文章编号:1007－6735(2025)06－0726－09　DOI: 10.13255/j.cnki.jusst.20241003001

一种灰狼邻域算法求解有电量约束的多 AGV 柔性车间调度问题

陈雪芬，　叶春明，　汤乐成，　盛安琪，　孔令阳，　张莫天，　谭　煦
（上海理工大学 管理学院，上海 200093）

摘要：为解决自动导向车(AGV)柔性车间调度问题，建立以最小搬运机器完工时间，即调度系统结束时间为目标的调度模型，并设计一种贪婪策略下的灰狼邻域算法对问题进行求解。在初始化阶段随机生成一定长度的向量，通过 LPV 方法转化成可行的工序和机器编码，基于贪婪策略选择完工时间最短的 AGV 并生成搬运机器编码。采用灰狼算子对随机向量进行更新，引入遗传算法的 IPOX 和均匀交叉算子对工序和机器编码进行交叉。邻域搜索时，设计一阶段寻优(1_opt)和二阶段寻优(2_opt)，再对工序和机器编码进行优化；根据精英策略保留 1/2 个体进入下一次迭代，在算法终止时得到调度结果。通过 20 个算例在相同参数下运用多种算法进行求解对比，以及单个算例在调整参数下进行求解对比，验证算法有效性。结果表明，改进算法能够有效解决 AGV 调度问题，算法的求解性能优于其他算法。

关键词：柔性车间调度问题；带电量约束；自动导向车；灰狼算子；邻域搜索
中图分类号：TP 301.6　　**文献标志码：**A

A gray wolf neighborhood algorithm for solving multi-AGV flexible workshop scheduling problem with power constraints

CHEN Xuefen，　YE Chunming，　TANG Lecheng，　SHENG Anqi，　KONG Lingyang，　ZHANG Motian，　TAN Xu
(*Business School, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China*)

Abstract: To address the flexible workshop scheduling problem of automated guided vehicles (AGV), a scheduling model was established with the objective of minimizing the makespan of handling machines, i.e., the completion time of the scheduling system. A gray wolf neighborhood algorithm based on a greedy strategy was designed to solve this problem. In the initialization stage, vectors of a certain length

收稿日期: 2024−10−03
基金项目: 上海市哲学社会科学一般项目 (2022BGL010)；国家自然科学基金资助项目 (71840003)
第一作者: 陈雪芬(1996—)，女，博士研究生．研究方向：生产调度．E-mail：15902171827@163.com
通信作者: 叶春明(1964—)，男，教授．研究方向：智能算法、生产调度．E-mail：Yechm6464@163.com

引文格式: 陈雪芬，叶春明，汤乐成，等．一种灰狼邻域算法求解有电量约束的多 AGV 柔性车间调度问题[J]．上海理工大学学报，2025，47(6)：726-734.
Citation: CHEN Xuefen, YE Chunming, TANG Lecheng, et al. A gray wolf neighborhood algorithm for solving multi-AGV flexible workshop scheduling problem with power constraints[J]. Journal of University of Shanghai for Science and Technology, 2025, 47(6): 726-734.

were randomly generated and transformed into feasible process and machine codes through the LPV method. Under the greedy strategy, the AGV with the shortest completion time was selected to generate the handling machine code. The gray wolf operator was adopted to update the random vector, and the IPOX of the genetic algorithm and the uniform crossover operator were introduced to cross the process and machine codes. During neighborhood search, one-stage optimization (1-opt) and two-stage optimization (2-opt) were designed to further optimize the operation and machine codes. According to the elite strategy, half of the individuals were retained for the next iteration, and the scheduling result was obtained when the algorithm terminates. The algorithm efficiency was verified through the comparison of solutions by multiple algorithms under the same parameters in 20 examples and the comparison of solutions by a single example under adjusted parameters. The results show that the improved algorithm can effectively solve the AGV scheduling problem, and its solution performance is superior to that of other algorithms.

Keywords: *flexible workshop scheduling problem*; *power constraints*; *AGV*; *gray wolf operator*; *neighborhood search*

柔性车间调度问题由 Brucker 等[1]在 1990 年首次提出，是著名的 NP-hard 问题。对于该类问题的求解，研究者们在算法设计上进行了诸多探索。Teekeng 等[2]为提高算法速度，应用遗传算子通过选择、交叉、变异对算法进行了改进。Wang 等[3]改进了柔性作业车间调度规则，优化机器分配，提高了算法效率。张国辉等[4]引入进化方法，使算法更易收敛。王建华等[5]在求解含有绿色指标的多目标柔性作业车间调度问题时设计了一种基于 Pareto 最优解的自适应多目标 Jaya 算法，相同数据下与其他算法对比显示出更高性能。Sun 等[6]提出一种变邻域搜索的混合遗传改进算法，解决加工系统中考虑机器负荷均衡的调度问题。张洪亮等[7]采用分批调度策略和改进遗传算法获得更优化的调度方案，有效提升了车间作业效率。

工业 4.0 和制造 2025 的推进，使得无人驾驶、新能源技术、智能调度成为当前的研究热点，并取得了显著成果。然而，企业在制造过程中仍面临小批量、短周期、自动化、高效率等生产模式转变的挑战。降低生产成本、提升生产效率对当前制造企业的发展至关重要。自动导向车（automated guided vehicles，AGV）以其高自动化、低能耗的优势，在生产物流中的应用无疑是解决当前问题的一个有效方向。

Ulusoy 等[8]首次构建了 AGV 与机器的集成调度模型，并通过一系列问题求解验证了其可行性，对设计的两种 AGV 线路规划策略进行了比较。Reddy 等[9]设计了一种乌鸦搜索算法，用于求解柔性制造系统（FMS）中机器和 AGV 的调度问题，通过整合资源和同步调度，提升了 FMS 的性能，并通过求解不同问题，验证了其优越性。李峥峰等[10]综合考虑工件调度、AGV运输任务调度、AGV 充电约束及 AGV 数量等因素，对作业车间调度问题进行了深入研究，并设计了相应算法进行求解，作业车间的典型算例仿真验证了模型与算法的有效性。邓希等[11]结合 A 星算法和混合遗传算法，解决了空载和路径冲突情况下的 AGV 调度问题，两种改进方案有效解决了 AGV 路径规划中的冲突碰撞和机器占用问题。Reddy 等[12]提出一种共生生物搜索算法，用于求解柔性制造系统中的机器、AGV 和工具的联合调度问题，并应用于一家制造公司的工业问题求解，结果表明所获得的调度结果可在实际中实施并降低成本。李翠玉等[13]将 AGV 调度问题划分为 AGV 调度和路径规划两个子问题，并采用标准遗传算法和自适应遗传算法进行联合调度，这种方式在充放协同调度问题中展现了求解时间短、精度高的优势。张峰等[14]设计了一种基于二维度的自适应遗传算法，求解柔性车间栅格问题，并用生产实例验证了其求解效率和鲁棒性。李晓辉等[15]在求解多 AGV 带充电约束的柔性车间调度问题时，设计了一种混合文化基因算法，求解过程中考虑关键路径，平衡了搬运机器的负荷，并用测试算例验证了算法的有效性。

由此可见，带 AGV 的柔性车间调度问题是当前研究的热点，但多数研究较少考虑 AGV 的电量问题。灰狼算法作为一种较新的算法，因其参数简洁、易于实现、收敛迅速以及良好的鲁棒性和稳定性，在多个问题上表现出色。然而，该算法也存在易陷入局部最优和参数敏感性不足等缺点。遗传算法是经典且广泛应用的车间调度算法，本文借鉴遗传算子的思路，设计领域搜索算子对灰狼算法进行优化。建立了以最早搬运机器完工时间为目标的调度模型，在 AGV 选择时引入贪婪策略，设计了一种基于贪婪策略的灰狼邻域搜索算法（gray wolf optimizer with neighborhood search and greedy strategy，GWONSG）以求解问题。

1 问题描述

有电量约束的 AGV 柔性车间可以描述为：m 个工件在 n 个机器上加工，每道工序至少有一台机器可加工，完整的生产过程是所有工件的物料从投入开始到成品搬回仓库结束。工序在机器间和仓库与机器间的移动都由搬运小车 AGV 实现，小车存在电量约束。该调度系统存在 4 种搬运方式，如图 1 所示。

方式 1 AGV 在仓库，需要搬运工件第一道工序的原料，直接搬运工件的物料到加工机器即可。

方式 2 AGV 在仓库，需要搬运工件的非原料工序，先到该工序的加工机器，判断电量是否能搬运到工序的下一个机器，如果是，搬运，否则先到充电区充电，再回来搬运物料。

方式 3 AGV 在某个机器处，需要搬运工件第一道工序的原料，需判断 AGV 电量是否满足回到仓库并搬运物料，如果是，回到仓库处搬运物料，否则先到充电区充电，再回到仓库并搬运物料。

方式 4 AGV 在某个机器处，需要搬运工件的非原料工序，判断电量是否满足能到达工序的加工机器并搬运到工序的下一个机器，如果是，到对应工序的机器搬运，否则先到充电区充电，再到对应工序的机器搬运。

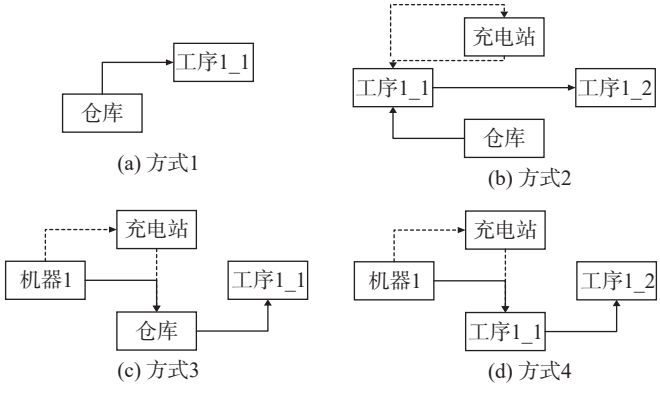


图 1 4 种 AGV 搬运方式

Fig.1 Four types of AGV material handling

该调度系统存在以下假设：

假设 1 工件处于加工阶段时同一时刻只能由一台机器加工，处于搬运阶段时同一时刻只能由一台搬运机器搬运；

假设 2 同一加工机器同一时刻只能加工一个工件，同一搬运机器同一时刻只能搬运一个工件；

假设 3 所有搬运、加工机器 0 时刻可用，搬运机器与充电站之间的移动单独考虑工件装载和卸载时间，机器与仓库之间的移动时间包含装、卸载时间；

假设 4 AGV 的电量能满足仓库到任意机器之间的相互移动；

假设 5 搬运机器能负荷所有工件，且载重对电量损耗忽略不计。

2 数学模型

对于带电量约束的 AGV 柔性车间问题，其完工时间由最后搬运工件回仓库的搬运机器决定，建立以最小化最晚完工搬运机器时间为目标的数学模型：

$$f = \min(\max(F_g)) \tag{1}$$

式中：F_g 为搬运机器 g 的完工时间；G 表示机器总数，$0<g\leqslant G$。

工序开始时间不小于物料或上一道工序到达时间，数学表达式为

$$B_{ij}+Y_{ijg}T_{ijg}\leqslant S_{ij} \tag{2}$$

式中：i 为工件号；j 为工序号；B_{ij} 是工序 o_{ij} 的搬运开始时间；Y_{ijg} 是工序 o_{ij} 是否由搬运机器 g 搬运，为 0−1 变量；T_{ijg} 是机器 g 搬运工序 o_{ij} 所需时间；S_{ij} 是工序 o_{ij} 的开工时间。工序 o_{ij} 的搬运指上一道工序搬运到当前机器或者物料搬运到当前机器。

工序完工时间不小于开工时间，数学表达式为

$$S_{ij}+X_{ijz}W_{ijz}\leqslant C_{ij} \tag{3}$$

式中：z 是机器号；X_{ijz} 是工序 o_{ij} 是否在机器 z 上加工，为 0−1 变量；W_{ijz} 是 o_{ij} 在机器 z 上的加工时间；C_{ij} 是工序 o_{ij} 的完工时间。

任意工序只能在 1 个机器上加工 1 次，数学表达式为

$$\sum_{z=1}^{n}X_{ijz}=1 \tag{4}$$

式中，n 为加工机器总数。

任意工序只能由 1 个机器搬运 1 次，数学表达式为

$$\sum_{g=1}^{G}Y_{ijg}=1 \tag{5}$$

同一机器同时刻只加工 1 道工序，数学表达式为

$$X_{hkz}C_{hk}+N(H_{hkij}-1)\leqslant X_{ijz}S_{ij} \tag{6}$$

式中：h 是工件号；k 是工序号；N 是一个大正实数；对于同一加工机器，H_{hkij} 等于 1 表示 o_{hk} 在 o_{ij} 之前，反之在后。

3　灰狼邻域搜索算法

3.1　编　码

带电量约束的 AGV 问题涉及 3 个编码：工序（OS）、加工机器（MA）和搬运机器（AG），采用 3 层实数编码。第一层是工序编码，表示工序在调度系统的加工顺序，编码基因是工件号，工件号出现次序表示第几道工序。第二层编码是机器编码，编码基因是工序编码升序排列后对应的机器号，即按工件依次生成编码。第三层编码是搬运机器编码，编码基因是对应工序的搬运机器号，本文的工件加工完成需搬回仓库，AG 编码最长。假设一个车间调度系统有 3 个工件、6 道工序、2 个加工机器、2 个搬运小车。工序、加工机器、搬运机器编码如图 2 所示。工序编码前 3 位分别表示工序加工顺序，用 o_{11}、o_{31}、o_{21} 表示；机器安排是 o_{11} 在机器 1，o_{12} 在机器 2，o_{21} 在机器 1；o_{11} 由 AGV2 搬运（原料搬运到对应工序），o_{31} 由 AGV2 搬运，o_{21} 由 AGV1 搬运。AG 最后 3 个编码表示工件 1 由 AGV2 搬回仓库，工件 2 由 AGV1 搬回仓库，工件 3 由 AGV2 搬回仓库。

3.2　解　码

随机选择小车的方法难以兼顾完工时间最小的目标，考虑一种贪婪策略：每次工序选择此次搬运完工时间最短的 AGV 搬运。解码步骤如下：

Step 1　初始各个工件、机器、AGV 的时间都是 0，初始 AGV 都在仓库；

Step 2　读取一个加工工序和对应加工机器、工件的上一道工序结束时间、机器的上一道工序结束时间；

Step 3　读取所有 AGV 所在的位置，计算各个 AGV 到工件上一道工序对应机器位置运回目标机器的时间（第一道工序材料的搬运需要先回仓库），如果电量不足，需回充电站充电再进行搬运

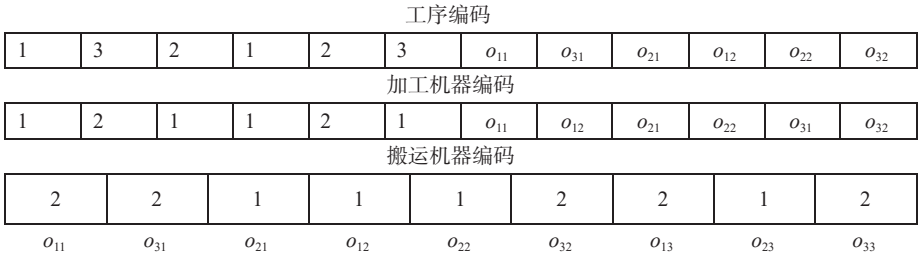


图 2　编码示意图

Fig.2　Coding schematic diagram

操作，选取完工时间最早的 AGV；

Step 4 读取上一道工序结束时间、机器的上一道工序结束时间、AGV 到达该机器的时间，当前工序的开工时间是三者的最大值；

Step 5 根据工序在机器的加工时间，更新对应工序的完工时间、机器的工序结束时间、AGV 到达时间、AGV 位置等；

Step 6 不断重复 Step 2～5，遍历到最后一个工序和机器编码时，转到 Step 7；

Step 7 继续遍历 AG，所有完成工件运回仓库，根据最晚 AGV 时间得到系统调度结束时间，解码完成。

以上面的编码例子为例，假设上面的机器编码对应加工时间是 t=[3,5,4,6,2,3]，搬运机器在机器间转移的时间矩阵 $\boldsymbol{w}$=[[0,2,4],[2,0,4],[4,6,0]]，矩阵首行表示仓库。不考虑电量约束的情况下，上述编码的甘特图及路径可视化结果如图 3 所示。

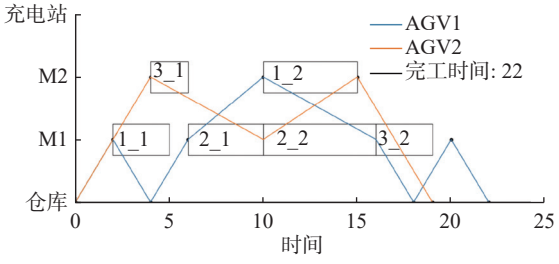


图 3 甘特路径图

Fig.3 Gantt path diagram

调度系统的完工时间是 22，2 个搬运机器的路径如下：AGV1 从仓库运送工件 1 材料到 M1，回到仓库运送工件 2 材料到 M1，到 M1 运送 o_{11} 到 M2，到 M2 运送 o_{31} 到 M1，运送 o_{22} 回到仓库，到 M1 运送 o_{32} 回到仓库；AGV2 从仓库运送工件 3 材料到 M2，到 M1 运送 o_{21} 到 M1，运送 o_{12} 回到仓库。

3.3 种群初始化

柔性车间问题的求解是离散的组合优化问题，灰狼算法求解的是连续问题，需要将连续解映射该组合优化问题的离散解，参考 Bean[16] 提出的 LPV(largest position value) 规则。工序、机器和 AGV 种群初始化如下：

a. 工序编码生成。随机生成一定长度(工件的工序数之和)的向量，值在 0～1 之间，对应工序顺序生成初始编码。向量升序后映射到初始的编码得到可行工序编码，如随机向量 $\boldsymbol{a}$=[0.3,0.2,0.1,0.5,0.6,0.4]，对应按工件顺序生成的编码序列 $\boldsymbol{b}$= [1,1,2,2,3,3]，升序 $\boldsymbol{a}$ 得到 [0.1,0.2,0.3,0.4,0.5,0.6]，对应编码变换成 $\boldsymbol{b}$=[2,1,1,3,2,3] 后是一个可行工序编码。

b. 机器编码生成。随机生成一定长度(工序的可加工机器数之和)的向量，值在 0～1 之间，按顺序和可加工机器数长度片段取值，取最大值位置索引当作搬运机器号。假设上述例子的每道工序都有 2 个可加工机器，如随机向量 $\boldsymbol{a}$=[0.3,0.2,0.6,0.2,0.1,0.1,0.5,0.6,0.2,0.1,0.5,0.4]，截取第一个数和第二个数，$\boldsymbol{b}$=[0.3,0.2]，机器选择是 $\boldsymbol{b}$ 中最大值所在位置，0.3最大，所以工序 o_{11} 选择机器 1，同理第三、第四个数是 o_{12} 的机器选择，按照上述方法得到全部的机器选择：$\boldsymbol{m}$=[1,1,1,2,1,1]。

AGV 编码由贪婪策略得出，不需要进行转换，种群初始化即按上述方法初始化多个工序编码和机器编码，并贪婪得到多个 AGV 编码。

3.4 灰狼算子

灰狼算法是 2024 年提出的一种模拟自然界灰狼捕猎的算法，其种群最优的前 3 个个体指导其余狼的行为，主要包括包围和狩猎。包围如式(7)～(10)所示。

$$A=2ur_1-u \tag{7}$$

$$R=2r_2 \tag{8}$$

$$D=Rx_t-x \tag{9}$$

$$x=x_t-AD \tag{10}$$

式中：u 为迭代过程中由 2 变为 0 的数；r_1、r_2 为 0～1 的随机数；x_t 为猎物位置；x 为灰狼当前位置；A 为动态系数；R 为随机系数；D 为距离。

3 个头狼 α、β、δ 引导狩猎过程，计算当前狼与目标狼的距离，根据距离计算移步长度。头狼引导的狩猎过程如下所示：

$$D_\alpha=R_\alpha x_\alpha-x,\quad x_1=x_\alpha-A_\alpha D_\alpha \tag{11}$$

$$D_\beta=R_\beta x_\beta-x,\quad x_2=x_\beta-A_\beta D_\beta \tag{12}$$

$$D_\delta=R_\delta x_\delta-x,\quad x_3=x_\delta-A_\delta D_\delta \tag{13}$$

式中：R_α、R_β、R_δ 表示 3 个头狼的随机系数；x_α、x_β、x_δ 表示 3 个头狼的位置；D_α、D_β、D_δ 表示当前灰狼与 3 个头狼的距离；A_α、A_β、A_δ 表示 3 个头狼的动态系数；x_1、x_2、x_3 表示移步距离。

3 个移步距离取平均值更新位置，即

$$x=(x_1+x_2+x_3)/3 \tag{14}$$

本文工序、机器向量更新采用灰狼算子，然后通过 LPV 方法转化为可行的编码。

3.5　邻域搜索

灰狼算子寻优严重依赖头狼，当算法迭代过程中头狼未更新，种群易陷入局部最优，即头狼无法引导种群往正确的方向进化。为避免这一情况的出现，可引入多个邻域搜索算子。灰狼算法会得到同父代一样规模的子代，引入遗传算法的 IPOX (inversion-based partially-mapped crossover) 对父代和子代的工序进行交叉：

Step 1　工件随机分为 2 个组合，如上述例子的 3 个工件分为{1}和{2,3}；

Step 2　父代 1 保证组合 1 基因，其余位置依次填入父代 2 中组合 2 的基因得到子代 1，同理得到子代 2。

如父代 1 是 [1,3,2,1,2,3]，父代 2 是 [2,3,2,1,1,3]。保留父代 1 中的{1}得到 [1,0,0,1,0,0]，0 的地方依次填入父代 2 的 [2,3,2,3]，得到子代 1 是 [1,2,3,1,2,3]；同理得到保留父代 2 中的{2,3}，依次填入父代 1 的{1}，得到子代 2 是 [2,3,2,1,1,3]。

引入遗传算法的均匀交叉对父代和子代机器编码进行优化，均匀交叉可叙述为：生成 0～1 的随机数向量，如果随机数大于 0.5，子代 1 继承父代 1 的基因，否则继承父代 2 的基因，同理生成子代 2。

如机器编码的父代 1 是 [1,1,2,1,2,2]，父代 2 是 [2,2,1,2,1,2]，随机向量是 [0.6,0.4,0.4,0.7,0.3.0.6]，则子代 1 是 [1,2,1,1,1,2]，子代 2 是 [2,1,2,2,2,2]。

机器编码 1_opt 寻优：机器编码在可变更范围内从左到右依次更改机器号，变更到任意一位置时，如果新解优于原解，结束变更，否则保持该位置原来的基因，进行下一位置的变更。

工序编码 2_opt 寻优：交换任意 2 个位置的编码，如果低于 5 次交换能得到优于原解的编码，更新编码，结束交换；如果交换到达 5 次没有得到优于原解的编码，则不接受交换。

3.6　算法流程

综上所述，考虑贪婪策略的灰狼邻域搜索算法步骤如下：

Step 1　初始化多个工序和机器的随机向量值，运用 LPV 方法转化为可行编码，通过贪婪策略得到 AGV 编码，计算每个个体的目标值；

Step 2　根据目标值对种群进行排序，前 3 个个体是 α、β、δ 狼，其余狼对应的随机向量通过灰狼算子进行更新，同时按照 3.3 的方法转换编码并计算目标值；

Step 3　灰狼算子产生一个新种群，2 个种群的工序个体进行 IPOX 交叉，机器个体进行均匀交叉，如果新解优于原解，则对应个体更新；

Step 4　机器 1_opt 寻优，新解优于原解时更新并跳出算子(最多遍历编码长度)，工序 2_opt 寻优，5 次内新解优于原解时更新或者到达 5 次时跳出算子；

Step 5　两个种群合并，保留最优的 50% 个体，如果到达迭代次数，算法结束，否则转入 Step 2。

算法流程图如图 4 所示。

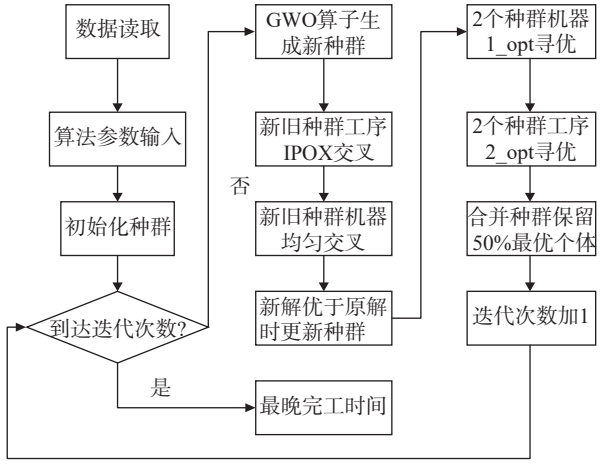


图 4　算法流程图

Fig.4　Algorithm flowchart

4　算法验证

带 AGV 的柔性车间调度数据面临来源、度量及数据不标准导致的数据清洗等问题，本文采用文献 [17] 中的数据集对算法进行验证，设置算法的迭代次数为 200，种群规模为 100，AGV 从任意机器到充电站和充电站回任意机器的时间都是 2。工件在搬运机器与充电站之间移动时，装载和卸载时间是 1，AGV 在充电站的充电时间是 3，AGV 数量设置为 3，里程限制设置为 25。加工情况和转移情况组合共有 20 个算例，表 1 列举一个算例。

加工情况的一行表示一个工件的加工情况，第一行第一个的 3 表示工件 1 有 3 道工序，第二个 3 是工序 o_{11} 有 3 台可加工机器，在机器 1 的时间是 8，机器 2 时间是 9，机器 3 时间是 9，后面

表 1 算例 1 加工转移情况表

Tab.1 Processing transfer table of example 1

加工情况	AGV转移情况
331829393216314417341211 3210	[0,6,8,10,12]
331203182213310113483218417319	[12,0,6,8,10]
33312411111348210373115314217	[10,6,0,6,8]
234141163163218316116	[8,8,6,0,6]
23310294113115416314	[6,10,8,6,0]

及其余行数据依此类推。AGV 转移情况中一个中括号表示一个调度单元到其他调度单元的时间，第一个中括号表示机器 0(仓库)到机器 0、1、2、3、4 的时间是 0、6、8、10、12。其余中括号依此类推。

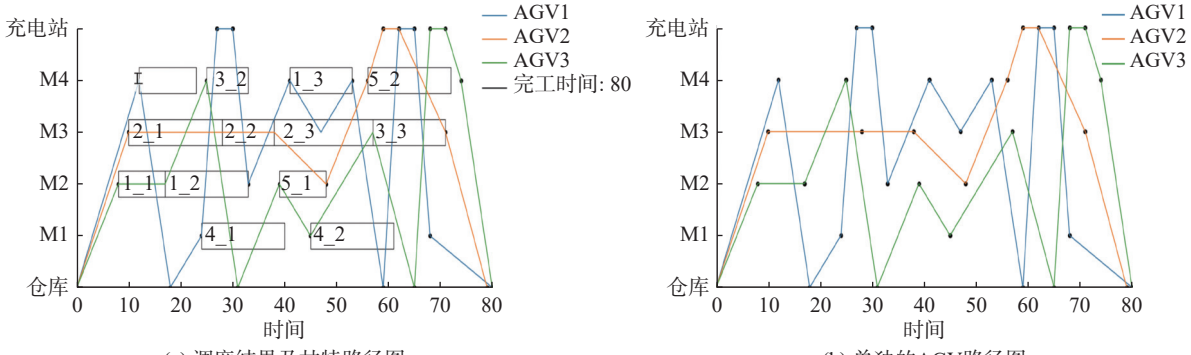
算例 1 的调度结果如图 5 所示，左边包含甘特路径图，右边是单独的 AGV 路径图，迭代 200 次后完工时间是 80，调度结果工序编码：3,2,1,2,1,4,3,2,5,1,3,4,5；机器编码：2,2,4,3,3,3,4,4,3,1,1,2,4；搬运机器编码：1,2,3,2,3,1,3,2,3,1,1,3,2,1,3,2,1,3,2,1,3；各个搬运小车的路径如下：

(a) AGV1 仓库运送工件 3 材料到 M4，回到仓库运送工件 4 材料到 M1，到充电站充电，到 M2 运送 o_{12} 到 M4，到 M4 运送 o_{32} 到 M3，运送 o_{13} 回到仓库，到充电站充电，到 M1 运送 o_{42} 回到仓库；

(b) AGV2 仓库运送工件 2 材料到 M3，到 M3 运送 o_{21} 到 M3，到 M3 运送 o_{22} 到 M3，到 M2 运送 o_{51} 到 M4，到充电站充电，到 M3 运送 o_{33} 回到仓库；

(c) AGV3 仓库运送工件 1 材料到 M2，到 M2 运送 o_{11} 到 M2，到 M4 运送 o_{31} 到 M4，回到仓库运送工件 5 材料到 M2，到 M1 运送 o_{41} 到 M1，运送 o_{23} 回到仓库，到充电站充电，到 M4 运送 o_{52} 回到仓库。

200 次的迭代优化下，可以看出图 5 的甘特路径图比较紧凑，算法求解效果良好，算法在 120 次左右就得到此次优化的最早完工时间，收敛比较快。其余 9 个算例的 200 次迭代完工时间变化见图 6，完工时间基本在 100 次以前收敛，算法求解效率良好。



(a) 调度结果及甘特路径图　　(b) 单独的AGV路径图

图 5 算例 1 甘特路径图

Fig.5 Gantt path diagram of example 1

针对 20 个算例(ex1～20)，在相同迭代次数和种群规模下，同时通过遗传算法(genetic algorithm，GA)、粒子群算法(particle swarm optimization，PSO)、差分进化(differential evolution，DE)算法和不考虑贪婪策略的灰狼邻域搜索算法(gray wolf optimizer with neighborhood search strategy，GWONS)进行求解，结果如表 2 所示。可以看出，本文的 GWONSG 从算法结果和迭代收敛情况来看，都优于其他算法。

假设 AGV 数量是 2～5，本文算法对算例 1 求解的结果如图 7 所示，可以看出，不同 AGV 下的完工时间都收敛较快，算法效果较好。随着 AGV 数量增加，初始解的质量和最后的算法迭代结果表现都越来越好，但其算法曲线差距越来越小，AGV 数量对算法的求解影响越来越小。

5 结 论

本文建立以最晚 AGV 完工时间为目标的带 AGV 电量约束的柔性车间调度模型，设计了一种带贪婪策略的灰狼邻域算法进行求解。选择搬运完工时间最小的 AGV 贪婪策略提高解的质量，LPV 使灰狼算子优化的向量映射到该调度问题的离散解，还增加了遗传算法的多个算子及设计了 1_opt 和 2_opt 对解进行优化，避免了局部最优问题，提高了求解效率。

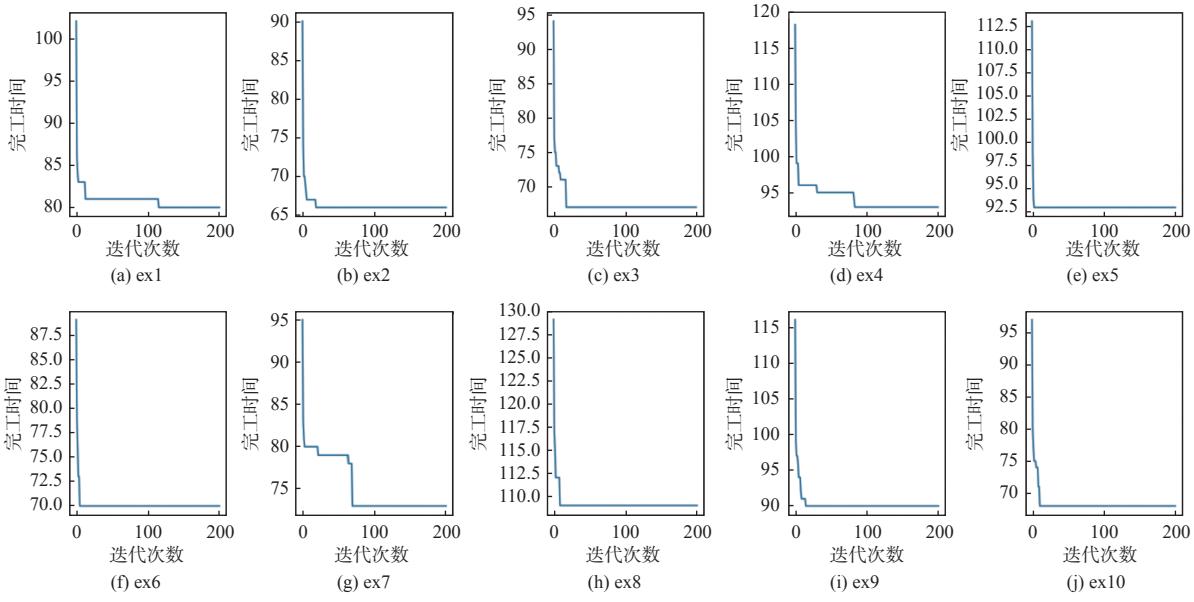


图 6　前 10 个算例完工时间变化图

Fig.6　Change chart of completion time for the first 10 examples

表 2　算例测试结果对比

Tab.2　Comparison of test results for example

算例	GA	PSO	DE	GWONS	GWONSG
ex1	79	80	81	80	80
ex2	71	72	68	68	66
ex3	70	72	69	70	67
ex4	92	95	96	94	93
ex5	94	96	95	94	93
ex6	73	71	70	71	70
ex7	75	74	76	78	73
ex8	109	113	111	115	109
ex9	91	90	98	95	90
ex10	70	69	74	73	68
ex11	78	76	77	79	75
ex12	105	110	108	106	104
ex13	74	78	79	74	72
ex14	60	59	67	64	58
ex15	60	61	63	65	60
ex16	89	92	94	91	88
ex17	109	108	112	115	107
ex18	80	77	78	81	76
ex19	88	90	93	92	87
ex20	130	134	128	135	128

最后，在相同参数下，应用多个算法对 20 个算例进行求解，单个算例的甘特路径图比较紧凑，算法收敛较快。多个算法的迭代结果对比显示本文的算法在优化程度和优化效率方面表现良好。不同 AGV 数量的灵敏度分析显示，完工时间与数量负相关，更多的 AGV 加入调度系统必然减少完工工序对搬运机器的等待，增加加工机器之间的响应。但存在边际递减效应，会出现多个空闲 AGV 等待一个工序的冗余情况。本文算法在多个算例和参数下表现良好，算法鲁棒性强，求解效率高。本文的研究拓展了智能算法在带 AGV 的柔性车间调度问题上的理论探索，对实际的生产车间调度具有一定启示意义。后续可以拓展在具体的生产实例中进行算法的求解验证，或者算法的优化，如和深度学习，强化学习等机器算法的融合。

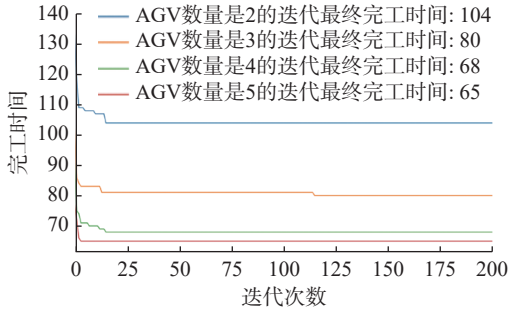


图 7　不同数量 AGV 的完工时间变化

Fig.7　Completion time varies for different numbers of AGV

参考文献：

[1] BRUCKER P, SCHLIE R. Job-shop scheduling with multi-

purpose machines[J]. Computing, 1990, 45(4): 369−375.

[2] TEEKENG W, THAMMANO A. Modified genetic algorithm for flexible job-shop scheduling problems[J]. Procedia Computer Science, 2012, 12: 122−128.

[3] WANG Y M, YIN H L, QIN K D. A novel genetic algorithm for flexible job shop scheduling problems with machine disruptions[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2013, 68(5/8): 1317−1326.

[4] 张国辉, 张凌杰, 吴立辉, 等. 精英进化策略求解柔性作业车间调度问题 [J]. 计算机应用研究, 2016, 33(12): 3579−3581,3666.

[5] 王建华, 潘宇杰, 孙瑞. 自适应 Jaya 算法求解多目标柔性车间绿色调度问题 [J]. 控制与决策, 2021, 36(7): 1714−1722.

[6] SUN K X, ZHENG D B, SONG H H, et al. Hybrid genetic algorithm with variable neighborhood search for flexible job shop scheduling problem in a machining system[J]. Expert Systems with Applications, 2023, 215: 119359.

[7] 张洪亮，童超，丁倩兰. 带有动态到达工件的分布式柔性作业车间调度问题研究 [J]. 安徽工业大学学报(自然科学版), 2024, 41(5): 573−582.

[8] ULUSOY G, BILGE Ü. Simultaneous scheduling of machines and automated guided vehicles[J]. International Journal of Production Research, 1993, 31(12): 2857−2873.

[9] REDDY N S, RAMAMURTHY D V, RAO P K. Simultaneous scheduling of machines and AGVs using crow search algorithm: a new nature-inspired meta-heuristic[J]. Manufacturing Technology Today, 2018, 17(9): 12-22.

[10] 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.

[11] 邓希, 胡晓兵, 江代渝, 等. 基于混合遗传算法的柔性作业车间机器和 AGV 规划 [J]. 四川大学学报(自然科学版), 2021, 58(2): 022003.

[12] REDDY N S, RAMAMURTHY D V, LALITHA M P, et al. Integrated simultaneous scheduling of machines, automated guided vehicles and tools in multi machine flexible manufacturing system using symbiotic organisms search algorithm[J]. Journal of Industrial and Production Engineering, 2022, 39(4): 317−339.

[13] 李翠玉, 胡雅梦, 康亚伟, 等. 应用自适应遗传算法的电动汽车充放电协同调度 [J]. 吉林大学学报(工学版), 2022, 52(11): 2508−2513.

[14] 张峰, 陈乃超, 邢海燕. 柔性车间生产资源与 AGV 物流资源联合优化调度 [J]. 现代制造工程, 2023(10): 1−7,

[15] 李晓辉, 资湖海, 徐坷鑫, 等. 带有充电约束的多 AGV 柔性作业车间调度 [J]. 计算机工程, 2025, 51(4): 314−326.

[16] BEAN J C. Genetic algorithms and random keys for sequencing and optimization[J]. ORSA Journal on Computing, 1994, 6(2): 154−160.

[17] BILGE Ü, ULUSOY G. A time window approach to simultaneous scheduling of machines and material handling system in an FMS[J]. Operations Research, 1995, 43(6): 1058−1070.

（编辑：丁红艺）