doi:10.12068/j.issn.1005－3026.2026.20250025

混合分割赛汝系统中技能水平随机的多技能工匹配模型

黄坤元，姜艳萍，张洋鑫
（东北大学 工商管理学院，辽宁 沈阳 110169）

摘 要：为解决混合分割赛汝系统（HDSS）中多技能工与作业单元的有效匹配问题，提出一种在HDSS中考虑技能水平随机性的多技能工与作业单元的匹配模型，用于生成匹配方案．首先，为衡量多技能工与作业单元上工序的匹配满意程度，结合多技能工技能水平的随机性，提出了双方偏好度的计算方法；进一步地，构建了多技能工与作业单元匹配的多目标规划模型，并提出一种改进的多目标免疫算法（IMOIA）进行求解．实验结果表明，本文提出的方法可在较短时间内生成匹配方案，且获得的匹配方案在满足双方偏好方面具有明显优势，因此该方法具有可行性与有效性．

关 键 词：多技能工；混合分割赛汝系统；随机性；多目标规划；改进的多目标免疫算法
中图分类号：N 945 **文献标志码**：A **文章编号**：1005－3026（2026）05－0127－11

Matching Model for Multi-skilled Workers Considering Randomness of Skill Levels in Hybrid Divisional Seru System

HUANG Kun-yuan, *JIANG Yan-ping*, *ZHANG Yang-xin*
（School of Business Administration, Northeastern University, Shenyang 110169, China. Corresponding author: JIANG Yan-ping, E-mail: ypjiang@mail.neu.edu.cn）

Abstract: To solve the problem of effectively matching multi-skilled workers and operation units in the hybrid divisional Seru system (HDSS), a matching model for multi-skilled workers and operation units considering the randomness of skill levels in HDSS was proposed to generate matching schemes. First, to evaluate the matching satisfaction between multi-skilled workers and processes on operation units, calculation methods for preference degrees of both sides were proposed by considering the randomness of skill levels. Furthermore, a multi-objective programming model for matching multi-skilled workers and operation units was constructed, and an improved multi-objective immune algorithm (IMOIA) was proposed for solution. Experimental results indicate that the proposed method can generate matching schemes in a short time, and the obtained matching schemes have obvious advantages in satisfying preferences of both sides. Therefore, the method is feasible and effective.

Key words: multi-skilled worker; hybrid divisional Seru system (HDSS); randomness; multi-objective programming; improved multi-objective immune algorithm (IMOIA)

新质生产力作为先进生产力的具体体现形式，是科技创新交叉融合突破所产生的根本性成果，也是生产力现代化的具体体现[1].2023年12月11日至12日中央经济工作会议指出："以科技创新引领现代化产业体系建设.要以科技创新推动产业创新，特别是以颠覆性技术和前沿技术催生新产业、新模式、新动能，发展新质生产力"[2].与此同时，新兴信息技术的飞速发展与广泛应

收稿日期：2025－03－24
基金项目：国家自然科学基金资助项目（72371065）.
作者简介：黄坤元（1993—），男，山东青岛人，东北大学博士研究生.
通信作者：姜艳萍，E-mail：ypjiang@mail.neu.edu.cn.

用,带来了工业制造流程与管理的智能化.智能制造系统相较于传统的制造模式,可以更快地响应不断变化的市场需求,增强制造企业在市场竞争中的优势,是新质生产力的重要标志[3].混合分割赛汝系统(HDSS)作为一种智能制造系统,结合了分割式赛汝生产的柔性化与流水线生产的批量化、标准化,已受到越来越多企业的青睐.目前,国内一些高端制造企业如海信、欣旺达、迈瑞医疗等,均通过流水线向HDSS的转型,大幅度提升了生产效果[4].

多技能工的配置是HDSS中的一个重要问题[5].在现实中,多技能工的配置通常依靠管理人员的经验,无法充分考虑到多技能工与作业单元双方的需求,不利于良好工作氛围的形成与生产效率的提升.此外,该方式往往忽略了多技能工身心状态的波动造成的技能水平随机的情形.因此,本文提出HDSS中多技能工与作业单元的匹配模型,可根据多技能工对作业单元中工序的偏好与作业单元中工序对多技能工技能水平的需求,生成一个使双方满意的匹配方案.有效的匹配方案不仅可以满足作业单元上工序对多技能工技能水平的需求,同时还能满足多技能工对工序的偏好,这也符合欧盟委员会提出的"工业5.0"倡议中以人为本与保障员工福祉的理念[6].

目前,赛汝系统(Seru system,SS)中多技能工与作业单元匹配的相关研究极为缺乏,与本文相关的研究均为SS中多技能工分配的研究.相较于匹配方法,分配方法仅考虑作业单元上工序对多技能工技能水平的需求,而忽略了多技能工对作业单元上工序的偏好.从已有的研究来看,SS中多技能工分配方法的研究包括:HDSS中多技能工分配方法的研究,混合巡回赛汝系统(由几个巡回式赛汝与一部分流水线构成的SS,以下简称HRSS)中多技能工分配方法的研究,以及纯SS(仅由几个赛汝构成,不包含流水线的SS,以下简称PSS)中多技能工分配方法的研究.针对HDSS中多技能工分配方法的研究主要包括:Wu等[7]提出一个双目标规划模型,用于最小化多技能工的最大工作时间和任务总完成时间;Li等[8]提出一个单目标规划模型用于最小化系统的最大完工时间.针对HRSS中多技能工分配方法的研究主要包括:Yu等[9]建立了以最大完工时间最小化和多技能工总操作时间最小化为目标的双目标规划模型;Wu等[10]建立了以最大完工时间最小化为目标的单目标规划模型.针对PSS中多技能工分配方法的研究文献主要包括:Yılmaz[11]以最大完工时间最小化与多技能工之间工作负载平衡为目标建立了双目标规划模型;Yılmaz等[12]基于少人化哲学,以最大完工时间最小化为目标建立了单目标优化模型;Jiang等[13]考虑了Dejong学习效应,并分别建立了3个单目标规划模型,优化目标分别为总等待时间最小化、等待时间偏差总和最小化与赛汝总工作负载最小化;Miao等[14]建立了多目标规划模型用于最大完工时间的最小化,以及赛汝之间与多技能工之间工作负载的平衡.

综上,已有研究为HDSS中多技能工与作业单元稳定匹配模型的研究提供了重要借鉴,但依然存在明显的不足.首先,这些研究仅考虑了SS中作业单元上的工序对多技能工的技能水平需求,忽视了多技能工对作业单元上的工序存在偏好这一现实;其次,这些研究忽略了多技能工的技能水平存在随机性的情形.因此,本文考虑多技能工技能水平的随机性,根据HDSS中多技能工对作业单元上工序的偏好,以及作业单元上工序对多技能工的技能水平需求,提出一种综合考虑多技能工与作业单元满意程度的匹配模型.

1 问题描述与符号说明

本文研究的问题是生产任务开始前,HDSS中多技能工与作业单元匹配方案的生成.一个HDSS由多个分割式赛汝和流水线工序组成,其中,每个分割式赛汝可以匹配多个多技能工,每个流水线工序仅能匹配一个多技能工,每个多技能工只能与一个分割式赛汝或流水线工序匹配.在分割式赛汝中,每个多技能工操作部分工序.在生产任务开始前,需要根据多技能工对作业单元存在的偏好,以及作业单元上工序对多技能工的技能水平需求,生成一个使多技能工和作业单元双方满意的匹配方案.本文所需的符号如表1所示.

2 多技能工与作业单元匹配模型

本节首先提出了多技能工与作业单元中工序的偏好度计算方法;进一步地,提出了多技能工在作业单元中的工作时间,以及分割式赛汝与流水线单位时间产出量的计算方法;最后构建了多技能工与作业单元匹配模型.

2.1 偏好度的计算

本文采用归一化方法计算多技能工与作业

单元中工序的偏好度,对于任意 $i\in\{1,2,\cdots,I\}$, $k\in\{1,2,\cdots,K\}$, T_i 对 P_k 的偏好度 α_i^k 的计算公式如下所示:

$$\alpha_i^k=\begin{cases}\dfrac{r_{ik}}{\max_{k=1,2,\cdots,K}\{r_{ik}|r_{ik}\neq M\}}, r_{ik}\neq M;\\ M, r_{ik}=M.\end{cases}\tag{1}$$

显然,α_i^k 的取值范围为 $\left\{\left[\dfrac{1}{\max_{k=1,2,\cdots,K}\{r_{ik}|r_{ik}\neq M\}},1\right],M\right\}$,$\alpha_i^k$ 越小,说明 T_i 对 P_k 越满意,即 T_i 操作 P_k 的意愿越强.

对于任意 $k\in\{1,2,\cdots,K\}$, $i\in\{1,2,\cdots,I\}$,在场景 $\omega\in\Omega$ 中时刻 $t\in\mathcal{T}$ 下 P_k 对 T_i 的偏好度 $\tilde{\beta}_k^i(\omega,t)$ 的计算公式如下所示:

$$\tilde{\beta}_k^i(\omega,t)=\begin{cases}\dfrac{\tilde{c}_{ik}(\omega,t)}{\max_{i=1,2,\cdots,I}\{\tilde{c}_{ik}(\omega,t)\neq M\}}, \tilde{c}_{ik}(\omega,t)\neq M;\\ M, \tilde{c}_{ik}(\omega,t)=M.\end{cases}\tag{2}$$

显然,$\tilde{\beta}_k^i(\omega,t)$ 的取值范围为 $\left\{0,\left[\dfrac{1}{\max_{i=1,2,\cdots,I}\{\tilde{c}_{ik}(\omega,t)\neq M\}},1\right],M\right\}$,$\tilde{\beta}_k^i(\omega,t)$ 越小,说明在场景 $\omega\in\Omega$,时刻 $t\in\mathcal{T}$ 下,P_k 对 T_i 越满意,即 T_i 越适合操作 P_k.

表 1　本文所需的符号

Table 1　Notations required in this paper

项目	符号	说明
集合	T	多技能工的集合,T_i 表示第 i 个多技能工,$i=1,2,\cdots,I$
	F	分割式赛汝的集合,S_e 表示第 e 个分割式赛汝,$e=1,2,\cdots,E$
	G	流水线工序的集合,S_{E+m} 表示第 m 个流水线工序,$m=1,2,\cdots,J-E$
	S	作业单元的集合,$S=F\cup G$,S_j 表示第 j 个作业单元,$j=1,2,\cdots,J$
	P	工序的集合,P_k 表示第 k 个工序,$k=1,2,\cdots,K$
参数	Q_j	S_j 匹配多技能工的限额,是一个正整数,$j=1,2,\cdots,J$. 特别地,如果 $S_j\in G$,则 $Q_j=1$
	V_{jk}	指示变量,如果 S_j 中包含 P_k,则 $V_{jk}=1$;否则 $V_{jk}=0$,$j=1,2,\cdots,J$, $k=1,2,\cdots,K$
	η_{jk}	S_j 中 P_k 的标准加工时间,如果 $V_{jk}=1$,则 $\eta_{jk}>0$;否则 $\eta_{jk}=0$,$j=1,2,\cdots,J$, $k=1,2,\cdots,K$
	$\tilde{c}_{ik}(\omega,t)$	场景 $\omega\in\Omega$ 中时刻 $t\in\mathcal{T}$ 下 T_i 操作 P_k 的技能水平,Ω 和 $\mathcal{T}$ 分别表示场景和时刻的集合,$\tilde{c}_{ik}(\omega,t)>0$,$\tilde{c}_{ik}(\omega,t)$ 越小,表示 T_i 操作 P_k 的水平越高. 特别地,如果 T_i 没有能力操作 P_k,则 $\tilde{c}_{ik}(\omega,t)=M$,$M$ 在全文中均表示一个极大的正数,$i=1,2,\cdots,I$, $k=1,2,\cdots,K$
	O_{ik}	指示变量,如果对于任意 $\omega\in\Omega$ 与 $t\in\mathcal{T}$,均有 $\tilde{c}_{ik}(\omega,t)=M$,则 $O_{ik}=0$;否则 $O_{ik}=1$,$i=1,2,\cdots,I$, $k=1,2,\cdots,K$
	f_{jk}	S_j 中 P_k 的技能水平需求,$f_{jk}>0$,f_{jk} 越小,表示技能水平需求越高,如果 $V_{jk}=0$,则 $f_{jk}=M$,$j=1,2,\cdots,J$, $k=1,2,\cdots,K$
	r_{ik}	T_i 对 P_k 给出的偏好序值,如果 $O_{ik}=1$,则 $r_{ik}\in\{1,2,\cdots,\sum_{k=1}^{K}O_{ik}\}$;否则 $r_{ik}=M$,$i=1,2,\cdots,I$, $k=1,2,\cdots,K$
决策变量	x_{ij}	$x_{ij}\in\{0,1\}$,如果 T_i 与 P_k 匹配,则 $x_{ij}=1$;否则 $x_{ij}=0$,$i=1,2,\cdots,I$, $j=1,2,\cdots,J$
	y_{ijk}	$y_{ijk}\in\{0,1\}$,如果 T_i 与 S_j 匹配且操作 P_k;则 $y_{ijk}=1$,否则 $y_{ijk}=0$,$i=1,2,\cdots,I$, $j=1,2,\cdots,J$, $k=1,2,\cdots,K$

2.2　工作时间与单位时间产出量的计算

下面给出多技能工在作业单元中工作时间的计算公式,以及分割式赛汝和流水线单位时间产出量的计算公式.

在场景 $\omega\in\Omega$ 中时刻 $t\in\mathcal{T}$ 下,T_i 在 S_j 内操作 P_k 的所需时间如下所示:

$$\tilde{t}_{ijk}(\omega,t)=V_{jk}\eta_{jk}\tilde{c}_{ik}(\omega,t)y_{ijk},$$
$$i=1,2,\cdots,I; j=1,2,\cdots,J; k=1,2,\cdots,K.\tag{3}$$

显然,$\tilde{c}_{ik}(\omega,t)$ 越小,则 $\tilde{t}_{ijk}(\omega,t)$ 越小,表示 T_i 在 S_j 内操作 P_k 的所需时间越短.

多技能工 T_i 在 S_j 内的工作时间为 T_i 在 S_j 内负责操作的所有工序所需时间之和,如下所示:

$$\tilde{t}_{ij}(\omega,t)=\sum_{k=1}^{K}\tilde{t}_{ijk}(\omega,t), i=1,2,\cdots,I; j=1,2,\cdots,J.\tag{4}$$

显然,$\tilde{t}_{ij}(\omega,t)$ 越小,表示 T_i 在 S_j 内的工作时间越短.

与分割式赛汝 S_e 匹配的瓶颈多技能工,即工作时间最长的多技能工的工作时间如下所示:

$$\tilde{B}_e(\omega,t)=\max_{i=1,2,\cdots,I}\{\tilde{t}_{ie}(\omega,t)\}, e=1,2,\cdots,E.\tag{5}$$

式中,$\tilde{t}_{ie}(\omega,t)$ 表示 T_i 在分割式赛汝 S_e 内的工作时间.

显然,$\tilde{B}_e(\omega,t)$ 越小,表示分割式赛汝 S_e 中的瓶颈多技能工的工作时间越短.

在分割式赛汝中,每个多技能工负责完成一部分工序,因此分割式赛汝的瓶颈多技能工决定了其单位时间产出量;在流水线中,每个多技能工操作一个工序,因此流水线的瓶颈工序决定了其单位时间产出量.

在场景 $\omega\in\Omega$ 中时刻 $t\in\mathcal{T}$ 下,分割式赛汝 S_e 的单位时间产出量 $\tilde{u}_e(\omega,t)$ 取决于 S_e 中瓶颈多技能工的工作时间,如式(6)所示:

$$\tilde{u}_e(\omega,t)=\frac{1}{\tilde{B}_e(\omega,t)},e=1,2,\cdots,E. \tag{6}$$

显然,$\tilde{B}_e(\omega,t)$越小,$\tilde{u}_e(\omega,t)$越大,表示分割式赛汝S_e的单位时间产出量越大,生产效率越高.

分割式赛汝的单位时间总产出量$\tilde{U}_1(\omega,t)$如下所示:

$$\tilde{U}_1(\omega,t)=\sum_{e=1}^{E}\tilde{u}_e(\omega,t). \tag{7}$$

显然,$\tilde{U}_1(\omega,t)$越大,表示分割式赛汝的单位时间总产出量越大,总生产效率越高.

流水线的单位时间产出量$\tilde{U}_2(\omega,t)$取决于流水线中瓶颈多技能工的工作时间,如下所示:

$$\tilde{U}_2(\omega,t)=\frac{1}{\max_{i=1,2,\cdots,I,j=E+1,E+2,\cdots,J}\{\tilde{t}_{ij}(\omega,t)\}}. \tag{8}$$

显然,$\max_{i=1,2,\cdots,I,j=E+1,E+2,\cdots,J}\{\tilde{t}_{ij}(\omega,t)\}$越小,表示流水线的单位时间产出量越大,生产效率越高.同时,分割式赛汝与流水线的生产效率越接近,即$|\tilde{U}_1(\omega,t)-\tilde{U}_2(\omega,t)|$越小,HDSS的整体运转越流畅.

2.3 模型的构建

HDSS中多技能工与作业单元匹配方案的优劣主要通过以下4个方面来衡量:

1)匹配方案应尽可能满足多技能工对作业单元中工序的偏好,多技能工对作业单元中工序的偏好度越小,表示多技能工对该工序越满意,操作该工序的意愿越强;

2)匹配方案应尽可能保证作业单元与技能水平高的多技能工匹配,作业单元中工序对多技能工的偏好度越小,表示与作业单元匹配的多技能工技能水平越高;

3)为符合“工业5.0”倡议中以人为本的理念,匹配方案应尽可能保证分割式赛汝中多技能工工作负荷的平衡性.分割式赛汝中多技能工之间的工作时间偏差越小,表示分割式赛汝中多技能工的工作负荷越平衡,同时,分割式赛汝的运转越流畅;

4)匹配方案应尽可能保证HDSS整体工作节奏的一致性,分割式赛汝与流水线单位时间产出量偏差越小,表示HDSS整体工作节奏的一致性越强,整体运转越流畅.

在场景$\omega\in\Omega$中时刻$t\in\mathcal{T}$下,HDSS中多技能工与作业单元匹配模型如下所示:

$$\min\tilde{Z}_1(\omega,t)=\sum_{i=1}^{I}\sum_{j=1}^{J}\sum_{k=1}^{K}\alpha_i^k y_{ijk}, \tag{9}$$

$$\min\tilde{Z}_2(\omega,t)=\sum_{i=1}^{I}\sum_{j=1}^{J}\sum_{k=1}^{K}\tilde{\beta}_k^i(\omega,t)y_{ijk}, \tag{10}$$

$$\min\tilde{Z}_3(\omega,t)=\sum_{i=1}^{I}\sum_{e=1}^{E}[\tilde{B}_e(\omega,t)-\tilde{t}_{ie}(\omega,t)], \tag{11}$$

$$\min\tilde{Z}_4(\omega,t)=|\tilde{U}_1(\omega,t)-\tilde{U}_2(\omega,t)|. \tag{12}$$

s.t.

$$\sum_{j=1}^{J}x_{ij}\leqslant 1,i=1,2,\cdots,I, \tag{13}$$

$$1\leqslant\sum_{i=1}^{I}x_{ij}\leqslant Q_j,j=1,2,\cdots,J, \tag{14}$$

$$V_{jk}=\sum_{i=1}^{I}y_{ijk},j=1,2,\cdots,J,k=1,2,\cdots,K, \tag{15}$$

$$[\tilde{c}_{ik}(\omega,t)-f_{jk}]y_{ijk}\leqslant 0,i=1,2,\cdots,I,j=1,2,\cdots,J,k=1,2,\cdots,K, \tag{16}$$

$$y_{ijk}\leqslant V_{jk}x_{ij},i=1,2,\cdots,I,j=1,2,\cdots,J,k=1,2,\cdots,K, \tag{17}$$

$$x_{ij}\leqslant\sum_{k=1}^{K}V_{jk}y_{ijk},i=1,2,\cdots,I,j=1,2,\cdots,J, \tag{18}$$

$$x_{ij}\in\{0,1\},i=1,2,\cdots,I,j=1,2,\cdots,J, \tag{19}$$

$$y_{ijk}\in\{0,1\},i=1,2,\cdots,I,j=1,2,\cdots,J,k=1,2,\cdots,K. \tag{20}$$

其中,式(9)~式(12)为目标函数,$\tilde{Z}_1(\omega,t)$表示多技能工对作业单元上的工序的偏好度之和;$\tilde{Z}_2(\omega,t)$表示作业单元上的工序对多技能工的偏好度之和;$\tilde{Z}_3(\omega,t)$表示分割式赛汝内多技能工的工作时间偏差之和;$\tilde{Z}_4(\omega,t)$表示分割式赛汝和流水线之间单位时间产出量偏差;式(13)~式(20)为约束条件,式(13)限制每个多技能工匹配的作业单元数量;式(14)限制每个作业单元匹配多技能工的数量;式(15)表示每个作业单元上的每个工序均需要一个多技能工操作;式(16)表示如果多技能工操作某一作业单元中的某一工序,则必须满足该作业单元中该工序的技能水平需求;式(17)表示如果多技能工操作某一作业单元中的某一工序,则该作业单元必须包含该工序,且该多技能工必须与该作业单元匹配;式(18)表示任何与作业单元匹配的多技能工,必须操作该作业单元中至少一个工序;式(19)~式(20)表示决策变量的取值范围.

3 模型求解算法

由于本文提出的模型为随机规划模型,为了更好地对其求解,采用样本平均近似方法(SAA)[15]将其转化为一个确定性规划模型,目标函数如式(21)~式(24)所示:

$$\min Z_1=\frac{1}{H}\sum_{h=1}^{H}\sum_{i=1}^{I}\sum_{j=1}^{J}\sum_{k=1}^{K}\alpha_i^{kh}y_{ijk}, \tag{21}$$

$$\min Z_2=\frac{1}{H}\sum_{h=1}^{H}\sum_{i=1}^{I}\sum_{j=1}^{J}\sum_{k=1}^{K}\beta_k^{ih}y_{ijk},\tag{22}$$

$$\min Z_3=\frac{1}{H}\sum_{h=1}^{H}\sum_{i=1}^{I}\sum_{e=1}^{E}(B_e^h-t_{ie}^h),\tag{23}$$

$$\min Z_4=\frac{1}{H}\sum_{h=1}^{H}|U_1^h-U_2^h|.\tag{24}$$

约束条件包含式(13)~式(15)、式(17)~式(20)以及下式:

$$[\tilde{c}_{ik}^h(\omega,t)-f_{jk}]y_{ijk}\leqslant 0,i=1,2,\cdots,I;$$
$$j=1,2,\cdots,J;k=1,2,\cdots,K;h=1,2,\cdots,H.\tag{25}$$

在式(21)~式(25)中,Z_1表示多技能工对作业单元上工序偏好度之和的样本平均近似值;Z_2表示作业单元上工序对多技能工偏好度之和的样本平均近似值;Z_3表示分割式赛汝内多技能工工作时间偏差之和的样本平均近似值;Z_4表示分割式赛汝和流水线之间单位时间产出量偏差的样本平均近似值;H表示随机生成的样本的个数;h表示某一特定样本对应的场景,$h=1,2,\cdots,H$;α_i^{kh}和β_k^{ih}分别表示场景h下T_i与P_k对对方的偏好度;B_e^h表示场景h下分割式赛汝S_e中瓶颈多技能工的工作时间;t_{ie}^h表示场景h下T_i在分割式赛汝S_e内负责操作的工序所需时间之和;U_1^h和U_2^h表示场景h下分割式赛汝与流水线工序的单位时间产出量;c_{ik}^h表示场景h下T_i操作P_k的技能水平.式(25)表示如果多技能工操作某一作业单元中的某一工序,则必须在全部H个场景下满足该作业单元中该工序的技能水平需求.

由于以式(22)为目标函数,以式(13)~式(15)、式(17)~式(20)及式(25)为约束条件的模型是一个在HDSS中多技能工分配模型,而文献[16]指出此类问题均为NP-Hard问题,因此本节的确定性规划模型同样为NP-Hard问题.此外,在多目标非线性规划模型中,对于多个互相冲突的目标函数,需要求出一组Pareto解.同时文献[17]指出,基于种群的多目标启发式算法是解决复杂生产管理问题的常用方法之一.

多目标免疫算法(MOIA)作为一种实现难度低、全局搜索能力强、鲁棒性强的多目标启发式算法,在此类问题的求解中已得到较为广泛的应用[18-19].因此,本文采用MOIA算法求解该模型.本文对MOIA算法的相关步骤进行了改进:首先,根据问题特点,采用整数编码方式对抗体进行编码;其次,为加快初始可行解的生成,本文提出了快速生成可行解方法;最后,根据问题特点,提出了新的变异算子.

3.1　抗体编码方式

IMOIA采用整数编码的方式对抗体进行编码,记$n_{\max}$为种群初始规模.编号为n的抗体如式(26)所示:

$$\boldsymbol{D}^n=\begin{bmatrix}d_{11}^n & \cdots & d_{1K}^n\\ \vdots & \ddots & \vdots\\ d_{J1}^n & \cdots & d_{JK}^n\end{bmatrix}.\tag{26}$$

式中:$\boldsymbol{D}^n$表示编号为n的抗体对应的匹配方案.d_{jk}^n表示$\boldsymbol{D}^n$中操作S_j上P_k的多技能工索引,$d_{jk}^n\in\{0,1,\cdots,I\}$,$n\in\{1,2,\cdots,n_{\max}\}$;$d_{jk}^n\in\{1,2,\cdots,I\}$表示$S_j$上$P_k$由某一$T_i$操作,$i\in\{1,2,\cdots,I\}$;$d_{jk}^n=0$表示$S_j$中的$P_k$没有多技能工负责操作.$\boldsymbol{D}^n$中与$S_j$匹配的多技能工个数用$\mathrm{Num}(\boldsymbol{D}^n,j)$表示.

3.2　快速生成可行解方法

复杂约束条件的存在导致模型的可行解空间稀疏,此时,如果根据离散均匀分布随机生成初始抗体种群,则会产生大量不可行解,导致求解速度缓慢.为加快初始抗体种群的生成,本文提出快速生成可行解的方法,步骤如下:

步骤1　将可行解数量记为N^F,当前抗体编号记为n,并执行$N^F\leftarrow 0$,$n\leftarrow 1$;

步骤2　将没有与任何作业单元匹配的多技能工集合记为Ω^0,并执行$\Omega^0\leftarrow T$;针对每个$V_{jk}=1$,$j\in\{1,2,\cdots,J\}$,$k\in\{1,2,\cdots,K\}$,将满足S_j上P_k技能水平需求的多技能工集合记为Ω^{jk},并执行$\Omega^{jk}\leftarrow\{T_i|c_{ik}^h\leqslant f_{jk},h=1,2,\cdots,H\}$;

步骤3　针对每个$V_{jk}=1$,$j\in\{1,2,\cdots,J\}$,$k\in\{1,2,\cdots,K\}$,如果$\Omega^0\cap\Omega^{jk}\neq\varnothing$,则随机选择一个$T_i\in\Omega^0\cap\Omega^{jk}$,并执行$d_{jk}^n\leftarrow i$,$\Omega^0\leftarrow\Omega^0/\{T_i\}$,否则执行$d_{jk}^n\leftarrow 0$;

步骤4　判断是否满足$\mathrm{Num}(\boldsymbol{D}^n,j)\leqslant Q_j$,以及是否对于每个$V_{jk}=1$,$j\in\{1,2,\cdots,J\}$,$k\in\{1,2,\cdots,K\}$,均有$d_{jk}^n\neq 0$,若满足,则保留当前抗体,并执行$N^F\leftarrow N^F+1$,$n\leftarrow n+1$,否则淘汰当前抗体;

步骤5　判断是否满足$N^F=N$,若满足,则初始可行解生成结束,否则转步骤2.

3.3　抗体浓度评价与激励度计算

抗体浓度表示抗体的多样性程度,抗体浓度过高意味着种群中非常相似的个体大量存在,导致寻优搜索集中于可行解区间的某一区域,不利于全局优化.因此,应对浓度过高的抗体进行抑制,以保证抗体的多样性.抗体$\boldsymbol{D}^n$的浓度计算公式如式(27)所示:

$$\mathrm{den}(\boldsymbol{D}^n)=\frac{1}{n_{\max}}\sum_{z=1}^{n_{\max}}\mathrm{sim}(\boldsymbol{D}^n,\boldsymbol{D}^z).\tag{27}$$

式中：$\boldsymbol{D}^z$表示编号为z的抗体；den($\boldsymbol{D}^n$)的值越大，表示与$\boldsymbol{D}^n$相似的抗体越多，$\boldsymbol{D}^n$的浓度越高；sim($\boldsymbol{D}^n$,$\boldsymbol{D}^z$)表示抗体$\boldsymbol{D}^n$与$\boldsymbol{D}^z$之间的相似度，可由式(28)计算：

$$\mathrm{sim}(\boldsymbol{D}^n,\boldsymbol{D}^z)=\begin{cases}1, \mathrm{aff}(\boldsymbol{D}^n,\boldsymbol{D}^z)\geqslant\varphi;\\ 0, \mathrm{aff}(\boldsymbol{D}^n,\boldsymbol{D}^z)<\varphi.\end{cases}\tag{28}$$

式中：aff($\boldsymbol{D}^n$,$\boldsymbol{D}^z$)表示$\boldsymbol{D}^n$与$\boldsymbol{D}^z$之间的亲和度，aff($\boldsymbol{D}^n$,$\boldsymbol{D}^z$)越大，表示$\boldsymbol{D}^n$与$\boldsymbol{D}^z$之间的亲和度越高，即$\boldsymbol{D}^n$与$\boldsymbol{D}^z$越相似；φ为相似度阈值，可在实验中自行设定；aff($\boldsymbol{D}^n$,$\boldsymbol{D}^z$)可通过海明距离公式来获得，如式(29)所示：

$$\mathrm{aff}(\boldsymbol{D}^n,\boldsymbol{D}^z)=\sum_{j=1}^{J}\sum_{k=1}^{K}\tau_{jk}^{nz}.\tag{29}$$

式中：$\tau_{jk}^{nz}\in\{0,1\}$为衡量$\boldsymbol{D}^n$与$\boldsymbol{D}^z$相同位置的元素值是否相等的变量，τ_{jk}^{nz}的取值规则如式(30)所示：

$$\tau_{jk}^{nz}=\begin{cases}1, d_{jk}^n=d_{jk}^z;\\ 0, d_{jk}^n\neq d_{jk}^z.\end{cases}\tag{30}$$

式中：d_{jk}^z表示抗体$\boldsymbol{D}^z$中操作S_j上P_k的多技能工索引，$d_{jk}^z\in\{0,1,\cdots,I\}$，$z\in\{1,2,\cdots,n_{\max}\}$；$d_{jk}^z\in\{1,2,\cdots,I\}$表示$S_j$上$P_k$由某一$T_i$操作，$i\in\{1,2,\cdots,I\}$；$d_{jk}^z=0$表示$S_j$中的$P_k$没有多技能工负责操作.

抗体质量的评价指标是抗体的激励度，一般来说，抗体的浓度越低，与目标函数之间亲和度越大，则抗体的激励度越大，抗体激励度的计算公式如式(31)所示：

$$\mathrm{exc}(\boldsymbol{D}^n)=\mathrm{aob}(\boldsymbol{D}^n)\cdot \mathrm{e}^{-\lambda\cdot\mathrm{den}(\boldsymbol{D}^n)}.\tag{31}$$

式中：exc($\boldsymbol{D}^n$)为抗体$\boldsymbol{D}^n$的激励度，exc($\boldsymbol{D}^n$)的值越大，表示$\boldsymbol{D}^n$的质量越高；aob($\boldsymbol{D}^n$)为抗体$\boldsymbol{D}^n$与目标函数之间的亲和度，如果$\boldsymbol{D}^n$对应的匹配方案不受其他抗体对应的匹配方案支配，则aob($\boldsymbol{D}^n$)=1，否则aob($\boldsymbol{D}^n$)=0；λ为激励参数，可根据实际情况确定.

变异是MOIA算法中产生有潜力的新抗体，实现区域搜索的重要操作.其本质是在抗体中加入一个小扰动，使其稍微偏离原来的位置，落入其邻域中的另一个位置，实现邻域内的搜索.本文提出的变异操作为：将$\boldsymbol{D}^n$中与S_j匹配的多技能工集合记为Ω^{nj}，随机选择$\boldsymbol{D}^n$的第q个克隆体中的非零元素$d_{jkq}^n(q=1,2,\cdots,q_{\max})$，以$\{i|T_i\in\Omega^{nj}\bigcap\Omega^{jk}\}$为范围改变$d_{jkq}^n$的取值，其中$q_{\max}$表示抗体克隆的倍数，变异概率$\xi$可根据实际情况确定.

3.4 IMOIA步骤

记GEN为当前迭代次数，$\mathrm{GEN}_{\max}$为最大迭代次数，IMOIA步骤如下所示：

步骤1 根据3.2节生成规模为$n_{\max}$的初始抗体种群，GEN$\leftarrow$0；

步骤2 根据3.3节计算每个抗体的亲和度、浓度与激励度；

步骤3 对抗体进行选择；

步骤4 判断是否满足$\mathrm{GEN}=\mathrm{GEN}_{\max}$，若满足，则转步骤6，否则转步骤5；

步骤5 根据3.4节对选择后的抗体进行克隆与变异，GEN$\leftarrow$GEN+1，转步骤2；

步骤6 输出Pareto解，算法结束.

4 算例分析

为了验证本文提出的匹配模型和IMOIA的有效性，本节首先给出实例描述，随后分析模型求解结果，最后对比不同算法的求解效果，以证实本文所提方法的有效性.

4.1 实例描述

某公司的滚动轴承生产车间采用HDSS，包含3个分割式赛汝和一条流水线，分割式赛汝为S_1，S_2和S_3，分别用来生产LFR滚动轴承、NUTR滚动轴承和RV滚动轴承的半成品，流水线工序为S_4，S_5和S_6.整个HDSS中包含的所有工序为：锻造(P_1)、退火(P_2)、车加工(P_3)、磨加工(P_4)、串软点(P_5)、冲压(P_6)、精研(P_7)、镗孔(P_8)、抛光(P_9)、酸洗(P_{10})、防锈工序(P_{11})、涂油(P_{12})、压盖(P_{13})、检测(P_{14})、包装(P_{15}).同时，车间包含15个多技能工，分别用$T_1,T_2,\cdots,T_{15}$表示，多技能工的技能水平概率分布均为$N(1.0,0.04)$，多技能工对工序的偏好序值向量根据离散均匀分布生成，作业单元上各工序对技能水平需求如表2所示，作业单元中工序的标准加工时间如表3所示，各作业单元的多技能工限额分别为$Q_1=Q_2=Q_3=4$，$Q_4=Q_5=Q_6=1$.

4.2 匹配方案生成结果分析

为了确定多技能工小组与作业单元的匹配方案，本文在Intel(R)Core(TM)i5-1035G1 CPU，内存为8.00 GB的Windows 10计算机上，使用MATLAB 8.0进行所有实验.IMOIA的参数设计为：$n_{\max}=100$，$t_{\max}=100$，$\varphi=0.20$，$\lambda=1.0$，$\xi=0.70$，$q_{\max}=5$，免疫选择方式为保留激励度排名位于前50%的抗体.为减少单次试验的误差，将IMOIA运行10次，算法收敛性曲线如图1所示.在剔除重复解后，共得到5个Pareto解，这些Pareto解对应的5个匹配方案和目标函数值如表4所示.

表2　作业单元中工序的技能水平需求

Table 2　Skill level requirements of processes on operation units

工序	P_1	P_2	P_3	P_4	P_5	P_6	P_7	P_8	P_9	P_{10}	P_{11}	P_{12}	P_{13}	P_{14}	P_{15}
S_1	1.2	1.3	1.3	1.3	M	M	1.4	1.3	1.3	M	M	M	M	M	M
S_2	1.3	M	1.3	1.3	M	1.2	1.4	M	M	1.3	1.2	M	M	M	M
S_3	1.2	M	M	1.2	1.2	M	M	M	1.3	1.3	1.2	1.4	M	M	M
S_4	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	1.1	M	M
S_5	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	1	M
S_6	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	1.2

表3　作业单元中工序标准加工时间

Table 3　Standard processing time of processes on operation units　　min

工序	P_1	P_2	P_3	P_4	P_5	P_6	P_7	P_8	P_9	P_{10}	P_{11}	P_{12}	P_{13}	P_{14}	P_{15}
S_1	6	4	5	6	0	0	10	6	6	0	0	0	0	0	0
S_2	6	0	5	6	0	5	10	0	0	7	5	0	0	0	0
S_3	6	0	0	6	9	0	0	0	6	7	5	5	0	0	0
S_4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	0	0
S_5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	0
S_6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3

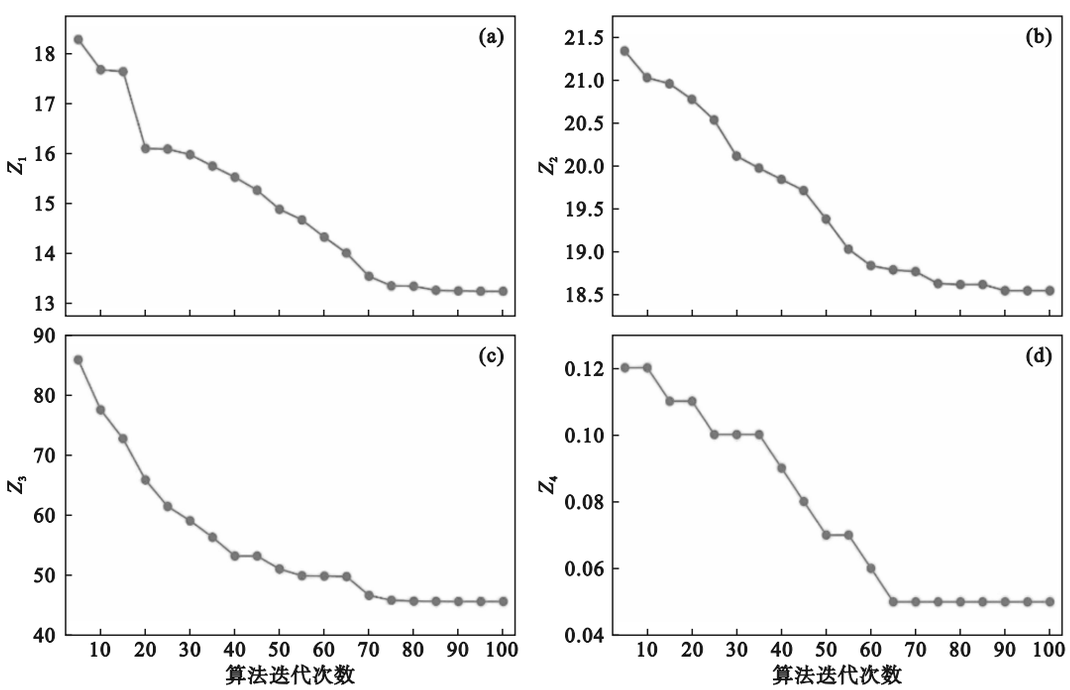


图1　算法收敛性曲线

Fig. 1　Algorithm convergence curves

(a)—Z_1随算法迭代次数增加的变化;(b)—Z_2随算法迭代次数增加的变化;(c)—Z_3随算法迭代次数增加的变化;(d)—Z_4随算法迭代次数增加的变化.

在图1a~图1d中,横轴均表示算法迭代次数,纵轴分别表示多技能工对作业单元中工序偏好度之和Z_1、作业单元中工序对多技能工偏好度之和Z_2、分割式赛汝内多技能工的工作时间偏差之和Z_3与分割式赛汝和流水线之间单位时间产出量偏差Z_4共4个目标函数值的变化情况.可以看出,随着算法迭代次数的增加,种群逐渐收敛到Pareto前沿,这表明算法具有良好的收敛性.在表4中,5个Pareto解对应的匹配方案各有优缺点,具体采用何种方案可由生产管理者决定.如果生产管理者更加重视多技能工偏好度,则μ_5是最好的选择;如果生产管理者更加重视作业单元上工序偏好度,或者希望HDSS运转流畅,即分割式赛汝与流水线单位时间产出量偏差更小,则应选择μ_2;如果生产管理者希望分割式赛汝中的多技能工工作负荷更平衡,分割式赛汝运转更流畅,则μ_3更加适合;如果生产管理者希望实现各优化目标之间的平衡,则μ_1与μ_4更有优势.

表4 多技能工与作业单元匹配方案与目标函数值

Table 4 Matching schemes for multi-skilled workers and operation units and objective function values

序号	Z_1	Z_2	Z_3	Z_4	多技能工与作业单元匹配方案
1	11.93	18.76	62.60	0.03	$\mu_1=\{(S_1:T_1\to P_1,P_2,P_3,\ T_2\to P_4,\ T_3\to P_7,P_8,P_9),$ $(S_2:T_5\to P_1,P_3,\ T_6\to P_4,P_6,P_7,\ T_7\to P_{10},P_{11}),$ $(S_3:T_8\to P_1,P_4,\ T_9\to P_5,\ T_{10}\to P_9,P_{10},P_{11},\ T_{11}\to P_{12}),$ $(S_4:T_{12}\to P_{13}),\ (S_5:T_{13}\to P_{14}),\ (S_6:T_{14}\to P_{15})\}$
2	14.65	17.73	54.90	0.01	$\mu_2=\{(S_1:T_2\to P_1,P_2,\ T_1\to P_3,P_4,\ T_5\to P_7,P_8,P_9),$ $(S_2:T_6\to P_1,P_3,P_4,\ T_8\to P_6,P_7,P_{10},\ T_{10}\to P_{11}),$ $(S_3:T_{12}\to P_1,P_4,\ T_7\to P_5,P_9,\ T_{13}\to P_{10},\ T_{15}\to P_{11},P_{12}),$ $(S_4:T_3\to P_{13}),\ (S_5:T_9\to P_{14}),\ (S_6:T_{14}\to P_{15})\}$
3	14.70	18.83	31.27	0.11	$\mu_3=\{(S_1:T_5\to P_1,P_2,P_3,\ T_6\to P_4,P_7,P_8,\ T_7\to P_9),$ $(S_2:T_9\to P_1,P_3,P_4,\ T_2\to P_6,P_7,\ T_3\to P_{10},P_{11}),$ $(S_3:T_8\to P_1,P_4,\ T_{10}\to P_5,P_9,\ T_{12}\to P_{10},P_{11},P_{12}),$ $(S_4:T_{15}\to P_{13}),\ (S_5:T_{14}\to P_{14}),\ (S_6:T_{13}\to P_{15})\}$
4	13.25	18.58	42.50	0.09	$\mu_4=\{(S_1:T_4\to P_1,P_2,\ T_5\to P_3P_4,\ T_1\to P_7,P_8,\ T_2\to P_9),$ $(S_2:T_3\to P_1,P_3,\ T_6\to P_4,P_6,\ T_8\to P_7,\ T_7\to P_{10},P_{11}),$ $(S_3:T_9\to P_1,P_4,\ T_{10}\to P_5,P_9,\ T_{12}\to P_{10},P_{11},\ T_{13}\to P_{12}),$ $(S_4:T_{15}\to P_{13}),\ (S_5:T_{14}\to P_{14}),\ (S_6:T_{11}\to P_{15})\}$
5	10.98	19.21	95.70	0.08	$\mu_5=\{(S_1:T_{10}\to P_1,P_2,P_3,\ T_9\to P_4,P_7,\ T_8\to P_8,\ T_{12}\to P_9),$ $(S_2:T_1\to P_1,P_3,\ T_2\to P_4,\ T_5\to P_6,P_7,P_{10},\ T_{11}\to P_{11}),$ $(S_3:T_6\to P_1,\ T_3\to P_4,P_5,P_9,\ T_4\to P_{10},P_{11},P_{12}),$ $(S_4:T_7\to P_{13}),\ (S_5:T_{14}\to P_{14}),\ (S_6:T_{15}\to P_{15})\}$

4.3 多技能工偏好对匹配方案的影响

为了验证考虑多技能工对工序的偏好对匹配方案的影响,本节在4.2节编程环境与参数设置的基础上,采用IMOIA求解不包含式(9)的模型.为减少单次试验的误差,将IMOIA运行10次,剔除重复解后得到的Pareto解共有5个.得到Pareto解与对应的匹配方案后,计算多技能工对作业单元中工序偏好度之和Z_1'.5个Pareto解对应的匹配方案,目标函数Z_2,Z_3与Z_4的值,以及Z_1'的值如表5所示.

表5 不考虑多技能工偏好的多技能工与作业单元匹配方案与目标函数值

Table 5 Matching schemes for multi-skilled workers and operation units and objective function values without considering preferences of multi-skilled workers

序号	Z_1'	Z_2	Z_3	Z_4	多技能工与作业单元匹配方案
1	19.25	18.65	53.85	0.09	$\mu_1'=\{(S_1:T_1\to P_1,P_2,P_7,\ T_8\to P_4,P_3,\ T_7\to P_8,P_9),$ $(S_2:T_5\to P_1,P_{10},\ T_{14}\to P_4,P_6,P_7,\ T_{12}\to P_3,P_{11}),$ $(S_3:T_2\to P_1,P_4,\ T_3\to P_5,P_9,\ T_{13}\to P_{10},P_{11},\ T_8\to P_{12}),$ $(S_4:T_4\to P_{13}),\ (S_5:T_9\to P_{14}),\ (S_6:T_{10}\to P_{15})\}$
2	18.77	18.58	60.05	0.02	$\mu_2'=\{(S_1:T_2\to P_1,P_2,\ T_1\to P_3,P_4,P_8,\ T_8\to P_7,P_9),$ $(S_2:T_3\to P_1,P_3,P_4,\ T_8\to P_6,P_7,P_{11},\ T_{10}\to P_{10}),$ $(S_3:T_4\to P_1,P_5,\ T_7\to P_4,P_9,\ T_{13}\to P_{10},P_{11},P_{12}),$ $(S_4:T_9\to P_{13}),\ (S_5:T_{12}\to P_{14}),\ (S_6:T_{14}\to P_{15})\}$
3	18.58	17.65	45.58	0.03	$\mu_3'=\{(S_1:T_1\to P_1,P_2,P_3,\ T_6\to P_4,P_8,\ T_3\to P_7,P_9),$ $(S_2:T_{11}\to P_1,P_3,\ T_2\to,P_4,P_6,P_7,\ T_8\to P_{10},P_{11}),$ $(S_3:T_5\to P_1,P_4,\ T_7\to P_5,P_9,P_{10},\ T_{10}\to P_{11},P_{12}),$ $(S_4:T_{14}\to P_{13}),\ (S_5:T_{15}\to P_{14}),\ (S_6:T_{13}\to P_{15})\}$
4	15.96	18.96	32.67	0.08	$\mu_4'=\{(S_1:T_9\to P_1,P_2,\ T_{12}\to P_3P_4,\ T_7\to P_7,P_8,\ T_2\to P_9),$ $(S_2:T_1\to P_1,P_6,\ T_6\to P_3,P_4,P_7,\ T_8\to P_{10},P_{11}),$ $(S_3:T_{10}\to P_1,P_4,\ T_{12}\to P_5,P_9,\ T_9\to P_{10},P_{11},\ T_{13}\to P_{12}),$ $(S_4:T_{15}\to P_{13}),\ (S_5:T_{14}\to P_{14}),\ (S_6:T_{11}\to P_{15})\}$
5	19.97	18.64	92.85	0.06	$\mu_5'=\{(S_1:T_{12}\to P_1,P_2,P_3,\ T_2\to P_4,P_7,\ T_1\to P_8,P_9),$ $(S_2:T_4\to P_1,P_3,P_4,\ T_{13}\to P_6,P_{10},P_{11},\ T_{11}\to P_7),$ $(S_3:T_{14}\to P_1,P_9,\ T_3\to P_4,P_5,,\ T_9\to P_{10},P_{11},P_{12}),$ $(S_4:T_{10}\to P_{13}),\ (S_5:T_7\to P_{14}),\ (S_6:T_{15}\to P_{15})\}$

对比表4与表5可知,表4中Z_1的平均值相较于表5中Z_1'的值降低了29.2%,这意味着考虑多技能工对工序的偏好可以在很大程度上提高多技能工对工序的满意程度.在这种情况下,由于多技能工操作的工序普遍是其更加满意的工序,因此可以更好地避免部分多技能工出于对操

作工序的不满而出现私下互换工序的情形,从而保证匹配方案的稳定执行;表4中Z_2与Z_3的平均值相较于表5均提高了0.7%,说明考虑多技能工对工序的偏好会降低工序对多技能工的满意程度,同时增加多技能工工作负荷偏差,但这种差别并不明显;表4中Z_4的平均值与表5相比提高了14%,但数值几乎没有变化,因此考虑多技能工对工序的偏好基本不会影响HDSS整体运转的流畅性.综上所述,考虑多技能工对工序的偏好对匹配方案具有重要意义.

4.4　多技能工有能力操作工序数量的影响

为了验证多技能工有能力操作的工序数量$\sum_{k=1}^{K}O_{ik}$对匹配方案的影响,本节针对算例中每个$T_i, i\in\{1,2,\cdots,15\}$,以1为步长,将$\sum_{k=1}^{K}O_{ik}$的值由5逐渐递增到15,并观察4个目标函数的变化趋势.为减少单次实验导致的误差,每组实验同样重复进行10次,4个目标函数的变化趋势如图2所示.

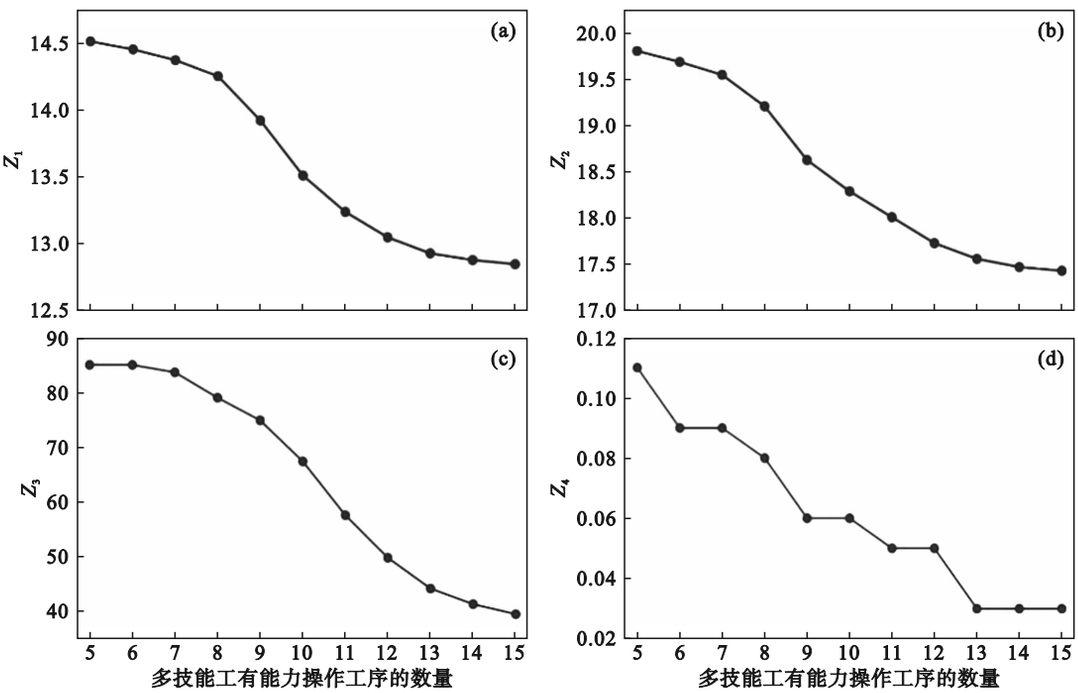


图2　多技能工有能力操作工序数量的影响

Fig. 2　Impact of number of processes that multi-skilled workers can operate

(a)—Z_1随多技能工有能力操作工序数量增加的变化;(b)—Z_2随多技能工有能力操作工序数量增加的变化;(c)—Z_3随多技能工有能力操作工序数量增加的变化;(d)—Z_4随多技能工有能力操作工序数量增加的变化.

由图2a可知,Z_1随$\sum_{k=1}^{K}O_{ik}$的递增逐渐下降,其原因在于$\sum_{k=1}^{K}O_{ik}$的递增拓展了每个多技能工对工序的偏好范围.因此,在匹配方案中,多技能工有更多机会操作其偏好的工序,提升了多技能工对工序的满意程度;由图2b可知,Z_2随$\sum_{k=1}^{K}O_{ik}$的递增逐渐下降,其原因在于$\sum_{k=1}^{K}O_{ik}$递增,说明多技能工能够以较高技能水平操作的工序数量增加.因此,作业单元中的工序有更多机会被相应技能水平更高的多技能工操作,提升了工序对多技能工的满意程度;由图2c可知,Z_3随$\sum_{k=1}^{K}O_{ik}$的递增逐渐下降,其原因在于$\sum_{k=1}^{K}O_{ik}$递增,说明每个多技能工有能力操作更多工序,因此,在匹配方案中,分割式赛汝有更多机会匹配到能使其运转更加流畅的多技能工,相应地,降低了分割式赛汝中多技能工工作时间偏差;由图2d可知,Z_4随$\sum_{k=1}^{K}O_{ik}$的递增逐渐下降,其原因在于$\sum_{k=1}^{K}O_{ik}$递增,说明每个多技能工有能力操作更多工序.因此,在匹配方案中,作业单元有更多机会匹配到能使整个HDSS工作节奏更加一致的多技能工,相应地,降低了分割式赛汝与流水线的单位时间产出量偏差.

4.5　算法对比

为了验证本文提出的IMOIA在匹配方案生成中的优良性能,将其与经典MOIA算法、改进MOIA算法[20]以及离散和声搜索算法(DHS)进行仿真对比.经典MOIA算法与改进MOIA算法的参数设置与免疫选择方式与IMOIA相同,DHS算法的参数设置为:和声库规模HMS=100,最大

迭代次数 NI = 100，记忆考虑率 HMCR = 0.85，音调微调率 PAR = 0.30，音调微调带宽 BW = 1. 本文基于快速可行解生成方法生成的初始可行解，以解集覆盖率[21]、世代距离[22]、空间评价指标[23]为评价标准，对不同算法的性能进行比较. 令 A_g 表示 4 种算法中的某一种，$A_g \in \{\text{IMOIA, MOIA, 改进 MOIA, DHS}\}$，其中 $g \in \{1,2,3,4\}$，Ψ_g 表示由 A_g 得到的 Pareto 解集，$|\Psi_g|$ 表示 Ψ_g 中解的个数，PA 表示 $\bigcup_{g=1}^{4}\Psi_g$ 的 Pareto 前沿，|PA| 表示 PA 中解的个数. Ψ_g 的解集覆盖率 $C(\Psi_g)$ 如式(32)所示：

$$C(\Psi_g)=\frac{|\{x\in \text{PA}|\exists y\in\Psi_g: y\succcurlyeq x\}|}{|\text{PA}|}. \tag{32}$$

式中，$C(\Psi_g)\in[0,1]$，$C(\Psi_g)$ 越大，Ψ_g 的支配性越强，$y\succcurlyeq x$ 表示解 y 不劣于解 x.

Ψ_g 的世代距离 $\text{GD}(\Psi_g)$ 表达式如式(31)所示：

$$\text{GD}(\Psi_g)=\frac{\sum_{x\in\Psi_g} L(x,\text{PA})}{|\Psi_g|}. \tag{33}$$

式中：$L(x,\text{PA})$ 是点 $x\in\Psi_g$ 到 PA 的最小欧氏距离，$\text{GD}(\Psi_g)$ 越小，Ψ_g 越接近 PA.

Ψ_g 的空间评价指标 $\text{SP}(\Psi_g)$ 如式(33)所示：

$$\text{SP}(\Psi_g)=\sqrt{\frac{1}{|\Psi_g|-1}\sum_{v=1}^{|\Psi_g|}(\bar{L}-L_v)^2}. \tag{34}$$

式中：L_v 为 Ψ_g 中第 v 个点到其他点的最小欧氏距离；$\bar{L}$ 为 L_v 的均值；$\text{SP}(\Psi_g)$ 越小. Ψ_g 中解的分布越均匀. 此外，记 $t(\Psi_g)$ 为得到 Ψ_g 所需时间(单位：秒)，为减少单次实验导致的误差，每一组实验同样重复进行 10 次，算法性能对比结果如表 6 所示.

表 6 匹配方案生成中算法性能对比结果

Table 6 Comparison results of algorithm performance in generation of matching schemes

评价标准	算例规模	IMOIA	MOIA	改进 MOIA	DHS
$\|\Psi_g\|$	8×4	2	1	1	1
	15×6	4	2	2	1
	30×10	11	6	6	3
	50×15	21	12	13	8
$C(\Psi_g)$	8×4	0. 50	0. 25	0. 25	0
	15×6	0. 52	0. 16	0. 16	0. 16
	30×10	0. 55	0. 14	0. 18	0. 13
	50×15	0. 54	0. 13	0. 21	0. 12
$\text{GD}(\Psi_g)$	8×4	1. 82 E−04	2. 17 E−03	1. 91 E−03	2. 23 E−03
	15×6	1. 91 E−04	2. 55 E−03	2. 79 E−03	2. 85 E−03
	30×10	1. 86 E−04	2. 83 E−03	2. 76 E−03	3. 07 E−03
	50×15	1. 84 E−04	2. 47 E−03	2. 91 E−03	2. 98 E−03
$\text{SP}(\Psi_g)$	8×4	4. 51 E−01	5. 29 E−01	5. 19 E−01	6. 18 E−01
	15×6	4. 65 E−01	5. 84 E−01	5. 75 E−01	6. 46 E−01
	30×10	4. 81 E−01	5. 99 E−01	5. 86 E−01	6. 53 E−01
	50×15	4. 63 E−01	5. 87 E−01	5. 81 E−01	6. 71 E−01
$t(\Psi_g)$/s	8×4	15. 11	14. 53	14. 72	6. 52
	15×6	48. 51	41. 33	43. 66	37. 47
	30×10	87. 33	80. 87	82. 12	62. 89
	50×15	144. 12	138. 27	140. 89	131. 01

表 6 中的对比结果显示，在 4 种不同算例规模下，IMOIA 得到的 Pareto 解数量多于其他算法，说明 IMOIA 在寻优能力上具有一定优势；IMOIA 的解集覆盖率明显大于其他算法，说明 IMOIA 求得的 Pareto 解具有更强的支配性；IMOIA 的世代距离明显小于其他算法，说明 IMOIA 具有更强的收敛性；IMOIA 的空间评价指标小于其他算法，说明 IMOIA 求得的 Pareto 解分布更加均匀；IMOIA 求解所需时间略长于其他算法，但是与其他算法的运行时间相差极小. 综上所述，与其他算法相比，本文提出的 IMOIA 在模型求解方面具有更好的效果.

5 结 语

1) 本文针对技能水平随机情形下 HDSS 中多技能工与作业单元的匹配方案生成问题，建立了多技能工与作业单元匹配的多目标随机规划模型，并提出了 IMOIA 进行求解. 数值实验表明，本文提出的方法可在短时间内生成多技能工与作业单元匹配方案，同时，匹配方案的数量和质量具有明显优势.

2) 与已有研究成果相比，本文考虑了多技能工对工序的偏好，以及多技能工技能水平的随机

性,因而更加具有现实意义.本文的建模思想还可用于解决其他考虑技能限制的匹配方案生成与调整问题,例如维修任务与维修工人的匹配问题、订单与供应商的匹配问题、医生与患者的匹配问题等.

3)在未来的研究中,可以考虑存在多技能工培训、极端事件风险等情形下多技能工的动态匹配;可以考虑多技能工的技能水平服从其他概率分布,甚至概率分布未知的情形;可以引入分布式鲁棒优化方法与条件风险值目标函数,从而提升模型的鲁棒性.

参考文献:

[1] 中国汽车新闻工作者协会.新质生产力理论构建工作和思考[EB/OL].(2024-02-04)[2025-03-19].http://www.cnaja.com/hyyw/898.html.
(China National Automotive Jounalist Association. Work and thinking on the construction of new quality productive force theory [EB/OL]. (2024-02-04) [2025-03-19]. http://www.cnaja.com/hyyw/898.html.)

[2] 中华人民共和国中央人民政府.中央经济工作会议在北京举行 习近平发表重要讲话[EB/OL].(2023-12-12)[2025-03-19].https://www.gov.cn/yaowen/liebiao/202312/content_6919834.htm.
(Central People's Government of the People's Republic of China. Xi Jinping delivered an important speech at the Central Economic Work Conference [EB/OL]. (2023-12-12) [2025-03-19]. https://www. gov. cn/yaowen/liebiao/202312/content_6919834.htm.)

[3] 科技日报.以高水平科技自立自强助力现代化建设——代表委员热议政府工作报告[EB/OL].(2024-03-06)[2025-03-19]. https://www. cas. cn/zt/hyzt/2024lh/2024qglh_mtbd/202403/t20240306_5007565.shtml.
(Science and Technology Daily. Helping modernization with high-level science and technology self-reliance and self-reliance: representatives and committee members deeply discussed the government work report [EB/OL]. (2024-03-06) [2025-03-19]. https://www.cas.cn/zt/hyzt/2024lh/2024qglh_mtbd/202403/t20240306_5007565.shtml.)

[4] 任玉红,唐加福,王晔.基于IPO系统观的SERU系统柔性的分析框架[J].系统工程理论与实践,2022,42(11):3030-3043.
(Ren Yu-hong, Tang Jia-fu, Wang Ye. SERU system flexibility analysis framework based on IPO system view [J]. *Systems Engineering-Theory & Practice*, 2022, 42(11): 3030-3043.)

[5] Liu F, Niu B, Xing M Z, et al. Optimal cross-trained worker assignment for a hybrid seru production system to minimize makespan and workload imbalance [J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2021, 160: 107552.

[6] Xu X, Lu Y Q, Vogel-Heuser B, et al. Industry 4.0 and industry 5.0: inception, conception and perception [J]. *Journal of Manufacturing Systems*, 2021, 61: 530-535.

[7] Wu Y H, Zeng S Y, Li B B, et al. A bi-objective approach for the multi-skilled worker assignment of a hybrid assembly line-seru production system[J]. *RAIRO-Operations Research*, 2024, 58(2): 1187-1206.

[8] Li B B, Wu Y H. Integrated optimization of worker assignment, batch splitting and scheduling for a hybrid assembly line-seru production system [J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2024, 194: 110399.

[9] Yu Y, Sun W, Tang J F, et al. Line-hybrid seru system conversion: models, complexities, properties, solutions and insights [J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2017, 103(C): 282-299.

[10] Wu Y T, Wang L, Chen J F. A cooperative coevolution algorithm for complex hybrid seru-system scheduling optimization [J]. *Complex & Intelligent Systems*, 2021, 7(5): 2559-2576.

[11] Yılmaz 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.

[12] Yılmaz G B, Yılmaz Ö F, Çevikcan E. Lot streaming in workforce scheduling problem for seru production system under Shojinka philosophy [J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2023, 185: 109680.

[13] Jiang Y J, Zhang Z, Gong X, et al. An exact solution method for solving seru scheduling problems with past-sequence-dependent setup time and learning effect [J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2021, 158: 107354.

[14] Miao Q Q, Bai Z Y, Liu X B, et al. Modelling and numerical analysis for seru system balancing with lot splitting [J]. *International Journal of Production Research*, 2023, 61(21): 7410-7433.

[15] Kleywegt A J, Shapiro A, Homem-de-Mello T. The sample average approximation method for stochastic discrete optimization [J]. *SIAM Journal on Optimization*, 2002, 12(2): 479-502.

[16] 于洋,李晓龙,崔思国.赛汝生产系统构建与调度的研究进展[J].系统工程理论与实践,2021,41(2):465-474.
(Yu Yang, Li Xiao-long, Cui Si-guo. Research agenda on the formation and scheduling of SERU production system [J]. *Systems Engineering-Theory & Practice*, 2021, 41(2): 465-474.)

[17] Zheng T W, Jiang Y P. Driver-rider matching and route optimization in carpooling service for delivering intercity commuters to the high-speed railway station [J]. *Expert Systems with Applications*, 2023, 227: 120231.

[18] Chen X L, Li J Q, Xu Y. Q-learning based multi-objective immune algorithm for fuzzy flexible job shop scheduling problem considering dynamic disruptions [J]. *Swarm and Evolutionary Computation*, 2023, 83: 101414.

[19] Zhang Z H, Wang X X, Lu J X. Multi-objective immune genetic algorithm solving nonlinear interval-valued programming [J]. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2018, 67(C): 235-245.

[20] Zhu S F, Cai J H, Sun E L. Mobile edge computing offloading scheme based on improved multi-objective immune cloning algorithm [J]. *Wireless Networks*, 2023, 29(4): 1737-1750.

[21] 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.

[22] Coello C A C, Pulido G T, Lechuga M S. Handling multiple objectives with particle swarm optimization [J]. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 2004, 8(3): 256-279.

[23] 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.