水利工程经济评价风险分析方法

罗高荣 著

浙江大学出版社

进行了比较系统的研究，其内容包括了国内外绝大部分有关水利水电建设项目经济评价中风险率分析与计算的最新成果。由于水利水电工程经济评价风险分析方法应用的历史不长，笔者水平有限，又资料收集可能不尽全面且成书仓促，恳切希望广大同行批评指正，或者就本书提供的议题展开讨论，以促进水利水电工程经济评价风险分析方法研究的进展。笔者谦以此微不足道的劳动，作为对我国水利水电工程经济专业的一点微薄贡献。

罗高荣

一九八九年七月一日

3.其它几种决策指标的风险率分析计算………（ 47 ）

五、风险率随机模拟分析………………………………（ 55 ）

1.模拟分析理论基础………………………………（ 55 ）
2.模拟分析在风险率分析中的应用……………（ 60 ）

六、风险变量的相关分析……………………………（ 64 ）

1.主观判断法……………………………………（ 64 ）
2.作图估计法……………………………………（ 64 ）
3.借鉴资料法……………………………………（ 65 ）
4.相关计算法……………………………………（ 65 ）

七、风险变量的分布特点及参数估计………………（ 68 ）

1.风险变量的分布特点…………………………（ 68 ）
2.风险变量的参数估计…………………………（ 74 ）
3.防洪工程的效益估计…………………………（ 75 ）

八、盈亏平衡分析与敏感性分析……………………（ 85 ）

1.盈亏平衡分析…………………………………（ 85 ）
2.敏感性分析……………………………………（ 88 ）

九、经济评价风险决策方法…………………………（ 91 ）

1.几种简单决策方法……………………………（ 91 ）
2.无信息的贝叶斯决策方法……………………（ 97 ）
3.有信息的贝叶斯决策方法……………………（ 99 ）

十、结　　语……………………………………………（ 103 ）
参考文献…………………………………………………（ 104 ）

一、概　述

众所周知，水利水电工程的技术经济指标是决定工程开发规模、乃至决定能否兴建的重要因素，因此在工程的可行性研究和设计阶段就需要对工程的技术经济特性进行详细分析论证，广为收集有关经济分析的基础资料，并在社会的、经济的、生态的以致人们的心理角度对这些资料进行分析论证，应用某些特定的决策标准和决策方法，衡量分析比较工程兴建的可行程度。目前在水电工程经济分析与评价中常使用的一些方法有：内部经济回收率法、净效益现值法、支出费用法等等。这些方法均为有关经济计算与评价规程规范所规定使用的方法，已为广大水利水电经济工作者所熟悉，而且其决策评价结果也基本可以反映水电工程的实际情况。然而如果在使用这些方法时只按有关经济指标的均值进行计算，不考虑其随机影响，在某些情况下，其结果可能不反映工程的客观实际，尤其是在工程的方案比较中，各方案的特征参数随机特性有较大差异时更是这样。因此有必要研究工程经济评价中的风险分析方法问题，以使其整个工程的经济评价更符合客观实际。

1.水利水电工程经济分析中的可靠性概念

水电工程由于有其自己的特点而使其技术经济指标在工程的整个运用期间呈现随机波动。比如发电效益，由于其一方

面跟河流的径流特性有关，另一方面也跟工程的故障特性、系统负荷图上的工作位置等因素有关，这些因素的随机特性使得水电工程的发电效益呈现随机波动。另外，水电工程的年运行维护费也是一随机量，由于故障修复费用、防洪费用以及其它多种不确定因素的影响，使得其年运行费在年际之间呈现随机波动，就是工程总投资，在设计阶段的估计值也为不确定量，这些均已为众多工程实际所证实。

水利水电工程经济分析评价中的风险率被定义为：当考虑特征指标的随机性时，工程在整个运用期间获取某一决策指标小于（当决策目标为极大化）或大于（当决策目标为极小化）某一规定值的可能性或概率。上述定义的风险率指标考虑了经济指标的随机特性和信息。当进行决策时，不仅应考虑获取决策指标的大小，而且要考虑获取该规定指标的风险率，综合这两方面的情况，得出符合客观实际的决策结果。

2.水利水电工程经济评价风险率分析的发展

有关工程的可靠性设计理论和风险分析方法最早由军工生产部门于50年代提出，至80年代初才日臻完善起来，正在形成一个比较完整的学科。在70年代后期这一学科逐步向水资源经济评价领域渗透，并最早在美国水资源开发中得以应用。为了让联邦水资源机构进行效益—费用分析时有一可资遵循的准则，1978年6月12日，卡特总统在对水利资源委员会工作的指示中，强调了系统地进行风险率和不确定性分析的需要。1979年5月24日，水利资源委员会讨论并通过了工程评价方法草案，以便于规划设计人员处理风险率与不确定性问题，在这一草案中建议：“可以通过灵敏度分析的途径

求出效益—费用比的变化区间。所谓灵敏度分析就是通过改变经济、人口、环境及其它有关要素的特征值来考察其对效益—费用比的影响。”并指出：“当证明一套概率估计值能够用于描述效益—费用比变化区间的特性时，就可以用各种适用的方法来处理这些概率估计值。但需注意，如果概率估计值的大小已经确定，那么在规划说明书中应当讲明，由于它带有主观性，所以不一定能客观地反映长系列水文记录的特性。”该草案还提出了在工程目的与造价、施工期限分析及规划阶段中，区分风险率与不确定性的一般性概念。

进入80年代以来，许多国家的水利工程规划人员均注意到了工程评价中的风险率与不确定性分析问题。作为一些基本概念，在一些教科书与论著中时有所见。到目前为止，不仅在其概念上而且在计算处理方法和手段上均有创新，形成了一门日臻完善的学科。我国开展此项研究工作始于80年代初期。据笔者统计，至目前为止，见诸于各种文献和杂志的有关论文已有20余篇，有些研究成果已处在国际前列，作为一套正规的不确定性和风险率分析处理办法，已经在有关的规程规范中出现，标志着我国关于水利水电工程经济评价风险率与不确定性分析已由研究阶段发展到应用阶段。

二、风险率近似计算分析方法

近似计算分析方法是对水电工程风险率与不确定性进行近似估计的方法。这种方法尤其适用于不容易取得较长序列资料的情况。应用这种方法时，首先估算出决策指标（益本比、内部回收率等）的三个特征值，即：期望值、最优值与最不利值。期望值是指在相同条件下多次重复某一事件时可

能性最大、出现次数最多的特征值；最优值是指事态发展极为顺利，将能够实现的最理想结果；最不利值是指事态进展极为不利时的最不理想结果。事实上最优值和最不利值给定了决策指标的可能取值范围，并规定以上范围为“95%的置信区间”。

如果上述三个参数确定之后便可对变量的均值和方差进行估计，并结合问题的特点，确定出具有一定分布特征的概率分布，这种概率分布可用一些典型的概率分布规律来拟合。在水利水电工程经济评价风险率分析中，如下一些分布应用较多。

1.三角形分布

设随机变量服从三角形分布，则有概率密度函数

$$f(x)=\begin{cases}\dfrac{2(x-x_c)}{(x_b-x_c)(x_a-x_b)}, & x_c\leqslant x\leqslant x_b\\ 0, & \text{其它}\\ \dfrac{2(x_a-x)}{(x_a-x_b)(x_a-x_c)}, & x_b\leqslant x\leqslant x_a\end{cases}\tag{1}$$

式中：x_c为最优值；x_b为期望值；x_a为最不利值。

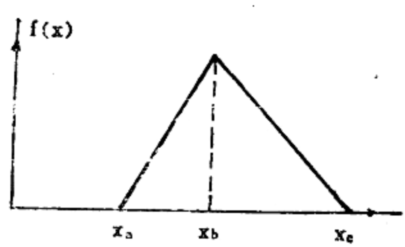

图1　三角形分布概率密度曲线

这一分布是美国泰勒(Taylor)等人于1979年为模拟水资源规划中效益费用分析时提出的。由于其分布形状简单，使其在状态模拟中有较好的应用结果。但因其解析性差，在应用中受到了一定的限制。

2.威布尔分布

如果随机变量服从威布尔分布，其概率密度函数的数学表达式为：

$$f(x)=\begin{cases}\left(\dfrac{\beta}{\alpha}\right)\left(\dfrac{x-K}{\alpha}\right)^{\beta-1}\exp\left\{-[(x-K)/\alpha]^{\beta}\right\}, & K\leqslant x\\ 0 & K>x\end{cases}\tag{2}$$

式中：α、$\beta>0$，$K\geqslant 0$

根据三个参数α、β、K值便可以完全确定威布尔分布。α、β、K三个参数的不同数值可使威布尔分布具有不同的分布

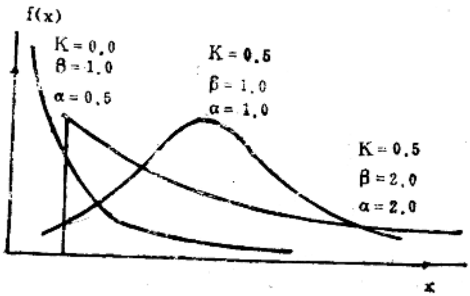

图 2　威布尔分布概率密度曲线

形状。威布尔分布有较好的解析特性，所以应用较为广泛。

为了将威布尔分布应用于水利水电工程经济评价风险分析，可按下述方法进行数学处理，设x_a、x_b、x_c为最不利值、期望值和最优值，可导出威布尔分布的下列数学性质：

$$\alpha=\left(\frac{\beta}{\beta-1}\right)^{1/\beta}(x_b-K)$$

$$1-P_a=\exp\left[-\left(\frac{\beta-1}{\beta}\right)\left(\frac{x_a-K}{x_b-K}\right)^{\beta}\right] \qquad (3)$$

$$P_c=\exp\left[-\left(\frac{\beta-1}{\beta}\right)\left(\frac{x_c-K}{x_b-K}\right)^{\beta}\right]$$

式中：$P_a=P(x\leqslant x_a)$、$P_c=P(x\leqslant x_c)$。

根据置信区间为95%的假设，取$P_c=0.025$，$(1-P_a)=0.975$。这样上述三个方程对应于三个未知数α、β、K，因此可求得此三个未知数值。因为威布尔分布的分布形态具有可塑性，便于将主观因素考虑在内，而且有较好的解析性，容易进行数学变换，一些学者如美国的马什尔(Marcer)、摩根(Morgan)极力推荐采用此分布进行水资源工程经济评价风险率与不确定性分析。

3.伽玛分布

伽玛分布的概率密度函数为：

$$f(x)=\begin{cases}\dfrac{x^{\alpha-1}\exp[-x/\beta]}{\Gamma(\alpha)\beta^{\alpha}}, & x>0\\ 0, & 其它\end{cases} \qquad (4)$$

式中α、β为参数

该概率密度函数的一、二次矩为：

均值：$E(x)=\mu=\alpha\beta$

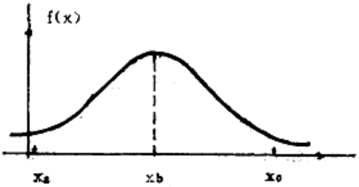

图3 伽玛分布概率密度曲线

方差：$E(x-\mu)^2=\sigma^2=\alpha\beta^2$ （5）

当参数α、β为未知时，可以通过下式估计其均值与方差（μ、σ^2）：

$$\mu=x_b$$

$$\sigma^2=\left[\frac{1}{6}(x_c-x_a)\right]^2 \qquad (6)$$

伽玛分布与威布尔分布相比，其优点是只需两个参数值α与β，就可完全确定其分布形状。伽玛分布的解析特性亦较好，从而有可能通过解析方法进行数学变换和处理，集中考虑各个随机变量的综合效应。

4.正态分布

正态分布是应用最多的一种分布，其概率密度函数为：

$$f(x)=\frac{1}{\sqrt{2\pi}\,\sigma}\exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2\right],$$

$$-\infty<x<+\infty \qquad (7)$$

式中：μ为均值，σ^2为方差。

正态分布的随机变量其取值范围为（$-\infty$，$+\infty$）。因此，在输入分量只有非负值的经济评价风险分析中，正态分布的应用受到了限制。但是由于正态分布函数具有很好的解析特性，尤其是正态分布变量之和、之差仍为正态分布，这给集中考虑各种随机变量的综合效应带来了极大的方便，因此在经济评价风险率分析中仍然得以很广泛的应用。实践证明，正态分布变量的均值和方差估计可用下式完成

$$\mu = x_b$$

$$\sigma^2 = \left[\frac{1}{6} (x_c - x_a) \right]^2$$

或者有：

$$\begin{aligned} \mu &= \left(\frac{x_c + 4x_b + x_a}{6} \right) \\ \sigma^2 &= \left[\frac{1}{6} (x_c - x_a) \right]^2 \end{aligned} \qquad (8)$$

另外还有一些分布如对数正态分布，皮尔逊Ⅲ型分布等也可应用于经济评价的风险率分析中，这里不一一列举。

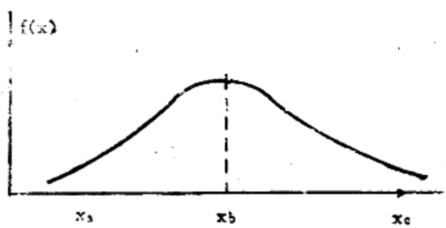

图 4　正态分布概率密度函数

5.近似计算方法

当应用如上一些分布进行水利水电工程经济评价风险率分析时，各种随机因素的影响均在决策指标单序列中表现出来，或者说工程经济评价中决策指标的随机波动是众多随机因素作用的结果。应用上述概率分布密度函数的积分便可估计出决策指标获取的可靠性或者风险率指标。在决策目标为极大化情况下，决策指标不小于某一规定值x_0的概率计算为：

$$P(x \geqslant x_0)=\int_{x_0}^{x_0} f(x)\mathrm{d}x \tag{9}$$

风险率为：

$$F(x)=1-P(x)=1-\int_{x_0}^{x_0} f(x)\mathrm{d}x=\int_{x}^{x_0} f(x)\mathrm{d}x \tag{10}$$

当决策目标为极小化时，有风险率

$$F(x \geqslant x_0)=\int_{x_0}^{x_0} f(x)\mathrm{d}x \tag{11}$$

其中：$P(x)$为可靠率，$F(x)$则为风险率。

如果随机变量服从正态分布，则有

$$P(x \geqslant x_0)=\int_{x_0}^{\infty} f(x)\mathrm{d}x \tag{12}$$

$$F(x<x_0)=1-\int_{x_0}^{\infty} f(x)\mathrm{d}x=\int_{-\infty}^{x_0} f(x)\mathrm{d}x \tag{13}$$

例 1： 某水电工程一推荐方案与火电替代方案的计算益本比（期望值）均为1.8。通过分析，两方案的益本比年际之间的变化可用参数为(μ, σ^2)的正态分布来描述，其概率密度函数为：

$$f(x)=\frac{1}{\sqrt{2\pi}\,\sigma}\exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2\right],$$

$$-\infty<x<+\infty \qquad (14)$$

在水能规划设计中，通过对各种影响因素的组合分析，估算出工程益本比的特征值如表 1 所示。

表 1

方案 \ 特征值	益本比最小值x_a	益本比期望值x_b	益本比最大值x_c
水　　电	1.1	1.8	2.9
火　　电	1.4	1.8	2.1

近似估计随机变量特征参数如下：

$$E(x)=\mu\doteq x_b$$

$$E(x-\mu)^2=\sigma^2\doteq\left[\frac{1}{6}(x_c-x_a)\right]^2$$

得：水电：$\mu_s=1.8$，$\sigma_s^2=(0.3)^2$

火电：$\mu_h=1.8$，$\sigma_h^2=(0.117)^2$

在分析评价各个比较方案的优劣时，不仅应分析各工程益本比的期望值大小，大多数情况下规划工作者更感兴趣的是各方案益本比大于等于某个规定值的可能性或概率为多少，或者说各方案获取某规定的益本比的风险率是多少，显然

$$F_h(-\infty < t \leqslant -2.6) = \int_{-\infty}^{-2.6} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left[-\frac{1}{2}t^2\right]dt$$

$$= 0.00466$$

这就是说对于该水电方案，在工程运用期间获取不小于1.5益本比的风险率为0.25803，而作为替代的火电方案获取不小于1.5益本比的风险率则为0.00466。

当$x_0 = 2.0$时

水电：$t_s = \frac{x_0 - \mu}{\sigma} = \frac{2 - 1.8}{0.3} = 0.667$

火电：$t_h = \frac{x_0 - \mu}{\sigma} = \frac{2 - 1.8}{0.117} = 1.7$

因此有：

$$F_s(-\infty < t \leqslant 0.667) = \int_{-\infty}^{0.667} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left[-\frac{1}{2}t^2\right]dt$$

$$= 0.7453$$

$$F_h(-\infty < t \leqslant 1.7) = \int_{-\infty}^{1.7} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left[-\frac{1}{2}t^2\right]dt$$

$$= 0.955$$

即该水电方案在工程运用期间获取益本比小于2.0的概率为0.7453，而火电替代方案则为0.955。

从以上计算结果可见，在水、火电方案比较中，虽然火电满足中等益本比的风险率要小，但其获取高额益本比的风险率要远高于水电。

当随机变量服从正态分布且统计独立时，随机变量的任一线性组合均仍服从正态分布，因此可利用正态分布的

这一特点，集中考虑某些随机变量的综合影响，以使其结果更符合客观实际。对于诸如年净收益法等等方法，需要考虑多种随机变量复合影响的情况，便可利用正态分布的这一特点解决决策指标的风险率计算问题。比如年净效益法有如下算式：

$$B = S - (\beta K + C) \tag{15}$$

式中：B为年净收益，S为总收益，K为工程总投资，C 为工程年运行维护费，β 为资金回收系数，有 $\beta = i(1+i)^n / ((1+i)^n - 1)$，$i$ 为国民经济平均投资收益率，n为工程经济使用年限。

进一步设：$\beta K + C = x$，则有$B = S - x$.

因效益与费用对于火电工程可近似视为统计独立的随机变量，应用随机变量S，x的线性组合$S - x$的概率分布规则来计算其风险率问题，有二维随机变量的概率密度函数为：

$$f_{sx},(x, S)$$

则有：

$$\begin{aligned} F_B(B) &= 1 - P_B(B) = 1 - \iint f_{s,x}(S,x)\,dS\,dx \\ &= 1 - \int_{-\infty}^{-\infty}\int_{-\infty}^{B}\limits_{[g(x,s)=B]} f_{s,x}(g^{-1},x)\left|\frac{\partial g^{-1}}{\partial B}\right| dB\,dx \end{aligned} \tag{16}$$

式中：$g^{-1} = g^{-1}(x,B)$

若S,x均服从正态分布时，有S,x的联合概率密度函数为：

$$f_B(B) = \frac{1}{2\pi\sigma_s\sigma_x}\int_{-\infty}^{\infty} e^{-\frac{1}{2}\left\{\left(\frac{B+x-\mu_s}{\sigma_s}\right)^2+\left(\frac{x-\mu_x}{\sigma_x}\right)^2\right\}} dx$$

经简化后有：

$$f_B(B) = \frac{1}{\sqrt{2\pi(\sigma_s^2 + \sigma_X^2)}} \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left[\frac{B - (\mu_s - \mu_x)}{\sqrt{\sigma_s^2 + \sigma_X^2}} \right]^2 \right\}$$

年净收益不大于某一规定值B_0的概率，即风险率为：

$$F(B < B_0) = \int_{-\infty}^{B_0} f_B(B)\,dB = \int_{-\infty}^{B_0} \frac{1}{\sqrt{2\pi(\sigma_s^2 + \sigma_X^2)}} \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left[\frac{B - (\mu_s - \mu_x)}{\sqrt{\sigma_s^2 + \sigma_X^2}} \right]^2 \right\} dB$$

例 2：某小型水电站具有14年的年总收益与年费用样本资料，经分析之后得其频率分布直方图如图 6 、图 7 所示。

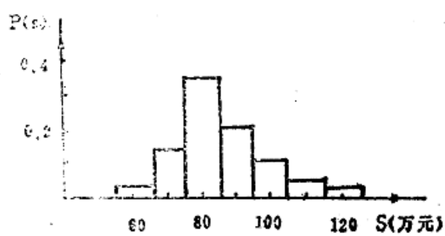

图 6　年效益频率直方图

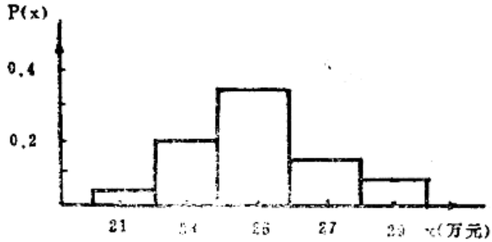

图 7　年运行费频率直方图

该电站的总收益与总费用特征值见表 2。

表 2

总收益	S_c	S_b	S_a	总费用	x_c	x_b	x_a
特征值（万元）	122	80	59	特征值（万元）	31	25	21

各变量正态分布的方差和均值可通过（8）式估算，因此有：

$$N_s(\mu_s,\ \sigma_s^2) = N_s(83.5,\ 10.5^2)$$
$$N_x(\mu_x,\ \sigma_x^2) = N_x(25.3,\ 1.67^2)$$

将参数组代入随机变量函数$B = S - x$的概率密度函数，有：

$$F_B(B < B_0) = \int_{-\infty}^{B_0} \frac{1}{\sqrt{2\pi(\sigma_s^2 + \sigma_x^2)}} \cdot$$
$$\exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{B_0 - \mu_s + \mu_x}{\sqrt{\sigma_s^2 + \sigma_x^2}}\right) dB = \int_{-\infty}^{B_0} \frac{1}{\sqrt{2\pi}10.632} \cdot\right.$$
$$\exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{B_0 - 58.2}{\sqrt{113.039}}\right)^2\right] dB$$