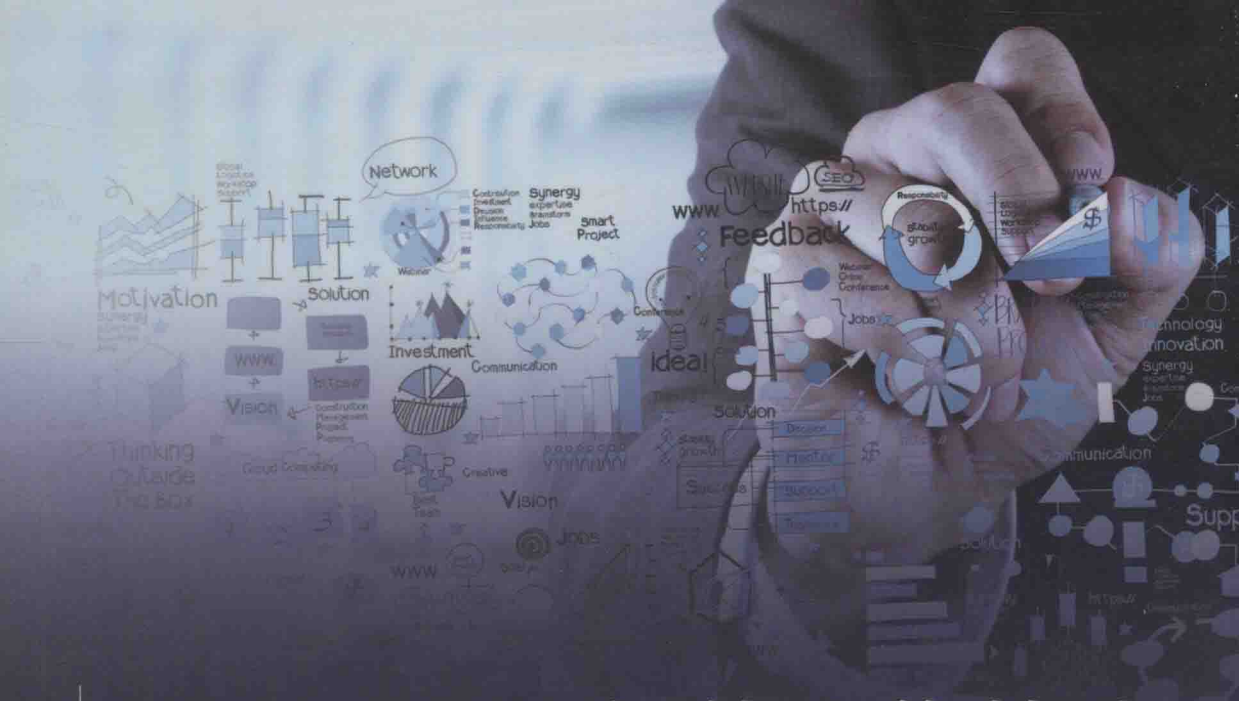


人工智能优化算法在柔性作业车间调度中的应用研究

RENGONG ZHINENG YOUHUA SUANFA ZAI ROUXING ZUOYE CHEJIAN DIAODU ZHONG DE YINGYONG YANJIU

焦璇　宁涛　黄明　梁旭　著

中国铁道出版社有限公司
CHINA RAILWAY PUBLISHING HOUSE CO., LTD.

人工智能优化算法在柔性作业车间调度中的应用研究

焦璇　宁涛　黄明　梁旭　著

中国铁道出版社有限公司
CHINA RAILWAY PUBLISHING HOUSE CO., LTD.

内 容 简 介

本书系统地介绍了优化调度算法的基础理论及其在柔性作业调度问题中的应用，主要探讨了生产实践中存在的一般多目标 FJSP、模糊多目标 FJSP 和动态多目标 FJSP 三方面问题，并使用经典测试集和实际生产车间调度数据对所提出的方法进行了有效性验证。

本书适合作为普通高等院校计算机专业本科生课程教材，也可作为相关行业工作人员的参考用书。

图书在版编目（CIP）数据

人工智能优化算法在柔性作业车间调度中的应用研究 / 焦璇等著. —北京：中国铁道出版社，2019.7
ISBN 978-7-113-24969-4

Ⅰ.①人… Ⅱ.①焦… Ⅲ.①人工智能－最优化算法－应用－车间调度－研究 Ⅳ.①F406.2-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 216027 号

书　　名：人工智能优化算法在柔性作业车间调度中的应用研究
作　　者：焦璇　宁涛　黄明　梁旭

策　　划：李志国　　读者热线：（010）63550836
责任编辑：张文静　卢　笛
封面设计：刘　颖
责任校对：张玉华
责任印制：郭向伟

出版发行：中国铁道出版社有限公司（100054，北京市西城区右安门西街 8 号）
网　　址：http://www.tdpress.com/51eds/
印　　刷：北京捷迅佳彩印刷有限公司
版　　次：2019 年 7 月第 1 版　2019 年 7 月第 1 次印刷
开　　本：710 mm×1 000 mm　1/16　印张：10.75　字数：188 千
书　　号：ISBN 978-7-113-24969-4
定　　价：35.00 元

版权所有　侵权必究

凡购买铁道版图书，如有印制质量问题，请与本社教材图书营销部联系调换。电话：（010）63550836
打击盗版举报电话：（010）51873659



前　言

随着市场全球化的迅速发展，作为国民经济重要基础产业的制造业的全球性竞争也日益加剧。自20世纪90年代以来，我国制造业逐渐成为推动国民经济发展的重要支柱，同时也面临着严峻的考验。在全球化市场竞争下，如何通过低成本、高质量、快速度及令用户满意的服务来提高企业的综合竞争力？如何改善生产管理机制以满足现代生产的产品需求规模小、产品结构复杂和订单交货期短的要求？研究怎样的策略才能更好地缩短理论研究与实际生产的距离？这些都是制造企业在有效提高管理水平时需要关注的核心问题，也是关系企业竞争成败的关键。

智能优化算法是一种以数学为基础，用于求解各种工程问题优化解的应用技术。作为一个重要的科学分支，它一直受到人们的广泛重视，并在诸多工程领域得到迅速推广和应用，如系统控制、人工智能、模式识别、生产调度、VLSI技术和计算机工程等。鉴于实际工程问题的复杂性、约束性、非线性、多极值、建模困难等特点，寻求一种适合于大规模并行且具有智能特征的算法已成为相关学科的重要研究目标和备受关注的研究方向。

车间调度是生产调度的重要组成部分，其效果的优劣对企业生产成本有很大的影响，因此对作为车间调度关键环节的柔性作业车间调度问题（FJSP）的研究受到越来越多的关注。虽然国内外学者在建模、最优解选择及算法应用等方面对该问题进行了大量研究，但由于实际生产调度环境复杂多变，使得各种优化算法无法完全发挥其功能。在问题规模变大时，当前方法无法适应问题解的状态空间的相应变化，导致求解效率下降。鉴于此，本书在介绍目前流行的智能优化算法的基础上，主要探讨了生产实践中存在的一般多目标FJSP、模糊多目标FJSP和动态多目标FJSP三方面问题，并使用经典测试集和实际生产车间调度数据对所提出的方法进行了有效性验证。

首先，针对实际作业车间调度多目标指标不同而产生冲突的问题，建立最小化交货期惩罚值、最小化最大完工时间、最小化加工机器负荷、最小化加工成本及最大化用户满意度等模型；提出了设置不同目标权重系数；引入

拥挤距离的选择策略对非支配解进行优化排序以平衡多目标。其次，针对多目标柔性作业车间调度中完工时间和交货期的要求模糊的问题，建立了模糊柔性作业车间调度问题的数学模型，提出了结合混沌理论局部优化策略和改进旋转角的混沌量子算法，解决了算法局部收敛及后期种群多样性丢失而过早收敛的问题。在上述研究基础上对问题的动态方面进行定义和分类，设计了基于重调度周期驱动和重调度事件驱动的滚动窗口策略，同时提出了用两条基因链分别表示机器分配链和工序排序链的双链编码方法。为了均衡调度效率和调度稳定性目标，又提出了混合多相量子粒子群算法对问题进行求解。最后，通过使用标准的 Kacem 测试集、Brandimarte 测试集和某机车厂加工车间的实际数据，分析了生产过程中存在的问题，设计了 FJSP 的调度原型系统，对如何将书中所提的方法应用于生产实践进行了研究，以便于方法的推广和应用。

本书由焦璇、宁涛、黄明、梁旭著。具体分工如下：第 1 ～ 6 章和第 8 ～ 10 章由焦璇撰写（字数约 142 千字），第 7 章由黄明撰写（字数约 5 千字），第 11 章由梁旭撰写（字数约 7 千字），第 12 章由宁涛撰写（字数约 11 千字）。大连理工大学刘晓冰教授审阅全书，并提出许多修改意见，在此表示感谢。

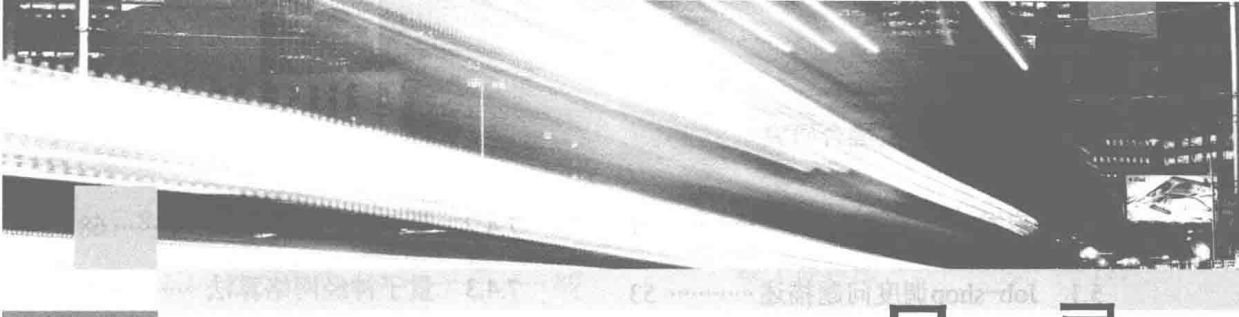
本书可作为计算机、人工智能、管理科学与工程等专业的研究生及高年级本科生的教材，也可作为从事人工智能优化算法设计与开发、车间调度等相关领域研究人员和工程技术人员的参考书。

本书获得大连市人民政府资助出版，获得辽宁省博士启动基金项目“基于量子算法的多目标模糊作业车间调度研究”支持（项目编号：20170520229）。

由于作者水平有限，编写时间仓促，书中疏漏和不妥之处在所难免，恳请读者和专家批评指正。

著　者

2018 年 8 月



目 录

第1章 绪论 …… 1

1.1 车间调度问题 …… 2

1.2 最优化问题 …… 5

1.3 智能算法在车间调度中的应用 …… 6

1.3.1 遗传算法在车间调度中的应用 …… 6

1.3.2 禁忌搜索算法在车间调度中的应用 …… 7

1.3.3 遗传—禁忌搜索算法在车间调度中的应用 …… 8

1.3.4 人工神经网络算法在车间调度中的应用 …… 9

1.4 本书的主要内容 …… 10

第2章 调度理论 …… 14

2.1 调度问题的基本理论 …… 14

2.1.1 基本概念 …… 14

2.1.2 调度问题分类 …… 16

2.1.3 调度问题的目标函数 …… 17

2.2 调度系统的控制技术 …… 18

2.3 调度算法 …… 18

2.3.1 调度算法设计 …… 19

2.3.2 调度问题的复杂性 …… 19

2.3.3 典型的调度算法 …… 20

第3章 车间调度问题 …… 27

3.1 调度问题的模型 …… 27

3.2 车间调度问题的描述方法 …… 28

3.3 车间调度问题的特点 …… 30

3.4 车间调度问题现状 …… 31

3.5 柔性作业车间调度问题 …… 32

3.5.1 柔性作业车间调度定义 …… 33

3.5.2 问题分类 …… 34

3.5.3 柔性作业车间调度模型 …… 40

3.5.4 实现方法 …… 41

第4章 禁忌搜索算法 …… 44

4.1 禁忌搜索算法流程 …… 45

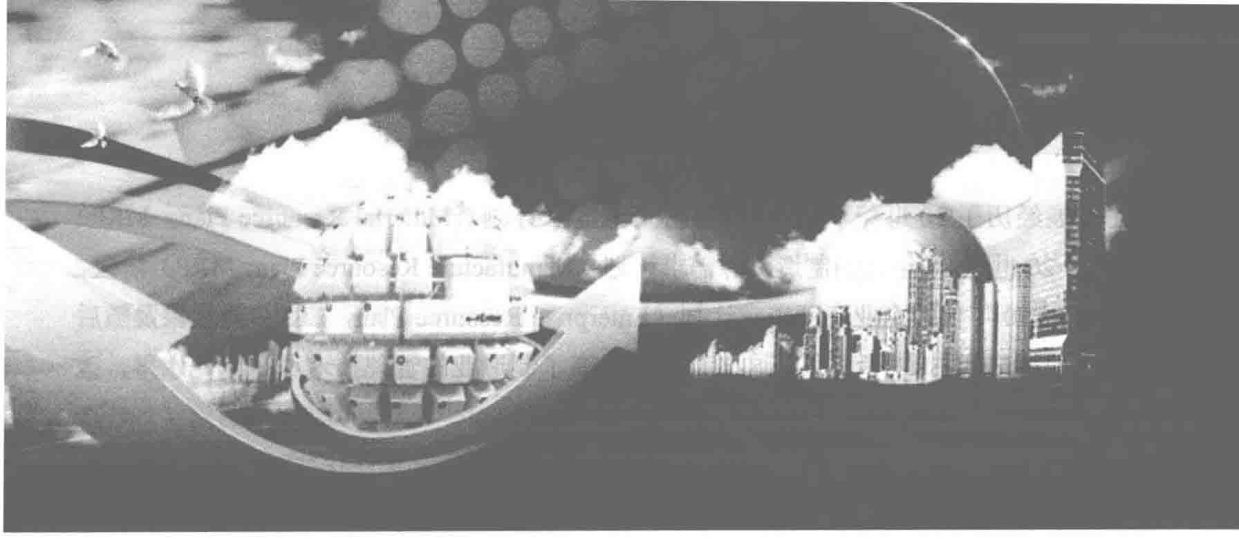
4.2 禁忌搜索的关键参数和操作 …… 46

4.3 禁忌搜索算法的收敛性 …… 50

第5章 启发式遗传算法 …… 51
5.1 Job-shop调度问题描述 …… 53
5.2 启发式调度算法 …… 53
5.3 问题的编码和初始群体的构成 …… 54
5.4 遗传操作算法 …… 55
5.5 启发式优先规则及算法描述 …… 57
第6章 细菌觅食优化算法 …… 59
6.1 细菌觅食算法的主要算子及其运算特征 …… 60
6.1.1 趋化算子及操作 …… 60
6.1.2 繁殖算子及操作 …… 61
6.1.3 迁移算子及操作 …… 61
6.2 改进的细菌觅食优化算法 …… 62
第7章 量子智能算法 …… 65
7.1 量子计算的特点 …… 65
7.1.1 量子态的叠加性 …… 65
7.1.2 量子态的相干性 …… 66
7.1.3 量子的并行性 …… 66
7.1.4 量子态的纠缠性 …… 66
7.2 量子位 …… 66
7.3 量子门 …… 67
7.4 几种量子优化算法 …… 67
7.4.1 量子退火算法 …… 67
7.4.2 量子微粒群算法 …… 68
7.4.3 量子神经网络算法 …… 68
7.4.4 量子遗传算法 …… 69
第8章 一般多目标柔性作业车间调度算法 …… 70
8.1 柔性车间调度问题 …… 71
8.2 柔性作业车间问题评价指标及数学模型 …… 73
8.2.1 评价指标体系 …… 73
8.2.2 目标函数 …… 75
8.2.3 约束条件 …… 76
8.3 基于旋转角的改进量子粒子群算法 …… 76
8.3.1 量子粒子群更新方程 …… 77
8.3.2 动态量子门旋转角的生成 …… 78
8.3.3 非支配解优化排序 …… 79
8.3.4 IQPSO的算法描述 …… 80
8.4 数据分析与验证 …… 81
8.4.1 算例分析 …… 81
8.4.2 实例验证 …… 83
第9章 模糊多目标柔性作业车间调度算法 …… 86
9.1 模糊FJSP问题 …… 87
9.1.1 问题定义 …… 88

9.1.2 问题分类……88
9.1.3 建模策略……89
9.2 模糊FJSP数学模型……90
9.2.1 优化目标函数……90
9.2.2 问题约束条件……92
9.3 基于混沌理论的混合量子算法……92
9.3.1 完工时间和交货期的模糊数表示……92
9.3.2 惩罚系数设计……94
9.3.3 混沌理论……95
9.3.4 混沌量子算法的实现……96
9.3.5 算法设计……98
9.4 数据分析与验证……101
9.4.1 编码设计……101
9.4.2 算例分析……101
9.4.3 实例验证……103
第10章 动态多目标柔性作业车间调度算法……108
10.1 动态FJSP问题定义……109
10.2 动态FJSP数学模型……111
10.2.1 优化目标函数……111
10.2.2 问题约束条件……113
10.3 动态FJSP调度策略……115
10.4 动态FJSP的混合量子粒子群算法……117
10.4.1 双链量子编码……117
10.4.2 基于Logistic映射的粒子群算法……119
10.4.3 量子旋转角更新个体……121
10.4.4 评价函数的计算……122
10.4.5 混合多相量子粒子群算法的实现……122
10.5 数据分析与验证……125
10.5.1 粒子表示……125
10.5.2 算例分析……125
10.5.3 仿真验证……127
第11章 基于前景理论的FJSP干扰管理……133
11.1 基于前景理论的扰动度量策略……134
11.1.1 问题界定与假设……134
11.1.2 基于前景理论的函数表示……134
11.1.3 模糊车间调度问题模型……135
11.2 JSP干扰管理求解算法……136
第12章 柔性作业车间调度案例……139
12.1 案例背景……139

12.2 作业车间调度管理系统…… 140
12.3 原型系统功能模块设计与实现…… 141
12.3.1 BOM管理模块…… 142
12.3.2 车间作业计划管理模块…… 143
12.3.3 多目标评价模块…… 145
12.3.4 车间管理模块…… 146
参考文献…… 148



第1章 绪 论

随着市场全球化的迅速发展，制造业的全球性竞争日益加剧。在发达的工业国家，制造业占整个国民经济的比重超过65%，它的发达程度成为衡量国家综合实力的重要标志。自20世纪90年代以来，我国制造业逐渐成为推动国民经济发展的重要支柱，同时也面临着严峻的考验[1]。在全球化市场竞争下，如何通过低成本、高质量、快速度和用户满意的服务来提高企业综合竞争力，从而适应产品需求的日益多样化要求，满足现阶段产品小批量生产比例变大、产品结构种类多及订单交货期要求短的特点，这些都是现阶段制造企业竞争成败的关键，因而，制造企业的生产管理水平显得尤为重要。

调度管理对企业生产管理有着重要作用，是影响企业内部资源配置及管理科学化的核心部分，它被定义为“将有限的资源在时间上分配给若干个任务，以满足或优化一个或多个目标”[2]。在实际制造过程中有很多的时间是消耗在与实际加工无关的过程中，因此有效的调度将直接影响制造业的成本和效益，也是作业车间能有序、可控和高效生产的核心保证。自20世纪50年代Johnson首先对两台机器有序加工型的流水车间调度问题进行系统研究[3]开始，国内外学者便陆续开展了对作业车间调度问题（Job-shop Scheduling Problem，JSP）的研究，并取得了一定的研究成果。FJSP作为一类复杂的组合优化问题，是JSP的扩展分支。互联网关于“Flexible Job-shop Scheduling Problem”的Google学术搜索结果已达到24 700项。制造业管理技术

的发展经历了20世纪70年代的物料资源需求计划（Material Resource Plan，MRP）阶段，20世纪80年代的制造资源需求计划（Manufacture Resource Plan，MRP）阶段，20世纪90年代的企业资源需求计划（Enterprise Resource Plan，ERP）阶段以及随后出现的第二代ERP等理念，这些都极大提高了制造业的管理技术和智能化水平，改善了生产环境并提高了产品制造效率。

当前我国制造业正面临着从量（生产规模）到质（产品多样化、响应能力）的转变，研究和发展适应我国制造业生产的FJSP管理方法对改善我国制造业生产环境、降低管理成本、提高生产效率、减少生产和流通环节的物料消耗有重要意义。在信息化日益密集化的环境下，为了适应市场的国际化竞争，改变产品生产过于单一，满足小批量产品多元化需求的现状，我国制造企业的生产计划管理面临着严峻挑战和前所未有的发展机遇。本书根据FJSP的特点，对问题进行模拟仿真并着重在量子计算理论基础上实现将量子算法与多种智能算法相结合，以期研究成果有助于开发先进的作业车间调度系统，从而节省企业加工成本和提高机器使用率，同时更大程度地满足客户对加工产品高效、快捷的需求。对柔性作业车间调度问题的研究具有一定的科学意义和实用价值，同时还对其他领域（如车辆调度、电力调度等）问题的解决有着很好的借鉴作用。

1.1 车间调度问题

作业车间调度问题是众多现实生产调度问题的简化模型。经过证实，作业车间调度属于最难组合的优化问题之一，即隶属于NP难题，对车间调度问题的研究具有十分重要的理论意义，它是目前研究最为广泛的一类调度问题。作业车间调度问题面向的是一个可拆解的问题，它是在查找能够符合现实生产而且满足某些条件限制的情况下，做到如何合理地使用已有的资源，合理有效地对生产中的每一个环节进行调度，如在生产过程中如何合理地安排生产的加工次序、生产的开始/结束时间等操作，达到实现生产效益的最大化目标。相对于现实中的调度问题，现在对调度理论的大部分研究进行的是理想状态下的操作，如减少了某些客观存在的条件，因此该研究与实际应用之间尚存在一定的差距。

JSP的调度目标是在满足不同约束条件下，合理安排工件及工序使之对不同性能指标进行优化，可将其定义为：有n个工件在m台机器上进行加工，每个工件有多道工序，每道工序可以在若干台机器中的一台上进行加工，且必须按照一定的次序

加工；每台机器可以对同一工件的若干工序进行加工，且不同机器的加工工序集无须相同[4]。

根据研究角度的不同，可对 JSP 进行不同分类。

1．按照加工特点分类

（1）静态车间调度问题（Static Job-shop Scheduling Problem）。静态车间调度是指在约束条件稳定情况下的调度，即生产任务、物料、操作处理时间等都是已知、稳定的。在调度开始的时刻，所有工件全部准备就绪，并且在加工过程中，所有工件及工序要严格按照既定路线和时间进行加工，即不考虑加工过程中可能出现的诸如机器故障、工件交货期临时变动等情况。

（2）动态车间调度问题（Dynamic Job-shop Scheduling Problem）。动态车间调度是指生产条件变化情况下的调度，如加工时间变化、设备故障等。当遇到机器故障等突发情况时，调度能够根据车间的加工能力随时进行响应并对工件进行及时的再调度，以保证加工生产过程中的性能指标始终保持最优或次优状态。

2．按照工件和车间构成分类

（1）开放车间调度问题（Open Job-shop Scheduling Problem）。工件加工工序没有路线约束的限制，即工件的加工可以从任意一道工序开始，在任意一道工序结束，各工序间没有先后约束关系。

（2）流水车间调度问题（Flow Job-shop Scheduling Problem）。在这类问题中，加工车间是由多台功能不同的机床组成，每个待加工的工件都有多道工序，并且各个工件的加工路线相同，每道工序只能在一台机床上加工，而且同一工件的多个工序加工有先后顺序[5]。

（3）单机调度问题（Single Machine Scheduling Problem）。在这类问题中，加工车间仅有一台机床，所有工件都在同一机床上加工。每个待加工工件只有一道工序。

（4）并行机调度问题（Parallel Machine Scheduling Problem）。在这类问题中，加工车间具有多台完全相同的机床，每个待加工工件只有一道工序，工件可以在多个机床中任意选择一台进行加工。

（5）作业车间调度问题（Job Shop Scheduling Problem）。在这类问题中，加工车间具有多台功能不同的机床，机床可以被任意布局，每个待加工工件包含多道工序，每道工序在一台机床加工，且工件的加工路线是不固定的。

归纳总结上述不同类型的问题，JSP 具有如下几个特点[6][7][8]：

计算复杂性：JSP 是一个 NP 难题，其可行解的数量随着规模的变大而呈指数级

增加。例如，当求解 8 工件 ×8 机器问题时，如果优化目标是加工时间最短，则可能的组合数将达到 $(8!)^8$ 个。

多目标性：实际生产中的加工要求通常是对多个目标性能的综合结果，多个指标要求之间不可避免会产生冲突，该性质根据实际情况权衡取最适宜的值，经常使用的指标有：最大完工时间、交货期、机器总负荷、生产成本以及拖期时间和库存等。

不确定性：实际生产制造过程中可能存在很多突发性事件（如原材料不足、机器临时故障、技术工人短缺、机器和原料耗损过多等），而理想的确定加工信息很难在加工前获得。

动态性：动态性是对实际生产制造过程的真实描述，加工的工件按顺序排队等待加工，不同的工件从系统入口进入后被加工，加工完成后则从系统出口离开。

离散性：JSP 是典型的离散优化问题。因为在整个加工过程中，与工件相关的大多是离散的、非线性的事件，像工件开始加工时间、订单分配、订单变更、机器故障和人员调动等，所以可以利用离散系统建模、数学规划与仿真等方法对该问题进行研究。

多约束性：在一般情况下，工件的加工路线将受到加工环境等约束，从而要求各工序间具有先后约束关系。同时，加工工件的机器、人员及物料运送设备是已知的，工件必须在满足这些客观约束条件下选择适当的机床进行加工。

目前对 FJSP 研究的热点是综合应用多种智能算法，并且以时间性能是否达到最优作为评价方法优劣的重要指标 [9]。求解 FJSP 的优化算法大致可分为四类：直接派工法（最早交货期优先、最短加工时间优先和最长加工时间优先），此类方法可以短时间内获取近似最优解，但仅能处理比较简单的调度问题；精确算法（割平面法、分枝定界法、动态规划法和网络流法等），此类算法虽然可以根据调度问题的特点，采用数学规划理论来抽象约束条件和目标函数，并最终求取最优解，但是由于方法对计算机性能有较高要求而使最优解的获取局限于理论层面；经典启发式算法（构造法、两阶段法、改进法）；亚启发式算法（细菌算法、鱼眼算法、蜂群算法、遗传算法、蚂蚁群算法以及人工神经网络等）[10]。

因为进化算法具有结构简单、适用面广并且有很强的健壮性特点，所以它经常被用来求解各类优化问题，该类算法中种群的进化是通过群体搜索策略与个体间进行信息交互来完成的，以粒子群算法和遗传算法为基础的方法应用最为广泛。粒子群算法由于具有记忆性强和易于实现的优点，近年来受到越来越多的关注和应用。例如，H. Zhang 等 [11] 运用粒子群优化算法对资源受限制项目调度问题进行求解，过

程中设计了基于优先列表和置换的粒子编码方式。B. Liu 等[12]在将粒子群优化操作算子和局部搜索算子结合的基础上，运用基于 Memetic 算法的粒子群算法对置换流水车间调度问题进行求解。D. Y. Sha 等[13]通过改进粒子群算法的速度更新公式，并结合禁忌搜索算法 JSP 的组合优化进行求解。

1.2 最优化问题

最优化是人们在工程技术、科学研究和经济管理等诸多领域中经常遇到的问题。随着科学技术尤其是计算机技术的不断发展，以及数学理论与方法向各门学科和各个应用领域的广泛、深入渗透，最优化理论和技术必将在社会的诸多方面起着越来越大的作用。

优化技术是一种以数学为基础，用于求解各种工程问题优化解的应用技术，作为一个重要的科学分支一直受到人们的广泛重视，并在很多工程领域得到迅速推广和应用，如系统控制、人工智能、模式识别、生产调度、VLSI 技术和计算机工程等。实现生产过程的最优化，对提高企业生产效率与效益、节省资源具有重要的作用[14]。

同时，优化方法的理论研究对改进算法性能、拓宽算法应用领域、完善算法体系同样具有重要作用。因此，优化理论与算法的研究是一个具有理论意义和应用价值的重要课题。好的算法可以优化作业计划编制，提高资源利用率，缩短工期，降低成本。

到目前为止，研究调度问题的主要理论是产生于 20 世纪 50 年代的经典调度理论（Classical Scheduling Theory）。一般认为，Johnson 于 1954 年对两台机器下作业排序问题的求解是经典调度理论产生的重要理论。他首先在文献中提出了 n/m/F/Cmax 问题的优化算法，并且在此基础上给出了针对 n/3/F/Cmax 中的一些特殊情况的算法[15]。Jackson 在他的一个研究报告里首先提出了 EDD 规则[16]；Smith 也提出了单机（Single Machine）问题的几个优化规则[17]。这段时期的研究成果主要是提出了针对特殊的和规模较小问题的解析优化方法，一般仅适用于单机和简单的流水车间（Flow-shop）问题，研究范围较窄，但这些早期的工作为经典调度理论后来的发展奠定了基础。

20 世纪 60 年代，人们开始用一些普通的优化方法来解决调度问题，主要包括数学规划方法（如分枝定界法和动态规划法），如 Story 等[18]的研究，同时也有人开始将启发式算法应用到调度问题的研究中，如 Gere[19]、Gavett[20]提出的方法。P. Mellor

系统地总结和归纳了调度问题的有关定义和概念，包括研究调度问题的 12 条假设、27 个调度目标和若干解决问题的方法[21]，着重研究调度理论同实际生产脱节的问题；Conway 等（1967）提出了调度问题的描述系统[22]。20 世纪 60 年代末期，一个完整的经典调度理论体系开始初步形成。

20 世纪 70 年代，问题复杂性方面理论逐渐问世[23][24]，人们发现大多数调度问题都属于 NP-complete 问题或 NP-hard 问题，找到解决这些问题的快速算法存在一定的难度，因此启发式算法开始成为求解调度问题的重要方法，如 Campvell、Gupta、Baker、Danwnbring、Garey 和 Gonzalez 等[25-30]提出了该领域重要的算法。Panwalkar 等回顾了二十年来调度理论的研究情况，总结和归纳出 113 条调度规则，并对其进行了分类[31]。20 世纪 70 年代末期，经典调度理论开始趋向成熟。

20 世纪 80 年代初期，Stephen 等从三方面对调度问题进行了重新考察，并根据调度理论在实际中的应用情况，对未来发展做出了分析和预测，认为调度理论与实际的结合已经成为调度研究的首要问题[32][33]。这个富有挑战性的课题吸引了来自机械制造、自动化技术、计算机科学、企业管理、系统工程和应用数学等多个领域的学者，许多跨学科领域的技术和方法被应用到调度问题研究中[34][35]，调度研究成为一种跨学科的研究领域。其中一项最引人注目的工作是以 Carnegie-Mellon 大学的 M.Fox 为代表的学者们开展的基于约束传播的 ISIS 研究，这项研究标志了人工智能真正开始应用于调度问题。20 世纪 80 年代后期，Rodammer 等（1988）总结了生产调度的理论和实践方面的最新研究进展[36]，从七方面论述了有关生产调度的技术和方法，包括传统的调度理论、控制理论、人工智能和离散事件仿真等，同时讨论了 MRPII、JIT、和 OPT 等技术的应用情况，研究认为，生产调度无论在理论还是实践上都已经开始打破传统的界限。20 世纪 90 年代，对调度问题的研究进入了高潮，各种研究手段得到了充分发挥，同时不断有新的研究工具被应用到调度研究中，比较有代表性的技术包括遗传算法、人工神经网络、Petri 网、模糊数学和系统仿真等[37-43]。智能调度已成为调度研究的主流，其中分布式人工智能技术，特别是多代理技术在调度研究中的应用成为该领域新的发展方向。

1.3 智能算法在车间调度中的应用

1.3.1 遗传算法在车间调度中的应用

遗传算法（Genetic Algorithm，GA）是 20 世纪 60 年代由美国 Michigan 大学的

J. H. Holland 教授等人提出的[44]。GA 以生物进化过程为背景，模拟生物进化的步骤，将繁殖、杂交、变异、竞争和选择等概念引入算法中。通过维持一组可行解，并通过对可行解的重新组合，改进可行解在多维空间内的移动轨迹或趋向，最终接近最优解。它是一种全局优化算法，克服了传统优化方法容易陷入局部极值的缺点。

Florida 大学的 J. E. Biegel 和 J. J. Davern 最早于 1992 年提出了“用于作业车间调度的遗传算法”，浙江大学纪树新于 1995 年发表了题为《基于遗传算法的作业车间调度系统研究》的博士论文[36]。遗传算法在调度领域中已得到了较为广泛的应用，尤其是 20 世纪 90 年代以来，国内外学者发表了大量应用遗传算法求解调度问题的文章。几乎每一类调度问题都涉及遗传算法的应用，因此可以认为遗传算法具有较好的适用性。

遗传算法的有效性一般与其相应参数的选择有关，如周泓等（1997）设计的 Flow shop 得到满意的效果[45]。王成尧等（1998）在用遗传算法研究模糊加工时间单机 R/T 调度问题时发现，使用不同的遗传因子，算法的有效性存在一定差异，使用单一遗传因子的有效性较低，而将这些因子混合使用时，算法有效性较高，并且随着问题规模的增大，算法有效性呈下降趋势[46]。另一方面，不同的迭代次数相对于不同的遗传因子得到的结果也不同。王秀利，吴惕华（2001）提出了一种两机成组作业流水车间优化调度的遗传算法。该遗传算法分两层：一层优化组内作业排序，另一层优化组排序[47]。孙志峻，朱剑英（2001）用遗传算法研究了具有柔性加工路径的作业车间的智能优化调度问题，提出了一种将遗传算法和分派规则相结合的调度算法，同时考虑加工计划与生产调度，避免了加工计划和生产调度相脱节的弊端[48]。郭文胜，殷国富（2001）设计了一种调度遗传算法用于任务类型相同的多个项目在多个虚拟车间的调度问题[49]。徐琪等（2002）通过对遗传算法关键因素的讨论，研究了 SFSDSS 设计的优化方法[50]。孙志峻，乔冰等（2002）采用遗传算法进行柔性作业车间调度研究，针对柔性作业车间问题提出了一种新颖直观的基因编码方法以适用于批量调度[51]。孙志峻，朱剑英（2002）用遗传算法研究了含机器人的作业车间双资源调度优化问题，提出了一种将遗传算法和分派规则相结合的调度算法，将加工机床和机器人合理地分配给加工任务，使评价指标获得最优[52]。

1.3.2 禁忌搜索算法在车间调度中的应用

禁忌搜索（Tabu Search 或 Taboo Search，TS）的思想最早由 Glover 在 1986 年提出，它是对局部邻域搜索扩展后的一种全局逐步寻优算法[53]。禁忌搜索算法在组合

优化领域中的应用非常广泛。在禁忌搜索算法刚刚提出来的20世纪80年代，人们主要用它来解决旅行商（TSP）问题、0-1背包问题和图节点着色等问题，如Rego（1998）研究了TSP问题的禁忌搜索算法；自从J. Hurink于1994年将禁忌搜索算法应用于Job-shop问题后，禁忌搜索算法在调度领域获得了蓬勃的发展，时至今日，调度问题仍是禁忌搜索算法应用最广泛的领域。例如，尹新等（1995）提出将禁忌搜索方法应用于解最小化拖期任务数的并行多机调度问题[54]；Nowicki等（1996）和BekDay等（1998）分别提出了求解Flow shop的禁忌搜索算法；Verhoeven（1998）研究了资源受限制的调度问题的禁忌搜索算法；Lutz等（1998）利用禁忌搜索算法确定生产线中缓冲区的位置和大小；James等（1998）利用禁忌搜索算法改善E/T调度问题的优化性能[36]；胡斌、黎志成（1999）提出了一个面向JIT的生产作业计划禁忌搜索算法[55]；衣杨等（2000）提出了并行多机成组工件调度的禁忌搜索方法[56]；童刚等（2001）提出了一种用于Job-shop调度问题的改进禁忌搜索算法，该方法采用了Hash技术存储禁忌表[57]。此外，禁忌搜索还被应用到图分区、频带分配、0-1背包问题、时间表设计、满意度问卷、电力系统设计与调度、聚类问题、间歇化工设计、卫星通信、计算机结构设计、光学工程等领域，如Costamagna等（1998）提出了设计电信网络的一个禁忌搜索算法，Martins等（1998）将禁忌搜索算法应用于公交车网络的设计问题，王凌等（1998）设计了QAP问题的一个自适应并行禁忌搜索算法等[58]。目前禁忌搜索算法仍然处于发展过程中，并且其应用领域有继续拓宽的趋势。

1.3.3 遗传—禁忌搜索算法在车间调度中的应用

H. Muhlenbein[59]最早把记忆功能引入到GA中，而TS的创始人F. Glover的文献[53]被认为是GA与TS进行混合的理论基础，其从广义的范围对GA与TS进行分析和比较，但并未提出具体的混合策略。

由于遗传算法的结构是开放的，与具体问题无关，所以容易和其他算法混合。Lin等人把遗传算法和模拟退火算法进行混合，生成了模拟遗传算法；Moscato提出了把遗传算法和禁忌搜索相结合的方法并进行了深入研究。

吴悦和汪定伟在文献[60]中提出用遗传/禁忌搜索混合算法求解可变加工时间的调度问题，基本结论是禁忌搜索算法对于求解混合最优问题COP（combinatorial optimization problems）是非常有效的，它在邻域中重复进行搜索准则，快速而高概率地向好的方向移动。但由于参数的选取对最后获取的解具有直接的影响，在算法