

# 考虑资源闲置成本的多项目调度问题研究\*

倪霖<sup>a, b</sup>, 周林<sup>c</sup>, 景熠<sup>c</sup>

(重庆大学 a. 机械传动国家重点实验室; b. 现代物流重庆市重点实验室; c. 机械工程学院, 重庆 400030)

**摘要:** 针对资源受限多项目整体进度优化问题, 考虑资源分配过程中的资源闲置成本, 提出了一种集成工期延迟和资源闲置成本的多目标调度协同优化模型。通过该模型提高了资源的利用效率, 理论上实现了多项目在目标成本最小情况下的整体进度方案。综合利用模拟退火算法和遗传算法的优点, 设计退火遗传算法对该模型进行求解, 通过算例验证了算法和模型的有效性。

**关键词:** 多项目调度; 资源约束; 闲置成本; 模拟退火; 遗传算法

中图分类号: TP301 文献标志码: A 文章编号: 1001-3695(2013)01-0060-04

doi: 10.3969/j.issn.1001-3695.2013.01.014

## Multi-project scheduling problem with resource idle cost

NI Lin<sup>a, b</sup>, ZHOU Lin<sup>c</sup>, JING Yi<sup>c</sup>

(a. State Key Laboratory of Mechanical Transmission, b. Chongqing Key Laboratory of Logistics, c. College of Mechanical Engineering, Chongqing University, Chongqing 400030, China)

**Abstract:** By considering the idle resources cost in resources distribution process, this paper proposed a multi-objective coordination optimization model with the cost of multi-project duration delay and idle resources integrated synthetically, aiming at achieving integration scheduling optimization of resource-constrained multi-project. This model improved the efficiency of resource utilization, and achieved intergration scheduling in the case of minimal target cost in theory. Making comprehensive use of the advantage of simulated annealing algorithm and genetic algorithm, it designed an annealing genetic algorithm to solve the model. It carried a case study out to demonstrate the effectiveness of the proposed algorithm and model.

**Key words:** multi-project scheduling; resources constraint; idle cost; simulated annealing(SA); genetic algorithm(GA)

资源受限项目调度问题一直是项目管理领域的一个重点研究方向, 在实际的企业运营过程中, 90%的项目是以多项目并行的方式来运作的<sup>[1]</sup>。多项目之间相互依赖、交错运行必然会在有限资源竞争、工期冲突等多种联系。针对这一问题, 许多学者进行了深入研究。文献[2~5]以多项目总工期为目标, 分别运用迭代算法、关键链方法和遗传算法求解多项目调度问题; 文献[6]针对单活动单资源的多项目调度问题, 以多项目加权工期最短为目标, 运用模拟退火遗传算法来进行求解; 文献[7]以多项目延迟成本为目标, 运用关键链方法对多项目进行调度; 文献[8]在考虑资源转移时间的情形下, 提出一种考虑资源传递时间并以多项目总工期及各个项目工期的加权和最短为目标的多项目调度模型, 并运用遗传算法对该模型进行求解。这些研究大多是基于资源约束条件下, 以多项目总体工期最小或者项目总体延迟成本最小为目标来构造数学模型进行求解。较少文献涉及对冲突活动进行资源分配时所造成受限资源闲置成本的研究。

资源受限多项目调度的核心约束条件是资源的稀缺性。企业在运营过程中持有稀缺资源需投入大量维持成本, 在持有稀缺资源的同时不对稀缺资源进行任务分配, 会带来稀缺资源的闲置成本, 将直接增加企业运作总成本。在对资源受限条件下的多项目进行调度过程中, 单方面考虑项目延迟成本会造成

部分受限资源利用率较低, 产生不合理的资源闲置成本。为了实现企业多项目管理总成本最小化, 多项目调度问题是一个多目标优化问题, 需要对多项目延迟成本和资源闲置成本进行权衡优化。因此, 为了更好地解决多资源约束条件下多项目调度问题, 使多项目管理的理论研究更贴近企业实际运作, 本文构建了综合考虑受限资源闲置成本最小和项目延迟成本最小的多目标协同优化数学模型来实现多项目进度优化, 设计退火遗传算法对模型求解。

## 1 考虑资源闲置成本的多项目协同优化模型建模

### 1.1 问题描述

多项目是由一系列单项目构成的集合  $P = \{1, 2, \dots, m\}$ , 对每一个单项目  $i \in P$ , 包含活动  $j = \{N_{i-1} + 1, \dots, N_i\}$ , 其中  $N_{i-1} + 1$  和  $N_i$  为虚活动, 分别表示项目  $i$  的开始和结束, 0 和  $N + 1$  表示整个多项目的虚拟开始和虚拟结束活动<sup>[7]</sup>。

企业的管理目标是以最小的投入成本来获得最高经济收益, 因此多项目调度的目标是以最小的成本获得最优的调度方案。对多项目调度而言, 项目总体延迟成本和资源闲置成本是构成多项目管理总成本最主要的两个组成部分。因此, 多项目调度的目标是在满足活动紧前关系和资源约束的前提下, 使多项目总体延迟成本最小和资源闲置成本最小。

收稿日期: 2012-05-25; 修回日期: 2012-07-12 基金项目: 中央高校基本科研业务费项目(CDJZR10110035); 国家自然科学基金项目(11BGL006); 重庆市科技攻关计划重大项目(CSTC 2010AA2044 2012ggC0001); 中央高校基本科研业务费跨学科类重大项目(CDJZR12118801)

作者简介: 倪霖(1971-), 男, 副教授, 博士, 主要研究方向为项目管理、现代物流与供应链管理; 周林(1987-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为项目管理、现代物理管理(zhoulin1205@126.com); 景熠(1987-), 男, 博士研究生, 主要研究方向为生产运作管理。

1.2 模型假设

为了使模型有序合理化,提出以下假设条件:

假设 1 各个项目之间相互独立,在争取项目组合成本最小化且其资源满足的条件下,均可以最早利用资源,使资源利用率最大化。

假设 2 忽略资源在项目、活动之间转移的转移时间。

假设 3 忽略资源在项目之间、活动之间转移过程中产生的期间费用。

假设 4 各个活动在执行过程中不能间断。

1.3 符号及变量说明

符号说明:

- $P$  为多项目的数量
- $K$  为  $P$  个项目共享可更新资源的种类
- $R_k$  为第  $k$  种资源的总量
- $a_{ij}$  为第  $i$  个项目的第  $j$  个任务
- $d_{ij}$  为活动  $a_{ij}$  的工期
- $r_{ij}^k$  为活动  $a_{ij}$  对第  $k$  种资源的需求量
- $A_{ij}$  为活动  $a_{ij}$  紧后活动集合
- $T$  为多项目总工期
- $c_k$  为第  $k$  种资源的单位时间闲置成本
- $w_i$  为项目  $i$  单位时间延迟成本
- $T_i^D$  为项目的合同交付时间
- $S_{ij}$  为活动  $a_{ij}$  的开始时间
- $E_{ij}$  为活动  $a_{ij}$  的完成时间
- $T_i^F$  为项目  $i$  的实际完成时间
- $T$  为多项目调度总工期

变量描述:

- $t$  为活动发生的时间节点
- $A_t$  为  $t$  时刻纳入资源调度的活动集合
- $r_k(t)$  为  $t$  时刻第  $k$  种资源的消耗量
- $D_t$  为  $t$  时刻紧前活动已经开始的待调度活动集合
- $A_t$  为  $t$  时刻正在调度的活动集合
- $F_t$  为已完成调度的活动集合

1.4 目标函数

调度模型的数学描述如下:

a) 多项目总体延迟成本最小  $\min C_d$

$$\min C_d = \min \sum_{i=1}^P w_i (T_i^F - T_i^D) \tag{1}$$

为了使模型不失一般性,以各项目的关键路径活动时间为项目的合同交付时间  $T_i^D$ 。

b) 调度过程资源闲置成本最小  $\min C_i$

$$\min C_i = \min \sum_{t=1}^T \sum_{k=1}^K c_k (R_k - r_k(t)) \tag{2}$$

多项目在调度过程中,总体延迟成本最小和资源闲置成本最小在一定程度上相互影响。企业在实际的多项目管理过程中会根据对两者的重视程度设定不同的权重。据此,设立一种加权算法:

$$C = \alpha C_d + \beta C_i \tag{3}$$

其中:  $\alpha$ 、 $\beta$  分别为项目延迟成本和资源闲置成本的加权系数。

1.5 约束条件

1) 活动约束 活动的安排满足活动间的紧前关系,即任意一个任务没有完成之前不能开始它的任何后续任务。

$$E_{ij} - E_{ih} \geq d_{ij}, \forall a_{ij}, A_{ih} \in A_{ij} \tag{4}$$

2) 资源约束 在调度的任意时刻,并行执行的资源数量总和不能超过给定资源总量。

$$\sum_{j \in A(t)} r_j^k \leq R_k, \forall k \in K \{1, 2, \dots, K\}, t \geq 0 \tag{5}$$

2 退火遗传算法设计

由于多项目调度问题的复杂性,目前国内外的研究大多是采用启发式算法,然而启发式算法只能得到合理解,不能保证解的质量<sup>[9]</sup>。针对该问题,Xu 等人<sup>[9]</sup>指出,当项目的活动数量超过 1 000 时,遗传算法比传统优化算法的求解速度快得多,因此遗传算法特别适合于多资源约束项目调度问题的优化<sup>[10]</sup>。遗传算法是一种内在并行的全局优化方法,不需要目标函数具有连续性的假设,能够利用所设计的一系列进化算子迭代收敛到一个全局最优解。但是简单的遗传算法存在早熟、进化参数难以选择的问题,导致算法搜索空间萎缩,算法趋向寻找局部最优解<sup>[11]</sup>。而模拟退火(SA)算法由于其较强的局部搜索能力,正好能够克服遗传算法的缺点。因此,本文采用遗传算法与模拟退火算法相结合的算法。

2.1 算法思路

退火遗传算法(SAGA)将遗传算法良好的全局搜索能力、内在并行性与模拟退火算法强大的局部搜索能力相结合,克服了模拟退火算法和遗传算法单方面的局限性,能够较准确地获得全局最优解或近似最优解。本文算法采取两种算法互嵌的方式来实现,其步骤为: a) 使用 GA 进行若干代数进化,获得一个最优解; b) 为 SA 设置一个较高的初始温度,将步骤 a) 产生的最优解作为初始解,随着温度的下降,结合概率的突跳特性,以概率的方式随机在解空间内随机寻找目标函数的最优解; c) 将 SA 得到的解作为优良个体种子注入到 GA 的进化种群中,再进行进化。依次执行该步骤,直到算法满足终止条件。

2.2 编码设计

根据多项目调度问题的特点,对多项目采用优先级编码:染色体编码由  $P$  个基因构成, $P$  为项目个数,每个基因位置表示一个活动,用  $p_{ij}$  表示基因位置, $T_{ij}$  表示分配给活动  $n_{ij}$  的优先级, $T_{ij} \in [1, n]$  间的唯一整数( $n$  为  $P$  个项目所有活动的总数)。

2.3 解码设计

设置调度决策集  $D_t$ 、执行集  $A_t$  和完成集  $F_t$ 。解码时按照生成的项目活动优先级从  $D_t$  中选择一个活动,将其纳入  $A_t$ ,在满足其活动时间和资源约束的前提下,按照最早的逻辑关系确定其进度,进度安排后将其移入  $F_t$ ,依次进行,当  $T_{ij} = n$  时,当前整体调度完成。记录调度完成集内活动  $p_{ij}$  的最早完工时间  $EF_{ij}$  和最晚完工时间  $LF_{ij}$ 、各项目首活动的最早开始时间  $ES_{i1}$  和最晚开始时间  $LS_{i1}$ 。定义解码后得到的是关于多项目调度的一个完整解集  $I_j^t$ 。

2.4 适应度函数

适应度是评价由染色体解码生成的调度方案优劣的标准,同时在选择算子时也需要利用个体的适应度来进行优胜劣汰的进化。本文采用启发式规则的解码,保证了各个调度方案的有效性,在进行个体适应度评价时无须引入罚函数,算法的适应度函数为

$$f(c) = \frac{1}{F(c)} \tag{6}$$

适应度函数的值越大,调度结果越优。式中  $F(c)$  为解码后个体的目标函数式(3)的值。

2.5 进化策略

1) 算子选择 由于退火遗传算法具备模拟退火算法较强

的局部搜索能力,因此,为了保证子代具有优秀的基因,在每一次进化中,从每一代种群中随机选择一定数目的精英解组成临时的最优集合,不断更新和保存更好的解。在进行选择时,选择前 20% 作为精英解进入最优集合,用来替代种群适应度函数排在最后的 20%。

2) 算子交叉和变异 根据适应度及进化代数来调节个体的交叉率、变异率。AGA 自适应交叉概率、变异率按式 (7) (8) 进行调节。

$$P_c = \begin{cases} P_{c1} - \frac{(P_{c1} - P_{c2})(f' - f_{avg})}{f_{max} - f_{avg}} & f' \geq f_{avg} \\ P_{c1} & f' < f_{avg} \end{cases} \quad (7)$$

$$P_m = \begin{cases} P_{m1} - \frac{(P_{m1} - P_{m2})(f_{max} - f)}{f_{max} - f_{avg}} & f' \geq f_{avg} \\ P_{m1} & f' < f_{avg} \end{cases} \quad (8)$$

其中:  $P_c$  为交叉概率,一般取  $P_{c1} = 0.9, P_{c2} = 0.6$ ;  $f_{avg}$  为当前种群的平均适应度值;  $f_{max}$  为当前种群的最大适应度值;  $P_m$  为变异概率,一般取  $P_{m1} = 0.1, P_{m2} = 0.001$ 。

### 2.6 退火操作

SA 通过模拟热力学中经典粒子系统降温过程来获得调度问题局部最优解。其基本原理<sup>[12]</sup>如下:

a) 以 SA 计算产生的最优集合中的解为初始解,给定初始温度  $T_0$ ,计算该点的目标函数值  $F(I_i)$ 。

b) 随机产生扰动  $\Delta I_i$ ,得到新点  $I_i' = I_i + \Delta I_i$ ,计算新点目标函数值  $F(I_i')$  及函数值之差  $\Delta F = F(I_i') - F(I_i)$ 。

c) 若  $\Delta F \leq 0$ ,则接受新点作为下一次模拟退火的初始点;若  $\Delta F > 0$ ,则计算新点的接受概率  $p(\Delta F) = \exp\left[-\frac{\Delta F}{T}\right]$ ,产生  $[0, 1]$  内均匀分布的伪随机数  $r$ 。如果  $p(\Delta F) \geq r$ ,则接受新点作为下一次模拟退火的初始点;否则放弃新点,仍取原来的点作为下一次模拟退火的初始点。

表 1 多项目基础参数

项目 编号	活动 编号	紧后 工作	工期 (d)	所需资源		
				$R_1$	$R_2$	$R_3$
1	0	{1, 6, 12, 17, 23}	0	0	0	0
	1	{2, 3}	0	0	0	0
	2	{4, 5}	3	3	2	1
	3	{4}	5	2	4	2
	4	{28}	6	3	1	2
	5	{28}	2	4	3	1
	6	{7, 8}	0	0	0	0
	7	{9}	5	3	1	1
2	8	{9}	5	3	2	3
	9	{10, 11}	5	2	1	3
	10	{28}	3	1	1	1
	11	{28}	2	3	2	1
3	12	{13}	0	0	0	0
	13	{14, 15}	2	2	2	2
	14	{16}	6	3	2	2
	15	{16}	3	3	2	1
	16	{28}	3	3	3	2
	17	{18, 19}	0	0	0	0
	18	{20, 21}	2	2	1	2
	19	{21, 22}	6	2	3	2
4	20	{28}	4	3	1	2
	21	{28}	2	3	1	1
	22	{28}	3	3	2	1
	23	{24, 25, 26}	0	0	0	0
5	24	{27}	1	2	2	1
	25	{27}	2	2	3	2
	26	{27}	6	1	1	3
	27	{28}	3	3	2	1
	28	∅	0	0	0	0

## 3 算例分析

### 3.1 算例介绍

为了便于证明模型和算法的有效性,实验算例采用文献 [5, 7] 的例子来对本文模型及方法进行验证。该例子为一 IT 行业的多项目综合调度方案,共包括五个项目,每个项目的活动均需要三种资源,资源总量为  $(R_1, R_2, R_3) = (6, 6, 6)$ 。多项目基础参数根据网络图列出,如表 1 所示。文献 [5] 根据例子中的项目优先关系给出该项目的单位时间延迟损失比例  $(w_1: w_2: w_3: w_4: w_5) = (9: 9: 1: 1: 1)$  根据文献 [5] 给出的损失比例给出本文各项目的单位时间延迟损失成本  $(w_1, w_2, w_3, w_4, w_5) = (90, 90, 10, 10, 10)$ 。各资源的单位时间闲置成本分别为  $(c_{R1}, c_{R2}, c_{R3}) = (1.5, 1, 1)$ 。

### 3.2 算例验证及分析

运用本文算法分别求得在不考虑资源闲置成本 ( $\alpha = 1, \beta = 0$ ) 和考虑资源闲置成本两种情况下 ( $\alpha = 1, \beta = 1$ ) 的调度方案参数分别如表 2 所示。

表 2 本文算法在两种情况下的调度参数

项目 编号	$T_i^{epm}$	结果参数					
		$\alpha = 1, \beta = 0$			$\alpha = 1, \beta = 1$		
		$ST_i$	$FT_i$	$T_i$	$ST_i$	$FT_i$	$T_i$
1	11	6	23	18	6	23	18
2	13	0	13	13	0	13	13
3	11	11	35	25	24	37	14
4	9	24	40	17	11	28	18
5	9	13	23	11	13	35	23

根据表 2 分别绘制两种情况下的多项目综合调度甘特图,如图 1、2 所示。

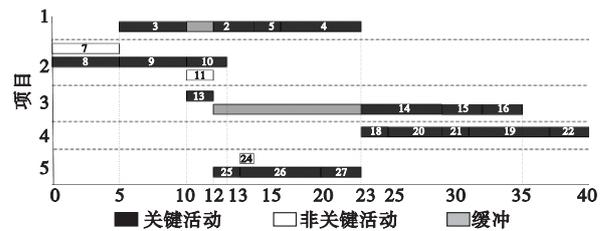


图 1 多项目综合调度甘特图 ( $\alpha=1, \beta=0$ )

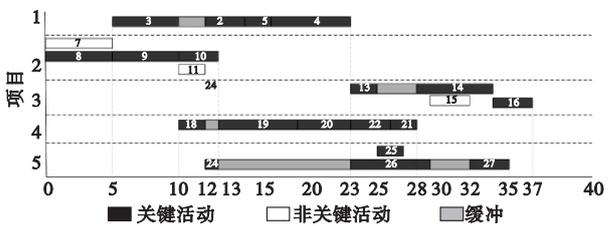


图 2 多项目综合调度甘特图 ( $\alpha=1, \beta=1$ )

根据多项目调度结果可知,多项目的调度过程是项目间并行、活动间交叉进行的,体现了多项目调度过程中综合利用受限资源、实现整体最优的思想。项目调度结果综合验证及分析如下:

a) 运用本文算法和传统的遗传算法<sup>[7]</sup>以及启发式算法<sup>[5]</sup>对多项目调度的整体周期进行比较。

针对同一多项目调度问题,运用本文算法求得在不考虑资源闲置成本的多项目整体周期为 40 天,考虑资源闲置成本的多项目整体周期为 37 天,均比文献 [5] 的工期 42 天和文献 [7] 的 52 天短,证明了本文提出算法的有效性。

b) 将本文算法与传统算法求解结果关于多项目调度成本进行比较。

根据本文假设的单位时间项目延迟成本和单位时间受限资源的闲置成本,计算本文和文献[5]的项目延迟和资源闲置总成本如表 3 所示。

表 3 不同算法调度情况下总成本对比

调度类型	项目延迟成本	资源闲置成本	总成本
传统算法	1 830	297.6	2 127.6
本文算法( $\alpha=1 \beta=0$ )	1 770	262.3	2 032.3
本文算法( $\alpha=1 \beta=1$ )	1 790	195.5	1 985.5

通过比较表 3 中三种调度类型下的三种成本可知,运用本文模型和算法求得的总成本最小,表明本文提出模型在充分利用资源上取得项目整体最优解的有效性。

c) 运用本文算法对不考虑资源转移成本和考虑资源转移成本的两种调度结果进行比较。

根据计算结果,资源  $R_1$ 、 $R_2$ 、 $R_3$  利用情况分别如图 3~5 所示(图中(a)为不考虑资源闲置成本的资源利用水平,(b)为考虑资源转移成本情况下资源利用水平)。

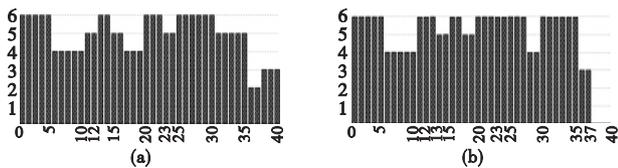


图3 资源 $R_1$ 利用水平

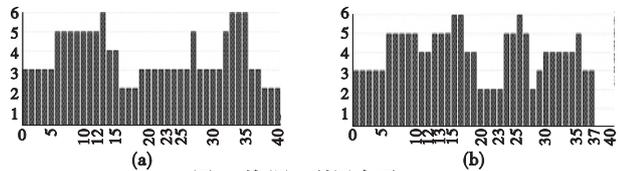


图4 资源 $R_2$ 利用水平

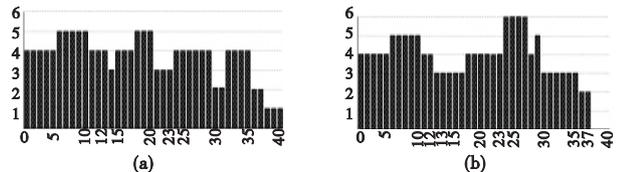


图5 资源 $R_3$ 利用水平

根据图 3~5,三种资源在两类调度类型下的平均资源利用率如表 4 所示。

表 4 两种调度类型下平均资源利用率对比

调度类型	资源类别		
	$R_1$	$R_2$	$R_3$
不考虑资源转移成本/%	81.67	60.83	61.25
考虑资源转移成本/%	89.19	65.77	66.22

a) 根据表 2、3 可知,运用本文模型和算法求得在不考虑资源闲置成本下的项目整体工期为 40 天,大于考虑资源闲置成本情况下的整体工期 37 天,但前者的项目总体延迟成本为 1 770,小于后者的 1 790。由此可知,多项目整体工期最短并不意味着项目整体进度最优。同时,由两者的总成本可知,考虑资源转移成本情况下的多项目调度总成本要小于不考虑资源闲置成本下的多项目调度成本,也表明多项目总体延迟成本最小并不意味着多项目整体调度成本最小。

b) 分析图 1、2 可知两者的进度计划存在很大差异,尤其是项目 3、4、5 的进度计划发生了较大改变。一方面表明资源转移成本对多项目调度结果产生较大影响;另一方面表明多项目调度保障延迟成本大的项目优先完成,符合多项目调度要求。

c) 分析表 4 可知,考虑资源转移成本下的三种资源平均利

用率均大于不考虑资源约束下的平均利用率,体现了多项目调度充分利用项目资源的思想。同时由表 4 可知,两种情形下的各种资源的平均利用率均有  $y_{R_1} > y_{R_2} > y_{R_3}$ ,结合单位资源的闲置成本  $c_{R_1} > c_{R_3} > c_{R_2}$  可知,资源的单位时间闲置成本越高,资源的利用率就越高,符合资源受限多项目调度问题中资源利用最大化的思想。

### 4 结束语

针对当前多项目调度模型缺少对受限资源闲置成本考虑的这一问题,提出了一种综合考虑项目延迟成本与资源闲置成本最小的多目标协同优化模型。针对该模型,综合考虑模拟退火算法和遗传算法的优缺点,设计了退火遗传算法来对模型进行求解,并利用算例验证了模型和算法的有效性。模型求解结果表明,考虑项目资源闲置成本会对多项目调度结果产生较大影响,综合考虑项目延迟成本和资源闲置成本有利于提高受限资源的利用效率,实现多项目调度的整体最优化和多项目管理成本的最小化。同时,该模型能够通过对项目延迟成本和资源闲置成本系数的变更来实现企业多项目管理过程中工期、成本、资源之间的权衡优化。本文是基于忽略资源在项目、活动之间转移的转移时间,忽略资源在项目之间、活动之间转移过程中产生的期间费用为假设条件的前提下展开的。将资源闲置成本与资源转移时间和资源转移期间费用结合起来求解多项目调度问题将是今后进一步研究的方向。

### 参考文献:

- [1] PAYNE J H. Management of multiple simultaneous projects: a state-of-the-art review [J]. International Journal of Project Management, 1995, 13(3): 163-168.
- [2] 寿涌毅. 资源约束下多项目调度的迭代算法 [J]. 浙江大学学报, 2004, 38(8): 1095-1099.
- [3] 杨雪松, 胡昊. 基于关键链方法的多项目管理 [J]. 工业工程与管理, 2005, 10(2): 48-52.
- [4] 郭庆军, 李慧民, 袁云秀. 多项目关键链进度优化算法分析 [J]. 工业工程与管理, 2008, 13(6): 41-45, 50.
- [5] 马国丰, 尤建新. 关键链项目群进度管理的定量分析 [J]. 系统工程理论与实践, 2007, 27(9): 54-60.
- [6] 谭伟, 赵蔓, 李向. 基于模拟退火遗传算法的多项目调度问题研究 [J]. 微计算机信息, 2009, 25(9): 220-222.
- [7] 李俊亭, 王润孝, 杨云涛. 关键链多项目整体进度优化 [J]. 计算机集成制造系统, 2011, 17(8): 1772-1779.
- [8] 宗砚, 刘琼, 张超勇, 等. 考虑资源传递时间的多项目调度问题 [J]. 计算机集成制造系统, 2011, 17(9): 1921-1928.
- [9] XU Ning-xiong, McKEE S A, NOZIK L K et al. Augmenting priority rule heuristics with justification and rollout to solve the resource-constrained project scheduling problem [J]. Computers and Operations Research, 2008, 35(10): 3284-3297.
- [10] 李险峰, 董绍华. 改善收敛早熟的混合遗传算法 [J]. 计算机系统应用, 2011, 20(10): 224-227.
- [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] 袁立鹏, 崔淑梅, 卢红影, 等. 基于模拟退火遗传算法的电液伺服马达超低速性能 [J]. 上海交通大学学报, 2010, 44(12): 1741-1746.
- [13] KRÜGER D, SCHOLL A. A heuristic solution framework for the resource constrained (multi-) project scheduling problem with sequence-dependent transfer times [J]. European Journal of Operational Research, 2009, 197(2): 492-508.