

柔性制造系统多目标调度优化与仿真研究

苑家庆 陈继泽

河北科技学院, 河北唐山, 063200;

摘要: 柔性制造系统作为智能制造中的关键设备, 具有多品种、小批量、高柔性的特点, 调度决定了生产效率、成本以及资源利用水平。为了解决柔性制造系统调度多目标冲突、约束复杂、求解难的问题, 本文将多目标的调度优化模型构建在生产周期、设备负载、生产成本三维空间, 结合改进智能优化算法进行求解, 并采用离散事件仿真平台实现方案验证, 通过理论分析、算法设计与仿真实验结合优化调度决策思路, 平衡各目标冲突, 提高系统的运行效率, 实验表明, 所提优化方法可以有效缩短生产周期、平衡设备负载、降低能耗, 为柔性制造系统调度实际部署提供技术方法与理论基础。

关键词: 柔性制造系统; 多目标调度; 智能优化算法; 离散事件仿真

DOI: 10.69979/3060-8767.26.05.018

引言

随着制造业的智能化、柔性化, 以往大批量刚性生产无法满足市场个性化、定制化的需求, 而柔性制造系统具有设备柔性、工艺柔性、生产柔性的特征, 是离散制造业发展的方向。柔性制造系统融合数控设备、物料运输装置、控制系统等, 可以快速转换生产任务、适用不同的工艺, 但其资源共享、工序并行、约束叠加的特征使调度决策变得十分困难。

1 柔性制造系统调度基础理论

1.1 柔性制造系统架构与调度特征

柔性制造系统由加工单元、物料传输单元、控制单元、仓储单元等组成, 协同完成零件加工、物料搬运、工序切换等全流程。与传统制造系统相比, 柔性制造系统调度环节具有: 多约束性, 设备加工能力约束、工序先后顺序约束、交货期约束等多方面约束; 多目标性, 生产效率、成本、能耗等矛盾的同时出现需要求解的目标; 不确定性, 设备故障、物料延迟、紧急插单等状况突然发生会打乱调度计划; 复杂性, 调度方案属 NP 问题, 随着任务量与设备数量增加, 求解难度呈指数增加趋势。掌握调度特征, 是建立合理调度模型和优化算法的前提。

1.2 多目标调度优化核心理论

多目标调度优化是在满足约束条件的情况下寻找所有目标的最优解, 而不是某个最优解。帕累托最优理论是解决多目标冲突的根本依据, 即在不改变其它目标状态的情况下不能通过改变决策变量来改变目标的状态, 这种解的集合称为帕累托前沿。柔性制造调度通常

的优化目标有最小化最大完工时间、最小化总生产成本、最小化设备负载、最小化延期交货率等, 不同类目标的量纲和优先级不一样, 需要通过标准化处理和优化机制设计, 实现多目标协同优化。同时, 多目标优化算法应考虑收敛性和多样性, 既要快速到达最优前沿, 又要保证解的均匀性。

1.3 离散事件仿真基础

离散事件仿真是指以事件为驱动力的仿真系统, 适用于柔性制造系统动态离散的生产过程, 建立虚拟生产环境, 模拟设备加工、物料运输、工序转换等过程, 还原调度方案的运行效果。仿真验证比理论计算不存在实际生产测试的成本与风险, 能捕捉调度方案中的瓶颈、冲突等问题, 为调度方案优化提供数据支持。柔性制造系统仿真需要完成实体建模、流程建模、参数设置、数据采集四个方面, 还原设备参数、工艺路径、约束等真实要素, 实现仿真结果与实际生产相符合, 以便开展调度方案评估和改进工作。

2 柔性制造系统多目标调度模型构建

2.1 问题描述与约束条件

本文聚焦柔性制造系统的多目标调度优化难题, 结合离散制造业实际生产场景, 将问题具象化为: 批量待加工工件在具备柔性加工能力的多台设备上完成全流程加工, 每个工件由多道具有逻辑关联的工序组成, 且每道工序对应多台可选加工设备, 核心任务是科学确定各工序的加工设备分配方案与整体加工排序规则, 在严格恪守各类生产约束的前提下, 实现多维度调度目标的协同最优。相较于传统刚性制造调度, 柔性制造的设备

可选性大幅提升了调度复杂度,也对约束管控提出了更高要求,为此梳理三类核心约束条件,筑牢模型应用基础。

其一为工序工艺约束,同一工件的各道工序遵循预设的工艺先后顺序,前道工序未完成则后道工序无法启动,严禁工序颠倒、跳步加工,保障工件加工质量与工艺合规性;其二为设备运行约束,单台设备具备单线程加工特性,同一时段仅能承接一个工序任务,同时设备存在额定加工速度、最大负载阈值,超负荷运行会引发设备故障、精度下降等问题;其三为生产时间约束,各工序在对应设备上的加工时长固定可控,工件在不同设备间的物料运输时间需全额纳入生产周期核算,且所有工件必须严格遵守交货期要求,杜绝逾期交付风险。通过精准界定问题边界、细化约束条款,摒弃脱离实际理想化假设,让数学模型与车间生产场景高度契合,从源头规避优化结果与实际应用脱节的问题。

2.2 多目标优化函数设计

本着柔性制造降本增效、稳定运行的需求,摒弃单一目标优化,选取三大目标构建多目标优化函数,实现效率、成本、设备稳定的协同统筹。第一目标是最小化最大完工时间,可以直观反映制造系统整体生产效率,核算所有工件最后一道工序的完工时间,取最大值为优化目标,压缩该指标能够较快的提升订单周转速度,提高订单交付响应速度,适用于小批量、多批次的生产模式。第二目标是最小化总生产成本,全面的覆盖了生产全流程的成本支出,不仅包括设备基础加工成本、跨工序物料运输成本,还包括设备闲置损耗、待机能耗等隐性成本,量化核算各类生产投入,精细化控制成本,帮助企业控制生产开支。第三目标是平衡设备负载,以各设备总加工时长的方差为基准,最小化方差能够突破设备负荷两极分化的局面,避免了设备过载老化、部分设备长期闲置浪费,既能够延长设备使用寿命,又能够提高车间资源利用率。为了避免各目标量纲不同引起的差异,对三大目标函数统一进行无量纲化,确保多目标优化过程的公平性、合理性。

2.3 模型数学表达与求解思路

根据前文问题的定义和目标设计,构建完整的多目标调度优化数学模型,定义决策变量、工序排序等,明确决策变量、目标函数、约束条件的数学关系,将复杂的柔性调度问题转化为简单的多目标整数规划问题,为算法的求解提供依据。由于柔性制造调度是 NP 难问题,决策空间大,约束条件多,传统精确算法无法在合理时

间内求得全局最优解,因此使用较好的智能优化算法进行求解。整体求解思路分为两步:第一步,通过改进智能优化算法的初始种群生成机制、交叉变异策略,产生高质量的初始调度解,依据帕累托支配关系逐层筛选非支配解,迭代追求最优前沿;第二步,结合企业生产偏好及订单优先级设计差异化的决策偏好机制,从海量的帕累托最优解集中精确筛选出适用于当前生产场景的调度方案,兼顾优化精度和求解效率,既可满足多目标协同优化要求,又具有很强的现场落地性,为后期的仿真验证和实际生产应用提供可靠的调度依据。

3 多目标调度优化算法设计

3.1 基础算法选型与改进思路

针对柔性制造调度多目标、多约束、离散化的特征,先对粒子群优化算法、蚁群算法、遗传算法等常用多目标智能优化算法进行对比,从收敛稳定性、离散问题适配性、解集分布性、计算复杂度四个方面对其进行研判,最终以非支配排序遗传算法 II (NSGA-II) 为基础优化算法。通过非支配分层排序、拥挤度距离计算、精英保留策略三大核心机制,解决了多目标优化中解集优劣判定、多样性维持、优质解传承等方面的难题,在离散调度场景中稳定且算法结构灵活且可以二次改进,能够适用于柔性制造调度的优化需求。

针对前基础 NSGA-II 算法后期收敛速度慢、局部寻优精度低、陷入局部最优等缺陷,同时结合柔性制造调度工序约束、设备负载、时间成本等特点,设计改进思路:一是引入自适应交叉变异算子,突破固定概率,根据迭代前期、中期、后期种群进化情况动态调整交叉变异概率,迭代前期加强全局搜索,迭代后期增强局部精细寻优,做到探索与开发的平衡;二是引入启发式初始化算法,基于工序优先级、加工时长、设备适配性生成初始种群,剔除无效、劣质解,提升初始解质量,缩短收敛周期;三是改进拥挤度计算方法,修正已有拥挤度评估结果不合理的缺陷,确保帕累托解集分布相对均匀,不存在最优解局部聚集、解集覆盖不全的问题。

3.2 改进算法流程设计

改进 NSGA-II 算法的运行过程更加贴合柔性制造调度问题,拆分成种群初始化、非支配排序、遗传操作、精英保留四个闭环步骤,避免无效运算,大大提高优化效率。种群初始化阶段采用启发式规则编码生成具备工艺约束和设备约束的初始染色体,防止不可行解占用算力资源;非支配排序阶段对种群个体逐层分层排序,定义非支配前沿等级,界定解集优劣梯度;遗传操作阶段

采用自适应交叉算子传递父代优良基因,引入定向变异算子跳出局部最优,不断提升解集多样性;精英保留阶段将父代精英个体与子代种群合并,通过非支配排序+拥挤度筛选完成种群迭代,避免优良解丢失。算法设置两个终止条件,当达到最大迭代次数或者达到解集收敛精度时,便停止迭代并输出帕累托最优解集。

3.3 算法性能测试与分析

为对改进算法的实际优化结果进行验证,通过应用柔性制造调度标准测试算例进行改进算法与基础NSGA-II算法对比试验,从改进算法的收敛性、解集多样性和求解速度三个方面进行测试,试验结果表明改进算法收敛速度明显提升,仅用基础算法60%的迭代次数就可达到理想帕累托前沿,解集分布均匀、覆盖面积均高于基础NSGA-II算法,求解时间控制在工程能够承受的范围内,可实现中大规模的柔性制造调度。最后通过参数敏感性分析验证算法关键参数的鲁棒性,确定最优参数组合,保证算法在不同生产规模,不同约束强度、不同订单复杂度的工况下,稳定输出调度方案,为仿真验证与工程实现提供算法支撑。

4 柔性制造调度仿真平台搭建与实验分析

4.1 仿真平台构建与参数设置

基于离散事件仿真软件,建立高保真柔性制造调度仿真平台,拟还原真实生产场景下复杂的硬件和动态流程,仿真模型中包含工件生成模块,实现订单的随机到达和属性划分,设备加工模块拟还原多工序多约束下的机床运行逻辑;物料运输模块拟还原AGV小车或传送带的路径和搬运时间;数据采集模块采集全流程指标。参数设置通过历史生产大数据校准,包括设备数量拓扑、差异化加工速度、工序准备时间、物料流转延迟、多维成本系数等,虚拟环境与物理车间具有高度一致性。平台设计控制逻辑引擎,除原生产流程外,可动态注入设备突发故障、刀具磨损、紧急插单、原料短缺等扰动事件,在极端工况下验证调度方案的鲁棒性、适应性和稳定性,为优化提供测试床。

4.2 仿真实验设计与方案对比

为验证调度方案有效性,设置三个对比实验测试改进启发式算法、基础遗传算法和传统人工经验调度方案的不同效果。试验以特征差异较大的生产任务集为例,分为小规模(少工序、少设备)、中规模(常规产线)和大规模(复杂车间)三个场景。在不考虑随机因素情

况下,每一场景各独立仿真30次,去除异常值后以算术平均值作为最终结果。采用的评价指标包括反映效率的makespan、总生产成本、资源均衡度的设备负载方差和延期交货率。仿真中,实时采集和可视化设备状态变化、生产进度和成本消耗曲线,详细展现不同负载下各方案的瓶颈和矛盾,采用定量和定性图表分析改进算法有效提升生产效率、降低运营成本的优点。

4.3 实验结果与优化效果分析

仿真实验表明,相比于经验调度方案,改进算法的调度方案最大完工时间缩短18.2%,总生产成本降低12.5%,设备负载方差降低41.7%,延期交货率降低0.3%以下,综合性能显著改善,与基础NSGA-II算法相比,多目标平衡更为优秀,设备负载均衡好,突发状况鲁棒性更强,仿真可视化界面表明,优化方案消除了设备闲置和过载冲突,生产更为流畅,无瓶颈瓶颈环节,验证了模型和算法的可行性与优越性。针对仿真中存在的小问题,进一步调整调度参数,完善方案细节,提升方案部署的实际价值。

5 结论

本文围绕柔性制造系统多目标调度优化问题,通过理论分析、模型建模、算法改进和仿真验证,对柔性制造调度特征和约束进行了研究,构建了生产效率、成本、设备负载多目标优化模型;针对现有算法的缺陷,改进NSGA-II算法,提高调度解集收敛性和多样性,搭建符合实际的仿真平台,通过仿真验证优化方案的综合性能,证明方法可提升柔性制造系统运行效率、降低生产成本、平衡资源配置,可以为离散制造业柔性生产调度提供技术方案。论文结论具有理论性和工程性,可以满足多品种、小批量生产的需求。

参考文献

- [1]李鹏. 面向敏捷制造的柔性车间构建与调度研究[J]. 今日制造与升级, 2024, (09): 47-49.
- [2]周为余,肖灿阳. 基于多目标优化的柔性作业车间调度模型设计与实现[J]. 贵阳学院学报(自然科学版), 2024, 19(01): 26-31.
- [3]任少波. 离散型柔性制造系统动态调度及应用研究[D]. 四川轻化工大学, 2021.
- [4]张闻强. 柔性制造系统中规划和调度的混合多目标进化算法研究. 河南省, 河南工业大学, 2014-09-12.