

水利水电工程施工进度风险规定下的投资优化

王卓甫 杨志勇 杨建基

(河海大学国际工商学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 分析水利水电工程施工进度计划对工程建设动态投资的影响, 给出施工进度计划风险的定义, 提出施工进度风险计算的 MC 仿真方法. 在此基础上, 建立施工进度风险规定下, 建设资金优化配置的数学模型, 并给出了用 MC 仿真方法优化计算的公式和步骤.

关键词: 施工, 进度风险, 动态投资, 网络计划, 仿真

中图分类号: TV512 文献标识码: A 文章编号: 1000-198X(2000)06-0052-04

大中型水利水电工程项目及其建设的特点是工程规模巨大、投资多、建设工期长. 此外, 影响建设的不确定因素也特别多, 常包括: 水文、气象、地质、施工方案、施工技术、施工管理和资源供应等. 科学安排施工进度, 合理配置建设资金, 对提高水利水电工程建设投资效益意义重大^[1].

对如图 1 所示工程进度网络计划, 在施工时考虑下列两种方案: 方案一: 将各工作(或称工序、子项工程)按肯定型网络计划中最早可能开工时间开始施工, 则可得到一投资累计曲线, 如图 2 中曲线 A. 方案二: 将各工作按肯定型网络计划中最迟必需开工时间开始施工, 则得到另一投资累计曲线, 如图 2 中曲线 B.

对于这个工期不足 2 年的工程, 动态投资分析结果表明, 若取月息为 0.5%, 方案二比方案一节省动态投资 1.5%. 显然, 当工期更长时, 若各项工作按最迟必需开工时间开始施工, 则节省的投资要更多.

但是, 也应该看到, 由于施工过程中不确定因素的影响, 完成每一工作的时间拖延的可能性也是存在的. 因此, 从进度计划角度看, 对于方案一和方案二, 其不能按时完成施工任务的进度风险是不一样的, 方案二的施工进度风险要大.

因此, 此处施工工期投资的优化安排和保证工程按时完工是相互矛盾的. 本文将探讨在施工进度风险(或按时完工概率)一定的条件下, 如何科学安排施工进度, 使建设资金优化配置的问题.

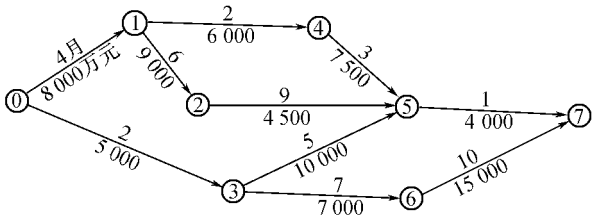


图 1 施工进度网络

Fig.1 Network for construction progress

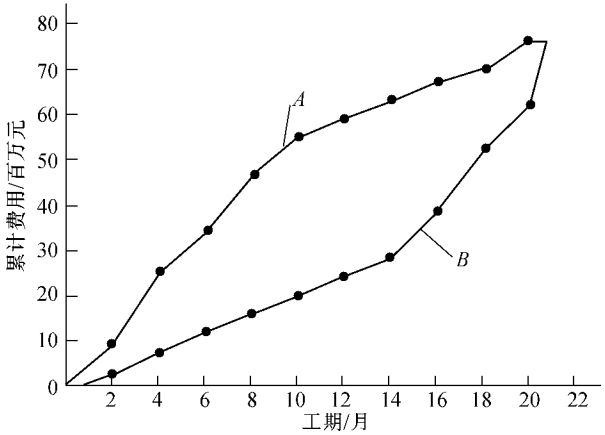


图 2 投资累积曲线

Fig.2 Cumulative curves of investment

1 施工进度的不确定性和网络计划的时间参数

1.1 施工进度不确定性的描述

由于水利水电施工中各种不确定因素的存在,使得完成每项工作的时间和施工次序均具有不确定性.本研究仅考虑每项工作持续时间的不确定性,而施工的先后次序假设是确定的.对这种进度计划问题,常用工作逻辑关系确定、工作持续时间不确定的非肯定型网络计划技术(PERT)来解决.

对这种非肯定型网络计划,其工作持续时间的不确定性可用 β 分布或近似用正态分布描述;不论每一项工作的持续时间是用 β 分布还是正态分布描述,整个进度网络计划计算工期的不确定性可用正态分布描述,而且当进度网络计划中的工作越多,这种描述越精确^[2~4].在PERT中,各工作的持续时间往往凭经验或过去的试验成果,先确定三个参数:(a)乐观估计时间 a ,它是在顺利条件下,完成某项工作的时间.(b)悲观估计时间 b ,它是在最不利条件下,完成某项工作的时间.(c)最可能估计时间 m ,它是在正常条件下,完成某项工作最大可能的时间.然后,估计工作持续时间的期望值.

$$D_{ij} = (a + 4m + b) / 6 \tag{1}$$

估计方差 σ_{ij}^2 或标准差 σ_{ij} : $\sigma_{ij}^2 = (b - a)^2 / 36$ $\sigma_{ij} = (b - a) / 6$ (2)

1.2 网络计划时间参数的计算

在传统的PERT中,常用式(1)(2)计算 D_{ij} 和 σ_{ij} ,然后将工作持续时间的不确定性问题转化为确定的网络计划问题来处理.当用双代号进度网络计划来表示时,其节点和工作的部分时间参数用CPM法计算^[3].

1.2.1 节点时间参数的计算

节点最早开始时间
$$\left. \begin{aligned} TE_i &= 0 & i &= 1 \\ TE_j &= \max(TE_i + D_{ij}) & i > 1, i < j \end{aligned} \right\} \tag{3}$$

节点最迟完成时
$$TL_i = \min(TL_j - D_{ij}) \quad i < j < n \tag{4}$$

$$TL_n = TP(\text{计划完工时间})$$

节点时差
$$TS_i = TL_i - TE_i \tag{5}$$

1.2.2 工作时间参数的计算

工作最早开始时间
$$ES_{ij} = TE_i \tag{6}$$

工作最早完成时间
$$EF_{ij} = TE_i + D_{ij} \quad i < j \tag{7}$$

工作最迟完成时间
$$LF_{ij} = TL_j \quad i < j \tag{8}$$

工作最迟开始时间
$$LS_{ij} = TL_{ij} - D_{ij} \quad i < j \tag{9}$$

1.3 关键路线和计算工期

对于双代号网络计划,关键路线是网络图中从始节点到终节点所有路线中持续时间最长的路线,而关键路线的持续时间称为计算工期.但应注意到,对本文讨论的这类网络计划,用式(1)的 D_{ij} 计算得到的计算工期为期望计算工期,其实现的概率仅为50%.

2 施工进度风险计算

网络计划的计算工期决定于关键路线上工作的持续时间,由于工作的持续时间具有不确定性,因而计算工期也具有不确定性,即计算工期 TC 是一随机变量,并可将其用正态分布描述.在计划完工时间 TP 一定的情况下,施工进度就存在风险 P_r ,

$$P_r = P(TC > TP) \tag{10}$$

在传统的分析计算中, P_r 可根据期望关键路线的期望计算工期和相应方差计算.但当出现多条期望关键路线或次期望关键路线和期望关键路线相接近时,会有较大的计算偏差,其期望计算工期偏短,计划实现的可靠度较低^[4].因此,有必要寻找其它方法分析计算 P_r .

从理论上讲,知道工作持续时间的不确定分布后,就可根据式(10),用精确的概率方法求 P_r .但这在数学上很难,以至无法解决.而用MC(Monte Carlo)方法求解 P_r ,可以得到满意的结果^[2,5].

假定工作持续时间近似服从正态分布,工作持续时间用式(1)(2)模型描述时,其抽样近似公式为

$$D'_{ij} = \sigma_{ij} \left(\sum_{k=1}^{12} r_k - 6 \right) + D_{ij} \quad (11)$$

其中: r_k ——随机数; D'_{ij} ——随机工作持续时间。

用 MC 方法求 P_r 的过程 (a) 确定仿真次数 N (b) 估算式 (1) 中 a, m, b (c) 根据工作逻辑关系, 绘制初始网络计划 (d) 产生随机数 r_k , 计算随机工作持续时间 D'_{ij} (e) 用式 (3) 计算 TE_n , 并使 $TC_k = TE_n$ (k 为第 k 次计算) (f) 统计 $TC_k > TP$ 的次数, 并记为 M (g) 计算施工进度计划风险 $P_r, P_r = M/N$ 。

在计算过程中, 同样可得到描述该计划网络的计算工期均值 $\overline{TC}$, 标准差 S 和难度系数 λ :

$$\overline{TC} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N TC_i \quad (12)$$

$$S = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (TC_i - \overline{TC})^2} \quad (13)$$

当计算工期用正态分布描述时, λ 可由 P_r 并借助于正态分布表而查得。

3 施工进度风险规定下的投资优化模型和程序

3.1 施工进度风险规定下的投资优化模型

由 MC 仿真方法可得初始进度计划的风险 P_r , 但应注意到, 当 P_r 较小时, 说明某些工作可进一步推迟施工, 以减少动态投资; 当 P_r 较大时, 说明在规定工期内完工的可能性太小, 一般总将 P_r 控制在某一范围内, 例如, 取 $P_r = 20\%$ 左右。当超出这一范围时, 应对初始网络计划进行调整, 使其满足规定要求。若施工进度计划的风险在规定的范围内, 即可开始进行投资优化。其优化的思路是, 从进度网络计划图中最后一个节点开始, 以此向前, 将各项工作的开始施工时间尽可能推迟, 但其施工进度风险不能超过规定的范围。

优化过程从进度网络计划图最后一个节点 n 开始, 同样用 MC 方法, 仿真 N 次。首先使 $TL_n = TP$; 其次, 根据式 (4) 计算第 j 个节点最迟完成时间 TL_j , 并用下列公式计算工作 (i, j) 从 i 节点到终节点 n 的最长持续时间 TC_{ijn} 。

$$TC_{ijn} = TP - TL_j + D_{ij} \quad i < j < n \quad (14)$$

$$\{TC_{ijn}\}, n = 1, 2, \dots, N$$

用和式 (11) 及 (12) 及 (13) 类似的公式, 计算 TC_{ijn} 的均值 $\overline{TC_{ijn}}$ 和标准差 S_{ijn} 。在此基础上, 再计算在规定进度计划风险范围内工作 (i, j) 的最迟开始时间

$$LS'_{ij} = TP - \overline{TC_{ijn}} - \lambda S_{ijn} \quad i < j < n \quad (15)$$

式中 λ 为难度系数, 由 P_r 查正态分布表确定。

和式 (6) 中 ES_{ij} 相比, 工作按 LS'_{ij} 开始施工时, 可推迟的时间

$$\Delta T1_{ij} = LS'_{ij} - ES_{ij} \quad (16)$$

和式 (9) 中 LS_{ij} 相比, 工作按 LS'_{ij} 开始施工时, 应提前的时间

$$\Delta T2_{ij} = LS_{ij} - LS'_{ij} \quad (17)$$

3.2 施工进度风险规定下的投资优化步骤

施工进度风险规定下的投资优化步骤 (a) 设计规定施工进度风险 P_r (b) 用 MC 仿真方法计算 P_r (c) 若计算的 P_r 不满足规定的 P_r , 则调整初始网络, 若计算的 P_r 满足规定的 P_r , 则继续下步 (d) 确定仿真次数 N (e) 产生随机数 r_k , 计算随机工作持续时间 D'_{ij} (f) 用式 (14) 计算 $\{TC_{ijn}\}, n = 1, 2, \dots, N$ (g) 计算均值 $\overline{TC_{ijn}}$ 和标准差 S_{ijn} (h) 用式 (15) 计算在规定进度计划风险范围内工作 (i, j) 的最迟开始时间 LS'_{ij} (i) 用式 (16) (17) 计算可向后推迟的时间 $\Delta T1_{ij}$ 和 $\Delta T2_{ij}$ 。

4 算 例

某施工进度网络计划如图 1, 规定工期 20.5 个月, 设计规定施工进度风险 $P_r = 25\%$, 其各项工作持续时间估计值见表 1, 用式 (1) 可计算得各工作期望工作持续时间, 结果见表 1。用表 1 中各期望工作持续时间, 并借助于 CPM 法, 可得期望计算工期为 19.91 个月, 同时可得各工作期望最早开始时间 ES_{ij} , 计算结果见表 2。

用 MC 法进行仿真计算, 取仿真次数 $N = 10000$ 次, 得本算例进度网络计划的计算工期的平均值为 20.10

(月)标准差为 0.605(月),施工进度风险 $P_r = 0.249 = 24.9\%$,满足规定的要求.

由 $P_r = 24.9\%$,借助于正态分布表,可查得难度系数 $\lambda = 0.68$,将其代入式(15),再进行仿真分析,可得各工作最迟开始时间 LS'_{ij} ,结果见表 2. LS'_{ij} 减 ES_{ij} 或 LS_{ij} 减 LS'_{ij} ,分别可得 $\Delta T1_{ij}$ 和 $\Delta T2_{ij}$. $\Delta T1_{ij}$ 和 $\Delta T2_{ij}$ 分别表示了在规定施工进度风险条件下,各工作相对于 ES_{ij} 和 LS_{ij} 可推迟或应提前开始施工的时间,其中, ES_{ij} 和 LS_{ij} 是按期望工作持续时间和规定工期(20.5月),用 CPM 法计算所得.

表 1 工作持续时间的估计值和期望

表 2 各工作的 ES_{ij} , LS_{ij} , LS'_{ij} , $\Delta T1_{ij}$ 和 $\Delta T2_{ij}$ 计算值

Table 1 Estimated and expected work duration			Table 2 Calculated results of ES_{ij} , LS_{ij} , LS'_{ij} , $\Delta T1_{ij}$ and $\Delta T2_{ij}$					
工作号 (i , j)	估计工作持续时间/月 $a - m - b$	期望工作持续 时间/月	工作号 (i , j)	ES_{ij}	LS_{ij}	LS'_{ij}	$\Delta T1_{ij}$	$\Delta T2_{ij}$
(1 2)	3.3 - 4 - 4.7	4.00	(1 2)	0.00	0.59	0.00	0.00	0.59
(1 4)	1.3 - 2 - 2.5	1.97	(1 4)	0.00	1.50	1.11	1.11	0.39
(2 3)	5.2 - 6 - 6.8	6.00	(2 3)	4.00	4.59	4.03	0.03	0.56
(2 5)	1.5 - 2 - 2.5	2.00	(2 5)	4.00	14.48	14.30	10.30	0.18
(3 6)	7.5 - 9 - 10.8	8.91	(3 6)	10.00	10.59	10.07	0.07	0.52
(4 6)	4.2 - 5 - 5.6	4.97	(4 6)	1.97	14.53	14.36	12.39	0.17
(4 7)	6.0 - 7 - 8.2	7.03	(4 7)	1.97	3.47	3.10	1.13	0.37
(5 6)	2.5 - 3 - 3.6	3.02	(5 6)	6.00	16.48	16.35	10.35	0.13
(6 8)	0.7 - 1 - 1.3	1.00	(6 8)	18.91	19.50	19.43	0.52	0.07
(7 8)	8.8 - 10 - 11.2	10.0	(7 8)	9.00	10.50	10.23	1.23	0.27

5 结 语

在水利水电工程施工中,每一子项工程(或工作)施工所需的时间不同程度上存在着不确定性.这种不确定性的存在,导致了网络计划工期的不确定性.对于这种类型网络计划,从保证工程进度实现的角度出发,每一工作按最早开始时间开始施工是保险的,但从减少工程投资看,每项工作按最迟开始时间开始施工是有利的.因此,探讨在施工进度风险一定下,尽可能推迟每项工作的开始施工时间,对节省工程动态投资具有实际意义.

表 2 中 $\Delta T1_{ij}$ 是在施工进度风险一定条件下,各项工作可在 ES_{ij} 后开始施工的时间,其最大值为 12.39 ; $\Delta T2_{ij}$ 是在施工进度风险一定条件下,各项工作应在 LS_{ij} 前开始施工的时间,其最大值为 0.59 个月,其余均较小.比较 $\Delta T1_{ij}$ 和 $\Delta T2_{ij}$ 可见,当采用 CPM 法进行分析计算时,各项工作实际开始施工的时间可参考 LS_{ij} ,并适当考虑提前来确定.

本文的分析计算中,工作的持续时间和网络计划的计算工期均按正态分布考虑,这还有待进一步探讨.当然,考虑其它分布时本文的分析计算方法不会有质的变化.

参考文献:

[1] 汪龙腾. 水利水电工程项目管理 [M]. 北京: 水利电力出版社, 1992. 215 ~ 223.
[2] 王卓甫. 水利水电施工进度计划的风险分析 [J]. 河海大学学报, 1999, 27(4): 83 ~ 87.
[3] 聂相田. 建设项目进度控制 [M]. 北京: 水利电力出版社, 1998. 107 ~ 117.
[4] 李庆华. 中国网络计划大全 [M]. 北京: 地震出版社, 1993. 139 ~ 146.
[5] 徐哲, 冯允成. 网络计划进度的风险分析 [J]. 系统工程理论与实践, 1998(4): 24 ~ 28.

Investment Optimization under Certain Schedule Risk for Hydropower Construction

WANG Zhuo-fu ,YANG Zhi-yong ,YANG Jian-ji

(College of International Industry and Commerce , Hohai Univ . Nanjing 210098 , China)

Abstract :The effect of construction schedule on dynamic investment is analysed. Then ,the definition of construction schedule risk is given and the MC simulation method for the schedule risk is proposed. On this basis , a mathematical model of cost optimization under a certain schedule risk is developed and a program of optimization calculation with the help of MC is given.

Key words :construction ; schedule risk ; dynamic investment ; network schedule ; simulation