



同济大学 1907-2017
Tongji University



同济博士论丛
TONGJI Dissertation Series

总主编 伍江 副总主编 雷星晖

谢楠 李爱平 著

基于Petri网的可重组制造系统 建模、调度及控制方法研究

Research on Modeling, Scheduling and
Controller of Reconfigurable Manufacturing
System Using Petri Nets



同济大学出版社
TONGJI UNIVERSITY PRESS



总主编 伍 江 副总主编 雷星晖

谢 楠 李爱平 著

基于Petri网的可重组制造系统 建模、调度及控制方法研究

Research on Modeling, Scheduling and
Controller of Reconfigurable Manufacturing
System Using Petri Nets

 同济大学出版社
TONGJI UNIVERSITY PRESS

内 容 提 要

本书基于系统动态建构和模块化的特点,利用 Petri 网这一形式化和图形化分析工具,提出和设计了可重组制造系统的建模、调度和控制方法,并进行了大量的数值仿真与比较研究。本书的研究成果推进和丰富了可重组制造系统关键技术的研究,对解决与之相关的制造系统问题具有一定的指导作用。本书可供相关制造业从业人员参考阅读。

图书在版编目(CIP)数据

基于 Petri 网的可重组制造系统建模、调度及控制方法研究 / 谢楠,李爱平著. —上海: 同济大学出版社,2017.5
(同济博士论丛 / 伍江总主编)
ISBN 978-7-5608-6888-2

I. ①基… II. ①谢…②李… III. ①Petri 网—系统建模②机械制造—系统建模 IV. ①TP393.19②TH16

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 082039 号

基于 Petri 网的可重组制造系统建模、调度及控制方法研究

谢楠 李爱平 著

出品人 华春荣 责任编辑 朱勇 卢元姗
责任校对 徐春莲 封面设计 陈益平

出版发行 同济大学出版社 www.tongjipress.com.cn
(地址:上海市四平路 1239 号 邮编:200092 电话:021-65985622)
经 销 全国各地新华书店
排版制作 南京展望文化发展有限公司
印 刷 浙江广育爱多印务有限公司
开 本 787 mm×1092 mm 1/16
印 张 10.75
字 数 215 000
版 次 2017 年 5 月第 1 版 2017 年 5 月第 1 次印刷
书 号 ISBN 978-7-5608-6888-2

定 价 53.00 元

本书若有印装质量问题,请向本社发行部调换 版权所有 侵权必究

前言

可重组制造系统作为可以适应多品种、变批量、多功能、快速交货和短市场寿命产品的生产模式的新型制造系统,受到了理论界和工程界的广泛关注及深入研究。由于可重组制造系统具有模块化、可集成、可定制、可变结构以及可诊断的新特点,发展与之相适应的关键使能技术成为一项重要的研究课题。建模、调度和控制作为支撑制造系统提高管理水平、优化水平以及自动化水平的关键理论与方法,其研究和应用的成果已经成为制造系统总体应用水平的一个重要标志。本书基于系统动态重构和模块化的特点,利用 Petri 网这一形式化和图形化分析工具,提出和设计了可重组制造系统的建模、调度和控制方法,并进行了大量的数值仿真与比较研究。本书的研究成果推进和丰富了可重组制造系统关键技术的研究,对解决与之相关的制造系统问题具有一定的指导作用。

本书的研究问题及所取得的主要成果归纳如下:

(1) 提出可重组制造系统的理论框架及其关键使能技术。分析了多品种、变批量的生产方式对制造系统的要求,对适应这一发展趋势的可重组制造系统定义、特性和组成进行了描述,提出可重组制造系统的



结构和设计原则,给出了可重组制造系统的理论框架,指出和详细分析实现可重组制造系统关键使能技术,并阐述如何运用这些技术实现可重组制造系统。从技术角度提出实现可重组制造系统的一个切实可行的完整体系。

(2) 提出基于扩展随机 Petri 网的可重组制造系统建模方法。为适应可重组制造系统可变结构的特点,采用自底向上建模方法,将可重组制造系统不同类型的加工资源对应于相应的扩展随机 Petri 网基本模块,采用过渡变迁合成扩展随机 Petri 网模型。该模型通过反映可重组制造基本特征的模块,可方便、有效地描述可重组制造系统的组元升级和组态调整。模型能适应任意分布的制造系统,可精确地反映生产过程。

(3) 提出基于行为表达式的可重组制造系统性能分析方法。为克服目前常用的基于 Petri 网可达图的性能分析方法存在状态空间爆炸的问题,将行为表达式的性能分析方法引入可重组制造系统的扩展随机 Petri 网模型,给出了可重组制造系统性能分析方法,该方法不必画出系统可达图就可进行系统性能分析,并直接得到系统参数之间的定量函数关系,利用该关系式可直观、简洁地得到系统性能及相应趋势图,计算仿真结果验证了该方法相对于基于传统马尔可夫理论链分析方法的优越性。

(4) 提出一种基于确定性时间 Petri 网和遗传算法的调度方法,解决可重组制造系统的生产调度问题。为描述可重组制造系统的可变结构,给出了基于确定性时间 Petri 网的基本调度模块,并建立了系统的调度模型。遗传算法采用可重组制造系统 Petri 网模型的激发序列作为染色体,选择、交叉及变异算子都是对 Petri 网元素进行操作,与问题空间无关;目标函数采用系统重组费用与提前/拖期惩罚相结合的多目标优

化。该算法在满足交货期的前提下,有效降低了系统重组费用,减少了成品/半成品的库存占用时间,提高了系统的成本经济效益。

(5) 提出一种基于 Petri 网并支持混流生产的可重组模块化逻辑控制器设计方法。针对可重组制造系统模块化结构、混流生产等特点,可重组模块化逻辑控制器包括产品决策逻辑控制器以及加工设备逻辑控制器,通过施加不同的条件变量以明确相互之间的时序关系,并给出了相应的模块连接算法。通过 Petri 网自身特性,验证了可重组模块化逻辑控制器是活性、安全和可逆的。该方法的特点为高度模块化、易于重构、支持混流、可方便地实现分布式控制。

目 录

总序

论丛前言

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 研究背景	1
1.2 制造系统发展现状	3
1.2.1 生产模式的变迁	3
1.2.2 先进制造系统	4
1.2.3 可重组制造系统与其他制造系统的比较	5
1.3 国内外研究现状	9
1.3.1 可重组制造系统的国内外研究现状	9
1.3.2 制造系统建模技术及性能分析方法的国内外 研究现状	16
1.3.3 制造系统调度方法的国内外研究现状	22
1.3.4 制造系统控制器设计方法的国内外研究现状	26
1.4 研究内容及意义	28



1.4.1	研究内容	28
1.4.2	研究意义	30
1.5	内容组织	31
1.6	本研究依托的项目	32
第 2 章	可重组制造系统理论框架及其关键技术	33
2.1	定义及特点	34
2.1.1	制造系统的可重组性	34
2.1.2	可重组制造系统的定义	36
2.1.3	可重组制造系统的特点	37
2.2	理论框架	38
2.3	关键技术	41
2.3.1	系统建模技术	42
2.3.2	车间作业调度技术	44
2.3.3	模块化控制器设计技术	45
2.3.4	布局规划与优化技术	46
2.3.5	可重组机床设计技术	47
2.3.6	可拼接物流技术	47
2.3.7	构件集成和整合技术	48
2.3.8	系统快速诊断技术	49
2.4	本章小结	50
第 3 章	可重组制造系统建模及性能分析方法	51
3.1	Petri 网在制造系统中的应用	52
3.1.1	基本 Petri 网在制造系统中的应用	52
3.1.2	随机 Petri 网在制造系统中的应用	56

3.2	基于 ESPN 的可重组制造系统建模与性能分析方法	59
3.2.1	ESPN 的定义	60
3.2.2	基于 ESPN 的可重组制造系统建模方法	61
3.2.3	基于行为表达式的可重组制造系统分析方法	66
3.3	性能分析方法的比较研究	69
3.3.1	问题描述	69
3.3.2	基于 ESPN 和行为表达式的可重组制造系统 建模及性能分析	69
3.3.3	基于 GSPN 的可重组制造系统建模及性能分析	77
3.3.4	实例计算结果比较	83
3.4	本章小结	83
 第 4 章 基于 Petri 网与 GA 的可重组制造系统调度方法		85
4.1	GA 理论与实现技术	86
4.1.1	GA 的基本流程	86
4.1.2	GA 参数与操作的设计	88
4.2	基于 Petri 网与 GA 的可重组制造系统调度方法	91
4.2.1	调度模型设计	93
4.2.2	调度算法特点	96
4.2.3	调度算法参数定义	97
4.2.4	调度算法算子设计	98
4.3	基于 DTPN—GA 的车间任务调度	103
4.3.1	问题描述及性质	103
4.3.2	调度实例模型的建立	104
4.3.3	计算结果及分析	105



4.4	本章小结	108
第 5 章	可重组制造系统的逻辑控制器设计方法	110
5.1	可重组制造系统对逻辑控制器的设计要求	111
5.2	逻辑控制器及其相关技术	112
5.2.1	逻辑控制器	112
5.2.2	逻辑控制器的 Petri 网描述	115
5.3	支持混流生产的可重组模块化逻辑控制器设计方法	117
5.3.1	变量及其作用	119
5.3.2	加工设备逻辑控制器	120
5.3.3	产品决策逻辑控制器	123
5.3.4	可重组模块化逻辑控制器的形式化分析	123
5.3.5	可重组模块化逻辑控制器的重构机制	125
5.4	支持混流生产的可重组模块化逻辑控制器实现	125
5.4.1	混流可重组生产线描述	125
5.4.2	可重组模块化逻辑控制器构建与实现	126
5.5	本章小结	131
第 6 章	总结与展望	133
6.1	全文总结	133
6.2	进一步的研究工作	135
	参考文献	137
	后记	152

第 1 章

绪 论

本章介绍本书的研究背景、国内外研究现状、主要研究内容和意义以及本书的内容安排。

1.1 研究背景

制造业是国家的经济支柱产业之一。在中国,占到全国 GDP 的 40%以上,2004 年达到 6 万亿元。^[1]2004 年全国设备制造业和电气机械器材制造业分别比上年增长了 22.2%和 17.7%。^[2]以上海为例,其制造业每年对 GDP 增长的贡献率高达 65%。^[3]优先发展先进制造业,具有重大的现实意义,提高先进制造技术水平是提高制造业核心竞争力的必然要求。

随着现代科学技术的日新月异,现代制造业正面临不可预测、快速多变和不断增强的市场竞争等一系列问题,表明在由激烈的全球化竞争、逐步提高的客户素质和创新的工艺技术直接驱动的新产品上市速度、产品零部件、客户需求、工艺技术和政策法规等多个方面的变化,反映了经济、技术和社会之间的平衡。企业只有具有快速、高效和低成本



地适应各种变化的能力,才能在新的环境中生存。^[4]因此,如何快速响应瞬息万变的市场成为业界共同思考的问题。

20 世纪 90 年代左右,计算机辅助设计(Computer aided design,简称 CAD)的广泛应用,极大地缩短了产品设计时间。另一方面,制造企业也试图通过对制造部门的资金投入,配置更多的加工设备和物流设备来减少产品生产周期并实现快速转产。如何根据市场订单快速调整制造过程,从客观上来说需要有一种由客户订单驱动,以多品种、变批量、多功能、快速交货和短市场寿命的产品等为特征的生产模式。传统制造系统显然不能适应这一形势的发展要求,需要发展一种能够通过制造资源构件调整和制造系统快速重构,适应生产系统内外部各种影响因素的变化,将多品种、变批量的生产问题全部或部分地转化为一定批量生产的新型制造系统,即可重组制造系统(Reconfigurable manufacturing system,简称 RMS)。^[5,6]

建模、调度和控制作为支撑制造系统提高管理水平、运筹水平、优化水平以及自动化水平的关键理论与方法,它们的发展将极大地提高制造系统总体应用水平。本书将进一步丰富和扩展制造系统的建模、调度及控制方法,尤其是应用于可重组制造系统的建模、调度和控制方法,因此,具有一定的理论意义。另一方面,作为先进制造技术中的重要基础理论之一,本书的研究成果将为采用多品种、变批量生产方法的企业,进行可重组生产线的技术革新和改造提供理论、技术和实践依据,并促进以个性化服务为宗旨的生产行业(如汽车、电器、机电等)中,包括准时制生产、敏捷制造、成组技术等在内的先进生产管理技术的发展,因此,具有重要的实际意义。

1.2 制造系统发展现状

1.2.1 生产模式的变迁

制造系统的生产模式总是随着制造企业竞争目标和竞争要素的变化而不断发展的。20 世纪 20 年代,以福特为代表的大规模生产成为工业界广泛采用的生产模式。大规模生产采用的刚性制造系统以流水线为特征,通过形成规模经济实现低成本。它的一个原则就是面向统一的市场标准化产品,从而形成了稳定的产能和缓慢的产品变化。20 世纪 80 年代后,世界市场发生了重大变化,经济全球化、用户需求个性化、大市场和大竞争等促使企业采用新的技术和新的管理方法。于是,一种新的生产模式——大规模定制开始浮出水面。大规模定制旨在以大规模生产的效率和成本提供个性化的定制产品。^[7]表 1—1 为大规模生产与大规模定制生产模式的对比。^[8,9]

表 1—1 大规模生产与大规模定制的对比

指 标 \ 生产模式	大 规 模 生 产	大规模定制生产
经济模式	规模经济	知识经济
关键特征	稳定的需求、统一的市场； 低成本、质量稳定、标准化产品； 产品生命周期长	个性化的需求、多元化的市场； 低成本、高质量、定制化产品； 产品生命周期短
主要生产要素	劳动力	知识
对制造系统的要求	刚性和专用性	柔性和重组性

近年来,随着用户对产品个性化定制的不断增长和市场需求的剧烈变化,企业在产品的快速设计时采用了既继承又创新的方式,因此,制造



系统的生产产品势必混合了具有较大规模的标准化产品以及符合不同客户要求的个性化产品,这样必然造成制造系统的混批、变批生产,原有大规模定制生产模式的部分特征也逐渐演变为多品种、变批量。

1.2.2 先进制造系统

由于生产模式的变更,世界各国对现代制造系统展开了广泛而深入的研究,这不仅是发展制造业本身的需要,也是各国适应全球经济发展对本国的企业进行产业结构调整的需要。^[9]任何一种制造系统的存在和发展都是为了适应生产模式的某一变化。^[10,11]由此,在制造领域相继提出了许多新思想、新概念,产生了新的制造技术和制造系统。

根据 CIRP(国际生产工程学会)近 15 年来发表的文献统计,所提出的先进制造系统的模式多达三十多种,如:柔性制造、计算机集成制造、并行工程、精益生产、敏捷制造、多智能体制造、协同制造、绿色制造、智能制造、全球制造、可重组制造等。以上各种制造系统中,有的已经研究了很多年,并有了成熟的系统,如柔性制造系统等;有的近年来展开一定规模的研究并有一些已实现的系统,如精益生产等;还有的尚处于研究之中,未形成成熟的系统,如可重组制造系统等^[9]。

其中,最具代表性的有以下几种:

- 柔性制造系统(Flexible manufacturing system,简称 FMS)

柔性制造系统基于所有可用柔性和功能构建,针对某一特定产品族实现多功能、高效能生产。FMS 以其良好的产品适应能力一经提出就在日本和欧洲得到了较快发展。然而,FMS 引入美国工业界的速度相对较慢,其中主要的原因包括:FMS 有限的投资回报率、对操作人员的高要求以及系统复杂性。^[12,13]

- 精益制造(Lean manufacturing,简称 LM)

作为适应大规模定制生产模式的一个有效手段,精益制造的提出主

要是为了减少生产过程的浪费、降低成本的同时提高质量。^[14,15]

- 敏捷制造(Agile manufacturing,简称 AM)

美国里海大学在 1991 年发表的“21 世纪制造企业战略”报告中提出了敏捷制造。^[16~18]敏捷制造关注的焦点是企业内部以及企业之间的灵活管理,它借助网络化制造平台,使得信息在企业内部、企业与用户、企业与供应商直接连续流动。

- 可重组制造系统(Reconfigurable manufacturing system,简称 RMS)

20 世纪 90 年代末,为适应新的市场环境,美国的 Y. Koren 教授等首次正式提出 RMS 的概念。^[5]RMS 具有制造系统的组元(结构化的元件、主轴、控制器、软件、夹具及刀具等)可升级、组态(物理构形)可调整的特征,能根据市场变化形成新的生产能力和生产功能。^[19]上述 RMS 的概念关注生产系统的加工、物流和控制系统,是广义敏捷制造概念中制造系统的主要发展模式。

1.2.3 可重组制造系统与其他制造系统的比较

多品种、变批量的产品生产需要可重组制造系统(RMS)既具有一定的刚性和专用性来保证高的生产效率,又具有快速转产的柔性能力和通用性。因此,既具有刚性制造系统(Dedicated manufacturing system,简称 DMS),也具有柔性制造系统(FMS)的特点。然而,FMS 在设计之初就固定了软硬件结构并将其集成到一个系统,很难严格区分某项具体功能与某个具体组(部)件的对应关系,这样导致了系统几乎没有可能根据要求进行升级、定制、改变自身生产能力。^[13]因此,RMS 作为 FMS 的继承和发展正日益受到关注。以下对 DMS、FMS 和 RMS 三种制造系统进行比较。^[4~6]

1. 设计原理及设计目标比较

表 1-2 为三种制造系统的设计原理和目标比较。

表 1-2 三种制造系统的设计原理和目标

制造系统	设计原理	目标
刚性制造系统 (DMS)	刚性制造系统是专门针对某一种零件而不是基于变化的生命周期设计,一般采用自动生产线	刚性制造系统的设计目标是实现特定产品高的生产率和质量、低的生产成本
柔性制造系统 (FMS)	柔性制造系统是针对于某一产品族柔性生产设计,硬件主要包括多轴 CNC 机床,软件主要为可编程的控制程序。可根据生产订单实现定制柔性	柔性制造系统的设计目标是某一产品族内要求的生产率和质量、低的生产成本
可重组制造系统 (RMS)	可重组制造系统由可变结构的软硬件组成,支持系统形态的重构,通过快速改变自身构形响应市场变化,为不同零件族提供了定制柔性	可重组制造系统的设计目标是根据生产需求的不同,快速改变自身生产功能和生产能力

与柔性制造系统不同,可重组制造系统可有效减少因系统重组或再设计导致的系统 Rump-up 时间和费用,并可将现有生产系统与新的技术和功能进行快速集成。^[19]

2. 生产能力-生产功能关系比较

三种制造系统生产能力-生产功能关系如图 1-1 所示。

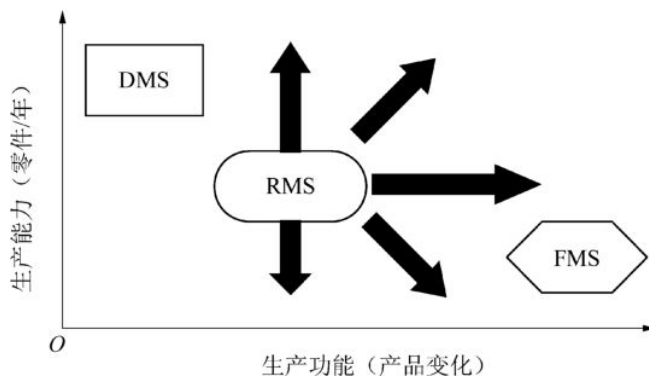


图 1-1 三种制造系统生产能力-生产功能关系

与 DMS 和 FMS 不同,RMS 的生产能力是个动态演化的过程,如图 1-2 所示。

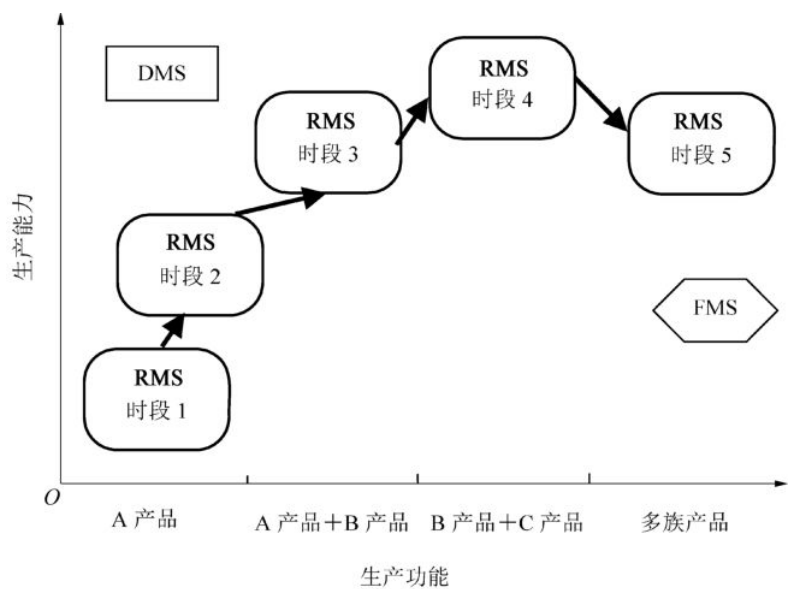


图 1-2 可重组制造系统生产功能-生产能力演化

DMS 具有很高的生产率,但是其生产品种单一,生产能力和功能在设计之初就固定不可改变。在统一市场需求稳定的情况下,DMS 表现出高效率 and 低成本,随着全球市场竞争的加剧,DMS 生产能力的发挥受到了限制。

FMS 是采用“先设计后使用”的方法,即针对特定用户,适合某一特定零件族,在构建之初往往预留了很多功能,使得 FMS 大量可用生产能力得不到充分的发挥,一些预设的生产功能往往满足不了新的需求。

RMS 弥补了 DMS 和 FMS 的不足,其生产能力和生产功能介于两者之间,不同阶段表现出不同的状态。

3. 生产率和系统构建费用关系比较

DMS 在设计的最大生产能力范围内其系统构建费用和生产率之比