

资源受限项目调度问题的改进文化微粒群算法求解^{*}

何立华^{1,2}, 孙晓森^{2†}, 张连营¹

(1. 天津大学 管理与经济学部, 天津 300072; 2. 中国石油大学(华东) 经济管理学院, 山东 青岛 266580)

摘要: 为了克服标准微粒群算法在求解资源受限项目调度问题上存在的早熟现象, 提出一种改进的文化微粒群算法。该算法框架基于微粒群算法的主群体空间和文化算法的知识空间, 两种空间具有各自的群体并可独立并行演化, 形成双演化双促进机制, 提高了算法的全局搜索能力和运行效率。同时为了避免文化算法知识空间自我演化限制, 引入遗传算法的演化机制来改进知识空间的演化操作。通过具体的算例比较, 验证了提出的改进文化微粒群算法在求解资源受限项目问题时的有效性。

关键词: 文化微粒群算法; 资源受限项目调度问题; 知识空间; 主群体空间

中图分类号: TP18; TP301.6 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-3695(2013)01-0090-04

doi: 10.3969/j.issn.1001-3695.2013.01.021

Improved cultural particle swarm optimization algorithm for solving resource-constrained project scheduling problem

HE Li-hua^{1,2}, SUN Xiao-sen^{2†}, ZHANG Lian-ying¹

(1. School of Management & Economics, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 2. School of Economics & Management, China University of Petroleum (East China), Qingdao Shandong 266580, China)

Abstract: In order to overcome the premature phenomenon of standard particle swarm optimization (PSO) for solving RCPSP, this paper proposed an improved cultural particle swarm optimization (ICPSO) algorithm. The framework of the proposed algorithm was based on the main population space of the PSO and the knowledge space of the cultural algorithm (CA), where two spaces having respective groups as well as evolving independently, and formed the mechanism of "double evolution, double promotion". At the same time, in order to avoid the restriction of self-evolving by the knowledge space of the CA, it introduced the evolutionary mechanism of the genetic algorithm (GA) into the knowledge space to improve its evolutionary operations. A specific comparing example verifies the validity of the ICPSO for solving the RCPSP.

Key words: cultural particle swarm optimization (CPSO) algorithm; resource-constrained project scheduling problem (RCPSP); knowledge space; main population space

资源受限项目调度(RCPSP)是在满足项目紧前约束与资源约束的前提下,通过安排项目所有任务的开工时间达到最小化项目总工期的目的。RCPSP是一个典型的NP-hard问题^[1],自20世纪50年代以来,一直都备受学者的关注,他们对RCPSP进行了大量的研究并取得了很多成果。在RCPSP的求解方法上,从精确解法到满意解,从线性规划、非线性规划,发展到分支定界法^[2]直至现在的启发式算法,包括遗传算法^[3,4]、模拟退火算法^[5,6]、微粒群算法^[7,8]、蚁群算法^[9]等。在以上算法中,微粒群算法是一种应用在RCPSP上比较成功的群智能算法。传统的微粒群算法在求解RCPSP时,由于算法自身的局限,容易陷入局部寻优,出现早熟现象,使得优化结果与理想结果之间存在一定差距。文化算法是一种基于种群的多进化过程的计算模型^[10],任何一种符合文化算法要求的进化算法都可以嵌入文化算法框架中。另外,由于文化算法中知识空间的自我演化机制限制,使得知识空间群体在自我演化时达到的效果并不理想,对下层主群体空间的有效影响作用减少,算法整体的全局搜索能力和运行效率受到一定影响。基于此,本文提出基于文化算法框架的改进文化微粒群算法(ICPSO),通过

遗传算法的种群演化机制来改进知识空间的自我演化机制,使其在求解RCPSP时可以减少粒子过早陷入局部最优的概率,能较好地解决RCPSP。

1 经典资源受限项目调度问题

经典资源受限项目调度问题可以描述为^[11]:项目中有一系列的工作,它们之间存在着时序约束,每个工作都对应一组确定已知的持续时间和资源需求量,该问题的求解是在满足工作的紧前关系约束和资源约束条件下生成一种使项目工期最短的最优调度方案。经典RCPSP的模型一般基于以下几个假设条件: a) 项目中的工作数目 J 确定; b) 各工作只允许有一种执行模式,且该执行模式不具有抢先权; c) 工作间的紧前、紧后约束关系确定; d) 各工作执行过程中需多种可更新资源,且每种资源在各阶段的需求量和供应量确定; e) 各工作的执行只受可更新资源约束。

基于以上假设,设单项目中共含有 J 个工作,设 ST_j 为工作 j 的开始时间($j=1,2,\dots,J$), d_j 表示工作 j 的执行时间($j=$

收稿日期: 2012-05-02; 修回日期: 2012-06-14 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(70871088)

作者简介: 何立华(1971-),男,安徽怀宁人,副教授,博士研究生,主要研究方向为工程管理与项目管理、管理科学理论与应用(lihuahesd@163.com); 孙晓森(1987-),男(通信作者),山东寿光人,硕士,主要研究方向为智能算法、工程管理与项目管理; 张连营(1965-),男,河北衡水人,教授,博导,主要研究方向为工程项目管理、多目标优化。

1, 2, ..., J, j 为工作数); r_{jk}^p 为工作 j 对可更新资源 k 的需求量, R_k^p 为第 k 种资源的总量 ($k = 1, 2, \dots, K, K$ 为可更新资源种类数); p_j 是工作 j 的紧前工作集。该问题的数学模型为

$$\min f = ST_j \quad (1)$$

$$\text{s. t. } ST_j - ST_i \geq d_j \quad i \in P_i \quad (2)$$

$$\sum_{j \in A_t} r_{jk}^p \leq R_k^p \quad t = 1, 2, \dots, ST_j \quad (3)$$

其中: 式(1)为目标函数,表示使最后工作 J 的开工时间最小,即项目总工期最短;式(2)代表时序约束,即紧前关系约束,表明对任何一个工作 $i \in P_j$,如果工作 i 还未结束,工作 j 就不能开始进行;式(3)为资源约束,工作一旦开始则不能中断,且在任一时刻各种资源使用量不能大于其可用量。

2 算法描述

2.1 微粒群算法和文化算法

微粒群算法是基于群体与适应度的智能优化算法。首先随机生成初始种群,其中每个微粒都代表优化问题的一个候选解。将微粒的位置坐标代入目标函数得到该微粒的适应度值,算法通过适应度来衡量微粒的优劣,其中适应度最优的微粒用 p_g 表示,称为全局极值,个体到当前代所经历的最优位置为个体极值,用 p_i 表示。微粒在解空间中运动,由一个速度矢量决定其运动方向和距离。每个微粒根据 p_g 和 p_i 来更新速度和位置。经过逐代搜索,算法最后得到问题的最优解。

假设在一个 D 维的目标搜索空间中,有 N 个微粒组成一个群体,其中第 t 代、第 i ($i = 1, 2, \dots, N$) 个微粒的位置坐标表示成向量 $X_i^t = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{id}, \dots, x_{iD})^T$, 其速度可表示为 $v_i^t = (v_{i1}^t, v_{i2}^t, \dots, v_{id}^t, \dots, v_{iD}^t)^T$, 个体最优位置表示为 $p_i^t = (p_{i1}^t, p_{i2}^t, \dots, p_{id}^t, \dots, p_{iD}^t)^T$, 种群的全局最优表示为 $p_g^t = (p_{g1}^t, p_{g2}^t, \dots, p_{gd}^t, \dots, p_{gD}^t)^T$ 。

对第 $t+1$ 代第 i 个第 d 维微粒,根据以下方程迭代更新:

$$v_{id}^{t+1} = \omega v_{id}^t + c_1 r_1 (p_{id}^t - x_{id}^t) + c_2 r_2 (p_{gd}^t - x_{id}^t) \quad (4)$$

$$x_{id}^{t+1} = x_{id}^t + v_{id}^{t+1} \quad (5)$$

其中: ω 为惯性权重,控制着前一速度对当前速度的影响;学习因子 c_1, c_2 是调整粒子自身经验与社会(群体)经验在运动中所起作用的权重; r_1 与 r_2 为 $(0, 1)$ 范围内均匀分布的随机数。

文化算法是 Reynolds 等人^[4]于1995年在人类文化系统的进化模型基础上提出的一种新型算法。文化算法是一种基于种群的模拟文化演化的多进化过程的计算模型,提供了一种显性的机制来获取、保存和整合微观演化群体寻求求解的知识和经验。主群体空间是算法运行进行问题求解的主空间,通过演化操作和性能评价进行自身的迭代求解;主群体空间不断产生知识信息并通过接受操作保存到知识空间,知识空间通过自身的演化操作进行更新,并通过影响操作对主群体空间的进一步演化进行指导。文化算法具有双重进化继承、支持两个空间的自适应进化、支持不同算法的种群演化机制等特点。文化算法的流程如图1所示。

2.2 改进的文化微粒群算法

2.2.1 算法框架

文化微粒群(CPSO)算法是将文化算法模型和微粒群算法结合而成的一种智能算法,在其演化过程中,粒子跟踪两个目标,即 p_g 和 p_i 。全局历史最优解的代代相传,形成全局最优解的轨迹,将这些最优解视为迭代搜索的全局知识信息不断地保

存并更新知识空间(又称为信念空间),对知识空间进行演化,同时对 PSO 群体的进一步求解进行指导,通过 PSO 空间(主群体空间)和知识空间的双重演化及互相影响,使求解具有更好的全局搜索能力^[13]。但是由于文化算法中知识空间的自我演化机制限制,使得知识空间群体在自我演化时达到的效果并不理想,对下层主群体空间的有效影响作用也大为降低。为避免上述现象,本文提出一种改进的文化微粒群算法(ICPSO),将遗传算法的种群演化机制引用到知识空间的自我演化,通过选择、交叉和变异操作来对知识空间群体进行自身演化和更新,从而提高知识空间群体自我演化的全局搜索能力和运行效率。ICPSO 算法框架如图2所示。

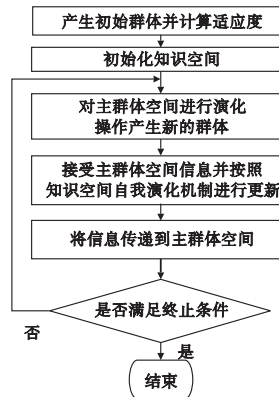


图1 文化算法流程

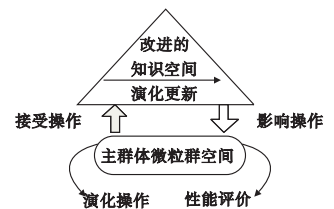


图2 ICPSO算法框架

2.2.2 改进的文化微粒群算法流程

改进的文化微粒群算法流程如图3所示,具体描述如下:

a) 初始化主群体空间和知识空间的最大迭代次数 G_1 和 G_2 、种群大小 N 、惯性权重、加速常数等参数。

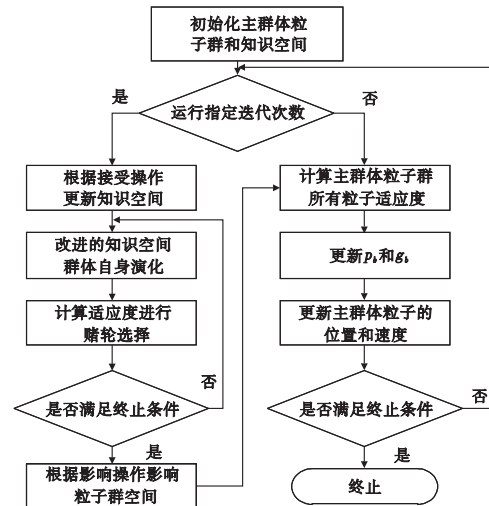


图3 ICPSO算法流程

b) 在各自的群体中,计算每个微粒的适应度值、保存初始最好位置及初始最优适应度值。

c) 对于知识空间计算各微粒新的速度,根据式(4)和(5)计算各微粒新的位置,并对各微粒新的位置与速度进行限幅处理;对于主群体空间计算各微粒新的速度,计算各微粒新的位置,并对各微粒新的位置与速度进行限幅处理。

d) 更新各微粒的个体历史最好适应度和个体历史最好位置;更新各群体的群体历史最好适应度和群体历史最好位置。

e) 通过接受函数判断是否为真,若为真,即超过允许群体空间与知识空间全群最优微粒适应度连续不改善的代数,则将群体空间的适应度最优的微粒替代知识空间的适应度最差的微粒。

f) 若满足停止条件,即迭代次数超过最大允许迭代次数或搜索到的最优位置满足预定的最小适应阈值。搜索停止,输出最优位置与最优适应值。否则,返回 c) 继续搜索。

2.2.3 改进的知识空间群体自身演化操作

知识空间群体的自身演化和更新通过遗传算法种群演化机制来进行改进,采用选择、交叉和变异操作来进行自我演化。

1) 选择操作 记种群规模为 n 。在进行交叉操作之前,必须利用选择操作从当前种群中选择父代个体。选择个体进行交叉操作的选择操作算法流程如下:

a) 计算当前种群中所有个体的 $f(i)$, $i=1, \dots, n$ 。

b) 确定所有个体的选择概率 $P(C_i)$ 。由于比例选择方式中优秀个体的中选概率会远超劣质个体,从而导致搜索范围迅速变小,容易产生早熟现象,因此本文采用基于排序选择的方式来确定个体的中选概率。即将个体按照适应度大小进行降序排列,记排序后的个体为 $\{C_1, C_2, \dots, C_n\}$ 。个体的中选概率为

$$P(C_i) = \frac{1}{n} \left\{ \sigma^g - \frac{\sigma^g - \sigma^b}{n-1} (i-1) \right\} \quad (6)$$

其中: i 为个体的排序序号; σ^g 为最优个体 C_1 在选择操作后的期望值, $\sigma^g = n \times P(C_1)$; σ^b 为最差个体 C_n 在选择操作后的期望值, $\sigma^b = n \times P(C_n)$ 。一般要求 $1 \leq \sigma^g \leq 2$, $\sigma^b = 2 - \sigma^g$ 。当 $\sigma^g = 2$ 、 $\sigma^b = 0$ 时,最差个体在下一代生存的期望数量为 0,最优个体的中选概率远远大于其他个体,使算法容易过早收敛;当 $\sigma^g = \sigma^b = 1$ 时,选择方式变为均匀分布的随机选择。通常情况下,可选择 $\sigma^g = 1.1$ 。

c) 按照式(6)计算的个体概率,用赌轮选择保存较优个体。

2) 交叉操作 本文采用单点交叉的方式来进行操作。对于所选的两个个体,随机选择一个交叉点,然后相互交换该点之后的优先权值,如图4所示。

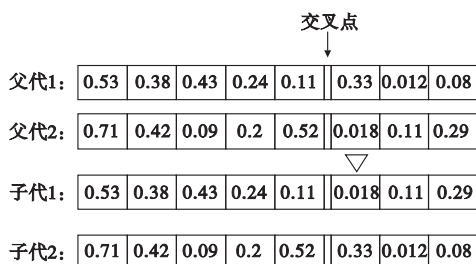


图4 交叉操作

3) 变异操作 变异算子以变异概率 P_m 对个体进行操作。根据变异概率 P_m 选中某一个体中的某个优先权值,然后在区间 $(0,1)$ 中按均匀分布随机取值替代原先的值。

2.2.4 算法时间复杂度分析

依据上述算法描述,算法复杂度分析如下:

a) 算法种群大小为 N ,迭代次数为 G_1 ,标准微粒群算法的时间复杂度为 $O(N \times G_1)$ 。

b) 文化算法种群为 $40\%N$,迭代次数为 G_2 ,忽略常数项的影响,文化算法的时间复杂度为 $O(N \times G_2)$ 。

c) 在初始化时,微粒群算法和文化算法共用初始种群,本文提出的 ICPSO 算法的时间复杂度为 $O(N \times G_1 \times G_2)$ 。

3 RCPSP 求解

3.1 编码设计

本文采用基于优先权值的编码方案,在 $(0,1)$ 范围内随机产生一优先权序列,使得每个活动都有一个唯一的优先权。在

RCPSP 模型中,一个粒子代表一个可行解。每个粒子作为 D 维空间的一个点,其 D 个元素代表所求解 RCPSP 的 D 项活动。因此, D 维参量 $C_i = \{C_{i1}, C_{i2}, \dots, C_{iD}\}$ 表示粒子 i 的 D 维位置,代表了 D 项活动的优先权值,如图5所示。

活动	1	2	3	4	5	...	$D-2$	$D-1$	D
粒子1: C_1	0.71	0.42	0.09	0.2	0.52	...	0.018	0.11	0.29
粒子1: C_2	0.69	0.28	0.56	0.6	0.31	...	0.356	0.08	0.1

x —— x 表示相对应活动的优先权值

图5 粒子优先权值

3.2 调度方案生成

利用串行调度方案作为解码规则。RCPSP 目标值是项目的最小化工期,它是根据生成的工作调度序列和资源约束计算的。具体求解过程如下:

a) 初始化资源列表,初始化调度序号 ID 等于 1,令 $k=1$ 。

b) 提取调度表里的工作序号 S_k ,将 S_k 赋予 ID,查找工作 ID 的所有紧前工作,选择其中最晚完工的一个工作的结束时间,将该时间作为工作 ID 的最早开工时间 ST_{ID} 。

c) 判断各项资源是否满足要求,若满足转 e),否则转 d)。

d) 工作的最早开工时间延期一天,即 $ST_{ID} = ST_{ID} + 1$,然后重新计算资源供应量,转到 c)。

e) 根据工作持续时间计算工作 ID 的完工时间 FT_{ID} ,采用优先抢占模式的资源分配方式,并将所用资源从资源列表中扣除,然后更新资源列表。

f) 如果 $k < J, k = k + 1$,转到 b); 否则得到工作 J 的最早开工时间,该时间就是目标值——项目工期。

4 算例求解及结果分析

本文采用的实例来自于文献 [3,14]。文献 [3] 采用网络计划技术,而文献 [4] 采用微粒群优化算法对该实例进行了资源受限最短工期的求解。按照简单编码规则,编码后的网络计划图如图6所示,项目含有 9 个实际活动,项目的资源数量限制为 12 个人力。项目信息明细如表1所示。

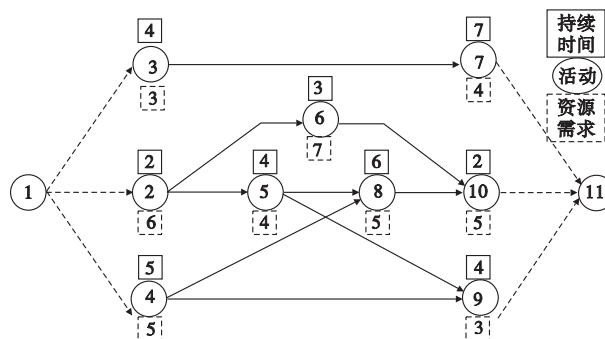


图6 项目单代号网络图

参数设置: 种群规模 50,迭代次数为 200 次,惯性因子 ω 为 1.2, C_1 、 C_2 为 2,知识解空间为种群规模的 40%,采用 Project VBA 编写程序,并运行 100 次。

以上算例中,本文求解概率最大的满意解(最短工期)是 16 d,比文献 [3,14] 求解的相应结果(最短工期 17 d)少了一天,得到的结果更优。这说明求解资源受限项目调度问题,文化微粒群算法在扩大搜索范围、避免早熟方面比上述求解算法有一定的优势。

表1 项目信息明细表

活动	资源/ 人力	工期/ d	紧前 活动	紧后 活动	活动	资源/ 人力	工期/ d	紧前 活动	紧后 活动
1	—	—	—	2,3,4	7	4	7	3	11
2	6	2	1	5,6	8	5	6	4,5	10
3	3	4	1	7	9	3	4	4,5	11
4	5	5	1	8,9	10	5	2	6,8	11
5	4	4	2	8,9	11	—	—	7,9,10	—
6	7	3	2	10					

在上述算例的求解中,不仅满意解(最短期)比相关文献得到了改进,而且还找到了更多的项目调度方案,体现了算法的全局搜索能力和种群的多样性,如表2所示。说明文化微粒群算法在求解资源受限项目调度问题上有较好的现实意义,在实际工程项目中,可以为决策者提供更多的决策方案 and 选择。

表2 最大概率解对应的调度方案(16 d)

活动	工期	优化方案1		优化方案2	
		开始时间	结束时间	开始时间	结束时间
1	0	虚工作	虚工作	虚工作	虚工作
2	2	1	2	1	2
3	4	3	6	1	4
4	5	1	5	3	7
5	4	3	6	3	6
6	3	7	9	7	9
7	7	10	16	10	16
8	6	7	12	8	13
9	4	10	13	10	13
10	2	13	14	14	15
11	0	虚工作	虚工作	虚工作	虚工作

程序运行100次,统计每次运算中产生的满意解(最短期)的种类及其对应的调度方案,同时统计每种满意解的出现次数。对于工期较短的项目来说,文化微粒群算法能以较大的概率(82%)达到满意解,与文献[4]的相关结果进行比较,如图7所示,可以说明文化微粒群在寻优能力上要比标准微粒群算法更加突出,可以使资源受限项目调度问题以较大的概率获得最佳满意解,在现实中可以大大减少求解相关问题时的成本和负担。

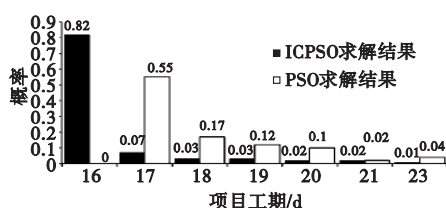


图7 运行100次的项目工期及概率

分别采用网络计划技术、标准微粒群算法、遗传算法和改进文化微粒群算法对上述实例进行求解。其中, $d_{\max}$ 、 $d_{\min}$ 和 d_{mean} 分别为算法所得解与最优解偏差的最大值、最小值和平均值, ω 为最优解占全部解的比例, d_{time} 是算法的平均计算时间。计算结果如表3所示。

表3 算法计算结果比较

算法	$d_{\min}$	$d_{\max}$	d_{mean}	$\omega/\%$	d_{time}
CPM [3]	0	3	2	60	30
GA [4]	1	6	2.3	55	6
PSO	0	4	1.9	75	9
ICPSO	0	1	0.3	82	11

四种算法中,ICPSO算法的精确度最高,能以较大的概率求得最优解;因为ICPSO算法需要对两个群体空间进行迭代演化,计算时间要稍长于GA和PSO。总体来说,ICPSO算法求解资源受限项目调度问题有较好的效果,算法求解效率和性能要优于GA和PSO。

5 结束语

针对资源受限的项目调度问题,本文提出了一种改进文化微粒群算法。算法的主群体空间和知识空间独立进化,形成双演化双促进机制,增强了算法的种群多样性,并用遗传算法的种群演化机制改进了知识空间的自我演化机制,增强了种群演化时的全局搜索能力,能较好地避免陷入局部寻优,增强寻优效率。通过求解相关文献中的算例,并与文献结果进行分析比较,证明了改进文化微粒群在求解资源受限项目调度问题上比其他算法有较突出的优势,可以获得更好的满意解,同时还可以获取更多的调度方案,为项目决策者提供更多的选择。在求解效率上,改进文化微粒群算法能以较大的概率获取满意解和调度方案,问题求解时的运行次数和时间可以大大减少,减轻项目调度时的负担和成本。如何运用改进文化微粒群算法解决更复杂的资源受限项目调度问题和相关参数的设定对求解结果的影响是下一步研究的问题和方向。

参考文献:

- [1] BLAZEWCZ J, LENSTRA J K, KAN A H G R. Scheduling subject to resource constraints: classification and complexity [J]. Discrete Applied Mathematics, 1983, 5(1): 11-24.
- [2] RODRIGUES S B, YAMASHITA D S. An exact algorithm for minimizing resource availability costs in project scheduling [J]. European Journal of Operational Research, 2010, 206(3): 562-568.
- [3] MENDES J J M, GONCALVES J F, RESENDE M G C. A random key based genetic algorithm for the resource constrained project scheduling problem [J]. Computers & Operations Research, 2009, 36(1): 92-109.
- [4] MONTOYA-TORRES J R, GUTIERREZ-FRANCO E, PIRACHICÁN-MAYORGA C. Project scheduling with limited resources using a genetic algorithm [J]. International Journal of Project Management, 2010, 28(6): 619-628.
- [5] SHUKLA S K, SON Y J, TIWARI M K. Fuzzy-based adaptive sample-sort simulated annealing for resource-constrained project scheduling [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2008, 36(9-10): 982-995.
- [6] HE Zheng-wen, WANG Neng-ming, JIA Tao, et al. Simulated annealing and tabu search for multi-mode project payment scheduling [J]. European Journal of Operational Research, 2009, 198(3): 688-696.
- [7] JARBOUI B, DAMAK N, SIARRY P, et al. A combinatorial particle swarm optimization for solving multi-mode resource-constrained project scheduling problems [J]. Applied Mathematics and Computation, 2008, 195(1): 299-308.
- [8] CHEN R M, WU Chun-lun, WANG C M, et al. Using novel particle swarm optimization scheme to solve resource-constrained scheduling problem in PSPLIB [J]. Expert Systems with Applications, 2010, 37(3): 1899-1910.
- [9] 寿涌毅, 傅奥. 多目标资源受限项目调度的多种群蚁群算法 [J]. 浙江大学学报: 工学版, 2010, 44(1): 51-55.
- [10] REYNOLDS R G, MICHALEWICZ Z, CAVARETTA M. using cultural algorithms for constraint handling in GENOCOP [C]. //Proc of the 4th Annual Conference on Evolutionary Programming. Cambridge: MIT Press, 1995: 298-305.
- [11] 杨利宏, 杨东. 基于遗传算法的资源约束型项目调度优化 [J]. 管理科学, 2008, 21(4): 60-68.
- [12] 王奕首, 艾景波. 文化粒子群优化算法 [J]. 大连理工大学学报, 2007, 47(4): 540-541.
- [13] 刘忠贤. 网络计划技术 [M]. 北京: 水利电力出版社, 1993.
- [14] 张凯, 赵国荣. 资源约束项目调度问题的粒子群优化算法求解 [J]. 海军航空工程学院学报, 2009, 24(5): 578-582.