

华中科技大学本科生自然科学创新基金

申请书（机械学院初步申报版）

项目名称：一种面向多品种混线加工的全自动
柔性生产线智能调度系统

申请人：贾丰硕

申请人学号：U202210704

移动电话：15822618899

电子邮件：2376612048@qq.com

所在院系：机械科学与工程学院

填表日期：2024年05月21日

华中科技大学本科生院制

2024年5月

基本信息

申请人信息	姓名	贾丰硕	性别	男
	出生年月	2004 年 07 月	民族	汉族
	导师姓名	张春江	导师职称	讲师
	学籍单位	机械科学与工程学院	学号	U202210704
	电子邮箱	2376612048@qq. com		
	手机号码	15822618899	QQ	2376612048
	研究领域	车间智能调度		
	是否基础学科拔尖学生培养计划 2.0 基地			<input type="checkbox"/> 是 <input checked="" type="checkbox"/> 否
项目基本信息	项目名称	一种面向多品种混线加工的全自动柔性生产线智能调度系统		
	英文名称	A fully automatic intelligent scheduling system for flexible production lines designed for multi-variety mixed line processing		
	研究期限	2024 年 5 月 30 日---2025 年 5 月 30 日		
	研究方向	车间智能调度		
	申请金额	5 万元		
	中文关键词	车间调度，多品种，全自动柔性生产线，调度系统		
	英文关键词	Shop Scheduling, Multi-variety, Fully Automatic Flexible Production Line, Scheduling System		
中文摘要	<p>随着现代化商业竞争日益激烈，制造企业需要快速响应市场变化，并满足不同客户的个性化需求。这就迫使企业越来越多地采用柔性生产线，以缩短产品生命周期、提高设备利用率、降低生产成本。相较于传统的固定流水线，柔性生产线具有快速适应生产需求和多样化灵活生产的能力，可以在不同产品之间快速地进行切换和调整，灵活性高、自适应性强、资源利用更充分，能够很好地满足多品种混线、中小批量的生产需求。本项目深入了解某企业多品种混线加工的全自动柔性生产线的调度需求，面向该产线设计一种智能调度系统，综合考虑实际场景中的各种约束因素，包括考虑辅助资源的准备和运输时间、不同物流场景下的约束条件、工件运输时间、刀具使用寿命、工件工艺约束、机器约束、工件分批静态约束条件，以及辅助资源未到达、临时插单、机器故障等造成的动态扰动，构建混合整数规划模型并应用遗传禁忌搜索算法、深度强化学习等技术进行求解，获得调度方案的同时应对和处理实际生产场景中的变化，达到最优调度效果。在实现对高度自动化生产线调度过程中，能提高精益管控和柔性制造水平及生产效率、改善综合生产指标。通过对生产资源的柔性自动匹配和调度，帮助企业实现多品种共线、多工序共用资源自动化生产，最大程度上降低加工时间损失、稳定生产品质、预测交付日期，为多品种混线生产下智能柔性作业生产线的调度提供技术支撑，对于促进制造业智能化转型具有重要的现实意义。</p>			

报告正文（从以下三方面进行阐述，不超过 3000 字。请勿删除或改动下述提纲标题及括号中的文字。）建议 2-3 页

研究 初 衷	<p>（为什么选择该研究课题？）</p> <p>硬件基础：各种柔性生产设备不断涌现。随着数控机床、加工中心、工业机器人等多功能设备的广泛应用和个性化、定制化生产模式的兴起，柔性生产线得到了广泛应用。相对于理论研究中的单件柔性作业车间调度，批量柔性作业车间模式在实际生产中更为普遍。近年来，车间自动化、数字化及智能化水平进一步提高，全自动物流设备（如 AGV 小车、分拣机械人等）得到了广泛应用，这为作业车间调度提供了更高的柔性，同时更高的柔性更适于应对现实生产中的动态事件。</p> <p>现实需求：市场竞争导致柔性生产线越来越普遍。随着现代化制造业的发展以及市场环境的快速变化，市场竞争激烈，企业需要快速响应市场变化。同时，消费者对产品个性化的需求不断增加，企业也要满足不同客户的个性化需求。一条产线生产多种产品、缩短产品生命周期成为必然要求，多品种混线、中小批量的柔性生产线成为必然选择。而多品种小批量生产特点是工件的年产量从一件到几千件不等，给人的感觉是“多而杂”且无法实现自动化生产，导致灵活自动化解决方案拥有的巨大潜力往往被忽视。相较于传统的固定流水线，柔性生产线具有适应快速变化的生产需求和灵活生产多样化产品的能力，可以在不同产品之间快速地进行切换和调整，灵活性高、自适应性强、资源利用更充分，可以满足灵活的市场需求变化和客户定制需求。</p> <p>面临的问题：柔性生产线中，调度系统是进一步提升生产效率的关键。柔性生产线通常采用自动化设备和智能控制系统，能够通过重新编程或调整设备参数来适应新产品的生产需求。目前柔性自动化系统（FMS）中的硬件柔性设备较为成熟，但调度规则较为简单，不能很好的适应如今复杂多变的生产场景，效率低下。因此，对于柔性生产线进行自动化、智能化升级，充分发掘数据这一新生产要素的潜能，打造数据驱动决策的柔性生产线智能调度系统，是进一步提升生产效率的关键，也是发展新质生产力的必然要求。希望通过本课题的研究，最终达到提高精益管控和柔性制造水平、大幅提升生产效率、提高企业竞争力的目的。</p>
--------------	--

（前期做了哪些思考和准备？包括但不限于查阅文献、理论分析、实验验证等）

文献调研：是研究热点，但对于实际场景的柔性生产线智能调度研究较少。首先查阅了与本课题相关的文献，了解有关本课题的发展动态。图 1 为 1990 年到 2021 年有关柔性生产调度的文献数量。从图中可以看出，21 世纪之前对该问题的研究处于起步阶段，而进入 21 世纪后对该问题的研究迅速兴起，并逐渐发展起来。在 2013 年左右，文献数量有所减少，说明对于该问题更深入的研究进入一定瓶颈期，并且对于该领域研究的重心转向到应用。随着时代和市场的发展，对于该领域的需求进一步扩大，所以于此问题的研究和应用进一步深入，且目前处于高速发展期，潜力巨大。前人对于相关的柔性调度课题都取得了良好的成果，但是对于实际场景的柔性生产线智能调度研究较少，且自动化、智能化程度不高。所以本项目更加充分且全面地考虑实际车间中的各种因素，开发出一种新型的全自动智能调度系统，精度更高，资源分配更完善，以满足实际生产中的需要，更加具有实际意义与应用前景。

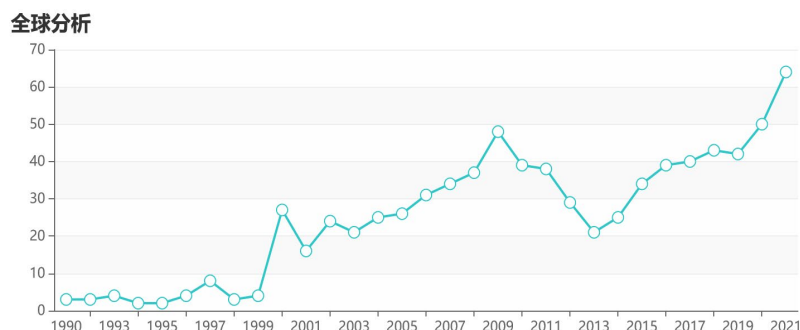


图1 1990-2021 年柔性生产线调度期刊论文文献数量

理论分析：传统方法难以求解，需要设计特异性的混合智能算法。针对理论分析，多品种混线加工生产的柔性生产线调度问题在机器分配、工件排序等层次之间相互耦合，解空间极其庞大。传统的数学规划方法无法进行有效求解，而智能优化方法也因编码层次过多无法直接高效求解。本项目针对该问题，从以下层面进行研究：首先建立该静态调度问题的数学模型；研究基于数学模型的子问题有效分解方法，设计启发式算法进行高效求解；针对动态突发事件，研究基于深度强化学习的动态调度方法；研究启发式算法与动态调度规则的柔性生产线动态调度方法集成。

实地调研：和目标企业合作，了解实际场景、整理需求和数据。由于本项目与实际生产紧密结合，前期的主要工作为对生产线数据的预处理。故到企业实地进行调研，总结需要考虑的影响因素、约束条件等，并获取生产线数据，将数据进行整理、分类。如图 2 为部分数据收集及处理实例。

NO.	托盘id	托盘编码	托盘夹持位id	托盘夹持位id状态	当前位置-仓储位编码	当前位置-机床加工位id	订单id	工件id	工艺流程id	工序编码	工序id	机床id	工单大类	工单编号	工单对象	工步对象id	工单编码
1	pass-001-001	pass-001	1	2	OW01		20240113-20240113-002	OP10	91832520	1501	SP802	34	10	20240113-103410W01			
1	pass-001-002	pass-001	1	2	OW01		20240113-20240113-002	OP10	91832520	1501	SP802	38	10	20240113-103818W01			
1	pass-002-001	pass-002	1	1	OW01		20240113-20240113-002	OP10	91832520	1501	SP803	35	11	T0004-1 113510W01			
1	pass-002-001	pass-002	2	2	OW01		20240113-20240113-002	OP10	91832520	1501	SP803	60	11	T0004-1 116018P02			
1	pass-002-001	pass-002	5	2	OW01		20240113-20240113-002	OP10	91832520	1501	SP803	36	15	pass-002-153618P02			
1	pass-002-001	pass-002	8	2	OW01		20240113-20240113-002	OP10	91832520	1501	SP803	35	11	pass-002-113510W01			
1	pass-002-002	pass-002	1	2	OW01		20240113-20240113-002	OP10	91832520	1501	SP803	60	11	T0003-1 116018P02			
1	pass-002-002	pass-002	5	2	OW01		20240113-20240113-002	OP10	91832520	1501	SP803	37	11	T0001-1 113718P02			
1	pass-002-002	pass-002	2	2	OW01		20240113-20240113-002	OP10	91832520	1501	SP803	35	11	NT0001-01113510W01			
1	pass-002-002	pass-002	5	2	OW01		20240113-20240113-002	OP10	91832520	1501	SP803	60	11	NT0001-01116018P02			
1	pass-002-002	pass-002	8	2	OW01		20240113-20240113-002	OP10	91832520	1501	SP806	46	10	20240113-104611B01			
1	pass-002-003	pass-002	1	2	OW01		20240113-20240113-002	OP10	91832520	1501	SP808	50	10	20240113-105011S01			
1	pass-002-003	pass-002	2	2	OW01		20240113-20240113-002	OP10	91832520	1501	SP810	53	10	20240113-105311S01			
1	pass-002-003	pass-002	5	2	OW01		20240113-20240113-002	OP10	91832520	1501	SP810	43	10	20240113-10431DB01			
1	pass-002-003	pass-002	8	2	OW01		20240113-20240113-002	OP10	91832520	1501	SP810	36	10	20240113-103618P02			
1	pass-002-003	pass-002	1	2	OW01		20240113-20240113-002	OP10	91832520	1501	SP802	34	10	20240113-103410W01			
1	pass-002-003	pass-002	5	2	OW01		20240113-20240113-002	OP10	91832520	1501	SP802	38	10	20240113-103818P01			
1	pass-002-003	pass-002	8	2	OW01		20240113-20240113-002	OP10	91832520	1501	SP806	46	10	20240113-104611B01			
1	pass-002-004	pass-002	1	2	OW01		20240113-20240113-002	OP10	91832520	1501	SP808	50	10	20240113-105011S01			
1	pass-002-004	pass-002	2	2	OW01		20240113-20240113-002	OP20	91833614	1504	SP806	47	10	20240113-10471DB01			
1	pass-002-004	pass-002	5	2	OW01		20240113-20240113-002	OP20	91833614	1504	SP808	50	10	20240113-105011S01			

图2 数据处理及收集示例



图3 企业实地生产线

由于数据表中的信息是系统中的所有信息，因此需要对其中的数据进行筛选，对有用的信息进行预处理。为了让数据结构更加合理，使用了多个数据类，下面是其中的主要部分：

- 1) 工序类。工序类用于表示工序加工信息以及相应的辅助资源信息，具体有：加工前库位；隔离时间；工序切换方式；机床 id；机床加工位 id;机床夹具编码；随行夹具/托盘编码；加工方式；托盘编码；检测方式编码；加工后库位等。当存在有多种不同选择时，如机床 id，则保存的信息为数组形式。
- 2) 工件类。工件类信息包含：工序类的数组、对应工序排序的数组。
- 3) 算法编码类。将订单信息转换成对应的编码符号，其中具体包含：工件类、分批数量、优先级、分批方式等。在类中工件的工序数量就是该类符号在算法编码中出现的次数。
- 4) 夹具 id 类。该类表示每一个夹具需要包含的信息，具体有：上次任务结束时间、当前位置。
- 5) 夹具编码类。该类用于表示同种夹具的所有信息，具体有：夹具 id 类数组、关联库位编码、关联抓手编码。

- 6) 其他辅助资源类。如托盘、刀具、库位等类与夹具类相似。其中刀具 id 类中需要包含刀具寿命。
- 7) 工序执行顺序类。该类用于表示加工具体工序的执行工步，如加工某工序的工步有：切换刀具、切换夹具、运输托盘、运输工件、加工、返回库位等。

实验验证：使用 matlab 编程解决简化模型的小规模问题，证明算法的可行性。使用 matlab 软件对预处理完的数据加入一定的混合算法，得出的工件在机器上的时间排序分布以及时间数据，如图 3、图 4 所示，总加工时间有着较为明显的减少，效果良好，初步证明了本项目智能调度的可行性。

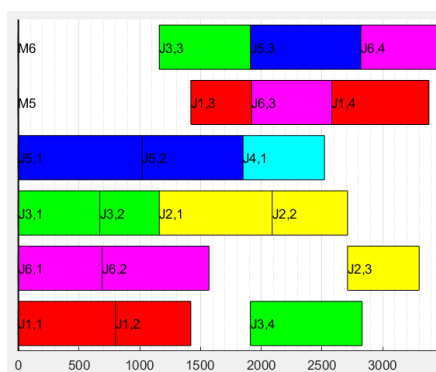


图4 排序分布甘特图

加工时间 工件 \ 工序	1	2	3	4
1	800	620	500	800
2	930	620	590	
3	670	490	730	920
4	670			
5	1020	830	910	
6	690	880	660	640

加工时间 工件 \ 工序	1	2	3	4
1	780	620	500	800
2	650	620	590	
3	670	490	750	760
4	670			
5	960	890	910	
6	690	880	660	640

图5 优化前（左）及优化后（右）加工时间对比图

（包括研究目标和拟解决的关键问题，以及拟采取的研究方法、技术路线等）

本项目首先建立**多品种混线分批次柔性作业车间调度模型**，综合各种实际约束因素条件及不同的重点对不同阶段之间约束进行建模，并分析模型相对一致分批的优缺点，设计实际案例验证调度模型的正确性，采用商用求解软件如 Cplex 寻找精确算法可求解范围边界。

其次，基于**智能算法进行静态调度**。在调度模型的基础上，对该复杂调度问题进行分解，基于高效的整体智能优化算法并结合实际约束条件优化机器分配和工步排序等问题，采用精确数学规划算法作为局部搜索算法求解子批划分问题，研究子问题间的解耦规律及全局最优性保留机制。

第三，基于**深度学习进行动态调度**。多品种混线柔性生产线的生产方式使得车间具有很大的柔性，能更好地应对诸如机器故障、紧急插单等动态事件，但在加工时间较短、生产节奏较快时，全自动物流设备往往需要调度系统能快速地动态事件进行处理，常用的重调度机制不适应此种情况，而经典的调度规则也不完全适用。故本项目将研究针对此复杂调度问题的基于深度强化学习的动态调度方法，在前述调度模型的基础上，对动态事件进行仿真模拟，设计具有针对性的调度规则库，采用深度 Q 强化学习算法对不同状况下调度规则进行选择，得到适用性强的有效调度规则。

最后，通过与相关企业合作，将本研究**应用到实际生产线上**，真正打通产学研壁垒，实现成果转化落地。

对于整体的研究流程路线如下图所示：

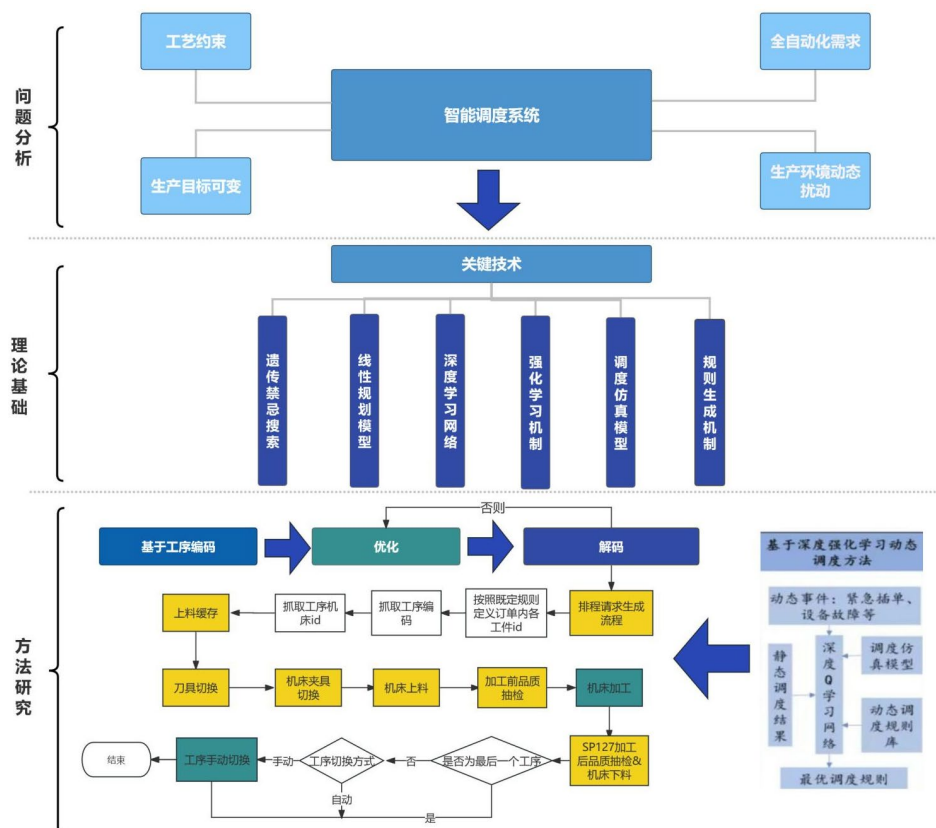


图6 研究流程图

	<p>本项目旨在建立一种新型全自动柔性生产线调度系统，解决多品种、中小批量的实际生产问题，最终实现生产车间高效、稳定的全自动运行。主要创新点和优势有：对新颖的多品种混线加工问题进行建模，并且所考虑的实际场景中的资源复杂，因此可以达到贴近实际状况、精度极高的效果，可以使得各机器严丝合缝地执行任务、精准控制，非常实际化；本项目的算法系统考虑了资源需求，会对资源的需求进行预估，更好地统筹与调配工作进程；本项目所研发的系统完全自动化，不需要人力介入，高效率，高智能，可以实现人机分离。</p>
--	--

申请人简历

教育经历	<p>（从高中开始;大学期间教育经历需写明所在院系）</p> <p>2019 年 09 月-2022 年 06 月 天津市塘沽第一中学 高中</p> <p>2022 年 09 月-至今 华中科技大学机械科学与工程学院 本科</p>
项目经历	<p>（曾参与的科技活动或项目）</p> <p>[1] 肠道微生物对睡眠节律影响的研究进展，探究肠道微生物分泌物等对睡眠及阿尔兹海默症的影响，获得科研项目推介信，指导老师:平勇，2021.1-2021.3（高中）</p> <p>[2] 某企业智能柔性生产管控系统开发项目，使用 matlab 软件辅助求解优化工件加工时间及工步排序，指导老师:李新宇、张春江，2024.1-至今</p> <p>[3] 基于 FactorySimulation 的某光伏组件大试线仿真分析与优化，对搭建的产线仿真模型进行细节的改善，以及可优化点的分析，包括堆栈缓冲区、固化房等，指导老师:朱海平，2024.3-至今</p> <p>[4] 电力电子装备的堆叠式结构设计与快速生产方法研究,对电力电子积木结构进行优化设计以及生产流程的优化与数据分析，指导老师：陈宇，2023.11-至今</p>

成绩奖励	<p>本科学业成绩、加权排名和获得奖励情况（如论文、专利、奖项等，高中期间获得全国性学科竞赛奖项也可列出）</p> <p>加权成绩：87.76</p> <p>专业排名：3/52</p> <p>[1] “津发杯”陕西省第十五届工业工程改善创意竞赛一等奖（第一名，排位第二），2024.5</p> <p>[2] APMCM 亚太地区大学生数学建模竞赛二等奖（排位第一），2024.1</p> <p>[3] 美国大学生建模竞赛 H 奖（排位第一），2024.4</p> <p>[4] “科技强国”大学生创意作品竞赛铜奖（排位第一），2023.3</p> <p>[5] 国家发明专利“一种吸尘黑板擦”，202311383106.X，第一发明人</p>
------	---

项目承诺

本人承诺遵守学术伦理,承诺遵守国家和学校规定,合法合规使用项目经费;承诺按照申请书制定的目标和计划完成项目;如在项目结题之前毕业,本人承诺按本科生院要求结题。

承诺人:

2024 年 05 月 23 日

导师意见

本项目较为新颖,申请者科研能力强,综合素质高,创新想法多,对科研有着浓厚的兴趣,对拟开展的研究工作规划详细,具备科研潜力,同意申报。

导师:

2024 年 05 月 23 日