

文章编号: 1000-6788(2009)03-0132-10

## 现金流平衡约束下的 Max-npv 项目调度

何正文, 刘人境, 胡信布, 徐 渝

(西安交通大学 管理学院, 西安 710049)

**摘 要** 首先对现金流平衡约束下的 Max-npv 项目调度问题进行界定, 分析其不同于一般资源约束型 Max-npv 项目调度问题的基本特征, 提炼研究的假设条件; 随后构建问题的非线性整数规划优化模型, 借助现金流平衡约束将项目费用、支付与融资联系起来, 实现现金流出与流入的平衡; 鉴于问题的特点及模型的组合属性, 设计专门的模拟退火启发式算法对其进行求解; 在随机生成的 29160 个标准算例上对算法进行测试, 结果满意: 算法可以在平均 8.90 秒求解所有算例, 满意解与其上界的平均相对偏差为 9.79%, 平均变异系数为 0.0024; 最后通过一个算例对研究成果进行说明, 分析影响项目收益的各种参数, 得到如下结论: 承包商项目净现值与融资费用率和质量保证金比例负线性相关, 与支付比例和预付款比例正线性相关, 与质量保证期和折现率负指数相关。

**关键词** 现金流平衡; Max-npv 项目调度; 优化模型; 模拟退火启发式算法

**中图分类号** C935; F224.33

**文献标志码** A

## Max-npv project scheduling problems with cash flow balance constraints

HE Zheng-wen, LIU Ren-jing, HU Xin-bu, XU Yu

(School of Management, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

**Abstract** The Max-npv project scheduling problem with cash flow balance constraints is identified at first. Its characteristics different from the classical resource-constrained Max-npv project scheduling problem are analyzed and the basic assumptions of the study are summed up. Then a nonlinear integer-programming model of the problem is constructed. Through the cash flow balance constraints in the model, activity expenses, progress payments, and financing cost are connected together and cash outflows and cash inflows in the project may be kept balanced. Because of the combinatorial attribute owned by the model, a simulated annealing heuristic is developed. The heuristic is tested on a data set consisting of 29160 standard instances generated by ProGen. The outcome shows that the heuristic can solve all instances with an average time of 8.90 seconds, the mean relative deviation and variance parameter of the solutions are 9.79% and 0.0024 respectively. Ultimately, an illustrative example is solved by the heuristic and the influences of the key parameters on the project NPV are analyzed. Based on the results obtained, the following conclusions can be drawn: the project NPV has a negative linear correlation with the financing cost rate and the deposit rate of quality security, a positive linear correlation with the payment proportion and the advance payment proportion, and a negative exponential correlation with the quality security period and the discount rate of cash flows.

**Keywords** cash flow balance; Max-npv project scheduling; optimization model; simulated annealing heuristic

**收稿日期:** 2006-09-30

**资助项目:** 国家自然科学基金 (70673077, 70871097); 国家社会科学基金 (07XJL002); 陕西省软科学研究项目 (2007KR56)

**作者简介:** 何正文 (1967-), 男, 汉, 山西运城人, 副教授, 博士, 研究方向: 项目管理及优化, Email:zhengwenhe@mail.xjtu.edu.cn.

## 1 引言

Max-npv 项目调度问题即以净现值 NPV(Net present value) 最大化作为活动进度安排目标的项目调度问题<sup>[1]</sup>. 在经典的 Max-npv 项目调度问题研究中, 资金通常被视为一种不可更新资源 (Nonrenewable resource), 其可用量定义在整个项目工期上, 即只要资金使用总量不超过给定预算, 其在各个时刻的使用量不受限制, 也不需考虑现金流的平衡问题<sup>[2-3]</sup>.

然而在实际项目的实施过程中, 保持现金流出和流入的平衡对项目的成功至关重要: 一方面, 承包商为了完成项目活动, 需要为劳动力、设备以及原材料等支出费用; 另一方面, 当全部或部分项目活动完成时, 又可以从业主那里获得资金补偿. 在这一过程中, 一旦资金使用出现缺口, 就需要从项目组织外部进行融资以确保项目的顺利进行. 事实上, 通过内部计划调度和外部融资以保证资金的充足供应, 并力图实现项目收益的最大化, 是现实中许多项目管理者的核心工作内容之一, 因而它必然成为一个具有较高实用价值的研究问题. 然而迄今为止, 据作者所知, 尚未有学者对该问题进行过深入的研究<sup>[1,4-6]</sup>.

本文对现金流平衡约束下的 Max-npv 项目调度问题进行研究. 作者首先对问题进行界定; 其次构建其优化模型, 设计模拟退火启发式算法并在随机生成的标准算例上对算法进行测试, 通过一个算例对研究成果进行说明; 最后总结全文并指出进一步研究的方向.

## 2 问题界定

对于某一具有  $N$  个活动、 $M$  个事件的给定项目, 活动  $n(n=1, 2, \dots, N)$  的工期和费用分别为  $d_n$  和  $c_n$ , 实现事件  $m(m=1, 2, \dots, M)$  所需费用为  $e_m$ :

$$e_m = \zeta \cdot \sum_{n \in S_{m1}} c_n + (1 - \zeta) \cdot \sum_{n \in S_{m2}} c_n$$

其中,  $S_{m1}$  为从事件  $m$  开始活动的集合,  $S_{m2}$  为到事件  $m$  结束活动的集合,  $\zeta(0 \leq \zeta \leq 1)$  为活动费用在其开始和结束事件之间的分配比例. 活动  $n$  的挣值为  $w_n$ , 事件  $m$  的挣值为  $v_m = \sum_{n \in S_{m2}} w_n$ . 项目截止日期为  $D$ , 合同总价格为  $U$ . 在项目开始时刻, 业主对承包支付  $\gamma U$  的预付款 ( $\gamma$  为预付款比例, 该笔预付款在随后的支付中按比例扣除); 在项目实施过程中, 业主在给定的里程碑事件  $k \in S_P$  ( $S_P$  为支付事件集合, 项目终事件  $M$  必须位于该集合中) 上对承包商进行支付, 支付量  $p_k$  等于从上次支付到事件  $k$  发生这段时间中, 承包商累计完成活动的挣值与支付比例  $\theta$  的乘积, 但需按比例扣留预付款和质量保证金 (质量保证金的扣留比例为  $\eta$ ); 在项目完成时, 除扣留  $\eta U$  的质量保证金外, 业主向承包商支付其余的全部合同价款; 质量保证期为  $Q$ , 质量保证期满后业主再将质量保证金支付给承包商. 在项目实施过程中承包商必须保持现金流的平衡, 如果负现金流超过正现金流, 则必须从项目组织外部进行融资以弥补资金使用上的缺口, 单位资金的融资成本 (即融资费用率) 为  $\beta$ ; 折现率为  $\alpha$ ; 项目完成时间不能超过给定的截止日期  $D$ , 目标是最大化承包商以净现值表示的项目收益.

与一般资源约束型 Max-npv 项目调度问题<sup>[1]</sup> 相比, 此处所界定的现金流平衡约束下的 Max-npv 项目调度问题有以下三个明显的不同之处: 首先, 资金由不可更新资源 (Nonrenewable resource) 变为可更新资源 (Renewable resource), 其可用量在项目实施过程中是变化的; 其次, 作为可更新资源的资金使用量与项目支付相联系, 且在给定的支付结构 (Payment structure) 下与项目活动进度安排密切相关; 最后, 承包商可以按给定的融资费用率从项目组织外部进行融资以弥补资金使用上的缺口. 此外, 支付在给定的里程碑事件上进行以及支付量基于承包商的累计挣值而定, 也使得本文所研究的问题更接近于项目管理的现实情况.

根据上述对问题的界定及分析, 本文研究的假设条件可以提炼如下:

- 1) 项目网络为确定型无环路网络, 项目活动的工期、费用及挣值是确定的、已知的.
- 2) 承包商在项目开始时可获得一定预付款, 但预付款须在随后支付中按比例扣除.
- 3) 每次支付时业主扣留一定比例的质量保证金, 在质量保证期满后另行支付.
- 4) 承包商可在事先约定的支付事件 (项目终事件必须为支付事件) 上获得支付, 支付量基于承包商的累计挣值按比例计算, 项目结束时必须结清除质量保证金外的所有合同款项.

- 5) 承包商可按一定费率从外部进行融资, 在项目进行过程中其现金流须保持平衡。  
6) 项目必须在规定的截止日期之前完成, 承包商的目标是追求项目净现值的最大化。

### 3 优化模型

采用基于事件 (Event-based) 的研究方法<sup>[7]</sup> 构建该问题的优化模型, 即项目网络采用 AoA(Activity-on-Arc) 方式表述, 现金流与事件相联系. 令  $x_{mt}$  为事件  $m$  在时刻  $t(t=0, 1, \dots, D)$  发生的 0-1 变量, 现金流平衡约束下的 Max-npv 项目调度问题的优化模型可以表述如下:

$$\max NPV = \gamma \cdot U + \sum_{k \in S_P} \left\{ p_k \sum_{t=E_k}^{L_k} [\exp(-\alpha t) x_{kt}] \right\} + \eta U \exp \left\{ -\alpha \left[ \sum_{t=E_M}^{L_M} (t x_{Mt}) + Q \right] \right\} - \sum_{m=1}^M \left\{ e_m \sum_{t=E_m}^{L_m} [\exp(-\alpha t) x_{mt}] \right\} - \sum_{T=0}^D \beta f_T \exp(-\alpha T) \quad (1)$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{t=E_m}^{L_m} x_{mt} = 1, \quad m = 1, 2, \dots, M \quad (2)$$

$$\sum_{t=E_{b_n}}^{L_{b_n}} (x_{g_{nt}} \cdot t) + d_n \leq \sum_{t=E_{o_n}}^{L_{o_n}} (x_{h_{nt}} \cdot t), \quad n = 1, 2, \dots, N \quad (3)$$

$$\sum_{t=E_M}^{L_M} (x_{Mt} \cdot t) \leq D \quad (4)$$

$$f_T = \begin{cases} -r_T, & r_T < 0 \\ 0, & r_T \geq 0 \end{cases} \quad T = 0, 1, \dots, D \quad (5)$$

$$x_{mt} \in \{0, 1\}, \quad m = 1, 2, \dots, M; t = 0, 1, \dots, D \quad (6)$$

其中,  $NPV$  为承包商现金流的净现值; 事件  $b_n$  和  $o_n$  分别为活动  $n$  的开始和结束事件;  $[E_k, L_k]$ 、 $[E_m, L_m]$ 、 $[E_{b_n}, L_{b_n}]$ 、 $[E_{o_n}, L_{o_n}]$  和  $[E_M, L_M]$  分别为事件  $k$ 、 $m$ 、 $b_n$ 、 $o_n$  和  $M$  的由网络优先关系和项目截止日期决定的时间窗;  $f_T$  为承包商在  $T$  时刻的融资量,  $r_T$  表示截至  $T$  时刻所获得的累计支付扣除累计费用之后的余额, 即

$$r_T = \gamma \cdot U + \sum_{k \in S_P} \left( p_k \sum_{t=0}^T x_{kt} \right) - \sum_{m=1}^M \left( e_m \sum_{t=0}^T x_{mt} \right), \quad T = 0, 1, \dots, D$$

在事件  $k$  上的支付量  $p_k$  由如下三个附加约束条件确定:

$$\sum_{k \in S_P} \left( p_k \sum_{t=0}^T x_{kt} \right) = (\theta - \gamma - \eta) \cdot \sum_{m=1}^M \left( v_m \sum_{t=0}^T x_{mt} \right), \quad T = 0, 1, \dots, D \quad (7)$$

$$\sum_{k \in S_P} p_k + (\gamma + \eta) \cdot U = U \quad (8)$$

$$p_k \geq 0, \quad k \in S_P \quad (9)$$

上述优化模型为非线性整数规划模型. 目标要求为最大化项目的净现值, 其中  $NPV$  中的第 1 项为预付款, 第 2 项为各次支付的现值, 第 3 项为质量保证金的现值, 第 4 项为各事件费用的现值, 第 5 项为融资费用的现值; 约束条件式 (2) 确保为每个事件在其时间窗内安排一个发生时间; 式 (3) 为优先关系约束, 保证每个活动开始事件的发生时间与该活动工期之和不超过其结束事件的发生时间; 式 (4) 使得项目终事件  $M$  的发生时间 (亦即整个项目的完成时间) 不超过项目截止日期; 式 (5) 为现金流平衡约束 (如果  $r_T < 0$ , 表示承包商截至  $T$  时刻累计获得的支付不足以弥补累计发生的费用, 需要从项目组织外部筹集总量为  $r_T$  的资金以确保项目的顺利实施; 反之, 如果  $r_T \geq 0$ , 则表示截至  $T$  时刻累计获得的支付足以弥补累计发生的费用, 因此不需要从外部进行融资); 式 (6) 为决策变量的定义域约束; 式 (7) 确保至  $T$  时刻各次支付量的总和, 等于承包商的累计挣值与支付比例  $\theta$  扣除预付款比例  $\gamma$  和质量保证金比例  $\eta$  后的乘积; 式 (8) 使得各次支付量的总和加上预付款和质量保证金后等于项目合同的总价款; 式 (9) 保证每次的支付量均为非负值。

## 4 模拟退火启发式算法

由于本文所构建优化模型具有组合属性, 容易推知对于现实规模的此类问题, 要获得其最优解从计算时间上来说代价是巨大的, 甚至是不可能的<sup>[8]</sup>. 因此从实用角度出发, 本文设计了一种模拟退火启发式算法.

作者之所以选择模拟退火作为该问题的求解方法, 主要基于以下两方面考虑: 首先模拟退火已被许多学者证明是求解具有高度组合属性的项目调度问题的一种有效方法. 在此方面, Sampson 和 Weiss<sup>[9]</sup> 用模拟退火技术成功求解了具有最大最小时滞优先关系的资源约束型项目调度问题; Lee 和 Kim<sup>[10]</sup> 将问题扩展到多重资源约束情形下, 并比较了模拟退火、禁忌搜索及遗传算法这三种启发式方法各自的优缺点; Boctor<sup>[11]</sup> 研究了求解资源约束型项目调度问题模拟退火算法的适应和调整问题, 以提高此种启发式算法的效率; Cho 和 Kim<sup>[12]</sup> 将项目进度安排定义为一种优先权列表, 从而提高了模拟退火启发式算法的柔性; Bouleimen 和 Lecocq<sup>[13]</sup> 将模拟退火启发式算法的应用扩展到活动具有多种执行模式情形下; Shtub<sup>[14]</sup> 等利用该种启发式方法解决了海军巡逻快艇研发项目进度安排问题; Etgar<sup>[15]</sup> 等假定活动的现金流大小依赖于其完成时间, 用模拟退火启发式算法解决了净现值最大化项目调度问题; Dayanand 和 Padman<sup>[16]</sup> 针对单模式项目支付进度安排问题, 设计了一种双阶段模拟退火启发式算法; Mika 等<sup>[17]</sup> 在多种支付规则的正现金流假设条件下, 比较了模拟退火和禁忌搜索求解多模式资源约束型 Max-npv 问题时的长处和不足; He 和 Xu<sup>[18]</sup> 则用模拟退火成功求解了具有奖励惩罚结构的多模式项目支付进度问题. 其次, 本文所研究的现金流平衡约束型 Max-npv 项目调度问题具有单一的目标函数且约束条件较多, 相比于遗传算法和禁忌搜索等其他启发式算法来说, 采用模拟退火技术求解该问题具有如下优点: 初始可行解易于确定、无需进行可行解编码转换、目标函数值计算简单、生成可行邻点的操作简捷易行. 这些优点使得算法便于编程及实现.

令  $\Gamma = \{t : x_{mt} = 1, m = 1, 2, \dots, M\}$  为项目事件的发生时间集合. 基于模拟退火搜索技术的基本原理, 作者设计了问题求解的启发式算法, 其实施步骤如下:

**Step0** 输入初始温度  $TEMP_S$ 、冷却速率  $\mu(0 < \mu < 1)$ 、终止温度  $TEMP_E(TEMP_E > 0)$ 、在每一温度下的迭代步数  $Num_0$ 、初始进度  $\Gamma_0$  及初始项目收益  $NPV_0$ .

**Step1** 当前温度设定:  $TEMP = TEMP_S$ .

**Step2** 当前迭代步数设定:  $Num = 0$ .

**Step3** 在  $TEMP$  下由  $\Gamma_0$  生成一个邻点  $\Gamma_1$ , 计算在邻点下的项目收益  $NPV_1$ .

**Step4** 若  $\Delta NPV = NPV_1 - NPV_0 > 0$ , 则接受邻点成为当前解:  $\Gamma_0 = \Gamma_1, NPV_0 = NPV_1$ . 否则, 生成一个在  $[0, 1]$  之间均匀分布的随机数  $R$ , 若  $R \leq e^{(\Delta NPV / TEMP)}$ , 则接受邻点成为当前解:  $\Gamma_0 = \Gamma_1, NPV_0 = NPV_1$ ; 反之, 拒绝邻点.

**Step5**  $Num = Num + 1$ . 若  $Num \leq Num_0$ , 转 Step3; 否则, 转 Step6.

**Step6** 按冷却速率将温度下降一定的比例:  $TEMP = TEMP \cdot \mu$ . 若  $TEMP > TEMP_E$ , 转 Step2; 否则, 转 Step7.

**Step7** 输出搜索到的结果:  $\Gamma^* = \Gamma_0, NPV^* = NPV_0$ , 搜索结束.

初始进度  $\Gamma_0$  按照如下步骤确定:

- 1) 基于截止日期  $D$  和项目网络结构, 通过关键路径法 CPM(Critical path method) 计算每个事件  $m(m = 1, 2, \dots, M)$  的时间窗  $[E_m, L_m]$ ;
- 2) 在其时间窗  $[E_m, L_m]$  内为事件  $m(m = 1, 2, \dots, M)$  安排一个发生时间;
- 3) 检查各事件发生时间是否满足优先关系约束 (3), 如果不满足, 则顺次调整各事件的发生时间, 直至优先关系约束得到满足为止.

为了简便起见, 也可以直接选用每个事件的最早发生时间 (或最晚发生时间) 来形成初始进度  $\Gamma_0$ . 在给定的进度  $\Gamma$  下计算项目收益  $NPV$  的步骤如下:

- 1) 根据优化模型中的约束条件式 (7) 计算在每个支付事件  $k \in S_P$  上的支付量  $p_k$ ;
- 2) 根据优化模型中的约束条件式 (5) 计算在每个时刻  $T(T = 0, 1, \dots, D)$  的融资量  $f_T$ ;
- 3) 根据优化模型中的目标函数式 (1) 计算项目收益  $NPV$ .

给定初始进度  $T_0$ , 其邻点  $T_1$  的生成步骤如下:

- 1) 从除初始事件之外的所有事件中随机地挑选一个事件  $m(m=1, 2, \dots, M)$ ;
- 2) 将事件  $m$  的发生时间在其时间窗  $[E_m, L_m]$  内随机地变动一个时间单位;
- 3) 检查各事件发生时间是否满足优先关系约束 (3), 如果不满足, 顺次调整其他各事件的发生时间, 直至优先关系约束得到满足为止.

算法的初始温度  $TEMP_S$ 、冷却速率  $\mu$ 、终止温度  $TEMP_E$  以及在某一给定温度下的迭代步数  $Num_0$  等参数均通过试验法确定.

## 5 算法测试

为了验证算法的有效性, 用项目调度问题算例生成器 ProGen<sup>[19]</sup> 随机生成的标准算例对算法进行测试. ProGen 生成算例时的参数设置见表 1, 其中, 按全因素试验设计的参数有 7 个: 项目非虚活动数  $N$ 、预付款比例  $\gamma$ 、支付比例  $\theta$ 、折现率  $\alpha$ 、融资费率  $\beta$ 、质量保证金比例  $\eta$  和质量保证期  $Q$ . 参数  $N$  的取值为 4 种,  $\gamma$ 、 $\theta$ 、 $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\eta$  和  $Q$  的取值均为 3 种, 在每种参数组合下生成的算例数为 10 个, 由此形成  $10 \times 4 \times 3^6 = 29160$  个算例.

如果假定承包商所拥有的自有资金量足以保证项目的顺利实施, 无需从外部进行融资以保持现金流平衡, 那么本文所研究问题便退化为无融资约束的 Max-npv 项目调度问题. 显然, 后者最优解所对应的目标函数值  $NPV^{opt}$  为前者的一个上界. 在此, 用启发式算法获得满意解的目标函数值  $NPV^*$  偏离  $NPV^{opt}$  的相对程度  $RD$  来衡量其质量高低:  $RD = [(NPV^{opt} - NPV^*)/NPV^*] \times 100\%$

在  $RD$  的基础上, 定义如下两个启发式算法评价指标:

$ARD = (\sum_{i=1}^I RD_i)/I$ : 满意解对应的目标函数值距离其上界的平均相对偏差;

$MRD = \max_{1 \leq i \leq I} \{RD_i\}$ : 满意解对应的目标函数值距离其上界的最大相对偏差.

表 1 ProGen 生成算例时的参数设置

ProGen 参数	取值
算例的非虚活动数 $N$	10、20、30 或 40.
在某一非虚活动数下生成的算例数	10.
算例的起始和终止活动数	随机地从 2、3 和 4 中选取.
最大紧前和紧后活动数	4.
活动工期 $d_n$	随机地从区间 [1, 10] 中生成.
活动费用 $c_n$	随机地从区间 [10, 20] 中生成.
活动挣值 $w_n$	$\rho_1 c_n$ . 其中, $\rho_1$ 从区间 [1.4, 1.6] 中随机生成.
活动费用分配比例 $\zeta$	0.5
支付事件集合 $S_P$	支付次数从 3、4 和 5 中随机选取. 其中, 结束事件必为支付事件, 其余支付事件从在除开始事件之外的其他事件中随机选取.
预付款比例 $\gamma$	0.00、0.10、0.20.
支付比例 $\theta$	0.70、0.80、0.90.
折现率 $\alpha$	0.006、0.010、0.014.
融资费率 $\beta$	0.02、0.06、0.10.
质量保证金比例 $\eta$	0.06、0.10、0.14.
项目截止日期 $D$	$C_{\max} + \rho_2$ . 其中, $\rho_2$ 从 5、10 和 15 中随机选取, $C_{\max}$ 是项目活动网络关键路径的长度.
质量保证期 $Q$	$\rho_3 D$ . 其中, $\rho_3$ 分别取为 1.0、1.5 和 2.0.

算法的计算时间用如下两个指标反映:

$$ACT = (\sum_{i=1}^I CT_i) / I : \text{算法获得满意解的平均计算时间};$$

$$MCT = \max_{1 \leq i \leq I} \{CT_i\} : \text{算法获得满意解的最大计算时间}.$$

此外, 为了评价算法的稳定性, 本文还定义了如下两个评价指标:

$$ACV = (\sum_{i=1}^I CV_i) / I : \text{满意解所对应目标函数值的平均变异系数};$$

$$MCV = \max_{1 \leq i \leq I} \{CV_i\} : \text{满意解所对应目标函数值的最大变异系数}.$$

在上述定义中,  $I$  是标准算例集中的测试算例个数,  $CT_i$  是算法求解算例  $i$  的计算时间,  $CV_i$  为算例  $i$  满意解的变异系数:

$$CV_i = \frac{\sqrt{\frac{1}{J-1} \sum_{j=1}^J (NPV_{ij}^* - E[NPV_i^*])^2}}{E[NPV_i^*]}$$

其中,  $J$  为算法求解算例  $i$  的总运算次数,  $NPV_{ij}^*$  为在第  $j$  次运算中获得的满意解所对应的目标函数值,

$E[NPV_i^*] = \frac{1}{J} \sum_{j=1}^J NPV_{ij}^*$  为  $J$  次运算所得到的满意解目标函数值的均值.

模拟退火启发式算法采用 Visual Basic 6.0 语言编程, 在 CPU 主频为 1.6GHz、内存为 256MB 的个人计算机上进行测试, 上界  $NPV^{opt}$  借用 Demeulemeester 等<sup>[20]</sup> 的求解无资源约束 Max-npv 问题的精确递归搜索算法获得. 对于每个算例, 算法运行 100 次 (即  $J=100$ ). 表 2 为算法的测试结果, 从表中数据可见, 算法求解算例的平均和最大计算时间分别为 8.90 秒和 25.26 秒, 满意解距离其上界的平均和最大相对偏差分别为 9.79%和 23.99%(注: 此处的上界忽略了现金流平衡约束, 因而是一个松的保守上界, 从而导致相对偏差较高), 满意解的平均和最大变异系数分别为 0.0024 和 0.0072. 尽管由于本文所研究问题的特殊性, 我们无法就测试结果与其他学者的研究进行客观的比较, 但从模拟退火在项目调度问题中应用的一般情况及实用角度来看, 本文所开发的模拟退火启发式算法的绩效是可以接受的. 此外, 表 2 还表明, 随着问题规模 (即算例活动数) 的增大, 算法的计算时间 ( $ACT$  和  $MCT$ ) 有所增加, 而求解质量 ( $ARD$  和  $MRD$ ) 及稳定性 ( $ACV$  和  $MCV$ ) 则有所下降.

表 3 给出了不同参数设置下的算例项目平均收益. 从表 3 中的数据可见, 平均  $NPV^*$  随着融资费用率  $\beta$ 、质量保证金比例  $\eta$ 、质量保证期  $Q$  及折现率  $\alpha$  的增大而下降, 随着支付比例  $\theta$  和预付款比例  $\gamma$  的提高而上升. 其原因初步分析如下: 融资费用率反映了承包商使用外部资金的成本, 它的上升意味着承包商从外部获得资金成本的提高, 因而必然导致其收益的下降; 当质量保证金比例提高时, 更多的合同款会被延迟到质

表 2 启发式算法测试结果

算例集合	ARD(%)	MRD(%)	ACT(秒)	MCT(秒)	ACV	MCV
N=10	5.08	11.32	3.22	6.44	0.0000	0.0000
N=20	8.77	15.56	5.35	7.60	0.0010	0.0014
N=30	9.07	19.08	11.55	14.75	0.0024	0.0072
N=40	12.68	23.99	19.03	25.26	0.0049	0.0083
所有算例	8.90	23.99	9.79	25.26	0.0021	0.0083

表 3 不同参数设置下的算例平均  $NPV^*$

算例集合	平均 $NPV^*$	算例集合	平均 $NPV^*$	算例集合	平均 $NPV^*$	算例集合	平均 $NPV^*$	算例集合	平均 $NPV^*$
$\beta=0.02$	57.48	$\theta=0.70$	45.72	$\gamma=0.00$	29.12	$\eta=0.06$	62.52	$Q=1.0D$	57.01
$\beta=0.06$	52.24	$\theta=0.80$	52.23	$\gamma=0.10$	52.23	$\eta=0.10$	52.23	$Q=1.5D$	52.23
$\beta=0.10$	46.87	$\theta=0.90$	58.42	$\gamma=0.20$	74.59	$\eta=0.14$	41.72	$Q=2.0D$	48.56
								$\alpha=0.006$	83.61
								$\alpha=0.010$	52.23
								$\alpha=0.014$	30.58

保期满后支付给承包商,这使得在项目进行过程中承包商必须从外部融入更多资金以维持现金流的平衡,从而造成其项目收益下降;在其他条件不变的情况下,质量保证金的现值会随着质量保证期的延长而下降,进而给项目净现值造成负面影响;折现率反映资金的时间价值,折现率越高,正负现金流折扣到项目开始时刻的现值就越小,所以项目净现值与折现率必然呈现出一种负相关关系;当支付比例上升时,承包商在每次支付时获得的支付量增加,相应地其从外部的融资量必然会有所减少,所以其项目收益上升;预付款比例对项目收益的影响与支付比例相似,它的提高可以使承包商在项目开始时获得更多的资金,从而提高其项目收益。

## 6 示例

用图 1 所示项目算例<sup>[21]</sup>对上述研究成果进行说明,各活动的挣值、工期和费用见表 4。该算例的其他参数如下:项目合同总价款  $U$  为 22000,活动费用在其开始和结束事件之间的分配比例  $\zeta$  为 0.5,预付款比例  $\gamma$  为 10%,每次支付时承包商累计挣值支付比例  $\theta$  为 0.80,业主在事件 4、6、8 和 10 上对承包商进行支付(即  $S_P=\{4, 6, 8, 10\}$ ),折现率  $\alpha$  为 0.01,融资费用率  $\beta$  为 0.06,质量保证金比例  $\eta$  为 10%,质量保证期  $Q$  为 80,项目截止日期  $D$  为 42。

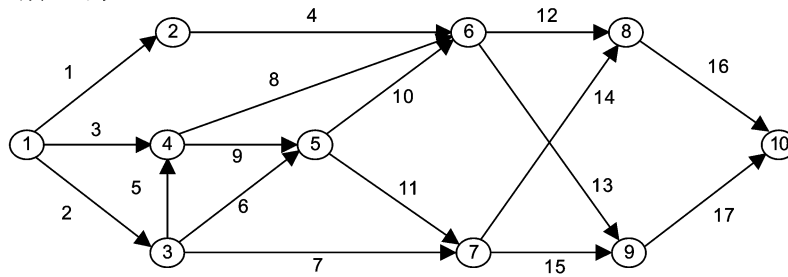


图 1 项目活动网络图

表 4 活动的挣值、工期及费用

活动编号	挣值	工期	费用	活动编号	挣值	工期	费用
1	1000	5	760	10	1500	8	1140
2	760	3	600	11	1500	7	1150
3	1800	2	1400	12	760	5	600
4	1800	6	1420	13	760	4	580
5	1300	2	1010	14	1500	3	1100
6	1000	10	770	15	1300	12	1000
7	1000	8	750	16	2700	6	2100
8	1000	4	780	17	1900	5	1520
9	420	8	320				

### 6.1 计算结果

利用本文所开发的模拟退火启发式算法,可以求得该项目的满意进度安排如下:

$$\Gamma^* = \{0, 15, 3, 5, 13, 21, 21, 33, 33, 39\}$$

由计算结果可见,项目开始(项目开始时刻记为 0 时刻)后的第 39 时刻完成;承包商在项目开始时可以获得 2200 的预付款,在项目实施过程中的时刻 5、21、33 和 39 可以分别获得 2316、5532、2592 和 7160 的支付,总量为 2200 的质量保证金要在第 119 时刻(即项目结束后的第 80 时刻)才能获得。此外,还可以计算出在时刻 3、13 和 15,承包商从业主获得的支付不足以弥补其所发生的费用,需要从外部进行融资,融资量分别为 745、1129 和 1090,累计需支出融资费用 178。在该进度安排下,承包商的最终项目收益(即其净现值)为 1959。

### 6.2 项目收益影响因素分析

为了分析融资费率  $\beta$ 、支付比例  $\theta$ 、预付款比例  $\gamma$ 、质量保证金比例  $\eta$ 、质量保证金期  $Q$  及折现率  $\alpha$  等参数对项目收益的影响, 在其他参数不变的条件下, 变动其中某一参数并求解优化模型, 获得不同取值下的项目收益见表 5, 据此绘制的项目收益随各参数变化曲线如图 2 所示.

由图 2 可见, 承包商的项目收益随着  $\beta$ 、 $\eta$ 、 $Q$  和  $\alpha$  的增加单调下降, 随着  $\theta$  和  $\gamma$  的提高单调上升. 根据第 3 节中所建立的优化模型, 我们可以分析出项目收益与这些参数之间的量化相关关系: 将目标函数式 (1) 左边的前四项合记为  $\Pi$  并令  $\Psi = \sum_{T=0}^D [f_T \exp(-\alpha T)]$ , 代入式 (1) 可得  $NPV = \Pi - \beta \Psi$ , 由此可见, 在其他参

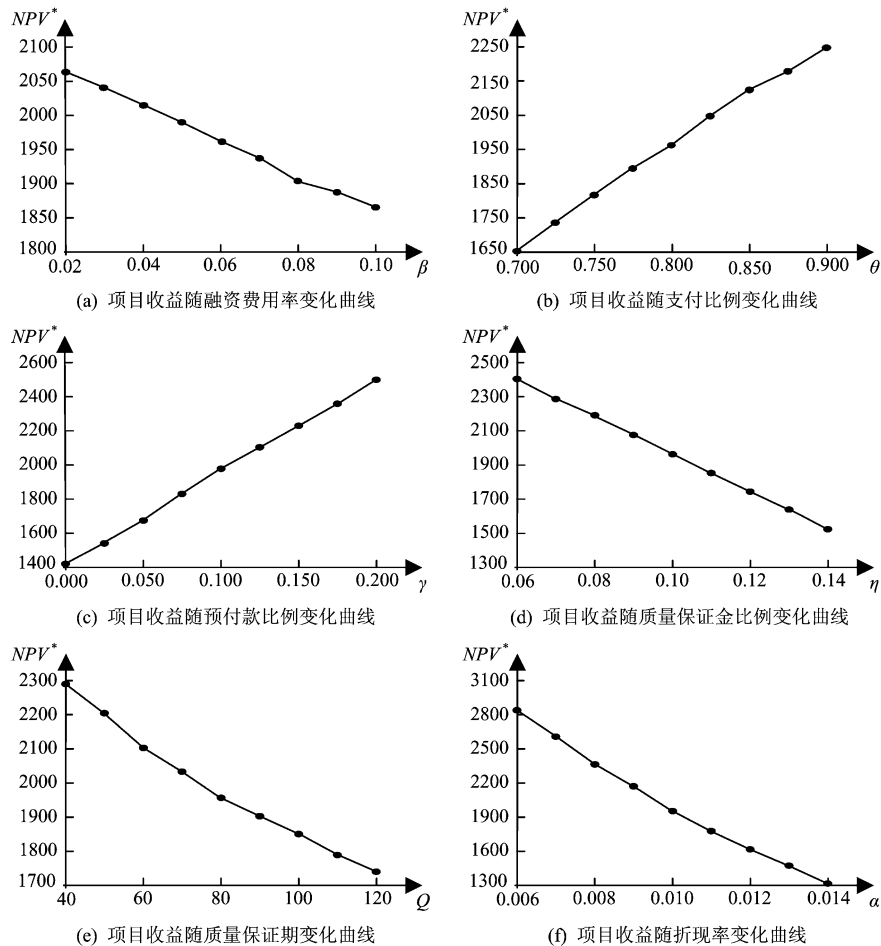


图 2 项目收益随不同参数变化曲线

表 5 不同参数值下的项目收益

融资费率		支付比例		预付款比例		质量保证金比例		质量保证金期		折现率	
$B$	$NPV^*$	$\theta$	$NPV^*$	$\gamma$	$NPV^*$	$\eta$	$NPV^*$	$Q$	$NPV^*$	$\alpha$	$NPV^*$
0.02	2066	0.700	1651	0.000	1421	0.06	2402	40	2289	0.006	2845
0.03	2039	0.725	1733	0.025	1536	0.07	2293	50	2207	0.007	2599
0.04	2013	0.750	1814	0.050	1673	0.08	2197	60	2108	0.008	2360
0.05	1990	0.775	1893	0.075	1822	0.09	2071	70	2030	0.009	2162
0.06	1959	0.800	1959	0.100	1968	0.10	1959	80	1959	0.010	1959
0.07	1934	0.825	2047	0.125	2102	0.11	1851	90	1904	0.011	1781
0.08	1900	0.850	2119	0.150	2232	0.12	1735	100	1846	0.012	1620
0.09	1888	0.875	2177	0.175	2360	0.13	1633	110	1786	0.013	1463
0.10	1866	0.900	2248	0.200	2498	0.14	1519	120	1738	0.014	1321



数不变的条件下,  $NPV$  与融资费用率  $\beta$  呈负线性相关关系; 约束条件式 (7) 决定了各次支付量  $p_k$  与支付比例  $\theta$  正线性相关, 而目标函数式 (1) 左侧第 2 项 (即各次支付的净现值) 又决定了  $NPV$  与  $p_k$  正线性相关, 由此可以断定  $NPV$  与  $\theta$  之间必然呈一种正线性相关关系; 将目标函数式 (1) 左侧后 4 项合记为  $\Omega$ , 便可以清楚地看出  $NPV$  与  $\gamma$  之间的正线性相关关系:  $NPV = \gamma U + \Omega$ ; 当质量保证金比例  $\eta$  线性上升时, 由约束条件式 (7) 所决定的  $p_k$  会线性下降, 而质量保证金却线性上升, 但是由于项目各事件的发生时间均不会晚于其终事件的发生时间, 因而各次支付的折现因子  $\sum_{t=E_k}^{L_k} [\exp(-\alpha t)x_{kt}]$  一定大于质量保证金的折现因子  $\exp\left\{-\alpha\left[\sum_{t=E_M}^{L_M}(tx_{Mt}) + Q\right]\right\}$ , 所以二者的综合效果必然导致项目  $NPV$  线性下降; 项目收益和质量保证期  $Q$  之间的关系可以从目标函数式 (1) 左边第 3 项  $\eta U \exp\left\{-\alpha\left[\sum_{t=E_M}^{L_M}(tx_{Mt}) + Q\right]\right\}$  得到, 由于  $Q$  在指数项中, 因此当其它参数不变时, 项目  $NPV$  与  $Q$  之间必然呈一种负指数相关关系; 与  $Q$  相类似, 因为折现率  $\alpha$  位于式 (1) 左边后 4 项的指数中, 所以它与项目收益之间也是一种负指数关系。

对上述分析总结如下: 承包商以净现值表示的项目收益与融资费用率  $\beta$  和质量保证金比例  $\eta$  之间存在着负线性相关关系, 与支付比例  $\theta$  和预付款比例  $\gamma$  呈正线性相关关系, 与质量保证期  $Q$  和折现率  $\alpha$  呈负指数相关关系. 这一结论要求承包商在实际项目的实施过程中, 必须努力降低其融资成本、提高其内部收益率, 同时尽量与业主协商, 获得一个较高的支付比例及预付款比例, 以及适当的质量保证金比例和质量保证期, 从而确保项目有一个合理的收益. 最后需要指出的是, 以上结论是在本文研究的假设条件以及各参数之间不存在相互关联的基础上得到的, 当参数之间存在关联关系时, 情形将变得更为复杂.

## 7 结论

本文研究了现金流平衡约束下的 Max-npv 项目调度问题. 作者首先对问题进行了界定, 并指出其不同于经典资源约束型 Max-npv 项目调度问题的主要特征, 进而提炼出本文研究的假设条件. 随后构建了问题的非线性整数规划优化模型, 通过模型中的现金流平衡约束将项目费用、支付与融资联系在一起, 从而实现了现金收支的平衡. 考虑到所构建模型的组合属性, 借鉴以往研究成果并基于本文所研究问题的特点, 作者从实用角度出发设计了专门的模拟退火启发式算法. 用项目调度问题生成器 ProGen 随机生成了 29160 个标准算例, 在其上对启发式算法进行了计算测试, 结果满意: 算法的平均和最大计算时间分别为 8.90 秒和 25.26 秒, 满意解距离其上界的平均和最大相对偏差分别为 9.79% 和 23.99%, 满意解的平均和最大变异系数分别为 0.0024 和 0.0072. 最后, 通过一个算例对研究成果进行了说明, 并分析了影响项目收益的各种参数, 得到如下结论: 承包商以净现值表示的项目收益与融资费用率和质量保证金比例之间存在负线性相关关系, 与支付比例和预付款比例呈正线性相关关系, 与质量保证期和折现率呈负指数相关关系. 需要指出的是, 在本文的研究中没有考虑活动的多种执行模式、项目的奖励惩罚机制以及其他的支付方式, 也没有考虑业主对项目进度安排的影响. 因此, 对该问题的研究仍需进一步的深入和扩展.

## 参考文献

- [1] He Z W, Xu Y, Zhu S Y. A survey of Max-npv project scheduling problems[J]. Journal of Industrial Engineering and Engineering Management, 2005, 19(4): 60-63.
- [2] Smith-Daniels D E, Smith-Daniels V L. Maximizing the net present value of a project subject to materials and capital constraints[J]. Journal of Operations Management, 1987, 7: 33-45.
- [3] Smith-Daniels D E, Padman R, Smith-Daniels V L. Heuristic scheduling of capital constrained projects[J]. Journal of Operations Management, 1996, 14: 241-254.
- [4] Herroelen W, Dommelen V, Demeulemeester E. Project network models with discounted cash flows: A guided tour through recent developments[J]. European Journal of Operational Research, 1997, 100(1): 97-121.
- [5] Kolisch R, Padman R. An integrated survey of deterministic project scheduling[J]. Omega, 2001, 29(3): 249-272.
- [6] Herroelen W, Leus R. Project scheduling under uncertainty: Survey and research potential[J]. European Journal

- of Operational Research, 2005, 165(2): 289–306.
- [7] Elmaghraby S. Activity nets: A guided tour through some recent developments[J]. European Journal of Operational Research, 1995, 82(3): 383–408.
- [8] Blazewicz J, Lenstra J K, Rinnooy K. Scheduling project to resource constraints: Classification and complexity[J]. Discrete Applied Mathematics, 1983, 5(1): 11–24.
- [9] Sampson S E, Weiss E N. Local search techniques for the generalized resource-constrained project scheduling problem[J]. Naval Research Logistics, 1993, 40: 665–675.
- [10] Lee J K, Kim Y D. Search heuristics for resource-constrained project scheduling[J]. Journal of the Operational Research Society, 1996, 47: 678–689.
- [11] Boctor F F. An adaptation of the simulated annealing algorithm for solving resource-constrained project scheduling problems[J]. International Journal of Production Research, 1996, 34: 2335–2351.
- [12] Cho J H, Kim Y D. A simulated annealing algorithm for resource-constrained project scheduling problems[J]. Journal of the Operational Research Society, 1997, 48: 736–744.
- [13] Bouleimen K, Lecocq H. A new efficient simulated annealing algorithm for the resource-constrained project scheduling problem and its multiple mode version[J]. European Journal of Operational Research, 2003, 149(2): 268–281.
- [14] Shtub A, Larry J L, Cai Z. Scheduling programs with repetitive projects: A comparison of a simulated annealing, a genetic and a swap algorithm[J]. European Journal of Operational Research, 1996, 88: 124–138.
- [15] Etgar R, Shtub A, Larry J L. Scheduling project to maximize net present value — the case of time-dependent, contingent cash flows[J]. European Journal of Operational Research, 1996, 96: 90–96.
- [16] Dayanand N, Padman R. A two stage search heuristic for scheduling payments in projects[J]. Annals of Operation Research, 2001, 102(1): 197–220.
- [17] Mika M, Waligora G, Weglarz J. Simulated annealing and tabu search for multi-mode resource-constrained project scheduling with positive discounted cash flows and different payment models[J]. European Journal of Operational Research, 2005, 164: 639–668.
- [18] He Z W, Xu Y. Multi-mode project payment scheduling problems with bonus-penalty structure[J]. European Journal of Operational Research, 2008, 189(3): 1191–1207.
- [19] Kolisch R, Sprecher A. PSPLIB – A project scheduling problem library[J]. European Journal of Operational Research, 1996, 96: 205–216.
- [20] Demeulemeester E, Herroelen W, Dommelen P V. An optimal recursive search procedure for the deterministic unconstrained max-npv project scheduling problem[R]. Research Report 9603, Department of Applied Economics, Katholieke University Leuven, 1996, Leuven, Belgium.
- [21] He Z W, Xu Y, Zhu S Y. Study on project payment scheduling problems with bonus-penalty structure from two viewpoints[J]. Systems Engineering — Theory & Practice, 2005, 25(10): 39–45.