

水利水电工程施工初期导流标准多目标 风险决策研究

胡志根¹, 刘全¹, 贺昌海¹, 肖焕雄¹, 周宜红¹, 傅峥², 李定葵²

(1. 武汉大学水利水电学院, 武汉 430072; 2. 国家电力公司成都勘测设计研究院, 成都 610072)

[摘要] 水电工程施工导流的成败直接影响到主体工程的建设, 与导流标准选择密切相关, 而导流标准的择优必须综合协调导流建筑物的建设投资、工期、系统风险率及其风险损失。文章系统全面地分析了水电工程施工初期导流标准选择涉及的控制性因素, 提出了因素定量化方法, 运用多目标决策理论, 建立了初期导流标准风险决策模型。通过实例分析, 说明导流标准风险因素定量化刻划方法及决策模型是有效的, 很好地解决了导流工程工期、投资与风险之间的关系。

[关键词] 施工导流; 初期导流; 导流标准; 多目标规划; 风险决策

1 引言

导流标准优选是关系到水电工程建设投资和发挥效益的关键问题。在导流工程系统中, 通过对影响导流标准的工程投资、建设工期、风险损失以及导流风险各个要素进行定量多目标分析, 从总体上优化导流标准。据国外水电建设的统计, 施工导流费用约占水电总工程费用的5%~20%, 其中河床式电站约占15%左右^[1]。我国施工导流费用, 一般占总工程投资的4%~15%或占主体建筑物(坝、电站)等总投资的10%~30%。同时, 施工导流的顺利与成败, 直接影响到主体工程建设; 截流失败会推迟工程建设工期; 洪水漫顶垮堰, 可能使工程建设重新开始, 工期要大幅度延长。因此, 在水电工程建设中, 要缩短建设工期, 降低工程投资, 必须做好施工导流的规划, 优选施工导流标准^[2]。

在导流标准优化中, 一个很重要的决策目标就是导流风险。1948年, H.A.Thomas提出了计算 N 年内超过标准 P 的洪水发生 K 次的概率公式。

1970年 Ben-Chine Yen 给出了工程期望寿命年限内超标准洪水发生的概率计算公式, 并被列入美国水文实践指南中^[3,4]。从本质上看, 它们都是基于每年超标准洪水发生的可能性服从贝努里分布。然而, 导流风险指标在一定程度上要考虑导流工程的具体条件和经济、安全施工, 明确导流工程可能承担的风险大小, 为出现超标准洪水时提出施工抢险措施。在这方面不少学者作了一定的工作, 给出了一些风险率模型。1989年后, 肖焕雄、韩采燕等以随机点过程理论为依据, 先后提出了一些风险率计算模型^[5-9]。但由于只考虑了水文不确定性, 而未考虑系统泄流能力的水力不确定性, 因此很难直接应用于施工导流工程的实际。为此, 针对不同工程项目施工洪水的特性, 利用 Monte-Carlo 方法模拟施工洪水过程^[10-15]和导流建筑物泄流工况, 通过系统仿真进行施工洪水调洪演算, 用统计分析模型确定上游围堰堰前水位分布, 以堰前水位统计分析确定在不同的导流标准条件下, 围堰施工及运行的动态风险。在具体处理风险目标时, 要考虑与其他目标(诸如投资、工期等)存在矛盾性和

[收稿日期] 2001-03-19; **修回日期** 2001-06-18

[基金项目] 国家自然科学基金资助项目(50079017)

[作者简介] 胡志根(1964-), 男, 湖北新洲县人, 武汉大学水利水电学院教授, 工学博士

不可公度性，为此引入风险损失费用概念，将风险目标通过一定的数学变换，转变为其他目标进行决策择优^[5,10]。

然而，风险损失费用是一个不确定量。如果导流建筑物没有失事，则导流建筑物投资损失为零；如果工程失事，其损失费用视导流规模的大小、破坏的程度与范围确定，合理地确定风险损失费用对决策结果影响显得尤其重要。一般说来，导流风险越小，要求导流的标准越高，导流建筑物的规模就越大，相应的工程投资就大，建设工期就长；要缩短工期，就必须增加人力、物力、财力，增大施工强度，增加导流工程建设投资。因此，导流风险、投资和工期不可能同时达到最小值，是矛盾的目标。所以，必须从导流系统总体择优出发，采用系统分析与风险决策方法，综合考虑各个目标，评价优选导流方案。

2 施工过程中导流系统风险因素

2.1 施工洪水入库过程的随机性

在施工导流系统中，围堰挡水，水流通过泄水建筑物下泄到下游河道中，由于众多不确定性因素的影响而蕴涵风险。围堰的堰顶高程一旦确定，即为一定值，而泄水建筑物的规模及布置虽已确定，但其泄流能力与建筑物的水力参数、上（下）游水位等因素有关。施工洪水进入围堰形成的水库，其设计洪水过程是工程设计依据的基本资料。由于洪水形成是受自然环境不确定性的影响，入库施工洪水过程本身具有随机性。同时，由于水文资料的收集、整理和设计洪水过程线推求方法，导致实际洪水过程与设计洪水过程之间的偏差。综合这些因素，表现出施工设计洪水是一个连续的随机过程。根据坝址的实测水文资料，以典型过程进行调洪设计过程线，按放大典型洪水过程线方法计算洪水过程线。最大洪峰流量采用P-Ⅲ典型随机抽样均值，其密度函数为^[12]：

$$f(x) = \frac{\beta^\alpha}{\Gamma(\alpha)} (X - a_0)^{\alpha-1} e^{-\beta(x-a_0)}, \quad (1)$$

式中： α ， β ， a_0 为P-Ⅲ型分布的形状、刻度和位置参数； $\Gamma(\alpha)$ 为 α 的伽玛参数。并且， $\alpha = 4C_s^2$ ， $\beta = 2/(\mu_Q C_v C_s)$ ， $a_0 = \mu_Q(1 - 2C_v/C_s)$ ； C_s 为P-Ⅲ型分布的离差系数； C_v 为P-Ⅲ型分布的离势系数； μ_Q 为P-Ⅲ型分布的均值。

2.2 洪水期导流系统泄洪的随机性

在施工导流泄洪建筑物规模确定的情况下，受围堰上游水位和泄流建筑物流量系数等水力参数的不确定性影响，导流泄洪量表现为一个随机过程。导流洞泄洪能力受上游围堰堰前水位和泄洪流量系数等水力参数的不确定影响，因此，泄洪是一个随机过程。对于水电工程初期导流，由于泄洪能力不确定性参数很难确定，一般假定为三角分布。其分布函数为：

$$f(x) = \begin{cases} \frac{2(x-a)}{(b-a)(c-a)} & a \leq x \leq b \\ \frac{2(c-x)}{(c-a)(c-b)} & b < x \leq c \\ 0 & \text{其他,} \end{cases} \quad (2)$$

式中： a 为泄洪能力下限； b 为平均泄洪能力； c 为泄洪能力上限； a ， b ， c 参数通过导流建筑物施工及运行统计资料来确定。

2.3 其他随机性因素

1) 由于工程测量、绘制计算以及围堰上游库区的坍塌等自然因素，会引起围堰上游库容与水位之间的关系具有不确定性。

2) 水库水位与库容关系受多种因素的影响，也是一个随机不确定的。

3) 上游围堰调洪起调水位也是影响水位确定的重要因素。通过水位计算的敏感性分析上游围堰调洪起调水位对调洪计算结果的影响。

3 施工导流系统动态综合风险

3.1 导流系统风险率

在导流过程中，最容易观测到的是上游水位是否超过围堰堰顶。对于土石围堰来说，在导流时段内水位超过堰顶时，围堰就失事了，导流系统就不能发挥作用。因此，导流系统风险也就是围堰施工及使用期内堰前水位超过堰顶高程的可能性，即导流系统风险率 R 为：

$$R = P(Z_{\text{上}} \geq H_{\text{上堰高}}), \quad (3)$$

式中： $Z_{\text{上}}$ 为上游围堰堰前水位； $H_{\text{上堰高}}$ 为上游围堰堰顶高程。

3.2 导流系统的动态综合风险

根据工程导流设计资料，考虑水文、水力不确定性因素的影响，采用 Monte-Carlo 方法模拟施工洪水过程和导流建筑物泄流，统计分析确定围堰上游水位分布^[13~15]，计算确定围堰施工设计规模条件下的导流风险率 R 。因此，在围堰运行年限内，第 n 年内遭遇超标洪水的动态风险率 $R(n)$ 为：

$$R(n) = 1 - (1 - R)^n. \quad (4)$$

4 初期导流标准决策的目标和指标计算方法

4.1 初期导流标准的决策目标

就初期导流标准选择而言,处理风险、投资(或费用)与工期三者之间的关系,取决于两方面的约束,一是最大允许的施工进度要求,另一个是最大允许投资的限制。对于这两个要求的理解是就超载洪水发生后,有没有允许的时间和允许的投资把被破坏的导流建筑物重新恢复起来。因此,在选择初期导流标准决策时,考虑决策者在能够接受的风险范围内,协调处理投资规模、初期导流围堰施工进度、超载洪水发生的导流建筑物损失、溃堰时对通航河道的航运损失及发电工期损失。关于水电站初期导流超载洪水发生后投资与工期损失的测度,可将发电工期的损失转换为工程第一批机组竣工发电量损失,综合到超载洪水对导流建筑物破坏的恢复中。

4.2 决策指标的计算方法

4.2.1 投资规模 投资包括挡水、泄水建筑物的施工费用及基坑的抽水和开挖费用。在导流建筑物规模确定的情况下,其规模投资可由下式估算:

$$C = C_1 + C_2 + C_3 + C_4 + C_5, \quad (5)$$

式中: C 为导流建筑物投资规模; C_1 为泄水建筑物的费用,由泄水建筑物规模确定; C_2 为上游围堰的费用,由上游围堰规模确定; C_3 为下游围堰的费用; C_4 为基坑抽排水费用; C_5 为导流工程建筑物建设不可预见费,一般取 $C_1 \sim C_4$ 总费用的 10%~15%。

4.2.2 围堰施工最大平均强度 围堰施工最大平均强度 D 表示在考虑泄水建筑物的施工进度、截流历时、基坑抽水排水时间条件下,围堰的最大平均填筑强度。

4.2.3 超载洪水导致溃堰风险损失 如果围堰为土石围堰,超载洪水发生后,假定河道具有一定的防洪能力和预防溃堰的措施。在确定导流标准时,风险分析不考虑溃堰对下游淹没损失,只计算围堰基坑损失,第 n 次超载洪水导致溃堰的风险损失 $C_r(n)$ 估算为:

$$C_r(n) = C_{r1}(n) + C_{r2}(n) + C_{r3}(n) + C_{r4}(n) + C_{r5}(n), \quad (6)$$

式中: $C_{r1}(n)$ 为第 n 次溃堰时基坑再次抽排水费

用; $C_{r2}(n)$ 为第 n 次溃堰时重修上游围堰的费用; $C_{r3}(n)$ 为第 n 次溃堰时基坑清淤费用; $C_{r4}(n)$ 为第 n 次溃堰时工期损失导致的发电损失; $C_{r5}(n)$ 为第 n 次溃堰时对通航河道的航运损失。

在围堰运行使用期内,超载洪水导致溃堰风险总损失为:

$$C_p = \sum_{n=0}^k C_r(n)(1+i)^{-n}, \quad (7)$$

式中: k 为围堰运行使用年限; i 为风险损失折算成工程投资概算基准年的折现率。

4.2.4 决策指标与导流风险率 R 的关系 对于特定的水利水电工程,在枢纽布置以及导流方式、施工设备及施工技术条件一定的情况下,导流工程费用、施工强度和超载洪水风险损失只依赖于导流标准的变化,是风险率 R 的函数,即:

$$C = C(R) \quad (8)$$

$$D = D(R) \quad (9)$$

$$C_p = C_p(R). \quad (10)$$

5 初期导流标准多目标风险决策模型

初期导流标准的可行(或待决策)方案有 m 个,其集合 U 为:

$$U = \{u_1, u_2, \dots, u_m\}, \quad (11)$$

而每个可行方案的评价指标有 n 个,其指标集 V 为:

$$V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}, \quad (12)$$

对于可行方案 k ,可以得到其评价指标的特征值向量 A_k ,

$$A_k = \{A_{k1}, A_{k2}, \dots, A_{kn}\}, \quad (13)$$

则对于所有可行方案,其评价指标特征矩阵 A :

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{m1} & a_{m2} & \dots & a_{mn} \end{bmatrix} = (a_{ij})_{m \times n}. \quad (14)$$

在构造特征矩阵 A 时,决策者对评价指标的估计,很难精确测定,具有不确定性和模糊性特征。同时,方案的择优,是对备选方案集中元素之间的相对比较而言的,具有相对性。为了便于计算和优选分析,应对目标方案集的指标绝对量值转化为相对量^[16,17]。

假设目标方案 i ,评价指标 j 的隶属度 f_{ij} ,对于目标为越大越好有:

$$f_{ij} = a_{ij} / \sum_{i=1}^m a_{ij}, \quad (15)$$

对于目标为越小越好有：

$$f_{ij} = \frac{1}{m-1} (1 - a_{ij} / \sum_{i=1}^m a_{ij}). \quad (16)$$

利用式 (15) ~ (16)，可以将特征矩阵式 (14) 转化为对应的隶属度矩阵 F ，

$$F = \begin{bmatrix} f_{11} & f_{12} & \cdots & f_{1n} \\ f_{21} & f_{22} & \cdots & f_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ f_{m1} & f_{m2} & \cdots & f_{mn} \end{bmatrix} = (f_{ij})_{m \times n}. \quad (17)$$

令 $\Phi = (\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_n) = (\bigcup_{i=1}^m f_{i1}, \bigcup_{i=1}^m f_{i2}, \dots, \bigcup_{i=1}^m f_{in})$ ，称 Φ 为正理想隶属度特征向量。

令 $\Psi = (\psi_1, \psi_2, \dots, \psi_n) = (\bigcap_{i=1}^m f_{i1}, \bigcap_{i=1}^m f_{i2}, \dots, \bigcap_{i=1}^m f_{in})$ ，称 Ψ 为负理想隶属度特征向量。

设备选方案评价指标的权重为 $\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n$ ，并令特征向量 F_i 为：

$$F_i = (f_{i1}, f_{i2}, \dots, f_{in}), \quad (18)$$

$$\text{令 } L^{(1)}(F_i, \Phi) = \sqrt{\sum_{j=1}^n \omega_j (\varphi_j - f_{ij})^2}, \quad (19)$$

$$L^{(2)}(F_i, \Psi) = \sqrt{\sum_{j=1}^n \omega_j (\psi_j - f_{ij})^2}, \quad (20)$$

分别称 $L^{(1)}(F_i, \Phi), L^{(2)}(F_i, \Psi)$ 为备选方案 i 的正理想距离和负理想距离。

对于备选方案 i ，设 $\mu_i (v_i)$ 为从属于正 (负) 理想隶属特征向量的隶属度，则有：

$$M = (\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_m)^T, \quad (21)$$

$$N = (v_1, v_2, \dots, v_m)^T, \quad (22)$$

$$M + N = (\mu_1 + v_1, \mu_2 + v_2, \dots, \mu_m + v_m)^T = (1, 1, \dots, 1)^T, \quad (23)$$

$$\text{令 } D^{(1)}(F_i, \Phi) = \mu_i L^{(1)}(F_i, \Phi) = \mu_i \sqrt{\sum_{j=1}^n \omega_j (\varphi_j - f_{ij})^2}, \quad (24)$$

$$D^{(2)}(F_i, \Psi) = v_i L^{(1)}(F_i, \Psi) = v_i \sqrt{\sum_{j=1}^n \omega_j (\psi_j - f_{ij})^2}, \quad (25)$$

分别称 $D^{(1)}(F_i, \Phi), D^{(2)}(F_i, \Psi)$ 为备选方案 i 的正理想度和负理想度。

为了求得最优解，计算评价向量 M 和 N ，可按最小二乘法优选准则，对所有备选导流方案，使 $D^{(1)}(F_i, \Phi), D^{(2)}(F_i, \Psi)$ 的广义距离二次

方和最小。根据这一优选准则，建立目标函数：

$$\min Z = \sum_{i=1}^m [(D^{(1)}(F_i, \Phi))^2 + (D^{(2)}(F_i, \Psi))^2] = \sum_{i=1}^m [(\mu_i L^{(1)}(F_i, \Phi))^2 + (v_i L^{(2)}(F_i, \Psi))^2], \quad (26)$$

$$\text{令 } \partial Z / \partial \mu_i = 0, i = 1, 2, \dots, m, \quad (27)$$

计算整理后有：

$$\mu_i = \frac{[L^{(2)}(F_i, \Psi)]^2}{[L^{(1)}(F_i, \Phi)]^2 + [L^{(2)}(F_i, \Psi)]^2}, \quad (28)$$

对所有备选方案，按式 (28) 计算，以正隶属度极大原则，择优初期施工导流标准及方案，即

$$\mu_{\text{pot}} = \mu_k = \max_{1 \leq i \leq m} \{\mu_i\}. \quad (29)$$

6 实例分析及其计算成果

6.1 设计洪水资料

某水电站装机 12 600 MW，正常蓄水位 600.00 m，坝顶高程 610.00 m，双曲拱坝最大坝高 278.00 m，正常蓄水位以下库容 $115.7 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。根据《水利水电工程施工组织设计规范》SDJ338-89，选定的导流建筑物为Ⅲ级。对于Ⅲ级导流建筑物，土石类围堰相应设计洪水标准为重现期 20~50 年。

通过对实测资料进行分析，电站坝址下游的水文站实测最大流量为 $29\ 000 \text{ m}^3/\text{s}$ 。综合分析水文系列资料、导流建筑物的工程量、施工工期以及水文、水力等不确定性因素，初步拟定初期施工导流标准为 30 年一遇、50 年一遇或围堰挡水第一年为 30 年一遇，以后挡水为 50 年一遇 3 个方案。导流标准为 30 年一遇洪峰流量 $Q_{p=3.3\%} = 29\ 900 \text{ m}^3/\text{s}$ 到 50 年一遇洪峰流量 $Q_{p=2\%} = 32\ 000 \text{ m}^3/\text{s}$ ，导流洞为 6 条断面尺寸为 $18\text{m} \times 20 \text{ m}$ (宽×高)。

6.2 导流标准决策计算

根据工程施工组织设计和专家提供的资料，应用导流系统风险分析方法和计算机仿真 (公式 1~4)^[14~15]。对于备选导流方案的导流动态风险，30 年一遇和 50 年一遇的初期导流标准的风险率为 R_{30}, R_{50} ，对应方案的动态风险如表 1 所示；在确定的导流方案与标准条件下，围堰的投资规模，施工工期及围堰失事的风险损失如表 2 所示 (该工程项目建设不可预见费取 10%，同时项目建设不考虑河道通航， $C_{i5}(n)$ 为零)。

表1 围堰运行的动态风险率

Table 1 Dynamic risk rates during the cofferdam operation

风险	方案1	方案2	方案3
导流标准	$P=3.33\%$	$P=2\%$	第1年 $P=3.33\%$, 第2,3年 $P=2\%$
第一年综合风险 $R_1/\%$	2.92	1.81	2.92
第二年综合风险 $R_2/\%$	5.75	3.59	4.68
第三年综合风险 $R_3/\%$	8.51	5.33	6.40

表2 各导流标准条件下的决策指标

Table 2 Decision parameters under the diversion standards

导流标准(重现年)	30年 一遇	50年 一遇	第1年30年一遇, 第2,3年50年一遇
投资规模 $C(R)/10^4$ 元	24 736.7	26 357.8	26 352.8
风险损失 $C_p(R)/10^4$ 元	13 103.4	8 251.4	11 259.8
围堰填筑最大平均强度 $D(R)/10^4 \cdot \text{月}$	23	27.5	26

在表2结果的基础上,应用导流标准多目标风险决策模型(式11~29),备选导流方案的分析结果,如表3所示。在决策过程中,目标权重的选择与决策者的偏好密切相关。为此,对优选结果中决策目标的权重进行敏感性分析,方案的优选排序分析结果如表4所示。

表3 各导流标准条件下的决策分析结果

Table 3 Data of decision analysis under the diversion standards

相对值	投资规模	风险损失	最大平均强度
方案1	0.340 299 77	0.299 117 01	0.349 673 20
方案2	0.329 833 96	0.373 501 22	0.320 261 44
方案3	0.329 866 27	0.327 381 77	0.330 065 36
$L^{(1)}(F_i, \Phi)^2$	0.000E+00	1.660E-03	0.00E+00
$L^{(1)}(F_i, \Phi)^2$	3.834E-05	0.000E+00	3.028E-04
$L^{(1)}(F_i, \Phi)^2$	3.810E-05	6.381E-04	1.346E-04
$L^{(2)}(F_i, \Phi)^2$	3.834E-05	0.000E+00	3.028E-04
$L^{(2)}(F_i, \Phi)^2$	0.000E+00	1.660E-03	0.000E+00
$L^{(2)}(F_i, \Phi)^2$	3.653E-10	2.397E-04	3.364E-05

表4 优选方案的敏感性分析

Table 4 Sensitivity analysis for the optimal diversion scheme

各目标权重	以下排列中 P_1 、 P_2 、 P_3 分别代表 30年、50年和第一年30、 第二年为50年的导流方案
$\omega_1 = 0.4, \omega_2 = 0.1, \omega_3 = 0.5$	方案 P_2 优于 P_1 优于 P_3
$\omega_1 = 0.3, \omega_2 = 0.2, \omega_3 = 0.5$	方案 P_2 优于 P_1 优于 P_3
$\omega_1 = 0.3, \omega_2 = 0.1, \omega_3 = 0.6$	方案 P_2 优于 P_1 优于 P_3
$\omega_1 = 0.3, \omega_2 = 0.3, \omega_3 = 0.4$	方案 P_2 优于 P_3 优于 P_1
$\omega_1 = 0.4, \omega_2 = 0.2, \omega_3 = 0.4$	方案 P_2 优于 P_1 优于 P_3
$\omega_1 = 0.35, \omega_2 = 0.3, \omega_3 = 0.35$	方案 P_2 优于 P_3 优于 P_1

6.3 计算成果及分析

在初期导流标准风险分析的基础上,采用多目标决策技术综合分析导流系统费用(建筑物投资及超载洪水导致溃堰的风险损失)、施工强度和运行期间的动态风险。结论是导流方案排序为方案2,方案1和方案3。同时从表4可以看出,目标权重的敏感性分析说明方案2具有很好的稳定性。因此,推荐初期导流方案为采用50年一遇,全年挡水土石围堰,挡水标准($Q_{\max} = 32\ 000\ \text{m}^3/\text{s}$)。

7 结语

笔者系统分析导流标准与导流建筑物的投资、工期及风险度基础上,提出决策目标的定量刻划方法,建立了多目标风险决策模型。通过工程实例验证分析,表明定量分析方法及决策模型是有效的、可行的。同时,还进行了目标权重的敏感性分析,说明计算成果(优选的导流方案)具有良好的稳定性,说明研究成果为水电工程施工导流标准选择提供有效的方法与手段。但是,水利水电工程施工初期导流标准影响因素涉及方方面面,尤其对大中型水利水电工程影响导流标准决策的不确定性因素较多,文中建立的初期导流标准风险决策模型尚待通过工程实践,使其不断完善。

致谢:本文研究过程中,得到了国家电力公司成都勘测设计研究院技术委员会和施工处专家的指导和帮助;武汉大学水利水电学院方德斌、李继革硕士参加了部分研究工作,在此表示感谢!

参考文献

- [1] 肖焕雄. 国外施工导流情况综述及几个有关问题的探讨[J]. 水力发电, 1985, (2): 54~58
- [2] 肖焕雄, 韩采燕, 唐晓阳. 施工导流标准与方案优选[M]. 武汉: 湖北科学技术出版社, 1996
- [3] Ben-Chie Yen. Risk in hydrologic design of engineering project [M]. Proceeding ASCE, Vol 96, Hy. 1970
- [4] Midgley D C. A flood risk analysis for choosing in height of a cofferdam [J]. ICOLD. 1967, Q. 33. R. 11: 112~123
- [5] 徐宗学. 洪水风险率 CSPPC 模型及其应用[J]. 水利学报, 1988, (9): 1~9
- [6] 邓永录, 徐宗学. 洪水风险率分析的更新过程模型与应用[J]. 水电能源科学, 1989, (3): 226~232
- [7] 肖焕雄, 韩采燕. 施工导流系统超标洪水风险率模型研究[J]. 水利学报, 1993, (11): 76~83
- [8] 肖焕雄, 史精生. 施工导流标准多目标风险决策[J]. 水利学报, 1990, (11): 66~71
- [9] 肖焕雄, 孙志禹. 不过水围堰超标洪水风险率计算[J]. 水利学报, 1996, (2): 37~42
- [10] Reiro A A. Criteria for the construction diversion floods and cofferdams[M]. ICOLD. 1988, Q. 63. R. 7: 69~78
- [11] Shalaby A I. Estimating probable maximum flood probability [J]. Water Resource Bulletin, 1994, (2): 307~318
- [12] 长江水利委员会, 南京水文水资源研究所. 水利水电工程设计洪水计算手册[M]. 北京: 水利电力出版社, 1995
- [13] Thompson K D, Stedinger J R, Health D C. Evaluation and presentation of dam failure and flood risks [J]. J. of Water Resources Planning and Management. 1997, (4): 216~227
- [14] 姜树海. 水库调洪演算的随机模拟数学模型[J]. 水科学进展, 1993, (4): 294~300
- [15] 石明华, 钟登华. 施工导流超标洪水风险率估计的水文模拟方法[J]. 水利学报, 1998, (3): 30~33
- [16] 陈守煜, 赵瑛琪. 多目标规划模糊优化原理与模型[J]. 水利学报, 1990, (12): 30~33
- [17] 陈 斑. 决策分析[M]. 北京: 科学出版社, 1989

Multi-objective Risk Model of Optimal River Diversion Standards During Initial Stage Construction for Hydroelectric Project

Hu Zhigen¹, Liu Quan¹, He Changhal¹, Xiao Huanxiong¹, Zhou Yihong¹, Fu Zheng², Li Dingkui²

(1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Wuhan University,

Wuhan 430072 China ; 2. Chengdu Hydroelectric Investigation and

Research Institute of SPC, Chengdu, 610072 China)

[Abstract] For a hydropower project, river diversion planning directly decides the dam construction and has a bearing on the diversion standard. The relations between selection of diversion standard and investment, construction duration, risk and its losses of diversion structures should be coordinated. This paper systematically analyzes the controlling factors of choosing diversion standard during initial construction, and puts forward a quantitative analytic method of the factors. By means of multi-objective decision-making theory, a risk model of river diversion standard during initial stage construction is established. A case study shows that the quantitative analysis and decision model are effective, and are of great aid to the handling of the relations between the duration, investment and the risk for diversion construction.

[Key words] construction diversion; initial stage of construction diversion; standard of construction diversion; multi-objective planning; risk decision-making