

# 水闸闸室安全性态影响因素重要性分析

梁佳铭, 李占超, 徐波, 陆伟刚

(扬州大学水利与能源动力工程学院, 江苏 扬州 225100)

**摘要:**依据现行水闸设计规范,选取表征闸室安全性态的5个指标作为研究对象,筛选出对应的10个影响因素,并基于DRAM算法、BP神经网络以及Garson影响因素重要性度量指标,构建了水闸闸室单一和整体安全性态影响因素重要性分析方法。实例分析表明,方法合理可行。研究成果表明,对于闸室单一安全性态指标,上下游水深和风速对抗滑稳定和基底应力的影响较大,上下游水深对出口段渗透坡降的影响较大;对于闸室整体安全性态指标,上下游水深和风速的影响较大。

**关键词:**水闸; 闸室; 安全性指标; DRAM 抽样算法; BP神经网络; Garson 重要性指标

中图分类号: TV662

文献标志码: A

文章编号: 1006-7647(2020)03-0014-07

**Importance analysis of influencing factors for sluice chamber safety status//LIANG Jiaming, LI Zhanchao, XU Bo, LU Weigang (College of Hydraulic, Energy and Power Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225100, China)**

**Abstract:** According to the current sluice design specifications, five indicators that characterize the safety status of sluice chambers were selected as the research object, and 10 corresponding influencing factors were screened out. Based on Delayed Rejection Adaptive Metropolis (DRAM) algorithm, BP neural network and Garson algorithm, the importance analysis method of the influencing factors for the single and overall safety status of a sluice chamber was constructed. The case study shows that the above method is reasonable and feasible. The research results reveal that for the single safety status index, the water depth in the upstream and downstream, and the wind speed have greater impact on anti-sliding stability and base stress. The seepage slope at the exit section is also influenced by the water depth in the upstream and downstream. The water depth and the wind speed have greater impact on the overall safety status index.

**Key words:** sluice; sluice chamber; safety status index; DRAM sampling algorithm; BP neural network; Garson importance index

截至2017年年底,全国已建成流量为 $5\text{ m}^3/\text{s}$ 及以上的水闸共103 878座,其中大型水闸893座<sup>[1]</sup>,这些水闸在防洪、灌溉、航运、发电、冲沙等方面有不可替代的作用<sup>[2-3]</sup>,但也存在防洪标准偏低、闸室和翼墙不稳定、消能防冲设施损坏、闸基渗流破坏等问题。据2009年全国水闸安全状况普查报告<sup>[4]</sup>,水闸的病险比例高达2/3,严重地影响了水闸的安全运行和效益发挥。在病险水闸中,闸室稳定不满足要求的约占10.0%<sup>[5]</sup>。而闸室是水闸挡水的主体结构,其安全性直接关系到整个水闸的安全和工程效益。一旦水闸失事,将会给上下游地区人民的生命和财产带来巨大的损失。因此,水闸的安全,尤其是闸室的安全尤为重要。

近年来,有许多对水闸安全评价方面的研究,李

达等<sup>[6]</sup>采用多指标综合评价方法从安全性、适用性和耐用性3方面对水闸进行了综合评价,安全性方面主要对混凝土结构、抗渗和抗滑稳定性及闸室沉降等指标进行研究。宋小波等<sup>[7]</sup>基于改进AHP法,结合模糊综合评价理论对水闸指标体系进行安全评价,其中水闸指标体系包括抗渗稳定性、抗滑稳定性、消能防冲、混凝土结构等方面。闫滨等<sup>[8]</sup>将基于改进白化权函数和两阶段判断法的灰色聚类法应用于水闸安全评价中,对于安全评价指标的选取主要采用结构强度、结构稳定性、防洪能力、消能防冲等指标。赵然杭等<sup>[9]</sup>基于定性指标与定量指标提出了基于模糊群决策理论的半结构性模糊评价方法,定量指标有过流能力、渗流稳定、整体稳定、消能设施等,定性指标有混凝土强度、岸墙翼墙等。王少伟等<sup>[10]</sup>

基金项目:江苏省自然科学基金(BK20171288);国家自然科学基金(51779215)

作者简介:梁佳铭(1995—),男,博士研究生,主要从事水闸安全性态分析研究。E-mail:2502402761@qq.com

通信作者:李占超(1985—),男,副教授,博士,主要从事水工程安全研究。E-mail:006520@yzu.edu.cn

从病险水闸安全鉴定结论准确性、除险加固设计方案、服役性能提升程度、经济效益和可持续发展效应等方面,构建由5个一级指标和21个二级指标组成的病险水闸除险加固效果评价指标体系。何杨杨等<sup>[11]</sup>将水闸的健康状况划分为4个等级,在主客观组合赋权的基础上运用云模型实现水闸安全评价。

另一方面,许多学者对水闸的安全进行了较为丰富的研究,顾再仁等<sup>[12]</sup>考虑了上下游水荷载、自重和扬压力,采用非线性平面有限元,分析了闸基应力状态和抗滑稳定。张永生等<sup>[13]</sup>采用弹塑性有限元法,对一般荷载作用下的闸基稳定进行了分析。江启升等<sup>[14]</sup>考虑自重、水压力、扬压力,用分项系数极限状态设计方法对水闸的稳定和应力进行了分析,并将其与单一安全系数法进行了对比。马飞等<sup>[15]</sup>考虑了结构自重、水压力、水重、扬压力、浪压力、风荷载,利用有限元软件 ANSYS 对闸室稳定进行了分析。曹邱林等<sup>[16]</sup>考虑结构自重、回填土荷载和水荷载,借助有限元软件 ABAQUS 对不同闸内外水位情况下微桩群复合地基以及闸室结构的应力应变情况进行了研究。

考虑水闸结构的不确定性,许萍等<sup>[17]</sup>将钢筋混凝土容重、上下游水位、摩擦系数作为变量,将可靠度分析方法与安全系数法进行了比较。张俊芝等<sup>[18]</sup>将底板与地基土间的摩擦系数、钢筋混凝土的容重、上下游水深作为变量,根据 JC 法分析了随机变量不同分布下的闸室稳定可靠度。申向东等<sup>[19]</sup>取自重、上下游水位及闸室底板与地基之间的摩擦系数、基底黏着力和侧向土压力等作为随机变量,对单孔水闸的抗滑稳定可靠性分析方法进行了探讨。许萍等<sup>[20]</sup>用 K-S 法对上游水位的分布规律进行分布拟合和假设检验,建议应根据水闸的类型不同而采用不同的分布形式。王建华等<sup>[21]</sup>将地基摩擦系数、混凝土容重、上下游水位、地基黏聚力作为变量,计算水闸整体稳定的可靠度指标和失效概率,并对影响水闸整体稳定可靠性的不确定因素进行了敏感性检验。邹春霞等<sup>[22]</sup>考虑了水闸结构自重、上下游水压力、闸底板与地基间的摩擦力、基底黏着力,运用信息熵的概念和最大熵原理计算了闸室抗滑稳定的失效概率。贾仁年等<sup>[23]</sup>将地基摩擦系数、混凝土容重、上下游水位以及地基黏聚力作为变量,基于直接积分法计算了水闸稳定的可靠度指标和失效概率。齐艳杰等<sup>[24]</sup>将上下游水深、混凝土重度以及底板与地基间的摩擦系数作为变量,采用蒙特卡罗法进行数值模拟,研究不同变量的均值、变异系数、分布类型对闸室抗滑稳定可靠度指标的影响。

综合以上分析可见,现有研究涵盖了水闸结构

安全的确定性分析和不确定性分析,研究的广度较为丰富,但是仍然存在需要深入研究的方面。在荷载或影响因素选取方面,现有研究中并不完全一致,究其原因,在于研究者对应该考虑哪些因素上存在认识的差异。同时,在水闸安全性态的理解上,大都侧重于研究水闸的抗滑稳定性,而对地基承载力、渗透破坏等其他安全性态指标及整体安全性态指标研究较少。因此,本文依据现行水闸设计规范,首先,选取表征水闸安全性态的指标,并筛选出对应的影响因素;然后,基于延迟拒绝自适应算法(Delayed Rejection Adaptive Metropolis, DRAM)、BP 神经网络以及 Garson 提出的影响因素重要性度量指标,构建了水闸闸室安全性态影响因素重要性分析方法;最后,采用本文提出的方法,对某一实际水闸工程的闸室结构的安全性态进行了影响因素重要性分析。

## 1 闸室安全性态指标及其影响因素选取

根据 SL265—2016《水闸设计规范》<sup>[25]</sup>,本文考虑的荷载分别为:水闸结构的自重  $W_1$ ,上、下游水重  $W_2$ 、 $W_3$ ,浮托力  $u_1$ ,渗透压力  $u_2$ ,上、下游水压力  $P_1$ 、 $P_2$ ,浪压力  $P_3$  及风荷载  $P_4$  等,如图 1 所示。

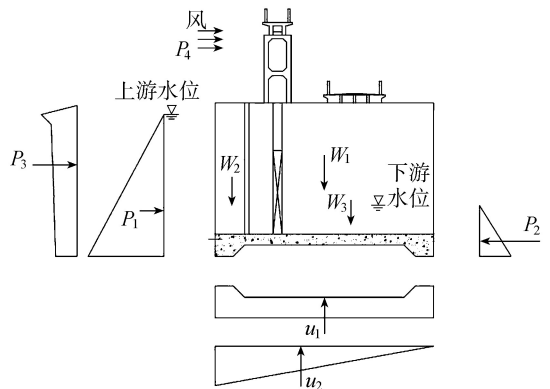


图 1 闸室结构

根据 SL214—2015《水闸安全评价导则》<sup>[26]</sup>,选取 5 个闸室安全性态指标:抗滑稳定安全系数  $K_c$ 、最大和最小基底应力  $P_{\max}$ 、 $P_{\min}$ 、不均匀系数  $\eta$  及出口段渗透坡降  $J$ ,计算公式为

$$K_c = \frac{\tan\varphi_0(W_1 + W_2 + W_3 - u_1 - u_2) + C_0A}{P_1 + P_3 + P_4 - P_2} \quad (1)$$

$$P_{\max} = \frac{W_1 + W_2 + W_3 - u_1 - u_2}{A} + \frac{M}{W} \quad (2)$$

$$P_{\min} = \frac{W_1 + W_2 + W_3 - u_1 - u_2}{A} - \frac{M}{W} \quad (3)$$

$$\eta = \frac{P_{\max}}{P_{\min}} \quad (4)$$

$$J = \frac{h'_0}{S'} \quad (5)$$

式中： $\varphi_0$  为闸室基础底面与土质地基之间的摩擦角； $C_0$  为闸室基础底面与土质地基之间的黏结力； $M$  为作用在闸室上的全部竖向荷载和水平向荷载对于基础底面垂直水流方向的形心轴的力矩； $A$  为闸室基底面的面积； $W$  为闸室基底面对于该底面垂直水流方向的形心轴的截面矩； $h'_0$  为出口段修正后的水头损失值； $S'$  为底板埋深与板桩入土深度之和。

其中，扬压力、浪压力的具体计算方法见文献[25]。风荷载  $P_6$  参考 GB 50009—2012《建筑结构荷载规范》<sup>[27]</sup> 进行计算：

$$P_6 = \beta_z \mu_s \mu_z w_0 \quad (6)$$

式中： $\beta_z$  为高度  $z$  处的风振系数； $\mu_s$  为风荷载体型系数； $\mu_z$  为风压高度变化系数； $w_0$  为基本风压。

闸室各个安全性态指标所涉及到的荷载及其对应的影响因素见表 1。

表 1 安全性态指标及其影响因素

安全性态指标	公式	对应荷载	影响因素
$K_c$	(1)	$W_1, W_2, W_3, u_1, u_2, P_1, P_2, P_3, P_4$	$f_1 \sim f_{10}$
$P_{\max}$	(2)	$W_1, W_2, W_3, u_1, u_2, P_1, P_2, P_3, P_4$	$f_1 \sim f_5, f_8 \sim f_{10}$
$P_{\min}$	(3)	$W_1, W_2, W_3, u_1, u_2, P_1, P_2, P_3, P_4$	$f_1 \sim f_5, f_8 \sim f_{10}$
$\eta$	(4)	$W_1, W_2, W_3, u_1, u_2, P_1, P_2, P_3, P_4$	$f_1 \sim f_5, f_8 \sim f_{10}$
$J$	(5)	$u_2$	$f_2, f_3$

注： $f_1$  为钢筋混凝土容重； $f_2$  为上游水深； $f_3$  为下游水深； $f_4$  为风区长度； $f_5$  为风速； $f_6$  为地基土摩擦角； $f_7$  为地基土黏聚力； $f_8$  为淤泥浮容重； $f_9$  为上游泥沙淤积厚度； $f_{10}$  为淤沙内摩擦角。

## 2 闸室安全性态影响因素重要性分析方法

### 2.1 影响因素抽样的 DRAM 算法

影响因素的概率分布形式对不确定分析结果具有一定的影响，本文初步假定闸室的所有影响因素均服从正态分布，某些参数的其他概率分布形式，可参考文献[28]。蒙特卡罗模拟方法是一种概率统计法或统计模拟法，马尔可夫链蒙特卡罗方法<sup>[29]</sup>是一种特殊的蒙特卡罗方法，该方法通过建立状态转移规则，构建一条马尔可夫链，使得马尔可夫链的平稳分布渐进于已知概率分布，实现从已知概率分布对变量的抽样。本文采用马尔可夫链蒙特卡罗方法中的 DRAM 算法<sup>[30]</sup>进行影响因素的抽样。该方法通过将全局自适应与局部自适应采样相结合，可以快速构造出接近目标分布的建议概率函数，从而极大地提高了抽样的效率。

DRAM 算法的具体步骤可表示为：①假设马尔可夫链当前( $t$ 时刻)状态为  $x_t$ ，从建议概率函数  $N_p(x_t, C_{it})$  中产生候选点  $x^*$ ；②计算接受概率  $A$ ，产生均匀随机数  $u \sim U(0, 1)$ ；③若  $u < A$  则接受候选点，此时  $x_{t+1} = x^*$ ，然后进入⑤，否则进入④；④调整协方差矩阵  $C_{it} = \lambda_i C_{it}$ ，从建议概率函数  $N_p(x_t, x^*, \dots, C_{it})$  中产生新的候选点  $x^*$ ，返回②；⑤若  $t < m$  ( $m$  为马尔可夫链总长度)，则  $t = t + 1$ ，返回①，否则结束模拟。

### 2.2 抽样空间拟合的 BP 神经网络

BP 神经网络是一种按照误差逆向传播算法训练的多层前馈神经网络，它由输入层、隐含层、输出层 3 层神经元层组成<sup>[31]</sup>。在 BP 网络的拓扑结构中，输入节点与输出节点的个数由问题本身决定。本文选取影响因素的个数(共 10 个，见表 1)作为输入节点数。对于输出层节点数，当对单一安全性态指标(比如：抗滑稳定安全系数)进行分析时，取为 1；当对闸室的整体安全性态指标(即：抗滑稳定安全系数、最大和最小基底应力、不均匀系数及出口段渗透坡降同时作为输出)进行分析时，取为 5。

关于隐含层的层数与隐节点的数目有很多种说法。Robert<sup>[32]</sup>提出：对只有一个隐含层的神经网络，只要隐节点数量足够多，就可以以任意精度逼近一个非线性函数。因此，本文将隐含层的层数设定为 1。对于隐节点的个数  $S$ ，其选取对 BP 网络的整体性能有着直接的影响，本文采用如下经验公式<sup>[33]</sup>：

$$S = \sqrt{0.43mn + 0.12n^2 + 2.54m + 0.77n + 0.35} + 0.51 \quad (7)$$

式中： $m$  为输入层节点数； $n$  为输出节点数。

因此，在对单一安全性态指标的影响因素重要性进行分析时，隐节点的个数设定为 6；在对整体安全性态指标的影响因素重要性进行分析时，隐节点的个数设定为 8。

### 2.3 影响因素重要性度量指标

Garson<sup>[34]</sup>提出了一种借助 BP 神经网络获得的连接权值，确定变量重要性的分析方法。其基本思想是，采用从输入层到隐含层的权值与隐含层到输出层的权值的乘积，来计算输入变量对输出变量的影响程度，具体表达为

$$R_{ij} = \frac{\sum_{j=1}^n (|W_{ij} W_{jk}| / \sum_{r=1}^m |W_{rj}|)}{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (|W_{ij} W_{jk}| / \sum_{r=1}^m |W_{rj}|)} \quad (k = 1, 2, \dots, L) \quad (8)$$

式中： $R_{ij}$  为输入变量的相对重要性； $W_{ij}$ 、 $W_{jk}$  分别为输入层到隐含层、隐含层到输出层之间的连接权值； $i = 1, 2, \dots, m$ ； $k = 1, 2, \dots, n$ 。

水闸闸室结构安全性态影响因素重要性分析流程如图2所示。

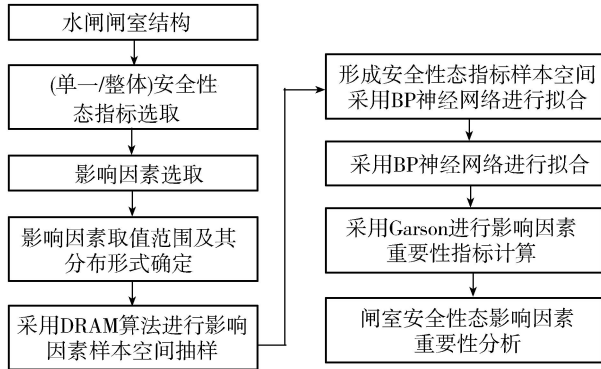


图2 水闸闸室结构安全性态影响因素重要性分析流程

### 3 工程实例分析

某水闸位于江苏省宝应湖畔,主要功能为防汛排涝。水闸设计流量为  $160 \text{ m}^3/\text{s}$ , 闸孔总净宽  $40 \text{ m}$ , 每孔净宽  $8.0 \text{ m}$ , 闸室总宽  $45.5 \text{ m}$ 。闸室为钢筋混凝土大、小底板分离式结构, 闸身为3级水工建筑物, 闸基为粉质壤土。闸室纵剖面图如图3所示。10个影响因素概率分布的特征参数见表2。

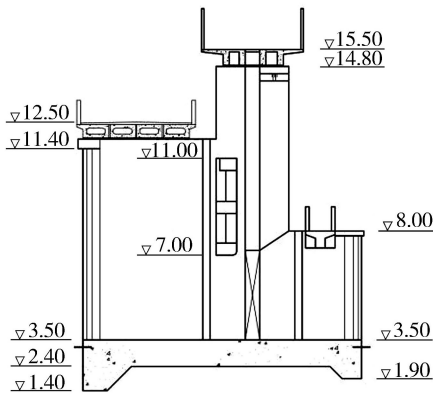


图3 闸室纵剖面(单位:m)

表2 10个影响因素概率分布的特征参数

项目	$f_1/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	$f_2/\text{m}$	$f_3/\text{m}$	$f_4/\text{m}$	$f_5/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	$f_6/(\text{°})$	$f_7/\text{kPa}$	$f_8/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	$f_9/\text{m}$	$f_{10}/(\text{°})$
均值	24.5	6	2	2000	10	12.6	19.8	11	0.4	10
方差	1.225	2.4	0.4	50	6	2.52	7.92	2.2	0.24	4
取值范围	22~25	1~6.75	1.5~2.5	1950~2050	0~20	8~18	2~36	9~13	0~0.8	5~15

表3 各安全性态指标影响因素的重要性指标  $R_{ij}$

安全性态指标	$f_1$	$f_2$	$f_3$	$f_4$	$f_5$	$f_6$	$f_7$	$f_8$	$f_9$	$f_{10}$
$K_c$	0.033	0.556	0.139	0.013	0.098	0.062	0.068	0.007	0.008	0.015
$P_{\max}$	0.078	0.365	0.089	0.035	0.248	0.022	0.030	0.058	0.043	0.033
$P_{\min}$	0.082	0.279	0.110	0.048	0.192	0.050	0.055	0.061	0.064	0.059
$\eta$	0.047	0.437	0.100	0.033	0.234	0.028	0.016	0.029	0.045	0.033
$J$	0.008	0.536	0.403	0.007	0.008	0.008	0.007	0.008	0.007	0.009
整体	0.064	0.555	0.097	0.008	0.206	0.012	0.039	0.006	0.007	0.006

采用本文所构建的水闸闸室安全性态影响因素重要分析方法,对该水闸进行分析,神经网络对单一及整体安全性态指标线性相关系数均较大,分别为  $0.9968$ 、 $0.9999$ 、 $0.9948$ 、 $0.9998$ 、 $0.9999$ 、 $0.9878$ , 分析结果见表3,其中在采用DRAM算法进行抽样时,样本个数设定为68000。各个影响因素的重要性排序如下(括号内的影响因素重要性相当):

$$K_c : f_2 \sqrt{f_3} \sqrt{f_5} \sqrt{f_7} \sqrt{f_6} \sqrt{f_1} \sqrt{f_{10}} \sqrt{f_4} \sqrt{f_9} \sqrt{f_8};$$

$$P_{\max} : f_2 \sqrt{f_5} \sqrt{f_3} \sqrt{f_1} \sqrt{f_8} \sqrt{f_9} \sqrt{f_4} \sqrt{f_{10}} \sqrt{f_7} \sqrt{f_6};$$

$$P_{\min} : f_2 \sqrt{f_5} \sqrt{f_3} \sqrt{f_1} \sqrt{f_9} \sqrt{f_8} \sqrt{f_{10}} \sqrt{f_7} \sqrt{f_6} \sqrt{f_4};$$

$$\eta : f_2 \sqrt{f_5} \sqrt{f_3} \sqrt{f_1} \sqrt{f_9} \sqrt{f_{10}} \sqrt{f_4} \sqrt{f_8} \sqrt{f_6} \sqrt{f_7};$$

$$J : f_2 \sqrt{f_3} \sqrt{f_{10}} \sqrt{f_1} \sqrt{f_5} \sqrt{f_6} \sqrt{f_8} \sqrt{f_4} \sqrt{f_7} \sqrt{f_9};$$

$$\text{整体排序} : f_2 \sqrt{f_5} \sqrt{f_3} \sqrt{f_1} \sqrt{f_7} \sqrt{f_6} \sqrt{f_4} \sqrt{f_9} \sqrt{f_8} \sqrt{f_{10}}.$$

对于某一安全性态指标,存在多个影响因素,其相互影响关系体现在影响因素所构成的多维空间内。为直观反映单一影响因素与安全性态指标之间的关系,对安全性态指标与单一影响因素之间的关系绘制散点图如图4所示(图中  $h_1$  为上游水深;  $h_2$  为下游水深;  $v$  为风速)。需要说明的是,由于抗滑稳定安全系数最大值为无穷大,为清晰地反映抗滑稳定安全系数较小时与影响因素的关系,在抗滑稳定安全系数等于80处进行了截断。图4中影响因素的选取是按照其对应的重要性指标大于0.10为标准进行选取的。

从表3及图4可见:

a. 对于抗滑稳定安全系数,当上游水深较小时,抗滑稳定安全系数随上游水深的增加近似呈抛物线形式增长;当上游水深较大时,抗滑稳定安全系数随上游水深的增加近似呈负指数形式衰减;当上下游水深相近时,抗滑稳定安全系数为无穷大;在同一下游水深处,抗滑稳定安全系数呈现上疏下密的分布规律。对于最大和最小基底应力及不均匀系数,随着上游水深的增大,最大基底应力整体上呈抛

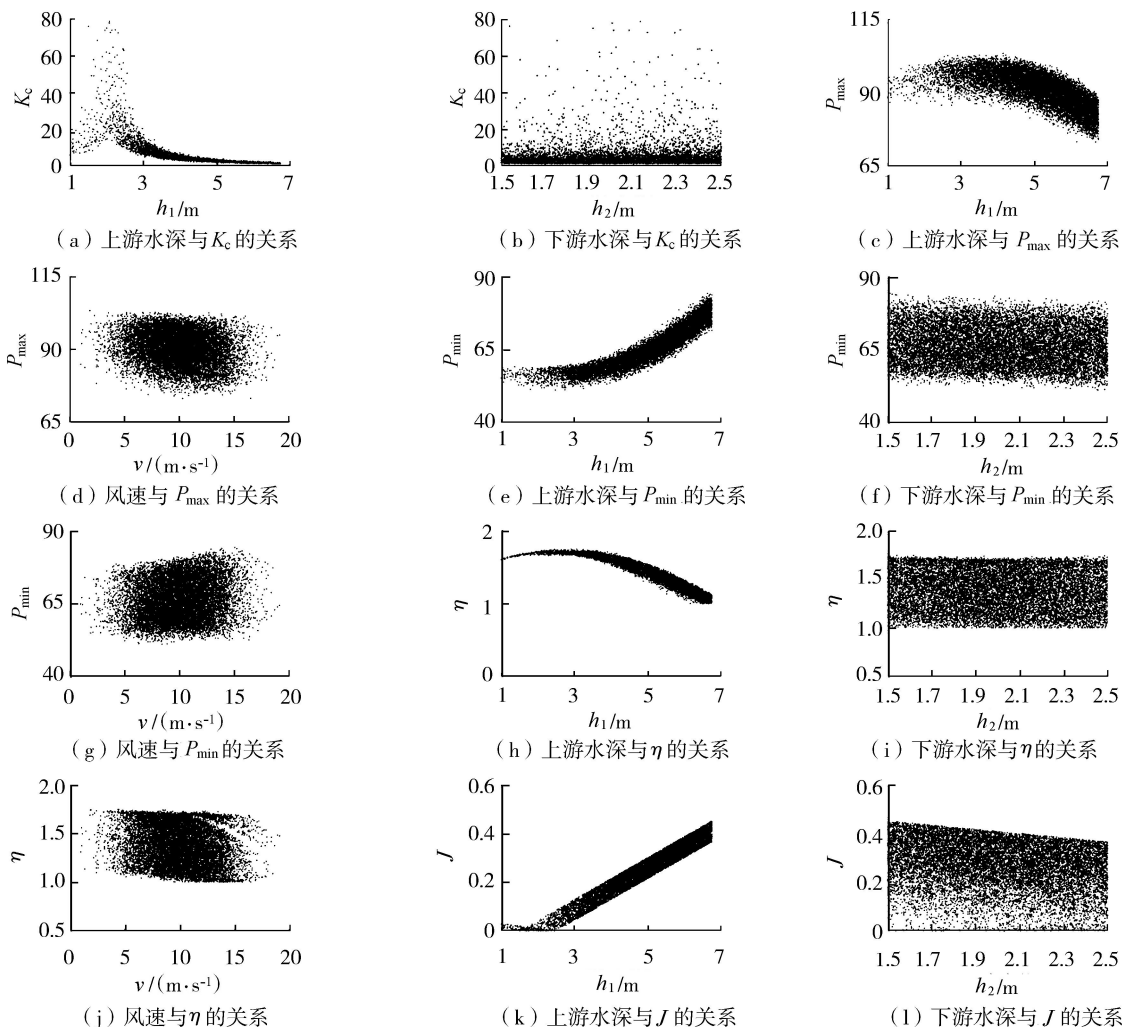


图4 安全性态指标与单一影响因素的关系

物线形式先增大后减小,最小基底应力呈抛物线形式先减小后增大,不均匀系数与最大基底应力呈现类似的规律;下游水深对最小基底应力和不均匀系数均呈条带状分布规律;随着风速的增大,最大基底应力和不均匀系数总体呈现下降趋势,而最小基底应力则呈现上升趋势。对于出口段渗透坡降,当上游水深较小时,出口段渗透坡降随上游水深的增加呈线性衰减,当上游水深较大时,出口段渗透坡降随上游水深的增加呈线性增长,当上下游水深相近时,出口段渗透坡降趋近于0;随着下游水深的增加,出口段渗透坡降总体呈现下降趋势。

**b.** 对于抗滑稳定安全系数,上游水深的影最为显著,下游水深和风速次之,而风区长度、下游泥沙淤积厚度、淤泥浮容重影响最小;对于最大和最小基底应力及不均匀系数,上游水深的影最为大,风速、下游水深次之;对于出口段渗透坡降,上下游水深影响最大,其他因素影响很小。

**c.** 根据表1及式(2)(3),最大和最小基底应力及不均匀系数与地基土摩擦角和地基土黏聚力无

关,从表3可见,它们对于最大基底应力和不均匀系数的重要性均不大于0.03,这主要是因为本文采用的重要性度量指标是基于拟合后的BP神经网络权重值,而对于物理上不相关的影响因素,在采用BP神经网络进行拟合分析时,其权重值往往并不完全为0。而对于最小基底应力,地基土摩擦角和地基土黏聚力的重要性指标分别为0.05和0.055,相对较大,这主要是与此时BP神经网络的拟合程度相对误差有关。

**d.** 对于出口段渗透坡降,根据表1及式(5),它仅仅与上下游水深有关联,上下游水深的重要性累积达到了0.94,较好地反映了出口段渗透坡降的物理意义,其他因素的重要性均在0.01以下,主要是由于BP神经网络的计算误差所致。

**e.** 对于整体安全性态指标,上游水深影响最大,风速及下游水深影响次之,其他因素影响较小;与单一安全性态指标的分析结果相比,两者的结果基本一致,均认为上下游水深和风速的影响最大,尤其是与最大和最小基底应力及不均匀系数的分析结

果相比较,筛选出的主要影响因素及其顺序均相同。

## 4 结 论

a. 对于闸室单一安全性态而言,影响抗滑稳定和基底应力的主要因素分别为上下游水深和风速,影响出口渗透坡降的主要因素为上下游水深;对于闸室整体安全性态而言,主要影响因素分别为上下游水深和风速。

b. 对比闸室单一安全性态和整体安全性态的影响因素重要性分析结果,两者的结果基本一致,在一定程度上,反映了上下游水深和风速对闸室安全性态的影响较为显著。

c. 对于闸室单一安全性态而言,上游水深对各安全性态指标的影响程度较大,上游水深逐渐增大的过程中,抗滑稳定安全系数先近似呈抛物线形式增长后近似呈负指数形式衰减,最大基底应力和不均匀系数呈抛物线形式先增大后减小;最小基底应力呈抛物线形式先减小后增大;出口段渗透坡降先呈线性衰减后呈线性增长。

本文假定了各个影响因素之间是独立不相关的且均服从正态分布,采用的荷载及安全性分析模型均基于现行规范,并依据经验设定了影响因素的取值范围,因此,对于不同的计算模型、不同的参数分布及其相关性、以及不同的取值范围,对闸室安全性态影响因素重要性分析的结果是否影响以及影响程度如何,均需要进行深入分析和研究。

### 参考文献:

[1] 中华人民共和国水利部. 全国水利发展统计公报[M]. 北京:中国水利水电出版社,2018.

[2] 陈忠儒,石含英. 葛洲坝航道冲沙闸设计特点与运行实施[J]. 长江科学院院报,1993,10(3):14-21. (CHEN Zhongru, SHI Hanying. Design characteristics and operation of Gezhouba Channel Scouring Sluice [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 1993,10(3):14-21. (in Chinese))

[3] 高志华,陈勇. 三峡冲沙闸消能防冲建筑物混凝土温度控制[J]. 人民长江,2008,54(7):5-10. (GAO Zhihua, CHEN Yong. Concrete temperature control for energy dissipation and anti-scouring structure of TGP's sediment flushing sluice[J]. Yangtze River, 2008,54(7):5-10. (in Chinese))

[4] 水利部水利建设管理总站. 全国水闸安全状况普查报告[R]. 郑州:黄河水利科学研究院,2009.

[5] 袁庚尧,余伦创. 全国病险水闸除险加固专项规划综述[J]. 水利水电工程设计,2003,22(3):6-9. (YUAN Gengyao, YU Lunchuang. The summary of the special program of countrywide ill-conditioned and dangerous

sluice [J]. Design of Water Resources & Hydroelectric Engineering, 2003,22(3):6-9. (in Chinese))

[6] 李达,王春树,杜晓舜,等. 多指标综合评价方法在上海市水闸安全鉴定中的应用[J]. 水电能源科学,2012,30(7):109-111. (LI Da, WANG Chunshu, DU Xiaoshun, et al. Application of multi-index comprehensive evaluation method to safety evaluation of sluice in Shanghai [J]. Water Resources and Power, 2012, 30(7):109-111. (in Chinese))

[7] 宋小波,蔡新,杨杰. 基于改进 AHP 法的水闸安全性模糊综合评价[J]. 水电能源科学,2013,31(2):174-176. (SONG Xiaobo, CAI Xin, YANG Jie. Fuzzy comprehensive evaluation of sluice safety based on improved AHP method[J]. Water Resources and Power, 2013, 31(2):174-176. (in Chinese))

[8] 闫滨,孙友良,于保慧. 基于改进白化权函数灰色聚类法的水闸安全评价[J]. 沈阳农业大学学报,2015,46(2):245-249. (YAN Bin, SUN Youliang, YU Baohui. Sluice safety evaluation based on grey clustering method using improved whitenization weight function[J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2015, 46(2):245-249. (in Chinese))

[9] 赵然杭,陆小蕾. 基于模糊理论的水闸安全评价方法及其应用[J]. 水电能源科学,2010,28(2):114-118. (ZHAO Ranhang, LU Xiaolei. Safety evaluation method of sluice based on fuzzy theory and its application[J]. Water Resources and Power, 2010, 28(2):114-118. (in Chinese))

[10] 王少伟,苏怀智,付启民. 病险水闸除险加固效果评价指标体系研究[J]. 水利经济,2018,36(2):7-9. (WANG Shaowei, SU Huaizhi, FU Qimin. Establishment of evaluation index system for reinforcement effects of dangerous sluices [J]. Journal of Economics of Water Resources,2018,36(2):7-9. (in Chinese))

[11] 何杨杨,苏怀智. 考虑规范分级的水闸安全云评价方法[J]. 水利水电科技进展,2020,40(2):29-35. (HE Yangyang, SU Huaizhi. Cloud assessment method of sluice safety considering specification classification [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2020,40(2):29-35. (in Chinese))

[12] 顾再仁,姚志坚,罗穗红. 泄水闸闸基抗滑稳定分析有限元计算[J]. 人民珠江,2000,21(2):19-22. (GU Zairen, YAO Zhijian, LUO Suihong. Finite element calculation of stability against sliding for sluice foundation [J]. Pearl River, 2000,21(2):19-22. (in Chinese))

[13] 张永生,梁立孚. 水闸地基整体稳定性弹塑性有限元分析[J]. 长沙大学学报,2003,17(4):1-5. (ZHANG Yongsheng, LIANG Lifu. Analysis of elastic-plastic finite element for the whole foundation stability of sluice [J]. Journal of Changsha University, 2003,17(04):1-5. (in Chinese))

- [14] 江启升,张林. 分项系数极限状态法在水闸设计中的应用[J]. 水电站设计, 2003, 19(2): 13-17. (JIANG Qisheng, ZHANG Lin. Application of partial safety factors limit state method in sluice design [J]. Design of Hydroelectric Power Station, 2003, 19(2): 13-17. (in Chinese))
- [15] 马飞,马兆会,李永春. 基于ANSYS的孟家闸闸室稳定有限元分析[J]. 水利规划与设计, 2013, 26(11): 54-55. (MA Fei, MA Zhaohui, LI Yongchun. Finite element analysis of stability of Mengjia Sluice chamber based on ANSYS [J]. Water Resources Planning and Design, 2013, 26(11): 54-55. (in Chinese))
- [16] 曹邱林,孟怡凯. 微桩群复合地基水闸闸室结构有限元分析[J]. 人民长江, 2013, 44(4): 31-34. (CAO Qiulin, MENG Yikai. FEM analysis on sluice structure with composite foundation of micro-piles [J]. Yangtze River, 2013, 44(4): 31-34. (in Chinese))
- [17] 许萍,夏友明. 水闸闸室抗滑稳定可靠度校核方法探讨[J]. 工程力学, 1998, 15(2): 123-128. (XU Ping, XIA Youming. Analysis of stability against sliding for gate chamber [J]. Engineering Mechanics, 1998, 15(2): 123-128. (in Chinese))
- [18] 张俊芝,高延红. 随机变量不同分布下的闸室稳定可靠度[J]. 南昌水专学报, 1999, 18(4): 5-8. (ZHANG Junzhi, GAO Yanhong. The reliability against sliding stability of gate chamber with random variables of different distribution [J]. Journal of Nanchang Institute of Technology, 1999, 18(4): 5-8. (in Chinese))
- [19] 申向东,赵占彪,王耀强,等. 单孔水闸抗滑稳定可靠性分析[J]. 排灌机械, 2000, 19(1): 24-26. (SHEN Xiangdong, ZHAO Zhanbiao, WANG Yaoqiang, et al. Reliability analysis on anti-sliding stability of single arch sluice [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2000, 19(1): 24-26. (in Chinese))
- [20] 许萍,周建康,费勤贵. 水闸上游水位变化规律统计分析[J]. 扬州大学学报(自然科学版), 2001, 28(3): 34-37. (XU Ping, ZHOU Jiankang, FEI Qingui. Statistical analyze of sluice in upriver water level variational rule [J]. Journal of Yangzhou University (Natural Science Edition), 2001, 28(3): 34-37. (in Chinese))
- [21] 王建华,杨海平. 水闸整体稳定的可靠性分析[J]. 中国农村水利水电, 2004, 46(11): 82-83. (WANG Jianhua, YANG Haiping. Reliability analysis of whole stability of sluice [J]. China Rural Water and Hydropower, 2004, 46(11): 82-83. (in Chinese))
- [22] 邹春霞,申向东. 最大熵法计算水闸闸室抗滑稳定可靠性[J]. 水利水运工程学报, 2005, 27(1): 47-51. (ZOU Chunxia, SHEN Xiangdong. Stability against sliding for gate chambers by principle of maximum entropy [J]. Hydro-Science and Engineering, 2005, 27(1): 47-51. (in Chinese))
- [23] 贾仁年,王建华. 基于直接积分法的水闸稳定可靠度分析[J]. 浙江水利科技, 2006, 34(3): 12-14. (JIA Rennian, WANG Jianhua. Analysis of stable reliability for sluice based on direct numerical integration [J]. Zhejiang Hyrotechnics, 2006, 34(3): 12-14. (in Chinese))
- [24] 齐艳杰,王建,李立辉. 蒙特卡罗法在水闸闸室可靠度分析中的应用[J]. 水电能源科学, 2009, 27(2): 116-118. (QI Yanjie, WANG Jian, LI Lihui. Application of Monte-Carlo method in reliability analysis against sliding for gate lock chamber [J]. Water Resources and Power, 2009, 27(2): 116-118. (in Chinese))
- [25] 中华人民共和国水利部. 水闸设计规范: SL 265—2016 [S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2016.
- [26] 中华人民共和国水利部. 水闸安全评价导则: SL 214—2015 [S]. 北京: 水利水电出版社, 2015.
- [27] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑结构荷载规范: GB 50009—2012 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
- [28] 武清玺. 结构可靠性分析及随机有限元法 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.
- [29] 康崇禄. 蒙特卡罗方法理论和应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2015.
- [30] HAARIO H, LAINE M, MIRA A, et al. DRAM: efficient adaptive MCMC [J]. Statistics and Computing, 2006, 16(4): 339-354.
- [31] 刘春艳,凌建春,寇林元,等. GA-BP神经网络与BP神经网络性能比较[J]. 中国卫生统计, 2013, 30(2): 173-176. (LIU Chunyan, LING Jianchun, KOU Linyuan, et al. Performance comparison between GA-BP neural network and BP neural network [J]. Chinese Journal of Health Statistics, 2013, 30(2): 173-176. (in Chinese))
- [32] ROBERT H N. Theory of the backpropagation neural network. proceedings of the international joint conference on neural networks [M]. New York: IEEE Press, 1989.
- [33] 高大启. 有教师的线性基本函数前向三层神经网络结构研究[J]. 计算机学报, 1998, 21(1): 80-85. (GAO Daqi. On structures of supervised linear basis function feedforward three-layered neural networks [J]. Chinese Journal of Computers, 1998, 21(1): 80-85. (in Chinese))
- [34] GARSON G D. Interpreting neural-network connection weights [J]. AI Expert, 1991, 6(4): 46-51.

(收稿日期: 2019-05-20 编辑: 郑孝宇)