



计算机集成制造系统
Computer Integrated Manufacturing Systems
ISSN 1006-5911, CN 11-5946/TP

《计算机集成制造系统》网络首发论文

题目：考虑产品切换的客车混流装配线排序问题
作者：甘雅文，侯亮，徐昌华，张炜，陈鼎，方奕凯
收稿日期：2017-12-05
网络首发日期：2018-08-21
引用格式：甘雅文，侯亮，徐昌华，张炜，陈鼎，方奕凯. 考虑产品切换的客车混流装配线排序问题. 计算机集成制造系统.
<http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.5946.TP.20180817.1413.039.html>



网络首发：在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认：纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

考虑产品切换的客车混流装配线排序问题

甘雅文¹, 侯亮^{1*}, 徐昌华², 张炜¹, 陈鼎¹, 方奕凯¹

(1.厦门大学 航空航天学院机电工程系, 福建 厦门 361005; 2.厦门金龙联合汽车工业有限公司, 福建 厦门 361023)

摘要: 针对主客观因素交互影响下混合装配线的排序问题, 建立以最小化工作站堵塞时间与最小化产品切换次数为目标的交互排序模型, 并依据客车在实际加工过程中的传统排序方案与模型所得排序方案的结果进行对比分析。模型构建从客观因素出发, 优化堵塞时间即“重构”作业框架, 以达到对负荷高峰时期进行削峰处理的目的, 并进一步在主观因素层面上, 考虑线上操作者的作业惯性, 降低线上操作者对频繁切换产品的出错率以及保持较高熟练度时操作的方便与流畅性。引入主客观优化评价算法对模型进行计算, 决策出最优任务调度方案。对比分析结果表明, 模型获得的最优排序改善了装配线的生产堵塞时间, 同时兼顾在主观因素主导下的产品切换频率问题, 对于节省装配过程中有限的时间资源以及释放有限的空间资源起到很大作用。

关键词: 主客观因素; 产品切换; 作业惯性; 主客观优化评价算法

中图分类号: TH165; TP301

文献标识码: A

Sequencing for Bus Mixed Model Assembly Line with Consideration of Product Switching

GAN Yawen¹, HOU Liang^{1*}, XU Changhua², ZHANG Wei¹, CHEN Ding¹, FANG Yikai¹

(1. School of Aerospace Engineering, Xiamen University, Xiamen 361005, China; 2. Xiamen King Long Motor Group Co.,Ltd, Xiamen 361023, China)

Abstract: Content of abstract During the last years, the manufacturing industry is experiencing an increasing trend in the utilization of mixed-model assembly line (MMAL). In order to solve the problem of mixed model assembly line sequencing problem under the influence of subjective and objective factors, this paper establishes an interactive sequencing model aiming at minimizing the blocking time of workstations and

收稿日期: 2017-12-05; **修订日期:** 2018-06-08。Received 05 Dec. 2017; accepted 08 June 2018.

基金项目: 福建省高校产学研合作项目 (2017H6020);福建省科技重大专项(2016HZ0001-9)..

minimizing the number of switching products, and compare the sequencing of the bus in the actual processing process and sequencing results by the model. The model is constructed from objective factors, optimizing the blocking time means the "refactoring" operation frame to achieve the aim of peak shaving processing. On the subjective factor level, Consider the operation inertia of the online operator, Reduce the error rate of the online operators because of frequent switching of products and maintain a high degree of proficiency in the operation of the convenience and fluency. The subjective and objective optimization evaluation algorithm is introduced to calculate the model and make the optimal task scheduling scheme. The results show that the optimal sequencing improves the blocking time of assembly line and the efficiency of production. It plays a significant role in saving the limited time resources and releasing the limited space resources in the mixed model assembly line.

Keywords: subjective and objective factors; product switching; work inertia; subjective and objective optimization evaluation algorithm

0 引言

制造业的智能化已经成为发展的必然趋势，然而我国制造业仍存在发展不均衡、智能化程度差异较大的状况^[1]，因此，充分考虑这一进程中混流装配线的产品切换问题，对于协调人为主观因素对产线所造成的影响，乃至产线完整智能化的实施进程均具有重要现实意义。

1977年 DAR-EI E M 和 CUCUY S^[2] 以最小化总装配线长度为优化目标，在满足生产需求的前提下得到最优序列，并提出了相应的数学模型，基于此类问题，现今国内外众多学者对此进行了研究。MONDEN Y 和宋华明^[3-5] 等以最小化未完成作业量、均衡化资源消耗、最小化费用调用等单目标为研究对象，决策物料投产顺序，研究结果对生产线的总成本有很大改善，但随着客制化加工和柔性生产线的完善，单目标优化对物料调配的决策存在局限性，BAUTISTA J 和 ROSSIA^[6-8] 等建立以最小化工作站负荷、超载时间、产品变化率和设备切换时间为优化目标的数学模型，并提出多目标算法求解，对后续不同约束下排序问题的研究起到启发作用，此后孙宝凤和 MAKAROUNI^[9-11] 在不同的约束条件下，对装配线上物料平准化的排序问题进行研究，科学制定适应高定制化要求的生产计划。这些研究在减少能源、资金和时间等因素上具有明显优势。上述混流装配线排序问题的研究重点只关注于产线客观参数的系统优化，但在实际操作中操作者的作业惯性等主观因素往往会对混流装配线优化排序的实施产生一定的影响^[22-24]。因此，针对产品切换的客车混流装配线的排序问题，不仅仅利于提高在制品物流效率以及人员作业惯性，避免因作业惯性而引起生产效率低、出错率高以及员工疲

劳度强等问题，并且有利于理论优化结果与实际生产优化的贴合。

本文基于主客观耦合因素的排序，建立以最小化工作站堵塞时间与最小化产品切换次数为优化目标的模型，实现作业框架“重构”，优化线上堵塞时间的同时保证操作者较高的作业惯性。而在解决多目标优化模型时，采用主客观优化评价算法得到 Pareto 非支配解，即最终的最优解集，在此基础上针对实际生产线对模型中约束的重视程度不同，采用量纲归一法决策出最终排序方案，并将最终方案与生产线的传统排序方案进行对比分析，结果表明优化后的排序方案在生产线堵塞时间以及产品切换频率方面有很大改善，这对于改善产线加工成本、保障产品质量、降低加工浪费等方面具有显著意义，并且对于拓展至生产线上的多维度主观因素研究有启发作用。

1 排序问题的描述及其目标函数

1.1 混流装配线排序研究框架

排序问题是决定混流装配线是否高效运作的 key 问题之一，即在同一条生产线上合理的投入结构及工艺相似的不同产品^[2]。为使投入的产品均匀混合地流送到各个工作站，减少线上生产能力停滞浪费和在制品占用库存浪费等问题，本文建立产线的客观因素模型；传统排序问题将工位上操作工人的工作状态理想化，而实际频繁切换产品会导致工人的生产质量下降，为解决由此产生的产品质量下降、企业效率降低等问题，并得到生产线的合理排序方案，提出考虑产品切换的客车混流装配线排序方法，该方法的研究框架如图 1 所示。

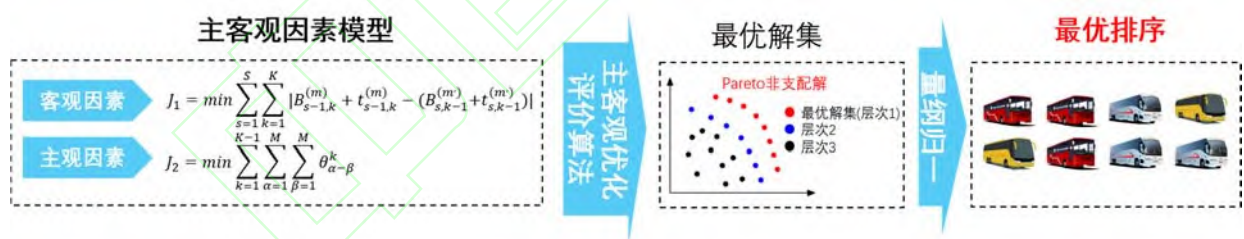


图 1 混流装配线排序研究框架

1.2 客观因素：工作负荷建模

考虑产品切换的混流装配线排序模型参数列表：

符号解释

T	计划生产时间	s	混合生产线上工作站(s=1,2,……,S)
m	产品类型 (m=1,2,……,M)	G	产品生产量 D_m 的最大公约数
CT	生产节拍	D_m	每种类型产品的生产量
dm	各类型产品在 MPS 循环中每次循环内生产量	simi	粒子相似度
$t_s^{(m)}$	M 型产品在工作站 s 上的作业时间	α 、 β	α 型和 β 型产品
K	MPS 循环中每次循环内生产总量 (k=1,2, ……K)	U	计划生产时间 T 内的产品总量, 且 $U = \sum_{m=1}^M D_m$
$t_{s,k}^{(m)}$	投产顺序为 k 的 m 型产品, 在工作站 s 上的加工时间	$B_{s,k}^{(m)}$	投产顺序为 k 的 m 型产品, 在工作站 s 上开始加工的时间
$Q_{s,k}^{(m)}$	投产顺序为 k 的 m 型产品, 在工作站 s 上结束加工的时间	$I_{s,k}^{(m)}$	投产顺序为 k 的 m 型产品, 在工作站 s 时的堵塞时间
$\theta_{\alpha-\beta}^k$	布尔型变量, 判断在 k 位置的 α 型产品在 k+1 位置的 β 型产品是否一样	$\delta_{pop-ctg}^k$	布尔型变量, 判断在 k 位置的 pop 个体和类 ctg 个体的产品类型是否一样
$\sigma_{m,k}$	布尔型变量, 判断在 k 位置的产品是否为 m 型		

任意的任务调度模型在生产技术上是可行的, 但是, 为了得到更加显著的经济效益, 需要更严格的生产计划, 特别是针对生产线上产品的加工效率, 应该对客观因素过程进行相应的考量^[7-8]。基于客观因素中的工位负荷平衡问题, 如果我们相继在同一条生产线上投入的多个产品使得某些工作站连续不断的承受高负荷加工, 则这些工作站会出现负荷过载问题, 但高、低负荷产品交替到达工作站, 对工作站的负荷进行补偿, 这种均衡化的投产方式可消除装配线忙闲不均的状态, 即可对工作站负荷过载问题进行规避^[13], 如图 2 所示, 并以此将这一客观因素转化为数学语言进行描述, 建立生产线上工作负荷模型。

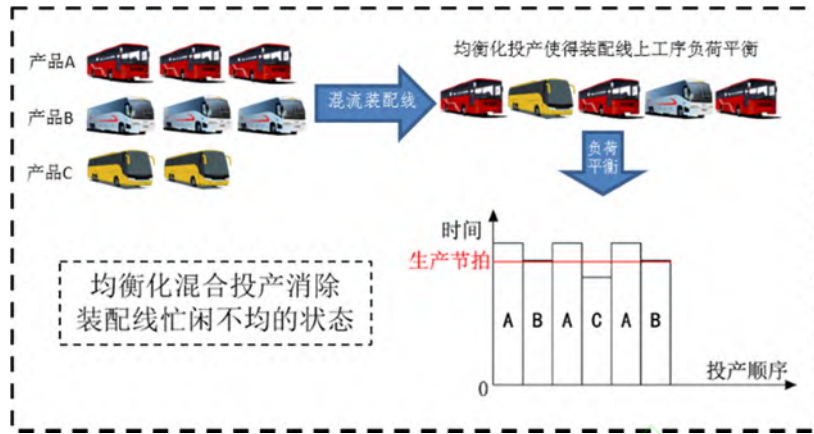


图2 混流装配线排序问题

假设一客车混合装配线需在计划生产时间 T 内生产 M 种同一类型的产品,产品类型 $m=1,2,\dots,M$,根据客户订单计算生产产品总量为 U ,每种类型产品的生产量是 $D_m(m=1,2,\dots,M)$,根据在计划生产时间 T 内的产品总量 $U = \sum_{m=1}^M D_m$ 可以计算得到混合装配线的生产节拍 $CT=T/U$ 。采用Bard提出的最小生产循环(Minimal Production Set, MPS)^[12], G 为产品生产量 $D_m(m=1,2,\dots,M)$ 的最大公约数,循环 G (用 g 代表投产循环次数, $g=1,2,\dots,G$)次即可生产完总计划 U 个产品,根据不同产品在每次循环内生产量 $dm=D_m/G(m=1,2,\dots,M)$,可得每次投产循环的产品总量 $K = \sum_{m=1}^M d_m$, $s(s=1,2,\dots,S)$ 表示混合装配线上工作站。 $t_s^{(m)}$ 表示产品类型 m 分配到工作站 s 的作业时间, $t_{s,k}^{(m)}$ 表示在第 s 工作站内投产序列中第 k 位置的产品加工时间,故: $t_{s,k}^{(m)} = \sum_{m=1}^m \sigma_{m,k} \cdot t_s^{(m)}$

$$\text{其中 } \sigma_{m,k} = \begin{cases} 0 & \text{在位置}k\text{的产品不是}m\text{型} \\ 1 & \text{在位置}k\text{的产品是}m\text{型} \end{cases}$$

在生产过程中假设在第一次循环开始时,操作工在工作站的起点迎接工件的到来,即开始时间 $B_{1,k}^{(m)} = 0(k=1; m=1,2,3,\dots,M)$,由于第一次循环时,影响操作工开始时间的因素只有上游工作站的堵塞情况,所以在后续工作站操作工的开始时间是 $B_{s,k}^{(m)} = B_{s-1,k}^{(m)} + t_{s-1,k}^{(m)}(k=1; s=2,3,\dots,S; m=1,2,3,\dots,M)$,由于第一个循环产品的影响,从第二次开始循环后,工作站在起点的操作工开始时间是:

$$B_{1,k}^{(m)} = \max\{CT, B_{1,k-1}^{(m')} + t_{1,k-1}^{(m')}\}$$

其中, $k=2,3,\dots,K$ 且 m' 表示在序列 $k-1$ 的产品类型,由于影响后续循环操作工的开始时间的因素有排序 $k-1$ 在工作站 s 的产品的以及工作站在 $s-1$ 的堵塞情况,那么操作工的开始时间是:

$$B_{s,k}^{(m)} = \max\{B_{s-1,k}^{(m)} + t_{s-1,k}^{(m)}, B_{s,k-1}^{(m)} + t_{s,k-1}^{(m)}\}$$

从而可算出其结束时间为：

$$Q_{s,k}^{(m)} = B_{s,k}^{(m)} + t_{s,k}^{(m)}$$

这样在 s 工作站时，即可基于郑永前^[16]的等待时间方程和阻塞时间方程，将序列为第 k 个产品引起的工作站堵塞时间整合为：

$$I_{s,k}^{(m)} = \left| B_{s-1,k}^{(m)} + t_{s-1,k}^{(m)} - (B_{s,k-1}^{(m)} + t_{s,k-1}^{(m)}) \right| \quad (1)$$

最小化装配流水线的堵塞时间的目标函数可表示为：

$$J_1 = \min \sum_{s=1}^S \sum_{k=1}^K I_{s,k}^{(m)} \quad (2)$$

$$s.t. \quad \sum_{m=1}^M \sigma_{m,k} = 1 \quad \forall k; k=1, 2, \dots, K \quad (3)$$

$$\sum_{k=1}^K \sum_{m=1}^M \sigma_{m,k} = d_m \quad \forall m; \sigma_{m,k} \in \{0, 1\} \quad (4)$$

$$B_{s,k}^{(m)} \geq B_{s-1,k}^{(m)} + t_{s-1,k}^{(m)} \quad (5)$$

$$B_{s,k}^{(m)} \geq B_{s,k-1}^{(m)} + t_{s,k-1}^{(m)} \quad (6)$$

其中：约束(3)保证了在生产周期内，投产顺序的每个位置只有一种类型产品；约束(4)保证了在一个计划生产周期内，所有类型产品投入的生产数量等于其计划生产量；约束(5)保证了投产顺序为 k 的产品，在完成了工位 $s-1$ 的装配后，才能开始装配工位 s 的内容；约束(6)保证了在工位 s 装配的产品，在投产顺序为 $k-1$ 的产品装配完以后，才能装配投产顺序为 k 的产品。

1.3 主观因素：产品切换建模

针对实际生产过程，产品的投产顺序直接影响生产线的加工进度以及调整时间。然而，不同的产品在同一个工作站工作的时间和所需零部件均不尽相同，这就使得相同工位的工人作业方式或所耗时间需要结合产品切换进行不断调整。而在实际操作过程中，操作者对于连续性的单一工作往往会形成不假思索的自然作业习惯，产生一种伴随动作惯性与意识卷入的记忆过程，即操作者的作业惯性^[22-24]。这种作业惯性相比于实际生产过程中针对产品切换所需的调整过程，不仅有利于提高操作者的工作熟练度，而且对于作业效率和工作质量都具有显著改善作用。因此，在考虑主观因素中的作业惯性前提，达到规避产品切换频繁程度的目的，引入包含布尔型变量 θ ，产品类别 α ， β 的目

标函数:

$$J_2 = \min \sum_{k=1}^{K-1} \sum_{\alpha=1}^M \sum_{\beta=1}^M \theta_{\alpha-\beta}^k \quad (7)$$

$$s.t. \quad \sum_{\alpha=1}^M \sum_{\beta=1}^M \theta_{\alpha-\beta}^k = 1 \quad \forall k \quad (8)$$

$$\sum_{k=1}^K \sum_{m=1}^M \sigma_{m,k} = d_m \quad \forall m; \sigma_{m,k} \in \{0,1\} \quad (9)$$

$$\theta_{\alpha-\beta}^k = \begin{cases} 0 & \text{在} k \text{位置的} \alpha \text{型产品和在} k+1 \text{位置的} \beta \text{型产品一样} \\ 1 & \text{在} k \text{位置的} \alpha \text{型产品和在} k+1 \text{位置的} \beta \text{型产品不一样} \end{cases} \quad (10)$$

J_2 为混合生产线最小化产品切换次数，在连续生产过程中，持续性输入相同产品有利提高操作者的作业惯性，最小化产品切换即最大化操作者的作业惯性。其中 $\sum_{k=1}^{K-1}$ 即遍历本次排序， $\sum_{\alpha=1}^M \sum_{\beta=1}^M \theta_{\alpha-\beta}^k$ 即判断 k 位置和 $k+1$ 位置处产品的类型是否相同。

约束（8）保证第 k 和 $k+1$ 位置投入顺序的产品不一样；约束（9）保证每种类型的产品总量与其计划生产总量相同；约束（10）保证产品 α 型和 β 型分别排列于第 k 和 $k+1$ 的投入顺序。

2 主客观优化评价算法

本文采用基于主客观优化评价算法求解排序问题，具体流程如图 3 所示。

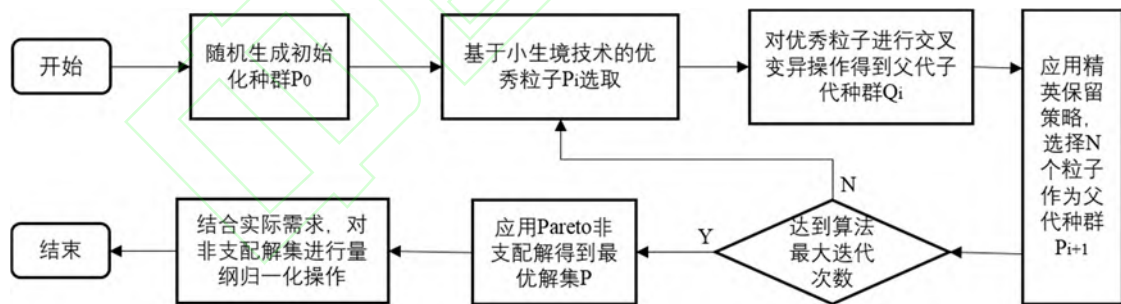


图 3 主客观优化评价算法流程图

2.1 Pareto 非支配解

在多目标优化过程中，一般不存在使所有优化目标同时达到最优的解，即不存在某种排序使得优化的主观和客观因素同时达到最优，由此优化主观因素的同时有可能会弱化相应的客观因素的性能^[18-20]。传统的多目标优化算法本质上是赋予每个优化目标不同的权重，进而将数学模型转化成单一的加权函数，以此将多目标问题转化为单目标问题进行求解，从而达到算法通用性高的目的^[21]，

但是，其中的加权系数却在很大程度上影响了解的质量，这使得决策者的偏好更容易使优化结果朝着特定目标转化。此外，当目标函数的权重选择不合理时，优化算法容易出现局部收敛解，而在多目标优化方面已经得到广泛应用的 Pareto 非支配解的引入，相比于直接采用优化目标权重更能够获得使各个优化目标拥有最大程度性能的解。Pareto 非支配解在可行域 S 内的多目标问题 $f(S)$ 可以描述为：

$$\begin{aligned} \min f(x) &= (f_1(x), \dots, f_p(x))^T \\ &\begin{cases} g_i(x) \geq 0, i \in I \\ h_j(x) \geq 0, j \in J \end{cases} \end{aligned}$$

其中， x 为变量，若存在点 $x^* \in S$ 满足 $\forall x \in S$ ，有 $f(x^*) < f(x)$ ，则称 x^* 为多目标规划问题的 Pareto 非支配解。在本文中 x^* 为可行排序，代表其他任何方案的主客观因素不优于 x^* 解集中的主客观因素。因此，如图 3 所示的优化算法过程中，针对主客观因素的多目标优化问题，则可选择相对应的 Pareto 最优解以决策出最终排序方案，由此有效弱化决策者自定义优化目标权重造成的局部收敛、全局寻优与局部寻优不平衡问题。

如表 1 所示数据，可行域内的可行解 x 有 7 个，其中优化目标 J1 和 J2 的值越小性能越好。通过两两对比得到解集 $\{x_2, x_4, x_7\}$ 即为 Pareto 非支配解，使各优化目标得到最大程度的性能，即 x_2 、 x_4 、 x_7 无法比较其综合性能优劣，例如 x_2 的 J2 优于 x_4 ，但 J1 劣于 x_4 ，而其他粒子的综合性能一定劣于解集中某粒子，例如 x_3 的 J1 和 J2 都劣于 x_2 。由此在没有加权系数的情况下，可以得到综合性能最好的粒子集。

表 1 可行域内可行解的 J1 和 J2 性能

可行域内可行解 x	J1	J2
x_1	89	6
x_2	91	2
x_3	95	4
x_4	89	4
x_5	92	2
x_6	93	3

2.2 基于小生境技术的选择优化操作

生物学上,小生境是指特定环境下的一种组织结构。在自然界中,往往特征、形状相似的物种相聚在一起,并在同类中交配繁衍后代。这种技术应用到计算科学领域时,即将数据特征相同的数据归为同一类,本文应用小生境技术选出每类中适应度较大的个体,作为该类的优秀代表个体,然后将同类以及不同类间个体进行交叉变异操作,以产生新一代个体子群^[15]。该技术可以更好地保持解集的多样性,同时有利于避免其收敛于局部。小生境技术具体操作如下:

(1) 种群粒子分为若干类。首先,利用种群中当代个体历史最优位置的集合得到孤立性最好的粒子^[14],即中心粒子。其次,根据其与各中心个体的相似度,将剩下粒子赋给相似度最大的类别中,倘若出现相似度最大有多类的情况,则随机赋给其中一类,其相似度公式为:

$$simi = \sum_{k=1}^K \delta_{pop-ctg}^k$$

其中,计算相似度之前将粒子中代表相同车辆的基因用同一数值表示,但是原基因不进行破坏,以

便于接下来的操作。且式中 $\delta_{pop-ctg}^k = \begin{cases} 1 & pop \text{ 个体与类 } ctg \text{ 个体在 } k \text{ 位置的基因值相同} \\ 0 & pop \text{ 个体与类 } ctg \text{ 个体在 } k \text{ 位置的基因值不相同} \end{cases}$ 。

(2) 同类中粒子进行分层。粒子分配到不同类后,将同类中具有相同性质的粒子分在同一级别,即在同类粒子中,性质最好的粒子群分配到一个级别层次如层次 1,然后将此类剩下粒子中性质最好的粒子同样分配到一个级别层次如层次 2,依次将种群分为多层。

(3) 选择优秀代表粒子。本文在各类中选择优秀个体时保留其层次 1 的所有个体,使得精英个体不被遗失。而将层次 2、层次 3 及后续层次的所有个体按照概率进行选择,以保证同一级别的非支配个体被选择的概率相同。

2.3 交叉变异

2.3.1 交叉操作

本文采用数字的编码方式表示产品信息,每个粒子上数字的个数代表一个周期内的加工产品总数,例如 A, B, C 三款产品的加工数分别为: 4, 3, 3, 那么 1-3-7-5-2-6-4-9-8-10 是一个可行编码,其中数字从小到大依次代表着相应数量的产品信息,即这个可行编码代表的排序方案为 A-A-B-B-A-B-A-C-C-C。针对本文排序的问题的编码方式,采用两点交叉方法,图 4 为交叉示意图。首先,随机抽取 2 个父代个体,在每个父代个体上随机生产 2 个交叉点,将父代个体随机分成 3 部分。其次,

对 2 个父代个体进行如下交叉操作：将父代中间部分的排列顺序与另一个父代中间部分的排列顺序进行对比，形成新的排序。最后，2 个父代个体形成新的子代个体。

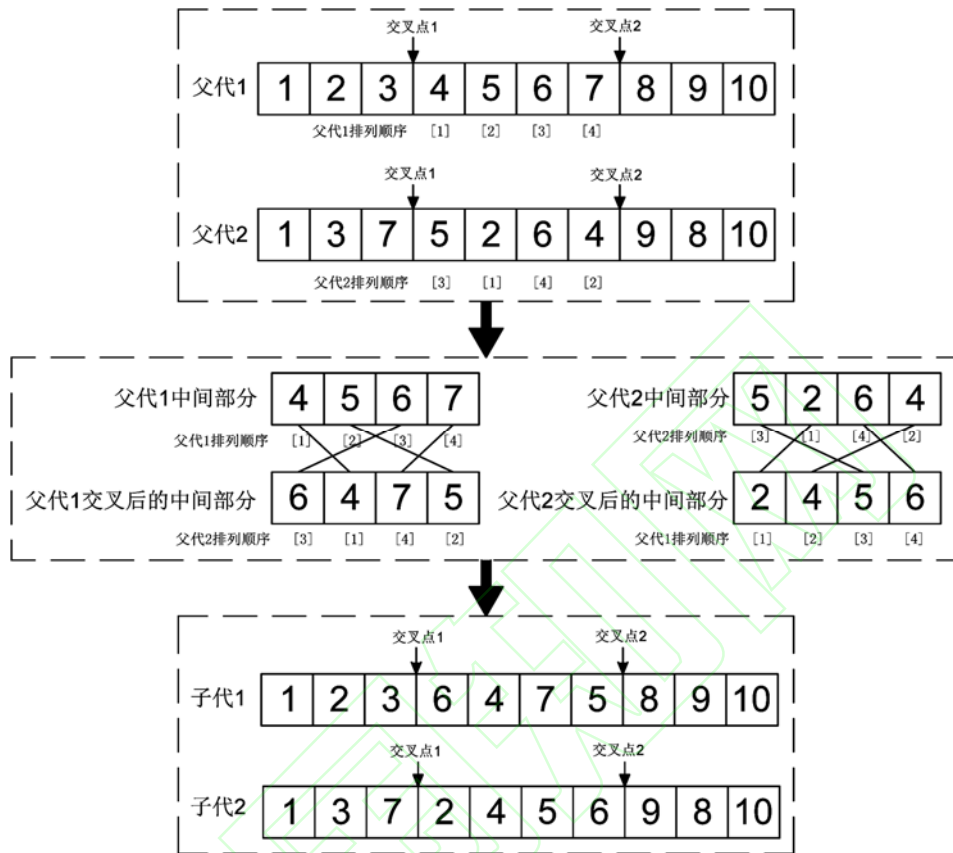


图 4 交叉操作示意图

2.3.2 变异操作

种群经过交叉操作以后，根据变异概率随机选取变异粒子。如图 5 所示，变异时随机选取变异点，将粒子变异点前后的基因进行变动，即粒子前后基因对调位置，以形成新的个体。

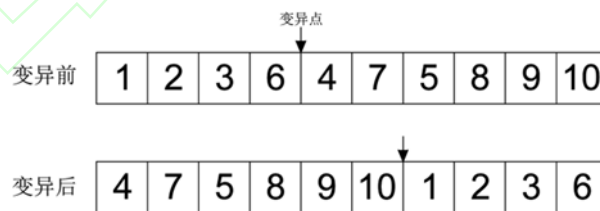


图 5 变异操作示意图

2.4 基于主客观因素优化算法

如图 3 所示，在算法的优化过程中，首先随机生成初始化种群 P_0 并设置算法中最大迭代次数、种群大小、交叉变异概率等基本参数，随后应用小生境技术选择种群中的优秀代表粒子 P_i ，进行下一步的交叉变异操作，在得到的子父代种群 Q_i 中应用精英保留策略选择出下一代父代种群 P_{i+1} 。其

中小生境技术和精英保留策略的运算步骤与 Pareto 非支配操作交互计算，即小生境技术在分层时选择综合性质最好的粒子群即为 Pareto 非支配解中粒子，精英操作过程中避免精英个体的遗失即保留此时子父代群体中 Pareto 非支配解的所有个体。

当循环满足迭代次数达到最大的终止条件后，应用 Pareto 非支配解计算得到最优解集，即得到堵塞时间及产品切换次数综合性能最好的几组排序方案，在没有其他约束的条件下，非支配解内部的排序方案之间无法比较其综合性能优劣，但非支配解外部排序方案的综合性能一定比内部某些方案差，因此选择非支配解内部的排序方案可保证解的绝对优越性。最后，针对实际生产线对模型中约束的重视程度，利用量纲归一化在非支配解内部选择产线堵塞时间和产品切换次数综合性能最好的方案，即为最终排序方案。这样不仅保证了主客观因素的全局最优性能，降低生产成本、维持工人生产惯性，并结合实际生产情况决策最终排序，保证排序的实用性。

3 案例与分析

3.1 算法收敛性验证

在数据量较小的情况下，计算机可以做到穷尽所有排序方案，具有绝对的正确性，而当数据量大时，由于计算机计算能力以及时间等限制，穷尽计算显然无法满足生产需求。故本文在小数据的情况下利用穷尽方式验证算法的收敛性，保证算法的准确性。

文献 16 中，某混流装配线需生产 A、B、C 三类产品，其需求比例为 3: 1: 2。装配线上有 5 个工位，各个产品在各工位上加工时间如表 2。

表 2 各产品在各工作站上加工时间

时间/s	产品 A	产品 B	产品 C
工作站 1	6	1	8
工作站 2	8	2	5
工作站 3	6	6	3
工作站 4	3	2	10
工作站 5	4	7	4

传统上投产按照 ABC 顺序直接投产，即 A-A-A-B-C-C 的投产顺序进行产品推进，模拟各产品加工时间，得到混流装配线的产品堵塞时间，如表 3 所示，且其优化目标 $J1=84.9s$ 、 $J2=2$ 次。

表 3 投产顺序为 A-A-B-C-C 时的堵塞时间

堵塞时间/s	工作站 1	工作站 2	工作站 3	工作站 4	工作站 5
A	0	0	0	0	0
A	0.7	2	2	5	4
A	1.4	4	2	5	4
B	2.1	11	4	3	1
C	2.2	2.8	5	1	4
C	2.7	0.2	2.8	7	6

采用穷尽法和主客观优化算法得到的 Pareto 非支配解结果一致,即得到生产线排序的最优解集:

表 4 最优解集

J1/s	J2/次	排序
73.5	2	C-C-B-A-A-A
63.3	3	A-B-A-A-C-C
51.9	4	A-C-B-A-A-C
44.8	5	A-C-B-A-C-A

根据以上结果显示, 穷尽法和主客观优化算法得到的最优解集一致, 验证了算法的收敛性以及准确性。但是穷尽方法存在无法快速收敛、无法收敛长排序等明显局限性, 而运用主客观优化算法可以克服这些局限。

由 Pareto 非支配解得到的最优解集中排序方案相互之间是在牺牲 J2 的情况下优化 J1, 故在没有其他参数约束时, 无法判断综合性能最好的解。观察表 4 中数据, 传统的投产方法与最优解集中 C-C-B-A-A-A 的投产方式比较, 后者具有明显的优势, 即在最优解集中存在某种排序方案绝对优于传统排序方法。故在决策排序方案时, 选择最优解集中的排序方案更具优越性。

3.2 实例分析

3.2.1 最优解集

某实际混合客车焊装生产线, 其生产 X、Y 以及 Z 三款产品, 三款产品的需求分别为 20 辆、12 辆、16 辆, 采用最小生产循环的生产比例为 5: 3: 4, 混合焊装生产线由 57 道工序组成 15 个工位,

三款产品在各个工位上所需时间如表 5 所示。

表 5 产品 XYZ 在各工位上加工时间

时间/min	X	Y	Z	人数
顶盖骨架	123.433	133.4	140.37	9
顶盖蒙皮	86.025	100.56	88.06	6
车身拼装	152.8	200.23	252.78	12
补焊 1	121.42	126.57	157.15	9
补焊 2	113.45	139.6	168.83	9
地板骨架	161.95	210.44	249.22	12
行李架埋铁	44.97	55.47	69.53	3
侧蒙皮涨拉	132.72	189.34	203.27	9
前顶骨架焊接	127.11	179.27	203.8	9
封板工位	134.47	170.71	244.41	12
乘客门	116.7	136.2	151.7	7
侧仓门	82.65	140.66	166.86	6
行李仓门	89.999	100.44	143.8	6
下线修整 1	96.33	109.26	129.33	7
下线修整 2	91.35	98.5	100.8	6

计算得到最优解集如表 6 所示：

表 6 最优解集

J1/min	J2/次	排序
970.62	2	B-B-B-A-A-A-A-A-C-C-C-C
912.32	3	B-A-A-A-A-A-B-B-C-C-C-C

传统投产顺序根据订单交期前后直接投入生产，即传统排序为 A-A-A-A-A-B-B-B-C-C-C-C，计算得到其 $J_1=1028.82\text{min}$ 、 $J_2=2$ 次。下列表 7 和表 8 分别为最优解集中某一排序与传统排序在加工时各个工位上的堵塞情况。

表 7 最优解集中排序 B-A-A-A-A-B-B-C-C-C-C 的堵塞时间

时间/min	顶盖骨架	顶盖蒙皮	车身拼装	补焊 1	补焊 2	地板骨架	行李架埋铁
B	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
A	2.149	0.896	2.348	1.330	2.020	4.931	4.994
A	3.257	1.738	0.993	1.094	1.134	5.821	6.488
A	3.257	2.634	4.238	2.386	2.137	4.575	7.982
A	3.257	2.634	4.238	3.480	4.366	1.099	9.477
A	3.257	2.634	4.238	3.480	4.366	2.376	8.595
B	3.257	3.741	7.768	10.963	12.420	14.436	8.388
B	2.149	0.211	0.285	2.908	1.460	0.565	0.953
C	2.149	0.986	1.023	7.002	8.952	9.609	10.934
C	1.375	2.295	5.117	3.604	2.306	0.297	2.112
C	1.375	2.295	9.211	3.604	2.306	0.297	4.223
C	1.375	2.295	13.305	3.604	2.306	0.297	6.335
侧蒙皮涨拉	前顶骨架焊接	封板工位	乘客门	侧仓门	行李仓门	下线修整 1	下线修整 2
0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
6.048	5.172	0.102	8.251	6.772	2.965	0.609	2.655
5.804	4.549	2.815	10.902	3.875	4.190	0.630	3.489
5.561	3.926	2.917	13.450	0.979	5.415	1.238	3.714
5.318	3.302	2.917	15.998	1.917	4.722	1.238	3.939

5.074	2.679	2.917	18.546	2.896	3.051	1.238	4.165
7.057	11.292	20.005	0.986	5.682	11.075	14.054	10.273
2.548	1.119	6.812	0.594	3.392	6.703	7.835	7.027
10.525	13.191	21.610	22.520	17.356	28.426	36.784	38.843
0.591	0.532	2.809	1.505	4.633	3.843	9.334	11.010
0.591	0.532	2.809	1.505	9.267	3.843	9.334	11.010
0.591	0.532	2.809	1.505	13.900	3.843	9.334	11.010

表 8 传统排序 A-A-A-A-A-B-B-B-C-C-C-C 的堵塞时间

时间/min	顶盖骨架	顶盖蒙皮	车身拼装	补焊 1	补焊 2	地板骨架	行李架埋铁
A	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
A	3.257	2.634	4.238	3.480	4.366	3.475	1.981
A	3.257	2.634	4.238	3.480	4.366	3.475	1.981
A	3.257	2.634	4.238	3.480	4.366	3.475	1.981
A	3.257	2.634	4.238	3.480	4.366	3.475	1.981
B	3.257	3.741	7.768	10.963	12.420	14.436	16.982
B	2.149	0.211	0.285	2.908	1.460	0.565	0.953
B	2.149	0.211	0.285	2.908	1.460	1.131	1.907
C	2.149	0.986	1.023	7.002	8.952	9.043	9.415
C	1.375	2.295	5.117	3.604	2.306	0.297	2.112
C	1.375	2.295	9.211	3.604	2.306	0.297	4.223
C	1.375	2.295	13.305	3.604	2.306	0.297	6.335
侧蒙皮涨拉	前顶骨架焊接	封板工位	乘客门	侧仓门	行李仓门	下线修整 1	下线修整 2
0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
2.225	2.848	5.765	0.300	3.196	1.971	3.210	1.746

2.225	2.848	5.765	0.300	3.196	1.971	3.210	1.746
2.225	2.848	5.765	0.300	3.196	1.971	3.210	1.746
2.225	2.848	5.765	0.300	3.196	1.971	3.210	1.746
20.726	27.640	36.353	33.908	39.590	48.033	51.012	51.395
2.548	1.119	6.812	1.581	2.406	6.703	7.835	7.027
5.096	1.119	6.812	1.581	4.811	6.703	7.835	7.027
6.458	9.125	17.543	18.454	11.871	22.941	31.299	33.358
0.591	0.532	2.809	1.505	4.633	3.843	9.334	11.010
0.591	0.532	2.809	1.505	9.267	3.843	9.334	11.010
0.591	0.532	2.809	1.505	13.900	3.843	9.334	11.010

由表 6 中数据与传统排序方案的数据比较，最优解集中所有排序方案在堵塞时间上都得到很大程度的优化，其中方案 1 的综合性能绝对优于传统排序方案；又由表 7 和表 8 中数据可知，最优解集中为 B-A-A-A-A-A-B-B-C-C-C 的排序方案相较于传统排序方案，前者不仅仅缩短了整个装配时间，同时优化了加工过程中总堵塞时间最长的工作站，最大总堵塞时间前者和后者分别为 38.8 分钟、51.4 分钟，即“重构”的排序作业框架对客车混流生产线上的负荷高峰处进行了削峰处理，虽然此方案是在牺牲了少量切换次数的情况下优化的堵塞时间，但是当在加入其它约束后，此方案可以很容易在综合性能上优于传统排序，这是由多目标优化的性质所决定的，因此在决策最终排序方案时，选择 Pareto 非支配解内的方案具有绝对的优越性，因为 Pareto 非支配解得到的最优解集内部的排序方案无法直接比较其堵塞时间和产品切换次数的综合性能优劣，但非支配解外部的排序方案的综合性能一定劣于内部某种排序方案。

3.2.2 量纲归一化

Pareto 非支配解集是多目标优化问题一般不存在唯一最优解而产生的优秀解集，例如上述最优解集，在牺牲堵塞时间 J_1 的情况下优化目标 J_2 ，而得到了多个满意解，但是从解集中决策出最终投产顺序由实际情况确定，根据企业实际需求本文取 J_1 和 J_2 的权重分别为 0.4 和 0.6，并采用均值化方法对两个指标进行无量纲化处理^[17]，均值化方法为：

$$y_{ij} = \frac{x_{ij}}{\Delta x_j} = \frac{\omega_j (x_{ij} - x_{j\min})}{x_{j\max} - x_{j\min}}$$

其中 $x_{j\max}$ 、 $x_{j\min}$ 为最优解集中同一目标 j 的最大值与最小值； x_{ij} 为当前值； ω_j 为目标 j 的实际需求权重。

基于均值化评价结果如表 9 所示：

表 9 评价结果

J1	J2	评价得分	评价名次
970.62	2	0.40	2
912.32	3	0.31	1
910.27	4	0.60	3

基于最优解集下的量纲归一化解，有效保证优解的传递性，避免了在常规方法选择过程中由于某些因素而误将优解破坏。量纲归一化是在最优解集中根据实际需求决策出最终投产顺序，是理论与实际的综合性考虑，本文在实际背景下得到的最优排序方案为 B-A-A-A-A-B-B-C-C-C，得到的优解排序相较于传统排序方法在总堵塞时间上得到很大程度的改善，即客观因素得到极大优化，而在堵塞时间得到改善的同时，也兼顾了产品切换的主观因素，即兼顾了生产线上操作工人的生产惯性。而以往研究者在模型的考量上并未加入人为因素，但理想化的线上工人操作状态与实际相悖，使得产品质量下滑，从而引发产品返工量增加、搬运浪费、库存浪费等问题，最终造成生产成本增加。

4 结束语

本文在解决混流装配线排序问题时，针对生产线负荷以及产品切换进行了数学建模，即在主观和客观两方面进行了研究，客观上优化线上堵塞时间，减少等待性浪费提高生产物流效率，主观上考虑线上工人自身的操作惯性，避免因频繁切换产品而导致产品的出错率提高，保证工人的熟练度以及生产的节拍性，再引入主客观优化评价算法，对实际混流生产线的投产顺序进行决策得到最终投产方案，研究过程中得出以下结论。

(1) 以客观因素为前提建立的最小化工作站堵塞时间，均衡了混合装配线在生产过程中忙闲不均的现状，在消除线上等待性浪费的同时，对其产生的库存浪费、搬运浪费、零部件遗失寻找等也有改善作用，可以得出此优化目标对整个生产线的操作运转起到了举足轻重的作用。

(2) 在主观因素层面上，基于产品切换的模型，改善线上生产的节拍性和缓解员工疲劳度时，

节约了物质、时间等资源，保证了产品的合格率，极大的降低了生产所需成本。

(3) 在计算方法上，利用主客观评价算法，采取 Pareto 非支配解得到最优解集，保证解得绝对优越性，并结合实际生产线对模型中约束的重视程度得到最终排序方案，实现了理论计算和实际需求的综合考虑。

本文为混合装配线排序问题提供了主观因素的建模思想，后续研究可拓展主观因素，进行生产线上多维主客观因素交互影响的研究。

参考文献

- [1] LI Qing,TANG Qianlin,CHEN Yaotang,et al.Smart manufacturing standardization:reference model and standards framework[J] . Computer Integrated Manufacturing Systems. 2017,1-17. [李 清,唐骞麟,陈耀棠,等. 智能制造体系架构、参考模型与标准化框架研究[J/OL]. 计算机集成制造系统,2017,1-17.]
- [2] DAR-EL EM, CUCUY S. Optimal mixed-model sequencing for balanced assembly lines[J]. Omega, 1977, 5(3):333-342.
- [3] MONDEN Y.Toyota production system[M].Institute of Industrial Engineering Press,1983.
- [4] MOSADEGH H, ZANDIEH M, GHOMI SMTF. Simultaneous solving of balancing and sequencing problems with station dependent assembly times for mixed-model assembly lines[J]. Applied Soft Computing ,2012,12(4):1359-1370.
- [5] SONG Huaming,MA Shihua. Sequencing for mixed - model assembly line with consideration of line balancing[J]. China Mechanical Engineering. 2006,(11):1138-1141,1147. [宋华明,马士华. 考虑流水线平衡的混合装配线排序[J]. 中国机械工程,2006,(11):1138-1141,1147.]
- [6] ROSSI A, GUREVSKY E, BATTIAIA O, et al. Maximizing the robustness for simple assembly lines with fixed cycle time and limited number of workstations[J]. Discrete Applied Mathematics, 2016, 208(C):123-136.
- [7] BAUTISTA J, CANO A. Solving mixed model sequencing problem in assembly lines with serial workstations with work overload minimisation and interruption rules[J]. European Journal of Operational Research, 2011, 210(3):495-513.
- [8] LIU Weiqi,LIU Qiong,ZHANG Chaoyong,et al. Hybrid particle swarm optimization for multi-objective sequencing problem in mixed model assembly lines[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems. 2011, 17(12):2590-2598. [刘炜琪, 刘 琼, 张超勇,等. 基于混合粒子群算法求解多目标混流装配线排序[J].

计算机集成制造系统, 2011, 17(12):2590-2598.]

[9] SUN Baofeng, SHEN Xiuxiu, LONG Shuling, et al. Bi-objective sequencing decision model for mixed-model assembly line[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems. 2017,23(7):1481-1491. [孙宝凤,申琇秀,龙书玲,等. 混流装配线的双目标投产排序决策模型[J]. 计算机集成制造系统,2017,23(7):1481-1491.]

[10] ZHOU Binghai,PENG Tao.Optimal schedule of just-in-time part distribution for mixed-model assembly lines[J].Journal of Jilin University: Engineering and Technology, 2017,47(4):1253-1261. [周炳海,彭涛. 混流装配线准时化物料配送调度优化[J]. 吉林大学学报:工学版,2017,47(4):1253-1261.]

[11] MAKAROUNI I, SISKOS E, PSARRAS J. Multiobjective large scale job sequencing optimization based on a synergy of compensatory and non compensatory methods[J]. Operational Research, 2016, 16(2):223-244.

[12] JONATHAN F, BARD, EZEY DARELJ, AVRAHAM SHTUB An analytic framework for sequencing mixed model assembly lines[J]. International Journal of Production Research, 1992, 30(1):35-48.

[13] AITZAI A, BENMEDJDOUB B, BOUDHAR M. A branch and bound and parallel genetic algorithm for the job shop scheduling problem with blocking[J]. International Journal of Operational Research, 2012, 14(3):343-365.

[14] LI Haibo,LIU Jianhua,HE Yongxi,et al.Optimization design of multi-objective tolerances based on niche PSO algorithm[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems. 2015, 21(3):585-592. [刘海博, 刘检华, 何永熹,等. 基于小生境粒子群算法的公差多目标优化设计[J]. 计算机集成制造系统, 2015, 21(3):585-592.]

[15] HORN J. Controlling the cooperative-competitive boundary in niched genetic algorithms[C].Conference on Genetic and Evolutionary Computation. Morgan Kaufmann Publishers Inc. 1999.

[16] ZHENG Yongqian,WANG Yongsheng, YU Shengnan. Mixed-model assembly line balancing based on real-time load[J]. Modern Manufacturing Engineering. 2010,(12):66-72. [郑永前,王永生,于胜男. 实时负荷条件下混流装配线平衡方法研究[J]. 现代制造工程,2010,(12):66-72.]

[17] GUO Yajun.Comprehensive evaluation theory,methods and application[M].Science Press,2008.[郭亚军. 综合评价理论、方法及应用[M]. 科学出版社, 2008.]

[18] CHEN Y, WANG Z, YANG E, et al. Pareto-optimality solution recommendation using a multi-objective artificial wolf-pack algorithm[C]//Proceedings of International Conference on Software, Knowledge, Information Management & Applications. IEEE, 2017:116-121.

[19] PARISI S, PIROTTA M, RESTELLI M. Multi-objective reinforcement learning through continuous pareto manifold approximation[J]. Journal of Artificial Intelligence Research, 2016, 57:187-227.

[20] ZHU C, XU L, GOODMAN ED. Generalization of pareto-optimality for many-objective evolutionary optimization[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2016, 20(2):299-315.

[21] LU Jianxia,WENG Yaowei,LI Xiulin,TANG Hongtao,DONG Qiaoying. Application of hybrid artificial bee colony algorithm in mixed assembly lines sequencing[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems. 2014,20(01):121-127. [鲁建厦,翁耀炜,李修琳,汤洪涛,董巧英. 混合人工蜂群算法在混流装配线排序中的应用[J]. 计算机集成制造系统,2014,20(01):121-127.]

[22] SCHATZ TR, SPRANGER T, KNOFF M. Is there a memory profit after repeated learning of subject - performed actions? Comparing direct and long - term memory performance level as a function of age[J]. Scandinavian Journal of Psychology, 2010, 51(6):465.

[23] WATSON CE, CHATTERJEE A. The functional neuroanatomy of actions.[J]. Neurology, 2011, 76(16):1428-34.

[24] WANG Lijuan,LI Guangzheng.Action Memory:A new domain of memory research[J]. Advances in Psychological Science,2014, 22(6):953-958.[王丽娟, 李广政. 动作记忆:记忆研究的新范畴[J]. 心理科学进展, 2014, 22(6):953-958.]

作者简介:

甘雅文 (1991—), 女, 湖北天门人, 硕士研究生, 研究方向: 制造业信息化、大批量定制;
+侯 亮 (1974—), 男, 河南许昌人, 教授, 博士, 博士生导师, 研究方向: 产品大批量定制技术、振动噪声控制、工业大数据, 通信作者, E-mail: hliang@xmu.edu.cn;
徐昌华 (1974—), 男, 江西玉山人, 本科, 高级工程师, 研究方向: 车辆工程, 智能制造;
张 炜 (1982—), 男, 福建仙游人, 博士研究生, 研究方向: 大批量定制、智能制造;
陈 鼎 (1985—), 男, 福建三明人, 博士研究生, 研究方向: 统计分形理论的应用研究、车辆结构及动力学;
方奕凯 (1993—), 男, 福建泉州人, 硕士, 研究方向: 物联网。