

基于蒙特卡罗法的缓变型防洪风险分析

周方明¹, 王 锋², 谷明晗³, 蔡 磊³

(1. 宿州学院 资源与土木工程学院, 安徽 宿州 234000; 2. 江西水利职业学院 水利工程系, 江西 南昌 330013; 3. 南昌大学 建筑工程学院, 江西 南昌 330031)

摘 要: 针对水库大坝服役期的水文、水力不确定性因素及工程结构风险等因素的影响,在时变效应理论的基础上,构建了时变随机变量量化的函数模型,并提出缓变型防洪风险分析模型;同时运用蒙特卡罗法(Monte Carlo method)来求解风险率,进而定量的分析大坝的防洪安全。以池潭水电站为例,利用监测资料序列构建坝前最高水位与坝顶高程的缓变历程的函数关系,结果分析表明:大坝继续使用期内的防洪风险率满足现行规范设防标准,可为大坝的防洪风险评估提供科学依据,亦可将该分析方法拓展至其他服役水利工程的防洪安全评估。

关键词: 大坝防洪; 蒙特卡罗法; 缓变型; 随机模拟; 防洪风险; 安全评估

中图分类号:TV698.2

文献标识码:A

文章编号:1672-643X(2018)05-0180-06

Analysis of flood control risk of slow type based on Monte Carlo method

ZHOU Fangming¹, WANG Feng², GU Minghan³, CAI Lei³

(1. School of Resources and Civil Engineering, Suzhou University, Suzhou 234000, China;

2. Department of Hydraulic Engineering, Jiangxi Water Resources Institute, Nanchang 330013, China;

3. School of Civil Engineering and Architecture, Nanchang University, Nanchang 330031, China)

Abstract: In view of the influence of hydrological and hydraulic uncertainty factors and engineering structure risk during service period, based on the theory of time-varying effect, the time-varying stochastic variable quantization function model was constructed and the slow flood risk analysis model was proposed. At the same time, the Monte Carlo method was used to solve the risk rate, and then the dam safety was analyzed quantitatively. Taking Tan Chi hydropower station as an example, the functional relationship between the maximum water level before the construction of the dam and the slow process of the crest elevation was constructed by using the monitoring data sequence. The case results indicated that the flood risk rate of the dam meets the current fortification standard during the continued using period, which can provide scientific basis for flood risk assessment of dam. The analysis method can also be extended to flood control safety assessment of other water conservancy projects.

Key words: dam flood control; Monte Carlo method; slow type; random simulation; flood control risk; safety assessment

1 研究背景

洪涝灾害是世界发生频次最高、损失最大的自然灾害,我国大部分地区均存在着不同程度的洪涝灾害,对人民生命财产、国家经济建设、地域生态环境构成了重大威胁^[1-3]。世界坝工委员会^[4]于1998年总结了水库防洪安全设计的进展,主要是根

据经验和水库的共性粗略分级制定标准列表备查,并未考虑到水库的个性,如水库大小、坝型、库容以及垮坝的危害。外国学者 Kwon 等^[5]采用了 Monte-Carlo 模拟随机变量分布,用来研究大坝的水文风险概率;国内学者梅亚东等^[6]认为水库大坝在长期服役过程中,影响防洪风险的诸多因素(水力、水文、设计)伴随时间历程发生随机不确定性的变化,

收稿日期:2017-08-14; 修回日期:2017-11-02

基金项目:国家自然科学基金项目(51569014、51409139);江西省研究生创新专项资金项目(YC2016-S093)

作者简介:周方明(1992-),男,江西浮梁人,硕士研究生,研究方向为水工结构和大坝安全监控。

通讯作者:王 锋(1991-),男,江西吉安人,硕士研究生,研究方向为大坝安全监控和水工结构可靠度分析。

致使大坝的防洪能力呈现明显的时变特性^[7-9]。时变特性具体呈现为不确定性洪水的荷载效应与结构的抗力作用是随机变化的过程。故防洪建筑物的失事因素与时变效应存在着协同作用,导致了诸多破坏形式和失效模式,如洪水漫顶、边坡失稳、渗透破坏等;其中洪水漫顶是最常发生的失效模式。

因此,防洪风险分析显得尤为重要,对水库大坝防洪能力进行评估能最大限度地降低其风险和灾害影响,具有重大意义。故本文针对水库大坝泄流能力不足或遭遇超标准洪水所引起水库漫坝的风险进行研究。一般的风险分析方法并未考虑长期服役下大坝防洪性能的衰退,也未能对不同服役环境下大坝实际性态的

差异给予定量的分析。据此,本文在时变效应理论的基础上,试图构建时变随机变量量化的函数模型,并提出缓变型防洪风险分析模型,同时运用蒙特卡罗法求解风险率,从而定量分析大坝防洪时变安全度。

2 时变风险率计算方法

2.1 蒙特卡罗法的基本原理

蒙特卡罗法通过构建一个概率模型或随机过程,使其参数等于所求问题的解,然后通过随机试验或观察等来计算所求参数的统计特征,由此得出问题的近似解,而解的精度可由估计值的标准差来表示,并且据此可得结果的置信度及置信区间,从而解决实际工程问题^[10-11]。首先由多个相互独立的随机变量 $X_1, X_2, \dots, X_n$ 构成功能函数为 $Z = g(X_1, X_2, \dots, X_n)$,再分别对其抽样获得各随机变量的分位值 $x_1, x_2, \dots, x_n$,接着对功能函数式 $z_i = g(x_1, x_2, \dots, x_n)$ 进行求解,设抽样次数为 N ,再计算每组对应的功能函数值 z_i ,其中 $z_i < 0$ 的次数为 M ,在足够多的抽样结束后,其失效概率为 $P_f = M/N$ 。

首先选用一种特定的方式构造随机数,在 $[0, 1]$ 上均匀分布的随机数是最基础的,其他分布的随机数均可在 $[0, 1]$ 范围内的均匀分布基础上经变换获得。混合同余法^[12]以速度快、周期长、统计性质好的特点而被广泛运用。

混合同余法的计算公式为:

$$x_{i+1} = (ax_i + b) \pmod{m} \quad (1)$$

式中: a, b, m 都取非负整数, $m \neq 0$ 。

计算时,引入一个参数 k_i ,令:

$$k_i = \text{int}\left(\frac{ax_i + b}{m}\right) \quad (2)$$

式中:符号 int 表示取整。

则:

$$x_{i+1} = ax_i + b - mk_i \quad (3)$$

将 x_{i+1} 除以 m 后,即得 $[0, 1]$ 上的均匀随机数 r_{i+1} :

$$r_{i+1} = \frac{x_{i+1}}{m} \quad (4)$$

2.2 随机变量的抽样

由混合余同法形成的随机数序列在客观问题中往往需要转换为给定分布下的随机样本值。设 X 的分布函数为 $F_X(x)$ 且反函数 $F_X^{-1}(x)$ 存在连续的随机变量,若令 $F_X(x) = r$,则相应于 r 的 x 值为 $x = F_X^{-1}(r)$ 。若已知 $\{r_i\} (i = 1, 2, \dots, N)$,则可得符合 $F_X(x)$ 分布的 X 的样本值序列:

$$x_i = F_X^{-1}(r_i) \quad (i = 1, 2, \dots, N) \quad (5)$$

随后将抽样值依次代入功能函数式中,求解成果唯有 $g(x_i) > 0$ 和 $g(x_i) \leq 0$ 两种情况,故可定义指标函数:

$$I(g(x_1, x_2, \dots, x_n)) = \begin{cases} 1, & g(x_i) \leq 0 \\ 0, & g(x_i) > 0 \end{cases} \quad (6)$$

依据大数定律计算其失效概率 P_f 为:

$$P_f = \frac{1}{N} \sum I(g(x_1, x_2, \dots, x_n) \leq 0) = \frac{M}{N} \quad (7)$$

式中: M 为 N 次模拟计算中 $g(x_i) \leq 0$ 的总次数。

本文拟采纳 95% 的置信度来确保蒙特卡罗法求解在容许误差 ε 内:

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{2(1 - P_f)}{N \cdot P_f}} \quad (8)$$

由公式(8)可知,抽样数目 N 越大,容许误差 ε 随之减小。若计算结果要满足既定的精度要求,样本数目 N 需满足一定要求:

$$N \geq 100/\hat{P}_f \quad (9)$$

式中: $\hat{P}_f$ 为预先估计的失效概率。

求解风险率的具体形式如下:

(1) 依据实测资料定义功能函数中每个随机变量以及其分布规律;

(2) 产生 0 到 1 之间的均匀随机数 r_i ;

(3) 由 r_i 产生各个随机变量的抽样值;

(4) 将随机变量的抽样值依次代入功能函数式,求解功能函数值 z_i ;

(5) 统计出现 $z_i < 0$ 的次数 M 和总抽样次数 N ;

(6) 当抽样次数 N 符合 $N \geq 100/\hat{P}_f$ 的要求,由 $P_f = M/N$ 计算风险率。

3 缓变型防洪风险分析模型

当坝前水深接近坝顶高程时,大坝防洪风险将显著标志,建立其极限状态方程:

$$Z = H - D = 0 \quad (10)$$

由于大坝服役过程中内外环境等因素的变化,致使各种随机性因素发生缓慢变异,有学者将该时变效应称之为缓变型时变效应^[13-15]。大坝防洪风险的缓变特性随时间逐步发生,或许是结构上的变化,或许是非结构上的。在防洪时变风险分析中,各种不确定性因素将发生缓慢变化, $D(n)$ 是坝顶高程一个随机过程,故利用衰减函数模型来表述坝顶高程的沉降缓变历程:

$$D(n) = a(n, k) D_0 \quad (11)$$

式中: $D(n)$ 为服役 n 年以后随机坝顶高程; D_0 为大坝的坝顶高程初设值; $a(n, k)$ 是衰减函数; k 为衰减系数,相应的衰减模型用指数函数来表示:

$$a(n, k) = \exp\left(-k \frac{n}{T}\right) \quad (12)$$

式中: T 为大坝设计基准期; k 需要通过工程经验或试验资料确定。

坝前最高水位变量 H_i 对极值 I 型分布、对数正态分布和正态分布均不拒绝^[16-17],依据实测资料对各年的坝前最高水位 H_i 进行排序($H_1 < H_2 < \dots < H_n$),计算其经验分布:

$$F_n(H_k) = \begin{cases} 0 & H < H_1 \\ \frac{k}{n} & H_k \leq H \leq H_{k+1}, k = 1, 2, \dots, n-1 \\ 1 & H \geq H_n \end{cases} \quad (13)$$

随机变量 H_i 的均值 μ_H 、标准差 σ_H 及变异系数 δ_H 可应用矩法公式求解:

$$\mu_H = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n H_i \quad (14)$$

$$\sigma_H = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (H_i - \mu_H)^2} \quad (15)$$

$$\delta_H = \frac{\mu_H}{\sigma_H} \quad (16)$$

依照公式(13) 求解经验分布 $F(H_k)$, 并采用 $K-S$ 检验法^[18] 依次检验相应的经验分布 $F(H_k)$, 建立统计量:

$$D_n = \max_{1 \leq k \leq n} \{|F_n(H_k) - F(H_k)|, |F_n(H_{k-1}) - F(H_k)|\} \quad (17)$$

根据显著性水平(一般取 95%),查 $K-S$ 检验临界值得 $D_{n,95\%}$ 与 D_n ,通过对比来判辨分布概型的拟合度,从而获得随机变量 H_i 的最优概率分布。假定 H 与 D 是相互独立且服从正态分布的随机变量, D 的均值 μ_D 和标准差 σ_D 由以下公式确定:

$$\mu_D(n) = \mu_{D_0} \cdot a(n, k) \quad (18)$$

$$\sigma_D(n) = \sigma_{D_0} \cdot a(n, k) \quad (19)$$

随机变量 H 的均值 μ_H 和标准差 σ_H 由荷载评估期 T_E 内荷载统计分析方法求解:

$$\mu_H(T_E) \approx \mu_H + 3.5(1 - 1/\sqrt[4]{n_E})\sigma_H \quad (20)$$

$$\sigma_H(T_E) \approx \sigma_H/\sqrt[4]{n_E} \quad (21)$$

由此可知,大坝第 n 年的防洪风险率的计算公式如下:

$$P_f(n) = \Phi(-\beta_n) = \Phi\left[-\frac{\mu_{D_0} \cdot a(n, k) - \mu_H - 3.5(1 - 1/\sqrt[4]{n_E})\sigma_H}{\sqrt{(\sigma_{D_0} \cdot a(n, k))^2 + (\sigma_H/\sqrt[4]{n_E})^2}}\right] \quad (22)$$

若随机变量 H 和 D 分别服从对数正态分布和正态分布,经公式(4) 产生 $[0, 1]$ 上的均匀随机数 r_i ,再运用坐标变换法获得正态分布 $N(0, 1)$ 的两个随机数 u_{i1}, u_{i2} :

$$\begin{cases} u_{i1} = \sqrt{-2\ln r_i} \cos(2\pi r_{i+1}) \\ u_{i2} = \sqrt{-2\ln r_i} \sin(2\pi r_{i+1}) \end{cases} \quad (23)$$

由于随机变量 D 服从一般正态分布 $N(\mu_D, \sigma_D^2)$, 则其随机数 d_{i1}, d_{i2} :

$$\begin{cases} d_{i1} = \mu_D + u_{i1}\sigma_D = \mu_D + \sqrt{-2\ln r_i} \cos(2\pi r_{i+1})\sigma_D \\ d_{i2} = \mu_D + u_{i2}\sigma_D = \mu_D + \sqrt{-2\ln r_i} \sin(2\pi r_{i+1})\sigma_D \end{cases} \quad (24)$$

由于随机变量 H 服从对数正态分布,令 $H' = \ln H$, 可知 H' 为正态分布,则有:

$$\mu_{H'} = \mu_{\ln H} = \ln\left(\frac{\mu_H}{\sqrt{1 + \delta_H^2}}\right) \quad (25)$$

$$\sigma_{H'} = \sigma_{\ln H} = \sqrt{\ln(1 + \delta_H^2)} \quad (26)$$

设 H' 的随机数为 h'_i , 则随机变量 H 的随机数 h_i 为:

$$h_i = \exp(h'_i) \quad (27)$$

具体计算流程见图 1。

4 实例分析

4.1 工程概况及计算参数

金溪流域上池潭混凝土坝已正常运行多年,选

取该坝的典型坝段进行防洪风险分析,典型坝段剖面示意图见图 2。

工程主要建筑物为二级永久建筑物,坝顶高程为 384.5 m,岩基建基面高程 314.5 m,正常蓄水位 382.0 m,设计洪水位($P = 1\%$)为 382.0 m,校核洪水位($P = 0.1\%$)为 384.0 m,死水位 354.0 m,为年调节水库。

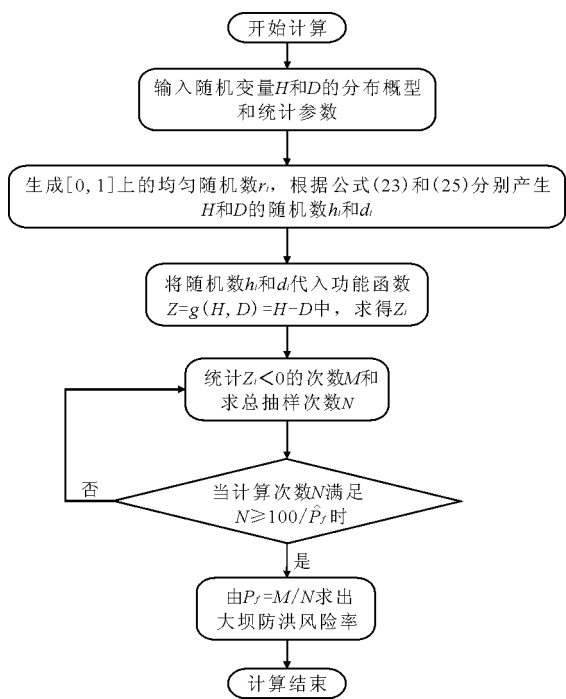


图 1 计算流程图

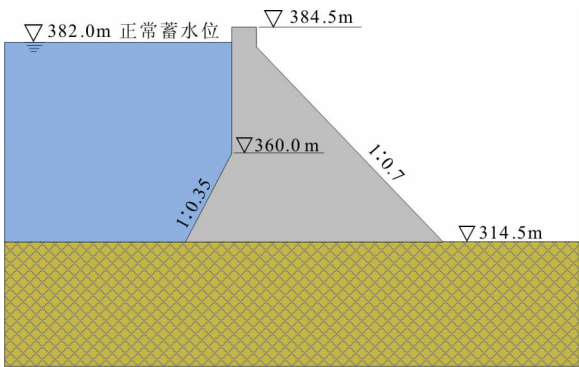


图 2 典型坝段剖面示意图

选取 1990 年至 2011 年间的坝前实测年最高水

位以及对应的坝顶实测年沉陷最大值进行分析,如表 1 所述。

表 1 服役期实测资料

服役年限/a	年最高水位/m	年最大沉降/mm
1	381.79	4.55
2	380.67	4.68
3	381.35	4.24
4	379.26	5.37
5	382.06	4.43
6	380.00	5.22
7	378.53	5.42
8	382.04	5.32
9	381.13	5.12
10	382.12	5.71
11	382.24	6.16
12	378.07	3.33
13	379.28	3.94
14	382.15	4.45
15	381.63	4.79
16	382.06	4.24
17	381.86	5.94
18	381.28	4.88
19	381.36	5.97
20	379.4	5.87
21	381.75	4.76
22	381.17	4.18

对上文所述的 3 种分布函数进行 K - S 检验,其检验成果见表 2。

查 K - S 检验临界值表获得允许概率差值 $D_{22, 95\%} = 0.2807$,与表 2 的计算成果对比分析,3 种分布的最大概率差值 D_n 均小于 $D_{22, 95\%}$,表明随机变量 H 和 D 均服从这 3 种分布的假定,且正态分布的 D_n 值小于对数正态分布和极值 I 型分布的 D_n ,说明实测序列值与正态分布假定之间差别最小,随机变量均为正态分布时的拟合效果最好。

表 2 随机变量分布检验表

随机变量	平均值 μ /m	标准差 σ /m	最大概率差值 D_n		
			正态分布	对数正态	极值 I 型
坝前最高水位 H	380.964	1.281	0.1880	0.1887	0.2581
坝顶高程 D	384.495	7.430×10^{-4}	0.0787	0.0787	0.1221

本工程中的设计基准期为 50 a ($T_N = 50$), 结构荷载评估基准期 T_E 可采用类比法式求解:

$$T_E = T_M \frac{T}{T_N} = T_M \quad (28)$$

随机变量 H 在继续使用期 T_M 内的统计参数 μ_H 、 σ_H 可依据公式(20)、(21)计算, 其计算结果见表 3。

由于缺乏坝顶沉降衰减模型的资料, 故选用公式(12)模拟沉降衰减; 根据已服役 22 a 内坝顶沉降统计的均值近似确定坝顶高程的衰减函数 $a(n, k)$ 。

已知 $\mu_{D_0} = 384.5 \text{ m}$, $\mu_D(22) = 384.495 \text{ m}$, $\sigma_D(22) = 7.43 \times 10^{-4} \text{ m}$, 则由公式(18)、(19) 可得:

$$\mu_D(n) = \mu_{D_0} \cdot a(n, k)$$
$$= 384.5 \exp\left(-3.0 \times 10^{-4} \times \frac{n}{50}\right) \quad (29)$$

$$\sigma_D(n) = \sigma_{D_0} \cdot a(n, k)$$
$$= 7.43 \times 10^{-4} \exp\left(-3.0 \times 10^{-4} \times \frac{n}{50}\right) \quad (30)$$

4.2 大坝防洪风险率评估

选用表 3 所得的荷载评估期统计参数, 依据公式(20~22)来推求大坝继续使用期内的防洪风险率, 并计算现行规范设防标准下的防洪风险率, 其求解成果如表 4 及图 3、4 所示。

表 3 随机变量 H 在继续使用期内的统计参数表

大坝设计使用期 T_N/a	大坝已使用期 T_0/a	继续使用期 T_M/a	荷载评估期 T_E/a	统计时段数 n_E/a	μ_H/m	σ_H/m
50	22	5	5	5	382.449	0.86
		10	10	10	382.926	0.72
		15	15	15	383.169	0.65
		20	20	20	383.327	0.61
		25	25	25	383.442	0.57
		30	30	30	383.532	0.55

表 4 大坝继续使用期内防洪风险率统计表

大坝使用 年限/a	最高水位/m		坝顶高程/m		可靠指标	防洪风险率	规范设防标准
	μ_H	σ_H	μ_D	$\sigma_D \times 10^{-4}$	β	$P_f/\%$	$P_f/\%$
25	382.449	0.86	384.494	7.429	2.38	0.87	22.22
30	382.926	0.72	384.493	7.429	2.18	1.46	26.03
35	383.169	0.65	384.492	7.428	2.04	2.07	29.66
40	383.327	0.61	384.490	7.428	1.91	2.81	33.10
45	383.442	0.57	384.489	7.428	1.84	2.90	36.38
50	383.532	0.55	384.488	7.428	1.74	4.09	39.50

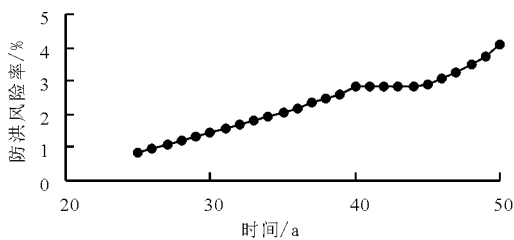


图 3 大坝继续使用期内的防洪风险率

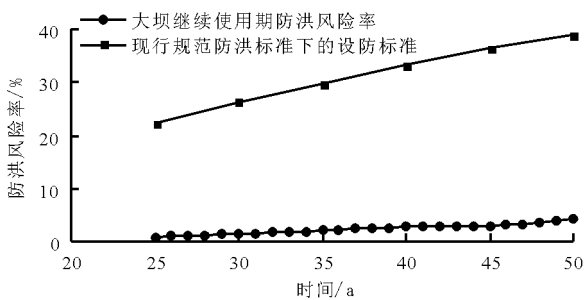


图 4 大坝后续服役期防洪风险率与现行规范设防标准对比图

由图 3 和 4 可知, 大坝在服役过程中其防洪性能伴随时间不断的衰退, 防洪风险率逐步增大, 算例中的大坝在后续服役期内的防洪风险率完全符合现行规范设防标准, 且存在一定的安全余度。为进一步确保大坝生命周期内的防洪安全, 减小洪水漫顶风险率, 建议在工程建设前期充分考虑泥沙作用效应, 并预设一定的淤积库容; 也可在后续服役期内增加坝顶高程, 以增大防洪库容来提升大坝防洪能力。

5 结 论

(1) 本文针对制约大坝防洪能力的不确定性因素, 探究了适宜解决随机问题的蒙特卡罗法 (Monte Carlo Method), 并论述了其基本原理和求解过程。

(2) 将时变效应引入防洪的风险分析中, 构建了时变随机变量量化的函数模型, 据此提出了缓变型防洪风险分析模型。

(3)根据实际工程的实测资料序列,采用随机风险率计算方法定量地分析大坝后续服役期内的防洪风险率,评估大坝继续使用期内的防洪能力。同时,本文的风险分析方法亦可为其他水利工程防洪风险评估提供参考。

参考文献:

- [1] 姜树海,范子武,吴时强. 洪灾风险评估和防洪安全决策[M]. 北京:中国水利水电出版社,2005.
- [2] 田杏丽,黄强,王义民,等. 我国水库洪水资源化研究进展[J]. 水资源与水工程学报,2011,22(5):36-39.
- [3] 毛德华,谢石,刘晓群,等. 洪灾风险分析的国内外研究现状及展望(Ⅲ)——研究展望[J]. 自然灾害学报,2012,21(5):8-15.
- [4] BERGA L. Dam safety[M]. Rotterdam: A A Balkema Publishers, 1998.
- [5] KWON H H, MOON Y I. Improvement of overtopping risk evaluations using probabilistic concept for existing dams[J]. Stochastic environmental research and risk assessment, 2006,20(4):223-237.
- [6] 梅亚东,谈广鸣. 大坝防洪安全的风险分析[J]. 武汉大学学报(工学版),2002,35(6):11-15.
- [7] 姜树海,范子武. 时变效应对大坝防洪风险率的影响研究[J]. 水利学报,2006,37(4):425-430.
- [8] 徐镇凯,王锋,魏博文,等. 多因素协同作用下混凝土坝性能退化机理研究进展[J]. 水利水电科技进展,2016,36(4):80-88.
- [9] 苑希民,田俊玲,庞金龙,等. 基于 FAHP 防洪保护区洪水风险分析的溃口选择研究[J]. 水资源与水工程学报,2016,27(2):135-141.
- [10] 邹铁方,赵力萱. 事故再现不确定分析蒙特卡洛法的样本容量选取方法[J]. 中国安全科学学报,2013,23(5):22-26.
- [11] 段炼,袁寿其,胡林峰,等. 蒙特卡洛法在共轨系统可靠性分析中的应用[J]. 江苏大学学报(自然科学版),2016,37(2):155-161.
- [12] 郭凤鸣. 一种生成大周期伪随机数的新算法——改进的混合同余法[J]. 地球科学,1992(6):733-738.
- [13] 李益,蔡新,徐锦才,等. 考虑时变效应的土石坝安全风险综合评价模型[J]. 河海大学学报(自然科学版),2010,38(6):655-659.
- [14] 范子武,姜树海,李运辉. 影响大坝防洪安全随机因子的时变特性及其量化方法[J]. 岩土工程学报,2008,30(11):1632-1636.
- [15] 李桂青,李秋胜. 工程结构时变可靠度理论及其应用[M]. 北京:科学出版社,2001.
- [16] 卢安平,赵林,郭增伟,等. 基于 Monte Carlo 法的极值分布类型及其参数估计方法比较[J]. 哈尔滨工业大学学报,2013,45(2):88-95.
- [17] 袁子厚,何英明,吴桂英,等. 对数正态分布随机变量在设计基准期内的最大值分布[J]. 中国农村水利水电,2001(11):34-37.
- [18] 夏云云,文尚胜,方方. 基于 Kolmogorov-Smirnov 检验的 LED 可靠性评估[J]. 光子学报,2016,45(9):26-31.
- (上接第179页)
- [12] 李大鸣,王志超,李杨杨,等. 驾驭式洪水演进模型在蓄滞洪区联合防洪中的研究与应用[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版),2016,49(10):1084-1092.
- [13] 范玉,陈建,李大鸣. 一、二维洪水演进数学模型在蓄滞洪区的应用[J]. 华北水利水电学院学报,2009,30(4):12-15.
- [14] 苑希民,田福昌,王丽娜. 漫溃堤洪水联算全二维水动力模型及应用[J]. 水科学进展,2015,26(1):83-90.
- [15] 苑希民,李长跃,田福昌,等. 多源洪水耦合模型在防洪保护区洪水分析中的应用[J]. 水利水运工程学报,2016(5):16-22.
- [16] 刘海娇. 基于一维、二维水力学耦合计算模型的洪水风险分析研究[D]. 天津:天津大学,2012.