

控制与决策

Control and Decision

面向建材装备集团制造的分布式多项目资源调度

张锦, 江丽, 郭钧, 杜百岗, 李益兵

引用本文:

张锦, 江丽, 郭钧, 等. 面向建材装备集团制造的分布式多项目资源调度[J]. 控制与决策, 2021, 36(9): 2133–2142.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1802>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[基于混合禁忌搜索算法的随机车辆路径问题](#)

Stochastic vehicle routing problem based on hybrid tabu search algorithm

控制与决策. 2021, 36(9): 2161–2169 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0107>

[基于种群演化的超参数异步并行搜索](#)

Asynchronous parallel hyperparameter search with population evolution

控制与决策. 2021, 36(8): 1825–1833 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1743>

[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>

[基于改进NSGA-II算法求解多目标资源受限项目调度问题](#)

An improved NSGA-II algorithm for multi-objective resource-constrained project scheduling problem

控制与决策. 2021, 36(3): 669–676 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0906>

[基于改进蛙跳算法的分布式两阶段混合流水车间调度](#)

An improved shuffled frog leaping algorithm for the distributed two-stage hybrid flow shop scheduling

控制与决策. 2021, 36(1): 241–248 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0472>

面向建材装备集团制造的分布式多项目资源调度

张锦, 江丽, 郭钧[†], 杜百岗, 李益兵

(1. 武汉理工大学机电工程学院, 武汉 430070; 2. 武汉理工大学数字制造湖北省重点实验室, 武汉 430070)

摘要: 针对建材装备集团项目执行过程中存在的项目内和项目间多类别资源协同共用现象, 提出并行调度机制下考虑多类别资源转移时间和转移成本的分布式多项目资源调度问题, 以最小化资源转移成本和项目执行工期为目标建立问题的数学模型. 为改善进化算法在局部搜索能力方面的不足, 提出将禁忌搜索与进化算法相结合, 构造一种内嵌禁忌搜索寻优搜索的多目标混合进化算法, 在保证算法全局搜索能力的前提下提升局部精确搜索能力. 同时, 考虑资源转移成本和时间对任务选取的影响, 改进任务选择的优先权值, 提出并行调度机制下资源转移冲突消解策略. 数据实验表明, 所提算法能够有效避免不合理的资源转移, 在求解质量方面具有良好的性能.

关键词: 建材装备集团; 分布式多项目资源调度; 资源转移成本; 混合进化算法; 禁忌搜索

中图分类号: TP39

文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2019.1802

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



引用格式: 张锦, 江丽, 郭钧, 等. 面向建材装备集团制造的分布式多项目资源调度[J]. 控制与决策, 2021, 36(9): 2133-2142.

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

ZHANG Jin, JIANG Li, GUO Jun[†], DU Bai-gang, LI Yi-bing

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China; 2. Hubei Digital Manufacturing Key Laboratory, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

Abstract: To solve the problem of resource sharing within and between projects in the process of project scheduling of building materials and equipment group, a distributed multi-project resource scheduling problem under the parallel scheduling mechanism is proposed, which considers the transfer time and transfer cost of multi-category resources. In addition, a mathematical model for the problem is established aiming at the total cost of multi resource transfer and the total execution time. In order to improve the deficiency of the evolutionary algorithm in local search ability, a multi-objective hybrid evolutionary algorithm with embedded tabu search is constructed. At the same time, considering the influence of resource transfer cost and time on task selection, the priority value of task selection is improved and the resource transfer conflict resolution strategy under the parallel scheduling mechanism is proposed. Data experiments show that the proposed algorithm can effectively avoid unreasonable resource transfer and has good performance in solving quality problems.

Keywords: building materials equipment group; distributed multi-project resource scheduling; resource transfer cost; hybrid evolutionary algorithm; tabu search

0 引言

随着科学技术的进步, 市场竞争日益激烈. 为了提高市场竞争力, 建材装备制造朝着集团化管控的方向发展^[1]. 建材装备集团产品多为成套建材设备, 具有批量小、结构复杂的特点, 其生产过程不再只是涉及单车间、单项目, 而是涉及到多主体协同工作, 具

有多项目、多任务并行的特点. 项目所需资源(如机器设备、技术工人等)对项目的按期完工尤为重要. 建材装备集团由于并行项目众多、关键设备购买和维护费用高昂以及高级技工聘请成本较高等问题, 常常会出现项目关键资源较为匮乏的现象, 影响项目的如期进行. 因此, 在生产过程中集团各分公司之间、分

收稿日期: 2019-12-24; 修回日期: 2020-03-01.

基金项目: 国家自然科学基金项目(51705386); 中国国家留学基金项目(201606955091); 中央高校基本科研业务费专项资金项目(2018-IVB-010).

责任编辑: 王凌.

[†]通讯作者. E-mail: junguo@whut.edu.cn.

公司与外协厂之间常常存在资源共享现象^[2]. 由于不同资源的特异性, 不同资源在不同项目、不同任务之间转移的过程中所需时间和成本开销是不同的. 在项目执行过程中, 资源转移策略与项目成本和项目完工时间密切相关, 项目进行过程中清晰合理的资源转移规划能极大减少项目开支, 缩短项目工期, 而盲目的资源转移往往造成项目成本的增加和进度的滞后.

建材装备集团分布式多项目资源调度问题是一种资源受限多项目调度问题(resource constrained multi-project scheduling problem, RCMPSP)的拓展形式, 近年来国内外学者针对 RCMPSP 问题进行了很多的研究. 在对 RCMPSP 问题的模型建立方面, 文献[3]建立了以项目完工时间为目标的局部调度模型及以多项目总延期成本为目标的全局调度模型, 并设计了正向逆向调度改进的遗传算法求解局部调度模型, 综合考虑多项目延期成本的差异, 设计了多回合序贯博弈谈判机制协调全局资源分配; 文献[4]以项目平均延期时间和项目工期最小为目标, 建立了多项目调度模型, 并采用改进遗传算法对模型进行求解. 针对项目执行过程中资源转移共享现象, 现有文献主要考虑转移的时间因素. 文献[5]考虑资源传递时间, 提出了以多项目总工期及各个项目工期的加权和最短为目标的多项目调度模型; 文献[6]针对资源共享型节拍式流水装配多项目调度问题, 考虑到资源转移时间, 采用基于局部两作业转移需求的改进并行调度机制, 解决了基于资源转移优先规则的资源调度策略的不足; 文献[7]建立了考虑资源转移时间的项目调度数学模型, 采用一种将遗传算法与分支定界法结合的方法进行求解. 上述文献主要以项目工期为目标函数, 而对资源转移过程中的成本问题考虑较少. 建材装备集团项目资源多为大型生产设备, 资源转移费用较为高昂, 其转移成本也是建材装备集团分布式多项目资源调度决策中的重要考虑因素. 在分布式调度求解算法方面, 现有研究主要采用启发式方法和智能优化方法^[8], 针对特定问题的特征, 提出高效实用的规则进行求解; 文献[9]考虑分布式多项目调度问题的信息不对称性和各单项目决策者的自利性, 设计了基于合作博弈协商机制的分阶段进化算法对问题求解; 文献[10]针对抢占式任务可拆分多项目调度问题, 提出了一个长工期任务优先拆分、长工期项目优先拆分和高资源利用率项目优先拆分3种任务拆分优先级判断规则, 通过实例分析验证了所提出方法在多项目调度总工期的优化效果和求解效率; 文献[11]提出了一种基于整数规划的启发式算法求解多项目

调度问题, 设计了基于整数规划的局部搜索提升算法性能; 文献[12]提出了一种分支界定算法解决资源受限项目调度问题, 采用精确复合下界策略进行求解; 文献[13]针对考虑顺序相关准备时间的分布式两阶段混合流水车间调度问题, 提出了一种改进的蛙跳算法以同时最小化拖后工件数和最大完成时间; 文献[14]建立了以最小化最大完工时间为优化目标的分布式柔性作业车间调度优化模型, 并改进基本人工蜂群算法以使其适用于求解分布式柔性作业车间调度问题; 文献[15]针对不确定分布式置换流水线调度问题, 采用区间数表示工序加工时间, 以最小化区间最大完工时间为目标, 利用问题特性在果蝇优化框架内提出了一种混合离散果蝇优化算法; 文献[16]针对多模式资源受限项目调度问题, 提出了一种基于列生成的分布式调度算法, 并通过算例验证了该分布式算法具有较好的求解质量和计算效率.

综上所述, 本文基于建材装备集团各制造企业地理位置分布具有差异性, 以及项目周期长、涉及资源种类多等特点, 综合考虑分布式多项目生产过程中的资源转移时间和转移成本的问题, 建立多项目调度模型, 采用混合进化算法对模型进行求解, 并采用基于并行调度策略的冲突消解算法确定具体资源转移方案, 最后通过数据实例验证算法的有效性.

1 模型描述

1.1 问题描述

建材装备集团分布式多项目资源调度计划分为项目内资源调度计划和项目间资源调度计划, 对于项目内资源调度计划, 其目的是保证任务资源转移时能选取转移成本和转移时间相对较少的转移策略, 当项目内部资源无法满足要求时, 需要外部资源协助, 即通过项目间的资源调配满足项目资源要求. 建材装备集团多项目资源调度问题可描述如下: 假设有 n 个并行项目, 项目集合为 $\{P_1, P_2, \dots, P_n\}$, 所有项目的任务集合为 $\{tsk_1, tsk_2, \dots, tsk_{T-n}\}$, 资源种类集合为 $\{R_1, R_2, \dots, R_m\}$, 资源可在项目内或不同项目的任务之间发生转移, 每种资源在任意两个任务之间都有对应的转移时间和转移成本, 资源 k 的资源固定转移时间矩阵为

$$t_g = \begin{bmatrix} 0 & t_{g-2k1} & \dots & t_{g-(T-n)k1} \\ t_{g-1k2} & 0 & \dots & t_{g-(T-n)k2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ t_{g-1k(T-n)} & t_{g-2k(T-n)} & \dots & 0 \end{bmatrix}. \quad (1)$$

单位可变转移时间矩阵为

$$t_b = \begin{bmatrix} 0 & t_{b-2k1} & \dots & t_{b-(T-n)k1} \\ t_{b-1k2} & 0 & \dots & t_{b-(T-n)k2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ t_{b-1k(T-n)} & t_{b-2k(T-n)} & \dots & 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

资源转移单位固定费用矩阵为

$$c_g = \begin{bmatrix} 0 & c_{g-2k1} & \dots & c_{g-(T-n)k1} \\ c_{g-1k2} & 0 & \dots & c_{g-(T-n)k2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ c_{g-1k(T-n)} & c_{g-2k(T-n)} & \dots & 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

单位可变费用矩阵为

$$c_b = \begin{bmatrix} 0 & c_{b-2k1} & \dots & c_{b-(T-n)k1} \\ c_{b-1k2} & 0 & \dots & c_{b-(T-n)k2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ c_{b-1k(T-n)} & c_{b-2k(T-n)} & \dots & 0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

其中: t_{g-ikj} 、 t_{b-ikj} 、 c_{g-ikj} 和 c_{b-ikj} 分别表示一个单位资源 k 从任务 i 转移到任务 j 处所花费的固定时间、单位可变时间、固定成本和单位可变成本。如何确定每个项目任务优先级以及资源转移策略,使得多项目执行过程中的资源转移费用和项目总执行时间最小是本文要解决的问题。

为方便问题建模和求解,在每个项目中引入虚拟开始任务和虚拟结束任务,虚拟开始任务和虚拟结束任务为项目资源调度的起点和终点,项目初期资源全部存储在虚拟开始任务处,项目结束时任务使用的所有资源均需转移至虚拟结束任务处。同时考虑到建材装备集团的生产实际情况,本文做出如下假设。

- 1) 项目开始时所有共享资源从同一位置开始调度,所有项目资源从项目起始任务处开始调度,项目结束时所有资源释放后转移至同一虚拟结束任务处。
- 2) 多项目执行过程中不同项目除共享部分资源外完全独立,不同项目中的任务间不存在时序约束。
- 3) 资源转移策略的不同只对资源转移成本有影响,暂不考虑对项目其他成本的影响。
- 4) 由于建材装备集团生产过程中工件多为大型工件,具有转移成本较高的特点,实际生产中除完工后发运到客户处外极少发生转移。原材料多为建筑材料,在各分公司各车间均有较为充足的储备,转移需求也较少。因此本文假设在生产过程中工件及原材料等其他物资不发生转移,对这些物资的转移时间和成本不作考虑。
- 5) 同一资源从任务 i 转移至任务 j 与从任务 j 转移至任务 i 所对应的转移时间和转移成本一致。

1.2 数学模型

针对上述问题,作出如下变量定义。 P 为所有项目集合; Tsk 为所有任务集合; $P_i - tsk$ 为项目 i 的所有任务集合; $Tsk - n$ 为任务总数; Tsk_{Ri-pre} 为转移资源至 tsk_i 的任务集合; Tsk_{Ri-lat} 为等待 tsk_i 释放资源的任务集合; $P - n$ 为项目总数; t_i 为 tsk_i 预期生产消耗时间; t_{i-e} 为 tsk_i 预期结束时间; t_{i-s} 为 tsk_i 预期开始时间; T_i 为项目 i 预期执行时间; Pre_i 为 tsk_i 的前置任务集合; Lat_i 为 tsk_i 的后置任务集合; R 为所有资源集合; $R - n$ 为资源种类总数; R_k 为第 k 种资源; t_{g-jki} 为 R_k 从 tsk_j 处转移至 tsk_i 处所需的固定时间; t_{b-jki} 为 R_k 从 tsk_j 处转移至 tsk_i 处所需的单位可变时间; t_{jki} 为 R_k 从 tsk_j 处转移至 tsk_i 处所需的总时间; c_{g-jki} 为 R_k 从 tsk_j 处转移至 tsk_i 处所需的固定成本; c_{b-jki} 为 R_k 从 tsk_j 处转移至 tsk_i 处所需的单位可变成本; R_{ik-n} 为从 tsk_i 正常进行所需资源 R_k 的数量; x_{jki} 为 0-1 决策变量,值为 1 表示要从 tsk_j 处转移资源 R_k 至 tsk_i 处,值为 0 表示不存在此种转移行为; y_{jki} 表示从 tsk_j 处转移资源 R_k 至 tsk_i 处的数量; c 为资源转移总成本。

因为建材装备集团不同项目对时间和成本的要求不尽相同,同时资源具有特异性,资源转移时间与成本之间不存在绝对的函数关系,所以为了衡量资源转移对项目工期和项目开销的影响,本文选择最小化多项目总工期和最小化资源转移成本两个指标作为目标函数。

目标函数 1 为

$$\min T = \min \sum T_i, i \in P. \quad (5)$$

目标函数 2 为

$$\min c = \min \left(\sum_{j=1}^{Tsk-n} \sum_{i=1}^{Tsk-n} x_{jki} \times c_{jki} \right), \quad (6)$$

$i \in Tsk, j \in Tsk, k \in R.$

$$\text{s.t. } T_i = \max(t_{j-e}), i \in P, \forall j \in P_i - tsk; \quad (7)$$

$$t_{j-e} < t_{i-s}, \forall j \in Pre_i, i \in Tsk; \quad (8)$$

$$t_{j-s} > t_{i-e}, \forall j \in Lat_i, i \in Tsk; \quad (9)$$

$$t_{i-s} = \max(t_{j-e} + x_{jki} \times (t_{g-jki} + y_{jki}t_{b-jki})), \quad (10)$$

$t \in Tsk, k \in R, \forall j \in Tsk_{Ri-pre};$

$$t_{i-s} \geq t_{j-e}x_{jki} + t_{jki}, \quad (11)$$

$\forall j \in Tsk_{Ri-pre}, \forall k \in R_{tski};$

$$c_{jki} = x_{jki} \times (c_{g-jki} + c_{b-jki} \times y_{jki}), \quad (12)$$

$i \in Tsk, j \in Tsk, k \in R;$

$$x_{jki} = 0, \forall j \in Lat_i, i \in Tsk, k \in R;$$

$$\sum y_{jki} = R_{ik} - n, \quad (13)$$

$$i \in \text{Tsk}, k \in \text{Tsk}, j \in \text{Tsk}_{R_i-\text{pre}}; \quad (14)$$

$$\sum y_{jki} = R_{jk} - n, \quad (15)$$

$$i \in \text{Tsk}_{R_j-\text{lat}}, k \in R, j \in \text{Tsk}.$$

目标函数(5)表示并行多项目总工期最小,目标函数(6)表示多项目资源转移总成本最小,约束(7)表示项目预期执行时间为项目内最晚结束的任务结束时间,约束(8)表示当前任务必须在其紧前任务全部结束后才能开始执行,约束(9)表示当前任务结束时间必须早于所有紧后任务,约束(10)表示任务正式开始时间、可转移资源任务的结束时间与资源转移时间之间的关系;约束(11)表示 tsk_i 应在所需资源全部满足后才能开始执行,约束(12)表示任务所需各类资源转移成本与 c_{g-jki} 和 c_{b-jki} 之间的关系,约束(13)表示资源不能从后置任务处转移,约束(14)表示从其

他任务转移至 tsk_i 的各种资源数量应该与 tsk_i 所需资源数量一致,约束(15)表示任务所占有的资源最终必须全部转移(可能转移至其他任务,也可能转移至最终虚拟结束任务处).

2 混合进化算法

2.1 算法总体步骤

进化算法是一类模拟自然选择和生物遗传来搜索最优解的算法,因其简单易用、鲁棒性强等特点,近年来在不同的领域都有比较广泛的应用^[17-20]. 本文提出混合进化算法对多项目资源转移问题求解,采用分段随机交叉操作和变异操作获取初始解,并采用禁忌搜索算法改善算法整体的局部搜索能力. 在得到项目任务优先级队列之后,采用基于并行调度策略的资源转移冲突消解算法确定具体的资源转移策略,并求解双目标帕累托最优解. 其具体过程如图1所示.

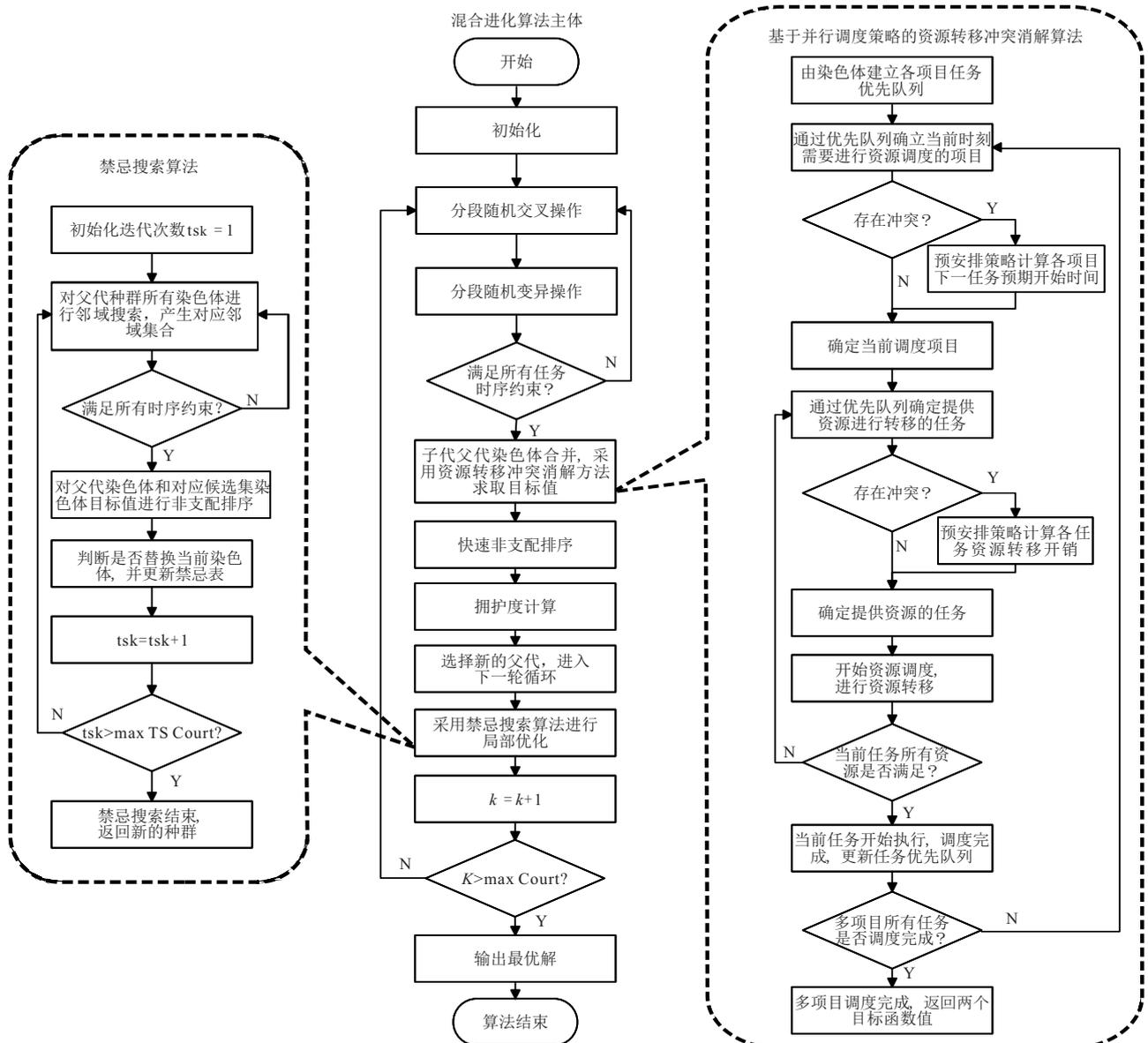


图1 算法流程

混合进化算法的过程分为如下步骤。

step1: 编码。

本文设置编码由所有任务的优先调度序列组成。假设有 N 个项目, 每个项目分别有 n_1, n_2, \dots, n_N 个不同的任务, 则总任务数为

$$Tsk - n = n_1 + n_2 + \dots + n_N. \quad (16)$$

首先将所有任务编号, 从1到 $Tsk - n$, 本文设置染色体长度为 $L = Tsk - n$, 染色体中每个基因表示一个任务, 不同项目中的任务按照项目号依次排列, 同一项目中基因的顺序表示任务的优先顺序。

step2: 初始化。

初始染色体分段随机生成, 每个项目段内的任务排列方式随机生成。第1个项目段范围内, 即第1到 n_1 个基因 X_1, X_2, \dots, X_{n_1} 可以随机排序, 第2个项目段范围内, 即第 $n_1 + 1$ 到 $n_1 + n_2$ 个基因 $X_{n_1+1}, X_{n_1+2}, \dots, X_{n_1+n_2}$, 可以随机排序, 依此类推。

step3: 分段随机交叉操作即为通过双亲产生子代的过程, 本文采用交换其中一个项目的优先级顺序的方式进行交叉, 既满足了交叉规律, 又不会对其他项目优先级顺序造成影响。

交叉过程分为如下两步: 1) 生成一个 $1 \sim N$ 的随机数, 确定要交换的项目段; 2) 交换双亲对应位置的基因片段, 产生子代。

step4: 分段随机变异操作。

变异的过程分为如下几步:

1) 随机选择染色体中的一个项目, 假设选定的项目有 N 个任务;

2) 随机生成一个整数 $m (m \leq N/2)$, 将选定项目第 $1 \sim m$ 和 $N - m + 1 \sim N$ 片段位的任务进行交换;

3) 验证变异后个体是否符合所有时序约束条件, 符合则生效, 不符合则交换不满足时序约束的任务。

step5: 选择操作。

本文采用非支配排序的方式对个体进行选择, 同时为了保证算法的收敛性, 将父代染色体和子代染色体合并之后进行评价和选择。其具体过程分为如下两个步骤:

1) 获取子代 $popSize$ 条染色体对应的资源转移方案, 将每次资源转移操作对应的开始时刻 t , 资源提供方任务号 f_{Tsk} , 资源接收方任务号 t_{Tsk} , $R - n$ 种资源的转移数量 $tn_{1i}, tn_{2i}, \dots, tn_{(R-n)i}$ 均保存至资源转移方案矩阵 M 中, 并进一步计算得到双目标函数值 (c_1, c_2, \dots, c_p) 和 (t_1, t_2, \dots, t_p) , 采用快速非支配排序方法对父代和子代染色体对应的 $2 \times popSize$ 组目标函数值进行排序, 得出每组解 (c_i, t_i) 对应的非支配等级 zp_{rank_i} , 并计算出拥挤度 zp_{d_i} 。

2) 通过 step5 的 1) 中的 $2 \times popSize$ 组目标函数值对染色体进行选择操作, 在进行选择操作时, 如果两条染色体对应 zp_{rank_i} 不同, 则选择 zp_{rank_i} 较小的一条, 若 zp_{rank_i} 相同则选择 zp_{d_i} 较大的那一条。一共选择 $popSize$ 条染色体进行禁忌搜索操作, 禁忌搜索得到的结果进入下一轮循环。

step6: 解码操作。

通过以上步骤得到最优资源转移方案矩阵 M 。

$$M = \begin{bmatrix} t_1 & f_{Tsk_1} & t_{Tsk_1} & t_{n_{11}} & t_{n_{21}} & \dots & t_{n_{(R-n)_1}} \\ t_2 & f_{Tsk_2} & t_{Tsk_2} & t_{n_{12}} & t_{n_{22}} & \dots & t_{n_{(R-n)_2}} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ t_{t_c} & f_{Tsk_{t_c}} & t_{Tsk_{t_c}} & t_{n_{1t_c}} & t_{n_{2t_c}} & \dots & t_{n_{(R-n)_{t_c}}} \end{bmatrix}. \quad (17)$$

其中: t_c 为资源转移总次数, 即对应的多项目执行过程中的资源转移方案如下:

1) 时刻 t_1 , 从 f_{Tsk_1} 转移资源至 t_{Tsk_1} , 具体转移数量为 $t_{n_{11}}$ 个单位资源 R_1 、 $t_{n_{21}}$ 个单位资源 R_2 、 \dots 、 $t_{n_{(R-n)_1}}$ 个单位资源 R_{R-n} ;

2) 时刻 t_2 , 从 f_{Tsk_2} 转移资源至 t_{Tsk_2} , 具体转移数量为 $t_{n_{12}}$ 个单位资源 R_1 、 $t_{n_{22}}$ 个单位资源 R_2 、 \dots 、 $t_{n_{(R-n)_2}}$ 个单位资源 R_{R-n} 。

依此类推。

2.2 基于禁忌搜索算法的局部搜索策略

通过交叉和变异操作之后, 原有的优秀个体可能被破坏, 因此禁忌搜索可以通过局部搜索对被破坏的优秀染色体进行修复。同时, 禁忌搜索算法具有记忆功能, 在搜索过程中通过将搜索过程得到的邻域解录入禁忌表的方法避免陷入局部最优。本文将 TS 与进化算法相结合, 将进化算法得出的结果作为 TS 的初始解, 对初始解进行 TS 算法邻域搜索操作。在禁忌搜索算法执行过程中, 禁忌长度的设置显得尤为重要。禁忌长度过长常常会导致算法搜索慢、效率低, 而禁忌长度过短, 则可能导致算法陷入局部最优。因此, 本文设置与任务数量以及迭代次数相关的动态禁忌长度, 其具体值为

$$\text{len}_T = \begin{cases} 2 \times Tsk - n, & k < \frac{1}{3} \max TSCnt; \\ 4 \times Tsk - n \times \frac{k}{\max TSCnt}, & \frac{1}{3} \max TSCnt \leq k < \frac{2}{3} \max TSCnt; \\ Tsk - n \times \frac{k}{\max TSCnt}, & k \geq \frac{2}{3} \max TSCnt. \end{cases} \quad (18)$$

其中: k 为当前迭代次数, $\max TSCnt$ 为最大迭代次数。

禁忌搜索算法具体步骤如下。

step1: 选取初始解.

将混合进化算法交叉变异结束后得到的 popSize 条染色体 $Y_1, Y_2, \dots, Y_{popSize}$ 作为禁忌搜索算法的初始解, 随机选取一个初始解 Y_i 进行禁忌搜索操作, 设置禁忌表 $T = \emptyset$.

step 2: 邻域选择.

先随机生成一个项目号 j , 在项目 j 中运用两点交换的方法生成邻域染色体, 校验是否满足禁忌要求, 选择满足禁忌要求的染色体候选集.

step 3: 邻域评价.

通过计算模糊隶属度的方法计算候选集中的染色体适应度值, 将当前染色体 X_i 对应的目标值 $c(X_i)$ 、 $t(X_i)$ 和候选集中的染色体 X'_i 对应的目标值 $c(X'_i)$ 、 $t(X'_i)$ 进行非支配排序. 若判断得到候选集中染色体 X'_i 对应的目标函数值优于 X_i 对应的目标函数值, 则用 X'_i 替换 X_i ; 若 X'_i 不存在于禁忌表 T 中, 则更新禁忌表 T .

step 4: 判断是否满足结束条件.

设置最大迭代次数 max TSCnt, 设定临时变量 t , 每进行一次 step 2 和 step 3 的操作即 $t = t + 1$, 判断 t 等于 max TSCnt 即结束, 否则重复 step 2 和 step 3.

2.3 考虑并行调度的资源转移冲突消解算法

2.3.1 多项目并行调度冲突

多项目任务调度过程采用并行调度的方法进行调度. 如图2所示, 将某时刻的所有任务分为等待调度任务 (waiting for scheduling tasks, WST)、调度中任务 (scheduling tasks, ST) 和已调度任务 (scheduled tasks, SDT) 3种, 将 SDT 分为存在资源的候选转移资源的任务 (scheduled tasks with resources, STWR) 和不可转移资源任务 (scheduled tasks without resources, STWOR) 两种, 对于 ST, 可以选择从 STWR 处进行资源转移.

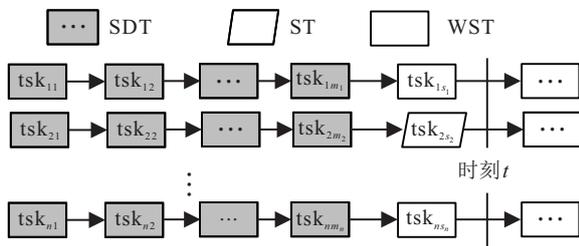


图2 并行调度任务执行状态

考虑到生产实际和算法复杂程度, 资源 R_k 从 tsk_i 转移至 tsk_j 时, 做如下规定: 资源转移数量 $R - n_{ikj}$ 必须为任务 tsk_i 所含资源数量 R_{ik} 或任务 tsk_j 当前需要的资源数量 R_{jk-rem} , 其中 R_{jk-rem} 为任务需要的资源数量与已经转移的资源数量的差值. 即资源可不转移, 或按需尽可能多地转移, 不存

在部分转移的情况, 即不存在转移数量同时小于 R_{ik} 和 R_{jk-rem} 的情况. 同时资源转移数量不能超过 R_{jk-rem} , 即资源不会过需转移.

要完成多项目的并行调度须考虑以下冲突情形:

情形1 不同项目的任务优先级冲突.

项目 m 中任务 i 和项目 n 中任务 j 在同一时刻等待开始调度, 要从中选择一个优先调度的任务 ST. 此时又有以下几种情况:

1) 任务 i 和 j 都不需要其他项目资源.

此种情形两个任务的先后顺序对最终调度结果没有影响, 因此只需分别进行项目内资源调度即可. 本文采取的方法是优先调度项目号较小的.

2) 任务 i 和 j 某一方需要其他项目资源, 假设为 i .

此时优先调度任务 j , 能避免调度任务 i 之后对任务 j 的项目内调度方案造成影响.

3) 任务 i, j 都需要其他项目资源.

此时优先调度平均资源转移时间和成本较小的任务.

情形2 项目内 STWR 冲突.

任务开始调度时, 可转移资源的任务 STWR 通常有多个, 因此从哪些任务处转移资源也是需要确定的问题. 当任务 j 开始调度时, 有 m 个任务完成调度且存在未转移的资源, 则任务 j 可以从这 m 个任务中任意调度资源.

2.3.2 多项目并行调度策略

首先, 对每个 STWR 分别进行资源转移安排, 计算对应资源转移所需的时间和成本开销, 此过程称为预安排. 在所有 STWR 对应的预安排结果中通过非支配排序确定最终转移资源的任务进行资源转移, 具体步骤如下.

step 1: 原始数据提取, 包含资源转移时间和成本矩阵、多项目任务数量矩阵、任务资源数量矩阵等.

step 2: 获得每个项目等待队列中的下一任务最早开始时间.

for $i = 1$ to $P - n$

从优先队列中下一个调度任务预安排下一任务, 将所有项目下一任务最早开始时间储存在 prePtList 集合中.

end for

step 3: 通过 step 1 中 prePtList 的最小开始时间确定下一步调度项目索引 pIndex 和项目当前花费时间 ptime.

step 4: 判断当前项目资源是否满足要求, 以决定是否需要其他项目资源.

获取等待队列第一个任务 nextTask 作为下一步需要调度的任务.

for $k = 1$ to $R - n$

项目内资源数量是否满足 nextTask 需要的资源数量,若满足,则 step 5 中的候选转移资源任务集合 stwrList 从项目内选择,否则从所有项目中选择.

end for

step 5: 进行预调度,确定最优转移任务.

for each stwr in stwrList

确定资源转移数量,资源转移数量为 stwr 所含资源数量和 nextTask 所需资源数量中较小者. 通过资源转移数量计算转移单位资源所需的平均转移时间和转移费用,通过非支配排序将两者均较小的 stwr 确定为正式进行资源转移的任务 transStwrIndex.

end for

step 6: 进行正式调度.

for $k = 1$ to $R - n$

进行资源转移,将任务资源数量集合中 stwr 对应的资源数量减少, nextTask 对应的资源数量增加. 更新当前项目时间和资源转移总成本.

end for

step 7: 判断当前任务所有资源是否满足要求.

for $k = 1$ to $R - n$

循环遍历每种资源,比较当前资源是否满足要求,若全部满足,则当前任务资源转移结束,开始执行,更新项目时间,否则返回 step 4,选择下一个 stwr 进行转移.

end for

step 8: 判断所有项目是否已结束调度.

for $i = 1$ to $P - n$

判断所有项目等待队列是否为空,若是,则算法结束,输出最终结果,否则返回 step 2.

end for

3 实验仿真与分析

为了验证本文提出的模型和算法的有效性,以某建材装备集团的分布式多项目资源调度过程为例,包含6个项目、3种资源,其多项目任务资源信息如表1所示,其中不同任务间的不同资源转移时间和转移成本都不同.表2列出在项目1中各任务之间转移资源1所需转移时间和转移成本.

为了验证本文算法的有效性,与改进非支配排序遗传算法(nondominated sorting genetic algorithm II, NSGA-II)和基于多目标的差分进化算法(differential evolution, DE)、蚁群算法(ant colony algorithm, ACO)、粒子群优化算法(particle swarm optimization, PSO)进行对比分析.在2.5 GHz Intel Core i5 处理器,8 G RAM, Windows10 系统的配置环境下,通过 C++ 语言

和 Matlab R2017a 软件对算法进行实现.5种算法种群规模为200,迭代次数为500,其他参数设置如表3所示.

表1 项目任务信息表

项目号	任务号	后置任务	工期/天	所需资源数量		
				R_1	R_2	R_3
1	1	2,3	19	6	5	2
	2	—	26	6	4	2
	3	5	17	4	5	3
	4	—	31	4	6	3
	5	—	21	7	2	2
2	6	9	21	3	5	4
	7	—	20	5	4	1
	8	—	22	4	4	3
	9	11	27	7	5	3
	10	—	22	6	4	1
	11	—	21	8	6	2
3	12	13,17	29	8	4	3
	13	—	22	2	3	2
	14	—	34	2	4	4
	15	18	28	8	7	3
	16	—	17	6	6	3
	17	—	26	8	6	3
	18	—	25	3	4	3
	19	—	22	5	6	3
4	20	—	22	4	6	2
	21	23	29	4	5	2
	22	—	31	1	6	2
	23	24	27	5	7	4
	24	—	30	6	5	4
5	25	30	30	7	5	2
	26	—	33	2	4	2
	27	—	18	6	5	3
	28	29	15	4	7	1
	29	—	27	4	7	2
	30	—	22	4	5	2
	31	—	26	3	6	4
6	32	—	30	4	4	4
	33	37	32	1	5	2
	34	—	30	1	5	2
	35	—	20	6	4	3
	36	—	30	5	4	4
	37	—	25	6	4	3

表2 项目1中资源1的转移时间和成本

任务号 (i, j)	t_{g-j1i} /天	t_{b-j1i} /天	c_{g-j1i} /百元	c_{b-j1i} /百元
(1,2)	1	0.3	5.7	2.1
(1,3)	1.1	0.5	5.4	1.2
(1,4)	0.6	0.5	4.8	3
(1,5)	1.1	0.4	6	2.3
(2,3)	0.9	0.5	7.5	1.4
(2,4)	0.6	0.5	5	1.2
(2,5)	0.7	0.3	7.3	3.3
(3,4)	0.9	0.4	6.2	1.5
(3,5)	1.1	0.4	6.2	1.6
(4,5)	1.1	0.5	4.8	2.7

表3 算法主要参数设置

参数	HEA	NSGA-II	DE	ACO	PSO
交叉概率	0.9	0.9	0.9	—	—
变异概率	0.1	0.1	0.1	—	—
惯性权重	—	—	—	—	0.6
个体因子	—	—	—	—	2
社会因子	—	—	—	—	2
飞翔速度	—	—	—	—	3
缩放因子	—	—	0.5	—	—
挥发因子	—	—	—	0.5	—
信息素重要度	—	—	—	1	—
启发因子	—	—	—	2	—
信息素增强度	—	—	—	100	—

图3为5种算法所得解中非支配解的对比结果. 在相同的环境以及终止条件下, 本文提出的混合进化算法(HEA)的性能优于另外4种对比算法. 结合建材装备制造集团多项目实际情况, 从本文HEA算法得到的帕累托前沿图中选择对应项目总时间为1234.70天, 转移成本为98087.00元的点, 其对应的染色体编码为:1-3-4-2-5-7-6-8-10-9-11-19-12-15-14-13-18-16-17-22-21-20-23-24-31-25-28-29-30-26-27-35-33-34-32-36-37. 通过解码操作得到的资源转移方案如图4所示. 为使得转移过程更加清晰明了, 本文略

去了将所有任务持有资源转移至最终虚拟结束点的过程.

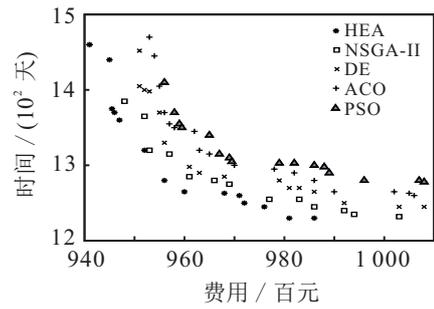


图3 算法结果对比

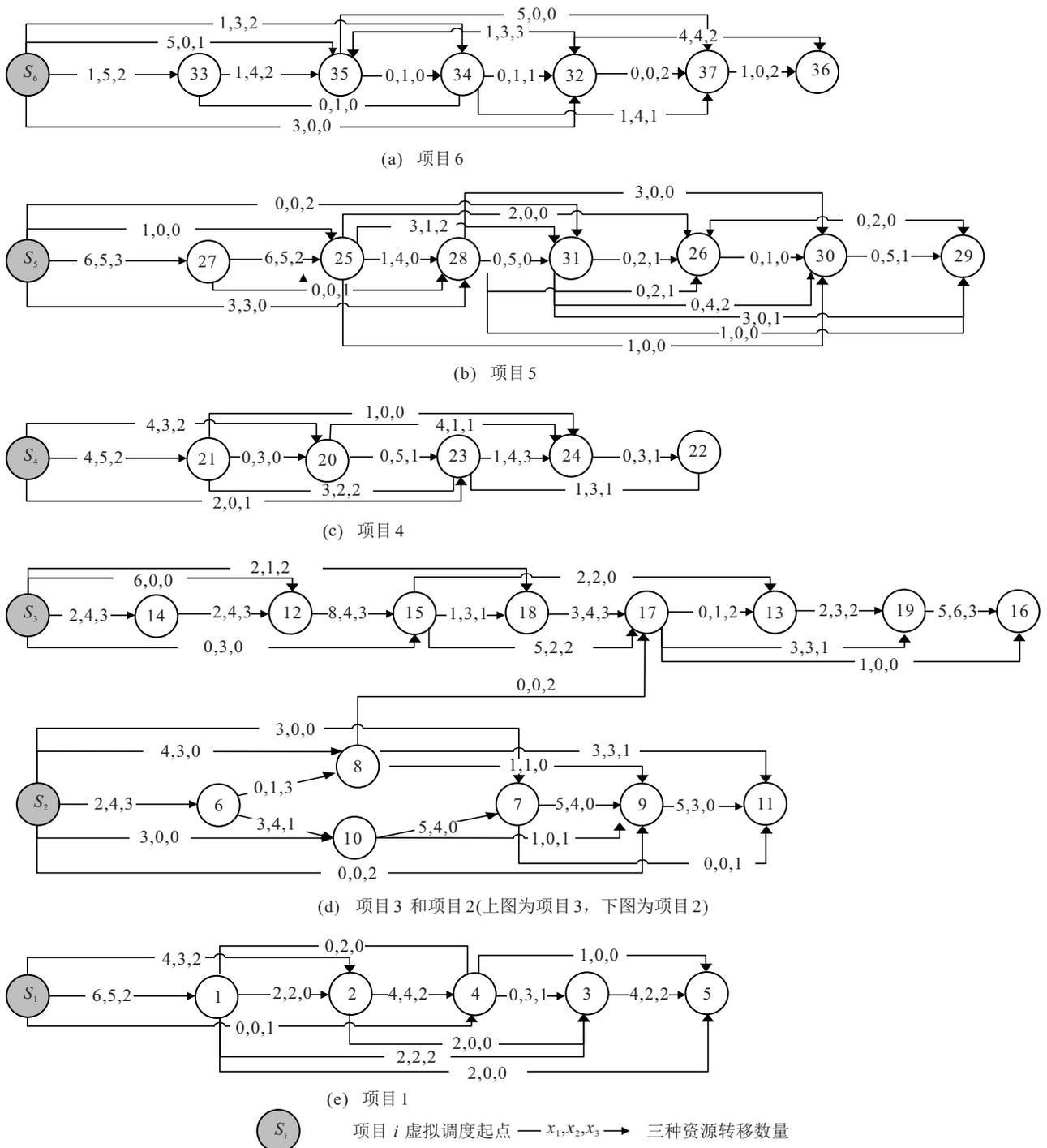


图4 多项目资源转移方案

从图4可以看出,多项目资源转移以项目内资源转移为主,但是同时也存在项目间资源转移的情况.如项目4中的任务21与项目5中的任务28之间存在资源转移.

为进一步说明所提算法的适用性,本文选取3、6、12个项目3种规模情况采用5种算法分别进行求解,最优结果如表4所示.

表4 不同规模算例结果

算法	3个并行项目		6个并行项目		12个并行项目	
	T/天	c/元	T/天	c/元	T/天	c/元
HEA	623.3	47413.3	1234.7	98087	2813	193506.9
NSGA-II	626.7	47726.5	1259.9	98366.2	2988.6	202365.6
DE	630.6	47551.6	1266.8	98443.6	2966.7	202344.5
ACO	644	48036	1289.5	99062	3466.5	205521.3
PSO	636.6	47600	1290.6	98533.5	3023.8	198846.6

从表4可以看出,3种项目规模下本文算法得出的调度时间和成本均小于另外4种算法.说明本文算法是解决建材装备制造企业分布式多项目资源调度问题的一种有效方法.

4 结论

本文以建材装备制造企业生产实际为背景,提出了一种考虑资源转移时间和成本的多项目调度模型.针对问题的特点,提出了一种混合进化算法对模型进行求解,设计了考虑并行调度的资源转移冲突消解算法,并最终通过多项目数据实验和算法比较验证了本文所提出的方法的有效性和适用性.

参考文献(References)

[1] 杜百岗,郭顺生,彭兆,等.集团制造多主体外协订单任务制造资源配置[J].计算机集成制造系统,2015,21(2):455-466.
(Du B G, Guo S S, Peng Z, et al. Multi-agent manufacturing resource allocation of outsourcing order in group manufacturing[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2015, 21(2): 455-466.)

[2] 王磊,郭顺生,李西兴,等.基于改进蚁群算法的多主体制造资源配置冲突协调方法[J].计算机集成制造系统,2017,23(12):2561-2570.
(Wang L, Guo S S, Li X X, et al. Multi-Agent manufacturing resource allocation conflict resolution based on improved ant colony algorithm[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2017, 23(12): 2561-2570.)

[3] 李飞飞,徐哲,于静.基于序贯博弈谈判机制的分布式多项目调度[J].系统工程理论与实践,2018,38(3):696-709.
(Li F F, Xu Z, Yu J. A sequential game-based

negotiation approach to distributed multi-project scheduling problem[J]. Systems Engineering—Theory & Practice, 2018, 38(3): 696-709.)

[4] Okada I, Weng W B, Yang W B, et al. A genetic algorithm with local search using activity list characteristics for solving resourceconstrained multiproject scheduling problem[J]. IEEE Transactions on Electrical and Electronic Engineering, 2016, 11(1): 34-43.

[5] 宗砚,刘琼,张超勇,等.考虑资源传递时间的多项目调度问题[J].计算机集成制造系统,2011,17(9):1921-1928.
(Zong Y, Liu Q, Zhang C Y, et al. Multi-project scheduling problem with resource transfer time[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2011, 17(9): 1921-1928.)

[6] 朱宏伟,陆志强.考虑资源转移时间的项目可拆分资源受限多项目调度问题[J].计算机集成制造系统,2019,25(3):586-597.
(Zhu H W, Lu Z Q. Modeling and improved algorithm for resource-constrained multi-project scheduling problem based on project splitting with resource transfer time[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2019, 25(3): 586-597.)

[7] 陆志强,刘欣仪.考虑资源转移时间的资源受限项目调度问题的算法[J].自动化学报,2018,44(6):1028-1036.
(Lu Z Q, Liu X Y. Algorithm for resource-constrained project scheduling problem with resource transfer time[J]. Acta Automation Sinica, 2018, 44(6): 1028-1036.)

[8] 王凌,邓瑾,王圣尧.分布式车间调度优化算法研究综述[J].控制与决策,2016,31(1):1-11.
(Wang L, Deng J, Wang S Y. Survey on optimization algorithms for distributed shop scheduling[J]. Control and Decision, 2016, 31(1): 1-11.)

[9] 刘东宁,徐哲,李飞飞.基于合作博弈协商机制的分布式资源受限多项目调度[J].系统工程理论与实践,2019,39(6):1507-1516.
(Liu D N, Xu Z, Li F F. Distributed resource constrained multi project scheduling problem with cooperative game based negotiation mechanism[J]. System Engineering—Theory & Practice, 2019, 39(6): 1507-1516.)

[10] 王磊,聂兰顺,战德臣,等.求解任务可拆分多项目协同调度问题的启发式算法[J].控制与决策,2017,32(6):1013-1018.
(Wang L, Nie L S, Zhan D C, et al. Heuristic algorithm for solving multi-project collaborative scheduling problem with activity splitting[J]. Control and Decision, 2017, 32(6): 1013-1018.)

[11] Toffolo T A M, Santos H G, Garvalho M A M, et al.

- An integer programming approach to the multimode resource-constrained multiproject scheduling problem[J]. *Journal of Scheduling*, 2016, 19(3): 295-307.
- [12] Coelho J, Vanhoucke M. An exact composite lower bound strategy for the resource-constrained project scheduling problem[J]. *Computers & Operations Research*, 2018, 93(2): 135-150.
- [13] 雷德明, 王甜. 基于改进蛙跳算法的分布式两阶段混合流水车间调度[J]. *控制与决策*: 2021, 36(1): 241-248.
(Lei D M, Wang T. An improved shuffled frog leaping algorithm for the distributed two-stage hybrid flow shop scheduling[J]. *Control and Decision*, 2021, 36(1): 241-248.)
- [14] 吴锐, 郭顺生, 李益兵, 等. 改进人工蜂群算法求解分布式柔性作业车间调度问题[J]. *控制与决策*, 2019, 34(12): 2527-2536.
(Wu R, Guo S S, Li Y B, et al. Improved artificial bee colony algorithm for distributed and flexible job-shop scheduling problem[J]. *Control and Decision*, 2019, 34(12): 2527-2536.)
- [15] 王凌, 郑洁, 王晶晶. 求解区间数分布式流水线调度的混合离散果蝇优化算法[J]. *控制与决策*: 2020, 35(4): 930-936.
(Wang L, Zheng J, Wang J J. A hybrid fruitfly optimization algorithm for distributed permutation flowshop scheduling with interval data[J]. *Control and Decision* 2020, 35(4): 930-936.)
- [16] Liu C C, Xiang X, Zhang C R, et al. A column generation based distributed scheduling algorithm for multi-mode resource constrained project scheduling problem[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2018, 125(9): 258-278.
- [17] 韩玉艳, 李俊青, 桑红燕, 等. 离散NSGA-II求解带有限缓冲区的多目标批量流水线调度问题[J]. *聊城大学学报: 自然科学版*, 2018, 31(1): 89-96.
(Han Y Y, Li J Q, Sang H Y, et al. Discrete NSGA-II for multi-objective lot-streaming flow shop scheduling problem with limited buffers[J]. *Journal of Liaocheng University: Natural Science Edition*, 2018, 31(1): 89-96.)
- [18] Zulvia F E, Kuo R J, Nugroho D Y. A many-objective gradient evolution algorithm for solving a green vehicle routing problem with time windows and time dependency for perishable products[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 242(9): 118428.
- [19] Xiang Y, Zhou Y R, Li M Q, et al. A vector angle-based evolutionary algorithm for unconstrained many-objective optimization[J]. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 2017, 21(1): 131-152.
- [20] Tian Y, Cheng R, Zhang X, et al. An indicator-based multiobjective evolutionary algorithm with reference point adaptation for better versatility[J]. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 2017, 22(4): 609-622.

作者简介

张锦(1995—), 男, 硕士生, 从事项目资源调度的研究, E-mail: zj574406254@hotmail.com;

江丽(1980—), 女, 副教授, 博士, 从事智能故障诊断与状态监测、模式识别等研究, E-mail: ljiang@whut.edu.cn;

郭钧(1982—), 男, 副教授, 博士, 从事数字制造与智能制造、再制造智能决策与优化等研究, E-mail: junguo@whut.edu.cn;

杜百岗(1987—), 男, 副教授, 博士, 从事制造过程理论与优化、企业资源计划智能决策等研究, E-mail: dbg767@163.com;

李益兵(1978—), 男, 教授, 博士, 从事机械设备故障诊断、智能优化等研究, E-mail: ahlyb@whut.edu.cn.

(责任编辑: 闫妍)