

# 考虑资源闲置成本的网络计划资源调度优化模型

杨志勇 欧阳红祥 田文水 田贵良

(河海大学商学院 江苏 南京 210098)

**摘要** 针对在考虑风险因素时,资源就位时间的任何改变都可能使总工期和资源闲置时间发生变化,进而影响到施工计划总成本的情况,建立了总成本最低的最佳资源就位时间优化模型,并给出了利用蒙特卡罗(MC)法模拟和遗传算法求解各工作最佳资源就位时间的方法.实例验证结果表明,该优化模型优于 CPM 网络模型.

**关键词** 网络计划 资源调配 遗传算法 网络优化  
**中图分类号** :TV512      **文献标识码** :A      **文章编号** :1000-1980(2006)04-0465-04

在网络计划中,对资源调度安排的主要内容之一是确定各工作的资源就位时间( $t_{RS}$ ).各工作的资源就位时间一般是根据计算得到的各工作的时间参数来安排的.一般认为,当取某工作的资源就位时间为该工作的最早开始时间( $t_{ES}$ )与最迟开始时间( $t_{LS}$ )之间的某一值时,资源不会出现闲置,对总工期也没有影响.但当考虑实际施工中的风险因素时,每项工作的持续时间是一随机变量,其时间参数是工期的随机函数.因此,当确定了每项任务的资源就位时间后,可能会出现以下 3 种情况:

- a. 当  $t_{RS} < t_{ES}$  时,资源闲置,产生浪费.
- b. 当  $t_{RS} > t_{LS}$  时,该工作在工作资源就位时间后才能开工,则可能会使总工期延长,从而可能会增加成本.
- c. 当  $t_{ES} \leq t_{RS} \leq t_{LS}$  时,既不会使资源闲置,也不会使总工期延长.

资源出现 a、b 情况的概率相当大,出现 c 情况的概率很小.可以看出:在资源调度时,确定的资源就位时间越早,该资源闲置的可能性越大,但使总工期延长的可能性越小;在资源调度时,确定的资源就位时间越迟,该资源闲置的可能性越小,但使总工期延长的可能性越大.为此,本文建立了总成本最低的最佳资源就位时间优化模型,并通过该模型求解了最佳资源就位时间.

## 1 网络计划时间参数计算方法

### 1.1 CPM 网络计划时间参数计算方法<sup>[1-2]</sup>

CPM 网络计划时间参数分别为:工作  $i$  ( $i = 0, 1, \dots, n$ ,  $n$  为工作数量)的持续时间  $t_{D_i}$ ;工作  $i$  的最早开始时间  $t_{ES_i}$ ;工作  $i$  的最早完成时间  $t_{EF_i}$ ;工作  $i$  的最迟开始时间  $t_{LS_i}$ ;工作  $i$  的最迟完成时间  $t_{LF_i}$ ;工作  $i$  的总时差  $t_{TF_i}$ ;工作  $i$  的自由时差  $t_{FF_i}$ .其中:

$$\begin{aligned} t_{ES_0} &= 0 & t_{EF_0} &= 0 \\ t_{ES_j} &= \max t_{EF_i} \quad (0 \leq i < j \leq n) \\ t_{EF_j} &= t_{ES_j} + t_{D_j} \end{aligned} \tag{1}$$

前后工作时间间隔

$$t_{LAG_{i-j}} = t_{ES_j} - t_{EF_i} \tag{2}$$

局部时差

$$t_{FF_i} = \min t_{LAG_{i-j}} \tag{3}$$

总时差

$$t_{TF_i} = \min(t_{LAG_{i-j}} + t_{TF_j}) \tag{4}$$

工作最迟开始时间和最迟完成时间

$$t_{LS_i} = t_{ES_i} + t_{TF_i} \quad t_{LF_i} = t_{EF_i} + t_{TF_i} \tag{5}$$

$$t_{Tp} = t_{Tc} = t_{EF_n} \tag{6}$$

计划完工时间  $t_{Tp}$  和计算完工时间  $t_{Tc}$ .

1.2 考虑资源就位时间因素后时间参数的计算

考虑资源就位时间因素后,工作  $j$  的最早开工时间

$$t_{ES'_j} = \max(t_{EF_i}, t_{RS_j}) \tag{7}$$

式中  $t_{RS_j}$  为工作  $j$  的资源就位时间.

其他参数的计算方法与 CPM 网络计划时间参数的计算方法相同,见式(2)~(6).

2 资源就位时间优化模型分析

假定第  $i$  项工作只消耗一种资源  $i$ ,该资源 1d 的直接费用为  $P_i$ ,且资源空闲 1d 的费用为  $P'_i$ ,间接费用与总工期成正比,1d 的直接费用为  $P_0$ ,则施工总费用

$$S = P'_i \sum |t_{ES_i} - t_{RS_i}| + P_i \sum t_{Di} + P_0 t_{Tp} \tag{8}$$

式中  $t_{Tp}$  为计划完工时间.当施工工期较长时,式(8)中的各项费用还应考虑资金的时间价值.

由于工作时间具有不确定性,网络计划的计算工期为一随机变量,任何工作开工时间的改变都可能对计算工期产生影响,即改变进度的风险  $P_r$ .在计划完工时间  $t_{Tp}$  一定的情况下,施工进度就存在风险  $P_r = P(t_{Tc} > t_{Tp})$ .当施工进度风险  $P_{r_0}$  确定后,以上模型还存在约束条件  $P_r \leq P_{r_0}^{[3-5]}$ .因此,寻找最优资源就位时间的问题可以表示为

$$\min E[S(t_{RS_1}, t_{RS_2}, \dots, t_{RS_i}, \dots, t_{RS_n})] \tag{9}$$

$$\text{s.t.} \quad P(t_{RS_i}) \leq P_{r_0} \quad (i = 1, 2, \dots, n) \tag{10}$$

$$t_{ES_{i\min}} \leq t_{RS_i} \leq t_{LS_{i\max}} \quad (i = 1, 2, \dots, n) \tag{11}$$

式中  $t_{ES_{i\min}}$  ——随机函数  $t_{ES_i}$  值域的下限;  $t_{LS_{i\max}}$  ——随机函数  $t_{LS_i}$  值域的上限.

$E(S), P_r(t_{RS_i})$  可用蒙特卡罗(MC)法模拟得出.模拟步骤如下<sup>[6]</sup>:

- a. 输入各工作持续时间分布的类型及其参数;
- b. 产生各工作服从其分布类型的随机持续时间;
- c. 根据式(2)~(6)计算各工序时间参数和  $t_{Tc}$ .根据式(7)计算施工总成本  $S$ ;
- d. 重复 b、c 步骤,求出各工序时间参数及  $S, t_{Tc}$  的概率分布,并通过统计分析求出  $S, t_{Tc}$  的均值以及进度风险  $P_r$ .

决策变量  $t_{RS_i}$  应是一个连续变量,但考虑施工管理中的具体要求及减少计算工作量时,可取为离散变量.因此,上述优化问题成为组合优化问题.

3 模型优化计算方法

遗传算法是一种通过模拟自然进化过程搜索最优解的方法,该算法可用于解决复杂的全局优化问题<sup>[7]</sup>.如果用染色体  $V = (t_{RS_1}, t_{RS_2}, \dots, t_{RS_n})$  作为解的代码,则可行集包含在下列超几何体中:

$$\Omega = \{ (t_{RS_1}, t_{RS_2}, \dots, t_{RS_n}) | t_{ES_{i\min}} \leq t_{RS_i} \leq t_{LS_{i\max}} \} \quad (i = 1, 2, \dots, n) \tag{12}$$

最优资源就位时间求解算法如下:

- a. 通过下式对超几何体进行抽样,以产生初始染色体.

$$\begin{aligned} t_{RS_1} &= U(t_{ES_{1\min}}, t_{LS_{1\max}}) \\ t_{RS_2} &= U(t_{ES_{2\min}}, t_{LS_{2\max}}) \\ &\vdots \\ t_{RS_n} &= U(t_{ES_{n\min}}, t_{LS_{n\max}}) \end{aligned}$$

其中函数  $U(a, b)$  用来产生区间  $[a, b]$  上均匀分布的随机数。

b. 计算施工总费用  $S$  和进度风险  $P_r$ , 并检验其可行性. 如果可行, 则作为一个染色体, 否则拒绝接受。

c. 根据目标函数值计算染色体的适应度, 当参数  $\alpha \in (0, 1)$  给定时, 基于序的评价函数为

$$\text{eva}(v_i) = \alpha(1 - \alpha)^{i-1} \quad (i = 1, 2, \dots, n)$$

$i = 1$  说明染色体最好,  $i = n$  说明染色体最差。

d. 旋转赌轮, 选择染色体. 赌轮按每个染色体的适应度进行选择. 选择过程以旋转赌轮  $n$  次为基础. 每次旋转都为新的种群选择一个染色体. 选择过程为 (a) 计算每个染色体  $V_i$  的累积概率  $q_i$ , 即

$$q_0 = 0 \quad q_i = \sum_{j=1}^i \text{eva}(V_j) \quad (i = 1, 2, \dots, n) \tag{13}$$

(b) 从区间  $(0, q_n]$  中产生一个随机数  $r$  (c) 若  $q_{i-1} < r \leq q_i$ , 则选择  $i$  个染色体  $V_i (1 \leq i \leq n)$  (d) 重复步骤 (b) (c)  $n$  次, 得到  $n$  个复制的染色体。

e. 交叉操作, 首先将参数  $P_c$  定义为交叉操作的概率. 从  $i = 1 \sim i = n$  重复下列过程:

从  $[0, 1]$  中产生随机数  $r$ , 如果  $r < P_c$ , 则选择  $V_i$  作为一个父代. 用  $V'_1, V'_2, V'_3, \dots$  表示所选择的父代, 并把它们随机地分成对  $(V'_1, V'_2), (V'_3, V'_4), (V'_5, V'_6), \dots$  现以  $(V'_1, V'_2)$  为例说明对所有对的交叉操作方法. 首先, 从开区间  $(0, 1)$  中产生一个随机数  $c$ , 然后按下列形式在  $V'_1$  和  $V'_2$  之间进行交叉操作, 并产生  $X$  和  $Y$  2 个后代。

$$X = cV'_1 + (1 - c)V'_2 \quad Y = (1 - c)V'_1 + cV'_2$$

如果 2 个后代均可行, 则用它们代替其父代; 否则, 保留其中可行的 (如果存在的话), 然后产生新的随机数  $c$ , 重新进行交叉操作, 直到得到 2 个可行的后代或满足循环给定次数为止。

f. 将交叉参数  $P_m$  作为遗传系统中的变异概率, 类似于交叉操作中选择父代的过程, 从  $i = 1 \sim i = n$  重复下列过程:

从区间  $[0, 1]$  中产生随机数  $r$ , 如果  $r < P_m$ , 则选择染色体  $V_i$  作为变异的父代. 用  $V = (x_1, x_2, \dots, x_n)$  表示所选择的每一个父代, 并按如下方法进行变异。

在  $R_n$  中随机地选择变异方向  $d$ , 如果  $V + M'd$  是不可行的, 则置  $M'$  为 0 和  $M$  之间的随机数, 直到其可行为止. 其中  $M$  是初始化过程定义的一个足够大的数. 如果在预先给定的迭代次数之内没有找到可行解, 则置  $M' = 0$ . 无论  $M'$  为何值, 总用  $X = V + Md$  代替  $V$ 。

g. 重复 b ~ f, 直到满足终止条件为止。

进化完成之后, 可以把最好的染色体作为最优解. 虽然这个解不一定是理论上的最优解, 但至少是满意解或次最优解。

4 算 例

某工程施工计划单代号网络如图 1 所示, 计划工期 13 个月, 设计规定施工进度风险为 20%, 其各项工作持续时间服从三角分布, 参数估计值见表 1. 假定每项工作只消耗一种资源, 该资源每月的直接费用为 1 万元, 且资源空闲 1 个月的费用为 0.6 万元, 间接费用与总工期成正比, 每月的直接费用为 1 万元, 取月息为 0.5%, 则当安排的各项工作的资源在由 CPM 法计算出的该工作的最早开工时间 ( $t_{ES}$ ) 就位时, 据 MC 法模拟计算, 不考虑资金时间价值的总成本为 30.57 万元, 考虑资金时间价值的总成本为 29.84 万元。

利用遗传算法求解最优资源就位时间时, 所使用的种群规模为

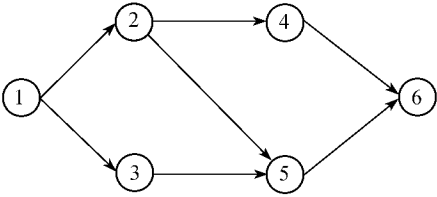


图 1 施工进度网络  
Fig.1 Network for construction schedule

30、交叉概率为 0.3、变异概率为 0.2 ,而基于序的评价函数的参数  $\alpha$  为 0.05. 经过3 000 次的进化后 ,求得了优化结果. 由优化结果可知 :不考虑资金时间价值优化后的总成本为 30.024 万元 ,比优化前节省 1.8% 的成本 ;考虑资金时间价值优化后的总成本为 29.3203 万元 ,比优化前节省 2.15% 的成本.

表 1 各工作持续时间及资源就位时间计算值

Table 1 Work durations and time of resource schedule

| 节点<br>编号 | 工作<br>名称 | 工作持续时间 |      |      | CPM 法计算<br>出的 $t_{ES_i}$ | 不考虑资金时间<br>价值优化后的 $t_{RS_i}$ | 考虑资金时间价值<br>优化后的 $t_{RS_i}$ |
|----------|----------|--------|------|------|--------------------------|------------------------------|-----------------------------|
|          |          | 最可能值/月 | 下限/月 | 上限/月 |                          |                              |                             |
| 1        | A        | 2      | 1.5  | 3.0  | 0                        | 0                            | 0                           |
| 2        | B        | 3      | 2.0  | 4.5  | 2                        | 2.1                          | 2.2                         |
| 3        | C        | 2      | 1.5  | 3.0  | 2                        | 2.3                          | 2.9                         |
| 4        | D        | 4      | 3.0  | 6.0  | 5                        | 5.3                          | 5.4                         |
| 5        | E        | 3      | 2.0  | 4.5  | 5                        | 5.9                          | 6.0                         |
| 6        | F        | 2      | 1.5  | 3.0  | 9                        | 9.8                          | 9.8                         |

5 结 语

对工程项目施工中每个工作的持续时间为一随机变量的施工网络计划来说 ,若考虑缩短总工期、减少间接费用 ,则应安排资源尽早就位 ;若考虑资金时间价值、减少资源闲置 ,则应安排资源较迟就位. 本文分析计算时工作持续时间是按三角分布来考虑的 ,当网络计划工作持续时间服从正态分布、 $\beta$  分布或其他常见分布时 ,可以得到类似优化结果. 对大型复杂网络计划来说 ,计算时间可能会较长 ,但由于工程网络计划一般用于非实时控制 ,因此采用进度费用优化模型和遗传算法求解可满足实际需要.

参考文献 :

[ 1 ] 赵志缙 ,应惠清. 建筑施工[ M ]. 上海 :同济大学出版社 ,1998 :284-296.  
[ 2 ] NICHOLAS J M. Project management for business and technology[ M ]. 2nd ed. Englewood Cliffs :Prentice Hall ,2001 :193-217.  
[ 3 ] 王卓甫 ,杨志勇 ,杨建基. 水利水电工程施工进度风险规定下的投资优化[ J ]. 河海大学学报 :自然科学版 ,2000 ,28( 6 ) :52-55.  
[ 4 ] 王卓甫 ,陈登星. 水利水电施工进度计划的风险分析[ J ]. 河海大学学报 :自然科学版 ,1999 ,27( 4 ) :83-87.  
[ 5 ] 王卓甫 ,杨高升 ,杨建基 ,等. 水利水电施工中应用 PERT 的完工概率问题[ J ]. 河海大学学报 :自然科学版 ,2002 ,30( 1 ) :44-48.  
[ 6 ] 谢行皓. 建筑工程系统仿真[ M ]. 北京 :科学出版社 ,2001 :111-117.  
[ 7 ] 邢文训 ,谢金星. 现代优化计算方法[ M ]. 北京 :清华大学出版社 ,2003 :140-191.

Optimization model for resource dispatching in network schedule  
with consideration of cost of unused resources

YANG Zhi-yong , OUYANG Hong-xiang , TIAN Wen-shui , TIAN Gui-liang  
( Business School , Hohai University , Nanjing 210098 , China )

**Abstract :**When the risk factors are taken into account , any changes in resource schedule may lead to the variation of the project duration and the unused time of resources , and further lead to some influences on the total cost of the project. In consideration of the above fact , an optimization model for optimal resource schedule at the lowest cost of the project was established , and the MC simulation and genetic algorithm were introduced to the solution of the optimal time of resource schedule. A case study shows that the optimization model is superior to CPM network model.

**Key words :**network schedule ; resource dispatching ; genetic algorithm ; network optimization