

改进 PSO 的多目标约束项目进度计划问题研究

刘明周 程晓梅 葛茂根 安苏华 李 辉

【摘要】 在项目进度计划问题的研究中,为实现在多执行模式和多资源约束条件下,对项目活动的执行顺序和执行模式进行合理安排的目标,以使项目工期最短,建立了多目标进度计划的目标函数,确定了约束条件。结合微粒群算法求解该组合优化问题,并通过对标准微粒群算法的改进,引入了交换子和交换序的概念,提高了算法的寻优速度和寻优能力,并结合具体的实例验证了改进算法的有效性。

关键词: 多资源约束 项目进度计划 多模式 微粒群算法

中图分类号: TB114.1

文献标识码: A

Study on Multi-mode Resource-constrained Project Scheduling Problem Based on Particle Swarm Optimization

Liu Mingzhou Cheng Xiaomei Ge Maogen An Suhua Li Hui
(Hefei University of Technology)

Abstract

During the research of project scheduling problem, in order to achieve objective that included arranging the execution sequence of the activities and the execution mode reasonably, minimizing the project duration, an objective function of multi-objective scheduling was built and restriction conditions were defined. Then considering the specialty of this combinatorial optimization problem, the standard particle swarm optimization algorithm was improved, and a method presented the concepts of swap operator and swap sequence was designed for improving the optimizing speed and capacity of the algorithm. Finally the validity of such method has been proved with an example.

Key words Resource-constrained, Project scheduling, Multi-mode, Particle swarm optimization

引言

在制造业的产品研发、生产计划和运营管理中,项目进度计划(project scheduling, 简称 PS)是一个重要的优化问题。该问题研究的是在一定约束条件下达到某种最优目标的方法,即一个寻优的过程。目标的设定根据企业的经营目的和需求的差别而不同,最普遍的目标是工期最短和成本最小。PS 的约束条件包括项目活动之间的逻辑先后关系以及资源限量。资源可分为可恢复资源、不可恢复资源、部分

恢复资源及双约束资源^[1],每个活动的执行也可以有多种模式(multi-mode)。目前的研究大多是针对资源约束型项目进度问题(resource-constrained project scheduling problem, 简称 RCPSP)及其延伸问题进行的,主要集中在开发解决此类特定问题的模型和算法上^[2]。

本文对多模式资源约束型项目进度问题(multi-mode resource-constrained project scheduling problems, 简称 MRCPSP)进行研究,建立该问题的模型,并利用改进微粒群算法对其进行求解,通过实例说明该

收稿日期: 2006-11-06

刘明周 合肥工业大学机械与汽车工程学院 教授 博士生导师, 230009 合肥市
程晓梅 合肥工业大学机械与汽车工程学院 硕士生
葛茂根 合肥工业大学机械与汽车工程学院 硕士生
安苏华 合肥工业大学机械与汽车工程学院 硕士生
李 辉 合肥工业大学机械与汽车工程学院 硕士生

模型和算法的有效性。

1 问题描述及数学模型

1.1 研究的假设条件

(1) 项目活动网络为确定无环路网络,且仅有一个开始节点和一个结束节点。

(2) 项目各项活动具有多种执行模式,每个活动只能选择一种模式执行,且一旦选中一种模式,在其执行过程中不能中断。

(3) 项目活动的执行模式确定后,其对应的工期、各种资源需求量都是确定已知的。

1.2 问题描述

假定一个项目由 N 个活动组成,用活动集 $V = \{v_0, v_1, \dots, v_{n+1}\}$ 表示,其中活动 0 和活动 $n+1$ 分别表示项目开始和结束的虚活动 $j (j \in V)$;活动有多种执行模式 $M_j = \{1, \dots, |M_j|\}$, $M_0 = M_{n+1} = \{1\}$;活动 j 在模式 m 下的工期为 $p_{jm} \in Z^+ (m \in M_j)$, $p_{01} = p_{n+1,1} = 0$;可恢复资源集为 R^ρ ,第 $k (k \in R^\rho = \{1, \dots, K\})$ 种可恢复资源(称为资源 ρ) 的单位时间限量为 R_k^ρ ,活动 j 在模式 m 下所消耗的资源量为 r_{jmk}^ρ , $r_{0lk}^\rho = r_{n+1,l,k}^\rho = 0$;不可恢复资源集为 R^v ,第 $k (k \in R^v = \{1, \dots, K'\})$ 种不可恢复资源(称为资源 v) 限量为 R_k^v ,活动 j 在模式 m_j 下所消耗的资源量为 r_{jmk}^v , $r_{0lk}^v = r_{n+1,l,k}^v = 0$ 。

如何确定活动的执行顺序 $J = (j_0, \dots, j_{n+1}) (j_0 = 0)$,模式 $M = (m_0, \dots, m_{n+1})$ 和开始时间 $S = (s_0, \dots, s_{n+1}) (s_0 = 0, s_{n+1}$ 为项目总工期),使得项目活动在满足优先关系约束,单位时间内资源 v 限量约束和项目工期内资源 v 限量约束的条件下,达到项目的工期最小。该问题在于求取活动的最优执行顺序、执行时间和各自采用的资源模式,这是个 NP-hard 问题,当 $|R^v| \geq 2$ 时是一个 NP-complete^[3] 问题。

1.3 MRCPSP 优化模型

MRCPSP 可建立数学模型为

$$\min F(x) = s_{n+1} \quad (1)$$

$$\text{s. t.} \quad \begin{cases} x_{jm} = \begin{cases} 1 & (\text{活动 } j \text{ 以模式 } m \text{ 执行}) \\ 0 & (\text{其他}) \end{cases} \\ \sum_{m=1}^{M_j} x_{jm} = 1 \quad (j = 0, 1, \dots, n+1) \end{cases} \quad (2)$$

$$s_i + \sum_{i \in P(j)} x_{im} p_{im} \leq s_j \quad (3)$$

$$\sum_{j \in L_t} \sum_{m=1}^{M_j} r_{jmk}^\rho x_{jm} \leq R_k^\rho \quad (k = 1, 2, \dots, K) \quad (4)$$

$$\sum_{j=1}^n \sum_{m=1}^{M_j} r_{jmk}^v x_{jm} \leq R_k^v \quad (k = 1, 2, \dots, K') \quad (5)$$

其中:式(1)表示最小化项目完成时间的目标函数。式(2)保证一个活动只能在一种模式下完成一次。式(3)中 $P(j)$ 为活动 j 的紧前活动集合,该式保证活动间的优先关系约束。式(4)中 L_t 为时间段 $[t-1, t]$ 内正在执行的活动集合,该式保证单位时间使用的可恢复资源量不超过可用量。式(5)保证整个项目耗费的不可恢复资源量不超过投入总量。

为了达到总工期最短的目标,每个活动都必须尽可能早日完成。当各活动的执行模式选定后,其工期也分别确定,计算紧前活动集 $P(j)$ 中所有活动开始时间与其相应工期的和,即活动 j 所有紧前活动的完成时间,通过比较,取最大值作为活动 j 的开始时间,公式表示为 $s_j = \max_{i \in P(j)} \{s_i + x_{im} p_{im}\}$ 。从而可得出各项活动的开始时间。活动 $n+1$ 是表示项目结束的虚活动,工期为零,其开始时间 s_{n+1} 即为项目总工期。

2 改进微粒群算法

2.1 标准微粒群算法

微粒群算法^[4] (particle swarm optimization algorithm, 简称 PSO) 的基本思想是源自对鸟类群体行为的研究,算法的实质是根据个体与环境的适应程度,并通过群体中的信息共享来实现寻优,从而将群体中的个体逐渐“吸引”到最佳区域。PSO 中, n 维空间内的每一个“微粒”都是优化问题的一个解,所有的微粒都有一个由目标优化函数决定的适应值(fitness value),以及一个速度决定其飞行的方向和距离。

假设在一个 n 维实值搜索空间(即问题的解空间)中,由 m 个微粒组成一个微粒群,其中微粒的空间位置为 $X_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{in}), i = 1, 2, \dots, m$,飞行速度为 $V_i = (v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{in})$,所经历的最优位置为 $P_i = (p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{in})$,在整个微粒群中,所有微粒经历过的最好位置为 $P_g = (p_{g1}, p_{g2}, \dots, p_{gn})$ 。任意一个微粒 i 在第 d 维空间 $(1 \leq d \leq n)$ 上的运动变化方程为

$$v_{id}(k+1) =$$

$$\omega v_{id}(k) + c_1 r_1 (p_{id} - x_{id}) + c_2 r_2 (p_{gd} - x_{id}) \quad (6)$$

$$x_{id}(k+1) = x_{id}(k) + v_{id}(k+1) \quad (7)$$

式中 k ——迭代次数 ω ——惯性权重系数
 c_1, c_2 ——加速系数,它们均为正常数,通常在 0~2 之间取值
 r_1, r_2 ——两个在 $[0, 1]$ 范围内的随机数
 v_{id} ——微粒 i 在 d 维空间上的速度
 x_{id} ——微粒 i 在 d 维空间上的位置

此处,微粒的位置和速度变化范围都限定在最大、最小值之间,若超过边界范围,则取边界值。

在运动方程式(6)中微粒飞行速度由3项组成。第1项表示微粒维持先前速度的程度,它维持算法拓展搜索空间的能力,惯性权重系数 ω 可起到调整算法全局和局部搜索能力的作用;第2项代表认知部分,表示微粒对自身成功经验的肯定和倾向,并通过适当的随机扰动来防止陷入局部最优;第3项代表社会部分,表示微粒间的信息共享和互相合作。这正是PSO算法的关键所在,若没有第3项,算法将等价于各个微粒单独运行,得到最优解的概率就很小。

2.2 求解模型的改进微粒群算法

2.2.1 构造粒子

实现算法的关键是要找到合适的表达方法使粒子与解对应。MRCPSP是NP-hard问题,根据上面所讲的模型特点,一旦活动的模式向量 \mathbf{M} 确定,活动 j 的模式 m 便确定了活动的工期、资源 ρ 和资源 v 的消耗量。因此构造一个 n 维空间,对应 n 个活动的执行模式。表示为

$$\mathbf{M} = (m_0, \dots, m_{n+1})$$

当确定 \mathbf{M} 后根据项目的网络结构,采用网络拓扑技术确定活动的执行顺序 J 和开始时间向量 \mathbf{S} ,因此每个粒子唯一对应一个进度计划 $(J, \mathbf{M}, \mathbf{S})$ 。

2.2.2 改进的进化方程

由于基本微粒群算法求解优化问题的进化方程是以连续型函数为优化目标,而本文所研究的MRCPSP问题是一个复杂的离散优化问题,所以基本微粒群算法无法对该问题进行求解,必须改进基本微粒群算法,以满足该问题的求解。

求解MRCPSP问题的一个关键点是定义速度的概念,这里定义速度为粒子编码的位置数和变换目标。具体描述为

$$V_i = \{(i, l), i = 1, 2, \dots, n\} \quad (8)$$

式中 i ——编码的位置数,对应着活动代号

l ——替代值,其取值小于、等于活动 i 的执行模式个数

式(8)表示将活动 i 的执行模式变换为 l 。

一个活动执行模式序列 X 经速度 V 变换后,得到一个新的模式序列 Y 为

$$X = 131213231 \quad V = \{(2, 1), (3, 3), (4, 1), (7, 3)\}$$

$$Y = X + V = 113113331$$

针对本文所研究的MRCPSP问题,结合上述的编码方式及速度的基本定义,把求解该问题的进化方程改进为

$$V_i(k+1) = \alpha(P_i - X_i) + \beta(P_g - X_i) \quad (9)$$

$$X_i(k+1) = X_i(k) + V_i(k+1) \quad (10)$$

式(9)中的 α 和 β 为 $[0, 1]$ 之间的随机数, $\alpha(P_i - X_i)$ 表示 $(P_i - X_i)$ 交换序中的交换以概率 α 保留; $\beta(P_g - X_i)$ 表示 $(P_g - X_i)$ 交换序中的交换以概率 β 保留。根据此处对速度的定义,它是微粒代码各位置数据的代换,所以改进进化方程去除了标准微粒群方程的自身速度项。

2.2.3 变异操作

标准PSO算法收敛速度很快,但易陷入局部最优。为了避免收敛早熟现象的发生,在进化过程中采用变异操作,保持微粒群的多样性,尽可能拓展解空间的搜索范围,减少陷入局部最优的可能性。具体引入方法是:对微粒群的微粒赋予一个变异概率 r ,在每次迭代中,依据变异概率 r 选取指定数量的微粒随机进行变异。变异时对所选微粒的编码的几个随机位置进行变换,在这几个位置的取值范围内随机取一数值替换原值,从而产生相同数目的子代并取代父代微粒,在保持种群的总微粒数目不变的同时,保证种群的多样化。使群体中的个体增加新的信息,以避免重要信息的丢失^[5]。

新生成的微粒确定了各活动采取的执行模式,根据这些模式对应的工期和资源消耗量,以及项目的网络结构,以开始时间的先后对项目各活动进行排序,同时考虑单位时间的可恢复资源约束。在网络图中,若并行活动的可恢复资源存在冲突,则工期较短的先执行,并行活动按串行方式执行。从而得出项目活动的执行顺序和开始时间。

2.2.4 适应度函数

首先为每个活动随机选择一种执行模式,此处构造的MRCPSP是有约束的整数规划问题,式(5)为不可恢复资源约束。采用罚函数法来处理这一约束,取一个很大的正数 R 作为罚系数,则目标函数转化为

$$\min F(x) = S_{n+1} + R \left[\max \left(\sum_{j=1}^n \sum_{m=1}^{M_j} r_{jmk}^v x_{jm} - R_k^v, 0 \right) \right]^2 \quad (11)$$

这样,对不可行解进行加权处理,使其在PSO迭代求解的过程中被淘汰,从而达到微粒群逐渐收敛于可行解的目标。

2.3 改进微粒群算法流程

(1) 设定微粒群的规模及参数 α 和 β 的值,然后初始化微粒群,即给群体中每个微粒赋一个初始位置和速度。

(2) 根据适应度函数计算每个微粒的适应值。

(3) 比较每个微粒的适应值与其个体极值 P_i ; 如果较优, 则更新个体极值为该微粒的适应值。

(4) 比较每个微粒的适应值与全局极值 P_g , 如果较优, 则更新全局极值为该微粒的适应值。

(5) 根据式(9)~(10)求得微粒的新位置 X'_k 和新速度 V_{k+1} ; 对 X'_k 进行一定概率的变异操作得到下一代微粒 X_{k+1} 。

(6) 若未达到预先设定的停止准则(最大迭代次数或收敛控制精度), 返回步骤(2); 若达到则停止计算, 输出计算结果。

3 实例分析

在对 MRCPSP 的研究中, 结合项目网络图的表示方法, 采用 AON(activity-on-node) 技术来辅助解决问题。

如图 1、表 1 所示, 该例中由 22 个活动构成, 其中 0 和 21 为虚活动。除虚活动外其他每个活动都有多种执行模式。假设该例中可恢复资源单位时间限量 $R_k^b = 10$, 不可恢复资源总限量为 $R_k^v = 60$ 。各种执行模式对应的工期(天)及资源需求量如表 2 所示。

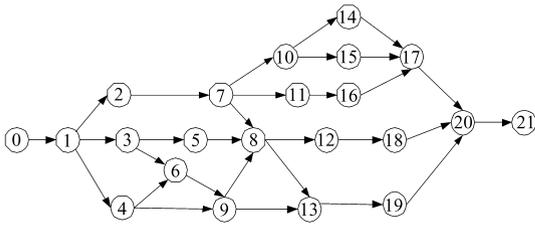


图 1 实例项目网络图

Fig. 1 Network of the example

表 1 项目活动优先关系表

Tab. 1 Precedence of the activities in the project

活动代号	紧前活动	活动代号	紧前活动	活动代号	紧前活动	活动代号	紧前活动
0		6	3, 4	12	8	18	12
1	0	7	2	13	8, 9	19	13
2	1	8	5, 7, 9	14	10	20	17, 18, 19
3	1	9	4, 6	15	10	21	20
4	1	10	7	16	11		
5	3	11	7	17	14, 15, 16		

运用 Matlab 编程, 采用上述设计的改进微粒群算法对该实例项目的进度计划进行分析, 微粒群规模设定为 60, 变异概率 $r = 0.35$ 。运算结果如表 3 所示, 该表给出了活动执行模式及对应的开始、结束时间。该结果方案中, 项目的总工期为 34 d, 不可恢复资源消耗量为 58, 在其限量范围内, 同时满足优

先关系和单位时间可恢复资源约束。实例项目甘特图如图 2 所示。

表 2 项目活动详细信息表

Tab. 2 Details of the activities in the project

活动代号 j	执行模式 k/d	p_{jm}	r_{jmk}^o	r_{jmk}^v	活动代号 j	执行模式 k/d	p_{jm}	r_{jmk}^o	r_{jmk}^v	
0	1	0	0	0	11	1	8	2	1	
	1	2	3	5		2	6	4	2	
	2	3	3	4		1	4	3	4	
	3	4	1	3		12	2	3	4	2
4	5	2	2	3	5		2	5		
1	1	2	4	5	13	1	8	1	3	
	2	3	2	3		2	6	2	4	
	3	5	5	5		3	2	5	3	
2	1	7	3	2	14	4	5	3	5	
	2	5	4	3		5	7	3	2	
	3	6	3	1		15	1	8	2	4
	4	2	5	4			2	6	5	2
	5	4	2	2			3	3	2	3
3	1	3	4	3	16	4	5	5	1	
	2	5	2	6		5	7	3	5	
	3	6	3	1		17	1	5	1	3
	4	2	5	4			2	2	3	3
	5	2	5	4			3	4	2	6
	6	5	3	3			4	3	4	2
4	1	5	3	5	18	1	7	2	2	
	2	4	6	2		2	5	4	1	
	3	3	3	3		3	2	2	3	
5	1	3	2	7	19	1	6	6	1	
	2	2	4	5		2	5	8	2	
	3	3	3	3		20	1	5	4	4
	4	5	5	5			2	4	5	2
6	1	2	3	6	21	3	8	3	5	
	2	1	8	2		4	4	6	2	
	3	3	4	4		1	0	0	0	
7	1	10	1	5	10	2	8	3	4	
	2	5	4	2		3	4	6	2	
8	1	2	5	4	9	1	5	4	4	
	2	1	5	3		2	5	8	2	
	3	2	2	5		19	1	5	4	4
4	4	2	3	2	4		5	2		
9	1	10	1	5	10	3	8	3	5	
	2	8	3	4		4	4	6	2	
	3	4	6	2		1	0	0	0	

表3 项目优化方案

Tab.3 Optimal solution of the example

活动代号	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
执行模式	1	3	1	4	2	2	3	2	2	1	3	1	1	3	4	1	2	2	1	1	4	1
执行顺序	0	1	5	2	2	3	4	6	8	6	7	7	10	10	9	9	11	12	12	12	13	14
开始时间	0	0	10	4	4	6	9	12	14	12	13	13	19	19	17	17	21	23	23	23	30	34
结束时间	0	4	12	6	9	10	12	13	19	14	17	21	23	21	22	22	23	29	30	29	34	34

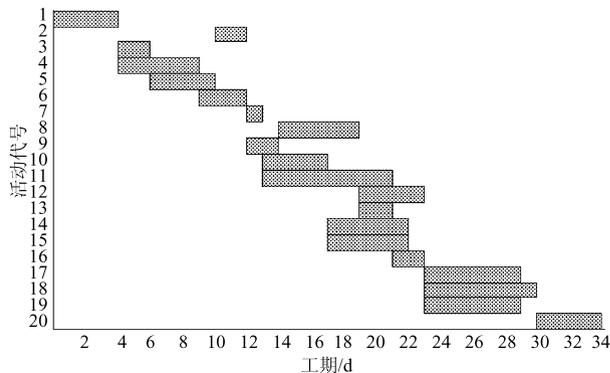


图2 实例项目甘特图

Fig.2 Gantt chart of the example

4 结束语

对多模式多资源约束问题进行了描述,并提出了求解该问题的数学模型,提出了以微粒群算法求解该问题的方法,针对该问题设计了编码方法,改进了速度和位置进化方程,并引入交换子、交换序的概念及变异操作。实例证明,将改进的PSO算法用于解决多模式资源约束型项目进度问题,提高了寻优解效率,有效避免了陷入局部最优的问题,是一种有潜力的优化方法。

参 考 文 献

- 1 Slowinski R. Two approaches to problems of resource allocation among project activities: a comparative study [J]. Journal of the Operational Research Society, 1980, 31:711~723.
- 2 Kolischa R, Padmanab R. An integrated survey of deterministic project scheduling [J]. The International Journal of Management Science, 2001,29(3):249~272.
- 3 Roland H. Resource-constrained project scheduling: a heuristic for the multi-mode case [J]. OR - Spektrum, 2001, 23(3): 335~357.
- 4 曾建潮,介婧,崔志华.微粒群算法[M].北京:科学出版社,2004.
- 5 元四华,费业泰.基于遗传算法的制造质量控制多目标的优化[J].农业机械学报,2006,37(6):110~112, 116.

(上接第97页)

参 考 文 献

- 1 Chen R S, Wu P L, Chiou R Y Y. Peanut roots as a source of resveratrol[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2002,50(6):1 665~1 667.
- 2 向海艳,周春山,雷启福,等. HPLC法测定花生根中白藜芦醇的含量[J].天然产物研究与开发,2005,17(2):179~181.
- 3 郭景南,刘崇怀.葡萄属植物白藜芦醇研究进展[J].果树学报,2002,19(3):199~204.
- 4 朱立贤,金征宇.大孔吸附树脂对虎杖中白藜芦醇吸附性能的研究[J].食品科学,2005,26(3):75~78.
- 5 陈雷,韩雅珊.葡萄不同品种和组织白藜芦醇含量的差异[J].园艺学报,1999,26(2):118~119.
- 6 陈秀霞,陈由强,陈如凯.白藜芦醇研究进展[J].福建林业科技,2003,30(4):84~88.
- 7 刘大川,刘强,吴波,等.花生红衣中白藜芦醇、原花色素提取工艺的研究[J].食品科学,2005,26(7):144~148.
- 8 戴蕴青,韩雅珊,赵文恩,等.红葡萄酒中白藜芦醇及其糖苷异构体的反相 HPLC 分析[J].中国农业大学学报,2002,7(1):14~18.