

DOI: 10.3969/j.issn.1001-4551.2024.02.016

考虑 AGV 运输和机器转速的作业车间绿色调度研究*

李峥峰¹, 张东方¹, 丁其聪¹, 张国辉²

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

摘要: 在车间实际生产中, 机器在加工状态和空载状态下都需要消耗能量, 且机器在不同转速下的能耗也不同。此外, 随着自动导引车 (AGV) 在车间的广泛应用, 其能耗也不可忽略, 因此对考虑 AGV 和机器转速的作业车间绿色调度问题进行研究具有重要意义。完工时间不仅被认为是表示车间生产效率的指标, 而且在一定程度上意味着机器空载能耗的减少、机器利用率的提高。为此, 对考虑 AGV 运输和机器转速的作业车间完工时间和能耗优化问题进行了研究。首先, 对作业车间机器的能耗、AGV 能耗进行了分析, 探讨了 AGV、工件和机器之间的工艺约束, 建立了考虑 AGV 运输和机器转速的作业车间绿色调度模型; 然后, 采用两阶段优化的方式分别对完工时间和车间总能耗进行了优化, 在第一阶段, 机器以最高转速进行了加工, 采用改进麻雀搜索算法对其最大完工时间进行了优化; 在第二阶段, 在保证第一阶段优化得到的完工时间最小值不变的前提下, 提出了一种间隙档位调整策略, 通过降低部分工序的机器转速来降低车间能源消耗, 实现对车间总能耗的优化; 最后, 采用标准用例对算法进行了仿真实验。研究结果表明: 在第一阶段采用改进麻雀搜索算法, 提高了种群质量, 加快了算法的收敛速度, 算法具有较强的跳出局部最优能力; 第二阶段在保证完工时间的基础上, 采取间隙档位调整策略来降低能耗, 通过 10 个用例测试表明能耗可减少 1.13% ~ 5.18%。该结果验证了考虑 AGV 和机器转速绿色调度模型的正确性以及改进麻雀算法的有效性。

关键词: 作业车间完工时间; 能耗优化问题; 绿色调度; 麻雀搜索算法; 机器转速; 间隙档位调整策略; 自动导引车

中图分类号: TH186; TP18

文献标识码: A

文章编号: 1001-4551(2024)02-0327-10

Green scheduling of job shop considering AGV transportation and machine speed

LI Zhengfeng¹, ZHANG Dongfang¹, DING Qicong¹, ZHANG Guohui²

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

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

Abstract: In actual production in the workshop, energy of machine will be consumed not only in the processing state, but also in the no-load state, and the energy consumption of machines will vary at different processing speed. In addition, with the wide application of automated guided vehicle (AGV) in workshops, its energy consumption can not be ignored, therefore the research on green scheduling of job shops considering AGV and machine speed is of great significance. Makespan is not only regarded as the efficiency indicator of workshop production, but also, to a certain extent, means the reduction indicator of machine energy consumption in no-load state and the improvement indicator of machine utilization. Based on this, the makespan and energy consumption optimization problem of the job shop considering AGV transportation and machine speed was studied. Firstly, the machine energy consumption and AGV energy consumption of job shop were analyzed, and the process constraints among AGV, job and machine were explored. And the green job shop scheduling model considering AGV transportation and machine speed was established. Then, the two-stage optimization method was adopted to optimize makespan and energy consumption of job shop. In the first stage, the machine processed at the highest speed and used an improved sparrow search

收稿日期: 2023-05-08

基金项目: 国家自然科学基金联合基金资助项目 (U1904167); 教育部人文社会科学规划基金资助项目 (18YJAZH125); 河南省科技攻关项目 (182102210515); 河南省高校科技创新团队 (21IRTSTHN018); 河南省高等学校重点科研项目计划 (19A460034)

作者简介: 李峥峰 (1976 -), 男, 河南许昌人, 博士, 高级工程师, 硕士生导师, 主要从事智能制造、车间调度、智能算法方面的研究。E-mail: zhengfengli@yeah.net

algorithm to optimize makespan; in the second stage, while the makespan optimized in the first stage remained unchanged, the gap gear adjustment strategy was proposed to reduce energy consumption in job shop by reducing the machine speed of some processes to achieve optimization of the total energy consumption in job shop. Finally, the algorithms were simulated and verified using standard use cases through simulation. The experimental results show that in the first stage, the improved sparrow search algorithm can improve the quality of the population, accelerate the convergence speed of the algorithm, jump out of the local optimal solution, and obtain better makespan. In the second stage, on the basis of above makespan, the gap adjustment strategy is adopted to reduce the energy consumption, and the energy consumption can be reduced by 1.13% ~ 5.18% through 10 use cases. The results verify the correctness of the green scheduling model considering AGV and machine speed and the effectiveness of the improved sparrow algorithm.

Key words: job shop completion time; energy consumption optimization problem; green scheduling; sparrow search algorithm; machine speed; gap adjustment strategy; automated guided vehicle (AGV)

0 引 言

在制造车间中,机器被用于切削加工的时间在整个生产过程中所占比例较低,大部分时间被浪费在非加工过程。有研究表明,零件加工以外的时间能占到整个生产过程的95%,其中工件的运输时间更是占了大部分^[1],因此在车间生产过程中,运输过程不可忽略。同时,自动导引车(automated guided vehicle, AGV)逐渐成为车间生产中常用的运输工具,在车间中得到了广泛应用。

随着我国制造业的迅速发展,能源的消耗量也在与日俱增。研究表明,机器的待机能耗在整个加工过程中占比较高,以加工中心为例,非加工过程能量消耗占比高达40%以上^[2-3]。此外,工件运输过程中,AGV的能量消耗也不可忽略。车间生产调度作为智能制造系统的重要环节,其通过合理调度各类资源,以达到提高生产效率、节约成本、降低能耗的目的。

作业车间调度是一种常见的车间生产调度问题,开展针对作业车间绿色调度问题的研究具有重要意义。

在车间各种能耗中,由于机器能耗占据车间总能耗的比重较大,因此,近年来国内外有学者从优化机器能耗的角度对车间绿色调度问题进行了研究。整体来看,目前对于车间绿色调度问题中优化机器能耗的研究,主要从两个大的方面进行:1)设置机器关机/重启的车间绿色调度;2)调整机器转速的车间绿色调度。

对于设置机器关机/重启的车间绿色调度,能够使闲置等待时间较长的机器及时关机,节省能耗。然而,机器频繁地关机/重启,不仅对机器闲置等待的时长有要求,而且还会影响机器的使用寿命。而通过调整机器转速则可以避免这些问题的产生,并且机器转速的改变不仅影响工序的实际加工时间,对相应工序的机

器能耗也将产生较大影响。因此,对考虑机器转速的车间绿色调度问题的研究逐渐引起了学者的关注。

ZHU H 等人^[4]采用多目标离散水波优化算法(multi-objective discrete water wave optimization, MODWVO)研究了机器加工速度可变的多目标作业车间绿色调度问题。WU X 等人^[5]研究了考虑机器加工速度的流水车间绿色调度问题。GAO Z 等人^[6]采用改进蛙跳算法研究了机器加工速度可变的混合流水车间绿色调度问题。张国辉等人^[7]采用改进遗传算法求解了考虑机器速度的柔性作业车间绿色调度问题。吴秀丽等人^[8]采用带精英策略的非支配排序遗传算法 II(non-dominated sorting genetic algorithm-II, NSGA-II),求解了考虑机器转速的柔性作业车间绿色调度问题。

综上所述,目前对于调整机器转速的车间绿色调度问题的研究还不是很丰富,并且一些研究者为了便于求解,对模型进行了简化,忽略了工件在加工机器之间运输的过程。这显然是不合理的,特别是当机器之间的距离较远、运输时间较长时,运输过程更不可忽略。

AGV 在车间的广泛应用,减轻了工人的劳动强度,提高了车间生产的智能化程度。同时 AGV 的引入也带来了 AGV 的任务分配问题,使问题的求解更加复杂,引起了广大研究者的关注。

XU Y 等人^[9]采用改进粒子群优化算法研究了考虑 AGV 运输的柔性作业车间调度问题。HAI Y M 等人^[10]研究了作业车间 AGV 与机器双资源集成调度问题,并通过实验对 AGV 与机器双资源集成调度策略的有效性进行了验证。LIU Q 等人^[11]研究了考虑 AGV 运输的柔性作业车间双资源集成调度问题,并采用改进遗传算法对完工时间进行了优化。马千惠等人^[12]采用改进 NSGA-II 算法,研究了 AGV 和机器双约束的柔性作业车间多目标优化问题。周鑫^[13]在考虑 AGV 运输的基础上,采用改进遗传算法研究了柔性作业车

间调度问题,并实现了对完工时间的优化目的。

综合以上文献可知,尽管已有学者研究了考虑AGV运输的车间调度问题,并取得了一定成果,但是从绿色调度的角度研究考虑AGV运输的车间调度问题的文献较少,特别是考虑AGV运输和机器转速的车间绿色调度问题的研究,几乎没有相关文献。在车间实际生产过程中,机器转速的改变会影响工序的完工时间和相应的机器能耗。通常来说,工序在机器上加工时,机器转速越高,完工时间越小,但相应的机器能耗越高。此外,随着企业对准时化交货期要求的不断提高,车间对工件运输准时性的要求也不断提高。如果只考虑加工过程而忽视运输过程,则会导致工件无法按时运送到相应机器上,影响生产进度。

基于此,笔者以作业车间为研究对象,对考虑AGV运输和机器转速的作业车间绿色调度问题展开研究。

由于最大完工时间 C_{\max} 和总能耗 E 这两个指标存在冲突关系,且最大完工时间 C_{\max} 在企业中占据主导地位,此外最大完工时间的减少也侧面反映了车间公共系统能耗和机器空载能耗的减少,缩短最大完工时间在一定程度上减少了车间总能耗。基于此,笔者采用两阶段优化的方式分别对最大完工时间和总能耗进行优化。

第一阶段,机器以最高转速进行加工,采用改进的麻雀搜索算法(sparrow search algorithm, SSA)优化车间最大完工时间;第二阶段,在保证第一阶段优化得到的最大完工时间最小值不变的前提下,提出一种间隙档位调整策略(gap gear adjustment strategy, GGAS),通过降低部分工序的机器转速来降低能源消耗,实现对总能耗的优化;最后,通过实验对改进麻雀搜索算法的有效性进行了验证,并对算法改进策略及间隙档位调整策略的有效性进行了验证。

1 考虑AGV运输和机器转速的车间调度问题

1.1 问题描述

考虑AGV运输和机器转速的作业车间绿色调度问题描述如下:有 n 个工件在 m 台机器上加工,每个工件 i 包含 h_i 道工序,每台机器有 d 个档位,且不同的档位对应不同的转速和功率;每道工件工序 O_{ij} 所在的加工机器已知,且可以使用该机器的所有档位,同时有 r 辆AGV小车负责把工件运输到相应的机器上进行加工;机器分为加工状态和空载状态,两种状态的功率不同;AGV分为负载运输和空载运输,两种运输的功

率也不同。

此外,该问题还需要满足以下假设条件:

- 1) 在0时刻,所有机器、工件与AGV均已准备就绪;
- 2) 机器的档位一旦确定,在加工过程中不允许改变;
- 3) 同一机器以不同的档位进行加工时,加工时间和机器的能耗也不同;
- 4) 机器间存在无限大的缓冲区;
- 5) 所有AGV和工件的初始位置均在装载区 M_0 ,最终位置均在卸载区 M_{m+1} ;
- 6) AGV完成运输任务后停靠在机器旁,等待下一次运输任务;
- 7) AGV小车空载和负载速度相同;
- 8) 任一时刻,一台AGV只能运输一个工件,一个工件也只能被一台AGV运输;
- 9) AGV电量充足;
- 10) 工件的装卸时间包含在加工时间中;
- 11) 每个工件必须在前一道工序加工完毕后才可运输至下一台机器上进行加工。

1.2 两阶段目标函数及调度模型

笔者采用两阶段优化的方式依次对最大完工时间 C_{\max} 和总能耗 E 进行优化。第一阶段,采用改进的麻雀搜索算法优化企业最重要的指标 C_{\max} ;第二阶段,在保证第一阶段优化得到的 C_{\max} 最小值不变的基础上,采用间隙档位调整策略,对 E 进行优化。

两阶段优化的目标函数如下:

- 1) 最大完工时间最小。其表达式如下:

$$\min C_{\max} = \min(\max C_{ij}) \quad (1)$$

式中: C_{\max} 为最大完工时间; i 为工件编号; j 为工序编号; C_{ij} 为工件 i 的 j 工序的完工时间。

2) 车间总能耗最小。车间的总能耗包括机器加工能耗 E_1 、机器空载能耗 E_2 、AGV运输能耗 E_3 和车间公共系统的能耗 E_4 四部分。

①机器加工能耗 E_1 。其由加工功率和加工时间的乘积表示如下:

$$E_1 = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{h_i} \sum_{q=1}^d P_{M_{ij}q} T_{ijM_{ij}q} Y_{M_{ij}q} \quad (2)$$

式中: n 为工件数量; j 为工序编号; h_i 为工件 i 的工序数; M_{ij} 为工序 O_{ij} 的加工设备; q 为机器的档位编号, $q \in \{1, 2, \dots, d\}$; d 为机器的档位数; $P_{M_{ij}q}$ 为工序 O_{ij} 在机器 M_{ij} 以档位 q 加工时的功率; $T_{ijM_{ij}q}$ 为工序 O_{ij} 在机器 M_{ij} 上以档位 q 加工的加工时间; $Y_{M_{ij}q}$ 为机器 M_{ij} 是否以档位 q 加工的工件,若是则 $Y_{M_{ij}q} = 1$,否则 $Y_{M_{ij}q} = 0$;

②机器的空载能耗 E_2 。其由机器空载功率和机器前后两道相邻工序之间存在的加工间隙时长的乘积表示如下：

$$E_2 = \sum_{i,i'=1}^n \sum_{j,j'=1}^{h_i} \sum_{q,q'=1}^d P_{M_{ijq}}^e (S_{ijM_{ijq}} - C_{i'j'M_{ijq'}}) Y_{i'j'M_{ij}} \quad (3)$$

式中： $P_{M_{ijq}}^e$ 为机器 M_{ij} 以档位 q 空载运行时的功率； $S_{ijM_{ijq}}$ 为工序 O_{ij} 在机器 M_{ij} 上以档位 q 加工的开始时间； $C_{i'j'M_{ijq'}}$ 为与工序 O_{ij} 在同一机器 M_{ij} 上的上一个工件工序 $O_{i'j'}$ 以档位 q' 加工的结束时间； $Y_{i'j'M_{ij}}$ 为若同一机器 M_{ij} 上相邻两道工序 $O_{i'j'}$ 比工序 O_{ij} 提前加工，则 $Y_{i'j'M_{ij}} = 1$ ，否则 $Y_{i'j'M_{ij}} = 0$ ；

③AGV 运输能耗 E_3 。其包括负载运输阶段能耗和空载运输阶段能耗，可表示如下：

$$E_3 = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{h_i} \sum_{l=1}^r (P_A^e T_{l-pos-Mi(j-1)} + P_A T_{l-Mi(j-1)-Mij}) Y_{Al} \quad (4)$$

式中： l 为 AGV 的编号， $l \in \{1, 2, \dots, r\}$ ； r 为 AGV 数量； P_A^e 为 AGV 小车空载运输时的功率； P_A 为 AGV 小车负载运输时的功率； Y_{Al} 为工件是否由 AGV 小车 A_l 运输，若是则 $Y_{Al} = 1$ ，否则 $Y_{Al} = 0$ ； $T_{l-pos-Mi(j-1)}$ 为 AGV 小车 A_l 从当前位置到机器 $M_{i(j-1)}$ 的时间； $T_{l-Mi(j-1)-Mij}$ 为 AGV 小车 A_l 从机器 $M_{i(j-1)}$ 位置到机器 M_{ij} 的时间；

④车间公共系统能耗 E_4 。车间的照明、通风等的能耗，由公共系统功率和最大完工时间的乘积表示如下：

$$E_4 = P_0 C_{\max} \quad (5)$$

式中： P_0 为车间公共系统功率。

因此，车间总能耗 E 为：

$$E = E_1 + E_2 + E_3 + E_4 \quad (6)$$

AGV 负载运输开始时间受 AGV 可用时刻、AGV 从当前位置到工件上道工序加工机器的时间和工件上道工序完工时间的约束。

其约束公式如下：

$$A_{l-start} = \max \{ A_{l-able} + T_{l-pos-Mi(j-1)}, C_{i(j-1)} \} \quad (7)$$

式中： $A_{l-start}$ 为 AGV 小车 A_l 负载运输工件的开始时刻； A_{l-able} 为 AGV 小车 A_l 可用时刻； $C_{i(j-1)}$ 为工序 $O_{i(j-1)}$ 完工时间。

AGV 负载运输完成时间约束公式如下：

$$A_{l-end} = A_{l-start} + T_{l-mi(j-1)-Mij} \quad (8)$$

式中： A_{l-end} 为 AGV 小车 A_l 负载运输工序 $O_{i(j-1)}$ 到下一道工序 O_{ij} 加工机器的完成时刻。

工序 O_{ij} 在机器 M_{ij} 上的开始加工时间受 AGV 可用时刻、AGV 从当前位置到机器 $M_{i(j-1)}$ 时间、AGV 从工件上道工序所在机器 $M_{i(j-1)}$ 到机器 M_{ij} 的时间、工件

上道工序完工时间、机器 M_{ij} 上一道工序 $O_{i'j'}$ 完工时间的约束。其约束公式如下：

$$S_{ijM_{ijq}} = \max \{ A_{l-able} + T_{l-pos-Mi(j-1)} + T_{l-Mi(j-1)-Mij}, C_{i(j-1)Mi(j-1)q} + T_{l-Mi(j-1)-Mij}, C_{i'j'M_{ijq'}} \} \quad (9)$$

工序 O_{ij} 的完工时间约束公式如下：

$$C_{ijM_{ijq}} = S_{ijM_{ijq}} + T_{ijM_{ijq}} \quad (10)$$

式中： $C_{ijM_{ijq}}$ 为工序 O_{ij} 在机器 M_{ij} 上以档位 q 加工的结束时间。

同一工件的工序间有加工先后约束关系，其约束公式如下：

$$C_{i(j+1)Mi(j+1)q} - C_{ijM_{ijq}} \geq T_{ijM_{ijq}} \quad (11)$$

机器的加工档位一旦确定，在加工过程中不允许改变，其约束公式如下：

$$\sum_{q=1}^d Y_{M_{ijq}} = 1 \quad (12)$$

一道工序只能由一辆 AGV 进行运输，其约束公式如下：

$$\sum_{l=1}^r Y_{Al} = 1 \quad (13)$$

2 改进麻雀搜索算法求解

麻雀搜索算法是由 XUE J 等人^[14]于 2020 年提出的一种新型群智能优化算法，其具有参数设置简单、寻优能力强和易于实现等优点，在解决优化问题时具备良好的性能。

麻雀搜索算法根据麻雀个体分工不同，将种群分为发现者、加入者。发现者负责为种群寻找食物，指引种群觅食方向；加入者跟随发现者进行觅食。同时，该方法设立侦察预警机制用来躲避危险。

麻雀搜索算法自提出以来已经得到了广泛的应用，并在路径规划、电动汽车充电站规划、故障诊断和车间调度等领域已经取得了一些研究成果。

笔者根据作业车间的问题模型和特点，提出一种改进麻雀搜索算法(improved sparrow search algorithm, ISSA)，求解考虑 AGV 运输和机器转速的作业车间绿色调度问题。

2.1 离散化编码

2.1.1 编码机制

笔者采用基于工序的编码方式。由于 AGV 小车需要在装载区、机器和卸载区之间运输工件，因此，每个工件的运输任务数比该工件工序数多 1。

为了使工序数和 AGV 的运输任务数统一，笔者为每个工件增加一道虚拟工序，并把卸载区假设为该虚

拟工序的虚拟机器。虚拟工序在虚拟机器上的加工时间为0,工序编码染色体的长度为总工序数+总工件数。

假设车间有2个工件,第一个工件有2道工序,第二个工件有3道工序,则工序编码染色体的长度为总工序数与总工件数之和7。

其中一个编码方案如图1所示。

1	2	1	2	1	2	2
---	---	---	---	---	---	---

图1 工序编码

Fig.1 Encoding based on operation

图1中,元素值表示工件号,从左到右元素出现的次数表示该工件的第几道工序。比如1表示工件1,其中第一个1表示工件1的第一个工序,第二个1表示工件1的第二道工序。

2.1.2 转换机制

麻雀搜索算法的解是连续值,而作业车间调度问题的解是离散值。为了使麻雀搜索算法适用于作业车间调度问题,需要将连续的解转换为离散的解。针对工序序列,常用的转换规则有排序顺序值(rank order value, ROV)转换规则和最大位置值(largest position value, LPV)转换规则,但这两种转换规则只能解决所有工件具有相同工序数的问题,具有一定的局限性。基于此,笔者设计一种排列顺序转换(sort order conversion, SOC)规则对工序序列进行解空间的转换,不论工件的工序数量是否相同,该转换规则都可以实现连续值到离散工序的转换。

具体操作过程为:首先根据工件号从小到大的顺序,获取工件号*i*及其工序数*j*,然后按从小到大的顺序把相应位置*j*个解转换为工件号*i*,直到所有工序完成转换,这样得到了基于工序编码的离散解,工件号出现的次序就代表其加工工序。

其转换过程如图2所示。

A	5.6	-2.3	6.5	7.1	2.5	-7.1	-6.2	0.5	9.3
B	2	1	2	2	1	1	1	1	2

图2 SOC 工序编码转换

Fig.2 SOC operation encoding conversion

图2以两个工件为例:第一个工件有5道工序,从连续解A序列中找到5个最小的值,把对应位置的B值设置为1;第二个工件有4道工序,在连续解A中剩下的序列中找到最小的4个值,把对应位置B的值设置为2,按工件号依次完成所有的工件工序的转换。B中工件号出现的次序就表示该工件的工序。

2.2 解码

编码完成后还需要进行解码,才能得到具体的调度方案。对工序编码序列从左往右依次解码,得到相应的工序 O_{ij} 和该工序对应的机器以及加工时间。由于上述编码方法仅涉及工序编码,并未涉及AGV编码,因此,在解码时需要考虑AGV的任务分配问题。

针对AGV任务分配问题,笔者采用“先到先搬运”的启发式规则进行AGV的任务分配。

具体步骤如下:

- 1) 依次读取工序编码序列的每一个基因,转换为相应的工序 O_{ij} ;
- 2) 根据工序编码依次获得每道工序的加工设备;
- 3) 根据每道工序的加工设备依次获得每道工序对应的运输任务,获得运输起止点和运输时间;
- 4) 找出工序 O_{ij} 前一道工序所在机器 $M_{i(j-1)}$,若 $j=1$,此时工件还在装载区 M_0 位置,则 $M_{i(j-1)}=M_0$ 。根据AGV当前位置和AGV完成本次运输任务的结束时间,在所有AGV中选择最早到达 $M_{i(j-1)}$ 的AGV*l*。如果满足最早到达条件的AGV*l*不止一台,则从中随机选择一台;如果AGV*l*已经在机器 $M_{i(j-1)}$ 处,转至6),否则转至5);
- 5) 将AGV*l*从原来位置移动到机器 $M_{i(j-1)}$;
- 6) AGV*l*将工件*i*从机器 $M_{i(j-1)}$ 运输到机器 M_{ij} ;
- 7) 由式(7)和AGV*l*运输时间,更新AGV*l*可用时刻 A_{l-able} 和AGV*l*当前位置;
- 8) 是否全面解码完毕:是跳转9),否跳转1);
- 9) 结束。

2.3 初始化种群

标准麻雀搜索算法采用随机初始化方式生成初始种群。随机初始化虽然简单易操作,但是也会造成生成的种群个体分布较随机、种群质量不高,影响收敛速度。而反向学习策略通过生成当前种群个体的反向个体,并对个体进行评估,挑选较优个体组成新的种群,可以提高种群个体的质量,加快收敛速度^[15]。

基于此,笔者采用反向学习策略生成麻雀初始种群,提高种群质量,加快算法收敛速度。

其实现过程为:随机生成初始种群 $X_u = [x_{u1}, x_{u2}, \dots, x_{ud}]$, $u=1, 2, \dots, N$ 。其中: N 表示种群规模, u 表示个体, D 表示维数。

则 X_u 对应的反向种群 $X_u^* = [x_{u1}^*, x_{u2}^*, \dots, x_{ud}^*]$ 为:

$$X_u^* = rand \cdot (lb + ub) - X_u \quad (14)$$

式中: lb, ub 为搜索空间的上下界。

将生成的反向种群和原初始种群合并成一个新的

种群,并按照适应度值对新种群个体进行排序,从中挑选出前 50% 适应度较好的个体,将其作为新的麻雀初始种群。

2.4 局部搜索策略

麻雀种群中的发现者负责为种群寻找食物源、提供觅食方向,加入者通过跟随发现者来获取食物。因此,发现者的位置在很大程度上决定着整个种群能否获取足够的食物,有必要对发现者进行深度发掘,扩大其搜索范围,进行细致搜索以寻求更优位置。而局部搜索能够通过小的局部变化来改进给定的解决方案^[16]。

基于此,笔者在发现者位置更新后提出一种局部搜索策略,对发现者进行深度发掘以寻求更优位置。局部搜索策略具体操作为:在发现者位置更新后,于当前个体位置向量中随机选择四个不同的位置,对这四个位置的元素进行重新排列产生另外 23 个可行解,如图 3 所示。

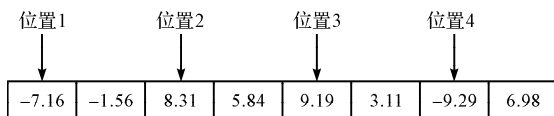


图 3 局部搜索策略

Fig. 3 Local search strategy

位置 1、位置 2、位置 3 和位置 4 共有 24 种排列方式。对这四个位置的元素进行排列可以产生另外 23 个可行解,选取其中最优的个体进入下一次迭代。

2.5 模拟退火算法

麻雀搜索算法在迭代后期易陷入局部最优,而模拟退火算法能够以一定概率接受比原个体差的新个体,使算法跳出局部最优的“陷阱”^[17]。笔者在麻雀搜索算法后引入模拟退火算法作用于种群前 2% 最优个体。

模拟退火算法操作如下:

1) 初始化参数设置;

2) 根据初始解 S 得到新解 S' , 比较新解适应度值 $f(S')$ 和初始解适应度值 $f(S)$ 的大小。如果 $f(S') < f(S)$, 则令 $S = S'$, 否则按下式计算新解 S' 的接受概率:

$$\exp(-(f(S') - f(S))/T) \quad (15)$$

式中: T 为当前温度。

其中: 若 $\exp(-(f(S') - f(S))/T) > \varepsilon$ (ε 表示 0 到 1 之间的随机数), 则令 $S = S'$, 否则保留当前解 S ;

3) 按照降温公式对当前温度进行降温迭代:

$$T_0 = T_0 \times rate \quad (16)$$

式中: T_0 为初始温度; $rate$ 为降温速度;

4) 判断当前温度是否小于设定终止温度, 若是, 则结束, 输出最优解, 否则跳转步骤 2)。

3 间隙档位调整策略

设定机器有 1、2、3 三个转速档位, 且以不同的档位加工时, 加工时长和相应的机器能耗也不同。第一阶段, 让所有机器以最高档 3 档进行加工, 此时加工速度最快, 采用改进的麻雀搜索算法优化最大完工时间。在第一阶段对最大完工时间实现优化之后, 在第二阶段提出一种间隙档位调整策略, 在保证第一阶段最大完工时间不变的前提下, 通过降低部分工序的机器档位, 降低能源消耗, 实现对总能耗的优化。

间隙档位调整策略的具体步骤如下:

1) 初始化机器档位编码元素全部为最高档位 3, 让所有工序以最高档 3 档进行加工, 找出最快完工时间 C_{max} ;

2) 依此读取工序编码序列的每一位基因, 转换成相应的工序 O_{ij} ;

3) 根据工序编码依次获得每道工序的加工设备以及标准加工时间 (标准加工时间即机器以 3 档加工的时间);

4) 当机器不是第一次被使用的时候, 此时机器前后两道相邻工序之间有存在加工间隙的可能, 若存在加工间隙, 则转 5), 否则转 11);

5) 判断机器前一道工序以最低档 1 档加工的加工时长是否小于等于机器前一道工序的标准加工时间与加工间隙之和, 若是则转 6), 否则转 8);

6) 判断机器前一道工序以最低档 1 档加工时, 是否会影响最快完工时间 C_{max} , 若是则转 8), 否则转 7);

7) 把机器前一道工序对应的档位编码元素设置为 1, 机器前一道工序以最低档 1 档进行加工;

8) 判断机器前一道工序以中间档 2 档加工的加工时长是否小于等于机器前一道工序的标准加工时间与加工间隙之和, 若是则转 9), 否则转 11);

9) 判断机器前一道工序以中间档 2 档加工时, 是否会影响最快完工时间 C_{max} , 若是则转 11), 否则转 10);

10) 把机器前一道工序对应的档位编码元素设置为 2, 对机器前一道工序以中间档 2 档进行加工;

11) 机器前一道工序对应的档位编码元素保持为 3 不变;

12) 工序编码序列基因是否读取完毕, 若是则转

13), 否则转 2);
13) 结束。

4 仿真实验与分析

4.1 实验环境及参数设置

实验在 Intel Core i5-5200U、2.20 GHz CPU、8.00 G RAM、Windows 10 64 位操作系统的笔记本电脑上运行。程序编译和运行环境为:MATLAB R2020a。

参数设置:种群大小为 100;算法最大迭代次数为 500;AGV 空载功率和负载功率分别为 0.12 kW 和 0.15 kW;机器有 3 个档位,给定档位系数[1.5, 1.2, 1]分别对应于 1、2、3 档,三个档位的加工时间分别为标准算例的时间乘以档位系数;机器的加工信息表参照文献[8]的部分数据,其中每台机器的功耗信息如表 1 所示。

表 1 中每台机器均有 3 个不同的档位,具有不同的加工功率和空载功率,机器档位越高所需功率越大。

4.2 算法有效性验证

为了验证改进麻雀搜索算法的有效性,笔者将改进麻雀搜索算法 (ISSA) 与标准麻雀搜索算法 (SSA) 以及文献[18]中的混合哈里斯鹰算法 (hybrid harris hawk optimizer, HHHO)、改进哈里斯鹰算法 (improved harris hawk optimizer, IHHO)、哈里斯鹰算法 (harris

表 1 每台机器的功耗信息

Table 1 Power of machine

机器 编号	功率 p/kW					
	档位 1		档位 2		档位 3	
	加工	空载	加工	空载	加工	空载
1	1.23	0.23	1.51	0.32	2.27	0.37
2	1.16	0.18	1.5	0.28	1.82	0.35
3	1.15	0.19	1.39	0.3	1.88	0.35
4	1.38	0.23	1.92	0.33	2.34	0.39
5	1.04	0.22	1.5	0.31	2.22	0.38
6	1.27	0.23	1.56	0.27	2.26	0.37
7	1.17	0.22	1.51	0.3	2.16	0.4
8	1	0.17	1.21	0.29	1.69	0.35
9	1.3	0.25	1.77	0.32	2.51	0.4
10	1.36	0.25	1.96	0.31	2.51	0.38
11	1.35	0.24	1.85	0.34	2.44	0.39
12	1.03	0.19	1.48	0.28	1.92	0.32
13	1.31	0.23	1.86	0.31	2.29	0.39
14	1.06	0.2	1.45	0.3	1.96	0.4
15	1.45	0.3	2.09	0.35	2.97	0.4

hawk optimizer, HHO)、灰狼优化算法 (grey wolf optimizer, GWO) 和鲸鱼优化算法 (whale optimization algorithm, WOA) 进行对比,对完工时间进行优化;每个算例运行 20 次,取 20 次的最优值和平均值进行比较。

各算法的对比实验结果如表 2 所示。

表 2 WOA、GWO、HHO、iHHO、HHHO、SSA 和 ISSA 算法运行结果

Table 2 Results of WOA, GWO, HHO, iHHO, HHHO, SSA, and ISSA algorithms

算例 名称	已知 最优解	WOA			GWO			HHO			iHHO			HHHO			SSA			ISSA		
		最优解	平均解	最优解 个数	最优解	平均解	最优解 个数	最优解	平均解	最优解 个数	最优解	平均解	最优解 个数	最优解	平均解	最优解 个数	最优解	平均解	最优解 个数	最优解	平均解	最优解 个数
FT06	55	55	57.3	5	55	57.65	5	55	56.55	8	55	58.3	2	55	55	20	55	57.75	2	55	55	20
FT10	930	1098	1178	0	1098	1179	0	1066	1178.9	0	1095	1154.95	0	976	1000.7	0	1176	1232.4	0	962	994.5	0
LA01	666	675	701.75	0	666	700.45	1	666	694.4	1	666	704.65	2	666	668.7	14	678	702.2	0	666	666	20
LA05	593	593	594.05	17	593	594.05	17	593	593.35	19	593	594.55	17	593	593	20	593	593	20	593	593	20
LA06	926	926	950.25	3	926	936.65	4	928	960.35	0	928	960.55	0	926	928.95	13	926	951.5	3	926	926	20
LA11	1222	1223	1270.9	0	1222	1256.45	3	1239	1292.2	0	1234	1299.95	0	1222	1230.7	11	1236	1277.1	0	1222	1222	20
LA16	945	1077	1130.05	0	1058	1123.75	0	1078	1122.3	0	1241	1288.35	0	946	984.5	0	1082	1113	0	956	985.93	0
LA21	1046	1296	1383.85	0	1290	1370.1	0	1293	1411.8	0	1313	1418.7	0	1132	1178.9	0	1353	1427.95	0	1100	1154.1	0
LA26	1218	1604	1660.45	0	1572	1619.55	0	1552	1623.7	0	1552	1629.95	0	1381	1396.4	0	1635	1703.36	0	1275	1328.6	0
LA36	1268	1620	1681.1	0	1622	1685.9	0	1634	1682.75	0	1626	1679.8	0	1365	1393.85	0	1695	1762.77	0	1351	1386.4	0

从表 2 可以看出:在求解 LA16 算例时,除 ISSA 算法稍逊于 HHHO 这一个算法外,ISSA 算法不论是求解最优值还是平均值,效果均优于其他 5 种算法;在求解另外 9 个算例时,DISSA 算法不论是求解最优值还是平均值,效果均优于其他 6 种算法。此外,ISSA 算法求解出的最优解的个数也多于其他算法。

综上所述,ISSA 算法具有更好的寻优能力和求解的稳定性。

4.3 算法改进策略有效性验证

此处算法的改进策略包括:1)采用反向学习策略初始化麻雀种群;2)在发现者位置更新后引入局部搜索策略;3)在麻雀搜索算法后引入模拟退火算法。

为验证算法改进策略的有效性,笔者采用上述三种改进策略依次对文献[18]中的 10 个作业车间标准算例进行仿真实验,对完工时间进行优化;每个算例运行 20 次,取 20 次的最优值和平均值进行比较。

麻雀搜索算法改进策略对比结果如表 3 所示。

表 3 麻雀搜索算法改进策略对比
Table 3 Comparison of improvement strategies in SSA

算例名称	已知最优解	SSA		SSA + IN		SSA + IN + LS		ISSA	
		最优解	平均解	最优解	平均解	最优解	平均解	最优解	平均解
FT06	55	55	57.75	55	57.6	55	55	55	55
FT10	930	1 176	1 232.4	1 133	1 203.6	1 004	1 049.4	962	994.5
LA01	666	678	702.2	677	700.14	666	671.45	666	666
LA05	593	593	593	593	593	593	593	593	593
LA06	926	926	951.5	926	943.6	926	926	926	926
LA11	1 222	1 236	1 277.1	1 227	1 276.2	1 222	1 222	1 222	1 222
LA16	945	1 082	1 113	1 064	1 110.3	982	1 020.9	956	985.93
LA21	1 046	1 353	1 427.95	1 323	1 427.56	1 107	1 182.7	1 100	1 154.1
LA26	1 218	1 635	1 703.36	1 624	1 688.43	1 310	1 347.75	1 275	1 328.6
LA36	1 268	1 695	1 762.77	1 642	1 752.6	1 400	1 459.73	1 351	1 432.4

注:SSA 为标准麻雀搜索算法;SSA + IN 为对 SSA 采用反向学习策略初始化改进后得到的算法;SSA + IN + LS 为在 SSA + IN 的基础上加入局部搜索策略得到的改进算法;ISSA 为该文算法,即 SSA 经反向学习策略初始化、局部搜索和模拟退火算法等一系列改进后得到的算法。

由表 3 实验结果可以看出,标准麻雀搜索算法经过反向学习策略初始化、局部搜索策略、模拟退火等一系列改进之后,算法的寻优能力和求解的稳定性逐步增强,尤其是加入局部搜索策略之后,优化效果最为显著。由此可以证明,该算法改进策略是有效的。

笔者分别选取 FT10 算例和 LA36 算例进行说明。其逐步改进策略的迭代曲线图分别如图 4、图 5 所示。

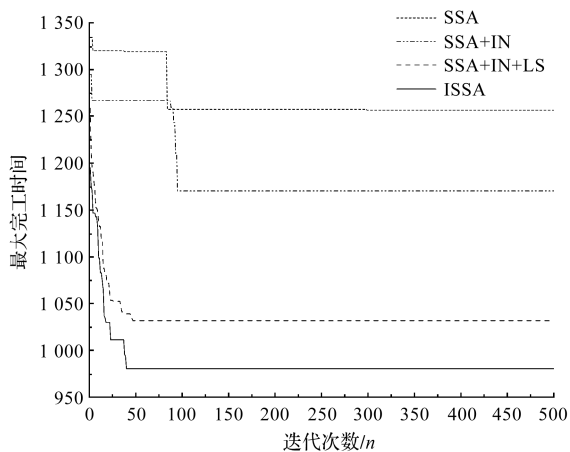


图 4 FT10 迭代曲线图
Fig.4 FT10 iteration curve

图 4 和图 5 显示:经过反向学习策略初始化改进之后,算法的收敛速度加快,在相同的迭代次数下,能够得到更优的结果;经过局部搜索策略之后,发现者通过扩大搜索范围,搜索到了更优的解;加入模拟退火算法之后,算法具有更强的跳出局部最优的能力。

4.4 间隙档位调整策略有效性验证

文献[19]2876 指出,运输时间越大,对完工时间的优化效果越明显;并且为了严格验证算法的有效性,选择运输时间最小的情况对算法有效性进行验证。

此处机器之间的距离越大,在 AGV 速度固定不变

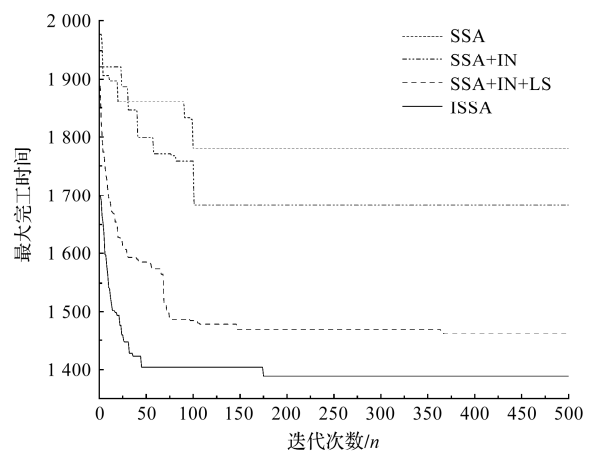


图 5 LA36 迭代曲线图
Fig.5 LA36 iteration curve

的情况下,运输时间也就越长,工件被运输到下一台机器 M 的时间将会越靠后,此时机器 M 上本道工序和前一道工序之间存在的加工间隙也就越大,机器 M 上前一道工序选择降档加工的可能性也就越大;反之,机器之间距离越小,运输时间越短,工件被运输到下一台机器 M 的时间将会越提前,此时机器 M 上本道工序和前一道工序之间存在的加工间隙也就越小,机器 M 上前一道工序选择降档加工的可能性也就越小。

为了严格验证上述间隙档位调整策略的有效性,笔者参照文献[19]2876,选择运输时间最小的情况,对间隙档位调整策略的有效性进行验证,即把装载区和卸载区抽象为机器,设置相邻两台机器之间的距离为单位 1,且单位距离运输时间为 1。

有研究表明^{[19]2877},当 AGV 数量达到工件数量的 80% 左右时,对完工时间的优化效果是最好的,此时 AGV 数量足够使用且不造成 AGV 的浪费。

因此,笔者设置 AGV 数量为工件数量的 80%,并

四舍五入取整。

第一阶段,机器以最高转速 3 档进行加工,采用改进麻雀搜索算法对最大完工时间进行优化;第二阶段,在保证第一阶段优化得到的最大完工时间最小值不变的前提下,使用间隙档位调整策略,对总能耗进行优化^[20-23]。

第一阶段和第二阶段优化结果对比如表 4 所示。

表 4 两阶段优化结果

Table 4 Optimization results in two stages

算例名称	第一阶段优化		第二阶段优化		E 降低率/%
	C_{max}	E	C_{max}	E	
FT06	68	545.29	68	527.67	3.23
FT10	1 065	13 046.99	1 065	12 371.19	5.18
LA01	672	6 851.31	672	6 749.853	1.48
LA05	599	5 580.22	599	5 458.455	2.18
LA06	932	9 693.71	932	9 569.4	1.28
LA11	1 244	12 820.48	1 244	12 704.201	1.13
LA16	1 021	13 718.72	1 021	13 222.028	3.62
LA21	1 228	19 822.67	1 228	19 326.729	2.5
LA26	1 351	25 139.03	1 351	24 454.826	2.72
LA36	1 449	30 276.26	1 449	29 178.109	3.63
平均					2.70

由表 4 可以看出:在第一阶段,机器全部以 3 档进行加工,加工速度最快,此时优化最大完工时间,得出最大完工时间的最小值和相应的车间总能耗;在第二阶段,在保证第一阶段最大完工时间不变的同时,使用间隙档位调整策略对部分工序的加工机器进行降档调整,实现了对车间总能耗的优化。

以 FT06 算例为例,在第一阶段对最大完工时间进行优化时,最大完工时间为 68,总能耗 545.29,其调度甘特图如图 6 所示。

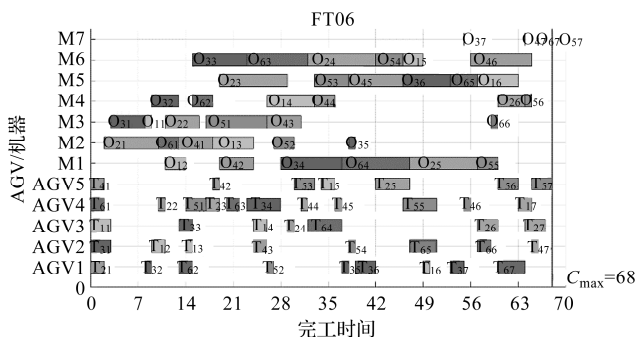


图 6 第一阶段优化的 FT06 甘特图
Fig. 6 Ganttchart of FT06 in the first stage

在第二阶段使用间隙档位调整策略之后,最大完工时间保持为 68 不变,总能耗降为 527.67,其调度甘特图如图 7 所示。

从图 6 和图 7 的对比可以看出:在完工时间不变

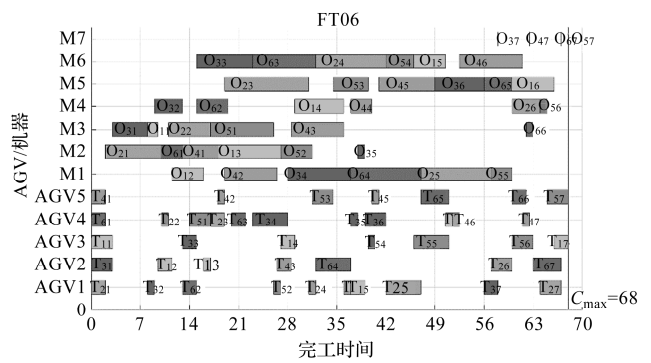


图 7 FT06 使用间隙档位调整策略的甘特图
Fig. 7 Ganttchart of FT06 with GGAS

的情况下,能耗仍然减少了 17.62,降低了 3.23%,实现了绿色调度的目的。

由此可以证明,间隙档位调整策略是有效的。

5 结束语

在考虑 AGV 运输和机器转速的基础上,笔者建立了作业车间绿色调度模型,并设计了反向学习策略、局部搜索策略、模拟退火算法等多种改进策略,采用改进麻雀搜索算法对调度模型进行了求解,采用两阶段优化的方式对完工时间和能耗优化进行了研究,通过部分 FT 和 LA 基准算例的仿真结果与其他算法进行了实验对比,验证了改进麻雀搜索算法的有效性。

研究结果表明:

1) 采用反向学习策略生成麻雀初始种群,提高了种群质量,加快了算法收敛速度;采用局部搜索策略和模拟退火可以提高麻雀算法的搜索深度,并获取较强的跳出局部最优的能力;

2) 采用两阶段优化的方式可以在完工时间优化后不改变的基础上,通过间隙档位调整策略降低机器加工速度,可以有效降低能耗。在 10 个算例测试中,能耗最高降低 5.18%,能耗最低降低 1.13%,能耗平均降低 2.70%;

3) 通过 FT 和 LA 基准用例,对麻雀算法改进前后及其他算法进行了实验对比,证明了改进麻雀算法的有效性,其寻优能力和求解速度有明显提升。在 10 个算例测试对比中,只有在 LA16 算例上,ISSA 性能略差于 HHHO 算法,在其他算例上,ISSA 性能均优于其他 6 种算法。

在目前的研究中,笔者没有考虑 AGV 的路径规划问题、AGV 的电量及其充电问题,也没有考虑机器的故障、AGV 故障等特殊情况,这些将是笔者下一步研究工作的主要内容。

参考文献 (References):

- [1] 张国辉. 柔性作业车间调度方法研究[D]. 武汉: 华中科技大学机械科学与工程学院, 2009.
ZHANG Guo-hui. Research on Flexible Job Shop Scheduling Method [D]. Wuhan: School of Mechanical Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, 2009.
- [2] LI C, TANG Y, CUI L, et al. A quantitative approach to analyze carbon emissions of CNC-based machining systems[J]. Journal of Intelligent Manufacturing, 2015, 26(5): 911-922.
- [3] KORDONOWY, D N. A Power Assessment of Machining Tools[M]. Massachusetts Institute of Technology, 2002.
- [4] ZHU H, JIANG T, WANG Y, et al. Multi-objective discrete water wave optimization algorithm for solving the energy-saving job shop scheduling problem with variable processing speeds [J]. Journal of Intelligent & Fuzzy Systems, 2021, 40(6): 10617-10631.
- [5] WU X, CHE A. Energy-efficient no-wait permutation flow shop scheduling by adaptive multi-objective variable neighborhood search[J]. Omega, 2020, 94(7): 102-117.
- [6] GAO Z, PENG J, HAN Z, et al. Flow shop scheduling with variable processing times based on differential shuffled frog leaping algorithm [J]. International Journal of Modelling, Identification and Control, 2019, 33(2): 179-187.
- [7] 张国辉, 党世杰. 考虑机器速度的低碳柔性作业车间调度问题研究[J]. 计算机应用研究, 2017, 34(4): 1072-1075.
ZHANG Guo-hui, DANG Shi-jie. Research on low-carbon flexible job shop scheduling problem considering machine speed [J]. Computer Application Research, 2017, 34(4): 1072-1075.
- [8] 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 Xiu-li, SUN Yang-jun. Green scheduling problem for flexible job shops with multiple machine speeds [J]. Computer Integrated Manufacturing System, 2018, 24(4): 862-875.
- [9] XU Y, YE C, CAO L. Research on flexible job-shop scheduling problem with AGV constraints [J]. Application Research of Computers, 2018, 35(11): 3271-3275.
- [10] HAI Y M, DONG L Y, QUE P F, et al. Dual-resource integrated scheduling method of AGV and machine in intelligent manufacturing job shop [J]. Journal of Central South University, 2021, 28(8): 2423-2435.
- [11] LIU Q, WANG N, LI J, et al. Research on flexible job shop scheduling optimization based on segmented AGV [J]. Computer Modeling in Engineering & Sciences, 2022, 134(3): 2073-2091.
- [12] 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 Qian-hui, LIANG Xiao-lei, LIU Xing-yu, et al. Research on multi-objective flexible job shop scheduling with multiple AGVs and machine integration [J]. Computer Engineering and Applications, 2023, 59(1): 278-290.
- [13] 周 鑫. 含有运输小车的柔性作业车间调度研究 [J]. 软件工程, 2021, 24(3): 16-19.
ZHOU Xin. Research on flexible job shop scheduling with transport trolley [J]. Software Engineering, 2021, 24(3): 16-19.
- [14] XUE J, SHEN B. A novel swarm intelligence optimization approach: sparrow search algorithm [J]. Systems Science & Control Engineering, 2020, 8(1): 22-34.
- [15] MA J M, CHEN H Y, SU R J, et al. Improved Firefly Algorithm and Its Application [C] // Proceedings of the 4th International Conference on Crowd Science and Engineering, 2019: 180-185.
- [16] BECKER C, GAUTHIER J B, GSCHWIND T, et al. In-depth analysis of granular local search for capacitated vehicle routing [J]. Discrete Applied Mathematics, 2023, 329(4): 61-86.
- [17] ZHANG R. A simulated annealing-based heuristic algorithm for job shop scheduling to minimize lateness [J]. International Journal of Advanced Robotic Systems, 2013, 10(4): 435-449.
- [18] 刘小宁, 魏 霞, 谢丽蓉. 混合哈里斯鹰算法求解作业车间调度问题 [J]. 计算机应用研究, 2022, 39(6): 1673-1677.
LIU Xiao-ning, WEI Xia, XIE Li-rong. Hybrid Harris eagle algorithm for solving job shop scheduling problems [J]. Computer Application Research, 2022, 39(6): 1673-1677.
- [19] 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 Zheng-feng, LIU Yang-yang. Job shop scheduling problem for multiple AGVs considering charging [J]. Computer Integrated Manufacturing System, 2021, 27(10): 2872-2879.
- [20] 张明伟, 牛占文. 考虑异质 AGV 运输的可变分批绿色作业车间调度 [J]. 机械设计, 2023, 40(4): 64-73.
ZHANG Ming-wei, NIU Zhan-wen. Variable batch green job shop scheduling considering heterogeneous AGV transportation [J]. Journal of Machine Design, 2023, 40(4): 64-73.
- [21] 刘 凯, 黄辉先, 赵 骥. 求解模糊作业车间调度问题的混沌乌鸦搜索算法 [J]. 传感器与微系统, 2021, 40(6): 110-113, 117.
LIU Kai, HUANG Hui-xian, ZHAO Ji. Chaos crow search algorithm for solving fuzzy job shop scheduling problems [J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2021, 40(6): 110-113, 117.
- [22] 王 佳, 巫 江, 方异锋, 等. 铸造车间 RGV 柔性动态调度系统的设计与应用 [J]. 机电工程技术, 2023, 52(9): 62-65, 104.
WANG Jia, WU Jiang, FANG Yi-feng, et al. Design and application of RGV Flexible dynamic scheduling system in casting workshop [J]. Mechanical & Electrical Engineering Technology, 2023, 52(9): 62-65, 104.
- [23] 王 磊, 张 贺, 刘 毅, 等. 基于优先调度规则实时选择模型解决加工车间调度问题 [J]. 机械制造, 2022, 60(12): 81-86, 50.
WANG Lei, ZHANG He, LIU Yi, et al. A real-time selection model based on priority scheduling rules to solve machining workshop scheduling problems [J]. Machinery, 2022, 60(12): 81-86, 50.

本文引用格式:

李峥峰, 张东方, 丁其聪, 等. 考虑 AGV 运输和机器转速的作业车间绿色调度研究 [J]. 机电工程, 2024, 40(2): 327-336.

LI Zhengfeng, ZHANG Dongfang, DING Qicong, et al. Green scheduling of job shop considering AGV transportation and machine speed [J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2024, 40(2): 327-336.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>