

# 控制与决策

Control and Decision

## 考虑批量分割的单元装配系统工作量平衡联合决策模型

白朝阳, 王浩, 和莉

引用本文:

白朝阳, 王浩, 和莉. 考虑批量分割的单元装配系统工作量平衡联合决策模型[J]. *控制与决策*, 2021, 36(10): 2517–2527.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0167>

---

## 您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

### 基于资源特征融合的复杂型面配合决策方法

Decision-making method for complex surface coordination based on resource feature fusion

控制与决策. 2021, 36(6): 1368–1376 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1311>

### 两部件系统视情维修与生产调度的联合优化模型

Joint optimization model for condition-based maintenance and production scheduling of two-component systems

控制与决策. 2021, 36(6): 1377–1386 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1357>

### 基于改进NSGA-II算法求解多目标资源受限项目调度问题

An improved NSGA-II algorithm for multi-objective resource-constrained project scheduling problem

控制与决策. 2021, 36(3): 669–676 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0906>

### 基于复杂昂贵仿真的体系效能多目标优化

Complex and expensive simulation based multi-objective optimization to system-of-system effectiveness

控制与决策. 2021, 36(3): 589–598 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0844>

### 顺序依赖的调整时间和拖期的无缝钢管热轧批量调度算法

Hot-rolled batch scheduling algorithm for seamless steel tube with sequence-dependent setup times and tardiness

控制与决策. 2021, 36(2): 505–512 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0723>

# 考虑批量分割的单元装配系统工作量平衡联合决策模型

白朝阳<sup>†</sup>, 王浩, 和莉

(1. 大连理工大学 制造管理信息化技术国家地方联合工程实验室, 辽宁 大连 116023;  
2. 大连理工大学 经济管理学院, 辽宁 大连 116023)

**摘要:** 针对日本式单元化生产中批量大小不合理导致单元间工作量不平衡的问题, 在单元装配系统构建过程中考虑批量分割, 构建流水线向单元装配系统转化的多目标优化模型. 该模型以最小化总完工时间和最小化工人总工时为目标, 对转化过程中单元构建和批量分割进行联合决策. 考虑到多目标优化问题特点以及解空间复杂度, 增加局部搜索策略, 对算法进行改进, 提出 INSGA-II 算法, 设计了基于游标的编码方式表示批量分割, 满足单元数量动态变化下批量划分约束. 在进化过程中不断优化各单元对应产品种类以及批量大小, 平衡单元间工作量, 缩短总完工时间. 最后, 通过数值算例验证所提出方法的有效性, 结果表明在产品数量波动较大的情况下, 考虑批量分割能更好地平衡单元间工作量.

**关键词:** 单元间工作量平衡; 单元装配系统构建; 批量分割; 联合决策; NSGA-II

中图分类号: TP273

文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2020.0167

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



**引用格式:** 白朝阳, 王浩, 和莉. 考虑批量分割的单元装配系统工作量平衡联合决策模型 [J]. 控制与决策, 2021, 36(10): 2517-2527.

## Joint decision model of Seru production system balancing considering lot-splitting

BAI Zhao-yang<sup>†</sup>, WANG Hao, HE Li

(1. National Joint Engineering Laboratory for Manufacturing Management and Information Technology, Dalian University of Technology, Dalian 116023, China; 2. School of Economics and Management, Dalian University of Technology, Dalian 116023, China)

**Abstract:** In this paper, lot-splitting is adopted in the process of Seru production system formation for the inter-Seru imbalance problem caused by unreasonable batch size in Seru production. A multi-objective optimization model of line-Seru conversion is developed. Aiming to minimize the total throughput time and the total labor hours, by the model makes joint decisions on Seru formation and lot-splitting in the conversion process. Considering the characteristics of the multi-objective optimization problem and the complexity of the solution space, a local search strategy is added to improved the algorithm, the INSGA-II is proposed to solve the problem, and an encoding method based on vernier is designed to express the lot-splitting strategy to satisfy the constraint when Seru quantity changes. In evolution, the batch sizes and product types of each Seru are continuously optimized to balance the workload between Serus and shorten total throughput time. Finally, the effectiveness of the method is verified by numerical examples. The results show that lot-splitting can better balance the workload between Serus when the quantity of product has high fluctuation.

**Keywords:** inter-Seru system balancing; Seru system formation; lot-splitting; joint decision; NSGA-II

## 0 引言

20 世纪 90 年代, 受泡沫经济影响及消费者偏好变化, 日本电子行业产品呈现出多品种、小批量的特征, 传统流水线方式难以满足频繁变化的生产需求, 以佳能、索尼、日立等为代表的电子行业巨头尝试

对流水线进行单元化改造<sup>[1-3]</sup>, 日本式单元化生产应运而生, 各企业均取得较好应用成效. 以佳能为例, 从 1999 年到 2005 年, 利润从 11 亿日元增加到 118 亿日元, 增加了 973%, 利润率从 1.5% 上升到 10.7%, 工厂空间节省 70%, 能源需求以及 CO<sub>2</sub> 排放量减少 50%,

收稿日期: 2020-02-20; 修回日期: 2020-06-26.

基金项目: 国家社会科学基金项目(19BGL029); 国防基础科研项目(JCKY2019205B012); 大连理工大学重点实验室建设类项目(DUT19LAB34).

责任编辑: 刘民.

<sup>†</sup>通讯作者. E-mail: baizhaoyang@dlut.edu.cn.

平均生产率提高4倍<sup>[4]</sup>。较西方传统单元制造而言,日本式单元化生产强调以人为核心<sup>[5]</sup>,依托由一个或多个员工以及简单、低成本设备组成的装配单元来取代原有传送带<sup>[6]</sup>,即流水线向装配单元转化。其具备了流水线生产方式的高效性,同时融合了西方单元制造以及丰田精益生产的特点<sup>[7-9]</sup>,以较高的灵活性和低成本来应对多品种、小批量的市场需求<sup>[10]</sup>。

单元装配系统是日本式单元化生产的核心,指利用单元柔性特征,通过对工人、设备和产品快速重新配置来提高生产率的生产系统<sup>[11]</sup>。近年来得到国内外学者广泛关注和研究,Kaku等<sup>[12]</sup>首次对流水线向日本式单元化生产方式转换机理进行研究,提出了以最小化总完工时间和最小化工人总工时为目标的单元装配系统构建基础模型;Stecke等<sup>[8]</sup>、Liu等<sup>[13]</sup>通过对企业生产经验以及相关文献系统分析总结出日本式单元化生产的管理模型和通用框架。在上述研究基础上,学者们从不同角度对单元装配系统模型进行优化研究,Wang等<sup>[14]</sup>从稳定性角度着手,研究了可以响应随机需求的单元装配系统构建模型,该模型提高了系统鲁棒性并减少不同情境下系统重构次数;Liu等<sup>[15]</sup>、Yu等<sup>[16]</sup>和孙薇等<sup>[17-18]</sup>先后对Kaku所提出模型进行改进和简化,降低了解空间复杂度并提高了求解效率。

在实际流水线向单元装配系统转化过程中,企业往往对产品进行批量分割,批量分割指将产品分成若干批次,是实现单元装配系统工作量平衡的重要方法,可以确保同一产品在多个工作中心并行处理,减少流通时间并缩短交货期<sup>[19-20]</sup>。Wang等<sup>[21]</sup>、王海燕等<sup>[22]</sup>指出,生产时考虑批量分割可以增加调度灵活性,促进企业生产资源合理分配,更贴近实际生产,适应多品种、小批量的生产特点。

当前单元装配系统工作量平衡的相关研究,主要包括单元内工作量平衡和单元间工作量平衡<sup>[10]</sup>。单元内工作量平衡主要是围绕工人技能与生产协同度研究为核心,如Liu等<sup>[23]</sup>按照给定的先来先服务调度规则,构建单元内工作量平衡模型,指出同质工人可以带来高水平的单元内平衡;王晔等<sup>[24]</sup>研究员工合作对单元装配系统性能的影响,结果表明员工整体合作程度较高及合作关系差异较大时,单元系统的性能提升程度较为明显。单元间工作量平衡主要是通过任务分配、单元动态构建、批量分割等方法,实现单元之间同步化,消除单元间不平衡导致的等待浪费,提高生产协同效率和资源利用率,相关学者进行了深入探索性研究。Yu等<sup>[25-26]</sup>指出将批次分配给

完工时间最短的工人可以缩短工人总工时,但会导致单元间工作量不平衡,因此在单元装配系统构建过程中应考虑合理的任务分配规则以平衡单元间工作量;于洋等<sup>[27-29]</sup>研究了减人情况下的单元装配系统构建问题,分析了工人减少量对单元构建和单元间平衡的影响,指出减少技能熟练度低的工人有利于单元间工作量平衡;Yu等<sup>[30]</sup>对单元装配系统平衡基本原理进行研究,定义了单元装配系统平衡的两项指标,建立单元装配系统构建的数学模型,设计了一种基于 $\varepsilon$ 约束的改进算法,通过切割解空间节省计算时间;Kaku等<sup>[31]</sup>对单元装配系统构建问题进行参数分析,指出最优批量大小会随着生产环境不同而改变,当批量较大时,应进行批量分割将产品划分成合适的批次;Shao等<sup>[32]</sup>面向单元工作量分配结果,将工作量较多的单元任务划分到工作量较少的单元中,以此减少单元空闲时间,提高单元间工作量平衡;王晔等<sup>[33]</sup>考虑需求波动情境下单元装配系统构建问题,对比不同批量大小对单元构建方案的影响,发现随着批量大小的增加,单元装配系统的效率得到提高。由于批量分割是一个动态的过程,不同批量分割方案对应不同的批量大小,会影响单元工作量。当前围绕批量分割进行单元间工作量平衡的研究,都是在调度方案决策后进行,并没有在调度方案决策过程中考虑批量大小合理性及其对单元装配系统构建模型的影响。

本文将批量分割融入单元装配系统构建问题模型中,对单元构建和批量分割进行联合决策,研究日本式单元化生产下单元装配系统构建过程中单元间工作量平衡问题。通过设置批量大小这一决策变量,确保同一产品在多个单元并行处理时总完工时间减少,促进企业生产资源合理分配。在指标选择方面,Stecke<sup>[34]</sup>提出了单元间工作量平衡的5个项目指标,而最小化总完工时间作为指标之一可以反应出瓶颈单元的完工时间<sup>[35]</sup>,方便企业管理人员进行决策,且其他平衡指标多为总完工时间的函数。随着瓶颈单元完工时间的减少,单元间完工时间的差异随之减少,单元间工作量平衡得到提高。通过对各平衡指标的分析,发现所得方案对应的各指标的排序基本相同。因此,模型以最小化总完工时间作为单元间工作量平衡指标,以最小化工人总工时作为工作效率衡量指标。在模型优化机理方面,通过决策不同单元批量大小,优化各单元工作量,达到确保各单元完工时间差异减少,提高单元间工作量平衡水平,缩短总完工时间的目的。单元装配系统构建问题已经被证明属于NP-hard问题<sup>[16]</sup>,在算法设计上,由于考虑批量分

割的模型增加了解空间复杂度,根据模型中决策变量的特点以及约束条件,本文采用 NSGA-II 算法<sup>[36]</sup>对模型求解,设计基于游标的编码方式解决单元数量动态变化下批量与单元匹配难题,并在进化过程中不断对批量大小进行优化.最后通过算例验证算法效果,分析各生产要素对单元间工作量平衡的影响,并在管理上给出建议.

### 1 问题描述与模型建立

#### 1.1 问题描述与模型假设

单元装配系统和分布式流水线虽然都是并行化生产,但二者有本质的不同.分布式流水线是以不同公司之间的合作生产或不同工厂之间协作生产等分布式制造为背景,研究工件在工厂间的分配和各工厂内的加工顺序,以实现调度指标的最优化<sup>[37]</sup>.分布式流水线以每一个工厂为一个流水车间,其本质仍为流水线.流水线向单元装配系统转化则以单元取代原有流水线,这种单元取消了原有流水线的传送带,并以带轮子的工作台、轻型机器、手持工具、一个或若干多能工取代.相较于流水线每个工人负责一个工位,单元内工人经过交叉培训后能完成产品部分或全部工序的装配,工人会因同一产品不同阶段的工序任务发生移动.因此,工作单元装配系统具有灵活多变的布局和技能丰富的工人,能够通过快速调整单元数量和工人分配方案来及时响应产品变化和 demand 波动.

图 1 为流水线向单元装配系统转化示意,产品经传送带经过每个工位,工人在固定工位上完成产品的各个工序.在流水线向单元装配系统转化后,构建两个单元,单元内工人负责同一产品全部装配工作,并随着产品工序的不同阶段依次经过 5 个工位.由于转

化后生产方式变为并行生产,各单元分配的任务量的不同会导致单元间工作量平衡发生改变,有必要考虑批量分割改变各单元分配的任务量以提高单元间平衡.日本式单元化生产广泛应用于电子行业,并在松下华录取得较好的应用效果<sup>[38]</sup>.

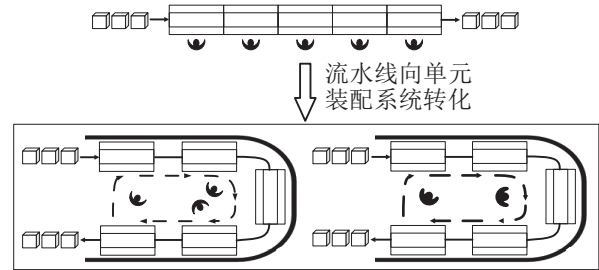


图 1 流水线向单元装配系统转化示意

本文在单元装配系统构建中从批量大小合理性角度研究单元间工作量平衡问题,其中单元装配系统的构建单位为巡回式单元<sup>[8]</sup>,由几名工人以相近的速度来回生产,单元内工人为全能工,能够完成一件产品从头到尾的装配工作.在已知产品类型、产品数量、单元类型、工人数量、工人技能水平的前提下,考虑批量分割,假设产品类型为  $P_n$ ,各类型产品数量为  $PB_n$ .  $LS_{nj}$  表示产品  $n$  划分的批次被分到单元  $j$  中,为在满足单元内工人数量、批量分割和批次分配约束条件下,以最小化工人总完工时间和最小化工人总工时为优化目标,决策单元数量、单元内工人组合、批次分割和批次分配方案,具体要素及其关系如图 2 所示.其中:  $w_1, w_2, w_3, w_4, w_5, w_6$  表示工人,工人技能熟练度已知;  $P_1, P_2, P_3, P_4$  表示产品类型;  $PB_1, PB_2, PB_3, PB_4$  表示各类产品数量;  $LS_{11}, LS_{22}, LS_{23}, LS_{33}, LS_{41}, LS_{42}$  表示产品被划分的批次.在给定的假设和模型

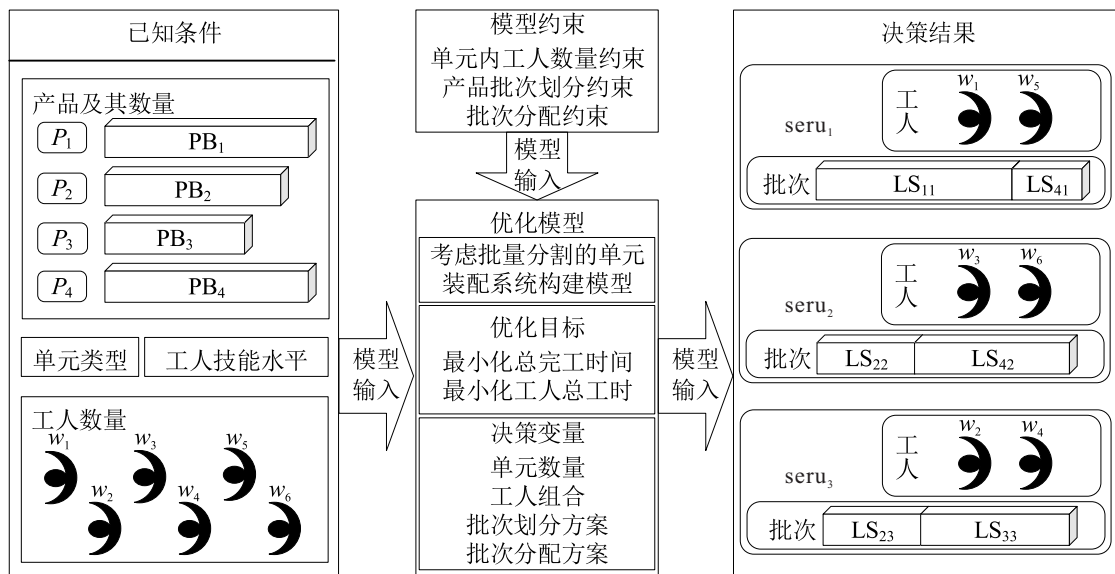


图 2 考虑批量分割的模型优化流程

约束下建立3个单元,  $seru_1$ ,  $seru_2$  和  $seru_3$  中分别对应工人组合  $(w_1, w_5)$ ,  $(w_3, w_6)$  和  $(w_2, w_4)$ . 其中: 产品1被分配到单元  $seru_1$  中; 产品2被划分为两个批次, 分别分配到单元  $seru_2$  和  $seru_3$  中; 产品3被分配到单元  $seru_3$  中; 产品4被划分为两个批次, 分别分配到单元  $seru_1$  和  $seru_2$  中. 在模型构建描述中, 产品批次划分约束是指产品  $n$  被划分的批次大小之和等于产品数量; 批次划分方案则是指产品  $n$  被划分为几个批次以及各批次的大小. 本文模型假设如下:

- 1) 由于大部分装配单元都是由简单、低成本设备构成, 不考虑设备复制成本<sup>[8]</sup>.
- 2) 工人数量与原流水线工序数相同, 原流水线工人只处理一道工序.
- 3) 工人在单元内可以完成所有工序装配工作, 不考虑工人在单元间移动.
- 4) 单元内每种产品工序与原流水线中工序数量相同.
- 5) 考虑生产准备时间, 生产准备时间只与产品种类相关.

### 1.2 模型建立

基于上述问题描述, 对模型优化机理进行分析, 并给出相关符号定义. 该模型包括单元数量、各单元对应批量大小、工人分配3个决策变量, 通过对单元构建和批量分割进行联合决策, 优化单元工作量. 当单元间工作量差异较大时, 通过减少工作量较大单元批量, 增加工作量较小单元批量, 减少单元间完工时间差异, 以缩短总完工时间, 提高单元间工作量平衡. 本文定义的参数和决策变量如表1所示.

表1 参数与决策变量

符号	说明
$l$	工序索引号, $l = 1, 2, \dots, L$
$i$	工人索引号, $i = 1, 2, \dots, W$ , 且 $W = L$
$n$	产品种类索引号, $n = 1, 2, \dots, N$
$T$	原流水线节拍时间
$T_{nl}$	单元中第 $n$ 道工序的标准加工时间
参数	$\gamma_{il} \geq 1$ , 表示工人 $i$ 对第 $l$ 道工序的熟练度, 越接近1表示熟练度越高
	$SCT_n$ 单元中第 $n$ 类产品生产准备时间
	$SLt_n$ 流水线中第 $n$ 类产品生产准备时间
	$PB_n$ 第 $n$ 类产品数量
	$j$ 单元索引号, $j = 1, 2, \dots, J$
决策变量	$J$ 所构建单元数量, $1 \leq J \leq W$
	$LS_{nj}$ 单元 $j$ 中第 $n$ 类产品批量大小, $0 \leq LS_{nj} \leq PB_n, j = 1, 2, \dots, J$
	$X_{ij}$ 0-1 决策变量, $X_{ij} = 1$ 表示工人 $i$ 被分配到单元 $j$ 中, 否则为0

在流水线向单元装配系统转化过程中, 需要对员工进行培训, 由于工人认知能力和经验不同, 其培训效果往往也不同. 本文以工人熟练度系数  $\gamma_{il}$  来表示不同工人对某道工序操作能力,  $T_{nl}\gamma_{il}$  表示工人  $i$  对第  $n$  类产品第  $l$  道工序的具体加工时间. 工人  $i$  加工单个产品的总时间

$$TP_{ni} = \sum_{l=1}^L T_{nl}\gamma_{il}, \forall n, j; \quad (1)$$

单个产品在单元中加工时间以单元内员工平均加工时间<sup>[13]</sup>表示, 即

$$TT_{nj} = \frac{\sum_{i=1}^W TP_{ni}X_{ij}}{\sum_{i=1}^W X_{ij}}, \forall n, j; \quad (2)$$

单元  $j$  中批量大小为  $LS_{nj}$  的产品总加工时间为

$$TB_{nj} = \frac{TT_{nj}LS_{nj}}{\sum_{i=1}^W X_{ij}}, \forall n, j. \quad (3)$$

当  $LS_{nj} = 0$  时表示单元  $j$  未分配产品  $n$ ,  $TB_{nj} = 0$ .

在同一单元内, 当两种不同产品先后进行加工时, 往往会因产品种类差异而对单元做出调整, 因此考虑生产准备时间

$$SCP_{nj} = SCT_n \text{sgn}(LS_{nj}). \quad (4)$$

$$TS_{nj} = \begin{cases} \sum_{n'=1}^{n-1} (SCP_{n'j} + TB_{n'j}), & n = 2, 3, \dots, N; \\ 0, & n = 1. \end{cases} \quad (5)$$

$$TTPT = \max_j (TS_{Nj} + SCP_{Nj} + TB_{Nj}). \quad (6)$$

$$TLH = \sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^W \sum_{n=1}^N (TB_{nj}X_{ij}). \quad (7)$$

式(4)表示第  $n$  类产品在单元  $j$  中的生产准备时间, 其中  $\text{sgn}(LS_{nj})$  为符号函数, 当单元  $j$  中第  $n$  类产品批量大小  $LS_{nj} = 0$  时, 其准备时间为0. 式(5)表示第  $n$  类产品在单元  $j$  中开始加工时间, 为紧前产品的结束时间, 当该单元加工产品1时, 其值为0. 式(6)表示总完工时间 (total throughput time, TTPT), 为各个单元最后一个加工批次完工时间最大值. 式(7)表示工人总工时 (total labor hours, TLH), 为所有工人实际工作时间总和.

综上所述, 建立如下模型:

$$f_1 = \min(TTPT); \quad (8)$$

$$f_2 = \min(TLH). \quad (9)$$

$$\text{s.t. } 1 \leq \sum_{i=1}^W \leq W, \forall j; \quad (10)$$

$$\sum_{j=1}^J X_{ij} = 1, \forall i; \quad (11)$$

$$\sum_{j=1}^J LS_{nj} = PB_n, \forall n; \quad (12)$$

$$\sum_{n=1}^N LS_{nj} = 0, \forall j \mid \sum_{i=1}^W X_{ij} = 0; \quad (13)$$

$$1 \leq J \leq W; \quad (14)$$

$$X_{ij} \in \{0, 1\}, \forall i, j; \quad (15)$$

$$0 \leq LS_{nj} \leq PB_n, \forall j, n. \quad (16)$$

目标函数式(8)和(9)分别表示最小化总完工时间和最小化工人总工时;式(10)和(11)表示工人分配约束,其中式(10)表示各个单元工人数量限制,即单元内至少有一个工人且工人数量不大于总工人数量,式(11)表示一个工人只能安排在一个单元中,即单元间不存在工人移动;式(12)和(13)为批次分配约束,其中式(12)表示第  $n$  类产品批量总和等于该产品数量,式(13)表示任何产品批次都不会在没有工人的单元中进行加工;式(14)~(16)表示决策变量取值范围.

## 2 INSGA-II

本文对单元构建和批量分割进行联合决策,增加了批量划分约束,要求同一类产品批量总和保持不变,使问题变得更为复杂.考虑到 NSGA-II 算法可以通过编码灵活表示模型约束,同时对求解 NP 完全问题具有较好的通用性,因此采用 NSGA-II 算法进行求解.为弥补算法在局部搜索方面的不足,提出局部搜索策略,形成混合 NGSII 算法.

### 2.1 NSGA-II

#### 2.1.1 编码方式

本文采用两段式编码方式,第 1 个基因段采用加入冗余码的编码方式,用来表示单元构建方案,染色体由  $2W - 1$  个随机打乱的整数组成,其中  $W$  表示工人数量,  $[1, W]$  表示工人编号,  $[W + 1, 2W - 1]$  表示单元分割符.如图 3 所示,按照所提编码方式,将 6 个工人分配到 3 个单元,分别为  $\{1,2\}, \{3,4\}, \{5,6\}$ .

1	2	7	3	4	8	5	6	9	10	11
---	---	---	---	---	---	---	---	---	----	----

图 3 单元构建段

对于染色体的第 2 个基因段,采用游标进行批量分割,游标数为  $NW$ .对于每一种产品  $n$ ,游标数为  $W$ ,其中前  $W - 1$  个游标随机生成并按照升序排列,

取值范围为  $[0, TB_n]$ ,最后一个游标  $W$  取值  $TB_n$ .每一个游标与单元构建段中对应顺序工人相对应,并根据单元数量确定批量段数量,每个单元产品批量大小为对应批量段与前一批量段最大值之差.其中第 1 个单元产品批量大小为对应批量段的最大值.如图 4 所示,假设有 2 种产品,其数量分别为 20 和 23,以图 3 单元构建段为例,产品 1 对应批量段为  $\{3,6\}, \{8,13\}, \{16,20\}$ ,则单元 1 对应批量大小为 6,单元 2 对应批量大小为  $13 - 6 = 7$ ,单元 3 对应批量大小为  $20 - 13 = 7$ .同理,产品 2 在 3 个单元中对应批量大小分别为 8、8 和 7.

3	6	8	13	16	20	3	8	12	16	20	23
---	---	---	----	----	----	---	---	----	----	----	----

图 4 批量分割段

#### 2.1.2 非支配排序与选择算子

非支配排序是从当前种群中找出所有非劣解,按照次序给其分配等级并从种群中移除所找到的非劣解,直至种群大小为 0.在实际求解过程中发现,由于同一单元构建方案会对应多个批量分配方案,最终帕累托曲面中重复解较多,在非支配排序前对解集进行分层,将解集划分为优质解与非优质解两个集合,分别对两个集合进行非支配排序,并优先对优质解进行选择,然后对非优质解进行选择.

本文定义优质解如下,对于相同的单元构建方案,以完工时间最小的染色体为优质解,其余染色体对应非优质解.对于染色体单元构建段,不考虑单元顺序,如果单元内工人相同,则认为二者属于相同的单元构建方案.例如,染色体单元构建段  $\{1,2,7,3,4,8,5,6,9,10,11\}$  和  $\{4,3,7,8,5,6,9,10,1,2,11\}$ ,可以看出二者都对应  $\{1,2\}, \{3,4\}, \{5,6\}$  三个单元,其总完工时间分别为  $TTPT_1$  和  $TTPT_2$ ,如果  $TTPT_1 < TTPT_2$ ,则将第 1 个染色体放入优质解集合中,将第 2 个染色体放入非优质解集合中.

#### 2.1.3 交叉算子

本文采用两种交叉算子分别对染色体两个基因段进行交叉,对于染色体第 1 个基因段选择顺序交叉算子 (order crossover, OX);对于染色体第 2 部分,本文提出多点排序交叉算子 (multi-point sorting crossover, MSX),首先选择参与交叉的染色体,对染色体中每种产品按基因位置随机分为两个集合,从父染色体 1 中选择集合 1 对应位置基因,父染色体 2 中选择集合 2 对应位置基因,将两个集合合并然后对基因按照升序排列生成子代染色体 1.如图 5 所示,对于产品 1,按位置分为  $\langle 2, 4 \rangle, \langle 1, 3, 5, 6 \rangle$  两个集合,染色体

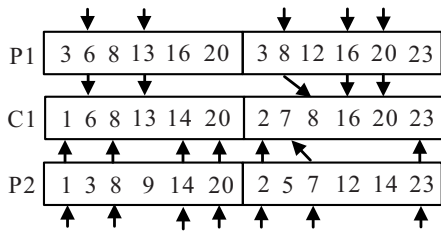


图5 多点排序交叉算子

P1 对应位置 (2, 4) 选择基因集合 {6, 13}, 染色体 P2 对应位置 (1, 3, 5, 6) 选择基因 {1, 8, 14, 20}, 将其按照升序排序为 {1, 6, 8, 13, 14, 20}. 同理对产品 2 进行交叉, 产生子代 {2, 7, 8, 16, 20, 23}.

2.1.4 变异算子

本文采用两种变异操作, 对于单元构建段, 采用互换变异, 即随机选择两个基因位, 交换二者位置; 对于批量分割段, 选择均匀变异, 随机选择参与变异的产品, 从中随机选取一个基因, 在区间 [0, TB<sub>n</sub>] 中取随机整数进行变异, 并按照升序插到对应位置. 如图 6 所示, 假设产品 1 中值为 9 的基因发生均匀变异, 从 [0, 20] 中随机取整数 5, 按照升序排序将 5 插到值为 8 的基因前.

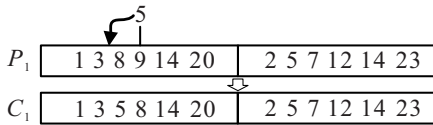


图6 均匀变异

2.2 局部搜索策略

本文目标函数 TTPT 反应瓶颈单元完工时间, 将瓶颈单元中部分产品分配给完工时间较短的单元有助于减少总完工时间. 为使优化过程中的解向非支配方向移动, 将瓶颈单元部分产品分配给非瓶颈单元的同时, 需要寻求满足减少工人工时的产品. 由式 (2) 和 (3) 可知, 单元 j 中数量为 ΔB<sub>nj</sub> 的产品 n 对应的工人工时如下所示:

$$\Delta TLH_{nj} = \Delta B_{nj} TT_{nj} = \Delta B_{nj} \frac{\sum_{i=1}^W TP_{ni} X_{ij}}{\sum_{i=1}^W X_{ij}}. \tag{17}$$

对于既定单元, TT<sub>nj</sub> 为定值. 因此, 假设瓶颈单元 j<sub>1</sub> 和非瓶颈单元 j<sub>2</sub> 存在产品重分配, 仅需寻求满足 TT<sub>(nj<sub>1</sub>)</sub> ≥ TT<sub>(nj<sub>2</sub>)</sub> 的产品.

基于上述分析, 局部搜索策略如下.

step 1: 将染色体中单元 j 对应的完工时间从小到大排列 (TTPT<sub>1</sub>, TTPT<sub>2</sub>, ..., TTPT<sub>J</sub>), TTPT :=

TTPT<sub>J</sub>, j := 1, 转至 step 2.

step 2: 若 j < J, 则计算 ΔTT<sub>nj</sub> := TT<sub>nJ</sub> - TT<sub>nj</sub>, 单元 j 对应集合 ΔTT<sub>j</sub> = (ΔTT<sub>1j</sub>, ΔTT<sub>2j</sub>, ..., ΔTT<sub>Nj</sub>), 转至 step 3; 否则, 转至 step 1.

step 3: 若 max(ΔTT<sub>j</sub>) ≥ 0, 则 ΔTT<sub>n'j</sub> := max<sub>n</sub>(ΔTT<sub>j</sub>), 计算

$$\Delta LS_{n'j} := \frac{(TTPT_J - TTPT_j) \sum_{i=1}^W X_{iJ} \sum_{i=1}^W X_{ij}}{TT_{n'J} \sum_{i=1}^W X_{ij} + TT_{n'j} \sum_{i=1}^W X_{iJ}},$$

转至 step 4, 否则, j := j + 1, 转至 step 5.

step 4: 若 min(LS<sub>n'j</sub>, [ΔLS<sub>n'j</sub>]) > 0, 瓶颈单元 J 产品 n' 数量 LS<sub>n'J</sub> := LS<sub>n'J</sub> - min(LS<sub>n'j</sub>, [ΔLS<sub>n'j</sub>]), 单元 j 产品 n' 数量 LS<sub>n'j</sub> := LS<sub>n'j</sub> + min(LS<sub>n'j</sub>, [ΔLS<sub>n'j</sub>]), 则计算 TTPT<sub>j</sub> 和 TTPT<sub>J</sub>, 转至 step 1; 否则, j := j + 1, 转至 step 3.

step 5: 如果 j = J ∧ TTPT = TTPT<sub>J</sub>, 则结束; 否则, 转至 step 2.

2.3 算法步骤

NSGA-II 具有较强的全局搜索能力, 但在局部搜索方面仍有待提高. 因此, 本文根据问题特征, 增加局部搜索策略, 对算法进行改进. 提出 INSGA-II, 具体框架如图 7 所示.

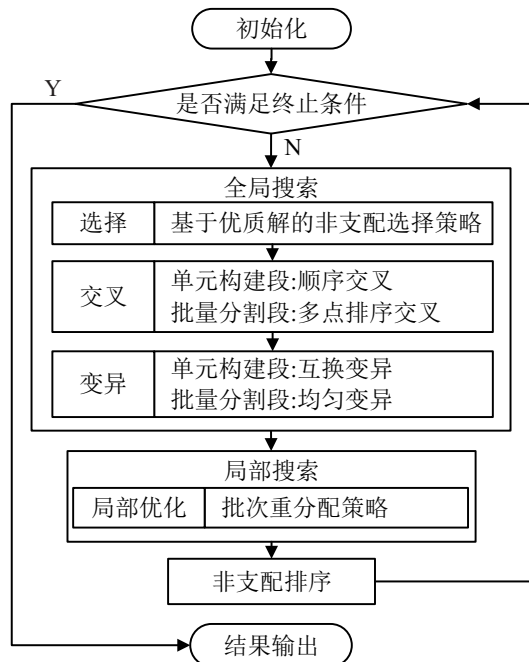


图7 INSGA-II 算法框架

3 数值检验分析

3.1 基本算例

基于前文所提数学模型, 本文以文献 [16] 中 Benchmark 数据为例验证模型的有效性. 为方便对

比,表2列出以往文献中给定随机批次下采用先来先服务调度规则的单元装配系统构建方案对应的批次数据,假设有5种产品30个批次,各批次产品数量服从 $N(20,5)$ 的正态分布;表3所示为各类产品总量.假设流水线上节拍时间为1.8 min,每种产品有6道工序,各个产品各工序标准加工时间 $T_{ni}$ 服从 $U(1.4,1.8)$ 的均匀分布,具体值如表4所示.表5为工人技能熟练度 $\gamma_{ii}$ ,某工序实际加工时间可以由 $T_{ni}\gamma_{ii}$ 表示.例如表4中产品1第1道工序,标准加工时间为1.4 min,表5中工人1对工序1技能熟练度为1.00,因此工人1对产品1第1道工序具体加工时间为1.40 min;产品在单元和流水线中生产准备时间如表6所示.

表2 产品批次数据

批次号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
产品种类	1	2	1	2	2	5	1	2	3	3
批量大小	13	12	25	14	28	20	25	14	22	24
批次号	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
产品种类	2	2	4	2	5	4	3	1	5	2
批量大小	12	13	15	27	24	19	24	20	20	23
批次号	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
产品种类	5	2	4	2	5	3	5	3	4	5
批量大小	14	8	21	18	15	13	20	15	13	21

表3 产品数量数据

产品种类	1	2	3	4	5
产品数量	83	169	98	68	134

表4 工序标准操作时间

产品	工序					
	1	2	3	4	5	6
1	1.40	1.80	1.50	1.60	1.40	1.60
2	1.40	1.60	1.60	1.50	1.40	1.80
3	1.40	1.50	1.60	1.80	1.70	1.40
4	1.70	1.40	1.50	1.60	1.60	1.80
5	1.70	1.60	1.50	1.40	1.50	1.70

表5 工人技能熟练度

产品	工序					
	1	2	3	4	5	6
1	1.00	1.02	1.05	1.02	1.04	1.08
2	1.06	1.10	1.00	1.03	1.07	1.02
3	1.04	1.03	1.00	1.07	1.06	1.09
4	1.04	1.05	1.10	1.00	1.08	1.00
5	1.10	1.17	1.05	1.01	1.00	1.07
6	1.08	1.09	1.03	1.13	1.05	1.00

表6 生产准备时间

产品类型	1	2	3	4	5
SCt <sub>n</sub>	1.30	1.40	1.20	1.60	1.10
SLt <sub>n</sub>	2.30	2.40	2.20	2.60	2.10

3.2 算法比较

运用所提改进NSGA-II算法,初始种群规模为200,进化代数为100,交叉概率0.8,变异概率0.2.在工人数为6的算例实验中,考虑批量分割前后帕累托前沿如图8(a)所示.表7列出了考虑批量分割下对应的解集,其中产品列分别对应各单元批量大小,与流水线总完工时间1050.20 min、工人总工时6231.60 min相比,考虑批量分割的单元装配系统有效缩短了总完工时间,同时降低了工人总工时.

为验证本文所提出模型及算法对不同算例的效果,分别对10名工人和20名工人组成的单元装配系统构建问题进行求解,由于篇幅有限,只列出其最终解分布与帕累托前沿,图8(b)、(c)分别是10名工人和20名工人对应的帕累托前沿,可以看出考虑批量分割结果更优,当工人人数增多时,批量分割能更好地缩短总完工时间和工人总工时.

如表8所示,比较不同工人组成的单元装配系统构建方案对应单元间工作量平衡,可以发现考虑批量分割的单元装配系统构建方案能更好平衡各单元工作量.同时,随着产品工序的增加,单元间工作量会有一定差距,这是由于产品工序多时单个产品加工时间较长,各个单元间工作量得到很好平衡时,单元间工作量之差不超过单个产品加工时间.

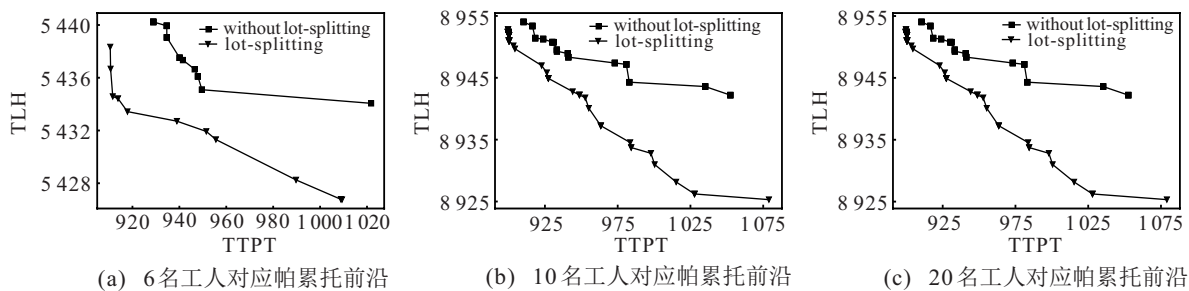


图8 不同工人数量下考虑批量分割前后的帕累托前沿比较

表7 考虑批量分割由6名工人组成的流水线向单元转化的帕累托解

TPPT	TLH	Seru	产品1	产品2	产品3	产品4	产品5
910.54	5438.37	3,1 5,4,2,6	83,0	0,169	98,0	0,68	5,129
910.69	5436.67	4 6,3,2 5 1	83,0,0,0	0,144,21,4	10,0,0,88	0,0,68,0	0,133,0,1
911.61	5434.58	1 4,2,3 6 5	83,0,0,0	0,74,92,3	10,0,0,8	0,0,68,0	0,133,0,1
913.84	5434.42	1 4,6,3,2 5	83,0,0,0	0,74,92,3	10,0,0,88	0,0,68,0	0,133,0,1
917.88	5433.43	3,1 4,6,2 5	83,0,0	0,169,0	0,10,88	0,68,0	93,41,0
938.96	5432.71	2,2 5 4,3 6	83,0,0,0	0,0,74,95	22,76,0,0	68,0,0,0	17,0,117,0
951.49	5431.93	1 5 2,6 5,3	55,0,0,38	0,2,0,167	30,68,0,0	0,68,0,0	13,0,121,0
955.57	5431.31	5 1,4 3,2,6	0,88,0	0,0,169	0,68,30	0,67,1	0,44,90
989.74	5428.25	5 1,2 3,4 6	0,0,83,0	0,0,72,97	50,48,0,0	0,68,0,0	0,84,47,3
1008.85	5426.78	3 5 1 2,4,6	0,83,0,0	0,0,0,169	20,46,32,0	0,0,0,68	0,0,71,63
1009.34	5426.76	5 3,1,4 6,2	0,83,0	0,11,158	41,57,0	0,35,33	0,121,13

表8 单元间工作量平衡对比

工人	考虑批量分割的单元工作量			不考虑批量分割的单元工作量		
	min(TPPT)	对应单元工作量	级差	min(TPPT)	对应单元工作量	级差
6	910.54	[909.89,910.54]	0.65	928.89	[928.89,920.14]	8.75
10	901.63	[901.63,900.82]	0.81	910.39	[904.32,910.39,908.12]	6.07
20	923.35	[922.09,923.05,918.57,918.62,919.61,923.35]	4.78	931.31	[929.61,923.36,931.31]	7.95

本文所提模型考虑了批量分割,针对同一单元构建方案,会存在较多可行邻域解.为验证所提算法的有效性和局部搜索能力,以10名工人为例,分别与MOFOA<sup>[39]</sup>和IMOEA/D<sup>[40]</sup>两种局部搜索能力较强的算法进行对比.同时,流水线向单元装配系统转化可以分为单元构建和任务分配两个子问题<sup>[41]</sup>,因此与加入协同机制的CCEA<sup>[42]</sup>算法进行对比.图9所示为4种算法对应的帕累托前沿,可以看出本文所提出的INSGA-II具有较好的求解效果.

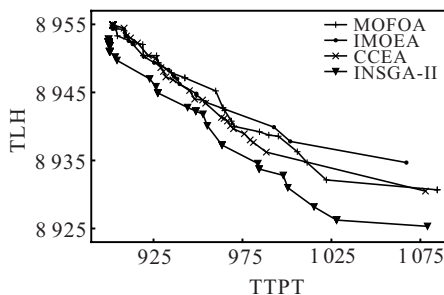


图9 各算法对应的帕累托前沿分布

### 3.3 灵敏度分析

由于单元间工作量平衡主要受各单元任务量差异的影响,产品数量波动会影响单元所分配的任务量,且在一定程度上反映客户需求变化以及市场需求变动.因此,分析产品数量参数变化即市场需求变动对考虑批量分割下单元间工作量平衡以及稳定性的影响,并与随机批次下单元装配系统构建问题进行对

比验证.以6名工人组成的单元装配系统构建问题为例,在表2随机批次服从 $N(20,5)$ 分布对应数据的基础上,增加 $N(20,10)$ 和 $N(30,5)$ 的对比试验,并分别生成20组算例,每组算例运行20次,取最优TPPT均值以及单元间工作量级差的均值,分析批次方差和期望变化对单元间工作量平衡的影响.

图10分别为服从 $N(30,5)$ 、 $N(20,5)$ 、 $N(20,10)$ 分布下最优TPPT对比.对比20组算例,考虑批量分割的TPPT值均更优,TPPT平均提高率分别为1.14%、1.63%和1.22%.分析发现:批次期望相同、方差较小时TPPT平均提高率较高,即考虑批量分割更能提高单元装配系统效率并减少总完工时间.

在随机批次不同分布下,对比批量分割前后单元间工作量平衡,图11(a)、(b)、(c)分别对应 $N(30,5)$ 、 $N(20,5)$ 、 $N(20,10)$ 情况下20组算例对应的单元间工作量级差,可以看出在不同分布下,考虑批量分割对应的折线图均较平稳.即算法对不同产品需求均具有较好效果,且考虑批量分割的模型均能更好平衡单元间工作量.对比20组算例的期望与方差,随机批次下期望为20.49、12.49、14.20,方差为439.40、193.71、138.48,考虑批量分割后期望为0.97、0.83、0.35,方差为0.51、0.38、0.17.可以发现:在不考虑批量分割情况下,不同分布对单元间工作量平衡影响较大,对考虑批量分割情况下单元间工作量平衡影响较小,即考虑批量分割具有更好的稳定性.

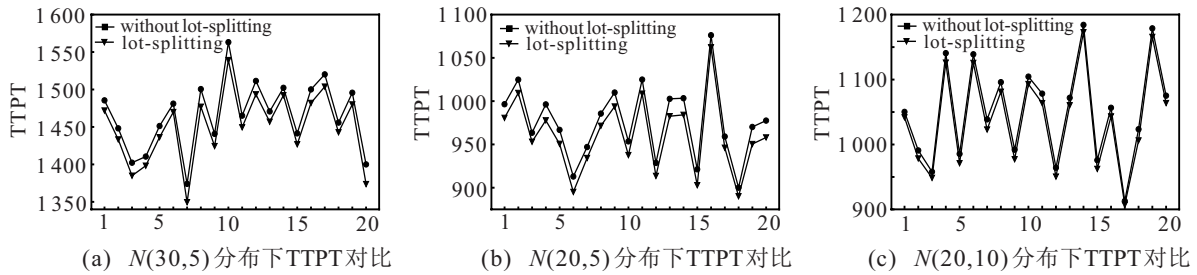


图 10 随机批次不同分布下考虑批量分割前后 TTPT 对比

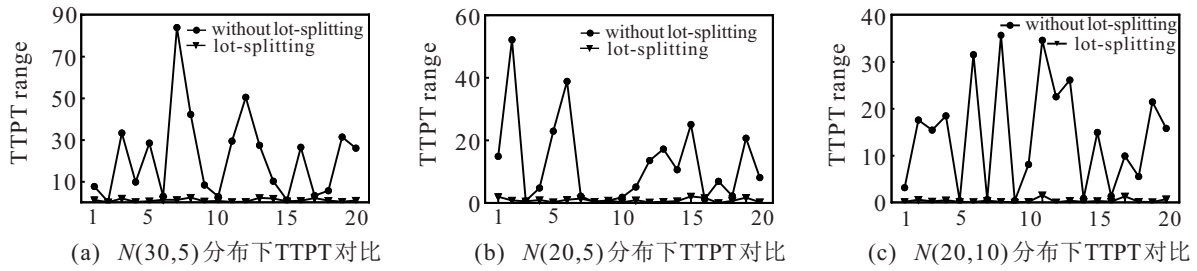


图 11 随机批次不同分布下考虑批量分割前后单元工作量平衡对比

为进一步分析批量分割的效果,取图10中考虑批量分割前后各算例对应的TTPT差值画箱线图,结果如图12(a)所示.可以看出:当随机批次方差相同,期望不同时,四分位数间距、中位数位置基本相同;当方差较大时,差值整体偏小,说明批量波动较大情况下考虑批量分割具有更短的TTPT.图12(b)分别为不同分布情况下,考虑批量分割下单元间工作量级差对应箱线图.可以看出:当随机批次分布方差相同,期望值不同时,对应中位数、上下边缘跨度基本相同;当期望值相同,方差较大时,考虑批量分割单元间级差离散程度较小,即产品数量波动较大时考虑批量分割稳定性更好.

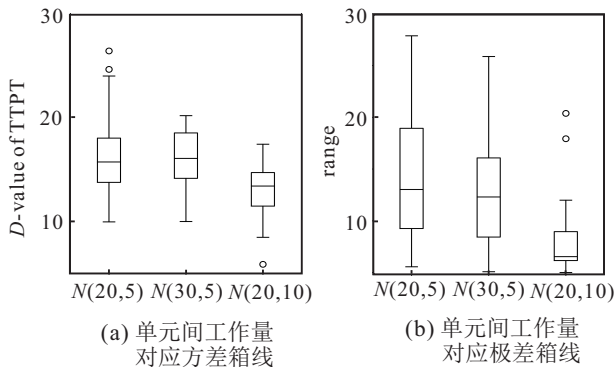


图 12 考虑批量分割前后 TTPT 差值对应的箱线图

### 4 结论

本文根据日本式单元化生产的特点以及生产实际,考虑批量分割对单元间工作量平衡的影响,以最小化总完工时间和最小化工人总工时为目标,构建流水线向单元装配系统转化的多目标模型,对转化过程

中单元构建和批量分割进行联合决策,以缩短总完工时间,同时提高单元间工作量平衡.在模型求解过程中,根据模型特点采用 INSGA-II 算法进行求解,设计了基于游标的编码方式,满足了批量划分约束,在进化过程中从全局角度优化批量大小,以确保工人-单元-批量之间合理匹配.通过不同规模算例,对考虑批量分割前后进行对比,证明考虑批量分割更能提高单元间工作量平衡.为验证不同市场需求特征下批量分割对单元间工作量平衡的影响,设计3组实验,每组试验采用20组算例进行分析,发现对于不同产品需求分布,算法求解效果均较好,考虑批量分割均能较好地提高单元间工作量平衡,且对于产品需求波动较大的环境下,考虑批量分割更能提高单元间工作量平衡.

### 参考文献(References)

- [1] Kono H. The aim of the special issue on seru manufacturing[J]. IE Review, 2004, 45: 4-5.
- [2] Yin Y, Kaku I, Stecke K E. The evolution of seru production systems throughout Canon[J]. Operations Management Education Review, 2008, 2: 35-39.
- [3] 刘晨光, 廉洁, 李文娟, 等. 日本式单元化生产——生产方式在日本的最新发展形态[J]. 管理评论, 2010, 22(5): 93-103.
- [4] Liu C G, Lian J, Li W J, et al. Seru seisan—The latest manufacturing model developed in Japan[J]. Management Review, 2010, 22(5): 93-103.)
- [5] Hisashi S. The change of consciousness and company by cellular manufacturing in Canon way (in Japanese)[M]. Tokyo: JMAM, 2006.

- [5] Yin Y, Stecke K E, Li D N. The evolution of production systems from industry 2.0 through industry 4.0[J]. *International Journal of Production Research*, 2018, 56(1/2): 848-861.
- [6] Yin Y, Stecke K E, Swink M, et al. Lessons from seru production on manufacturing competitively in a high cost environment[J]. *Journal of Operations Management*, 2017, 49(51): 67-76.
- [7] Sakazume Y. Is Japanese cell manufacturing a new system? A comparative study between Japanese cell manufacturing and cellular manufacturing[J]. *Journal of Japan Industrial Management Association*, 2005, 55(6): 341-349.
- [8] Stecke K E, Yin Y, Kaku I, et al. Seru: The organizational extension of JIT for a super-talent factory[J]. *International Journal of Strategic Decision Sciences*, 2012, 3(1): 106-119.
- [9] Villa A, Taurino T. From JIT to Seru, for a production as lean as possible[J]. *Procedia Engineering*, 2013, 63: 956-965.
- [10] 于洋, 唐加福. Seru生产方式[M]. 北京: 科学出版社, 2018: 133-137.  
(Yu Y, Tang J F. Seru production[M]. Beijing: Science Press, 2018: 133-137.)
- [11] Yu Y, Tang J F. Review of seru production[J]. *Frontiers of Engineering Management*, 2019, 6(2): 183-192.
- [12] Kaku I, Murase Y, Yin Y. A study on human tasks related performances of converting conveyor assembly line to cellular manufacturing[J]. *European Journal of Industrial Engineering*, 2008, 2(1): 17-34.
- [13] Liu C G, Stecke K E, Lian J, et al. An implementation framework for seru production[J]. *International Transactions in Operational Research*, 2014, 21(1): 1-19.
- [14] Wang Y, Tang J F. Cost and service-level-based model for a seru production system formation problem with uncertain demand[J]. *Journal of Systems Science and Systems Engineering*, 2018, 27(4): 519-537.
- [15] Liu C G, Li W J, Lian J, et al. Reconfiguration of assembly systems: From conveyor assembly line to serus[J]. *Journal of Manufacturing Systems*, 2012, 31(3): 312-325.
- [16] Yu Y, Tang J F, Gong J, et al. Mathematical analysis and solutions for multi-objective line-cell conversion problem[J]. *European Journal of Operational Research*, 2014, 236(2): 774-786.
- [17] 孙薇, 于洋, 唐加福, 等. 提高生产率的流水线转单元的变邻域搜索[J]. *计算机集成制造系统*, 2014, 20(12): 3040-3047.  
(Sun W, Yu Y, Tang J F, et al. Variable neighborhood search for line-cell towards increasing productivity[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2014, 20(12): 3040-3047.)
- [18] Sun W, Li Q, Huo C H, et al. Formulations, features of solution space, and algorithms for line-pure seru system conversion[J]. *Mathematical Problems in Engineering*, DOI: 10.1155/2016/9748378.
- [19] Wagner B J, Ragatz G L. The impact of lot splitting on due date performance[J]. *Journal of Operations Management*, 1994, 12(1): 13-25.
- [20] Jacobs F R, Bragg D J. Repetitive lots: Flow-time reductions through sequencing and dynamic batch sizing[J]. *Decision Sciences*, 1988, 19(2): 281-294.
- [21] Wang C, Liu C, Zhang Z H, et al. Minimizing the total completion time for parallel machine scheduling with job splitting and learning[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2016, 97: 170-182.
- [22] 王海燕, 王万良, 黄凤立, 等. 分批优化调度问题综述及面向节能研究展望[J]. *计算机集成制造系统*, 2017, 23(3): 542-556.  
(Wang H Y, Wang W L, Huang F L, et al. Survey on production scheduling with lot splitting and prospect for energy-saving scheduling[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2017, 23(3): 542-556.)
- [23] Liu C G, Yang N, Li W J, et al. Training and assignment of multi-skilled workers for implementing seru production systems[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2013, 69(5/6/7/8): 937-959.
- [24] 王晔, 唐加福. 考虑员工合作关系的单元装配系统构建方法[J]. *控制与决策*, 2020, 35(2): 453-460.  
(Wang Y, Tang J F. Seru production system formation considering cooperation of workers[J]. *Control and Decision*, 2020, 35(2): 453-460.)
- [25] Yu Y, Gong J, Tang J F, et al. How to carry out assembly line-cell conversion? A discussion based on factor analysis of system performance improvements[J]. *International Journal of Production Research*, 2012, 50(18): 5259-5280.
- [26] Yu Y, Wang S H, Tang J F, et al. Complexity of line-seru conversion for different scheduling rules and two improved exact algorithms for the multi-objective optimization[J]. *SpringerPlus*, 2016, 5(1): 1-26.
- [27] 于洋, 唐加福, 宫俊. 通过生产线向单元转化而减人的多目标优化模型[J]. *东北大学学报: 自然科学版*, 2013, 34(1): 17-20.  
(Yu Y, Tang J F, Gong J. Multi-objective optimization model of line-cell conversion towards reducing

- workers[J]. Journal of Northeastern University: Natural Science, 2013, 34(1): 17-20.)
- [28] Yu Y, Tang J F, Sun W, et al. Reducing worker(s) by converting assembly line into a pure cell system[J]. International Journal of Production Economics, 2013, 145(2): 799-806.
- [29] Yu Y, Sun W, Tang J F, et al. Line-seru conversion towards reducing worker(s) without increasing makespan: Models, exact and meta-heuristic solutions[J]. International Journal of Production Research, 2017, 55(10): 2990-3007.
- [30] Yu Y, Wang J W, Ma K, et al. Seru system balancing: Definition, formulation, and exact solution[J]. Computers & Industrial Engineering, 2018, 122: 318-325.
- [31] Kaku I, Gong J, Tang J F, et al. Modeling and numerical analysis of line-cell conversion problems[J]. International Journal of Production Research, 2009, 47(8): 2055-2078.
- [32] Shao L M, Zhang Z, Yin Y. Production system performance improvement by assembly line-seru conversion[C]. Proceedings of the 10th International Conference on Management Science and Engineering Management. Singapore: Springer, 2017: 1165-1180.
- [33] 王晔, 唐加福, 赵林度. 考虑需求波动的单元装配系统构建问题的多目标模型[J]. 中国管理科学, 2018, 26(4): 57-66.  
(Wang Y, Tang J F, Zhao L D. Multi-objective optimization model for seru production system formation considering demand fluctuation[J]. Chinese Journal of Management Science, 2018, 26(4): 57-66.)
- [34] Stecke K E. Formulation and solution of non-linear integer production planning problems for flexible manufacturing systems[J]. Management Science, 1983, 29(3): 273-288.
- [35] Kumar N, Shanker K. Comparing the effectiveness of workload balancing objectives in FMS loading[J]. International Journal of Production Research, 2001, 39(5): 843-871.
- [36] Deb K, Pratap A, Agarwal S, et al. A fast and elitist multi-objective genetic algorithm: NSGA-II[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2000, 6(2): 182-197.
- [37] 王凌, 邓瑾, 王圣尧. 分布式车间调度优化算法研究综述[J]. 控制与决策, 2016, 31(1): 1-11.  
(Wang L, Deng J, Wang S Y. Survey on optimization algorithms for distributed shop scheduling[J]. Control and Decision, 2016, 31(1): 1-11.)
- [38] 刘震, 杨秀斌, 王建立, 等. 单元化生产方式及评价方法研究[J]. 工业工程与管理, 2009, 14(6): 120-123.  
(Liu Z, Yang X B, Wang J L, et al. Research on the cell production system and evaluation methods[J]. Industrial Engineering and Management, 2009, 14(6): 120-123.)
- [39] Wang L, Zheng X L. A knowledge-guided multi-objective fruit fly optimization algorithm for the multi-skill resource constrained project scheduling problem[J]. Swarm and Evolutionary Computation, 2018, 38: 54-63.
- [40] Jiang E D, Wang L. An improved multi-objective evolutionary algorithm based on decomposition for energy-efficient permutation flow shop scheduling problem with sequence-dependent setup time[J]. International Journal of Production Research, 2019, 57(6): 1756-1771.
- [41] 吴旭辉, 杜劲峰, 郝慧慧, 等. 一种基于协同进化的流水线向Seru系统转化方法[J]. 自动化学报, 2018, 44(6): 1015-1027.  
(Wu X H, Du S F, Hao H H, et al. A line-seru conversion approach by means of cooperative coevolution[J]. Acta Automatica Sinica, 2018, 44(6): 1015-1027.)
- [42] Sun W, Wu Y T, Lou Q, et al. A cooperative coevolution algorithm for the seru production with minimizing makespan[J]. IEEE Access, 2019, 7: 5662-5670.

### 作者简介

白朝阳(1979—), 男, 副教授, 博士, 从事企业管理、日式单元化生产等研究, E-mail: baizhaoyang@dlut.edu.cn;

王浩(1993—), 男, 博士生, 从事单元化生产的研究, E-mail: wanghaoals@163.com;

和莉(1997—), 女, 博士生, 从事车间智能调度的研究, E-mail: helili0623@163.com.

(责任编辑: 孙艺红)