

人工蜂群算法求解任务可拆分项目调度问题

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: 针对任务可拆分的资源受限的项目调度问题, 提出了一种人工蜂群算法与任务可拆分的串行调度机制相结合的优化方法. 人工蜂群算法中每个食物源的位置代表一组项目任务的优先权序列, 优先权序列通过调度生成机制转换为可行调度方案, 迭代中由三种人工蜂执行不同的操作来实现全局最优解的更新. 实算表明, 基于优先权的人工蜂群算法可以有效求解任务可拆分项目调度问题, 收敛速度较快且精度较高.

关键词: 任务可拆分; 资源受限项目调度问题; 人工蜂群算法; 调度生成机制

中图分类号: TP391

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2011)11-0053-04

Artificial Bee Colony Algorithm for Resource—Constrained Project Scheduling Problem with Activity Splitting

SUN Xiao-ya^{1,2}, LIN Yan²

(1 Management College, Liaoning Normal University, Dalian 116029, China;

2 Ship CAD Engineering Center, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: To solve the resource—constrained project scheduling problem (RCPSP) with activity splitting, an optimization method combined artificial bee colony algorithm with serial scheduling scheme for activity splitting is presented. In ABC algorithm the location of each food source represents priorities of activities, which can be transformed to a feasible schedule by serial scheduling scheme for activity splitting. In the iterative process the global optimal solution is updated according to the different behaviors of three type artificial bees. The actual calculation shows that the artificial bee colony algorithm is valid for resource—constrained and activity splitting project scheduling problem with fast convergence speed and high precision.

Key words: activity splitting; resource—constrained project scheduling problem (RCPSP); artificial bee colony algorithm (ABC); scheduling scheme

1 引言

现代项目在执行过程中面临着越来越多的资源限制与争夺, 同时项目工期的竞争也愈发激烈, 因而对资源受限项目调度问题(RCPSP)的研究显得更为迫切^[1-2]. RCPSP 是指在满足项目任务紧前关系和资源约束条件下, 合理安排调度, 从而实现项目的既定目标最优, 它是一类典型的组合优化问题, Blazewicz 已经证明它属于强 NP—hard 问题^[3-4].

近年来, 群智能算法如蚁群算法(ACO)^[5]、粒子群算法(PSO)^[6]等, 已经成为国内外学者研究的

热点. 2005 年 Karaboga^[7]提出了一种基于蜂群智能的新的启发式算法, 人工蜂群算法(Artificial Bee Colony, ABC). Karaboga 等已经验证与遗传算法(Genetic Algorithm, GA)、差分进化算法(Differential Evolution, DE)及 PSO 算法相比, ABC 算法在连续型多峰函数寻优问题中能得到更好的结果. Akbari^[8]等用 ABC 算法成功求解了单模式资源受限项目调度问题(RCPSP), 实现了 ABC 算法在组合优化中的应用.

文中首先建立了资源受限的任务可拆分项目调度问题的数学模型, 然后利用基于优先权的人工蜂

群算法对模型进行求解,调度机制采用任务可拆分的串行调度生成机制,最后通过实例仿真验证了模型和算法的有效性.

2 问题描述

资源受限的任务可拆分项目调度问题可描述为^[5-6]: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 $j (j = 1, 2, \dots, n)$ 可以拆分成多次执行, s_j, f_j, d_j 分别表示第 j 项任务的开始时间、结束时间和总耗时. $C = \{(i, j) \mid i \text{ 必须在 } j \text{ 开始前完成}\}$ 为项目的紧前任务集. 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_{jk} . 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. 定义: 0-1 变量 x_{jt} , ($j = 1, 2, \dots, n; t = 1, 2, \dots, T$)

$$x_{jt} = \begin{cases} 1, & \text{任务 } j \text{ 在 } t \text{ 时刻正在执行} \\ 0, & \text{任务 } j \text{ 在 } t \text{ 时刻不执行} \end{cases}$$

则 $s_j = \min\{tx_{jt}\}, f_j = \max\{tx_{jt}\}$.

资源受限的任务可拆分项目调度的数学模型为:

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

s. t.

$$\begin{cases} f_i \leq s_j & (i, j) \in C \quad (2) \\ \sum_{t=s_j}^{f_j} x_{jt} = d_j & j \in J \quad (3) \\ \sum_{j=1}^J r_{jk} \times x_{jt} \leq R_k & j \in J, \quad (4) \\ k \in \{1, 2, \dots, K\}, t \in \{1, 2, \dots, T\} \end{cases}$$

在上述模型中, (1) 式为目标函数优化目标是项目的完工工期最短. (2)(3)(4) 式为约束条件, (2) 式表示满足任务间的紧前关系; (3) 式表示任务可拆分, 拆分后满足任务工时要求; (4) 式表示在项目执行中任一时刻必须满足各种资源限制.

3 人工蜂群算法

自然界中蜂群是一个动态系统, 它们能收集和分享环境的信息, 并适时地调整其行为适应环境的变化. 蜜蜂总能很快地发现好蜜源并在蜂巢内以跳“摆尾舞”的方式和其他蜜蜂交换信息. ABC 算法是模拟自然蜂群的一种群智能算法. 人工蜂群包含三类蜂: 工作蜂, 跟随蜂和侦查蜂. 每一种蜂扮演不同

的角色: 工作蜂在蜜源采蜜并提供它所记忆的蜜源领域的信息; 跟随蜂等候在舞蹈区从工作蜂那里得到食物源的信息, 并根据食物源含蜜量情况选择一个食物源去采蜜; 侦查蜂负责寻找新蜜源. 蜂群按数量等分成两组, 前一半是工作蜂, 后一半是跟随蜂. 每一个食物源只有一个工作蜂. 也就是工作蜂的数目和蜂巢周围的食物源的数目相等. 当一个食物源被工作蜂或跟随蜂所抛弃, 侦查蜂就去寻找一个新的食物源. 在 ABC 算法中食物源即蜜源, 每个食物源的位置代表优化问题的一个可行解, 食物源的蜂蜜量代表相关解的质量, 称为适应值. ABC 算法的步骤如下^[4]:

(1) 初始化. ABC 算法首先产生初始种群, 种群数量为 SN, 也即代表 SN 个解(食物源). 每一个解 $x_i (i = 1, 2, \dots, SN)$ 是一个 D 维向量, D 是优化参数. $x_i (i = 1, 2, \dots, SN)$ 生成后, 计算每个 x_i 的适应值 fit_i .

(2) 迭代过程. 在初始化之后, 进入迭代 ($C = 1, 2, \dots, C_{\max}$) 过程, $C_{\max}$ 为最大迭代次数. 在每次迭代中, 三种类型的人工蜂执行如下不同的操作, 种群的全局最优解就随着人工蜂群每次迭代中所寻找的食物源适应值的情况不断更新.

① 工作蜂有 SN 个, 对应 SN 个食物源, 任意工作蜂 i 在种群中随机选择一个工作蜂 k 做它的邻居, 并在工作蜂 k 的食物源的 D 维向量中随机选择一位 $d (d = 1, 2, \dots, D)$. v_i 为工作蜂 i 的候选食物源, v_i 与 x_i 除了第 j 位 v_{id} 外, 其余各位和 x_i 一致. v_{id} 的计算方法如(5)式.

$$v_{id} = x_{id} + \omega \phi_{id} (x_{id} - x_{kd}) \quad (5)$$

其中, x_{id} 是食物源 x_i 第 d 位, x_{kd} 是相邻食物源 x_k 的第 d 位, ϕ_{id} 是 $[-1, 1]$ 上的随机数, ω 是控制当前食物源和相邻食物源差别大小的参数. 这样, v_i 生成后, v_i 和 x_i 之间通过贪婪策略进行选择, 即如果 v_i 的适应值不比 x_i 的适应值差, 则 $x_i = v_i$, x_i 重复使用的次数 $trail_i$ 置 0. 否则舍弃 v_i , x_i 保持不变, x_i 重复使用的次数 $trail_i$ 增加 1.

② 跟随蜂也有 SN 个, 当工作蜂寻找到新的食物源后, 回到蜂巢的跳舞场和跟随蜂分享食物源的信息. 工作蜂的食物源的蜂蜜量的概率值 p_i 的计算可按(6)或(7)式.

$$p_i = \frac{fit_i}{\sum_{k=1}^{SN} fit_k} \quad (6)$$

$$p_i = \frac{fit_i}{\max(fit_i)} \quad (7)$$

其中, fit_i 为工作蜂 i 的食物源的适应值. 跟随蜂 j 通过轮盘赌的形式来从工作蜂的食物源中选择食物源, 假设工作蜂 i 的食物源 x_i 被选中, 跟随蜂 j 采用和 ① 相同的方法来生产候选食物源 v_i , 也采用和 ① 相同贪婪策略在 v_i 和 x_i 之间进行取舍, $trail_i$ 的设置方法亦同上.

③ 当某一食物源 x_i 的 $trail_i$ 等于最大重复使用次数的限定值时, 侦查蜂就会随机生成一个新的食物源取代 x_i , 原来的食物源被舍弃不用.

(3) 结束. 当第二步完成 $C_{\max}$ 次迭代后, ABC 算法结束, 输出最优解及最优适应值.

4 任务可拆分项目调度问题求解

文中利用基于优先权的 ABC 算法及任务可拆分的串行调度机制对任务可拆分项目调度问题进行优化求解.

4.1 基于优先权的 ABC 算法编码

在 ABC 算法中, 每个食物源的位置代表一个可行解. 在用 ABC 算法求解资源受限项目调度问题时, 每个食物源的位置 x_i 是一个 n 维向量 $x_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{id}, \dots, x_{in})$, 向量的维数 n 即是项目的非虚拟任务数. 食物源 x_i 代表一种项目任务的优先权序列. 其中, x_{id} 是第 i 个食物源的第 d 个位置的值, 它对应了第 d 项任务的优先权为 x_{id} . ABC 算法得到的 x_i 是连续数构成的向量, 这样的优先权序列看起来不够直观, 可以通过把 x_i 向量元素按从小到大排序, 转换成 $1 \sim n$ 的整数排列. 这种整数优先权序列再通过调度生成机制转换为一个可行的调度方案.

4.2 任务可拆分项目的调度生成机制

ABC 算法中一个食物源的位置对应项目的一种任务的优先权序列, 还不是调度问题的解, 需要通过适当的调度生成机制把任务的优先权转化为可行的调度方案. 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. 文中采用串行调度机制来实现优先权与可行调度方案的转换, 在转换中遵循任务开始时间越早越好的原则, 同时每个任务都允许多次拆分. 设 E_i 为已处理完的任务集合, D_i 为先序任务已处理完的待处理任务的集合, P_j 为任务 j 的先序任务的集合, $RL_k (k = 1, 2, 3; t = 1, \dots, T)$ 为在 t 时刻第 k 资源的可用量(或剩余量). 则任务可拆分项目调度生成的算法可描述为:

step1: 初始化, $l = 1, E_l = \Phi, D_l = \Phi, RL_k = R_k$;

step2: 更新 $D_l, D_l = \{j \mid j \notin E_l, P_j \in E_l\}$;

step3: 选择 D_l 中优先权最大的任务 j^* ;

step4: 根据任务 j^* 的紧前任务集 P_{j^*} 的完成时间确定任务 j^* 的最早开始时间 s_{j^*} ;

step5: 令 $a = 0$, 对每一时段 t , 逐一判断 $r_{j^*k} \leq RL_k (t = s_{j^*} + 1, \dots, T)$, 若 t 时段成立, 则 $a = a + 1$, 否则 a 不变, 直到 $a = d_{j^*}$ 为止, 此时的 t 即为任务 j^* 的最早完成时间 f_{j^*} ;

step6: 根据已经安排的任务的资源消耗的情况, 更新 $RL_k (t = 1, \dots, T)$;

step7: $E_l = E_l \cup \{j^*\}$;

step8: 若 $l < n$, 则 $l = l + 1$, 转 step2; 否则, 转 step9;

step9: 结束, 输出可行调度方案.

4.3 适应值函数

ABC 算法中食物源的好坏用蜂蜜量的多少来衡量, 蜂蜜量也就是指食物源对应的可行解的适应值函数. 在任务可拆分的 RCPSP 中, 食物源 x_i 代表的优先权序列转换为可行调度方案后, 就得到了项目完工工期 $makespan_i$. 项目调度的优化目标是使项目完工工期最短, ABC 算法的适应值 fit_i , 可由 (8) 式转换得到.

$$fit_i = \frac{1}{makespan_i} \quad (8)$$

5 算例仿真

文中采用文献[3-4]的算例对算法进行有效性验证. 算例的单代号网络图如图 1 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.

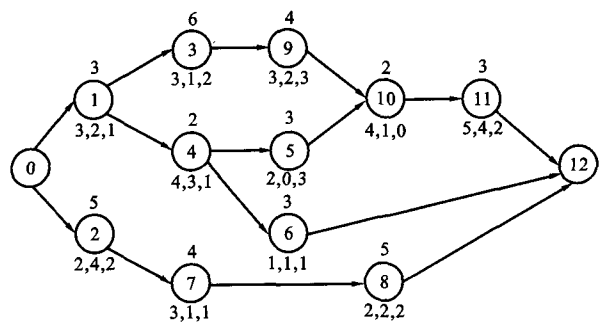


图 1 项目调度问题算例

在任务不可拆分情况下, 采用 ABC 算法和串行调度生成机制得到的优化调度方案甘特图如图 2 所示. 可以看出任务不可拆分时项目的最短工期为 22d.

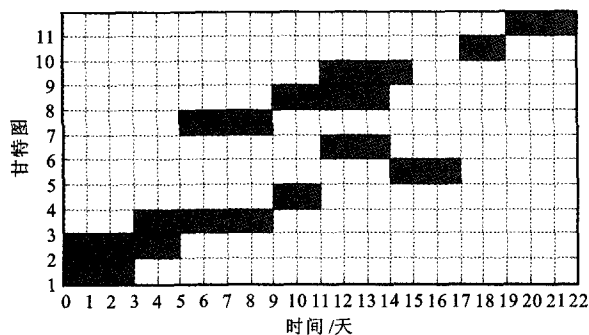


图2 任务不可拆分情况下项目甘特图

在任务可拆分情况下,采用ABC算法和任务可拆分的串行调度生成机制得到项目优化调度方案的甘特图如图3所示.可以看出当任务允许拆分时,有的任务如任务6和8被拆分,项目的最短工期为20d,较任务不可拆分时的工期缩短了2d,这一优化结果和文献[3-4]相同.任务可拆分时受限资源的利用率得到提高,此时三种资源的使用情况如图4所示.

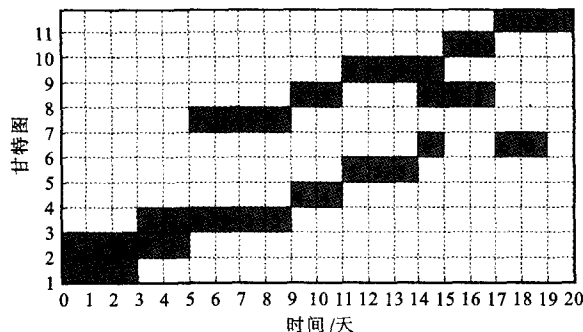


图3 任务可拆分情况下项目甘特图

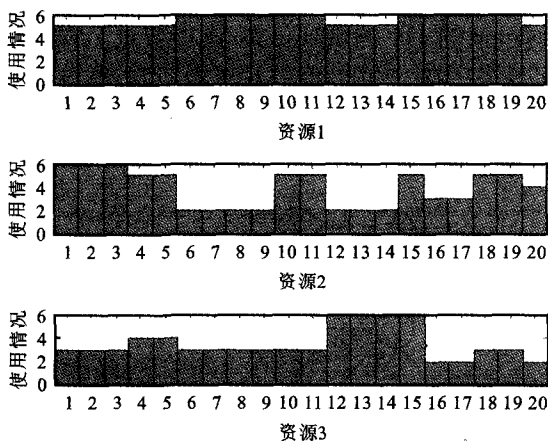
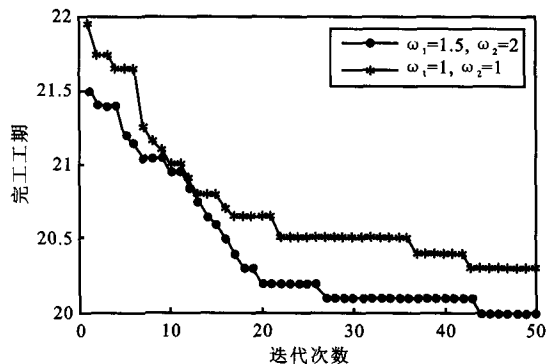


图4 任务可拆分情况下三种资源的使用情况

文中人工蜂群算法及调度生成机制是通过Matlab编程实现的.人工蜂群算法的参数选取非常简洁,算例中取最大迭代次数 $C_{\max}=50$,工作蜂和跟随蜂的数目均为10个,食物源最大重复使用次数为3次.图5给出了20次仿真中,项目最短工期在公

式(5)中参数 ω 取不同值时迭代平均收敛情况的比较.带点的曲线是工作蜂寻找候选食物源应用公式(5)时,取参数 $\omega_1=1.5, \omega_2=2$ 时的平均收敛曲线.带星号的曲线是参数 $\omega_1=1, \omega_2=1$ 时的平均收敛曲线.由图可见,第一组 ω 取值时,项目工期的迭代收敛速度更快一些,精度也更高一些.

图5 ω 取不同值时迭代收敛情况的比较

6 结束语

文中建立了任务可拆分的资源受限的项目调度优化问题的数学模型,并通过人工蜂群算法和任务可拆分的串行调度机制对数学模型进行求解.仿真结果表明:人工蜂群算法能够有效地求解任务可拆分的资源受限的项目调度问题,在人工蜂群算法使用中适当地调整算法参数可以提高迭代收敛的速度和精度.在项目调度中通过对可拆分任务的拆分不但能有效地缩短项目工期,又能提高资源的使用效率,值得在实际项目中推广应用.

参考文献:

- [1] Buddhakulsomsiri Jirachi, David S K. Properties of multi-mode resource-constrained project scheduling problems with resource vacations and activity splitting [J]. European Journal of Operational Research, 2006, 175(1): 279-295.
- [2] Buddhakulsomsiri Jirachi, David S K. Priority rule-based heuristic for multi-mode resource-constrained project scheduling problems with resources vacations and activity splitting [J]. European Journal of Operational Research, 2007, 178(2): 374-390.
- [3] 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.
- [4] 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.

(下转第60页)

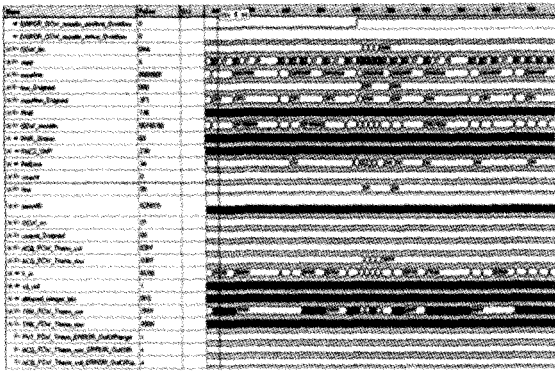


图5 环路锁定状态下的时序图

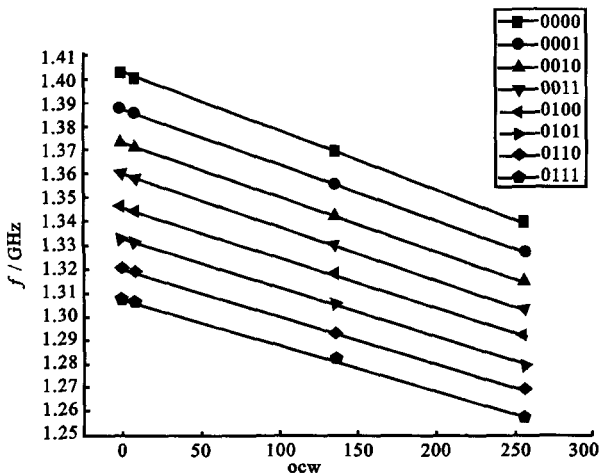


图6 DCO的调谐曲线

率.按照 Top-down 的实现流程,版图经 0.18 m

工艺流片,样片测试结果与仿真结果一致,实现了一款输出为 1.2~1.4GHz 的全数字 LC 锁相环,在 1.36GHz 时相位噪声 $-101\text{dBc}/\text{Hz}@1\text{MHz offset}$.

参考文献:

- [1] Staszewski R B, Dirk Leipold, Chih-Ming Hung, et al. TDC-based frequency synthesizer for wireless application[EB/OL]. (2004-08-04)[2004-10-19]. <http://ieeexplore.ieee.org/iel5/9231/29249/01320575.pdf>.
- [2] 高明伦,胡永华,李丽. 深亚微米芯片设计中相位噪声的讨论[J]. 微电子学与计算机, 2002, 27(9): 57-60.
- [3] 王云峰,叶青,满家汉,等. 3.5GHz 锁相环的设计[J]. 微电子学与计算机, 2009, 26(6): 43-46.
- [4] Diego A, Valentino L, Carla V. Behavioral analysis of charge-pump PLL's[C] //Proc IEEE Int Symp Circ and Syst, Rio de Janeiro, Brazil, 1995: 13-16.
- [5] Norman K J. Cycle-domain simulator for phase-locked loops [C] //Southwest Symp Mixed-Signal Design, San Diego, CA, USA, 2000: 77-82.
- [6] 王雷,魏廷存,郑然. 用于生物医学成像的多通道高精度 TDC 芯片设计[J]. 微电子学与计算机, 2010, 27(5): 57-60.

作者简介:

田欢欢 (1983-), 博士研究生. 研究方向为无线射频前端及混合信号集成电路设计.

(上接第 56 页)

- [5] 王海宁,孙守迁. 基于优化成熟度的自适应蚁群优化算法[J]. 微电子学与计算机, 2010, 27(8): 140-144.
- [6] 孙晓雅,林焰. 基于信息熵的免疫粒子群算法求解指派问题[J]. 微电子学与计算机, 2010, 27(7): 65-68.
- [7] Karaboga D. An idea based on honey bee swarm for numerical optimization[R]. Kayseri Turkey: Erciges University, Engineering Faculty Computer Engineering Department, Technical Report-TR06, 2005.
- [8] Akbari R, Zeighami V, Ziarati K. Artificial Bee colony for resource constrained project scheduling problem[J].

International Journal of Industrial Engineering Computations, 2011, 2(1): 45-60.

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.