

考虑有限AGV运输资源的柔性作业车间调度研究

张国辉* 蔡翌豪 李志霄 郭胜会 张海军

郑州航空工业管理学院郑州市工业数字孪生与过程优化重点实验室, 郑州, 450046

摘要: 针对智能制造环境中有限自动导引车(AGV)运输资源的柔性作业车间调度问题, 以最小化最长完工时间、总能耗和工件的交货期惩罚值为目标, 建立有限AGV运输资源的集成调度模型。提出一种改进的非支配排序遗传算法(NSGA-II), 针对集成调度模型构建三段式编码方案, 设计三种初始化规则提高初始种群的质量和多样性。结合关键路径, 提出一种改进的变邻域搜索以增强算法的局部搜索能力。实验部分采用多种评价指标与其他算法进行对比, 实验结果表明: 在不同规模标准测试算例和航空企业实际生产案例下, 所提算法均能有效求解有限AGV运输资源的集成调度问题。同时分析不同AGV数量下集成调度模型的有效性, 得出柔性作业车间中AGV数量符合边际效应递减规律的结论, 为实际制造车间配置AGV提供了参考。

关键词: 有限运输资源; 改进的非支配排序遗传算法; 柔性作业车间调度问题; 自动导引车

中图分类号: TH165; TP23; TP18

DOI:10.3969/j.issn.1004-132X.2025.08.016

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Research on Flexible Job Shop Scheduling Problems Considering Limited AGV Transportation Resources

ZHANG Guohui* CAI Yihao LI Zhixiao GUO Shenghui ZHANG Haijun

Zhengzhou University of Aeronautics, Zhengzhou Key Laboratory of Industrial Digital Twin and Process Optimization, Zhengzhou, 450046

Abstract: Aiming at the flexible job shop scheduling problems of limited AGV transportation resources in the intelligent manufacturing environments, an integrated scheduling model for limited AGV transportation resources was established with the objective of minimizing the maximum completion time, total energy consumption and the delivery penalty value of workpieces. An improved NSGA-II solution algorithm was proposed to construct a three-stage coding scheme for the integrated scheduling model, and three initialization rules were designed to improve the quality and diversity of the initial population. Combined with the critical path, an improved variable neighborhood search was proposed to enhance the local search capability of the algorithm. In the experimental part, the algorithm was compared with other algorithms using various evaluation indexes, and the experimental results show that the algorithm may effectively solve the integrated scheduling problems of limited AGV transportation resources under different sizes of standard test cases and actual production cases of aviation enterprises. Meanwhile, the effectiveness of the integrated scheduling model was analyzed under different numbers of AGVs, and it is concluded that the number of AGVs in the flexible operation workshop conforms to the law of diminishing marginal effectiveness, so as to provide a reference for the configuration of AGVs in the actual manufacturing workshop.

Key words: limited transportation resource; improved non-dominated sorted genetic algorithm-II (improved NSGA-II); flexible job shop scheduling problem (FJSP); automatic guided vehicle(AGV)

0 引言

在新一轮产业变革的大背景下, 智能制造已

成为各国抢占科技发展制高点和提升制造业核心竞争力的战略选择, 中国正致力于推进制造业的高端化和智能化转型, 尤其在航空航天领域, 这一趋势尤为显著。而航空结构件作为航空航天类制造企业的重要生产部件^[1], 有着复杂的加工工序和严苛的精度标准^[2], 一个航空结构件的制造通常需要在多台机器上经过多道复杂的工序, 是经

收稿日期: 2024-08-11

基金项目: 国家自然科学基金(U1904167); 教育部人文社会科学研究规划基金(23YJAZH193); 河南省重点研发专项(231111221200); 河南省科技攻关项目(242102220039)

典的柔性作业车间调度问题(flexible job shop scheduling problem, FJSP)。同时这些过程需要高效的物料运输和流动控制。在这种情况下,自动导引车(automated guided vehicle, AGV)成为关键,它能够自主导航、安全运输零部件,实现生产线上的无缝物流,提高生产效率和精度,同时降低人为错误和成本。在实际智能制造环境下,缺乏合理高效的运输调度方案不仅会增加最长完工时间、延误交货期,而且会导致运输能耗的增加,因此,考虑运输资源的柔性作业车间调度问题(FJSP with transportation resources, FJSP-T)成为近年来的研究热点。

LI等^[3]针对多资源约束下的多目标作业车间调度问题,以同时最小化出口时间、劳动力成本、工人工作量差异和运输时间为目标,设计了一种改进的非支配排序混合局部搜索遗传算法(improved non-dominated sorting genetic algorithm with a hybrid local search, INSGA-HLS)。LI等^[4]提出一种多策略驱动遗传算法,针对工序序列和机器分配子问题,设计了三种有针对性的策略,引入针对特定问题的分集检查和重启策略,避免了多路遗传算法陷入局部最优。YAO等^[5]针对集成有限运输资源的作业车间调度问题的独特特性专门设计了新型邻域结构,将新邻域结构与禁忌搜索(novel neighborhood structures with the tabu search, TS_NNS)相结合,在23个实例中增强了最佳解决方案。REN等^[6]考虑了一种有运输资源和运输时间的约束的动态柔性作业车间调度问题,设计了动态调度系统的动态决策流程图,提出了结合遗传算子的粒子群优化算法,对动态事件进行响应,及时生成调度计划。LIU等^[7]研究了具有运输资源的动态柔性作业车间调度问题,提出了一种多目标自适应大邻域搜索算法进行求解。YAO等^[8]将具有有限AGV的柔性作业车间调度问题分解为4个子问题,提出了一种混合整数线性规划模型。张国辉等^[9]同时考虑运输时间和调整时间,建立了以最小化最长完工时间、机器总负载、机器关键负载和工件的交货期惩罚值为目标的数学模型,提出一种改进的混合多目标蚁群算法来求解该问题。

针对考虑运输资源的柔性作业车间调度问题研究成果颇丰,但随着环境问题的日益严重,设备资源的能耗及绿色智能制造趋势逐渐成为学者和实际应用的焦点。JIANG等^[10]针对作业车间存在的生产效率低、能耗高、加工成本高等问题,建

立了以总能耗、最长完工时间和加工成本为优化目标的航空航天复杂零件分批调度模型,提出了一种改进的交叉人工蜂群算法。XU等^[11]研究了柔性作业车间与AGV集成的多目标绿色调度问题,为使总能耗和完工时间同时最小化,设计了一种高效的启发式算法来求解模型;为了获得高质量的初始种群,还设计了平衡处理时间和能量消耗的种群初始化方法。张洪亮等^[12]针对考虑运输时间的分布式柔性作业车间绿色调度问题,以最小化完工时间和总能耗为目标,设计了考虑运输时间的贪婪插入解码方法,并嵌入一种变邻域搜索策略以提高Pareto前沿的质量。

近年来,使用强化学习等方法解决FJSP-T问题的研究也层出不穷。YUAN等^[13]提出了一种改进的双深度Q网络(double deep Q network, DDQN)实时调度方法,以最小化完工时间为目标解决FJSP-T问题。ZHANG等^[14]通过提出的深度强化学习方法学习端到端的高质量优先级调度规则以最小化Makespan,为了实现工序、机器和AGV的一体化决策,提出了一种基于异构图神经网络和深度强化学习的体系结构。YAO等^[15]提出了一种基于深度Q网络的多目标模因算法,以最小化最长完工时间和总能耗为目标,解决了有限AGV条件下的节能作业车间调度问题;在关键路径分析的基础上,提出了4个问题性质,作为设计6个邻域算子的基础。WANG等^[16]提出了一种基于反馈学习的模因算法,以同时最小化完工时间和总能耗为目标,通过引入群体状态和个体状态的观测器指标,自适应地匹配适合个体的算子,提出反馈学习模因搜索;在低密度区域引入多算子局部强化搜索,进一步提高开发能力。祝正宇等^[17]以最小化订单总拖期时间为优化目标,提出一种基于组合规则和强化学习的智能调度方法,并以航天结构件加工车间为案例对问题进行求解。PAN等^[18]提出了一种基于学习的多种群进化优化算法来解决FJSP-T问题,首先引入多种群策略,结合多种启发式算法设计基于合作的初始化算法,保证初始种群的质量和多样性,然后提出了一种基于强化学习的交配选择方法,通过选择合适的个体进行进化搜索,实现不同亚种群的合作。

综上所述,考虑运输的柔性作业车间调度问题的多种算法和方法的研究成果显著,但在实际生产过程中,运输资源并不是无限制的。本文在航空航天领域智能制造的背景下,结合航空结构

件的生产制造特点,考虑了有限 AGV 运输资源的柔性作业车间调度问题(FJSP with limited AGV transportation, FJSP-LAT),以最小化最长完工时间、总能耗和工件的交货期惩罚值为目标,建立了运输资源受限的 AGV 和机器集成调度模型。设计了一种改进的非支配排序遗传算法(improve non-dominated sorted genetic algorithm-II, INSGA-II),针对集成调度模型采用三段式编码方案,设计了3种初始化规则以提高初始种群的质量和多样性,以关键路径为导向,提出了一种改进的变邻域搜索以增强算法的局部搜索能力。最后通过实验验证所提算法的有效性,同时分析了不同 AGV 数量下集成调度模型的有效性,揭示了柔性作业车间中 AGV 数量符合边际效应递减规律,为实际制造车间配置 AGV 提供参考。

1 问题描述及数学建模

1.1 问题描述

FJSP-LAT 问题的描述如下:包含多道工序的 n 个工件可以在不同的 m 台机器(M_k 表示第 k 台机器, $k=1,2,\dots,m$)上进行加工,此外车间内还配备有 s 台相同类型的 AGV(V_v 表示第 v 个 AGV, $v=1,2,\dots,s$),负责工件在不同加工机器间的运输。每个工件需要依次经过多个加工阶段,每个加工阶段可以由多台不同的加工机器完成。在每道工序加工完成后,AGV 将工件从一台机器运送至下一道工序所在的加工机器。某航空企业航空结构件生产车间示意图见图 1,图 1 中多种工件经过复杂的工序在不同的智能制造设备上加工,由 AGV 承担不同机器间的转运工作,当然运输资源 AGV 的数量并不是无限的,因此,运输资源的调度就显得尤为重要。

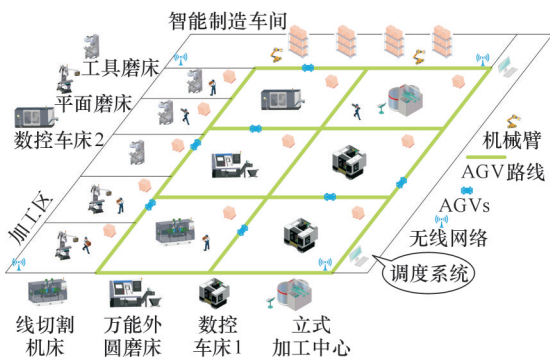


图 1 某航空企业智能制造车间示意图

Fig.1 Aerospace intelligent manufacturing workshop schematic

为了详细解释这一问题,给出一个由 3 个工件、4 台机器、3 辆 AGV 组成的例子来说明。如

表 1 所示,有 3 个工件 J_1, J_2, J_3 ,它们分别有两道、三道、两道工序,每道工序都可以选择相应的机器和 AGV 进行加工和运输,表 1 中数字是工件的不同工序在不同机器上的加工时间,“—”表示该机器不能加工该道工序。工序加工完成后可以选择 3 辆不同的 AGV 进行运输,1、2、3 是 3 辆 AGV 的编号,AGV 在不同机器间的运输时间见表 2,其中 L/U 区是装卸区,AGV 在零时刻从装卸区出发到达加工机器运送不同的任务,AGV 在各机器间的运输时间不同,表 2 中的数据表示不同机器间的运输时间,如第 3 行第 4 列的 3 表示 AGV 运送当前任务从机器 1 到达机器 2 的运输时间为 3。

表 1 FJSP-LAT 示例

Tab.1 FJSP-LAT instance

工件	工序	加工机器和加工时间			
		M_1	M_2	M_3	M_4
J_1	O_{11}	3	10	—	3
	O_{12}	—	4	5	2
J_2	O_{21}	—	7	5	—
	O_{22}	6	2	—	8
	O_{23}	—	6	4	2
J_3	O_{31}	4	—	2	—
	O_{32}	—	3	6	—
AGV 编号		1、2、3			

表 2 AGV 运输时间

Tab.2 AGV transportation time

参数	L/U 区	M_1	M_2	M_3	M_4
L/U 区	0	2	3	2	4
M_1	2	0	4	3	2
M_2	3	4	0	3	4
M_3	2	3	3	0	4
M_4	4	2	4	4	0

为了更直观地说明 FJSP-LAT 问题中机器选择、工序排序和 AGV 分派的集成调度,图 2 所示为表 1 中工序、机器和 AGV 之间的关系,实线表示该工序可在可选机器上进行加工,虚线表示可以使用 AGV 对该工序进行运输。图 3 所示为该示例问题的一个解决方案,该方案的调度甘特图见图 4,工件 2 的第一和第二道工序均在机器 M_2 上进行加工,因此,工件 2 的第一道加工工序完成后不需要 AGV 进行运输,直接在同一个机器上接着进行第二道工序的加工。再如工件 1 的第一道加工工序完成后,指派 AGV₂ 执行运输任务,AGV₂ 首先要从装卸区出发前往 M_1 ,等待工件 1 的第一道工序加工完成后,再从当前位置 M_1 前往 M_4 进行下一道工序的加工。

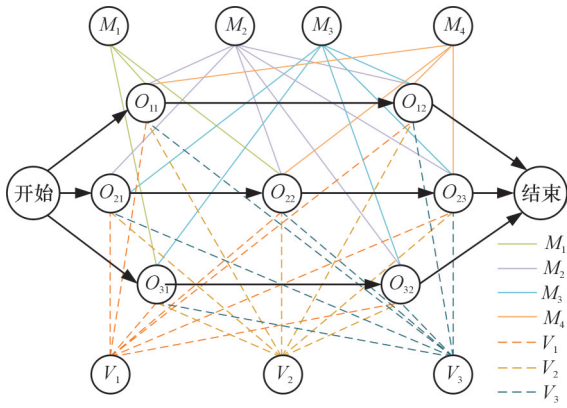


图2 FJSP-LAT问题结构图

Fig.2 Heterogeneous graph of FJSP-LAT

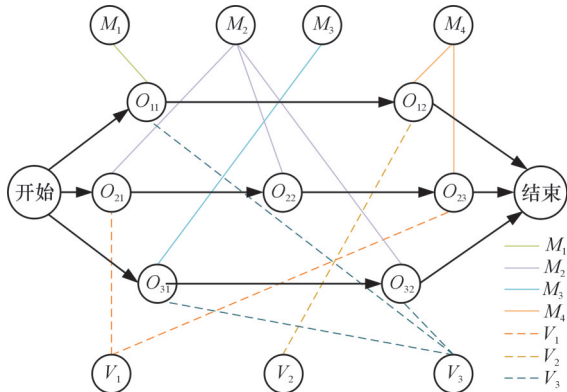


图3 FJSP-LAT问题的一个解决方案

Fig.3 A solution of FJSP-LAT

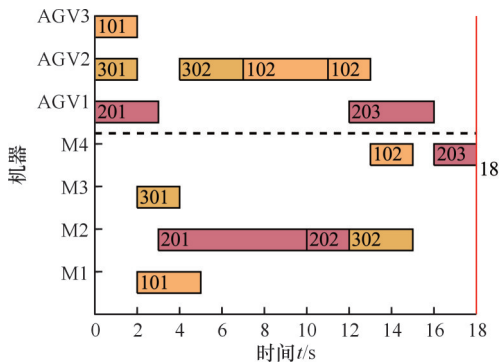


图4 FJSP-LAT问题的甘特图

Fig.4 FJSP-LAT Gantt chart

对于此问题,提出以下假设:①集成调度车间由装载区(L/U区)、 m 台机器、 n 个工件和 s 辆AGV组成;②零时刻所有的AGV和机器都可用,AGV停靠在装载区准备就绪;③所有工件的起始位置都在装载区,第一道工序均由AGV搬运到相应机器进行加工;④同一工件的不同工序均在一个机器上进行加工时不需要AGV运输;⑤不考虑AGV之间的路径冲突和碰撞;⑥每台机器同一时刻只能加工一道工序,且加工一旦开始,中途不能中断;⑦AGV一次只能运输一个工件,且每次运输任务完成后在当前位置等待下一个运输任务,不返回装载区;⑧同一工件的工序存在加工

顺序的约束关系,不同工件的加工工序不存在约束关系。

1.2 问题建模

为方便设计求解算法,梳理工件加工过程和AGV转运过程中的关键节点,符号及相关定义见表3。

表3 符号说明

Tab.3 Notation description

参数	定义
i	工件号; $i=1,2,\dots,n$
j	工序号; $j=1,2,\dots,l_i$
k	机器号; $k=1,2,\dots,m$
v	AGV号; $v=1,2,\dots,s$
l_i	工件 i 的工序总数
O_{ij}	工件 i 的第 j 道工序
C_i	工件 i 的完工时间
t_{sij}	工件 i 的第 j 道工序的开工时间
t_{cij}	工件 i 的第 j 道工序的完工时间
T_{ijk}	工件 i 的第 j 道工序在机器 k 上的加工时间
S_{ijks}	工件 i 的第 j 道工序在机器 k 上的开始加工时间
E_{ijks}	工件 i 的第 j 道工序在机器 k 上的开始终止时间
$TSE(i,j,v)$	v 运输 $O_{i,j-1}$ 时空载行程开始时间
$ETE(i,j,v)$	v 运输 $O_{i,j-1}$ 时空载行程结束时间
$TLB(i,j,v)$	v 运输 $O_{i,j-1}$ 时负载行程开始时间
$ETL(i,j,v)$	v 运输 $O_{i,j-1}$ 时负载行程结束时间
P_{MLijk}	工件 i 的第 j 道工序在机器 k 上的负载功率
P_{MNijk}	工件 i 的第 j 道工序在机器 k 上的空载功率
P_{ALijv}	v 的负载功率
P_{ANijv}	v 的空载功率
E_p	加工能耗
E_1	空闲能耗
E_T	运输能耗
D_{Er}	最早交货期
D_{Li}	最晚交货期
X_{ijkp}	0-1决策变量,工件 i 的第 j 道工序在机器 k 上加工为1,否则为0
R_{ijkv}	0-1决策变量,当工件 i 的第 j 道工序在机器 k 上加工选择AGVs完成运输任务为1,否则为0

以最长完工时间、总能耗和交货期惩罚值最小化为优化目标,数学模型的优化目标和约束条件如下:

$$f_1 = \min(\max C_i) \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (1)$$

$$f_2 = \min(E_p + E_1 + E_T) \quad (2)$$

$$E_p = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{l_i} \sum_{k=1}^m (P_{MLijk} \times T_{ijk}) \quad (3)$$

$$E_1 = E_{1m} + E_{1v} \quad (4)$$

$$E_{1m} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{l_i} \sum_{k=1}^m P_{MNijk} \cdot (C_{\max} - \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{l_i} \sum_{k=1}^m ((t_{cij} - t_{sij}) \cdot X_{ijkp})) \quad (5)$$

$$E_{lv} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{l_i} \sum_{v=1}^s (P_{ANijv} \cdot (ETE(i, j, v) - TSE(i, j, v))) R_{ijkv} \quad (6)$$

$$E_T = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{l_i} \sum_{v=1}^s (P_{ALijv} \cdot (ETL(i, j, v) - TLB(i, j, v))) \cdot R_{ijkv} \quad (7)$$

$$f_3 = \sum_{i=1}^n \begin{cases} \alpha_s (D_{Ei} - C_{Ji}) & C_{Ji} < D_{Ei} \\ 0 & D_{Ei} \leq C_{Ji} \leq D_{Li} \\ \alpha_e (D_{Ei} - C_{Ji}) & C_{Ji} > D_{Ei} \end{cases} \quad (8)$$

$$\sum_{k=1}^m X_{ijk} = 1 \quad (9)$$

$$\sum_{v=1}^s R_{ijkv} = 1 \quad (10)$$

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{l_i} X_{ijkv} \geq 1 \quad \forall i, j \quad (11)$$

$$S_{ijks} + T_{ijk} = E_{ijks} \quad (12)$$

$$S_{ijks} + T_{ijk} \leq S_{i(j+1)ks} \quad (13)$$

其中:式(1)为目标函数最小化最长完工时间;式(2)表示总能耗由最小化加工能耗、空闲能耗和运输能耗之和构成;式(3)表示机器加工能耗;式(4)~式(6)表示机器的空闲能耗,空闲能耗分为两部分:机器空闲能耗和AGV空载能耗;式(7)表示AGV负载运输所产生的能耗;式(8)表示目标函数交货期惩罚值,即工件*i*完工时间 C_{Ji} ($C_{Ji} = \max(C_i)$)不在规定交货期 $[D_{Ei}, D_{Li}]$ 内造成的损失;若提前完工则需一定的存储费用, α_s 为提前每个单位时间花费的存储费,若拖期完工则需支付违约费用, α_e 为拖期每个单位时间花费的违约费;式(9)约束条件表示每道工序每次只能选择一台机器进行加工;式(10)表示AGV每次运输任务只能运送一个工件;式(11)表示同一时刻在一台机器上只能加工一道工序;式(12)表示一道工序一旦开始在机器上进行加工就要被加工完成,不存在停止加工;式(13)表示同一工件工序之间的制约关系满足工艺路线制约关系,即同一工件前一道工序加工完成后下一道工序才能进行加工。

2 改进的NSGA-II算法

2.1 编码与解码

FJSP-LAT问题可以划分为3个子问题:机器选择、工序排序和AGV分派,根据这3个子问题设计了一种三段式的编码方法,如图5所示。

根据表1和表2的数据,得到图5所示的一个3工件、4机器和3AGV的可行染色体编码。对于机器选择部分,编码时按照所有工件的工序顺序选择加工机器,一个工件的所有工序选择完毕才

能进行下一个工件的选择,如前两个值3、3为 J_1 的两道工序 O_{11} 和 O_{12} ,然后1、2、1是 J_2 的三道工序 O_{21} 、 O_{22} 和 O_{23} ,最后2、1代表 J_3 的两道工序 O_{31} 和 O_{32} 。解码时数值信息对应着当前工序在可选加工机器中选择的第几台加工机器。如第1个数值3代表 J_1 的第1道工序 O_{11} ,在可选机器 M_1 、 M_2 和 M_4 中选择第3台机器(即 M_4)进行加工。

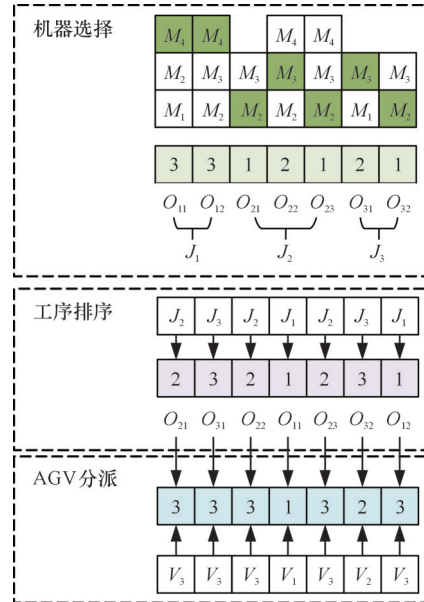


图5 编码解码

Fig.5 Encoding and decoding

工序排序部分对应数值代表第几个工件,如前两个数值2和3代表 J_2 和 J_3 ,每个工件有许多道工序,数值相同就代表某一工件的不同工序,如 J_2 有三道工序,那么相应地在工序排序部分就出现3个数值2。而相同数值出现的前后顺序就代表某一工件的前后工序,如数值2代表 J_2 的三道工序,那么第1个数值2就代表了 J_2 的第1道加工工序 O_{21} ,第2个数值2代表 O_{22} ,第3个数值2代表 O_{23} 。AGV调度部分,AGV的选择顺序按照工序排序的工序顺序进行运输,解码时对应的数值代表AGV的编号,如第1个数值3代表本次加工的第一个工件的第一道工序,即 J_2 的第一道工序 O_{21} 由 V_3 进行运输。AGV调度染色体的数值代表AGV的编号即选取那一辆AGV进行运输,运输的工序对应工序排序部分的染色体编码。

为了避免资源的浪费,传统的解码方法通常都按照机器或工序的最早可开工时间来安排,导致不能有效地利用机器的空闲时间,故本文采用张国辉等^[1]提出的左插入式解码方法。当工序 O_{ij} 在 M_1 上进行加工时,此时 M_1 上有两个空闲的时间段,按照传统的解码方法进行安排,会根据机器和工序的最早可开工时间,将 O_{ij} 安排在后一个空

闲时间段,而前一个空闲时间同样满足约束条件,因此,左插入式解码将把工序 O_j 安排到前一个空闲时间段进行加工。

2.2 初始化

为了保证初始种群的质量,本文设计了3种初始化规则生成初始解:完全随机的初始解、按照最小加工时间生成初始解和按照先加工最大剩余时间生成初始解,并且按照30%、40%、30%的比例进行分配,以保证初始解的质量和多样性。三种初始化规则如下:①完全随机生成规则。以完全随机的方式生成初始解,为每个工序随机选择一个机器,对工序的顺序进行随机排序,对AGV调度顺序进行随机排序。②按最小加工时间生成规则。在生成机器选择部分的初始解时,选择每道工序在所有可选机器中加工时间最短的机器,工序排序和AGV调度部分随机排列。③按先加工最大剩余时间生成规则。先选择总剩余时间最大的工件进行加工,对于每个工件,依次选择剩余时间最大的工序进行安排,机器选择和AGV调度部分随机排列。

这些初始化规则帮助遗传算法在搜索空间内找到更好的解,从而提高优化效率,缩短最长完工时间,减少资源的消耗。

2.3 操作算子设计

1)交叉算子。交叉算子设计见图6。机器选择部分和AGV调度部分都采用多点交叉的方式,从种群中选择两个个体,随机生成交叉的位置并确定交叉的个数,将两个个体的相同位置上的基因进行交换,然后将交叉完成的个体放入新的种群中相应位置。如图6a和图6c所示。

工序排序部分交叉采用工件交换的方式,同样也是多点交叉,从种群中选择两个个体的工序排序部分,随机生成工件的交叉顺序并确定交叉的工件个数,找到需要交换的工件的位置,按顺序交换两个父代个体对应工序的基因,将交叉完成的个体放入新的种群中相应位置。如图6b所示。

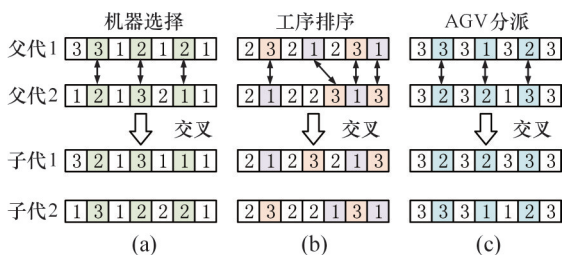


图6 交叉算子

Fig.6 Crossover operator

2)变异算子。变异算子设计见图7。机器选择部分和AGV调度部分均采用离散均匀变异的方式,在每个个体的机器选择部分,随机选取一个位置 a ,然后用一个1到可选机器总数大小的随机整数替换原来的值,它确保了在允许的机器范围内产生新的选择序列,如图7a所示。在AGV调度部分,同样随机选择一个位置 a ,然后用一个从1到AGV总数大小的随机整数替换原来的值,这个部分与机器选择类似,也是采用离散均匀变异的方法,如图7c所示。

工序排序部分涉及工件操作顺序的变异。首先随机选择两个位置,然后交换这两个位置的工序。这种方式模拟了工序之间的随机交换,帮助种群在搜索空间中更广泛地探索可能的解,如图7b所示。

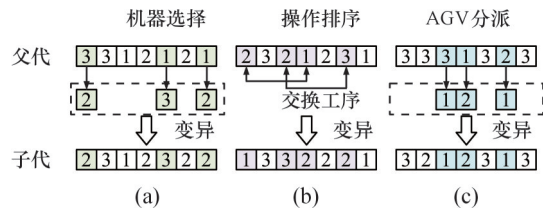


图7 变异算子

Fig.7 Mutation operator

2.4 变邻域搜索

为提高 INSGA-II 算法的局部搜索能力,本文结合关键路径以3个优化目标为导向设计了一种改进的变邻域搜索,通过变邻域搜索组合多个邻域结构提高解的质量,并设计了4种邻域结构(NS1~NS4)。

1) NS1。转移关键路径上的关键工序,通过将关键工序移动到其他路径可有效缩短关键路径的长度,从而减少最长完工时间。算法一给出了NS1详细过程。

算法一: NS1

输入: 个体 $S1$, 不同种群输入对应的目标值 f

输出: 个体 $bestS1, f'$

- 1: 对个体 $S1$ 进行部分解码,找到关键路径,令个数为 KL
- 2: if $KL > 1$
- 3: 随机选取一条关键路径
- 4: else
- 5: 即为寻找到的关键路径
- 6: end
- 7: 查找关键路径上最后一道工序 $O1$,并找出该工序的可选加工机器集合 M
- 8: 转移工序 $O1$ 到 M 中其他可选加工机器,得到新个体 $S2$
- 9: 对 $S2$ 进行部分解码,得到目标值 f'
- 10: if $f > f'$

```

11: bestS1 = S2
12: break
13: end
14: if  $f < f'$ 
15: bestS1 = S1
16: end
17: return bestS1,  $f'$ 
    
```

2)NS2。在车间加工过程中难免会出现部分机器长时间加工、部分机器出现闲置的情况,造成资源利用不合理。如何通过合理的调度方案,充分利用有限的资源尤为关键。因此,NS2通过计算各机器的负载情况,找出最大负载机器,然后降低机器长时间负载,将部分工序从最大负载机器转移到其他可选加工机器上,从而减少资源的浪费和能耗。

3)NS3。采取双点交换策略,随机选取个体 $bestS2$ 工序排序部分两个不同位置的染色体值,并对其进行交换,然后解码比较求得的目标值是否优于原目标值。若优于原目标值,则保留交换后新的个体 $bestS3$,反之保留原个体 $bestS2$,并传入下一个邻域结构。

4)NS4。采取单点插入策略,输入上一邻域结构的最优个体,随机选择两道工序将其中一道工序插入另一道工序之前,然后解码比较求得的目标值是否优于原目标值,若优于原目标值,则保留插入后新的个体 $bestS4$;反之,则不更新。

变邻域搜索的具体流程如下:

1)首先将种群分别按目标 f_1, f_2, f_3 从小到大排序。

2)分别选取前 k 个以不同目标值 f_1, f_2, f_3 从小到大排序的个体分别构成种群 A, B, C 。

3)令 $i \leftarrow 1$ 。

4)分别解码种群 A, B, C 的第 i 个个体,找出关键路径。

5)进行变邻域搜索。首先将得到的 $S1$ 传入 $NS1$,将关键路径上的最后一个工序转移到可加工机器中最小完成时间的机器上,并解码比较求得的目标值是否优于原目标值(种群 A 比较最长完工时间 f_1 ,种群 B 比较总能耗 f_2 ,种群 C 比较交货期惩罚值 f_3 。后面的邻域结构比较目标值也是同样操作),若优于原目标值,保留新的个体,记为 $bestS1$ 传入下一个邻域结构;反之,则不更新 $S1$,将原 $S1$ 记为 $bestS1$ 传入下一个邻域结构。

6)接收步骤 5)传来的结果对其进行 $NS2$ 操作。将部分工序从最大负载机器转移到其他可选加工机器上加工,解码比较求得的目标值是否优

于原目标值,若优于原目标值,保留新的 $bestS1$,记为 $bestS2$ 传入下一个邻域结构;反之,则不更新 $bestS1$,将原 $bestS1$ 记为 $bestS2$ 传入下一个邻域结构。

7)接收步骤 6)传来的结果,进行 $NS3$ 操作,采取两点交换策略。随机选择两道工序并交换位置,然后解码比较求得的目标值是否优于原目标值,若优于原目标值,保留新的 $bestS2$,记为 $bestS3$ 传入下一个邻域结构;反之,则不更新 $bestS2$,将原 $bestS2$ 记为 $bestS3$ 传入下一个邻域结构。

8)接收步骤 7)传来的结果,进行 $NS4$ 操作,采取单点插入策略。随机选择两道工序将其中一道工序插入另一道工序之前,然后解码比较求得的目标值是否优于原目标值,若优于原目标值,保留新的 $bestS3$,记为 $bestS4$;反之,则原 $bestS3$ 记为 $bestS4$ 。

9)分别保留得到的新的优秀个体和目标值到种群 A, B, C 。

10) $i \leftarrow i + 1$,判断 i 是否小于或等于 k ,以及是否搜索完所有个体,若小于或等于 k 则转到步骤 4),反之,则转到步骤 11)。

11)合并种群 A, B, C ,并保存 f_1, f_2, f_3 ,输出所得结果。

2.5 算法流程

改进的 NSGA-II 算法流程如图 8 所示。具体步骤如下:

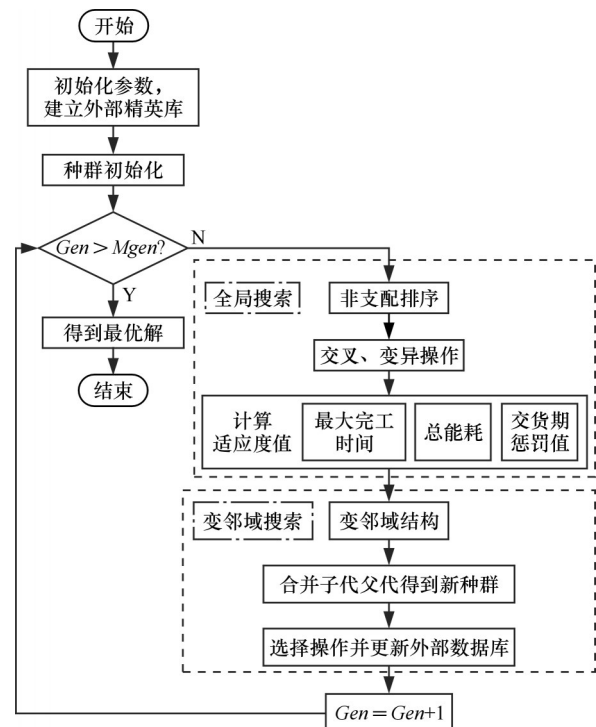


图 8 改进的 NSGA-II 算法

Fig.8 Improved NSGA-II algorithm

- 1)初始化参数,建立外部精英库;
- 2)使用三种初始化方法生成初始种群;
- 3)判断迭代次数是否达到最大迭代次数,若是则转到步骤9),否则转到步骤4);
- 4)进行全局搜索,对种群进行非支配排序,选出非支配等级高、拥挤度小的个体为新种群;
- 5)对新种群进行多点交叉和变异操作,计算目标适应度值;
- 6)进行变邻域搜索操作,得到质量更高的解;
- 7)合并子代父代得到新种群,选择操作更新外部数据库;
- 8)迭代次数加1,转到步骤3)进行判断;
- 9)得到最优解,输出结果。

3 仿真实验分析

本文使用 MATLAB R2021b 软件对所提算法进行仿真实验,运行环境为 12th Gen Intel(R) Core (TM) i5-12600KF 3.70 GHz 和 16.0 GB RAM。使用软件 Minitab 对算法进行多因子正交试验,确定算法的多个参数取值,然后对 MK 系列标准算例 MK01~MK10 的 10 个算例进行求解,采用多种评价指标 HV、IGD 和 SC,并与 IGA^[19]、NSGA-II^[20] 两种算法进行对比。结合实际案例,某航空设备加工公司实际生产的原始数据进行整理求解,以验证算法的有效性。最后分析了 AGV 数量对优化目标值的影响,为智能调度生产车间配备 AGV 数量提供参考。

本文使用的算例在 MK 系列算例的基础上增加了运输资源,其中运输资源的运输时间是使用 MATLAB 按照给定的规则随机生成的,且运输资源 AGV 数量为机器数量的一半或一半以下,以充分显示算法在解决针对运输资源不足这种问题的能力。随机生成的算例链接如下:https://pan.baidu.com/s/1Oc7yC_n1IrygjEIZV_RY1gpwd=cpge 提取码:cpge。

3.1 参数设置

使用软件 Minitab 2021 对交叉率 R_c 、变异率 R_m 、初始种群数目 N 以及变邻域搜索选择个体数目 k 四个参数,以反转世代距离(inverted generational distance, IGD)为评价指标,设计四因子、五水平的田口正交试验,通过该试验得到 4 个参数的正交表,对其进行分析处理后得到参数水平趋势图。由图 9 可知,交叉率、变异率、初始种群数目以及变邻域搜索选择个体数目 k 分别为 0.9、0.25、100 和 40。

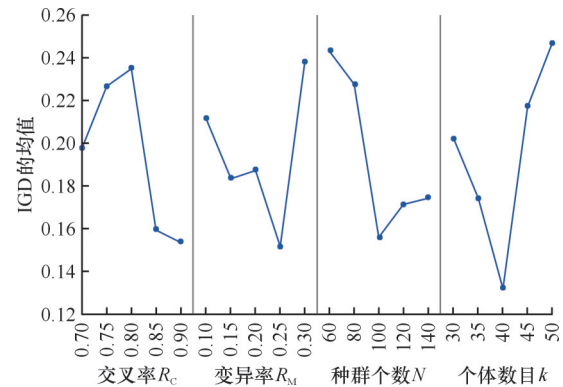


图9 参数水平趋势图

Fig.9 Parameter level trend chart

3.2 实验结果

将每个算例独立运行 10 次以避免算法的随机性,并将 INSGA-II 算法的运行结果与其他经典算法 IGA 和 NSGA-II 进行对比。通过 3 种常用的评价指标对所有算法进行评估:①反转世代距离 IGD。IGD 表示每个参考点到最近的解的距离的平均值,IGD 值越小,说明算法综合性能越好。②超体积指标(hypervolume, HV)。HV 表示算法获得的非支配解集与参照点围成的目标空间中区域的体积, HV 值越大,说明算法的综合性能越好。③解集覆盖率(set coverage, SC)。SC 表示两种算法非支配解集的覆盖率, SC 值越大,说明该算法对非支配解集的覆盖率较高,算法的综合性能越好。

将每个算例通过不同算法运行得出的最优值取出,见表 4。INSGA-II 算法得到的优化目标 f_1 和 f_1 均值全部优于 IGA 算法和 NSGA-II 算法,且通过 f_1 和 f_1 均值的对比可以证明 INSGA-II 算法的稳定性。同时优化目标 f_2 和 f_3 也大部分优于其他两种算法, INSGA-II 算法在显著缩短最长完工时间的前提下,能耗和交货期惩罚值也得到最优值或接近其他两种算法的最优值,由此证明 INSGA-II 算法寻找最优解的能力优于 IGA 算法和 NSGA-II 算法,以及求解机器与运输资源集成调度模型问题的有效性。

分别对比三种算法的 HV 值和 IGD 值,见表 5,表中的数值均为 10 次运算结果的平均值。显而易见, INSGA-II 算法解空间的 HV 值和 IGD 值全部优于 IGA 算法和 NSGA-II 算法, NSGA-II 算法解空间的 HV 值和 IGD 值又全部优于 IGA 算法,因此, INSGA-II 算法在求解机器与运输资源集成调度模型问题时,算法综合性能最优。

SC 值对比见表 6,其中, A、B、C 分别代表 IN-

表 4 算法优化目标对比

Tab.4 Comparison of algorithm optimization objectives

算例	INSGA-II				IGA				NSGA-II			
	f_1	f_2	f_3	f_1 均值	f_1	f_2	f_3	f_1 均值	f_1	f_2	f_3	f_1 均值
MK01	51	2.3471×10^5	164	53.4	55	2.5902×10^5	301	60.9	53	2.2215×10^5	258	57.3
MK02	41	1.8822×10^5	77	43.2	45	2.0447×10^5	46	47.3	44	1.9734×10^5	40	47
MK03	217	1.68×10^6	434	229.6	235	1.8015×10^6	480	252.6	218	2.132×10^6	488	237.7
MK04	89	6.0619×10^5	1275	92.8	97	6.168×10^5	1189	102.4	91	5.2505×10^5	1023	98
MK05	199	7.9841×10^5	940	202.5	205	9.4963×10^5	1554	211.9	200	8.7233×10^5	1263	206.7
MK06	143	7.4185×10^5	113	148.4	170	9.397×10^5	431	182.8	151	8.6657×10^5	137	165.7
MK07	197	1.1921×10^6	1281	202.1	220	1.0403×10^6	1013	227	209	1.1754×10^6	1084	214.5
MK08	529	5.4534×10^6	1574	535.9	544	4.92×10^6	2683	554.3	534	5.3394×10^6	2181	539.9
MK09	407	4.2215×10^6	3964	408.8	458	3.7298×10^6	3208	467	418	5.4472×10^6	3897	437
MK10	334	3.3109×10^6	2449	343	361	3.093×10^6	2146	377.9	355	5.6291×10^6	2202	367.3

表 5 HV 值和 IGD 值对比

Tab.5 HV and IGD comparison table.

算例	HV(望大)			IGD(望小)		
	INSGA-II	IGA	NSGA-II	INSGA-II	IGA	NSGA-II
MK01	0.034 92	0.000 946 85	0.010 643 743	0.097 84	0.138 57	0.129 38
MK02	0.1022	0.039 72	0.084 83	0.209 96	0.249 59	0.221 76
MK03	0.143 02	0.004 42	0.037 91	0.0886	0.169 53	0.122 01
MK04	0.125 03	0.020 989 356	0.052 15	0.222 15	0.280 81	0.2482
MK05	0.167 92	0.002 18	0.004 01	0.123 89	0.296 01	0.252 23
MK06	0.014 11	0.002 83	0.003 44	0.120 68	0.153 97	0.147 99
MK07	0.321 15	0.044 77	0.101 21	0.063 52	0.113 49	0.079 31
MK08	0.075 49	0.006 87	0.015 81	0.121 99	0.174 75	0.150 98
MK09	0.4067	0.143	0.204 99	0.0964	0.117 31	0.106 13
MK10	0.2959	0.014 43	0.141 47	0.029 32	0.177 79	0.091 69

SGA-II 算法、IGA 算法和 NSGA-II 算法, $SC(A, B)$ 表示 INSGA-II 算法非支配解集对 IGA 算法非支配解集的覆盖率, SC 值越大, 说明该算法对非支配解集覆盖率较大, 算法的综合性能越好。由此可见, INSGA-II 算法非支配解集对 IGA 算法非支配解集和 NSGA-II 算法非支配解集的覆盖率较大, 且 NSGA-II 算法非支配解集对 IGA 算法非支配解集的覆盖率也较大, 在解决此问题方面, INSGA-II 算法最优, NSGA-II 算法次之, IGA 算法最差。

图 10 为 INSGA-II 算法、IGA 算法和 NSGA-II 算法求解 MK 算例 MK05~MK08 的非支配前沿散点图, 图中的结果均为 10 次运算中随机的一次。明显可见, INSGA-II 算法求解 MK 算例 MK05~MK08 的非支配解数量多于 IGA 算法和 NSGA-II 算法, 且 INSGA-II 算法解空间分布更加集中, 说明 INSGA-II 算法的收敛性优于其他两种算法。

根据表 7 中 MK01 算例 AGV 运输时间表数据, INSGA-II 算法求解考虑有限运输资源 MK01

表 6 SC 值对比

Tab.6 SC Comparison

算例	$SC(A, B)$	$SC(B, A)$	$SC(A, C)$	$SC(C, A)$	$SC(B, C)$	$SC(C, B)$
MK01	0.946 43	0	0.705 36	0.080 86	0.150 59	0.655 96
MK02	0.664 73	0.040 99	0.684 79	0.186 16	0.226 33	0.482 08
MK03	0.834 06	0	0.762 18	0.032 33	0.001 27	0.603 87
MK04	0.651 09	0.0934	0.545 83	0.140 22	0.13	0.597 62
MK05	0.781 43	0	0.724 53	0.0225	0.016 67	0.713 34
MK06	0.971 43	0	0.8963	0.004 08	0.02	0.523 57
MK07	0.563 72	0.0029	0.773 76	0.074 94	0.016 54	0.138 61
MK08	0.462 12	0	0.337 06	0.018 29	0	0.766 67
MK09	0.495 61	0.026 92	0.671 15	0.120 13	0.048 04	0.386 36
MK10	0.558 83	0.000 68	0.567 04	0.097 33	0.0245	0.6322

算例的各目标收敛曲线图见图 11。其中, 红色曲线表示迭代过程中的最优个体的最优值, 蓝色曲线表示迭代过程中的种群最优平均值, 三个优化目标最长完工时间 Makespan、总能耗和交货期惩罚值均在前 50 代波动较大, 50 代后逐渐趋于稳定, 说明所提算法 INSGA-II 能够快速收敛得到最优值。图 12 为 INSGA-II 算法求解 MK01 问题时的甘特图, 其中, 横坐标表示加工时间, 纵坐标

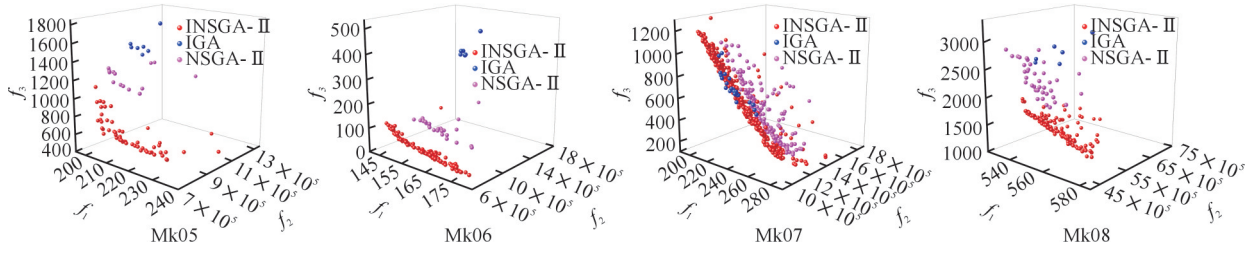


图10 Mk05~Mk08非支配前沿散点图

Fig.10 Distribution of the non-dominant solutions on Mk05~Mk08

M1~M6表示6台加工机器,AGV1~AGV3表示由3辆AGV进行工件在机器之间的运输工作,得到最小最长完工时间为51。

表7 Mk01算例AGV运输时间

Tab.7 AGV transportation time of Mk01 instance

参数	L/U区	M ₁	M ₂	M ₃	M ₄	M ₅	M ₆
L/U区	0	1	3	1	2	2	3
M ₁	1	0	1	3	1	2	1
M ₂	3	1	0	2	1	1	3
M ₃	1	3	2	0	1	3	2
M ₄	2	1	1	1	0	1	2
M ₅	2	2	1	3	1	0	1
M ₆	3	1	3	2	2	1	0

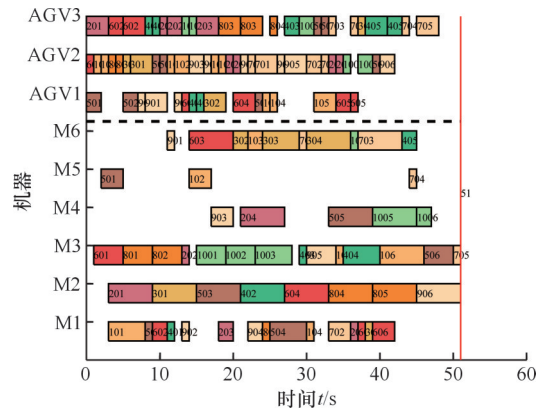


图12 Mk01甘特图

Fig.12 Mk01 Gantt chart

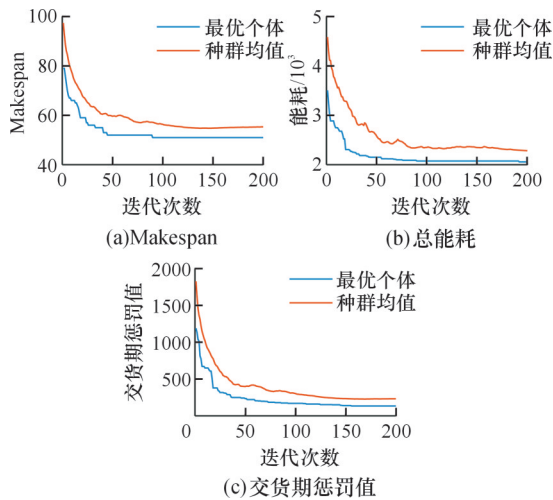


图11 Mk01目标收敛曲线

Fig.11 Convergence curve plots on Mk01

3.3 航空企业实际案例

为了验证所提算法和模型的有效性,将该算法和模型应用于实际航空企业。周亚勤等^[21]针对某航空设备加工公司实际生产的原始数据进行整理,得到表8所示的工件工序基础数据及表9所示的各工序可选的设备及运输资源AGV,共有8个工件、8台加工设备,其中,热处理、钳、检验和表面处理属于非机加工工序。由于本文在此基础上考虑了AGV运输,故在此数据的基础上加入考虑AGV运输的时间,见表10。

采用本文算法 INSGA-II 进行求解,得出最长完工时间为51、总能耗为234.011.455.45和交货期惩罚值为155,甘特图见图13。其中,航空结构件的加工有部分非机加工过程,非机加工过程不占用机器资源但需要运输资源AGV进行运

表8 工件工序信息

Tab.8 Jobs and operations information

工件	工序1		工序2		工序3		工序4		工序5		工序6	
	名称	时间	名称	时间	名称	时间	名称	时间	名称	时间	名称	时间
J ₁	数控立车	8	车端面	5	镗孔	1	车槽	6	钳	3	铣平面	4
J ₂	车端面	3	车外圆	10	镗孔	1	数控立车	8	车槽	3	铣平面	4
J ₃	车外圆	6	铣平面	4	镗孔	7	表面处理	9	数控立车	2	车端面	0.75
J ₄	热处理	3	车槽	1	铣平面	2	车外圆	3	车端面	0.75	—	—
J ₅	车外圆	2	铣平面	4	表面处理	3	镗孔	1.25	—	—	—	—
J ₆	车外圆	3	铣平面	5	车槽	4	数控立车	5	车端面	3	镗孔	3
J ₇	车外圆	1	检验	3	数控立车	6	铣平面	7	镗孔	3	车端面	6
J ₈	钳	7	数控立车	10	车端面	9	铣平面	3	镗孔	4	车槽	10

表 9 各工序可选的设备和运输资源 AGV

Tab.9 Available machines and AGVs of each operation

工序名称	设备组	对应机床设备	对应 AGV 编号
数控立车	数车组	M_1, M_2	1, 2, 3, 4
车端面	普车组	M_3, M_4, M_5	1, 2, 3, 4
镗孔	镗床组	M_6	1, 2, 3, 4
车退刀槽	普车组	M_3, M_4, M_5	1, 2, 3, 4
铣平面	数铣组	M_7, M_8	1, 2, 3, 4
车外圆	普车组	M_3, M_4, M_5	1, 2, 3, 4

表 10 AGV 运输时间

Tab.10 AGV transportation time

参数	L/U 区	M_1	M_2	M_3	M_4	M_5	M_6	M_7	M_8
L/U 区	0	2	3	2	4	4	2	3	2
M_1	2	0	4	3	2	5	3	6	4
M_2	3	4	0	3	4	5	6	4	3
M_3	2	3	3	0	4	2	6	4	5
M_4	4	2	4	4	0	3	2	2	5
M_5	4	5	5	2	3	0	2	4	6
M_6	2	3	6	6	2	2	0	6	4
M_7	3	6	4	4	2	4	6	0	2
M_8	2	4	3	5	5	6	4	2	0

输, 同时还需要满足加工顺序约束和时间约束。如 O_{53} 为非机加工表面处理操作, 因此, O_{52} 和 O_{54} 的时间间隔必须大于 3, 用于满足非机加工操作

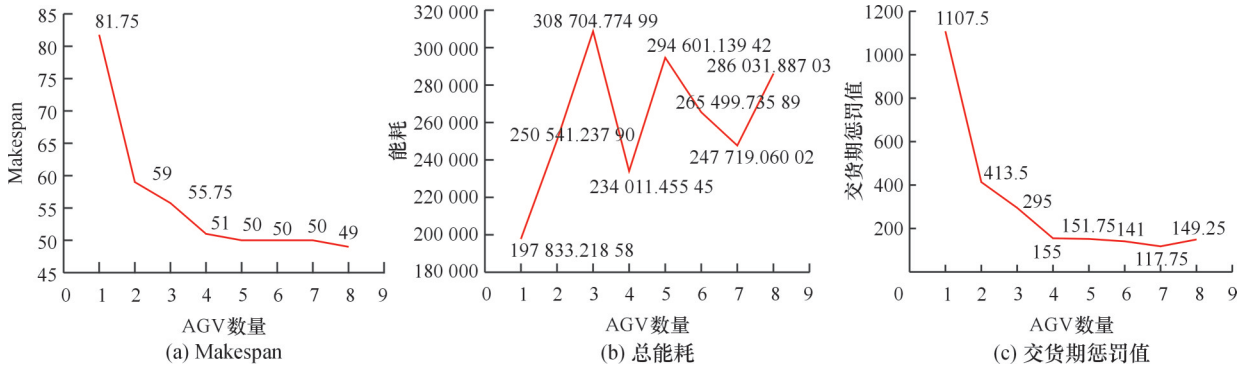


图 14 优化目标随 AGV 数量的变化

Fig.14 Plot of optimization objective with the number of AGVs

为了深入研究验证 AGV 数量对最长完工时间的影响, 并验证 AGV 的边际效用符合边际效用递减规律^[22-24], 在 MK 系列标准算例的基础上考虑不同 AGV 数量对最长完工时间的影响(前提是运输资源 AGV 数量不超过加工机器的数量), 每个算例分别取不同数量的 AGV, 分别进行计算 10 次并取最优值。结果如图 15 所示, 可以看出, 最长完工时间随着 AGV 数量的增加而减少, 且最长完工时间的递减速度随 AGV 数量的增加逐渐变缓, 遵循边际效应递减规律。在实际制造车间配置 AGV 时应综合考虑, 以实现运输资源的最大化利用。

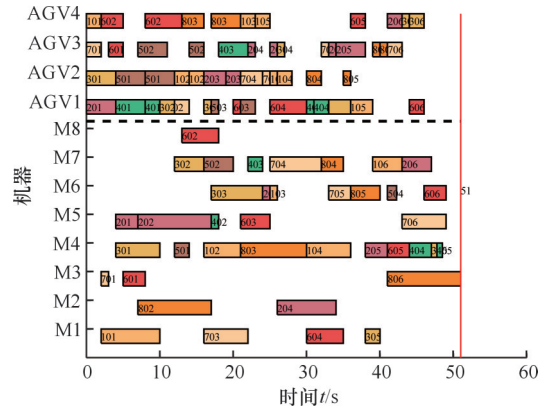


图 13 8×8 航空案例甘特图

Fig.13 Gantt chart for the 8×8 aerospace case

O_{53} 的加工时间, 且 O_{52} 加工完成后需要 AGV 运输到 O_{53} 非机加工位置, 待非机加工完成后再由 AGV 运输到 O_{54} 加工机器位置进行机加工。

3.4 AGV 数量对优化目标的影响

为了研究航空结构件智能制造车间中 AGV 数量对优化目标的影响, 并为航空结构件智能制造车间配置 AGV 数量提供参考, 本文考虑不同 AGV 数量对 3.3 节中问题优化目标的影响。如图 14 所示, 综合考虑 3 个优化目标值(最长完工时间 Makespan、总能耗和交货期惩罚值)可知, 当 AGV 数量为 4 时效果最好。

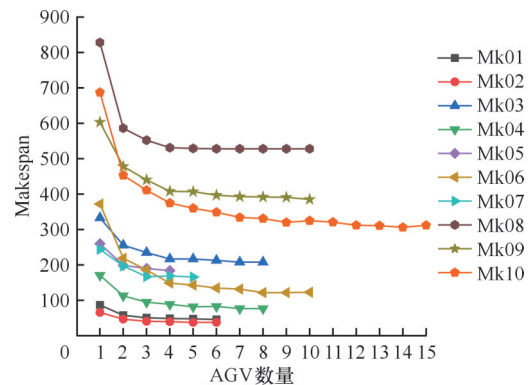


图 15 最长完工时间随 AGV 数量的变化

Fig.15 Makespan with different number of AGVs

4 结语

本文针对考虑有限AGV运输资源的柔性作业车间调度问题,以最长完工时间、总能耗和交货期惩罚值为优化目标,建立了运输资源受限的AGV和机器集成调度模型。提出了一种改进的NSGA-II算法进行求解,设计了3种初始化规则,并结合关键路径,提出了一种新的变邻域搜索以增强算法的局部搜索能力。采用多种评价指标与其他算法进行对比,验证了INSGA-II算法在求解AGV和机器集成调度问题的有效性。

在实际智能制造车间中,AGV和机器集成调度更为复杂,涉及多资源的调度以及机器或AGV故障、订单插入等随机动态事件的发生。未来将继续深入研究FJSP-LAT问题,并在此基础上考虑动态事件的干扰,以及在AGV调度过程中对AGV路径的规划,使之更加符合智能制造车间实际情况。

参考文献:

- [1] 张国辉,张得雨,闫少峰,等.考虑工人协作与学习效应的柔性作业车间调度[J].计算机集成制造系统,2024,30(12):4369-4385.
ZHANG Guohui, ZHANG Deyu, YAN Shaofeng, et al. Flexible Job Shop Scheduling with Worker Collaboration and Learning Effect[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2024, 30(12): 4369-4385.
- [2] 王玉芳,章殿清,华晓麟,等.面向航空结构件的双资源分布式柔性调度研究[J].系统仿真学报,2024,36(11):2722-2740.
WANG Yufang, ZHANG Dianqing, HUA Xiaolin, et al. Dual-resource Constrained Distributed Flexible Scheduling for Aerospace Structural Components [J]. Journal of System Simulation, 2024, 36(11): 2722-2740.
- [3] LI Yinghe, CHEN Xiaohui, AN Youjun, et al. Integrating Machine Layout, Transporter Allocation and Worker Assignment into Job-shop Scheduling Solved by an Improved Non-dominated Sorting Genetic Algorithm [J]. Computers & Industrial Engineering, 2023, 179: 109169.
- [4] LI Wenlong, LI Huan, WANG Yuting, et al. Optimizing Flexible Job Shop Scheduling with Automated Guided Vehicles Using a Multi-strategy-driven Genetic Algorithm [J]. Egyptian Informatics Journal, 2024, 25: 100437.
- [5] YAO Youjie, GUI Lin, LI Xinyu, et al. Tabu Search Based on Novel Neighborhood Structures for Solving Job Shop Scheduling Problem Integrating Finite Transportation Resources [J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2024, 89: 102782.
- [6] REN Weibo, YAN Yan, HU Yaoguang, et al. Joint Optimisation for Dynamic Flexible Job-shop Scheduling Problem with Transportation Time and Resource Constraints [J]. International Journal of Production Research, 2022, 60(18): 5675-5696.
- [7] LIU Jiaojiao, SUN Baofeng, LI Gendao, et al. Multi-objective Adaptive Large Neighbourhood Search Algorithm for Dynamic Flexible Job Shop Schedule Problem with Transportation Resource [J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2024, 132: 107917.
- [8] YAO Youjie, LIU Qihao, FU Ling, et al. A Novel Mathematical Model for the Flexible Job-shop Scheduling Problem with Limited Automated Guided Vehicles [J]. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2024, 22: 7449-7462.
- [9] 张国辉,闫少峰,陆熙熙,等.改进混合多目标蚁群算法求解带运输时间和调整时间的柔性作业车间调度问题[J].计算机应用研究,2023,40(12):3690-3695.
ZHANG Guohui, YAN Shaofeng, LU Xixi, et al. Improved Hybrid Multi-objective Ant Colony Optimization for Flexible Job-shop Scheduling Problem with Transportation Time and Setup Time [J]. Application Research of Computers, 2023, 40(12): 3690-3695.
- [10] JIANG Xingyu, TIAN Zhiqiang, LIU Weijun, et al. Energy-efficient Scheduling of Flexible Job Shops with Complex Processes: a Case Study for the Aerospace Industry Complex Components in China [J]. Journal of Industrial Information Integration, 2022, 27: 100293.
- [11] XU Gongjie, BAO Qiang, ZHANG Hongliang. Multi-objective Green Scheduling of Integrated Flexible Job Shop and Automated Guided Vehicles [J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2023, 126: 106864.
- [12] 张洪亮,徐公杰,鲍蔷,等.考虑运输时间的分布式柔性作业车间绿色调度[J].中国机械工程,2022,33(21):2554-2563.
ZHANG Hongliang, XU Gongjie, BAO Qiang, et al. Distributed Flexible Job Shop Green Scheduling with Transportation Time [J]. China Mechanical Engineering, 2022, 33(21): 2554-2563.
- [13] YUAN Minghai, ZHENG Liang, HUANG Hanyu,

- et al. Research on Flexible Job Shop Scheduling Problem with AGV Using Double DQN[J]. Journal of Intelligent Manufacturing, 2025, 36(1): 509-535.
- [14] ZHANG Min, WANG Liang, QIU Fusheng, et al. Dynamic Scheduling for Flexible Job Shop with Insufficient Transportation Resources via Graph Neural Network and Deep Reinforcement Learning [J]. Computers & Industrial Engineering, 2023, 186: 109718.
- [15] YAO Youjie, LI Xinyu, GAO Liang. A DQN-based Memetic Algorithm for Energy-efficient Job Shop Scheduling Problem with Integrated Limited AGVs[J]. Swarm and Evolutionary Computation, 2024, 87: 101544.
- [16] WANG Jingjing, HAN Honggui, WANG Ling. A Feedback Learning-based Memetic Algorithm for Energy-aware Distributed Flexible Job-shop Scheduling with Transportation Constraints [J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2024, PP(99): 1.
- [17] 祝正宇, 郭具涛, 吕佑龙, 等. 面向柔性作业车间生产调度的深度强化学习方法[J]. 中国机械工程, 2024, 35(11): 2007-2014.
ZHU Zhengyu, GUO Jutao, LYU Youlong, et al. Deep Reinforcement Learning Method for Flexible Job Shop Scheduling [J]. China Mechanical Engineering, 2024, 35(11): 2007-2014.
- [18] PAN Zixiao, WANG Ling, ZHENG Jie, et al. A Learning-based Multipopulation Evolutionary Optimization for Flexible Job Shop Scheduling Problem with Finite Transportation Resources [J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2023, 27(6): 1590-1603.
- [19] ZHANG Guohui, HU Yifan, SUN Jinghe, et al. An Improved Genetic Algorithm for the Flexible Job Shop Scheduling Problem with Multiple Time Constraints[J]. Swarm and Evolutionary Computation, 2020, 54: 100664.
- [20] DEB K, PRATAP A, AGARWAL S, et al. A Fast and Elitist Multiobjective Genetic Algorithm: NSGA-II[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2002, 6(2): 182-197.
- [21] 周亚勤, 杨长祺, 吕佑龙, 等. 双资源约束的航天结构件车间生产调度方法[J]. 机械工程学报, 2018, 54(9): 55-63.
ZHOU Yaqin, YANG Changqi, LYU Youlong, et al. Scheduling the Production of Aerospace Structural Parts with Dual Resource Constraints[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(9): 55-63.
- [22] 陈魁, 毕利, 王文雅. 柔性作业车间AGV与机器双资源集成调度研究[J]. 系统仿真学报, 2022, 34(3): 461-469.
CHEN Kui, BI Li, WANG Wenya. Research on Integrated Scheduling of AGV and Machine in Flexible Job Shop[J]. Journal of System Simulation, 2022, 34(3): 461-469.
- [23] 徐云琴, 叶春明, 曹磊. 含有AGV的柔性车间调度优化研究[J]. 计算机应用研究, 2018, 35(11): 3271-3275.
XU Yunqin, YE Chunming, CAO Lei. Research on Flexible Job-shop Scheduling Problem with AGV Constraints[J]. Application Research of Computers, 2018, 35(11): 3271-3275.
- [24] 马千慧, 梁晓磊, 刘星雨, 等. 多AGV和机器集成的多目标柔性作业车间调度研究[J]. 计算机工程与应用, 2023, 59(1): 278-290.
MA Qianhui, LIANG Xiaolei, LIU Xingyu, et al. Research on Multi-objective Flexible Job Shop Scheduling with Multiple AGVs and Machines Integration [J]. Computer Engineering and Applications, 2023, 59(1): 278-290.

(编辑 陈勇)

作者简介: 张国辉*, 男, 1980年生, 教授。研究方向为智能优化算法、车间调度等。E-mail: zgh09@zua.edu.cn。

本文引用格式:

张国辉, 蔡翌豪, 李志霄, 等. 考虑有限AGV运输资源的柔性作业车间调度研究[J]. 中国机械工程, 2025, 36(8): 1811-1823.

ZHANG Guohui, CAI Yihao, LI Zhixiao, et al. Research on Flexible Job Shop Scheduling Problem Considering Limited AGV Transportation Resources [J]. China Mechanical Engineering, 2025, 36(8): 1811-1823.