考虑有限运输资源和动态转运批量的多阶段混合流水车间调度研究

李一凡 张 峰* 何铭枫 院佳林 王 婧 秦红斌
武汉理工大学机电工程学院,武汉,430070

摘要:为求解有限运输资源约束下的多阶段混合流水车间调度问题,同时优化加工阶段间工件的转运批量大小,并考虑不同类型工件的换模要求,建立了以最大完工时间和总运输时间为优化目标的混合整数规划模型。设计了基于模拟退火的邻域搜索策略与非支配排序遗传算法Ⅱ(NSGAⅡ)相结合的混合算法对问题进行求解。根据工件前后工序的工时差异提出了动态转运批量策略,以改善阶段间的物料流转效率。设计了基于机器工作时长的轮盘赌初始化策略,以平衡机器负载。仿真结果表明,所提算法在多个评价指标上优于多目标粒子群优化(MOPSO)算法、基于分解的多目标进化算法(MOEA/D)和标准NSGAⅡ。运输资源数量分析表明,当自动导引车数量占机器总数的50%时,调度性能近似最优,为资源配置提供了决策依据。

关键词:有限运输资源;动态转运批量;集成调度;混合流水车间调度
中图分类号:TH166
DOI:10.3969/j.issn.1004-132X.2026.11.025 **开放科学(资源服务)标识码(OSID)**:

Research on Multi-stage Hybrid Flow Shop Scheduling Considering Limited Transportation Resources and Dynamic Transfer Batches

LI Yifan ZHANG Feng* HE Mingfeng YUAN Jialin WANG Jing QIN Hongbin
School of Mechanical and Electronic Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan, 430070

Abstract: To solve the multi-stage hybrid flow shop scheduling problem under limited transportation resources, a mixed-integer programming model was established with makespan and total transportation time as optimization objectives. The model jointly optimizes transfer batch sizes of workpieces among processing stages and considers the die-change requirements of different types of workpieces A hybrid algorithm combining a simulated annealing-based neighborhood search strategy with non-dominated sorting genetic algorithm Ⅱ (NSGAⅡ) was designed to solve the problem. A dynamic transfer batch strategy was proposed according to the working time differences between preceding and succeeding operations to improve the material flow efficiency between stages. A roulette wheel initialization strategy based on machine working hours was designed to balance machine loads. Simulation results demonstrate that the proposed algorithm outperforms multi-objective particle swarm optimization(MOPSO), multi-objective evolutionary algorithm based on decomposition(MOEA/D), and standard NSGAⅡ on multiple evaluation indicators. Analysis of transportation resource quantity reveals that scheduling performance approaches optimality when the number of automated guided vehicles accounts for 50% of the total number of machines, providing a decision basis for resource allocation.

Key words: limited transportation resource; dynamic transfer batch; integrated scheduling; hybrid flow shop scheduling

0 引言

薄膜晶体管液晶显示器(TFT-LCD)的生产流程主要包括阵列制造、有机薄膜制造与模组封装三大环节。模组封装工段主要涉及背光绑定、印刷电路板插接以及老化测试等工序。液晶显示器广泛应用于手机、电脑、汽车等消费电子领域,品牌繁多,型号各异,但各加工阶段工艺相似,因此在实际生产过程中模组封装工厂常采用混合流水车间的生产组织形式。此外,受洁净度要求限制,工件需借助特制的自动导引车(automated guided vehicle,AGV)在各加工阶段间转运,AGV的数量和载量有限。同时,不同种类工件的加工工时及模具不同,通常将同类型工件集中投产。基于上述生产特征,可将模组封装工厂的调度问题抽象为一类具有有限运输资源且转运批量可变

收稿日期:2025-09-10

的多阶段混合流水车间调度问题(hybrid flow shop scheduling problem with limited transport resources and variable transfer batches，HFSSP-LRVB)。在HFSSP-LRVB中，工件在每个加工阶段的机器分配、加工顺序、运输资源的数量以及运输资源每次转运的工件数量都会对调度结果产生很大影响，因此，本文在研究生产资源与运输资源集成调度优化问题的基础上，将进一步考虑运输资源的动态转运批量问题。

在生产资源与运输资源的集成调度优化方面，DONG等[1]研究了两机流水车间调度中的中间运输问题，优化了装箱和调度策略；白朝阳等[2]针对工件动态到达、加工时间存在波动的情况，提出了一种实时调度方法；LI等[3]通过建立任务池以简化调度复杂性；XING等[4]提出了一种群体优化器并结合多种调度策略来解决调度问题；温庭新等[5]针对有限缓冲区混合流水车间调度问题，优化了完工时间和能耗，但未考虑AGV的数量约束；AMIRTEIMOORI等[6]、轩华等[7]研究了有限运输资源，但均假设运输资源的运载量为1，忽略了批量转运；刘欢等[8]考虑了工人因素与运输资源约束，为同时优化物流效率与人员调度提供了新视角。现有研究在生产与运输资源集成调度方面涵盖了流水车间、分布式车间等多种复杂场景，但多数工作未考虑运输资源的有限性，以及运输批量的优化问题。

在结合批量流的生产资源与运输资源集成调度优化方面，学者们开始意识到批量转运的重要性。WANG等[9]在考虑运输资源容量的两阶段流水车间调度中，探讨了单处理机和批处理机之间的运输协调问题。TANG等[10]提出了一种多目标批量流混合流水车间调度与AGV集成调度方法，并对比了多种分批运输方式的优劣。张惠煜等[11]研究了AGV配置优化问题，针对AGV搬运工件数量随机、路径不固定的复杂场景，优化AGV购置成本。现有研究在批量流与生产资源和运输资源集成调度方面提出了多种分批运输策略，但在考虑工序工时差异、动态调整运输批量以提高整体调度效能方面尚缺乏研究。

综上所述，现有研究为本文奠定了坚实的基础，但在有限运输资源的约束下，大多数研究或是忽略了批量运输，或是只采用了固定的分批运输策略。而本文在有限运输资源约束下，根据前后工序工时差异动态调整转运批量，并设计了相应算法对该调度问题进行求解，从而实现了生产与运输的协同优化。

本文针对HFSSP-LRVB建立了以最大完工时间和总运输时间为优化目标的混合整数规划模型。首先，提出了动态转运批量策略，设计了基于模拟退火的自适应多邻域搜索(adaptive multi-neighborhood search based on simulated annealing，ASA)策略与非支配排序遗传算法Ⅱ(non-dominated sorted genetic algorithm Ⅱ，NSGAⅡ)相结合的混合算法(NSGAⅡ-ASA)；然后，设计了三段式编解码方案，提出基于轮盘赌的种群初始化策略以均衡机器负载，并设计基于非支配排序和拥挤度的二元锦标赛策略以保留优质解；最后通过仿真实验验证了所提算法的有效性和优越性，且分析了不同运输资源数量对评价指标的影响。

1 问题描述及数学建模

1.1 问题描述

本文研究的HFSSP-LRVB可描述为：车间有$|F|$种待加工工件，其中第f种工件的待加工数为N_f，每种工件需按顺序依次经过$|S|$个加工阶段。每个加工阶段s有$|M_s|$台不相关并行机，即同一工件在不同机器上加工所需的时间是不相关的。每个工件完成一个阶段的加工后由运输资源(即AGV)分批次运输至下一加工阶段。每个转运批次需由同种工件组成且不能超过AGV的运载量限制。车间内共有N_v个AGV，需合理分配到各个阶段之间执行运输任务。分配到每相邻两阶段(如s和$s+1$阶段)之间的AGV数量为$|V_s|$($\sum_{s=1}^{|S|-1}|V_s|\leqslant N_v$)，且只承担这两阶段间的运输任务，不可进行跨阶段运输。AGV的最大运载量为C^{ap}且不允许超载，它往返于各加工阶段中各机器之间的空载和负载运输时间已知。连续加工两种不同种类的工件时，机器所需的具有顺序相关性的换模时间$t_{sff'}^{sp}$已知。混合流水车间生产资源与运输资源集成调度场景如图1所示，各阶段间的工件由AGV批量转运，批次大小可调。AGV有空载取货行程和负载送货行程。

本研究需完成如下调度决策：①在每个阶段为每类工件分配加工机器；②决定每个机器上工件的加工顺序；③决定每类工件在每个阶段的运输批量大小；④决定每相邻阶段间AGV分配数量；⑤为每个待转运批次分配AGV；⑥决定每个AGV运输转运批次的顺序。

针对上述问题，提出如下假设：①每种工件在每个阶段只能选择一台机器进行加工；②各类工

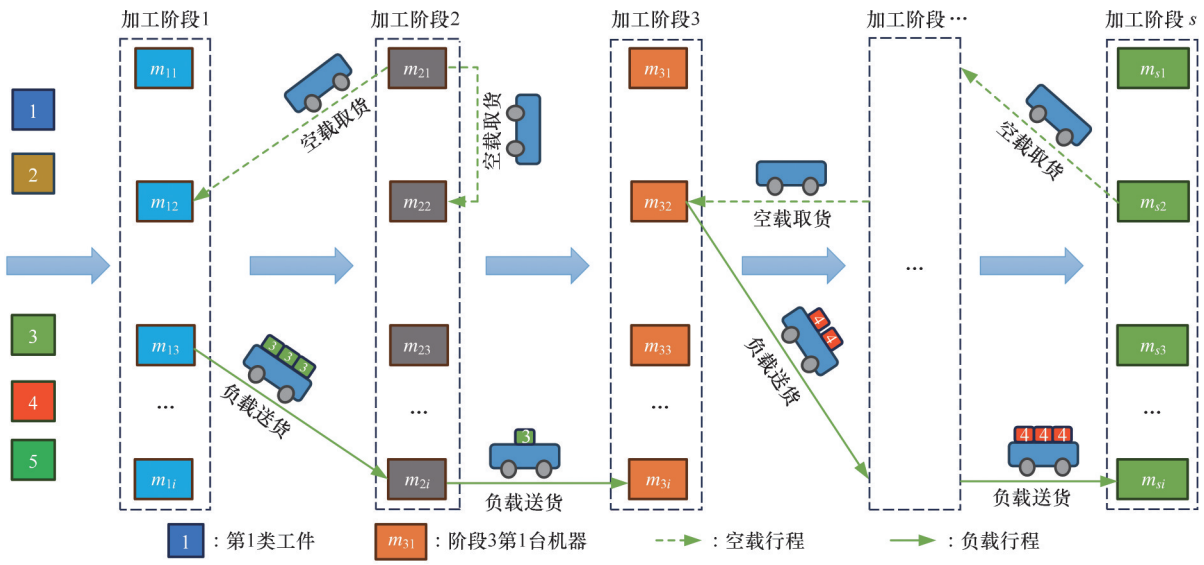

图1　混合流水车间生产资源与运输资源集成调度场景

Fig.1　Integrated scheduling scenario of production resources and transportation resources in a hybrid flow shop

件的工艺顺序相同；③同种工件在同一阶段不同机器上的加工用时不同；④机器在加工完当前工件类型的所有工件后，才可以加工其他类型工件；⑤机器在同一时刻只能加工一个工件，且加工任务一旦开始就不能中断；⑥在初始时刻，所有机器以及运输资源均可用，运输资源随机分布在各阶段机器点位旁边；⑦所有机器和运输资源无故障运行；⑧工件的装车和卸车时间包含在运输时间之内；⑨运输资源都是同质的，具有相同的速度和运载量限制；⑩运输资源一次只能运输一种工件，且运输数量不能超出运载量限制；⑪运输资源的运输行程一旦开始就不能中断；⑫运输资源在转运完当前工件类型的所有工件后，才可以转运其他类型工件；⑬运输资源完成运输任务后停在原地，直至接到下一运输任务。

1.2　问题建模

本文研究的HFSSP-LRVB所涉及的符号和定义见表1。

在TFT-LCD模组封装制造环境中，AGV系统不仅是实现物料流转的必备环节，其本身也是资本投入和运营成本的重要组成部分，因此，仅优化最大完工时间不足以全面评估调度方案的综合性能。故本文在优化最大完工时间的基础上，同时将所有AGV的总运输时间作为第二个优化目标，以此建立如下数学模型：

$$\min O_1=\max_{j\in J}\left(t^{\mathrm{E}}_{|S|j}\right) \tag{1}$$

$$\min O_2=\sum_s\sum_k\left(t^{\mathrm{El}}_{b_{sk}}-t^{\mathrm{Sl}}_{b_{sk}}+t^{\mathrm{En}}_{b_{sk}}-t^{\mathrm{Sn}}_{b_{sk}}\right) \tag{2}$$

约束条件如下：

$$\sum_i X_{fm_{si}}=1 \qquad \forall f,s \tag{3}$$

$$\sum_k Z^{\mathrm{P}}_{jb_{sk}}=1 \qquad \forall j,s \tag{4}$$

$$\sum_r Z^{\mathrm{M}}_{b_{sk}v_{sr}}=1 \qquad \forall s,k \tag{5}$$

$$\sum_{s=1}^{|S|-1}|V_s|\leqslant N_v \tag{6}$$

$$N_{b_{sk}}=\sum_j Z^{\mathrm{P}}_{jb_{sk}}\text{且}N_{b_{sk}}\leqslant C^{\mathrm{ap}} \qquad \forall s,k \tag{7}$$

$$\sum_j^{J(l^{\mathrm{h}}_j\neq l^{\mathrm{h}}_{b_{sk}})} Z^{\mathrm{P}}_{jb_{sk}}=0 \qquad \forall s,k \tag{8}$$

$$\left.\begin{aligned} t^{\mathrm{Sn}}_{sj}=t^{\mathrm{Sn}}_{sj'} \qquad t^{\mathrm{En}}_{sj}=t^{\mathrm{En}}_{sj'}\\ t^{\mathrm{Sl}}_{sj}=t^{\mathrm{Sl}}_{sj'} \qquad t^{\mathrm{El}}_{sj}=t^{\mathrm{El}}_{sj'}\end{aligned}\right\} \tag{9}$$
$$\forall j,j',s,k\text{且}Z^{\mathrm{P}}_{jb_{sk}}=Z^{\mathrm{P}}_{j'b_{sk}}=1$$

$$\left.\begin{aligned} t^{\mathrm{E}}_{sj}+t^{\mathrm{sp}}_{s,l^{\mathrm{h}}_j,l^{\mathrm{h}}_j}\leqslant t^{\mathrm{S}}_{sj'}+(1-Y_{jj'm_{si}})L \qquad \forall j,j',i\text{且}s=1\\ \max\left(t^{\mathrm{E}}_{sj},t^{\mathrm{El}}_{s-1,j'}\right)+t^{\mathrm{sp}}_{s,l^{\mathrm{h}}_j,l^{\mathrm{h}}_j}\leqslant t^{\mathrm{S}}_{sj'}+(1-Y_{jj'm_{si}})L\\ \forall j,j',i\text{且}s>1\end{aligned}\right\} \tag{10}$$

$$t^{\mathrm{El}}_{sj}+(2-X_{l^{\mathrm{h}}_j m_{si}}-X_{l^{\mathrm{h}}_{j'}m_{s+1,i'}})L\geqslant t^{\mathrm{Sl}}_{sj}+t^{\mathrm{l}}_{m_{si}m_{s+1,i'}} \tag{11}$$
$$\forall j,s,i,i'$$

$$t^{\mathrm{Sl}}_{sj}\geqslant\max\left(t^{\mathrm{E}}_{sj},t^{\mathrm{En}}_{sj}\right) \qquad \forall j,s \tag{12}$$

$$t^{\mathrm{E}}_{sj}+(1-X_{l^{\mathrm{h}}_j m_{si}})L\geqslant t^{\mathrm{S}}_{sj}+t_{l^{\mathrm{h}}_j m_{si}} \qquad \forall j,s,i \tag{13}$$

$$t^{\mathrm{Sn}}_{sj'}+(3-Y^{\mathrm{B}}_{b_{sk}b_{sk'}v_{sr}}-Z^{\mathrm{P}}_{jb_{sk}}-Z^{\mathrm{P}}_{j'b_{sk'}})L\geqslant t^{\mathrm{El}}_{sj} \tag{14}$$
$$\forall j,j',s,k,k',r$$

$$\left.\begin{aligned} t^{\mathrm{Sn}}_{sj'}+(2-Z^{\mathrm{P}}_{j'b_{sk'}}-Z^{\mathrm{M}}_{b_{sk'}v_{sr}}+\sum_k Y^{\mathrm{B}}_{b_{sk}b_{sk'}v_{sr}})L\geqslant 0\\ t^{\mathrm{Sn}}_{sj'}-(2-Z^{\mathrm{P}}_{j'b_{sk'}}-Z^{\mathrm{M}}_{b_{sk'}v_{sr}}+\sum_k Y^{\mathrm{B}}_{b_{sk}b_{sk'}v_{sr}})L\leqslant 0\end{aligned}\right\} \tag{15}$$
$$\forall j',s,k',r$$

$$t^{\mathrm{En}}_{sj'}+(3-Z^{\mathrm{P}}_{j'b_{sk'}}-Z^{\mathrm{M}}_{b_{sk'}v_{sr}}+\sum_k Y^{\mathrm{B}}_{b_{sk}b_{sk'}v_{sr}}-X_{l^{\mathrm{h}}_j m_{si}})L\geqslant$$
$$t^{\mathrm{Sn}}_{sj'}+t^{\mathrm{e}}_{c_{v_{sr}m_{si}}} \qquad \forall j',s,k',r,i \tag{16}$$

$$t^{\mathrm{En}}_{sj'}+(5-Y^{\mathrm{B}}_{b_{sk}b_{sk'}v_{sr}}-Z^{\mathrm{P}}_{jb_{sk}}-Z^{\mathrm{P}}_{j'b_{sk'}}-X_{l^{\mathrm{h}}_j m_{si}}-X_{l^{\mathrm{h}}_{j'}m_{si}})L\geqslant$$
$$t^{\mathrm{Sn}}_{sj'}+t^{\mathrm{e}}_{m_{i'i}m_{si}} \qquad \forall j,j',s,k,k',i,i',r \tag{17}$$

$$X_{fm_{si}},Y_{jj'm_{si}},Z^{\mathrm{P}}_{jb_{sk}},Z^{\mathrm{M}}_{b_{sk}v_{sr}},Y^{\mathrm{B}}_{b_{sk}b_{sk'}v_{sr}}\in\{0,1\} \tag{18}$$
$$\forall f,j,j',s,i,k,k',r$$

表1 HFSSP-LRVB中的符号及定义

Tab.1 Notations and definitions of HFSSP-LRVB

	符号	定义
集合	J	工件集，索引j
	S	阶段集，索引s
	F	待加工工件种类集，索引f
	M_s	s阶段的机器集，索引m_{si}
	V_s	分配到阶段s与$s+1$之间的运输资源集，索引v_{sr}
	B_s	阶段s与$s+1$之间的转运批次集，索引b_{sk}
机器相关	m_{si}	s阶段第i个机器
	$t^{\mathrm{e}}_{m_{si}m_{s'i'}}$	从机器m_{si}到机器$m_{s'i'}$的空载运输时间
	$t^{\mathrm{l}}_{m_{si}m_{s'i'}}$	从机器m_{si}到机器$m_{s'i'}$的负载运输时间
	d_s^{ig}	阶段s下机器数量的位数，若$\lvert M_s\rvert$为个位数，则$d_s^{\mathrm{ig}}=1$
工件相关	$t_{fm_{si}}$	f种类的工件在机器m_{si}上的加工时间
	$t^{\mathrm{sp}}_{sff'}$	s阶段机器从f类工件切换到f'类工件所需的换模时间
	l_j^{b}	工件j所属类别
	N_f	f类工件待加工数
运输相关	v_{sr}	分配到阶段s与$s+1$之间的第r个运输资源
	N_v	总可用运输资源数
	$C^{\mathrm{W}}_{v_{sr}}$	运输资源v_{sr}初始时刻下在车间所处的机器点位
	C^{ap}	运输资源的最大运载量
	δ_1,δ_2	运输资源的载量控制系数
批次相关	b_{sk}	阶段s与$s+1$之间的第k个转运批次
	$l^{\mathrm{b}}_{b_{sk}}$	批次b_{sk}所属工件类别
	$N_{b_{sk}}$	批次b_{sk}包含的工件数
决策变量	$X_{fm_{si}}$	f种类的工件在机器m_{si}上加工为1，否则为0
	$Y_{jj'm_{si}}$	机器m_{si}加工完工件j接着加工工件j'为1，否则为0
	$Z^{\mathrm{P}}_{jb_{sk}}$	工件j属于转运批次b_{sk}为1，否则为0
	$Z^{\mathrm{M}}_{b_{sk}v_{sr}}$	批次b_{sk}由运输资源v_{sr}运输为1，否则为0
	$Y^{\mathrm{B}}_{b_{sk}b_{sk'}v_{sr}}$	运输资源v_{sr}运输完批次b_{sk}接着运输批次$b_{sk'}$为1，否则为0
状态变量	$t_{sj}^{\mathrm{S}},t_{sj}^{\mathrm{E}}$	工件j在s阶段的开工时间和完工时间
	$t_{sj}^{\mathrm{Sn}},t_{sj}^{\mathrm{En}}$	在阶段s与$s+1$之间，运输资源转运工件j的空载运输开始时间和结束时间，$Z^{\mathrm{P}}_{jb_{sk}}=Z^{\mathrm{P}}_{j'b_{sk}}=1$时$t_{sj}^{\mathrm{Sn}}=t_{sj'}^{\mathrm{Sn}},t_{sj}^{\mathrm{En}}=t_{sj'}^{\mathrm{En}}$
	$t_{sj}^{\mathrm{Sl}},t_{sj}^{\mathrm{El}}$	在阶段s与$s+1$之间，运输资源转运工件j的负载运输开始时间和结束时间，$Z^{\mathrm{P}}_{jb_{sk}}=Z^{\mathrm{P}}_{j'b_{sk}}=1$时$t_{sj}^{\mathrm{Sl}}=t_{sj'}^{\mathrm{Sl}},t_{sj}^{\mathrm{El}}=t_{sj'}^{\mathrm{El}}$
	$t_{b_{sk}}^{\mathrm{Sn}},t_{b_{sk}}^{\mathrm{En}}$	运输资源转运批次b_{sk}的空载运输开始时间和结束时间，$Z^{\mathrm{P}}_{jb_{sk}}=1$时$t_{b_{sk}}^{\mathrm{Sn}}=t_{sj}^{\mathrm{Sn}},t_{b_{sk}}^{\mathrm{En}}=t_{sj}^{\mathrm{En}}$
	$t_{b_{sk}}^{\mathrm{Sl}},t_{b_{sk}}^{\mathrm{El}}$	运输资源转运批次b_{sk}的负载运输开始时间和结束时间，$Z^{\mathrm{P}}_{jb_{sk}}=1$时$t_{b_{sk}}^{\mathrm{Sl}}=t_{sj}^{\mathrm{Sl}},t_{b_{sk}}^{\mathrm{El}}=t_{sj}^{\mathrm{El}}$
其他	L	极大数，用作判定条件
	λ	工时差异系数
	d	拥挤度

$$t_{sj}^{\mathrm{S}},t_{sj}^{\mathrm{E}},t_{sj}^{\mathrm{Sn}},t_{sj}^{\mathrm{En}},t_{sj}^{\mathrm{Sl}},t_{sj}^{\mathrm{El}},\lvert V_s\rvert-1\geqslant 0\qquad\forall j,s\qquad(19)$$

式(1)、式(2)为目标函数，其中式(1)表示最小化最大完工时间，式(2)表示最小化总运输时间。约束条件包括：式(3)表示每个工件在各阶段分配唯一机器；式(4)表示每个工件在各阶段属于唯一转运批次；式(5)表示每个批次由唯一AGV运输；式(6)表示各阶段AGV总数限制；式(7)表示批次大小限制；式(8)表示批次内工件种类唯一；式(9)表示同一批次内，工件运输起止时间相同；式(10)表示换模时间约束；式(11)表示工件的负载运输结束时间大于或等于其开始时间与负载运输时间之和；式(12)表示工件的负载运输开始时间大于或等于工件完工时间与运输资源空载到达时间两者中的最大值；式(13)表示工件的完工时间大于或等于其开工时间与加工时间之和；式(14)表示运输资源运输下一转运批次须在上一批次的负载运输结束之后进行；式(15)表示运输资源首次运输转运批次时，其空载运输开始时间为零时刻；式(16)、式(17)表示运输资源运输任一转运批次时，其空载运输结束时间大于或等于其开始时间与空载运输时间之和；式(18)、式(19)表示变量非负性和整数性约束。

2 基于多批次变载量的动态转运策略设计

在相邻的两个加工阶段间，AGV完成一个转运批次的运输包含如下两个部分：①从自身所在地到转运批次所在地取货的空载运输；②从转运批次所在地到下一加工阶段的负载运输。

除第一个加工阶段外，各阶段加工与运输顺序由各类工件在前一阶段的首工件完工时间升序决定。AGV按最早送达原则分配。AGV空载到达转运批次所在地，然后等待批次内所有工件加工完毕后开始负载运输。运至下一加工阶段对应机器后原地待命，直至接到下一运输任务。

在一般情况下，工厂为减少运输次数，会将AGV的最大运载量作为每次转运的批量大小，但考虑到工件前后工序工时之间的差异，这种做法并非十分合理。当某工件在前一阶段的工时较长，而在后一阶段的工时较短，此时若等待前一阶段的完工工件数达到最大运载量则需等待较长时间，可能造成后一阶段的机器处于饥饿状态；当前一阶段的工时较短，而后一阶段的工时较长时，则应尽可能提高单次运输的批量大小，以减少运输次数。为此，本文基于工时差异提出了动态转运批量(dynamic transfer batch，DTB)策略以动态调整转运批次的批量大小$N_{b_{sk}}$。

对于f类工件，在s阶段机器m_{si}上的工时为$t_{fm_{si}}$，在$s+1$阶段机器$m_{s+1,i'}$上的工时为$t_{fm_{s+1,i'}}$，则工时差异系数λ可表示为

$$\lambda=\frac{t_{fm_{sl}}}{t_{fm_{s+1,l'}}} \tag{20}$$

其中，λ越大，越应减小转运批次的批量大小；λ越小，越应增大转运批次的批量大小。故基于工时差异系数λ、载量控制系数δ_1和δ_2，设计如下三种转运模式，从而实现动态调节转运批量大小。

1）当$\lambda\leqslant\delta_1$，该类工件在s阶段与$s+1$阶段间的转运批量大小为

$$N_{b_{sk}}=\begin{cases}mod(N_f,C^{ap}) & \text{剩余工件不足}C^{ap}\\ C^{ap} & \text{其他}\end{cases} \tag{21}$$

其中，$mod(N_f,C^{ap})$表示N_f对C^{ap}取余。

2）当$\delta_1<\lambda\leqslant\delta_2$，该类工件在$s$阶段与$s+1$阶段间的转运批量大小为

$$N_{b_{sk}}=\begin{cases}mod(N_f,round(0.75C^{ap})) & \\ & \text{剩余工件不足}round(0.75C^{ap})\\ round(0.75C^{ap}) & \text{其他}\end{cases} \tag{22}$$

其中，$round(0.75C^{ap})$表示对$0.75C^{ap}$取整。

3）当$\lambda>\delta_2$，该类工件在s阶段与$s+1$阶段间转运批量大小为

$$N_{b_{sk}}=\begin{cases}mod(N_f,round(0.25C^{ap})) & \\ & \text{剩余工件不足}round(0.25C^{ap})\\ round(0.25C^{ap}) & \text{其他}\end{cases} \tag{23}$$

上述提到的载量控制系数δ_1、δ_2后续可通过正交试验来确定。

3　求解方法

针对HFSSP-LRVB的多目标、多约束特性，本文设计了一种基于模拟退火的自适应多邻域搜索（ASA）策略与NSGA-Ⅱ相结合的混合算法（NSGAⅡ-ASA）。

3.1　编码与解码

本文所提三段式编码分别由加工顺序（JS）、机器分配（MS）以及运输资源分配（VS）组成，以4类工件、4个AGV、3个阶段、每阶段3台机器为例的编解码示例如图2所示。

对于JS部分，染色体长度为$|F|$，数字代表工件种类，出现次序即第一阶段加工顺序。

对于MS部分，染色体长度为$|F|\times|S|$，每个编码值代表JS部分对应工件种类在各阶段的机器分配，每个编码值内代表各阶段机器分配的编码由“-”隔开，通过线性转换公式映射到实际机器编号。设某类工件对应的MS编码值为[φ_1-φ_2…-φ_s…-$\varphi_{|S|}$]，若s阶段机器数介于[1，10]，则φ_s在[0，9]内取整数值；若s阶段机器数介于[11，100]，则φ_s在[0，99]内取整数值，以此类推。然后，将φ_s通过线性转换映射到区间[1，$|M_s|$]，得到实际机器编号。以图2中MS的编码值“9-4-0”为例，共3个加工阶段，每个阶段3台机器，故分别将9、4、0映射到[1，3]，得到3、2、1，表明第1类工件在3个阶段选择的机器分别是m_{13}、m_{22}、m_{31}。线性转换公式如下：

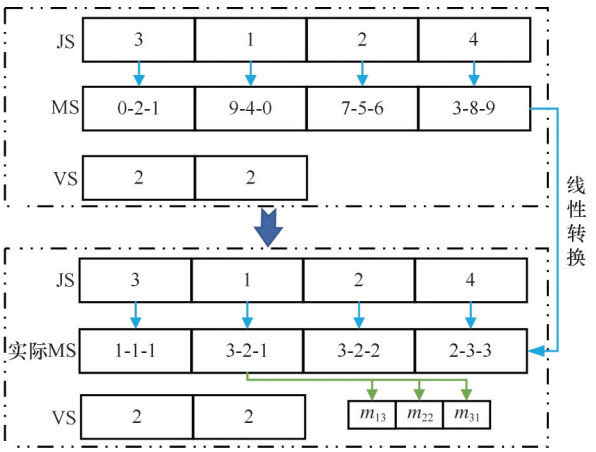

图2　编解码示例

Fig.2　Encoding and decoding examples

$$actual_\varphi_s=round(1+(\frac{\varphi_s}{B_s})\times(|M_s|-1)) \tag{24}$$

式中：$actual_\varphi_s$表示φ_s经线性转换并取整后的值；B_s为φ_s的取值上限。

对于VS部分，染色体长度为$|S|-1$，数字代表各阶段间的AGV数量。以图2中VS编码“22”为例，第1、2阶段间分配2个AGV，第2、3阶段间也分配2个AGV。

所研究的HFSSP-LRVB中有10类工件，每类工件待加工数分别为{6，4，5，5，3，6，3，4，4，3}，包含3个阶段，每阶段3台机器，共4个AGV，最大运载量为3，调度甘特图示例如图3所示。其中，横坐标代表时间，纵坐标代表各阶段机器及运输资源（即AGV），每种色块代表一类工件，黑色色块代表换模时间，各色实线代表运输资源相应的负载运输行程，各色虚线代表运输资源相应的空载运输行程。

3.2　种群初始化策略

本文针对编码不同部分设计了不同的初始化策略：

1）对于JS部分，采用随机生成工件种类的全排列。

2）对于MS部分，为使得各机器的工作负载更加均衡，提出了基于机器工作时长的轮盘赌策略（roulette strategy based on machine working hours，RMH），按照JS编码部分给出的顺序依次

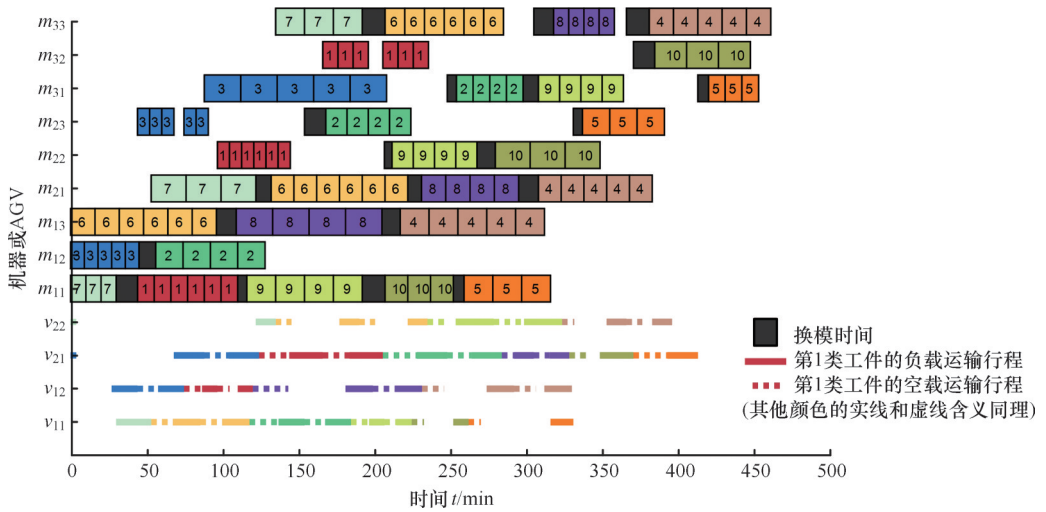

图3 HFSSP-LRVB甘特图示例

Fig.3 HFSSP-LRVB Gantt chart example

为各类工件分配机器。初始时刻下所有机器的工作时长为零，被选择的概率相等。然后，每为一种工件分配完机器便更新机器的工作时长，工作时长越久的机器在下次分配中被选择的概率越小。

3)对于VS部分，初始化采用随机生成的方式，以保证种群多样性。

3.3 遗传操作

3.3.1 选择算子

设计二元锦标赛选择策略，每次从种群中随机选择两个体，比较其非支配等级选出等级更低(更接近Pareto前沿)的个体，如果等级相同则选出拥挤度较大(保证多样性)的个体，如果拥挤度仍相同则随机选择一个个体，该个体将进入交配池并有机会将自己的染色体片段遗传到下一代。

3.3.2 交叉算子

针对JS部分，采用POX交叉算子进行交叉，染色体交叉后仍然是可行解；针对MS部分，采用均匀交叉；针对VS部分，混合使用差分进化交叉和两点交叉(各50%的概率)。

1)差分进化交叉。将从交配池中选出的三个个体的VS部分记为PA_1、PA_2、PA_3，将三者交叉产生的子代记为CH_1、CH_2。

$$\left.\begin{aligned} CH_1 &= PA_1 + PA_2 - PA_3 \\ CH_2 &= PA_2 + PA_1 - PA_3 \end{aligned}\right\} \tag{26}$$

2)两点交叉。随机选择两个基因点位，互换父代个体在这两个点位的基因然后产生子代。

针对VS交叉可能产生的不可行解(AGV总数超出限制)，设计了一个修复算子，通过边界约束和总量调整使其恢复可行。

3.3.3 变异算子

对JS和MS部分均采用互换变异算子进行变异，即随机选择染色体上的两个基因点位然后互换编码。

对于VS部分，提出了4种变异算子(各25%的概率)，具体如下。

1)变异算子1。随机互换两个点位的编码。

2)变异算子2。在已使用的运输资源数少于总运输资源数的情况下，随机选择一个点位将其运输资源数加1，如图4所示。

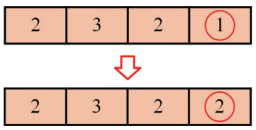

图4 变异方式二示意图

Fig.4 Schematic diagram of mutation method 2

3)变异算子3。随机选择一个运输资源数大于1的点位，将其运输资源数减1，如图5所示。

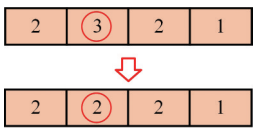

图5 变异方式三示意图

Fig.5 Schematic diagram of mutation method 3

4)变异算子4。随机选择一个运输资源数大于1的点位，将其运输资源数减1，同时随机给另外一个点位的运输资源数加1，如图6所示。

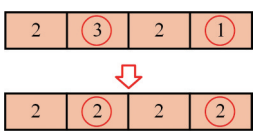

图6 变异方式四示意图

Fig.6 Schematic diagram of mutation method 4

3.4 基于模拟退火的自适应多邻域搜索策略

NSGAⅡ算法适合进行全局探索，但随着问题规模的逐渐增大，该算法易过早地陷入局部最优。考虑到模拟退火(SA)算法能通过Metropolis

准则跳出局部最优，并具有出色的局部开发能力，故本文将多种邻域结构与SA算法相结合从而提出ASA策略，将其嵌入到NSGAⅡ算法框架以进一步优化每一代的Pareto解。

3.4.1　邻域结构

1)邻域结构一。采用加法扰动邻域结构对个体的MS中各编码值添加整数扰动，扰动幅度随进化代数的增加而自适应减小。记$MS=\{\rho_1,\rho_2,\ldots,\rho_f,\ldots,\rho_{|F|}\}$，给每个$\rho_f$加上一个随机整数$\Delta_f$，其表达式如下：

$$\left.\begin{aligned}&\rho_f\leftarrow\rho_f+\Delta_f\\&\Delta_f\sim U(-w,w)\end{aligned}\right\}\tag{27}$$

$$w=round((1-g/g_T)(10^{\sum d_i^R}\alpha-10)+10)$$

其中，g为当前代数，g_T为总进化代数，w为随机整数Δ_f的取值上界，α为可调节w大小的缩放参数。然后重新用“-”将编码值内代表不同阶段机器分配的编码分隔开，进而得到一个新个体，执行过程示例如图7所示。若执行加法扰动邻域后，编码值超出其取值范围，则缩小w值并通过式(27)重新生成新个体。

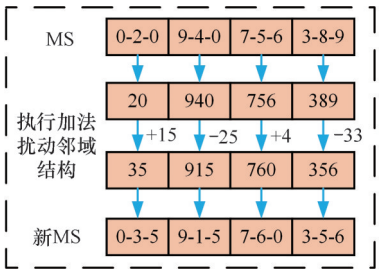

图7　加法扰动邻域结构执行示例

Fig.7　Example of executing the additive perturbation neighborhood structure

2)邻域结构二。采用两点互换邻域结构，随机选择个体的JS、VS部分的两个点位互换编码。

3)邻域结构三。随机选择JS部分的两个点位，将后者插入到前者的位置。

4)邻域结构四。随机选择JS部分的两个点位，将前者插入到后者的位置。

3.4.2　ASA算法流程

ASA策略的具体流程如下：

1)合并父代与经过基因操作后得到的子代并进行快速非支配排序，取出处于Pareto前沿的G个个体，构成邻域搜索种群$P_R=\{p_1,p_2,\ldots p_G\}$。

2)初始化个体索引$e=1$，设置初始温度$T=T_0$、每个温度值T的迭代次数S^L、冷却系数K、外部种群当前代数g以及总代数g_T。

3)个体p_e通过3.4.1节的邻域结构生成一个邻域个体n，记p_e目标函数值为p^z，n的目标函数值为n^z。若个体n支配个体p_e，则用n代替p_e；否则以概率$(1-g/g_T)\exp(-\frac{10g\sum(n^z-p^z)}{T})$接受$n$。重复上述过程$S^L$次后执行步骤4)。

4)令$T\leftarrow K\times T$。若$T>0.1$，则返回步骤3)；若$T\leqslant0.1$且$e\neq G$，则令$e\leftarrow e+1$，$T=T_0$，并返回步骤3)；若$T\leqslant0.1$且$e=G$，则输出更新后的种群P_R。

3.5　NSGAⅡ-ASA算法流程

NSGAⅡ-ASA算法流程图见图8。

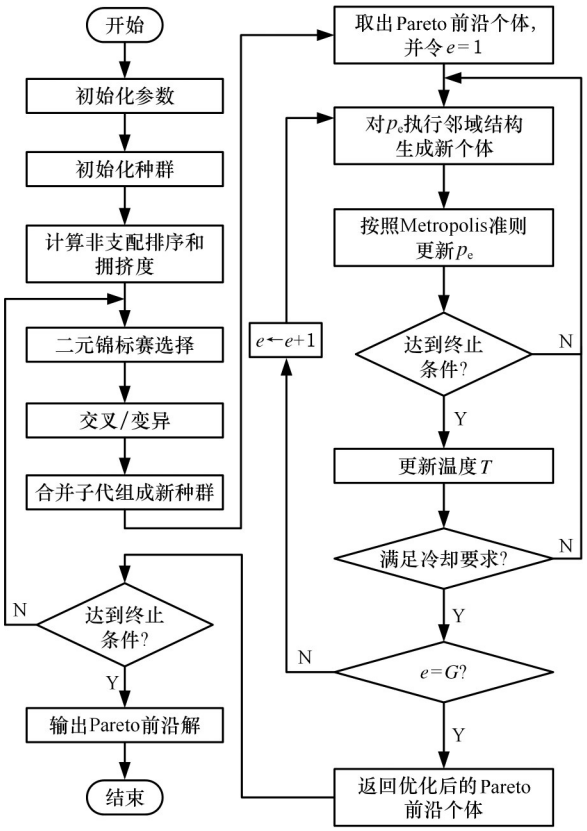

图8　NSGAⅡ-ASA算法流程图

Fig.8　NSGAⅡ-ASA algorithm flow chart

4　仿真实验

本文采用MATLABR2020a对所提算法进行编程，运行环境为Intel(R) Core(TM) i5-9300H CPU @ 2.40 GHz RAM为8 GB。

4.1　算例设计

针对HFSSP-LRVB实际并参考文献[2]算例设计，算例参数的设置如表2所示，包含阶段数、工件种类数、每阶段机器数以及运输资源运载量限制，并从每个参数的分布范围中分别取3个水平值。

设定机器加工时间[8,25]，换模时间[5,15]。各工件待加工数[4,10]。为展现算法处理运输资源不足问题的能力，将车间总运输资源数设为总

表2 参数设置

Tab.2 Parameter settings

符号	参数名称	参数取值范围	参数水平
S	阶段数	Uniform(3,7)	3,5,7
F	工件种类数	Uniform(10,20)	10,15,20
M_s	每阶段机器数	Uniform(3,7)	3,5,7
C^{ap}	运输资源运载量	Uniform(3,5)	3,4,5

机器数的60%及以下。同阶段内不同机器之间的空载运输时间为[5,15],不同阶段机器间的负载运输时间为$[10(s-s'),20+10(s-s')]$(本文不涉及同阶段内的负载运输时间),不同阶段机器间的空载运输时间为对应负载运输时间的0.8倍。

由于涉及多个参数且每个参数具有多个水平,因此本文采用正交试验法来提高实验效率。基于IBM SPSS Statistics 25软件平台生成9个不同参数组合的正交算例。算例的命名方式如下:S表示阶段数、M表示每阶段的机器数、F表示工件种类数、C表示运输资源的运载量限制。以S7M4F20C3为例,它表示HFSSP-LRVB中包含7个阶段,每阶段有4台机器,20种工件,运输资源的运载量为3。

4.2 参数设置

采用正交试验优化缩放参数α、载量控制系数δ_1和δ_2、交叉概率P_{CR}(变异率设为1—P_{CR})4个主要参数的取值,如表3所示。以超体积(hypervolume,HV)作为评价指标,综合反映Pareto解集的收敛性和多样性。

表3 参数水平值设置

Tab.3 Parameter level value settings

参数水平	参数			
	α/%	δ_1	δ_2	P_{CR}
1	0.2	1.25	2.00	0.3
2	1.0	1.50	2.25	0.6
3	2.0	1.75	2.50	0.9

根据正交表$L_9(3^4)$,基于算例S5M4F15C4进行正交试验。每种参数组合重复运行5次并取其均值作为最终结果,得到的结果如表4所示。

基于表4所示的正交试验结果分别计算各参数水平($\Gamma1$、$\Gamma2$、$\Gamma3$)对应的平均值如表5所示,各参数分别取使HV平均值最大的水平,得到最优参数组合α=0.2%,δ_1=1.75,δ_2=2.5,P_{CR}=0.6。极差越大表明该参数对HV平均值的影响力越大,故各参数影响力的排名从大到小依次为:δ_2,δ_1,P_{CR},α。

4.3 改进策略有效性验证

由前述可知,本文所提出的NSGAⅡ-ASA算法设计了如下3种改进策略:基于机器工作时长的轮盘赌策略(RMH)、动态转运批量策略(DTB)、基于模拟退火的自适应多邻域搜索策略(ASA)。为验证上述3种策略的有效性,本文通过消融实验[12]提出3种变体算法:①变体算法1(NSA1),即去掉RMH初始化策略;②变体算法2(NSA2),即去除DTB策略,每个运输资源的转运批次大小均设为该运输资源的最大载量;③变体算法3(NSA3),即去除ASA策略,其他不变。采用3种变体算法以及本文所提算法分别对算例S5M4F15C4进行求解,沿用4.2节中正交试验给出的参数组合,计算结果如表6所示。其中最大完工时间与总运输时间均取中位数,即Pareto解集中欧几里得范数最小的解。

表4 正交试验结果

Tab.4 Orthogonal experiment results

序号	α/%	δ_1	δ_2	P_{CR}	超体积
1	0.2	1.50	2.50	0.3	1 369 418
2	0.2	1.75	2.00	0.6	1 485 361
3	1.0	1.25	2.50	0.6	1 451 902
4	1.0	1.75	2.25	0.3	1 244 918
5	1.0	1.50	2.00	0.9	1 254 061
6	2.0	1.75	2.50	0.9	1 534 429
7	2.0	1.25	2.00	0.3	1 241 783
8	0.2	1.25	2.25	0.9	1 349 594
9	2.0	1.50	2.25	0.6	1 272 365

表5 极差分析结果

Tab.5 Range analysis results

水平均值	α	δ_1	δ_2	P_{CR}
$\Gamma1$	**1 401 458**	1 347 760	1 327 068	1 285 373
$\Gamma2$	1 316 960	1 298 615	1 288 959	**1 403 209**
$\Gamma3$	1 349 526	**1 421 569**	**1 451 916**	1 379 361
极差	84 498	122 954	**162 957**	117 836

表6 消融实验结果

Tab.6 Ablation experiment results

评价指标	NSA1	NSA2	NSA3	NSGAⅡ-ASA
超体积	5 863 637	5 903 683	5 383 117	**5 920 386**
总运输时间/min	3337	**3164**	3498	3282
最大完工时间/min	**1325**	1385	1436	**1326**

表6中研究结果表明,NSGAⅡ-ASA的超体积(HV)值最大,Pareto解集的综合质量最优。与NSGAⅡ-ASA相比,NSA3的HV值显著减小,这直接证明了ASA策略是提高算法性能的关键。在总运输时间维度上NSA2表现最优,因为NSA2中运输资源每次转运均按照最大载量进行,所以运输次数少,总运输时间短,但相应的最大完工时间会增加。在最大完工时间维度上NS-

GAⅡ-ASA与NSA2相比具有显著优势，有效验证了DTB策略通过调整转运批量可缩短最大完工时间。NSA1与NSGAⅡ-ASA的最大完工时间差别不大，这是因为即使不采用RMH初始化方法，随着算法的不断进化迭代，初始种群的质量对最大完工时间的影响也会逐渐减弱。但NSA1与NSGAⅡ-ASA在HV值上的差距表明，RMH为种群提供了更好的起点，有助于算法更快地收敛到高质量区域。

为直观地展示DTB的效果，本研究针对算例S5M4F15C4分别采用NSGAⅡ-ASA与NSA2对同一染色体进行解码，所得甘特图见图9和图10。经对比可知，图10(NSA2，无DTB)中明显存在工件待运不及时和后续机器待料的情况。而图9(NSGAⅡ-ASA，有DTB)中，通过DTB加快了工件的流转速度，实现了更短的生产周期。

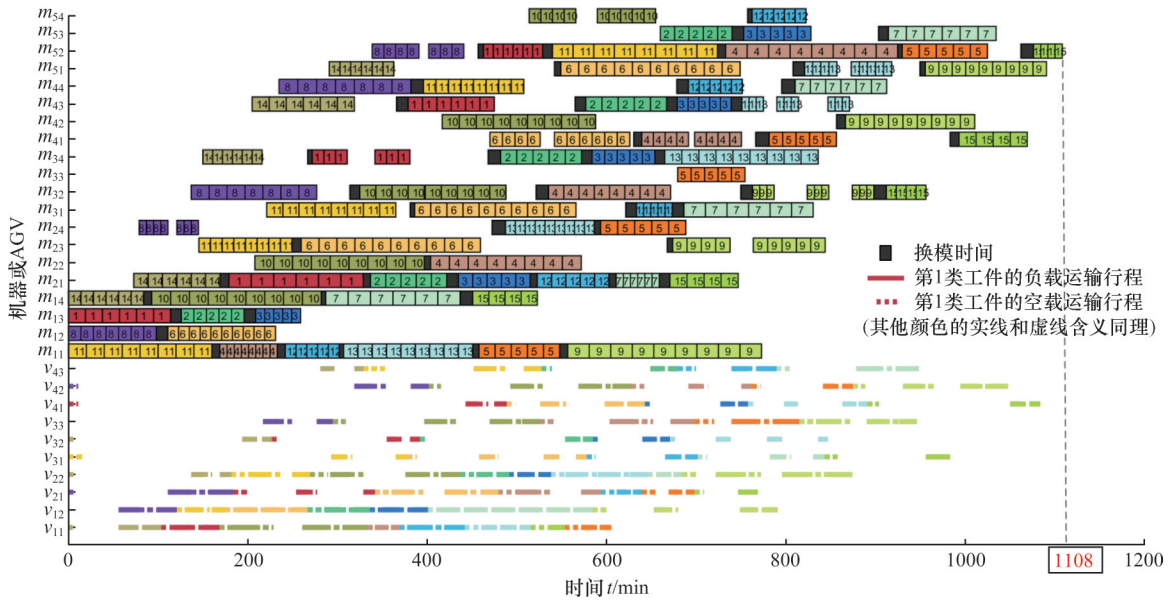

图9　NSGAⅡ-ASA与解码调度方案

Fig.9　NSGAⅡ-ASA decoding scheduling scheme

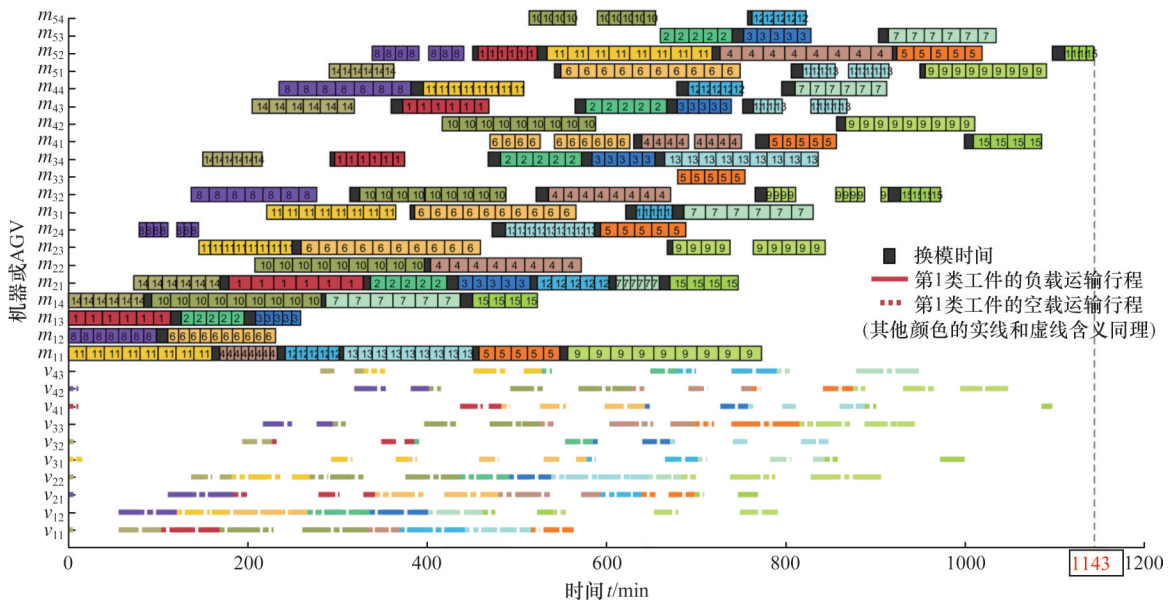

图10　NSA2解码调度方案

Fig.10　NSA2 decoding scheduling scheme

4.4　算法性能对比分析

为验证NSGAⅡ-ASA的优越性，采用多目标粒子群优化算法[13](MOPSO)、基于分解的多目标进化算法[14](MOEA/D)、NSGAⅡ[15]等多目标优化算法分别对4.1节中生成的9个算例进行运算，每个算例运行5次，基于所得结果开展对比分析研究。评价指标为超体积(HV)和间隔距离(spacing，SP)。SP可衡量Pareto解集中相邻解的分布均匀程度，SP值越小表明分布越均匀。

综合考虑计算时间与收敛性能，将NSGAⅡ-

ASA的种群数设为50，进化代数设为90；NSGAⅡ的种群数为50，进化代数为90，交叉率设为0.5，变异率为0.5；MOEA/D的种群大小设为60，进化代数为100，交叉率为0.5，变异率为0.5，子问题邻域大小设为15；MOPSO的种群大小设为60，进化代数为100。采用上述4种算法对各个算例进行运算求解，所得各评价指标的平均值分别如表7和表8所示。

表7 4种算法的HV值对比

Tab.7 Comparison of HV values of four algorithms

算例	NSGAⅡ-ASA	NSGAⅡ	MOEA/D	MOPSO
S7M4F20C3	**12.15×10⁶**	10.70×10⁶	5.82×10⁶	5.58×10⁶
S7M5F10C4	**2.79×10⁶**	2.29×10⁶	1.47×10⁶	1.50×10⁶
S3M3F10C3	**1.56×10⁶**	1.50×10⁶	1.23×10⁶	1.16×10⁶
S5M3F20C4	**7.02×10⁶**	5.92×10⁶	4.51×10⁶	4.20×10⁶
S7M3F15C5	**6.63×10⁶**	5.61×10⁶	4.30×10⁶	3.81×10⁶
S5M5F15C3	**5.95×10⁶**	4.89×10⁶	3.27×10⁶	2.75×10⁶
S5M4F10C5	**5.40×10⁶**	4.95×10⁶	3.80×10⁶	4.18×10⁶
S3M5F20C5	**7.02×10⁶**	6.62×10⁶	5.44×10⁶	5.23×10⁶
S3M4F15C4	**3.86×10⁶**	3.48×10⁶	2.23×10⁶	2.85×10⁶

表8 4种算法的SP值对比

Tab.8 Comparison of SP values of four algorithms

算例	NSGAⅡ-ASA	NSGAⅡ	MOEA/D	MOPSO
S7M4F20C3	73.63	142.80	**43.22**	198.98
S7M5F10C4	34.05	**27.64**	83.56	52.42
S3M3F10C3	**15.67**	34.95	41.73	23.45
S5M3F20C4	**27.10**	35.04	124.60	65.99
S7M3F15C5	**36.87**	61.34	76.21	99.77
S5M5F15C3	**27.78**	70.09	109.52	114.62
S5M4F10C5	**34.39**	40.66	45.91	76.49
S3M5F20C5	**18.06**	35.18	88.68	54.30
S3M4F15C4	**21.54**	29.45	66.78	34.29

观察表7和表8中的数据可发现，NSGAⅡ-ASA在绝大多数算例上HV值最大，SP值最小或处于下游，证明其解集在收敛性、多样性和分布均匀性上均具有优势。

4.5 运输资源数量对评价指标的影响分析

为研究运输资源数量对HFSSP-LRVB调度评价指标的影响，分别从4.1节中选取S3M4F15C4(小规模)、S5M4F10C5(中规模)、S7M3F15C5(大规模)的3种算例进行实验，自变量为总运输资源数占总机器数的比例，仿真结果如图11～图13所示。

由图11～图13可见，随着AGV占比的增大，超体积增长率和最大完工时间降低率均减缓，总运输时间优化不明显。当AGV占比达到50%时，可兼顾较优的超体积和最大完工时间。

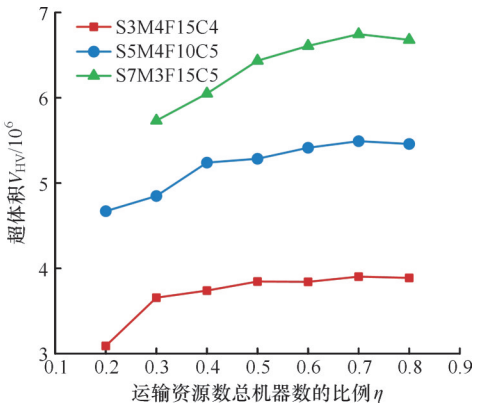

图11 超体积随运输资源数量变化

Fig.11 HV changes with the number of transportation resources

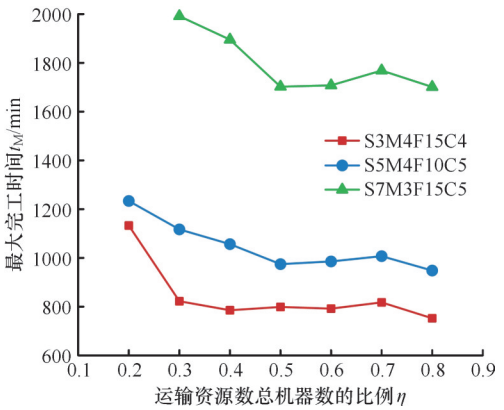

图12 最大完工时间随运输资源数量变化

Fig.12 Makespan changes with the number of transportation resources

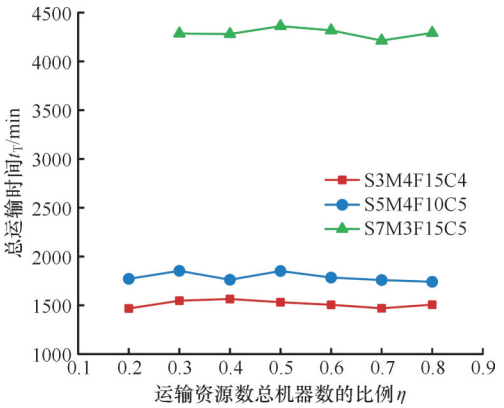

图13 总运输时间随运输资源数量变化

Fig.13 Total transportation time changes with the number of transportation resources

5 结语

本文聚焦有限运输资源条件下多批次变载量转运的多阶段混合流水车间调度问题(HFSSP-LRVB)，以最大完工时间与总运输时间为优化目标，构建了生产与运输集成调度模型。提出了混合算法NSGAⅡ-ASA对调度问题进行求解。设计了动态调整转运批量大小的柔性运输策略，从

而提高了运输效率。设计了基于机器工作时长的轮盘赌种群初始化策略。最后通过正交试验确定了算法的主要参数，并通过仿真实验验证了HFSSP-LRVB调度优化模型的有效性和所提算法的优越性。

参考文献：

[1] DONG J, WANG X, HU J, et al. An Improved Two-machine Flowshop Scheduling with Intermediate Transportation[J]. Journal of Combinatorial Optimization, 2016, 31(3): 1316-1334.

[2] 白朝阳，张昊楠，苗琪琪，等. 基于GEP-DES的柔性流水车间机器与AGV集成实时调度方法[J]. 计算机集成制造系统，2023，29(12)：4161-4174.
BAI Zhaoyang, ZHANG Haonan, MIAO Qiqi, et al. Integrated Scheduling Method of Machines and Automated Guided Vehicles for Flexible Flow Shop in Real-time Systems Based on GEP-DES Algorithm[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2023, 29(12): 4161-4174.

[3] LI W, HAN D, GAO L, et al. Integrated Production and Transportation Scheduling Method in Hybrid Flow Shop [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2022, 35: 12.

[4] XING S, SHAO Z, SHAO W, et al. Joint Scheduling of Hybrid Flow-shop with Limited Automatic Guided Vehicles: a Hierarchical Learning-based Swarm Optimizer [J]. Computers & Industrial Engineering, 2024, 198: 110686.

[5] 温廷新，关婷誉. 考虑能耗和运输的有限缓冲区混合流水车间调度[J]. 系统仿真学报，2024，36(6)：1344-1358.
WEN Tingxin, GUAN Tingyu. Hybrid Flow Shop Scheduling with Limited Buffers Considering Energy Consumption and Transportation[J]. Journal of System Simulation, 2024, 36(6): 1344-1358.

[6] AMIRTEIMOORI A, MAHDAVI I, SOLIMANPUR M, et al. A Parallel Hybrid PSO-GA Algorithm for the Flexible Flow-shop Scheduling with Transportation [J]. Computers & Industrial Engineering, 2022, 173: 108672.

[7] 轩华，武怡璇，王薛苑，等. 考虑运输资源约束的分布式异构混合流水车间节能调度[J]. 工业工程与管理，2024，29(6)：180-195.
XUAN Hua, WU Yixuan, WANG Xueyuan, et al. Distributed Heterogeneous Energy-efficient Hybrid Flowshop Scheduling with Transport Resource Constraint[J]. Industrial Engineering and Management, 2024, 29(6): 180-195.

[8] 刘欢，赵付青，许天鹏. 考虑工人因素和运输资源的分布式混合流水车间调度方法[J]. 华中科技大学学报(自然科学版)，2025，53(6)：71-79.
LIU Huan, ZHAO Fuqing, XU Tianpeng. Distributed Hybrid Flow Shop Scheduling Method Considering Worker Factors and Transportation Resources[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2025, 53(6): 71-79.

[9] WANG C N, ANDREW PORTER G, HUANG C C, et al. Flow-shop Scheduling with Transportation Capacity and Time Consideration[J]. Computers, Materials & Continua, 2022, 70(2): 3031-3048.

[10] TANG H, HUANG J, REN C, et al. Integrated Scheduling of Multi-objective Lot-streaming Hybrid Flowshop with AGV Based on Deep Reinforcement Learning[J]. International Journal of Production Research, 2025, 63(4): 1275-1303.

[11] 张惠煜，王松龄，陈庆新，等. 随机批量运输的柔性作业车间AGV配置优化[J]. 工业工程，2024，27(2)：119-129.
ZHANG Huiyu, WANG Songling, CHEN Qingxin, et al. Optimization of AGV Configuration in a Flexible Job Shop with Random Batch Transportation[J]. Industrial Engineering Journal, 2024, 27(2): 119-129.

[12] 罗亚波，周翔宇，张峰，等. 基于两阶段算法的多技能工人共站装配线再平衡问题[J]. 西南交通大学学报，2025，60(6)：1611-1622.
LUO Yabo, ZHOU Xiangyu, ZHANG Feng, et al. Multi-skilled Multi-manned Assembly Line Rebalancing Problem Based on Two-stage Algorithm[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2025, 60(6): 1611-1622.

[13] ZHANG Mengai, ZHANG Tianxian. MOPSO Based Optimal Resources Scheduling for Multi-base Station Cooperative System[C]//International Conference on Autonomous Unmanned Systems (ICAUS 2021). Singapore, 2021: 2327-2335.

[14] 卫晨昊，李敬敏，李韵辰，等. 改进的MOEA/D算法求解考虑机器恶化效应的柔性流水车间节能调度问题[J]. 计算机集成制造系统，2026，32(2)：585-598.
WEI Chenhao, LI Jingmin, LI Yunchen, et al. Modified MOEA/D for Solving Energy-efficient Flexible Flow Shop Scheduling Problem with Machine Deterioration Effect[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2026, 32(2): 585-598.

[15] YUAN M, LI Y, ZHANG L, et al. Research on Intelligent Workshop Resource Scheduling Method Based on Improved NSGA-Ⅱ Algorithm[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2021, 71: 102141.

（编辑　胡佳慧）

作者简介：李一凡，男，2000年生，硕士研究生。研究方向为生产运作与企业信息化。E-mail：18736143753@163.com。**张　峰***（通信作者），男，1986年生，讲师。研究方向为生产运作与企业信息化。E-mail：zhangfengie@whut.edu.cn。

本文引用格式：

李一凡，张峰，何铭枫，等. 考虑有限运输资源和动态转运批量的多阶段混合流水车间调度研究[J]. 中国机械工程，2026，37(11)：2927-2937.

LI Yifan, ZHANG Feng, HE Mingfeng, et al. Research on Multi-stage Hybrid Flow Shop Scheduling Considering Limited Transportation Resources and Dynamic Transfer Batches[J]. China Mechanical Engineering, 2026, 37(11): 2927-2937.