文章编号:1674-2974(2024)04-0161-08 DOI:10.16339/j.cnki.hdxbzkb.2024182

退役产品拆解车间逆向生产与物流集成调度优化

匡增彧 ,谢晖 †,任莹晖 ,石珉滈
(湖南大学 机械与运载工程学院 长沙 410082)

摘 要:针对退役产品拆解工艺与物流存在的不确定性,提出一种逆向生产和物流集成调度拆解车间优化方法.分析退役产品拆解车间作业过程中生产与物流相互影响因素,以优化逆向生产与物流过程中的最大完工时长和提前/拖期成本为目标构建车间多目标调度模型.基于物流路径决策,设计一种带基因修复的变异算子改进NSGA-Ⅱ算法的变异准确性,提升算法的求解有效性.以某公司的手机拆解线为例,分析多尺寸的生产、物流算例.结果表明,随着自适应引导车数量的增加,大、小尺寸算例的拖期成本分别减少了57.1%和58.3%,验证了模型的有效性.

关键词:退役产品;逆向生产;拆解车间;逆向物流;调度
中图分类号:TP18;TB497 **文献标志码**:A

Optimization of Reverse Production and Workshops Logistics Integrated Scheduling in End-of-life Products Disassembly Workshops

KUANG Zengyu, XIE Hui†, REN Yinghui, SHI Minhao
(College of Mechanical and Vehicle Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: Aiming at the uncertainty of disassembly processes and logistics, an optimization method for the production and logistics integrated scheduling in a disassembly workshop is proposed to cooperatively optimize efficiency and cost. Firstly, the interaction factors between reverse production and reverse logistics in end-of-life product disassembly workshops are analyzed. A multi-objective scheduling model of the workshop is constructed, aiming at optimizing the maximum completion time and the advanced/delayed costs in reverse production and workshops logistics processes. Secondly, based on the logistics route decision, a mutation operator with gene repair is designed to improve the mutation accuracy of the NSGA-Ⅱ algorithm and enhances the solution effectiveness of the algorithm. Finally, taking a company's mobile phone disassembly line as an example, the multi-size production and logistics examples are analyzed. The results show that as the number of adaptive guided vehicles increases, the delay cost of large and small size examples are reduced by 57.1% and 58.3%, respectively, verifying the effectiveness of the model.

Key words: end-of-life products; reverse production; disassembly workshop; reverse logistics; scheduling

---

* **收稿日期**:2023-10-16
基金项目:国家重点研发计划资助项目(2020YFB1713002),National Key Research and Development Program of China (2020YFB1713002)
作者简介:匡增彧(1989—),男,湖南衡阳人,湖南大学博士研究生
† 通信联系人,E-mail: danielxie@163.com

随着双碳目标的不断推进,制造业迫切需要完成车间绿色低碳循环的可持续发展转型[1].退役产品拆解车间管理作为产品生命逆向周期中废品-原料关键节点[2],既有环境效益又有经济效益,受到国内外回收再利用企业的广泛关注.而退役产品拆解车间中产品生产与物流高度耦合[3],拆解车间生产和物料等监管环节之间面临着产品品类繁杂、工艺交叉、设备切换频繁等问题,严重制约了拆解车间管理调度的经济性和准确性.因此,面向退役产品拆解的车间生产和物流集成调度优化,能够有效地减少车间生产-物流过程中的成本与提高工作效率,是退役产品拆解车间生产管理亟待解决的关键难题.

退役产品拆解车间与物流调度属于车间管理环节[4].车间生产存在来料渠道复杂、生产批次不均等特点,具有典型的柔性作业特色.围绕柔性车间生产与物流调度问题(Flexible Job and logistics Scheduling Problem,FJLSP)的研究是近年来的热点.目前,针对不同调度规则下的物流与车间生产匹配问题受到国内外学者的重点关注.综合考虑不同调度策略,可实现最大完工时长、综合能耗、设备负载等调度目标的生产与物流调度优化.例如,胡晓阳等[5]考虑先到先服务的调度策略,建立最大完工时长为目标的生产与物流调度模型.Liu 等[6]考虑以低碳为先的调度策略,建立综合能耗和完工时长的生产与物流的多目标模型.马千慧等[7]综合考虑工件到达时间、交货期等因素,建立最小延期成本、最小设备负荷等的生产与物流调度模型.上述研究主要考虑产品从原料到成品的正向生产过程,忽略了产品的生产批次、工艺一致性等差异,导致产品拆解生产过程中个体特征存在较大的差别.

元启发式算法和人工智能算法是求解车间调度模型的主流算法[8].目前,国内外学者主要聚焦于针对元启发式算法和人工智能算法的框架进行改进.Zhang 等[9]设计一种局部最优搜索算子改进 NSGA-Ⅱ算法求解车间调度模型,提升了求解的有效性和稳定性.Popper 等[10]设计了车间生产与物流的强化学习框架下的智能体,验证了生产与物流协同智能体设计的有效性.Krishnamoorthy 等[11]设计了一种基于概率分布的局部搜索算子改进模因算法,求解生产与物流调度模型,提升了算法的求解效率.上述研究主要考虑算法求解的质量和效率,未考虑生产工艺、产品状态对生产与物流调度求解的影响.

综上所述,研究者们对于产品逆向周期过程的拆解生产车间调度研究未曾深入展开.因此,本文针对退役产品拆解生产车间的生产与物流协同调度优化问题(Disassembly Job and Logistic Scheduling Problem,DJLSP)开展研究.首先,分析拆解逆向生产的生产和物流相互影响要素,建立以最大完工时长和车间成本为优化目标的 DJLSP 模型;提出一种改进 NSGA-Ⅱ算法求解该模型;通过经典不同尺寸算例分析车间生产和物流设备对车间调度的影响,验证所提模型的有效性.

1 DJLSP 问题描述和模型建立

退役产品生命逆向周期拆解物流(简称,逆向物流)指在资源的循环利用、退役产品的废弃处理和危险物品管理等方面的物流活动[12].实际上,逆向物流可直观地理解为将废旧的产品从客户端回收,经过拆解、翻新、梯次利用等再处理再制造,重复使用产品零部件的过程.与正向生产相比,逆向生产和物流调度主要面临着生产过程中,产品的生产工艺差别较大、再利用方式不确定、产品拆解深度不确定等问题.因此,在考虑 DJLSP 问题的过程中,要对生产过程中的工艺、设备与车间物流进行集成调度研究.

1.1 问题描述

假设有 n 个待拆解产品,每个产品按照规定的工艺路线在 m 个加工单元上进行拆解操作.每个加工单元拆解后的子装配体或零部件暂存于该加工单元的缓存区物料框中,自适应引导车(Automated Guided Vehicle,AGV)承担物流框运输.AGV 的第 1 个运送任务 T_{i1},表示 AGV 从仓库运送到产品 i 的第一个加工单元.AGV 的最后一个运送任务 T_{il},表示 AGV 从产品 i 的最后一个加工单元运送到仓库.本文所研究的问题均假设产品工序已知,工序对应加工单元的加工时间已知,工序选择的加工单元未知,拆卸料框的运送任务不确定,完工时间不确定,假设:①所有机器与产品在 0 时刻均可使用;②每个加工单元在某一时刻只能加工一个产品;③每个产品同一时间只能在一个加工单元上加工,且不中断;④单个 AGV 只能运输一个加工单元的物料;⑤忽略 AGV 的装卸时间且不考虑启停的加减速;⑥产品之间无优先级,不同产品的工序无优先级约束;⑦AGV 在两个加工单元之间的运输时间仅取决于加工单元的位置,与产品无关,忽略负载和空载对 AGV 运输时间的影响.

1.2 数学模型

1.2.1 目标函数

退役产品拆解车间主要关注点为车间运营成本和车间生产效率[13].本文主要考虑最大完工时长最少、提前/拖期惩罚成本最小作为DJLSP问题的目标函数.

退役产品拆解车间生产与物流过程的最大完工时长为第1目标函数f_1,其大小为产品的最后一道工序完成时间与AGV运输到达最终运输工位缓存区中的时刻[14].

$$f_1 = \max\{C_i \mid i = 1, 2, \cdots, n, R_i \mid i = 1, 2, \cdots, n\} \tag{1}$$

式中:C_i表示工序i的完工时间;R_i表示产品i由AGV运输到达最终工位缓存区的时刻.

车间生产过程中,产品物流过程的提前/拖期成本[15]为第2个调度目标f_2,可表示为:

$$f_2 = \min \sum_{i=1}^{n} \left[u_1 (D_i - C_i) + u_2 (1 - x_i)(C_i - D_i) \right] \tag{2}$$

式中:u_1和u_2分别代表产品i的提前到达和拖期到达的惩罚成本;D_i代表产品i的AGV离开时刻.

退役产品在拆解过程中,产品加工和AGV运输过程存在加工和等待两个状态.工位j中机器m的加工时间T_{jm}为:

$$T_{jm} = \sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{N_i} \left(T_{i,j} \right) \tag{3}$$

式中:$T_{i,j}$为产品i在工位j上使用机器m的拆解时间.

工位j中机器m的空闲时间T_{jw}为:

$$T_{jw} = \sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{N_i} \left(S_{m,i} - C_{m,i-1} \right) \tag{4}$$

式中:$S_{m,i}$和$C_{m,i-1}$分别为机器m上一道工序的完工时刻和下一道工序开始时刻.

1.2.2 决策变量

基于上述描述,其决策变量为:

$$x_{i,j,k} = \begin{cases} 1 \\ 0 \end{cases} \tag{5}$$

若产品i的第j道工序选择加工单元k,则取值1,否则取值0.

$$y_{i,j,k,q} = \begin{cases} 1 \\ 0 \end{cases} \tag{6}$$

若工步O_{ij}在加工单元k上的第q个位置加工,则取值1,否则取值0.

$$z_{ilh} = \begin{cases} 1 \\ 0 \end{cases} \tag{7}$$

若产品i的第l个运输任务选择AGV,则取值1,否则取值0.

$$x_{k,i,i} = \begin{cases} 1 \\ 0 \end{cases} \tag{8}$$

若机器k上第i个产品优先于第i'个产品加工,则取值1,否则取值0.

$$x_i = \begin{cases} 1 \\ 0 \end{cases} \tag{9}$$

1.2.3 约束条件

根据DJLSP问题的描述,存在下列约束.

$$\sum_{k=1}^{m} x_{ijk} = 1 \tag{10}$$

$$\sum_{i=1}^{n} x_{ijk} = 1 \tag{11}$$

$$\sum_{l=1}^{L} T_{il} = 1 \tag{12}$$

$$S_{i,l,h} - E_{i,l-1,h} \geqslant z_{ilh} \times pt_{T_{il}} \tag{13}$$

$$S_{i,j,k} \geqslant \max\left(C_{i,j,k} + pt_{T_{il}}, E_{i,l,h} \right) \tag{14}$$

$$S_{ijh} \geqslant \max\left(C_{i,j,k}, E_{i,l-1,h} + pt_{T_{i(l-1)}} \right) \tag{15}$$

$$C_{i,j,k} - S_{i,j,k} = \sum_{k=1}^{m} x_{ijk} \times pt_{O_{ij}} \tag{16}$$

$$S_{i,l+1,h} \geqslant E_{i,l,h} \tag{17}$$

式(10)表示加工单元的约束,即同一时刻同一道工序能且只能被一个加工单元加工;式(11)表示产品i只能被加工一次;式(12)表示产品i的第1个物流任务只能执行一次;式(13)表示同一产品i的物流任务的先后约束关系;式(14)、式(15)表示AGV调度协同加工单元的开始工作时间约束;式(16)表示工序加工的先后顺序;式(17)表示产品i运送任务的先后顺序.

2 求解算法

NSGA-Ⅱ是一种典型的求解柔性车间调度优化的元启发式算法,在求解过程中具备求解适应性强、计算收敛快、解集空间分布均匀等特点[16].但在求解过程中,存在解空间早熟和容易陷入局部最优等不足.本文针对DJLSP特点,对NSGA-Ⅱ进行以下改进:①设计同时考虑AGV路径决策的初始化方法,提高初始种群质量;②采用改进的均匀交叉和POX交叉并用的染色体交叉方法,提升交叉的准确性;③提出一种带染色体修复的多点变异方法,保障变异的稳定性.

2.1 基于工序和机器的MSOS编码

本文采用基于MSOS编码[17]方式对拆解车间生产工序和机器进行编码,而AGV的决策则由解码规则决定.如图1所示,其染色体主要包括工序排序向量和机器分配向量.

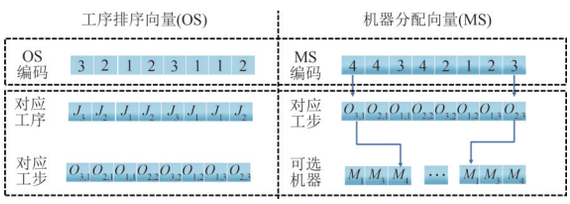


图1 工序和机器的MSOS编码

Fig.1 MSOS codes for processes and machines

2.2 考虑AGV路径决策的种群初始化

基于生产和物流集成的拆解车间调度优化问题主要考虑两个方面:①机器的选择;②物流路径的规划.而两者的核心是拆解工位的决策[18].本文为实现初始种群的多样性,设计了多种种群选择方法以保障初始调度解的多样性.种群初始化方法:工序层编码以随机的方式产生;机器的分配则是采用随机编码、概率选择和二元竞争等方法产生,而上述3种方法的比例为1:2:7.

2.3 交叉算子

交叉算子的核心目标是尽可能融合多代种群的信息,从而生成高质量的子代群体[19].本文采用改进的POX算子和均匀变异算子分别对工序和机器部分进行变异操作,分别如图2和图3所示.

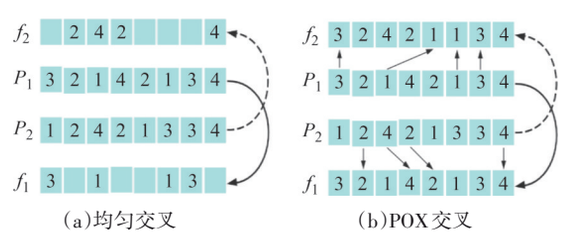


图2 工序层交叉过程

Fig.2 Process layer crossing process

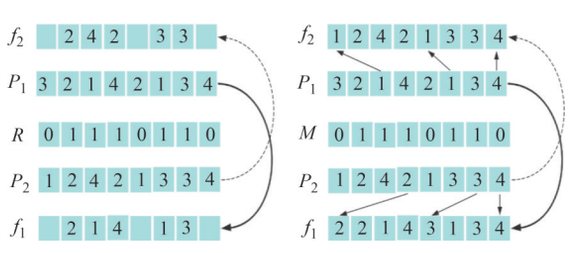


图3 机器层交叉过程

Fig.3 Machine layer crossing process

工序层交叉步骤如下:

步骤1 选择父代染色体P_1和P_2;

步骤2 将工序集合$J=\{1,2,3,\cdots,n\}$随机划分为长度为J_0和J_1的两个子集;

步骤3 随机生成长度为n的非零向量,将向量分为长度为J_0和J_1两部分,其中元素为0对应的染色体位置向量为J_0',元素为1对应的染色体位置向量为J_1';

步骤4 将P_1对应的子集J_0复制到J_0',将P_2对应的子集J_1复制到J_1'.

机器层交叉操作步骤如下:

步骤1 在父代P_1的工序编码部分染色体中,随机选择偶数个位置进行两两分组;

步骤2 对分配到同一组的2个基因,将其工序染色体进行互换变异,其对应的工序基因进行两两互换,工序基因对应的机器基因及对应的AGV基因跟随者工序基因变动,产生数量为m_1的子代种群m_1';

步骤3 随机选取变异基因,取出该基因,将其插入基于工序编码的其他位置,其对应的机器基因及对应的AGV基因跟随者工序基因变动,产生数量为m_2的子代种群m_2';

步骤4 选取一部分基因序列,其序列长度大于2,将该段基因序列逆向排列,其对应的机器基因及对应的AGV基因跟随者工序基因变动,产生数量为m_3的子代种群m_3';

步骤5 从产生的不同子代种群m_1'、m_2'、m_3'按6:2:2选取子代个体,组合成新的变异子代种群.

2.4 变异算子

变异算子的核心目的是使得生成的子代群体更加准确,增加调度方案的准确性[20].本文在变异过程中,要考虑AGV的位置信息,故设计一种带染色体修复的变异算子,如图4所示.

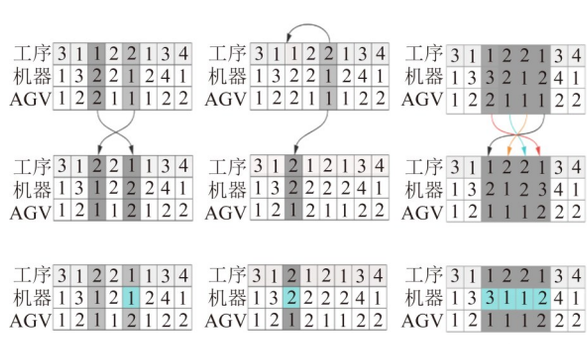


图4 三层染色体变异过程

Fig.4 Three layers of chromosomal variation

由图4可知,本文提出的待染色体修复的变异操作执行步骤如下:

步骤1 随意选择产品i和产品k的第j道工序进行互换;

步骤2 对该工序下的机器m基因段和AGV基因段进行变异;

步骤3 查询变异后O_{ij}和O_{kj}父代的机器集合m和AGV集合v,分别复制到新染色体基因点对应的集合m'和v';

步骤4 分别判断该工序与前一工序的数值大小;若该工序数值大于前一工序,则染色体不变,否则将其与前一工序互换.

2.5 变邻域搜索

NSGA-Ⅱ算法在迭代过程中存在容易陷入早熟和局部最优等问题[21],变邻域搜索作为典型的局部搜索算子,可以较好地避免算法陷入局部最优,提升算法求解的有效性.基于此,提出以下邻域结构,邻域1针对产品工序,邻域2针对AGV编码,邻域3针对机器选择.具体如下:①随机交换2个产品序列的工序位置;②选择AGV编码路径最长的基因点,将其复制到路径较短的基因点;③选择加工时长最长的机器基因点,将其转换为当前机器集合下时长较短的机器编号.

3 案例分析

3.1 待拆解产品及车间布局

3.1.1 待拆解产品信息

以某手机循环利用企业为例,拆解车间主要对收购的废旧手机、拆解后的零部件等物料进行运输.按照目前市场退役的手机可分为智能手机与非智能手机.非智能手机的拆解工序如表1所示,有4个工序,每个工位有4道工步,每个工序对应1个操作工位.

智能手机的拆解工序如表2所示,按照工艺相似性,将其划分为4工序13工步的工艺操作流程.

对比表1和表2可知,智能手机和非智能手机的拆解工序主要差别在于智能手机拆解工序中,工序1、3和4中分别少1个工步.为了满足手机柔性拆解要求,本文将生产工艺定为4工序4工步的手机拆解序列.

表1 非智能手机的拆解工序

Tab.1 Non-intelligent machine dismantling process

工序	操作步骤	拆解时长/min
1-1	拆出手机后盖	2
1-2	从手机内取出电池	
1-3	从手机内取出手机卡	
1-4	从手机内取出内存卡	
2-1	从手机内取出天线	3
2-2	用电批取出前、后盖螺钉	
2-3	用钳子拆除前、后盖	
2-4	用螺丝刀拆除机内振动器	
3-1	用螺丝刀掀起喇叭	3
3-2	从上往下拆除显示屏	
3-3	从线路板上拆除键盘	
3-4	用螺丝刀或钳子剪断电子线束	
4-1	用螺丝刀拆除摄像头	3
4-2	用钳子拆除线路板上盖板	
4-3	清除线路板胶纸	
4-4	拆下手机主板	

表2 智能手机的拆解工序

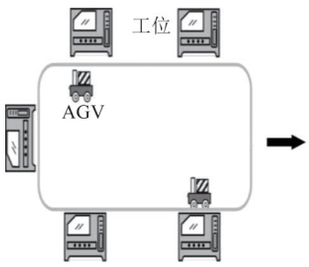
Tab.2 Intelligent machine dismantling process

序号	工步	拆解时长/min
1-1	拧下电池盖固定螺钉	6
1-2	取下电池盖	
1-3	撕掉石墨散热膜	
2-1	拧下主板上固定螺钉	5
2-2	取下摄像头盖,拆下前后摄像头、听筒	
2-3	断开电池BTB、FNBTB、FKBTB	
2-4	取下主板	
3-1	拧下扬声器支架螺钉	3
3-2	拆卸RF射频线	
3-3	拆卸电池(电池和屏幕组件黏接在一起)	
4-1	拧下副板上固定螺钉,取下副板盖	4
4-2	取下马达、扬声器、RF射频	
4-3	拆下FK板	

3.1.2 拆解车间布局

实地采集该企业的拆解产线,按照分布特点,将其简化为U型串联产线布局,拆解车间工位与AGV布局如图5所示,其中P_s表示AGV的出发地即仓库,M_x表示机器.其变量为工位数量和AGV数量.

AGV的运输任务调度规则:当工件i从仓库中出库时,运送任务的起点位置即为仓库.工件i在加工单元k进行第j道工序加工,相应的加工单元k相关联的3个阶段的运输任务分别为:工件出库,工件i从仓库出库位置由AGV运送到第1道工序对应的加工单元k.工件加工,工件i在加工单元k加工完后,运



(a)车间工位

设备	P_s	M_1	M_2	M_3	M_4	M_5	M_6
P_s	0	4	6	4	2	4	6
M_1	4	0	4	6	2	4	6
M_2	6	4	0	4	4	6	4
M_3	4	6	4	0	2	4	2
M_4	2	2	4	2	0	2	4
M_5	4	4	6	4	2	0	2
M_6	6	6	4	2	4	2	0

(b)车间设备

图5 拆解车间工位与AGV布局

Fig.5 Disassembly workshop station and AGV layout

输任务的开始位置为工件i的第j道工序所在的加工单元k的位置,AGV运输的终点位置为工件i的第j+1道工序所在的加工单元位置.工件入库,工件i在最后一道工序加工完成后,由AGV运输入库,AGV的终点位置为仓库.

3.2 案例参数设置

基于MATLAB R2021a算法进行求解,配置为:CPU Intel(R) Core(TM) i7-7500,主频3.6 GHz,内存16 GB,Win10系统的计算机.本文涉及的案例有3台机器和6台机器2种布局距离,分别如表3和表4所示.

表3 3台机器的布局距离

Tab.3 3 machine layout distance **m**

设备	P_s	M_1	M_2	M_3
P_s	0	4	6	4
M_1	4	0	4	6
M_2	6	4	0	4
M_3	4	6	4	0

表4 6台机器的布局距离

Tab.4 6 machine layout distance **m**

设备	P_s	M_1	M_2	M_3	M_4	M_5	M_6
P_s	0	4	6	4	2	4	6
M_1	4	0	4	6	2	4	6
M_2	6	4	0	4	4	6	4
M_3	4	6	4	0	2	4	2
M_4	2	2	4	2	0	2	4
M_5	4	4	6	4	2	0	2
M_6	6	6	4	2	4	2	0

3.3 优化结果分析

3.3.1 小算例分析

为验证所提模型和算法的有效性,本文以4种产品3台机器为例,3台机器拆解时长如表5所示,工位之间的布局距离如表3所示,机器1(M_1)、机器2(M_2)、机器3(M_3)与仓库P_s之间的距离分别为4 m、6 m、4 m,AGV的运行速度为30 m/min,拖期成本按50元/min进行计算.

表5 3台机器拆解时长

Tab.5 3 machine disassembly time

工序	工步	拆解时长/min		
		M_1	M_2	M_3
J_1	O_{11}	2	6	3
	O_{12}	3	8	—
	O_{13}	4	5	3
J_2	O_{21}	3	—	6
	O_{22}	4	6	5
	O_{23}	—	7	11
J_3	O_{31}	—	4	6
	O_{32}	5	—	6
	O_{33}	—	7	10
J_4	O_{41}	4	3	5
	O_{42}	—	7	4
	O_{43}	3	4	2

图6为3台机器单辆AGV的小算例调度方案,最大完工时间为22 min,车间物流和生产拖期总成本为1 400元.

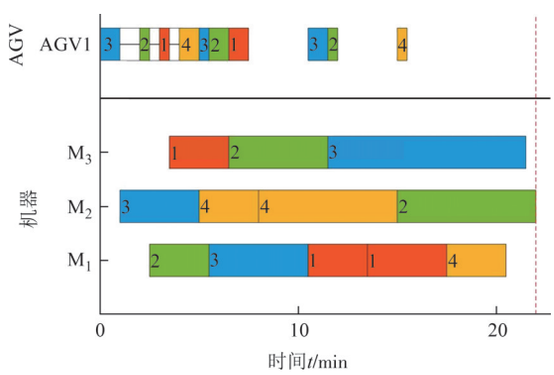


图6 3台机器单辆AGV的小算例调度方案

Fig.6 Small example scheduling scheme of 3 machine single AGV

图7为3台机器2辆AGV的小算例调度方案,最大完工时间为21 min,车间物流和生产拖期总成本为600元.

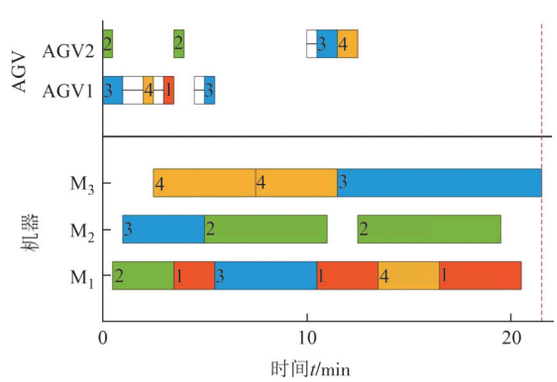


图7 3台机器2辆AGV的小算例调度

Fig.7 Small example scheduling scheme of 3 machine 2 AGV

对比图 6 和图 7 可知,增加 AGV 的数量对车间作业时长的影响不大,而使车间拖期成本降低了 57.1%,主要原因是在增加 AGV 数量的情况下,工位缓存区的运输更加准时,使得 AGV 的等待时间大为缩短.

3.3.2　大算例分析

为提升模型和算法优化的可靠性,本文增加算例尺寸,对 10 种产品 6 台机器的实例进行计算求解.6台机器拆解时长如表6所示.

表 6　6台机器拆解时长

Tab.6　6 machine disassembly time

工序	工步	拆解时长/min					
		M_1	M_2	M_3	M_4	M_5	M_6
J_1	O_{11}	2	6	3	—	4	7
	O_{12}	3	8	—	6	6	—
	O_{13}	4	5	3	7	—	3
J_2	O_{21}	3	—	6	—	7	5
	O_{22}	4	6	5	5	—	4
	O_{23}	—	7	11	4	6	—
J_3	O_{31}	—	4	6	4	—	7
	O_{32}	5	—	6	—	3	4
	O_{33}	—	7	10	4	7	6
J_4	O_{41}	4	3	5	3	7	4
	O_{42}	—	7	4	4	4	2
	O_{43}	3	4	2		2	3

图 8 为 6 台机器单辆 AGV 的大算例调度方案,最大完工时间为 58 min,车间物流和生产拖期总成本为 3 600 元.图 9 为 6 台机器 3 辆 AGV 的大算例调度方案,最大完工时间为 56 min,车间物流和生产拖期总成本为 1 500 元.

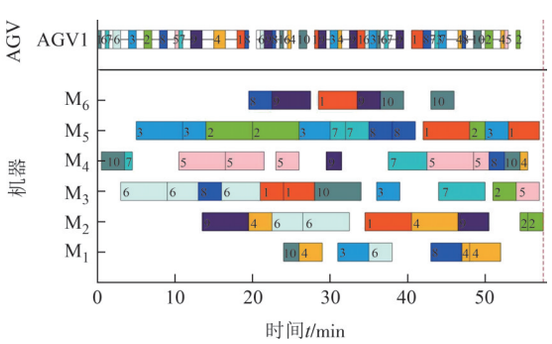


图 8　6台机器单辆AGV的大算例调度方案

Fig.8　Large example scheduling scheme of 6 machine single AGV

对比图 8 和图 9 可知,AGV 的数量由 1 增加到 3,而最大完工时长的变化差别不大,而拖期成本降低了 58.3%.这表明,在大尺寸算例调度方案中,随着

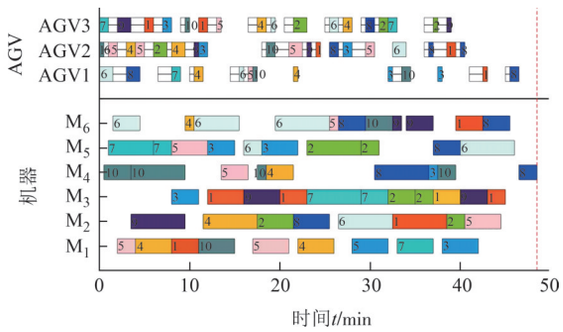


图 9　6台机器3辆AGV的大算例调度方案

Fig.9　Large example scheduling scheme of 6 machine 3 AGV

AGV 数量的增加,生产拖期总成本有明显降低,空闲时长有明显减少,提升了车间物流调度的效率.

4　结 论

本文针对退役产品拆解车间逆向生产与物流集成调度优化问题进行了研究,将退役产品拆解车间生产与物流集成优化,得出结论:

1)建立了退役产品拆解生产车间的生产与物流协同调度模型.根据退役产品拆解车间作业过程的生产和物流特点,协同优化完工时长和拖期成本.

2)提出了一种生产和物流集成调度拆解车间优化方法,设计了同时考虑 AGV 路径决策的初始化方法,提高初始种群质量;采用改进的均匀交叉和 POX 交叉并用的染色体交叉方法,提升交叉的准确性;提出了一种带染色体修复的多点变异方法,保障变异的稳定性.

3)以某公司退役手机拆解为例,分别计算了在不同尺寸下的车间调度优化方案.结果表明:在拆解车间生产过程中,增加物流设备数量可有效降低生产拖期成本,验证了模型的有效性.

本文提出的退役产品拆解车间生产与物流协同优化模型并未考虑车间生产对环境、碳排放等因素的影响,未来研究须综合考虑在其他指标下,退役产品拆解车间生产和物流调度的优化.

参考文献

[1]　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)

[2] YIN K X, WEI R R, RUAN J X, et al. Life cycle assessment and life cycle cost analysis of surgical mask from production to recycling into hydrogen process[J]. Energy, 2023, 283: 129225.

[3] 马新一,匡增彧,卓晓军,等. 考虑不确定性条件的退役产品拆解柔性调度[J]. 工业工程,2023,26(4):144-153.
MA X Y, KUANG Z Y, ZHUO X J, et al. Flexible scheduling of decommissioned product disassembly under uncertain conditions [J]. Industrial Engineering Journal, 2023, 26(4): 144-153.(in Chinese)

[4] ONOZUKA S, KISHITA Y, MATSUMOTO M, et al. Quantitative assessment method for supporting scenario workshops toward sustainable consumption and production [J]. Procedia CIRP, 2021, 98: 49-54.

[5] 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)

[6] LIU Z C, LUO Q, WANG L, et al. The low-carbon scheduling optimization of integrated multispeed flexible manufacturing and multi-AGV transportation[J]. Processes, 2022, 10(10): 1944.

[7] 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)

[8] LIU Q H, WANG N J, LI J, et al. Research on flexible job shop scheduling optimization based on segmented AGV[J]. Computer Modeling in Engineering & Sciences, 2023, 134(3): 2073-2091.

[9] ZHANG H L, QIN C Q, ZHANG W H, et al. Energy-saving scheduling for flexible job shop problem with AGV transportation considering emergencies[J]. Systems, 2023, 11(2): 103.

[10] POPPER J, YFANTIS V, RUSKOWSKI M. Simultaneous production and AGV scheduling using multi-agent deep reinforcement learning [J]. Procedia CIRP, 2021, 104: 1523-1528.

[11] KRISHNAMOORTHY P, SATHEESH N, SUDHA D, et al. Effective scheduling of multi-load automated guided vehicle in spinning mill: a case study [J]. IEEE Access, 2023, 11: 9389-9402.

[12] REN Y P, LU X Y, GUO H F, et al. A review of combinatorial optimization problems in reverse logistics and remanufacturing for end-of-life products[J]. Mathematics, 2023, 11(2): 298.

[13] ZHANG W K, ZHENG Y F, AHMAD R. An energy-efficient multi-objective integrated process planning and scheduling for a flexible job-shop-type remanufacturing system [J]. Advanced Engineering Informatics, 2023, 56: 102010.

[14] 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)

[15] 李西兴,杨道明,李鑫,等. 基于混合遗传鲸鱼优化算法的柔性作业车间自动导引车融合调度方法[J]. 中国机械工程,2021,32(8):938-950.
LI X X, YANG D M, LI X, et al. Flexible job shop AGV fusion scheduling method based on HGWOA [J]. China Mechanical Engineering, 2021, 32(8): 938-950.(in Chinese)

[16] ZHANG Z Q, YAN J P, LU X C, et al. Optimization of porosity and surface roughness of CMT-P wire arc additive manufacturing of AA2024 using response surface methodology and NSGA-Ⅱ[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2023, 24: 6923-6941.

[17] 陈鸿海, 蒋增强, 左乐, 等. 基于近亲变异NSGA-Ⅱ算法的多目标柔性作业车间调度[J]. 农业机械学报, 2015, 46(4): 344-350.
CHEN H H, JIANG Z Q, ZUO L, et al. Multi-objective flexible job-shop scheduling problem based on NSGA-Ⅱ with close relative variation [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(4): 344-350.(in Chinese)

[18] LI Y B, HUANG W X, WU R, et al. An improved artificial bee colony algorithm for solving multi-objective low-carbon flexible job shop scheduling problem[J]. Applied Soft Computing, 2020, 95: 106544.

[19] 秦红斌, 孔仁杰, 常永顺, 等. 基于混合平衡优化器算法的多目标柔性作业车间多重动态调度研究[J]. 工业工程, 2023, 26(5): 78-88.
QIN H B, KONG R J, CHANG Y S, et al. Multiple dynamic scheduling of multi-objective flexible job shops based on a hybrid equilibrium optimizer algorithm [J]. Industrial Engineering Journal, 2023, 26(5): 78-88.(in Chinese)

[20] 高丽, 周炳海, 杨学良, 等. 基于多规则资源分配的柔性作业车间调度问题多目标集成优化方法[J]. 上海交通大学学报, 2015, 49(8): 1191-1198.
GAO L, ZHOU B H, YANG X L, et al. A multi-objective integrated optimization method for FJSP based on multi-rule resource allocation[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2015, 49(8): 1191-1198.(in Chinese)

[21] VITAL-SOTO A, BAKI M F, AZAB A. A multi-objective mathematical model and evolutionary algorithm for the dual-resource flexible job-shop scheduling problem with sequencing flexibility [J]. Flexible Services and Manufacturing Journal, 2023, 35(3): 626-668.