

考虑柔性资源技能进化的多项目组合调度问题

陆志强[†], 陈丞

(同济大学 机械与能源工程学院, 上海 201804)

摘要:在飞机移动装配线中,人力资源的技能水平可以通过一定时间的学习培训得到提升.针对该现象,提出了在已知期望人力资源结构条件下考虑柔性资源技能进化的多项目组合调度问题,建立了以最小化达到目标人力资源结构所需项目个数和投入总成本为目标的混合整数规划模型.针对该模型,设计了一种多层链表结构编码方式的混合多目标教学优化算法,并结合邻域搜索提高算法的局部搜索能力.最后,通过实验数据结果验证了本文模型与算法的有效性.

关键词:人力资源结构;人员培训;项目调度;多目标优化

中图分类号:F273

文献标志码:A

Multi-project Portfolio Scheduling Problem Considering Skill Evolution of Flexible Resource

LU Zhiqiang[†], CHEN Cheng

(School of Mechanical Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: In the aircraft mobile assembly line, the skill level of human resources can be improved through a certain period of learning by doing. For this phenomenon, a multi-project portfolio scheduling problem considering the skill evolution of flexible resource under the known expected human resource structure is proposed, and a mixed integer programming model is established to minimize the number of projects and the total input cost required to achieve the target human resource structure. To solve this model, a hybrid multi-objective teaching optimization algorithm with multi-layer linked list structure encoding is designed, and the neighborhood search is combined to improve the local search ability of the algorithm. Finally, the results of experimental data verify the effectiveness of this model and algorithm.

Key words: human resource structure; staff training; project scheduling; multi-objective optimization

目前,大型设备装配过程的调度问题可以被抽象为资源受限项目调度问题^[1]及其扩展问题.对于飞

机移动装配线来说,多架飞机连续通过工位则可以看作多个串行项目的组合调度问题,对项目作业及

* 收稿日期:2020-10-09

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61473211,71171130),National Natural Science Foundation of China(61473211,71171130)

作者简介:陆志强(1968—),男,江苏太仓人,同济大学教授,博士生导师

[†] 通信联系人, E-mail: zhiqianglu@tongji.edu.cn

资源建立合理的调度计划仍是企业生产管理的重要点.在飞机装配中,人力资源是关键资源之一,然而目前生产中人力资源技能水平不高、结构不合理的现状未得到根本性改变.技能水平较低的人力资源可能会导致更长的作业时间和更差的产品质量,而人力资源结构不合理则会导致部分人力资源的缺失以及部分人力资源的浪费.因此对企业长期发展来说,明确人力资源结构同时构建合理高效的柔性人力资源培训体系极为重要.由于人力资源可以通过在项目作业中不断学习来提升技能水平,企业中一种常见的内部人力资源培训方法是在实际项目作业中培训技能水平较低的人力资源.但这种培训方式可能与生产相冲突,企业投入的人力资源整体技能水平过低会导致项目逾期完成或者更多的资源投入.为解决此问题,本文提出考虑柔性资源技能进化的多项目组合优化调度问题,将项目作业调度与人力资源培训进行耦合建模研究,其目的为在满足生产需求的条件下更快更低成本地培训符合要求的柔性人力资源.

考虑柔性资源技能进化的多项目组合优化调度问题具体可分为两个部分:单项目内的作业开始时间与人力资源调度,多项目下人力资源培训方向的确定.在单个项目内,员工的技能水平变化不大,可以看作固定技能水平的多技能资源约束项目调度问题. Bellenguez 等^[2]率先对带有技能水平的基本多技能资源约束项目调度问题进行了研究,认为其可看成多模式资源约束项目调度问题的扩展,并证明了该问题是 NP-hard 问题. Lian 等^[3]在浆液生产系统中考虑了工人技能和熟练程度的差异,同时解决了工作人员分组、单元加载和任务分配. Barz 等^[4]使用离散时间马尔可夫决策过程解决了电讯业中的具有分层技能结构的多技能资源的资源分配问题. Walter 等^[5]构造了混合整数线性模型以最大程度地减少不同技能水平的多技能工人团队规模,并设计了三种构造试探法加速商用求解器的求解.任逸飞等^[6]认为资源技能水平会对作业时间产生影响,并将资源分为关键和辅助 2 类,以最小化项目总工期为目标建立优化模型. Maghsoudlou 等^[7]同时考虑了员工的技能水平会引起作业返工风险的差异,并将以项目的执行成本和作业的返工风险作为目标函数.上述研究均认为技能水平的差异会对作业的时间和质量产生一定影响,并在考虑该影响的情况下对单项目内固定技能水平的项目调度问题进行了求解优化.

当问题扩展成多个项目,员工的技能水平变化

情况则应当被考虑,同时需要对该变化引起的生产调度的影响进行具体的讨论. Liu 等^[8]在动态蜂窝制造系统中考虑了工人的学习和遗忘作用,认为学习和遗忘作用使得工作站的生产率变化,有必要重新分配多技能工人. Mehmanchi 等^[9]在多技能项目调度中考虑到学习和遗忘对人类技能的影响,并利用线性近似技能效率的指数变化,通过实验验证了其简化近似的有效性. Chen 等^[10]研究了 IT 行业中考虑员工学习能力的人员分配,综合考虑了员工整体技能水平的提高,公司的发展效率和产品质量,员工技能增长按照学习曲线. Hossein 等^[11]考虑了资源受限问题中的资源学习情况,利用社交网络来研究不同资源间效率的交互情况. Huan 等^[12]在并行生产系统中同时考虑了员工独自的学习经历和同组员工间的相互学习,做出员工分组和分配决策,以最大化制造系统的产出量. Bruecker 等^[13]在飞机维修行业中首先得到便宜的劳动力组合然后求解了最佳可行的培训计划.以上研究虽考虑了员工技能水平的变化,但其主要目标仍然是对项目的调度,而不是人力资源的培训.

总之,目前对大型工业品装配过程中考虑人力资源培训的研究较少,并且研究目标多为最大化人力资源技能水平的增长量,这种优化可能会导致单个项目资源技能水平增长快而后续项目中增长缓慢.针对现有文献的不足,本文以飞机装配线为背景,在已知期望人力资源结构的条件下,通过学习曲线来描述项目进行人力资源的技能增长过程,以最小化人力资源结构达到理想结构所经历过的项目个数和投入总成本为目标,建立了多目标混合整数规划模型,并设计了相应的混合多目标教学优化算法进行求解.

1 问题描述及数学模型

1.1 问题描述与基本假设

某企业一条生产线上需连续装配 N 架飞机,各飞机的型号序列已知,保证各架飞机按序串行生产,不可并行.每装配一架飞机都被抽象成执行一个项目,每个项目由多个作业组成,各作业只有在满足时序约束的条件下才可以执行,并需要一定数量一定技能的人力资源,其实际作业时间由分配的人力资源技能等级决定.现有人力资源的技能水平和目标人力资源技能需求已知.各资源在执行作业的过程中,只增加已有技能的熟练度,而不会增加新的技能.由于技能效率增长缓慢,假设在项目执行过程中

技能效率是不变的,只有在项目结束时才计算技能效率的增长量,并代入到下一个项目中.该问题的目标是在保证各个项目在其给定工期内完成的条件下,最小化每个项目的资源使用成本和最小化现有资源达到目标要求所经过的项目个数.

1.2 参数与变量

本文模型中所涉及的决策变量与参数分别如表 1 和表 2 所示.

表 1 模型所涉决策变量

Tab.1 Decision variables in the model

决策变量	定义
x_{ijd}	0,1 变量,项目 i 中的作业 j 在 d 时刻处于执行状态则为 1,否则为 0
y_{jrsd}	0,1 变量,资源 r 在项目 i 中的 d 时刻使用技能 s 执行作业 j 则为 1,否则为 0
z_{ijrs}	0,1 变量,资源 r 在项目 i 中使用技能 s 执行作业 j 则为 1
p_{rr}	0,1 变量,原资源 r 培养成目标资源 r^a 则为 1,否则为 0,其中 $r \in R_c, r^a \in R_c^a$

表 2 模型所涉参数

Tab.2 Parameters in the model

参数	定义
$I=\{0,1,2,\dots,i,\dots,N\}$	项目集合,其中 0 表示开始的虚拟项目
i	项目编号
T_i	项目 i 的工期
$J_i=\{0,1,2,\dots,j,\dots,n_i\}$	项目 i 的作业集合,其中 0 表示唯一开始的虚拟作业
j	作业编号
$pre(ij)$	项目中 i 第 j 项作业的紧前作业集合
q_{ijs}	项目 i 作业 j 对技能 s 的需求量
t_{ij}	项目 i 作业 j 基准作业时间 (作业的最小完成时间)
t_{ij}^a	项目 i 作业 j 的实际作业时间
$S_s=\{1,2,\dots,s,\dots,S\}$	技能集合
s	技能编号
$L_s=\{1,2,\dots,l_s,\dots,L_s\}$	技能 s 的技能等级集合
l_s	技能 s 的 l 等级
$\eta_{ls}^{\max}, \eta_{ls}^{\min}$	技能水平 l 的技能效率上界和下界
$R_c=\{1,2,\dots,r,\dots,R\}$	现有资源集合
r	资源编号
ΔT_{irs}	项目 i 结束后,资源 r 技能 s 的累积作业时间
l_{irs}	项目 i 结束后,资源 r 技能 s 的等级
η_{irs}	项目 i 结束后,资源 r 技能 s 的效率
$R_c^a=\{1,2,\dots,r^a,\dots,R^a\}$ ($R^a \leq R$)	目标资源集合
l_s^a	目标资源 r 技能 s 的技能等级
d	离散时间点

1.3 技能效率与技能增长模型

人力资源的技能效率 $\eta(0 < \eta \leq 1)$ 代表着作业的基准作业时间 t_{ij} 与其执行作业实际作业时间 t_{ij}^a 的比值,如果作业只需要一个资源,则有 $t_{ij}^a = t_{ij}/\eta$. 人力资源的技能效率 η 越接近 1,其实际作业时间越接近作业最小时间.当作业需要多个资源时,实际作业时间取决于所投入资源的平均技能效率,如式 (1) 所示:

$$t_{ij}^a = \left[t_{ij} / \left(\sum_{s \in S_c} \sum_{r \in R} \eta_{irs} \cdot z_{ijrs} \cdot q_{ijs} / \sum_{s \in S_c} q_{ijs} \right) \right], \forall i, j \quad (1)$$

人力资源的技能效率增长是普遍存在的,只要人力资源使用技能,其技能效率就会自动增长.目前,对学习过程的建模方式种类繁多,但根据 Grosse 等^[14]的分析,其中最有效的仍是 Wright 所提出的指数学习曲线^[15]:

$$T_u = T_1 \cdot u^{-a} \quad (2)$$

式(2)代表着重复生产一件产品的单件生产时间和作业次数的关系, T_1 和 T_u 分别表示生产第 1 个和第 u 个产品所用时间, a 表示学习效率 ($0 < a < 1$, a 越大学习越快).该模型是作业时间和作业次数的关系,不适用于飞机装配项目中,因此对其加以改动,将其更改为技能效率和累积技能使用时间之间的关系.假设生产一个产品的标准时间为 t_s ,初始技能效率和生产第 u 个产品时的技能效率分别为 $\eta_1 = t_s/T_1$ 和 $\eta_u = t_s/T_u$,生产第 u 个产品累积技能使用时间为 $\Delta T_u = ut_s$,将其代入式(2)并化简得到式(3):

$$\eta_u = \eta_1 \cdot (\Delta T_u / t_s)^a \quad (3)$$

虽然人力资源的技能效率能够增长,但是这种增长速率是缓慢的,因此可以假设在单个项目执行过程中人力资源技能效率是不变的,只有在当前项目结束切换到下一个项目时才计算其技能效率的增长量.对人力资源在项目中使用技能 s 执行作业的时间进行求和,代入到式(3)得到资源技能效率和累积技能使用时间在项目切换中的变换公式:

$$\begin{cases} \eta_{irs} = \eta_{(i-1)rs} \cdot (\Delta T_{irs} / \Delta T_{(i-1)rs})^a \\ \Delta T_{irs} = \Delta T_{(i-1)rs} + \sum_{l \in L} \sum_{j \in J_i} \sum_{s \in S_c} z_{ijrs} t_{ij} \end{cases}, \forall i, j, s \quad (4)$$

1.4 数学模型

$$\min F = (f_1, f_2) \quad (5)$$

$$f_1 = \min_{i \in I} \{i \cdot h_i + (1 - h_i)M\} \quad (6)$$

$$f_2 = \sum_{i=1}^N \left(\sum_{r=1}^R c_{ir} \max_{d \in [1, T_i]} \sum_{j=1}^{n_i} \sum_{s=1}^S y_{jrsd} \right) \quad (7)$$

s.t.

$$h_i = \begin{cases} 1, & \text{if } \forall l_{irs} p_{rr'} = l_{rs}^a, r \in R_c, r' \in R_c^a \\ 0, & \text{else} \end{cases} \quad (8)$$

$$z_{ijsr} = \begin{cases} 1, & \text{if } \forall y_{ijrds} = 1, \forall i, j, r, d, s \\ 0, & \text{else} \end{cases} \quad (9)$$

$$\sum_{d=1}^{T_i} x_{ijd} = t_{ij}^a, \forall i \in I, \forall j \in J_i \quad (10)$$

$$t_{ip}^a x_{ijd} \leq \sum_{k=1}^{d-1} x_{pk}, \forall p \in \text{pre}(ij), \\ \forall i \in I, \forall j \in J_i, \forall d \in D \quad (11)$$

$$t_{ij}^a x_{ijd} - t_{ij}^a x_{ij(d+1)} + \sum_{k=d+2}^{T_i} x_{ijk} \leq t_{ij}^a, \\ \forall i \in I, \forall j \in J_i, \forall d \in D \quad (12)$$

$$\sum_{r \in R_c} y_{ijrds} = q_{ijs} \times x_{ijd}, \\ \forall i \in I, \forall j \in J_i, \forall d \in D, \forall s \in S_c \quad (13)$$

$$t_{ij}^a \times y_{ijrds} = \sum_{d=1}^{T_i} y_{ijrds}, \forall i \in I, \forall j \in J_i, \\ \forall r \in R_c, \forall d \in D, \forall s \in S_c \quad (14)$$

$$\sum_{j \in J_i} \sum_{s \in S_c} y_{ijrds} \leq 1, \forall i \in I, \forall r \in R_c, \forall d \in D \quad (15)$$

$$\sum_{j \in J_i} y_{ijrds} \leq 1, \forall i \in I, \forall r \in R_c, \forall d \in D, \forall s \in S_c \quad (16)$$

$$\sum_{r' \in R_c^a} p_{rr'} \leq 1, \forall r \in R_c \quad (17)$$

$$\sum_{r \in R_c} \sum_{r' \in R_c^a} p_{rr'} \leq R^a \quad (18)$$

$$x_{ijd}, y_{ijrds}, z_{ijsr}, p_{rr'} = \{0, 1\}, \forall i \in I, \forall j \in J_i, \\ \forall r \in R_c, \forall d \in D, \forall s \in S_c$$

其中,式(6)表示最小化现有人力资源达到目标人力资源结构所经历过的项目个数;式(7)表示最小生产总成本;式(8)表示只有当所有人力资源都达到要求时培训才算完成;式(9)表示决策变量 z_{ijsr} 与 y_{ijrds} 间的关系;式(10)表示各个作业在工期内都可以被执行完成;式(11)表示时序约束,每一项作业在其所有紧前作业完成后才开始;式(12)表示作业一旦开始就不能结束;式(13)表示作业在满足技能需求的情况下才能进行;式(14)表示资源是非抢占式的;式(15)表示资源只能执行作业一种技能;式(16)表示资源同时只能执行一项作业;式(17)表示每个现有人力资源最多只能培训成一个目标资源;式(18)表示所有目标资源都需要得到培训;式(19)表示决策变量的取值范围。

2 算法设计原理

本文问题属于 NP-hard 问题,并且即使各个项目的规模很小,整合起来的规模仍然很大,很难在有效时间内得到精确解,因此可行且有效的方法是通过智能搜索算法获取近似的 Pareto 解集.本文设计了一种混合多目标教学优化算法(HMOTLBO).在该算法中,对资源培训方向和项目的具体调度方案编码,并在传统教学优化算法中的教学阶段引入自适应变化因子,在学习阶段将自我学习与向他人学习相结合,同时在迭代中引入邻域搜索以提高算法的局部搜索能力.

2.1 问题复杂性分析

关于本文问题的计算复杂性,有如下性质:

性质 1 本文问题具有 NP-Hard 的计算复杂性.

证 当所有各种技能只有一种水平且各资源均为单技能资源并且技能无法进化时,即 $|L_{sc}| = 1$, $\sum_{s \in S_c} [\eta_{rs}] = 1, a_r = 0$ 时,本文问题退化为多个基本 RCPSp 问题.由于 RCPSp 问题具有 NP-Hard 的计算复杂性,依据调度问题计算复杂性递阶关系,本文问题同样属于 NP-Hard 问题.证毕.

2.2 编码与解码

本文在对解码编码时需要同时考虑到项目内的作业次序,为作业分配一定数量的资源,人力资源在作业中使用恰当的技能以及人力资源的培养方向.由于需要处理的信息过多,传统的任务列表编码很难求得较优解.本文引用 Maghsoudlou 等^[7]的多层链表编码同时考虑到作业、技能和资源三个层面,可以有效地解决该问题,同时本文对其加以改进,将资源培养方向囊括进去.如图 1 所示,编码可分为两层,第一层为资源培训方向,共有 1 行 R 列, R 为现有资源数量.其编码值为非负整数,正整数代表其要培养成的资源序号,0 代表其没有培训方向,例如现有 1 号资源没有培训方向,而现有 2 号资源需要培训为目标 1 号资源.编码第二层为调度编码,共有 $2 + \max q_{ijs}$ 行和 L 列, L 为项目的各种活动所需的技能总和.第 1 行为作业调度次序,第 2 行为技能分配次序,其余为资源对作业的分配.其编码值为随机生成的 0 到 1 的小数.

编码的解码过程主要包括两部分:一是对单个项目内的作业和资源进行具体的调度;二是随着项目计算并更新资源的总投入以及资源技能效率的变

化情况. 单项目内的调度存在两种方式, 一种是资源未培训达标时同时考虑资源培训和成本的调度方式, 另一种是资源培训达标后只考虑成本的调度方式. 整体解码具体步骤如图 1 所示。

资源培训方向	0	1	2	0	0	
作业安排	0.612 7	0.286 3	0.974 3	0.146 5	0.578 3	0.487 2
技能安排	0.224 5	0.619 9	0.599 0	0.884 3	0.142 7	0.736 2
资源安排	0.420 0	0.060 6	0.043 3	0.618 5	0.332 0	0.306 1
	0.326 3	0.130 4	0.494 4	0.863 0	0.436 2	0.596 2

图 1 编码
Fig.1 Coding

Step1:项目 $i = 1$, 初始成本 $C = 0$;

Step2:判断资源是否全部达标, 如果达标则输出 $f_i = i - 1$, 转 step4; 否则转 step3;

Step3:按照最小成本与资源培训的方式对项目 i 进行调度, 并计算项目 i 所用成本 $C_i, C = C + C_i, i = i + 1$, 转 step2;

Step4:按照最小成本方式对项目 i 进行调度, 并计算项目 i 所用成本 $C_i, C = C + C_i$;

Step5:判断 i 是否等于项目总数 N , 如果不等于则输出 $i = i + 1$, 转 step4; 否则, 则输出 $f_2 = C$, 同时解码过程结束。

以一个 3 作业、3 技能、每个技能 2 水平的示例来对编码中单项目的调度方案解码进行说明. 其中每种技能的等级划分界限均为 0.7 (即技能效率在 0~0.7 间的等级为 1 级, 技能效率在 0.7~1 间的等级为 2 级). 作业次序与技能需求如表 3 所示, 现有资源技能效率和目标资源等级分别如表 4 和表 5 所示. 根据以上信息对图 1 中的编码进行单项目的解码。

表 3 作业次序与技能需求

Tab.3 Predecessor sets and skills required

作业	紧前作业	技能 1	技能 2	技能 3
作业 1	—	1	1	0
作业 2	—	0	1	2
作业 3	作业 2	1	0	2

单项目内具体的调度方案由三部分组成: 作业执行次序、技能分配次序和资源对作业的分配. 作业执行次序由调度编码的第一行来决定. 将每确定一个作业次序视为一个阶段 step, 初始阶段为 1. 在每

一阶段中, 将所有紧前作业已完成的作业放入到可开始作业集合中, 将可开始作业数目与调度编码中 (1, step) 的编码值相乘并向上取整得到 A 值, 则将要开始作业为可开始作业集合中的第 A 个作业, 如表 6 中阶段 1 的可开始作业为作业 1 和 2, A 值为 2, 最先开始的作业为可开始作业集合中的第 2 个作业即作业 2. 每一阶段都更新可开始作业集合, 并在确定作业次序后将其从可开始作业集合中删除, 重复以上步骤, 直到所有作业分配完成. 由表 6 得到最终作业调度次序为 2, 1, 3.

表 4 现有资源技能效率

Tab.4 Skill efficiency of existing resources

资源	技能 1	技能 2	技能 3
资源 1	0.6	0.9	0.8
资源 2	0.6	0.5	0
资源 3	0.6	0	0.6
资源 4	0.5	0	0.9
资源 5	0	0.8	0.6

表 5 目标资源技能等级

Tab.5 Target resource skill level

资源	技能 1	技能 2	技能 3
资源 1	2	1	0
资源 2	2	0	2

表 6 作业次序的确定

Tab.6 Sequence of activities specified

阶段	作业	A	作业次序
1	1, 2	$0.6127 * 2 = 2$	2
2	1, 3	$0.2863 * 2 = 1$	1
3	3	$0.9743 * 1 = 1$	3

在得到作业次序的基础上, 需确定技能分配的次序, 该次序由调度编码的第二行来决定. 将每确定一个技能分配次序视为一个阶段 step, 初始阶段为 1. 已知作业 2 需要技能 2 和技能 3, 将待分配的技能数量与调度编码中 (2, step) 的编码值相乘并向上取整得到 A 值, 则将要分配的技能为待分配技能集合中的第 A 个技能, 如表 7 中最先分配的为作业 2 的技能 2. 当技能分配过后将其从待分配技能中删去, 重复上述过程, 直到所有作业技能分配完成. 其最终技能分配结果如表 7 所示。

表 7 作业技能的分配

Tab.7 Skills to activities assigned

阶段	作业	技能	A	技能次序
1	2	2,3	$0.2245*2 = 1$	2
2	2	3	$0.6199*1 = 1$	3
3	1	1,2	$0.5990*2 = 2$	2
4	1	1	$0.8843*1 = 1$	1
5	3	1,3	$0.1427*2 = 1$	1
6	3	3	$0.7363*1 = 1$	3

第三步需要对已分配完成的技能进行资源分配,由调度编码的第 3 行到最后一行来决定.在为作业技能分配资源时,首先要确定拥有该技能的可分配资源,如果某资源已经分配过该作业的其他技能,那么该资源不能成为该作业该技能的可分配资源.分配资源时存在两种分配方式,分别对应单项目内的两种调度方式,在分配前需要判断资源是否全部培训完成,如果完成则采用只考虑成本的调度方式,否则采用同时考虑成本和培训的调度方式.采用只考虑成本的调度方式分配资源时,对于某作业中某技能的第 i 个需求,将可分配资源数量与调度编码中(2+i,step)的编码值相乘并向上取整得到 A 值,然后将可分配资源中的第 A 个资源分配给该技能需求.依次对作业技能需求分配资源,直到所有作业技能都有资源执行.其最终资源分配结果如表 8 所示.

同时考虑成本和培训的调度方式在分配资源时需考虑资源达到要求的培训时间,以使资源更大概率地分配到使整体资源技能效率增长快的技能上.具体步骤如下:1) 确定各资源的技能效率与目标资

源技能效率的差值,已培训完成的资源和无培训目标的资源技能效率差值为 0.2)判断效率差值不为 0 的资源数目:如果全部可分配资源的数目效率差值均为 0,将可分配资源数量与调度编码(2+i,step)位相乘并向上取整得到 A 值,然后将可分配资源中的第 A 个资源分配给该技能需求;如果只有一个资源技能差距不为 0,则将其分配给该技能需求;如果多个资源技能差距不为 0,则按照轮盘赌选择法在技能差距不为 0 的资源中选择资源分配给该技能需求.其最终资源分配结果如表 8 所示.

2.3 教学优化

教学优化算法是模仿课堂教学的算法,通过“教”阶段来提高班级中学员的整体水平,通过不同学员之间“学”阶段再来提高个体成绩,从而优化种群.在算法的每一次迭代过程中,都将未被支配的个体作为老师,其余个体作为学生.

“教”阶段以一个随机过程来表示老师帮助学生提高水平.对于第 i 个学生 X_i ,对其具体调度方案编码的更新机制如下:

$$X_i(t+1) = (t/T_{max})X_i(t) + rand \cdot (1-t/T_{max}) \cdot (Teacher(t) - TF \cdot Mean(t)) \quad (19)$$

其中,Teacher 个体是在 Pareto 前沿中随机选择的个体, $Mean(t) = 1/NP \sum_{i=1}^{NP} X_i(t)$ 代表所有个体的平均值, $TF = round[1 + rand(0,1)]$ 代表着向均值更改的幅度. t 为当前迭代次数, T_{max} 为最大迭代次数,在迭代初期 $(1-t/T_{max})$ 的值较大,可以快速向最优个体周围靠拢;随着迭代进行, (t/T_{max}) 越来越大,个体维持自身状态能力增强,减缓了向最优个体靠近的速度,避免过早的聚集于教师周围.

表 8 两种方式分配资源

Tab.8 Resources allocated in two ways

阶段	作业	技能	考虑成本			考虑成本和资源培训			
			可用资源	A	分配资源	可用资源	资源差距	A	分配资源
1	2	2	1,2,5	$0.4200*3 = 2$	2	1,2,5	0,0.2,0	—	2
2	2	3	1,3,4,5	$0.0606*4 = 1$	1	1,3,4,5	0,0.1,0,0	—	3
	2	3	3,4,5	$0.1304*3 = 1$	3	1,4,5	0,0,0	$0.1304*3=1$	1
3	1	2	1,2,5	$0.0433*3 = 1$	1	1,2,5	0,0.2,0	—	2
4	1	1	2,3,4	$0.6185*3 = 2$	3	1,3,4	0,0.1,0	—	1
5	3	1	1,2,3,4	$0.3320*4 = 2$	2	1,2,3,4	0,0.1,0.1,0	0.3320	2
6	3	3	1,3,4,5	$0.3601*4 = 2$	3	1,3,4,5	0,0.1,0	—	3
	3	3	1,4,5	$0.5962*3 = 2$	4	1,4,5	0,0,0	$0.5962*3=2$	4

“学”阶段,学生根据自己梯度信息进行自我学习.对于第 i 个学生 $X_i(t)$,对其调度方案编码的更新机制表示如下:

$$X_i(t+1)=X_i(t)+rand(X_i(t)-X_i(t-1)) \quad (20)$$

式(20)表示第 i 个学生自我学习过程中的连续变化.但如果在连续两代值中没有变化,那么第 i 个学生的值将不会更新.这可能会降低算法的搜索能力,尤其是在迭代过程的后期.为了提高搜索能力,如果第 i 个学生的位置连续两代保持不变,将通过小组讨论进行交互式学习以提高水平.对于第 i 个学生 $X_i(t)$,对其调度方案编码的更新机制表示如下:

$$X_i(t+1)=\begin{cases} X_i(t)+rand \cdot (X_i(t)-X_k(t)), & \text{if } X_i(t) \text{ dominate } X_k(t) \\ X_i(t)+rand \cdot (X_k(t)-X_i(t)), & \\ \text{otherwise} \end{cases} \quad (21)$$

其中 $X_k(t)$ 代表着从学生中随机选择的其它个体,dominate 代表着完全支配.

2.4 邻域搜索

为了增强算法的局部搜索能力,本文在每次迭代过程中加入邻域搜索策略,对 Pareto 前沿中的解在邻域内进行搜索改进.设定邻域结构集合 $N_k = \{N_1, N_2, N_3\}$,对种群中个体 x 从第一个邻域结构 N_1 开始扰动,若获得改进解 x' ,则令 $x = x'$,并返回第一个邻域结构重新开始迭代,直到无法改进则执行下一个邻域结构.本文采用如下三种邻域结构:

1)交换资源培训方向:在相同技能种类资源中随机选中两个资源,交换两资源的培训方向.

2)交换作业次序:在确定作业次序阶段,随机选择 step,将确定其 A 值的编码值进行更改,使 A 值发生变动.

3)更改分配资源:在分配资源阶段,随机选择 step,将确定其 A 值的编码值进行更改,使分配到同一作业的资源发生变动.

3 数值实验

本文所有算法均运用 python3.7 编程实现,测试实验在 Internet Core i5 处理器,3.4 GHz 主频,8 G 内存的计算机上进行.

3.1 算例构造

考虑到目前在飞机生产中考虑人力资源培训的

调度问题尚无标准测试集,本文对测试问题库 PSPLIB 中算例进行改造,构建测试算例.构建过程如下:1)生成生产项目序列.项目总数 N 服从在 $[10, 20]$ 上的均匀分布.项目序列随机生成,并且为保证生产的连续性,在向项目序列中添加项目时要保证相同项目连续生产不少于 4 个.项目中作业个数,作业时间,作业时序关系,作业技能需求均来自于 PSPLIB 算例.2)设定 $|S_c| = 3$,每种技能分为 3 级,即 $|L| = 3$.3)资源柔性度 F 表示所有资源掌握的技能数量总和与技能数和资源种类乘积的比值 $F = \sum_{s \in S_c} \sum_{r \in R_c} [\eta_{sr}] / (|S_c| * |R_c|)$.现有资源数量 $|R_c| = 20, F = 0.6$,各级人员按 6:3:1 比例配置.目标资源数量 $|R_c^e| = 10, F = 0.6$,各级人员按 3:5:2 比例配置.4)各人员学习效率 a_r 为 0.5 ~ 0.9 的随机数.

3.2 算法参数设置

本文所使用的教学算法具有参数设置少的优点,所需确定的参数只有种群规模与迭代次数.种群大小分别取值 30、50、70、100,算法在 1 000 代终止.如图 2 所示,目标函数值在 500 代后未有改进,因此设置算法最大迭代次数 500 足以获得近优解.此外,在种群数量 50、70 和 100 情况下,500 代后所得近优解的目标函数值非常接近,因此设置算法种群数量为 50.

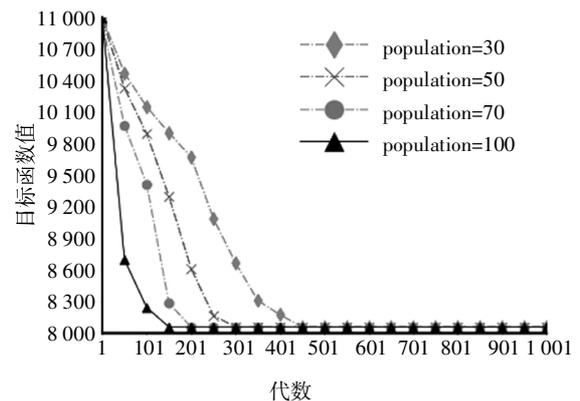


图 2 不同种群数量的收敛曲线

Fig.2 Performance comparison of different population sizes

3.3 模型比较

为了说明本文提出多项目下最小化达标项目个数和总成本(MINPRTAC)的模型优越性,将其分别与单项目内最小化投入成本(MIC)和单项目内最大化技能效率增长量(MASG)两种建模方式进行比较.

所比较的指标为资源达标项目个数($NPRT$)和投入的总成本(C)。在 Pareto 前沿中选取待比较的解时,将原模型内的双目标转换为单目标,将资源培训项目个数转换为成本,从中选取折算总成本最小的解进行比较,折算总成本计算方式如下:

$$C_{all} = \begin{cases} f_2(f_1/N) + f_2, & \text{if } f_1 \leq N \\ f_2(RD_0/(RD_0 - RD)) + f_2, & \text{else} \end{cases} \quad (22)$$

其中, RD_0 和 RD 分别表示项目未开始时的资源差距和项目结束后的资源差距,资源差距 RD 代表着资源培训所需的最短时间,计算方式如下:

$$RD = \min \sum_{r \in R} p_{rr} \leq [\Delta T_{irs} (\eta_{lr}^{min} / \eta_{irs})^{1/a_r} - \Delta T_{irs}] \quad (23)$$

实验结果如表 9 所示。其中,在 NRTP 中,“-”代表着全部项目结束后资源仍未达标,括号内数值为项目结束后的资源差距 RD 。由表 9 可知, MIC 由于不能控制资源的技能水平增长,使其成本往往是最高的;而 MASG 局限于单项目内,忽略了资源长期发展,使其对资源的培训也不是最快的。相比之下,本文提出的模型在大部分情况资源可以达到要求且资源培训速度更快同时成本更低。

表 9 模型比较结果

Tab.9 Results of model comparison

算例编号	算例规模		MINRTPAC		MIC		MASG	
	N	$Jobs$	$NPRT$	C	$NPRT$	C	$NPRT$	C
1	10	10	6	7 100	10	7 358	9	7 391
2	10	10	-(67)	6 124	-(129)	6 604	-(93)	6 893
3	10	10	9	5 962	-(29)	6 023	-(24)	6 785
4	10	20	10	8 094	-(17)	8 663	10	8 422
5	10	20	9	8 853	9	8 928	9	9 158
6	10	20	8	7 275	9	7 463	9	7 589
7	20	10	15	8 481	18	9 135	16	9 664
8	20	10	18	9 631	20	9 457	20	9 836
9	20	10	13	9 041	17	9 827	14	10 657
10	20	20	10	11 691	16	12 605	14	12 275
11	20	20	15	11 571	19	12 240	18	13 089
12	20	20	14	10 568	20	11 922	17	11 826

为对这种情况进行具体的解释说明,本文以其中某算例进行具体的资源差距和成本变化分析,其结果如图 3 和图 4 所示。由图 3 中可知,在资源培训上, MASG 初期具有一定的优势,但随着项目的进行,其资源差距的减小幅度逐渐变小,并且在所有项目结束后仍未完成,可能原因是其只考虑了资源培训的增量而没有考虑资源培训的方向,导致了培训方向上的偏差。并且其一直考虑资源效率的增长,忽略了成本,使其成本一直都很高。在成本方面,由图 4 可知, MIC 在初期具有一定优势,但这种优势逐渐被本文模型所赶超,并且资源也没有培训完成。相比较之下, MINRTP 在初期的成本高,资源效率增幅比较小,但是由于其培训了正确的资源,使其在后续的进展中,资源能够达到要求并且成本也能控制下来,体现了整体建模的优越性。

源的在线培训是普遍存在的。对管理者来说,应当舍弃短期内培训更多低水平资源的策略,而应该明确各人力资源的长期培训目标,才能制定更优的培训路径以更快完成目标进行更灵活的调度。

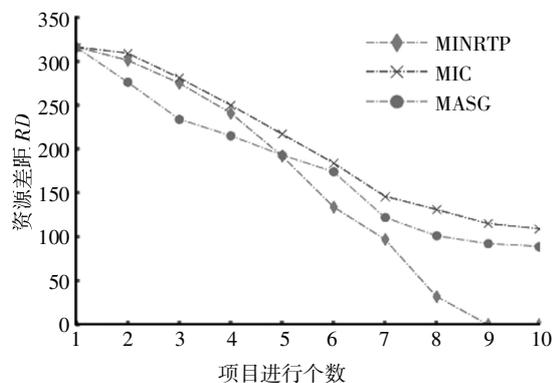


图 3 资源差距比较

Fig.3 Resource gap comparison

从实际角度看,在复杂设备装配过程中,人力资

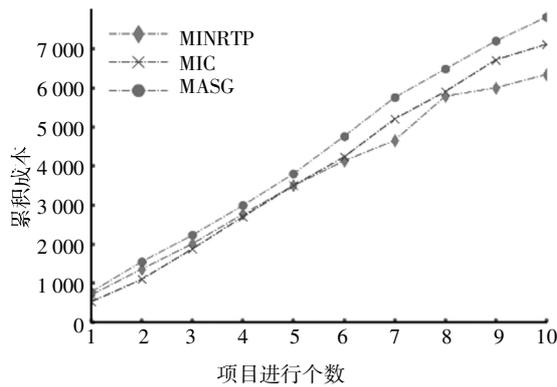


图 4 成本比较

Fig.4 Cost comparison

3.4 算法比较

为了验证本文算法 HMOTLBO(A0)的有效性, 将其与原始的多目标教学算法(MOTLBO,A1)和带

精英策略的非支配选择遗传算法(NSGA-II,A2)进行比较. 根据正交实验, NSGA-II 算法种群规模为 100, 交叉率为 0.8, 变异率为 0.1. 比较指标有三种, Pareto 解的个数(N), 平均理想距离(MID), 间距指标(SP). 其中, MID 越小, 表明算法收敛性越好; SP 越小, 表明算法多样性越佳. 实验结果如表 10 所示, 可以观察到, 本文 HMOTLBO 算法在三项指标上都优于 NSGA-II 算法, 并且随着问题规模增加, 算法优越性也在增加. 与传统的 MOTLBO 相比, 虽小部分算例性能相近, 但大部分情况下要优于 MOTLBO. 可以看出本文算法的优越性.

以其中一个 20 项目算例为例, 3 种算法得到的 Pareto 解集如图 5 所示, 其中项目数 21 代表其资源未完成培训. 在解的数量方面, HMOTLBO 和 MOTLBO 远多于 NSGA-II 算法, 并且质量也更优.

表 10 算法比较结果

Tab.10 Results of algorithm comparison

算例	问题规模		NS			MID			SP		
	N	jobs	A0	A1	A2	A0	A1	A2	A0	A1	A2
1	10	10	4	4	3	0.52	0.73	0.64	0.21	0.48	0.63
2	10	16	5	4	3	0.46	0.53	0.55	0.18	0.29	0.30
3	10	20	5	5	5	0.45	0.50	0.50	0.32	0.46	0.68
4	15	10	8	6	7	0.63	0.75	0.87	0.19	0.20	0.41
5	15	16	9	5	6	0.55	0.48	0.73	0.56	0.73	0.74
6	15	20	9	7	5	0.74	0.83	0.99	0.55	0.67	0.63
7	20	10	12	11	8	0.91	0.94	0.95	0.23	0.51	0.51
8	20	16	12	10	9	0.95	1.02	0.99	0.36	0.25	0.80
9	20	18	12	11	10	1.13	1.11	1.45	0.43	0.60	0.66
10	20	20	13	10	9	1.09	1.24	1.20	0.26	0.77	0.57

MOTLBO 算法虽然也得到了质量较优的解, 但其解的分布与 HMOTLBO 相比不够均匀.

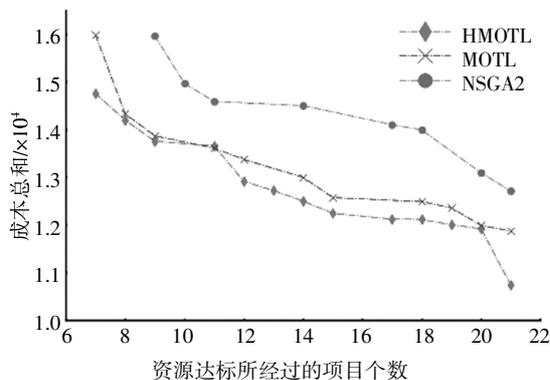


图 5 算法 Pareto 解比较

Fig.5 Pareto front comparison of 3 algorithms

4 总结

在飞机装配中, 人员的培训问题常被忽略. 本文在目标人员结构给定的情况下, 以最小化资源培训经历项目个数和最小化总生产成本为目标, 对串行项目建立了联合优化的混合整数规划模型. 针对该问题, 设计了新编码方式的混合多目标教学优化算法. 仿真实验结果表明, 本文所建立的模型要优于单项目下最小化成本和最大技能效率增长的建模方式. 同时, 本文的算法也显示出一定的优越性. 由于不同的企业阶段目标、观点不同, 本文为决策者提供了一组可行的 Pareto 解, 决策者可以从中选出最符

合企业目标的人员培训方案,在保证作业的基础上提高企业的竞争力。本文考虑的人员技能效率增长模型采用了经典的指数学习曲线,未来可以进一步研究人员技能效率的评定以及具体变化。

参考文献

- [1] 陆志强, 杨超. 基于项目网络拆分决策的多项目协同调度问题建模[J]. 上海交通大学学报, 2017, 51(2): 193.
LU Z Q, YANG C. Modeling of resource constrained multi-project scheduling problem based on project splitting[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2017, 51(2): 193. (In Chinese)
- [2] BELLENGUEZ O, EMMANUEL N. Lower bounds for the multi-skill project scheduling problem with hierarchical levels of skills [C]// Practice and Theory of Automated Timetabling V. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2005: 229—243.
- [3] 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.
- [4] BARZ C, KOLISCH R. Hierarchical multi-skill resource assignment in the telecommunications industry [J]. Production and Operations Management, 2014, 23(3): 489—503.
- [5] WALTER M, ZIMMERMANN J. Minimizing average project team size given multi-skilled workers with heterogeneous skill levels[J]. Computers & Operations Research, 2016, 70: 163—179.
- [6] 任逸飞, 陆志强, 刘欣仪. 考虑技能水平的多技能资源约束项目调度[J]. 浙江大学学报(工学版), 2017, 5(15): 1000—1006.
REN Y F, LU Z Q, LIU X Y. Project scheduling problem with hierarchical levels of skills[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2017, 51(5): 1000—1006. (In Chinese)
- [7] MAGHSOUDLOU H, AFSHAR-NADJAFI B, AKHAVAN NIAKI S T. Multi-skilled project scheduling with level-dependent rework risk; three multi-objective mechanisms based on cuckoo search[J]. Applied Soft Computing, 2017, 54: 46—61.
- [8] LIU C, WANG J, LEUNG Y T. Worker assignment and production planning with learning and forgetting in manufacturing cells by hybrid bacteria foraging algorithm [J]. Computers & Industrial Engineering, 2016, 96: 162—179.
- [9] MEHMANCHI E, SHADROKH S. Solving a new mixed integer non-linear programming model of the multi-skilled project scheduling problem considering learning and forgetting effect on the employee efficiency [C]// 2013 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management. Bangkok, Thailand: IEEE, 2013: 400—404.
- [10] CHEN R, LIANG C Y, GU D X, *et al.* A competence-time-quality scheduling model of multi-skilled staff for IT project portfolio[J]. Computers & Industrial Engineering, 2019, 139: 106183.
- [11] HOSSEINIAN A H, BARADARAN V, BASHIRI M. Modeling of the time-dependent multi-skilled RCPSPP considering learning effect [J]. Journal of Modelling in Management, 2019, 14(2): 521—558.
- [12] JIN H, HEWITT M, THOMAS B W. Workforce grouping and assignment with learning-by-doing and knowledge transfer[J]. International Journal of Production Research, 2018, 56(14): 4968—4982.
- [13] DE BRUECKER P, BELIËN J, VAN DEN BERGH J, *et al.* A three-stage mixed integer programming approach for optimizing the skill mix and training schedules for aircraft maintenance [J]. European Journal of Operational Research, 2017, 267(2): 439—452.
- [14] GROSSE E H, GLOCK C H, MÜLLER S. Production economics and the learning curve: a meta-analysis [J]. International Journal of Production Economics, 2015, 170(DEC.PT.B): 401—412.
- [15] WRIGHT T P. Factors affecting the cost of airplanes [J]. Journal of the Aeronautical Sciences, 1936, 3(4): 122—128.