc 系统体系结构、Holon 间的协调机制、Holonc 制造调度、调度执行及系统执行效率等问题。

HMS 通过生产单元及构型的重组来快速响应市场环境及生产过程中的

实时数据,借助构型的变化,快捷地实现同一产品族中系列产品的加工。在动态多变、多品种、变需求环境下,“何时重构”“如何重构”“重构与调度的关系”构成了基于移动机器人物流的 HMS 运转的核心问题。最核心的问题和难点是如何通过调度实现非线性重构。HMS 将尽可能在同一时间段允许多条生产线并发作业,这些并发的生产线构成了一个 HMS 系统级构型,系统级构型间的重构成为基于生产线的非线性重构问题的核心技术。本书拟采用制造单元构建、重构与运行集成优化的思路,消除由于规划与执行两阶段分开而导致的 HMS 系统无法适应动态生产环境持续重构的问题,以此来提高制造系统响应动态变化市场的能力。

Holonic 制造控制系统通过协调从原材料到产品转换过程中的所有制造活动,来满足各种制造约束前提下的优化系统性能,包括生产规划、调度、加工路径选择和资源分配等。而来自制造系统内外环境中对制造系统的运行性能产生直接或间接影响的各种扰动和事件,如紧急订单、机床故障、加工时间变化或工艺信息更改等,均会给制造系统带来各种不确定性;因此,制造重构和调度是制造系统稳定运行的前提,高效实用的调度方法和控制策略是先进制造技术的基础和关键。

针对当前关于 HMS 可重构制造生产模式存在的一些认识误区和研究盲点,可进行系统研究来澄清和规范,建立面向制造层次的 HMS 生产模式运行机制。将动态调度思想引入制造系统规划过程中,形成制造系统规划、控制与调度集成优化的技术思路,是本书研究的重点和难点,也是迫切需要展开和突破的研究内容。

通过对相关的制造系统重构和调度理论及方法进行全面和深入的研究,以此来指导对现有制造设备采用 PLC 和新型数控技术等,进行低成本、自动化改造,改变企业现有的组织和控制结构;通过合理有效地组织、管理和使用现有制造资源,在一体化的全球市场经济竞争中增强我国企业的适应性、开放性、自组织和创新能力,实现制造系统的整体优化,以使用较少的投资获取较高的效益。

1.2 HMS 研究现状

世界上较早开展 Holonic 制造系统的研究始于国际智能制造系统 IMS 研究六个项目的第五项,称为“Holonic 制造系统:自治的模块化系统元件及其分布式控制 (Holonic Manufacturing Systems: System Components of Autonomous Modules and Their Distributed Control)”,包括以下研究内容:

- (1) 21 世纪的用户需求。
- (2) 下一代制造系统的关键因素。
- (3) 测试平台。
- (4) 测试台基准。

主要涵盖 Holonic 加工系统、Holonic 装配站、系统优化、AGV 任务控制、钢冷轧机控制 Holon 五个项目。这些项目对 Holonic 制造和传统制造系统的性能,从概念到原型系统都进行了比较。

当前的 Holonic 制造研究主要是针对 Holon 体系结构、Holon 之间的协作、Holonic 控制系统的研究。比利时的 Van Brussel 教授和 Jo Wyns 等人提出了 PROSA 参考体系结构,将制造系统归纳为三方面的内容:资源、产品及工艺信息、订单,并建立了相应的 Holon。Holon 之间的协作主要有基于合同网的分布式求解策略和基于拉格朗日松弛法的近似全局最优方法;在控制系统方面有 Gilad Langer 提出的基于 PROSA 参考体系结构的 HoMuCS (Holonic Multi-cell Control System) 通用控制结构,采用统一建模语言 UML (Unified Modeling Language) 定义 Holon 的功能模型和交互方法;Leitao P. 提出了关于 Holon 控制的基本思想及其在制造系统中的实现技术,即在分布式控制中引入了层次结构 HDC (Hierarchy in Distributed Control)、分布式决策 DDP (Distributed Decision Power)、并行的调度和调度执行 CSSE (Concurrent Scheduling and Schedule Execution)。

就实际应用而言,由于 HMS 和 CIMS 一样首先体现了一种制造哲理和

理念, 它将把新的理论、方法和技术融入到原有系统中。目前在国外 HMS 还没有真正用于实际的生产系统, 其应用尚处于探索阶段。已经建立的应用试验系统主要有 Valckenaers 等人建立的系统优化测试平台, 包括四台机器人和传输系统, 系统可以同时装配两种不同的产品; Heikkia 等人用两台工作站建立了以机器人加工单元为背景的计算机仿真系统; Tamaya 等人在 Maho 机床(MH 600C)上开发了具有 Holon 特性的机床控制器。关于 Holonic 制造系统中各基本单元之间的交互、通信, 及各单元内部的自组织、自适应机制的研究多限于理论和仿真系统的研究。

国内对于 Holonic 制造的研究始于浙江大学的唐任仲, 到目前已有十余年的研究历史。国内学者对 Holonic 制造哲理、系统参考模型、制造单元模型构造、系统优化算法等做了大量的工作。沈阳自动化所的王成恩、南京理工大学的袁红兵、南京航空航天大学的王岩等对 Holonic 制造原理和概念进行了研究。巢炎等基于 Holonic 制造系统(HMS)模型, 研究了基于 Holon 的工艺系统体系结构, 并探讨了体系结构的运行机制。赵普等对 Holonic 制造系统的模块进行分析与设计, 并对一个实际的小型柔性制造系统进行了基于 Holonic 制造参考模型的构造。陈庆新等提出了基于包含 Holonic 过程模型的开放式 Holonic 制造系统体系结构, 并对制造网格环境下多项目运行的仿真系统进行了建模、分析及评价。安蔚瑾提出了基于 Holon 思想的全过程制造执行系统的功能和结构模型, 并以某光纤生产企业为研究对象, 初步建立了可集成的全过程制造执行系统。黄雪梅等研究了基于 Agent 与 Holon 智能制造思想体系的可重构生产线制造系统实现技术。

本书作者所在课题组在国家自然科学基金的资助下, 针对 HMS 可靠性、可扩展性和适应性的要求, 提出了基于 Holon 的柔性制造车间控制体系结构, 重点研究了组件 Holon 的结构模型、数据和功能关系、信息传递模型和通信语言基本规范, 并从软件体系结构的角度出发, 运用 Petri 网对其进行了形式化描述和分析, 为基于 Holon 的体系结构设计和分析奠定了基础。其中, 课题组在 Holon 制造系统的运行机理、决策逻辑、交互机制及 Holon 控制策略等方面取得了很大的进展, 提出了动态 Holonic 制造单元基于握手机制的交互过程与实现方法, 从运行机制上实现了技术性因素与

非技术性因素的解耦。同时建立了 Holonic 制造控制系统中任务调度的数学模型，包括系统运行状态稳定和异常情况下的调度模型。这些工作为推动动态 Holonic 制造控制系统的建模与优化奠定了理论和方法基础。目前，课题组已在 Holonic 制造系统建模及实时调度策略方面做了初步的工作并发表了相关的论文。

1.3 HMS 调度系统

众所周知，实际生产中很少使用一些高性能的调度方法，主要原因为：
①调度的计算复杂，很难在线提供近优调度；②调度鲁棒性差，对干扰很敏感；如果发生干扰，很难继续执行系统所提供的调度。

Holonic 控制结构是在分布控制结构的基础上结合分层控制结构的特点而提出的新型结构方案，其目的在于使系统在具有集中控制系统的可测性、稳定性和全局优化等优势的基础上融入分布系统的鲁棒性、柔性等特点。Holonic 控制提供给模块以自治的权限，使系统对干扰具有快速响应的能力，并为制造系统提供了面临新的需求重新进行构造的能力。它同时还允许模块集成，以构成更大规模的系统。

Holonic 控制系统中的核心模块是 Holonic 资源分配模块，其功能包括资源规划功能（调度）和资源规划执行（调度执行）。目前，有关 Holonic 资源分配的研究主要侧重于具有 Holonic 特性的调度和控制算法的研究。有些学者提出了能够很好地响应干扰的混杂控制，但是其性能和可预测性较差。还有一些学者转向响应式调度的研究，由于对响应时间的限制，往往采用一些性能较差的、快速的调度算法，如基于规则的调度算法。

由于生产中存在各种干扰，导致已生成的调度很快就失效了，很难达到预期的调度性能。因此，目前大多数学者都注重响应式调度的研究。响应式调度是处理具有动态性和随机性特点调度问题的技术。环境中的所有随机因素都可以被看做干扰，如机床损坏、不可预测的加工偏差等，也包