

## 基于粒子群算法的资源受限项目扩展调度方法

孙晓雅<sup>1,2</sup>, 林 焰<sup>1</sup>

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

**摘 要:** 针对资源受限的项目调度问题, 提出了一种离散粒子群算法与扩展调度机制相结合的优化方法. 离散粒子群算法中每个粒子的位置代表一组项目任务的优先权, 迭代中通过交叉策略和局部搜索策略来更新粒子的位置, 这既保持了粒子位置的离散性, 又增加了粒子的多样性, 避免早熟收敛. 每个粒子的位置通过扩展串行调度机制转换成可行的调度方案. 实算表明, 扩展调度机制的引入显著地加速了收敛的进程, 提高了解的精度. 这种基于粒子群算法的扩展调度优化方法是求解资源受限项目调度问题的有效方法.

**关键词:** 资源受限项目调度; 离散粒子群算法; 扩展串行调度

**中图分类号:** TP301.6

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-7180(2011)06-0070-04

## An Extended Scheduling Approach Based on Swarm Optimization Algorithm to Resource-constrained Project Scheduling Problem

SUN Xiao-ya<sup>1,2</sup>, LIN Yan<sup>1</sup>

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

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

**Abstract:** To solve the resource-constrained project scheduling problem (RCPSP), an optimization algorithm combined discrete particle swarm optimization(DPSO) with extended serial scheduling scheme is presented. In DPSO the location of each particle represents priorities of activities. Cross strategy and local search technology are adopted when updating the particle positions, which can ensure discreteness, increase the diversity of particles and avoid premature during iteration. The location of each particle is transformed to a feasible schedule by the extended serial scheduling scheme. The actual calculation shows that extended scheduling scheme can accelerate the convergence process obviously and improve the precision. It can be concluded that this algorithm is valid for RCPSP.

**Key words:** Resource-constrained Project Scheduling (RCPSP); Discrete Particle Swarm Optimization (DPSO); Extended Serial Scheduling Scheme

### 1 引言

目前对资源受限的项目调度问题(Resource Constrained Project Scheduling Problem, RCPSP)的研究很重要. RCPSP 是一类典型的组合优化问题, 在理论上已经证明它属于强 NP-hard 问题, 对于大规模项目用精确解法求可行调度的解空间将十分巨大, 计算时间通常无法接受. 近年来国内外学者对求解 RCPSP 的启发式算法和智能算法进行了广泛的探讨. 粒子群算法(Particle Swarm Optimiza-

tion, PSO)最早由美国的 Kenney 和 Eberhart 在 1995 年提出, 是一种基于进化的群体智能算法<sup>[1]</sup>. 因其算法参数简洁, 易于实现, PSO 算法在出现至今的十多年里得到了迅速的发展和应用. Zhang 等<sup>[2]</sup>首次将 PSO 算法应用于 RCPSP, 采用基于优先权的粒子编码方法, 求解一个具有 3 种资源约束 25 个任务的 RCPSP 算例. 单汨源等<sup>[3]</sup>采用一种复合最优模型的粒子群算法求解文献<sup>[2]</sup>的算例. 邓林义等<sup>[4]</sup>采用了优先规则的粒子群算法求解 RCPSP, 通过和以往算法的比较表明该算法具有较好的优化

效果. 彭武良等<sup>[5]</sup>提出了一种求解基于任务优先权粒子编码的改进的粒子群算法.

本文基于粒子群算法的资源受限项目扩展调度方法主要分为两个环节. 第一,通过离散粒子群算法得到项目各任务的优先值. 第二,通过扩展的串行调度得到可行的任务调度方案. 离散粒子群算法与扩展串行调度方法的结合不但能提高解的精度,而且加速了迭代收敛的进程.

## 2 问题描述

典型的 RCPSP 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.  $s_j, f_j, d_j$  分别表示第  $j$  项任务的开始时间、结束时间和工期.  $C = \{(i, j) \mid i \text{ 必须在 } j \text{ 开始前完成}\}$  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  $r_{jk}$ .  $A(t)$  代表  $t$  时刻正在执行的任务的集合. 则 RCPSP 的优化调度数学模型如下:

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

$$\text{s. t. } f_i \leq s_j \quad (i, j) \in C \quad (2)$$

$$s_j \geq 0, f_j = s_j + d_j \quad j \in J \quad (3)$$

$$\sum_{A(t)} r_{jk} \leq R_k \quad k \in K, 0 \leq t \leq f_{n+1} \quad (4)$$

## 3 求解 RCPSP 的离散粒子群算法

### 3.1 PSO 算法的基本原理

PSO 是一种基于群体智能理论的全局优化方法, 通过群体中粒子间的合作与竞争产生的群体智能指导优化搜索. 算法中的种群称作粒子群, 个体称为粒子. 每个粒子代表问题的一个可行解, 具有位置和速度两个属性, 分别表示当前粒子在解空间中的位置和移动速度, 以移动速度改变粒子位置, 以粒子位置对应的适应度函数值确定粒子的“优劣”程度. PSO 算法首先随机初始化一定数量的粒子构成粒子群, 然后粒子在每一次迭代中通过跟踪两个“极值”来更新自己. 一个极值是粒子本身所找到的最优解, 叫做个体极值  $pbest$ , 另一个极值是整个种群目前找到的最优解, 称为全局极值  $gbest$ . PSO 算法中的粒子寻优基本公式如下<sup>[1,6]</sup>:

$$v_i^{k+1} = wv_i^k + c_1r_1(pbest_i^k - x_i^k) + c_2r_2(gbest^k - x_i^k) \quad (5)$$

$$x_i^{k+1} = x_i^k + v_i^{k+1} \quad (6)$$

式中,  $w$  称为惯性因子;  $r_1, r_2$  是  $[0, 1]$  区间服从均匀

分布的随机数;  $c_1, c_2$  均为学习因子;  $k$  代表迭代的次数;  $x_k$  为迭代  $k$  次时粒子的空间位置;  $v_i^k$  为迭代  $n$  次时粒子  $i$  的速度;  $pbest_i^k, pbest_i^k$  分别为微粒从初始到当前迭代次数搜索产生的个体极值和全局极值.

上述 PSO 算法的基本理论是针对连续性问题给出的. 在 PSO 算法中用粒子位置的编码表示 RCPSP 中任务的优先级, 如果采用连续数据形式, 就会产生较多的数据冗余<sup>[5]</sup>, 为此本文采用了一种离散粒子群算法 (Discrete Particle Swarm Optimization, DPSO).

### 3.2 基于优先权的 DPSO 算法

#### 3.2.1 粒子的位置

对任务集为  $J = \{0, 1, 2, \dots, n, n+1\}$  的资源受限项目, 在粒子群算法中, 取粒子群的总数为  $m$ , 每个粒子的位置是一个  $n$  维向量  $x_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{ij}, \dots, x_{in})$ , 向量的维数即是项目的非虚拟任务数. 每个粒子的位置代表一种项目任务的优先权的排列, 是  $1 \sim n$  自然数的一个排列. 其中,  $x_{ij}$  是第  $i$  个粒子的第  $j$  个位置的值, 它对应了第  $j$  项任务的优先权为  $x_{ij}$ . 一个粒子的位置对应了一种项目的任务优先权序列, 每组任务优先权序列通过扩展的串行调度生成机制都可以得到一个可行的调度方案.

#### 3.2.2 适应度函数

适应度函数用来评价粒子的性能. RCPSP 的目标是整个项目完工工期最短, 因此选用项目工期做为适应度函数, 每个粒子位置所代表的任务优先权序列都转换为一个可行调度, 进而可求出该可行调度方案对应的项目工期, 这一项目工期就作为粒子的适应度函数值, 简称为粒子的适应值.

#### 3.2.3 粒子位置的更新

为了保证粒子位置更新后得到的新粒子位置仍为从 1 到  $n$  的任务优先权的排列. 本文采用了遗传算法中交叉和变异的思想, 来实现粒子位置的更新.

实现过程分两步<sup>[7]</sup>: 第一步, 粒子对个体极值和全局极值的跟踪通过交叉操作来实现. 每个粒子首先和个体极值进行定位交叉, 产生两个粒子, 取二者中适应值小的粒子来更新粒子. 然后新粒子再和全局极值进行定位交叉, 同样再用适应值小的粒子更新粒子. 第二步, 采用一种局部搜索策略, 对第一步更新后的粒子进行改进, 以增强全局搜索能力. 具体做法为: 根据粒子位置的维数, 随机生成  $a$  对位置点, 然后把每对位置点的值进行交换, 就得到新的粒子位置, 其中随机位置点的对数  $a$ , 根据所求解问题的维数适当调整. 在完成整个粒子群的位置更新后,

重新计算粒子的适应值,然后对个体极值和全局极值进行更新.

4 扩展串行调度生成机制

DPSO 算法中一个粒子的位置对应了项目的一种任务的优先权序列,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两种:一种是以任务为阶段变量的串行调度机制(SSS);另一种是以时间为阶段变量的并行调度机制(PSS). Kolisch 指出<sup>[8]</sup>: 串行调度产生积极计划而并行调度产生非延迟计划,并行调度的解空间是串行调度的子集,因而有可能错过最优解. 串行调度有两种对齐调度方式,一种是左齐计划,一种是右齐计划. 本文扩展的串行调度生成机制采用了双齐计划,实现过程分为三个步骤: 第一步,采用串行调度方法生成一个左齐计划;第二步,在左齐计划的基础上,以左齐计划的结束任务完工时间为基准,再生成右齐计划;第三步,若右齐计划开始任务开始时间大于零,则整个右齐计划同步左移至开始任务最早开始时间,即再进行一个左齐计划. 以一个具有 5 个任务的简单项目为例,受限资源只有 1 种,最大可用资源量为 3. 图 1 给出了该算例的单代号网络图,每个任务节点上方标示的两个数字,分别表示该任务的工期和所需资源量. 若取 5 个任务的优先级为[5 4 3 2 1],图 2 的(a)、(b)和(c)展示了扩展的串行调度的实现过程,这三个图的横坐标均表示工期时间,纵坐标表示任务的资源使用量. 第一步左齐计划所生成的调度如图 2(a)所示;第二步右齐计划所生成的调度如图 2(b)所示;第三步再进行左齐计划生成最终调度如图 2(c)所示.

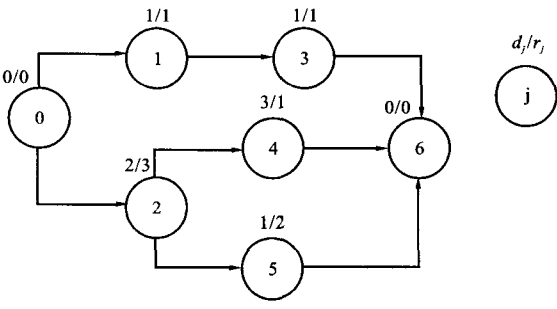


图 1 单代号图表示的简单示例

5 算例仿真

基于上述离散粒子群算法及扩展串行调度的基本原理,本文应用 Matlab 7.0 编制了相应的求解程

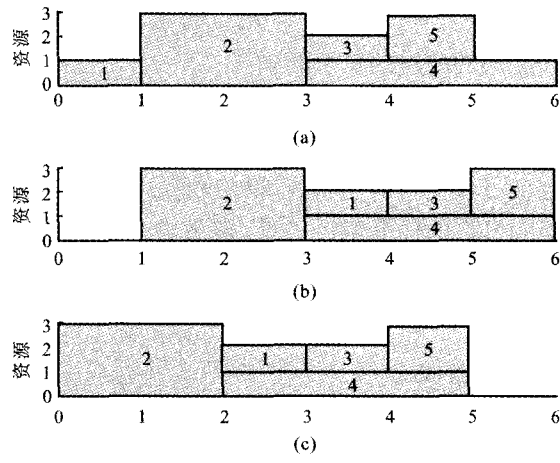


图 2 扩展串行调度实现过程

序. 选用标准问题库 PSLIB 中的单执行模式项目调度问题对算法进行仿真测试,这里随机选择 J30 中 480 个问题中 j306\_10 进行验证. 采用两种算法. 第一种基于 DPSO 算法和串行调度生成机制,第二种基于 DPSO 算法和扩展串行调度机制. 图 3 给出了两种算法 20 次计算的平均收敛情况,每次计算均取粒子数为 20,粒子变异对数为 2 对,最大迭代次数为 50. 已知 j306\_10 最短完工工期的精确解为 61. 由图 3 可见第一种算法较第二种算法收敛速度快,而且解的精度高,对于该算例第一种算法在 20 次仿真中每次都能收敛到精确解 61,相对而言第二种算法的性能就比较差.

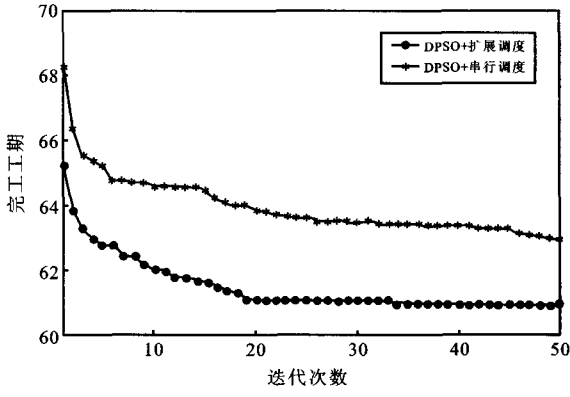


图 3 两种算法的收敛情况比较

为了对串行调度和扩展的串行调度进行比较,我们随机地给出 20 组任务的优先权,分别采用串行调度和扩展的串行调度机计算项目的完工工期. 如图 4 所示,星号为给定一组优先权时由串行调度得到的项目工期,菱形符号为相同优先权时由扩展串行调度得到的项目工期,每条竖线表示二者工期的差距,差距值标示在竖线上方. 由图 4 可以看出扩展串行调度机制明显优于串行调度,对于同样的优先权,扩展调度生成的可行调度的工期总是小于等于

串行调度生成的可行调度的工期,而大多数情况是前者工期比后者工期大大缩短,可见扩展调度对问题优化的效果十分显著。

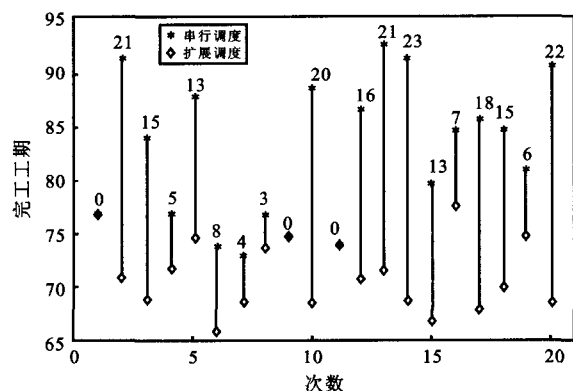


图4 扩展串行调度与串行调度生成机制的比较

## 6 结束语

本文针对资源受限的项目调度问题提出了一种算法:即由离散粒子群算法求得项目任务的优先权,由扩展的串行调度生成机制得到可行的调度方案。考虑到以往算法任务优先权冗余性的问题,采用了离散粒子群算法,并采用交叉变异及局部搜索技术对粒子位置进行更新,以保持粒子的离散性和多样性。通过算例仿真可以看出:本文基于离散粒子群算法和扩展串行调度相结合的优化调度算法能够有效地求解 RCPSP 问题,迭代收敛的速度快,精度高;同时也看到扩展的串行调度生成机制与串行调度生成机制相比具有非常明显的优点,它既提高了算法的优化效率又提高了算法的优化精度。

(上接第 69 页)

数,从而使有功功率和无功功率的估算更为方便、精确。通过上述分析,建立该系统的 MATLAB/SIMULINK 仿真模型,根据仿真结果可以清晰地看出该控制算法的优点:直流电压稳定,谐波畸变率小,功率因数较高,动态性能良好。

## 参考文献:

- [1] 张崇巍,张兴. PWM 整流器及其控制 [M]. 北京:机械工业出版社,2003.
- [2] 罗悦华,伍小杰,王晶鑫. 三相 PWM 整流器及其控制策略的现状与展望[J]. 电气传动, 2006, 36(5): 3-8.
- [3] 郑征,姚永刚. 基于虚拟磁链的双 PWM 变频器一体化控制策略研究[J]. 河南理工大学学报:自然科学版, 2008, 27(5): 551-555.

## 参考文献:

- [1] Eberhart R, Kennedy J. A new optimizer using particle swarm theory[C]// Proc of the 6th Int Symposium on Micro Machine and Human Science. New York: IEEE, 1995: 39-43.
- [2] Zhang Hong, Li Heng, Tam C M. Particle swarm optimization for resource - constrained project scheduling [J]. International Journal of Project Managemnet, 2006, 24(1): 83-92.
- [3] 单汨源,吴娟,吴亮红,等. 基于改进粒子群算法的资源受限项目进度研究[J]. 计算机工程与应用, 2007, 43(15): 26-29.
- [4] 邓林义,林焰,金朝光. 采用优先规则的粒子群算法求解 RCPSP[J]. 计算机工程与应用, 2009, 45(10): 40-43.
- [5] 彭武良,郝永平. 求解资源受限项目调度问题的改进粒子群算法[J]. 系统工程, 2010, 28(4): 84-88.
- [6] 张雯,杨春明,罗雪春,等. 改进的粒子群优化算法[J]. 微电子学与计算机, 2007, 24(2): 70-72.
- [7] 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.
- [8] Kolisch R. Serial and parallel resource - constrained project scheduling methods revisited: theory and computation [J]. European Journal of Operational Research, 1996, 90(2): 320-333.

## 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。

- [4] 王久和,李华德. 一种新的电压型 PWM 整流器直接功率控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(16): 50-55.
- [5] 刘钊,赵克友. 三相 PWM 整流器不定频直接功率控制[J]. 青岛大学学报:工程技术版, 2007, 22(1): 11-16.
- [6] 郭孝园,李明. 基于直接功率控制的三相整流器的研究[J]. 工矿自动化, 2009(3): 11-13.
- [7] 王久和. 电压型 PWM 整流器的非线性控制[M]. 北京:机械工业出版社, 2008.

## 作者简介:

郑征 女, (1965-), 教授, 博士研究生. 研究方向为电力电子与电气传动。

孔德宁 男, (1985-), 硕士研究生. 研究方向为电力电子与电气传动。