

◆项目资助：浙江省自然科学基金（准动态双资源单元制造系统的设计与优化LQ13G010008）

准动态双资源制造单元构建的 理论、方法与技术

范佳静 著



ZHEJIANG UNIVERSITY PRESS

浙江大学出版社

◆项目资助：浙江省自然科学基金（准动态双资源单元制造系统的设计与优化LQ13G010008）

准动态双资源制造单元构建的 理论、方法与技术

范佳静 著



ZHEJIANG UNIVERSITY PRESS
浙江大学出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

准动态双资源制造单元构建的理论、方法与技术 /
范佳静著. —杭州: 浙江大学出版社, 2015. 11

ISBN 978-7-308-15239-6

I. ①准… II. ①范… III. ①工业企业管理—生产管理—数学模型—研究 IV. F406.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 243886 号

准动态双资源制造单元构建的理论、方法与技术

范佳静 著

责任编辑 黄兆宁

责任校对 余梦洁 丁佳雯

封面设计 周 灵

出版发行 浙江大学出版社

(杭州市天目山路 148 号 邮政编码 310007)

(网址: <http://www.zjupress.com>)

排 版 杭州中大图文设计有限公司

印 刷 杭州日报报业集团盛元印务有限公司

开 本 710mm×1000mm 1/16

印 张 15.25

字 数 290 千

版 印 次 2015 年 11 月第 1 版 2015 年 11 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978-7-308-15239-6

定 价 39.00 元

版权所有 翻印必究 印装差错 负责调换

浙江大学出版社发行部联系方式: 0571-88925591; <http://zjdxcbbs.tmall.com>

摘 要

制造业是我国国民经济的支柱产业,是体现国家竞争力的重要标志。以高效率、高柔性、高质量、低成本为特征的单元制造系统已成为当今制造业发展的主流趋势。单元构建是单元制造的基础,制造单元的合理构建为制造系统的模块化生产、生产系统的流程再造以及快速成组技术的广泛应用提供了基础,它是制造系统实现快速重组的核心细胞。

本书针对当今单元制造系统发展的现实需求以及现行静态和动态单元构建研究中存在的诸多问题[如前置条件之不足:没有结合考虑原有制造系统(机器设备、人力资源等)的实际情况],提出了一种有别于静态和动态单元构建的新方法:准动态单元构建方法,它采用阶段式构建思想来获得各周期单元构建的最优方案。本书着力研究准动态单元构建的理论、方法和实现技术,建立描述单元构建的统一范式(抽象函数)。研究多技能员工工作任务分配和学习性能对单元构建的内在影响,进而将人力资源要素引入准动态单元构建中,最终提出准动态双资源单元设计问题的数学模型,并进行重要参数的灵敏度分析和构建方案的实证分析,为实施制造系统快速重组、模块化单元制造、成组技术等制造策略提供基础技术支撑,促进我国制造业转型升级与快速响应市场变化的能力,同时为拓展单元制造系统的构建理论与技术提供实质性的科学贡献。本书主要研究内容及结果为:

1. 准动态单元构建方法的理论研究

在详细分析静态单元构建方法的基础上,提出了准动态单元构建的基本思想和分析方法,研究剖析了不同类型单元构建方法的联系与区别,建立了规范化的描述单元构建方法的统一范式。

2. 基于相似系数分析法的双资源单元构建问题的研究

在文献回顾的基础上构建了以相似系数为基础的双资源约束的单元构建模型,并将应用提出的数学模型与文献中的案例进行对比分析,5个对比案例在 Voids 和 EEs 两个指标上都优于文献结果,证明了所提模型的有效性。

3. 人力资源要素对单元构建的影响研究

详细分析多技能员工任务分配和人的学习性能对单元构建的影响,研究了

双资源约束下的单元构建问题,并建立了相应的数学模型,通过对模型中目标函数权重系数的灵敏度分析,优化了企业资源配置。

4. 准动态双资源约束下的单元设计问题的研究

在准动态单元构建方法的基础上,综合考虑设备单元划分、员工工作任务分配以及单元布局对单元制造系统效率的影响,研究了准动态双资源约束下的单元设计问题,建立了相应的数学模型,进而研究恰当的求解方法。

5. 案例分析

在对企业实际调研与数据分析的基础上,将准动态双资源约束下的单元构建数学模型应用于实际企业,改变原有生产方式为单元生产方式,从而大大减少了物料搬运距离,提高了生产质量水平、员工工作效率以及整个单元制造系统的效率。

关键词:单元制造系统;单元构建;单元设计;准动态;双资源约束

ABSTRACT

Manufacturing is a pillar industry of the national economic; it is also the important embodiment of national competitiveness. Nowadays, the cellular manufacturing system which is characterized by high efficiency, high flexibility, high quality and low cost has become the main trend in the development of manufacturing industry. Cellular manufacture combines the flexibility of the workshop and the efficiency of the flow process, as well as to product varieties of small batch according to the approximate cost of the rigid flow process, so it can meet the market in the time, quality, cost, flexibility and many other changes. It also represents the advanced production model. Cell formation is the basis of the cell manufacturing. Reasonable construction of the cellular manufacturing form a foundation for the wide application on the modular production of manufacturing system, the process reconstruction of production system and the rapid grouping technique. And it is a core part for the manufacturing system to achieve rapid reorganization.

Based on the practical needs of today's cellular manufacturing system and the present problems which are brought from static and dynamic cell formation [such as the inadequacy of pre-conditions; without considering the actual condition of the original manufacturing system (such as machinery & human resources)], the paper originally proposes a new method which is different from both static and dynamic cell formation; quasi-dynamic cell formation. It uses the recycling formation method to achieve the optimal cell formation schemes for every period. The paper focuses on the study of the theory, methods and techniques of the quasi-dynamic cell formation, establishing a unified mathematical model (abstract function) to describe different types of cell-formation problems. It considers the internal influence of work assignment for multi-skilled employees and workers' learning ability on cell formation. And then human resource factors are introduced into quasi-dynamic cell-formation problem. Finally mathematical model are proposed for

the quasi-dynamic dual-resource cell-formation and do the sensitivity analysis to some important parameters and demonstration analysis. This paper study will provide strong and fundamental technical support for recombining a manufacturing system rapidly, executing cellular manufacturing and group technology strategy. It will also promote the ability of manufacturing enterprises in responding the rapid change of the global market. At the same time, it will contribute crucially to the development of formation theory and technique for cellular manufacturing system. The main work and achievements are as follows:

(1) Research on the quasi-dynamic cell-formation theory. By analyzing the basic method of static and dynamic cell formation and its practical application, this paper puts forward basically idea and method of quasi-dynamic cell formation, and then research the connection and distinguish of these three formation method, and at last build a a unified expression method.

(2) Study on dual-resource constraint cell formation problem based on similarity coefficient. A dual-resource constraint cell formation mathematical model based on similarity coefficient is put forward after literature reviewing and summarizing problem of existing research. And then applies this mathematical model into case of reference. The result of these five cases are better than reference on the two indictors (Voids and EEs), which proved the effectiveness of this model.

(3) Research on the effect of human factor on cell formation. On the basis of analyzing the influence multi-skilled workers on cellular manufacturing system, this paper puts forward dual-resource constrained cell formation problem and build a corresponding mathematical model and do the sensitivity analysis for the weight coefficient to optimize enterprise resource distribution.

(4) Research on the quasi-dynamic dual-resource cell formation problem. Based on the concept of quasi-dynamic dual-resource cell-formation, analysis machines cell division, human work assignment and cell layout effect on the cell manufacturing system efficiency, and then put forward quasi-dynamic dual-resource cell-formation problem and build a corresponding model, at last research on the solution method for this model and gain the optimal formation scheme.

(5) Case study. Based on the enterprise survey and data analysis, applied the quasi-dynamic dual-resource cell-formation model into the metalworking shop and changed original mode to cellular production mode, thus greatly reducing the material handling distance, improve production quality level, employee's work efficiency and efficiency of the entire cellular manufacturing system.

Key words: cellular manufacturing system, cell formation, cell design, quasi-dynamic, dual-resource constrained

目 录

第 1 章 绪 论	1
1.1 研究的背景与研究内容	1
1.1.1 研究的背景与意义	1
1.1.2 研究内容	3
1.2 研究的技术路线	4
1.3 基本结构	5
1.4 创新点	6
第 2 章 单元构建方法研究综述	7
2.1 先进制造系统的发展	7
2.2 单元制造系统与单元制造概述	11
2.2.1 单元制造系统	11
2.2.2 单元制造	11
2.3 制造单元构建问题及其评价指标	14
2.4 单元构建方法综述	16
2.4.1 相似系数法	16
2.4.2 聚类分析法	19
2.4.3 数学规划法	21
2.4.4 图论法	30
2.4.5 神经网络法	31
2.5 单元构建数学规划法算法综述	33
2.5.1 遗传算法	33
2.5.2 蚁群算法	33

2.5.3 禁忌搜索	34
2.6 本章小结	35
第3章 准动态单元构建方法的研究	36
3.1 静态与动态单元构建方法剖析	36
3.1.1 静态单元构建方法剖析	36
3.1.2 动态单元构建方法剖析	37
3.2 准动态单元构建方法的提出	40
3.2.1 准动态单元构建方法的概念	41
3.2.2 准动态单元构建方法剖析	42
3.2.3 多周期环境下准动态单元构建方法剖析	43
3.3 单元构建理论的统一范式	45
3.3.1 准动态与动态单元构建方法的目标函数值差异分析	45
3.3.2 单元构建方法的统一范式	46
3.4 准动态单元构建问题的一般数学模型	46
3.4.1 模型的基本假设及参数变量的设置	47
3.4.2 数学模型	48
3.5 数例分析	49
3.5.1 静态单元构建方法分析	49
3.5.2 动态单元构建方法分析	51
3.5.3 准动态单元构建方法分析	55
3.5.4 数例分析小结	57
3.6 本章小结	57
第4章 基于相似系数的双资源单元构建问题的研究	59
4.1 双资源约束的单元构建数学模型	60
4.2 设备单元及零件族划分模型(模型1)	60
4.2.1 模型的参数及变量	60
4.2.2 设备单元及零件族划分模型	61

4.3	工人工作任务分配模型(模型 2)	62
4.3.1	模型的参数及变量	62
4.3.2	工人工作任务分配模型	62
4.4	模型线性化	63
4.5	算例分析	64
4.6	本章小结	69
第 5 章	双资源约束下的单元构建问题的研究	70
5.1	国外研究现状	70
5.2	人力资源要素对制造单元效率的影响分析	71
5.3.1	人员与设备间的交互作用分析	71
5.2.2	团队绩效分析	74
5.3	双资源单元构建问题建模	75
5.3.1	模型的基本假设及参数变量设置	75
5.3.2	数学模型	76
5.4	基于遗传算法的模型求解	79
5.4.1	遗传算法概述	79
5.4.2	算法设计	85
5.5	算例分析	89
5.5.1	双资源约束的单元构建问题的两阶段分析	90
5.5.2	双资源约束的单元构建问题的综合分析	96
5.5.3	算例总结	96
5.6	本章小结	99
第 6 章	基于学习曲线的双资源约束的单元构建问题的研究	100
6.1	学习曲线理论及其在单元构建中的作用	100
6.1.1	学习曲线的基本理论	100
6.1.2	学习曲线理论在单元构建中的作用	104
6.2	双资源约束下的单元构建问题建模	106
6.2.1	模型的基本假设及参数变量的设置	106

6.2.2	数学模型	108
6.3	基于改进分散搜索法的模型求解	112
6.3.1	分散搜索法基本原理	112
6.3.2	改进分散搜索算法设计	112
6.3.3	算法实验及其结果分析	119
6.4	算例及其灵敏度分析	121
6.4.1	算例基本描述	121
6.4.2	目标函数权重系数的灵敏度分析	125
6.5	基于学习—遗忘的单元构建问题	131
6.5.1	遗忘曲线的研究现状	132
6.5.2	基于学习—遗忘曲线的双资源单元构建模型	133
6.5.3	基于遗传算法的数值算例求解	138
6.6	本章小结	150
第7章	准动态双资源约束的单元设计问题研究	152
7.1	单元布局对单元构建的影响分析	152
7.1.1	单元内设备布局对单元构建的影响分析	152
7.1.2	单元定位对单元构建的影响分析	154
7.2	准动态双资源约束下的单元构建问题模型	157
7.2.1	模型的基本假设及参数变量的设置	158
7.2.2	数学模型	160
7.3	多目标优化问题的 Pareto 解	163
7.4	基于改进多目标遗传算法的模型求解	163
7.5	本章小结	169
第8章	案例分析	171
8.1	应用对象分析	172
8.2	现状及问题分析	173
8.3	产品和设备分析	175
8.3.1	产品归类分析	175

8.3.2 设备分析	176
8.4 员工学习能力分析	177
8.5 单元制造系统的构建	180
8.6 方案评价	183
8.7 本章小结	185
 第 9 章 总结及展望	186
9.1 研究总结	186
9.2 研究展望	187
 参考文献	188
 附录 1 Lingo 程序	206
附录 2 分散搜索算法程序	209
附录 3 遗传算法部分程序	217
 索 引	229

第1章 绪 论

1.1 研究的背景与研究内容

1.1.1 研究的背景与意义

制造业是国民经济的支柱产业,是体现国家竞争力的重要标志。随着产品更新速度的不断加快、生命周期的日益缩短,以及顾客需求的日趋多样化、个性化,生产制造模式和组织方式已由面向产品转为面向客户、面向需求和面向服务^[1],时间、质量、成本、服务、环境和知识创新已成为现代企业赢得客户和市场的关键要素。制造企业想在竞争中赢得生存和发展空间,除了需要拥有先进的生产设备,还须具备一套能以高质量、高效率、低成本进行生产的制造系统。在过去的几十年里,国内外学者已经提出了许多先进制造模式,如计算机集成制造系统(Computer Integrated Manufacturing System, CIMS)、柔性制造系统(Flexible Manufacturing System, FMS)、敏捷制造(Agile Manufacturing, AM),等等。虽然这些先进制造模式都取得了不同程度的成功,但它们主要适用于高自动化水平的生产系统,需有大量的初期投入。我国虽然在这些年加快数控机床生产和应用的比例,但截止到2012年我国机械加工数控化率仅达30%左右,与发达国家70%左右的数控化率相比相差甚远^[2],大多数企业仍然处于人机结合的半自动化水平,普通的加工机床因为价格低廉仍然占据主流位置。因此,为了更好地适应市场环境的多变性及生产周期的灵活性,单元制造系统已经成为我国中小制造企业的最佳选择之一^[3,4]。

单元制造(Cellular Manufacturing, CM)思想最初来源于成组技术(Group Technology, GT),它根据产品的相似性,将产品种类组合成产品族,根据产品设备的关联情况,构建与产品族相对应的设备单元。单元制造生产方式既能结合工作车间方式的灵活性和流水线方式的高效率,又能以近似刚性流水线的成本来生产多品种少批量的商品。许多研究结果表明,单元制造系统有占地面积小、工序间距离接近、在制品积压少、一名工人进行多工序操作和柔性等优点。因此单元制造方式可以满足市场在时间、质量、成本、柔性等多方面的挑

战,它代表着生产方式的新方向。目前单元制造在许多公司得到了广泛的应用,比如松下电器、理光公司、戴尔计算机、奥林巴斯、佳能公司等。实践证明,单元制造生产方式可以帮助企业缩短 65% 的生产线、缩短 70% 的供货周期和缩减 40% 的人员,它被西方企业称为“看不见的传送带”,不仅大大减少了浪费,而且革新员工意识,使企业充满活力,进而为企业发展抢得先机^[4]。

单元制造能够结合工作车间方式的灵活性和刚性流水线方式的高效率,因此单元生产方式可以满足市场在时间、质量、成本、柔性等多方面的挑战,它代表着生产方式的新方向。单元构建是单元制造的基础,制造单元的合理构建为制造系统的模块化生产、生产系统的流程再造以及快速成组技术的广泛应用提供了基础,它是制造系统实现快速重组的核心细胞。

单元构建根据问题研究周期的不同可分为单周期和多周期单元构建问题,并分别采用静态和动态单元构建方法进行问题的分析求解。静态和动态单元构建方法的区别在于前者仅考虑一个周期的需求决策,而后者则根据不同时期零件需求、设备生产能力等因素,以获得多个周期整体最优为目标,确定各个周期单元组建方案。但是静态和动态单元构建方法研究的本质都是在一个空白制造系统的基础上构造一个全新的系统,这是一种理想状态。而现实情况大都是:经过一定时期针对外部市场需求和企业自身发展能力之需,在原有制造系统的基础上进行系统设备的再规划与调整。同时由于制造系统中某些设备的安装和拆卸需要花费大量的时间和人力,大大制约了制造系统的调整,因此忽略原有制造系统对后续系统调整的研究方法不符合企业实际生产的要求。动态单元构建方法是对多个周期的统一规划,需要在规划初期就对每个周期(每个周期至少半年以上)的制造系统做出系统构建方案,因此在初期就需获得日后较长时期精准的数据来获得多周期的总体最优,但随着全球经济一体化背景下产品需求变化的不断加速,已很难获取相应的准确数据。虽然不少学者通过模糊技术来降低长期数据预测不精确性带来的风险,但是模糊技术只能对产品需求、设备价格,以及相关的单位成本进行模糊处理,而对于生产技术进步引起的设备性能提升、生产工艺提升以及生产工艺路径变化等因素则难以预测和处理,而这些因素在生产实际中是至关重要的。因此,模糊技术并不能完全解决动态单元构建方法进行多周期决策时由于数据偏差带来的风险。鉴于以上分析,静态单元构建方法已不能完全适应当今单元制造系统发展的现实需求,有必要提出并解决有别于静态和动态单元构建的新方法——准动态单元构建方法,来适应现代制造企业的实际生产需求。准动态单元构建方法是在考虑原有制造系统影响的基础上,结合本周期的需求以及设备基本信息,通过采取阶段式的构建方式获得每个周期的最优构建方案,它旨在改变静态单元构建方法中忽视原有制造系统状态及数据预测风险对单元构建方案的影响。

单元制造系统是一个复杂系统,除机器设备外,人力资源对系统柔性、高效的运行也起着至关重要的作用。我国制造企业中80%以上是中小型企业,多为劳动力密集型产业。近年来我国虽然加快了数控机床的应用步伐,但截止到2012年机械加工数控化率仅达30%左右,大多数企业仍然处于人机结合的半自动化水平,同时随着设备操作技术水平的不断提升,人与设备技术的融合问题显得尤为突出,以往针对全自动加工中心、高自动化水平的制造系统单元构建的研究并不能完全适应我国企业发展的需求,亟须在单元构建中同时考虑设备资源和人力资源这双重资源。

虽然研究者已经在单元构建中关注人的因素,但主要是基于设备单元的人员培训与工作任务的分配,缺乏对设备单元和工人任务分配之间内在联系和冲突的分析。例如:①多技能员工一般可以同时操作多台设备,为了降低工人的劳动强度以及减少设备的等待时间,同一员工操作的不同设备必须位于同一个单元,然而这一安排又会增加物料的搬运成本;②不同员工对操作任务的技能水平和操作质量是有明显差异的,因此员工任务分配的合理性直接影响单元的工作效率;③个体在实践过程中,都存在一定的学习能力,可以通过不断的生产实践来提高自身的生产效率。因此在单元构建中需考虑人的学习性能,分析学习性能对工人工作效率的影响,进而分析对整个单元制造系统的影响。

准动态双资源制造单元构建的理论、方法与技术研究符合当今制造企业发展的实际需求,其研究结果可为制造企业构建可重构制造单元、开展模块化生产、实现生产线快速重组提供技术支撑,这对提升企业快速响应国际市场的应变能力、提高顾客满意度、推动制造业转型升级具有显著的经济价值,同时对于拓展单元制造系统的构建理论与技术具有重要的科学价值。

1.1.2 研究内容

在详细剖析现行单元构建研究方法的基础上,本书提出了一个新方法——准动态单元构建方法;通过详细分析人力资源要素对制造单元的影响,研究双资源约束下的单元构建问题;然后基于准动态单元构建的基本方法,综合考虑设备单元划分、员工工作任务分配和单元布局对单元制造系统的影响,最终提出并解决了基于准动态的双资源约束下的单元构建问题。本书主要研究内容如下:

(1)准动态单元构建方法的理论研究。在深入分析静态和动态单元构建方法和实践应用的基础上,提出静态和动态单元构建的抽象函数;基于静动态单元构建方法存在的问题,提出有别于静动态单元构建方法的准动态单元构建方法;并在详细剖析三种方法区别与联系的基础上,建立单元构建方法的统一范式(抽象函数);最后将三种方法应用于同一个数学算例,得出准动态单元构建

方法能更好地满足企业实际运作的要求。

(2) 基于相似系数法的双资源单元构建问题的研究。在文献回顾的基础上构建了以相似系数为基础的双资源约束的单元构建模型,并将应用提出的数学模型与文献中的案例进行对比分析,五个对比案例在 Voids(表示对角矩阵中的 0 元素的数量)和 EEs(表示非对角矩阵中的 1 元素的数量)两个指标上都优于文献结果,证明了所提模型的有效性。

(3) 人力资源要素对单元构建的影响研究。在详细剖析单元制造中员工工作任务分配以及人的学习性能对单元构建影响的基础上,研究双资源约束下的单元构建问题,并建立相应的数学模型。根据模型的复杂性,提出改进分散搜索法进行求解。通过对实际算例的求解及灵敏度分析,说明人员在单元制造系统中的作用及对设备单元构建的影响。

(4) 准动态双资源约束下的单元设计问题研究。基于准动态单元构建的概念,综合考虑员工工作任务分配、设备单元构建与单元布局对单元制造系统的影响,研究准动态双资源约束下的单元设计问题,建立相应的数学模型,并采用多目标遗传算法进行求解,最后将该模型应用到企业实际,提高企业现行运作效率。

(5) 案例分析。将准动态双资源约束下的单元构建数学模型及相应的算法应用于具体企业,将企业现有机群式布置的生产方式改为单元生产方式,提高企业整体绩效。

1.2 研究的技术路线

根据以上分析研究内容,给出以下技术路线,如图 1-1 所示。

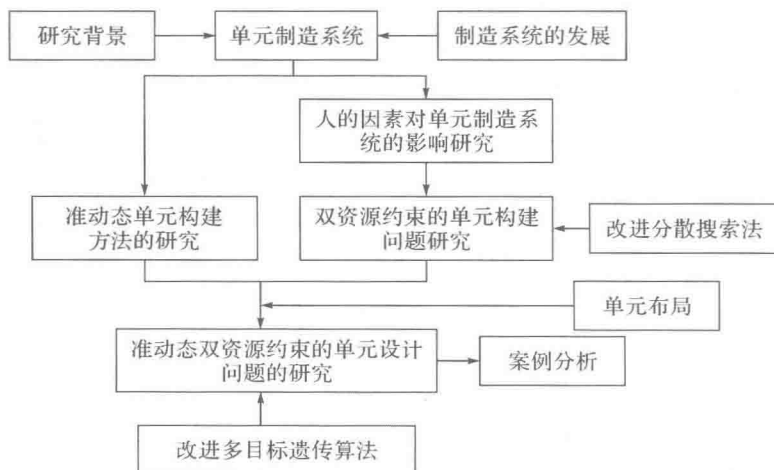


图 1-1 技术路线