

控制与决策

Control and Decision

基于改进NSGA-II算法求解多目标资源受限项目调度问题

王峰, 韩孟臣, 赵耀宇, 张衡

引用本文:

王峰, 韩孟臣, 赵耀宇, 等. 基于改进NSGA-II算法求解多目标资源受限项目调度问题[J]. *控制与决策*, 2021, 36(3): 669–676.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0906>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于复杂昂贵仿真的体系效能多目标优化

Complex and expensive simulation based multi-objective optimization to system-of-system effectiveness

控制与决策. 2021, 36(3): 589–598 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0844>

基于分解的多目标多因子进化算法

A multiobjective multifactorial evolutionary algorithm based on decomposition

控制与决策. 2021, 36(3): 637–644 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0525>

顺序依赖的调整时间和拖期的无缝钢管热轧批量调度算法

Hot-rolled batch scheduling algorithm for seamless steel tube with sequence-dependent setup times and tardiness

控制与决策. 2021, 36(2): 505–512 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0723>

基于改进多目标优化算法的分布式数据中心负载调度

Multi-objective optimization of energy and performance management in distributed data centers

控制与决策. 2021, 36(1): 159–165 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0702>

基于负荷平衡的柔性预约决策

Flexible outpatient appointment decision model with loading balance

控制与决策. 2021, 36(1): 226–233 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1690>

基于改进NSGA-II算法求解多目标资源受限项目调度问题

王峰[†], 韩孟臣, 赵耀宇, 张衡

(武汉大学 计算机学院, 武汉 430072)

摘要: 资源受限项目调度问题(resource constrained project scheduling problem, RCPSP)要求在满足相关约束的条件下安排各活动开始时间,从而达到某一目标的最优,具有很强的应用背景,并受到众多学者的广泛关注.经典的RCPSP模型以最小化项目工期为单一目标,忽略了资源使用率等因素对项目整体的影响,使其与实际应用仍有较大差距.基于经典的RCPSP模型,引入最优资源均衡为另一目标,将模型扩展为多目标模型,丰富了RCPSP模型的应用场景.同时,考虑到新模型中各活动间存在大量的控制关系,使用传统的启发式多目标算法需要耗费大量的时间对不可行解进行判断,求解性能较低,提出一种新的算法框架NSGA-IIs.该算法框架基于活动间控制关系将各活动分成若干子集,并在初始化和交叉变异等阶段以子集为基本单位产生新的个体,能够较好地避免不可行解的产生,提高算法的效率.使用解集覆盖度作为评价指标,通过实例数据集的实验表明,与已有的求解RCPSP的经典算法相比,所提出的算法具有明显的优越性.

关键词: 资源受限项目调度; NSGA-II; 多目标优化; 资源约束

中图分类号: TP18

文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2019.0906

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



引用格式: 王峰,韩孟臣,赵耀宇,等.基于改进NSGA-II算法求解多目标资源受限项目调度问题[J].控制与决策,2021,36(3): 669-676.

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

WANG Feng[†], HAN Meng-chen, ZHAO Yao-yu, ZHANG Heng

(School of Computer Science, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: The resource constrained project scheduling problem (RCPSP) requires that the starting time of each activity should be scheduled so as to achieve an optimal target under the condition of satisfying the relevant constraints. It has attracted many researchers' attention and has been applied to many research fields. The classical RCPSP model only focuses on the minimization of project duration time and ignores the impact of other factors on the overall project, which is not suitable for real applications. Based on the classical RCPSP model, this paper introduces a multi-objective model by exploring the optimal resource equalization as the optimization objective, which can enrich the application scenario of RCPSP models. Due to the large number of control relationships between activities in the proposed new model, it takes a lot of time to evaluate the infeasible solutions by using traditional heuristic multi-objective algorithms. In order to improve the efficiency of the algorithm, this paper proposes a new algorithm known as NSGA-IIs. The NSGA-IIs algorithm divides each activity into several subsets based on the control relationship between activities and generates new individuals based on subsets in the initialization and crossover mutation stages, which can avoid the generation of infeasible solutions and improve the performance of the algorithm effectively. The set coverage measure is employed as a performance indicator, and the experimental results show that the proposed algorithm outperforms the classical RCPSP algorithms.

Keywords: RCPSP; NSGA-II; multi-objective optimization; resource constraint

0 引言

资源受限的项目调度优化问题(resource constrained project scheduling problem, RCPSP)是指在

满足相关活动资源约束以及活动间紧前紧后约束关系的条件下,通过调度各活动开始时间,合理分配资源使用量,从而实现项目优化目标的一类问题.自上

收稿日期: 2019-06-25; 修回日期: 2019-08-27.

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(61773296); 国家重点研发计划项目(2017YFC1502902).

责任编辑: 王凌.

[†]通讯作者. E-mail: fengwang@whu.edu.cn.

个世纪七十年代以来,该类模型已得到了众多研究者的持续关注^[1-2].

经典的RCPSP模型中,一般以最小工期为优化目标,而对于实际应用问题,其往往存在不同的优化目标,仅仅考虑最小工期无法满足实际应用需求.在不同的背景下,一些学者分别使用了鲁棒性目标^[3]、资源均衡优化^[4]、最小成本^[5]、资源投资额度^[6-7]等为优化目标进行研究.此外,项目调度优化问题具有很明显的多目标特性,而由于问题的复杂性,目前的研究仍然大多集中在单目标上,将若干目标结合起来综合考虑的研究成果尚不多见.Xiong等^[8-11]对资源受限项目调度问题通过不同的方式进行建模,提出了多种相应的求解算法,并用于救灾应急物资调度等问题求解.通过上述研究工作可以看出,对RCPSP问题进行多目标建模求解存在巨大的应用前景.

资源均衡配置是项目管理和调度的一个重要研究内容,其研究的目的是使项目实施过程中资源的利用能够尽量保持均衡,避免出现频繁严重的高峰或低谷现象,最大限度地节约费用,但追求资源均衡配置往往又会导致项目的完成时间延后,即延长项目总工期^[12].可以看出,最短项目工期和最优资源均衡往往是一对互相矛盾的优化目标,并且这两种优化需求常常在实际问题中同时出现.为了更好地满足实际应用需求,本文以最短工期和最优资源均衡为优化目标,构建多目标资源受限项目调度优化模型.

RCPSP已被证明是NP难问题,即很难找到一种适用于所有实例的通用算法^[13].近几十年来,随着计算机技术的发展,用于解决RCPSP问题的算法提出基本可以分为两个阶段.在上世纪,人们通常用精确算法来求解该类问题,例如一些学者将0-1整数规划方法引入RCPSP;而另一些学者将分支定界方法应用于RCPSP中,但是此类算法的求解时间会随着活动的增加而呈指数型增长,不适宜用来求解包含多个活动的大型项目调度优化问题.在本世纪初,由于启发式算法可以在相对较短的时间内搜寻到最优解或者近似最优解,人们开始尝试用启发式算法来求解RCPSP问题,例如Hartmann^[14]将遗传算法引入RCPSP中,Boctor^[15]运用模拟退火算法对RCPSP进行了研究,Merkle等^[16]将蚁群算法应用到RCPSP中,Wang等^[17]使用EDA算法对RCPSP模型进行求解.在将元启发式算法应用于实际问题中时,不仅需要考虑算法的更新迭代机制,还需要考虑算法在具体问题中的表现形式.一般而言,此类问题中个体的

表现方式有3种:1)基于任务列表编码;2)基于随机生成的优先数编码;3)基于优先规则(优先权)编码.例如,Hartmann^[14]在遗传算法中选择用任务列表编码,Ghobadi等^[18]在PSO算法中选择用优先数和优先权编码.

基于任务链表编码的方式具有操作简单、便于部署的特点,因此得到了广泛的应用,但在启发式算法中,随机生成的任务链表往往不满足活动间先后顺序关系约束,在搜索过程中需要消耗大量时间来构造可行解,以求其满足活动顺序关系.为了进一步提升算法效率,本文提出一种新的任务链表编码方式以及相应的交叉和变异算子,并将其与经典的NSGA-II^[19]算法相结合,提出一种新算法NSGA-II_s.

1 模型构建

资源受限的项目调度优化问题可以描述如下:整个工程项目包含 j 个活动,活动可以表示为集合 $J = \{1, 2, \dots, N\}$.任意活动 $j \in J$ 需要使用 k 种不同的资源,资源种类可以记为集合 $K = \{1, 2, \dots, NR\}$,第 $k \in K$ 种资源的供应量为 R_k .

1.1 最小化项目工期

经典RCPSP模型通常以项目工期最小化为优化目标,该目标是在满足活动紧前紧后约束关系和资源约束的条件下,为各活动合理分配资源,安排活动进行顺序,从而达到最短工期.其现实意义在于项目越早结束,越能尽早释放资源,从而节约成本,并有效减少逾期风险.基于项目工期最短的单目标优化模型如下:

$$\begin{aligned} \min f_N. & \quad (1) \\ \text{s.t. } f_0 &= 0; \\ f_j - d_j &\geq f_i, \forall (i, j) \in J, i = 1, 2, \dots, N; \\ \sum_{i=0}^t r_{ik} &\leq R_k, t \geq 0, k = 1, 2, \dots, NR. \end{aligned}$$

其中: f_i 表示第 i 个活动的完成时间, N 表示项目所含任务总数量, d_j 表示第 j 个活动的持续天数, r_{ik} 表示任务 i 每期所需的资源 k 的数量, NR 表示资源种类总数, R_k 表示资源 k 的供给量, t 表示某一时刻任务总个数.在任何时刻,项目对资源 k 的需求量都不能大于 R_k .

1.2 最优资源均衡

资源均衡问题(resource leveling problem, RLP)是在保持项目工期不变的情况下,使资源的利用能够尽量保持均衡,从而有效避免项目进行资源大量闲置

或者资源供应紧张的情况。

在资源均衡模型研究中,众多学者提出一系列衡量资源波动的度量指标,包括方差最小法、平方和最小法、矩最小法、资源波动量(RRH)^[20]等。相较于其他度量指标,资源波动量更为形象直观且计算方便,因此本文将资源波动量作为资源均衡度量指标,其可表示为项目进行各种资源($k = 1, 2, \dots, NR$)不同时刻使用波动量的总和。因此,得到基于最优资源均衡目标的模型如下:

$$RRH_C = C \times RRH, \quad (2)$$

$$RRH = \sum_{k=1}^{NR} \left(R_{k1} + \sum_{t=1}^{T-1} |R_{kt+1} - R_{kt}| + R_{kT} \right).$$

其中: C 表示工程进行时需要额外增加的单位波动成本(例如人力资源在需求高峰期需要更多的雇用成本,在需求低谷期往往较为廉价), R_{kt} 表示 t 时刻资源 k 的供给量($k = 1, 2, \dots, NR$), RRH 表示项目进行各种资源波动量的总和。

1.3 多目标RCPSP模型

基于前述最小化项目工期模型和最优资源均衡模型,本文构造了基于项目工期最短和资源波动量最优的多目标模型:

$$\min f_N, \quad (3)$$

$$\min RRH_C.$$

$$\text{s.t. } f_0 = 0;$$

$$f_j - d_j \geq f_i, \forall (i, j) \in J, i = 1, 2, \dots, N;$$

$$\sum_{i=0}^t r_{ik} \leq R_k, t \geq 0, k = 1, 2, \dots, NR.$$

上述模型中,最优资源均衡优化目标的提升可以进一步提升项目整体的资源利用率,从而降低项目总成本。而常规项目中,总成本的降低会导致项目总工期的增加,因此上述两个目标之间存在冲突,需要设计多目标优化算法予以求解。

2 求解算法NSGA-IIs

NSGA-II^[19,21-22]算法是一种基于非支配排序的多目标进化算法,在求解多目标问题上有广泛的应用。由于多目标RCPSP模型的初始自变量是一串活动链表,且活动间必须满足紧前紧后约束关系。为了求解上述问题,本文提出一种基于控制关系的任务链表编码方案以及相应的交叉和变异操作,通过结合NSGA-II的算法框架,提出NSGA-IIs。该算法基于活动间控制关系将各活动分成若干子集,提出新

的染色体生成策略、交叉算子和变异算子,可以有效避免不可行解的产生,提高算法的求解效率。

2.1 染色体生成策略

在求解RCPSP问题时,优化的关键是活动次序的排列,因此怎么对活动次序进行编码并满足紧前紧后约束关系是设计算法的重要一环。

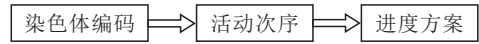


图1 通过对染色体的解码间接生成进度方案

为了克服初始化算法时生成不满足活动间先后顺序约束的染色体,本文提出一种基于控制关系的染色体生成方式:首先将完全没有紧前约束关系的活动放在集合1,然后将所有先序关系在集合1的活动放在集合2,依次类推,直到所有任务排列完成。每个集合中的活动可以任意排列,但集合本身必须按先集合1后集合2的顺序排列。

基于控制关系染色体生成方法不仅可以生成满足紧前紧后约束关系的进度安排,同时因为集合内部活动可以任意排列的原因,初始生成染色体的随机性也较强,具有操作简便、表示合理的优点。

2.2 交叉算子

在过去的研究中,常用的交叉方式有单点交叉、多点交叉和一致交叉3种^[23]。这几种交叉方式都需要一个判断活动链表是否满足紧前紧后约束关系的判断机制,这无疑增加了操作难度。基于此,本文提出一种基于控制关系的交叉算子,具体交叉步骤如下。

step 1: 将参与交叉运算的两个父代个体记为母体 A_1 和父体 A_2 ,记交叉概率为 p_1 ,随机生成 $\varepsilon, \varepsilon \in [0, 1]$ 。

step 1.1: 当 $p_1 > \varepsilon$ 时,执行step 2;

step 1.2: 当 $p_1 \leq \varepsilon$ 时,直接进入变异运算过程。

step 2: 随机生成交叉操作控制参数 $c, c \in [1, n]$ (n 代表集合个数),基于 c 确定交叉点 pos_1 ,将染色体 A_1 中由前 pos_1 个集合组成的分段称为 X_1 , pos_1 点后的集合组成分段 X_2 ;同时,将染色体 A_2 中前 pos_1 个集合组成的分段称为 X_3 ,其余集合形成分段 X_4 。

step 3: 将 X_1 中任务和 X_4 中的任务合并为新的染色体 B_1 ,将 X_3 中的任务和 X_2 中的任务合并为新的染色体 B_2 。

图2为两个具有10个任务的染色体交叉操作示意图,当 $c = 2$ 时,将各染色体前2个集合分成一段,其余的作为另外一段,然后进行交叉操作生成新个体。

上述交叉算子在执行过程中充分考虑了任务之间的约束关系,将集合作为交叉操作的操作单元,一

方面大大减少了交叉位置的范围、提高算法的搜索性能,另一方面也有效保证了新生成解的可行性。

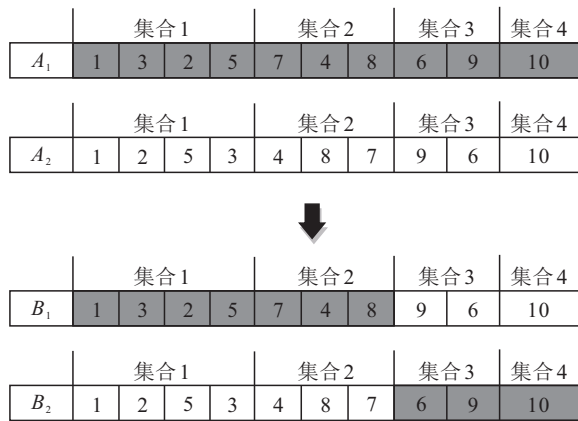


图2 交叉过程

2.3 变异算子

变异算子每次只对一个染色体进行操作,目前主要有交换式和插入式两种操作方式.其中交换式变异是指在交换任务列表的两个不同任务,如果交换之后不满足紧前关系约束,则换回原来的位置,转入下一次交换.插入式变异是指首先计算出变异基因的所有紧前任务在任务列表中的最后位置及最前面的位置,然后在之间随机选择一个位置,将此基因插在此位置上.上述两种变异操作方式不仅操作复杂,而且生成个体都需要一个是否满足紧前紧后关系约束的判断机制,较为耗时.针对以上问题,本文提出一种基于控制关系的变异操作算子,具体步骤如下:

step 1: 记变异概率为 p_2 , 随机生成 $\theta, \theta \in [0, 1]$.

step 1.1: 当 $p_2 > \theta$ 时, 执行 step 2;

step 1.2: 当 $p_2 \leq \theta$ 时, 结束.

step 2: 随机生成变异操作控制参数 $m, m \in [1, n]$ (n 代表集合个数), 确定在哪个集合发生变异.

step 3: 若选定的集合中有超过两个以上维度(活动元素), 则在该集合中随机生成两点, 交换位置, 否则返回 step 2.

如图3所示, 当 $m = 1$ 时, 应在集合1中发生变异操作, 在集合1中随机生成两点 $pos_1 = 1, pos_2 = 3$, 交换两者的位置, 得到新的个体.

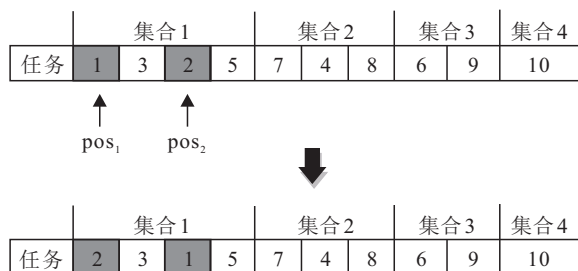


图3 变异过程

上述变异操作充分考虑了任务之间的控制关系, 将操作限定在集合范围内进行, 一方面增加了种群多样性, 另一方面也确保了所生成的解满足紧前紧后约束关系。

2.4 算法框架

本文提出 NSGA-IIs 的算法框架, 具体步骤如下所述.

step 1: 初始化, 假设初始化种群为 P_0 , 种群规模大小为 N , 分别利用 2.1 节中所提到的编码方式和文献 [24] 方式初始化 $N/2$ 个个体, 采用 P_s 和 P_w 来表示;

step 2: 使用本文所提的交叉和变异算子对 P_s 进行遗传操作, 产生子代种群 P'_s , 对 $P_s \cup P'_s$ 进行非支配排序, 并更新 P_s ;

step 3: 假设种群 P_s 中的所有非支配解为 PS, $P_{tmp} = P_w \cup PS$, 使用文献 [24] 中的交叉和变异算子对 P_{tmp} 进行遗传操作, 产生子代种群 P'_w , 对 $P_w \cup P'_w$ 进行非支配排序, 并更新 P_w ;

step 4: 若不满足算法终止条件, 则跳至 step 2, 否则输出 $P_s \cup P_w$ 中的所有非支配解.

3 实验结果与比较

3.1 测试数据

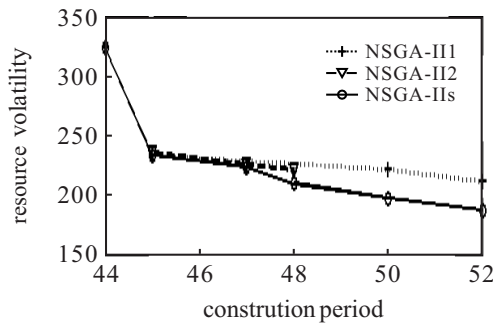
本文采用 3 组数据集进行对比实验, 数据来源于文献 [25], 分别表示为 F_{20} 、 F_{30} 和 F_{60} . 随机从 PSPLIB 测试集 [26] 中选择两个测试问题 J3045_3 和 J6045_3 各数据集的特征如下: F_{20} 共有 20 个活动, 6 种受限资源; F_{30} 共有 30 个活动, 4 种受限资源; F_{60} 共有 60 个活动, 4 种受限资源.

3.2 参数设置及实验结果

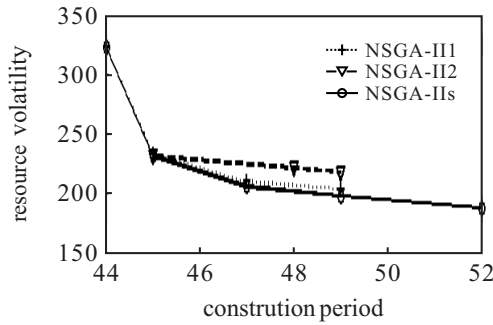
本文中算法采用 Java 编程, 环境为 JDK1.7, 编译器为 Eclipse, 运行环境为 3.6 GHz 主频的 CPU, Intel Core i7 处理器. 实验中, 针对 F_{20} 数据集, 种群数量设置为 30; 针对 F_{30} 和 F_{60} 数据集, 种群数量设置为 100. 算法迭代次数都设置为 200, 单位波动成本 C 设为 10.

本文选取了另外两种基于 NSGA-II 求解 RCPS 的算法进行对比, 为表述方便, 文中分别将其称为 NSGA-II1 [41] 和 NSGA-II2 [27]. 图 4~图 6 分别展现了在 3 个不同的数据集下, 3 种算法在迭代次数为 20、50、100、200 次时所得解中非支配解的对比结果.

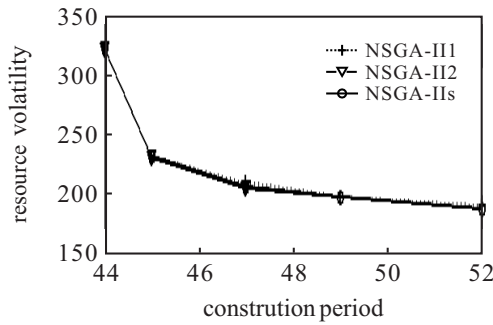
为了更进一步评价 NSGA-IIs 算法和另外两种不同算法之间性能的好坏, 本文采用解集相互覆盖度 C [28] 来比较本文算法与另外两种算法产生的帕累托最优解之间的相互支配的关系, 解集相互覆盖度的



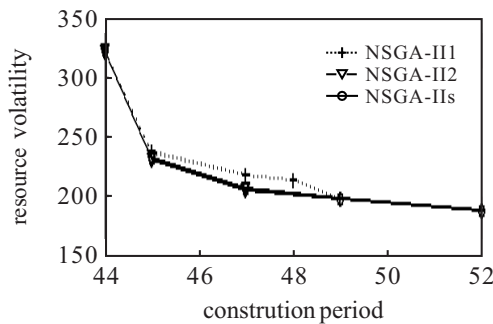
(a) generation = 20



(b) generation = 50



(c) generation = 100



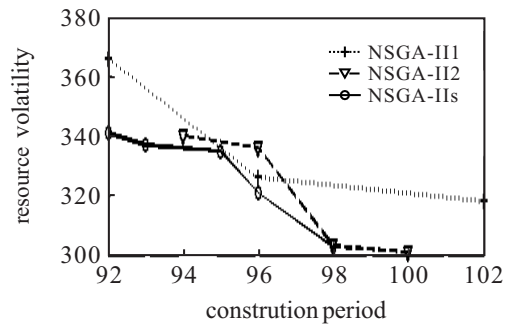
(d) generation = 200

图4 F_{20} 上各算法的收敛性结果

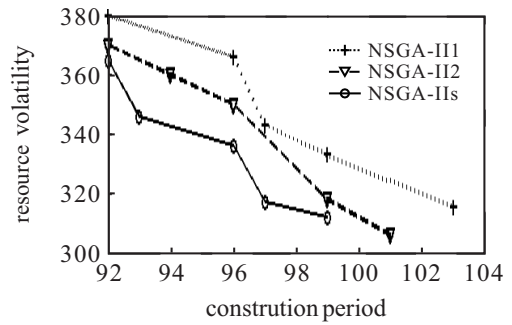
定义如下:

$$C(X_1, X_2) = \frac{|\{a'' \in X_2; \exists a' \in X_1 : a' \succeq a''\}|}{|X_2|} \quad (4)$$

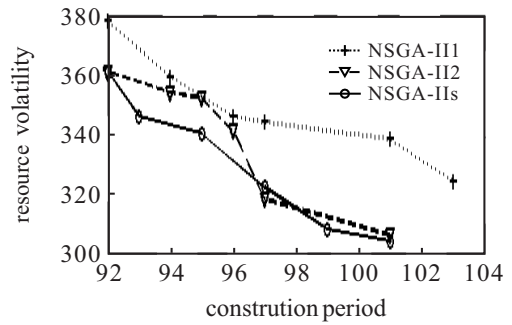
其中: X_1 和 X_2 代表两个不同的帕累托解集, $C(X_1, X_2)$ 代表解集 X_2 中被 X_1 中的解支配或者与 X_1 中的解相等的解占 X_2 总解集的比例, 其大小在 $[0, 1]$ 之间. $C(X_1, X_2) = 1$ 表示 X_2 中的所有解都能在 X_1 中找到支配该解或者与该解相等的解; 相反, $C(X_1, X_2) = 0$ 则表示 X_2 中的任何解都不被 X_1 中的



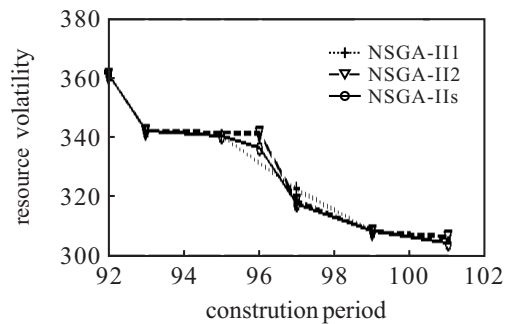
(a) generation = 20



(b) generation = 50



(c) generation = 100



(d) generation = 200

图5 F_{30} 上各算法的收敛性结果

解支配. 通过这种方式的比较可以很明显地看出不同算法之间解的相互支配关系, 即算法的优劣性. 需要注意的是, $C(X_1, X_2)$ 和 $C(X_2, X_1)$ 都需要考虑, $C(X_1, X_2)$ 和 $C(X_2, X_1)$ 之和不一定等于 1.

3.3 实验结果分析

由图4~图6可知, 在相同的环境以及终止条件下, 针对不同规模的RCPSP问题, 本文所提NSGA-IIs的性能均优于另外两个对比算法. 在 F_{20} 和 F_{30} 上, NSGA-IIs算法生成的非支配解集已经收敛的时候,

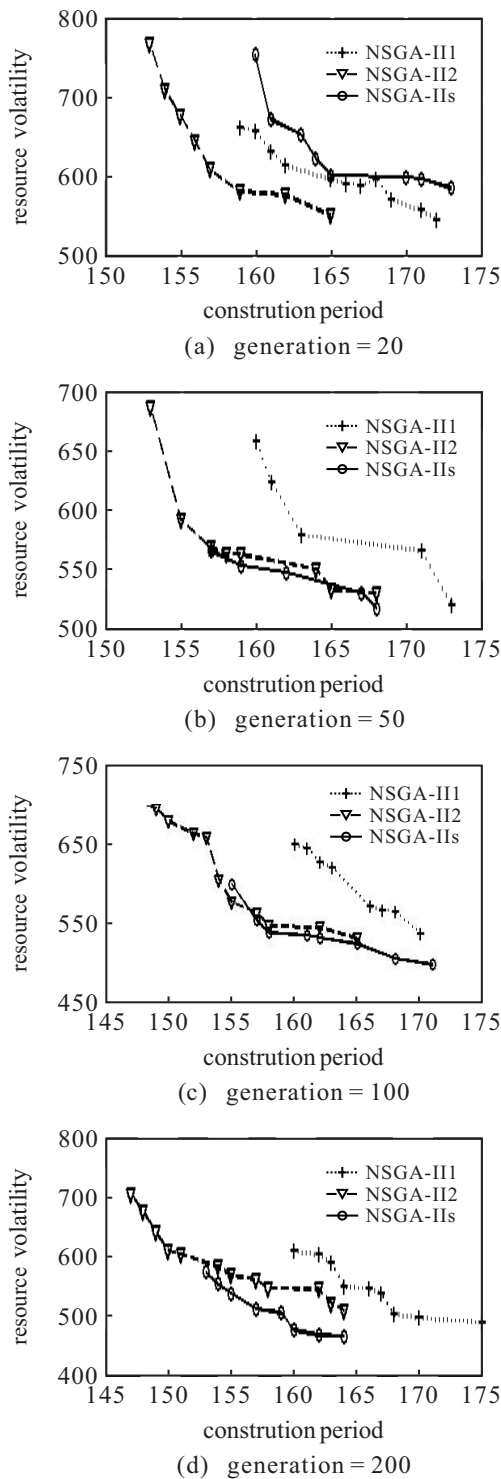


图6 F_{60} 上各算法的收敛性结果

另外两个算法的解集还未完全收敛,即相同迭代次数下,NSGA-IIs所得非支配解集的性能明显更优.在 F_{60} 上,NSGA-IIs的初期表现不佳,但随着迭代代数的增加,帕累托前沿很快朝着最优解的方向移动,最后所得到的解集也比其他两个算法得到的解集性能更好,这也说明了本文算法具有更快的收敛速度.

由表1~表3可以看出,随着迭代次数的增加,NSGA-IIs求得的非支配解集能够覆盖另外两种算法NSGA-II1和NSGA-II2产生的非支配解集,例如在

F_{60} 中,当迭代次数为200次时, $C(\text{NSGA-IIs}, \text{NSGA-II1}) = 1$,说明NSGA-II1算法生成的解全部被NSGA-IIs生成的解支配;同时, $C(\text{NSGA-II1}, \text{NSGA-IIs}) = 0$ 表示NSGA-IIs生成的解不被NSGA-II1生成的任何解支配.又如,通过图6中200代的非支配解集图和表3中 $C(\text{NSGA-IIs}, \text{NSGA-II2}) = 0.58$ 可知,NSGA-II2生成的解中有58%被NSGA-IIs所生成的解支配,而NSGA-IIs生成的解没有被NSGA-II2生成的解支配.由此可以更加准确地说明,本文提出的基于控制关系的NSGA-IIs算法确实比NSGA-II1、NSGA-II2算法性能更好.

表1 基于 F_{20} 的各算法解集覆盖度比较结果

覆盖度 C	迭代次数			
	20	50	100	200
(NSGA-IIs, NSGA-II1)	1	1	1	1
(NSGA-II1, NSGA-IIs)	0	0	0	0.14
(NSGA-IIs, NSGA-II2)	0.75	1	0.82	1
(NSGA-II2, NSGA-IIs)	0.25	0	0.32	0.42
(NSGA-II1, NSGA-II2)	0.25	0	0	0.33
(NSGA-II2, NSGA-II1)	0.33	1	1	1

表2 基于 F_{30} 的各算法解集覆盖度比较结果

覆盖度 C	迭代次数			
	20	50	100	200
(NSGA-IIs, NSGA-II1)	1	1	1	1
(NSGA-II1, NSGA-IIs)	0.33	0.25	0.80	0.40
(NSGA-IIs, NSGA-II2)	1	1	1	1
(NSGA-II2, NSGA-IIs)	0.33	0.40	1	1
(NSGA-II1, NSGA-II2)	0.50	0.75	0.80	0.40
(NSGA-II2, NSGA-II1)	0.50	0.25	1	1

表3 基于 F_{60} 的各算法解集覆盖度比较结果

覆盖度 C	迭代次数			
	20	50	100	200
(NSGA-IIs, NSGA-II1)	0	1	1	1
(NSGA-II1, NSGA-IIs)	1	0	0	0
(NSGA-IIs, NSGA-II2)	0	0.50	0.36	0.58
(NSGA-II2, NSGA-IIs)	1	0	0.13	0
(NSGA-II1, NSGA-II2)	0	0	0	0
(NSGA-II2, NSGA-II1)	1	1	1	1

分析可知,基于控制关系的初始化策略能够有效地避免不可行解的产生;其次,相比于NSGA-II1、NSGA-II2算法中的算子,本文所提出的交叉算子在生成子代种群时能够将交叉范围限定在特定的集合之间,避免了交叉过后要判断活动链表是否满足紧前紧后约束关系的过程,并且可能迅速搜索至最优区域,为后续的搜索过程注入有效信息,从而加速收敛过程;最后,变异算子通过将变异操作限定在集合内部,改善了交换式变异可能产生不可行解的缺点,以及插入式变异需要首先计算出变异基因的所有紧前任务在基因中的具体位置的缺点,加快了算法收敛的速度。

综上所述,对多目标资源受限项目调度问题而言,本文提出的NSGA-IIs算法相比其他经典方法具有更好的求解性能。

4 结论

针对经典资源受限项目调度优化问题,本文引入了资源波动量这一衡量指标,将模型进一步扩展为更加契合实际资源受限项目调度优化问题的以最短工期和最优资源均衡为优化目标的多目标优化模型,并提出了基于控制关系的NSGA-IIs算法进行求解。基于控制关系的初始化策略及交叉变异算子能够有效避免不可行解的产生,加快收敛速度。通过3组不同规模的数据集进行了实验验证,结果表明,基于本文提出的模型和求解算法,可以在项目活动相关数据已知的条件下,生成有效参考结果,为项目管理者提供有益参考。

由于RCPSP问题有很强的实际应用背景,在下一步研究中,可以将上述多目标RCPSP模型进一步扩展,例如考虑项目的鲁棒性、最小成本等目标。同时,可以寻求更优的编码方法,进一步提升算法效率。

参考文献(References)

[1] 方晨,王凌. 资源约束项目调度研究综述[J]. 控制与决策, 2010, 25(5): 641-650.
(Fang C, Wang L. Survey of study on resource-constrained project scheduling[J]. Control and Decision, 2010, 25(5): 641-650.)

[2] 王凌,郑环宇,郑晓龙. 不确定资源受限项目调度研究综述[J]. 控制与决策, 2014, 29(4): 577-584.
(Wang L, Zheng H Y, Zheng X L. Survey on resourceconstrained project scheduling under uncertainty[J]. Control and Decision, 2014, 29(4): 577-584.)

[3] Lambrechts O, Demeulemeester E, Herroelen W. Time

slack-based techniques for robust project scheduling subject to resource uncertainty[J]. Annals of Operations Research, 2011, 186(1): 443-464.

[4] 何立华. 资源不确定条件下项目调度多目标优化研究[D]. 天津: 天津大学经济与管理学院, 2013: 52-57.
(He L H. Multi-objective optimization of project scheduling under uncertain resources[D]. Tianjin: School of Management and Economics, Tianjin University, 2013: 52-57.)

[5] 王景华. 基于离散和混合模型的生产调度若干问题研究[D]. 合肥: 合肥工业大学计算机与信息学院, 2014: 60-63.
(Wang J H. Research on some problems of production scheduling based on discrete and hybrid models[D]. Hefei: School of Computer and Information, Hefei University of Technology, 2014: 60-63.)

[6] Wang L, Fang C, Mu C D, et al. A pareto-archived estimation-of-distribution algorithm for multiobjective resource-constrained project scheduling problem[J]. IEEE Transactions on Engineering Management, 2013, 60(3): 617-626.

[7] 王凌,郑环宇. 一种多目标资源受限项目调度问题的教学算法[J]. 控制与决策, 2015, 30(10): 1868-1872.
(Wang L, Zheng H Y. A teaching algorithm for multi-objective resource-constrained project scheduling problem[J]. Control and Decision, 2015, 30(10): 1868-1872.)

[8] Xiong J, Liu J, Chen Y, et al. A knowledge-based evolutionary multiobjective approach for stochastic extended resource investment project scheduling problems[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2014, 18(5): 742-763.

[9] Yuan X, Liu J, Hao X. A moving block sequence-based evolutionary algorithm for resource investment project scheduling problems[J]. Big Data & Information Analytics, 2017, 2(1): 39-58.

[10] Zhou Y, Liu J, Zhang Y, et al. A multi-objective evolutionary algorithm for multi-period dynamic emergency resource scheduling problems[J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2017, 99: 77-95.

[11] Hao X, Liu J. A moving block sequence-based evolutionary algorithm for resource-constrained project scheduling problems[J]. International Journal of Bio-Inspired Computation, 2019, 14(2): 85.

[12] Hegazy T. Optimization of resource allocation and leveling using genetic algorithms[J]. Journal of Construction Engineering and Management, 1999, 125(3): 167-175.

[13] Blazewica J, Lenstra J K, Rinnooy Kan. Scheduling

- subject to resource constraints: Classification and complexity[J]. *Discrete Applied Mathematics*, 1983, 5(1): 11-24.
- [14] Hattmann S. A competitive genetic algorithm for resource-constrained project scheduling[J]. *Naval Research Logistics*, 1998, 45(7): 733-750.
- [15] Boctor F F. Resource-constrained project scheduling by simulated annealing[J]. *International Journal of Production Research*, 1996, 34(8): 2335-2351.
- [16] Merkle D, Middendorf M, Schmeck H. Ant colony optimization for resource-constrained project scheduling[J]. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 2002, 6(4): 333-346.
- [17] Wang L, Fang C. An effective estimation of distribution algorithm for the multi-mode resource-constrained project scheduling problem[J]. *Computers & Operations Research*, 2012, 39(2): 449-460.
- [18] Ghobadi S, Parnak S. Solving the resource constraint project scheduling problem (RCPSP) by the particle swarm optimization (PSO) method[J]. *International Industrial Engineering Conference*, 2018, 6(1): 236-243.
- [19] Deb K, Pratap A, Agarwal S, et al. A fast and elitist multi-objective genetic algorithms: NSGA-II[J]. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 2002, 6(2): 182-197.
- [20] El-Rayes K, Jun D H. Optimizing resource leveling in construction projects[J]. *Journal of Construction Engineering and Management*, 2009, 135(11): 1172-1180.
- [21] Huang M Z, Han W, Wan J Q, et al. Multi-objective optimisation for design and operation of anaerobic digestion using GA-ANN and NSGA-II[J]. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, 2016, 91(1): 226-233.
- [22] 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 solves multi-objective batch pipeline scheduling problem with finite buffers*[J]. *Journal of Liaocheng University: Natural Science*, 2018, 31(1): 89-96.)
- [23] Geng J Q, Weng L P, Liu S H. An improved ant colony optimization algorithm for nonlinear resource-leveling problems[J]. *Computers & Mathematics with Applications*, 2011, 61(8): 2300-2305.
- [24] Wang H, Lin D, Li M Q. A competitive genetic algorithm for resource-constrained project scheduling problem[C]. *2005 International Conference on Machine Learning and Cybernetics*. Guangzhou: IEEE, 2005: 2945-2949.
- [25] Jun D H, El-Rayes K. Multiobjective optimization of resource leveling and allocation during construction scheduling[J]. *Journal of Construction Engineering and Management*, 2011, 137(12): 1080-1088.
- [26] Kolisch R, Sprecher A. PSPLIB — A project scheduling problem library: OR software-ORSEP operations research software exchange program[J]. *European Journal of Operational Research*, 1997, 96(1): 205-216.
- [27] Xiao J, Wu Z, Hong X, et al. Integration of electromagnetism with multi-objective evolutionary algorithms for RCPSP[J]. *European Journal of Operational Research*, 2016, 251(1): 22-35.
- [28] 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.

作者简介

王峰(1981—),女,副教授,博士,从事机器学习与智能优化等研究, E-mail: fengwang@whu.edu.cn;

韩孟臣(1993—),男,硕士生,从事智能优化的研究, E-mail: hanmengchen@whu.edu.cn;

赵耀宇(1995—),男,硕士生,从事智能优化的研究, E-mail: zhaoyaoyu@whu.edu.cn;

张衡(1996—),男,硕士生,从事机器学习与智能优化的研究, E-mail: zhangheng96@whu.edu.cn.

(责任编辑: 齐 霖)