

分类号:TP301

10710-2018125013



长安大学

硕士学位论文

考虑生产准备和工件分批的
柔性作业车间调度问题研究与系统开发

李田丰

导师姓名职称

朱斌 副教授

申请学位类别

工学硕士

学科专业名称

机械工程

论文提交日期

2021 年 3 月 20 日

论文答辩日期

2021 年 5 月 24 日

学位授予单位

长安大学

Research on Flexible Job Shop Scheduling Problem and System Development with Production Preparation and Job Batch Splitting

A Thesis Submitted for the Degree of Master

Candidate: Li Tianfeng

Supervisor: Prof. Zhu Bin

Chang'an University, Xi'an, China

摘 要

车间调度是制造系统生产问题的核心，企业需采用较优的车间生产调度方案，以缩短产品的生产时间，提高生产效率，进而获得更大的效益。在车间实际生产过程中，通常采用柔性调度的方式，且工件通常是多品种批量生产的。在开始加工之前，需要进行工件安装、刀具更换等生产准备工作。本文对考虑生产准备和工件分批的柔性作业车间调度问题进行研究，提出一种基于改进遗传算法的求解方法，对本文所建立的模型进行求解，并结合车间调度过程中的实际需求开发柔性作业车间调度系统。

为了研究考虑生产准备和工件分批的柔性作业车间调度问题，首先，论文先研究一般的柔性作业车间调度问题，对其数学模型、调度优化目标及可行解的表示方法进行研究。

其次，结合车间实际生产过程中的特点，对生产准备时间和批量调度问题进行研究，建立考虑生产准备和工件分批的柔性作业车间调度数学模型。对常用的求解方法进行研究，分析不同求解方法的特点，并根据本文数学模型主要解决的问题选择合适的求解方法。结合车间调度实例对遗传算法的求解过程进行研究，并分析算法解决本文所建模型的局限性。

然后，研究基于改进遗传算法的求解方法，对批量调度问题中工件分批方法进行研究，并提出一种柔性分批方法。改进染色体的编码方式、交叉和变异操作，解决本文所研究的问题。结合车间调度实例，验证本文求解方法的有效性，并分析分批加工对工件最大完工时间的影响。

最后，分析车间调度的特点和实际需求，结合本文提出的求解方法，对柔性作业车间调度系统进行开发设计。开发完成调度过程所需的功能，并对系统的运行流程进行研究。采用 C# 与 MATLAB 相结合的编程方法，完成系统的开发，并用实例测试系统运行的可行性。

关键词：柔性作业车间调度，生产准备时间，工件分批，改进的遗传算法，系统开发

Abstract

Job shop scheduling is the core of the production problems in the manufacturing system. Enterprises need to adopt a better workshop production scheduling plan to shorten the production time of products, improve production efficiency, and obtain greater benefits. In the actual production process of the workshop, flexible methods are usually used to complete the scheduling, and the work-pieces are usually produced in batches of multiple varieties. Before starting processing, it is necessary to perform production preparations such as installing work-pieces and changing tools. This thesis focuses on the flexible job shop scheduling problem with production preparation and job batch splitting. Proposing a solution method based on improved genetic algorithm to solve the model established in this paper. And by combining the actual needs in the workshop scheduling process to develop a flexible job shop scheduling system.

In the paper, in order to study the flexible job shop scheduling problem with production preparation and job batch splitting. It firstly studies the general flexible job shop scheduling problem. And researching the mathematical model, scheduling optimization goals, and representation methods of feasible solutions of the scheduling problems.

Secondly, this thesis combines the characteristics of the actual production process in the workshop to study the production preparation time and batch scheduling issues, and establishes a mathematical model of the flexible job shop scheduling problem with production preparation and job batch splitting. To study the commonly used solution methods, analyze the characteristics of different solution methods, and choose the appropriate solution method according to the main problem solved by the mathematical model in this paper. It studies the solving process of genetic algorithm with examples of workshop scheduling, and analyzes the limitations of the algorithm to solve the model in the paper.

Thirdly, to study the solution method based on improved genetic algorithm. Research on the method of batch division of work pieces in the batch scheduling problem, and proposing a flexible batch splitting method. By improving the coding method of chromosomes, crossover and mutation operations, to solve the problems studied in this paper. Combined with the examples of workshop scheduling, to verify the effectiveness of the solution method in this

paper, and analyze the impact of batch processing on the maximum completion time of the work piece.

Finally, it analyzes the characteristics and actual needs of workshop scheduling, combined with the solution method proposed in this thesis, to develop and design a flexible job shop scheduling system. Developing the functions needed to complete the scheduling process, and to study the operating process of the system. Using C# and MATLAB mixed programming method to complete the development of the system, and to test the feasibility of the system operation with examples.

Key words: Flexible job shop scheduling, Production preparation time, Job batch splitting, Improved genetic algorithm, System development

目 录

第一章 绪论	1
1.1 研究背景与选题来源	1
1.1.1 研究背景	1
1.1.2 选题来源	2
1.2 研究目的与意义	2
1.2.1 研究目的	2
1.2.2 研究意义	3
1.3 国内外研究现状	3
1.3.1 柔性作业车间调度研究现状	3
1.3.2 批量调度研究现状	5
1.4 论文研究内容	6
1.5 论文结构及章节安排	6
第二章 柔性作业车间调度问题研究	9
2.1 车间调度问题概述	9
2.2 柔性作业车间调度问题	10
2.2.1 柔性作业车间调度问题数学模型	11
2.2.2 柔性作业车间调度问题的分类	13
2.2.3 柔性作业车间调度问题的特点	14
2.3 柔性作业车间调度问题的表示方法	15
2.3.1 析取图	15
2.3.2 甘特图	16
2.4 柔性作业车间调度问题的性能指标	17
2.5 本章小结	19
第三章 考虑生产准备和工件分批的柔性作业车间调度问题研究	21
3.1 问题研究	21
3.2 考虑生产准备和工件分批的柔性作业车间调度数学模型	25
3.2.1 问题描述	25
3.2.2 数学模型	26
3.3 模型求解方法	27
3.3.1 方法分类	27
3.3.2 方法选择	28
3.3.3 方法分析	34

3.4 本章小结	35
第四章 基于改进遗传算法的求解方法研究	37
4.1 工件分批方法研究	37
4.2 遗传算法的改进	39
4.2.1 改进编码方式	40
4.2.2 选择操作	42
4.2.3 改进交叉操作	42
4.2.4 改进变异操作	43
4.3 实例验证	44
4.4 本章小结	51
第五章 柔性作业车间调度系统开发	53
5.1 系统需求分析	53
5.2 系统总体设计	54
5.2.1 系统设计原则	54
5.2.2 系统功能设计	54
5.2.3 系统运行流程	55
5.3 系统界面设计与功能实现	56
5.3.1 系统界面设计	56
5.3.2 系统实现技术	56
5.4 实例测试	57
5.5 本章小结	66
结论	67
参考文献	69
攻读学位期间取得的研究成果	75
致谢	77

第一章 绪论

1.1 研究背景与选题来源

1.1.1 研究背景

智能制造理念推动着制造业转型升级，这种生产模式已经成为制造业未来的发展趋势。在经济全球化的背景下，市场对产品的需求以及企业的生产特点呈现出多变性和不可预测性。应对这些特点，产品的更新日益加快。面对不断变化的市场需求，企业需采用柔性的生产制造模式和科学的运作管理方法，在短周期内高效率、高质量、低成本地开发出不同的产品。车间调度是车间生产活动中非常重要的一部分，柔性制造系统的生产作业与调度是指在满足制造系统性能指标和约束条件的前提下，为工件合理地安排加工时间，分派工件的加工先后次序、加工设备等，对生产时间和成本等调度目标进行优化^[1]。根据车间内现有的生产资源，分配生产任务，以充分利用资源提高生产效率，高效率地完成生产任务。

车间生产调度是制造系统的基础，在满足约束条件的情况下，合理的调度方案能够获得较优的生产性能指标。通过优化生产性能指标，高效率地完成车间生产任务，帮助企业降低成本、增加收益、提高竞争力。由于车间调度问题有多种约束关系，且调度过程是离散的，对这一类问题的求解过程较为复杂^[2]。车间调度是指在满足生产资源等约束的前提下，通过对工件在机器上的加工顺序进行排序，完成调度目标的优化，获得最优的车间调度方案^[3]。

在作业车间调度问题（Job Shop Scheduling Problem, JSP）的研究中，机器的功能有限，限制了工件工序对机器的选择性，不能根据实际需求选择可加工的机器。这种车间调度方式有一定的局限性，需要寻求更优的车间调度方法。相关学者对机器可选择的柔性作业车间调度问题（Flexible Job Shop Scheduling Problem, FJSP）进行研究，在该调度问题中，机器有多种不同的功能，工件的工序可在不同的机器上加工，这种调度方式更加符合车间实际需求。FJSP 中机器的可选择性，提高了所研究问题的复杂性，该类调度问题的求解过程较为复杂^[4]。FJSP 中工件的每道工序可在多台不同的机器上加工，工件的可选择性较大，避免了 JSP 中工件的每道工序只能在特定的机器上加工的约束，更加符合实际车间生产过程。FJSP 通过解决机器的选择和工序排序问题，将加工任务分配到

机器上，并对工件在机器上的加工顺序进行排序，以完成对调度目标的优化^[5]。

柔性作业车间生产调度可根据企业的生产要求，解决工件工序在车间内每台机器上的分配问题，给出合理的调度方案，获得最优的调度目标。在非柔性生产过程中，工件的每道工序由指定的加工设备完成，限制了工序对加工机器的选择性。作业车间内工件的加工时间难以精确预知，加工结束时间和产品交货期等数据不能精确给定，只能给出大致的区间^[6]。柔性作业车间具有并行加工、多功能加工、分布式加工、批量加工、动态变化和不确定性等特性。

在车间实际生产调度过程中，工件通常是批量加工的。在研究这类问题时，要考虑所选择的批量加工方式对工件最大完工时间的影响。工件批量加工时，需选择合适的方法对工件进行批量划分。这类调度问题主要研究机器选择、工件分批和子批工序排序问题。通过对工件进行分批加工，增加生产过程中的柔性，提高车间的生产效率。

在工件开始加工之前，需要进行工件的安装、定位及刀具的更换等生产准备工作，完成生产准备工作所需的准备时间不能忽略。因此，研究考虑生产准备和工件分批的柔性作业车间调度更能满足企业的实际生产需求，可用于解决车间实际调度问题，为车间生产提供合理的调度方案。

1.1.2 选题来源

陕西省科技重大专项智能制造资助项目（2018zdzx01-01-01）

1.2 研究目的与意义

1.2.1 研究目的

在车间实际生产过程中，常会遇到多品种、多批次批量调度问题，作业车间调度具有随机性。本文研究目的主要有以下两点：

（1）通过分析 FJSP 的特点，建立考虑生产准备和工件分批的 FJSP 数学模型。并对有生产准备时间和工件分批约束的调度问题进行分析，研究不同的分批方式对调度优化目标的影响。提出一种柔性分批方法，并对遗传算法进行改进，解决工件分批、机器选择和子批工序排序等问题，为车间生产提供合理的调度方案。

（2）分析车间调度过程中的实际需求及面临的主要问题，开发柔性作业车间调度系统，解决实际调度问题。在系统中输出调度问题的最优调度方案及相关的优化结果，为

车间实际调度过程提供决策支持。

1.2.2 研究意义

在全球化经济体系中，一个企业的核心竞争力是能够高效率、高质量地满足市场的动态需求。在多品种、批量生产模式下，应对多变的市场需求，需要快速制定车间调度方案。结合车间实际生产过程的特点，对考虑生产准备和工件分批的 FJSP 进行研究。同时，建立一种能够根据车间生产任务快速做出响应的柔性作业车间调度系统。

车间调度系统是制造系统生产管理的核心，在调度系统内采用优化的求解算法解决实际调度问题。用智能调度方法解决人工经验排产调度的局限性，提高车间调度的效率和准确性。同时，根据车间分配的生产任务，能够快速制定最优的车间调度方案，以提高车间的生产效率，降低生产成本。因此，对 FJSP 的研究具有十分重要的现实意义。

1.3 国内外研究现状

1.3.1 柔性作业车间调度研究现状

FJSP 是复杂的组合优化问题，学术界提出很多方法来解决这类问题。对 FJSP 的研究最初使用的是运筹学方法，随着人工智能方法的不断发展，智能优化算法及其改进算法不断地运用到求解 FJSP 中，通过计算机的迭代计算进行优化，能够在短时间内解决车间调度中复杂的组合优化问题，给出调度问题的最优解，确定车间的调度方案。

运筹学中的数学规划法和分支定界法可用于解决 FJSP，数学规划法是将调度问题转化为数学模型，建立调度问题约束关系和目标函数的数学表达式，对问题进行求解。分支定界法是根据规则将所求问题的可行解空间分为若干子空间，在获得问题的最优解时删除可行解中不符合条件的子空间^[7]。数学规划方法是早期研究 FJSP 的一种常见方法。Mokhtari 等用数学规划法，解决有机器故障率和路径柔性约束的车间调度问题^[8]。文献[9]以总延迟时间为优化目标建立 MILP 模型解决产品的投产排序问题，确定产品的投产顺序。文献[10]对几种 FJSP 的 MILP 模型进行分析。但是，基于运筹学的算法求解效率低，只能解决小规模 FJSP，对于大规模、多约束的 FJSP 无法有效求解。

随着研究的深入，启发式算法逐渐发展起来，根据调度规则解决 FJSP。优先分派规则是一种常用的启发式调度算法，该规则按优先权决定待加工工序的排序方法^[11]。车忠志等采用启发式算法解决多目标 FJSP^[12]。Ziaee 提出一种解决大规模 FJSP 的启发式算

法^[13]。苏子林等采用组合优先规则解决以完工时间、关键机器负荷和总负荷为调度优化目标的 FJSP^[14]。启发式算法在求解车间调度问题时, 根据规则对问题进行局部优化, 算法的求解复杂度低, 求解效率高, 易于实现。能够快速给出车间调度方案, 可用于解决大规模的 FJSP。

人工智能技术的不断发展, 为解决 FJSP 提供了一种较好的方法。彭建刚等采用智能优化算法解决多目标 FJSP 这类复杂的组合优化问题等^[15]。与传统的运筹学方法和启发式算法相比, 智能优化方法在解决复杂的车间实际生产调度问题上有很大的优势, 通过计算机进行迭代计算, 在问题的可行解空间内搜索局部最优解, 搜索效率高。

遗传算法是一种常用的通过模拟进化过程解决 FJSP 的智能优化方法, 可以自动搜索所研究问题可行解空间内的最优解, 并进行迭代优化。张国辉等采用一种有效的染色体编码方法对遗传算法进行改进, 对 FJSP 进行调度优化^[16]。方水良等采用链结构进行编码, 并对初始化方法进行优化, 解决柔性车间调度问题^[17]。张腾飞等采用改进遗传算法, 产生具有基因多样性的初始解, 解决 FJSP^[18]。仇永涛等提出一种新的混合进化算法和知识的多目标车间调度方法^[19]。吴树景等对遗传算法的搜索方式进行改进, 对 FJSP 的调度目标进行优化^[20]。

差分进化算法通常与其它算法混合使用解决 FJSP。吴秀丽等通过改变差分进化算法的交叉、变异和搜索方式, 解决双目标优化的分布式 FJSP^[21]。张贵军等对差分进化算法的编码方式进行优化, 采用动态策略解决车间优化调度问题^[22]。Yuan 等采用混合差分进化算法, 解决 FJSP^[23]。

Dorigo 等提出一种可用于解决实际问题的蚁群优化算法^[24]。蚁群算法利用蚂蚁个体之间进行信息传递的特征, 建立反馈机制, 提高算法的搜索能力, 搜索问题的最优解。黄学文等对工艺路径可变的 FJSP 进行研究, 采用蚁群算法对问题进行求解^[25]。邹攀等研究有资源驱动的动态调度问题, 采用混合蚁群算法解决实际动态调度问题^[26]。

人工蜂群算法是可用于解决调度问题的智能优化方法。人工蜂群算法不需要设置过多的参数, 算法的迭代优化过程较为简单, 能够实现对问题最优解的搜索^[27]。人工蜂群算法能够用于解决车间调度领域的组合优化问题, 对调度目标进行优化。陈少等改进人工蜂群算法的搜索方法, 对 FJSP 进行优化^[28]。孟冠军等采用禁忌搜索与人工蜂群混合的算法, 改进算法的搜索机制和初始化方法, 对多目标约束的 FJSP 进行优化^[29]。

Eberhart 和 Kennedy 研究一种可用于解决函数优化和车间调度问题的粒子群优化算法^[30]。刘韵等改变粒子群算法的搜索方法,结合启发式算法,以最小总工作时间为优化目标,对 FJSP 进行优化^[31]。孔飞等采用顶层与底层两层结构的粒子群算法,对 FJSP 的目标函数进行调度优化^[32]。Singh 等研究粒子群优化方法,解决考虑完工时间和延迟等多个目标的 FJSP^[33]。

禁忌搜索算法与人类的记忆原理相似,通过采用限制搜索策略标记已经搜索到的可行解,从而在再次搜索时,可避免重复搜索一些最优解。同时,可防止算法在求解过程中出现过早收敛的现象,提高对问题可行解的搜索效率,以快速获得调度问题的最优解。Li 等采用混合禁忌搜索算法,对工件的完工时间进行优化,解决 FJSP^[34]。余璇等研究多目标 FJSP 调度优化问题,采用混合禁忌搜索算法对问题进行求解^[35]。

随着研究的深入,学者们用智能优化方法对有生产准备时间约束的车间调度问题进行研究。李峥峰等结合车间实际生产过程,对有多时间约束的调度问题进行研究^[36]。范华丽等采用遗传规划法,研究有准备时间约束的动态作业车间调度问题^[37]。廖玮采用基因表达式编程方法研究有准备时间约束的调度问题^[38]。

1.3.2 批量调度研究现状

在车间实际生产过程中,批量加工已经成为主要的生产模式,工件的加工顺序、加工设备和批量的大小成为影响车间调度的主要因素,批量的划分方法及划分后子批的设备分配与排序是这种生产模式主要研究的问题^[39]。Low 等以生产周期和生产成本为调度优化目标,对分批处理的效果进行验证^[40]。周亚勤等对车间内机器动态负荷和工件批量加工问题进行研究,采用内外两层算法确定工件批量加工时的分批调度方案,对工件的总批次和总完工时间等调度目标进行优化^[41]。李聪波等对车间内总能耗和分批调度问题进行研究,采用模拟退化算法对车间内的多种能量消耗和完工时间等目标进行调度优化^[42]。徐本柱等提出试探法,使分批具有方向性,对划分后的工序进行调度^[43]。胡燕海等对解决工件分批问题的染色体编码方法进行研究,用柔性分批方法对工件进行批量划分,对批量调度的生产周期进行优化^[44]。巴黎等采用多层编码的方法对染色体进行编码,并用柔性分批方法解决批量调度负载分配不均的问题^[45]。王云等采用长度可变的分批编码方法,对工件进行批量划分,确定工件各批次的调度方案^[46]。白俊杰等对设置游标进行分批的方法进行研究,对批量调度的机器负荷和生产周期等目标进行优化^[47]。Gao 等对

批量调度问题进行研究，将双层人工蜂群算法应用到解决分批调度问题中^[48]。陆汉东等研究工件的初始分批方法，对工件的分批调度进行优化，以获得最优的调度优化目标^[49]。

柔性作业车间分批调度主要研究的问题是为各子批选取合适的加工顺序，确定工件的最优分批调度方案，实现调度指标的最优化。在关于 FJSP 的相关文献中，对工件批量加工问题的研究多是采用等量分批的方法。在实际车间生产过程中，工件、夹具的安装与刀具的更换或调整机器都需要一定的生产准备时间，本文将生产准备与工件分批结合起来，通过对遗传算法进行改进，解决考虑生产准备和工件分批的柔性作业车间调度问题。

1.4 论文研究内容

本文结合车间实际生产过程中的特点，以考虑生产准备和工件分批的 FJSP 为研究对象，以工件的最大完工时间为调度优化目标，对工件的最优分批调度方法进行研究。本文先对 FJSP 进行研究，之后通过分析生产准备时间和工件分批加工的特点，建立考虑生产准备和工件分批的柔性作业车间调度数学模型。研究遗传算法解决 FJSP 的主要过程，分析其解决本文所建模型的局限性。研究基于改进遗传算法的求解方法，并结合调度实例验证本文算法的有效性。最后，根据车间调度的实际需求，结合本文研究的求解方法完成柔性作业车间调度系统的开发。

1.5 论文结构及章节安排

论文结构如图 1.1 所示。

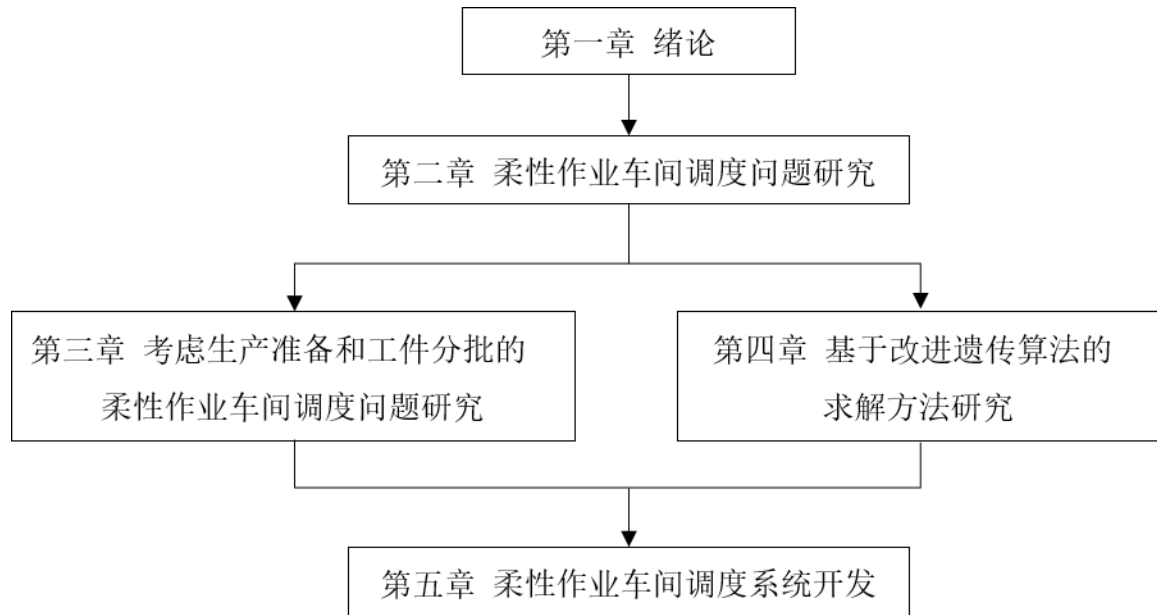


图 1.1 论文结构

论文章节安排如下：

第一章先介绍论文的研究背景、研究目的与意义。之后，对柔性作业车间调度与批量调度的研究现状进行分析。最后，介绍本文的研究内容、论文结构及章节安排。

第二章先对车间调度问题进行研究，接着建立 FJSP 的数学模型，对其分类、特点进行分析。结合具体的调度实例，对析取图和甘特图两种表示 FJSP 的方法进行研究。最后，分析调度问题的性能指标。

第三章研究考虑生产准备和工件分批的柔性作业车间调度，先研究生产准备和工件分批对调度过程的影响，并提出一种柔性分批方法。之后，建立数学模型，对相关的求解方法进行研究，选择合适的求解方法。

第四章研究基于改进遗传算法的求解方法，先对工件的柔性分批方法进行研究。之后，改进遗传算法的编码方式、交叉和变异操作，结合调度实例验证本文求解方法的有效性，并研究分批加工及考虑准备时间时对最大完工时间的影响。

第五章开发柔性作业车间调度系统，分析调度系统的实际需求。研究系统的设计方法和具体的功能。用 C#和 MATLAB 混合编程的方法完成系统的开发，在 MATLAB 中编写改进的遗传算法，通过 C#搭建系统的框架并调用 MATLAB 中的算法，并结合调度实例测试系统运行的可行性。

第二章 柔性作业车间调度问题研究

作业车间调度问题中,工件每道工序可选择的机器有限,这类车间调度问题没有考虑车间实际生产过程中对机器柔性的需求。在现有的车间生产中,机器有多种不同的功能,工件的工序可在不同的机器上加工,提高了工序对机器的选择性。柔性作业车间调度主要对机器的选择和工序排序问题进行研究,通过优化调度目标,给出工件合理的调度方案。

2.1 车间调度问题概述

车间调度是根据车间内现有的生产资源,完成生产任务的分配与排序,确定车间合理的调度方案,以均衡机器负荷,提高利用率,从而提高车间制造系统的整体运行效率^[50]。调度环节是制造系统生产问题的核心,影响着企业的生产效率和经济效益,是车间生产过程中非常重要的一环,主要对有多道工序的工件在机器上的加工排序问题进行研究,对调度目标进行优化,确定最优的排序方案。在对生产任务排序时,要确定每个生产任务的开始时间和结束时间,根据调度性能指标给出合理的调度方案,以提高整个车间制造系统的运行效率。

车间调度需要工件和机器的数据、调度约束条件和性能指标等关键信息。工件的数据是指工件的种类,以及每种工件的数量。机器的数据是指车间内可用机器的型号、数量,以及每道工序在机器上的完工时间。调度约束条件是指要满足车间实际生产过程中的限制,如工件每道工序持续加工不可中断、机器数量与功能的约束和工艺路径的约束等。调度性能指标是指车间调度问题的优化目标,主要包括工件的最大完工时间、机器的负荷、车间生产成本和产品交货期等。

车间调度问题可分为以下几种类型:

(1) 单机调度问题

单机调度问题中待加工工件只有一道工序,所有的工件都在一台机器上加工。这类调度问题主要以生产成本为调度优化目标,在满足约束条件的情况下,对车间内的生产任务进行排序。

(2) 并行机调度问题

并行机是指每台机器的功能相同,彼此之间没有差别。工件仅在机器上加工一次,

可根据实际情况,选择相应的加工机器。这类调度问题通常对工件的完工时间进行优化,确定工件在机器上的最佳分配方案。

(3) 流水车间调度问题

流水车间调度问题是指车间内的所有工件,以一定的顺序依次通过所有机器。在加工工件时,每个工件依次通过机器 1,机器 2,直到通过最后一台机器才能完成加工任务。研究流水作业车间调度问题主要考虑以下约束条件:

- 1) 工件在一台机器上加工且加工顺序相同;
- 2) 同一时间只能有一道工序在机器上加工;
- 3) 每两台相邻机器之间的缓存区无限大。

流水作业车间调度问题是实际流水线生产过程的简化,通过优化工件的最大完工时间,获得最优的调度方案,完成对工件加工顺序的排序。

(4) 作业车间调度问题

作业车间调度问题中,工件和机器的相关数据已知,每道工序的先后顺序已经确定。每道工序可选择的加工方式有限,只能选择在特定的机器上加工。研究该问题主要考虑以下约束条件:

- 1) 工件的每道工序仅可选择一台机器,且在机器上持续加工;
- 2) 不同工件的工序之间没有优先加工的约束;
- 3) 同一时间只能有一道工序在机器上加工。

作业车间调度问题主要对工件的完工时间进行优化,确定最优的车间调度方案,完成对工件加工顺序的排序。

2.2 柔性作业车间调度问题

面对多变的市场需求,企业需要不断地提高车间制造系统的柔性,高效率地生产出多种类、低成本、高质量的产品。通过增加车间中机器的柔性,提高生产效率,从而强化企业的竞争力^[51]。在有关作业车间调度的研究中,受机器性能的限制,工件只能选择在特定的机器上加工。这种生产方式柔性不足,不能快速应对车间生产任务的变化。在现有的车间中,机器是有柔性的,工件每道工序可选择不同的机器。

柔性作业车间调度问题是在对传统作业车间调度问题研究的基础上,对有机器柔性

的车间调度过程进行研究。主要研究机器的选择和工序排序问题，这一问题是求解过程更为复杂的组合优化问题。FJSP 能够充分利用车间内的机器等生产资源，提高调度过程的灵活性。通过合理的调度，对性能指标进行优化，提高车间的生产效率。这类调度问题更接近车间生产情况，是生产过程中面临的实际问题，对这类问题进行深入研究具有实用性和现实意义。

柔性作业车间工件加工流程图，如图 2.1 所示。

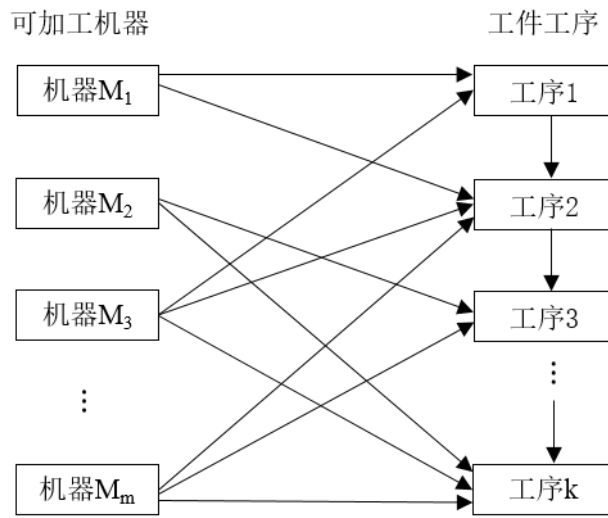


图 2.1 柔性作业车间工件加工流程图

2.2.1 柔性作业车间调度问题数学模型

FJSP 可描述为：有 n 种工件（工件集 J 为 $\{J_1, J_2, \dots, J_n\}$ ），有 M 台机器（机器集 M 为 $\{M_1, M_2, \dots, M_m\}$ ）可以选择，工件 J_i 有 k 道顺序确定的工序 $\{O_{i1}, O_{i2}, \dots, O_{ik}\}$ ，工序的数目与机器的数量无关。加工工件时，要按照每道工序的先后顺序持续加工，在机器上完成加工任务。由于机器之间有性能差别，机器加工不同种类的工件时，所需的完工时间不同。通过对调度过程中的机器选择和工序排序问题进行研究，优化调度目标，获得最优的调度方案。

FJSP 需满足以下假设条件：

- (1) 同一道工序在不同的机器加工时，所需的完工时间已知；
- (2) 同一时间每台机器只能加工同一种工件；
- (3) 同一时间工件的工序只能在一台机器上加工；
- (4) 不同种类的工件在加工过程中优先级相同；

(5) 工件在加工过程中不能中断;

(6) 不同种类工件各工序之间有先后加工次序。

根据上述问题描述及假设条件, 建立 FJSP 的数学模型。数学模型的符号定义如下:

n : 待加工工件的种类;

m : 机器的序号, 机器集 $M=\{M_1, M_2, \dots, M_m\}$;

k : 工件 i 的工序号, $k=1, 2, \dots, T_{oi}$;

T_{oi} : 工件 i 的总工序数;

B_i : 工件 i 的数量;

O_{ik} : 工件 i 的第 k 道工序;

S_{ikm} : 机器 m 开始加工工件 i 第 k 道工序的时间;

C_{ikm} : 机器 m 加工完工件 i 第 k 道工序的时间;

PT_{ikm} : 机器 m 加工工件 i 第 k 道工序的完工时间;

X_{ikm} : 若工件 i 第 k 道工序在机器 m 上加工则为 1, 否则为 0;

C_i : 工件 i 的完工时间;

C_{max} : 所有工件的最大完工时间。

约束条件:

约束 1: 同一时间工序只能在一台机器上加工

$$\sum_{m=1}^M X_{ikm} = 1 \quad (2.1)$$

约束 2: 每种工件的每道工序有先后顺序

$$S_{ikm} + X_{ikm} \times PT_{ikm} \leq C_{ikm} \quad (2.2)$$

约束 3: 同一时间每台机器只能加工一道工序

$$C_{ikm} \leq S_{i(k+1)m} \quad (2.3)$$

约束 4: 每种工件的完工时间不大于所有工件的最大完工时间

$$C_i \leq C_{max} \quad (2.4)$$

约束 5: 每种工件所需的完工时间为非负数

$$PT_{ikm} \geq 0 \quad (2.5)$$

约束 6: 工件每道工序在机器上的开始加工时间和加工结束时间均为正数

$$S_{ikm} \geq 0, C_{ikm} \geq 0 \quad (2.6)$$

2.2.2 柔性作业车间调度问题的分类

根据车间内的生产资源和机器加工性能的柔性程度, 可把所研究的问题分为完全柔性作业车间调度问题(Total FJSP, T-FJSP)和部分柔性作业车间调度问题(Partial FJSP, P-FJSP)^[52]。T-FJSP 中, 工件的工序不受机器性能的限制, 加工过程相对灵活, 机器可加工工件的每道工序。而 P-FJSP 中由于机器性能的限制, 至少有一道工序不能在所有机器上加工。在车间实际生产过程中, 车间制造系统调度受到制造资源的限制, P-FJSP 更符合车间实际生产调度过程。表 2.1 和表 2.2 分别为 T-FJSP 和 P-FJSP 实例。

表 2.1 T-FJSP 实例

工件	工序	机器			
		M ₁	M ₂	M ₃	M ₄
J_1	O_{11}	1	3	2	5
	O_{12}	3	2	1	3
	O_{13}	2	3	5	2
J_2	O_{21}	4	1	6	3
	O_{22}	3	6	5	2
	O_{23}	2	2	3	1
J_3	O_{31}	1	3	2	5
	O_{32}	3	6	3	2
	O_{33}	1	5	3	1

表 2.2 P-FJSP 实例

工件	工序	机器			
		M ₁	M ₂	M ₃	M ₄
J_1	O_{11}	3	4	5	×
	O_{12}	×	2	×	3
	O_{13}	2	3	5	×
J_2	O_{21}	4	×	6	×
	O_{22}	×	6	5	9
	O_{23}	×	×	5	8
J_3	O_{31}	3	5	×	7
	O_{32}	4	×	3	5
	O_{33}	×	10	6	9

表 2.1 和表 2.2 中的调度实例表示 3 种工件在 4 台机器上加工的问题，每种工件有 3 道工序，共有 9 道工序。表中数据表示不同类型的机器加工工件相应的工序所需的时间（单位，min）。表 2.2 P-FJSP 中，“×”表示对应的机器不能加工该道工序。 J_1 ， J_2 ， J_3 表示 3 种工件，如工序 O_{22} 表示工件 2 的第 2 道工序，可选择的机器集 $M = \{M_2, M_3, M_4\}$ ，加工时间分别为 6min、5min、9min。

2.2.3 柔性作业车间调度问题的特点

传统作业车间调度问题具有多目标性、多约束性、离散性、计算复杂性和动态随机性的特点。FJSP 中机器的可选择性，提高了所研究问题的复杂性，增加了该类型调度问题求解过程的难度，不同于一般作业车间调度的组合优化问题。FJSP 除了具有以上特点外，还有以下新的特性。

(1) 并行加工性

在作业车间调度问题的相关研究中，机器的功能有限，工件每道工序只能在一台机器上加工，限制了工序对机器的选择性。在 FJSP 中，有多台机器可为工件的工序提供选择。工件可根据生产过程中的实际需求，选择不同的加工方式，增加工件的可选择性，提高车间生产效率。

(2) 多功能加工性

传统的作业车间调度问题中，每台机器都有特定的功能，只能加工工件某道固定的

工序，不能加工其它工序。在车间实际生产中，机器有多种不同的功能，每台机器均可加工不同种类工件的不同工序，增加了工件对机器的选择性。

(3) 批量加工性

在传统作业车间调度问题中，通常对多个种类工件的单个个体进行加工，没有考虑工件批量加工的特点，要解决的问题是单个工件的作业排序问题。在智能制造生产模式下，多采用批量加工的方法生产不同类型的产品。在工件批量加工过程中，可采用不同的分批方式对工件进行批量划分。通过批量划分将工件划分为若干个子批，增加了生产过程的柔性。

FJSP 更加符合车间实际生产过程，是更为复杂的组合优化问题。车间调度问题模型的建立和选择合适的求解方法是解决这类问题的关键，相对于传统的作业车间调度问题，FJSP 有更多的约束条件和决策变量，建立数学模型相对困难。柔性作业车间内待加工工件种类多、机器设备功能不一，调度问题主要解决的是机器的选择和工序排序两个子问题。这两个子问题在求解过程中相互影响，需要采用有效的求解算法获得整个调度问题的最优解，得到最优的车间调度方案，为车间生产提供有效的调度决策。

2.3 柔性作业车间调度问题的表示方法

FJSP 有析取图和甘特图两种表示方法，可以直观地表示每种工件每道工序选择的机器和每台机器上加工的工序，能够帮助了解车间作业任务的分配及执行情况。

2.3.1 析取图

析取图是一种描述作业车间调度问题可行调度解的有向图，也可用来表示柔性作业车间调度问题的可行解^[53]。对于有 n 种工件、 m 台机器的 FJSP，析取图可以用 $G=(V,C,U)$ 表示，有向图中 V 表示所有工件工序的节点集合，每个节点表示加工工件每道工序的操作。节点集合中，节点 O_s 表示工件的虚拟开始工序，节点 O_E 表示工件的虚拟结束工序。 C 表示析取图中的有向弧集，用实线弧连接同一工件的不同工序，表示它们之间的约束关系。 U 表示析取图中的析取弧集，用虚线非连接弧表示机器上前两道工序之间的约束关系。

以表 2.2 中的 P-FJSP 为例，图 2.2 表示该调度实例一个可行解的析取图。节点集

$$V = \{O_s, O_{11}, O_{12}, O_{13}, O_{21}, O_{22}, O_{23}, O_{31}, O_{32}, O_{33}, O_E\},$$

有向弧集 $C = \{(O_{11}, O_{12}), (O_{12}, O_{13}), (O_{21}, O_{22}), (O_{22}, O_{23}), (O_{31}, O_{32}), (O_{32}, O_{33})\}$ 。析取图表示的是以最大完工时间为优化目标的调度解，在节点上方标注了每道工序选择的加工机器，节点下方标注了每道工序在机器上所需的加工时间。在图 2.2 中标注该调度问题可行解的关键路径，即 $O_s \rightarrow O_{31} \rightarrow O_{12} \rightarrow O_{23} \rightarrow O_E$ ，操作 O_{31}, O_{12}, O_{23} 为关键操作，对应的最大完工时间为 18min。 E_m 表示机器上的加工工序集， $E_1 = \{O_{21}\}$ ， $E_2 = \{O_{11}, O_{22}, O_{13}\}$ ， $E_3 = \{O_{32}, O_{33}\}$ ， $E_4 = \{O_{31}, O_{12}, O_{23}\}$ 。

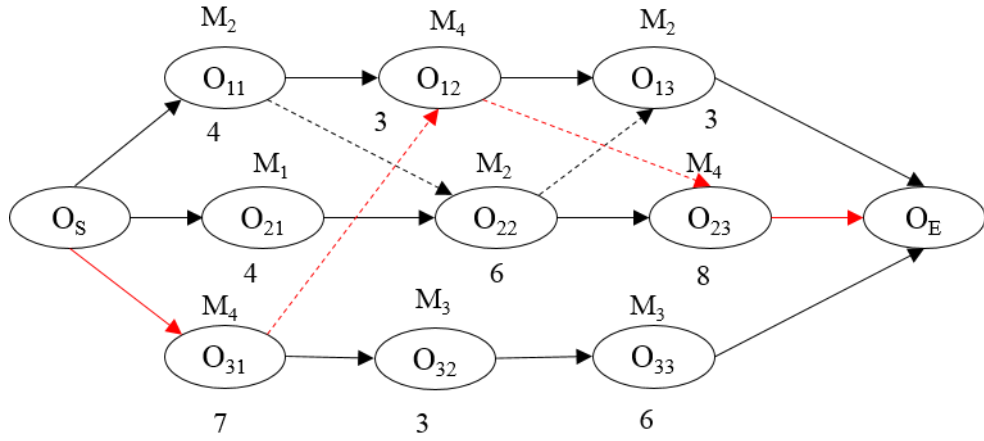


图 2.2 析取图

2.3.2 甘特图

甘特图是另一种描述车间调度问题可行解的方式，可直观地表示调度方案。甘特图中横轴表示加工时间，纵轴表示选择的机器。以图示的方式表示每台机器上不同工序的先后顺序，以及工件每道工序的加工开始时间与加工结束时间。甘特图可显示调度方案中不同工件的加工信息，能够掌握每道工序的实际进展情况，可更好地执行调度方案。

图 2.3 为表 2.2 调度问题一个可行解的甘特图。

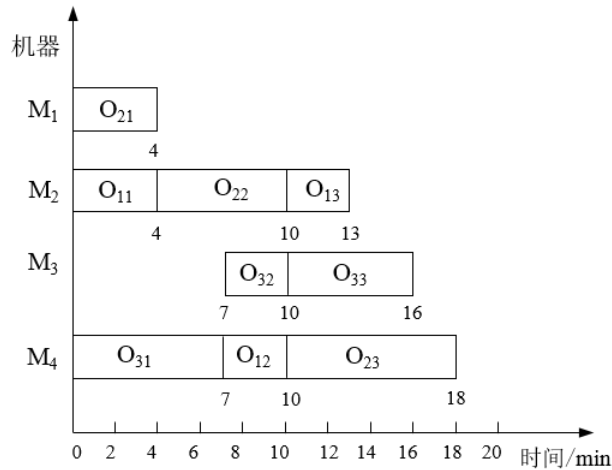


图 2.3 甘特图

表 2.3 为机器的加工开始时间和加工结束时间。

表 2.3 机器的加工开始时间和加工结束时间

机器	加工工序	加工开始时间	加工结束时间
M ₁	O ₂₁	0	4
M ₂	O ₁₁ -O ₂₂ -O ₁₃	0	13
M ₃	O ₃₂ -O ₃₃	7	16
M ₄	O ₃₁ -O ₁₂ -O ₂₃	0	18

在甘特图中, O_{21} 在机器 M_1 上加工, O_{11} 在机器 M_2 上加工, O_{31} 在机器 M_4 上加工, 加工开始时间均为 0。 O_{21} 的加工结束时间为 4min, O_{13} 的加工结束时间为 13min, O_{32} 的加工开始时间为 7min, O_{33} 的结束时间为 16min, 该调度方案中工件的最大完工时间为 18min, 最后一道工序 O_{23} 在机器 M_4 上完成。

2.4 柔性作业车间调度问题的性能指标

FJSP 中, 根据车间具体的加工任务制定调度优化目标, 并以此为依据选择最优的调度方案, 对工件的加工顺序进行排序。生产车间在选择调度方案时, 主要通过以下性能指标对调度方案进行判定。

(1) 工件的最大完工时间

每种工件最后一道工序的加工结束时间, 称为该工件的完工时间。所有工件最后一道工序加工结束时间的最大值, 即为工件的最大完工时间。最大完工时间是体现车间生产效率最根本的性能指标, 在 FJSP 相关的研究中, 通常以最小化最大完工时间为主要

的调度优化目标。通过对调度目标的优化，获得最优的车间调度方案。

$$f_1 = \text{Min } C_{\max} \quad (2.7)$$

式 (2.7) 中， $C_{\max} = \max \{C_i | i = 1, 2, \dots, n\}$ 。

(2) 机器的负荷

在车间生产过程中，机器完成分配的加工任务所需的运行时间为机器的负荷。机器的负荷指标反映了企业在完成生产任务时，对车间制造资源的利用水平。车间内每台机器的性能不同，机器加工不同种类的工作件所需的完工时间也不相同。同时，选择不同的调度方案对工件进行生产排序时，机器的负荷也不同。对于车间制造系统而言，为提高车间的生产效率，可对有机器负荷约束的调度目标进行优化。减少车间生产过程中瓶颈机器的负荷，保证机器整体负荷均衡，减少机器的空闲时间提高机器的利用率。机器负荷的指标主要有两个，总机器负荷和机器的最大负荷。

$$L_m = \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^{T_{oi}} PT_{ikm} X_{ikm} \quad (2.8)$$

$$f_2 = \text{Min} \{ \max (L_m) \} \quad (2.9)$$

$$f_3 = \text{Min} \left(\sum_{m=1}^M L_m \right) \quad (2.10)$$

式 (2.8) 表示机器 m 的总负荷，式 (2.9) 表示机器 m 的最大负荷最小，式 (2.10) 表示总机器负荷最小。

(3) 车间生产成本

车间的调度决策影响着企业的经济效益，不同的调度方案中完成加工任务所需的时间不同，车间生产成本也不同。车间生产成本指标能够反映出不同调度方案的效果，在选择调度方案时可作为主要的参考因素。在车间生产过程中，生产成本主要包括：工件和刀具的装拆、工件在机器上加工、机器的开停等所需的时间成本，待加工工件的存储与搬运成本等。

除了上述三种性能指标外，FJSP 的性能指标还有产品交货期指标、车间能耗指标等。在车间实际生产过程中可根据需求，对相应的目标进行优化，得到最优的调度方案。

2.5 本章小结

本章先对几种常见的车间调度问题进行介绍,之后研究 FJSP。阐述了 FJSP 的概念,根据调度过程的约束条件建立了该问题的数学模型,并对其分类、特点进行分析。结合具体的 FJSP 实例,对析取图和甘特图两种表示车间调度问题的方法进行研究。最后,分析了研究 FJSP 常用的性能指标。

第三章 考虑生产准备和工件分批的柔性作业车间调度问题研究

在车间实际生产过程中, 工件通常是多品种批量生产的。机器在开始加工之前, 需要完成工件的安装和刀具的更换等生产准备工作, 完成生产准备工作所需的准备时间不能忽略。结合车间调度的特点, 对考虑生产准备和工件分批的柔性作业车间调度问题进行研究。这一问题是在满足实际生产过程中考虑准备时间和工件分批约束的条件下, 对工件的完工时间进行优化, 确定工件最优的分批调度方案。合理地安排工件的加工路线, 提高生产效率。

3.1 问题研究

(1) 生产准备

在相应的约束条件下, 机器选择和工序排序是 FJSP 主要研究的问题。在研究该类问题时, 根据假设条件建立数学模型。在相关的研究中, 通常忽略生产准备的因素。然而在车间实际生产过程中, 工件在加工之前要进行装拆、机器的开停与调整、更换刀具、改变切削用量和选择工艺方案等生产准备工作, 完成这些生产准备工作所需的时间称为生产准备时间。在一般的生产模式中, 完成生产任务所需的时间主要包括基本加工时间和生产准备时间^[54]。在实际生产过程中, 工件在机器上的加工时间仅占完成加工任务所需时间的一部分。工件的生产准备时间并非很小的值, 通常不能忽略。

通过分析可知, 在 FJSP 中, 由于工序的加工方式及机器性能的原因, 完成生产准备工作所需的时间是不同的。生产准备时间影响了工件总的生产时间, 在调度过程中会影响优化目标及排序方案。因此, 在 FJSP 的研究中, 对工件的最大完工时间进行调度优化时, 要将生产准备时间作为约束条件进行研究。准备时间可分为工艺路线相关的准备时间和工艺路线无关的准备时间^[55]。

准备时间主要有两种类型, 第一种是准备时间作为工件加工时间的一部分, 加工不同的工序时, 当机器上正在加工的工序结束后, 才能进行生产准备工作, 为下一个加工任务做准备。第二种是所研究的准备时间与加工时间是相互独立的, 相关的生产准备工作可在工序开始加工前进行。

本文对有生产准备时间约束的 FJSP 进行研究, 对相互独立的生产准备时间和加工时间进行研究。在所研究的问题中, 工件前后两道工序在同一台机器上加工时, 生产准

备工作可在工序加工完成后再进行。前后两道工序选择不同的机器时，生产准备工作可在工序开始加工前进行。当工件到达加工区域时，可即刻开始加工，提高机器的利用率，从而缩短完工时间。以表 2.2 中调度实例为例，有准备时间的一个可行调度甘特图，如图 3.1 所示。

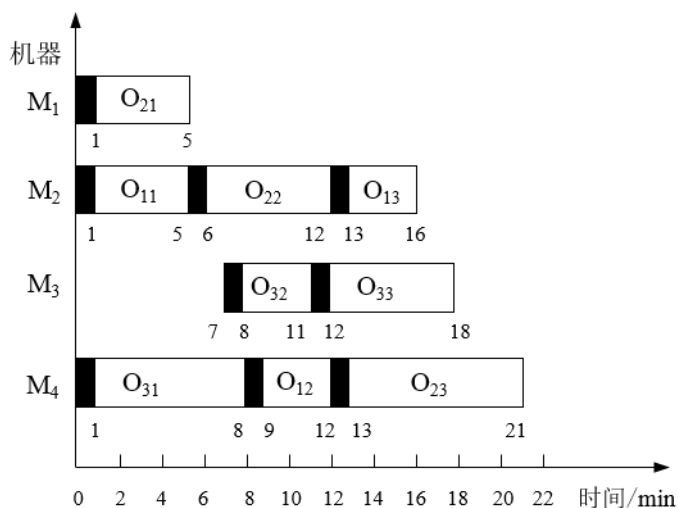


图 3.1 考虑准备时间的调度甘特图

将生产准备时间考虑到 FJSP 中，对调度目标进行优化，确定最优的车间调度方案，完成对工件加工顺序的排序。

(2) 工件分批

一般的 FJSP 研究的是单个工件的加工排序问题，每种工件的数量只有一个。在当前的车间生产中，批量生产已经成为主要的生产模式，工件通常是批量加工的，对批量调度问题的研究更符合实际生产需求。与加工单个工件的柔性作业车间调度不同，批量生产调度主要研究工件的分批方式和子批加工顺序的优化，解决这类问题的求解过程较为复杂^[56]。通过对工件进行分批和排序，为各子批选择合适的加工机器，对工件总的完工时间进行优化。

考虑工件分批的 FJSP 中，每种工件的各子批次可以选择在不同的机器上加工，工件的批次大小和子批的工序排序是调度问题的关键。在解决这类调度问题时，对工件分批、机器选择和子批工序排序问题进行分析，通过调度优化，给出最优的分批调度方案。

工件分批加工流程图，如图 3.2 所示。

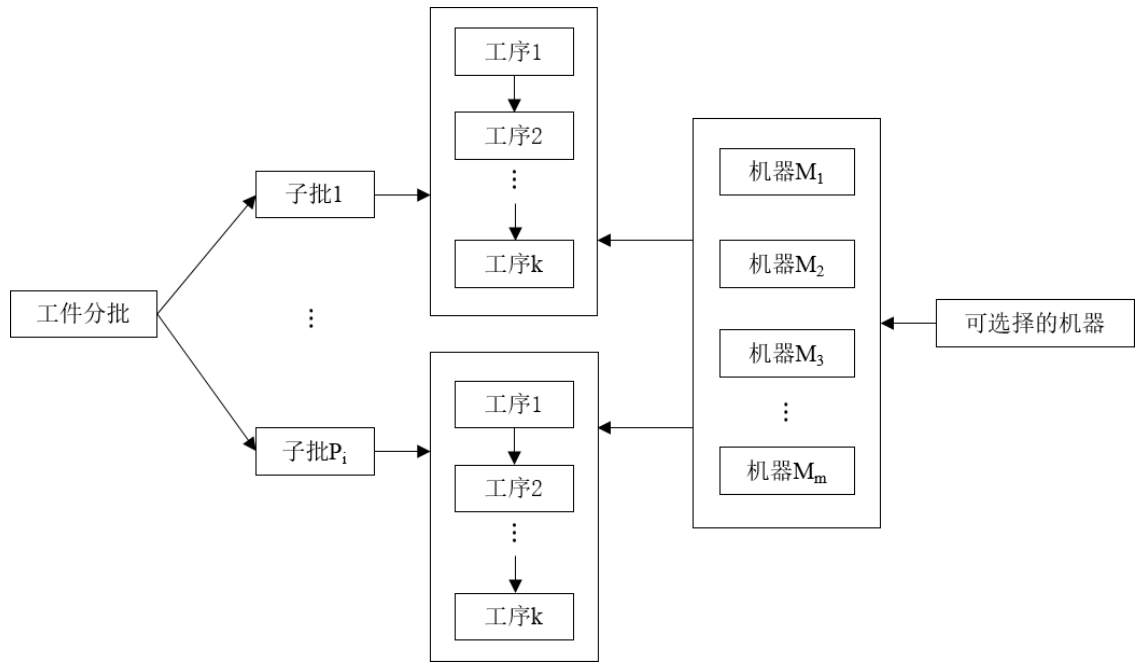


图 3.2 工件分批加工流程图

以表 2.2 中调度实例为例，对工件批量加工时，不同批量划分方法的调度方案进行说明。假设 3 种工件的数量均为 20 个，工件整批加工时一个调度方案的甘特图如图 3.3 所示。

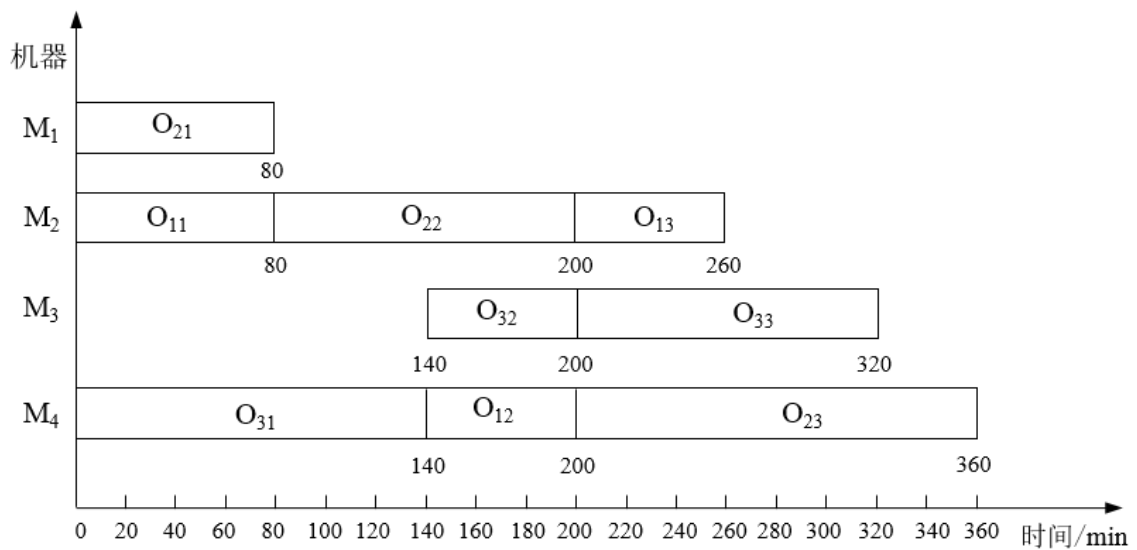


图 3.3 工件整批调度甘特图

在图 3.3 所示的调度甘特图中，工件整批加工时，工件的最后一道工序 O_{23} 在机器 M_4 上完成，工件的最大完工时间为 360min。图中机器 M_1 在工件加工过程中仅加工 O_{21} 一道工序，机器的空闲时间长，利用率低。机器 M_3 加工 O_{32} 和 O_{33} 两道工序，但是在加

工之前有较长的等待时间。机器 M_2 和 M_4 均加工 3 道工序，机器的负荷较大。每台机器的负荷如表 3.1 所示。

表 3.1 工件整批加工机器负荷

机器负荷	机器				
	M_1	M_2	M_3	M_4	$M_{\text{总}}$
加工时间	80	260	180	360	880

表 3.1 中，工件整批加工时，机器总负荷为 880min，其中机器 M_1 与 M_4 负荷相差较大，机器负荷分布不均匀，利用率低。

对工件进行分批加工时，调度甘特图如图 3.4 所示。

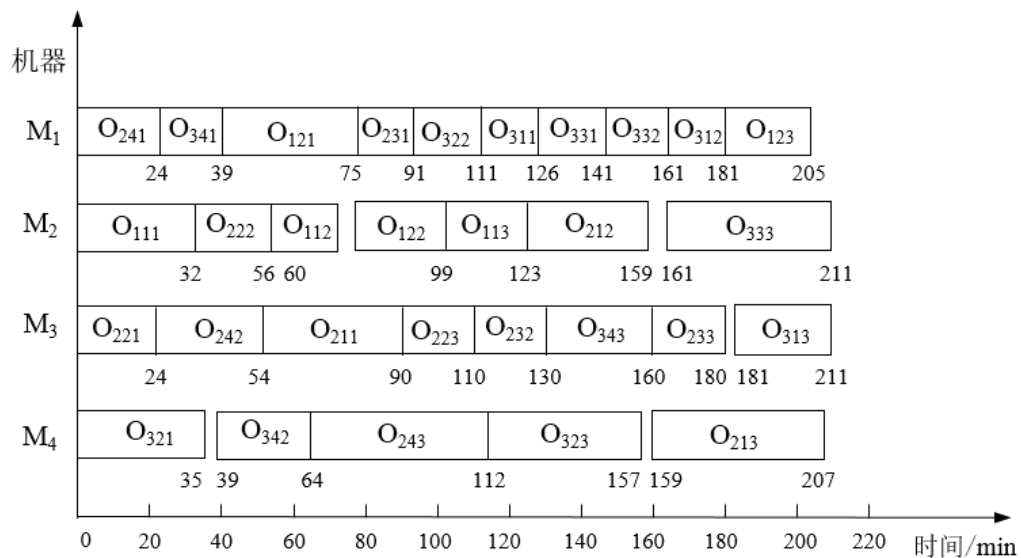


图 3.4 工件分批调度甘特图

在图 3.4 所示的工件分批调度甘特图中，工件的后一道工序 O_{333} 和 O_{313} 分别在机器 M_2 和 M_3 上完成，工件的最大完工时间为 211min。机器的负荷如表 3.2 所示。

表 3.2 工件分批加工机器负荷

机器负荷	机器				
	M_1	M_2	M_3	M_4	$M_{\text{总}}$
加工时间	205	206	210	201	822

与工件整批加工时的最大完工时间相比，工件分批加工的最大完工时间更小，生产效率更高。同时，机器的等待时间较小，负荷较为均匀，利用率较高。

通过以上分析可知，不同类型的工件批量加工时，若按照单个工件的生产模式将批量加工的工件看作一个整体，会增加工件的最大完工时间。同时，会造成机器负载分布

不均的现象,降低车间的生产效率。相比之下,通过优化工件加工方式,对批量加工的工件进行分批处理,可提高机器的利用率,获得工件最小的完工时间。同时,能够均衡机器负荷,能够满足车间实际生产需求。

本文通过分析生产准备和工件分批对 FJSP 的影响,研究考虑生产准备和工件分批的 FJSP。建立考虑生产准备和工件分批的 FJSP 数学模型,对批量加工的工件进行分批,以最小化最大完工时间为调度优化目标,确定最优的分批调度方案。

3.2 考虑生产准备和工件分批的柔性作业车间调度数学模型

3.2.1 问题描述

本文研究的考虑生产准备和工件分批的 FJSP 可描述为:有 n 种数量一定的工件(工件集 $J=\{J_1, J_2, \dots, J_n\}$),在 M 台机器(机器集 $M=\{M_1, M_2, \dots, M_m\}$)上完成加工。批量加工的工件可分为若干子批,工件每个子批的数量可随机分配。工件各子批每道工序的顺序确定,加工各子批不同的工序时,需要一定的生产准备时间。该问题主要研究的是在考虑准备时间时,选择有效的分批方法对批量加工的工件进行分批,为每个子批选择合适的机器进行加工,并对子批工序进行排序。考虑生产准备和工件分批的 FJSP 应满足以下假设条件:

- (1) 机器加工每道工序时间确定;
- (2) 同一时刻每台机器只能加工一道工序;
- (3) 同一机器加工完同一批次的工件后再加工下一批次的工件;
- (4) 相同批次的工件在机器上持续加工,不能中断;
- (5) 同一机器加工相同批次工件的前后工序时,生产准备工作在前道工序完成后再进行;
- (6) 不同机器加工相同批次工件的前后工序时,生产准备工作可在下道工序开始前进行;
- (7) 同种工件不同批次的相同工序在同一机器加工时,不需要进行生产准备工作;
- (8) 工件每道工序进行生产准备工作所需的准备时间已知。

在满足以上假设条件下,建立考虑生产准备和工件分批的柔性作业车间调度数学模型,对工件的最大完工时间进行调度优化。

3.2.2 数学模型

(1) 符号定义

考虑生产准备和工件分批的柔性作业车间调度数学模型中的符号定义如下：

n : 待加工工件的种类；

m : 机器的序号，机器集 $M=\{M_1, M_2, \dots, M_m\}$ ；

j : 第 i 种工件的批次号 ($i=1, 2, \dots, n$)；

k : 工件 i 的工序号；

B_i : 工件 i 的加工数量；

P_i : 工件 i 的子批数；

S_{ij} : 工件 i 第 j 批次的批量数；

O_{ik} : 工件 i 的第 k 道工序 ($k=1, 2, \dots, T_{oi}$)；

T_{oi} : 工件 i 的总工序数；

O_{ijk} : 工件 i 第 j 批次的第 k 道工序；

T_{ijkm} : 机器 m 开始加工工件 i 第 j 批次第 k 道工序的时间；

E_{ijkm} : 机器 m 加工完工件 i 第 j 批次第 k 道工序的时间；

ST_{ikm} : 工件 i 第 k 道工序在机器 m 上加工时的准备时间；

PT_{ikm} : 工件 i 第 k 道工序在机器 m 上加工的完工时间；

E_{ijtm} : 机器 m 加工完工件 i 第 j 批次最后一道工序的时间；

x_{ijkm} : 若工件 i 第 j 批次第 k 道工序在机器 m 上加工则为 1，否则为 0；

C_i : 工件 i 的完工时间；

C_{max} : 所有工件的最大完工时间。

(2) 约束条件

考虑生产准备和工件分批的柔性作业车间调度数学模型应满足以下约束条件：

约束 1: 工件各子批的每道工序只能在一台机器上加工

$$\sum_{m=1}^M x_{ijkm} = 1, j = 1, 2, \dots, P_i \quad (3.1)$$

约束 2: 同一种工件分批之后，工件的总数不变

$$\sum_{j=1}^{P_i} S_{ij} = B_i \quad (3.2)$$

约束 3: 工件 i 第 j 批次第 k 道工序在机器 m 上的结束时间 E_{ijkm} , 等于开始加工时间 T_{ijkm} 、准备时间 ST_{ikm} 和该批次所有工件的完工时间之和

$$E_{ijkm} = T_{ijkm} + ST_{ikm} + PT_{ikm} \times S_{ij} \quad (3.3)$$

约束 4: 相同批次工件的前后两道工序在同一机器上加工时, 后道工序的开始加工时间 $T_{ij(k+1)m}$ 等于前道工序的加工结束时间 E_{ijkm} 与后道工序的准备时间 $ST_{i(k+1)m}$ 之和

$$T_{ij(k+1)m} = E_{ijkm} + ST_{i(k+1)m} \quad (3.4)$$

约束 5: 各工件子批按照特定的工艺路线进行加工

$$T_{ij(k+1)m} \geq E_{ijkm} \quad (3.5)$$

约束 6: 各子批所有工件最后一道工序完工时间的最大值为最大完工时间

$$C_i = \max(E_{ijm}), j = 1, 2, \dots, P_i \quad (3.6)$$

在满足以上假设和约束条件下, 对车间调度中的工件分批、机器选择和子批工序排序问题进行研究。建立调度问题的目标函数, 对目标函数进行优化, 选择最优的工件分批调度方案。

(3) 目标函数

本文在解决考虑生产准备和工件分批的 FJSP 时, 目标函数为工件最大完工时间的最小值。

$$f = \min C_{\max} \quad (3.7)$$

式 (3.7) 中 $C_{\max} = \max\{C_i | i = 1, 2, \dots, n\}$ 。

3.3 模型求解方法

3.3.1 方法分类

FJSP 是复杂的组合优化问题, 学术界采用运筹学法、启发式算法和智能优化算法等方法, 研究此类型的调度优化问题。

(1) 运筹学法。

运筹学中的数学规划法和分支定界法可用于解决 FJSP, 对调度目标进行优化。通过数学规划建立调度问题约束关系和目标函数的数学表达式, 将调度问题转化为数学模型,

对问题进行求解。分支定界法求解时以调度问题的优化目标值为上界，删除超出上界的分支，缩小搜索空间。运筹学法在获得 FJSP 最优解时，要经过大量的运算，求解过程较为复杂，无法在较短的时间内获得车间调度问题的最优解，求解效率低。运筹学法适合解决规模较小的车间调度问题，不适应于大规模的组合优化问题。

（2）启发式算法

启发式算法是一种近似求解方法，运用调度规则解决 FJSP。启发式算法通常采用优先分派、最短加工时间等调度规则解决 FJSP。启发式算法的求解复杂度低，易于实现。但是，启发式算法仅以机器的加工状态为依据对工件的加工顺序进行判断，不能充分考虑 FJSP 的特点。

（3）智能优化方法

智能优化算法是借助计算机进行迭代计算，对问题进行优化的方法。智能优化算法的求解效率高，是解决复杂组合优化问题的主要研究方法。目前相关研究主要选择遗传算法、群体算法和禁忌搜索等方法研究 FJSP。

3.3.2 方法选择

由上述建立的数学模型可知，考虑生产准备和工件分批的 FJSP 数学模型与一般的 FJSP 数学模型相比，多了生产准备和工件分批两个约束条件。该调度问题主要包括工件分批、机器选择和子批工序排序三个子问题。解决这种调度问题时，求解过程较为复杂。在选择求解方法时，应充分考虑这三个子问题，选择合适的方法对数学模型进行求解。

遗传算法是一种常用的通过模拟进化过程解决 FJSP 的智能优化方法，算法通过迭代运行自动搜索可行解空间内的解，寻找最优的求解结果。遗传算法与其它智能优化算法的区别主要在于，在搜索问题最优解时能够实现智能搜索。同时，能够对种群内的多个个体进行搜索，可用于处理柔性作业车间调度领域多种形式的调度问题。先进行个体的初始化，用初始化的个体表示问题的初始解。之后，对个体的基因进行编码，通过遗传操作不断地进行迭代优化，寻找问题的最优解。

根据所研究问题的特点，建立适应度函数。在选择过程中，以适应度值为依据选择优秀的个体进行遗传操作。迭代优化过程中，新个体通过交叉、变异等操作产生，可提高算法对最优解的搜索效率。设置遗传算法的参数，使算法以一定的条件结束迭代优化过程，输出优化结果。算法运行时，通过迭代优化，逐步寻找问题的最优解。染色体通

过解码，转化为问题的解。

遗传算法的基本运算过程如下：

步骤 1：建立求解问题的数学模型；

步骤 2：设置迭代终止条件；

步骤 3：建立个体的适应度函数，在迭代优化过程中个体的适应度值为条件进行选择；

步骤 4：判断算法是否满足迭代终止条件，如果满足终止运行，输出结果，否则进行步骤 5；

步骤 5：根据每个个体的适应度值选择优秀的个体，对个体进行遗传操作，把所有经过遗传操作后的个体作为新种群。同时，返回步骤 3 继续循环。

遗传算法的流程图，如图 3.5 所示。

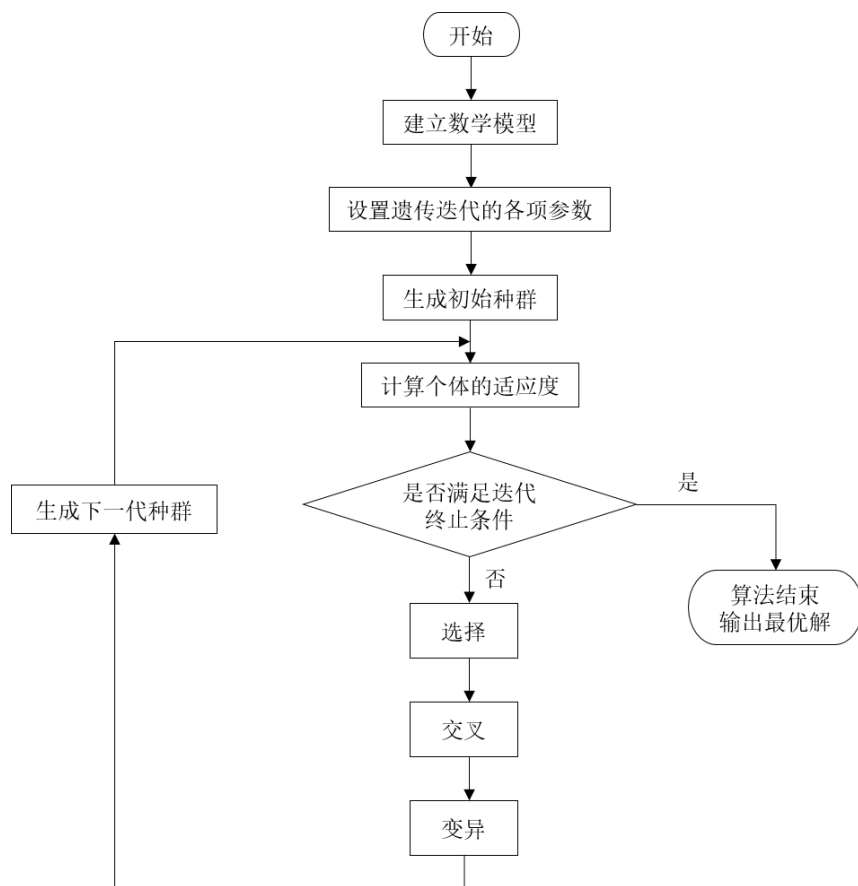


图 3.5 遗传算法流程图

遗传算法通过编码、选择、交叉和变异等过程进行迭代优化寻找问题的最优解。基本过程如下：

(1) 编码

遗传算法在解决 FJSP 时，通过染色体编码表示问题的可行解，编码方法影响遗传算法的迭代进化过程。在解决染色体编码问题时，可选择不同的编码规则对染色体进行编码。编码方式可根据具体优化目标，以及遗传算法的收敛速度进行选择。同时，编码方式也应考虑到如何更好地进行交叉、变异等遗传操作。

整数编码是通过 $1 \sim n$ 自然数的排列表示问题可行解的染色体，整数编码中表示染色体基因的整数可以重复。假设在车间调度问题中有 5 台可选的机器， $[1, 2, 3, 4, 5]$ 表示机器的编号，则 $[2, 5, 3, 4, 1]$ 可表示该工件的一种加工方式。FJSP 主要研究的问题是为工件选择合适的加工机器，并对工序排序，确定最优的调度方案。解决 FJSP 常用 MSOS 编码方法，MS (machine selection) 表示机器选择，OS 表示工序排序 (operation sequencing)，这种编码方法用数字表示工件号和机器号，可同时对机器选择和工序排序部分进行编码。

机器选择部分，每个基因位上对应的数字表示工件各工序所选择的加工机器的机器号，用作机器索引号。工序选择部分染色体上的基因用工件的编号来表示，工件号的顺序表示工件每道工序之间的先后顺序。如有 n 种工件，工件号为 i ($i=1, 2, \dots, n$)，在工序编码部分工件号 i 出现的总次数表示其总工序数 T_{oi} ，工件号 i 第 k 次出现的次数表示工件 J_i 的第 k 道工序，即 O_{ik} 。

以表 2.2 P-FJSP 实例为例，采用 MSOS 方法进行编码的染色体如图 3.6 所示。工序排序部分的编码为 $[2, 1, 3, 2, 3, 1, 1, 3, 2]$ ，其中第一个“1”表示工件 J_1 的第一道工序 O_{11} ，第二个“1”表示工件 J_1 的第二道工序 O_{12} ，第三个“1”表示工件 J_1 的第三道工序 O_{13} 。

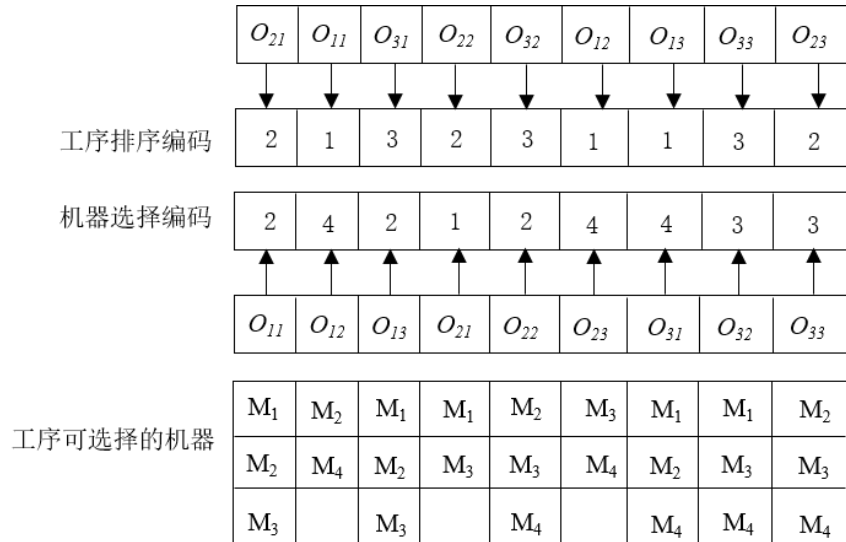


图 3.6 染色体编码

图 3.6 中工序编码部分表示的加工顺序为： $O_{21} \rightarrow O_{11} \rightarrow O_{31} \rightarrow O_{22} \rightarrow O_{32} \rightarrow O_{12} \rightarrow O_{13} \rightarrow O_{33} \rightarrow O_{23}$ 。机器选择编码中，从左到右依次表示 3 种工件每道工序选择的加工机器。工序 O_{11} 可选的机器集为 $\{M_1, M_2, M_3\}$ ，在编码时选择在机器 M_2 上加工。

用 MSOS 方法进行编码时，两条子染色体的编码过程相对独立，改变染色体上基因位的数字可以产生新的染色体。机器选择编码部分能够在可加工机器集中为工件的每道工序选择一台可加工机器，通过解码转化为具体的调度方案。

(2) 选择操作

选择算子是遗传算法的基本算子，遗传算法的每一次迭代运算都要进行选择。在遗传操作中通过选择算子选择出后续需要进行交叉和变异操作的个体，在对问题求解时，优质的个体将被选择保留下来，继续进行迭代计算，搜索问题的最优解。通常采用轮盘赌、锦标赛和排序等方法选择优质的个体，组成新的种群再次进行迭代计算。可根据所求问题的形式选择合适的方法获得优质个体，提高算法的搜索效率。

(3) 交叉操作

对父代染色体上的基因进行交叉操作，可产生新的子代个体^[57]。交叉方式决定了遗传算法对问题可行解的搜索效率。在进行交叉操作时，要保证子代能够继承父代的优良基因。遗传算法解决 FJSP 时，主要有以下交叉方式。

1) 单点交叉

在染色体 f_1 、 f_2 上随机选择一个交叉点，交换两条染色体上交叉点右端的基因，产生新的染色体 c_1 、 c_2 。以表 2.2 所示的 P-FJSP 实例为例，选择两条用 MSOS 编码的染色

体，染色体单点交叉过程如图 3.7 所示。

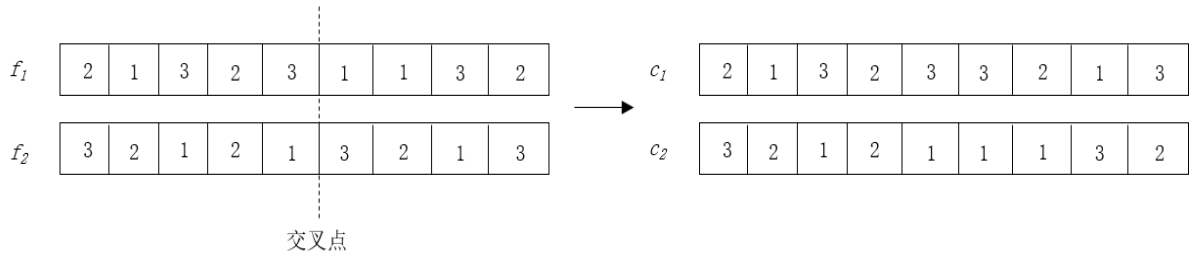


图 3.7 单点交叉操作

2) 两点交叉

两点交叉操作是交换染色体上两个交叉点之间的基因片段。两点交叉操作过程如图 3.8 所示。

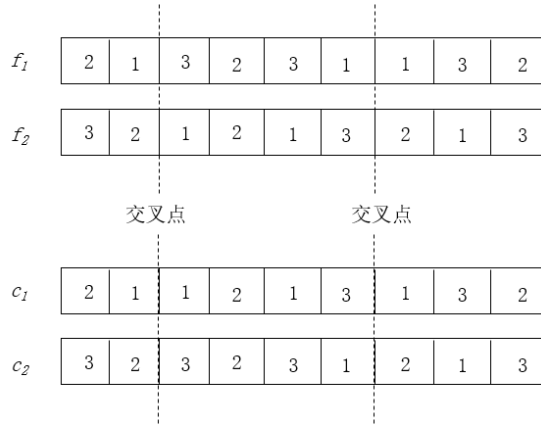


图 3.8 两点交叉操作

3) POX 交叉

POX (Precedence Operation Crossover, POX) 是一种先对工件集进行划分，再对工序编码进行交叉的遗传算子^[58]。以表 2.2 调度实例为例，具体交叉操作过程如下：

步骤 1：随机选择两条父代染色体 f_1 、 f_2 ；

步骤 2：将 3 种工件 J_1 、 J_2 和 J_3 分为两个集合 $\{J_1, J_2\}$ 和 $\{J_3\}$ ；

步骤 3：将 f_1 中 $\{J_1, J_2\}$ 工件对应的基因复制到 c_1 中对应的基因位置上，保留 $\{J_3\}$ 工件对应的基因位置。将 f_2 中 $\{J_3\}$ 工件对应的基因从左到右依次复制到 c_1 中 $\{J_3\}$ 工件空出的基因位置；

步骤 4：将 f_2 中 $\{J_1, J_2\}$ 工件对应的基因复制到 c_2 中对应的基因位置上，将 f_1 中 $\{J_3\}$ 工件对应的基因从左到右依次复制到 c_2 中。图 3.9 为 POX 交叉操作过程。

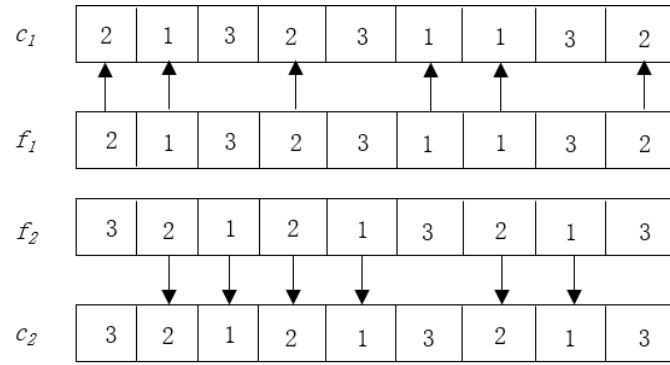


图 3.9 POX 交叉操作

除上述交叉操作外，还有多点交叉操作（Multi-point Preservative Crossover, MPX）、均匀交叉操作（Uniform Crossover, UX）和循环交叉操作（Cycle Crossover, CX）等。

（4）变异操作

变异操作是另一种产生新个体的遗传操作，通过改变染色体基因位上的某些基因来产生新个体，以增加种群的多样性，降低种群个体基因的相似度。通过变异操作能够使算法向最优解快速收敛，能够提高算法的搜索效率。适合于 MSOS 整数编码的变异操作主要有以下几种。

1) 倒序变异

倒序变异是对染色体上两个随机位置间的基因进行反转排序，产生子代染色体 c 。

图 3.10 为倒序变异操作过程。

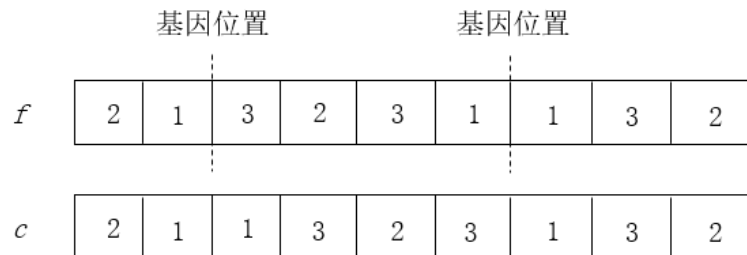


图 3.10 倒序变异操作

2) 插入变异

插入变异是在染色体编码上随机选择一个基因，将它随机插入到染色体的其它位置上。图 3.11 为染色体编码的插入变异操作。

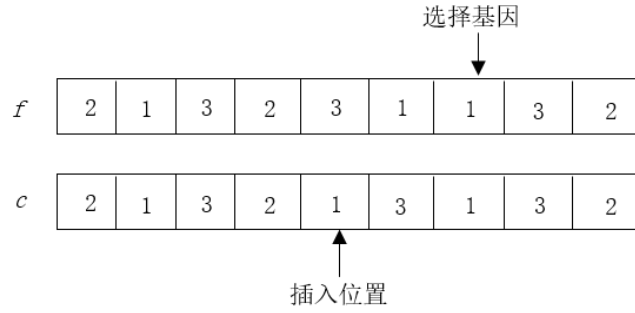


图 3.11 插入变异操作

3) 移位变异

移位变异是随机选择一个染色体编码片段，在染色体上随机选择一个位置插入。图 3.12 为染色体编码的移位变异操作。

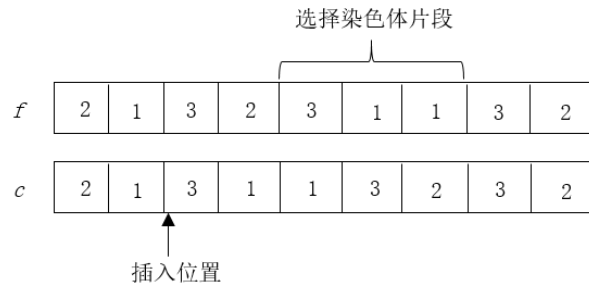


图 3.12 移位变异操作

4) 互换变异

互换变异是在染色体上随机选择两个不同位置的基因，将这两个位置上的基因进行交换。图 3.13 为互换变异操作过程。

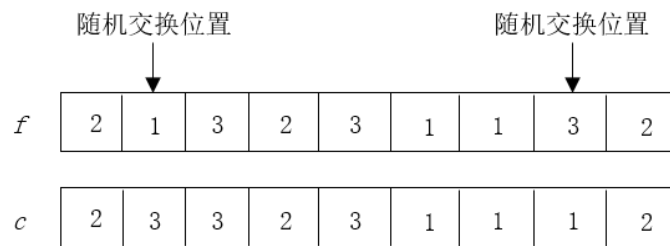


图 3.13 互换变异操作

3.3.3 方法分析

上述研究是遗传算法求解 FJSP 的主要过程，分析可知，一般的 FJSP 主要研究机器选择和工序排序问题。本文研究的考虑生产准备和工件分批的 FJSP 包括工件分批、机器选择和子批工序排序三个子问题，该问题有多种约束关系，求解过程较为复杂。遗传算法中常用的 MSOS 编码方式不能充分表示问题的初始解。此外，遗传算法在解决 FJSP

时,存在着过早收敛的现象,算法的搜索效率降低。因此,本文结合遗传算法解决 FJSP 的主要过程,对编码方式、交叉和变异操作进行改进,设计一种适应于解决考虑生产准备和工件分批的 FJSP 算法。

3.4 本章小结

本章分别研究了生产准备和工件分批对柔性作业车间调度的影响,并建立了考虑生产准备和工件分批的柔性作业车间调度数学模型。阐述了 FJSP 常用的求解方法,并根据所求问题的特点和算法的特性,选择遗传算法解决调度优化问题。研究了遗传算法解决 FJSP 的主要过程,分析了算法解决本文所建模型的不足之处,为后续对遗传算法进行改进提供指导。

第四章 基于改进遗传算法的求解方法研究

考虑生产准备和工件分批的柔性作业车间调度问题，要同时解决工件分批、机器选择和子批工序排序问题，整个调度优化过程较为复杂。遗传算法常用的编码方式不能充分表示问题的初始解，同时解决车间调度这类复杂的组合优化问题时存在着过早收敛的现象，算法的性能和效率降低，无法快速获得问题的最优解。本文对工件分批方法进行研究，并改进遗传算法的编码方式、交叉操作和变异操作，解决考虑生产准备和工件分批的柔性作业车间调度问题。

4.1 工件分批方法研究

工件批量加工时，通过批量划分来确定各子批的批量大小。在车间批量生产调度问题中，工件子批的批量大小会影响生产周期以及机器的生产效率。选择合适的批量划分方法，能够均衡机器的负荷以及获得工件的最小完工时间，提高车间的生产效率。最初采用等量分批方法对工件分批，每种工件分为固定的子批，由于每种工件的子批批量是固定的，无法根据机器的实际负荷情况进行调整，会影响车间的生产效率。

本文采用柔性分批方法，在给定每种工件的最大子批数后，通过随机分批的方式，对工件进行批量划分，划分后每个子批的工件数是不同的。具体的分批方法如下：

步骤 1：假设某种批量加工的工件个数为 n ，工件的最大子批数为 N ；

步骤 2：随机产生一个整数 P 作为工件的子批个数， $1 \leq P \leq N$ ；

步骤 3：随机产生一个整数 S_j ($0 < S_j \leq n - m$) 作为工件第 j 批次的批量数，其中 m 的初始值为 0， j 的初始值为 1；

步骤 4：对 m 重新赋值 ($m = m + S_j$)，判断 m 的值是否满足条件 $m + P - j \leq n$ ，若满足，则进行步骤 5；若不满足，对 m 赋值 ($m = m - S_j$)，返回步骤 3；

步骤 5：判断 j 的值是否满足条件 $j = P$ ，若满足，则算法结束，输出分批结果；若不满足，则对 j 赋值 ($j = j + 1$)，返回步骤 3。

柔性分批流程图，如图 4.1 所示。

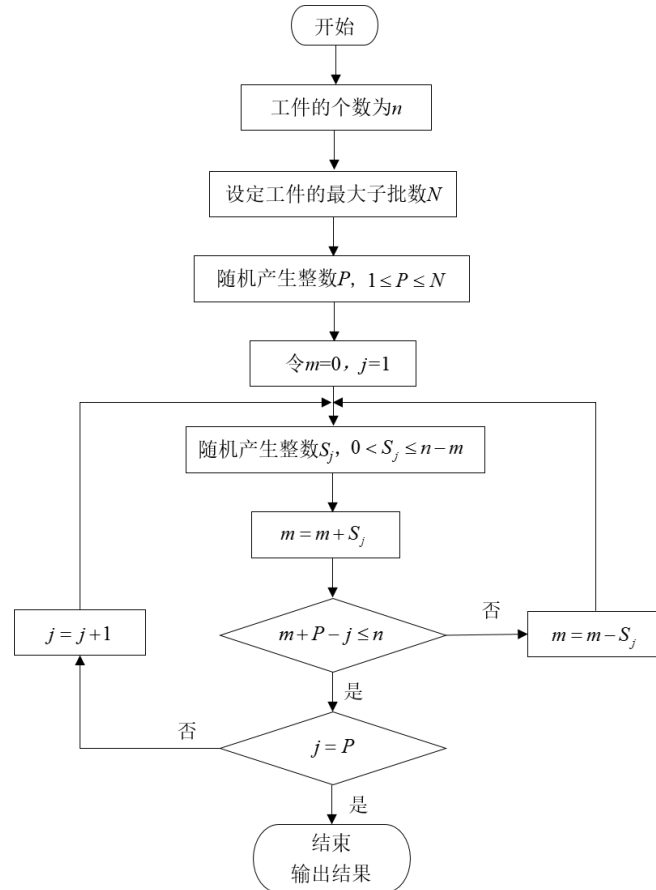


图 4.1 柔性分批流程图

表 4.1 为一个有准备时间的柔性作业车间批量调度实例，该实例是 3 种工件在 4 台机器上加工的调度优化问题。每种工件有 20 个，工件各有 3 道工序共 9 道工序，表中数据为机器加工每道工序所需的加工时间和准备时间（单位，min）。

表 4.1 调度实例

工件	工序	机器			
		M ₁	M ₂	M ₃	M ₄
J_1	O_{11}	3/2	4/3	5/2	×
	O_{12}	×	2/1	×	3/2
	O_{13}	2/1	3/3	5/1	×
J_2	O_{21}	4/1	×	6/3	×
	O_{22}	×	6/2	5/1	9/4
	O_{23}	×	×	5/3	8/1
J_3	O_{31}	3/2	5/4	×	7/1
	O_{32}	4/3	×	3/1	5/2
	O_{33}	×	10/2	6/1	9/1

用上述柔性分批方法对工件进行分批，分批方案如表 4.2 所示。

表 4.2 工件的分批方案

工件分批方案			各批次批量数			总批次	最大完工时间/min
J_1	J_2	J_3	J_1	J_2	J_3		
2	3	2	(12,8)	(4,8,8)	(9,11)	7	251
2	3	2	(7,13)	(6,9,5)	(8,12)	7	265
2	2	3	(13,7)	(8,12)	(6,7,7)	7	244
2	2	4	(7,13)	(11,9)	(5,6,5,4)	8	234
2	2	4	(8,12)	(11,9)	(8,4,4,4)	8	239
3	3	2	(10,5,5)	(6,7,7)	(10,10)	8	253
2	3	4	(12,8)	(7,6,7)	(4,4,4,8)	9	237
2	3	4	(11,9)	(6,5,9)	(6,4,5,5)	9	246
3	2	4	(7,8,5)	(8,12)	(5,6,3,6)	9	252
4	3	3	(6,4,4,6)	(9,6,5)	(4,8,8)	10	263
4	3	3	(7,6,4,3)	(6,7,7)	(5,6,9)	10	252
4	2	4	(6,4,5,5)	(11,9)	(4,4,6,6)	10	245
3	4	4	(7,8,5)	(6,3,5,6)	(4,5,5,6)	11	247
3	4	4	(9,5,6)	(4,6,7,3)	(3,5,6,6)	11	260
4	4	3	(5,5,4,6)	(4,4,5,7)	(5,8,7)	11	259
4	4	4	(6,4,5,5)	(4,4,7,5)	(7,4,4,5)	12	266
4	4	4	(6,6,3,5)	(5,6,4,5)	(4,4,6,6)	12	262
4	4	4	(3,4,6,7)	(3,5,5,7)	(5,7,5,3)	12	263

表 4.2 给出了每种工件的分批方案，工件的总批次有 5 种，每种工件有三组数据。以总批次为 8 的分批方案为例，工件有 (2, 2, 4) 和 (3, 3, 2) 两种批次划分方法。每种工件的子批数不同，最大完工时间也不同。此外，工件分批方式为 (2, 2, 4) 的子批批量不同，其最大完工时间也不同。工件的总批次大小和子批批量的大小都会影响工件的最大完工时间。

4.2 遗传算法的改进

分析可知，遗传算法在解决实际调度问题时存在过早收敛的现象，算法的性能和效率降低。同时，在用遗传算法解决本文所研究的问题时，编码方式不能充分表示问题的

初始解。本文用改进的遗传算法解决考虑生产准备和工件分批的 FJSP。改进的遗传算法流程图，如图 4.2 所示。

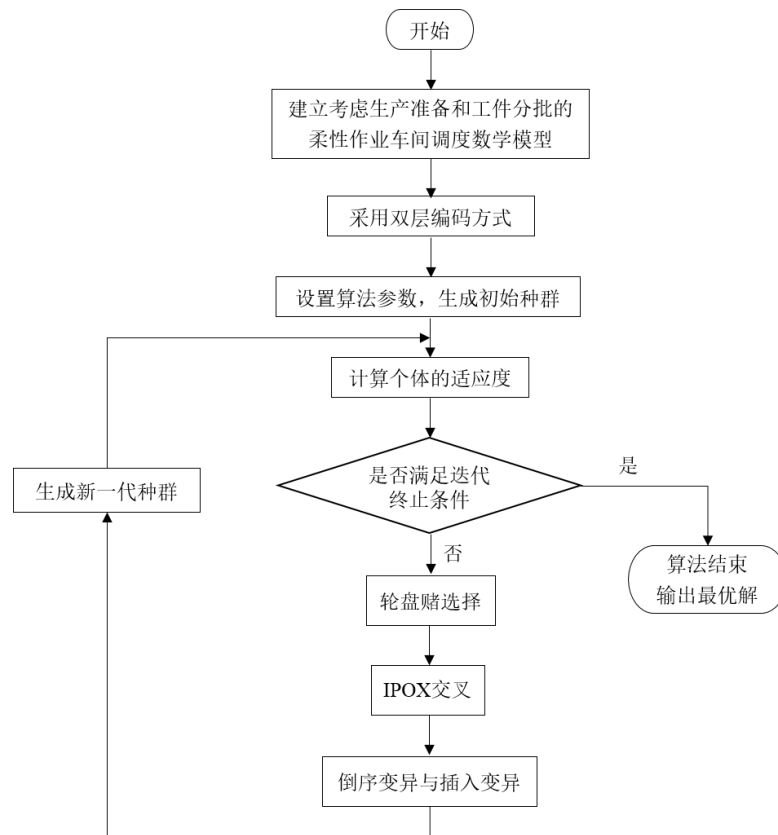


图 4.2 改进的遗传算法流程图

4.2.1 改进编码方式

确定染色体的编码方式是遗传算法的一个关键环节，对算法的求解效率有很大的影响。遗传算法求解 FJSP 时，工序排序和机器选择部分是编码的关键，在解决本文所研究的问题时，要考虑如何进行工件分批编码、子批工序排序编码和机器选择编码。MSOS 整数编码方式不能准确表示本文所研究问题的初始解，用改进的双层编码方式对工件分批、机器选择和子批工序排序部分进行编码。染色体结构如图 4.3 所示。

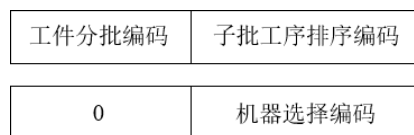


图 4.3 染色体结构

采用双层编码的染色体由两层组成，每层染色体各由两部分组成。第一层编码由工件分批编码和子批工序排序编码组成，第二层编码中与工件分批编码对应的部分用无意义的“0”表示，机器选择编码部分与工件子批工序排序编码部分一一对应。通过这种编

码方式将工件分批编码与子批工序排序编码和机器选择编码部分区分开，保证染色体能够正常进行交叉和变异操作。

以表 4.2 中分批方式为 (2, 2, 4)，最大完工时间为 234min 的分批方案为例，对工序编码中的数字予以说明，如表 4.3 所示。

表 4.3 工序编码中数字 1-8 对应的各工件子批

工序编码	工件子批
1	工件 1 的第 1 个子批
2	工件 1 的第 2 个子批
3	工件 2 的第 1 个子批
4	工件 2 的第 2 个子批
5	工件 3 的第 1 个子批
6	工件 3 的第 2 个子批
7	工件 3 的第 3 个子批
8	工件 3 的第 4 个子批

双层编码的染色体结构如图 4.4 所示。

工件分批编码			子批工序排序编码																										
2	2	4	8	6	1	6	3	7	8	6	8	5	4	3	1	7	4	2	3	2	5	1	2	7	5	4			
0	0	0	4	1	2	3	1	2	3	4	3	2	1	3	2	4	2	1	3	4	1	2	1	4	2	3			
			机器选择编码																										
子批工序 可选的机器	M ₁	M ₁	M ₁	M ₁	M ₁	M ₁	M ₁	M ₂	M ₂	M ₁	M ₁	M ₂	M ₂	M ₁	M ₂	M ₁	M ₃	M ₂	M ₁	M ₁	M ₁	M ₂	M ₂	M ₃					
	M ₂	M ₂	M ₂	M ₃	M ₃	M ₂	M ₃	M ₃	M ₃	M ₂	M ₃	M ₃	M ₄	M ₃	M ₃	M ₂	M ₄	M ₄	M ₃	M ₂	M ₂	M ₃	M ₃	M ₄					
	M ₄	M ₄	M ₃	M ₄		M ₄	M ₄	M ₄	M ₄	M ₄		M ₄		M ₄	M ₄	M ₃			M ₄	M ₃	M ₃	M ₄	M ₄						

图 4.4 染色体编码

图 4.4 所示的染色体中，第一层工件分批编码部分“2”、“2”、“4”表示 3 种工件的分批方案为 (2, 2, 4)，第二层编码中用“0”与之对应。用表 4.3 中工序编码数字表示子批工序排序编码中工件的各批次。在子批工序排序编码中，从左到右每个数字出现的次数表示该批次的工序。如：上述染色体编码中，第一次出现的“8”表示工序 O_{341} ，第二次出现的“8”表示工序 O_{342} ，第三次出现的“8”表示工序 O_{343} 。子批工序排序编码部分对应的工序顺序为：

$$\begin{aligned}
 &O_{341} \rightarrow O_{321} \rightarrow O_{111} \rightarrow O_{322} \rightarrow O_{211} \rightarrow O_{331} \rightarrow O_{342} \rightarrow O_{323} \rightarrow O_{343} \rightarrow O_{311} \rightarrow O_{221} \rightarrow O_{212} \\
 &\rightarrow O_{112} \rightarrow O_{332} \rightarrow O_{222} \rightarrow O_{121} \rightarrow O_{213} \rightarrow O_{223} \rightarrow O_{312} \rightarrow O_{113} \rightarrow O_{123} \rightarrow O_{333} \rightarrow O_{313} \rightarrow \\
 &O_{223}
 \end{aligned}$$

在第二层机器选择编码中, 对各子批每道工序选择的机器进行编码, 工序 O_{341} 有 3 台机器 $\{M_1, M_2, M_4\}$ 可以选择, 编码中的“4”表示该工序在机器 M_4 上加工。

解码是将染色体转化为具体的工序调度方案的过程, 主要是解决工件各子批工序排序和机器选择的问题。在对染色体进行解码时, 先对工件分批编码部分进行解码, 再对子批工序编码部分进行解码。同时, 从左到右依次对染色体的机器选择编码部分进行解码。将编码部分转换为机器选择矩阵 J_M 、工件的加工时间矩阵 T_l 和机器的准备时间矩阵 T_2 。机器编码部分确定了每道工序所选择的加工机器, 同时工序所需的加工时间也随之确定。同一种工件各子批之间存在并行工序, 解码过程是要确定机器上每道工序具体开始加工的时间。同时, 要确定工件每个子批工序在所选机器上的完工时间。

4.2.2 选择操作

遗传算法通过适应度函数值对染色体个体进行评价, 每次迭代计算前, 根据适应度值对个体进行选择。被选择的个体参与到下一次的迭代优化中, 对目标函数进行优化。本文采用轮盘赌法对个体进行选择, 保留种群中的优秀个体。在本文研究的考虑生产准备和工件分批的 FJSP 中, 目标函数 f 为工件最大完工时间的最小值。本文把工件的最大完工时间作为适应度函数, 即

$$F = C_{\max} \quad (4.1)$$

4.2.3 改进交叉操作

本文采用 IPOX (Improved Precedence Operation Crossover, IPOX) 交叉方法对染色体进行交叉操作。本文研究的求解方法中, 采用 MSOS 双层编码方法, 子批工序排序编码与机器选择编码之间存在对应关系, 子批工序排序编码的改变会引起下层机器选择编码的改变, 在进行交叉操作时只需对子批工序排序编码部分进行交叉操作。

以表 4.1 中的调度实例为例, 将 3 种工件分为两个集合 $\{J_1, J_2\}$ 和 $\{J_3\}$, f_1 、 f_2 为两个父代染色体, c_1 、 c_2 为交叉后产生的两个子代染色体。具体交叉操作过程如下:

步骤 1: 随机选择两条父代染色体 f_1 、 f_2 ;

步骤 2: 将 3 种工件 J_1 、 J_2 和 J_3 分为两个集合 $\{J_1, J_2\}$ 和 $\{J_3\}$;

步骤 3: 将 f_1 中 $\{J_1, J_2\}$ 工件对应的基因复制到 c_1 中对应的基因位置上, 保留 $\{J_3\}$ 工件对应的基因位置。将 f_2 中 $\{J_3\}$ 工件对应的基因从左到右依次复制到 c_1 中空出的基因位置:

步骤 4: 将 f_2 中 $\{J_3\}$ 工件对应的基因复制到 c_2 中对应的基因位置上, 保留 $\{J_1, J_2\}$ 工件对应的基因位置。将 f_1 中 $\{J_1, J_2\}$ 工件对应的基因从左到右依次复制到 c_2 中空出的基因位置。

染色体的子批工序排序编码交叉操作过程, 如图 4.5 所示。

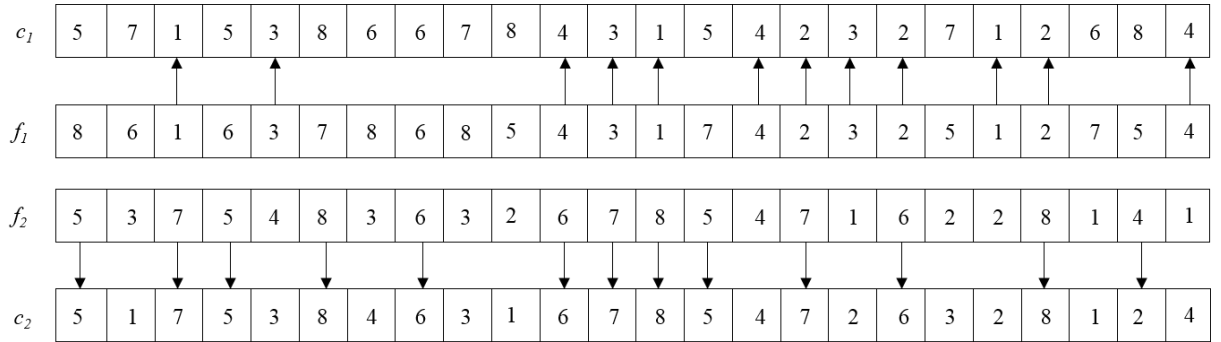


图 4.5 工序分批排序编码交叉操作

4.2.4 改进变异操作

变异操作可以产生新个体, 防止算法过早收敛, 能够提高算法的求解效率。在进行变异操作时, 同交叉操作一样, 只需对子批工序排序编码部分进行变异操作。倒序变异、插入变异是遗传算法常用的变异方法, 本文采用倒序变异与插入变异相结合的变异方法, 具体的变异操作如下:

步骤 1: 根据遗传算法设置的变异概率参数判断是否需要变异操作, 确定变异后对工序基因部分染色体进行变异操作;

步骤 2: 将染色体 f_1 中工序分批编码部分进行倒序变异;

步骤 3: 在倒序后的染色体上随机选择一个基因, 将它随机插入到染色体的其它位置上, 得到子代染色体 c_1 ;

以图 4.5 中染色体 f_1 为例, 用上述方法进行变异操作, 得到一条子代染色体 c_1 。具体的变异操作过程如图 4.6 所示。

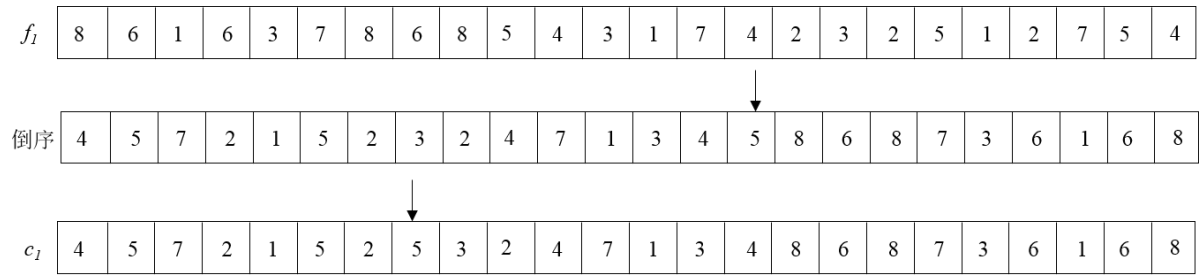


图 4.6 工序分批编码变异操作

4.3 实例验证

(1) 4×6 型实例验证

为验证本文求解方法的性能，对文献[59]提出的 4×6 型 FJSP 实例进行分析。该类型调度问题表示 4 种工件在 6 台机器上加工，调度数据如表 4.4 所示（单位，min）。

表 4.4 4×6 型调度问题

工件	工序	机器					
		M ₁	M ₂	M ₃	M ₄	M ₅	M ₆
J ₁	O ₁₁	2	3	4	×	×	×
	O ₁₂	×	3	×	2	4	×
	O ₁₃	1	4	5	×	×	×
J ₂	O ₂₁	3	×	5	×	2	×
	O ₂₂	4	3	×	×	6	×
	O ₂₃	×	×	4	×	7	11
J ₃	O ₃₁	5	6	×	×	×	×
	O ₃₂	×	4	×	3	5	×
	O ₃₃	×	×	13	×	9	12
J ₄	O ₄₁	9	×	7	9	×	×
	O ₄₂	×	6	×	4	×	5
	O ₄₃	1	×	3	×	×	3

相关学者分别采用传统遗传算法^[59]、改进的遗传算法^[60]，研究该问题的调度优化过程。在不考虑批量加工的情况下，求得最大完工时间的最优值均为 17min。

在上述调度问题的基础上，研究柔性作业车间批量调度问题。假设每种工件的数量均为 8 个，在不分批的情况下，文献[59]和文献[60]提出的求解算法得到的最大完工时间

为 136min ($17 \times 8 = 136$)。文献[61]采用柔性分批方法对该问题进行研究,求得工件最大完工时间的最优值为 89min, 4 种工件的分批方案为 (2, 2, 2, 2), 各子批工件的数量分别为 (3, 5)、(7, 1)、(5, 3) 和 (1, 7)。本文算法采用柔性分批的方法,求得工件最大完工时间的最优值为 82min。算法迭代过程中工件的分批方案及最大完工时间如表 4.5 所示。

表 4.5 4×6 型实例工件分批方案及最大完工时间

迭代次数	工件分批方案	最大完工时间/min
	J_1, J_2, J_3, J_4	
1	4, 3, 4, 4	102
2	2, 2, 2, 4	97
3	1, 3, 3, 3	99
4	4, 2, 4, 4	88
5	2, 3, 4, 4	97
6	2, 3, 2, 3	95
7	3, 3, 4, 3	93
8	3, 1, 3, 4	92
9	1, 4, 4, 3	93
10	4, 4, 4, 4	88
11	4, 2, 4, 4	82
12	1, 4, 3, 4	86
13	1, 3, 4, 4	87
14	4, 3, 4, 3	83
15	1, 3, 3, 3	84

在最大完工时间最优值为 82min 的分批调度方案中, 4 种工件的分批方案为 (4, 2, 4, 4), 总批次为 14。各子批工件的数量分别为 (2, 2, 2, 2)、(5, 3)、(2, 2, 1, 3) 和 (2, 3, 2, 1)。最优分批调度甘特图如图 4.7 所示。

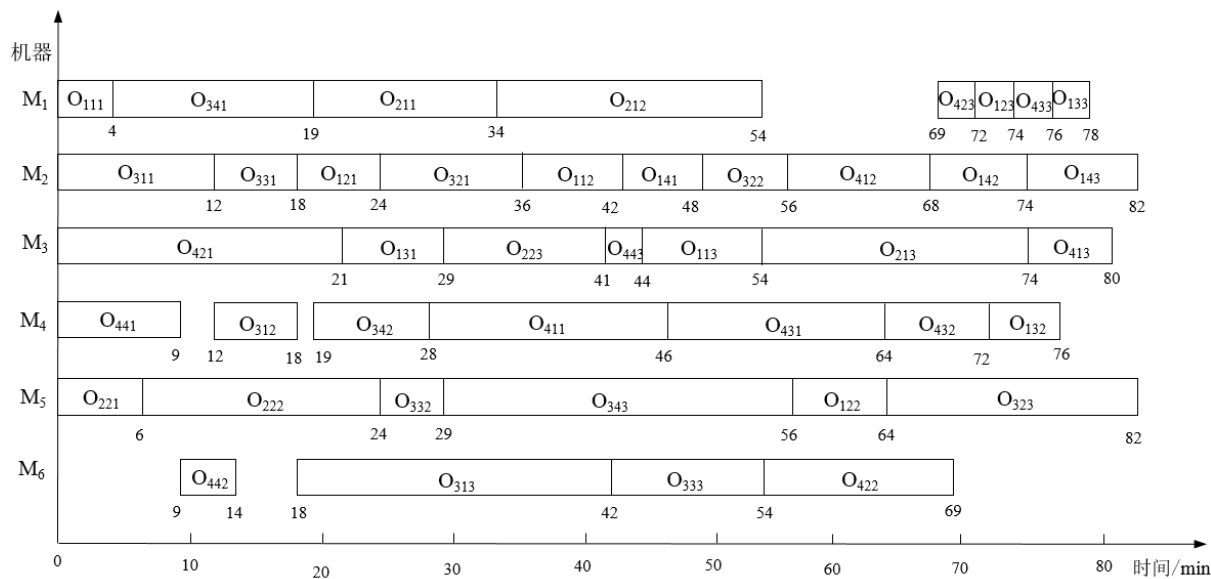


图 4.7 4×6 型最优分批调度甘特图

最优分批调度方案中，适应度值在迭代过程中的收敛图，如图 4.8 所示。

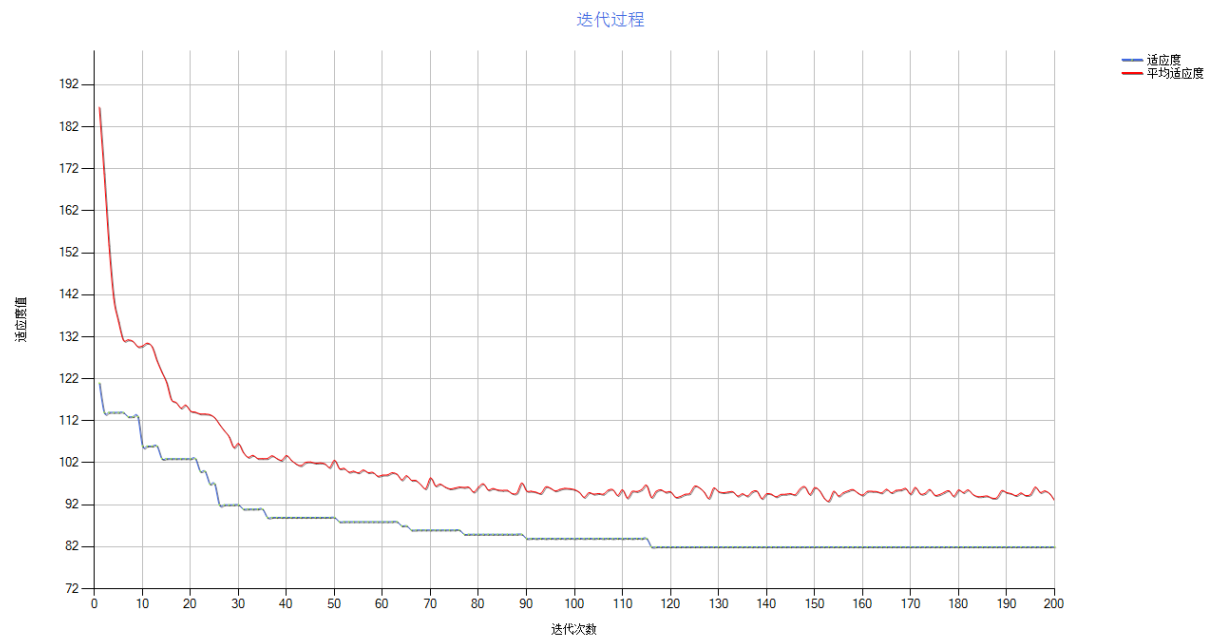


图 4.8 4×6 型分批调度适应度值收敛图

由上述分析可知，在相同的调度数据下，本文算法的求解结果优于文献[61]所采用的算法，且种群个体的适应度值在迭代过程中有较快的收敛速度。在研究批量调度问题时，本文基于改进遗传算法的求解方法是有效的。

本文在对工件进行柔性分批的基础上，对有准备时间约束的批量调度问题进行研究。在表 4.4 中柔性作业车间调度数据的基础上增加准备时间。假设工件每道工序的准备时

间与工件在机器上的加工时间相同，用本文算法解决该调度问题，调度甘特图如图 4.9 所示。

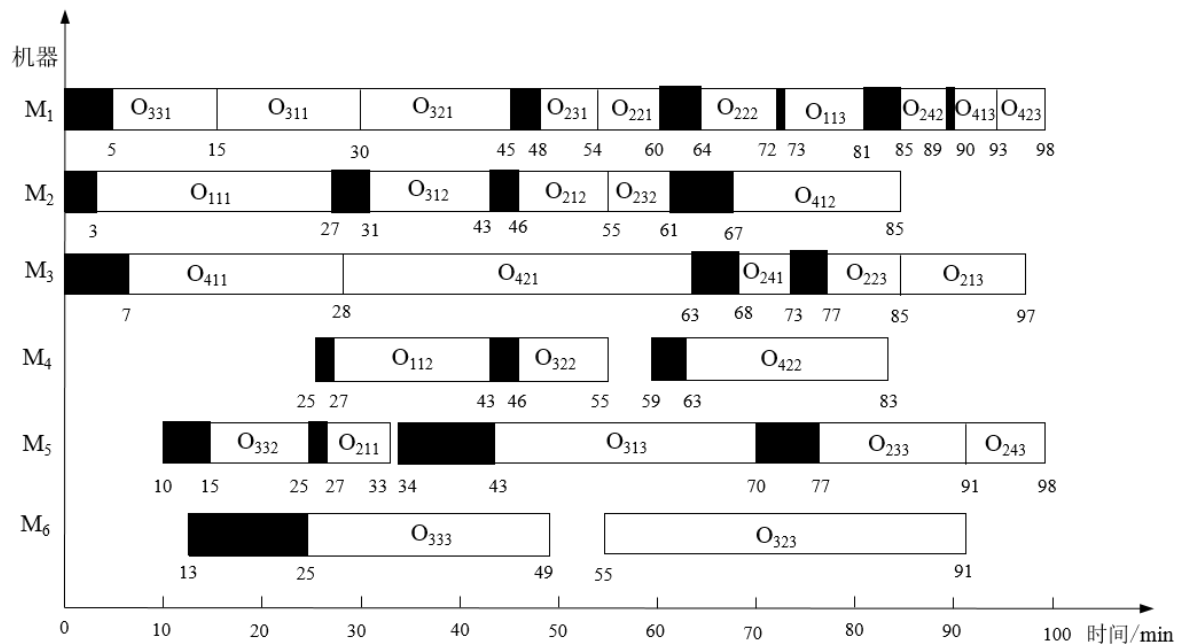


图 4.9 4×6 型考虑准备时间的最优分批调度甘特图

在图 4.9 所示甘特图中，黑色部分表示准备时间，工件最大完工时间的最优值为 98min。4 种工件的分批方案为 (1, 4, 3, 2)，第 1 种工件不分批，各子批工件的数量分别为 (10)、(3, 2, 2, 1)、(3, 3, 2) 和 (3, 5)。

考虑准备时间的最优分批方案中，适应度值收敛图如图 4.10 所示。

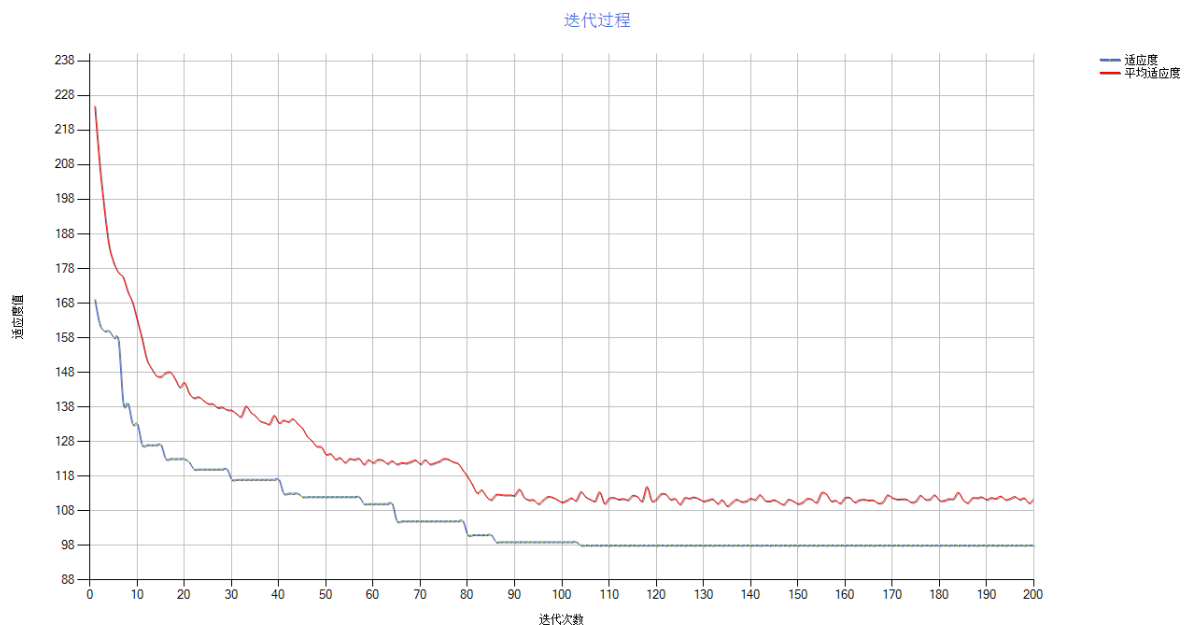


图 4.10 4×6 型考虑准备时间的适应度值收敛图

(2) 6×6 型实例验证

对文献[62]提出的 6×6 型 FJSP 实例进行分析。该类型调度问题表示 6 种工件在 6 台机器上加工，调度数据如表 4.6 所示（单位，min）。

表 4.6 6×6 型调度问题

工件	工序	机器					
		M ₁	M ₂	M ₃	M ₄	M ₅	M ₆
<i>J₁</i>	<i>O₁₁</i>	7	×	4	15	×	3
	<i>O₁₂</i>	×	10	×	2	8	4
	<i>O₁₃</i>	11	3	×	5	7	×
	<i>O₁₄</i>	8	6	3	2	×	9
<i>J₂</i>	<i>O₂₁</i>	4	9	7	×	×	6
	<i>O₂₂</i>	7	10	12	4	8	×
	<i>O₂₃</i>	10	5	×	7	6	11
<i>J₃</i>	<i>O₃₁</i>	5	9	4	7	5	7
	<i>O₃₂</i>	12	10	2	13	7	5
	<i>O₃₃</i>	4	7	5	9	×	5
<i>J₄</i>	<i>O₄₁</i>	8	×	10	×	7	6
	<i>O₄₂</i>	3	4	7	3	5	9
	<i>O₄₃</i>	5	5	×	3	3	2
<i>J₅</i>	<i>O₅₁</i>	2	5	7	×	4	4
	<i>O₅₂</i>	10	7	6	9	×	6
<i>J₆</i>	<i>O₆₁</i>	12	5	9	3	12	5
	<i>O₆₂</i>	7	×	4	4	9	×
	<i>O₆₃</i>	×	10	12	9	3	6
	<i>O₆₄</i>	4	4	2	×	9	5
	<i>O₆₅</i>	2	4	3	7	×	7

文献[62]研究该问题时，得到的最大完工时间为 20min。假设每种工件的数量均为 8 个，对批量调度问题进行研究。在不分批的情况下，最大完工时间为 160min(20×8=160)。用本文算法，求得工件最大完工时间的最优值为 152min，方案优于不分批调度。6 种工件的分批方案为 (1, 4, 3, 3, 1, 2)，各子批工件的数量分别为 (8)、(2, 2, 2, 2)、(3, 2, 3)、(2, 3, 3)、(8) 和 (4, 4)。算法迭代过程中工件的分批方案及最大完工

时间，如表 4.7 所示。

表 4.7 6×6 型实例工件分批方案及最大完工时间

迭代次数	工件分批方案	最大完工时间/min
	$J_1, J_2, J_3, J_4, J_5, J_6$	
1	2, 4, 1, 2, 3, 2	187
2	4, 4, 4, 1, 1, 2	177
3	4, 3, 3, 2, 3, 4	173
4	4, 4, 4, 2, 1, 1	172
5	2, 4, 4, 2, 4, 4	171
6	3, 2, 4, 4, 3, 3	177
7	1, 3, 3, 4, 4, 4	171
8	1, 3, 3, 3, 2, 4	169
9	2, 4, 1, 3, 2, 3	166
10	1, 4, 3, 3, 2, 1	162
11	3, 4, 4, 2, 4, 3	156
12	1, 4, 3, 3, 1, 2	152
13	4, 2, 1, 3, 4, 4	158
14	1, 2, 3, 4, 4, 1	159
15	2, 3, 4, 3, 4, 3	165

最大完工时间为 152min 的分批调度甘特图，如图 4.11 所示。

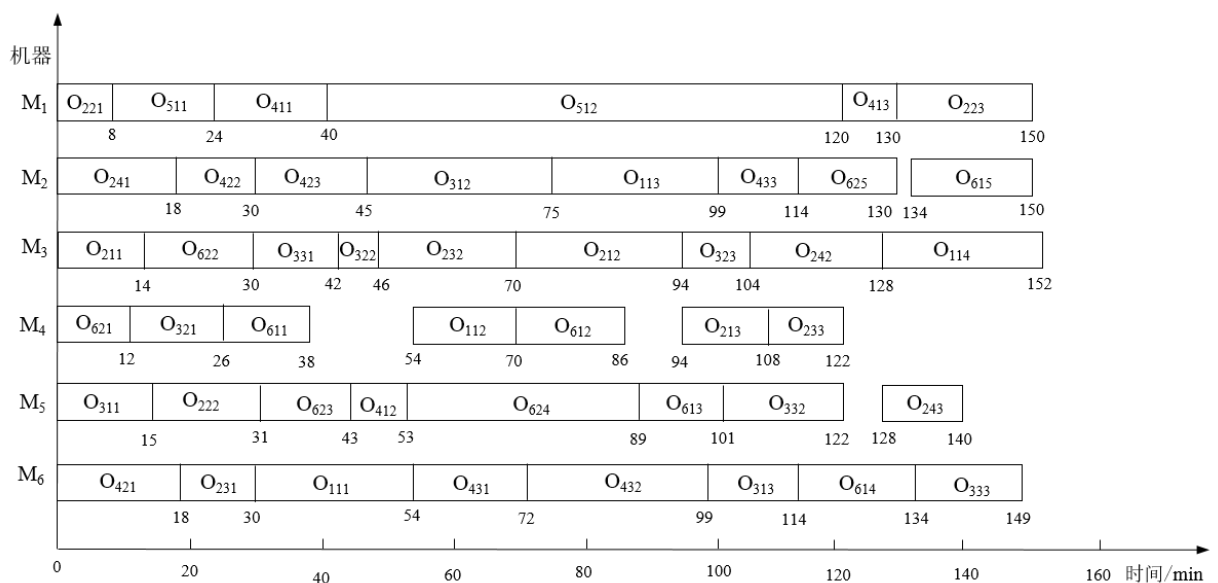


图 4.11 6×6 型最优分批调度甘特图

最优分批方案中，适应度值迭代收敛图，如图 4.12 所示。

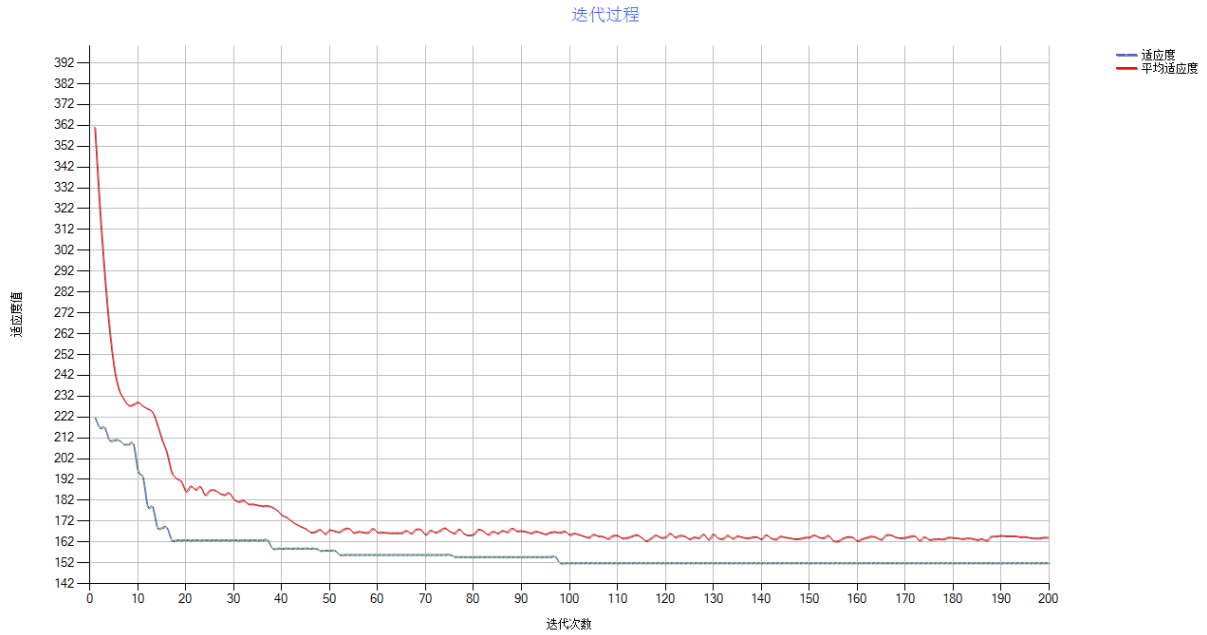


图 4.12 6×6 型分批调度适应度值收敛图

在上述研究的基础上，考虑准备时间。假设工件每道工序的准备时间与工件在机器上的加工时间相同。调度甘特图如图 4.13 所示。

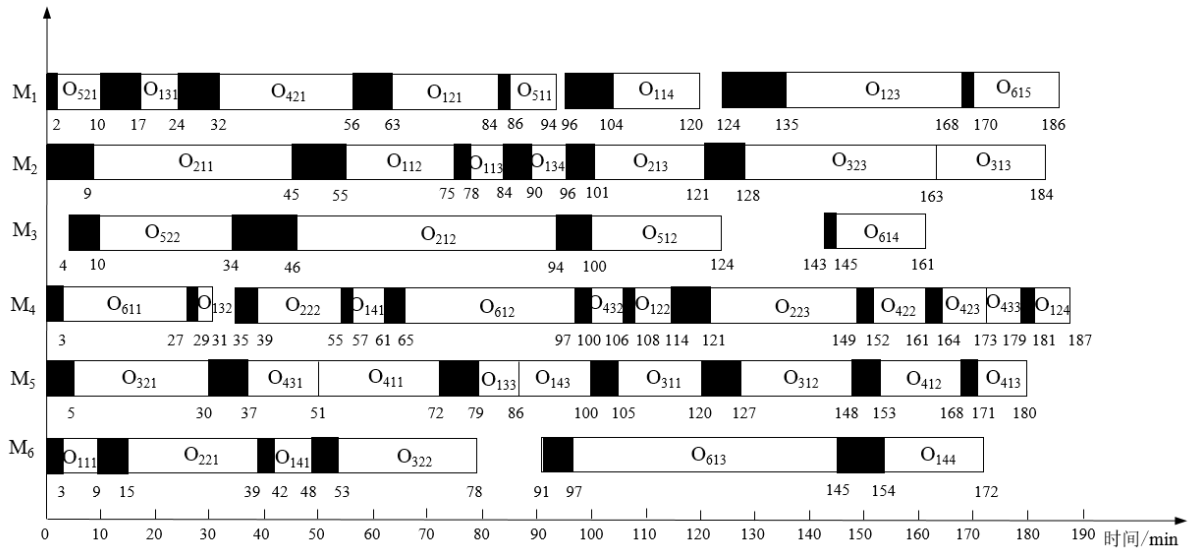


图 4.13 6×6 型考虑准备时间的最优分批调度甘特图

图 4.13 所示的甘特图中，工件最大完工时间的最优值为 187min。6 种工件的分批方案为 (4, 2, 2, 3, 2, 1)，第 6 种工件不分批，各子批工件的数量分别为 (2, 3, 1, 2)、(4, 4)、(3, 5)、(3, 3, 2)、(4, 4) 和 (8)。

适应度值在迭代过程中的收敛图，如图 4.14 所示。

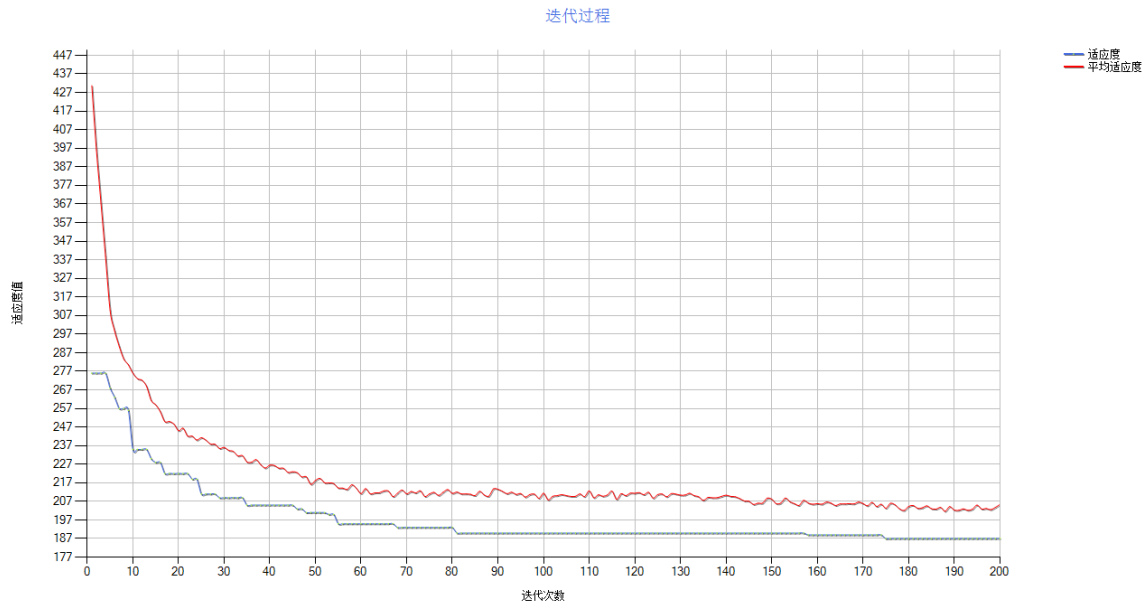


图 4.14 6×6 型考虑准备时间的适应度值收敛图

通过对上述调度实例的分析可知，在解决柔性作业车间批量调度问题时，相比工件不分批的加工方式，分批加工可以减小最大完工时间，提高车间的生产效率。同时，结合车间生产的实际情况，对有准备时间约束的批量调度问题进行研究。通过对调度实例的分析可知，考虑准备时间后，工件的最优分批方案发生了变化。工件在进行分批时，子批的数量会影响总的准备时间，进而会影响工件的最大完工时间。

因此，在解决考虑准备时间和工件分批的 FJSP 时，要对问题进行有效求解，获得最佳的子批数，从而得到最优的分批调度方案。减少工件的最大完工时间及工件分批加工时所需的准备时间，提高生产效率。

4.4 本章小结

本章对基于改进遗传算法的求解方法进行研究，根据工件批量加工的特性，提出一种柔性分批方法对工件进行分批。分析了遗传算法解决本文所研究问题的不足之处，改进染色体的编码方式、交叉和变异操作。结合调度实例验证了本文算法的有效性，并分析了工件分批加工及考虑准备时间时对最大完工时间的影响。

第五章 柔性作业车间调度系统开发

本章在上述理论研究的基础上开发了柔性作业车间调度系统，用 C# 完成柔性作业车间调度系统的界面设计和功能开发，在 MATLAB 中编写算法对调度问题进行求解。可根据车间生产任务的要求，在调度系统中输入工件和机器的数据，用算法求解后生成调度方案，完成对生产任务的排序。

5.1 系统需求分析

车间调度是生产管理的核心，根据车间内的生产资源对生产任务进行分配。柔性作业车间调度系统在满足约束条件的情况下，根据车间的生产状态，确定调度优化目标，采用智能算法对问题求解，快速确定车间排产调度方案，提高车间的运行效率。管理人员可根据具体的生产任务在调度系统中进行调度安排，给出合理的调度方案。

柔性作业车间调度系统主要有以下需求：

（1）车间调度数据

系统的运行需要获取车间调度过程的相关数据，这些数据主要是工件和机器的相关信息。工件的信息包括工件种类、工序数、每种工件的批量、批次数、工件每道工序可选择的机器及相应的加工时间。机器的信息是指车间内的机器数量。

（2）调度优化

建立柔性作业车间调度问题的数学模型，调用算法生成车间调度方案。算法根据获取的车间调度数据对工件的工序进行排序以及选择合适的加工机器，对调度目标进行优化，给出调度方案以及机器的负荷情况。工件批量加工生产时，在调度系统中对工件进行批量划分，给出工件的分批方案以及子批工序排序调度方案。

（3）可视化

在调度系统中要实现调度过程的可视化，能够查看具体的调度结果，以更加直观的方式进行排产安排。

5.2 系统总体设计

5.2.1 系统设计原则

柔性作业车间调度系统的设计应遵循以下原则：

（1）系统设计要满足车间实际调度的需求，输出相应的调度方案，为车间实际生产过程提供决策支持；

（2）在进行程序编写时，要添加系统操作判断功能，保证操作人员在操作失误时能够正确处理，提高系统运行的稳定性；

（3）系统的界面布局应规范，相应的功能模块应简单明了，符合操作人员的习惯，便于进行系统操作，提高效率。

5.2.2 系统功能设计

调度系统的功能主要分为：调度数据管理、算法求解和调度结果输出三个部分。系统功能结构如图 5.1 所示。

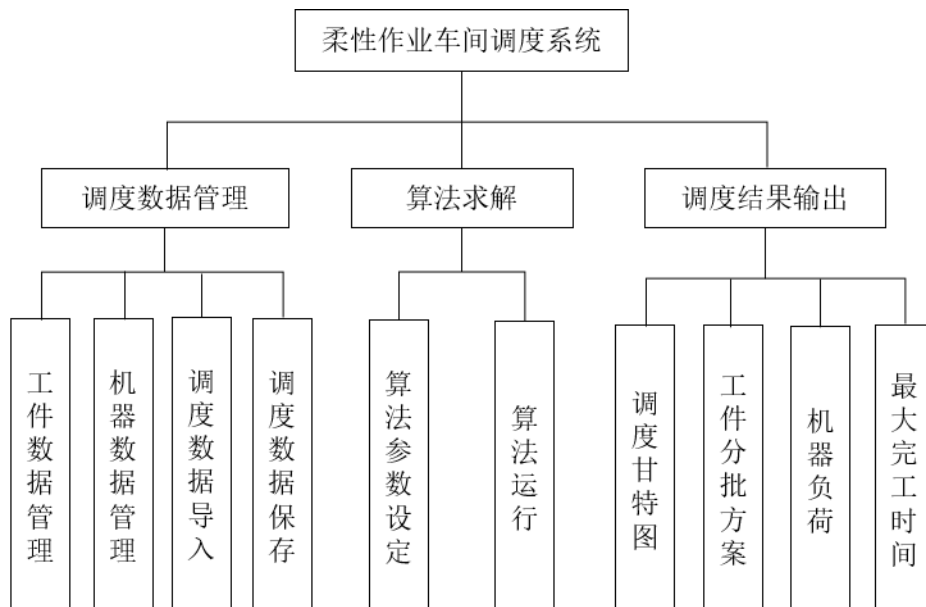


图 5.1 系统功能结构

（1）调度数据管理

调度数据管理部分的主要功能是能够输入工件和机器的数据、导入调度数据和保存调度数据。工件的数据主要包括工件种类、最大工序数、加工时间和准备时间。在工件批量加工时，还应设定工件的最大子批数和每种工件的批量数。机器的数据是指车间内机器的数量。

（2）算法求解

系统中算法求解部分的功能包括设定遗传算法参数、算法运行。在运行算法解决调度问题之前，需要在系统中设置遗传算法的迭代次数、种群规模、交叉概率和变异概率等参数。通过 C#调用 MATLAB 中改进的遗传算法，实现算法的求解功能。

（3）调度结果输出

调度结果输出部分的功能包括输出调度甘特图、工件的分批方案、机器的负荷和工件的最大完工时间。同时，还可以查看调度结果表以及种群的适应度值在迭代过程中的收敛图。

5.2.3 系统运行流程

在调度数据管理界面输入工件与机器的相关数据，在算法求解界面点击“改进的遗传算法”进行运算。算法运行之后，输出工件的最大完工时间和调度甘特图。同时，在“工件分批方案”部分输出每种工件的分析结果，“机器负荷”部分输出每台机器的准备时间、空闲时间和加工时间等数据。通过点击“查看迭代过程”可查看种群适应度值的收敛图。系统运行流程图如图 5.2 所示。

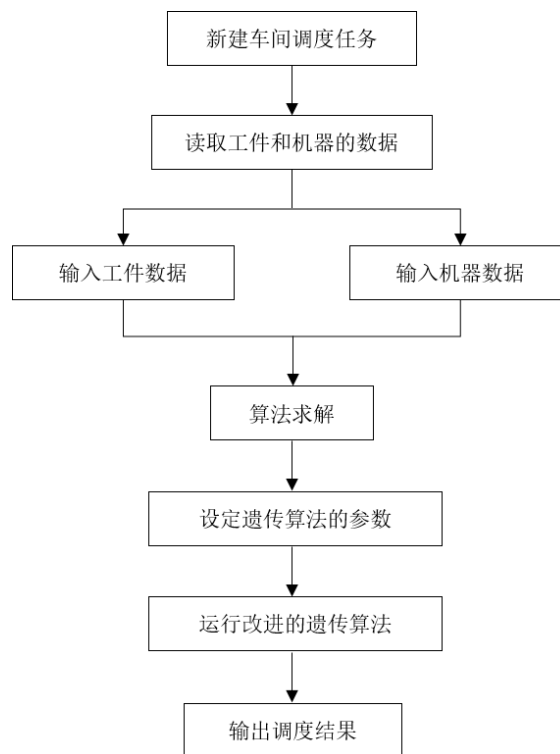
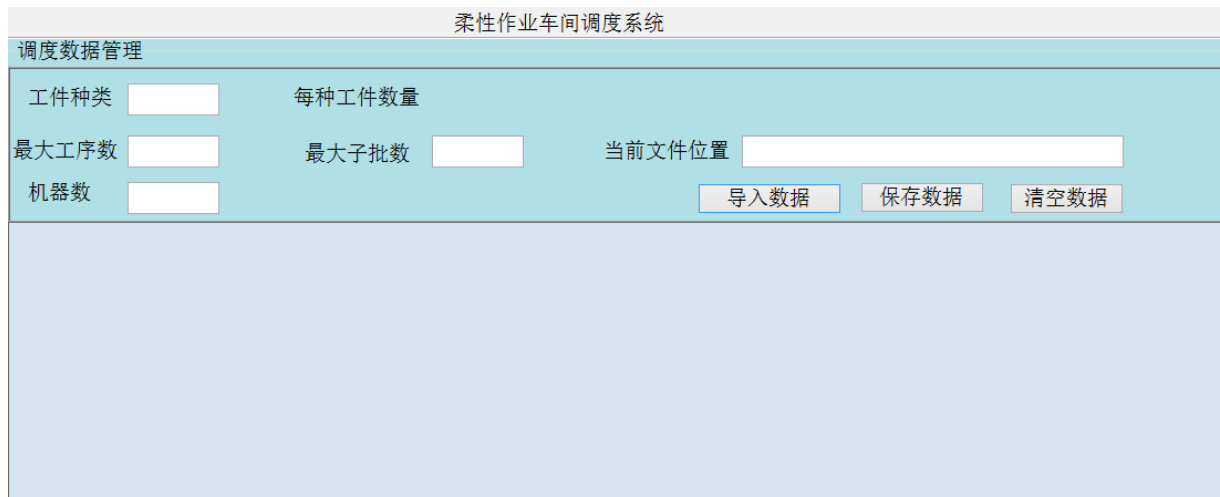


图 5.2 系统运行流程图

5.3 系统界面设计与功能实现

5.3.1 系统界面设计

系统调度数据管理界面如图 5.3 所示。在调度数据管理部分可以输入工件的种类、每种工件的数量、最大工序数、最大子批数和机器数。同时，能够实现调度数据的导入与保存。

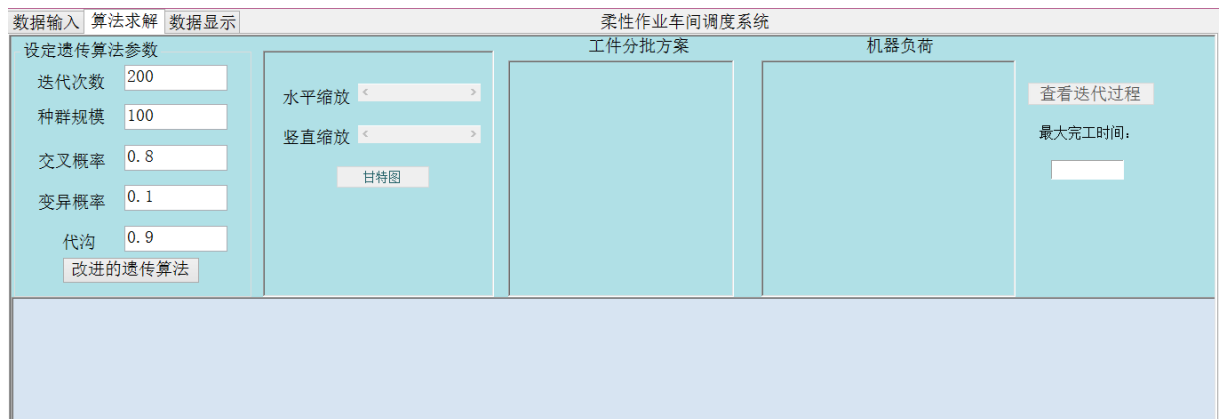


该界面为“柔性作业车间调度系统”下的“调度数据管理”子界面。顶部标题栏显示“柔性作业车间调度系统”。主区域包含以下元素：

- “调度数据管理”标题。
- 输入字段：工件种类、每种工件数量、最大工序数、最大子批数、当前文件位置、机器数。
- 操作按钮：导入数据、保存数据、清空数据。

图 5.3 调度数据管理界面

系统算法求解界面如图 5.4 所示。



该界面为“柔性作业车间调度系统”下的“算法求解”子界面。顶部标题栏显示“柔性作业车间调度系统”。主区域包含以下元素：

- “数据输入 | 算法求解 | 数据显示”标签页。
- “设定遗传算法参数”区域：迭代次数 (200)、种群规模 (100)、交叉概率 (0.8)、变异概率 (0.1)、代沟 (0.9)。
- “改进的遗传算法”按钮。
- “水平缩放”、“竖直缩放”滑块。
- “甘特图”按钮。
- “工件分批方案”和“机器负荷”显示区域。
- “查看迭代过程”按钮。
- “最大完工时间”显示区域。

图 5.4 算法求解界面

在算法求解界面，可输入遗传算法的相关参数，运行改进的遗传算法，输出调度结果。

5.3.2 系统实现技术

本文采用 C#与 MATLAB 混合编程的方法进行系统开发。在 C#中搭建系统的基本框架，根据功能需求设计系统的界面，实现系统的各项操作。C#主要有以下特点：

- (1) C#语法简洁，不需要进行指针操作；
- (2) C#面向对象编程；
- (3) C#能够与其它编程语言兼容，易于进行系统开发。

MATLAB 是一种常用的数学工具，主要有以下特点：

- (1) MATLAB 语言易于编程，可进行数据分析；
- (2) MATLAB 内部有函数库，便于进行算法开发工作；
- (3) MATLAB 可与其它编程语言相结合。

本文在 MATLAB 中编写改进的遗传算法，算法编译后生成.dll 文件。在 C#搭建的柔性作业车间调度系统中引用.dll 文件，在系统运行过程中调用 MATLAB 中编写的算法，实现算法的求解及调度结果输出功能。

5.4 实例测试

(1) 4×6 型实例测试

用 4.3 节中的 4×6 型柔性作业车间调度实例，对系统具体的操作流程进行介绍，并测试系统运行的可行性。4 种工件在 6 台机器上加工，每种工件加工 8 个，调度数据输入如图 5.5 所示。

柔性作业车间调度系统									
调度数据管理									
工件种类	4	每种工件数量	8	8	8	8			
最大工序数	3	最大子批数	4	当前文件位置		Users\			
机器数	6	导入数据		保存数据		清空数据			
		工件1	工件2	工件3	工件4				
机器号		1, 2, 3	1, 3, 5	1, 2	1, 3, 4				
工序1 准备时间		0, 0, 0	0, 0, 0	0, 0	0, 0, 0				
加工时间		2, 3, 4	3, 5, 2	5, 6	9, 7, 9				
机器号		2, 4, 5	1, 2, 5	2, 4, 5	2, 4, 6				
工序2 准备时间		0, 0, 0	0, 0, 0	0, 0, 0	0, 0, 0				
加工时间		3, 2, 4	4, 3, 6	4, 3, 5	6, 4, 5				
机器号		1, 2, 3	3, 5, 6	3, 5, 6	1, 3, 6				
工序3 准备时间		0, 0, 0	0, 0, 0	0, 0, 0	0, 0, 0				
加工时间		1, 4, 5	4, 7, 1	13, 9, 7	1, 3, 3				

图 5.5 调度数据输入

在调度数据管理界面输入工件和机器的数据后，运行改进的遗传算法进行求解。在算法求解功能部分设定遗传算法的相关参数。迭代次数为 200，种群规模为 100，交叉概率为 0.85，变异概率为 0.1。如图 5.6 所示。

数据输入

算法求解

数据显示

设定遗传算法参数
 迭代次数
 种群规模
 交叉概率
 变异概率
 代沟

图 5.6 遗传算法参数

系统输出的调度结果包括工件分批方案、机器负荷、最大完工时间和调度甘特图。在求解工件分批调度问题时，最优分批调度方案的最大完工时间为 82min，系统输出的调度结果如图 5.7 所示。

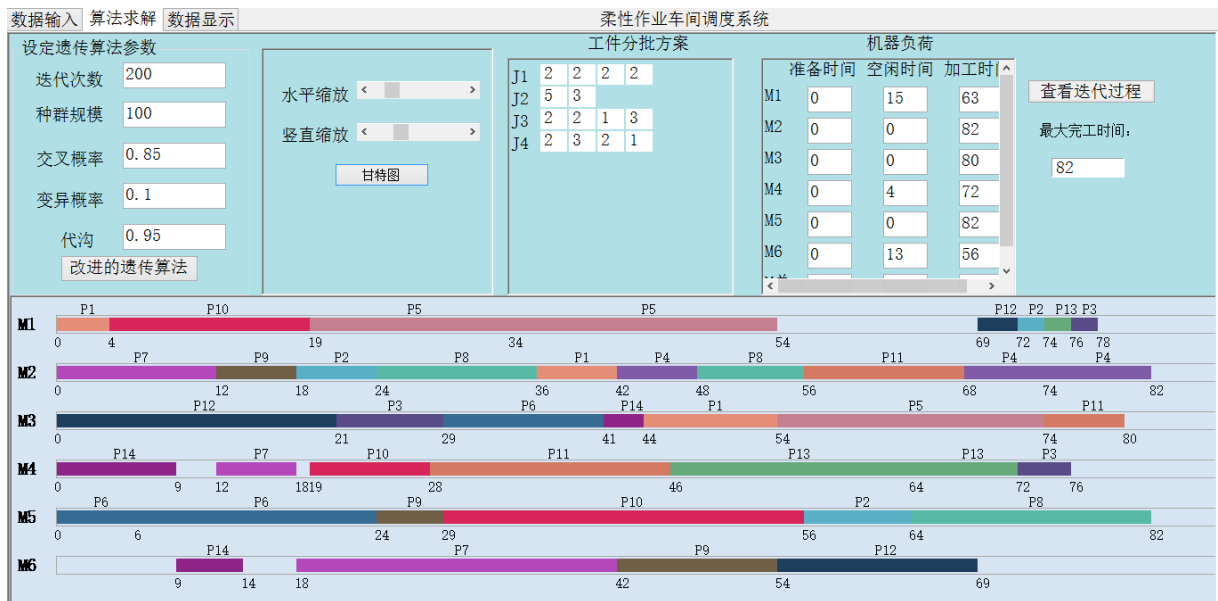


图 5.7 4×6 型最优分批调度结果

图 5.7 所示的调度结果中，工件分批方案部分显示每种工件的分批情况，主要包括工件分为几个批次及各子批工件的数量。4 种工件各批次的代表符号分别为 (P₁, P₂, P₃, P₄)、(P₅, P₆)、(P₇, P₈, P₉, P₁₀) 和 (P₁₁, P₁₂, P₁₃, P₁₄)。如：P₁₄ 表示工件 4 的第 4 个子批，首次出现在机器 M₄ 上，表示工件 4 的第 4 个子批的第一道工序在机器 M₄ 上加工。P₄ 表示工件 1 的第 4 个子批，最后一道工序在机器 M₂ 上完成，P₈ 表示工件 3 的第 2 个子批，最后一道工序在机器 M₅ 上完成，加工结束时间为 82min。工件分批加

工时，每台机器加工的工序如表 5.1 所示。

表 5.1 4×6 型分批加工每台机器加工的工序

机器	加工工序
M ₁	O ₁₁₁ -O ₃₄₁ -O ₂₁₁ -O ₂₁₂ -O ₄₂₃ -O ₁₂₃ -O ₄₃₃ -O ₁₃₃
M ₂	O ₃₁₁ -O ₃₃₁ -O ₁₂₁ -O ₃₂₁ -O ₁₁₂ -O ₁₄₁ -O ₃₂₂ -O ₄₁₂ -O ₁₄₂ -O ₁₄₃
M ₃	O ₄₂₁ -O ₁₃₂ -O ₂₂₃ -O ₄₄₃ -O ₁₁₃ -O ₂₁₃ -O ₄₁₃
M ₄	O ₄₄₁ -O ₃₁₂ -O ₃₄₂ -O ₄₁₁ -O ₄₃₁ -O ₄₃₂ -O ₁₃₂
M ₅	O ₂₂₁ -O ₂₂₂ -O ₃₃₂ -O ₃₄₃ -O ₁₂₂ -O ₃₂₃
M ₆	O ₄₄₂ -O ₃₁₃ -O ₃₃₃ -O ₄₂₂

在该 4×6 型调度问题的基础上，考虑准备时间因素，用本系统解决考虑生产准备和工件分批的柔性作业车间调度问题。工件每道工序的生产准备时间与工件在机器上的加工时间相同。调度数据输入如图 5.8 所示。

柔性作业车间调度系统

调度数据管理

工件种类 每种工件数量

最大工序数 最大子批数 当前文件位置

机器数

	工件1	工件2	工件3	工件4
机器号	1, 2, 3	1, 3, 5	1, 2	1, 3, 4
工序1 准备时间	2, 3, 4	3, 5, 2	5, 6	9, 7, 9
加工时间	2, 3, 4	3, 5, 2	5, 6	9, 7, 9
机器号	2, 4, 5	1, 2, 5	2, 4, 5	2, 4, 6
工序2 准备时间	3, 2, 4	4, 3, 6	4, 3, 5	6, 4, 5
加工时间	3, 2, 4	4, 3, 6	4, 3, 5	6, 4, 5
机器号	1, 2, 3	3, 5, 6	3, 5, 6	1, 3, 6
工序3 准备时间	1, 4, 5	4, 7, 1	13, 9, 1	1, 3, 3
加工时间	1, 4, 5	4, 7, 1	13, 9, 1	1, 3, 3

图 5.8 考虑准备时间的调度数据输入

在考虑准备时间和工件分批的情况下，在系统中求得工件最大完工时间的最优值为 98min，对应的最优分批调度结果如图 5.9 所示。

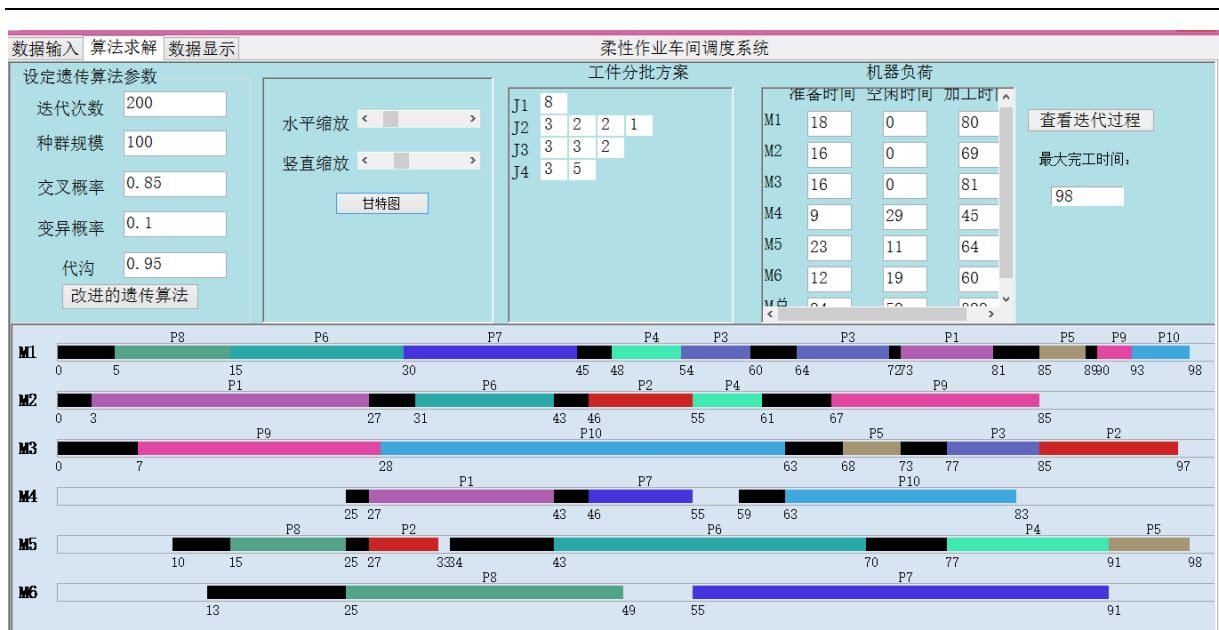


图 5.9 4×6 型考虑准备时间的最优分批调度结果

图 5.9 所示的调度结果中，黑色部分表示准备时间，4 种工件各批次的代表符号分别为 (P₁)、(P₂, P₃, P₄, P₅)、(P₆, P₇, P₈) 和 (P₉, P₁₀)。如：P₁ 表示工件 1 第一道工序在机器 M₂ 上加工。P₅ 表示工件 2 的第 4 个子批，最后一道工序在机器 M₅ 上完成，P₁₀ 表示工件 4 的第 2 个子批，最后一道工序在机器 M₁ 上完成，加工结束时间为 98min。考虑准备时间时每台机器加工的工序如表 5.2 所示。

表 5.2 4×6 型考虑准备时间时每台机器加工的工序

机器	加工工序
M ₁	O ₃₃₁ -O ₃₁₁ -O ₃₂₁ -O ₂₃₁ -O ₂₂₁ -O ₂₂₂ -O ₁₁₃ -O ₂₄₂ -O ₄₁₃ -O ₄₂₃
M ₂	O ₁₁₁ -O ₃₁₂ -O ₂₁₂ -O ₂₃₂ -O ₄₁₂
M ₃	O ₄₁₁ -O ₄₂₁ -O ₂₄₁ -O ₂₂₃ -O ₂₁₃
M ₄	O ₁₁₂ -O ₃₂₂ -O ₄₂₂
M ₅	O ₃₃₂ -O ₂₁₁ -O ₃₁₃ -O ₂₃₃ -O ₂₄₃
M ₆	O ₃₃₃ -O ₃₂₃

在数据显示界面，以表格的形式输出工件各批次每道工序对应的加工机器、准备时间和加工时间等加工信息。如图 5.10 所示。



图 5.10 4×6 型工件各批次的加工信息

(2) 6×6 型实例测试

用 4.3 节中的 6×6 型柔性作业车间调度实例，对系统进行测试。6 种工件在 6 台机器上加工，每种工件加工 8 个，系统具体的操作流程同上述操作一致。最优分批调度结果如图 5.11 所示。

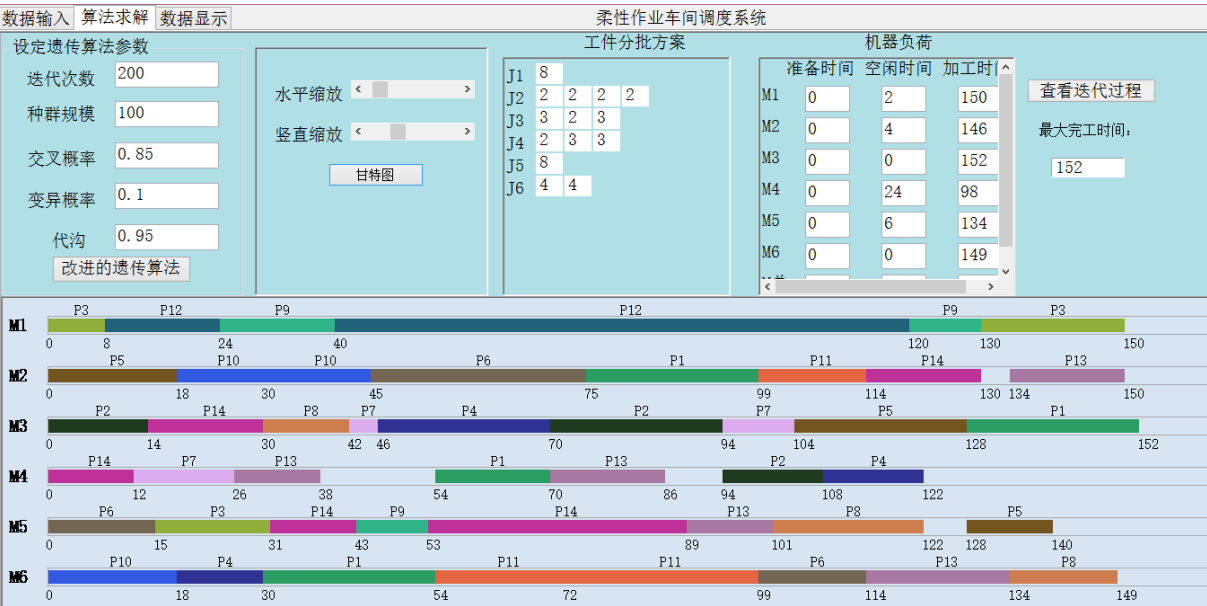


图 5.11 6×6 型最优分批调度结果

图 5.11 所示的调度结果中，6 种工件各子批的代表符号分别为 (P₁)、(P₂, P₃, P₄, P₅)、(P₆, P₇, P₈)、(P₉, P₁₀, P₁₁)、(P₁₂) 和 (P₁₃, P₁₄)。P₁ 表示工件 1，最后一道工序在机器 M₃ 上完成，加工结束时间为 152min。每台机器加工的工序如表 5.3 所示。

表 5.3 6×6 型分批加工每台机器加工的工序

机器	加工工序
M ₁	O ₂₂₁ -O ₅₁₁ -O ₄₁₁ -O ₅₁₂ -O ₄₁₃ -O ₂₂₃
M ₂	O ₂₄₁ -O ₄₂₂ -O ₄₂₃ -O ₃₁₂ -O ₁₁₃ -O ₄₃₃ -O ₆₂₅ -O ₆₁₅
M ₃	O ₂₁₁ -O ₆₂₂ -O ₃₃₁ -O ₃₂₂ -O ₂₃₂ -O ₂₁₂ -O ₃₂₃ -O ₂₄₂ -O ₁₁₄
M ₄	O ₆₂₁ -O ₃₂₁ -O ₆₁₁ -O ₁₁₂ -O ₆₁₂ -O ₂₁₃ -O ₂₃₃
M ₅	O ₃₁₁ -O ₂₂₂ -O ₆₂₃ -O ₄₁₂ -O ₆₂₄ -O ₆₁₃ -O ₃₃₂ -O ₂₄₃
M ₆	O ₄₂₁ -O ₂₃₁ -O ₁₁₁ -O ₄₃₁ -O ₄₃₂ -O ₃₁₃ -O ₆₁₄ -O ₃₃₃

在该 6×6 型调度问题的基础上，考虑工件的生产准备时间，对应的最优分批调度结果如图 5.12 所示。

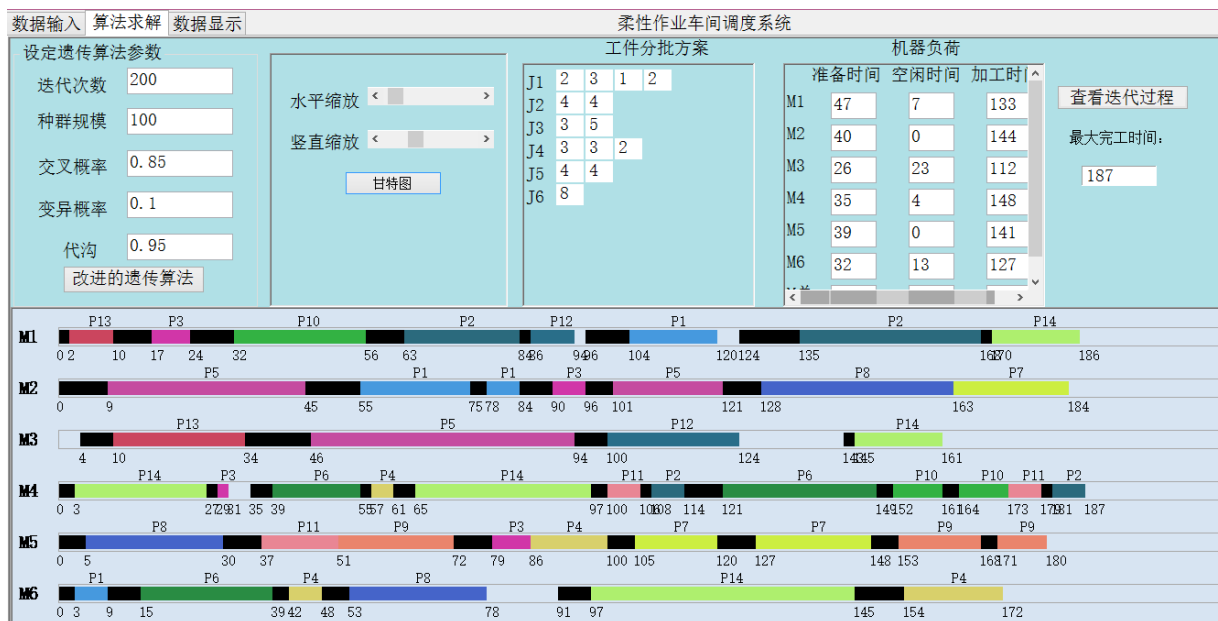


图 5.12 6×6 型考虑准备时间的最优分批调度结果

图 5.12 所示的甘特图中，黑色部分表示生产准备时间。6 种工件各子批的代表符号分别为 (P₁, P₂, P₃, P₄)、(P₅, P₆)、(P₇, P₈)、(P₉, P₁₀, P₁₁)、(P₁₂, P₁₃) 和 (P₁₄)。P₂ 表示工件 1 的第 2 个子批，最后一道工序在机器 M₄ 上完成，加工结束时间为 187min。每台机器加工的工序如表 5.4 所示。

表 5.4 6×6 型考虑准备时间时每台机器加工的工序

机器	加工工序
M ₁	O ₅₂₁ -O ₁₃₁ -O ₄₂₁ -O ₁₂₁ -O ₅₁₁ -O ₁₁₄ -O ₁₂₃ -O ₆₁₅
M ₂	O ₂₁₁ -O ₁₁₂ -O ₁₁₃ -O ₁₃₄ -O ₂₁₃ -O ₃₂₃ -O ₃₁₃
M ₃	O ₅₂₂ -O ₂₁₂ -O ₅₁₂ -O ₆₁₄
M ₄	O ₆₁₁ -O ₁₃₂ -O ₂₂₂ -O ₁₄₁ -O ₆₁₂ -O ₄₃₂ -O ₁₂₂ -O ₂₂₃ -O ₄₂₂ -O ₄₂₃ -O ₄₃₃ -O ₁₂₄
M ₅	O ₃₂₁ -O ₄₃₁ -O ₄₁₁ -O ₁₃₃ -O ₁₄₃ -O ₃₁₁ -O ₃₁₂ -O ₄₁₂ -O ₄₁₃
M ₆	O ₁₁₁ -O ₂₂₁ -O ₁₄₁ -O ₃₂₂ -O ₆₁₃ -O ₁₄₄

在数据显示界面，工件的加工信息如图 5.13 所示。

数据输入		算法求解		数据显示	
工件批次	工序	加工机器	准备时间	加工时间	
P1	1	6	3	6	
	2		10	20	
	3	2	3	6	
	4	1	8	16	
	5	1	0	0	
P2	1	1	7	21	
	2	4	2	6	
	3	1	11	33	
	4	4	2	6	
	5	1	0	0	
P3	1	1	7	7	
	2	4	2	2	
	3	5	7	7	
	4	2	6	6	
	5	1	0	0	
P4	1	6	3	6	
	2	4	2	4	
	3	5	0	14	
	4	6	9	18	
	5	1	0	0	
P5	1	2	9	36	
	2	3	12	48	
	3	2	5	20	
	4	1	0	0	
	5	1	0	0	

(a)

数据输入		算法求解		数据显示	
工件批次	工序	加工机器	准备时间	加工时间	
P5	1	2	9	36	
	2	3	12	48	
	3	2	5	20	
	4	1	0	0	
	5	1	0	0	
P6	1	6	6	24	
	2	4	4	16	
	3	4	7	28	
	4	1	0	0	
	5	1	0	0	
P7	1	5	5	15	
	2	5	7	21	
	3	2	0	21	
	4	1	0	0	
	5	1	0	0	
P8	1	5	5	25	
	2	6	5	25	
	3	2	7	35	
	4	1	0	0	
	5	1	0	0	
P9	1	5	0	21	
	2	5	5	15	
	3	5	3	9	
	4	1	0	0	
	5	1	0	0	

(b)

数据输入		算法求解		数据显示	
工件批次	工序	加工机器	准备时间	加工时间	
P10	1	1	8	24	
	2	4	3	9	
	3	4	3	9	
	4	1	0	0	
	5	1	0	0	
P11	1	5	7	14	
	2	4	3	6	
	3	4	0	6	
	4	1	0	0	
	5	1	0	0	
P12	1	1	2	8	
	2	3	6	24	
	3	1	0	0	
	4	1	0	0	
	5	1	0	0	
P13	1	1	2	8	
	2	3	6	24	
	3	1	0	0	
	4	1	0	0	
	5	1	0	0	
P14	1	4	3	24	
	2	4	4	32	
	3	6	6	48	
	4	3	2	16	
	5	1	2	16	

(c)

(a)

(b)

(c)

图 5.13 6×6 型工件各批次的加工信息

(3) 7×6 型实例测试

用文献[63]中的 7×6 型柔性作业车间调度实例，对系统进行测试。该问题表示 7 种工件在 6 台机器上加工。文献[63]研究该问题时，得到的最大完工时间为 37min。假设每种工件加工 8 个，在不分批的情况下，最大完工时间为 296min（37×8=296）。用本文算法对该调度问题求解时，求得工件最大完工时间的最优值为 269min，方案优于不分批调度。最优分批调度结果如图 5.14 所示。

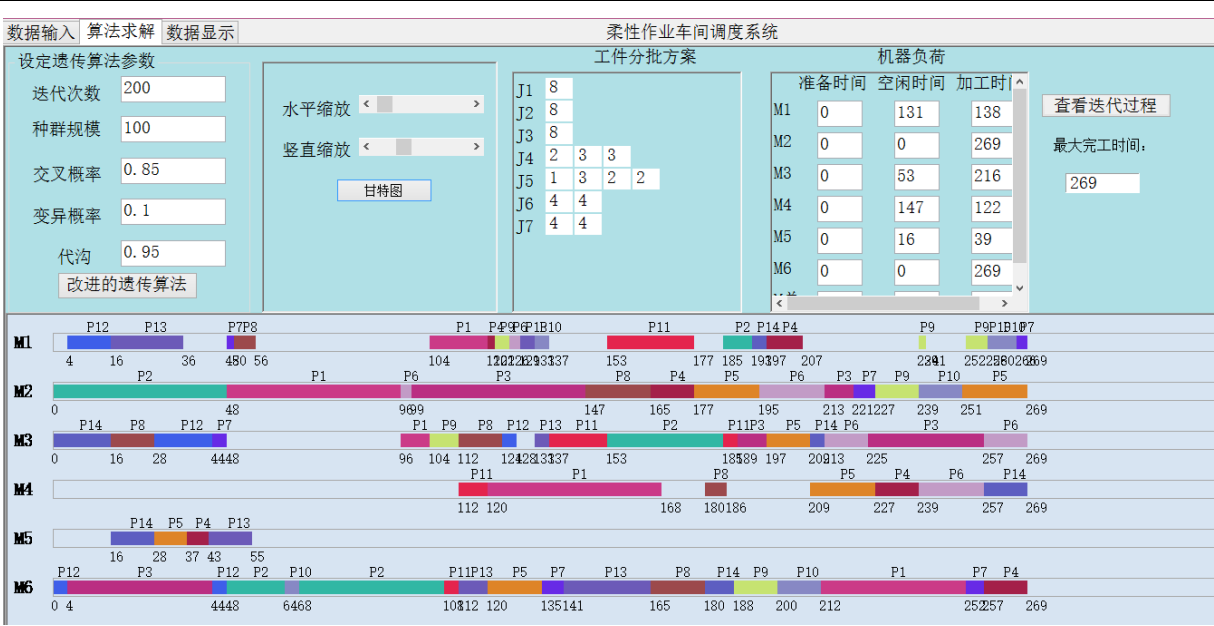


图 5.14 7×6 型最优分批调度结果

图 5.14 所示的调度结果中，7 种工件各子批的代表符号分别为 (P_1) 、 (P_2) 、 (P_3) 、 (P_4, P_5, P_6) 、 (P_7, P_8, P_9, P_{10}) 、 (P_{11}, P_{12}) 和 (P_{13}, P_{14}) 。最后一道工序的完工时间为 269min。每台机器加工的工序如表 5.5 所示。

表 5.5 7×6 型分批加工每台机器加工的工序

机器	加工工序
M ₁	O ₆₂₂ -O ₇₁₁ -O ₅₁₂ -O ₅₂₂ -O ₁₃ -O ₄₁₂ -O ₅₃₂ -O ₄₃₂ -O ₇₁₄ -O ₅₄₂ -O ₆₁₄ -O ₂₅ -O ₇₂₄ -O ₄₁₄ -O ₅₃₅ -O ₅₃₆ -O ₅₄₅ -O ₅₄₆ -O ₅₁₆
M ₂	O ₂₁ -O ₁₁ -O ₄₃₁ -O ₃₂ -O ₅₂₄ -O ₄₁₃ -O ₄₂₃ -O ₄₃₃ -O ₃₄ -O ₅₁₄ -O ₅₃₄ -O ₅₄₄ -O ₄₂₆
M ₃	O ₇₂₁ -O ₅₂₁ -O ₆₂₃ -O ₅₁₁ -O ₁₂ -O ₅₃₁ -O ₅₂₃ -O ₆₂₅ -O ₇₁₅ -O ₆₁₃ -O ₂₄ -O ₆₁₄ -O ₃₃ -O ₄₂₄ -O ₇₂₅ -O ₄₃₄ -O ₃₅ -O ₄₃₆
M ₄	O ₆₁₂ -O ₁₄ -O ₅₂₆ -O ₄₂₅ -O ₄₁₅ -O ₄₃₅ -O ₇₂₆
M ₅	O ₇₂₂ -O ₄₂₁ -O ₄₁₁ -O ₇₁₂
M ₆	O ₆₂₁ -O ₃₁ -O ₆₂₄ -O ₂₂ -O ₅₄₁ -O ₂₃ -O ₆₁₁ -O ₇₁₂ -O ₄₂₂ -O ₅₁₃ -O ₇₁₆ -O ₅₂₅ -O ₇₂₃ -O ₅₃₃ -O ₅₄₃ -O ₁₅ -O ₅₁₅ -O ₄₁₆

在该 7×6 型调度问题的基础上，考虑工件的生产准备时间，对应的最优分批调度结果如图 5.15 所示。

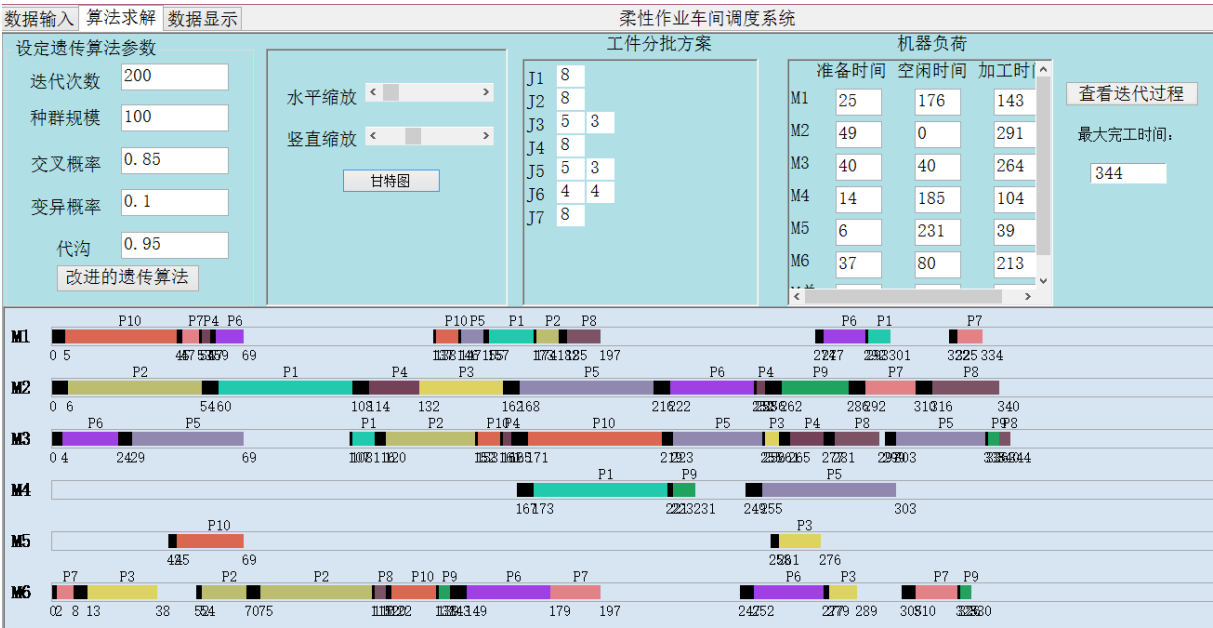


图 5.15 7×6 型考虑准备时间的最优分批调度结果

图 5.15 所示的甘特图中，黑色部分表示生产准备时间。7 种工件各子批的代表符号分别为 (P₁)、(P₂)、(P₃, P₄)、(P₅)、(P₆, P₇)、(P₈, P₉) 和 (P₁₀)。P₈ 表示工件 6 的第 1 个子批，最后一道工序 O₆₁₅ 在机器 M₃ 上完成，加工结束时间为 344min。每台机器加工的工序如表 5.6 所示。

表 5.6 7×6 型考虑准备时间时每台机器加工的工序

机器	加工工序
M ₁	O ₇₁ -O ₅₂₂ -O ₃₂₁ -O ₅₁₂ -O ₇₄ -O ₄₂ -O ₁₃ -O ₂₅ -O ₆₂ -O ₅₁₆ -O ₁₅ -O ₅₂₆
M ₂	O ₂₁ -O ₁₁ -O ₃₂₂ -O ₃₁₂ -O ₄₃ -O ₅₁₄ -O ₃₂₄ -O ₆₂₃ -O ₅₂₄ -O ₆₁₄
M ₃	O ₅₁₁ -O ₄₁ -O ₁₂ -O ₂₄ -O ₇₅ -O ₃₂₃ -O ₇₆ -O ₄₄ -O ₃₁₃ -O ₃₂₅ -O ₆₁₃ -O ₄₆ -O ₆₂₅ -O ₆₁₅
M ₄	O ₁₄ -O ₆₂₂ -O ₄₅
M ₅	O ₇₂ -O ₃₁₄
M ₆	O ₅₂₁ -O ₃₁₁ -O ₂₂ -O ₂₃ -O ₆₁₁ -O ₇₃ -O ₆₂₁ -O ₅₁₃ -O ₃₁₅ -O ₅₂₅ -O ₆₂₄

在数据显示界面，工件的加工信息如图 5.16 所示。

数据输入 算法求解 数据显示					数据输入 算法求解 数据显示					数据输入 算法求解 数据显示				
工件批次	工序	加工机器	准备时间	加工时间										
P1	1	2	6	48	P4	1	1	1	3	P7	1	6	2	6
	2	3	1	8		2	2	6	18		2	1	2	6
	3	1	2	16		3	3	1	3		3	6	0	18
	4	4	6	48		4	2	1	3		4	2	6	18
	5	1	1	8		5	3	4	12		5	6	5	15
	6	1	0	0		6	1	0	0		6	1	3	9
P2	1	2	6	48	P5	1	3	5	40	P8	1	6	1	4
	2	6	2	16		2	1	1	8		2	1	3	12
	3	6	5	40		3	2	6	48		3	3	4	16
	4	3	4	32		4	3	4	48		4	2	6	24
	5	1	1	8		5	4	6	48		5	3	0	4
	6	1	0	0		6	3	4	32		6	1	0	0
P3	1	6	5	25	P6	1	3	4	20	P9	1	6	1	4
	2	2	0	30		2	1	2	10		2	4	2	8
	3	3	1	5		3	6	6	30		3	2	6	24
	4	5	3	15		4	2	6	30		4	6	1	4
	5	6	2	10		5	6	5	25		5	3	1	4
	6	1	0	0		6	1	3	15		6	1	0	0
P4	1	1	1	3	P7	1	6	2	6	P10	1	1	5	40
	2	2	6	18		2	1	2	6		2	5	3	24
	3	3	1	3		3	6	0	18		3	6	2	16
	4	2	1	3		4	2	6	18		4	1	1	8
	5	3	4	12		5	6	5	15		5	3	1	8
	6	1	0	0		6	1	3	9		6	3	6	48

(a)

(b)

(c)

图 5.16 7×6 型工件各批次的加工信息

通过运用本系统对上述调度实例的分析，验证了系统解决考虑生产准备和工件分批的柔性作业车间调度问题的可行性和有效性。系统的功能较为灵活，可用于解决不同类型的柔性作业车间调度问题。根据实际情况，在系统中输入相关的数据，解决相应的调度问题，获得最优的调度结果，进行调度决策。

5.5 本章小结

本章针对车间调度中存在的问题，结合改进的遗传算法，开发了柔性作业车间调度系统。先对柔性作业车间调度系统的需求进行分析，接着介绍了系统的设计原则、主要功能及运行流程。根据系统的相关功能，设计系统的操作界面，并阐述了 C#与 MATLAB 混合编程的关键技术。最后，结合具体的车间调度实例，验证改进遗传算法的有效性，以及系统运行的可行性。

结论

结论

智能制造发展战略的提出，推动着制造业走向新的发展模式，不断地提升制造业的整体水平。目前，企业的产品多是批量生产的，需要在短时间内生产出低成本、高质量的产品，提高竞争力。柔性作业车间调度问题是车间调度领域研究的热点之一，本文结合车间实际生产过程的特点，对考虑生产准备和工件分批的柔性作业车间调度问题进行研究。同时，结合实际需求，开发了柔性作业车间调度系统。主要研究成果如下：

（1）根据车间调度问题的相关定义与描述，对 T-FJSP 和 P-FJSP 两种不同的调度问题进行了分析。并结合车间调度实例，用析取图和甘特图两种方法对车间调度方案进行分析。对最大完工时间、机器负荷和车间生产成本等调度优化目标进行分析，建立了该调度问题的数学模型。

（2）结合车间实际生产过程中的特点，研究了两种不同类型的生产准备时间，并对批量调度时要解决的问题进行分析。以工件的最大完工时间为调度优化目标，建立了考虑生产准备和工件分批的柔性作业车间调度问题的数学模型。分析了不同求解方法的特点，并选用遗传算法对问题进行求解。通过对本文数学模型的特点进行研究，分析了遗传算法解决本文所研究问题的局限性，并提出了对遗传算法的改进思路。

（3）对基于改进遗传算法的求解方法进行研究，提出一种柔性分批方法对工件进行批量划分。用双层编码方式、IPOX 交叉、倒序与插入结合的变异操作改进遗传算法。结合车间调度实例，通过分析对比验证了本文算法的有效性，并研究了分批加工及考虑准备时间时对工件最大完工时间的影响。验证了本文提出的柔性分批方法可以减小工件的最大完工时间，提高生产效率。

（4）根据柔性作业车间调度过程中的特点，分析了车间调度的实际需求，在此基础上采用 C#与 MATLAB 混合编程的方法进行系统开发。在 C#中完成了系统的界面和功能设计，开发了系统的调度数据管理功能、算法求解功能和调度结果输出功能。在 MATLAB 中编写改进的遗传算法，为系统提供算法支持。结合车间调度实例，在系统中输入相关的数据，系统运行后输出工件的分批方案、机器负荷、最大完工时间和调度甘特图等调度结果。验证了论文中算法的有效性，以及系统运行的可行性。

展望

本文对考虑生产准备和工件分批的柔性作业车间调度与系统开发问题开展了相应的研究工作，在系统中开发了部分功能模块，能够解决相关的柔性作业车间调度问题。但是，还有一些问题需要进一步研究，主要包括以下几个方面。

（1）车间生产过程中存在机器负荷分布不均衡的问题，可对有机器负荷约束的多目标调度问题进行研究，以获得较优的车间调度方案；

（2）在调度方案执行过程中，会面临生产任务发生变化等不确定因素，可针对这些因素，对系统功能进行完善。

参考文献

- [1] 梁迪. 柔性制造系统生产运作与管理策略[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2018
- [2] 张贵军, 丁情, 柳静, 等. 柔性车间生产排产调度优化方法[J]. 计算机科学, 2018, 45(2): 270-275
- [3] 徐雨, 黄海松, 胡涑. 一种求解车间调度的混合免疫遗传算法[J]. 机械设计与制造, 2020(09): 287-291
- [4] Zhang J, Ding G, Zou Y, et al. Review of job shop scheduling research and its new perspectives under Industry 4.0[J]. Journal of Intelligent Manufacturing, 2019, 30(4): 1809-1830
- [5] 王凌, 王圣尧, 方晨. 分布估计调度算法[M]. 北京: 清华大学出版社, 2017
- [6] Ge M, Liu C, Liu M. The online quality control methods for the assembling of remanufactured engines' cylinder block and cover under uncertainty[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2014, 74(1-4): 225-233
- [7] 张军峰, 王菲, 葛腾腾. 基于分支定界法的进场航空器动态排序与调度[J]. 系统仿真学报, 2016, 28(08): 1909-1914
- [8] Mokhtari H, Dadgar M. Scheduling optimization of a stochastic flexible job-shop system with time-varying machine failure rate[J]. Computers & Operations Research, 2015, 61: 31-45
- [9] Na H, Park J. Multi-level job scheduling in a flexible job shop environment[J]. International Journal of Production Research, 2014, 52(13): 3877-3887
- [10] Demir Y, İşleyen S K. Evaluation of mathematical models for flexible job-shop scheduling problems[J]. Applied Mathematical Modelling, 2013, 37(3): 977-988
- [11] 高亮, 李新宇, 文龙. 工艺规划与车间调度的智能算法[M]. 北京: 清华大学出版社, 2019
- [12] 车忠志, 苏子林, 冯宝富. 采用启发式算法求解多目标柔性作业车间调度问题[J]. 计算机应用与软件, 2013, 30(06): 288-291+321
- [13] Ziaee M. A heuristic algorithm for solving flexible job shop scheduling problem[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2014, 71(1-4): 519-528

- [14] 苏子林, 车忠志, 苑金梁. 柔性作业车间调度问题的一种启发式算法[J]. 计算机应用研究, 2011, 28(06): 2060-2063
- [15] 彭建刚, 刘明周, 张铭鑫, 等. 多目标柔性作业车间调度算法研究综述[J]. 中国机械工程, 2014, 25(23): 3244-3254
- [16] 张国辉, 石杨. 基于改进遗传算法求解柔性作业车间调度问题[J]. 机械科学与技术, 2011, 30(11): 1890-1894
- [17] 方水良, 姚嫣菲, 赵诗奎. 柔性车间调度的改进遗传算法[J]. 浙江大学学报(工学版), 2012, 46(4): 629-635
- [18] 张腾飞, 马跃, 李力, 等. 柔性作业车间调度问题的改进遗传算法[J]. 小型微型计算机系统, 2017, 38(1): 129-132
- [19] 仇永涛, 吉卫喜, 张朝阳. 结合混合进化算法和知识的多目标车间调度[J]. 中国机械工程, 2020, 31(24): 2979-2987
- [20] 吴树景, 游有鹏, 罗福源. 变邻域保优遗传算法求解柔性车间调度问题[J]. 计算机工程与应用, 2020, 56(22): 236-243
- [21] 吴秀丽, 刘夏晶. 差分进化算法求解分布式柔性作业车间调度问题[J]. 计算机集成制造系统, 2019, 25(10): 2539-2558
- [22] 张贵军, 王文, 周晓根, 等. 基于动态策略的差分进化柔性车间优化调度[J]. 计算机科学, 2018, 45(10): 240-245
- [23] Yuan Y, Xu H. Flexible job shop scheduling using hybrid differential evolution algorithms[J]. Computers & Industrial Engineering, 2013, 65(2): 246-260
- [24] Dorigo M, Maniezzo V, Colomi A. Ant system: optimization by a colony of cooperating agents[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B (Cybernetics), 1996, 26(1): 29-41
- [25] 黄学文, 张晓彤, 艾亚晴. 基于蚁群算法的多加工路线柔性车间调度问题[J]. 计算机集成制造系统, 2018, 24(03): 558-569
- [26] 邹攀, 李蓓智, 杨建国, 等. 基于分层蚁群遗传算法的多目标柔性作业车间调度方法[J]. 中国机械工程, 2015, 26(21): 2873-2879+2884
- [27] 唐嘉诚. 改进人工蜂群算法在柔性作业车间调度问题上的应用[D]. 上海: 上海交通大学

大学, 2018

- [28] 陈少, 吉卫喜, 仇永涛, 等. 改进人工蜂群算法求解柔性作业车间调度问题[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2018(05): 161-164
- [29] 孟冠军, 杨大春, 陶细佩. 基于混合人工蜂群算法的多目标柔性作业车间调度问题研究[J]. 计算机应用研究, 2019, 36(04): 972-974+979
- [30] Kennedy J, Eberhart R. Particle swarm optimization[C]//Proceedings of ICNN'95-international conference on neural networks. IEEE, 1995, 4: 1942-1948
- [31] 刘韵, 胡毅, 罗企, 等. 一种解决柔性车间作业调度问题的粒子群优化算法[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2015(12): 144-147
- [32] 孔飞, 吴定会, 纪志成. 基于双层粒子群优化算法的柔性作业车间调度优化[J]. 计算机应用, 2015, 35(02): 476-480
- [33] Singh M R, Singh M, Mahapatra S S, et al. Particle swarm optimization algorithm embedded with maximum deviation theory for solving multi-objective flexible job shop scheduling problem[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016, 85(9): 2353-2366
- [34] Li X Y, Gao L. An effective hybrid genetic algorithm and tabu search for flexible job shop scheduling problem[J]. International Journal of Production Economics, 2016, 174: 93-110
- [35] 余璇, 梁工谦, 董仲慧. 基于混合遗传禁忌搜索算法的多目标柔性作业车间调度[J]. 机械制造, 2016, 54(08): 90-93
- [36] 李峥峰, 于小忠, 张国辉, 等. 考虑生产过程时间的柔性作业车间调度优化[J]. 工业工程, 2020, 23(02): 26-33+123
- [37] 范华丽, 熊禾根, 蒋国璋, 等. 基于遗传规划的动态作业车间调度规则生成[J]. 计算机集成制造系统, 2018, 24(04): 876-885
- [38] 廖玮. 基于基因表达式编程的车间调度方法研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2018
- [39] 马庆吉. 基于改进灰狼算法的柔性作业车间调度方法研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2019
- [40] Low C, Hsu C M, Huang K I. Benefits of lot splitting in job-shop scheduling[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2004, 24(9-10): 773-780

- [41] 周亚勤, 吕佑龙, 郑鹏, 等. 考虑动态资源和工件批量约束的柔性车间生产调度[J]. 计算机集成制造系统, 2020, 26(05): 1257-1267
- [42] 李聪波, 沈欢, 李玲玲, 等. 面向能耗的多工艺路线柔性作业车间分批优化调度模型[J]. 机械工程学报, 2017, 53(05): 12-23
- [43] 徐本柱, 费晓璐, 章兴玲. 柔性作业车间批量划分与并行调度优化[J]. 计算机集成制造系统, 2016, 22(08): 1953-1964
- [44] 胡燕海, 周超, 陈再宏. 批量生产柔性作业车间分批调度问题研究[J]. 科技与管理, 2015, 17(1): 52-56
- [45] 巴黎, 李言, 杨明顺, 等. 考虑柔性分批的 IPPS 问题研究[J]. 机械科学与技术, 2017, 36(03): 426-435
- [46] 王云, 冯毅雄, 谭建荣. 柔性作业车间分批调度多目标优化方法[J]. 浙江大学学报(工学版), 2011, 45(4): 719-726, 764
- [47] 白俊杰, 龚毅光, 王宁生, 等. 多目标柔性作业车间分批优化调度[J]. 计算机集成制造系统, 2010, 16(02): 396-403
- [48] Gao K Z, Suganthan P N, Chua T J, et al. A two-stage artificial bee colony algorithm scheduling flexible job-shop scheduling problem with new job insertion[J]. Expert systems with applications, 2015, 42(21): 7652-7663
- [49] 陆汉东, 何卫平, 周旭. 基于禁忌搜索的柔性作业车间分批调度[J]. 上海交通大学学报, 2012, 46(12): 2003-2008
- [50] 王进峰. 智能制造系统与智能车间[M]. 北京: 化学工业出版社, 2020
- [51] 张洁, 秦威. 制造系统智能调度方法与云服务[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2018
- [52] 张国辉. 柔性作业车间调度方法研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2009
- [53] 袁源. 基于分解的多目标进化算法及其应用[D]. 北京: 清华大学, 2015
- [54] 杨超锋. 基于鲸鱼群算法的工艺次序柔性的车间调度方法研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2018
- [55] Rossi A. Flexible job shop scheduling with sequence-dependent setup and transportation times by ant colony with reinforced pheromone relationships[J]. International Journal of

- Production Economics, 2014, 153: 253-267
- [56] 王海燕, 王万良, 黄凤立, 等. 分批优化调度问题综述及面向节能研究展望[J]. 计算机集成制造系统, 2017, 23(03): 542-556
- [57] Amjad M K, Butt S I, Kousar R, et al. Recent research trends in genetic algorithm based flexible job shop scheduling problems[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2018, 2018
- [58] 张超勇. 基于自然启发式算法的作业车间调度问题理论与应用研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2007
- [59] 杨晓梅, 曾建潮. 遗传算法求解柔性 job shop 调度问题[J]. 控制与决策, 2004(10): 1197-1200
- [60] 席卫东, 乔兵, 朱剑英. 基于改进遗传算法的柔性作业车间调度[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2007(07): 1151-1153
- [61] 周超, 胡燕海, 李建辉. 基于遗传算法的柔性作业车间柔性分批调度问题研究[J]. 宁波大学学报(理工版), 2015, 28(02): 128-132
- [62] 刘月凡, 朱星. 改进的遗传算法求解柔性作业车间调度问题[J]. 大连交通大学学报, 2015, 36(04): 101-104
- [63] 张国辉, 朱宝英, 杨洋洋, 等. 考虑调整时间的柔性作业车间调度问题研究[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2019(08): 152-156

攻读学位期间取得的科研成果

- [1] 李田丰,朱斌,张奎.考虑准备时间和工件分批的柔性作业车间调度[J]. 机电工程技术, 2021, 50(02): 40-44.
- [2] 郭岳,车志忠,李田丰.钢桥快速设计制造系统[P]. 2019SR0072124.

致谢

本论文是在导师朱斌教授的悉心指导下完成的，从论文开题到论文完成，朱老师给予了我很多指引。朱老师学识渊博，在本专业领域有很多的研究成果，在论文的撰写过程中给予了我很多帮助。朱老师治学严谨，工作认真负责，在研究生期间给了我很多指导和关怀，在未来的工作和生活方面给了我很多建议。值此论文完成之际，向朱老师表示衷心的感谢和崇高的敬意。

同时，还要感谢我的同门张奎、李渊、吴亚东在论文撰写和系统开发方面给予我的建议和帮助。感谢师兄弟们三年来对我的帮助和支持，感谢你们的陪伴。感谢同窗好友对我学习和生活上的陪伴和帮助，感谢你们陪我度过了三年时光。

感谢我的父母和家人，感谢你们对我的关爱和支持。你们的鼓励与支持是我求学路上前进的动力。

最后，再次向我的老师、亲人、同学和好友表示感谢。