

非常泄洪设施对大坝防洪安全影响的研究

吴时强, 姜树海

(南京水利科学研究所, 南京 210029)

[摘要] 文章引入随机微分方程, 采用泄洪风险分析方法评估水电站采用非常泄洪设施对大坝安全所带来的影响, 并结合某一工程设置两条非常泄洪洞的可行性进行论证。在充分分析计算条件对风险率灵敏性的前提下, 讨论了调洪方案下两条非常泄洪洞启用的条件及相关的泄洪风险, 为导流洞改建方案的确定提供依据。分析结果表明该方案基本维持原设计方案的泄洪风险水平, 说明设置非常泄洪设施是可行的。

[关键词] 大坝安全; 泄洪; 风险分析; 随机微分方程

1 概述

随着水电站规模的不断扩大, 工程设计标准也相应提高, 泄洪设施规模也随之提高, 以确保大坝安全。水电站所选择的防洪设计标准较高, 这是必要的, 但稀遇洪水出现的机遇很少, 如为一工程设计的运行寿命期内都可能不遇的洪水而统一高标准的修建泄洪设施, 势必会使部分泄洪设施闲置或得不到充分利用, 造成经济损失。此时, 在确保大坝安全的前提下, 把泄洪设施分为正常泄洪设施和非正常泄洪设施, 以不同的设计标准进行修建是十分必要的。在常遇洪水的情况下, 启用正常泄洪设施即可确保大坝安全, 而在稀遇洪水时, 启用正常泄洪设施和非常泄洪设施, 并允许非常泄洪建筑物的自身部分破坏, 来确保大坝的安全, 这样可降低非常建筑物的设计标准, 降低工程造价。

目前, 国际上对大坝泄洪建筑物布置选型有简化的趋势, 同时尽量考虑采用非常溢洪设施, 以减少工程投资。采用既能保持一定泄洪可靠性, 又能减少常设泄洪设施的方案, 是高坝泄洪枢纽优化布置的方向。

采用非常泄洪设施对大坝泄洪风险会带来一定影响, 科学地评估这一影响是水电站采用非常泄洪

设施的重要依据。通常水电站枢纽工程是根据在使用年限内可能遇到的自然事件来设计的, 其中包括洪水的估算和设计标准及其重现期的确定。通过水库调洪演算, 可确定水电站枢纽工程泄洪建筑物的规模。传统的调洪演算是按照设计洪水过程和水库调度方案, 根据水量平衡原理, 推算出库水位变化过程, 以确定水库的防洪特征水位及相应的泄洪建筑物型式、尺寸、高程等。然而由于在确定泄洪建筑物规模时, 存在着许多不确定性因素, 如入库洪水过程的水文条件不确定性、大坝泄洪能力的水力条件不确定性、库容与水位关系的不确定性和防洪起调水位的初始条件不确定性等, 计算的许多物理量均为随机量, 从而导致了库水位变化过程和泄水建筑物泄洪能力的随机性, 这些随机因素的存在增加了按照传统方法确定的泄洪设施规模泄洪能力风险, 降低了大坝的可靠度。因此有必要考虑这些随机量对大坝安全可靠度的影响。

本文引入随机微分方程, 采用泄洪风险分析方法评估水电站采用非常泄洪设施对大坝防洪安全所带来的影响, 并结合某一工程设置两条非常泄洪洞的可能性进行论证, 分析调洪方案, 确定两条非常泄洪洞启用的条件及相关的泄洪风险, 为导流洞改建方案的确定提供依据。

2 泄洪风险分析方法

2.1 调洪过程随机微分方程

传统的调洪计算过程是确定性的，直接利用水库的水量平衡原理建立计算方程，考虑初始条件，则为

$$\begin{cases} F(Z) \frac{dZ}{dt} = Q(t) - q(Z, m) \\ Z(t_0) = Z_0, \end{cases} \quad (1)$$

式中 $Z(t_0)$ 为库水位， Z_0 为初始库水位， $Q(t)$ 为 t 时刻入库洪水流量， $q(Z, m)$ 为相应时刻出库泄流量。

(1) 式为确定性方程，实际上不同水位的库水面面积 $F(Z)$ 、洪水过程 $Q(t)$ 以及泄水建筑物过流量系数 m 的测量均存在一定的随机性，是个随机过程，可认为在过程的不同时刻它们的概率密度符合正态分析^[1]。受 $F(Z)$ 、 $Q(t)$ 和 m 随机性的影响，水库蓄洪量 W 在调洪计算中也必然是一随机过程。根据文献^[1]的分析， W 的随机过程是 Markov 过程，并符合 Wiener 过程定义条件。在扣除 W 的均值偏移后，就存在一无偏的 Wiener 过程 $B(t)$ ，其均值为 0，即

$$W(t) = \int_{t_0}^t (\bar{Q} - \bar{q}) dt + B(t), \quad (2)$$

式中 \bar{Q} 和 \bar{q} 为入库流量和出库泄流量的均值过程，对(2)式求导，并除以库水面面积 $F(Z)$ ，有：

$$\begin{cases} \frac{dZ}{dt} = \frac{\bar{Q}(t) - \bar{q}(Z, m)}{F(Z)} + \frac{dB(t)/dt}{F(Z)} \\ Z(t_0) = Z_0. \end{cases} \quad (3)$$

比较(1)式和(3)式，方程(3)右边增加了 $\frac{dB(t)/dt}{F(Z)}$ ，从而引入了随机因素， $Z(t)$ 不再是普通的确定性函数，而是一个随机过程，随机微分方程引入了调洪演算过程。

简化(3)式，令 $\varphi(t, Z(t)) = \frac{\bar{Q}(t) - \bar{q}(Z, m)}{F(Z)}$ ， $g(t, Z(t)) = \frac{1}{F(Z)}$ ，可得：

$$\begin{cases} dZ(t) = \varphi(t, Z(t))dt + g(t, Z(t))dB(t) \\ Z(t_0) = Z_0. \end{cases} \quad (4)$$

(4)式是一个典型的 Ito 方程，它带有一个随机输入项，并可具有随机初始条件，其解过程为 Markov 过程。

$B(t)$ 是一 Wiener 过程， $dB(t)/dt$ 是一正态白

噪声， $B(t)$ 的一维概率密度函数 $f(B)$ 为：

$$f(B) = \frac{1}{\sqrt{2\pi t}\sigma} \exp\left[-\frac{B^2}{2\sigma^2 t}\right]. \quad (5)$$

此式表明， $B(t)$ 的均值 $E[B(t)] = 0$ ，方差 $D[B(t)] = \sigma^2 t$ ，其中 σ^2 为常数，称为过程强度，它取决于 $W(t)$ 的离散程度，也即取决于入库洪水、出库泄量和库容自身的变异性。通过实际调查和资料分析，可给出以上三个随机过程的标准差 $\sigma_Q(t)$ 、 $\sigma_q(t)$ 和 $\sigma_w(t)$ ，并考虑到三个随机输入过程的相互不相关性，则可得输出过程的方差 $D[B(t)]$ 为：

$$D[B(t)] = \sigma_w^2 t_i = [\sigma_Q(t_i)^2 + \sigma_q(t_i)^2] \Delta t^2 + \sigma_w(t_i)^2. \quad (6)$$

由此可计算出确定均值的 σ^2 作为(5)式的过程强度参数， $\sigma^2 t$ 反映了 Q 、 q 和 W 对 $B(t)$ 的综合作用。

〔对于初始条件 Z_0 ，可以是确定的，也可以是随机的，由起调时刻库水位的控制条件所决定的，表明洪水过程开始时刻的影响。〕

2.2 随机微分方程的求解

对于典型的 Ito 方程(4)式，由于非线性性，很难直接求出其具有随机性质的解，考虑到其解具有 Markov 性质，可以利用随机过程的动力学方程来求解。就考察泄洪风险率而言，关注的是解过程的概率密度，即在调洪过程的各个时刻，库水位的随机分布状况。

库水位解过程 $Z(t)$ 的一阶概率密度函数 $f(h, t)$ 应能满足随机过程的动力学方程，并由此根据 $B(t)$ 的 Wiener 过程的性质，导出实用的向前方程(Fokker-Planck 方程)^[2]：

$$\begin{cases} \frac{\partial f(z, t)}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial z}[f(z, t)\varphi(t, Z)] + \frac{\partial^2}{\partial z^2}[f(z, t)g(t, Z)^2\sigma^2] \\ f(z, t_0) = f_0(z). \end{cases} \quad (7)$$

(7)式为一确定性的偏微分方程，适用于非线性的 Ito 方程问题。采用有限差分法求解。

为此，对于时间导数，采用后差分格式，坐标导数采用中心差分格式，由于方程中的 $\varphi(t, Z)$ 和 $g(t, Z)$ 与 Z 有关，给求解方程带来困难，假定 $\varphi(t, Z)$ 和 $g(t, Z)$ 在 $(t^n, t^n + \Delta t)$ 时间内变化不大，可采用 t^n 时刻的 $\varphi(t, Z)$ 和 $g(t, Z)$ 值来替代，则方程离散形式为：

$$[A]\{f\} = \{F\}, \quad (8)$$

其中， $[A]$ 为一三对角矩阵， $\{f\}$ 为密度函数矩阵，

{F}为源项矩阵,其元素为:

$$\begin{cases} a_{i,i-1} = -\frac{\alpha\varphi}{2\Delta z} - \frac{\alpha g^2 \sigma^2}{\Delta z^2} \\ a_{i,i} = \frac{1}{\Delta t} + \frac{2\alpha g^2 \sigma^2}{\Delta z^2} \\ a_{i,i+1} = \frac{\alpha\varphi}{2\Delta z} - \frac{\alpha g^2 \sigma^2}{\Delta z^2} \\ a_{i,j} = 0, j \neq i-1, i, i+1 \\ F_i = \frac{f_i^n}{\Delta t} - (1-\alpha)\varphi \frac{f_{i+1}^n - f_{i-1}^n}{2\Delta z} + \\ (1-\alpha)g^2\sigma^2 \frac{f_{i+1}^n - 2f_i^n + f_{i-1}^n}{\Delta z^2} \end{cases}$$

利用初始条件和边界条件,可以迭代求解出 $f(t, z)$ 分布,从而可以确定泄流量及库水位随机变化的均值过程。

2.3 调洪过程的泄洪风险计算方法

对水库调洪过程中的泄洪风险极限状况,应直接以库水位 $Z(t)$ 不超过坝顶高程 Z_i 为标准,即满足极限状态方程:

$$Z - Z_i = 0. \quad (9)$$

由此定义泄洪风险率 P_f 为:在一定的洪水重现期和泄洪建筑物设计规模以及各种可能的水库自然、工程和运行条件下,发生洪水漫顶事件的概率:

$$P_f = P_f[Z \geq Z_i], \quad (10)$$

这里 Z_i 为坝顶高度,而 Z 为一随机过程,可由前述随机方程计算确定。由此可以 P_f 值来具体度量水库的泄洪风险率,其物理概念明确、清晰,更能反映问题的本质。

在求出库水位的概率密度函数 $f(h, t)$ 后,水库漫顶的概率可由下式计算:

$$P_f = P_f[Z \geq Z_i] = \int_{Z_i}^{+\infty} f(z, t) dz, \quad (11)$$

采用 P_f 值,可以比较不同运行方案的泄洪风险。

3 计算条件对泄洪风险灵敏度影响的分析

某工程在设计中考虑了七种风险较高的洪水过程频率,来分析设置非常泄洪设施方案的可行性及其风险率。

考虑随机过程输入对 $Z(t)$ 的影响,选取几组变异系数 ($\delta_Q(t), \delta_q(t), \delta_w(z)$) 的组合,分别选取三个不同时刻(泄洪后 150 h 洪峰时刻、泄洪后 350 h) 的值,用(6)式求得 $B(t)$ 的 σ 值如表 1 所示。

表 1 $B(t)$ 的 σ 值

$P/\%$	δ_Q	0.1	0.1	0.1	0.1
	δ_q	0.01	0.01	0.01	0.01
	δ_w	0.0	0.01	0.02	0.05
0.01	62 847	137 616	252 738	615 168	
0.02	59 749	133 542	246 163	599 938	
0.05	55 938	128 072	237 049	578 540	
0.1	52 397	123 264	229 145	560 082	
0.2	49 117	118 080	220 232	538 894	
0.5	44 800	11 114	208 177	510 165	
1	41 354	104 943	197 239	483 870	

计算条件的选择往往会影响到泄洪风险率,为定性地了解这些选择所存在的误差对泄洪风险率的影响程度,这里选择 $P=0.01\%$ 的洪水过程为基准,分析三个变异系数 $\delta_Q(t), \delta_q(t)$ 和 $\delta_w(z)$ 的选择、起调初始水位随机性对泄洪风险灵敏度的影响。

3.1 变异系数的灵敏度分析

以 $\delta_Q(t)=10\%$ 、 $\delta_q(t)=1\%$ 和 $\delta_w(z)=5\%$ 为基准,分别改变 $\delta_Q(t), \delta_q(t)$ 和 $\delta_w(z)$,分析它们对泄洪风险的影响,计算结果如表 2 所示。

由表 2 可见, $\delta_Q(t)$ 和 $\delta_q(t)$ 的变化对于泄洪过程最大风险的影响成缩小趋势, $\delta_Q(t), \delta_q(t)$ 的变化对泄洪库水位随机过程的均方差和泄洪风险的影响最大为 0.79%, 而 $\delta_w(z)$ 对泄洪风险影响十分明显,其值越大,风险增加越快。三个变异系数中,以 $\delta_w(z)$ 对泄洪风险影响最大, $\delta_Q(t)$ 和 $\delta_q(t)$ 对泄洪风险影响不敏感。

3.2 $\delta_w(z)$ 对风险影响分析

为了更细致地分析 $\delta_w(z)$ 对泄洪风险的影响, $\delta_Q(t)$ 和 $\delta_q(t)$ 分别选为 10% 和 1%, $\delta_w(z)$ 的选择考虑到目前地形测量的精度,选择四种情况作为计算依据,分别为 0%、1%、2% 和 5%,相应的 $B(t)$ 的 σ 值如表 1 所示,计算不同 $\delta_w(z)$ 值的水库泄洪风险。不同 $\delta_w(z)$ 值的计算结果如表 2、图 1 和图 2 所示。

分析可见, $\delta_w(z)$ 越大,泄洪风险越大,而且 $\delta_w(z)$ 与最大泄洪风险的关系也表明这一点,说明库容的随机性较大程度地影响泄洪过程的随机性大小。

由于目前对于入库洪水过程、出库泄洪过程以及水位库容的随机性研究尚不多见,无法较为精确地确定三个变异系数,为了相对比较不同泄洪运行方案的泄洪风险率,这里选取 $\delta_Q(t), \delta_q(t)$ 和 $\delta_w(z)$ 分别为 10%、1% 和 5%。

表 2 灵敏度分析计算结果

Table 2 The results of sensitivity analysis

序号	$\delta_Q(t)$	$\delta_q(t)$	$\delta_w(z)$	σ_B	σ_z	$P_f[Z \geq Z_c]/\%$	误差/%
1	0.10	0.01	0.05	615 168	5.74	32.73	0
2	0.05	0.01	0.05	612 770	5.72	32.68	-0.15
3	0.20	0.01	0.05	624 668	5.83	32.99	0.79
4	0.10	0.05	0.05	615 855	5.74	32.76	0.09
5	0.10	0.10	0.05	617 997	5.76	32.81	0.24
6	0.10	0.01	0.00	62 847	0.59	1.16	-96.46
7	0.10	0.01	0.01	137 616	1.28	5.25	-83.96
8	0.10	0.01	0.02	252 738	2.36	14.50	-55.70
9	0.10	0.01	0.10	1 225 496	11.39	41.13	25.67

注：误差栏为与 $\delta_Q(t)=0.1, \delta_q(t)=0.01$ 和 $\delta_w(z)=0.05$ 情况比较的误差百分数。

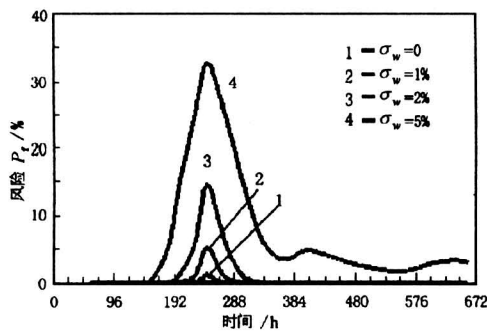


图 1 $\delta_w(z)$ 对泄洪风险的影响

Fig.1 $\delta_w(z)$ effect on discharge risk

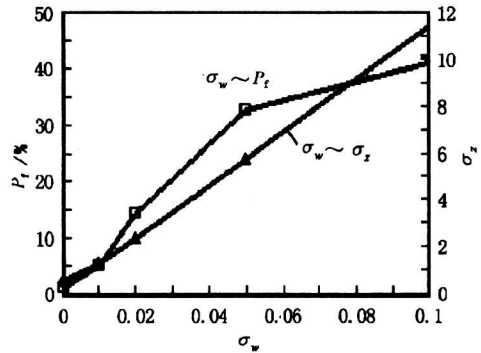


图 2 $\delta_w(z)$ 与最大风险的关系

Fig.2 The relation between $\delta_w(z)$ and maximum discharge risk

表 3 起调水位随机性对泄洪风险的影响分析

Table 3 The analyses for the effect of random of initiative reservoir level on the discharge risk

σ_{z_0}/m	0.0	0.5	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0
μ_z/m	602.46	602.46	602.46	602.46	602.46	602.46	602.46
σ_z/m	5.74	5.74	5.81	6.07	6.47	6.99	7.61
$P_{fmax}/\%$	32.74	32.74	32.95	33.68	34.67	35.78	36.91

3.3 起调水位随机性对泄洪风险影响分析

在前面的分析计算中,没有考虑起调水位 Z_0 的随机性,即认为起调水位 Z_0 是确定的,然而实际上并不能保证起调水位 Z_0 是一个确定值。如果考虑 Z_0 的随机性,则其对泄洪风险的影响有多大,需作一分析。

为简化起见,假定起调水位的随机性符合正态分布,即

$$f(Z_0) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{z_0}} \exp\left[-\frac{(Z_0 - \bar{Z}_0)^2}{2\sigma_{z_0}^2}\right] \quad (19)$$

式中, \bar{Z}_0 为 Z_0 的均值, σ_{z_0} 为 Z_0 的均方差。

分析不同 σ_{z_0} 值对库水位随机分布的均方差 σ_z 以及泄洪风险的影响,如表 3 所示。在本算例中,当 σ_{z_0} 值小于 1.0 m 时,起调水位随机性对于最大泄洪风险影响微弱,可以忽略不计;当 $\sigma_{z_0} > 1.0$ m

时，其影响会超过最大泄洪风险发生时间，但增加的有限，并会随时间增长，这种影响会逐渐削弱。为简便起见，在下面的计算中，不考虑起调水位的随机性。

4 采用非常泄洪设施方案对泄洪风险影响的分析

某水电站枢纽由大坝、泄水建筑物、地下厂房等组成，大坝为混凝土双曲拱坝，坝顶高程 605 m，最大坝高 273 m。为了解决高水头、大流量的泄洪消能问题，设计中采用分散泄洪、分区消能的原则，泄洪设施由坝身 7 个表孔、8 个深孔和 5 条泄洪洞组成，共同宣泄洪水。该电站枢纽处于高山峡谷，没有布置开敞式非常溢洪道的地形条件，两岸各有一条 16 m × 22 m 的漂木导流隧洞未予利用。设计上曾设想将这两条导流隧洞后期改造为永久泄洪隧洞，但因水头高（200 m 左右）、泄量大（单洞泄量 3 500 m³/s），国内外均无成熟的技术可资借鉴，故未予采用。如将这两条导流洞改建为非常泄洪洞，降低其设计标准，减少正常泄洪设施规模（原五条永久泄洪洞改由三条永久泄洪洞和两条非常泄洪洞组成），则可大大减少泄洪设施的工程造价，并优化枢纽布置。为此利用上述风险分析方法，论证该水电站采用非常泄洪设施方案的可行性，并分析非常泄洪设施启用条件。

4.1 设计方案的泄洪风险分析

图 3 为不同入库洪水过程下水库泄洪风险计算结果。分析可见，泄洪风险率与入库洪水过程的频率 P 有直接的关系， P 值越小，泄洪风险率越大，当发生校核洪水（ $P=0.01\%$ ）时，泄洪风险率最大为 32.73%，而且泄洪风险随泄洪过程而变，在库水位达到最高水位时，泄洪风险率最大，当 $P \gg 0.5\%$ （二百年一遇以下）洪水过程时，入库洪水、库容及泄流量的随机性基本上不会导致发生漫顶的事件，风险率趋于 0。

4.2 五条泄洪洞改为三条泄洪洞的泄洪风险分析

五条泄洪洞改为三条泄洪洞后，泄洪风险分析计算结果如图 4 和表 4 所示。分析可见，取消两条泄洪洞后，由于泄洪能力下降，各种频率洪水过程的泄洪风险都有不同程度的增加，主要体现在低频率洪水过程，尤其是 $P=0.01\%$ 和 $P=0.05\%$ 的洪水过程，三条泄洪洞的泄洪风险超过了 50%，说明其库水位均值已超过坝顶。三条泄洪洞方案在 P

$<0.10\%$ （千年一遇以上）的洪水过程中泄洪风险偏高，存在着较高机率的洪水漫顶可能性，因此，五个泄洪洞改为三个泄洪洞方案不可取。

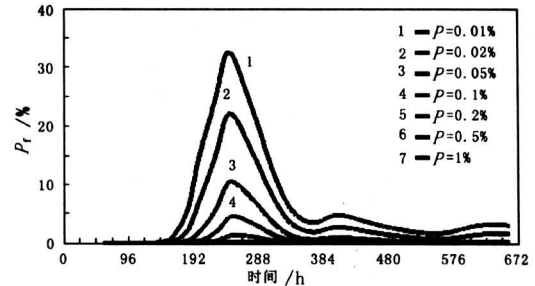


图 3 入库洪水过程频率与水库泄洪风险关系
Fig.3 The relation between the frequency of flood and discharge risk

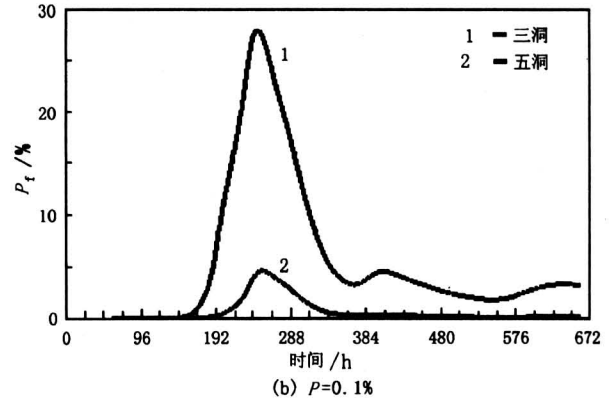
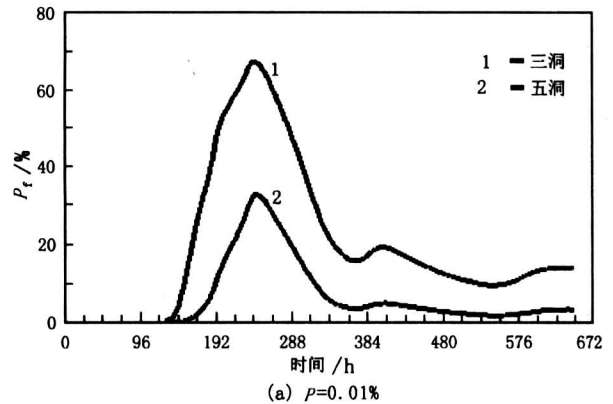


图 4 三条泄洪洞方案与设计方案的风险分析
Fig.4 The risk comparison for original design and three-tunnel plans

表 4 各种工况下泄洪风险计算结果

Table 4 The computational results of discharge risk under difference cases

P/%	0.01	0.02	0.05	0.10	0.20	0.50	1.00
设计方案	602.47	600.73	598.16	595.96	593.40	589.29	584.96
三条洞方案	607.64	606.07	603.82	601.97	599.93	596.95	594.17
μ_z/m							
584 m	602.54	600.84	598.38	596.32	594.04	590.66	587.68
586 m	502.55	600.86	598.40	596.37	594.12	590.86	588.22
588 m	602.56	600.87	598.44	596.42	594.21	591.14	588.77
590 m	602.58	600.89	598.47	596.48	594.32	591.53	590.04
592 m	602.59	600.92	598.51	596.56	594.50	592.07	592.03
594 m	602.61	600.95	598.57	596.68	594.82	594.01	594.00
δ_z/m							
设计方案	5.74	5.61	5.45	5.30	5.12	4.79	4.46
三条洞方案	5.85	5.66	5.43	5.25	5.09	4.88	4.67
584 m	5.87	5.70	5.47	5.30	5.13	4.92	4.63
586 m	5.87	5.69	5.46	5.29	5.12	4.88	4.60
588 m	5.87	5.68	5.46	5.29	5.11	4.85	4.57
590 m	5.87	5.68	5.45	5.28	5.10	4.83	4.51
592 m	5.87	5.68	5.45	5.27	5.09	4.80	4.28
594 m	5.87	5.68	5.45	5.26	5.07	4.74	4.52
$P_{fmax}/\%$							
设计方案	32.73	22.17	10.52	4.57	1.33	0.09	0.00
三条洞方案	67.34	57.36	41.17	28.03	15.90	5.13	1.22
584 m	33.59	23.12	11.33	5.25	1.83	0.26	0.03
586 m	33.64	23.18	11.38	5.31	1.87	0.28	0.04
588 m	33.71	23.26	11.48	5.39	1.94	0.31	0.05
590 m	33.79	23.37	11.59	5.50	2.02	0.37	0.07
592 m	33.88	23.49	11.73	5.64	2.16	0.46	0.23
594 m	34.00	23.63	11.91	5.87	2.44	0.82	0.98

4.3 非常泄洪洞方案的风险分析

正如以上分析，三条泄洪洞方案在较低频率（千年一遇以上）的洪水过程情况下，低水位时泄洪风险并没有明显的增加，只是高水位时风险增加较大，这为设置两条非常泄洪洞在高水位时启用来降低泄洪风险提供了机会。下面分析两条非常泄洪洞在不同水位启用时的泄洪风险。

表 4 为泄洪风险计算结果，图 5 为各频率洪水情况下泄洪风险变化过程。由表 4 可见，在一定库水位下启用两条非常泄洪洞后，其泄洪风险基本上维持原设计方案的风险水平，启用水位对于泄洪风险的影响也较小，计算的几种启用水位下泄洪风险差异在 1.5% 以内，表明非常泄洪洞的启用对于降低泄洪风险具有较大的作用。图 5 表明了泄洪风险变化过程，可见，不同启用水位对于泄洪风险的影

响主要体现在启用水位以下的时间段内，对于稀遇洪水最终的结果影响不大，对于常遇洪水（五百年一遇以下），启用水位过高时风险有所增加，但因其最高水位较低，整个泄洪风险也较低。

从上面的分析可见，把两条导流洞改建为非常泄洪洞后，只要在来水超过五百年一遇的洪水情况下才需启用，而非常泄洪设施启用的初始水位对大坝泄洪设施防洪安全的影响并不十分明显，并可以维持原设计方案的等同泄洪风险水平，表明这一方案是可行的。

值得说明的是，上述计算的泄洪风险率是计算洪水过程的频率下出现的概率，即是条件概率，例如 $P = 0.01\%$ 洪水过程的泄洪风险率为 33.59%，这时发生漫顶的总概率为 $0.01\% \times 33.59\% = 3.359 \times 10^{-5}$ ，是相当低的。

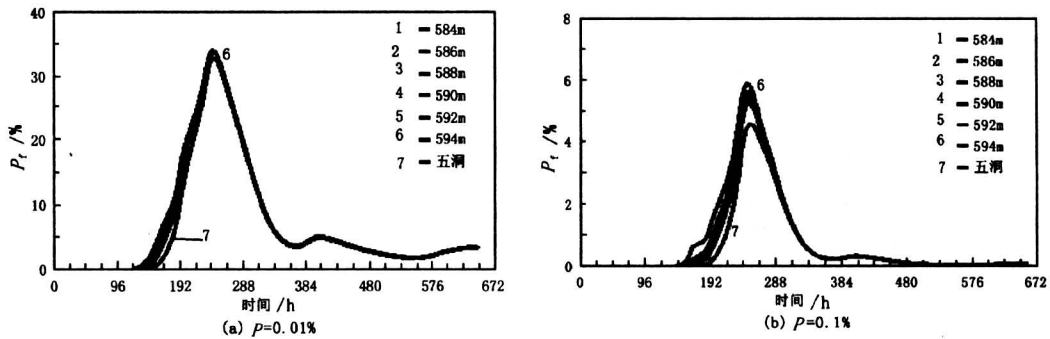


图5 不同水位启用非常泄洪洞情况下
泄洪风险计算结果

Fig.5 The computational results of discharge risk under difference reservoir level using unusual tunnels

5 结论

非常泄洪设施是优化水电站枢纽布置、降低工程成本的有效途径, 针对采用非常泄洪设施方案, 本文提出了一种基于随机微分方程的泄洪风险分析方法。在泄洪风险分析中, 引入随机微分方程, 可以全面地反映各种随机因素的影响, 是一种物理概念清楚、合理可靠的方法。

某工程非常泄洪设施方案泄洪风险分析结果表明, 非常泄洪洞方案通常只要在五百年一遇以上的

稀遇洪水条件下启用。在不同库水位情况下启用, 均能达到基本维持原设计方案的泄流能力及泄洪风险水平, 库最高水位也基本与设计方案一致, 因此该工程在泄洪枢纽布置上采用非常泄洪设施方案是可行的, 基本上保持原设计方案的泄洪风险水平。

参考文献

- [1] 姜树海. 随机微分方程在泄洪风险分析中的运用[J]. 水利学报, 1994, (3): 1~9
- [2] 张炳根, 赵玉芝. 科学与工程中的随机微分方程[M]. 北京: 海洋出版社, 1980

Effect of Discharge Facilities for Unusual Flood Release on Dam Safety

Wu Shiqiang, Jiang Shuhai

(Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China)

[Abstract] To predict the risk assessment of a dam which constructs two special tunnels for unusual flood release, a method based on stochastic differential equation is developed in this paper. After analyzing the sensitivity of computational conditions on discharge risk, the requirement for using two unusual tunnels in this project and their discharge risk are discussed, which provides a scientific basis for making decision on unusual tunnel design plan. The analyzed results show that the risk level of unusual tunnel plan can keep the same as that of the original design plan. Therefore, it proves that the unusual tunnel plan is reasonable.

[Key words] dam safety; flood discharge; risk analysis; stochastic differential equation