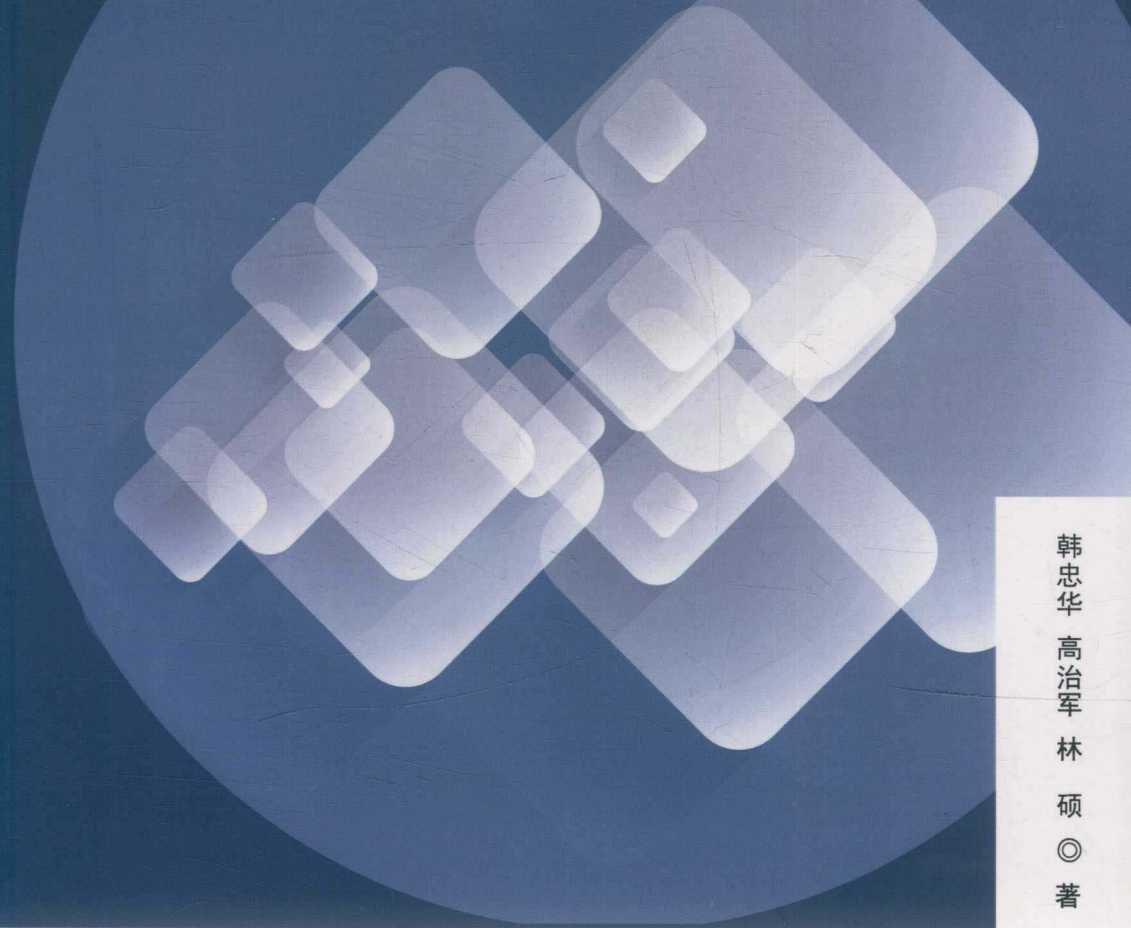




韩忠华 高治军 林 硕 著

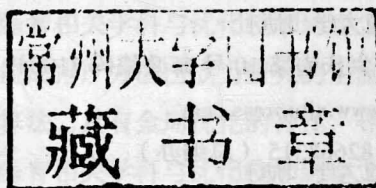
群体智能算法在混合流水 车间排产优化中的应用



西安交通大学出版社
XI'AN JIAOTONG UNIVERSITY PRESS

群体智能算法在混合流水车间 排产优化中的应用

韩忠华 高治军 林 硕 著



西安交通大学出版社
XI'AN JIAOTONG UNIVERSITY PRESS

图书在版编目 (CIP) 数据

群体智能算法在混合流水车间排产优化中的应用 /

韩忠华, 高治军, 林硕著. — 西安: 西安交通大学出版社, 2017.12

ISBN 978-7-5693-0342-1

I . ①群… II . ①韩… ②高… ③林… III . ①人工智能 - 算法 - 应用 - 车间 - 流水生产线 - 生产计划管理 - 最佳化 IV . ① F406.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 310691 号

书 名 群体智能算法在混合流水车间排产优化中的应用

著 者 韩忠华 高治军 林 硕

责任编辑 李 文

出版发行 西安交通大学出版社

(西安市兴庆南路 10 号 邮政编码 710049)

网 址 [http: //www.xjtupress.com](http://www.xjtupress.com)

电 话 (029) 82668315 (总编办)

传 真 (029) 82668280

印 刷 北京建宏印刷有限公司

开 本 710 mm × 1000 mm 1/16 印张 12.75 字数 227 千字

版次印次 2017 年 12 月第 1 版 2017 年 12 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978-7-5693-0342-1

定 价 36.00 元

读者购书、书店添货、如发现印装质量问题, 请通过以下方式联系、调换。

订购热线: (029) 82665248 (029) 82665249

投稿热线: (029) 82668578

读者信箱: medpress@126.com

版权所有 侵权必究

前 言

混合流水车间 (Hybrid Flow Shop, HFS) 是传统流水车间的一种推广形式, 具有多道工序、多个加工工位, 并且至少有一道工序具有多个并行工位, 加工过程存在多条工艺路线, 不同工位加工工时存在差异, 这些因素使得混合流水车间排产问题较一般排产问题复杂。装配型生产线以及串并型结构的批制造过程 (Batch Process) 都是典型的混合流水车间, 涉及汽车生产、半导体封装、大型装备制造等诸多国民经济的关键行业。这类生产车间具有工艺复杂、制造过程耦合紧密、各生产环节受到时序约束等特点, 对生产管控提出了更高要求。另外, 在实际生产过程中还存在着如何使生产任务均衡、更好地满足交货期和提高设备利用率等问题, 这些问题都增加了排产优化问题的复杂性, 所以研究混合流水车间排产优化问题具有重要的理论意义和实际应用价值。

混合流水车间十分贴近生产实际, 如客车制造的涂装车间、IC 芯片封装车间、印刷电路板制造车间等都是典型的混合流水车间, 其排产问题的研究已经深入到制造业的各个领域。在学术界, 排产优化问题也得到了广泛关注, 很多企业和研究机构都在进行相关研究, 研究方法也随着相关学科与优化技术的建立与发展而日趋多元化, 特别是基于计算智能和人工智能的排产方法已成为研究的主流。其中, 群体智能算法是人工智能方法中的一类重要算法, 具有全局优化的特性, 寻优过程具有隐性的并行性和分布性, 适合解决混合流水车间这种复杂的优化问题。目前, 利用群体智能方法等人工智能方法解决混合流水车间排产优化问题也成为一大趋势。虽然在混合流水车间排产优化领域已经有很多研究文献, 但深入、系统研究的书籍不多。本书的研究成果有助于科研人员的排产优化理论研究, 也能够有效地协助工程技术人员解决实际排产问题, 其中讲述的排产优化方法和技术已在客车制造行业和半导体封装行业的实际工程项目中得到应用, 并取得良好的排产优化效果。

本书着眼于混合流水车间排产优化问题的研究, 包括从建立模型到运用群体智能算法求解排产问题, 从单个优化目标到多目标优化, 从抽象的理论分析到具体的实际应用。读者通过本书的学习, 可以全面了解混合流水车间排产优化的概念、方法和相关技术, 将所学的知识用于解决实际的混合流水车间排产优化问题。本书首先从混合流水车间的数学规划模型入手, 建立混合流水车间中对象和对象之间的关系, 分析描

述排产优化过程。其次,研究如何求解混合流水车间排产优化问题,分析群体智能算法,抓住群体智能算法应用要点,通过研究多种初始种群构造方法,来建立群体智能进化算法与混合流水车间排产优化问题之间的桥梁,通过仿真结果比较,寻找更有效率的求解混合流水车间排产优化问题的群体智能算法。进一步从优化目标角度,全面展开对混合流水车间排产优化问题的研究,运用数学方法描述混合流水车间的多个单目标问题,进而建立混合流水车间排产优化问题的评价指标体系,通过不同的评价指标验证各种群体智能算法求解混合流水车间问题的有效性。最后将单目标优化问题延伸到多目标优化问题的研究,总结出求解混合流水车间多目标排产优化问题的主要步骤和要点,在构造非支配解集、分布性、收敛性、群体进化过程等方面进行新方法研究和探索,拓展混合流水车间的多目标优化问题求解方法。本书整体研究范围涵盖混合流水车间排产优化问题的模型、评价指标以及群体智能算法在混合流水车间排产的应用,并通过采用实际工程中获取的数据对所研究方法进行仿真对比分析,证明本书中所研究的求解混合流水车间排产优化问题方法的有效性和可行性。

本书一共分七章,第1章阐述了本书研究的背景,分析混合流水车间的生产排产研究现状,探讨了混合流水车间排产技术的发展趋势。第2章针对混合流水车间的特点建立混合流水车间排产的数学规划模型。第3章研究多种初始种群构造方法,以提高群体智能算法的优化结果。第4章采用多种群体智能算法求解混合流水车间排产优化问题,并提出改进算法进一步优化排产问题。第5章针对单目标排产优化问题,采用群体智能算法求解混合流水车间各类问题。第6章将单目标优化问题延伸到多目标优化问题,总结出求解混合流水车间多目标排产优化问题的主要步骤和方法。第7章针对混合流水车间排产优化问题,研究混合流水车间排产优化技术,建立起理论应用与实际工程之间的桥梁。

本书由中科院沈阳自动化研究所史海波研究员审定,由韩忠华,高治军和林硕担任主编,并负责写作提纲、组织编写和最后的统稿工作。参加本书部分章节撰写的有王世尧、孙亮亮(第1章)、高治军、田旭天(第2章)、林硕、董晓婷(第3章)、孙越、谢蕃悻(第4章)、孟付、张权(第5章)、孙越、韩超(第6章)、田旭天、王世尧(第7章),另外许景科、陈智丽、夏兴华、阚凤龙、黄建中、毕开元、许可、郭彤颖、郭莉莉、赵浩轩、孙东、高恩阳、曹阳、王鑫、英宇、宫巍、李征宇、林昊、叶友林、王凤英、贾美琪、陈世佳、武镇波、冯丹丹、金行也为本书做出贡献。

本书在编写的过程中,参考了大量相关书籍和资料,特向文献、资料的原著者表

示衷心的感谢。本书获得国家自然科学基金“基于高效拉式松弛迭代算法的炼钢 - 连铸主辅设备调度方法的研究”（基金号：61503259）的资助出版。

由于作者水平所限，对混合流水车间排产优化这一领域涉及的知识和内容研究的还不够深入透彻，另外生产管理优化领域发展快速，书中难免有不当之处，恳请读者、专家、学者给予批评指正。

本书编写组

2017 年 10 月

1.1 混合流水车间排产优化问题的研究背景	1
1.2 混合流水车间排产优化问题的研究现状	2
1.3 混合流水车间排产优化问题的研究意义	3
1.4 本章小结	4
本章参考文献	5
第 2 章 混合流水车间排产优化模型	15
2.1 引言	15
2.2 混合流水车间排产优化问题描述	15
2.3 混合流水车间排产问题数学规划模型	16
2.4 本章小结	18
本章参考文献	19
第 3 章 排产优化问题的初始可行解建立方法	21
3.1 引言	21
3.2 群体智能算法初始种群建立方法研究	21
3.3 本章小结	27
本章参考文献	27
第 4 章 群体智能优化算法及其在排产优化中的应用	29
4.1 引言	29
4.2 混合流水车间排产优化问题的智能求解算法分析	29
4.3 遗传算法	35
4.4 差分进化算法	38
4.5 粒子群算法	39
4.6 鲸鱼算法	77

目 录

第1章 引 言.....	1
1.1 混合流水车间排产优化问题的研究背景	1
1.2 混合流水车间排产优化问题的研究现状	2
1.3 混合流水车间排产优化问题的发展趋势	8
1.4 本章小结	10
本章参考文献	10
第2章 混合流水车间排产优化模型	15
2.1 引言	15
2.2 混合流水车间排产优化问题描述	15
2.3 混合流水车间排产问题数学规划模型	16
2.4 本章小结	18
本章参考文献	19
第3章 排产优化问题的初始种群建立方法	21
3.1 引言	21
3.2 群体智能算法初始种群建立方法研究	21
3.3 本章小结	37
本章参考文献	37
第4章 群体智能优化算法及其在排产优化中的应用	39
4.1 引言	39
4.2 混合流水车间排产优化问题的智能求解算法分析	39
4.3 遗传算法	45
4.4 差分进化算法	58
4.5 粒子群算法	69
4.6 蝙蝠算法	77

4.7 鲸鱼优化算法.....	87
4.8 帝国竞争算法.....	93
4.9 狼群算法	107
4.10 本章小结	117
本章参考文献	117

第5章 混合流水车间单目标排产优化问题..... 127

5.1 引言	127
5.2 排产优化问题的优化目标分析.....	127
5.3 排产优化问题的评价指标	133
5.4 群体智能算法求解单目标排产优化问题	134
5.5 本章小结	152
本章参考文献	153

第6章 混合流水车间多目标排产优化问题..... 155

6.1 引言	155
6.2 多目标优化问题概述	156
6.3 基于 NSGA-II 算法的多目标排产优化问题	164
6.4 本章小结	173
本章参考文献	174

第7章 混合流水车间排产优化技术..... 177

7.1 引言	177
7.2 排产优化仿真软件对比分析	177
7.3 混合流水车间排产软件设计	186
7.4 本章小结	192
本章参考文献	193

第1章 引言

1.1 混合流水车间排产优化问题的研究背景

最近几十年制造企业的生产方式发生了巨大转变,精益生产、计算机集成制造和敏捷制造等生产方式正在制造企业中快速应用与发展。激烈的市场竞争使得制造企业意识到,降低生产成本、提高经济效益是企业保持竞争力的一个重要因素。当前制造企业中存在着生产品种和生产方式的多样性,这使得生产计划、生产组织复杂化,增加生产管理上的困难。目前很多企业采用 SAP (Systems, Applications, and Products in Data Processing), 世界排名第一的 ERP (Enterprise Resource Planning) 软件, 给出的日生产计划指派到关键工位, 对指挥车间生产运行有一定支持^[1-3], 但由于计划的粒度粗, 无计划完成情况的实时反馈, 无完成计划情况的实时监控, 对生产现场实际情况反映不是很全面, 特别是对于具有复杂的混合流水车间特点的生产车间的运行管理意义不大, 难以满足企业的整体生产计划, 也不能做到生产车间相互配合和生产衔接。如果能有更精细的混合流水车间排产系统, 则能使制造企业降低成本, 提高生产效率并获得更高的经济效益, 建立完善的排产系统已成为当前制造企业挖掘自身潜力、提高现有资源利用率的一个主要途径。

在以往的排产优化问题理论研究中, 排产优化的目标多是优化生产周期, 并且多以一般 Flow-shop (FSP) 排产问题为研究对象^[4-7]。而在制造企业生产实践中, 生产形式多种多样, 工件的加工路线往往有多条, 在整条生产线上至少有一个车间具备典型的混合流水车间特点。混合流水车间排产问题 (Hybrid Flow-Shop Scheduling Problem) 比 Flow-shop 排产问题更加复杂。混合流水车间排产问题不仅要根据工件的工艺路线对多个工序上多个任务进行排产, 还要考虑每个工件在工序中并行机上不同的工时所导致排产结果的差异, 所以更增加排产的难度, 混合流水车间排产优化问题是典型的 NP-Hard 问题。

以客车制造行业为例, 近年来客车行业的竞争越来越激烈, 给客车企业的生存与发展造成了巨大的压力。由于客车行业具有产量低、品种多的特点, 所以自动化水平

都不是很高，与其他汽车行业相比属劳动密集型企业，基本上靠手工操作。另外，客户定制已成为客车生产的必然趋势。国内客车制造商，其制造模式是面向客户定制，甚至面向客户设计，导致客车生产品种多、批量小、工艺复杂，随着行业竞争加剧，客户的交货期要求越来越短，这就需要制造部门既能满足柔性制造，又要满足较短的交货期；同时，随着业务量的不断增长，生产的不均衡为制造企业的计划编制、现场管理带来了更大的压力。生产品种和生产过程多样性使得生产计划、生产组织复杂化，带来诸多生产管理上的困难。所以面向混合流水车间排产优化问题，不单纯研究单目标问题，而是综合考虑交货期、成本等多目标问题，更要契合生产实际需求，还要考虑与制造企业生产计划相关的库存水平、质量控制、生产速度等问题。这类具有一定难度的排产问题如果能得到很好解决，就能使得整个生产运作系统顺畅运行，提高产品质量，也能够提高企业现有资源潜力，使得整个企业能够按计划进行合理生产，达到供应链上各个环节的动态平衡。因此，研究面向混合流水车间的排产优化问题具有重大的理论和现实意义。

1.2 混合流水车间排产优化问题的研究现状

混合流水车间是传统流水车间的一种推广形式，因其具有多工序、多并行机、多阶段的特点而更贴近生产实际。如客车制造的涂装车间、IC 芯片封装车间、印刷电路板制造车间等都是典型的混合流水车间。另外，在实际生产过程中还经常伴随着一系列突发事件，如机器故障、订单的改变等都会影响生产车间的效率。所以研究混合流水车间的排产优化问题更具有实际意义。自从混合流水车间（Hybrid flow shop, HFS）概念在 1971 年第一次被 Arthanari 和 Ramaurthy^[8]提出以来，国内外学者已对混合流水车间排产问题（Hybrid Flow Shop Scheduling Problem, HFSP）做了大量研究。

目前，已提出的制造过程排产算法主要包括数学规划方法（Mathematical Programming Methods）、启发式方法（Heuristic Methods）、人工智能方法（Artificial Intelligence Methods）和软计算方法（Soft Computing Methods）等各类排产算法。下面针对制造过程不同优化目标对以上各种方法的应用做逐一介绍。

（1）minimizemakespan：2002 年，唐立新^[9]针对混合流水车间排产问题，以最小完工时间为目标提出了与最优分配原则相结合的遗传下降算法（Genetic Descent

Algorithm, GDA)。2007年, Kemal-Alaykyran 和 Alper Doyen^[10]提出用蚁群优化算法解决混合流水车间的最大完工时间 (makespan) 最小化问题。2009年, QunNiu 和 Taijin Zhou^[11]等人提出将量子激发免疫算法应用于 HFS 解决使 makespan 最小化问题。2011年, Wang H M、Chou F D、Wu F C^[12]针对具有多处理机任务的混合流水车间生产排产的最小 makespan 问题提出了一种模拟退火算法 (Imulated Annealing Algorithm, SA), 此方法通过列表排产、置换排产及首次适应算法来获得目标函数值, 并结合一种新的邻域机理 (Neighborhood Mechanism) 方法产生邻域解。2012年, 吴志明^[13]针对混合流水车间稀缺资源约束对最小化最大完工时间 (makespan) 的影响, 建立了基于资源约束的数学规划模型, 有效地解决了多台并行机因竞争稀缺资源而造成的时延等待、设备利用率低的调度问题, 并研究了考虑资源约束的混合流水车间调度问题以及具有预防性维修的资源约束混合流水车间调度问题。2013年, Cui Z 和 Gu X^[14]提出了一种改进的离散人工蜂群算法 (Improved Discreteartificial Bee Colony Algorithm, IDABC) 来解决混合流水车间最小 makespan 问题。在该算法中将一种新颖的差分进化方法和改进的变邻域搜索方法相结合来产生新的可行性解。2013年, 宋代立和张洁^[15]等研究集成批量计划和混合流水车间调度的问题, 提出蚁群算法 (Ant Colony Optimization, ACO), 并对产品分批、设备指派和批次排序三个相互关联的阶段进行优化, 使得所有产品的最大完工时间最小。2014年, Fattahi P、Hosseini S M H、Jolai F^[16]等人针对改机时间问题的装配混合流水车间提出了分枝定界算法以优化最大完工时间。2015年, Khorramizadeh M 和 Riahi V^[17]研究了混合流水车间生产调度问题, 并研究了最小化生产时间问题, 使用正交矩阵、路径规划以及优化的局部搜索方法开发了基于蜂群优化的元启发式算法。仿真结果表明, 该算法对于求解最小化问题具有较好的适应性。2015年, 苏志雄和伊俊敏^[18]针对以最小化 makespan 为目标的混合流水车间调度问题, 提出了一种混合流水车间调度的两阶段启发式算法。2015年, Kheirandish O、Tavakkoli-Moghaddam R、Karimi-Nasab M^[19]将混合流水车间生产过程分为两阶段, 通过人工蜂群算法求解合理运行时间的近似最优解来解决最小化最大完工时间问题。2015年, 张凤超^[20]等以最小化最大完工时间为优化目标, 提出了一种改进的分布估计算法用于求解混合流水车间调度问题。2016年, 李解^[21]等针对混合流水车间调度问题, 以最小化最大完成时间为目标建立整数规划模型, 将经典粒子群优化算法进行改进, 提出了一种用于解决该问题的改进的粒子群算法。2016年, 田云娜^[22]等设计了一种基于时间窗的蚁群算法, 以最小化最大完工时间为优化目标, 求解多阶段混合流水车间

调度问题。2016年, Abdollahpour S、Rezaian J^[23]解决了关于订单和生产管理策略限制的混合流水车间调度问题, 以迟到成本、加权早期成本、加权拒绝成本和加权不完全成本的总和为目标函数, 为了评估算法性能, 对混合流水车间最小化问题进行研究, 提出更优化的方案。2017年, Pan Q K、Gao L、Li X Y等^[24]提出了九种算法, 根据完工时建立上线序求解混合流水车间调度 makespan 问题, 其中六种算法是基于轨迹的元启发式算法, 包括迭代局部搜索的三种变体和迭代贪婪的三种变体, 其余的三种算法是基于群体的元启发式算法, 即改进的果蝇优化算法、改进的候鸟优化算法和离散的人工蜂群优化算法, 并提出了基于路径重新链接的协同搜索, 多样性控制方案, 以及基于初始种群多样性方法改进的果蝇优化算法。

(2) 交货期问题: 2011年, Behnamian J、Zandieh M^[25]提出了离散化殖民竞争算法来解决混合流水车间提前和二次拖期惩罚和最小问题。2012年, 唐海波、叶春明、刘长平和柯军^[26]针对模糊交货期的流水车间调度问题的特点, 提出采用知识进化算法和粒子群优化算法的混合算法来求解问题, 从而得到问题的最优解, 通过采用所提算法对带模糊交货期的流水车间调度问题的实例进行测试, 并对比遗传算法和粒子群优化算法, 验证了混合算法的可行性和有效性。2013年, Mao K、Pan Q、Pang X等^[27]提出将拉格朗日松弛方法应用于炼钢-连铸过程的混合流水车间排产问题。2013年, Ebrahimi M、Ghomi S M T F、Karimi B^[28]针对交货期具有不确定性但服从正态分布的混合流水车间生产排产问题提出非支配排序遗传算法。2013年, 徐锋和步丰林^[29]针对混合流水装配车间作业排产问题, 以最小化最大完工时间与及时交货为排产目标, 提出一种基于精英保留策略的改进遗传算法对该问题进行求解。2014年, 夏凯^[30]在对模糊交货期流水车间调度问题和混合流水车间调度问题进行研究的过程中, 为了克服遗传算法收敛速度慢等缺点设计了一种混合遗传算法 (Hybrid Genetic Algorithm, HGA), 并通过仿真实验验证其有效性和快速性。同时, 针对遗传算法求解计算量大这一缺点, 引入了分布式估计算法, 并采用此改进算法对混合流水车间调度问题进行研究。2015年, 张洁、秦威、宋代立^[31]等针对加工时间不确定的混合流水车间动态调度问题, 提出一种基于滚动窗口的改进蚁群算法, 并设计基于交货期偏差容忍度的滚动调度策略, 以实现事件驱动机制下重调度发生频率的有效缓冲。2016年, 罗仁蔚^[32]为了提高装配效率, 既要研究同时度问题, 即在制造阶段的同时考虑同个产品零部件完工的时间间隔, 又要兼顾订单基于交货期的准时度问题, 并采用基于机器的编码方式建立调度模型, 利用基于精英策略的非支配排序算法对问题求解, 设计启发式算法产生部分初始种群,

最后针对该算法求解时存在的问题进行了分析并做了相应的改进。

(3) 负荷平衡问题: 2009 年, Zhan Y、Qiu C H、Xue K [33] 提出用混合遗传算法 (HGA) 使不同并行机之间的负荷达到平衡以达到减小最大完工时间的目的, 该算法将基于邻域搜索方法与遗传算法一起作为局部优化方法。2012 年 Keskinurk T、Yildirim M B、Barut M [34] 针对减小并行机相对负荷不平衡率问题, 提出蚁群优化算法性能优于遗传算法性能, 它具有保持种群分布多样性的特点, 较好地克服了遗传算法易出现未成熟收敛, 陷于局部最优的缺点。2015 年, 董晓婷 [35] 等针对可重入混合流水车间负荷平衡调度问题, 设计了一种基于工件加工流程的编码方法并结合时间窗约束与最大剩余时间规则进行解码, 并采用动态自适应差分进化算法作为全局优化算法对该问题进行求解。

(4) 生产成本问题: 2007 年, Janiak A、Kozan E、Lichtenstein M [36] 等人提出了一种解决混合流水车间成本问题的元启发式算法。该算法涉及三种成本: 半成品成本、成品储存成本以及不符合交货期的成品惩罚成本。2008 年, Fakhrzad M B、Heydari M [37] 针对带相同并行机的混合流水车间提前/拖期惩罚成本问题提出了一种将三种启发式算法相结合的有效算法。2013 年, Luo H、Du B、Huang G Q 等 [38] 提出了一种新的元启发式蚁群进化算法用以解决混合流水生产车间的生产效率和电力成本问题。2014 年, Behnamian J [39] 针对具有改机时间的混合流水车间中学习恶化的同时影响问题, 提出一种由变邻域搜索算法改进的帝国竞争算法, 并通过该算法解决生产调度和员工分配两大基本问题, 从而降低生产成本。2016 年, 常晓坤 [40] 提出了基于混合流水车间的两阶段随机规划模型, 提出了一种求解 L 型切面的算法, 在目标为成本期望最小的情况下, 给出了近似最优调度解。建立的模型针对于生产过程中的稳态, 以更好地适应实际生产的需要。2017 年, 戴隆州、吴永明、罗利飞等 [41] 针对降低混装线企业中的生产成本问题设计了一种新改进的粒子群算法, 算法中引入反向学习优化初始种群分布, 从而提高了算法的寻优效率。为避免算法陷入局部收敛, 将 Baldwinian 学习策略引入该算法中, 增加了种群中粒子的多样性, 提高了种群的全局搜索能力, 并结合具体实例验证了该改进粒子群算法能有效地解决混装线投产排序问题。

(5) 多目标优化问题: 2009 年, Ling-Li Z、Feng-Xing Z、Zheng G 等 [42] 提出了一种基于空闲时间窗的粒子群优化算法, 用于解决混合流水车间的多任务动态排产问题。2009 年, Zhang G、Shao X、Li P [43] 等人提出将粒子群算法和禁忌搜索算法相结合的方法解决多目标冲突的柔性车间排产问题。2010 年, Dugardin F、Amodeo L、Yalaoui

F^[44]针对混合流水车间最小化 makespan 和瓶颈资源利用率的最大化问题, 提出名为 Lorenz 非支配排序遗传算法 (L-NSGA) 的多目标遗传算法。2009 年, Lipi T F、Hasin M A A、Noor-E-Alam M D^[45]提出以可靠性为中心的多目标混合流水车间排产问题, 建立两个模糊推理系统 (Fuzzy Inference System, FIS), 第一个 FIS 根据加工时间、交货期和成本来决定每个工件的优先级。第二个 FIS 在每道工序根据机器的平均故障时间和平均修复时间来获取机器的可靠性和可用性。2012 年, 刘烽、游海^[46]等人针对混合流水车间多目标排产问题, 以最大流程时间和生产中所消耗的总能量最小为目标建立了混合整数数学规划模型, 将具有解决复杂组合优化问题的非劣排序遗传算法应用于求解多目标混合流水车间排产问题。2013 年, Mousavi S M、Mousakhani M、Zandieh M^[47]提出了一种用于解决以最小化 makespan 和最小拖期时间为双目标的混合流水车间排产问题的局部搜索算法。2013 年, 陶翼飞^[48]等提出混合流水车间调度问题的多目标优化目标函数以及该问题的约束条件, 提出一种新的基于 Pareto 分级的多目标进化算法建立优化模型, 不仅用新的初始种群生成策略, 还在进化过程中改进了遗传算子, 引入局部搜索策略和一种新的保优机制, 能够保证进化过程的收敛性和 Pareto 最优解集的求解质量。2014 年, Ying K C、Lin S W、Wan S Y^[49]等提出了一种迭代 Pareto 贪婪算法 (Iterative Pareto Greedy Algorithm, IPGA) 解决可重入混合流水车间最小化 makespan 和总延迟双目标问题。2015 年, 鲁建厦、胡海芬、董巧英^[50]等运用博弈理论来平衡混流混合车间多目标之间的矛盾关系, 并以各车间之间的纳什均衡作为最终的全局优化解。2015 年, 尹斌^[51]针对生产负荷平衡和产品相似度的三个生产排序问题, 构建了多目标的混流装配排序问题, 并综合考虑了物料平准化、生产负荷平衡和产品的相似度, 对混流车间进行了优化。构建了一个多目标的混流装配排序问题, 提出了一种基于动态发现概率和惯性权重的布谷鸟算法对模型进行求解, 实验算例结果综合考虑了物料平准化、生产负荷平衡和产品的相似度等因素, 体现该算法对求解混流装配排序的多目标模型运用的可行性和有效性。2015 年, 刘胜军、李霞^[52]针对混合流水生产车间调度问题, 以生产周期最短、机器加工成本最少和生产次品率最低为目标, 建立了多目标优化模型, 将 NSGA-II 算法应用于求解混合流水生产车间调度问题。2015 年, 刘祚时、马力、罗金平^[53]针对混合流水车间调度问题结合生产实际应用调度和多目标优化理论建立基于时间和交货期最优条件下的多目标调度问题模型, 提出一种小生境粒子群算法对模型进行优化求解。该算法采用 NSGA-II 的非支配排序策略和动态加权方法选择最优粒子, 利用粒子聚集距离的变异操作保证解的收敛性和多样性, 通过

仿真实验验证了模型的正确性和算法的有效性。



虽然混合流水车间排产问题的研究已有几十年的历史,研究深度和广度已经深入到了制造业的各个领域,研究方法也随着相关学科与优化技术的建立与发展而亦趋多元化,特别是基于计算智能、人工智能和实时智能的排产方法已成为排产方法的研究主流,但是由于制造系统的复杂性和多样性,目前尚没有也不可能有一种通用方法可以解决各类生产方式的优化排产问题。在实际生产排产研究中,不同生产系统要区别对待,而且在当今排产方法研究中,理论研究和生产实际存在不小差距。

作为本书研究内容主要应用对象的车辆制造领域,20 世纪初, Henry Ford 在汽车

工业创立世界上第一条流水生产线, 车辆制造生产排产的研究自此拉开帷幕。最早研究的代表有美国芝加哥伊利诺伊理工学院的 Thomopoulos N T^[54], 他首次提出汽车混合流水装配线平衡和排序问题, 以负荷平衡的最小总惩罚代价为优化目标建立数学模型, 并用启发式算法进行了求解。在汽车装配生产线中, 常用目标追踪法解决计划排产问题, 该方法虽然易于实现, 但容易陷入局部最优解, 全局搜索能力较差。Jin M、Wu S D^[55]针对目标追踪算法的缺陷提出了一种新启发式算法, 在该算法中重新给出了优良部分和优良剩余序列的定义, 并分析了它们与最优解的目标函数值之间的关系, 实验结果表明该方法可以获得较优解。Gagné C^[56]等人针对由组装、涂装和总装车间所构成的生产线, 首先建立了涂装与总装的单目标排产数学模型, 然后提出了一个基于蚁群算法的多目标表达式进行多目标优化。Drexler A、Kimms A、Matthiesen L^[57]针对汽车混流生产线上最重要的两类问题, 即生产负荷平衡和物料消耗平准化, 设计了一种分支定界算法, 实例证明该算法可以迅速获得问题的可行解。2010 年, 熊福力、严洪森^[58]等人以优化涂装车间油漆换洗费用为目标, 建立了一类整数规划数学模型。采用模型非线性约束线性化的方法并结合运用优化软件对模型进行求解。2012 年, 叶永伟、王晓恩和林海^[59]等人针对汽车涂装线的复杂排产问题, 提出了基于改进协同粒子群算法的新调度方法, 建立了汽车涂装线的最优排产模型。2012 年, 宋人选、张波^[60]等人以满足柔性涂装车间交货期为目标, 提出基于规则的启发式倒序排产算法。在我国新型化学工业道路的发展进程中, 汽车制造业已成为国民经济的支柱产业。面对当今复杂多变的市场需求、激烈的市场竞争, 一个有效的排产计划是提高设备利用率、加快物料流动、降低库存成本以及缩短生产周期、满足客户需求、提高市场竞争力的前提。因此, 有效的排产算法与优化技术的研究与应用, 已成为汽车先进制造技术领域的热点。

1.3 混合流水车间排产优化问题的发展趋势

混合流水车间排产问题的研究已有几十年的历史, 研究深度和广度已经深入到了制造业的各个领域, 研究方法也随着相关学科与优化技术的建立与发展而亦趋多元化, 特别是基于计算智能、人工智能和实时智能的排产方法已成为排产方法的研究主流。目前, 已提出的制造过程排产算法主要包括数学规划方法 (Mathematical Programming Methods)、启发式方法 (Heuristic Methods)、人工智能方法 (Artificial Intelligence

Methods) 和软计算方法 (Soft Computing Methods) 等各类排产方法。现阶段人工智能已经成为研究的热点, 利用人工智能方法解决混合流水车间排产优化问题也成为一大趋势, 在学术界排产优化问题也得到了广泛关注, 很多企业和研究机构都在进行相关研究。

混合流水车间是企业的一个部分, 是企业的生产部门。整个企业是一个实时运行的大系统, 每个企业也不是一个孤立的个体, 是整个产业中一个个体, 就像身体中的一个细胞, 企业要与整个行业或是多个行业中其他企业在经营和业务中发生关联, 车间也要与整个企业内部各个部门发生关联, 所以混合流水车间的发展趋势从过去到未来都不能脱离这种关联性, 无论科技如何进步和行业如何演变, 这种关联性都是一种客观存在。混合流水车间生产排产越是复杂, 越是要综合考虑各种影响因素, 才能真正找到进一步发展的道路。

(1) 从制定计划到执行计划, 从整个供应链的角度上研究车间生产排产过程, 增强企业内部各个系统之间关联。即进一步增强整个 MES (Manufacturing-Execution System) 系统从上面 ERP 系统到底层生产控制系统之间的整合, 车间生产排产系统与 MES 系统中其他系统模块整合。

(2) 引入最新的物联网技术, 打破以往车间作为黑箱生产单元的局限, 使得整个生产过程变成透明的可追溯的系统, 与生产追踪系统做到更强更灵活的配合, 与车间传感网络实现更好信息共享, 使得生产排产系统对生产线上各种状况具有更敏捷的反应。

(3) 增强车间现场调度与车间排产计划之间耦合程度, 增强这个耦合的关键是车间内部管理方式的改造, 突破原来管理关系上的壁垒, 进一步增强车间信息化和智能化水平。

(4) 深入研究新的排产优化算法, 并且能够处理大规模复杂运算, 能够找到更好并行运算方法, 在原有硬件平台上增强数据处理能力, 更好运用大数据找到车间运行规律, 有机重组和重构车间生产要素。

(5) 引入人工智能技术, 对于混合流水车间这类 NP-Hard 问题, 无论是传统的数学方法, 还是群智能进化算法在求解时间和求解精度方面总会出现力不能及的地方, 而人工智能技术在深度学习、自我学习、自主寻优方面越来越展现出强大的优势和生命力, 尤其对于求解 NP-Hard 问题。