

控制与决策

Control and Decision

复杂人力资源约束下的抢占式维修工序调度

孙笑, 宋卫星, 班利明, 齐小刚

引用本文:

孙笑, 宋卫星, 班利明, 等. 复杂人力资源约束下的抢占式维修工序调度[J]. 控制与决策, 2022, 37(2): 393–400.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.1250>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

面向建材装备集团制造的分布式多项目资源调度

Distributed multi-project resource scheduling oriented to manufacturing of building materials equipment group

控制与决策. 2021, 36(9): 2133–2142 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1802>

两部件系统视情维修与生产调度的联合优化模型

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

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

基于正态云模型的状态转移算法求解多目标柔性作业车间调度问题

State transition algorithm based on normal cloud model for solving multi-objective flexible job shop scheduling problem

控制与决策. 2021, 36(5): 1181–1190 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1233>

工序加工时间不确定的可重入调度问题的求解

Solution of reentrant scheduling problem with uncertain processing time

控制与决策. 2021, 36(5): 1127–1136 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1036>

基于双种群模糊引力搜索算法的舰载机甲板作业调度

Flight deck operations scheduling based on dual population fuzzy gravitational search algorithm

控制与决策. 2021, 36(11): 2751–2759 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0523>

复杂人力资源约束下的抢占式维修工序调度

孙笑^{1†}, 宋卫星², 班利明², 齐小刚¹

(1. 西安电子科技大学 数学与统计学院, 西安 710100; 2. 中国人民解放军 32272 部队 11 分队, 兰州 730060)

摘要: 针对维修保障系统内部工序调度问题具有工序多、维修人员种类不同、维修人员等级不同等复杂特性, 建立以维修工时最短和人力资源总负荷最小为目标函数的多目标多约束优化模型, 设计了基于关键路径算法的优先权值编码对抢占式调度问题进行第一层编码, 采用随机产生方案得出第二层人力资源编码, 进而针对混合粒子群遗传算法设计符合抢占式调度的交叉算子, 利用 Matlab 软件对实例分别进行无抢占、一次抢占、多次抢占调度方案仿真, 最后对仿真结果进行对比分析. 仿真结果得出了多工序在多工种和多等级人力资源约束下的多次抢占式维修工序调度方案, 以及无抢占、一次抢占、多次抢占调度所对应的目标函数解, 决策者可根据实际需求设定目标函数权值以得出最佳调度方案.

关键词: 抢占式调度; 维修调度; 优先权值编码; 多目标; 混合粒子群遗传算法; 多等级人力资源

中图分类号: TP273

文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2020.1250

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



引用格式: 孙笑, 宋卫星, 班利明, 等. 复杂人力资源约束下的抢占式维修工序调度 [J]. 控制与决策, 2022, 37(2): 393-400.

Preemptive maintenance process scheduling under complex human resource constraints

SUN Xiao^{1†}, SONG Wei-xing², BAN Li-ming², QI Xiao-gang¹

(1. School of Mathematics and Statistics, Xidian University, Xi'an 710100, China; 2. Unit 11 of the Unit 32272 of the Chinese People's Liberation Army, Lanzhou 730060, China)

Abstract: In view of the complex characteristics of the internal process scheduling problem of the maintenance support system, such as multiple processes, different types of maintenance personnel, and different levels of maintenance personnel, this paper establishes a multi-objective and multi-constraint optimization model with the shortest maintenance man-hour and the minimum total human resource load as the objective function. The priority value encoding based on the critical path algorithm is used to code the preemptive scheduling problem at the first level, and the second level human resource code is obtained by using a random generation scheme, and then a crossover algorithm that meets the preemptive scheduling is designed for the hybrid particle swarm genetic algorithm. We use Matlab software to simulate the examples of non-preemption, one-time preemption, and multiple preemption scheduling schemes respectively, and finally compare and analyze the simulation results, through which we obtain a multi-process preemptive maintenance process scheduling scheme under the constraints of multi-work and multi-level human resources, as well as the objective function solution corresponding to the scheduling of no preemption, one preemption, and multiple preemption. Decision makers can set the weight of the objective function according to actual needs to get the best scheduling plan.

Keywords: preemptive scheduling; maintenance scheduling; priority coding; multi-objective; hybrid particle swarm genetic algorithm; multi-level human resources

0 引言

装备维修保障系统由装备维修所需的各类维修资源和管理手段组成, 该系统装备种类复杂且数量多, 包括维修器材与备件、维修设备以及各种等级维修人员等. 维修工序调度优化是建立维修

保障系统的一个关键步骤, 决策者需对有限的维修资源进行合理分配, 制定详细且符合实际的维修调度方案, 以达到既定目标. 若维修资源分配不合理、优化方案及算法设计不周, 将导致对资源的利用率过低, 产生较长的维修时间. 此问题属于资源受限式

收稿日期: 2020-09-08; 录用日期: 2020-12-03.

责任编辑: 王凌.

[†]通讯作者. E-mail: 2740663769@qq.com.

项目调度问题(resource-constrained project scheduling problem, RCPSP). 如何合理地对工序的维修流程进行安排, 分配维修保障资源, 形成所需时间最短的维修调度计划, 使调度方案达到最优, 对于提高部队保障能力和装备保障效益都具有重要意义^[1].

近年来, 对于资源受限式项目调度问题的研究已有不少. 为了更加满足项目的各种需求, 可以将完整的工序划分为若干个子工序, 对各个子工序进行维修. 根据在工序维修过程中有无转移维修资源, 将该问题划分为资源抢占式^[2]和非资源抢占式^[3]. 抢占式资源受限项目调度问题(preemptive resource-constrained project scheduling problem, PRCPSP)可以将当前的维修工序设置暂停, 并释放其所占用的维修资源, 对优先级更高的工序进行维修. 理论上, 通过工序抢占、设置优先级, 可以更加充分地利用维修资源, 从而缩短项目工期. 对于PRCPSP问题, 文献[4]提出每个工序的计划维修时间段内的每个整数时刻都可以作为资源抢占点, 也就是说, 若工序需要 t 个单位维修时间, 则该工序最多可以被抢占 $t-1$ 次, 并将PRCPSP划分为无抢占(0_PRCPSP)、一次抢占(1_PRCPSP)和多次抢占(m _PRCPSP)3种情况. 其中 m _PRCPSP(m 次资源受限抢占式调度问题)允许工序满足各类约束时, 在维修过程中的任意整数间断点被抢占 m 次. 以往的研究结论显示, 相对于非抢占式维修调度, 抢占式维修调度可显著缩短工期. 对于工序的优先级编码, 主要有基于活动列表的编码^[2]和基于优先权值的编码^[5]. 文献[6]设计了允许多次抢占的基于工序优先级的编码策略; 文献[7]针对1_PRCPSP, 分别设计了基于活动列表的编码方案和基于优先权值的双重编码方案.

在问题的建模和求解方面, 研究人员主要通过建立多约束规划模型并利用启发式算法对PRCPSP进行研究. 文献[8]针对传统的优先关系不能满足描述事件项目调度优先关系的要求, 引入了广义优先关系(generalized priority relation, GPRs)和改进的单代号网络图(activity-on-node, AON)来描述任务的时序关系, 并利用改进的布谷鸟算法对问题进行求解; 文献[9]提出了移动块序列(moving block sequence, MBS)来表示项目调度问题, 使得在满足优先约束和资源需求的情况下, 尽可能早地安排相应项目中的每个活动, 并采用多智能体进化算法(MAEA)求解问题; 文献[10]研究了在最大分割次数和最小连续执行周期的约束下, 在离散时间点对每个活动进行分割(考虑分割后的惩罚时间)的资源约束项目调度问题, 设计了一种遗传算法对问题进行求解; 文献[11]建立了多

个技能种类的资源受限式项目调度问题, 并对禁忌搜索算法进行改进以求解该调度问题; 针对资源受限式项目调度问题, 文献[12]提出了分散搜索的混合元启发式算法进行求解; 文献[13]针对多技能资源约束项目调度问题, 规定恢复一个被抢占的活动需要额外的惩罚成本, 并提出了一种基于蚁群的元启发式算法来求解模型; 文献[14]建立了考虑胜任力差异的人力资源受限多目标项目调度问题模型, 并采用所提出的两阶段优化算法求解模型; 文献[15]对连续时间条件下具有柔性资源配置的资源约束项目调度问题进行研究, 即每个任务可以在任何时间点开始、结束或改变其资源分配; 文献[16]提出了一种项目活动时间随机的资源约束型项目调度问题, 采用预处理和在线调度的两阶段策略, 并采用两阶段局部搜索进行优化.

现有的人力资源有限项目调度问题多针对工期最小的单目标函数进行优化求解, 或考虑人员多技能, 或考虑人员胜任力差异, 但实际的维修工序调度问题需要同时考虑人员多工种类型和人员等级不同等问题, 且单一的目标函数往往难以得出符合实际的调度方案. 基于以上分析, 本文对具有人员多工种类型、人员技能等级不同的双目标——工期最小和人力资源总负荷最小的多约束问题进行优化, 根据具体问题设计基于实数编码的双重编码方案对调度问题进行多次随机抢占, 并采用改进的混合粒子群遗传算法求解模型, 得出更符合实际需求的维修工序调度方案.

1 基本描述

1.1 问题描述

复杂人力资源受限式工序调度问题采用图 $G=(V, E)$ 描述, 其中节点集合 V 用以表示项目中工序集合 J , 有向弧集合 E 用以表示工序间的前后关系. 每个项目包含 $n+2$ 个工序, 其中开始0节点和结束 $n+1$ 节点为虚拟工序. 对于某维修任务, 工期为 S_j , 给定 M 个 K 种维修人员, 需要尽可能快且在工期上限 T 时刻之前完成维修, 且维修消耗的人力资源代价尽可能小. 该问题即为复杂人力资源约束下的工序调度问题, 需要针对该问题中的维修工序进行无抢占、一次抢占、多次抢占式调度优化, 分析并对比结果, 得出最符合实际要求的维修工序调度方案. 每个工序需要遵守两种约束关系: 1) 资源约束关系. 某工序进行维修的任意时刻, 其所占用的维修人员总数必须小于总维修人员数量. 2) 时序约束关系. 根据实际工序维修要求, 某些工序之间存在紧前约束关系, 即若工序 i 是工序 j 的紧前工序, 则 j 维修尚未结束时, 工序 i

不能开始维修.

以往的研究多是针对单一优化目标——维修工期最短的调度优化问题,然而在实际的装备维修保障过程中,单目标难以评价出一个调度方案的好坏,决策者必须建立多个优化目标并对其进行协调.但多个目标通常都相互制约、相互联系,直接对多个目标进行比较相当困难,因此需要在这些指标之间进行衡量,找到最优平衡点.本文建立维修工期最短和人力资源总负荷最小的双目标模型,在满足任务时序约束和人力资源约束的条件下,合理地调度工序和人员,达到既定的维修目标.

1.2 问题假设

- 1) 假设不可更新资源(配件、原材料等)充足;
- 2) 对于可更新资源,本文只考虑人力资源;
- 3) 维修工序所需必要维修时间已给定;
- 4) 不同等级维修人力资源对相应专业的每项工序进行维修所需的时间由平时经验数据计算得出;
- 5) 每个工序只需要某一种维修人员对其进行维修.

2 模型构建

2.1 符号定义及说明

模型构建所需的符号及其含义见表1.

表1 参数符号及其含义

符号	含义
J	项目工序集合
T	项目工期上限
R_k	第 k 种维修人员总数, $k = 1, 2, \dots, K$
j	工序序号, $j = 0, 1, \dots, n + 1$
d_j	执行工序 j 所需必要工作时间
P_j	工序 j 的前序工序集合
r_{jk}	完成工序 j 所需的第 k 种维修人员总数
$r_{jk}^1, r_{jk}^2, r_{jk}^3$	第 k 种维修人员的初、中、高级工对工序 j 进行维修的人数
R_k^1, R_k^2, R_k^3	第 k 种维修人员的初、中、高级工总数
W_k	第 k 个维修人员的总负荷
M	配置的维修人员人数
A_t	t 时刻正在进行维修的工序集合

2.2 建立调度模型

基于以上分析,本文建立以维修工期最短和维修人员总负荷最小为双目标的 m_PRCPSP (m 次抢占资源受限项目调度问题) 数学模型. 工序 j 的开始时间为 s_j , 工序 j 的紧前工序集合为 v_j , t 表示时刻, 除初始工序 0 和结束工序 $n + 1$ 外, 其余的工序均可被抢占为 W 部分, 即 j_1, j_2, \dots, j_W , 每一部分的开始时刻分别为 $s_{j_1}, s_{j_2}, \dots, s_{j_W}$, 工时分别为非负整数

$p_{j_1}, p_{j_2}, \dots, p_{j_W}$. 模型如下:

$$\min f_1 = s_{n+1}, \tag{1}$$

$$\min f_2 = \sum_{k=1}^M W_k = \sum_{t=1}^{s_{n+1}} x_{kj}^t \cdot d_j. \tag{2}$$

$$\text{s.t. } \sum_{j \in A_t} r_{jk} \leq R_k, t = 1, 2, \dots, S_J, k = 1, 2, \dots, K; \tag{3}$$

$$\sum_{j \in A_t} r_{jk}^x \leq R_k^x, t = 1, 2, \dots, S_J, k = 1, 2, \dots, K; \tag{4}$$

$$\sum_{w=1}^W d_{j_w} = d_j, \forall j \in V / \{0, n + 1\}; \tag{5}$$

$$s_{i_r} + d_{i_r} \leq s_{j_l}, \forall i \in v_j, \forall j \in V; \tag{6}$$

$$d_{j_w} \in Z/Z^-, \forall w \in W, \forall j \in V; \tag{7}$$

$$s_{n+1} \leq T. \tag{8}$$

其中: $x_{kj}^t = 1$ 表示 t 时刻维修人员 k 维修工序 j , $x_{kj}^t = 0$ 反之. 式(1)为目标函数1, 表示维修完成所有工序的所需时间最小化; 式(2)为目标函数2, 表示完成维修任务的维修人员总负荷最小化; 式(3)表示各种类维修人员总配置约束; 式(4)表示各种类中各等级维修人员总配置约束; 式(5)表示任一项工序的 w 个子部分工时之和等于该项工序所需的维修总工时; 式(6)表示工序的时序约束条件, 后续工序的维修需要在其紧前工序维修完成后方可进行; 式(7)表示工序抢占发生在非负整数间断点; 式(8)表示维修任务的完工时间不超过工期上限.

3 改进的混合粒子群遗传算法

本节结合资源受限维修调度问题的特点设计了符合本文模型的双重编码, 同时对混合混沌粒子群算法和遗传算法进行改进以适应调度方案并对其进行求解, 扩大算法的搜索范围, 提高优化质量.

3.1 编码方案

本节采用实数编码方式进行双重编码. 第一重编码表示对满足时序约束的所有工序进行排列, 为实现抢占式工序调度, 采用基于优先权值的编码. 工序维修时间段内的每个整数时刻均为潜在的被抢占时刻, 被抢占后的子工序记作 $(j, m_j)(m_j = 1, 2, \dots, d_j)$, 结合基础优先权值 φ_j 和随机优先权值 $\gamma(j, m_j)$ 计算最终优先权值 $\phi(j, m_j)$. 其中, 基础优先权值为抢占前工序被赋予的权值. 随机优先权值为抢占后的子工序被赋予的随机权值. 基础优先权值 $\varphi_j(j = 1, 2, \dots, J)$ 采用关键路径技术产生, 具体操作为: 首先计算出双代号网络图的关键路径, 随后根据工序的时序关系分别赋予关键路径上工序不等的

权值,删除网络图中关键路径的节点及边,再以同样的方式计算次关键路径,并赋予次关键路径上工序低于关键路径上工序的不同权值,重复此操作,直至所有的工序被赋予不等的权值. 随机优先权值 $\gamma(j, m_j)$ 根据各工序的子工序随机优先权值之和为1的规则随机产生. 结合基础优先权和随机优先权产生每个子工序的最终优先权值. 工序的子工序对应优先权集合记作 $\{\phi(j, 1), \phi(j, 2), \dots, \phi(j, m_j)\}$,由此为每个子工序产生不等的优先权值,根据优先权值的高低对子工序进行排序,算法首先选择优先权值最高的子工序对其进行维修.

第二重编码表示为第一重编码序列按照维修人员种类及总量约束产生的人员序列,即对一重编码序列中的每一个工序,根据其所需维修人员种类和数量 Y_i ,在符合维修人员约束的基础上,随机从对应种类中选择 $\{1, 2, 3\}$ (分别为对应某专业工种的初、中、高级维修人员)中某一个数,重复此操作 Y_i 次,得到与一重编码对应的维修人员选择情况,将所有人员选择结果串联,形成粒子的二重编码.

3.2 基于并行调度机制的解码方案

某一时刻,单个工序进行维修所需的维修人员远小于维修人员总量,因此,采用基于并行调度机制的解码方案. 将工序调度划分为 P 个阶段,表示工序 j 被抢占了 P 次,记作 $j_p \in \{j_1, j_2, \dots, j_P\}$. 多次抢占最多包含 $D \cdot P$ 个阶段,其中 D 代表抢占前工序总数. $n(n \in N \cdot P)$ 阶段对应的调度时刻 t_n 存在3个工序集合: 竣工工序集合 C_n 、已确定开始时间且完成资源分配的工序集合 A_n 以及可行工序集合 E_n ,其满足

$$E_n = \{j \mid j \notin \{C_n \cup A_n\}, P_j \subseteq C_n, r_{jk} \leq R_k, r_{jk}^x \leq R_k^x, k = 1, 2, \dots, K, x = 1, 2, 3\}. \quad (9)$$

从阶段 n 到阶段 $n+1$,首先对 t_{n+1} 、 A_{n+1} 、 C_{n+1} 进行计算,更新第 k 种维修人员剩余数 R_k 及不同等级维修人员剩余数 R_k^x 并调度工序 j ,计算 R_k 以及 R_k^x ,更新 E_{n+1} ,重复此步骤直至 $E_{n+1} = \{\emptyset\}$.

t_{n+1} 的计算如下:对于每一个编码粒子,已安排好的满足紧前关系约束的工序 j ,根据第二层编码得到工序 j 所需的维修人员种类和等级,工序 j 的开始维修时间为 P_j 的结束维修时刻和所需维修人员种类对应的维修人员集合里维修人员的空闲时刻中的最大值,其中 P_j 的结束维修时刻为工序 j 的开始维修时刻与实际所需维修时间(因分配的维修人员等级不定导致维修所需时间不同)之和,在开始维修时刻安排相应的维修人员对工序 j 进行维修,直至工序 j 维修完成.

3.3 改进的混合混沌粒子群遗传算法

本节对混合粒子群遗传算法进行改进,使其适用于抢占式工序调度模型. 首先根据双重编码方案初始化一群满足约束条件的随机粒子,第 i 个粒子 $x_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{iD}; y_{i1}, y_{i2}, \dots, y_{iD})$. 其中第 $d(d \in D)$ 个分量按照实际情况被进行 $d(d \in D)$ 次抢占的结果为 $x_{id} = (x_{id}^1, x_{id}^2, \dots, x_{id}^{n+1})$, $y_{id} = (y_{id}^1, y_{id}^2, \dots, y_{id}^{n+1})$,通过跟踪个体极值 $p_i = (p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{iD \cdot P})$ 和种群极值 $p_g = (p_{g1}, p_{g2}, \dots, p_{gD \cdot P})$ 来更新粒子,迭代找到最优解. 种群极值和个体极值的选取参考文献[17].

粒子的种群规模设定为 N ,采用精英保留策略由非支配集 F_1 包含的粒子组成精英种群,其余粒子属于常规种群. F_1 个数的最大上限设置为 $N/2$,当 F_1 的个数达到上限时,将适应度最高的 $N/2$ 个粒子归属于精英种群,其余 $N/2$ 个粒子归属于常规种群参与迭代.

1)选择算子. 采用精英保留策略,让上述精英种群直接进入下一代.

2)交叉算子. 对第一重编码,以第 k 代第 i 个粒子 x_i^k 为例,引入遗传算法中的单点交叉算子,即将 x_i^k 分别与 p_i 和 p_g 进行单点交叉来更新. 引入混沌机制控制粒子群算法中的参数,即:对于算法中保持群体多样性的随机数,给定 r 的第 k 代值, r 的第 $k+1$ 代值通过以下公式计算:

$$r(k+1) = \mu \cdot r(k) \cdot (1 - r(k)), r(k) \in (0, 1). \quad (10)$$

令算法中

$$\text{pos}_1 = c_1 r_1(k), \text{pos}_2 = c_2 r_2(k). \quad (11)$$

其中: $\mu = 4$ 为控制变量, $r(0) \neq \{0.25, 0.5, 0.75\}$, k 为当前迭代次数, r_1, r_2 为随机数.

将 x_i^k 与 p_i 在 pos_1 位置进行单点交叉,详细过程如下:

①根据第 k 代随机数 $r_1(k)$ 确定 x_i^k 的交叉位置 pos_1 , x_i^k 的前 pos_1 个子工序组成分段 J_1 ,其余部分为分段 J_2 ;

②找出 x_i^k 的个体极值 p_i 与 J_2 相同的部分,将其按原有顺序取出作为分段 J_3 , p_i 的其余部分作为分段 J_4 ;

③合并 J_1 与 J_3 作为新粒子 y_1 ,合并 J_2 与 J_4 作为新粒子 y_2 .

p_g 按照上述交叉方法进行交叉,产生 z_1, z_2, z_3, z_4 四个新粒子,比较4个新粒子及 x_i^k 的支配关系,更新个体极值 p_i . 交叉后会产生非法解,根据图1对方案进行调整.

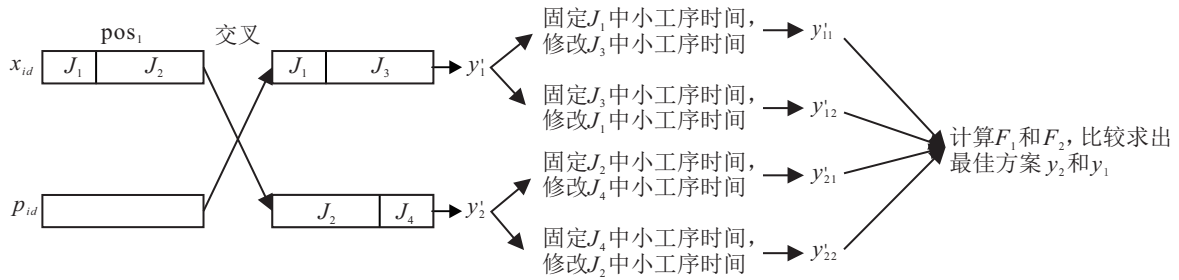


图1 非法解调整流程

对于第二重编码,采用多点随机交叉方式对其进行更新.若交叉后产生的序列违反了资源约束条件,则对原始序列进行重新交叉.

3) 变异算子. 对于第一重编码工序操作序列部分,采用文献[17]中第5章的变异算子;对于第二重编码维修人员分配序列部分,采用重新初始化方式进行变异.

3.4 算法复杂度分析

算法的时间复杂度主要依赖于问题的求解规模

(抢占后子工序数 n)、目标函数个数 M 、种群规模 N 和迭代次数 t . 从算法流程图2可知,其核心组成部分包括粒子交叉、变异以及后续非支配排序部分. 在迭代过程内部,最坏情况下(即每个非支配集只有一个粒子),其时间复杂度为 $3N^2/4$;对 $3N$ 个粒子的一半进行变异操作,时间复杂度为 $3N^2/2$;非支配排序部分的时间复杂度为 $M \cdot (3N)^2$;并行调度解码方案的时间复杂度为 nN . 由于编码方式为双层编码,本文算法的时间复杂度为 $O[(1 + 4M)/2 \cdot 9tN^2 + 2tnN]$.

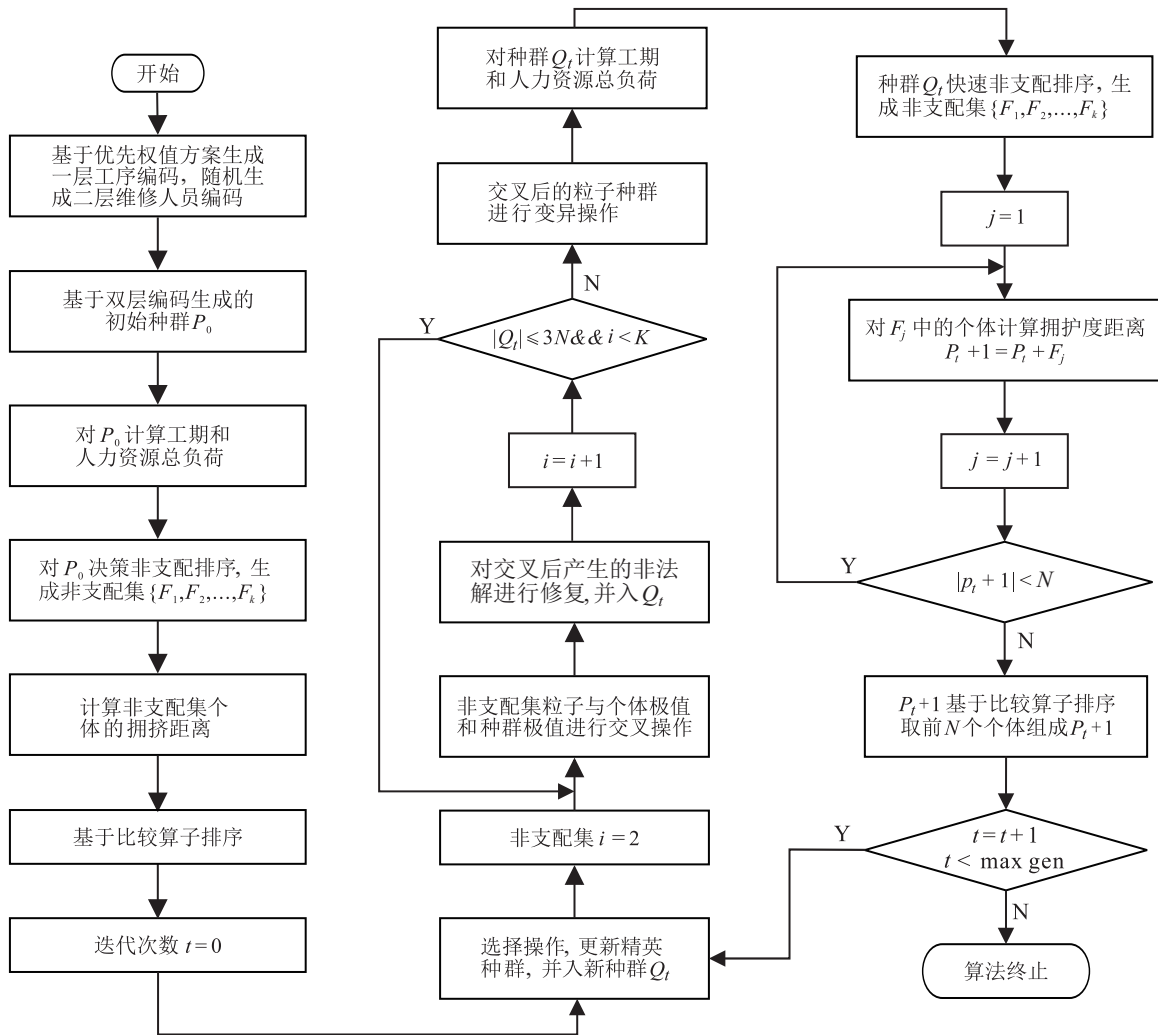


图2 改进的混合粒子群遗传算法流程

4 仿真与分析

4.1 示例仿真

数值实验以某型车辆维修保养的三级保养作业为例,配置维修人员数量为15人,每种(共3种)维修人员分配5名,分别为2名初级维修人员、2名中级维修人员、1名高级维修人员.初始种群数量为80,迭代次数为200,变异概率0.5.车辆维修保养的三级保养作业数据采用文献[17]中表4-1的数据,表中的维修工时均为中级维修人员对该工序进行维修需要的工

时,初级维修人员工时为中级维修人员的1.1倍向后取整,高级维修人员工时为中级维修人员的0.9倍向后取整.结合本文所提出的双重编码方案和改进的混合粒子群遗传算法,利用Matlab软件对该数值案例进行求解分析.

4.2 结果分析

车辆维修保养的三级保养作业维修调度部分方案如表2所示.

表2 多次抢占工序调度部分方案结果

抢占后的工序	所属大工序	所属大工序的部分	断点	维修人员等级	维修人员种类	维修开始时间	维修结束时间
10	7	1	8	1,1	B	0	10
11	7	2	16	1,1	B	10	29
55	27	1	18	2,1	A	0	20
37	20	1	18	2,1	B	29	49
58	28	3	2	2,3	B	0	2
56	28	1	24	2,3	B	2	24
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
34	18	1	23	2,2	C	540	563
35	18	2	7	2,2	C	563	570
156	79	1	25	2,3,2	B	546	569
157	79	2	11	2,3,2	B	569	579
154	78	1	21	2,2,3	A	535	554
155	78	2	3	2,2,3	A	554	557

1) 79个工序根据大工序所需维修时间的比例限定抢占次数,本文中抢占次数为18 min的整数倍,例如:大工序24所需工时为60 min,则其有 $60/18 = 3$ 个随机抢占点.

2) 表2给出多次抢占式维修调度的第1个Pareto解所对应的调度方案,数据第1列表示79个大工序被随机断点抢占后产生的158个子工序的维修顺序,第2列为子工序所属的抢占前大工序序号,第3列显示子工序属于大工序的第几部分,第4列为对该子工序进行维修的维修人员的技术等级(1、2、3分别代表初、中、高级人员),第5列为该维修人员所属的工种类别(有A、B、C三种专业类别);第6、7列分别代表该子工序的开始维修时间和终止维修时间.例如:第1行数据表示第7个大工序按照其工时被随机抢占点抢占为3段,第1段为第10个子工序,派两个B类初级维修人员对其进行维修,开始维修时间为0 min,终止维修时间为10 min.

3) 图3~图5分别为无抢占、一次抢占、多次抢占维修工序时间图.可以看出,维修全过程,没有15个维修人员同时进行维修的过程,最多为12个维修人员同时进行维修,这是由于其他未进行维修的人员在等待参与下一次维修,这样的调度方案在短时间内看不是最优的,但对于整个维修过程而言却是最优的.

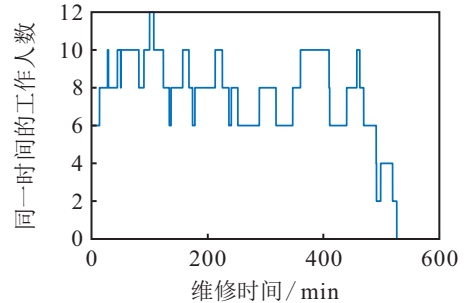


图3 无抢占工序维修时间

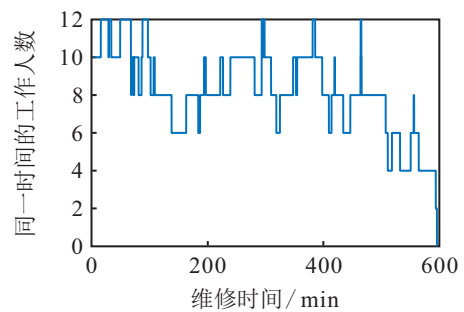


图4 一次抢占工序维修时间

4) 无抢占维修很少有12名维修人员同时进行维修,大部分集中为6名、8名或10名维修人员进行维修,因此最终维修结束时间必然最多;一次抢占有多次12名维修人员同时维修的过程,但由于后期出现较多的4名维修人员同时维修的过程,即500 min到维修结束时刻有2/3的维修人员在休息等待,因此导

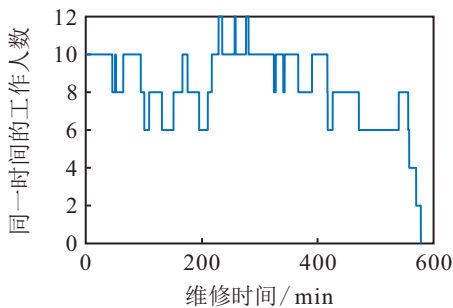


图5 多次抢占工序维修时间

致维修终止时间较长;多次抢占维修调度过程中12名维修人员同时参与工作的时刻略少于一次抢占,略多于无抢占,但大部分集中在10名维修人员同时工作的过程中,且很少有4名维修人员及少于4名维修人员同时工作的时刻,因此维修人员被充分利用,所用的维修时间必然最小。

5)本例在对多次抢占模型进行求解时,尝试对大工序以其维修时间的1/3、1/6、1/12来确定随机抢占次数,调度结果均比所罗列的维修方案结果差,分析后得出结论:抢占次数较多以后,工序被抢占为更小的子工序,导致维修资源分配时产生更多的时间缝隙,从而浪费了时间。

6)表3为3种方案调度结果目标值对比,每个方案有两个Pareto最优解,多次抢占方案总体优于一次抢占方案。对于维修时间,多次抢占的最优维修时间比一次抢占方案少27 min,同时,最优人力资源总负荷比一次抢占方案少28 min。若优先考虑维修时间,则多次抢占方案最佳,在维修时间方面优于无抢占方案36 min;若优先考虑人力资源代价,则无抢占方案最佳,优于多次抢占方案35 min;若要结合两个目标选出最佳的调度方案,可对目标进行归一化后加权处理得出最优解。

表3 3种方案调度结果目标值对比

方案	无抢占		一次抢占		多次抢占	
	f_1	f_2	f_1	f_2	f_1	f_2
Pareto最优解1	615	2375	606	2434	579	2410
Pareto最优解2	611	2378	592	2436	587	2408

4.3 算法求解对比

本文模型为双目标函数模型,因此采用带精英策略的非支配排序遗传算法(NSGA-II)进行求解。NSGA-II容易陷入局部最优,且计算复杂度较高,计算效率低下。粒子群算法计算速度快,复杂度低,因此考虑利用粒子群算法为NSGA-II提供优化方向,采用适应于抢占式工序调度的改进混合粒子群遗传算法进行求解。

图6为多次抢占下,本文算法与NSGA-II算法的

调度结果对比。对比结果显示:本文算法优化结果多集中于10名维修人员或8名维修人员同时进行维修,而NSGA-II算法优化结果多集中于8名维修人员或6名维修人员同时进行维修,且本文算法所得优化结果12名维修人员同时进行维修的总时间也多于NSGA-II的优化结果。

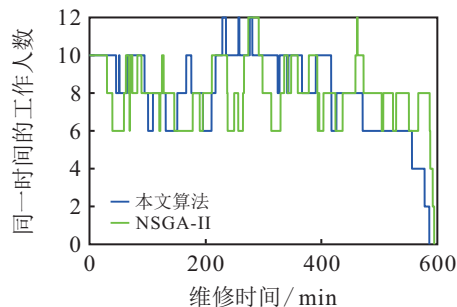


图6 多次抢占算法对比

表4为多次抢占下,本文算法与NSGA-II算法的调度结果对比。NSGA-II在迭代80次后收敛,而本文算法在迭代173次后收敛,NSGA-II快速收敛于局部最优解,其求得的目标函数解均劣于本文算法求得的目标函数值。

表4 多次抢占下本文算法与NSGA-II算法对比

算法	f_1	f_2	迭代次数
本文算法	579	2410	173
NAGA-II	595	2414	80

5 结论

对于考虑维修人员等级和维修人员种类的资源受限维修工序调度优化问题,本文建立了以维修时间最小和人力资源总负荷最小为目标函数的多约束优化模型。设计了基于关键路径法的优先权值编码方案,对混合粒子群遗传算法进行改进;设计了符合抢占式资源受限项目调度的粒子交叉方案,并结合实例对无抢占、一次抢占以及多次抢占方案进行对比。结果显示,在多目标约束下,多次抢占式调度方案略占优势,但对抢占次数较多的多次抢占式调度,反而会增加维修时间。因此,设计抢占式工序调度方案,应根据实际问题考虑多次抢占的次数。

下一步将考虑带有惩罚时间的无限制多次随机抢占方案在实际维修调度中的应用。

参考文献(References)

[1] 李晓宇,王新阁,方子立,等.面向任务的装备维修保障资源优化配置[J].国防科技,2011,32(3):48-52.
(Li X Y, Wang X G, Fang Z L, et al. A survey on optimization of mission-oriented equipment maintenance support resource allocation [J]. National Defense Science

- & Technology, 2011, 32(3): 48-52.)
- [2] Ballestín F, Valls V, Quintanilla S. Pre-emption in resource-constrained project scheduling[J]. *European Journal of Operational Research*, 2008, 189(3): 1136-1152.
- [3] Kaplan Lori A. Resource-constrained project scheduling with preemption of jobs[J]. *Industrial & Operations Engineering*, 1988.
- [4] Ballestín F, Valls V, Quintanilla S. Scheduling projects with limited number of preemptions[J]. *Computers & Operations Research*, 2009, 36(11): 2913-2925.
- [5] Cheng R W, Gen M. Resource constrained project scheduling problem using genetic algorithms[J]. *Intelligent Automation & Soft Computing*, 1997, 3(3): 273-286.
- [6] 祝政, 胡志华. 多次抢占项目调度问题的混合遗传算法[J]. *计算机工程与应用*, 2019, 55(6): 225-230.
(Zhu Z, Hu Z H. Hybrid genetic algorithm for multiple preemptive project scheduling problems[J]. *Computer Engineering and Applications*, 2019, 55(6): 225-230.)
- [7] 寿涌毅, 彭晓峰, 李菲, 等. 抢占式资源受限项目调度问题的遗传算法[J]. *浙江大学学报: 工学版*, 2014, 48(8): 1473-1480.
(Shou Y Y, Peng X F, Li F, et al. Genetic algorithm for preemptive resource-constrained project scheduling problem[J]. *Journal of Zhejiang University: Engineering Science*, 2014, 48(8): 1473-1480.)
- [8] Pengfei D, Jie Y, Hui N, et al. Improved cuckoo search algorithm for multi-skilled resource constrained project scheduling problems with generalized precedence relations[J]. *Application Research of Computers*, 2018, 35(5): 1315-1319.
- [9] Li Z T, Yuan X X, Tang X L, et al. A moving block sequence-based evolutionary algorithm for resource-constrained project scheduling problems[J]. *International Journal of Bio-Inspired Computation*, 2019, 14(2): 85.
- [10] Zhiqiang M, Zhengwen H, Nengmin W, et al. A genetic algorithm for the proactive resource-constrained project scheduling problem with activity splitting[J]. *IEEE Transactions on Engineering Management*, 2019, 66(3): 459-474.
- [11] Dai H, Cheng W, Guo P. An improved tabu search for multi-skill resource-constrained project scheduling problems under step-deterioration[J]. *Arabian Journal for Science & Engineering*, 2018, 43(6): 3279-3290.
- [12] Berthaut F, Pellerin R, Hajji A, et al. A path relinking-based scatter search for the resource-constrained project scheduling problem[J]. *International Journal of Project Organisation and Management*, 2018, 10(1): 1-36.
- [13] Maghsoudlou H, Afshar-Nadjafi B, Niaki S T A. Preemptive multi-skilled resource constrained project scheduling problem with hard/soft interval due dates[J]. *RAIRO-Operations Research*, 2019, 53(5): 1877-1898.
- [14] 陈俊杰, 同淑荣, 叶正梗, 等. 资源受限多项目调度问题的两阶段算法[J]. *控制与决策*, 2020, 35(8): 2013-2020.
(Chen J J, Tong S R, Ye Z G, et al. Two-stage algorithm for resource-constrained multi-project scheduling problem[J]. *Control and Decision*, 2020, 35(8): 2013-2020.)
- [15] Naber A. Resource-constrained project scheduling with flexible resource profiles in continuous time[J]. *Computers & Operations Research*, 2017, 84: 33-45.
- [16] Rostami S, Creemers S, Leus R. New strategies for stochastic resource-constrained project scheduling[J]. *Journal of Scheduling*, 2018, 21(3): 349-365.
- [17] 王涛. 基于混合进化算法的军用车辆维修保障资源调度优化研究[D]. 北京: 北京理工大学机电学院, 2013: 61-77.
(Wang T. Research on maintenance resource scheduling optimization for military vehicle based on hybrid evolutionary algorithm[D]. Beijing: School of Mechanical and Electrical Engineering, Beijing Institute of Technology, 2013: 61-77.)

作者简介

孙笑(1996—), 女, 硕士生, 从事装备维修保障任务调度模型与优化算法的研究, E-mail: 2740663769@qq.com;

宋卫星(1983—), 男, 硕士生, 从事装备维修保障系统的研究, E-mail: 88159073@qq.com;

班利明(1982—), 男, 工程师, 学士, 从事装备维修保障系统的研究, E-mail: 78503373@qq.com;

齐小刚(1973—), 男, 教授, 博士生导师, 从事健康管理与故障诊断、资源调度与优化算法等研究, E-mail: xgqi@xidian.edu.cn.

(责任编辑: 齐 霁)