

任务可定点拆分的资源受限项目调度问题研究

孙晓雅^{1,2}, 林 焰²

(1 辽宁师范大学管理学院, 辽宁 大连 116029; 2 大连理工大学船舶 CAD 工程中心, 辽宁 大连 116024)

摘 要: 任务可定点拆分的资源受限项目调度问题是标准资源受限项目调度问题的一个扩展. 针对这一问题提出了一种离散人工蜂群求解算法. 离散人工蜂群算法中采用基于任务排列的食物源编码方式, 并提出了能够一种保证解的可行性和离散型的候选食物源生成方法. 项目中允许定点拆分的任务首先要转换为满足先序关系的分任务, 然后在通过串行调度机制生成可行调度. 实算表明, 该算法能够有效求解任务可定点拆分的资源受限项目调度问题, 同时也看到在不影响完成质量情况下, 项目通过任务拆分能够在一定程度上缩短项目工期.

关键词: 资源受限项目调度; 任务; 定点拆分; 人工蜂群算法; 离散

中图分类号: C934

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2012)07-0098-05

A Study on Resource-constrained Project Scheduling with Activities Splitable at Fixed Points

SUN Xiao-ya^{1,2}, LIN Yan¹

(1 Ship CAD Engineering Center, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;

2 Management College, Liaoning Normal University, Dalian 116029, China)

Abstract: Resource-constrained project scheduling problem (RCPSP) with activities splitable at fixed points is an extension of the standard RCPSP. We provide a new discrete artificial bee colony (DABC) algorithm for this problem. In DABC each food source location represents a feasible permutation of the set of activities. We give a new method to produce candidate food sources which can keep the solution discrete and feasible. The activities allowed to split at fixed points should be changed into subtasks which meet the first and last relations, and then the feasible scheduling is generated through the serial scheduling scheme. The actual computation shows that this algorithm can solve RCPSP with activities splitable at fixed points effectively. We also see that the project makespan can be shorten in a certain extent by splitting activities without affecting its quality.

Key words: RCPSP; activity; splitable at fixed points; artificial bee colony algorithm; discrete

1 引言

资源受限项目调度问题(resource-constrained project scheduling problem, RCPSP)因其应用广泛、计算复杂在近几十年来受到了国内外学者的高度关注,其中标准 RCPSP 已经成为一个运筹学领域研究的经典问题. 标准 RCPSP 的求解模型建立在一定的假设基础之上,这就限制了它在许多实际项目中的适用性,例如,标准 RCPSP 假定项目中

任务一旦执行,不可中断和拆分,直到整个任务完成为止,而在实际项目中,任务常有被拆分若干次完成的情况,即一个任务在执行过程允许中断,其所占用资源抽调给其它任务使用,一段时间后资源再归还给该任务,以继续执行,这种情况称为任务可拆分的资源受限项目调度问题(pre-emptive RCPSP, PRCPS). Brucker 等^[1]对任务在任意整数时间可拆分的 PRCPS 进行了研究. Debels 等^[2]对任务在任意整数时间可拆分且拆分项目可并行的调度问

题进行研究, Ballestin 等^[3]研究了任务最多可以拆分 m 次的 PRCPSP, 他们重点探讨的是任务最多进行一次拆分的项目调度问题. Damay^[4]考虑了两类任务, 一类任务不允许中断, 另一类任务可以在任何时间点中断, 而不是进局限于整数时间点. 锥兴刚^[5]等采用混合遗传算法邓林义^[6]等采用粒子群算法分别对任务在任意整数时间可拆分的 PRCPSP 进行了研究.

在实际项目中, 还会经常出现这样的情况: 任务允许拆分, 但任务允许拆分位置不是任意时间点, 而是给定的某些时间点. 本文将对这类任务可定点拆分的 PRCPSP 进行探讨. 论文所研究的项目具有两类任务: 孩一类任务一旦执行不可中断; 虎一类任务允许在规定的整数点处(可一处或多处), 停顿, 其所占用资源抽调给其它任务使用, 一段时间后资源再归还给该任务, 以继续执行. 人工蜂群算法(Artificial Bee Colony, ABC)是最新出现的一种群智能优化算法, 该算法原理简单, 参数较少, 在一些优化问题中取得了较好的优化效果. 因此, 本文针对任务可定点拆分的资源受限项目调度问题提出了一种改进的人工蜂群求解算法.

2 问题描述

任务可定点拆分的资源受限项目调度问题可描述为: 设项目的任务集为 $J = \{0, 1, 2, \dots, n, n+1\}$, 任务 0 和 $n+1$ 为虚任务, 工期为 0, 分别代表开始任务和结束任务. 任务 $j (j=1, 2, \dots, n)$ 可以在给定拆分点进行 $l (l=1, 2, \dots, L_j)$ 次拆分, s_j, f_j, d_j 分别记为第 j 项任务的开始时间、结束时间和总耗时, $s_{j,l}, f_{j,l}, d_{j,l}$ 分别为第 l 个拆分段开始时间, 结束时间和执行时间, 实际上 $s_j = s_{j,1}, f_j = f_{j,L_j}, P_j$ 为任务 j 的紧前任务集合. 设项目共有 K 种可更新资源, 第 k 种资源的总量为 R_k , 第 j 项任务对第 k 种资源的需求量为 $r_{j,k}$, 因此第 j 项任务的第 l 个拆分段 $r_{j,l,k} = r_{j,k}$. T 为项目工期, t 为项目执行中的每一时刻 ($t=1, 2, \dots, T$). $A(t)$ 代表 t 时刻正在执行的任务的集合.

优化目标为项目工期最短的任务可顶点拆分的 PRCPSP 的数学模型为:

$$\min f_{n+1} \quad (1)$$

s. t.

$$f_0 = 0 \quad (2)$$

$$f_i \leq s_j \quad i \in P_j \quad (3)$$

$$f_{j,l} \leq s_{j,l+1} \quad j \in J, l = 1, 2, \dots, L_j - 1 \quad (4)$$

$$f_{j,l} - s_{j,l} = d_{j,l} \quad j \in J, l = 1, 2, \dots, L_j \quad (5)$$

$$\sum_{l=1}^{L_j} d_{j,l} = d_j \quad (6)$$

$$\sum_{A(t)} r_{j,l,k} \leq R_k \quad k \in K, 0 \leq t \leq f_{n+1} \quad (7)$$

3 求解任务可定点拆分的 PRCPSP

3.1 人工蜂群算法的基本原理

人工蜂群算法由 Karaboga^[7]提出, 它是基于模拟自然界蜂群采蜜时群体智能行为的一种元启发算法. ABC 算法中将人工蜂群分为三类: 工作蜂、跟随蜂和侦查蜂. 蜂群按数量等分成两组, 前半是工作蜂, 后半是跟随蜂, 另设一个侦查蜂. 蜂群中每一个工作蜂对应一个食物源(蜜源), 即食物源的数量和工作蜂的数量相等. 每个食物源的位置代表优化问题的一个可行解, 食物源的蜂蜜量称为适应值, 适应值的大小表征相关解的质量. 适应值越大, 蜂蜜量越多, 解的质量越好. ABC 算法的主体框架如下^[8]:

步骤 1: 人工蜂群的初始化

步骤 2: 迭代

① 派工作蜂到食物源去采蜜, 确定各食物源的蜂蜜量;

② 派跟随蜂到食物源去采蜜, 确定各食物源的蜂蜜量;

③ 抛弃多次重复采蜜的食物源, 派侦查蜂寻找新的食物源;

④ 更新目前为止找到的最好食物源.

步骤 3: 停止(满足迭代停止条件).

3.2 离散人工蜂群算法求解

3.2.1 任务可定点拆分项目调度的处理方法

应用智能算法和启发式算法求解 RCPS 时, 都需要通过调度生成机制来生成可行的调度方案, 目前使用较多的调度生成机制有串行调度机制和并行调度机制两种. 并行调度的解空间是串行调度的子集, 有可能错过最优解. 因此本文将应用串行调度机制来生成调度方案.

任务可定点拆分的项目中允许某些任务在一些固定时间点处停顿一段时间后再继续执行. 它与任务在任意整数时间点处均允许拆分的 PRCPSP 情

况不同,任务在任意整数时间点处允许拆分的项目在应用串行调度生成调度方案时,在调度的每一个阶段可一次处理一个任务,文献[6]就采用这种方法.而任务可定点拆分的项目如果采用这种处理方法,就有可能错过最优解.为此,本文对任务可定点拆分的项目的处理方法是:设任务 j 允许进行 L_j 次定点拆分,则将任务 j 分解成 $j_1, j_2, \dots, j_l, j_{l+1}, \dots, j_{L_j}$ 个任务,其中,任务 j_{l+1} 的紧前任务集为 $P_j \cup \{j_1, j_2, \dots, j_l\}$.这样就将任务可定点拆分的 PRCPSP 转换为标准 RCPSP.

3.2.2 基于排列的食物源位置编码

ABC 算法最初是用于求解连续多峰函数寻优问题,其食物源的位置编码及位置更新方式均是针对连续问题.项目调度优化问题的解具有离散的特点,本文在原 ABC 算法的基础上进行改进,采用了基于任务排列的食物源位置编码方法.可定点拆分项目的任务集为 $J = \{0, 1, 2, \dots, n, n+1\}$,将可定点拆分的任务进行转换,得到任务集为 $J' = \{0, 1, 2, \dots, w, w+1\}$ 的标准 RCPSP 之后进行食物源位置编码.每个食物源的位置 $x_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{id}, \dots, x_{iw})$ 是非虚拟任务 $\{1, 2, \dots, W\}$ 的一种排列,它满足所有任务的紧前关系,每个 x_i 表征的是任务依次开始的顺序.初始食物源的编码通过在采用串行调度时随机生成可行任务顺序的方法得到.

以一个 6 个实任务的项目为例,单代号网络图见图 1,该项目有一种可用资源,最大资源量为 4.若食物源编码为 $x_i = (1, 2, 4, 5, 3, 6)$,它表明了任务依次开始的顺序,这样就可以通过串行调度生产机制得到该食物源编码所对应的项目调度方案如图 2 所示,此时项目工期为 16.

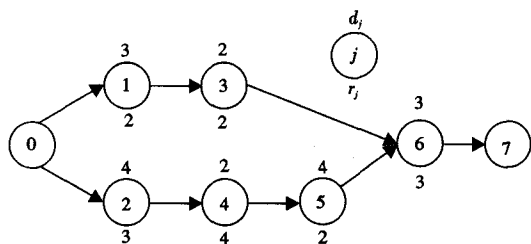


图 1 项目示例

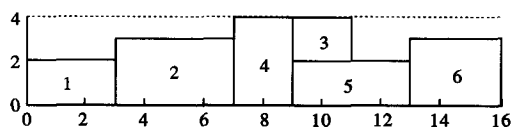


图 2 调度方案举例

3.2.3 适应值函数

食物源位置编码给出的任务排列顺序通过串行调度得到了该食物源对应的任务时间安排和项目工期,项目工期越短,该食物源蜂蜜量越多,适应值就越大.因此 ABC 算法中食物源 x_i 的适应值 fit_i ,可由式(8)得到.

$$fit_i = \frac{1}{x_i \text{ 对应的项目工期}} \quad (8)$$

3.2.4 候选食物源的生成

ABC 算法中工作蜂在采蜜之前要生成候选食物源,然后在候选食物源与原食物源之间进行取舍,选择蜂蜜多的食物源采蜜.跟随蜂则要通过轮盘赌从工作蜂的食物源中选择食物源,轮盘赌中工作蜂的食物源的蜂蜜量的概率值 p_i 为

$$p_i = \frac{fit_i}{\sum_{k=1}^{SN} fit_k} \quad (9)$$

其中,设工作蜂有 SN 个, fit_i 为工作蜂 i 的食物源的适应值.可见好蜜源会吸引更多的跟随蜂去采蜜.跟随蜂通过这种方式选定食物源后,也要生成候选食物源,然后它在二者之间进行取舍,选择蜂蜜多的食物源采蜜.候选食物源的生成方式是优化效果和效率好坏的关键.

本文基于任务排列的离散的食物源编码对应了任务调度的先后顺序,生成候选食物源时既要保持食物源编码的离散性又要保持食物源编码对应的调度方案的可行性,为此本文采用了一种新的候选食物源生成方法.这里仍以图 1 所示项目为例,来说明候选食物源的生成方法,设食物源 $x_i = (1, 2, 4, 5, 3, 6)$,选定的相邻食物源 $x_k = (1, 3, 2, 4, 5, 6)$,随机生成一位 $d=3$.则候选食物源 v_i 的生成方法为: v_i 的前两个元素取 x_i 的前两个元素(1,2),将 x_k 中去除和 x_i 的前两个元素相同的元素即得(3,4,5,6),取该矩阵中第一个元素为 v_i 的第三个元素,则 v_i 的前三个元素取为(1,2,3),再从 x_i 中去除(1,2,3)得到(4,5,6)作为 v_i 后面的元素.这样得到 $v_i = (1, 2, 3, 4, 5, 6)$.可以证明,采用这种方法得到的候选食物源满足项目任务的先序关系,满足解的可行性要求[9].

3.2.5 求解算法的实现步骤

基于上述原理,任务可定点拆分的 PRCPSP 求解算法的实现步骤如下.

步骤 1:将任务可定点拆分的 PRCPSP 转换为 RCPSP.

步骤2:初始化. 设定蜂群的数量, 初始化食物源, 计算食物源的适应值, 对任一食物源 i , 置 $trail_i = 0$. 记录目前找到的最优食物源及其适应值.

步骤3:重复

① 工作蜂的操作: 工作蜂生成候选食物源, 计算候选食物源的适应值, 在食物源与候选食物源间应有贪婪原则进行取舍, 若仍用原食物源, 则 $trail_i = trail_i + 1$, 否则更新食物源, 置 $trail_i = 0$.

② 跟随蜂的操作: 跟随蜂用轮盘赌依概率选择食物源, 然后生成候选食物源, 计算候选食物源的适应值, 在食物源与候选食物源间应有贪婪原则进行取舍, 若仍用原食物源, 则 $trail_i = trail_i + 1$, 否则更新食物源, 置 $trail_i = 0$.

③ 侦查蜂的操作: 若食物源 $trail_i$ 达到设定的最大值, 则派侦查蜂寻找一个新的食物源代替原食物源;

④ 记录目前找到的最优食物源及其适应值.

步骤4: 停止 (满足迭代停止条件).

步骤5: 输出任务可定点拆分的 PRCPSP 的最优调度方案.

4 算例仿真

本文采用文献[5-6]中算例对本文算法进行有效性验证. 算例的单代号网络图如图3所示, 该算例选自 Patterson 的 110 测试项目集. 图中节点上方的数字表示任务工期, 该项目受三种资源限制, 节点下方的数字分别为任务三种资源的使用量. 项目中三种可更新资源的可用量均为 6. 下面就对该项目在任务不允许拆分, 允许在任意整数时间点拆分, 允许定点拆分三种情况进行计算.

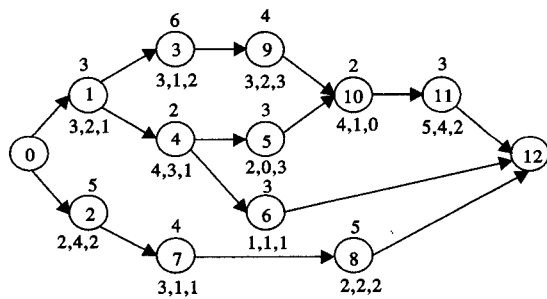


图3 项目调度问题算例

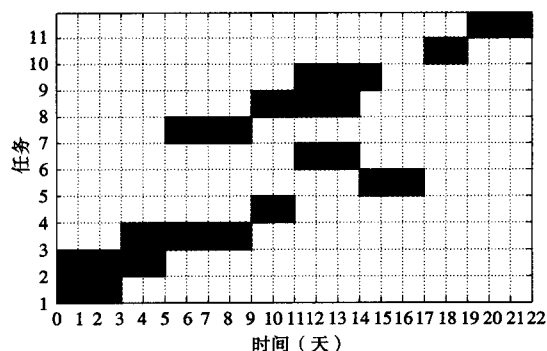


图4 任务不允许拆分情况下项目甘特图

4.2 任务允许在任意整数时间点拆分

图3项目在任务允许在任意整数时间点进行拆分情况下, 采用离散人工蜂群算法求解, 其中串行调度机制, 每个阶段处理一个任务, 即每个任务作为一个整体进行处理, 得到最优调度的甘特图如图5所示. 可以看出任务可任意拆分时项目的工期较情况1缩短2天, 为20天.

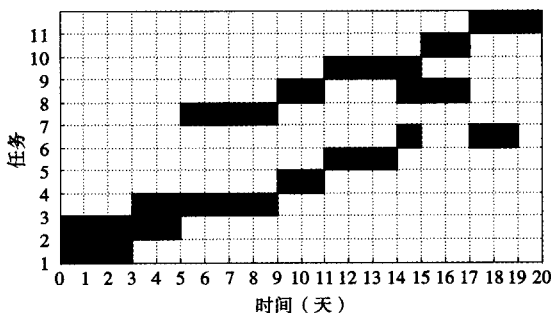


图5 任务允许在任意整数时间点拆分项目甘特图

4.3 任务允许定点拆分

图3项目在任务允许定点拆分情况下, 如果设任务执行时间为奇数的任务不允许拆分, 任务执行时间为偶数的任务在偶数时间点处允许拆分. 由离散人工蜂群算法计算得到最优调度的甘特图如图6所示. 可见此时最短工期为21天. 这一时间较情形1缩短1天, 比情形2长1天.

5 结束语

本文针对任务可定点拆分的 PRCPSP, 提出了一种离散人工蜂群求解算法. 通过对同一项目在任务不允许拆分, 允许在任意整数时间点拆分, 允许定点拆分三种情形的仿真计算可以看出, 项目在不影响完成质量情况下, 通过任务拆分能够在一定程度上缩短项目工期, 其中, 任务允许在任意整数时间点拆分的项目工期 $\leq$ 任务允许定点拆分时的项目工期 $\leq$ 任务不允许拆分时的项目工期.

4.1 任务不允许拆分

图3项目在任务不允许拆分情况下, 采用本文离散人工蜂群算法求解, 得到最优调度的甘特图如图4所示. 可以看出任务不可拆分时项目的最短工期为22天.

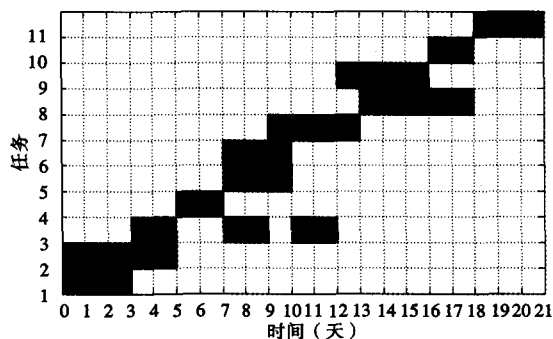


图6 任务允许定点拆分项目的甘特图

参考文献:

- [1] Brucker P, Knust S. Resource-constrained project scheduling and timetabling[J]. Lecture Notes in Computer Science, 2001(2079):277-293.
- [2] Debels D, Vanhoucke M. The impact of various activity assumptions on the lead time and resource utilization of resource-constrained projects[J]. Computers & Industrial Engineering, 2008(54):140-154.
- [3] Ballestin F, Valls V, Quintanilla S. Preemption in resource-constrained project scheduling [J]. European Journal of Operational Research, 2008, 189(3): 1136-1152.
- [4] Damay J, Quilliot A, Sanlaville E. Linear programming based algorithms for preemptive and non-preemptive RCPSP[J]. European Journal of Operational Research, 2007, 182(3):1012-1022.
- [5] 雒兴刚, 汪定伟, 唐加福. 任务可拆分项目调度问题[J]. 东北大学学报, 2006, 27(9):961-964.
- [6] 邓林义, 林焰. 粒子群算法求解任务可拆分项目调度问题[J]. 控制与决策, 2008, 23(6):681-685.
- [7] Karaboga D. An idea based on honey bee swarm for numerical optimization[R]. Technical Report-TRO6, 2005.
- [8] Karaboga D, Basturk B. On the performance of artificial bee colony algorithm[J]. Applied Soft Computing, 2008(8), 687.
- [9] Hartmann S. A competitive genetic algorithm for resource-constrained project scheduling [J]. Naval Research Logistics, 1998(45):733-750.

作者简介:

孙晓雅 女, (1972—), 博士研究生, 副教授. 研究方向为智能优化与运筹学.

林 焰 男, (1963—), 博士, 教授, 博士生导师. 研究方向为船舶与海洋结构物设计与制造.

(上接第 97 页)

- [3] Lihi Zelnik-Manor, Pietro Perona. Self-tuning spectral clustering[EB/OL]. [2011-11-10]. Department of Electrical Engineering, California Institute of Technology Pasadena, 2004, <http://www.vision.caltech.edu/lihi/Demos/SelfTuningClustering.html>.
- [4] Tao Xiang, Shaogang Gong. Spectral clustering with eigenvector selection[J]. Pattern Recognition, 2007, 41(2): 1012-1029.
- [5] 王玲, 薄列峰, 焦李成. 密度敏感的半监督谱聚类[J]. 软件学报, 2007, 18(10):2412-2422.
- [6] Ahmet Ekin, Sharath Pankanti, Arum Hampaur. Initialization-independent spectral clustering with application to Automatic video analysis[J]. Video Proc And Visual Perception Group, 2004:641-644.
- [7] 朱强生, 何华灿, 周延泉. 谱聚类算法对输入数据顺序的敏感性[J]. 计算机应用研究, 2007, 24(4):62-64.
- [8] 施培蓓, 郭玉堂, 胡玉娟, 等. 初始化独立的谱聚类算法[J]. 计算机工程与应用, 2010, 46(25):134-137.
- [9] 张利彪, 周春光, 马铭, 等. 基于粒子群优化算法的模糊 C 均值聚类[J]. 吉林大学学报:理学版, 2006, 44(2):217-223.
- [10] R. A. Fisher, Forina. UCI repository of machine learning database[EB/OL]. [2011-11-10]. <http://archive.ics.uci.edu/ml/>

作者简介:

孙大雷 男, (1988—), 硕士研究生. 研究方向为聚类分析.

孟凡荣 女, (1962—), 博士, 教授, 博士生导师. 研究方向为数据库技术、数据挖掘.

闫秋艳 女, (1978—), 博士, 副教授. 研究方向为不确定数据挖掘、流数据挖掘.