

王恒,唐孝国. 汽车制造涂装-总装缓存调序区调度优化问题的研究[J]. 智能计算机与应用, 2024, 14(4): 89-95. DOI: 10.20169/j.issn.2095-2163.240412

汽车制造涂装-总装缓存调序区调度优化问题的研究

王恒, 唐孝国

(铜仁职业技术学院 信息工程学院, 贵州 铜仁 554300)

摘要: 当今世界绿色制造是大势所趋,有效的生产线布局设计方法可以减少加工过程中的资源浪费。本文聚焦汽车制造涂装-总装缓存调序区,针对其存在的设备利用率低、待机时间长、交接效率低等核心问题,构建了一个多目标规划模型。该模型综合考虑了多约束条件,包括汽车制造过程中的缓冲区设备利用、交接以及调度时间等因素;严格遵循 PBS 约束及相关时间数据,根据涂装出车序列,结合 PBS 区域调度能力及限制,确保模型的精准性和实用性。为求解这一复杂的多目标优化问题,提出了一种创新的求解方法,该方法结合了改进粒子群算法和遗传算法的优势,能够更有效地找到最优解,不仅为汽车制造涂装-总装缓存调序区的调度问题提供了新的理论支撑,而且为探究独立缓冲区对汽车制造待产车调度的影响开辟了新的途径。

关键词: PBS 约束; 缓存调序区; 区域调度; 粒子群算法; 遗传算法

中图分类号: TP391

文献标志码: A

文章编号: 2095-2163(2024)04-0089-07

Research on scheduling optimization of the cache sequencing area for automobile manufacturing painting and assembly

WANG Heng, TANG Xiaoguo

(School of Information Engineering, Tongren Polytechnic College, Tongren 554300, Guizhou, China)

Abstract: Green manufacturing is the trend in the world today, and effective production line layout design methods can reduce resource waste in the processing process. This article focuses on the automotive manufacturing coating final assembly cache sequencing area, and constructs a multi-objective planning model to address its core issues such as low equipment utilization, long standby time, and low handover efficiency. This model comprehensively considers multiple constraints, including buffer zone equipment utilization, handover, and scheduling time in the automotive manufacturing process. Strictly adhere to PBS constraints and relevant time data, based on the painting shipment sequence, combined with PBS regional scheduling capabilities and limitations, to ensure the accuracy and practicality of the model. To solve this complex multi-objective optimization problem, an innovative solution method is proposed, which combines the advantages of improved particle swarm optimization algorithm and genetic algorithm to more effectively find the optimal solution. This study not only provides new theoretical support for solving the scheduling problem of the automotive manufacturing coating final assembly buffer scheduling area, but also opens up new avenues for exploring the impact of independent buffer zones on the scheduling of automotive production vehicles.

Key words: PBS constraint; cache sequencing area; regional scheduling; particle swarm optimization; genetic algorithm

0 引言

为了满足市场的多样化需求,汽车混流生产线上的产品种类越来越多,混流生产中的产品切换通常会带来切换时间、生产时间和物料需求的变化,复杂的生产过程需要更加精准的调度计划。汽车生产主要包含冲压、焊装、涂装以及总装四大生产工

艺^[1]。每一个车间计划都需要考虑关联车间的计划安排,从而制定合理的生产计划,以提高加工效率、减少生产成本、缩短订单完成时间。传统的依靠经验和手工编排方式制定的生产计划难以实现车间的合理调度,迫切需要一种科学、高效地面向混流生产的计划调度方法^[2-3]。生产线的不平衡会造成资源浪费,生产效率低下的问题,这样的问题是汽车企

作者简介: 王恒(1985-),男,博士研究生,讲师,主要研究方向:智能计算与混合系统,人工智能,故障诊断研究等。Email: 254782072@qq.com

收稿日期: 2024-01-08

哈尔滨工业大学主办 ◆ 学术研究与应用

业所必须面对的^[4-5]。线平衡的基本思想是将生产任务尽可能平均地分配到各个工位/机器上,以此解决“工作超负荷”和“工作闲置”情况,实现生产的“平顺化”,进而提升生产效率^[6]。从更加广义的概念上来讲,也可以把线平衡理解为公平性的一种体现,即不同机器/工位的工作量保持尽量相近/公平,不会让某些机器/工位太累,也不会让某些机器/工位太闲^[7-8]。由于各车间的约束不同导致生产调度无法按照同一序列连续生产,特别是涂装车间与总装车间序列差异较大,需要在两个车间之间建立一个具有调序功能的缓存区,即汽车制造涂装-总装缓存调序区(Painted Body Store, PBS),用来将涂装车间的出车序列调整到满足总装车间约束的进车序列^[9-10]。

粒子群优化(Particle Swarm Optimization, PSO)算法,是由 Kennedy 和 Eberhart 于 1995 年提出的一种高效的群体智能搜索算法。该算法模仿鸟类的飞行觅食行为,通过群体中粒子间的合作和竞争指导迭代优化过程,保留了种群的全局搜索策略,避免了复杂的遗传操作,具有不依赖问题信息、通用性强、原理简单、易于实现等优点^[11-12]。为降低能耗,本文针对该生产线的布局设计提出了一种基于改进粒子群算法结合遗传算法并考虑独立缓冲器配置和闲置分析的新方法,研究独立缓冲区对汽车制造中待产车调度的影响。

1 背景介绍

目前汽车制造厂主要由焊装车间、涂装车间、总装车间构成,每个车间有不同的生产偏好,如:焊装车间由于车身夹具的限制偏向最小车型及配置切换生产;涂装车间由于喷漆(固定每5辆车清洗喷头、颜色切换也需清洗喷头)限制偏向颜色以5的倍数切换生产;总装车间由于人工工时(不同车型及配置人工工时不同)及硬件(零部件数量等)等限制偏向按照车型及配置按比例切换生产^[13-14]。

目前,一天安排上线生产的车辆数介于200-450之间,对于每天要上线生产的车辆,车型、颜色等属性均有变化,目前车型大类有2类,颜色大约有10种,各个车间的产能不定,主要根据当天生产安排调整,涂装车间及总装车间的工艺流程如下:涂装车间处理喷漆主要是将涂料涂覆于白车身表面,最终形成涂膜或者漆膜或者涂层,主要是将白车身经过前处理电泳-中涂-色漆-清漆,最终得到修饰完整的车身;总装车间处理装配工艺,主要是组装剩余零部件,得到最终成品车辆,由内饰线、底盘线、最终线组成,最终经过测试检验后,成品车辆下线入库^[15]。

总装车间处理装配工艺,组装剩余零部件,得到最终成品车辆。总装车间的工艺详细流程如图1所示,主要由内饰线、底盘线、最终线组成,最终经过测试检验后,成品车辆下线入库。

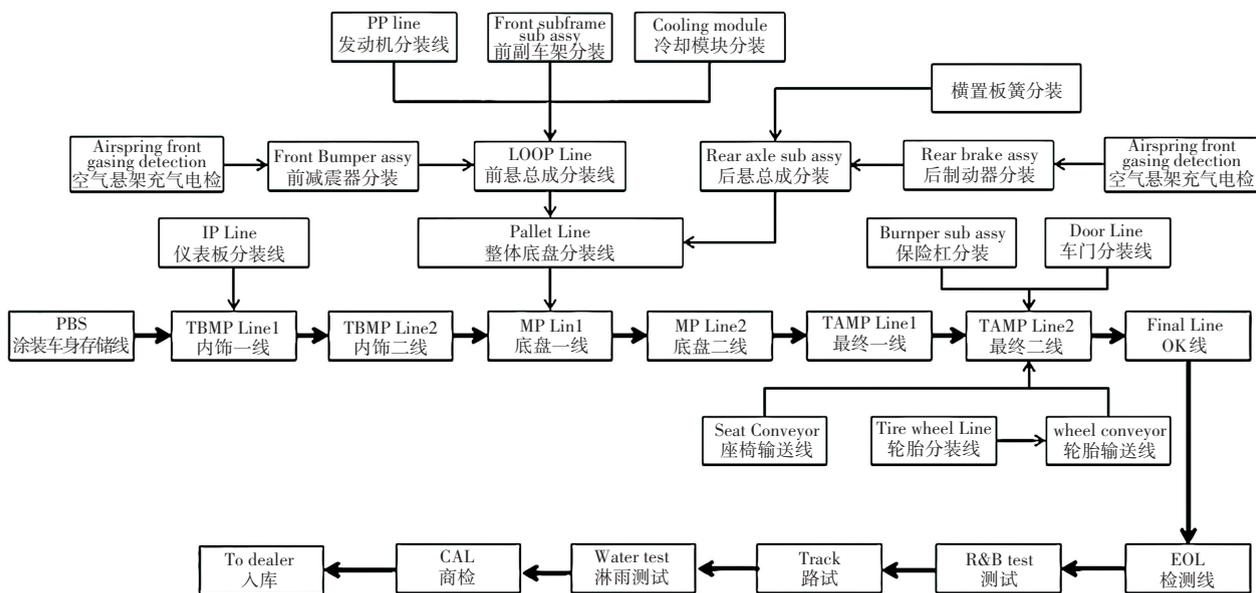


图1 总装车间工艺流程图

Fig. 1 Process flow chart of assembly workshop

2 PBS 调度调整问题描述

PBS 系统由多个区域组成,包括涂装-PBS 出车口、接车横移机、进车道(每条进车道有 10 个停车位,采用先入先出(First In First Out, FIFO)结构、返回道(包含 10 个停车位)、送车横移机以及 PBS-总装接车口。这些区域之间,车道距离均等,每条车道的宽度为 2 m,相邻车道之间的间隔为 1 m。此外,横移机的运动速度保持一致。根据涂装车间的出车序列,通过 PBS 调度调整,形成总装车间的进车序列^[16-17]。

根据要求建立一个 PBS 优化调度模型,使得总装进车序列尽可能满足总装生产需求。在给定的约束条件下依次满足目标:

- (1) 混动车型间隔 2 台非混动车型;
- (2) 四驱车型与两驱车型倾向 1 : 1 出车序列;
- (3) 尽量不使用返回道;
- (4) 调度时间最小化。

以所给的 4 个目标为规划目标,建立一个多目标规划模型。由于各个规划目标之间存在主次关系,根据题目要求,各个目标权值的分配为目标(1)~(4)分别取权值 0.4、0.3、0.2 和 0.1,因此可以使用分层序列法进行求解。按照目标重要性序列(1)~(4),依次求得模型的最优解,即首先对目标(1)求得最优解集,然后在这个最优解集的基础上再依次对目标(2)~(4)求最优解集。

3 PBS 调度调整问题模型

针对以上的要求,尽可能多的满足混动车型间隔 2 台非混动车型,同时尽可能多的满足四驱车型与两驱车型倾向 1 : 1 出车序列,并且尽可能少使用返回道,最后倾向总调度时间越小越好。为了更好的通过数学语言描述问题,建立数学模型。通过问题分析,本文建立了决策变量、目标函数和约束条件。

3.1 决策变量

$$x_i^k = \begin{cases} 1, & \text{混动车 } k \text{ 与下辆连续的混动车之间有两辆非混动车型} \\ 0, & \text{否则} \end{cases}$$

$$f_i^p = \begin{cases} 1, & \text{分块 } p \text{ 中四驱和两驱车比例为 } 1 : 1 \\ 0, & \text{否则} \end{cases}$$

$$r_i = \begin{cases} 1, & \text{汽车 } i \text{ 使用了返回道} \\ 0, & \text{否则} \end{cases}$$

$$e_{i,j} = \begin{cases} 1, & \text{上游车间车辆 } i \text{ 被分配给下游理想序列 } j \text{ 时} \\ 0, & \text{否则} \end{cases}$$

$$d_{n,m} = \begin{cases} 1, & n \text{ 车道 } m \text{ 车位有车时} \\ 0, & \text{否则} \end{cases}$$

3.2 目标函数

(1) 在目标(1)中,要尽可能多的满足混动车型间隔 2 台非混动车型,建立 $\max \sum_{i=1}^L x_i^k$, 目标函数,即等价于 $\min - \sum_{i=1}^L x_i^k$;

(2) 在目标(2)中,要尽可能多的满足四驱车型与两驱车型倾向 1 : 1 出车序,有 $\max \sum_{i=1}^L f_i^p$, 即等价于 $\min - \sum_{i=1}^L x_i^p$;

(3) 在目标(3)中,要使得尽可能少使用返回道,建立目标函数 $\min \sum_{i=1}^L r_i$;

(4) 在目标(4)中,倾向总调度时间越小越好,建立目标函数 $\min(T_{\max} - T)$ 。

综上所述,得到目标函数 $\min - \lambda_1 \sum_{i=1}^L x_i^k - \lambda_2 \sum_{i=1}^L f_i^p + \lambda_3 \sum_{i=1}^L r_i + \lambda_4(T_{\max} - T)$ 。

其中, $\lambda_1 = 0.4, \lambda_2 = 0.3, \lambda_3 = 0.2, \lambda_4 = 0.1$ 为多目标权重系数。

3.3 约束条件

(1) 为了保证上下游车间排产序列两两对应,即待排序中的车辆在各车间均有对应且唯一的序号,需满足的约束条件如表达式(1):

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^L e_{i,j} = 1, j = 1, \dots, L \\ \sum_{j=1}^L e_{i,j} = 1, i = 1, \dots, L \end{cases} \quad (1)$$

(2) 为保证待排产的每个车辆均需要通过线性缓冲区,有约束条件,如式(2)所示:

$$\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N x_{n,m} = L \quad (2)$$

(3) 为保证待排产的每个车辆只能分配给一条进车道,规定约束条件如式(3)所示:

$$\sum_{n=1}^N x_{i,n} = 1, i = 1, \dots, L \quad (3)$$

(4) 为保证线性缓冲区的容量不小于每批次待排产的每个车辆数目,约束条件如式(4)所示:

$$N \times M \geq L \quad (4)$$

(5) 为保证整个缓存区车辆满足先入先出(FIFO)原则, $ap_{n,m}$ 为车道 n 车位 m 的车辆对应上游车间序列中的位置, $ad_{n,m}$ 为车道 n 车位 m 的车辆对应下游车间序列中的理想位置, 当 $x_{n,m-1} = 1, x_{n,m} = 1$ 时, 约束条件如式(5)所示:

$$\begin{cases} ap_{n,m-1} < ap_{n,m}, n = 1, \dots, N, m = 1, \dots, M \\ ad_{n,m-1} < ad_{n,m}, n = 1, \dots, N, m = 1, \dots, M \end{cases} \quad (5)$$

(6) r_i 表示第 i 辆待产车使用了返回道, 送车横移机不能将返回道的车身送入 PBS - 总装接车口, 约束条件如式(6)所示:

$$x_{n,m,j} \geq r_i, j = 1, \dots, L \quad (6)$$

(7) 车身在进车道和返回道的移动方向不得改变, 约束条件如式(7)所示:

$$m_{t+1} < m_t, t = 1, \dots, T_{\max}, \text{对于进车道} \quad (7)$$

$$m_{t+1} > m_t, t = 1, \dots, T_{\max}, \text{对于返回道}$$

(8) 当某车身所在停车位的下一停车位出现空位时, 车身必须立即开始向下一停车位移动, 约束条件如式(8)所示:

$$td_{n,m} = td_{n,m+1}, td = 1, \dots, T_{\max} \quad (8)$$

(9) 如果任意进车道 1 停车位有车身, 那么送车横移机不能设置为空闲状态, 接车横移机空闲时 $VRTM$ 取 1, 否则取 0, 约束条件如式(9)所示:

$$d_{n,1} \geq VDTM, n = 1, \dots, N \quad (9)$$

(10) r_i 表示第 i 辆待产车使用了返回道, 当返回道 10 停车位有车身, 同时接车横移机空闲时, 优先处理返回道 10 停车位上的车身, 约束条件如式(10)所示:

$$r_m > VRDM \quad (10)$$

(11) $Fx_{n,1}$ 表示若干进车道 1 停车位有车身等候, 最先到达 1 停车位的车身。当若干进车道 1 停车位有车身等候, 同时送车横移机空闲时, 优先处理最先到达 1 停车位的车身, 约束条件如式(11)所示:

$$Fx_{n,1} \geq VDTM \quad (11)$$

综上所述, 可以得到问题一的加权单目标函数模型:

$$\min - \lambda_1 \sum_{i=1}^L x_i^k - \lambda_2 \sum_{i=1}^L J_i^p + \lambda_3 \sum_{i=1}^L r_i + \lambda_4 (T_{\max} - T)$$

4 算法设计

粒子群优化(Particle Swarm Optimization, PSO)是一种基于群体智能的优化算法, 通过模拟鸟类的飞行觅食行为, 利用粒子间的合作与竞争机制来指导迭代优化过程, 粒子群优化算法能够获得高质量的最优解, 在解决各种复杂问题方面表现出色, 具有

广泛的应用前景^[18-19]。设粒子个数为 N , 维数为 D , 位置向量为 $X_i = [x_{i,1}, x_{i,2}, \dots, x_{i,d}, \dots, x_{i,D}]$, 速度向量 $V_i = [v_{i,1}, v_{i,2}, \dots, v_{i,d}, \dots, v_{i,D}]$, 每个粒子经过的历史最好位置记为 $pbest$, 种群中所有粒子的历史最佳位置记为 $gbest$, 当迭代进行到第 $k+1$ 次时, 粒子群算法根据公式(12)更新粒子群的速度和位置:

$$\begin{cases} v_{i,d}^{k+1} = \omega \times v_{i,d}^k + C_1 \times r_1 \times [p_{i,d}^k - x_{i,d}^k] + \\ C_2 \times r_2 \times [p_{g,d}^k - x_{i,d}^k] \\ x_{i,d}^{k+1} = v_{i,d}^{k+1} + x_{i,d}^k \end{cases} \quad (12)$$

其中, $i \in (1, 2, \dots, N), d \in (1, 2, \dots, D), \omega$ 为惯性权重; c_1 和 c_2 为学习因子; r_1 和 r_2 为 $[0, 1]$ 间均匀分布的随机数。

生产调度问题通常具有离散的特性, 需要将连续的优化算法进行适当的离散化处理。为了解决这个问题, 将汽车混流装配线的调度排序方案和 PSO 算法中粒子的位置向量建立映射关系, 把车辆队列的排序方案作为粒子群的位置矢量, 这样可以将连续的优化问题转化为离散的调度问题^[20]。

借鉴遗传算法(Genetic Algorithm, GA)中的交叉和变异操作, 并将其应用到粒子群算法中的位置更新, 使粒子在搜索空间中更有效地寻找到最优解。本文设计了一种混合型的离散粒子群算法(Hybrid Distribution PSO, HDPSO), 结合了离散化处理和遗传算法的优点, 有效地求解生产调度问题。

4.1 粒子群的位置更新

通过粒子的交叉和变异操作, 可以实现更广泛的搜索空间和更高的搜索效率, 从而找到最优的调度方案^[21]。

混合离散粒子群算法的位置更新如式(13)所示:

$$X_i^{k+1} = C_2 \otimes f(C_1 \otimes g(\omega \otimes h(X_i^k), pB_i^k), gB^k) \quad (13)$$

其中, $i \in (1, 2, \dots, N), \omega$ 为惯性权重, c_1 和 c_2 为学习因子, $\omega, c_1, c_2 \in [0, 1]$ 。

对于上述位置更新公式的描述如式(14)所示:

$$R_i^k = \omega \otimes h(X_i^k) = \begin{cases} h(X_i^k), \beta_1 < \omega \\ X_i^k, \beta_1 \geq \omega \end{cases} \quad (14)$$

通过适当的变异操作, 可有效地扩展粒子的搜索空间, 提高算法的搜索效率。

逆序变异操作涉及生成两个不同的随机数 a 和 b 。首先, 选取 X_i^k 中位于位置 a 和位置 b 之间的车辆号; 其次, 这些车辆号会按照逆序排列, 并放回原来的位置。这一操作有助于增加粒子的搜索空间, 从而更有效地寻找最优解。在粒子群算法中, S_i^k 表示自身对粒子行为的影响, 如式(15)所示:

$$S_i^k = C_{1q_1} \otimes g(R_i^k \otimes pB_i^k) = \begin{cases} g(R_i^k \otimes pB_i^k), \beta_2 < C_1 \\ R_i^k, \beta_2 \geq C_1 \end{cases} \quad (15)$$

其中, β_2 是一个在 $[0,1]$ 范围内的随机数,而

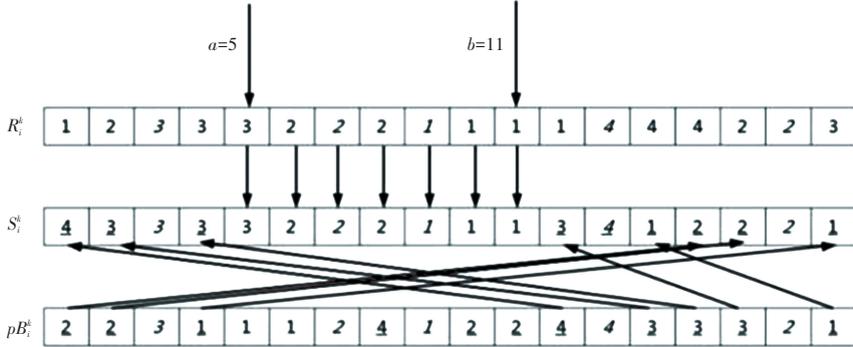


图2 两点相似工件交叉原理图

Fig. 2 Schematic diagram of two similar work-pieces crossing

两点相似工件交叉将 R_i^k 和 pB_i^k 中位于相同位置的相同元素复制到 S_i^k 中,随机产生交叉点 a 和 b ($b \geq a$),将 R_i^k 中位于位置 a 和 b 之间的元素复制到 S_i^k 中;将 pB_i^k 中的元素依次填入 S_i^k 中最前面的空位上,相同元素除外。同样采用两点相似工件交叉, T_i^k 表示社会因素对粒子行为的影响,如式(16)所示:

$$T_i^k = C_2 \otimes f(S_i^k \otimes gB^k) = \begin{cases} f(S_i^k \otimes gB^k), \beta_3 < C_2 \\ S_i^k, \beta_3 \geq C_2 \end{cases} \quad (16)$$

其中, β_3 是取值 $[0,1]$ 的随机数, $f()$ 为交叉操作算子。

4.2 基于非递减最早完成时间 (NEH) 的局部搜索能力增强策略

粒子群算法 (PSO) 具有出色的并行性和全局粗搜索能力,可以快速地找到问题的近似解。然而,PSO 在局部精搜索方面的能力较弱,过早地陷入局部最优解而无法继续寻找更好的解。基于 NEH 方法的邻域搜索是一种有效的策略,提高算法的局部开发能力。通过结合 NEH 方法和 PSO,来平衡算法的收敛性和搜索精度,从而提高整体的求解效果。基于 NEH 方法的邻域搜索步骤如下:

步骤 1 取 gB^k 为初始排列,记为 $\pi^0 = \{\pi^0(1), \pi^0(2), \dots, \pi^0(n)\}$;

步骤 2 取 π^0 的前两台车 $\pi^0(1)$ 和 $\pi^0(2)$,将其排序: $\{\pi^0(1), \pi^0(2)\}$ 和 $\{\pi^0(2), \pi^0(1)\}$,将调度时间短的作为当前调度;

步骤 3 令 $i = 3$,取 π^0 的第三台车,得到 i 个部

$g()$ 代表交叉操作算子。

当随机数小于 c_1 时,对当前位置进行交叉操作;反之,保持原来的位置不变。本文采用两点相似工件交叉,其原理如图 2 所示。

分调度,将调度时间短的作为当前调度;

步骤 4 令 $i = i + 1$,如果 $i \leq n$,重复步骤 3,输出最大完成时间最小的调度方案,更新 gB^k 。

4.3 算法描述

混合粒子群算法能够有效地解决汽车混流装配线调度优化问题,找到最优的车辆装配顺序,提高生产效率。混合离散粒子群算法的流程如图 3 所示。

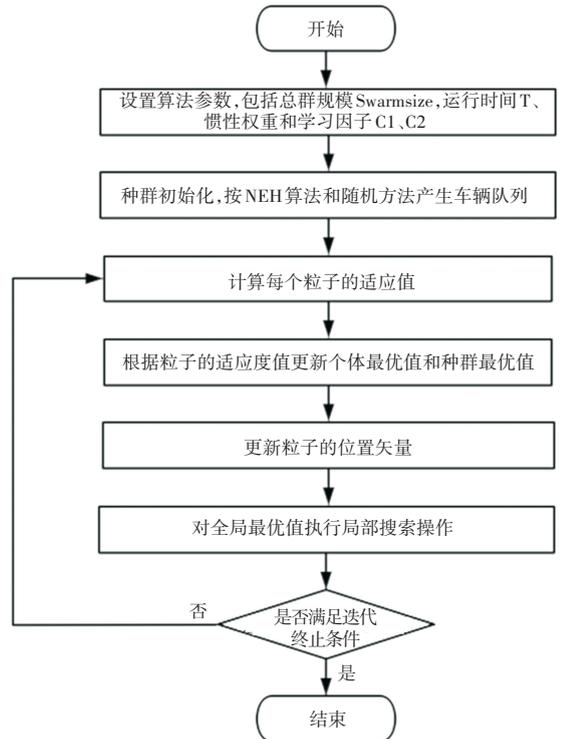


图3 算法流程图

Fig. 3 Algorithm flow chart

5 结果分析

5.1 数据说明

本文根据两套检测数据来进行结果分析,两套数据分别都包含 318 辆待产汽车, A、B 两种车型,车辆动力包括燃油和混动两种,驱动为两驱和四驱,要求首先运行第 1 套数据,然后运行第 2 套数据。第 1、第 2 套数据集的部分示例见表 1、表 2。

表 1 第 1 套数据集的部分示例

Table 1 Part of the first set of Numbers

进车顺序	车型	动力	驱动
1	B	燃油	两驱
2	A	混动	两驱
3	A	混动	两驱
4	A	燃油	两驱
5	A	混动	两驱
6	A	燃油	两驱

表 2 第 2 套数据集的部分示例

Table 2 Part of the second set of Numbers

进车顺序	车型	动力	驱动
1	B	燃油	两驱
2	A	混动	两驱
3	A	混动	两驱
4	A	燃油	两驱
5	A	燃油	两驱
6	A	燃油	两驱

根据每个车身在每一秒所处的区域,构建二维矩阵,存储区域代码(如 200 辆车在第 1 000 s 完成全部调度,则需提交 200×1 000 的矩阵)。矩阵中每一个值为各个区域代码,总的区域代码有 74 个,区域与代码的对应关系示例见表 3。

表 3 车身区域代码部分示例

Table 3 Partial examples of body area codes

区域	代码
1 进车道 1 停车位	11
1 进车道 2 停车位	12
1 进车道 3 停车位	13
1 进车道 4 停车位	14
1 进车道 5 停车位	15
1 进车道 6 停车位	16

5.2 数值结果分析

本文设定了 4 个主要目标:

- (1) 混动车型与非混动车型的间隔应为 2 台,以实现更优的配置;
- (2) 四驱车型与两驱车型的出车序列应保持 1:1 的比例,以确保平衡和效率;
- (3) 尽量减少返回道的使用的次数,以达到更高的运行效率;
- (4) 总调度时间应尽可能短,以优化调度流程并降低成本。

其比例权重分别为 0.4、0.3、0.2 和 0.1。设置每个优化目标初始分,得分计算规则更新得分,再乘以相应系数,得到最终加权总分。得分计算规则如下:

- (1) 优化目标 1(权重系数 0.4,初始分 100 分);
- (2) 优化目标 2(权重系数 0.3,初始分 100 分);
- (3) 优化目标 3(权重系数 0.2,初始分 100 分);
- (4) 优化目标 4(权重系数 0.1,初始分 100 分)。

针对以上得分规则,为了体现数据的科学性,各个数据集各个目标计算 30 次得分,取平均和标准差,对于目标 1—目标 4,在第 1 套数据集上计算得分见表 4,本文模型在数据集 A 上的的总得分为 30.96。

表 4 第 1 套数据集各目标计算得分表(30 次)

Table 4 Goals of the first dataset score table for each goal calculation (30 times)

目标	得分平均值	得分标准差
目标 1	-16.1	11.8
目标 2	74.4	8.65
目标 3	72.8	8.46
目标 4	5.2	9.36

在第 2 套数据集上计算得分见表 5,本文模型在第 2 套数据集上的总得分为 23.72。

表 5 第 2 套数据集各目标计算得分表(30 次)

Table 5 Goals of the second dataset score table for each goal calculation (30 times)

目标	得分平均值	得分标准差
目标 1	-25.80	9.56
目标 2	72.30	7.61
目标 3	60.20	5.50
目标 4	3.10	6.33

5.3 仿真结果分析

仿真输出结果为各个时刻各车辆的位置信息表,表 6 和表 7 分别为部分第 1 套数据集和第 2 套数据集调度时车辆的编码位置信息。

表6 第1套数据集各调度车辆编码位置信息(30次)

Table 6 Code location information of each dispatching vehicle in the first dataset (30 times)

待产车编号		车辆编码位置信息														
1	210	29	28	27	26	25	24	23	22	21						
2							310	39	38	37	36	35	34	33	32	31

表7 第2套数据集目标各调度车辆编码位置信息(30次)

Table 7 Code location information of each dispatching vehicle in the second dataset (30 times)

待产车编号		车辆编码位置信息														
1	410	49	48	47	46	45	44	43	42	41						
2							610	69	68	67	66	65	64	63	62	61

通过对原有算法的优化,本文提出的模型能更高效地处理优化问题,具有很高的应用价值。

6 结束语

本文将粒子群算法与遗传算法的结合,用于解决汽车制造调序区调度优化问题,该优化问题是一个 NP-Hard 问题。通过建立目标函数,在两套数据集上进行模型的计算仿真结果表明该方法取得较好的优化结果。本文提出的方法在汽车制造调序区调度优化问题方面具有良好的应用效果,为研究独立缓冲区对汽车制造中待产车调度的影响提供了一种新方法。

参考文献

[1] ZHAO S K. Hybrid algorithm based on improved neighborhood structure for flexible job shop scheduling[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2018, 24(12):3060-3072.

[2] LUO S, ZHANG L, FAN Y. Energy-efficient scheduling for multi-objective flexible job shops with variable processing speeds by grey wolf optimization[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 234:1365-1384.

[3] AN, CHEN Xiaohui, LI Youjun, et al. An improved non-dominated sorting biogeography-based optimization algorithm for the (hybrid) multi-objective flexible job-shop scheduling problem[J]. Applied Soft Computing, 2020, 99(C):106869.

[4] VIANA M S, CONTRERAS R C, MORANDIN J O. A new frequency analysis operator for population improvement in genetic algorithms to solve the job shop scheduling problem[J]. Sensors, 2022, 22(12):4561-4561.

[5] 喻代权. 汽车混流装配线动态生产调度研究及应用[D]. 重庆:重庆理工大学,2014.

[6] 李焱. 面向汽车混流生产的多级流水车间排产与调度问题研究[D]. 重庆:重庆大学,2021.

[7] 沈振宇. 面向汽车混流生产线的排产与调度问题研究[D]. 重

庆:重庆大学,2019.

[8] HIDRI L, ELSHERBEENY A M. Optimal solution to the two-stage hybrid flow shop scheduling problem with removal and transportation times [J]. Multidisciplinary Digital Publishing Institute;Symmetry,2022, 14(7):1424-1424.

[9] TINGWEI Z, ABD E W K H, ESMAEIL N S, et al. Minimizing the machine processing time in a flow shop scheduling problem under piecewise quadratic fuzzy numbers[J]. Discrete Dynamics in Nature and Society, 2022, 2022:pt3.

[10] 朱家政,张宏立,王聪,等. 基于深度强化学习的模糊作业车间调度问题[J]. 控制与决策,2024,39(2):595-603.

[11] 吴晓雯,郑巧仙. 基于改进粒子群的柔性作业车间调度问题优化研究[J]. 湖北大学学报(自然科学版),2022,44(5):501-507.

[12] KENNEDY J, EBERHART R. Particle swarm optimization[C]// Proceedings of ICNN '95 - International Conference on Neural Networks.IEEE, 1995: 1942-1948.

[13] 王柏村,朱凯凌,鲍劲松,等. 基于数字底座的涂装车身缓存区智能设计与调度优化[J]. 工程设计学报,2023,30(4):399-408.

[14] 杨晋渝. 汽车生产线自动调度系统设计[J]. 自动化与仪器仪表,2021(9):100-104.

[15] 郭伟飞,宋豫川,周璠,等. 基于逆序虚拟零部件的紧密衔接综合调度算法[J]. 计算机集成制造系统,2020,26(12):3313-3328.

[16] 刘恒,张亚加,邵乐乐,等. 汽车制造缓存区调度优化研究[J]. 陕西理工大学学报(自然科学版),2023,39(6):55-61,70.

[17] 刘凤杰,薛仁政. 混合粒子群算法求解作业车间调度问题[J]. 高师理科学刊,2022,42(6):38-43.

[18] 屈国际,李震领,鄢冰. 基于改进遗传粒子群结合算法的智能化检修配调优化设计[J]. 粘接,2023,50(12):183-187.

[19] 徐雪. 基于改进粒子群遗传混合算法的车间调度研究[D]. 昆明:昆明理工大学,2019.

[20] 周康渠,赵慧真. 混合离散粒子群算法在混流装配线生产调度中的应用[J]. 重庆理工大学学报(自然科学),2015,29(3):58-64,70.

[21] 李晨,吉桐萱. 基于改进启发式——遗传算法的流水车间调度问题研究[J]. 中国新通信,2022,24(14):119-121.