第33卷第4期
2022年 8月
水资源与水工程学报
Journal of Water Resources & Water Engineering
Vol. 33 No. 4
Aug. ,2022

DOI:10.11705/j.issn.1672-643X.2022.04.23

大坝结构可靠性影响因子的全局重要性分析

张晶梅[1,2]，王少伟[3]

（1.河海大学 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室，江苏 南京 210098；2.浙江水利水电学院 水利与环境工程学院，浙江 杭州 310018；3.常州大学 环境与安全工程学院，江苏 常州 213164）

摘　要：传统方法一般采用灵敏度系数分析各项不确定因子对大坝结构可靠性的影响，但灵敏度系数只在因子设计验算点处取值，针对该局部性取值的缺点，研究了大坝结构可靠性影响因子的全局重要性分析方法。首先，在建立大坝结构可靠性分析模型的基础上，考虑不确定因子在整个失效域内的变化，构建了影响因子的全局重要性测度指标。然后，采用基于截断重要抽样的蒙特卡洛法，实现了因子全局重要性的量化分析。最后，建立了某坝的结构可靠性分析模型，计算对比了各不确定因子的全局重要性测度和灵敏度系数，结果表明全局重要性测度能更全面地反映不确定因子对大坝结构可靠性的影响。

关键词：大坝结构可靠性；全局重要性测度；灵敏度；不确定因子；截断重要抽样；蒙特卡洛法

中图分类号：TV61　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1672-643X(2022)04-0171-07

Global importance analysis of influencing factors of dam structural reliability

ZHANG Jingmei[1,2], **WANG Shaowei**[3]

(1. *State Key Laboratory of Hydrology - Water Resources and Hydraulic Engineering*, *Hohai University*, *Nanjing* 210098, *China*; 2. *School of Water Conservancy and Environment Engineering*, *Zhejiang University of Water Resources and Electric Power*, *Hangzhou* 310018, *China*; 3. *School of Environmental and Safety Engineering*, *Changzhou University*, *Changzhou* 213164, *China*)

Abstract: Sensitivity coefficients are commonly used in the analysis of the influence of various uncertain factors on the reliability of dam structures; however, the values of the sensitivity coefficients are selected from the range of the local design checking points. In order to overcome the defect of locality, the global importance analysis method of the factors which can influence the dam structural reliability is studied for the analysis. Firstly, on the basis of the dam structural reliability analysis model, the global importance measurement index of influencing factors are determined considering the changes of uncertain factors in the whole failure domain. Then, Monte Carlo simulation combined with truncated importance sampling (TIS-MCS) is used to quantitatively calculate the global importance measurement index. Finally, the structural reliability analysis model of a dam is established to calculate and compare the global importance measurement indexes and sensitivity coefficients of the uncertain factors. The result shows that the global importance measurement index can reflect the influence of uncertain factors on the dam structural reliability more comprehensively than the sensitivity coefficient.

Key words: dam structural reliability; global importance measurement index; sensitivity coefficient; uncertain factor; truncated importance sampling(TIS); Monte Carlo simulation(MCS)

1　研究背景

大坝作为一个复杂的不确定结构系统，其工作性态受各种不确定因素的影响，如库水位、扬压力和浪压力等不确定外界荷载，以及坝体混凝土强度、坝基抗剪强度等不确定抗力因子[1-2]。大坝结构可靠性分析充分考虑了影响因子的不确定性，是大坝风险管理的重要环节[3-4]。影响因子重要性（敏感

收稿日期：2021-08-12；　**修回日期**：2022-01-30

基金项目：水文水资源与水利工程科学国家重点实验室“一带一路”水与可持续发展科技基金项目(2021492211)；浙江水利水电学院校级科研项目(xky2022014)

作者简介：张晶梅(1990-)，女，安徽阜阳人，博士，讲师，研究方向为水工结构安全监控。

性)分析是在可靠性分析的基础上评估各类不确定因子对大坝结构可靠性的影响,它可以为结构可靠性分析提供反馈指导。

近年来,不少研究者针对影响大坝结构可靠性的不确定因子进行敏感性分析。彭慧慧[5]、Wilde 等[6]、Ji 等[7]通过计算不确定因子在不同分布类型和分布参数情况下大坝的抗滑稳定可靠度,比选出对大坝稳定影响较显著的因素;黄畅[8]通过计算尾岩压盖几何尺寸和坝基材料参数取不同值时大坝的抗滑稳定安全系数来研究这两类参数的敏感性;吴邦彬等[9]将库型因子在合理范围内等间隔取值,研究了拱坝库盘基岩和坝体变形对不同库型因子的敏感性;周邠鹏等[10]对比分析了各参数放大和缩小 5 倍时的土石坝渗流计算结果来研究渗控效应对黏土心墙、帷幕、山岩材料渗透参数的敏感性;吴震宇等[11]、柴小兵[12]通过对比非线性强度指标,分别取不同概型、均值、变异系数时堆石坝坝坡稳定、堆石体沉降以及面板挠曲变形的可靠度,来进行参数敏感性分析。这类方法通过计算影响因子取不同值、不同分布和统计特征时的可靠度,并绘制图表对比分析大坝可靠性影响因素的重要性,其虽然简单直观,但不如定量指标客观明确。魏海等[13]建立了基于人工神经网络的大坝变形可靠度及敏感性计算公式,分析得到敏感因素以便对其进行重点监测;李会军等[14]将大坝各失效模式的功能函数在设计点处线性化展开的基础上,给出了极限状态方程对随机变量及其分布参数敏感性表征的 4 种重要性度量指标;蒋水华等[15]计算了锦屏拱坝坝肩岩体及各结构面抗剪强度参数分别取均值和均值加减两倍标准差的参数值时的边坡安全系数,在此基础上得到各强度参数的敏感性指标;Hu 等[16]采用失效概率对因子随机统计特征的偏导数来对大坝可靠性影响因子进行了敏感性分析;陈辉等[17]通过正交试验选取邓肯－张 E－B 模型参数,通过计算堆石坝变形位移的变化差异值与变化率的平均值来衡量各个参数的敏感性;Chen 等[18]通过计算因子在确定样本区域内变化时功能函数偏差的均值和标准差,对面板堆石坝本构模型非线性强度指标进行了敏感性分析。

大坝结构可靠性影响因子重要性定量分析方法中比较有代表性的是通过可靠度计算中得到的灵敏度系数来反映大坝各功能可靠性对影响因子的敏感性,但该灵敏度系数在随机变量的设计验算点处取值,不能反映输入随机变量的完整不确定性对大坝可靠性的影响,实质上是局部重要性分析。

针对上述问题,本文从全局不确定性的角度出发,研究大坝结构可靠性影响因子的全局重要性分析方法,构建全局重要性测度指标,并引入基于截断重要抽样的蒙特卡洛法以实现因子全局重要性的量化分析,最后借助工程实例分析库水压、抗剪强度指标、扬压力、抗拉强度等不确定因素对大坝结构可靠性的影响效应。

2 大坝结构可靠性影响因子全局重要性分析

2.1 大坝结构可靠性分析模型

大坝承受的荷载作用主要有坝体自重、上下游水压力、扬压力、泥沙压力、浪压力和地震荷载等,相应作用效应方面的影响因子主要包括上游水位 H_1、下游水位 H_2、扬压力系数 a、泥沙淤积高度 h_n、混凝土容重 γ_c 等;大坝结构抗力效应方面的影响因子主要包括坝体混凝土抗压强度 σ_c、坝体混凝土抗拉强度 σ_t、坝基岩体的摩擦系数 f' 和黏聚力 c' 等。大坝结构可靠性本质上取决于结构承受荷载作用和所能提供的抗力之间的关系。

用功能函数 $g_i(\cdot)$ 来定义大坝服役第 i 种功能模式所处的工作状态:

$$Z_i = g_i(\boldsymbol{x}) = g_i(x_1, x_2, \cdots, x_n) = R_i - S_i \tag{1}$$

式中:$\boldsymbol{x} = (x_1, x_2, \cdots, x_n)^{\mathrm{T}}$ 为影响大坝结构可靠性的不确定因子向量;R_i 为大坝结构提供的抗力效应;S_i 为大坝结构所承受的作用效应。

分析获得大坝结构各主要功能模式的功能函数后,便可用功能函数值 Z_i 来表征大坝第 i 种功能模式所处的工作状态。当 $Z_i > 0$ 时,大坝第 i 种功能模式处于可靠状态;$Z_i < 0$ 对应失效状态;$Z_i = 0$ 为极限状态,代表可靠和失效之间的临界状态。因此,大坝第 i 种功能模式可靠概率 P_{si} 可表示为:

$$P_{si} = 1 - P_{fi} = 1 - P \quad (Z_i < 0) \tag{2}$$

式中:P_{fi} 为大坝第 i 种功能模式的失效概率。

大坝结构可靠性影响因子通常视为随机因子,第 i 种功能模式的随机可靠度 β_i 可定义为:

$$\beta_i = \Phi^{-1}(P_{si}) = -\Phi^{-1}(P_{fi}) \tag{3}$$

式中:$\Phi(\cdot)$ 为标准正态累积概率分布函数。

2.2 大坝结构可靠性影响因子的全局重要性量化方法

以往在大坝结构可靠性分析中通常采用灵敏度系数来考察因子的重要性程度,因子灵敏度系数是在采用一次二阶矩法计算可靠度时获得的。具体地,先将原始随机因子 $\boldsymbol{x}$ 空间的功能函数 $g(\boldsymbol{x})$ =

$g(x_1,x_2,\cdots,x_n)$ 转换为无关标准正态因子 $\boldsymbol{u}$ 空间内的 $G(\boldsymbol{u}) = G(u_1,u_2,\cdots,u_n)$，然后对功能函数 $Z = G(\boldsymbol{u})$ 在验算点 $\boldsymbol{u}^* = (u_1^*,u_2^*,\cdots,u_n^*)$ 处线性展开，展开后的表达式为：

$$Z \approx G(u_1^*,u_2^*,\cdots,u_n^*) + \sum_{i=1}^{n}(u_i - u_i^*)\left.\frac{\partial G}{\partial u_i}\right|_{\boldsymbol{u}^*} \tag{4}$$

由于 $G(u_1^*,u_2^*,\cdots,u_n^*) = 0$，则功能函数标准差 σ_Z 为：

$$\sigma_Z = \sqrt{\sum_{i=1}^{n}\left(\left.\frac{\partial G}{\partial u_i}\right|_{\boldsymbol{u}^*}\right)^2} \tag{5}$$

于是得到第 i 个随机变量对响应总标准差贡献的灵敏系数 α_i 为：

$$\alpha_i = \left.\frac{\partial G}{\partial u_i}\right|_{\boldsymbol{u}^*} \Big/ \sqrt{\sum_{i=1}^{n}\left(\left.\frac{\partial G}{\partial u_i}\right|_{\boldsymbol{u}^*}\right)^2} \tag{6}$$

该灵敏度系数仅考虑了随机因子在设计验算点处对功能函数输出响应的影响程度，而不能反映输入因子的完整不确定性如何影响输出功能函数的响应值，其实质上是局部重要性分析，而且该局部灵敏度系数是在对功能函数进行近似泰勒线性展开的基础上获得的。为弥补以上缺陷，应从全局不确定性的角度出发，进行大坝结构可靠性影响因子的重要性分析。

重要性测度分析也被称为全局灵敏度分析[19-20]，它可以从模型输入变量的整个不确定性波动范围来衡量输入变量的不确定性对模型输出响应不确定性的贡献程度。在工程结构可靠性问题中，进行小失效概率计算需要关注的是结构功能响应量分布的尾部，因而基本随机变量对整个响应量分布的影响程度并不能视作基本变量对模型失效概率的影响程度，于是在满足“全局性、可量化性、通用性、矩独立性”这 4 项要求的前提下，Cui 等[21]建立了随机变量 x_i 对失效概率的全局重要性测度 δ_i^P，以衡量各变量对失效概率的影响程度，其表达式为：

$$\begin{aligned}\delta_i^P &= \int_{-\infty}^{+\infty}\left|\int_{-\infty}^{0}f_z(z)\,\mathrm{d}z - \int_{-\infty}^{0}f_{Z|x_i}(z)\,\mathrm{d}z\right| f_{X_i}(x_i)\,\mathrm{d}x_i \\ &= \int_{-\infty}^{+\infty}\left|P_f - P_{f|x_i}\right| f_{X_i}(x_i)\,\mathrm{d}x_i \\ &= E_{X_i}(\left|P_f - P_{f|x_i}\right|)\end{aligned} \tag{7}$$

式中：$f_z(z)$ 为 Z 的无条件概率密度函数；$f_{Z|x_i}(z)$ 为随机变量 x_i 取其实现值时 Z 的条件概率密度函数；P_f 为 Z 的无条件失效概率；$P_{f|x_i}$ 为随机变量 x_i 取其实现值时 Z 的条件失效概率；$f_{X_i}(x_i)$ 为随机变量 x_i 的概率密度函数。

随机变量 x_i 不确定性的消除会对失效概率造成影响，P_f 与 $P_{f|x_i}$ 的差值可由图 1 中的阴影面积表示。全局重要性测度 δ_i^P 表征了随机变量 x_i 在其分布域内变化时对可靠性模型失效概率的平均影响程度。

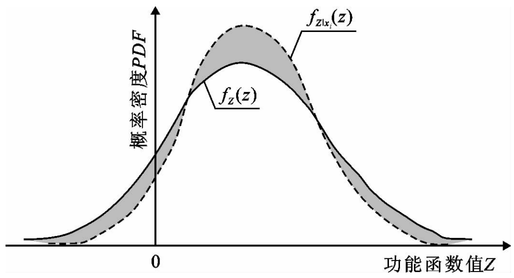

图 1　随机因子 x_i 对失效概率的影响

但是，上述全局重要性测度的定义式(7) 中包含绝对值，后续研究[22] 也只是将绝对值 $|P_f - P_{f|x_i}|$ 运算换成了平方项$(P_f - P_{f|x_i})^2$，只能衡量随机变量 x_i 对失效概率的绝对影响量值。为了能同时反映随机变量 x_i 对失效概率或可靠性影响的正负方向性，即 x_i 增大或减小对结构可靠性有利还是不利，本文将符号函数引入公式(7) 对其改进后，提出如下大坝结构可靠性随机影响因子的全局重要性测度概念。

对于大坝结构可靠性分析中的某项功能函数 $Z = g(x_1,x_2,\cdots,x_n)$，可定义如下随机因子 x_i 基于失效概率的全局重要性测度 GIM_i：

$$\begin{aligned}GIM_i &= \int_{x_i^l}^{x_i^u}\left(\int_{-\infty}^{0}f_{Z|x_i}(z)\,\mathrm{d}z - \int_{-\infty}^{0}f_Z(z)\,\mathrm{d}z\right)\cdot \\ &\qquad \mathrm{sgn}(x_i^* - x_i)f_{X_i}(x_i)\,\mathrm{d}x_i \\ &= \int_{x_i^l}^{x_i^u}(P_{f|x_i} - P_f)\,\mathrm{sgn}(x_i^* - x_i)f_{X_i}(x_i)\,\mathrm{d}x_i \\ &= E_{X_i}((P_{f|x_i} - P_f)\,\mathrm{sgn}(x_i^* - x_i))\end{aligned} \tag{8}$$

式中：$\mathrm{sgn}(\cdot)$ 为正负符号函数，$\mathrm{sgn}(t) = \begin{cases}1 & (t>0)\\ -1 & (t\leqslant 0)\end{cases}$；$x_i^*$ 为随机因子 x_i 相应于 P_f 的设计验算点值；x_i^u 和 x_i^l 分别为随机因子 x_i 的上界和下界；其他符号含义同上。

由公式(8) 可知，全局重要性测度 GIM_i 的绝对值越大，表示因子 x_i 对大坝结构可靠性的影响程度越大；GIM_i 为正，表示可靠性随着影响因子 x_i 的增大而提高，增大 x_i 对于大坝结构可靠性有利；GIM_i 为负，表示可靠性随着影响因子 x_i 的增大而降低，增大 x_i 会使大坝结构服役风险增高。综上，全局重要性测度 GIM_i 表征了随机影响因子 x_i 在其分布域内变化时对大坝结构可靠性或失效概率的影响效应。

全局重要性测度 GIM_i 的绝对值一般较小，为了便于在工程实例应用中更加直观地进行比较，可作如下的正规化处理：

$$\overline{GIM_i} = GIM_i \bigg/ \sqrt{\sum_{k=1}^{n}(GIM_k)^2} \tag{9}$$

2.3 大坝结构可靠性影响因子的全局重要性估算

从大坝结构可靠性随机影响因子全局重要性测度 GIM_i 的定义式(8) 可以看出，基于失效概率的重要性测度可用蒙特卡洛法(Monte Carlo simulation, MCS) 求解。在 MCS 法中，通过引入失效域指示函数 $I_{F|x_i}(\cdot)$，则定义式(8) 中的条件失效概率 $P_{f|x_i}$ 可以表达为：

$$\begin{aligned} P_{f|x_i} &= \idotsint\limits_{g_{x_i}(x)\leqslant 0} f_{X_{\sim i}}(\boldsymbol{x}_{\sim i})\,\mathrm{d}\boldsymbol{x}_{\sim i} \\ &= \idotsint\limits_{R^{n-1}} I_{F|x_i}(\boldsymbol{x}) f_{X_{\sim i}}(\boldsymbol{x}_{\sim i})\,\mathrm{d}\boldsymbol{x}_{\sim i} \\ &= E_{X_{\sim i}}(I_{F|x_i}(\boldsymbol{x})) \end{aligned} \tag{10}$$

式中：$\boldsymbol{x}_{\sim i}$ 为除 x_i 外的 $n-1$ 维随机变量向量；$f_{X_{\sim i}}(\boldsymbol{x}_{\sim i})$ 为除 x_i 外的 $n-1$ 维随机变量的联合概率密度函数；$g_{x_i}(\boldsymbol{x})$ 为随机变量 x_i 取其实现值时的条件功能函数；$I_{F|X_i}(\boldsymbol{x}) = \begin{cases} 1, & g_{x_i}(\boldsymbol{x}) \leqslant 0 \\ 0, & g_{x_i}(\boldsymbol{x}) > 0 \end{cases}$ 为对应的失效域指示函数；R^{n-1} 为除 x_i 外的 $n-1$ 维随机变量空间。

大坝结构可靠性分析一般涉及小失效概率的问题，此时若依照原始联合概率密度函数 $f_X(\boldsymbol{x})$ 进行普通随机抽样，需要较大的样本来保证部分子样落入失效域中，计算代价较大。而重要抽样法对这类小失效概率问题具有较高的效率，其通过采用重要抽样密度函数 $h_X(\boldsymbol{x})$ 进行抽样，$h_X(\boldsymbol{x})$ 可以通过将原密度函数 $f_X(\boldsymbol{x})$ 的均值点移到设计验算点 $\boldsymbol{x}^*$ 处求得，而 $\boldsymbol{x}^*$ 可以通过一次二阶矩法或其他优化算法很容易求得，如此便可在相对较小的样本数量下保证足够子样落入失效域中。当不考虑随机变量之间的相关性时，有 $h_X(\boldsymbol{x}) = \prod_{i=1}^{n} h_{X_i}(x_i)$，其中 $h_{X_i}(x_i)$ 为 x_i 的边缘重要抽样密度函数。为进一步提高重要抽样法的精度，可引入 β 超球进行截断，β 为设计点 $\boldsymbol{x}^*$ 对应的可靠度，β 超球为以原点为中心和以 β 为半径的超球。在标准化正态空间中，β 超球空间的指示函数定义为：

$$I_\beta(\boldsymbol{x}) = \begin{cases} 1 & (\|\sigma_X^{-1}(\boldsymbol{x}-\mu_X)\| \geqslant \beta) \\ 0 & (\|\sigma_X^{-1}(\boldsymbol{x}-\mu_X)\| < \beta) \end{cases} \tag{11}$$

β 超球外的空间包含了失效域，球内没有失效点，对落入 β 超球内的样本点无须计算其功能函数的值。引入重要抽样密度函数 $h_{X_i}(x_i)$ 和 β 超球后，公式(10) 可改写为以下形式：

$$\begin{aligned} P_{f|x_i} &= \idotsint\limits_{R^{n-1}} I_\beta(\boldsymbol{x}) I_{F|x_i}(\boldsymbol{x}) \frac{f_{X_{\sim i}}(\boldsymbol{x}_{\sim i})}{h_{X_{\sim i}}(\boldsymbol{x}_{\sim i})} h_{X_{\sim i}}(\boldsymbol{x}_{\sim i})\,\mathrm{d}x_{\sim i} \\ &= E_{X_{\sim i}}\left(I_\beta(\boldsymbol{x}) I_{F|x_i}(\boldsymbol{x}) \frac{f_{X_{\sim i}}(\boldsymbol{x}_{\sim i})}{h_{X_{\sim i}}(\boldsymbol{x}_{\sim i})} \right) \end{aligned} \tag{12}$$

将公式(12) 代入公式(8) 中，大坝随机影响因子全局重要性测度可进一步写成如下形式：

$$GIM_i = E_{X_i}\left\{ \left[E_{X_{\sim i}}\left(I_\beta(\boldsymbol{x}) I_{F|x_i}(\boldsymbol{x}) \frac{f_{X_{\sim i}}(\boldsymbol{x}_{\sim i})}{h_{X_{\sim i}}(\boldsymbol{x}_{\sim i})} \right) - P_f \right] \cdot \mathrm{sgn}(x_i^* - x_i) \right\} \tag{13}$$

上述基于截断重要抽样(truncated importance sampling, TIS)的蒙特卡洛法(TIS－MCS)引入了重要抽样密度函数和 β 超球，可较大程度地减少大坝可靠性影响因子重要性测度求解的计算量，并有效提高计算效率及精度。综上所示，大坝结构可靠性影响因子重要性测度的 TIS－MCS 法计算流程如图 2 所示。

3 工程实例

3.1 工程概况

某重力坝坝顶高程为 179.00 m，正常蓄水位为 173.00 m，500 年一遇设计水位为 174.76 m，5000 年一遇校核水位为 177.80 m。该重力坝 5# 坝段为典型挡水坝段，坝顶宽度为 7.0 m，坝底宽度为 73.0 m，坝底高程为 80.00 m，坝基面近似水平，坝基防渗帷幕距上游坝面水平距离为 6.0 m，上游面垂直，下游高程 168.00 m 以下的坝面坡度为 1∶0.75，其横剖面如图 3 所示。

3.2 大坝结构可靠性影响因子统计特征

5# 坝段坝基坐落于局部强风化岩石带上，其外界环境条件相对较差，是该坝结构服役的薄弱环节，所以本实例选择该坝段作为代表进行结构可靠性分析。现将该坝外部轮廓几何尺寸均视为确定值，设计时所考虑的影响因子视为随机变量，其统计特征见表 1。

3.3 大坝结构功能模式构建

现主要考虑该大坝 5# 典型坝段坝基抗滑、坝踵抗拉和坝趾抗压 3 种主要结构功能的要求，其分别

对应沿坝基面滑动、坝踵拉裂和坝趾压坏这 3 种失效模式,取单位长度坝段进行分析,得到 3 种模式的功能函数:

$$Z_1 = (3597\gamma_c - 365aH_1 - 30H_1)f' + 73000c' - 5H_1^2 \tag{14}$$

$$Z_2 = \sigma_t + 99.6\gamma_c - 9.18aH_1 - 1.58H_1 - 1.88 \times 10^{-3}H_1^3 \tag{15}$$

$$Z_3 = \sigma_c + \gamma_c + 0.82aH_1 - 0.76H_1 - 1.88 \times 10^{-3}H_1^3 \tag{16}$$

根据功能函数式(14)~(16)和各影响因子的统计参数,通过改进一次二阶矩法计算得到设计状态下坝基抗滑、坝踵抗拉和坝趾抗压 3 种功能模式的随机可靠度 β_i($i = 1,2,3$)分别为 4.84、7.50 和 8.32,对应的失效概率分别为 6×10^{-7}、3×10^{-14} 和 4×10^{-17}。

表 1　影响因子及其统计特征

影响因子	均值	标准差	变异系数	分布概型
混凝土容重 γ_c/(kN·m^{-3})	24	0.48	0.02	正态
扬压力系数 a	0.3	0.045	0.15	正态
上游水深 H_1/m	93	2.79	0.03	正态
抗剪断摩擦系数 f'	1.1	0.22	0.20	正态
抗剪断凝聚力 c'/MPa	1.1	0.33	0.30	对数正态
混凝土抗拉强度 σ_t/MPa	1.45	0.36	0.25	对数正态
混凝土抗压强度 σ_c/MPa	15	3.75	0.25	对数正态

3.4　大坝结构可靠性影响因子全局重要性考察

为分析库水深、抗剪强度指标、扬压力系数等随机因子对大坝各功能模式可靠性的影响程度,也即各不确定因子的重要性程度,采用 TIS - MCS 法计算得到各影响因子的全局重要性测度 $\overline{GIM}_{ki}$($k = 1,2,3$;$i = 1,2,\cdots,7$),同时也计算了传统的局部灵敏度系数 a_{ki},如表 2、图 4 和图 5 所示。

由表 2、图 4 和图 5 可以看出,上游水深和抗剪强度指标对该大坝坝基抗滑可靠性的影响较大;上游水深和混凝土抗拉强度对坝踵抗拉可靠性的影响较大;上游水深和混凝土抗压强度对坝趾抗压可靠性的影响较大。同时,结构抗力因子的重要性测度和灵敏度一般为正,表示增大结构抗力因子有利于提升大坝结构服役可靠性;而作用效应因子对应项一般为负,表示增大作用效应因子对大坝结构可靠性不利,这与工程实际相符合。

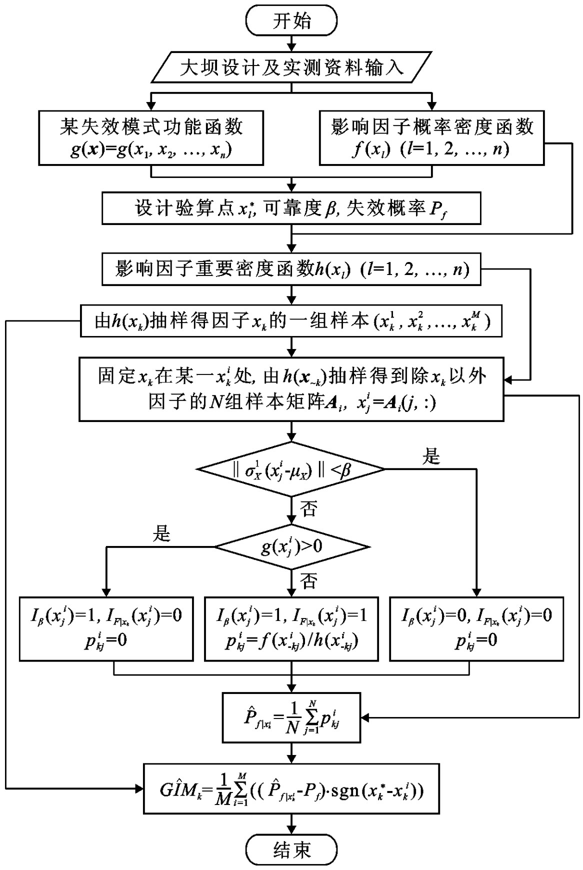

图 2　大坝结构可靠性影响因子全局重要性测度估算流程

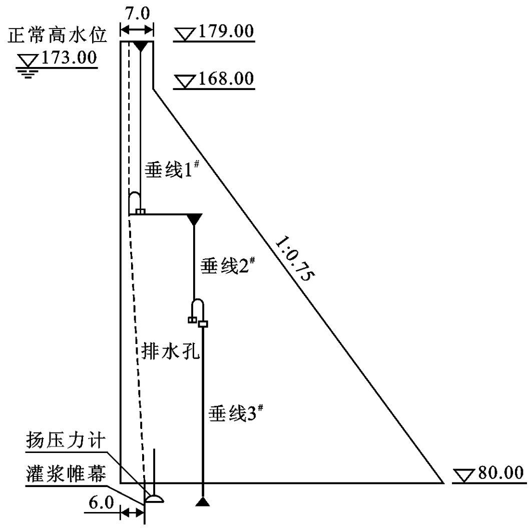

图 3　某重力坝典型挡水坝段横剖面(单位:m)

大坝结构可靠性影响因子重要性测度和灵敏度的量值大小和正负趋势一致,数值略有差别,其中上游水深对坝踵抗拉可靠性的全局重要性测度明显要比局部灵敏度大,即从全局不确定性的角度考虑,上游水位对坝踵抗拉产生的影响效应要大得多,因此,在大坝风险管理过程中应密切关注水位调控以保证大坝健康服役。

表 2　影响因子重要性分析

随机因子	坝基抗滑 Z_1		坝踵抗拉 Z_2		坝基抗压 Z_3	
	a_{1i}	$\overline{GIM_{1i}}$	a_{2i}	$\overline{GIM_{2i}}$	a_{3i}	$\overline{GIM_{3i}}$
混凝土容重 γ_c	0.026	0.011	0.209	0.118	0.001	0.001
扬压力系数 a	-0.023	-0.016	-0.315	-0.102	0.010	0.003
上游水深 H_1	-0.141	-0.084	-0.248	-0.632	-0.121	-0.079
抗剪断摩擦系数 f'	0.923	0.904	/	/	/	/
抗剪断凝聚力 c'	0.358	0.418	/	/	/	/
混凝土抗拉强度 σ_t	/	/	0.892	0.759	/	/
混凝土抗压强度 σ_c	/	/	/	/	0.993	0.997

注:表中符号“/”表示对应的功能模式中不包含此项影响因子。

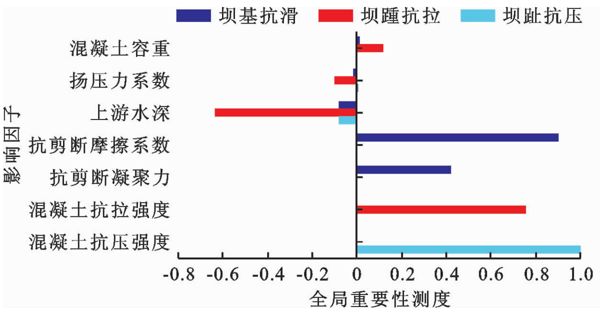

图 4　各影响因子全局重要性测度

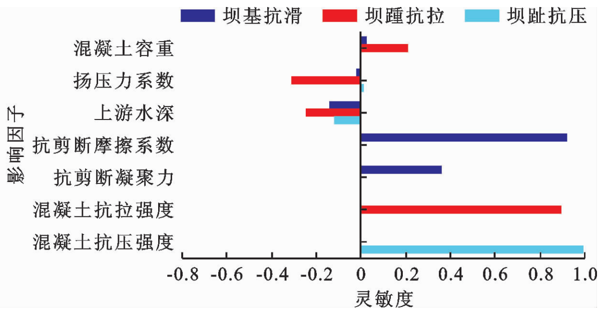

图 5　各影响因子灵敏度

4　结　论

本文从全局不确定性的角度出发,研究了大坝结构可靠性影响因子的全局重要性分析方法,采用 TIS-MCS 法实现因子全局重要性的量化分析,结合工程实例计算和对比分析了库水压、抗剪强度指标、扬压力、抗拉强度等不确定因子的全局重要性测度和灵敏度,主要结论如下:

(1)在大坝结构可靠性影响因子的全局重要性量化分析中,研究了影响因子在整个失效域内变化时对结构可靠性功能函数响应的影响,克服了传统局部灵敏性分析需对功能函数近似泰勒线性展开及只在设计验算点处取值的缺点,给出了各项影响因子的相对重要程度。

(2)根据全局重要性量化分析结果,将重要性程度较低的影响因子按定值处理可简化可靠度的计算;而确定重要性程度较高的因子可为存在安全隐患的大坝制定更好的维修指导方案,并可以有针对性地调整拟建或在建大坝的某些设计参数,从而提升大坝服役的可靠性。

参考文献:

[1] MCCANN M W, PAXSON G. Uncertainty in dam failure consequence estimates[C]// 3rd European Conference on Flood Risk Management, 2016.
[2] 顾冲时,张晶梅. 大坝服役非概率可靠性分析方法[J]. 水利水电科技进展,2018,38(5):1-9.
[3] 盛金保,厉丹丹,蔡 荨,等. 大坝风险评估与管理关键技术研究进展[J]. 中国科学:技术科学,2018,48(10):1057-1067.
[4] 顾冲时,苏怀智,刘何稚. 大坝服役风险分析与管理研究述评[J]. 水利学报,2018,49(1):26-35.
[5] 彭慧慧. 重力坝坝基失稳模糊风险分析方法研究[D]. 大连:大连理工大学,2011.
[6] WILDE M W, JOHANSSON F. System reliability of concrete dams with respect to foundation stability: Application to a spillway[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2013, 139(2): 308-319.
[7] JI Jian, LIAO Hongjian. Sensitivity-based reliability analysis of earth slopes using finite element method[J]. Geomechanics and Engineering, 2014, 6(6): 545-560.
[8] 黄 畅. 近水平软弱夹层坝基高重力坝深层抗滑稳定和基础处理措施研究[J]. 水利水电技术,2019,50(S1):250-255.
[9] 吴邦彬,顾冲时,陈 波,等. 分叉型库盘变形及对特高拱坝变形性态的影响[J]. 水利水电科技进展,2019,39(6):31-36+67.
[10] 周郊鹏,柴军瑞,雷 艳. 黑河金盆水库坝区三维渗控效

应评价与材料参数敏感性分析[J]. 水资源与水工程学报,2020,31(1):207 – 215.

[11] 吴震宇,陈建康,许唯临,等. 非线性指标坝坡可靠度分析及参数敏感性研究[J]. 武汉理工大学学报,2009,31(5):61 – 64.

[12] 柴小兵. 300 m 级混凝土面板堆石坝变形可靠性分析[D]. 北京:北京交通大学,2014.

[13] 魏 海,杨华舒,武 亮. 基于人工神经网络的重力坝安全可靠度分析[J]. 河海大学学报(自然科学版),2011,39(4):415 – 420.

[14] 李会军,李宗利,王亚红. 重力坝系统可靠度及敏感性研究[J]. 中国农村水利水电,2014(5):81 – 85.

[15] 蒋水华,李典庆,黎学优,等. 锦屏一级水电站左岸坝肩边坡施工期高效三维可靠度分析[J]. 岩石力学与工程学报,2015,34(2):349 – 361.

[16] HU Jiang, MA Fuheng, WU Suhua. Nonlinear finite-element-based structural system failure probability analysis methodology for gravity dams considering correlated failure modes[J]. Journal of Central South University, 2017, 24(1): 178 – 189.

[17] 陈 辉,刘东海,戚 蓝. 改进的堆石坝变形计算参数敏感性分析方法[J]. 河海大学学报(自然科学版),2017,45(5):406 – 412.

[18] CHEN Yue, GU Chongshi, SHAO Chenfei, et al. Parameter sensitivity and inversion analysis for a concrete face rockfill dam based on CS – BPNN[J]. Advances in Civil Engineering, 2019, 2019: 9742961.

[19] BORGONOVO E. A new uncertainty importance measure[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2007, 92(6): 771 – 784.

[20] LIU Qiao, HOMMA T. A new computational method of a moment-independent uncertainty importance measure[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2009, 94(7): 1205 – 1211.

[21] CUI Lijie, LU Zhenzhou, ZHAO Xinpan. Moment-independent importance measure of basic random variable and its probability density evolution solution[J]. Science China Technological Sciences, 2010, 53(4): 1138 – 1145.

[22] LI Luyi, LU Zhenzhou, Feng Jun, et al. Moment-independent importance measure of basic variable and its state dependent parameter solution [J]. Structural Safety, 2012, 38: 40 – 47.

(上接第 170 页)

[21] 张 超,段 寅,刘杏红,等. 基于并层单元的大体积混凝土水管冷却温度场热 – 流耦合精细计算[J]. 工程力学,2014,31(12):147 – 154.

[22] 李 芳,王大政. 利用层合单元的复合材料涡轮叶片结构设计[J]. 水力发电学报,2015,34(9):114 – 118.

[23] 周顺田,张 健,刘东旭,等. 基于温控仿真的碾压混凝土重力坝防裂措施研究[J]. 人民长江,2022,53(3):144 – 148.

[24] 刘蒙娜,胡士辉,瓮 宛. 基于 ANSYS 的碾压混凝土重力坝断层带处理有限元分析[J]. 水利规划与设计,2022(3):80 – 82 + 104.

[25] 任喜平,李元来,刘炜山. 大坝浇筑过程中温差裂缝形成研究及防控[J]. 水利建设与管理,2020,40(11):78 – 82.

[26] 李明超,张梦溪,沈 扬,等. 高碾压混凝土重力坝分区材料 – 结构界面特性与变形协调仿真分析[J]. 水利学报,2020,51(1):3 – 13.

[27] 段云岭,刘华北. 材料非线性接缝模型[J]. 清华大学学报(自然科学版),2000,40(8):98 – 101.