

考虑员工合作关系的单元装配系统构建方法

王 晔, 唐加福[†]

(东北财经大学 管理科学与工程学院, 辽宁 大连 116025)

摘 要: 针对流水线装配向单元装配转换的基本问题, 考虑员工之间的合作关系, 以最小化总装配周期和最小化员工总工作时间为目标, 建立流水装配线向单元装配系统转换的多目标优化模型. 针对模型的特征, 采用基于 NSGA-II 的多目标优化算法进行求解. 通过数值实验证明考虑员工合作关系的必要性, 并分析员工合作系数的均值和方差的变化对单元系统构建的组成和性能的影响. 结果表明, 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.

关键词: 流水单元转换; 单元装配系统; 多目标模型; NSGA-II; 员工合作

中图分类号: N945.12

文献标志码: A

Seru production system formation considering cooperation of workers

WANG Ye, TANG Jia-fu[†]

(College of Management Science and Engineering, Dongbei University of Finance and Economics, Dalian 116025, China)

Abstract: Considering cooperation of workers, this paper develops a multi-objective optimization model of a line-Seru conversion problem to minimize the make span (MS) and the total labor hours (TLH), and applies the NSGA-II-based algorithm to solve the model. Numerical experiments are conducted to testify the necessity of considering cooperation relations. At the same time, this paper evaluates how the variation of the mean and variance of cooperation coefficient influence the system performance. The results show that the performance of line-Seru conversion is improved by the higher mean value and higher variance of cooperation coefficients.

Keywords: line-Seru conversion; Seru production system; multi-objective model; NSGA-II; cooperation of workers

0 引 言

随着经济水平的提升,市场环境发生了颠覆性的转变. 消费者对于产品的需求由传统的单一化转化为个性化、多样化,特别是在以手机、相机、电脑等数码产品为代表的高新技术产品市场中表现更为明显^[1-2]. 面对如此严峻的行业现状,制造企业在准确捕捉最新市场需求和技术创新的同时,必须根据自身的条件调整生产方式,以最大可能地响应市场多变的需求、降低生产成本,以求在激烈的竞争环境下得以生存. 在应对需求市场变化的过程中,先后出现了以“科学管理之父”泰勒为代表的科学管理理论^[3]、亨利·福特的流水线式装配系统^[4](大规模生产, mass production)、丰田公司的丰田制造模式^[5](Toyota production system, TPS)或称为精益生产(lean production)、柔性制造^[6]、敏捷制造等^[7].

在生产模式的不断改进过程中,针对日本市场

在经济泡沫破灭后整体需求不景气的现实状况,日本式单元制造模式(Seru production system, SPS)应运而生,并在日本电子装配业得到了广泛的应用,例如佳能、索尼等^[1,8]. 这里 Seru 是英文单词 cell 的日语发音,区别于英文中 cell 单元的含义,它是为完成一个或多个产品的组装而由一些设备和一个或多个员工构成的一个装配单元. 日本式单元制造模式的主要实现形式是取消原有的传送带,以装配单元取代,即流水线向单元装配转换(简称流水-单元转换). 与传统的单元制造(cellular manufacturing)^[9]的本质区别是 Seru 特指装配单元、人员是多能工、设备精细化、面向产品(product-oriented)而非功能单元(function layout)^[1-2,10].

日本式单元制造模式自上世纪 90 年代被索尼、佳能等公司提出并应用以来,已经获得了业界的广泛肯定. 在降低厂房面积、产品库存、提前期、生产

收稿日期: 2018-04-26; 修回日期: 2018-08-27.

基金项目: 国家自然科学基金项目(7141001024).

责任编辑: 刘民.

[†]通讯作者. E-mail: jftang@mail.neu.edu.cn.

成本,提升产品质量、产品利润和市场变换应对能力等方面,实施日本式单元制造的企业都显示了较高的成效^[1,11]. 国内外的学者也针对这一生产模式做了较多的研究. 在日本式单元制造的应用状况和发展过程方面, Yin等^[11]通过对企业的调研和文献的汇总指出,日本式单元制造是一种精益生产方式的延伸,它是综合了精益制造、敏捷制造、绿色制造等先进制造思想的生产模式. 在日本式单元制造对制造企业带来收益的原理和应用过程方面, Kaku等^[12-13]提出了流水线装配向流水-单元混合装配转换的方式和机理,通过构建最小化总生产周期和最小化员工操作时间的优化模型,从数学建模的角度来构建和求解流水线装配向流水-单元混合装配转换的最优方式. 在此基础上, Yu等^[14-15]丰富了 Kaku的数学模型,在不增加总生产周期的前提下减少参与生产的员工数量的模型,并通过数值实验得到证实,可以通过流水线向纯单元装配的转换来减少员工数量以降低生产成本的作用. 另外, Liu等^[16]针对流水线装配向流水-单元混合装配转换过程,提出了最小化总生产周期的模型,并通过数值实验验证了其可行性和优越性. 与此同时,针对日本式单元制造实施的重要基础多能工交叉培训方面, Liu等^[17]和 Ying等^[18]构建了最小化员工培训成本和最小化装配单元内员工工作能力差异的数学模型,通过得到最优化的员工培训方案和员工分配方案,确保日本式单元制造的实施.

虽然在流水-单元转换问题方面已经有很多研究,但是有关员工间合作的问题却鲜有提及. 在有关 Seru(后文中以单元代替)的定义中可以得知,日本式单元制造的实施基础是降低设备成本,强调多能工和创新型员工的能力提升. 在员工的工作过程中,交叉培训、员工之间的交流与互相帮助都是顺利实施日本式单元制造必不可少的前提^[2,11]. 因此,在实际的生产管理过程中,将员工之间的合作关系考虑到单元的构建和员工分配问题中,是具有理论依据和现实意义的. 员工在具有经济人属性的同时还具备社会人的属性,在工作过程中需要情感交流和同事间的认可. 员工间良好的合作关系和默契有利于工作态度和工作效率的提升^[19]. 在日常工作中,如果工作对象彼此合作默契,自然生产效率较高,相反则会效率低下甚至互相埋怨,工作满意度低. 尤其在日本式单元制造系统中,员工间的合作更为密切,交流也更广泛,甚至需要相互学习和帮忙. Yu等^[15]通过实验表明,将工作能力相近的员工安排在同一个单元中将对系统整体生产效率产生积极的影响. 因此,在构建日本式单元制造系统时,考虑员工之间的合作关系差异,

可以在提升整体生产效率的同时,避免因为员工之间的情感或者能力差异而产生的合作冲突,导致员工满意程度的下降.

针对现有研究在这一领域的不足,本文讨论多品种小批量的产品需求下,考虑员工间合作关系的流水-单元转换问题. 以最小化总装配周期和最小化员工操作时间为目标,决策单元装配系统中的单元数量,每个单元内的员工组合以及产品批次与装配单元间的分配方案. 相对于现有的流水-单元转换问题,本文的创新点在于考虑员工合作关系进行单元系统构建,并且分析了不同合作关系环境下调整员工的组合关系对系统性能的影响. 在更贴近管理现实的同时,丰富了该领域的理论研究. 针对模型的特点,运用基于 NSGA-II 的算法进行求解,通过数值算例与现有的单元装配系统构建方案进行对比,说明考虑员工合作关系的必要性. 在此基础上,分析员工合作系数的均值和方差的变化对目标函数的影响. 数值实验表明,总体合作关系强,且合作系数差异较大时,更有助于日本式单元装配系统性能的提升.

1 问题描述和模型建立

1.1 问题描述

本文描述了一个由流水装配线转化为日本式单元装配系统(以下简称 SPS)的问题,将原有流水线上的所有单工序员工交叉培训为多能工后分配到 SPS 中. 根据装配产品的不同和员工之间合作默契程度的不同,员工将会通过相应的组合分配到不同的单元中. 在 SPS 中,基本单位单元分为3种:分割式单元(divisional Seru)、巡回式单元(rotating Seru)以及单人单元(Yatai)^[2]. 分割式单元是指一个单元内的工序任务被分割成几个部分,每个分配到该单元的员工只完成其中的一个部分的工序. 单人单元顾名思义是指每个单元内只有一个员工的 SPS,但由于设备限制等原因,通常很难达到. 本文所研究 SPS 的构建对象是巡回式单元,即每个单元由一个或多个员工组成,每个员工可以完成产品装配的全部工序,以巡回的方式在单元内进行作业,并且所有的单元均可以完成全部类别产品的生产. 在员工分配的过程中可能会遇到某个单元只有一名员工的情况,但这只是巡回式单元的一种特殊情况,因此不能归为单人单元系统.

索尼公司通过 SPS 的应用使总装配时间降低了 53%,佳能公司也在应用日本式单元制造系统中减少了 25% 的劳动力^[11]. 总装配周期的缩短可以直接缩短产品的交货期,提升企业的竞争力,因此缩短交货期成为企业界和学者的主要关注点,也有学者称其为订货提前期. 因此,本文基于 Yu等^[14]在 2012 年提出

的流水-单元转化模型,以最小化总装配周期和最小化员工总工作时间为目标,针对考虑员工间合作关系的流水-单元转换问题构建模型. 主要决策根据生产任务构建SPS的方案,具体决策单元装配系统中的单元数量,每个单元内的员工组合以及产品批次与装配单元间的分配方案.

员工与员工之间的合作关系不同将对其工作的热情和效率有所影响. 作为以人为核心的SPS,员工工作效率将直接影响系统的性能. 在部分员工之间合作可以提升工作效率与热情的同时,也存在另一部分员工由于相互合作导致工作效率和热情的降低^[19], 本文将以系数 α_{il} 来表示员工*i*与员工*l*之间的合作关系. 员工合作过程中,合作关系存在以下3种情况: $\alpha_{il} > 0$,表示员工*i*与员工*l*之间的合作存在使生产效率上升的关系; $\alpha_{il} = 0$,表示员工*i*与员工*l*之间的合作不会对生产效率产生影响; $\alpha_{il} < 0$,表示员工*i*与员工*l*之间的合作存在使生产效率下降的关系. 两名员工合作时,合作系数即为 α_{il} ,多人合作的情景下,采用取平均数的方式定义单个单元内的员工之间的合作系数,在下文中进行详细介绍. 在调度规则方面,SPS中生产的各批次按照先到先服务(first come first service, FCFS)的方式进行调度分配,即每个批次到达生产系统后会被分配到第一个进入空闲状态的单元中. 例如3个单元8个批次的分配问题的加工时间及分配方式如图1所示,其中每个长方形表示一个容量不同的产品批次,长方形内的数字表示批次到达的顺序.

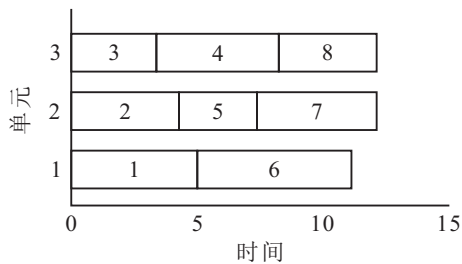


图1 FCFS调度方式实例

基于考虑员工间合作关系的影响,假设共有*M*个批次和*N*种产品,产品组合和需求已知,每个批次只有一种产品类型;单个批次中的所有产品都在同一个单元中进行生产,批次不会被拆分;每个单元内具备完整装配任一种产品的能力,即任何一种产品都可以在任何一个单元中完成全部的装配,不存在工件和员工跨单元的移动;全部待分配员工数与原装配流水线上的工序数相一致;每个员工都是全能工,能够独立完成任何一种产品的装配,即每个单元内的员工都可以在单个单元内完成全部的组装任务;不同单元内的员工数可以不同.

1.2 参数说明

1) 参数.

i, l: 员工的索引号, $i, l = 1, 2, \dots, W$;

j: 单元的索引号, $j = 1, 2, \dots, J$;

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, $k = 1, 2, \dots, M$;

T_n : *n*类产品在流水线上的节拍时间;

α_{il} : 员工*i*与员工*l*进行合作生产时的合作系数;

α_j : 单元*j*的合作影响因子;

β_{ni} : 员工*i*生产*n*类产品时的能力系数;

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

B_m : 第*m*批次的产品数量.

2) 变量.

TC_m : 第*m*批次的一件产品在所分配单元中一个工序的装配时间;

SC_m : 第*m*批次在所分配单元中的准备时间;

FC_m : 第*m*批次在所分配单元中的总装配时间;

FCB_m : 第*m*批次在所分配单元中的装配起始时间.

3) 决策变量.

$$X_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{如果员工 } i \text{ 分配到单元 } j; \\ 0, & \text{otherwise.} \end{cases}$$

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

1.3 数学模型

本文以文献[14]中提出的模型为参考,考虑加入员工合作系数作为影响参数,进行日式单元制造系统的构建. 根据对合作系数的定义,员工*i*与员工*l*之间的合作生产效率与合作系数 α_{il} 正相关,因此在以计算总装配周期的模型中以 $1 - \alpha_{il}$ 表示合作关系对装配时间的影响. 在不考虑合作系数以及员工能力系数时,单个员工*i*对产品*n*的单一工序装配时间为 T_n . 在流水-单元转换过程中,单元*j*内的全部员工合作关系对加工时间的影响因子 α_j 按照单元*j*内全部员工的加工效率平均值计算. 考虑合作系数的情况下,当员工*i*与员工*l*共同合作时,任一名员工完成产品*n*的单一工序的装配时间为 $T_n \times (1 - \alpha_{il})$. 以此类推,多名员工在同一个单元*j*内工作时,对员工*i*的装配时间影响因子可以表示为 $\prod_{l=1}^W (1 - \alpha_{il}) X_{ij} X_{lj}$. 因此,员工*i*对于产品单一工

序的装配效率为 $1 / \prod_{l=1}^W (1 - \alpha_{il}) X_{ij} X_{lj}$. 同理可得多人在同一单元内合作时, 该单元的合作影响因子 α_j 为

$$\alpha_j = \sum_{i=1}^W \left[1 / \prod_{l=1}^W (1 - \alpha_{il}) X_{ij} X_{lj} \right]. \quad (1)$$

m 批次在所分配单元中的单个操作所耗费的时间为

$$TC_m = \frac{\sum_{n=1}^N \sum_{i=1}^W \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^M V_{mn} T_n \beta_{ni} \alpha_j X_{ij} Z_{mjk}}{\sum_{i=1}^W \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^M X_{ij} Z_{mjk}}. \quad (2)$$

当单元内前后相邻两个批次所装配的产品类型不同时, 需要对单元内的设备进行一定的调整, 产生相应的准备时间. 每类产品以给定的参数 SCP_n 表示第 n 类产品在单元内的准备时间. 基于以上, 第 m 批次在单元内的停留时间包括准备时间和装配时间两部分组成. 第 m 批次在单元内的准备时间 SC_m 、装配时间 FC_m 和第 m 批次的开始装配时间 FCB_m 如下所示:

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

$$FC_m = \frac{B_m TC_m W}{\sum_{i=1}^W \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^M X_{ij} Z_{mjk}}; \quad (4)$$

$$FCB_m = \sum_{s=1}^{m-1} \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^m (FC_s + SC_s) Z_{mjk} Z_{sj(k-1)}. \quad (5)$$

本模型目标为最小化总装配周期和最小化员工总工作时间, 各批次的装配以先到先服务的方式进行调度. 具体表述如下:

$$MS = \min_m \{ \max(FCB_m + FC_m + SC_m) \}, \quad (6)$$

$$TLH = \min \sum_{m=1}^M \sum_{i=1}^W \left(\sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^M FC_m X_{ij} Z_{mjk} \right). \quad (7)$$

$$\text{s.t. } 1 \leq \sum_{i=1}^W X_{ij} \leq W, \forall j; \quad (8)$$

$$\sum_{j=1}^J X_{ij} = 1, \forall i; \quad (9)$$

$$\sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^M Z_{mjk} = 1, \forall m; \quad (10)$$

$$\sum_{m=1}^M \sum_{k=1}^M Z_{mjk} = 0, \forall j \left| \sum_{i=1}^W X_{ij} = 0; \quad (11)$$

$$\sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^M Z_{mjk} \leq \sum_{j'=1}^J \sum_{k'=1}^M Z_{(m-1)j'k'}, \quad m = 2, 3, \dots, M. \quad (12)$$

目标函数式(6)表示最小化产品的总装配周期; 式(7)表示最小化员工的总操作时间; 式(8)限制了可分配的总人数不超过原有流水线上的员工数; 式(9)表示每个员工只能被分配到一个单元内; 式(10)表示每个批次只能被分配到一个单元中, 即批次不可拆分; 式(11)表示产品不会被分配到没有员工的单元中; 式(12)表示各批次按顺序分配到各个单元中.

本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[15]中已证实是NP-hard问题, 无法在多项式时间内求得精确解. 针对本模型的多目标特征, 本文将采用基于NSGA-II的多目标优化问题求解算法.

2 基于NSGA-II的求解算法

多目标优化问题存在帕累托最优和非支配前沿解集, 因此无法通过传统的启发式算法求得最优解. 可以运用多目标加权的方式将多目标优化问题转化为单目标的问题并求解, 但是在以往的研究过程中, 由于多目标问题的特殊性, 运用加权的方式很难求得实际的最优解. 在实际的操作过程中, 由于人为定义各目标值的权重, 导致计算结果受人为因素影响过大. 为了解决这一问题, 学者提出了多目标优化问题的相关算法, 例如强帕累托演化算法(SPEA)^[20]、非支配排序遗传算法(NSGA-II)^[21]和多目标差分进化算法(MODE)^[22]等. 其中NSGA-II算法由Deb等^[21]于2002年提出, 并被学者们在各领域的研究中进行应用. 通过在各领域的应用和检验, 证明了NSGA-II算法在求解的速度和效率上都具备较好的优势. 首先, NSGA-II算法通过非支配排序的方式减小了对比解空间的次数, 从而降低了时间复杂度. 其次, 针对迭代过程中精英解的保留策略更具优势, 相对其他多目标算法能够得到更好的最终解. 与此同时, 一个更大的优势体现在运用NSGA-II算法的过程中需要人为输入的参数极少, 这避免了由于人为的不正确选择导致的算法求解效率低下的结果. NSGA-II算法也因此成为了被广泛使用的求解多目标问题的算法. 鉴于本文提出模型的相关特点都比较符合NSGA-II算法所呈现的优势, 因此选择NSGA-II算法为基础的启发式算法对模型进行求解.

NSGA-II算法在遗传算法的基础上引入了非支配排序和拥挤距离来评价个体的优劣. 本文的目标

函数有两个,分别为总装配周期最短和员工劳动时间最短,具体计算方式如模型描述.在基于NSGA-II的优化算法中运用非支配排序和拥挤距离评价解的适应值,并进行个体的选择.结合多目标解的评价机制的同时,运用GA来进行每一代种群的选择、交叉和变异等操作,最终选定最优解的组合.

2.1 染色体编码

本文采用顺序编码方式进行编码,每个染色体代表一个可行的单元构建方案.对于 W 个员工的流水-单元转换问题,采用1到 $2W - 1$ 的数字来编码,小于等于 W 的数字代表员工,大于 W 的数字代表分割数,以此编码表示员工分为了几个单元以及每个单元都分配了哪几个员工.例如,对于一个由4名员工组成的流水-单元转换的问题,采用1至 $2 \times 4 - 1 = 7$ 的数字进行编码.染色体“4 7 1 2 6 5 3”表示一个4名员工的SPS构建方案,其中大于4的7、6、5代表分隔符号.该染色体表示4名员工共分为3个单元,员工4分配到第1个单元,员工1和员工2分配到第2个单元,员工3分配到第3个单元.

2.2 适应值函数

本文的目标函数有两个,分别为:总装配周期最短和员工劳动时间最短.具体计算方式如模型描述.通过将迭代运算后的个体逐一解码后,根据目标函数计算染色体的目标函数值作为个体适应值.基于NSGA-II的优化算法,运用非支配排序和拥挤距离评价解的优劣,并进行解的选择.

2.3 非支配排序

在计算个体适应值的基础上,对解空间进行优劣对比及排序,从而在种群中选择优秀的个体.非支配排序的思路为,在两个个体的对比中,若个体1的两个目标函数值均优于个体2,或个体1的一个目标值优于个体2而另一个目标值相等时,称个体1占优于个体2,或称个体1支配个体2.对所有的个体进行非支配排序,占优级别越高的个体具有越小的级别编码.在判断同一非支配级别的个体优劣时,为了保证种群中最优解的差异性,优先选择处于稀疏地带的个体,即该个体的临近区间内个体密度较小.采用个体的拥挤距离判断该个体在种群中的密度值,拥挤距离较大的个体代表密度较小的更优个体.其中个体的拥挤距离是指在解空间中,它所在的非支配解集中离它最近的两个个体构成的长方形边长的均值.

2.4 交叉与变异

为了适应本文的编码方式,选择Davis^[23]提出的两点顺序交叉法进行交叉运算.例如个体1“4 7 1 2 6

5 3”和个体2“6 2 5 4 1 7 3”进行交叉运算,采用两点顺序交叉法得到的运算结果为个体1“5 4 | 1 2 6 | 7 3”和个体2“2 6 | 5 4 1 | 37”,具体交叉运算的步骤参考文献[23].运用该交叉方式可以满足染色体的可行性,免去由染色体变化所产生的运算复杂性.

在变异运算中,为满足变异后个体仍然可行,采取随机选择两点元素互换的方式进行.例如在个体“4 7 1 2 6 5 3”中选择随机两点进行变异操作,结果为“5 7 1 2 6 4 3”.个体解码后得到构建方案,由构建3个单元转换为构建2个单元,且员工的组合方式也发生了变化.因此,通过两点互换的变异操作可以更改原有单元构建方案中员工的分配方式和构建单元的数量.该变异方式可以在保证个体可行性的同时丰富解的多样性.

2.5 算法步骤

由于本文提出的编码特征会存在不同染色体解码结果相同的情况,因此在每一次父代种群的选择过程中,为了保证算法的高效性,首先剔除对解码结果相同的染色体,再通过非支配排序和锦标赛式选择最优的种群作为新的父代.根据本文提出的模型以及编码特征,在文献[21]的描述基础上,改进的NSGA-II算法具体操作步骤如下.

Step 1: 随机生成规模为 N 的初始种群 P_0 ,并将 P_0 进行非支配排序;

Step 2: 通过传统GA的运算,生成规模为 N 的后代种群 Q_0 ;

Step 3: 将 P_0 和 Q_0 合并为规模为 $2N$ 的种群 $P_0 \cup Q_0$;

Step 4: 剔除 $P_0 \cup Q_0$ 中构建单元方案相同的个体后,对种群进行非支配排序,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到Step 4,直至到达最大迭代次数;

Step 6: 输出最终非支配排序解.

3 数值实验分析

基于前文提出的模型和算法,通过数值实验分析员工间合作关系对SPS构建的效率和方案的影响.以文献[14]中的Benchmark数据为基础,针对研究的实际情况进行相应改进.考虑到员工之间的合作对工作效率的影响,加入了员工间合作系数的相关数值,具体信息如表1和表2所示.其中batch size限定为整数值,其余与时间相关的参数单位均为min.在应用NSGA-II算法的过程中设定运算数最大迭代次数为100、种群规模为100、交叉概率为0.8、变异概率

为0.2. 通过对实验结果的统计分析,得到SPS系统性能的变化规律,为生产管理者提供相应的理论支持和改善建议.

表1 流水-单元转化算例的相关参数

系统因素	参数取值
product types	5
batch size	$N(50, 5)$
SL_n	2.2
SCP_n	1
T_n	1.8
α_{il}	$N(0, 0.01)$

表2 员工与产品对应的技能水平参数 β_{ni}

产品类型	β_{ni}
1	$N(1, 0.05)$
2	$N(1.05, 0.05)$
3	$N(1.1, 0.05)$
4	$N(1.15, 0.05)$
5	$N(1.2, 0.05)$

基于以上数据,在员工数为5的算例实验中运行NSGA-II算法,得到的帕累托前沿如表3和图2所示.图2中:“.”表示迭代后最终种群内的所有可行解,即最终解;“□”表示种群内的非支配解,即帕累托前沿.由实验结果可得帕累托前沿包含6个解,总加工周期由2924.68到3179.68.管理者可以根据企业自身对生产周期和员工总加工时间的重要性,选择合适的方案进行SPS的构建.其次,对于合作关系更紧密的员工,也更多地分配到一个单元中,例如员工4和员工5.为确定所提出方法对本模型求解的准确性,通过实验对5名员工的流水-单元转换进行穷举,所有可行解和帕累托前沿如图3所示.图3中:“□”表示种群内的非支配解,即帕累托前沿;其他各点表示所有的可行解.

对比图2和图3可知,运用本文算法所求帕累托前沿与穷举法相一致,表明了本文算法对模型求解的有效性和多样性.

表3 考虑合作关系的5名员工流水-单元转换的帕累托前沿

MS	TLH	员工分配形式
2924.68	14515.74	{5,4}{2}{3,1}
2978.33	14466.99	{5,4,3,2}{1}
2983.10	14466.71	{5,4}{3,1}{2}
2997.02	14451.70	{3}{2}{1}{4,5}
3036.83	14428.39	{2}{3,1}{5,4}
3179.68	14402.46	{1}{3}{2}{5,4}

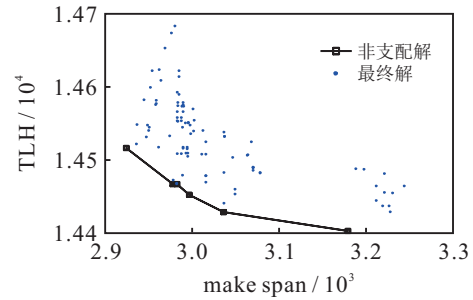


图2 运用NSGA-II所得考虑合作关系的5名员工流水-单元转换的最终解集

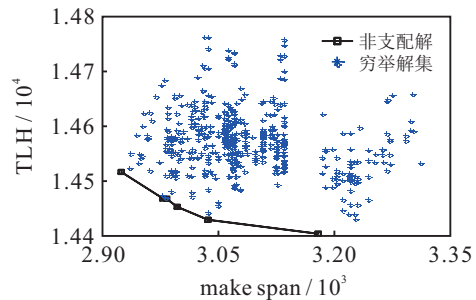


图3 考虑合作关系的5名员工流水-单元转换的穷举解集

本文分别对10名员工、20名员工以及50名员工的流水-单元转换算例采用多次运行算法,得到帕累托前沿.由于篇幅有限,此处只将针对20名员工的转化算例运行10次后的计算结果呈现在表4.根据生成的帕累托集,生产管理人员可以根据实际生产的情况和偏好来权衡总装配周期和员工总工作时间进行最优的单元构建方案选择.该方法为生产管理人员提供了多种解决方案,能够满足生产管理的实际需求.

表4 10次运行NSGA-II的20名员工转化问题的帕累托前沿

MS	TLH	员工分配形式
2996.55	58881.63	{7, 10}{15, 20}{1, 6, 18}{12, 14}{5, 9}{2, 8, 11, 13, 16, 17, 19}{3, 4}
3008.12	58751.04	{12, 15}{1, 7}{4, 9, 10}{3, 6}{5, 11}{2, 14, 18, 20}{8, 13, 16, 17, 19}
3009.45	58593.51	{12, 15}{1, 7}{4, 9, 10}{3, 6}{5, 11}{2, 14, 16, 20}{8, 13, 17, 18, 19}
3018.01	58471.45	{18, 20}{13, 19}{7, 17}{8, 11, 12, 14}{5, 15}{4, 16}{9, 10}{2, 6}{1, 3}
3023.63	58394.98	{3, 11, 13, 18}{6, 8, 10, 16, 17, 19}{2, 9, 14, 20}{4, 7}{1, 12}{5, 15}
3025.38	58139.24	{7, 8, 17}{4, 9, 15, 20}{1, 14}{3, 6}{2, 11}{5, 12}{10, 13, 16, 18, 19}
3040.93	58071.48	{2, 4, 7, 9, 15, 17}{12, 14}{3, 6}{8, 20}{5, 11}{10, 16, 19}{18}{1}{13}
3143.50	58044.16	{7, 8, 17}{12, 15}{9, 20}{3, 4, 14}{2, 6}{10, 19}{5, 11, 16}{1}{13, 18}
3148.08	58044.13	{2, 6}{5, 11}{4, 9, 12, 15}{8, 18}{16, 20}{3, 13}{1, 14}{10, 19}{7, 17}
3175.21	57878.85	{10, 19}{2, 6}{5, 11}{12, 15}{1}{3, 13}{4, 9}{7, 8, 16, 17, 20}{14, 18}
3380.24	57845.46	{7, 17}{8, 18}{2, 6}{5, 11}{10, 19}{12, 15, 16, 20}{3, 13}{4, 9}{1, 14}
3416.24	57820.15	{2, 4, 5, 15}{13, 14}{12, 20}{1, 3, 6, 7, 9, 17}{10, 11}{8, 16, 18, 19}
3697.76	57672.84	{5, 15}{12, 14}{1, 7}{17, 20}{2, 3, 4, 6, 8, 9, 10, 11, 13, 16, 18, 19}

为检验考虑员工合作关系对所构建SPS性能的影响,本文对50名员工考虑合作系数和不考虑员工合作系数的流水-单元转换问题分别进行求解.如图4所示,50名员工场景下考虑员工合作系数的帕累托前沿占优于不考虑员工合作系数的帕累托前沿.结果表明,考虑员工合作关系时所得的构建方案在总装配周期和员工总工作时间两方面都得到了更优的结果,即考虑员工合作关系的流水-单元转换模型可以得到更好的构建结果.

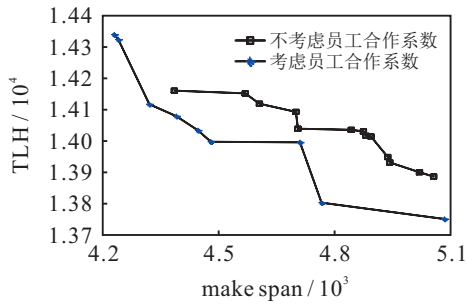


图4 是否考虑员工合作关系的SPS效率对比(W = 50)

由于企业文化、员工的受教育程度以及员工的文化价值观背景等方面的不同,员工间的合作意识和合作关系也存在不同.如何合理利用员工间的合作关系使构建SPS获得更高的收效是生产管理者需要关注的问题.员工间的合作系数 α_{il} 的均值和方差分别代表了一个组织中整体合作关系的融洽程度和个体间合作效率的差异.为了分析员工合作关系的变化对SPS的性能影响,根据员工整体合作关系的优劣和合作关系的差异程度不同,本文设计相应的数值实验,分析员工间的合作系数 α_{il} 的均值和方差的变化对于构建SPS效率的影响.

首先,对员工间合作差异情况影响系统性能的程度进行实验.其他实验参数不变,以50人的流水-单元转换为实验对象,选取合作系数 α_{il} 的均值为0时,方差分别取0.01、0.02、0.05、0.1,代表员工合作的差异程度,0.01表示合作差异最小,0.1表示合作差异最大.对比结果如图5所示,结果表明,随着合作系数方差的增大,所构建SPS的总装配周期和员工总工作时间都相应减少.也就是说,员工之间的合作关系差异

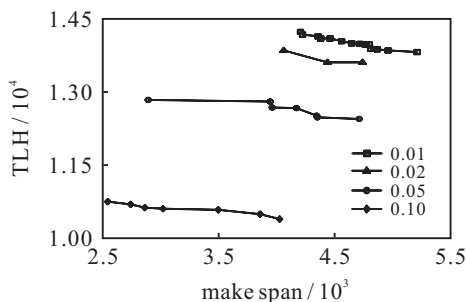


图5 合作系数方差变化对最优解的影响(W = 50)

较大时,考虑员工合作关系的SPS构建会得到更好的结果.

同样以50名员工的转换问题为实验对象,其他实验参数不变,选取合作系数 α_{il} 的方差为0.1,均值分别取值为-0.1、0、0.1,代表整体合作水平,-0.1表示整体合作意识较差,0.1代表整体合作水平较高.对比结果如图6所示,结果表明,随着合作系数均值的增加,SPS的总装配周期和员工总工作时间都相应减少,即员工整体合作水平较高时,流水-单元转换所得的结果更为理想.因此,对于生产管理者而言,应提升员工整体的合作意识,并允许员工之间的合作程度存在差异,以达到提升生产效率的目的.

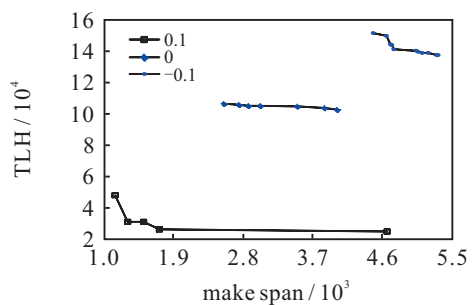


图6 合作系数均值变化对最优解的影响(W = 50)

4 结 论

本文根据日本式单元装配系统的特征以及适用情景,考虑员工间合作关系对生产效率的影响,以系统总装配周期和员工的工作时间为目标,建立了日本单元装配系统构建的多目标模型,在员工合作关系差异的情境下,决策构建单元的数量以及员工的分配方案.在模型的求解过程中,运用了基于NSGA-II的启发式算法进行多目标问题的优化和求解.对于小规模算例,与穷举法进行比较,证明了所提算法对模型求解的有效性.对于大规模算例,通过多次运行算法的方式可以在较短时间内取得较好的结果.通过与同样环境下不考虑员工合作关系的流水线向单元装配系统转化问题的数值实验对比,说明了考虑员工间的合作关系对总装配周期和员工总工作时间都有积极的影响.对于员工合作关系差异对单元装配系统性能的影响,根据模型从两方面进行了分析:一是分析在其他因素不变的情境下,合作系数方差的变化(即合作系数的差异性)对单元装配系统的影响.实验表明,合作系数的差异性较大时,会同时降低模型的总装配周期和员工操作时间两个目标.二是分析在其他因素不变的情境下,合作系数均值(即整体合作氛围的大小)对单元装配系统的影响.实验表明,合作系数的整体提升会促进单元系统性能的提升.数值实验为管理者提出建议,在多品种小批量的生产环境

下,流水-单元转换过程中,管理人员要注意提升员工整体的合作意识,并允许员工间的合作存在差异。

进一步的研究将更加关注单元系统的多样性,不局限于巡回式单元的转换,在分割式单元系统和单人式单元系统的转换中融入员工合作关系和其他参考因素,提出更为完善的流水-单元转换方式。

参考文献(References)

- [1] 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(49/50/51): 67-76.
- [2] 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(16): 2963-2971.
- [3] Taylor W. The principles of scientific management[M]. New York: Harper & Brothers, 1911: 55-71.
- [4] Hounshell D A. The standardization of manufacturing[J]. *Science*, 1984, 226: 331-332.
- [5] Jones T. The machine that vanged the eorld[M]. Rawson Associates, 1990: 77-98.
- [6] Macduffie J P. Human resource bundles and manufacturing performance: Organizational logic and flexible production systems in the world auto industry[J]. *Industrial & Labor Relations Review*, 1995, 48(2): 197-221.
- [7] Christopher M. The agile supply chain: Competing in volatile markets[J]. *Industrial Marketing Management*, 2000, 29(1): 37-44.
- [8] 曹愷璧. 佳能细胞式生产方式[J]. *北大商业评论*, 2010(8): 132-137.
(Cao X B. The production mode of cannon cell[J]. *PKU Business Review*, 2010(8): 132-137.)
- [9] 曾程宽, 刘士新. 求解存在运输空间约束多单元协作调度问题的拍卖算法[J]. *控制与决策*, 2019, 34(4): 689-698.
(Zeng C K, Liu S X. An suction slgorithm for multi Cell cooperative scheduling problem with transportation space constraints[J]. *Control and Decision*, 2019, 34(4): 689-698.)
- [10] 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(5): 93-103.
(Liu C G, Lian J, Li W J, et al. Japanese cellular manufacturing — The latest development form of the mode of production in Japan[J]. *Management Review*, 2010(5): 93-103.)
- [11] Yin Y, Stecke K E, Kaku I. The evolution of Seru production systems throughout canon[J]. *Operations Management Education Review*, 2008, 2: 27-40.
- [12] Kaku I, Murase Y, Yin Y. A study on human-task-related performances in converting conveyor assembly line to cellular manufacturing[J]. *European Journal of Industrial Engineering*, 2008, 2(1): 17-34.
- [13] Kaku I, Gong J, Tang J, et al. Modeling and numerical analysis of line-cell conversion problems[J]. *International Journal of Production Research*, 2009, 47(8): 2055-2078.
- [14] Yu Y, Gong J, Tang J, et al. How to carry out assembly line-Cell conversion? A discussion based on factor analysis of system performance ompromvements[J]. *International Journal of Production Research*, 2012, 50(18): 5259-5280.
- [15] Yu Y, Tang J, 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.
- [16] Liu C, Li W, Lian J, et al. Reconfiguration of assembly systems: From conveyor assembly line to serus[J]. *Journal of Manufacturing Systems*, 2012, 31(3): 312-325.
- [17] Liu C, Yang N, Li W, 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.
- [18] 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(9): 2978-2989.
- [19] 由雯. 国有企业内部人际关系对员工绩效的影响研究[D]. 长春: 吉林大学管理学院, 2013: 26-44.
(You W. The influence of interpersonal relationship on employee performance in state owned enterprises[D]. Changdun: School of Management, Jilin University, 2013: 26-44.)
- [20] Zitzler E, Thiele L. Multiobjective evolutionary algorithms: A comparative case study and the strength pareto approach[J]. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 1999, 3(4): 257-271.
- [21] Deb K, Pratap A, Agarwal S, et al. A fast and elitist multi-objective genetic algorithm: NSGA-II[J]. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 2002, 6(2): 182-197.
- [22] Zhang Q, Li H. MOEA/D: A multiobjective evolutionary algorithm based on decomposition[J]. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 2007, 11(6): 712-731.
- [23] Davis L. Applying adaptive algorithms to epistatic domains[C]. *Proceedings of International Joint Conference on Artificial Intelligence*. Los Angeles: Morgau Kaufmann Publishers Inc, 1985: 162-164.

作者简介

王晔(1988—), 女, 博士生, 从事制造系统优化的研究, E-mail: wangye77@foxmail.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.