

# 水利水电施工进度计划的风险分析

王卓甫

陈登星

( 河海大学国际工商学院 南京 210098 ) ( 浙江珊溪水库工程指挥部 温州 325000 )

**摘 要** 分析了水利水电工程施工进度计划的不确定性和风险性 , 讨论了影响施工进度计划的各种不确定量的分布和参数选择问题 , 提出了水利水电施工进度计划风险的计算方法和步骤 .

**关键词** 施工 进度计划 ; 风险分析 ; 仿真

**中图分类号** TV512

在水利水电施工进度计划的编制和实施过程中 , 人们十分关心在某些时刻 , 如截流、拦洪、完工等 , 实现该进度计划的可能性有多大 , 或者说实现该进度计划的风险有多大 .

水利水电施工进度计算和管理中 , 常用的方法有 CPM 和 PERT. CPM 法假定各分部分项工程( 或工序、工作 ) 先后施工的逻辑关系和施工的延续时间均是确定的 , 从而计算每一工作的时间参数、时差和工期 . 与 CPM 法相比 , PERT 法虽多考虑了工作( 工程 ) 施工延续时间的不确定性 , 但比较粗略 . 事实上 , 在水利水电工程施工进度计划编制中 , 经常是根据具体工程的工程量、资源供应情况和定额( 或经验 ) , 估计其所需的实际施工天数 , 然后再根据施工所在时段的有效施工天数 , 确定该工程开始施工的日期和完成施工的日期 . 在此期间 , 完成某工作所需的实际施工天数和月有效施工天数的估算均有较多的不确定因素和较大的不确定性 , 而且施工内容不同、施工时段不同 , 其不确定程度也不一样 . 此外 , 在水利水电施工进度计划编制和控制中 , 某些阶段性规定( 或计划 ) 完工的日期也具有不确定性 . 如 , 截流日期和拦洪日期等 .

因此 , 目前在水利水电施工进度计划编制和控制中 , 若单纯使用 CPM 法和 PERT 法 , 就无法考虑一些不确定因素对其的影响 , 进度计划编制和管理人员也无法了解实施进度计划中风险的大小 . 针对这一情况 , 本文将对影响施工进度计划的不确定因素进行分析 , 并对施工进度计划风险的计算问题进行探讨 .

## 1 施工进度计划风险的定义

施工进度计划风险系指在规定时段内 , 施工项目网络进度计划的计算完工日期超过规定( 或计划 ) 完工日期的概率 . 施工进度计划风险  $P_r$  的数学式表达为

$$P_r = P(T_C > T_p) \tag{1}$$

式中 :  $T_C$ ——根据 CPM 方法计算得到的完工日期 ;  $T_p$ ——规定或计划的完工日期 .  $T_C$  具有不确定性 , 它主要受到完成某工作实际所需时间估计的不确定性和月有效施工天数估计的不确定性的影响 .  $T_p$  常受到水文等因素的制约 , 也具有不确定性 .

## 2 施工进度计划不确定性分析

水利水电施工进度计划中的不确定性 , 或随机性 , 可归纳为主观和客观的不确定性两个方面 . 主观不确定性主要包括完成某分部分项工程( 或工作、工序 ) 所需实际施工天数估计的不确定性 . 客观不确定性主要是由水文、气象等因素引起的 , 主要包括每月有效施工天数的不确定性和规定( 或计划 ) 完工日期的不确定性 .

### 2.1 工作历时估计的不确定性及其分布

在水利水电工程施工中 , 完成某一部分项工程( 或工作、工序 ) 的历时 , 简称工作历时 , 常根据该工作的工程量、合理的资源供应计划和工程定额进行估算 , 或直接根据有关指标和经验进行估计 . 这种估算或估计

均不同程度地存在不确定性,而且不同的施工内容,这种不确定的程度也不同.但在一般情况下,其概率密度应具有以下两个特点<sup>[1]</sup>:

- a. 有一个分布区间 $(a, b)$ ,在此区间上的概率密度始终取有限正值;
- b. 在区间 $(a, b)$ 内,概率密度曲线呈单峰形状.

对一般施工内容, $\beta$ 分布比较符合工作历时的实际分布. $\beta$ 分布在估计区间 $(a, b)$ 内概率密度的表达式为

$$f(x) = \frac{\Gamma(r+s)}{(b-a)^{r+s-2}\Gamma(r)\Gamma(s)}(x-a)^{r-1}(b-x)^{s-1} \quad a \leq x \leq b \quad r > 0 \quad s > 0 \quad (2)$$

其期望值 $E(x)$ 和方差 $D(x)$ 为

$$E(x) = a + (b-a)r/(r+s) \quad (3)$$

$$D(x) = (b-a)^2 \frac{rs}{(r+s)(r+s+1)} \quad (4)$$

对每项工作历时,可用传统的“三点估计”法进行估计<sup>[2]</sup>,用 $a, b, m$ 分别表示乐观估计时间、悲观估计时间和最可能估计时间,所得的期望值和方差分别为 $(a+4m+b)/6$ 和 $(b-a)^2/36$ ,因而有

$$\frac{a+4m+b}{6} = a + (b-a)\frac{r}{r+s} \quad (5)$$

$$\frac{(b-a)^2}{36} = (b-a)^2 \frac{rs}{(r+s)(r+s+1)} \quad (6)$$

由式(5)和式(6),可求得参数 $r$ 和 $s$ ,若 $m=(a+b)/2$ ,则 $r=s=4$ .

## 2.2 每月有效施工天数的不确定性

对于水利水电工程施工,一般而言,采用轮休的办法可不考虑法定假日的停工,但应考虑到水文和气象(如下雨)的影响而引起的停工.例如,土石坝的填筑施工,特别是粘土防渗体的施工,降雨对其影响很大,即每月一定标准雨日的多少,直接影响到有效施工天数.每月有效施工天数可用下式计算:

$$\text{月有效施工天数} = \text{月日历天数} - \text{因水文气象影响的停工天数}$$

上式中,每月因水文气象影响而停工的天数具有不确定性.这种不确定性的分布可借助于历年逐月的大量资料分析而得.在缺乏大量资料的情况下,可假定每月因水文气象影响而停工的天数服从三角分布.三角分布的概率密度函数为

$$f(x) = \begin{cases} \frac{x-a}{(c-a)(b-a)} & a \leq x \leq c \\ \frac{b-x}{(b-a)(b-c)} & c \leq x \leq b \\ 0 & \text{其它} \end{cases} \quad (7)$$

式(7)中, $a, b$ 为估计区间, $c$ 在估计区间内,可取每月因水文气象影响而停工的设计天数.

## 2.3 规定(或计划)完工日期的不确定性

在水利水电工程施工中,像截流、拦洪和发电等阶段性进度计划的控制点,具体日期具有不确定性.截流和发电日期的不确定性受水文因素的影响较大.在有大量资料的情况下,可以分析其分布规律;在没有大量资料的情况下,可假定它们服从三角分布,其概率密度函数表达式见式(7).对于拦洪日期的不确定性,除受到水文不确定性因素的影响外,还受到主观因素的影响,人们习惯上将拦洪日期定在汛期之初,而此时的来水流量达到拦洪设计流量的概率较小,即拦洪水位达到拦洪设计水位的概率较小.因此,可假定拦洪日期的不确定性服从递增三角分布,其概率密度的表达式为

$$f(x) = \frac{x-a}{(b-a)^2} \quad a \leq x \leq b \quad (8)$$

式(8)中,可取 $a$ 为设计拦洪日期, $b$ 为估计可能发生的拦洪日期.

# 3 施工进度计划风险计算

式(1)中 $T_c$ 和 $T_p$ 均是随机量.其中计算完工日期应是开工日期加上关键线路的延长时间,它的随机性主要决定于各项工作估计历时的不确定性和因水文气象原因对各工程施工影响的不确定性.从理论上说,知

道各种不确定量的分布后,可用精确的概率方法计算施工进度的风险,即通过积分求  $P_r$ 。但应看到对式(1)求积分相当复杂,数学上难度极大,以至于无法解决。因此,精确的概率求解法并不适用。而采用蒙特卡罗(Monte Carlo)方法可较方便地计算  $P_r$ 。在目前计算机的计算速度有很大提高的情况下,其计算结果具有一定的精度。

蒙特卡罗方法是一种计算机模拟仿真方法,它的基本思想是构造各随机量的概率模型,然后对概率模型进行抽样试验,并用试验结果作为问题的解。在本文中,随机量的概率模型已经建立,对各种随机量的抽样,则视分布的不同而有差异。

工作历时服从  $\beta$  分布,难以得到抽样公式的表达式,但可用舍选抽样法进行抽样,其抽样过程见图 1。因水文气象而停工的天数和截流日期、发电日期服从三角分布,其抽样公式为

$$x_i = \begin{cases} a + \sqrt{r_i(c-a)(b-a)} & r_i \leq (c-a)(b-a) \\ b - \sqrt{(1-r_i)(b-c)(b-a)} & r_i > (c-a)(b-a) \end{cases} \quad (9)$$

式中: $x_i$ ——月停工的随机天数或截流、发电的随机日期; $r_i$ ——均匀分布随机数;其它符号意义同前。

拦洪日期按递增三角分布考虑,其抽样公式为

$$y_i = a + (b-a)\sqrt{r_i} \quad (10)$$

式中: $y_i$ ——随机拦洪日期; $a$ ——设计拦洪的日期; $b$ ——估计可能出现的拦洪日期。

- 用蒙特卡罗方法计算施工进度风险的步骤如下:
- a. 确定模拟仿真次数  $N$ ;
  - b. 根据工程量、合理的资源供应计划和工程定额等资料,估算每项工作的  $m$ ,  $a$  和  $b$  三个参数;
  - c. 借助于式(5)和式(6)计算  $r$  和  $s$ ;
  - d. 根据气象资料 and 具体施工内容(或工种),估算因气象原因停工的天数和分布区间;
  - e. 计算每项工作施工的起讫日期和日历天数;
  - f. 根据工作间逻辑关系,绘制网络图;
  - g. 若规定(或计划)完工日期具有不确定性,则估计其最可能时间和估计区间;

- h. 产生随机数  $r_i$ ,  $r_1$  和  $r_2$ , 计算随机工作历时、随机有效施工时间和各工作随机日历天数;
- i. 根据网络图确定计算完工日期  $T_C$ ;
- j. 统计  $T_C > T_p$  的次数,并记为  $M$ ;
- k. 计算施工进度计划风险  $P_r$ ,  $P_r = M/N$ 。

用蒙特卡罗方法计算施工进度计划风险时,其计算精度与模拟次数  $N$  有关<sup>[3]</sup>。其计算误差  $\epsilon = X_\alpha \sigma / \sqrt{N}$ 。若置信度系数  $X_\alpha$  和标准差  $\sigma$  一定时,则提高计算精度的途径是增加计算次数,且当精度提高一个数量级时,计算次数必须增加两个数量级。

4 算 例

某水电站土石坝枢纽工程,其截流到拦洪阶段性施工进度网络计划如图 2 所示,计划 11 月 1 日截流,次年 5 月 30 日拦洪。根据初步分析,截流、闭气、排水、基坑开挖和大坝填筑施工在关键路线上,其估算施工历时  $m$  及估计区间  $(a, b)$  数据见表 1。

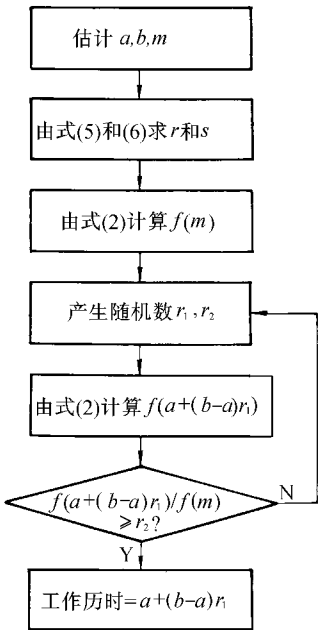


图 1  $\beta$  分布抽样  
Fig.1 Sampling chart for  $\beta$  distribution

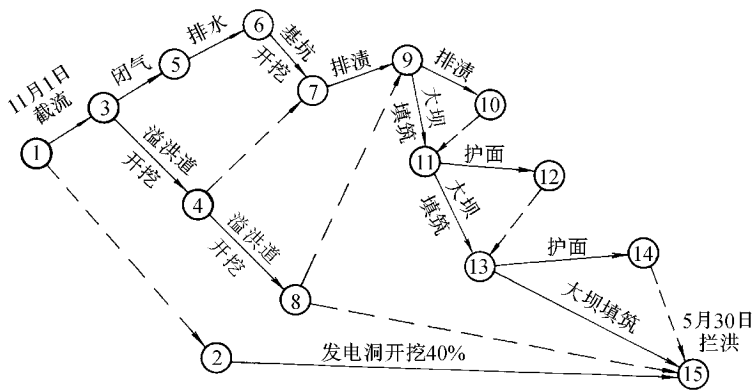


图 2 某水电工程施工进度局部网络

Fig.2 Local network of the schedule at a project

表 1 大坝填筑估算历时  $m$  和估计区间  $(a, b)$  数据

| 工 作  | 估算历时 $m$<br>/d | 区间 1        |             | 区间 2        |             | 区间 3        |             |
|------|----------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
|      |                | $a = 0.95m$ | $b = 1.05m$ | $a = 0.90m$ | $b = 1.10m$ | $a = 0.85m$ | $b = 1.15m$ |
| 截 流  | 2              | 1.90        | 2.10        | 1.80        | 2.20        | 1.70        | 2.30        |
| 闭 气  | 8              | 7.60        | 8.40        | 7.20        | 8.80        | 6.80        | 9.20        |
| 基坑排水 | 5              | 4.75        | 5.25        | 4.50        | 5.50        | 4.25        | 5.75        |
| 基坑开挖 | 20             | 19.00       | 21.00       | 18.00       | 22.00       | 17.00       | 23.00       |
| 大坝填筑 | 125            | 118.75      | 131.25      | 112.50      | 137.50      | 106.25      | 143.75      |

水文、气象因素对施工进度的影响：

a. 水文因素对截流和拦洪日期的影响. 截流拟在 11 月 1 日进行, 不确定变化范围估计为前后 9 d; 设计拦洪日期是截流后次年的 5 月 30 日, 估计可能拖延 15 d.

b. 气象因素主要对大坝填筑施工有影响, 在截流到拦洪这段时间内大坝需停止施工的天数见表 2.

大坝填筑逐月停工天数估计区间为:  $\pm$  估算停工天数  $\times 10\%$ . 关键线路上其它施工内容基本上不受气象因素的影响.

用蒙特卡罗方法进行模拟计算, 取模拟次数  $N = 50\,000$  次, 不同大坝填筑历时估计区间, 其施工进度计划风险计算结果见表 3.

表 2 大坝填筑估算逐月停工天数

Table 2 Estimated days of stopping construction at a certain dam

| 月 份    | 11 | 12 | 1  | 2  | 3  | 4  | 5  |
|--------|----|----|----|----|----|----|----|
| 估算停工天数 | 7  | 8  | 14 | 16 | 20 | 12 | 14 |

表 3 不同大坝填筑历时估计区间施工进度风险计算结果

Table 3 Calculated result of schedule risk in the estimated region for different dam construction duration

| 估计区间方案 $(0.95m, 1.05m)$ $(0.9m, 1.1m)$ $(0.85m, 1.15m)$ | 风险 $P_r$ | 0.0196 | 0.0506 | 0.1211 |
|---------------------------------------------------------|----------|--------|--------|--------|
|---------------------------------------------------------|----------|--------|--------|--------|

由表 3 可见, 当大坝填筑历时估计区间变大时, 施工进度计划风险上升, 且增加幅度较大.

5 结 语

水利水电工程施工进度计划, 由于受到施工历时估计不确定性和水文气象不确定因素的影响, 会给施工进度计划的落实带来风险. 对这种风险若没有充分的认识, 并提前采取必要的措施, 必然会导致施工过程中工程的某些损失, 严重时也有可能导致施工中工程的失事. 如, 土坝没有填筑到设计高程, 拦洪时坝体可能过水. 从本文算例看, 对拦洪这一进度控制点, 施工进度最大风险值达 12.11%. 若没有充分认识这一风险, 提前采取措施, 施工进度不落实的概率有 12.11%, 有可能进而引起坝体过水的问题.

因此, 在编制施工进度计划时, 有必要对其风险作定量分析, 以便有足够的思想准备, 进而严密监控和采取必要的加快施工进度措施.

从本文算例看 ,施工进度计划风险随工作历时估计精度的提高而减小 ,而且减小速度较快 .因此 ,提高估计工作历时精度是减少其风险的措施之一 .

水利水电工程施工进度计划风险分析计算在本文仅是初步 ,其重点在计算方法上作了些探讨 ,有关不确定量的分布及参数的确定问题 ,还有待于以后作大量的分析和研究 .

参 考 文 献

1 李庆华 .中国网络计划技术大全 .北京 :地震出版社 ,1993. 807 ~ 812

2 刘士贤 .建设项目进度控制 .北京 :水利电力出版社 ,1994. 72 ~ 74

3 朱本仁 .蒙特卡罗方法引论 .济南 :山东大学出版社 ,1987. 85 ~ 95

Risk Analysis of Construction Schedule for Water Resource Projects

Wang Zhuofu

( International Business School Hohai Univ. , Nanjing 210098 )

Chen Dengxing

( Zhejiang Shanxi Reservoir Project , Wenzhou 325000 )

**Abstract** The uncertainty and risk of construction schedule for water resource projects construction are analysed. The selection of parameters and distributions which affect uncertainty factors of the schedule are discussed as well. The risk calculation method and program are developed.

**Key words** construction ; schedule ; risk analysis ; imitation

《水利水电科技进展》征订启事

《水利水电科技进展》( 双月刊 ,国内统一刊号 CN32 - 1258/TV ,国际标准刊号 ISSN1006 - 7647 ).主要刊登与水利、水电、水运、海洋、土木、环境等学科有关的文章 ,为水利水电工程建设及运行管理提供有借鉴意义的新颖实用技术和科技信息 .主要栏目有方针与政策、专题综述、研究与开发、规划与勘测、设计与施工、工程管理、经济交流、国外动态等 ,适合广大工程技术人员、科学研究人员、科技管理人员以及大专院校师生阅读 .

本刊由河海大学主办 ,全国各地邮局均可订阅 ,邮发代号 28 - 244 ,1999 年全年订价 30.00 元 ,也可直接汇款至编辑部订阅( 另加包装邮寄费 6.00 元 ).编辑部地址 :南京市西康路 1 号河海大学《水利水电科技进展》编辑部 ,邮政编码 210098 .汇款时务请注明“ 订水利水电科技进展 ”.联系电话 ( 025 )3713777 转 50335 .