

doi: 10.11835/j.issn.1000-582X.2024.217

引用格式:李峥峰, 谷文鹏, 张国辉, 等. 考虑多 AGV 充电的绿色作业车间集成调度[J]. 重庆大学学报, 2026, 49(1): 17-31.



考虑多 AGV 充电的绿色作业车间集成调度

李峥峰¹, 谷文鹏¹, 张国辉², 周高峰¹

(1. 中原工学院 机电学院, 郑州 450007; 2. 郑州航空工业管理学院 管理工程学院, 郑州 450015)

摘要: 自动导引车 (automatic guided vehicle, AGV) 逐渐成为车间生产工件运输的重要工具, 这给车间生产调度带来了新的问题, 如 AGV 分配、AGV 电量约束、AGV 数量约束等。针对 AGV 运输的绿色作业车间调度问题, 在考虑 AGV 能耗、电量及充电的情况下, 提出了一种最小完工时间和最小能耗的多目标作业车间调度优化模型, 并设计了一种改进遗传算法进行求解, 该算法采用等长的工件分配和 AGV 分配两段式编码方式, 设计了工件和 AGV 相应的遗传操作算子和局部搜索策略, 针对 AGV 电量及充电约束设计了解码机制。通过 FT06 用例的实验仿真, 采用极差和方差法分析了 AGV 数量、电量对优化目标的影响, 验证了所提模型和算法的有效性。

关键词: 作业车间; 绿色调度; 能耗; 自动导引车; AGV 充电

中图分类号: TP278; TP18

文献标志码: A

文章编号: 1000-582X(2026)01-017-15

Integrated green job-shop scheduling considering AGV charging

LI Zhengfeng¹, GU Wenpeng¹, ZHANG Guohui², ZHOU Gaofeng¹

(1. School of Mechatronics Engineering, Zhongyuan University of Technology, Zhengzhou 450007, P. R. China;

2. School of Management Engineering, Zhengzhou University of Aeronautics, Zhengzhou 450015, P. R. China)

Abstract: Automatic guided vehicles (AGVs) have become an important transport resources in modern job shops, yet their deployment introduces new scheduling challenges, such as AGV assignment, power constraints, and fleet size limitations. To address the green scheduling problem of job shops considering AGV charging requirements, this study develops a multi-objective optimization model that minimizes makespan and energy consumption while accounting for AGV power levels and charging behavior. An improved genetic algorithm is proposed to solve the model. It employs dual-segment chromosome encoding for job sequencing and AGV allocation, and local search strategies and dedicated genetic operators for each chromosome segment. A decoding mechanism considering AGV power and charging constraints is also designed. Through orthogonal simulation experiments using the FT06 benchmark case, the influence of AGV fleet size and battery capacity on scheduling performance are analyzed via

收稿日期: 2023-10-26 网络出版日期: 2024-07-11

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (U1904167); 河南省重点研发专项项目 (231111221200); 河南省高等学校重点科研计划项目 (19A460034)。

Supported by National Natural Science Foundation of China (U1904167), the Key Research and Development Special Program of Henan Province (231111221200), and the Key Scientific Research Projects of Higher Education of Henan Province (19A460034)。

作者简介: 李峥峰 (1976—), 男, 高级工程师, 博士, 硕士生导师, 主要从事调度优化研究, (E-mail) zhengfengli@yeah.net。

range and variance methods. Simulation results demonstrate the effectiveness of the proposed model and algorithm.

Keywords: job shop; green scheduling; energy consumption; automatic guided vehicle; AGV charging

生产车间是制造业能耗的主要场所,控制生产车间能耗成为制造业控制能耗的关键。近年来,面向能耗优化的绿色作业车间调度问题成为研究的热点和重点问题。Mansouri等^[1]明确提出了能耗作为车间调度指标。王凌等^[2]从绿色车间调度的问题、调度算法和应用等层面进行了综述,指出了绿色车间调度具有重要的学术和工程意义。蒋增强等^[3]考虑了设备状态及其能耗,采用基于血缘变异的改进NSGA-II遗传算法求解低碳策略下的多目标柔性作业车间调度问题(flexible job shop scheduling problem, FJSP)。Piroozfard等^[4]采用改进多目标遗传算法研究了柔性作业车间最小化碳排放和迟到总工时多目标优化。在考虑机器的加工和空载2种状态下,姜天华^[5]采用灰狼算法研究了柔性作业车间的完工时间成本和能耗成本的加权最小化问题。针对设备的加工状态不同转速的能耗问题,吴秀丽等^[6]采用NSGAI研究了柔性作业车间完工时间和能耗的问题。李聪波等^[7]研究了考虑设备预维护的柔性作业车间调度节能方法。雷德明等^[8]采用2阶段算法求解总能耗约束的柔性作业车间调度问题。

这些研究对加工设备的能耗问题进行了比较深入分析,但没有考虑运输工件的因素。随着研究的深入,工件在生产车间运输能耗逐渐引起了研究者的重视。李国民等^[9]研究了轨道导引车的动态调度问题。Liu等^[10]研究了考虑吊车运输的能耗的集成绿色FJSP调度问题。特别是自动导引车(automatic guided vehicle, AGV)在自动生产车间逐渐得到推广应用,工件的AGV运输成为车间调度研究中不可忽略的关键问题。与典型作业车间绿色调度问题相比,考虑AGV的作业车间调度问题带来了3个新的问题。第一是运输任务的AGV分配问题,把运输任务合理分配给AGV,由AGV在车间生产中把工件运输到相应的工位给机器加工,这个问题与工件的完工时间、机器能耗密切相关。第二是AGV数量问题,即AGV数量对优化目标的影响,根据不同的需要选择合适的AGV数量,这同样与完工时间、能耗、成本密切相关。第三是AGV电量问题,AGV电量不同导致AGV持续工作的时间不同,需要充电的次数不同,对完工时间、能耗、成本等优化目标的影响也不同。这些都极大地增加了问题的规模、维度和求解难度,使考虑AGV运输的车间调度问题成为极具学术意义和工程价值的热点问题。

在考虑AGV的车间调度方面,贺长征等^[11]针对柔性作业车间工件加工机器选择和AGV分配问题的集成调度进行了研究,刘二辉等^[12]采用改进花粉算法研究了共融AGV作业车间调度问题,但都没有考虑AGV数量及能耗的影响。付建林等^[13]把AGV调度分为AGV静态、AGV动态和AGV同时调度,对自动导引车调度优化问题进行了综述。Heger等^[14-15]采用排序和路由规则研究了含AGV的柔性作业车间平均拖期问题,以及该车间的AGV的动态优先分配规则,但没有考虑AGV的能耗。徐云琴等^[16]建立了考虑行为效应的AGV搬运的柔性车间调度模型,研究了AGV最优调度方案和最佳AGV数量。马千慧等^[17]研究了多AGV的多目标柔性作业车间调度问题,但没有考虑车间的能耗和AGV电量约束。胡晓阳等^[18]研究了多AGV的柔性作业车间调度问题,采用先到先服务的启发规则分配运输任务给AGV。成丽新等^[19]研究了基于基因表达式编程的单AGV的加工车间生产调度规则问题。但这些车间调度问题的研究基本没有考虑AGV电量和能耗问题。

在考虑AGV运输的绿色车间调度方面,Xu等^[20]采用分段编码的进化算法研究了带AGV的FMS多目标多维绿色调度方法。Wang等^[21]考虑了AGV能耗和车间复杂度来研究了AGV调度方法,但研究的AGV执行一次任务后就返回,不连续执行任务。王真等^[22]研究了纺织车间中,考虑了AGV运行和等待状态的能耗问题,对运输任务进行优化,并采用AHP方法确定了运行时间、响应时间和能耗的加权系数,但是只考虑了AGV调度且运输一次的情况。戴敏等^[23]研究了AGV充足及AGV能耗固定的情况下,采用分布估计算法研

究绿色作业车间机器与 AGV 的集成调度。Dai 等^[24]研究了 AGV 充足、可立即运输工件情况下,改进 GA 算法求解的柔性作业车间多目标调度问题,该研究仅考虑 AGV 能耗,没有考虑 AGV 数量、电量及其充电问题。

目前针对车间调度中的 AGV 充电问题研究特别少。Dehnavi-Arani 等^[25]通过 GAMS 仿真研究了在作业车间中 AGV 充电站位置优化问题。李峥峰等^[26]研究了考虑 AGV 充电的最小完工时间的作业车间调度问题,但没有考虑总体能耗问题的优化。通过文献分析,车间调度问题中的 AGV 能耗问题研究较少,特别是考虑 AGV 电量的绿色作业车间调度的研究,相关文献几乎空白,而该问题对调度结果在实践中的应用具有重要的工程意义。文中在考虑设备运行状态、AGV 运输状态、AGV 充电的情况下,开展多目标绿色作业车间集成调度研究。

1 问题描述与模型

1.1 问题描述

考虑 AGV 充电的绿色作业车间调度问题简单描述为: n 个工件在 M 台设备上并行进行加工,每个工件有 d 道不同的工序, d 不大于 M ,每台工序只在 1 台设备进行加工,工件工序在不同设备之间的运输有 K 台需要充电 AGV 来完成。根据运输任务分配,AGV 到达任务起点,等待工件工序完成加工后,AGV 运输该工件到任务终点,即工件的下道工序加工设备处;如果 AGV 电量不需要充电,则在任务终点处等待任务分配,如果 AGV 电量低于充电阈值,AGV 回到充电站充电,充电完成后在充电站等待任务分配。

AGV 电量不足需充电时,可参与运输的 AGV 数量会动态变化,这增加了 AGV 调度和编码的难度及复杂度。文中采用 AGV 可用时间的改变来代替充电状态的变化,即当 AGV 充电时,计算 AGV 充电所需的时间,更新 AGV 的可用时间及位置,作为其下一个运输任务的起始。这样避免了 AGV 可用数量的动态变化,减少了问题的难度和复杂度。

设备分为加工状态和空闲状态,其能耗是不同的。加工状态为设备完成工序加工工艺进行加工的工作状态,加工不同工序所消耗的能量不同。空闲状态为设备在相邻工件加工任务之间的无加工的空闲状态。

AGV 分为负载状态和空载状态,其能耗也是不同的。负载状态为 AGV 装载工件运输时的状态,空载状态 AGV 没有装载工件时候的运行或等待。另外,由于 AGV 空载运行状态与 AGV 等待状态的能耗比较接近,文中把这 2 种状态都归为空载运行状态考虑。

车间设有工件物料区,成品区和充电站区域。

考虑 AGV 电量的绿色作业车间调度问题有以下假设:

- 1) 工序加工不中断,机器和 AGV 无故障。
- 2) AGV 运行负载为单负载,AGV 运行速度固定,AGV 单位时间负载能耗和空载能耗固定。
- 3) 工件缓冲区无限大。
- 4) AGV 运输不考虑路径冲突。
- 5) 准备就绪状态,工件、设备和 AGV 可用时间为 0,不需要额外准备时间。
- 6) 阈值电量足够 AGV 能返回充电站。
- 7) AGV 充电过程不中断,充满为止。
- 8) AGV 和设备不考虑工件的装载和卸载时间。

1.2 参数符号定义

M 表示设备数量, m 表示设备号; K 表示 AGV 数量, k 表示 AGV 号; n 表示工件数量, i 表示工件号; O 表示工序, j 表示工序号,工件最大工序数 d ; T_{k-able} 表示 AGV 小车 k 的可用时间; S_{ijk} 表示 AGV 小车 k 运输工序 O_{ij} 的开始时刻; C_{ijk} 表示 AGV 小车 k 运输工序 O_{ij} 的完成时刻; p_k^l 表示 AGV 小车 k 负载运输的单位时间能耗; p_k^u 表示 AGV 小车 k 空载运输的单位时间能耗; p_m^p 表示设备 m 加工时单位时间能耗; p_m^u 表示设备 m 空闲时单位时间能耗; M_{ij} 表示工序 O_{ij} 的加工设备; $T_{k-pos-mij}$ 表示 AGV 从当前位置到 M_{ij} 的时间; W_{ijk} 工序 O_{ij} 等待 AGV 小车 k 的

时间; S_{ijm} 表示设备 m 开始加工工序 O_{ij} 的时间; C_{ijm} 表示设备 m 加工工序 O_{ij} 的完工时间; p_{ijm} 表示设备 m 上工序 O_{ij} 的工艺加工时间; C_i 表示工件 i 的完工时间; S_{id} 表示工件 i 的最后一道工序的开工时间; P_{id} 表示工件 i 的最后一道工序的加工时间; S_m 表示设备 m 的加工开始时间; C_m 表示设备 m 的加工结束时间; S_k 表示AGV小车 k 的开始运输时间; C_k 表示AGV小车 k 所有任务结束时间; $T_{k-total}$ 表示AGV每次任务的总运行时长; T_{k-idle} 表示AGV每次任务的空载运行时长; T_{k-load} 表示AGV每次任务的负载运行时长; $T_{mij-station}$ 表示若需充电AGV到充电站的时长; T_{k-chg} 表示AGV在充电站的充电时长; P_k 表示AGV完成一次任务的能耗; P_{k-max} 表示最大能量; P_{k-bat} 表示AGV当前能量; P_{k-rate} 表示AGV充电速率; X_{ijm} 表示工件工序 O_{ij} 是否在设备 m 上加工,1表示在该设备上加工,0表示不在该设备上加工; X_{ijk} 表示工件工序 O_{ij} 是否在AGV k 上运输,1表示在该设备上加工,0表示不在该设备上加工。

1.3 优化模型

机床加工运行时能耗为

$$E_w = \sum_{m=1}^M \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^d X_{ijm} P_m^p p_{ijm} \quad (1)$$

机床空载运行时候能耗为

$$E_{idle} = \sum_{m=1}^M \left((C_m - S_m) - \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^d X_{ijm} p_{ijm} \right) P_m^u \quad (2)$$

机床的能耗为 $E_{mac}=E_w+E_{idle}$ 。

AGV负载运行时候的能耗为

$$E_{agv-w} = \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^d X_{ijk} P_k^p (C_{ijk} - S_{ijk}) \quad (3)$$

AGV空载运行时的能耗为

$$E_{agv-idle} = \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^d X_{ijk} (C_{ijk} - T_{k-able} - T_{k-mi(j-1)-mij}) P_k^u \quad (4)$$

AGV的能耗为 $E_{agv}=E_{agv-w}+E_{agv-idle}$ 。

考虑AGV运输的作业车间调度的约束有:

$$C_i = S_{id} + P_{id}; \quad (5)$$

$$S_{ijm} = C_{i(j-1)(m-1)} + W_{ijk} + T_{k-mi(j-1)-mij}; \quad (6)$$

$$C_{ijm} = S_{ijm} + p_{ijm}; \quad (7)$$

$$S_{ijk} = \max \{ T_{k-able} + T_{k-pos-mi(j-1)}, C_{i(j-1)} \}; \quad (8)$$

$$C_{ijk} = S_{ijk} + T_{k-mi(j-1)-mij}; \quad (9)$$

$$W_{ijk} = \begin{cases} S_{ijk} - C_{i(j-1)}, & S_{ijk} > C_{i(j-1)}; \\ 0, & \text{其他。} \end{cases} \quad (10)$$

$$T_{k-total} = C_{ijk} - T_{k-able}; \quad (11)$$

$$T_{k-load} = T_{k-mi(j-1)-mij}; \quad (12)$$

$$T_{k-idle} = T_{k-total} - T_{k-mi(j-1)-mij} = C_{ijk} - T_{k-able} - T_{k-mi(j-1)-mij}; \quad (13)$$

$$P_k = p_k^p T_{k-load} + p_k^u T_{k-idle}; \quad (14)$$

$$P_{k-bat} = P_k; \quad (15)$$

$$T_{k-chg} = (P_{k-max} - P_{k-bat} - T_{mij-station} T_{k-idle}) / P_{k-rate} \quad (16)$$

式(1)表示设备加工的总能耗,式(2)表示设备的总空闲能耗,式(3)表示AGV负载运输的总能耗,式(4)表示AGV空载运输的总能耗,这4项之和为车间调度的总能耗优化目标。式(5)表示工件最后一道工序加工结束就是完工时间,式(6)表示工件工序的开始加工时间受上一道工序加工时间、AGV是否可用和设备间运输时间约束,式(7)表示工件工序完工时间受开始加工时间与加工工艺时间约束,式(8)表示AGV开始运输时间受AGV可用时间、AGV到上道工序加工设备的时间,以及工件上道工序完工时间的约束,式(9)表示

AGV 运输完成时间,式(10)表示工件完工后需要等待 AGV 的时间,表示实际运输时间受 AGV 可用时间、AGV 当前位置、运输任务起止位置,以及上道工序完工时间约束,式(11)表示完成运输任务 AGV 总运输时间,包含 AGV 等待时间、AGV 空载运行时间和 AGV 负载运输时间,式(12)表示 AGV 负载运输时间,式(13)表示 AGV 空载运输时长,包括 AGV 等待时间,式(14)表示 AGV 本次运输任务的能耗,式(15)表示 AGV 剩余电量,决定是否回充电站充电,式(16)表示如果 AGV 需要回到充电站充电,所需要的充电时长。

完工时间是企业最重要的目标,而能耗也是企业转变增长方式的主要考虑内容。本文以能耗最小和工件最大完工时间最小为优化目标:

$$\min f_1 = \min \text{Max}(C_i), \quad (17)$$

$$\min f_2 = \min E = \min(E_{\text{mac}} + E_{\text{agv}})。 \quad (18)$$

考虑 AGV 的绿色作业车间调度优化模型是有约束的多目标函数,求解多目标函数的方法有很多,比较常见的有帕累托最优解和目标加权法。由于目标加权法操作简单、容易求得特性,文中采用归一化加权法,将多目标调度转化为单目标问题。

$$F(v) = \alpha(f_{1\max}^v - f_1^v) / (f_{1\max}^v - f_{1\min}^v) + (1 - \alpha)(f_{2\max}^v - f_2^v) / (f_{2\max}^v - f_{2\min}^v), \quad (19)$$

式中: α 是时间权重值; f_1^v 、 f_2^v 、 $f_{1\max}^v$ 、 $f_{2\max}^v$ 、 $f_{1\min}^v$ 和 $f_{2\min}^v$ 分别表示遗传算法第 v 代的第一个和第二个目标函数适应度值及其极大值与极小值。

2 集成调度求解遗传算法

考虑 AGV 运输的作业车间调度问题包含 2 个子问题:工件工序在设备上加工排序问题和工件运输任务的 AGV 选择问题。考虑到 GA 算法具有良好并行性和较强的全局搜索能力,在求解车间调度问题有良好表现,并结合 AGV 电量的绿色作业车间调度问题的特点,设计了工序加工排序和运输任务 AGV 选择问题的集成调度改进 GA 算法,其算法流程图如图 1 所示。

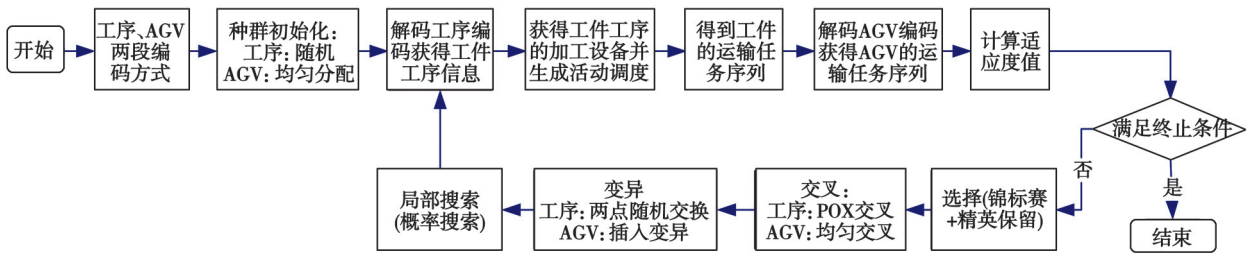


图 1 改进遗传算法流程图

Fig.1 Improved GA flowchart

2.1 编 码

针对工件加工排序和运输任务 AGV 选择这 2 个子问题,采用基于工序的编码和基于 AGV 号的两段染色体编码方式。由于工件需要在原料库、设备和成品库之间运输,为了编码的统一和方便,把成品库假设为一个虚拟设备,其加工时间为 0。每一个工件增加一道在虚拟设备上的虚拟工序,这样每一个工件需要加工和运输的次数一致,从而实现编码长度一致。总共增加的工序数为工件数 n 。

工序编码和 AGV 编码都采用整数编码,长度都为总工序数+总工件数 n 。工序编码的基因采用工件号,工件号出现的次序为工序号,AGV 编码的基因采用 AGV 编号,表示运输任务分配的 AGV。

如图 2 所示,表示 3 个工件,每个工件有 2 道工序的编码。其中第一位工序编码 1,表示为工序 O_{11} ,其加工设备为 M_2 ,运输任务为 T_{02} ,从原料库 0 到设备 M_2 ,由 AGV_3 完成该任务。工件 1 的最后一个工序编码 1 为虚拟工序 O_{13} ,其加工设备为虚拟设备 M_3 ,代表成品库,其虚拟加工时间为 0,运输任务为 T_{13} ,从设备 M_1 到成品库,由 AGV_3 完成该任务。

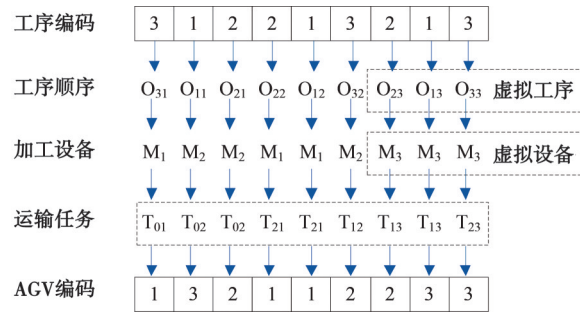


图2 染色体编码

Fig. 2 Representation of the Chromosome

2.2 种群初始化

对于工序编码部分可以采用随机初始化,AGV任务编码按均匀分配编码进行初始化。

2.3 交叉

父代的2个染色体通过相互交换基因,从而生产新的子代染色体。工序编码部分交叉方法采用POX方法^[27],POX方法通过对染色体中的多个工件进行操作,很好地保持父代个体的优良特征。AGV编码部分采用均匀交叉方式,即随机产生一个与机器编码长度相同的二进制串序列,将父代中与1对应位置的基因进行交换。

2.4 变异

工序编码部分采用随机互换2点基因进行变异的方法,在染色体中随机选择2个基因位置,然后把这2个基因交换位置,在实现变异的同时保证了编码的合法性。AGV编码部分采用插入变异,随机选择2个位置,把后一个位置的基因插入到前一个位置,2个位置中间的基因依次后移。

2.5 局部搜索

经过变异后的个体,按照一定概率进行局部搜索。在个体中选择3个不同随机的位置,对这3个基因进行排列产生另外5个候选解。

2.6 选择

选择方法采用复杂度较小的锦标赛方法,并采取保优策略。

2.7 解码

1)对工序进行解码,读取一位染色体基因转换为相应的工序 O_{ij} ,得到其加工设备。

2)采用活动调度方式^[24],获得工件工序的加工顺序。

3)获得该工序运输任务 R 的起点和目的地。

4)从AGV染色体中解码获得运输任务分配的AGV编号 k 。

5)AGV从其初始位置空载运行到运输任务起点,即从AGV当前位置到上道工序 $O_{i(j-1)}$ 的加工设备位置,其时间为 $T_{k-\text{pos}-mi(j-1)}$ 。根据式(8)计算本次任务运输的开始时间,根据式(9)计算运输任务完成的结束时间,也就是把该工件运输到目的地即该工序加工设备处的时间。

6)根据式(11)计算AGV总运输时长,根据式(12)计算AGV的负载运输时长,根据式(13)计算AGV的空载运行时长,根据式(14)计算AGV的总能耗。

7)根据式(15)计算AGV剩余电量,判断AGV电量是否小于充电阈值,如果是,则回到AGV充电站充电,根据式(16)计算充电时长,并更新AGV位置和下次可用时间 $T_{k-\text{able}} = C_{ijk} + T_{k-\text{charge}}$;否则AGV原地等待不动,并更新AGV位置和下次可用时间 $T_{k-\text{able}} = C_{ijk}$ 。

8)根据式(10)和式(6)计算该工序加工开始时间,根据式(7)计算该工序加工的完工时间,并根据设备状态计算其能耗。

9)判断是否全部解码结束:是则跳转步骤10,否则跳转步骤1。

10)结束。

3 仿真测试与分析

3.1 实验设计

采用经典 JSP 问题用例 FT06 问题对设计模型和算法进行了测试仿真,仿真程序采用 VC6++实现,初始种群数为 200,交叉概率 0.8,变异率 0.01,迭代 200 次,仿真程序在 Core i7-7700HQ 和 32G 内存的 Thinkpad T470P 笔记本电脑运行。

为便于表述,文中能耗和时间都采用比值表示,不考虑单位量纲。考虑 FT06 的加工工艺时间,AGV 在设备之间的运输时间用设备间的序号差表示,即设备 2 与设备 1 之间 AGV 的运输时间为 1,设备 5 与设备 1 之间 AGV 的运输时间为 4。

参考文献[7,22-23]设备的加工能耗与空载能耗的关系,并根据生产车间实际经验,估计设备加工状态与空闲运行的能耗比为 1~10。AGV 负载运行和空载运行的能耗之比为 4~10,设备的加工运行状态与 AGV 负载运行的能耗比为 5~20。在研究设备和 AGV 能耗状态之间的关系之前,不失一般性,假设设备工作能耗为 50,设备空闲能耗为 10,AGV 负载能耗为 5,AGV 空闲能耗为 1。为了体现设备的差异性,在 0.5~1.5 随机生成设备能耗系数,与典型能耗值相乘得到设备的实际能耗如表 1 所示。此外,实际车间中 AGV 设备的能耗差别不大,AGV 的负载和空载能耗可以直接选用典型值,即 AGV 负载能耗为 5,空载能耗为 1。

表 1 设备加工能耗和空闲能耗
Table 1 Working power and idle power of machine

能耗	设备号					
	1	2	3	4	5	6
工作能耗	50	63	75	34	40	59
空闲能耗	12	13	6	13	11	5

在 AGV 数量与工件数量相同时,理论上不存在工件等待 AGV 的情况。此时 FT06 用例中,AGV 数量为 6,权重系数为 0 时,表示优化目标为能耗单目标,仿真实验可以得出 AGV 总负载能耗为 480,空闲能耗约为 300。平均每台 AGV 的能耗为 130,同时考虑充电的阈值电量,不失一般性,假设每台 AGV 的电量在 210~90 变动。

AGV 数量和 AGV 电量对完工时间和能耗有着不可忽视的影响。AGV 数量越多,AGV 就能更及时把工件送达工位进行加工,完工时间就可能越短,机器空闲时间就越少,但 AGV 等待时间变长。分别对完工时间和能耗采用实验设计的方法研究 AGV 数量、AGV 电量和 AGV 数量电量相关性对优化目标的影响,其中 AGV 数量和 AGV 电量的五水平参数如表 2 所示。

表 2 AGV 数量和电量五水平参数表
Table 2 5-level parameters for AGV quantity and power

因素	水平				
	1	2	3	4	5
AGV 数量	5	4	3	2	1
AGV 电量	210	170	150	130	90

每次试验运行 10 次取运算结果的最优值作为参考值,实验结果如表 3 所示。其中,权重 1 表示优化目标为完工时间单目标,权重为 0 表示优化目标为能耗单目标。

根据试验数据分析 AGV 数量、AGV 电量及其相关性对完工时间和能耗的影响。

表3 实验结果

Table 3 Experimental results

序号	AGV 数量	AGV 电量	完工时间 ($\alpha=1$)	充电次数 ($\alpha=1$)	能耗 ($\alpha=0$)	充电次数 ($\alpha=1$)
1	5	210	65	0	12 656	0
2	5	170	67	5	12 664	5
3	5	150	73	5	12 665	5
4	5	130	74	5	12 913	5
5	5	90	78	10	12 954	12
6	4	210	68	3	12 635	2
7	4	170	76	4	12 781	3
8	4	150	76	4	12 939	4
9	4	130	79	5	13 088	6
10	4	90	78	12	13 174	10
11	3	210	80	3	12 788	3
12	3	170	81	3	13 228	3
13	3	150	81	5	13 235	3
14	3	130	87	6	13 316	6
15	3	90	89	11	13 565	10
16	2	210	97	2	13 755	2
17	2	170	98	4	13 835	4
18	2	150	106	4	14 000	4
19	2	130	109	6	14 214	6
20	2	90	116	11	14 706	10
21	1	210	176	2	16 640	3
22	1	170	182	4	16 690	4
23	1	150	184	5	16 708	4
24	1	130	190	6	16 808	6
25	1	90	211	10	17 525	11

3.2 完工时间分析

极差分析是实验数据的直观分析,可以得到各个因素对优化结果的影响程度。方差分析可以排除实验误差对实验结果的影响,研究变量对实验结果的显著性水平。

极差计算结果显示 AGV 数量对完工时间具有更大的影响,如表 4 和图 3 所示。在显著性水平为 0.05,方差结果如表 5 所示。由表可知,AGV 数量对完工时间有显著性影响。从上述结果可知,随着 AGV 数量的增加,完工时间减少最明显,这是因为工件运输等待 AGV 的时间减少,能更快地到达加工设备,从而减少了设备空闲时间;随着 AGV 电量的增加,完工时间也逐步有所减少,这是因为 AGV 需要到充电站的次数减少,从而减少了等待时间。充电次数结果分析显示,其主要与 AGV 电量有关,这是因为对于某加工任务来说,总运输能耗局限在某范围内,随着 AGV 电量的增加,AGV 的总充电次数也随之减少。

表 4 完工时间和充电次数的极差数值
Table 4 Range value of makespan and charge times

水平	完工时间		充电次数	
	AGV 数量	AGV 电量	AGV 数量	AGV 电量
1	71.4	97.2	5.0	2.0
2	75.4	100.8	5.6	4.0
3	83.6	104.0	5.4	4.6
4	105.2	107.8	5.4	5.6
5	188.6	114.4	5.4	5.5
极差	117.2	17.2	0.6	3.6
等级	1	2	2	1

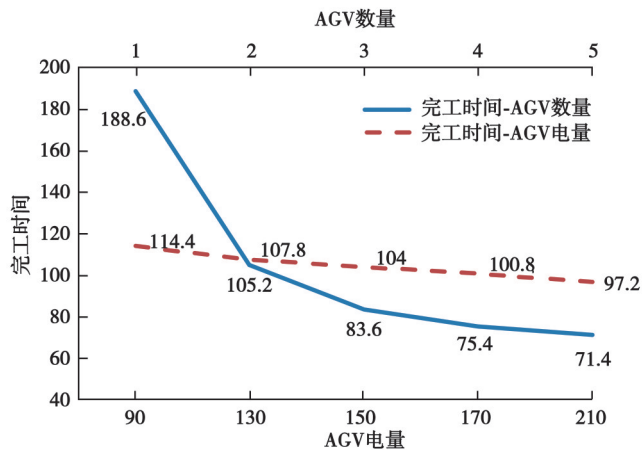


图 3 完工时间极差直观图

Fig. 3 Makespan range value

表 5 完工时间方差数值
Table 5 Variance of makespan

因素	偏差平方和	自由度	F 比	F 临界值	显著性
AGV 数量	47 259.760	4	5.842	2.780	显著
AGV 电量	877.760	4	0.108	2.480	
误差	48 541.560	24			

AGV 数量和电量的相关性分析结果图 4 所示,AGV 数量起主导作用,AGV 数量越多,完工时间越短,相同数量情况下,AGV 电量越多,完工时间越短。

3.3 总能耗分析

通过对能耗优化实验的极差分析可以得出,AGV 数量比 AGV 电量具有更大的影响,如表 6 和图 5 所示。在显著性水平为 0.05 时,方差结果如表 7 所示,方差分析说明 AGV 数量对能耗是显著性影响。随着 AGV 数量的增加,能耗减少最明显,这是因为运输任务等待 AGV 的时间减少,工件更快到达加工设备,从而设备的等

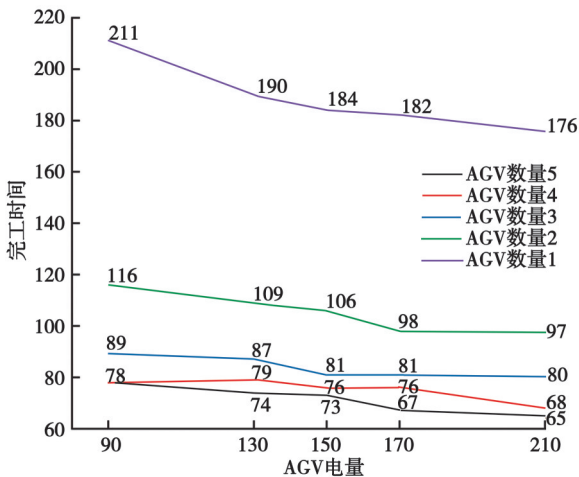


图 4 完工时间的 AGV 数量和电量相关性

Fig. 4 Correlation between AGV quantity and power in makespan

待时间减少,设备的空载能耗减少;随着AGV电量的增加,能耗也逐步有所减少,这是因为AGV需要到充电站的次数减少,从而减少了工件等待时间。充电次数结果分析显示,充电次数主要与AGV电量有关。

表 6 总能耗极差数值
Table 6 Range value of energy consumption

水平	总能耗		充电次数	
	AGV 数量	AGV 电量	AGV 数量	AGV 电量
1	12 770.4	13 694.8	5.4	2.0
2	12 923.4	13 839.6	5.0	3.8
3	13 226.4	13 909.4	5.0	4.0
4	14 102.0	14 067.8	5.2	5.8
5	16 874.2	14 384.8	5.6	5.6
极差	4 103.8	690.0	0.6	3.8
等级	1	2	2	1

表 7 总能耗方差数值
Table 7 Variance of energy consumption

因素	偏差平方和	自由度	<i>F</i> 比	<i>F</i> 临界值	显著性
AGV 数量	57 693 618.640	4	5.820	2.780	显著
AGV 电量	1 388 024.240	4	0.140	2.780	
误差	59 475 506.660	24			

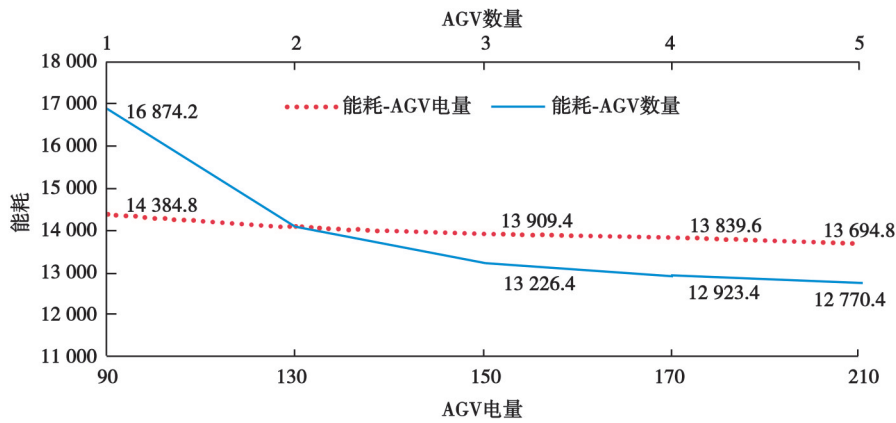


图 5 能耗的极差直观图
Fig. 5 Energy consumption range value

AGV 数量和 AGV 电量的相关性分析结果如图 6 所示,AGV 数量起主导作用,AGV 数量越多,能耗越少,相同 AGV 数量情况下,AGV 电量越多,能耗越少。

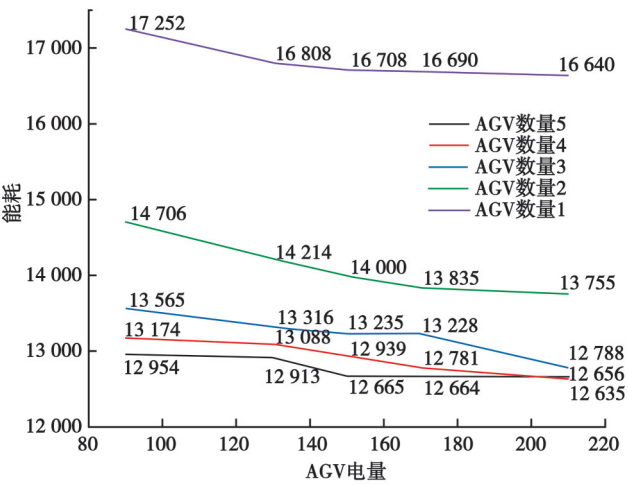


图 6 能耗的 AGV 数量和电量相关性图

Fig. 6 Correlation between AGV quantity and power in energy consumption

3.4 AGV 数量的影响

从上述实验可以看出,不论优化目标是完工时间还是能耗,AGV 数量都是主要的影响因素。下面在 AGV 电量最大为 210 时,通过实验进一步分析 AGV 数量的影响及原因,此时权重值选取 $\alpha=0, \alpha=0.5, \alpha=1$ 为典型值,计算完工时间、总能耗、设备空闲能耗、AGV 空闲能耗等指标进行分析,其结果采用运行 10 次仿真实验的结果的平均值。

仿真实验结果如表 8 所示。不论权重多少,随着 AGV 数量的增加,完工时间和能耗都随着 AGV 的增加而减少。这是因为随着 AGV 的增多,工件被及时地运输到加工设备,设备等待的时间减少,设备空载能耗减少,而 AGV 空载或等待时间逐渐增加,AGV 空载能耗增加,但是由于 AGV 空载能耗仅仅是设备空载能耗的 1/10,总能耗下降。由于 AGV 空载能耗相对设备空载能耗占比小,所以总能耗与设备空载能耗下降曲线基本一致。另外可以看出,随着 AGV 数量的增加,完工时间和能耗快速下降到一定程度,下降曲线变平缓。

表 8 不同 AGV 数量的绿色作业车间调度结果

Table 8 Results of green job shop scheduling with different AGV quantities

权重	评价指标	AGV 数量					
		6	5	4	3	2	1
$\alpha=1.0$	完工时间	65.00	66.43	67.71	70.79	79.07	140.21
	能耗	12 843.80	12 835.50	12 848.57	12 932.49	13 314.93	15 615.00
	设备空闲能耗	1 605.00	1 646.71	1 710.71	1 849.28	2 281.21	4 617.79
	AGV 空闲能耗	285.80	235.79	184.79	130.93	80.71	44.21
$\alpha=0.5$	完工时间	65.50	66.59	68.47	71.25	79.60	138.53
	能耗	12 752.40	12 756.59	12 799.67	12 898.58	13 180.13	15 139.33
	设备空闲能耗	1 523.70	1 567.71	1 663.80	1 815.17	2 152.00	4 143.80
	AGV 空闲能耗	275.70	235.88	182.87	130.42	77.73	42.53
$\alpha=0$	完工时间	68.50	69.47	72.93	76.00	88.20	142.40
	能耗	12 721.20	12 685.47	12 710.40	12 780.07	13 119.47	15 013.07
	设备空闲能耗	1 496.00	1 506.93	1 578.67	1 701.67	2 088.00	4 013.67
	AGV 空闲能耗	272.00	227.33	178.73	125.40	78.47	46.40

3.5 算法的有效性验证

为了验证所提模型及求解算法的有效性,将所提改进遗传算法 iGA 与经典 GA 算法进行比较。设置 AGV 数量 4,电量为 170,权重系数 α 分别为 1.0, 0.5 和 0,采用 FT06 和 LA01 算例进行验证,优化结果如表 9 所示,iGA 全面优于经典 GA 算法的结果。为了观察 iGA 算法的收敛性,图 7 给出了 FT06 用例的 iGA 算法和经典 GA 算法的收敛比较曲线,可以看出不论是收敛速度还是寻优能力,iGA 算法相对经典 GA 都有所提高。同时,权重为 1.0 时候,仅对完工时间进行优化,优化过程中完工时间单调减少,而能耗有波动;权重为 0 时候,仅对总能耗进行优化,优化过程中能耗单调减少,而完工时间有波动;权重为 0.5 时候,同时对完工时间和能耗进行优化,优化过程中完工时间和能耗都单调减少。

表 9 iGA 和 GA 的 FT06 和 LA01 的结果对比

Table 9 Comparision results of iGA and GA in FT06 and LA01

用例	权重	iGA		GA	
		完工时间	能耗	完工时间	能耗
FT06	1.0	76	13 146	82	13 374
	0.5	78	13 021	84	13 091
	0	93	12 823	101	13 058
LA01	1.0	671	157 932	684	159 287
	0.5	671	156 245	684	157 419
	0	671	155 973	695	156 243

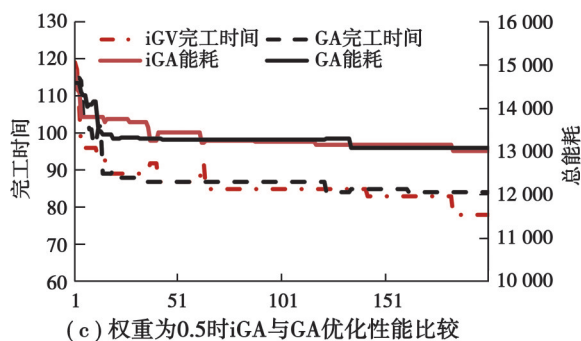
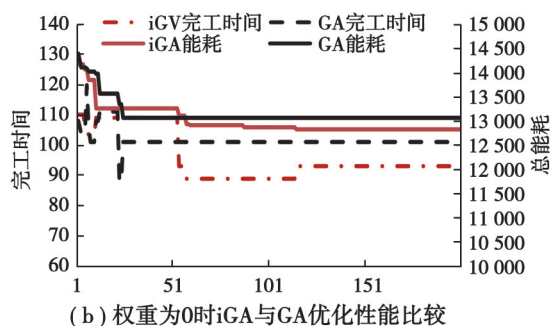
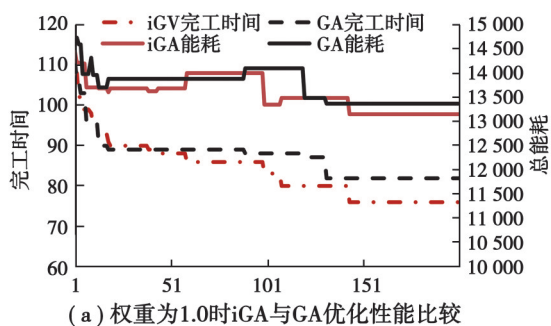


图 7 FT06 的 iGA 和 GA 算法收敛图

Fig. 7 Convergenc curve of iGA and GA in FT06

3.6 调度甘特图

为了展示生产车间内部调度情况,选取前面 FT06 用例正交试验 4 的一个调度结果,画出其调度甘特图。在实验 4 中,AGV 数量为 5 个,AGV 电量为 130,权重系数为 1,其最大完工时间为 74。图 8 展示了 AGV 在机

器之间运输工件,工件在机器上加工的过程,同时当 AGV 电量不足时候,AGV 进行充电的情况。甘特图中 1-2 表示工件 1 的第 2 道工序。举例说明,AGV1 把工件 3 从仓库运输到其第 1 道工序加工机器 3,然后在机器 3 上完成加工后,AGV3 把工件 3 从机器 3 运输到其第 2 道工序加工机器 4,依次安排工件的运输和生产;当 AGV 电量不足时候,AGV 进行充电操作。甘特图可以直观地显示所提模型和算法的有效性和正确性。

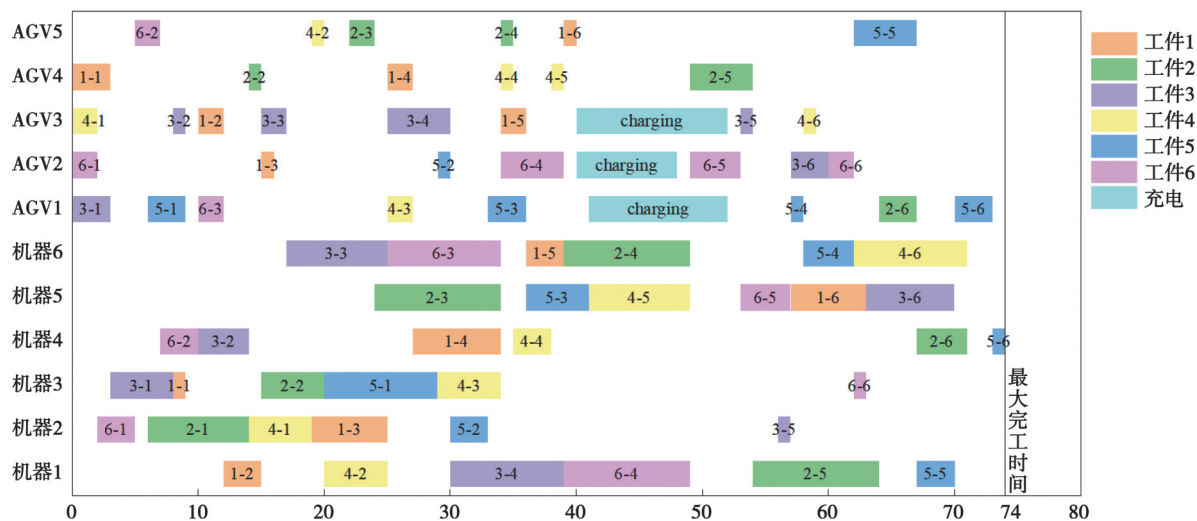


图 8 考虑多 AGV 充电的调度甘特图

Fig. 8 Gantt chart with AGVs charging

4 结束语

针对考虑多 AGV 充电的绿色作业车间多目标调度问题进行研究,建立了考虑 AGV 电量和充电的绿色作业车间调度模型,并设计了集成工件调度和运输任务 AGV 分配的集成遗传编码方式,设计相应的改进遗传算法进行求解,实验结果显示 AGV 数量对完工时间和能耗都有巨大的影响。相同 AGV 数量条件下,AGV 电量越低,充电次数就越多,完工时间和能耗就越多,并进一步分析了设备空闲能耗和 AGV 空载能耗与 AGV 数量的关系。

在下一步的工作中,针对 AGV 充电站位置、AGV 不同电量和不同能耗,AGV 不同工况、AGV 速度不同对耗电量的影响,以及不同加工速度的设备加工能耗展开研究,同时再改进求解算法的收敛性和寻优能力。

参考文献

- [1] Mansouri S A, Aktas E, Besikci U. Green scheduling of a two-machine flowshop: Trade-off between makespan and energy consumption[J]. European Journal of Operational Research, 2016, 248(3): 772-788.
- [2] 王凌,王晶晶,吴楚格. 绿色车间调度优化研究进展[J]. 控制与决策, 2018, 33(3): 385-391.
Wang L, Wang J J, Wu C G. Advances in green shop scheduling and optimization[J]. Control and Decision, 2018, 33(3): 385-391. (in Chinese)
- [3] 蒋增强,左乐. 低碳策略下的多目标柔性作业车间调度[J]. 计算机集成制造系统, 2015, 21(4): 1023-1031.
Jiang Z Q, Zuo L. Multi-objective flexible job-shop scheduling based on low-carbon strategy[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2015, 21(4): 1023-1031. (in Chinese)
- [4] Piroozfard H, Wong K Y, Wong W P. Minimizing total carbon footprint and total late work criterion in flexible job shop scheduling by using an improved multi-objective genetic algorithm[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2018, 128: 267-283.
- [5] 姜天华. 基于灰狼优化算法的低碳车间调度问题[J]. 计算机集成制造系统, 2018, 24(10): 2428-2435.

- Jiang T H. Low-carbon workshop scheduling problem based on grey wolf optimization[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2018, 24(10): 2428-2435. (in Chinese)
- [6] 吴秀丽, 孙阳君. 机器多转速的柔性作业车间绿色调度问题[J]. 计算机集成制造系统, 2018, 24(4): 862-875.
- Wu X L, Sun Y J. Flexible job shop green scheduling problem with multi-speed machine[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2018, 24(4): 862-875. (in Chinese)
- [7] 李聪波, 沈欢, 李玲玲, 等. 面向能耗的多工艺路线柔性作业车间分批优化调度模型[J]. 机械工程学报, 2017, 53(5): 12-23.
- Li C B, Shen H, Li L L, et al. A batch splitting flexible job shop scheduling model for energy saving under alternative process plans[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(5): 12-23. (in Chinese)
- [8] 雷德明, 杨冬婧. 具有总能耗约束的柔性作业车间调度问题研究[J]. 自动化学报, 2018, 44(11): 2083-2091.
- Lei D M, Yang D J. Research on flexible job shop scheduling problem with total energy consumption constraint[J]. Acta Automatica Sinica, 2018, 44(11): 2083-2091. (in Chinese)
- [9] 李国民, 高亮, 李新宇. 不确定性环境下轨道自动导引车动态调度[J]. 中国机械工程, 2019, 30(8): 926-931.
- Li G M, Gao L, Li X Y. Dynamic scheduling of RGV under uncertain environments[J]. China Mechanical Engineering, 2019, 30(8): 926-931. (in Chinese)
- [10] Liu Z C, Guo S S, Wang L. Integrated green scheduling optimization of flexible job shop and crane transportation considering comprehensive energy consumption[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 211: 765-786.
- [11] 贺长征, 宋豫川, 雷琦, 等. 柔性作业车间多自动导引小车和机器的集成调度[J]. 中国机械工程, 2019, 30(4): 438-447.
- He C Z, Song Y C, Lei Q, et al. Integrated scheduling of multiple AGVs and machines in flexible job shops[J]. China Mechanical Engineering, 2019, 30(4): 438-447. (in Chinese)
- [12] 刘二辉, 姚锡凡, 陶韬, 等. 基于改进花授粉算法的共融AGV作业车间调度[J]. 计算机集成制造系统, 2019, 25(9): 2219-2236.
- Liu E H, Yao X F, Tao T, et al. Improved flower pollination algorithm for job shop scheduling problems integrated with AGVs[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2019, 25(9): 2219-2236. (in Chinese)
- [13] 付建林, 张恒志, 张剑, 等. 自动导引车调度优化研究综述[J]. 系统仿真学报, 2020, 32(9): 1664-1675.
- Fu J L, Zhang H Z, Zhang J, et al. Review on AGV scheduling optimization[J]. Journal of System Simulation, 2020, 32(9): 1664-1675. (in Chinese)
- [14] Heger J, Voss T. Reducing mean tardiness in a flexible job shop containing AGVs with optimized combinations of sequencing and routing rules[J]. Procedia CIRP, 2019, 81: 1136-1141.
- [15] Heger J, Voß T. Dynamic priority based dispatching of AGVs in flexible job shops[J]. Procedia CIRP, 2019, 79: 445-449.
- [16] 徐云琴, 叶春明, 曹磊. 具有行为效应的含AGV柔性车间调度研究[J]. 计算机应用研究, 2019, 36(10): 3033-3038.
- Xu Y Q, Ye C M, Cao L. Research on flexible Job-Shop scheduling problem with AGV constraints and behavioral effects[J]. Application Research of Computers, 2019, 36(10): 3033-3038. (in Chinese)
- [17] 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 Q H, Liang X L, Liu X Y, 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. (in Chinese)
- [18] 胡晓阳, 姚锡凡, 黄鹏, 等. 改进迭代局部搜索算法求解多AGV柔性作业车间调度问题[J]. 计算机集成制造系统, 2022, 28(7): 2198-2212.
- Hu X Y, Yao X F, Huang P, et al. Improved iterative local search algorithm for solving multi-AGV flexible job shop scheduling problem[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2022, 28(7): 2198-2212. (in Chinese)
- [19] 成丽新, 唐秋华, 张利平. 基于基因表达式编程的单AGV加工车间调度规则生成[J]. 现代制造工程, 2020(1): 43-49.
- Cheng L X, Tang Q H, Zhang L P. Single AGV job shop dispatching rule generation based on gene expression programming[J]. Modern Manufacturing Engineering, 2020(1): 43-49. (in Chinese)
- [20] Xu W X, Guo S S, Xu W X, et al. A multi-objective and multi-dimensional optimization scheduling method using a hybrid evolutionary algorithms with a sectional encoding mode[J]. Sustainability, 2019, 11(5): 1329-1339.

- [21] Wang F L, Zhang Y, Su Z Q. A novel scheduling method for automated guided vehicles in workshop environments[J]. International Journal of Advanced Robotic Systems, 2019, 16(3): 1729881419844152.
- [22] 王真, 王晨曦, 王宇豪, 等. 车间多载自动导引车绿色物流调度[J]. 重庆大学学报, 2020, 43(1): 44-52.
Wang Z, Wang C X, Wang Y H, et al. On multi-load AGV green logistics scheduling in knitting workshop[J]. Journal of Chongqing University, 2020, 43(1): 44-52. (in Chinese)
- [23] 戴敏, 张玉伟, 曾励. 绿色作业车间机器与 AGV 的集成调度研究[J]. 南京航空航天大学学报, 2020, 52(3): 468-477.
Dai M, Zhang Y W, Zeng L. Integrated scheduling of machines and AGVs in green job shop[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2020, 52(3): 468-477. (in Chinese)
- [24] Dai M, Tang D B, Giret A, et al. Multi-objective optimization for energy-efficient flexible job shop scheduling problem with transportation constraints[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2019, 59: 143-157.
- [25] Dehnavi-Arani S, Sabaghian A, Fazli M. A job shop scheduling and location of battery charging storage for the automated guided vehicles (AGVs)[J]. Journal of Optimization in Industrial Engineering, 2019, 12(2): 121-129.
- [26] 李峥峰, 刘阳阳. 考虑充电的多 AGV 的作业车间调度问题[J]. 计算机集成制造系统, 2021, 27(10): 2872-2879.
Li Z F, Liu Y Y. Job shop scheduling considering multiple AGVs with charging[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2021, 27(10): 2872-2879. (in Chinese)
- [27] 张超勇, 饶运清, 刘向军, 等. 基于 POX 交叉的遗传算法求解 Job-Shop 调度问题[J]. 中国机械工程, 2004, 15(23): 2149-2153.
Zhang C Y, Rao Y Q, Liu X J, et al. An improved genetic algorithm for the job shop scheduling problem[J]. China Mechanical Engineering, 2004, 15(23): 2149-2153. (in Chinese)

(编辑 詹燕平)