

# 水利工程经济效益风险分析

李国芳

(淮海大学水文水资源及环境学院 南京 210098)

**摘 要** 假设水利工程各项子效益和子费用服从正态分布,采用参数解析法和蒙特卡罗法求解水利工程经济效益指标净现值和效益费用比的概率分布.净现值和效益费用比的概率分布,可以提供除期望净现值和期望效益费用比之外的投资成功(或失败)率、最大盈利额和最大亏损额等信息,有助于决策者作出更科学合理的决策.

**关键词** 经济效益指标 风险分析 参数解析法 蒙特卡罗法

**中图分类号** TV214

在进行水资源开发时,必须计算每种可供选择的方案所需的经费和预期能取得的效益,分析其经济效益指标,从中选择最优或较优的方案.

目前我国大多数水利工程的经济评价主要是计算经济效益费用比、净现值、内部收益率、投资回报年限等指标的期望值,并据此进行方案优选.但由于水文现象的随机性及其它不确定性因素(如人口、经济、法律政策、物价等)的影响,实际上每种方案的效益和费用都是不确定的,因此各经济效益指标也是随机变量,只有找出它们各自的概率分布,才能为方案选择提供充分的依据.美国工程科学院 COPEP 委员会认为:决策和效益总是和风险联系在一起的,如决策中仅考虑期望效益和期望费用,就很难提供充分的决策信息. Goicoehea 也指出,在评价工程可行性时,只求出系统的效益费用比是不够的,还应求出系统效益费用比的概率分布<sup>[1]</sup>.

水利工程经济效益风险分析,就是要分析影响工程费用和效益的各个风险因素及其可能发生的变化,对受各风险因素影响的工程经济效益指标的概率分布作出定量估计.

## 1 水利工程经济效益风险分析的方法

一个大型水利工程项目,通常包括灌溉、防洪、发电、旅游、供水等多项子效益以及大坝、溢流坝、输水洞、电站、渠系配套、水库管理等多项子费用.各项子效益和子费用都是可变的,而且还相互影响.因此对一个大型水利工程方案进行经济效益风险分析时,应从系统的观点出发,依据系统的层次性和可分性,将经济效益指标总系统(如净现值、效益费用比)分解成若干子系统(如发电效益、防洪效益、电站投资、大坝费用).先分析各子系统的风险(概率分布),然后由各子系统的风险(概率分布)推求总系统的风险(概率分布)<sup>[2]</sup>.

### 1.1 子系统的风险分析

子系统的风险分析主要是进行子系统的风险识别与估计.其中风险识别就是找出子系统存在的各种潜在风险因素及其可能对子系统带来的影响.风险估计就是将各风险因素的影响定量化,分析出受各因素影响的子系统的概率分布.

由于不同的水利水电工程项目,其功能以及涉及的政治、社会经济、技术、环境因素相差甚远,通常难以依据类似工程的历史统计资料预测拟建工程各子效益(或子费用)的概率分布,而工程兴建前又无实际资料,因此很难从历史资料出发客观地确定子系统的概率分布,通常只能由专家依据现状调查资料和信息及长期的工作经验,对拟建工程某子系统的风险作出预估.设某子效益(或子费用)为  $X$ ,则未来  $X$  出现各种值的可能性都有,让专家直接估计  $X$  出现各种值的可能性是相当困难的,但估计  $X$  的最可能值  $B$ 、最小值  $A$  和最大

值  $C$  还是有可能的. 假设  $X$  服从正态分布, 其值落在  $[A, C]$  区间的概率为 95%, 且  $P = P(X > X_p)$ , 则指定频率  $P$  的  $X$  值即  $X_p = \bar{X} + \Phi\sigma$  (其中  $\bar{X}$  为均值;  $\sigma$  为均方差;  $\Phi$  为离均系数, 可在正态分布表上查出与  $P$  对应的  $\Phi$  值). 因此, 由  $X_{97.5\%} = A, X_{50\%} = B, X_{2.5\%} = C$  可得  $\bar{X} = B, \sigma = (C - A)/3.92$ .

因为  $X$  服从  $N(\bar{X}, \sigma^2)$  分布, 因此其概率密度函数和分布函数分别为

$$f(X) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(X-\bar{X})^2}{2\sigma^2}} \quad F(X) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \int_X^\infty e^{-\frac{(X-\bar{X})^2}{2\sigma^2}} dX \tag{1}$$

同理可得到所有子系统的概率分布.

1.2 总系统的风险分析

总系统的风险分析主要是根据上述各子系统的分布推求出经济效益指标的概率分布, 也就是对系统内某些风险因素发生变化时对经济效益所造成的影响进行全面系统的分析.

经济效益指标的概率分布可通过参数解析法和蒙特卡罗法求得. 参数解析法也称组合频率法. 该方法首先由各子效益和子费用的统计参数通过一定的数学关系式求出总效益和总费用的统计参数, 再由总效益和总费用的统计参数求出水利工程经济效益指标 (如净现值、效益费用比等) 的统计参数, 最后给各经济效益指标配置一定的概率分布线型, 求出其分布. 参数解析法的主要问题是, 推导经济效益指标统计参数的求解公式和选择合适的经济效益指标线型, 当经济效益指标的统计参数不能解析表示时就无法使用. 蒙特卡罗法又称统计试验法. 该方法首先由计算机生成大量服从各子费用或子效益分布的随机数, 然后计算出每个经济效益指标的一系列值, 最后由经济效益指标系列直接确定其统计参数和分布. 比如模拟生成长度为 2000 的各子费用或子效益系列, 同序号所有子效益与所有子费用之差对应一个净现值, 就得到 2000 个净现值. 蒙特卡罗法不必假设经济效益指标的分布线型, 适用范围比参数解析法广.

1.2.1 参数解析法 (组合频率法)

设综合水利工程含有一系列子效益现值  $X_i (i = 1, 2, \dots, m)$  和子费用现值  $X_i (i = m + 1, m + 2, \dots, m + n)$ , 则工程总效益  $B$ 、总费用  $C$ 、净现值  $Z$ 、效益费用比  $Y$  可分别用下式表示:

$$B = \sum_{i=1}^m X_i \quad C = \sum_{i=m+1}^{m+n} X_i \quad Z = B - C \quad Y = B/C \tag{2}$$

假设  $X_i (i = 1, 2, \dots, m + n)$  都服从正态分布, 其均值  $\bar{X}_i$ 、均方差  $\sigma_i$  都已估计出, 则

$$\bar{B} = \sum_{i=1}^m \bar{X}_i \quad \sigma_B^2 = \sum_{i=1}^m \sigma_i^2 + 2 \sum_{i=1}^m \sum_{j=i+1}^m \rho_{ij} \sigma_i \sigma_j \tag{3}$$

$$\bar{C} = \sum_{i=m+1}^{m+n} \bar{X}_i \quad \sigma_C^2 = \sum_{i=m+1}^{m+n} \sigma_i^2 + 2 \sum_{i=m+1}^{m+n} \sum_{j=i+1}^{m+n} \rho_{ij} \sigma_i \sigma_j \tag{4}$$

式中:  $\bar{B}$  —— 工程总效益的均值;  $\bar{C}$  —— 工程总费用的均值;  $\sigma_B$  —— 工程总效益的均方差;  $\sigma_C$  —— 工程总费用的均方差;  $\rho_{ij}$  —— 子系统  $X_i$  和  $X_j$  的相关系数.

总效益和总费用之间的相关系数可由下式计算:

$$\rho_{BC} = \sum_{i=1}^m \sum_{j=m+1}^{m+n} \rho_{ij} \sigma_i \sigma_j / (\sigma_B \sigma_C) \tag{5}$$

由于  $B, C$  都是随机变量, 故  $Z$  也是随机变量, 其均值  $\bar{Z}$  和方差  $\sigma_Z^2$  可由下式计算:

$$\bar{Z} = \bar{B} - \bar{C} \quad \sigma_Z^2 = \sigma_B^2 + \sigma_C^2 - 2\rho_{BC}\sigma_B\sigma_C \tag{6}$$

以上各式都可以通过严格的数学推导得到.

同理, 由于  $B, C$  都是随机变量, 故  $Y = B/C$  也是随机变量, 其均值  $\bar{Y}$  和方差  $\sigma_Y^2$  可近似采用下式计算<sup>[3]</sup>:

$$\bar{Y} = (\bar{B}/\bar{C})(1 + C_{VC}^2 - \rho_{BC}C_{VB}C_{VC}) \quad \sigma_Y^2 = (\bar{B}/\bar{C})^2(C_{VB}^2 + C_{VC}^2 - 2\rho_{BC}C_{VB}C_{VC}) \tag{7}$$

式中  $C_{VB}, C_{VC}$  分别为  $B$  和  $C$  的偏差系数,  $C_{VB} = \sigma_B/\bar{B}, C_{VC} = \sigma_C/\bar{C}$ .

多个不独立的正态分布随机变量经过加、减、除等组合以后的变量服从何种分布, 这难以从理论上加以推导. 为此, 本文假设了正态分布、对数正态分布、 $\Gamma$  分布等三种线型, 以分析  $Z$  和  $Y$  的分布对线型的敏感性.

设  $P = P(Z > Z_p)$ , 则不论对何种线型, 指定频率  $P$  的  $Z$  值都可由式  $Z_p = \bar{Z} + \Phi\sigma_Z$  计算. 其中  $\Phi$  为离均系数. 对于正态分布,  $\Phi$  可根据  $P$  在标准正态分布表中查出; 对于对数正态分布和  $\Gamma$  分布, 取  $Z$  的下限为 -

$(\bar{C} + 5\sigma_C)$ , 可分别算出其  $C_S$  值,  $\Phi$  值可由  $P$  和  $C_S$  在相应的离均系数表中查出. 于是得三种不同分布下的  $Z \sim P$  关系曲线.

取  $Y$  的下限为 0, 用同样的方法可得到三种不同分布下的  $Y \sim P$  关系曲线.

应该指出, 由于  $\rho_{ij} (i = 1, 2, \cdots, m + n; j = i + 1, i + 2, \cdots, m + n)$  通常缺乏客观数据, 一般也是通过主观判断确定的. 当不考虑各  $X_i (i = 1, 2, \cdots, m + n)$  之间的相关性时, 只要取上述各  $\rho_{ij}$  等于零即可.

1.2.2 蒙特卡罗法(MC 法)

对每个  $X_i (i = 1, 2, \cdots, m + n)$ , 首先由计算机生成长度为  $L$  的服从  $N(\bar{X}_i, \sigma_{X_i}^2)$  分布的随机序列, 然后按式(2)计算  $Z$  和  $Y$  的值, 得到长度为  $L$  的  $Z, Y$  序列, 根据  $Z$  和  $Y$  的序列直接确定其统计参数和分布. 这里没有考虑各  $X_i (i = 1, 2, \cdots, m + n)$  之间的相关性.

2 算 例

拟建某综合利用大型水库, 其开发目标以灌溉为主, 兼有防洪、发电等任务, 工程经济计算期  $N$  以 40 a 计, 开始受益的第一年年初为基准年, 经济折算率以 7% 计. 工程的子效益有灌溉、防洪、发电等, 子费用有主体(大坝)工程、灌溉工程、电站等, 结合类似工程的历史统计资料及有关专家的估计, 得出工程某方案各子效益、子费用现值的最低值、最可能值、最高值, 详见表 1.

表 1 某方案各子效益、子费用现值的估计值

Table 1 The present value of subbenefits and subcosts for a certain alternative

百万元

| 子 系 统 |        | 最低值    | 最可能值   | 最高值    | 期望值    | 均方差    |
|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 效益系统  | 1 灌溉   | 221.23 | 314.10 | 406.98 | 314.10 | 47.385 |
|       | 2 防洪   | 62.10  | 218.85 | 375.60 | 218.85 | 79.974 |
|       | 3 发电   | 51.09  | 59.50  | 67.90  | 59.50  | 4.288  |
| 费用系统  | 4 主体工程 | 78.00  | 90.50  | 103.00 | 90.50  | 6.378  |
|       | 5 灌溉工程 | 115.00 | 137.00 | 159.00 | 137.00 | 11.224 |
|       | 6 电站等  | 255.00 | 283.00 | 311.00 | 283.00 | 14.286 |

综合利用大型水库各子系统之间是有一定联系的. 比如, 一般来说灌溉工程的费用大, 则相应的灌溉效益也比较大, 大坝工程投资大, 相应的防洪、发电效益也比较大, 所以它们之间存在一定的正相关关系; 又比如, 在工程规模不变的情况下, 由于水文变量的随机性, 遇连续丰水年组时, 防洪和发电效益较大, 但灌溉效益可能就比较小, 反之遇连续枯水年组时, 防洪和发电效益较小, 但灌溉效益可能就比较小, 所以它们之间存在一定的负相关关系.

通过专家组的讨论, 各子效益和子费用之间的相关系数见表 2.

分(a)考虑各子系统之间的相关性和(b)不考虑各子系统之间的相关性两种情况, 根据式(3)~(7)分别算出该方案净现值及效益费用比的均值和均方差, 结果列于表 3.

表 2 某方案各子效益和子费用之间的相关系数

Table 2 The coefficient of correlation between subbenefits and subcosts for a certain alternative

|       | $X_1$ | $X_2$ | $X_3$ | $X_4$ | $X_5$ | $X_6$ |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $X_1$ | 1.0   | 0.0   | -0.4  | 0.0   | 0.3   | 0.0   |
| $X_2$ | 0.0   | 1.0   | 0.0   | 0.2   | 0.0   | 0.0   |
| $X_3$ | -0.4  | 0.0   | 1.0   | 0.3   | 0.0   | 0.6   |
| $X_4$ | 0.0   | 0.2   | 0.3   | 1.0   | 0.3   | 0.0   |
| $X_5$ | 0.3   | 0.0   | 0.0   | 0.3   | 1.0   | 0.0   |
| $X_6$ | 0.0   | 0.0   | 0.6   | 0.0   | 0.0   | 1.0   |

表 3 工程净现值及效益费用比的统计参数

Table 3 The statistical parameter of net current value and benefit-cost ratio

| 情况  | 总效益/百万元 |       | 总费用/百万元 |       | 净现值/百万元 |       | 效益费用比 |        |
|-----|---------|-------|---------|-------|---------|-------|-------|--------|
|     | 均值      | 均方差   | 均值      | 均方差   | 均值      | 均方差   | 均值    | 均方差    |
| (a) | 592.45  | 92.18 | 510.50  | 20.34 | 81.95   | 91.09 | 1.161 | 0.1789 |
| (b) | 592.45  | 93.06 | 510.50  | 19.25 | 81.95   | 95.02 | 1.162 | 0.1875 |

分别假设  $Z$  和  $Y$  的线型为正态、对数正态、 $\Gamma$  分布, 得到考虑相关性时  $Z$  的三种不同的概率分布(表 4)

和  $Y$  的三种不同的概率分布(表 5)。

表 4  考虑相关性时指定累积频率对应的净现值

| Table 4  The net present values corresponding to different frequencies with consideration of correlation |        |        |        |        |       |      |         |         | 百万元     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------|--------|--------|--------|-------|------|---------|---------|---------|
| 频率                                                                                                       | 0.01   | 0.05   | 0.10   | 0.20   | 0.50  | 0.80 | 0.90    | 0.95    | 0.99    |
| 正态                                                                                                       | 294.19 | 231.79 | 199.00 | 158.92 | 81.95 | 4.98 | - 35.10 | - 67.89 | - 130.3 |
| 对数                                                                                                       | 320.50 | 241.08 | 201.46 | 156.00 | 76.12 | 4.34 | - 30.00 | - 57.05 | - 104.3 |
| $\Gamma$                                                                                                 | 311.28 | 238.23 | 200.91 | 157.19 | 78.03 | 4.34 | - 43.01 | - 60.78 | - 112.2 |

表 5  考虑相关性时指定累积频率对应的效益费用比

| Table 5  The benefit-cost ratios corresponding to different frequencies with consideration of correlation |       |       |       |       |       |      |       |       |       |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|------|-------|-------|-------|
| 频率                                                                                                        | 0.01  | 0.05  | 0.10  | 0.20  | 0.50  | 0.80 | 0.90  | 0.95  | 0.99  |
| 正态                                                                                                        | 1.578 | 1.455 | 1.391 | 1.312 | 1.161 | 1.01 | 0.931 | 0.867 | 0.744 |
| 对数                                                                                                        | 1.639 | 1.476 | 1.396 | 1.305 | 1.148 | 1.01 | 0.943 | 0.892 | 0.804 |
| $\Gamma$                                                                                                  | 1.617 | 1.470 | 1.395 | 1.308 | 1.152 | 1.01 | 0.938 | 0.883 | 0.786 |

同样,假设  $Z$  和  $Y$  的线型为正态、对数正态、 $\Gamma$  分布,得到不考虑相关性时  $Z$  和  $Y$  的三种不同的概率分布。另又通过蒙特卡罗方法得到  $Z$  和  $Y$  的概率分布,结果分别列于表 6、表 7。

表 6  不考虑相关性时指定累积频率对应的净现值

| Table 6  The net present values corresponding to different frequencies without consideration of correlation |        |        |        |        |       |      |         |         | 百万元     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------|--------|--------|--------|-------|------|---------|---------|---------|
| 频率                                                                                                          | 0.01   | 0.05   | 0.10   | 0.20   | 0.50  | 0.80 | 0.90    | 0.95    | 0.99    |
| 正态                                                                                                          | 303.35 | 238.26 | 204.05 | 162.24 | 81.95 | 1.66 | - 40.15 | - 74.36 | - 139.5 |
| 对数                                                                                                          | 341.40 | 250.99 | 207.19 | 157.87 | 73.54 | 1.13 | - 32.60 | - 58.49 | - 102.4 |
| $\Gamma$                                                                                                    | 322.09 | 245.37 | 206.24 | 160.34 | 81.36 | 0.99 | - 36.64 | - 66.47 | - 119.7 |
| MC 法                                                                                                        | 307.35 | 239.42 | 203.69 | 160.87 | 80.34 | 1.59 | - 38.87 | - 71.91 | - 133.0 |

表 7  不考虑相关性时指定累积频率对应的效益费用比

| Table 7  The benefit-cost ratios corresponding to different frequencies without consideration of correlation |       |       |       |       |       |      |       |       |       |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|------|-------|-------|-------|
| 频率                                                                                                           | 0.01  | 0.05  | 0.10  | 0.20  | 0.50  | 0.80 | 0.90  | 0.95  | 0.99  |
| 正态                                                                                                           | 1.598 | 1.471 | 1.402 | 1.320 | 1.162 | 1.00 | 0.922 | 0.853 | 0.726 |
| 对数                                                                                                           | 1.664 | 1.494 | 1.410 | 1.314 | 1.147 | 1.00 | 0.934 | 0.882 | 0.794 |
| $\Gamma$                                                                                                     | 1.642 | 1.487 | 1.408 | 1.316 | 1.152 | 1.00 | 0.929 | 0.871 | 0.770 |
| MC 法                                                                                                         | 1.614 | 1.475 | 1.403 | 1.317 | 1.157 | 1.00 | 0.925 | 0.862 | 0.746 |

结果表明,参数解析法取三种不同线型所得净现值、效益费用比的概率分布曲线基本一致,差异主要表现在曲线的两端,说明净现值和效益费用比的分布对线型不很敏感。参数解析法的关键之一就是选线型,净现值和效益费用比对线型的不敏感性,可以在一定程度上减小由于使用过程中线型选择不当而带来的误差。在不考虑各子系统相关性的情况下,正态分布给出了与蒙特卡罗法最接近的结果,建议在各子系统相关系数不大的情况下,净现值、效益费用比仍可选择正态分布。尽管在上例中,考虑相关性和不考虑相关性的差别不大,但换一个方案这种差别可能就比较大。由于各子系统之间的联系是客观存在的,建议在进行经济效益评价时应尽量考虑相关性。一般考虑相关性后,经济效益指标的波动会有所减小,减小量因具体方案而异。

考虑相关性的正态分布结果见表 4 和表 5,从中可以得出该方案的期望净现值、期望效益费用比、投资成功率。设‘最大值’和‘最小值’包含各指标 98% 的置信区间(另 2% 因出现概率较小而视为实际不可能发生),则还可以得到方案的最大盈利额、最大亏损额、最大效益费用比和最小效益费用比,结果见表 8。

表 8 方案的经济效益指标值

Table 8 The economic benefit indices for a certain alternative

| 期望净现值<br>/百万元 | 期望效益<br>费用比 | 投资<br>成功率 | 最大盈利额<br>/百万元 | 最大亏损额<br>/百万元 | 最大效益<br>费用比 | 最小效益<br>费用比 |
|---------------|-------------|-----------|---------------|---------------|-------------|-------------|
| 81.95         | 1.161       | 0.81      | 294.19        | 130.29        | 1.578       | 0.744       |

同理,对其它方案也可以得出以上一组指标.如果有一个方案,它的每一单项指标均为最优,则该方案就是‘最理想方案’.但实际上各评价指标往往相互矛盾,如有的方案收益很大,可失败率也很高,有的方案效益费用比很高,可总收益不大等,因此必须对上述各指标进行综合.比如采取一定的方法将各指标值转换成‘得分’,按每一个指标的重要性确定权重,最后求各单项‘得分’的加权平均;“加权平均分”高者为优.

3 结 语

本文基于水利工程项目中各项效益和费用服从正态分布的假设,以净现值和效益费用比指标为例,通过参数解析法和蒙特卡罗法分析了净现值和效益费用比的概率分布曲线.以净现值和效益费用比的分布曲线为基础,可以得出除期望净现值和效益费用比外的投资成功(或失败)率、最大盈利额、最大亏损额、最大效益费用比、最小效益费用比等信息,有助于决策者作出更科学合理的决策.

参 考 文 献

1 黄志中,周之豪.水电工程投资的多目标风险决策.水利经济,1994(2):10~16  
2 赵保障,李存斌.水利工程经济效果风险分析.见 赵宝璋主编.水利经济论文选集.北京:中国科学技术出版社,1990.59~66  
3 Dandy G C.分析效益费用比不确定性的一种近似方法.刘汉龙译.水利经济,1988(1):51~56

Risk Analysis of Economic Benefits for Water Projects

Li Guofang

(College of Water Resources and Environment, Hohai Univ., Nanjing 210098)

**Abstract** On the assumption that subbenefits and subcosts of water projects obey normal distribution, the probability distributions of economic benefit indices, such as net present value and benefit-cost ratio, are obtained by the analytical method and the Monte-Carlo method. Besides the expectances of net present value and benefit-cost ratio, the probability distributions can offer more information, such as the probability of success (or failure), the maximum benefits, and the maximum deficits, which are helpful for reasonable decision-making.

**Key words** economic benefit indices ; risk analysis ; analytical method ; Monte-Carlo method