

李文强,石江鹏,周亚东.考虑碳排放的分布式柔性车间调度优化[J].智能计算机与应用,2025,15(11):122-128. DOI:10.20169/j.issn.2095-2163.251120

考虑碳排放的分布式柔性车间调度优化

李文强¹,石江鹏¹,周亚东²

(1 武汉科技大学 冶金装备及其控制教育部重点实验室,武汉 430081;

2 武汉科技大学 机械传动与制造工程湖北省重点实验室,武汉 430081)

摘要:针对具有质检扰动的分布式柔性车间,以优化车间碳排放配额、提高生产效率和机器设备利用率为目,通过分析整合产品全生命周期在不同机器加工状态下的碳排放边界,本文构建了考虑碳排放的分布式柔性车间调度(Distributed Flexible Job Shop Scheduling Problem Considering Carbon Emissions, DFJSP-CE)框架。首先,基于对产品工艺路线各碳排放边界能耗整合,构建分布式车间碳排放调度模型,计算碳排放量;其次,为求解分布式柔性车间碳排放计算的近似解,改进了混合模因算法,采用基于工厂分配、机器选择、加工工序、人工质检4层编码和插入式贪婪解码方法进行编码与解码,通过混合非支配遗传算法、禁忌搜索算法的搜索策略增强局部搜索能力,设计基于右移重调度与完全重调度结合的部分重调度策略,对实时扰动进行种群重新迭代优化;最后,基于传统车间调度的标准算例构建了20个新的案例,验证改进混合模因算法的可行性和有效性。

关键词:碳排放;分布式柔性车间调度;混合模因算法

中图分类号:TB472 文献标志码:A 文章编号:2095-2163(2025)11-0122-07

Distributed flexible job shop scheduling optimization considering carbon emissions

LI Wenqiang¹, SHI Jiangpeng¹, ZHOU Yadong²

(1 Key Laboratory of Metallurgical Equipment and Control Technology, Ministry of Education, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081, China; 2 Hubei Key Laboratory of Mechanical Transmission and Manufacturing Engineering, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081, China)

Abstract: Aiming at the distributed flexible job shop with quality inspection disturbance, with the goal of optimizing the carbon emission quota of the workshop, improving product production efficiency and machine and equipment utilization, this paper constructs a distributed flexible job shop scheduling framework considering carbon emissions by analyzing and integrating the carbon emission boundaries of the whole life cycle of products in different machine processing states. Firstly, based on the integration of energy consumption across various carbon emission boundaries in the product's process route, a carbon emission scheduling model for distributed workshops is constructed to calculate carbon emissions. Then, to solve the approximate solution for carbon emission calculation in distributed flexible workshops, a hybrid memetic algorithm is improved. In this algorithm, a four-layer encoding method (encompassing factory assignment, machine selection, processing procedures, and manual quality inspection) and an insertion-based greedy decoding method are adopted for encoding and decoding. The local search capability is enhanced by combining the search strategies of the non-dominated genetic algorithm and the tabu search algorithm. Moreover, a partial rescheduling strategy that combines right-shift rescheduling and complete rescheduling is designed to perform population re-iteration optimization for real-time disturbances. Finally, 20 new cases are built based on the standard test instances of traditional workshop scheduling to verify the feasibility and effectiveness of the improved hybrid memetic algorithm.

Key words: carbon emissions; distributed flexible job shop scheduling; hybrid memetic algorithm

0 引言

在“双碳”背景下,用户个性化需求不断提升,对制造工艺提出了更高的要求,导致生产车间的碳

排放边界关系更加复杂,碳排放逐渐成为车间调度研究需要考虑的重要影响因素。合理有效的调度方案可以在优化碳排放配额的同时,高效提升产品生产效率和机械设备利用率。然而,目前涉及到碳排

放的车间调度由于机器不同运行状态导致实际调度过程中存在一些难点与挑战, 具体如下:

(1) 碳排放计算因素复杂。碳排放边界的确定取决于制造车间, 不同制造车间由于制造工艺、生产设备以及刀具的多样性, 导致产品排放边界的不确定性, 进而影响车间碳排放计算的准确性。

(2) 碳排放调度模型稳定性不足。碳排放与总工时(Makespan)、机器利用率之间存在依赖关系, 严重影响各阶段碳排放影响因子的相关性分析。

(3) 传统车间调度算法存在局限性。由于车间调度涉及多维度约束关系, 传统算法容易陷入局部最优, 不能有效的求解考虑碳排放的分布式柔性车间调度问题。随着新一代先进信息技术的高速发展, 自然发展规律模拟和演化的优化算法, 如遗传算法、粒子群算法、禁忌搜索等, 可以有效解决调度问题的约束性、不确定性和多目标性, 为解决复杂问题提供了一种新的思路和手段。上述优化算法凭借其在搜索、优化等方面的优势, 成为车间调度领域的研究热点。

本文从产品制造车间碳排放和调度算法两个角度对分布式柔性车间调度进行研究。在车间碳排放方面, Ball 等^[1]对制造加工生命周期中的碳排放进行分析, 基于物质流、能量流和废物流的碳排放分析方法, 建立了制造系统碳排放模型, 计算碳排放; Lu 等^[2]从产品本身出发, 将产品生命周期中的活动分为主动能源消耗和辅助能源消耗, 提出了产品/零件/组件的“具体化碳能量”的计算方法, 计算能源损耗产生的碳排放; Zhu 等^[3]基于投入产出模型和可比较价格投入产出表, 研究了 1992–2005 年之间中国居民消费产生的碳排放, 并采用结构分析法分析投入产出比例对碳排放的影响; Liu 等^[4]将投入产出分析法与结构分解法相结合, 构建了中国二氧化碳排放变化影响因素的分解模型, 从最终需求出发预测 2035 年中国二氧化碳排放量。上述对制造领域碳排放研究角度较多, 生产制造过程的差异性较大, 车间碳排放类型具有多样性, 不同制造车间对碳排放计算方法也不尽相同。在车间调度方面, Giovanni 等^[5]针对分布式柔性车间制造环境, 提出一种改进的遗传算法, 解决最小制造跨度问题; Du 等^[6]考虑起重机运输和能源消耗限制, 针对制造跨度与能源消耗提出了分布估计算法和禁忌搜索混合算法, 解决分布式柔性车间调度问题; Wang 等^[7]基于混合流水车间调度问题中的不确定性, 拓展了非支配遗传算法(NSGA-II), 解决最小化模糊制造跨

度和总模糊能耗问题; Guo 等^[8]提出了一种具有节能策略和增强局部搜索能力的线性混合遗传算法, 实现机床加工、闲置和超低闲置状态下的主动控制增加绿色车间的节能潜力, 降低总能耗。但上述智能算法求解车间调度问题时, 存在易陷入局部最优、处理多目标问题性能不足等问题。

本文针对特定的汽车零件生产全生命周期, 分析不同机器状态下的碳排放边界, 考虑分布式柔性制造车间生产过程中的碳排放量, 以质检为动态约束, 总碳排放、总工时(Makespan)及机器设备利用效率为目标, 对分布式柔性制造车间重调度优化, 提出了考虑碳排放的分布式柔性车间调度框架。首先, 基于对产品工艺路线各碳排放边界能耗整合, 构建分布式车间碳排放调度模型, 计算碳排放量; 其次, 为求解分布式柔性车间碳排放的近似解改进了混合模因算法, 采用基于工厂分配、机器选择、加工工序、人工质检 4 层编码和插入式贪婪解码方法进行编码与解码, 通过混合非支配遗传算法、禁忌搜索算法的搜索策略增强局部搜索能力, 设计基于右移重调度与完全重调度结合的部分重调度策略, 对实时扰动进行种群重新迭代优化; 最后, 基于传统车间调度的标准算例构建了 20 个新的案例, 验证改进混合模因算法的可行性和有效性。

1 考虑碳排放的分布式柔性车间调度问题框架

本文构建了考虑碳排放的分布式柔性车间调度(Distributed Flexible Job Shop Scheduling Problem Considering Carbon Emissions, DFJSP-CE)框架如图 1 所示, 该框架分两个层次: 分布式柔性车间碳排放调度模型、混合模因调度算法。

1.1 分布式柔性车间碳排放调度模型

为解决考虑碳排放的分布式柔性调度问题, 本文构建了分布式柔性车间碳排放调度模型, 该模型中的参数变量见表 1。

1) 分布式柔性车间碳排放

本文从车间调度角度对车间低碳优化, 车间碳排放计算时, 加工机器负载碳排放主要以不同运行状态计算; 工件运输设备产生的消耗也客观存在, 对碳排放总量进行计算时, 将工件在工厂车间之间和机器之间的运输设备的消耗也考虑在内; 车间中还有切削液、润滑油等也会损耗造成一定的碳排放量。因此, 分布式柔性车间碳排放表示如下:

$$CE = CE_m + CE_t + CE_e + CE_o \quad (1)$$

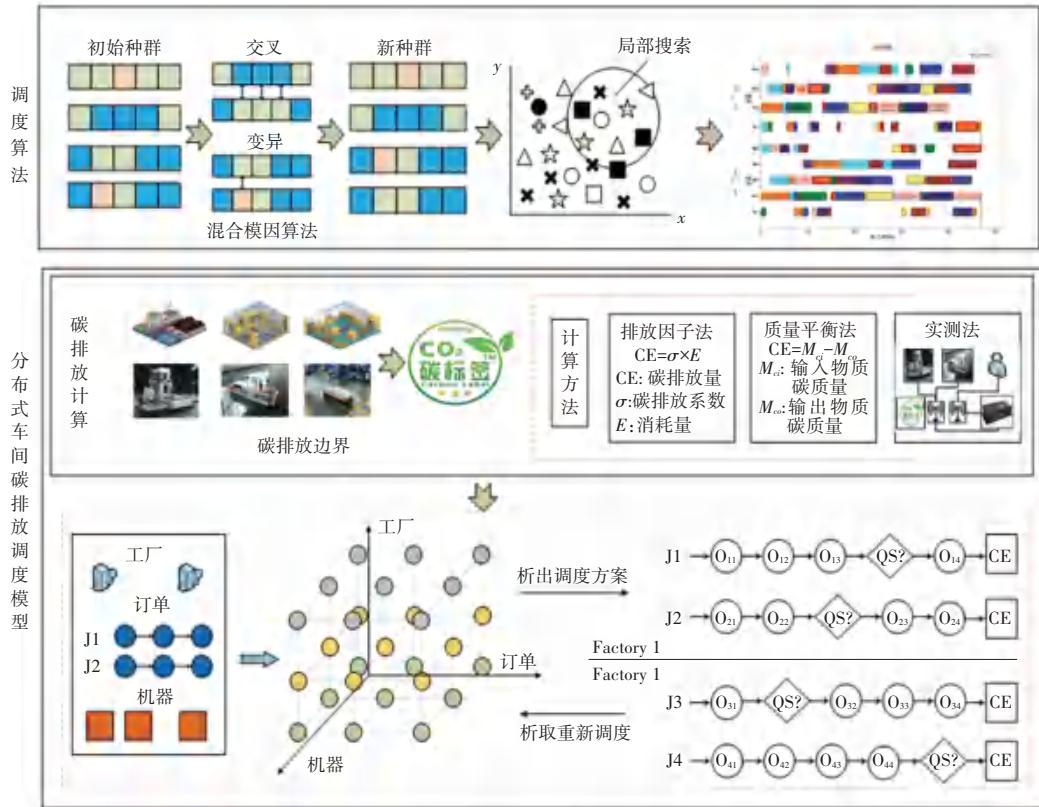


图 1 DFJSP-CE 框架

Fig. 1 DFJSP-CE framework

表 1 参数变量

Table 1 Parameter variables

参数	含义
CE, CE_r	总碳排放量、工厂额定配额碳排放量
CE_m, CE_t, CE_e, CE_o	机器负载、运输、冷却液、润滑油消耗造成的碳排放
t_{ij}	第 i 个作业的第 j 个操作的处理时间
$TM_{k,open}, TM_{k,close}$	机器 k 的开启时间、关闭时间
$J_{k,x}$	在机器 k 上进行第 x 次操作
$tf_{jk,1}$	机器 k 上第 1 次操作的调整时间
$tf_{jk,x,jk,x+1}$	机器 k 上从第 x 次操作到第 $x + 1$ 次操作的调整时间
$tps_{k,x}$	机器 k 上第 x 次操作的开始时间
$tpc_{k,x-1}$	机器 k 上第 $x - 1$ 次操作的结束时间
$tis_{k,x}$	机器 k 上第 x 次操作后空转的开始时间
$tic_{k,x-1}$	机器 k 上第 $x - 1$ 次操作后空转的结束时间
$tt_{jk,x,jk,x+1}$	机器 k 上从第 x 次操作到第 $x + 1$ 次操作的运输时间
$v_{i,k}v_{f,k}v_{p,k}v_{p,k}$	机器 k 空转功率、调整功率、加工功率、运输功率
$T_{c,k}, T_{o,k}$	机器 k 上的冷却液更换周期、润滑油更换周期
$L_{c,k}, L_{o,k}$	机器 k 上的冷却液消耗量、润滑油消耗量
$\sigma_e, \sigma_c, \sigma_o$	电能、冷却液、润滑油碳排放系数
α_{ijk}	如果分配在机器 k 上处理工件 i 的第 j 个操作，则为 1，否则为 0
γ_{ijk}	如果机器 k 上正在处理工件 i 的第 j 个操作，则为 1，否则为 0

加工机器负载能耗产生的碳排放量:

$$\text{CE}_m = \sigma_e \times \left[\sum_{k=1}^x \sum_{x=1}^y v_{f,k} \times (tf_{J_{k,1}} + tf_{J_{k,x}, J_{k,x+1}}) + v_{p,k} \times t_{ij} + v_{i,k} \times (tis_{k,x+1} - tic_{k,x}) \right] \quad (2)$$

运输产生的碳排放量:

$$\begin{aligned} \text{CE}_t = & \sigma_e \sum_{i=1}^w \sum_{j=1}^x \sum_{k=1}^y v_{p,k} \times t_{ij} + \\ & \sigma_e \sum_{k=1}^x \sum_{x=1}^y v_{t,k} \times tt_{J_{k,x}, J_{k,x+1}} \end{aligned} \quad (3)$$

冷却液消耗造成的碳排放量:

$$\text{CE}_c = \sigma_c \sum_{k=1}^x \frac{\sum_{i=1}^x \sum_{j=1}^y t_{ij}}{T_{c,k}} \times L_{c,k} \quad (4)$$

润滑油消耗造成的的碳排放量:

$$\text{CE}_o = \sigma_o \sum_{k=1}^x \frac{\text{TM}_{k,\text{close}} - \text{TM}_{k,\text{open}}}{T_{o,k}} \times L_{o,k} \quad (5)$$

2) 最小化加工时间

本文分布式柔性车间碳排放调度模型的最小化加工时间优化目标:

$$C_{\max} = \min(\max(\text{TM}_{k,\text{close}} - \text{TM}_{k,\text{open}})) \quad (6)$$

3) 最小化机器利用率

本文分布式柔性车间碳排放调度模型的最小化机器利用率优化目标:

$$A_{mu} = \frac{\sum_{i=1}^x \sum_{j=1}^y t_{ij}}{M \times (\text{TM}_{k,\text{close}} - \text{TM}_{k,\text{open}})} \quad (7)$$

约束条件:

为确保所有机器在初始时刻都可使用, 使用下式约束, 变量 α_{ijk} 表示如果工序 O_{ij} 被分配给机器 k 加工为 1, 否则为 0。

$$\sum_{k=1}^y \alpha_{ijk} = 1 \quad (8)$$

为确保一台机器同时只能处理一项操作, 使用下式约束, 变量 γ_{ijk} 表示如果机器 k 正在加工工序 O_{ij} 为 1, 否则为 0。

$$\sum_{k=1}^y \gamma_{ijk} = 1 \quad (9)$$

使用下式对一个工件每次只能在同一工厂车间的机器上操作进行约束:

$$\sum_{k=1}^y \alpha_{ijk} \gamma_{ijk} \leq 1 \quad (10)$$

对当前工序只能上一道工序加工完成后开始的约束:

$$tps_{k,x} - tpc_{k,x-1} > 0 \quad (11)$$

车间碳排放量少于公司限定配额碳排放量的约束, 式(12) :

$$\text{CE} \leq \text{CE}_r \quad (12)$$

1.2 改进的混合模因算法

本文以模因算法为基础, 为提升种群多样性, 设计了一种 4 层编码的初始化种群方法; 为提升算法搜索效率和局部搜索能力, 使用结合非支配遗传算法、禁忌搜索算法的搜索策略。改进的混合模因算法流程图如图 2 所示。

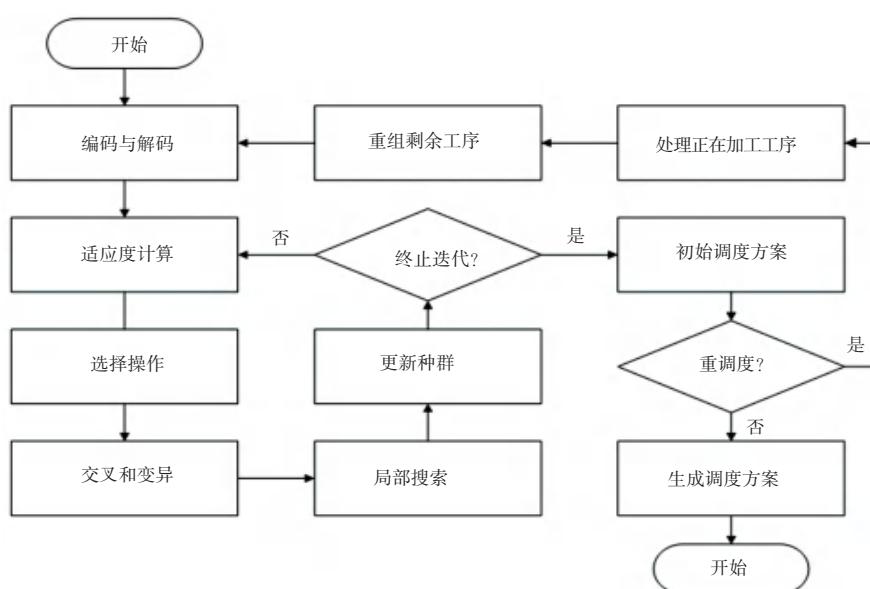


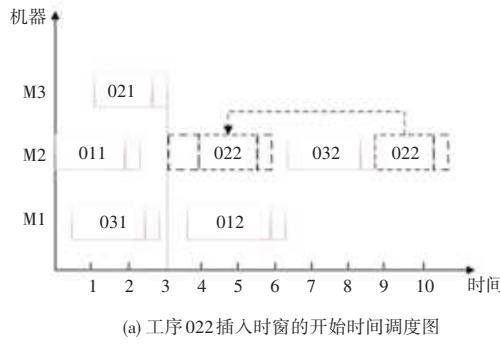
图 2 改进的混合模因算法流程图

Fig. 2 Flowchart of the improved hybrid memetic algorithm

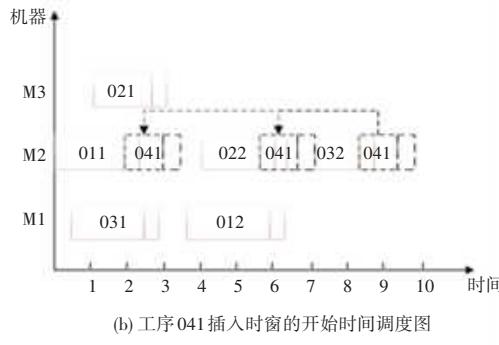
改进的混合模因算法具体步骤如下：

步骤 1 编码。设计了一种由工序向量(OS)、检查结果向量(IS)、工厂选择向量(FS)、机器选择向量(MS)4层染色体编码,从OS基因片段中提取基因粒 O_{ij} 获得染色体FS、MS中对应的工厂 F_i 和机器 O_{jk} ,然后确定加工时间、运输时间、检测时间。

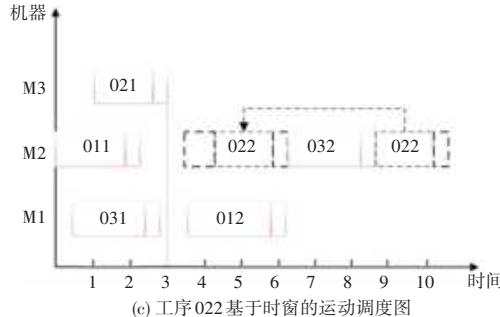
步骤 2 解码。以插入工序 O_{22} 和 O_{31} 为例,基于时窗的插入式贪婪解码调度过程及基于时窗的插入式贪婪解码调度结果如图3所示。查找机器 M_2 所有空闲时窗,通过式(13)确定空闲时窗起始时间 t_a ,按照式(14)判断是否满足插入条件,如果满足则插入当前空闲时窗, TS_h , TE_h 分别表示空闲时窗的起始时间和结束时间。



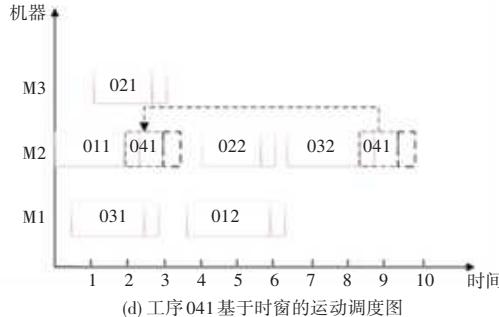
(a) 工序 022 插入时窗的开始时间调度图



(b) 工序 041 插入时窗的开始时间调度图



(c) 工序 022 基于时窗的运动调度图



(d) 工序 041 基于时窗的运动调度图

图 3 基于插入式贪婪解码调度方法

Fig. 3 Plug-in greedy decoding scheduling method

2 实验与分析

本文选取某汽车零部件加工车间作为研究对象,以碳排放量最小为目标进行生产调度,从而优化零件加工时间。采用超体积指标(HV)、反转世代距离(IGD)和C-metric评估算法,HV用来衡量解的多样性与分布性,值越大性能越好;IGD用来衡量算法收敛性,值越小越接近真实解;C-metric用来分析解的覆盖贡献程度。

为评估算法的有效性,基于传统FJSP(Flexible Job Shop Scheduling Problem)的权威算例^[9-10]构建

$$t_a = \max \{ C_{I, j-1}, TS_h \} \quad (13)$$

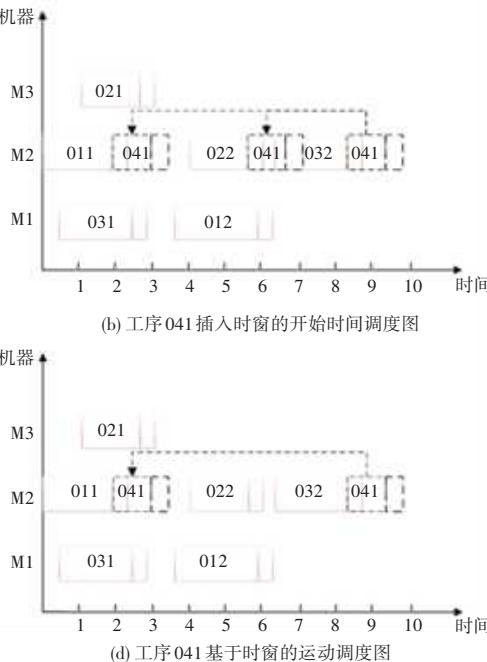
$$t_a + pt_{ijk} + pt_{ijkl} + pt_{ijkv_r} \leq TE_h \quad (14)$$

步骤 3 适应度函数。根据目标模型计算分布式柔性车间调度问题中各作业完成时间、碳排放量和所分配的工厂机器编号。

步骤 4 交叉和变异。设置交叉 $CP=0.8$ 、变异 $MP=0.6$ 的概率进行种群迭代。

步骤 5 局部搜索。使用结合交换、插入、反转邻域搜索算子的邻域结构的禁忌搜索,增强局部搜索能力。

步骤 6 重调度。在随机工序 O_{ij} 质检为劣质加工后,停止所有后续迭代,把工序 O_{ij} 与预加工工序右移,整合剩余工序重新调度。



20 个新的案例,使用这些案例进行数值模拟实验。MOMA (Multiple Objective Memetic Algorithm) 广泛用于多目标调度问题^[11],ENSGA (Enhanced Non-dominated Sorting Genetic Algorithm) 用于求解考虑机器、工人和排序灵活性的 FJSP^[12],与本文提出的算法存在部分相似。为实验公平性,本文将所有算法终止条件设置为最小平均运行时间,基于 HV、IGD、C-metric 的本文提出的算法与 MOMA 和 ENSGA 算法对比实验结果见表 2,可以得出一个结论:无论实验数值规模如何,HMA 在求解 DFJSP-CE 都优于 MOMA、ENSGA。

表 2 基于 HV、IGD、C-metric 的算法对比结果

Table 2 Comparison results of algorithms based on HV, IGD, and C-metric

实例	HV			IGD			C-metric		
	HMA	MOMA	ENSGA	HMA	MOMA	ENSGA	HMA	MOMA	ENSGA
DFS01	0.034	0.001	0.016	0.637	0.863	0.372	0.875	0.738	0.903
DFS02	0.093	0.055	0.077	0.267	0.393	0.223	0.832	0.921	0.960
DFS03	0.057	0.038	0.035	0.216	0.291	0.234	0.597	0.804	0.418
DFS04	0.059	0.031	0.042	0.352	0.377	0.272	0.796	0.743	0.774
DFS05	0.010	0.003	0.002	0.696	0.626	0.666	0.647	0.535	0.798
DFS06	0.074	0.025	0.057	0.315	0.310	0.266	0.094	0.117	0.208
DFS07	0.017	0.011	0.021	0.719	0.444	0.911	0.643	0.944	0.688
DFS08	0.078	0.063	0.048	0.214	0.045	0.375	0.838	0.696	0.944
DFS09	0.079	0.004	0.030	0.516	0.394	0.448	1.021	0.680	0.838
DFS10	0.063	0.054	0.049	0.334	0.195	0.265	0.154	0.021	0.075
DFS11	0.089	0.050	0.063	0.412	0.696	0.232	0.455	0.063	0.333
DFS12	0.060	0.044	0.031	0.306	0.653	0.248	0.996	0.838	0.699
DFS13	0.019	0.003	0.006	0.538	0.452	0.611	0.154	0.068	0.176
DFS14	0.004	0.023	0.017	0.764	0.487	0.761	0.357	0.421	0.404
DFS15	0.019	0.010	0.005	0.625	0.546	0.652	0.664	0.567	0.498
DFS16	0.013	0.013	0.012	0.606	0.882	0.247	0.037	0.450	0.237
DFS17	0.017	0.002	0.004	0.408	0.323	0.609	0.020	0.465	0.267
DFS18	0.026	0.034	0.021	0.451	0.454	0.182	0.445	0.289	0.275
DFS19	0.096	0.061	0.081	0.179	0.145	0.108	0.443	0.238	0.367
DFS20	0.025	0.023	0.003	0.141	0.229	0.604	0.323	0.398	0.182

HMA 基于案例获得的解决方案甘特图如图 4 所示, 将 20 个工件的 110 个工序分配到两个工厂, 共 9 台机器上。

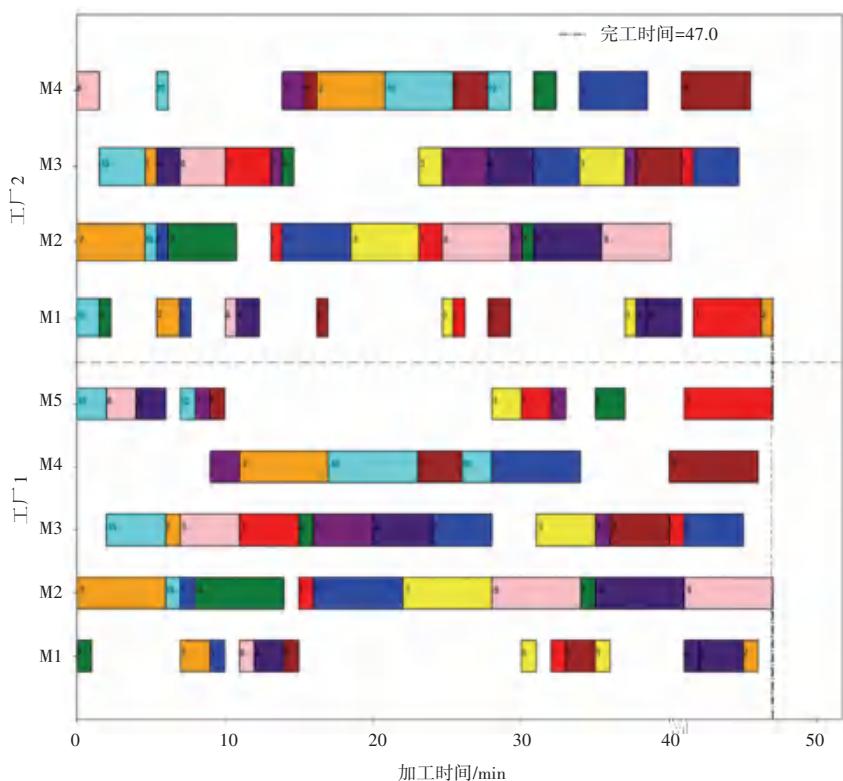


图 4 改进的混合模因算法甘特图

Fig. 4 Gantt chart of an improved hybrid memetic algorithm

3 结束语

本文提出的考虑碳排放的分布式动态柔性车间调度优化框架,分析质检约束下考虑碳排放的分布式柔性车间调度,结合非支配遗传算法和禁忌搜索算法的搜索策略优势,设计了一种新的混合模因算法,该算法可以有效降低分布式柔性车间生产碳排放量,减少制造车间产品加工时间,节省生产成本。最后,通过实例验证所提算法的有效性,为分布式车间调度的研究提供支持。

参考文献

- [1] BALL P D, EVANS S, LEVERS A, et al. Zero carbon manufacturing facility towards integrating material, energy, and waste process flow [J]. Journal of Engineering Manufacture, 2009, 223 (9): 1085–2096.
- [2] LU Q, ZHOU G, ZHU J. A calculation method of embodied carbon-energy for low-carbon products [J]. Procedia CIRP, 2016, 57: 680–685.
- [3] ZHU Q, PENG X, WU K. Calculation and decomposition of indirect carbon emissions from residential consumption in China based on the input-output model [J]. Energy Policy, 2012, 48: 618–626.
- [4] LIU M, YANG X, WEN J, et al. Drivers of China's carbon dioxide emissions: Based on the combination model of structural decomposition analysis and input-output subsystem method [J]. Environmental Impact Assessment Review, 2023, 100: 107043.
- [5] GIOVANNI L D, PEZZELLA F. An improved genetic algorithm for the distributed and flexible job-shop scheduling problem [J]. European Journal of Operational Research, 2010, 200 (2): 395–408.
- [6] DU Y, LI J, LUO C, et al. A hybrid estimation of distribution algorithm for distributed flexible job shop scheduling with crane transports [J]. Swarm and Evolutionary Computation, 2021 (3): 100861.
- [7] WANG Y J, WANG G G, TIAN F M, et al. Solving energy-efficient fuzzy hybrid flow-shop scheduling problem at a variable machine speed using an extended NSGA-II [J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2023, 121: 105977.
- [8] GUO J, WANG L, KONG L, et al. Energy-efficient flow-shop scheduling with the strategy of switching the power statuses of machines [J]. Sustainable Energy Technologies and Assessments, 2022, 53: 102649.
- [9] BRANDIMARTE P. Routing and scheduling in a flexible job shop by tabu search [J]. Annals of Operations Research, 1993, 41(3): 157–183.
- [10] HURINK J, JURISCH B, THOLE M. Tabu search for the job-shop scheduling problem with multi-purpose machines [J]. Operations Research Spektrum, 1994, 15: 205–215.
- [11] ZHANG X. A knowledge-guided memetic algorithm for energy-efficient flexible job shop scheduling with sequence-dependent setup times [J]. Computers & Industrial Engineering, 2023, 178: 108942.
- [12] JIANG P. A novel hybrid ENSGA-II algorithm for flexible job shop scheduling problem with multi-objectives [J]. Journal of Manufacturing Systems, 2021, 58: 30–45.