

控制与决策

Control and Decision

技能组合可选择的赛汝生产系统多能工配置问题

王晔, 任玉红, 唐加福

引用本文:

王晔, 任玉红, 唐加福. 技能组合可选择的赛汝生产系统多能工配置问题[J]. *控制与决策*, 2022, 37(3): 737–745.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.1553>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

考虑批量分割的单元装配系统工作量平衡联合决策模型

Joint decision model of Seru production system balancing considering lot-splitting
控制与决策. 2021, 36(10): 2517–2527 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0167>

一种求解约束多目标问题的协作进化算法

A collaborative evolutionary algorithm for solving constrained multi-objective problems
控制与决策. 2021, 36(11): 2656–2664 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0791>

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>

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>

基于改进多目标优化算法的分布式数据中心负载调度

Multi-objective optimization of energy and performance management in distributed data centers
控制与决策. 2021, 36(1): 159–165 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0702>

技能组合可选择的赛汝生产系统多能工配置问题

王 晔^{1†}, 任玉红², 唐加福²

(1. 南京财经大学 营销与物流管理学院, 南京 210046; 2. 东北财经大学 管理科学与工程学院, 辽宁 大连 116025)

摘 要: 作为以人为中心的赛汝生产系统, 如何合理地配置多能工是系统构建的主要问题. 针对赛汝生产系统构建的基本问题, 考虑工人技能组合的可选择性和工人技能水平的差异性, 以最小化最大完工时间和最小化工人工作时间差异为目标, 建立赛汝生产系统多能工配置的多目标优化模型. 针对模型和解空间的特征, 开发并采用基于 NSGA-II 的多目标优化算法进行求解. 通过数值实验验证模型和算法的准确性和有效性, 并分析工人标准工序数与工人效率系数的差异对系统最大完工时间、工人工作时间差异、工人人均掌握技能数和构建单元数量的影响.

关键词: 赛汝(Seru)生产系统; 多能工配置; 技能可选择; 多目标模型; NSGA-II

中图分类号: N945.12

文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2020.1553

引用格式: 王晔, 任玉红, 唐加福. 技能组合可选择的赛汝生产系统多能工配置问题[J]. 控制与决策, 2022, 37(3): 737-745.

Skill configuration of Seru production systems considering selectable skill set

WANG Ye^{1†}, REN Yu-hong², TANG Jia-fu²

(1. College of Marketing and Logistic Management, Nanjing University of Finance and Economics, Nanjing 210046, China; 2. College of Management Science and Engineering, Dongbei University of Finance and Economics, Dalian 116025, China)

Abstract: Assignment and configuration of multi-skilled worker is a key problem for Seru production systems formation, which is a human-centered production system. Considering the selectivity of worker skill sets and the diversity of workers' proficiency level, this paper develops a multi-objective optimization model of the multi-skilled worker configuration problem for the Seru production system to minimize the make span and imbalance in labor hours. The algorithm based on NSGA-II is developed to solve the mathematical model considering the NP-hard and multi-objective optimization nature of the problem. At the same time, numerical experiments are conducted to evaluate the impact of varying upper bound task number and proficiency level on make span, workload imbalance, average skill number and average Seru number.

Keywords: Seru production systems; multi-skilled worker configuration; selectable skill set; multi-objective model; NSGA-II

0 引 言

面对多样化、个性化的产品特征, 企业如何利用有限的资源快速响应顾客需求早已成为生产制造行业关注的重点问题, 尤其在技术发展迅速、产品更新换代快的高新产业更为明显^[1]. 在智能制造全面铺开、智能化设备大发展的环境下, 众多企业选择将简单操作借助于智能化设备进行, 在节约人工成本的同时, 可以提升产品的质量^[2]. 但是在高新技术产业中, 由于产品需求的批量小、类型多, 装配工艺复杂等原因, 智能设备也不能完全满足企业的生产需要, 高技

能工人参与的装配方式必不可少^[3]. 与此同时, 由于高技能工人的稀缺性, 如何合理地组织高技能工人完成企业的生产任务是一个值得研究的问题.

赛汝生产系统(Seru production systems, SPS)是由以佳能、索尼等为代表的日本电子装配企业在生产实践中提出的生产组织方式, 并在应用过程中得到了其他生产企业的认可, 被证实可以应对多品种、小批量、变批量以及更新换代快的市场需求^[4-8]. Seru一词来源于英文单词 cell 的日文发音, 由西方单元生产方式演化而来, 是单元生产方式的一个延伸. Seru

收稿日期: 2020-11-10; 录用日期: 2021-03-16.

基金项目: 国家自然科学基金项目(71901119).

[†]通讯作者. E-mail: wangye77@foxmail.com.

是指为了完成一种或多种产品的装配,将流水线进行分割,由一个或多个工人和一些简单设备组成的装配单元^[4].多个Seru组成的生产系统即为SPS,其核心竞争力为多能工和由多能工设计的便于操作的简易设备.虽然SPS与西方单元生产方式有相似之处,但是在本质上是完全不同的^[9].区别于西方单元生产的成组技术和设备组合优化等关注点,SPS以多能工为主要研究对象,确定多能工的分组和工作方式,以提升生产效率.它融合了西方传统单元制造、日本精益生产和敏捷制造等生产模式的特点,兼备流水线的高效性、传统单元制造的灵活性以及精益生产的低成本,以应对多品种、中小批量,特别是变批量的生产方式^[4,6].在众多相关研究中,系统的构建问题是业界最为关注也是学界重点研究的问题^[10-12].本文研究集中于SPS构建过程中,考虑多能工技能组合可选择的技能配置问题.

从考虑技能差异的角度,可以将现有的SPS构建研究分为3类.第1类研究假定系统内工人掌握所有产品的全部工序,只是工作效率存在差异,即当工人操作工序超过一定数量时生产效率下降.Kaku等^[5]以最小化完工时间和工人总工作时间为目标,研究流水线装配向流水-单元混合(line-Seru hybrid)装配系统的转换问题.Yu等^[13-14]以最小化完工时间和工人总工作时间为目标,建立纯SPS构建的多目标优化模型,并开发启发式算法对问题求解.Sun等^[15]以最小化总延迟时间为目标建立SPS构建模型,并提出解决小规模问题的精确解.第2类研究同时考虑了工人技能组合的差异和工人技能水平的差异,但是将工人技能组合作为已知条件进行SPS的构建和工人分配.Lian等^[16]以优化Seru内和Seru间的工作平衡为目标建立SPS构建模型,并运用启发式算法求解.Yu等^[17]考虑工人技能差异,研究SPS中的工作平衡问题,分析问题解空间性质并提出了精确解的求解方法.Yilmaz^[18-19]考虑了工人可以在多个Seru间走动的情景,以最小化最大完工时间和工人间的工时差异为目标进行SPS构建研究.第3类研究考虑了工人技能组合的差异,并将工人的技能组合作为决策变量提出SPS构建方案.Liu等^[20]考虑培训成本,通过构建与产品类型一一对应的SPS,决策分配到每个Seru内的工人以及每名工人所具备的技能组合.Ying等^[21]以最小化培训成本为目标,研究Seru构建方案,并开发两阶段启发式算法对模型求解.Wu等^[22]通过任务数量、完成时间、技能水平和技能水平差异4个指标度量分割单元和巡回单元的差异,帮助从业者选择合

适的单元构成方式.Wang等^[23]考虑了基于技能水平支付报酬情景下的动态SPS构建问题.

现阶段只有较少研究同时考虑工人技能组合和技能水平的差异,且集中于优化工人之间的工时均衡以及Seru间的均衡,而未同时对最大完工时间进行优化.对于决策工人技能组合和分配方案的研究,同时优化最大完工时间和工人间工时均衡的研究更是少之又少.因此,本文围绕SPS的构建问题,考虑多技能工人的技能组合可选择因素和工人工作量公平性因素,建立了多目标优化模型,并利用多目标优化算法对模型进行求解.相对于现有的SPS构建问题研究,本文的主要创新和贡献为:1)在问题选择方面,构建SPS过程中进行工人分配方式优化的同时,考虑工人技能组合的可选择性,提升工人分配方式的多样化和灵活性;2)在模型构建方面,同时考虑优化生产时间和工人间的公平性,并建立以最小化最大完工时间和工人间工作均衡为目标的多目标优化模型;3)在求解过程中,针对决策变量的特殊性设计符合变量特征的染色体编码规则.

1 问题定义与描述

1.1 问题描述

本文考虑的是工人技能组合可选择的SPS构建问题,即在SPS构建过程中,决策构建Seru的数量,每个Seru内分配哪些工人,每名工人的技能组合,每个批次如何分配到Seru内,以及每名工人在Seru内生产不同类别产品时所负责的工序.如图1所示,左侧图形表示在流水线装配环境下,5名工人 $w_1 \sim w_5$ 和3种产品类型 P_1, P_2, P_3 与工序之间的对应关系,如工人 w_1 掌握工序 s_1 的操作,产品 P_1 的装配需要工序 $\{s_1, s_2, s_4, s_5\}$.图1右侧的虚线表示工人增加相应的技能,通过虚线技能的增加,形成工人新的技能组合.最终,构建3个Seru分别分配工人 w_1 和 w_5 至Seru₁,工人 w_2 至Seru₂,工人 w_3 和 w_4 至Seru₃,通过工人技能组合方案 $(w_1, \{s_1, s_2, s_3\})$, $(w_2, \{s_2, s_3, s_4\})$, $(w_3, \{s_1, s_3, s_5\})$, $(w_4, \{s_2, s_4\})$, $(w_5, \{s_4, s_5\})$,对不同产品类型的工序分工,如图2所示.

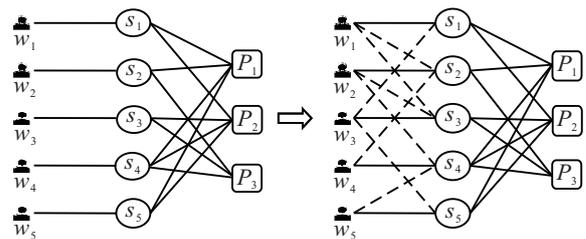


图1 工人、工序和产品之间的关系

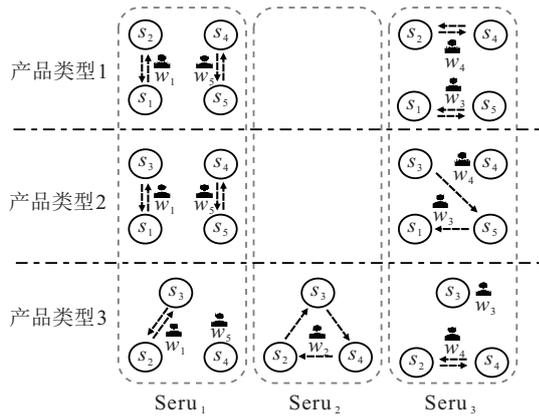


图2 算例的SPS构建方案

虽然工人掌握更多的技能可以丰富SPS的构建方案以及应变能力,但是当工人操作工序总数超过某一数值时,其工作效率会随着操作工序数的增加而降低^[13,24].与此同时,由于每名工人的能力差异,操作多个工序造成的效率影响也各不相同.因此,如何根据工人的差异性决策每名工人的技能组合以及工人到Seru的分配方案是本文主要解决的问题.

1.2 假设前提

基于本文的特征,提出以下假设:产品组合和需求已知,每个批次只有一种产品类型;每个产品类型的每个工序的标准加工时间已知且确定;批次不拆分,即单个批次中所有产品必须在同一个Seru内进行装配;每个Seru可以装配至少一种产品类型;每个工人只能分配在一个Seru中,不存在工人的跨Seru工作;全部待分配工人数与原装配流水线上的工序数相一致;同一Seru内工人的技能组合可以存在重叠,即同一工序可以有两名或两名以上工人可以操作;工人可以被分配一个或多个工序的操作;在加工同类型产品时,可以存在多名工人共同操作同一工序的情况出现;由于SPS的紧凑布局,工人在多个工序间的走动距离和时间忽略不计;不同单元内的员工数可以不同.

1.3 参数说明

1.3.1 索引

- i : 工人的索引号, $i = 1, 2, \dots, W$;
- j : Seru的索引号, $j = 1, 2, \dots, J$;
- s : 工序的索引号, $s = 1, 2, \dots, S$;
- n : 产品类型的索引号, $n = 1, 2, \dots, N$;
- m : 产品批次的索引号, $m = 1, 2, \dots, M$;
- k : 分到同一单元内产品批次的顺序, $k = 1, 2, \dots, M$.

1.3.2 参数变量

- t_{ns} : 产品类型 n 的工序 s 的标准加工时间;

ε_i : 工人 i 操作多道工序时的效率影响系数;

η_i : 工人 i 可以保持工作效率不变的最大工序数,即工人 i 的标准工序数;

C_i : 工人 i 由于承担工序数超过标准工序数而引起的工作时间影响系数;

SCP_n : 产品类型 n 的生产准备时间;

V_{mn} : 二进制变量,等于1表示第 m 批次的产品类型为 n ,否则等于0;

B_m : 第 m 批次的产品数量;

U_{is}^n : 二进制变量,等于1表示产品类型 n 的工序 s 分配给工人 i 且工人 i 承担工序数超过人均工序数,否则等于0.

1.3.3 决策变量

$$X_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{工人 } i \text{ 分配到 Seru } j; \\ 0, & \text{otherwise;} \end{cases}$$

$$Y_{is} = \begin{cases} 1, & \text{工人 } i \text{ 可以操作工序 } s; \\ 0, & \text{otherwise;} \end{cases}$$

$$Z_{mjk} = \begin{cases} 1, & \text{第 } m \text{ 批次以第 } k \text{ 个顺序分配到 Seru } j \\ & \text{内进行装配;} \\ 0, & \text{otherwise.} \end{cases}$$

1.4 数学模型

本文同时考虑了工人技能组合和技能水平的差异性.由于工人工作能力等方面的约束,当承担过多的工作内容时随着工作复杂性提升会产生工作效率下降、工作时间增加的情况^[13-14,25].因此,研究定义 C_i 为由工人承担工序数量的变化对工作时间的影 响.当工人 i 承担工序数不超过其标准工序数 η_i 时,对其工作时间无影响;当超过标准工序数 η_i 时,根据超出的工序数和效率影响系数共同影响其加工时间,具体表述为

$$C_i = 1 + \varepsilon_i \left(\sum_{s=1}^S Y_{is} - \eta_i \right)^+,$$

其中 $\left(\sum_{s=1}^S Y_{is} - \eta_i \right)^+ = \max \left\{ 0, \left(\sum_{s=1}^S Y_{is} - \eta_i \right) \right\}$.

当批次 m 分配给 Seru _{j} 时,根据工人所掌握的技能组合和技能水平的不同,将批次内产品的各道工序分配给 Seru _{j} 内的工人.为了保证工人间工作时间的均衡,对工序与工人的分配遵循如下原则:

- 1) 筛选出只能由单一工人完成装配的工序,并判断各工人所掌握工序是否超过人均工序数(产品类型的总工序数/Seru _{j} 内工人数),即该工人是否成为加工过程的瓶颈;

2) 如果工人负责工序超过平均工序,则分配工序至对应工人,并计算该工人的工作时间;

3) 去除已分配的工序和工人,重复进行步骤2)直至不存在瓶颈;

4) 按照剩余工人的工作系数等因素计算工人人们的平均工作时间.

基于以上分配规则,工人对批次的加工时间表述如下:

$$TW_{mi} = \begin{cases} \sum_{s=1}^S C_i t_{ns} B_m X_{ij} Y_{is} U_{is}^n, & i \mid \sum_{s=1}^S U_{is}^n \geq 1, \forall i; \\ \frac{\sum_{s=1}^S t_{ns} B_m (1 - U_{is}^n)}{\sum_{i=1}^W \frac{1}{C_i X_{ij} Y_{is}}}, & i \mid \sum_{s=1}^S U_{is}^n = 0, \forall i. \end{cases} \quad (1)$$

当批次 m 分配至 $Seru_j$ 时, $Seru_j$ 对批次 m 的加工时间为 $Seru$ 内工人的最大加工时间,即 $TS_{mj} = \max_i TW_{mi}$. 工人 i 的总工作时间为该工人对所有批次的总工作时间 $TW_i = \sum_{m=1}^M TW_{mi}$. 因此,批次 m 的加工时间可以表述为其在所分配的 $Seru$ 内的最大完工时间,即

$$T_m = \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^M TS_{mj} Z_{mjk}. \quad (2)$$

生产准备时间,或称为换产时间,是指在对产品进行生产加工之前要对生产环境和设备进行设置的时间^[26]. 当同一个 $Seru$ 内前后生产的两个批次属于不同的产品类型时,就存在生产准备时间,批次 m 的生产准备时间为

$$ST_m = \sum_{n=1}^N SCP_n V_{mn} \left(1 - \sum_{m'=1}^M V_{m'n} Z_{m'j(k-1)}\right), \quad (j, k) \mid Z_{mjk} = 1, \forall j, k. \quad (3)$$

当批次 m 是 $Seru$ 内分配的第 1 个批次时,开始加工时间,否则批次的开始加工时间为分配到同一 $Seru$ 内的上一批次的完工时间,即

$$BT_m = \sum_{l=1}^{m-1} \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^m (T_l + ST_l) Z_{mjk} Z_{l_j(k-1)}. \quad (4)$$

本模型目标为最小化最大完工时间和最小化工人间的工作时间差异,各批次与 $Seru$ 之间的分配采用先到先服务的调度规则,具体表述如下:

$$f_1 = \min_m \{\max(BT_m + ST_m + T_m)\}; \quad (5)$$

$$f_2 = \min \frac{1}{W} \sum_{i=1}^W (TW_i - \overline{TW_i})^2; \quad (6)$$

$$1 \leq \sum_{i=1}^W X_{ij} \leq W, \forall j; \quad (7)$$

$$\sum_{j=1}^J X_{ij} = 1, \forall i; \quad (8)$$

$$\sum_{s=1}^S Y_{is} \geq 1, \forall i; \quad (9)$$

$$\sum_{n=1}^N \prod_{s=1}^S \Pr \left(\sum_{i=1}^W t_{ns} X_{ij} Y_{is} \geq t_{ns} \right) \geq 0, \forall j; \quad (10)$$

$$\sum_{j=1}^J \prod_{s=1}^S \Pr \left(\sum_{i=1}^W t_{ns} X_{ij} Y_{is} \geq t_{ns} \right) \geq 0, \forall n; \quad (11)$$

$$\sum_{m=1}^M \sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^N \sum_{i=1}^W t_{ns} V_{mn} X_{ij} Y_{is} Z_{mjk} \geq \sum_{m=1}^M \sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^N t_{ns} V_{mn} Z_{mjk}, \forall j, s; \quad (12)$$

$$U_{msi} \leq Y_{is} B_m, \forall i, m, s; \quad (13)$$

$$\sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^M Z_{mjk} = 1, \forall m; \quad (14)$$

$$\sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^M Z_{mjk} \leq \sum_{j'=1}^J \sum_{k'=1}^M Z_{(m-1)j'k'}, m = 2, 3, \dots, M. \quad (15)$$

目标函数(5)和(6)分别代表最小化最大完工时间和工人工作时间的整体方差;约束(7)确保每个 $Seru$ 内最少分配一个工人,最多不超过工人总数;约束(8)确保所有工人都要分配到 SPS 内且只能分配到一个 $Seru$ 中,即工人不存在跨 $Seru$ 生产;约束(9)确保每名工人掌握至少一个工序的操作;约束(10)确保每个 $Seru$ 至少可以完成一个产品类型的生产;约束(11)确保每种产品类型至少可以由一个 $Seru$ 进行加工;约束(12)确保每个批次只能分配到具备该批次产品类型生产能力的 $Seru$;约束(13)确保每个批次的每个工序都只能分配给具备该工序生产能力的工人;约束(14)确保每个批次只能分配到一个 $Seru$ 内,即批次不拆分;约束(15)确保批次按序分配.

2 求解算法

本文所提出的模型对于各产品批次的调度采用先到先服务方式进行. 基于先到先服务的 SPS 构建问题在文献中已证实是 NP -hard 问题,无法在多项式时间内求得精确解^[13]. 本模型在该问题基础上增加

了工人技能组合可选择变量,增加了问题的复杂度,因此本文所提出的模型也是NP-hard问题.针对多目标优化问题,一般分为转化为单目标问题和求解帕累托前沿(Pareto front)两种方式进行求解.其中转化为单目标问题的方法主要有目标加权法(objective weighting),距离方程法(distance functions)和最小化最大值法(min-max formulation)^[27].此类方法可以降低问题的求解难度,且可以保证所求得解是原问题的最优解,但也存在一些问题.例如最终解为单一解,令决策者缺少了选择的空間;在多目标向单目标问题转换过程中的系数和方法的选择方面需要研究者具备非常丰富的先验知识;问题的最优解对所选择系数过分依赖,当解空间较为复杂时,可能无法求得最优解等.因此,学者在求解多目标优化问题时,更多选择启发式多目标优化算法求解帕累托前沿,在避免经验因素对求解精确度影响的同时,也为管理实践者提供更多的策略选择.

为求解多目标问题,学者们先后提出了有效的启发式算法,例如强帕累托演化算法(strength Pareto evolutionary algorithm-II, SPEA-II)^[28],带精英策略的非支配排序遗传算法(elitist non-dominated sorting genetic algorithm, NSGA-II)^[29],基于帕累托包络的选择算法(Pareto envelope-based selection algorithm, PESA)^[30]等.其中NSGA-II算法是影响最大和应用最广的一种多目标启发式算法,其主要优点有:1)快速非支配排序法降低了计算复杂度;2)选用精英选择策略,可迅速提高种群优越性;3)通过拥挤距离作为比较准则,不仅免去了人为选择参数的缺陷,而且保证了种群的多样性.因此NSGA-II算法为目前公认的求解多目标优化问题的最具优势的启发式算法.针对本模型的多目标特征以及解空间的特性,本文将采用改进的NSGA-II算法求解.

2.1 染色体编码与解码

本文根据同时决策工人技能组合和工人与Seru间分配的特点,设计混合染色体编码结构.染色体为 W 行 $S+1$ 列的矩阵,每一行代表对应序号的工人所在的Seru编码和所掌握的技能组合.其中第1列每个基因位为Seru编号,表示工人与Seru的分配结果.第2列至第 $S+1$ 列的基因位为0-1编码,分别表示每名工人对 $1\sim S$ 工序的技能掌握情况,1代表工人可以操作该工序,0则相反.以5名工人和5个操作工序的SPS构建方案为例,染色体编码如图3所示.染色体中每一行代表一名工人,工人索引与行索引一致.根据染色体编码规则可以得出5名工人共组成了4个

Seru,其中工人2和工人5分配到第1个Seru,工人1分配到第2个Seru,没有工人分配到第3个Seru,工人3和工人4分配到第4个Seru;工人1掌握工序1,2,3和工人5的操作技能,工人2掌握工序1,2,5的操作技能,依此类推.

Seru	1	2	3	4	5
2	1	1	1	0	1
1	1	1	0	0	1
4	1	0	1	1	1
4	0	1	0	1	1
1	1	0	0	0	1

图3 5名工人、5个操作工序的染色体编码

2.2 初始种群的生成

初始种群的个体创建分为3个步骤:1)随机生成 W 行 $S+1$ 列的矩阵,并随机分配第1列为不大于 J 的Seru编号;2)矩阵的第 $2\sim S+1$ 列随机赋值0或1;3)矩阵所有第 i 行第 $i+1$ 个元素赋值为1.通过以上操作确保工人随机分配到 J 个Seru内,因为随机数的产生规则会导致某些 $1\sim J$ 的数字不会产生.当存在 $1\sim J$ 的Seru编号未出现时即表示没有工人分配到该Seru中,在Seru的总量中去掉相应的数量.如图3所示,虽然第1列出现Seru编号4,但是因缺少编号3,系统中只构建了3个Seru.同时,在每个工人得到随机的初始技能集时,通过步骤3)的操作可以确保工人具备原有流水线上对应工序的操作技能,与问题的假设前提相一致.

2.3 迭代规则

根据NSGA-II的个体选择方法,对每一代个体种群进行非支配排序以及拥挤距离的计算^[29].通过引入精英策略的非支配排序,快速获得种群内个体的占优级别,占优级别越高优先级越高.在此基础上,对同一级别的个体进行拥挤距离的计算,拥挤距离较大的解被赋予更高的优先级.通过两步操作,将种群内的个体进行排序并选出符合种群规模数量的个体作为父代种群.

在迭代过程,主要目的是通过遗传算法的操作实现物理层面SPS的构建方案的改进,即工人与Seru的分配方案和工人的技能集选择.根据个体编码以及问题的特点,交叉运算选择单点交叉法.交叉过程如图4所示,随机选择交叉点为第2行第4列元素,以该点为基准将个体矩阵分为4个象限进行交叉运算,子代个体1继承父代个体1的第2、第4象限元素和父代个体2的第1、第3象限元素,子代个体2继承父代个体1的第1、第3象限元素和父代个体2的第2、第4象限元素.交叉运算的物理意义为改变部分工人与Seru的分配关系,以及全部工人的技能组合.变异运

算步骤如下: 1) 对选定个体的第1列进行Seru编码的重新赋值; 2) 随机选择一组工人编码, 在矩阵的对应对应行, 对第2~第S列进行重新赋值; 3) 矩阵所有第*i*行第*i*+1个元素赋值为1. 变异运算的物理意义是对工人与Seru的分配关系重新调整, 以及随机选择一组工人进行技能组合的重新选择.

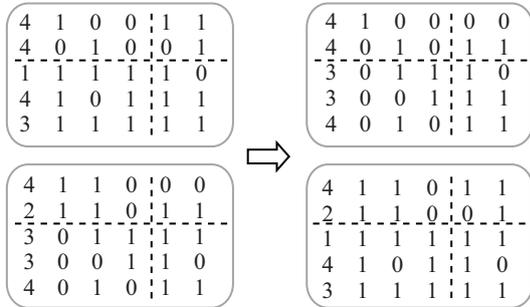


图4 交叉运算举例

2.4 解的可行性校验

按照给定的初始种群生成规则和迭代规则, 所产生的个体种群可以满足模型的约束(7)~(9), 但是初始种群和遗传操作后的子代种群中, 仍有个体无法满足约束(10)和(11), 即每个Seru可以完成至少一种产品类型的装配和每种产品类型至少可以由一个Seru进行装配. 对于不满足约束(10)的个体调整规则如下: 对于无法完成至少一种产品类型加工的Seru, 随机增加一个其不具备的工序技能, 直至该Seru可以完成至少一种产品类型的装配; 将所增加的技能随机增加给Seru内的工人. 对于不满足约束(11)的个体调整规则如下: 对于无法加工的产品类型, 将其随机分配到一个Seru中; 找出Seru装配该产品类型所缺少的工序技能, 并将技能随机分配到Seru内的工人.

2.5 算法步骤

根据本文提出的模型以及编码特征, 改进的NSGA-II算法具体操作步骤如下:

- step 1: 根据编码规则随机生成规模为*N*的初始种群*P*₀并进行可行性校验, 将*P*₀进行非支配排序;
- step 2: 通过迭代运算, 产生规模为*N*的后代种群*Q*₀并进行可行性校验;
- step 3: 将*P*₀和*Q*₀合并为规模为2*N*的种群*P*₀∪*Q*₀;
- step 4: 将*P*₀∪*Q*₀筛选后进行非支配排序, 按序选择最优的*N*个个体作为新的父代种群*P*₁;
- step 5: 重复step 2~step 4, 直至到达最大迭代次数;
- step 6: 得到最终非支配排序解.

3 算例分析

为了检验所提出模型和算法的有效性, 本文在2.1 GHz, Intel (R) Core (TM) i5-1021CPU, 8GRAM的PC上采用Matlab环境开展数据实验. 实验过程和结果分析如下.

3.1 基础算例

基础实验假设有10名工人负责完成由5种产品类型组成的30个批次的生产任务, 批次的顺序、产品类型和产品数量如表1所示. 假设装配过程共有10个工序, 在不影响工作效率情况下, 工人可承担的最大工序数为5, 当承担工序数超过5时产生效率影响. 为了方便计算, 效率影响系数ε_{*i*}按照*N*(0.2, 0.05)的方式取值^[17]. 5种产品类型的标准工作时间如表2所示. 应用NSGA-II算法过程中, 定义种群规模为100, 交叉概率0.8, 变异概率0.2, 最大迭代次数为100.

表1 产品批次信息

批次	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
产品类型	3	5	3	4	1	4	1	2	2	3
产品数量	55	53	54	49	49	55	54	48	48	48

批次	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
产品类型	2	4	3	4	5	5	1	4	2	5
产品数量	46	58	48	52	48	51	54	57	54	49

批次	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
产品类型	1	3	4	5	2	3	1	4	2	3
产品数量	53	46	45	46	45	44	53	47	53	52

表2 各产品类型的标准工作时间 min

产品类型	1	2	3	4	5
工序1	1.81	1.91	2.04	2.03	1.99
工序2	1.83	2	2.17	2.08	2.08
工序3	1.85	1.97	0	0	1.95
工序4	1.9	1.91	2.15	2.03	1.95
工序5	1.92	1.92	2.01	2.05	2.03
工序6	1.91	1.96	2.12	2.01	0
工序7	1.99	0	2.18	0	1.99
工序8	1.92	1.98	0	2.09	2.02
工序9	0	1.98	2.12	2.07	2.01
工序10	1.87	1.91	2.03	2.04	2.02

为了验证算法的有效性, 本文首先通过小规模算例来对比本文所提出算法和枚举法的求解结果. 选择工人数和工序数为4, 其他信息不变. 4名工人可能的单元构建方案数为4⁴ = 256, 可能的技能组合数为(2³)⁴ = 4096, 因此解空间为256 × 4096 = 1048 576. 通过枚举法求得所有可行解的帕累托前沿与本文提出的基于NSGA-II的启发式算法进行比较, 在求得相同的帕累托前沿基础上, 本文提出的算法与

枚举法的求解时间分别为15.41 s和98.93 s. 这表明该算法可以求得与枚举法相同的帕累托前沿, 并且求解时间更短、效率更高. 当求解问题更为复杂时, 由于解空间呈指数增长, 启发式算法的求解速度更具优势.

基于以上算例, 通过运行算法10次选最优结果的方式求得最终种群如表3所示. 其中以非支配解3为例, 其Seru构建方案为共构建两个Seru, 两个Seru中分别包含5名工人, 第1个Seru内工人技能组合方案为: $w_1\{s_1, s_4, s_5, s_7, s_{10}\}$, $w_2\{s_2, s_3, s_4, s_5, s_7, s_8, s_9, s_{10}\}$, $w_6\{s_1, s_2, s_4, s_6, s_9\}$, $w_7\{s_1, s_2, s_3, s_4, s_5, s_7, s_8, s_9, s_{10}\}$, $w_{10}\{s_1, s_3, s_7, s_9, s_{10}\}$. 第2个Seru内工人技能组合方案为: $w_3\{s_1, s_2, s_8, s_9, s_{10}\}$, $w_4\{s_3, s_4, s_8, s_9, s_{10}\}$, $w_5\{s_1, s_3, s_4, s_5, s_{10}\}$, $w_8\{s_4, s_6, s_7, s_8, s_9, s_{10}\}$, $w_9\{s_1, s_2, s_6, s_9, s_{10}\}$. 在该构建方案下, 两个Seru分别可以完成全部产品类型的加工. 其中工人最多掌握工序数为9, 最少为5, 人均掌握工序数为5.8.

表3 基础算例的帕累托前沿

非支配解	最大完工时间	工人工作时间的方差
1	2 809.732	59.078
2	2 834.954	16.486
3	2 871.078	0.298
4	2 922.739	0.199
5	2 950.665	0.042
6	3 044.216	0

3.2 工人技能水平差异的影响

为了验证工人技能相关参数对系统构建方案的影响, 基于基础算例, 扩展工人技能掌握程度至以下几种情况: 1) 工人标准工序数 η_i 的大小不同; 2) 所有工人的效率影响系数 ε_i 相同; 3) 效率影响系数 ε_i 的取值范围不同. 针对以上3种情况, 以10组算例作为测试对象, 分别对比各算例帕累托前沿的平均最大完工时间(f_1)、平均工人工作时间差异(f_2)、工人平均掌握工序数(NT)和平均构建Seru数(NS)4个指标. 10组算例的生成规则参考基础算例, 包括5种产品类型的30个批次. 批次内的产品类型随机产生, 产品数量取值范围为[45, 50]. 每种产品类型的各工序加工时间取值范围为[1.8, 2.2], 并随机选择1或2个工序为空闲工序, 即加工时间为0.

图5对比了各算例在 η_i 分别取值2、5、8时的帕累托前沿. 如图5所示, f_1 和 f_2 随 η_i 的增加而减少, NT和NS随之而增加. 值得一提的是, 在 η_i 取值为8时, 全部算例的NT均未超过8. 而取值为2和5时, 全部算例的NT都超过了 η_i , 且均在5左右, 即使在算例8中只有一个Seru的特殊情况下, NT也达到4.2. 说明

工人掌握技能数的增加虽然会引起加工时间的增加, 但同时可以增加工序分配的多样性, 从而降低总完工时间. 对于企业而言, 为了提升系统的生产效率可以选择技能水平较好(掌握多重工序效率不会显著降低)的工人, 但随之而来的构建单元数量也随之上升, 因此当单元构建的固定成本较高时要均衡考虑效率和成本.

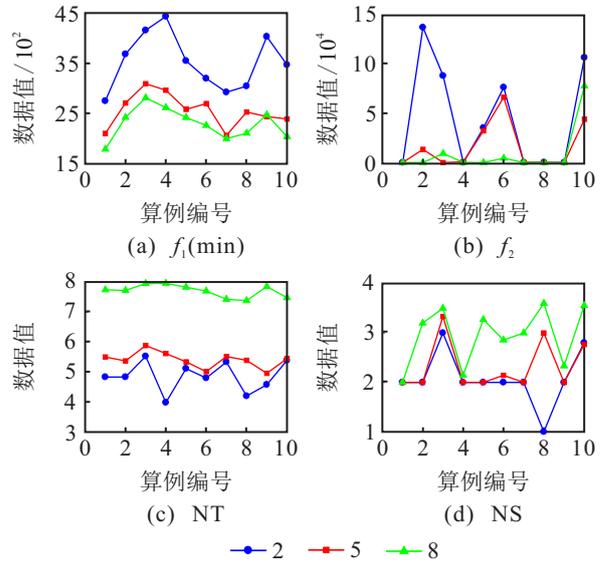


图5 η_i 不同取值的帕累托前沿对比

图6对比了工人是否具备同样的工人效率系数 ε_i 的帕累托前沿, 横轴表示算例编码, 纵轴表示各指标. 其中 ε_i 相同的一组实验选取 ε_i 值为基础实验组所有工人的均值, 即 $\varepsilon_i = 0.198$. 在两种情况下, f_1 和NT都未出现明显变化趋势, 而 f_2 和NS在 ε_i 值相同的情况下数值更高. 为了验证工人效率系数 ε_i 的波动范围对结果的影响, 分别以 $\varepsilon_i \in [1.6, 2.4]$, $\varepsilon_i \in [1.4, 2.6]$ 与基础实验 $\varepsilon_i \in [1.8, 2.2]$ 的帕累托前沿作

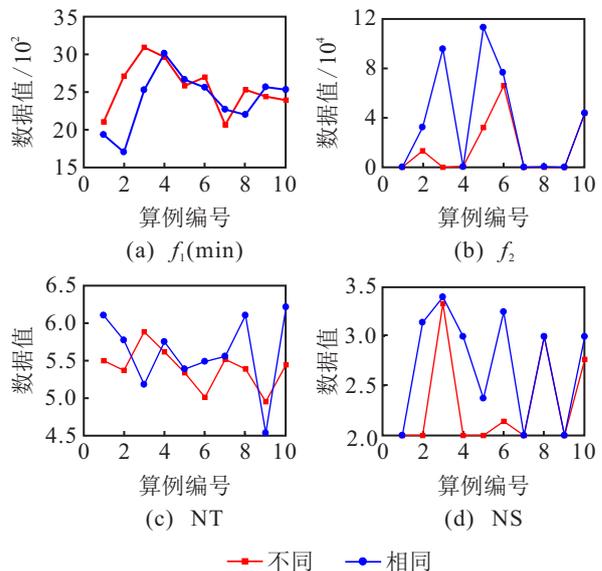


图6 工人效率系数 ε_i 取值是否相同的帕累托前沿对比

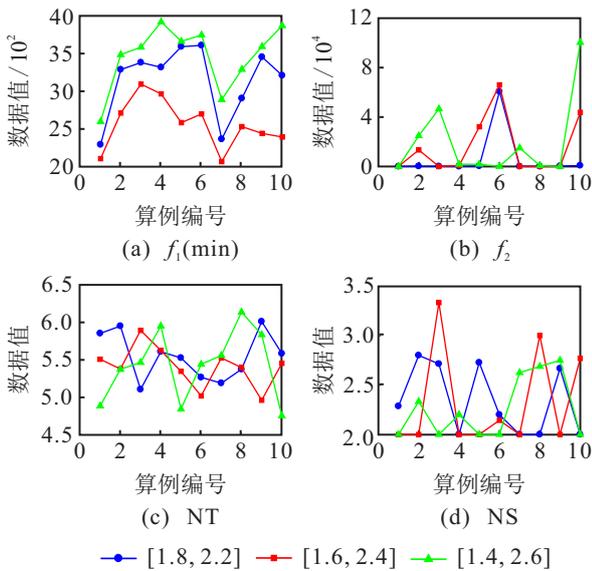


图7 不同工人效率系数 ε_i 取值范围的帕累托前沿对比

对比,如图7所示.结果表明,随着 ε_i 的波动范围增大, f_1 也随之增加,其他指标未见明显增减规律.由于工人受技能增加的效率影响范围更大,导致最大完工时间增加,企业在构建SPS时,应倾向于选用工作效率稳定的工人,将能力水平相近的工人进行组合会收获更好的生产效率和工人工作时间的均衡性.

4 结论

本文研究了SPS构建的多能工配置问题,同时考虑工人技能水平差异和技能组合的可选择因素,建立了以最小化最大完工时间和工人间工作时间均衡为目标的多目标模型,开发并应用了基于NSGA-II的启发式算法对模型进行求解.通过数值试验对比发现:

1) 当标准工序值提升时,工人间工作时间的均衡性也随之提升,但是即使标准工序定义为较低水平时,工人掌握平均工序数也不会很低;

2) 工人工作效率系数相同时会增加工人间工作时间的不均衡性;

3) 随着工人工作效率系数波动范围的增大,最大完工时间增加.

根据实验结果,对于生产多品种中小批量的企业应用SPS可以有效地提升生产效率.在应用过程中,正确地选择工人技能组合和充分考虑工人的技能水平差异可以有效地提升系统的生产效率.建议生产企业在应用SPS时,应对技能水平高和技能水平稳定的工人予以优先考虑,且在分配工人的过程中将效率水平相近的工人分配到同一Seru中.本文主要研究了在固定需求下考虑工人技能可选择的SPS多能工配置研究,进一步研究可以考虑在非确定需求场景下的多能工配置问题.

参考文献(References)

- [1] Roth A, Singhal J, Singhal K, et al. Knowledge creation and dissemination in operations and supply chain management[J]. *Production and Operations Management*, 2016, 25(9): 1473-1488.
- [2] 赵姗. 深挖工业数据价值打造创新发展新引擎[N]. *中国经济时报*, 2020-10-27(4).
(Zhao S. Digging the value of industrial data to create a new engine of innovation and development[N]. *China Economic Times*, 2020-10-27(4).)
- [3] 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.
- [4] Yin Y, Kaku I, Stecke K E. The evolution of seru production systems throughout Canon[J]. *Operations Management Education Review*, 2008, 2: 27-40.
- [5] Kaku I, Murase Y, Yin Y. A study on human-task-related performances in converting conveyor assembly line to cellular manufacturing[J]. *European J of Industrial Engineering*, 2008, 2(1): 17.
- [6] Stecke K E, Yin Y, Kaku I, et al. Seru[J]. *International Journal of Strategic Decision Sciences*, 2012, 3(1): 106-119.
- [7] 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.
(Bai Z Y, Wang H, He L. Joint decision model of Seru production system balancing considering lot-splitting[J]. *Control and Decision*, 2021, 36(10): 2517-2527.)
- [8] Sun W, Yu Y, Lou Q, et al. Reducing the total tardiness by Seru production: Model, exact and cooperative coevolution solutions[J]. *International Journal of Production Research*, 2020, 58(21): 6441-6452.
- [9] 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.
(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.)
- [10] 任玉红, 唐加福, 肖争喜, 等. LINE-SERU转化的评价分析——以某医疗制造企业实施SERU为例[J]. *系统工程理论与实践*, 2021, 41(2): 442-454.
(Ren Y H, Tang J F, Xiao Z X, et al. Evaluation and analysis of LINE-SERU conversion—Taking the implementation of SERU in a medical manufacturing enterprise for example[J]. *System Engineering—Theory & Practice*, 2021, 41(2): 442-454.)
- [11] 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.)

- [12] 湛荣鑫, 李冬妮, 马涛, 等. 面向快速响应的赛汝生产系统构建模型与方法[J]. 自动化学报, DOI: 10.16383/j.aas.c190731.
(Zhan R X, Li D N, Ma T, et al. Configuration model and approach of a Seru production system for quick response[J]. Acta Automatica Sinica, DOI: 10.16383/j.aas.c190731.)
- [13] 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.
- [14] Yu Y, Tang J F, Sun W, et al. Combining local search into non-dominated sorting for multi-objective line-cell conversion problem[J]. International Journal of Computer Integrated Manufacturing, 2013, 26(4): 316-326.
- [15] Sun W, Li Q Q, Huo C H, et al. Formulations, features of solution space, and algorithms for line-pure Seru system conversion[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2016, 2016: 1-14.
- [16] Lian J, Liu C G, Li W J, et al. A multi-skilled worker assignment problem in seru production systems considering the worker heterogeneity[J]. Computers & Industrial Engineering, 2018, 118: 366-382.
- [17] 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.
- [18] Yilmaz Ö F. Operational strategies for seru production system: A bi-objective optimisation model and solution methods[J]. International Journal of Production Research, 2020, 58(11): 3195-3219.
- [19] Yilmaz Ö F. Attaining flexibility in seru production system by means of Shojinka: An optimization model and solution approaches[J]. Computers & Operations Research, 2020, 119: 104917.
- [20] 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.
- [21] Ying K C, Tsai Y J. Minimising total cost for training and assigning multiskilled workers in seru production systems[J]. International Journal of Production Research, 2017, 55(10): 2978-2989.
- [22] Wu L, Chan F T S, Niu B, et al. Cross-trained worker assignment and comparative analysis on throughput of divisional and rotating seru[J]. Industrial Management & Data Systems, 2018, 118(5): 1114-1136.
- [23] 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.
- [24] Kaku I, Gong J, Tang J. A mathematical model for converting conveyor assembly line to cellular manufacturing[J]. International Journal of Industrial Engineering and Management Science, 2008, 7(2): 160-170.
- [25] 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.)
- [26] 杨喜娟, 黎锁平, 彭铎, 等. 考虑缓冲区故障的多产品生产系统的性能分析[J]. 控制与决策, 2019, 34(4): 699-708.
(Yang X J, Li S P, Peng D, et al. Performance analysis of multi-product manufacturing system with buffer breakdown[J]. Control and Decision, 2019, 34(4): 699-708.)
- [27] Srinivas N, Deb K. Multiobjective optimization using nondominated sorting in genetic algorithms[J]. Evolutionary Computation, 1994, 2(3): 221-248.
- [28] Zitzler E, Laumanns M, Thiele L. SPEA2: Improving the strength pareto evolutionary algorithm[C]. Proceeding of Evolutionary Methods for Design Optimization and Control With Applications to Industrial Problems. Athens, 2002: 95-100.
- [29] Deb K, Pratap A, Agarwal S, et al. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2002, 6(2): 182-197.
- [30] Corne D W, Knowles J D, Oates M J. The Pareto envelope-based selection algorithm for multiobjective optimization[C]. Parallel Problem Solving from Nature PPSN VI. Berlin, Heidelberg: Springer, 2000: 839-848.

作者简介

王晔(1988—), 女, 讲师, 博士, 从事制造与服务系统优化的研究, E-mail: wangye77@foxmail.com;

任玉红(1990—), 女, 博士生, 从事生产运作管理的研究, E-mail: 78465346@qq.com;

唐加福(1965—), 男, 教授, 博士生导师, 从事制造系统生产与物流运作管理、服务系统优化等研究, E-mail: jftang@mail.neu.edu.cn.

(责任编辑: 孙艺红)