

# 基于失效模式间全局相关性度量的大坝结构体系可靠性分析方法

张晶梅<sup>1,2</sup>, 王维汉<sup>3</sup>, 余成钢<sup>4</sup>

(1. 浙江水利水电学院水利工程学院, 浙江 杭州 310018;

2. 河海大学水灾害防御全国重点实验室, 江苏 南京 210098; 3. 浙江水利水电学院人事处, 浙江 杭州 310018;

4. 杭州国家水电站大坝安全和应急工程技术中心有限公司, 浙江 杭州 311122)

**摘要:**为克服大坝结构体系可靠性分析的局部性缺陷,考虑影响因子在整个失效域内的变化,在对大坝结构可靠性随机影响因子全局重要性考察的基础上,构建全局相关系数替代近似线性相关系数,提出了各失效模式间的全局相关性度量方法,并采用 TIS-MCS 法实现了全局相关性的量化分析。通过工程实例计算对比了全局相关性度量法和其他方法得到的大坝结构多失效模式下体系的随机可靠度,结果显示全局相关性度量法得到的体系可靠度更合理,为大坝结构体系可靠性分析提供了一种新方法。

**关键词:**大坝结构体系;可靠性;全局相关性;失效模式;全局重要性测度

中图分类号:TV698.1

文献标志码:A

文章编号:1006-7647(2025)02-0098-08

**System reliability analysis method based on global correlation measurement between failure modes of dam structure**//ZHANG Jingmei<sup>1,2</sup>, WANG Weihan<sup>3</sup>, YU Chenggang<sup>4</sup>(1. School of Hydraulic Engineering, Zhejiang University of Water Resources and Electric Power, Hangzhou 310018, China; 2. The National Key Laboratory of Water Disaster Prevention, Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. Human and Resources Office, Zhejiang University of Water Resources and Electric Power, Hangzhou 310018, China; 4. Hangzhou National Hydropower Station Dam Safety and Emergency Engineering Technology Center Co., Ltd., Hangzhou 311122, China)

**Abstract:** In order to overcome the locality defects in the reliability analysis of dam structural systems and account for the variation of influencing factors in the entire failure domain, a global correlation coefficient was constructed to replace the approximate linear correlation coefficient based on the global importance assessment of stochastic influencing factors in dam structure reliability. A global measurement method for the correlation between different failure modes was proposed, and the TIS-MCS method was employed to achieve the quantitative analysis of global correlation. Through an engineering case study, the system reliability of a dam structure under multiple failure modes obtained using the global correlation measurement method was compared with results from other methods. The results indicate that the system reliability obtained using the global correlation measurement method is more reasonable, providing a new approach for the reliability analysis of dam structural systems.

**Key words:** system of dam structure; reliability; global correlation; failure mode; global importance measurement

大坝受外界环境荷载作用、坝体材料物理力学参数、坝基岩土体性质等诸多不确定因素的影响,本质上是一个复杂的不确定性系统,结构可靠性分析可以充分考虑多源不确定因素的影响来辅助评估大坝服役性态<sup>[1-3]</sup>。通常在大坝结构失效模式和可靠性影响因子普遍存在的随机特性分析的基础上,进行大坝结构单一失效模式下的可靠性分析<sup>[4-8]</sup>。考

虑大坝是由多种建筑物构成的复杂体系,每一建筑物又可能存在多种失效模式,不同失效模式通常受共同或相关因素的影响<sup>[9]</sup>,因此,需合理度量各失效模式间不同程度的相关性,进一步分析大坝结构多失效模式下的体系可靠性<sup>[10-13]</sup>。

结构体系可靠性分析需要明确各组成部分之间的拓扑结构和系统可能存在的失效模式<sup>[14]</sup>。吴世

**基金项目:**水灾害防御全国重点实验室“一带一路”水与可持续发展科技基金项目(2021492211);浙江省教育厅一般科研项目(Y202352711);浙江省水利科技计划项目(RC2244);浙江省产学研合作协同育人项目(浙发改社会[2022]318号)

**作者简介:**张晶梅(1990—),女,讲师,博士,主要从事水工结构安全监控研究。E-mail:zhangjm@zjweu.edu.cn

伟等<sup>[15-16]</sup>探讨了坝体坝基联合作用下的可能失效途径,针对失效模式完全相关和相互独立两种极端情况进行了大坝体系可靠度分析。但将各失效模式间的逻辑关系归结为完全相关和相互独立两种极端情况过于简化,陈进等<sup>[17]</sup>对重力坝系统可靠度分析进行了模型概化,将各失效模式之间的串体系体和某一破坏模式的并体系体进行组合。不同失效模式通常受共同或相关因素的影响,许多学者利用失效模式验算点处敏感系数计算不同破坏模式间的线性相关系数,进而采用各种数值计算方法求解结构体系可靠度<sup>[18-21]</sup>。例如:苏怀智等<sup>[22]</sup>采用线性相关系数度量各失效模式间的相关性,探讨了大坝多种失效模式间的相关性对串、并联及两者混合结构体系可靠性的影响;Xu 等<sup>[23]</sup>运用虚拟变量法计算了重力坝失效路径上单元的条件失效概率,基于贝叶斯公式和 Cauchy-Schwarz 不等式得出失效概率的上限,采用串联模型计算得出了体系可靠度,但结果偏保守;李会军等<sup>[24]</sup>将重力坝坝趾压坏、坝踵拉裂和沿建基面滑动视为串联系统,利用串联 KHD 边界表达式得出体系可靠度;张社荣等<sup>[25]</sup>运用多元 Copula 函数<sup>[26]</sup>建立了重力坝层间抗滑稳定相关体系的联合分布模型,利用 Ditlevsen<sup>[27]</sup>窄界限公式对多失效模式相关的重力坝层间抗滑稳定进行了体系可靠性分析,但若模式间相关系数大于 0.6,界宽仍旧较大,且不适用于并体系体;尹金超等<sup>[28]</sup>利用条件概率降维算法<sup>[29]</sup>计算了重力坝体系可靠度,然而该方法在每一步降维过程中均需迭代求解验算点,导致效率不高;周超<sup>[30]</sup>分别运用基于验算点处灵敏度系数的一般相关系数和皮尔逊相关系数衡量失效模式间的相关性,采用概率网络估算法<sup>[31]</sup>计算了重力坝岩基整体体系可靠度,该方法预先选取相关系数临界值,超出给定值时取 1,低于给定值时取 0,通过简化相关性矩阵中的元素以减轻计算量,但临界值选取的主观性降低了计算精度;魏博文等<sup>[32]</sup>运用逐步等效线性 Johnson 求交法将大坝各失效模式功能函数近似线性化,利用线性系数构造失效模式间的相关系数,并采用窄界限法计算了重力坝体系可靠度。

综上所述,目前大坝结构体系可靠性研究通常只给出可靠度的范围,或利用基于验算点处灵敏度系数的局部线性相关系数来衡量各失效模式间的相关性,该灵敏度系数仅考虑了影响因子在设计验算点处对功能函数输出响应的程度,其实质是局部重要性分析,这导致该相关性分析存在局部性的缺点。

针对上述问题,本文在大坝结构可靠性随机影响因子的全局重要性考察基础上,提出利用全局相

关系数替代近似线性相关系数,从全局不确定性角度来度量大坝各失效模式间的相关性,并结合工程实例分析基于全局相关性度量的大坝结构多失效模式下体系随机可靠性,以期为大坝结构体系可靠性分析提供一种新方法。

## 1 大坝结构各失效模式间全局相关性度量

### 1.1 局部线性相关性度量

大坝结构各失效模式间的相关系数通常表示为随机影响因子灵敏度系数的构成形式,灵敏度系数在采用一次二阶矩法计算可靠度时获得。先将原始随机因子  $\mathbf{x}$  空间的功能函数  $g(\mathbf{x}) = g(x_1, x_2, \dots, x_n)$  转换为无关标准正态因子  $\mathbf{u}$  空间内的  $G(\mathbf{u}) = G(u_1, u_2, \dots, u_n)$ , 然后对功能函数  $Z = G(\mathbf{u})$  在验算点  $\mathbf{u}^* = (u_1^*, u_2^*, \dots, u_n^*)$  处线性展开为

$$Z \approx G(u_1^*, u_2^*, \dots, u_n^*) + \sum_{i=1}^n (u_i - u_i^*) \frac{\partial G}{\partial u_i} \Big|_{\mathbf{u}^*} \quad (1)$$

第  $i$  个随机变量对输出响应总标准差贡献的灵敏度系数  $\alpha_i$  为

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

各失效模式间的线性相关系数  $R_{Z_{ij}}$  可由随机因子灵敏度系数构成:

$$R_{Z_{ij}} = \sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^n \rho_{kl} \alpha_{ik} \alpha_{jl} \quad (3)$$

式中:  $\rho_{kl}$  为随机因子  $x_k$  与  $x_l$  之间的相关系数;  $\alpha_{ik}$ 、 $\alpha_{jl}$  分别为随机因子  $x_k$ 、 $x_l$  在第  $i$ 、 $j$  个失效模式中的灵敏度系数。

### 1.2 全局相关性度量

上述灵敏度系数在影响因子设计验算点处取值,不能全面反映输入因子的完整不确定性对输出功能函数响应值的影响,而且需先对功能函数进行泰勒线性展开。因此,由该局部灵敏度系数构成的线性相关系数也存在将功能函数近似线性化以及在局部验算点处取值的不足,其并不能全面精确地描述大坝结构各失效模式间的相关性。为弥补以上缺陷,本文从全局不确定性的角度出发,在作者之前提出的随机影响因子全局重要性分析<sup>[33]</sup>的基础上,提出大坝结构体系各失效模式间的全局相关性度量方法。

对于大坝结构某项功能函数  $Z = g(x_1, x_2, \dots, x_n)$ , 为代替上述局部灵敏度系数,随机影响因子  $x_i$  的全局重要性测度  $M_{G_i}$  可定义如下:

$$M_{G_i} = \int_{x_{li}}^{x_{ui}} \left[ \int_{-\infty}^0 f_{Z|x_i}(z) dz - \int_{-\infty}^0 f_Z(z) dz \right] \operatorname{sgn}(x_i^* - x_i) \cdot f_{X_i}(x_i) dx_i = \int_{x_{li}}^{x_{ui}} (P_{f|X_i} - P_f) \operatorname{sgn}(x_i^* - x_i) \cdot$$

$f_{x_i}(x_i) dx_i = E_{X_i}[(P_{f|x_i} - P_f) \text{sgn}(x_i^* - x_i)]$  (4)  
 式中:  $x_{ui}$ 、 $x_{li}$  分别为影响因子  $x_i$  的上界和下界;  $f_{Z|x_i}(z)$  为影响因子  $x_i$  取实现值时  $Z$  的条件概率密度函数;  $f_Z(z)$  为  $Z$  的无条件概率密度函数;  $P_{f|x_i}$  为影响因子  $x_i$  取实现值时  $Z$  的条件失效概率;  $P_f$  为  $Z$  的无条件失效概率;  $x_i^*$  为影响因子  $x_i$  相应于  $P_f$  的设计验算点值;  $f_{X_i}(x_i)$  为影响因子  $x_i$  的概率密度函数。

由式(4)可知,全局重要性测度  $M_{G_i}$  若为负值,表示增大影响因子  $x_i$  会使大坝结构可靠性降低;  $M_{G_i}$  若为正值,表示增大影响因子  $x_i$  会使大坝结构可靠性提高;  $M_{G_i}$  的绝对值越大,代表影响因子  $x_i$  对大坝结构可靠性的影响越显著。综上,  $M_{G_i}$  反映了影响因子  $x_i$  在其整个不确定分布域内波动时对大坝结构可靠性的影响效应。

全局重要性测度  $M_{G_i}$  的量值较小,考虑到实际应用的直观可比较性,作如下的正规化处理:

$$\bar{M}_{G_i} = M_{G_i} / \sqrt{\sum_{k=1}^n M_{G_k}^2} \quad (5)$$

在影响因子全局重要性测度的基础上,进一步构建大坝结构体系各失效模式间的全局相关系数  $C_{ij}$ :

$$C_{ij} = \frac{\sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^n \rho_{kl} M_{G_{ik}} M_{G_{jl}}}{\sqrt{\sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^n \rho_{kl} M_{G_{ik}} M_{G_{il}}} \sqrt{\sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^n \rho_{kl} M_{G_{jk}} M_{G_{jl}}} \quad (6)$$

其中

$$M_{G_{ik}} = \int_{x_{li}}^{x_{ui}} (P_{f_i|x_k} - P_{f_i}) \text{sgn}(x_k^* - x_k) f_{X_k}(x_k) dx_k$$

式中:  $i, j$  代表失效模式编号;  $k, l$  代表随机因子编号;  $\rho_{kl}$  为随机因子  $x_k$  与  $x_l$  之间的相关系数;  $M_{G_{ik}}$  为大坝第  $i$  个失效模式中随机因子  $x_k$  的全局重要性测度; 其他重要性测度  $M_{G_{jl}}$ 、 $M_{G_{il}}$ 、 $M_{G_{jk}}$  的含义参照  $M_{G_{ik}}$ 。

由式(6)可得,当  $i=j$  时,  $C_{ij}=1$ ; 当第  $i, j$  个失效模式相互独立时,两模式没有共同的随机因子,且随机因子之间不具相关性,此时  $C_{ij}=0$ 。失效模式间共有随机因子的数目越多,或失效模式间不同随机因子的相关性越高,则模式间全局相关系数越大,相关性越好;反之,失效模式间共有随机因子数目越少,或失效模式间不同随机因子的相关性越低,则模式间相关系数就越小,相关性就越差。所以,采用提出的全局相关系数  $C_{ij}$  来度量大坝结构体系各失效模式间的相关性是合理的。

全局相关系数  $C_{ij}$  反映了大坝结构体系整个失效域内不同失效模式间的相关性,克服了传统线性相关系数的不足,能在充分考虑随机因子完整不确

定性的情况下,较全面精确地度量大坝各失效模式间的相关性。

### 1.3 失效模式间全局相关系数估算

基于失效概率的重要性测度  $M_{G_i}$  可用蒙特卡罗法(MCS)求解<sup>[34]</sup>,通过引入失效域指示函数  $I_{\Pi_{x_i}}(\cdot)$ ,式(4)中的条件失效概率  $P_{f|x_i}$  可以转化为

$$P_{f|x_i} = \iint_{g_{x_i}(x) \leq 0} \dots \int f_{X_{-i}}(\mathbf{x}_{-i}) d\mathbf{x}_{-i} = \int_{R^{n-1}} \dots \int I_{\Pi_{x_i}}(\mathbf{x}) f_{X_{-i}}(\mathbf{x}_{-i}) d\mathbf{x}_{-i} = E_{X_{-i}}[I_{\Pi_{x_i}}(\mathbf{x})] \quad (7)$$

$$\text{其中} \quad I_{\Pi_{x_i}}(\mathbf{x}) = \begin{cases} 1 & g_{x_i}(x) \leq 0 \\ 0 & g_{x_i}(x) > 0 \end{cases}$$

式中:  $\mathbf{x}_{-i}$  为除  $x_i$  外的  $n-1$  维随机变量向量;  $f_{X_{-i}}(\mathbf{x}_{-i})$  为除  $x_i$  外的  $n-1$  维随机变量的联合概率密度函数;  $R^{n-1}$  为除  $x_i$  外的  $n-1$  维随机变量空间;  $g_{x_i}(\mathbf{x})$  为随机变量  $x_i$  取实现值时的条件功能函数;  $I_{\Pi_{x_i}}(\mathbf{x})$  为对应的失效域指示函数。

如果按联合概率密度函数  $f_X(\mathbf{x})$  进行随机抽样,对于大坝结构可靠性分析涉及的失效概率极小的情况,样本需要足够多才能保证抽取到部分失效域的子样,计算效率低。重要抽样法<sup>[35]</sup>利用重要抽样密度函数  $h_X(\mathbf{x})$  进行抽样,只需将  $f_X(\mathbf{x})$  的均值点替换为设计验算点  $\mathbf{x}^*$  即可获得  $h_X(\mathbf{x})$ ,而  $\mathbf{x}^*$  可用一次二阶矩法等其他常用算法得到。重要抽样法即便抽样数量相对较少也可以保证抽取到足够数量失效域中的子样。若不考虑影响因子之间的相关性,有  $h_X(\mathbf{x}) = \prod_{i=1}^n h_{X_i}(x_i)$ ,其中  $h_{X_i}(x_i)$  是  $x_i$  的边缘重要抽样密度函数。此外还可引入  $\kappa$  超球进行截断以进一步提高抽样精度,  $\kappa$  为设计点  $\mathbf{x}^*$  对应的可靠度,  $\kappa$  超球为以  $\kappa$  为半径的超球。在标准化正态空间中,  $\kappa$  超球空间的指示函数为

$$I_{\kappa}(\mathbf{x}) = \begin{cases} 1 & \|\sigma_x^{-1}(\mathbf{x} - \mu_x)\| \geq \kappa \\ 0 & \|\sigma_x^{-1}(\mathbf{x} - \mu_x)\| < \kappa \end{cases} \quad (8)$$

失效域位于  $\kappa$  超球外,  $\kappa$  超球内代表安全域,无需计算  $\kappa$  超球内样本点的功能函数值。引入重要抽样密度函数  $h_{X_i}(x_i)$  和  $\kappa$  超球后,式(7)可进一步转化为

$$P_{f|x_i} = \iint_{R^{n-1}} \dots \int I_{\kappa}(\mathbf{x}) I_{\Pi_{x_i}}(\mathbf{x}) \frac{f_{X_{-i}}(\mathbf{x}_{-i})}{h_{X_{-i}}(\mathbf{x}_{-i})} h_{X_{-i}}(\mathbf{x}_{-i}) d\mathbf{x}_{-i} = E_{X_{-i}} \left[ I_{\kappa}(\mathbf{x}) I_{\Pi_{x_i}}(\mathbf{x}) \frac{f_{X_{-i}}(\mathbf{x}_{-i})}{h_{X_{-i}}(\mathbf{x}_{-i})} \right] \quad (9)$$

将式(9)代入式(4),大坝随机影响因子全局重要性测度的计算式可转化为



$$M_{Gi} = E_{X_i} \left\{ \left[ E_{X_{-i}} \left( I_{\kappa}(\mathbf{x}) I_{\Pi_{X_i}}(\mathbf{x}) \frac{f_{X_{-i}}(\mathbf{x}_{-i})}{h_{X_{-i}}(\mathbf{x}_{-i})} \right) - P_f \right] \cdot \operatorname{sgn}(x_i^* - x_i) \right\} \quad (10)$$

对于各失效模式均可计算得到对应影响因子的全局重要性测度,然后代入式(6)即可求得大坝结构体系各失效模式间全局相关系数  $C_{ij}$ 。

上述基于截断重要抽样的蒙特卡罗法(TIS-MCS)可有效提高大坝结构体系各失效模式间全局相关系数的计算效率及精度,计算流程如图1所示。

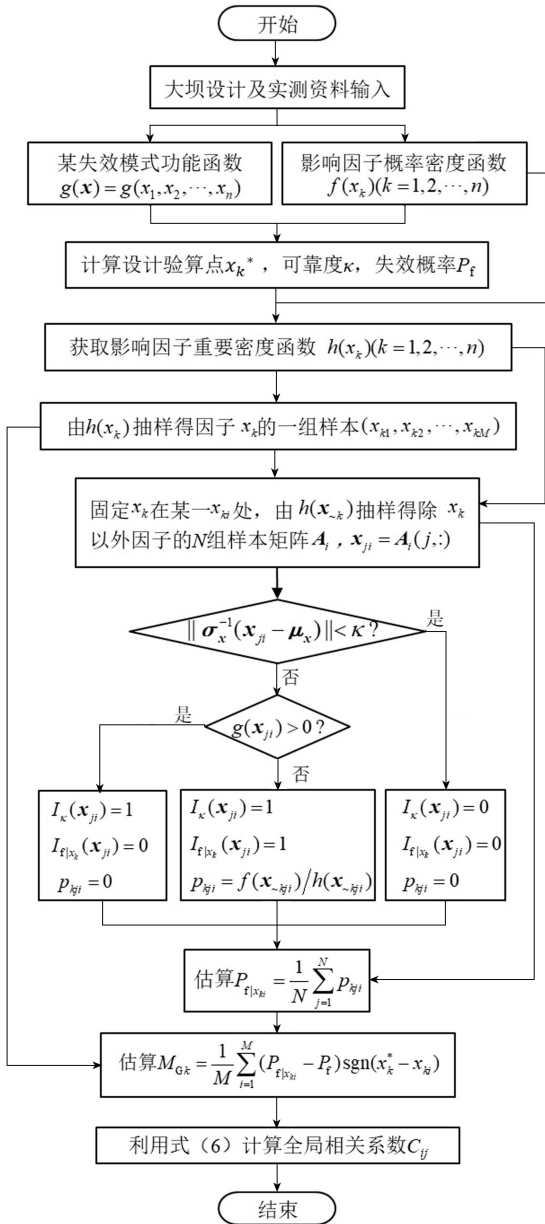


图1 大坝结构体系各失效模式间全局相关系数估算流程

## 2 大坝结构多失效模式下体系随机可靠性分析

大坝结构多失效模式下体系可靠性可概化为各

模式可靠性按一定逻辑关系的组合,常见的有串联、并联、串并联组合3种系统模型。以重力坝为例,假设各坝段之间分缝,各坝段独立工作,则大坝各坝段失效模式构成串联系统;就某一坝段而言,考虑承载能力极限状态,任一模式失效皆可导致该坝段失效,那么该坝段系统各失效模式间可视为串联关系;某个单独模式的失效往往是渐进的,像一个滑动路径的贯通是局部剪切损伤逐渐扩展积累导致的,滑动失效只在滑动路径上的每个子单元都进入剪切屈服状态时才会发生,此时可将该模式视为各局部子单元破坏模式组成的并联体系。

下面利用上节提出的全局相关系数  $C_{ij}$  来度量各失效模式间的相关性,研究大坝结构多失效模式下体系随机可靠性计算方法。

大坝结构体系中第  $i$  个失效模式的功能函数为

$$Z_i = g_i(\mathbf{x}) = g_i(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (11)$$

大坝结构体系第  $i$  个失效模式的失效概率  $P_{fi}$  为

$$P_{fi} = P(Z_i < 0) = \iint_{Z_i < 0} \dots \int f_i(\mathbf{x}) d\mathbf{x} \quad (12)$$

大坝结构体系第  $i$  个失效模式的随机可靠度  $\kappa_i$  为

$$\kappa_i = -\Phi^{-1}(P_{fi}) \quad (13)$$

式中  $\Phi(\cdot)$  为标准正态累积概率分布函数。

对于大坝各坝段构成的串联体系,认为其可靠性取决于可靠性最小的坝段,即取各坝段可靠度的最小值作为其体系可靠度;而就某一坝段各失效模式组成的串联体系而言,采用如下方法估算其体系可靠度。

设  $A_i$  为与失效模式  $Z_i$  相对应的事件,考虑  $Z_i$  之间的相关性,依据条件概率的概念,大坝串联结构体系可靠概率可以表示为

$$P_s = P(A_1)P\left[\left(\bigcap_{i=2}^m A_i\right) | A_1\right] = P(A_1)P(A_2 | A_1) \dots P(A_m | A_1 A_2 \dots A_{m-1}) \quad (14)$$

通过引入条件概率,将求解  $m$  个相容事件交集的概率转化为求解一组条件概率的乘积。但准确计算条件概率存在困难,通常采用如下的近似方法<sup>[36]</sup>。

将大坝各单一失效模式的风险概率  $P_{fi}$  排序,使  $P_{f1} \geq P_{f2} \geq \dots \geq P_{fm}$ 。假设  $i < j$ ,对于两个安全事件  $A_i, A_j$ ,可以得到:

$$P(A_j | A_i) = \frac{P(A_j \cap A_i)}{P(A_i)} \approx \frac{(1 - P_{fi})[1 - P_{fj}(1 - k_{ji}^{\kappa_j/2})]}{1 - P_{fi}} = \frac{1 - P_{fj}(1 - k_{ji}^{\kappa_j/2})}{1 - P_{fi}} \quad (15)$$

$$\text{其中 } k_{ji} = \frac{2}{\pi} \left[ 1 + (C_{ji} - C_{ji}^2) \left( \frac{3}{4} - C_{ji} \right) \exp(3C_{ji}) \right] \cdot \tan^{-1} \left( \frac{1}{\sqrt{1 - C_{ji}^2}} - 1 \right)$$

进一步可得:

$$P(A_i | A_1 A_2 \cdots A_{i-1}) \approx 1 - P_{fi} \prod_{j=1}^{i-1} (1 - K_{ij}^{\kappa_j/2}) \quad (16)$$

$$\text{其中 } K_{ij} = \frac{2}{\pi} \left[ 1 + (C_{ij} - C_{ij}^2) \left( \frac{3}{4 + C_{ij} \ln j} - C_{ij} \right) \exp(3C_{ij}) \right] \cdot \tan^{-1} \left( \frac{1}{\sqrt{1 - C_{ij}^2}} - 1 \right)$$

综合上述各式,可得大坝结构多失效模式串联体系可靠概率:

$$P_s = \prod_{j=1}^m (1 - P'_{fj}) \quad (17)$$

$$\text{其中 } P'_{f1} = P_{f1} \quad P'_{fj} = P_{fj} \prod_{i=1}^{j-1} (1 - K_{ji} \kappa_i/2)$$

对于由  $m$  个子单元破坏模式  $E_i$  并联构成的单个坝段某一失效模式而言,大坝结构并联体系可靠概率可由下式计算:

$$P_s = 1 - P(\bigcap_{i=1}^m E_i < 0) = 1 - \Psi(-\boldsymbol{\kappa}, \mathbf{C}) \quad (18)$$

$$\text{其中 } \boldsymbol{\kappa} = (\kappa_1, \kappa_2, \dots, \kappa_m)^T \quad \mathbf{C} = (C_{ij})_{m \times m}$$

$$\Psi(-\boldsymbol{\kappa}, \mathbf{C}) = \frac{\exp\left(-\frac{1}{2} \boldsymbol{\kappa}^T \mathbf{C}^{-1} \boldsymbol{\kappa}\right)}{\sqrt{2\pi \det \mathbf{C}} \prod_{k=1}^m \zeta_k}$$

$$|\boldsymbol{\kappa}| \rightarrow \infty \quad \zeta = \mathbf{C}^{-1} \boldsymbol{\kappa}$$

获得体系可靠概率后,再定义  $\kappa_s = \Phi^{-1}(P_s)$  为大坝结构多模式体系可靠度,进一步由  $P_f = 1 - P_s$  得到大坝结构多模式体系失效概率。

### 3 工程实例验证

#### 3.1 工程概况

某重力坝为 1 级水工建筑物,坝顶高程为 179.0m,水库的设计洪水位为 174.76m(500 年一遇),校核洪水位为 177.80m(5000 年一遇),正常蓄水位为 173.0m。5 号典型挡水坝段的横剖面如图 2 所示,上游面保持垂直,下游面折坡点高程为 168.0m,坝顶宽为 7.0m,底宽为 73.0m,底部高程为 80.0m,坝基防渗帷幕距上游坝面水平距离为 6.0m。

#### 3.2 大坝结构可靠性影响因素统计特征

5 号坝段建基面岩石局部强风化,工作条件比其余坝段更加恶劣,因此选取该坝段作为代表对该坝进行结构可靠性分析。该坝外部几何尺寸可近似为确定值,设计时的大坝结构可靠性随机影响因素统计特征见表 1。

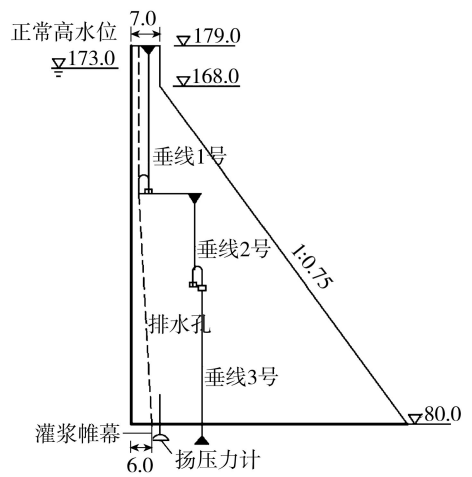


图 2 某重力坝非溢流坝段典型剖面(单位:m)

表 1 影响因素及其统计特征

| 影响因素                                      | 均值   | 标准差   | 变异系数 | 分布概型 |
|-------------------------------------------|------|-------|------|------|
| 混凝土容重 $\gamma_c / (\text{kN}/\text{m}^3)$ | 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 $H_1 / \text{m}$                     | 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 $c' / \text{MPa}$                  | 1.1  | 0.33  | 0.30 | 对数正态 |
| 混凝土抗拉强度 $\sigma_t / \text{MPa}$           | 1.45 | 0.36  | 0.25 | 对数正态 |
| 混凝土抗压强度 $\sigma_c / \text{MPa}$           | 15   | 3.75  | 0.25 | 对数正态 |

#### 3.3 大坝结构模式功能函数构建

考虑坝基抗滑、坝踵抗拉和坝趾抗压 3 种主要功能模式,取单位长度坝段进行分析,得到 3 项功能函数:

$$Z_1 = (3597\gamma_c - 365aH_1 - 30H_1)f' + 73000c' - 5H_1^2 \quad (19)$$

$$Z_2 = \sigma_t + 99.6\gamma_c - 9.18aH_1 - 1.58H_1 - 1.88 \times 10^{-3}H_1^3 \quad (20)$$

$$Z_3 = \sigma_c + \gamma_c + 0.82aH_1 - 0.76H_1 - 1.88 \times 10^{-3}H_1^3 \quad (21)$$

根据 3 项功能函数和影响因素的统计特征,采用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这 3 种模式的随机可靠度分别为 4.84、7.50、8.32,失效概率分别为  $6.36 \times 10^{-7}$ 、 $3.19 \times 10^{-14}$ 、 $4.39 \times 10^{-17}$ 。

#### 3.4 影响因素全局重要性

采用 TIS-MCS 法计算得到各影响因素的全局重要性测度  $\bar{M}_{Gki}$  ( $k=1,2,3; i=1,2,\dots,7$ ),同时为了对比,计算了局部灵敏度系数  $a_{ki}$ ,结果如表 2 所示。

从表 2 可以看出,坝基抗滑可靠性主要受抗剪强度指标和上游水深的影响;坝踵抗拉可靠性主要受混凝土抗拉强度和上游水深的影响;坝趾抗压可靠性主要受混凝土抗压强度和上游水深的影响。结构抗力影响因子的全局重要性测度和灵敏度均为正,意味着结构抗力影响因子越大,大坝结构服役可

靠性越高;而作用效应影响因子的全局重要性测度和灵敏度均为负,表明作用效应影响因子增大不利于大坝健康服役,这符合工程实际。影响因子全局重要性测度和灵敏度的计算数值略有差别,正负保持一致,而全局重要性测度弥补了灵敏度系数在局部设计验算点处取值的缺陷。

表2 影响因子重要性分析结果

| 影响因子       | 坝基抗滑 $Z_1$ |                 | 坝踵抗拉 $Z_2$ |                 | 坝趾抗压 $Z_3$ |                 |
|------------|------------|-----------------|------------|-----------------|------------|-----------------|
|            | $a_{1i}$   | $\bar{M}_{G1i}$ | $a_{2i}$   | $\bar{M}_{G2i}$ | $a_{3i}$   | $\bar{M}_{G3i}$ |
| $\gamma_c$ | 0.026      | 0.011           | 0.209      | 0.118           | 0.001      | 0.001           |
| $a$        | -0.023     | -0.016          | -0.315     | -0.102          | 0.010      | 0.003           |
| $H_1$      | -0.141     | -0.084          | -0.248     | -0.632          | -0.121     | -0.079          |
| $f'$       | 0.923      | 0.904           |            |                 |            |                 |
| $c'$       | 0.358      | 0.418           |            |                 |            |                 |
| $\sigma_1$ |            |                 | 0.892      | 0.759           |            |                 |
| $\sigma_c$ |            |                 |            |                 | 0.993      | 0.997           |

### 3.5 各模式间全局相关性度量

由此可见,坝踵抗拉和坝趾抗压( $C_{23}$ )两模式间的相关性较高,这主要是因为影响坝踵抗拉可靠性的抗拉强度和影响坝趾抗压可靠性的抗压强度具有较高的相关性。坝基抗滑和坝踵抗拉( $C_{12}$ )以及坝基抗滑和坝趾抗压( $C_{13}$ )的相关性较低,虽然各失效模式有共同的显著影响因子上游水深,但是3种模式受力分析得到的失效函数中上游水深的表达形式不同,坝基抗滑主要是上游水深的一次方项和二次方项,而坝踵抗拉和坝趾抗压主要是上游水深的一次方项和三次方项,导致得到坝基抗滑和另两个(坝踵抗拉和坝趾抗压)失效模式间的相关性较小。

### 3.6 大坝结构多模式体系随机可靠性分析

度量了模式间全局相关性后,便可对该坝进行多模式体系随机可靠性分析。对于该坝各坝段构成的串联体系而言,认为其可靠性取决于可靠性最低的坝段,而5号坝段工作条件较其他坝段更加恶劣,于是取5号坝段结构可靠度作为该坝结构体系可靠度。该坝段坝基抗滑、坝踵抗拉和坝趾抗压3种模式在系统中以串联形式存在。本文提出的全局相关性度量法和其他不同方法计算得到的体系可靠度如表3所示。

表3 大坝结构多模式体系随机可靠度

| 计算方法        | 体系可靠度 | 体系风险率/ $10^{-7}$ |
|-------------|-------|------------------|
| 简化界限法(完全独立) | 4.832 | 6.76             |
| 简化界限法(完全相关) | 4.844 | 6.36             |
| 窄界限法(下限)    | 4.835 | 6.65             |
| 窄界限法(上限)    | 4.842 | 6.42             |
| 线性相关度量法     | 4.841 | 6.45             |
| 全局相关性度量法    | 4.838 | 6.56             |

从表3可以看出,全局相关性度量法计算所得大坝结构体系随机可靠度(4.838)在窄界限法范围

内,略小于线性度量的结果(4.841)。因为该大坝结构体系可靠度主要取决于可靠度最小的坝基抗滑失效模式,而坝基抗滑与另外两个失效模式(坝踵抗拉和坝趾抗压)的局部线性相关系数和全局相关系数都比较小,所以导致不同方法得到的体系可靠度虽有差异但不是很大。但全局相关系数全面考虑了随机影响因子整个失效域内变化时各失效模式间的相关性,因此全局相关性度量法计算得到的体系随机可靠度更为合理。该服役重力坝为1级水工建筑物,结构安全等级为一级,根据GB 50199—2013《水利水电工程结构可靠性设计统一标准》,其发生二类破坏的随机目标可靠度为4.20,由体系可靠度计算结果可知,该坝在保持设计状态的情况下可以安全服役。

## 4 结 语

在大坝结构可靠性随机影响因子的全局重要性考察基础上,利用全局相关系数替代近似线性相关系数,提出了从全局不确定性角度来度量大坝各失效模式间相关性的方法,采用TIS-MCS法实现了失效模式间全局相关性的量化分析,克服了传统基于灵敏性的局部线性相关度量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。在大坝结构多失效模式体系可靠性量化模型基础上,考虑失效模式间的全局相关性,结合工程实例计算对比了基于全局相关性度量和其他方法得到的大坝结构多失效模式下体系随机可靠度。结果显示,全局相关性度量法计算得到的体系随机可靠度更为合理,为大坝结构体系可靠性分析提供了一种新方法。

### 参考文献:

- [1] 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. (GU Chongshi, SU Huaizhi, LIU Hezhi. Review on service risk analysis of dam engineering [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2018, 49(1): 26-35. (in Chinese))
- [2] 盛金保,厉丹丹,蔡尊,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. (SHENG Jinbao, LI Dandan, CAI Qian, et al. Research progress and its practice of key techniques for dam risk assessment and management [J]. Scientia Sinica Technologica, 2018, 48(10): 1057-1067. (in Chinese))
- [3] 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. (GU Chongshi, ZHANG Jingmei. Non-probabilistic reliability analysis methods of dam service performance [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2018, 38

- (5):1-9. (in Chinese))
- [ 4 ] 程井, 韦锦鹏, 李宗樾, 等. 基于 Neumann 展开随机有限元的混凝土重力坝结构可靠度分析[J]. 水利水电科技进展, 2019, 39(2):46-50. (CHENG Jing, WEI Jinpeng, LI Zongyue, et al. Structure reliability analysis of concrete gravity dams using Neumann expansion stochastic finite element method[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2019, 39(2):46-50. (in Chinese))
- [ 5 ] 裴亮, 代萍, 何坤, 等. 高碾压混凝土拱坝温控可靠性分析[J]. 水利水电科技进展, 2016, 36(1):90-94. (PEI Liang, DAI Ping, HE Kun, et al. Reliability analysis of temperature control of high RCC arch dam[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2016, 36(1):90-94. (in Chinese))
- [ 6 ] 苏怀智, 刘红萍. 高重力坝抗滑稳定安全度分析[J]. 水利水电科技进展, 2011, 31(4):20-23. (SU Huaizhi, LIU Hongping. Stability safety degree against sliding in high gravity dams[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2011, 31(4):20-23. (in Chinese))
- [ 7 ] XU Bo, WANG Shida. Sensitivity analysis of factors affecting gravity dam anti-sliding stability along a foundation surface using Sobol method[J]. Water Science and Engineering, 2023, 16(4):399-407.
- [ 8 ] 佟大威, 杨传会, 余佳, 等. 基于 XGBoost-PSO 的混凝土重力坝体型多目标优设计[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2023, 51(3):91-98. (TONG Dawei, YANG Chuanhui, YU Jia, et al. Multi-objective shape optimization of concrete gravity dam based on XGBoost-PSO [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2023, 51(3):91-98. (in Chinese))
- [ 9 ] XING Hanzheng, JIANG Tiantian, HAO Peng. An efficient dominant failure modes search strategy and an extended sequential compounding method of system reliability analysis and optimization [J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2021, 375:113637.
- [ 10 ] 向衍, 盛金保, 刘成栋, 等. 土石坝长效服役与风险管理研究进展[J]. 水利水电科技进展, 2018, 38(5):86-94. (XIANG Yan, SHENG Jinbao, LIU Chengdong, et al. Research progress in long-term service and risk assessment of earth-rockfill dams[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2018, 38(5):86-94. (in Chinese))
- [ 11 ] 蔡蓁, 王昭升, 朱思宇, 等. 土石坝风险实时评估与综合预警模型[J]. 水利水电科技进展, 2018, 38(4):57-63. (CAI Qian, WANG Zhaosheng, ZHU Siyu, et al. A real-time risk assessment and synthetical early warning model of earth and rockfill dams[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2018, 38(4):57-63. (in Chinese))
- [ 12 ] 李卓, 孙屹, 姜鑫, 等. 低围压与不同温度作用下土石坝护坡土石混合体力学特性[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2024, 52(6):90-96. (LI Zhuo, SUN Yi, JIANG Xin, et al. Study on mechanical properties of earth-rock mixture for earth-rock dam slope protection under low confining pressure and different temperatures[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2024, 52(6):90-96. (in Chinese))
- [ 13 ] 何梦佳, 陈波, 刘庭赫, 等. 基于有限元分析的特高拱坝实时风险率模型[J]. 水利水电科技进展, 2024, 44(6):113-122. (HE Mengjia, CHEN Bo, LIU Tinghe, et al. Real-time risk rate model for extra-high arch dams based on finite element analysis[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2024, 44(6):113-122. (in Chinese))
- [ 14 ] XIAO Ningcong, YUAN Kai, ZHOU Chengning. Adaptive kriging-based efficient reliability method for structural systems with multiple failure modes and mixed variables [J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2020, 359:112649.
- [ 15 ] 吴世伟, 李同春. 重力坝最大可能破坏模式的探讨[J]. 水利学报, 1990(8):20-28. (WU Shiwei, LI Tongchun. An approach to the most possible failure mode of gravity dams[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1990(8):20-28. (in Chinese))
- [ 16 ] 范书立, 陈健云, 范武强, 等. 地震作用下碾压混凝土重力坝的可靠度分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(3):564-571. (FAN Shuli, CHEN Jianyun, FAN Wuqiang, et al. Reliability analysis of roller compacted concrete gravity dams subjected to earthquake [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(3):564-571. (in Chinese))
- [ 17 ] 陈进, 黄薇. 重力坝系统可靠度研究方法探讨[J]. 长江科学院院报, 1997, 14(1):21-24. (CHEN Jin, HUANG Wei. Investigation to system reliability method of gravity dam [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 1997, 14(1):21-24. (in Chinese))
- [ 18 ] RACKWITZ R. Reliability analysis; a review and some perspectives[J]. Structural Safety, 2001, 23(4):365-395.
- [ 19 ] 伍建军, 李嘉辉. 失效模式相关性的柔顺机构可靠性分析[J]. 机械科学与技术, 2024, 43(11):1923-1928. (WU Jianjun, LI Jiahui. Reliability analysis of supple mechanisms considering failure mode correlation [J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2024, 43(11):1923-1928. (in Chinese))
- [ 20 ] 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.
- [ 21 ] 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.
- [22] 苏怀智, 胡江, 吴中如. 大坝体系使用寿命评估模型 [C]//中国水力发电工程学会大坝安全监测专业委员会. 2012 年中国水力发电工程学会大坝安全监测专委会年会暨学术交流会议论文集. 杭州: 中国水力发电工程学会, 2012: 131-140.
- [23] XU Qiang, CHEN Jianyun, LI Jing. Study on system reliability of gravity dam [J]. Applied Mechanics and Materials, 2013, 351/352: 1677-1682.
- [24] 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. (LI Huijun, LI Zongli, WANG Yahong. Research on system reliability and sensitivity of gravity dams [J]. China Rural Water and Hydropower, 2014(5): 81-85. (in Chinese))
- [25] 张社荣, 王超, 孙博. 重力坝多失效模式相关层间抗滑稳定体系的可靠性分析 [J]. 水利学报, 2013, 44(4): 426-434. (ZHANG Sherong, WANG Chao, SUN Bo. Reliability analysis for multiple failure modes related sliding stability system between layers of gravity dam [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2013, 44(4): 426-434. (in Chinese))
- [26] HE Liangli, LU Zhenzhou, LI Xinyao. Failure-mode importance measures in structural system with multiple failure modes and its estimation using copula [J]. Reliability Engineering & System safety, 2018, 174: 53-59.
- [27] DITLEVSEN O. Narrow reliability bounds for structural systems [J]. Mechanics Based Design of Structures and Machines, 1979, 7(4): 453-472.
- [28] 尹金超, 赵泽鹏, 张瀚, 等. 复杂地基下重力坝抗滑稳定可靠度分析 [J]. 水电能源科学, 2020, 38(11): 80-84. (YIN Jinchao, ZHAO Zepeng, ZHANG Han, et al. Reliability analysis of anti-sliding stability of gravity dam under complex foundation [J]. Water Resources and Power, 2020, 38(11): 80-84. (in Chinese))
- [29] HOHENBICHLER M, RACKWITZ R. First-order concepts in system reliability [J]. Structural Safety, 1983, 1(3): 177-188.
- [30] 周超. 重力坝岩基整体稳定体系可靠度研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2018.
- [31] ANG A H S, TANG W H. Probability concepts in engineering planning and design, Vol. II. Decision, risk, and reliability [M]. New York: John Wiley & Sons, 1984.
- [32] 魏博文, 张升, 袁冬阳, 等. 基于概率-模糊-区间混合模型和改进分枝限界法的重力坝可靠性分析方法 [J]. 水利学报, 2022, 53(12): 1476-1489. (WEI Bowen, ZHANG Sheng, YUAN Dongyang, et al. Reliability analysis method of gravity dam based on probability-fuzzy-interval hybrid model and improved branch and bound method [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2022, 53(12): 1476-1489. (in Chinese))
- [33] 张晶梅, 王少伟. 大坝结构可靠性影响因子的全局重要性分析 [J]. 水资源与水工程学报, 2022, 33(4): 171-177. (ZHANG Jingmei, WANG Shaowei. Global importance analysis of influencing factors of dam structural reliability [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2022, 33(4): 171-177. (in Chinese))
- [34] XIAO Sinan, NOWAK W. Reliability sensitivity analysis based on a two-stage Markov chain Monte Carlo simulation [J]. Aerospace Science and Technology, 2022, 130: 107938.
- [35] TABANDEH A, JIA Gaofeng, GARDONI P. A review and assessment of importance sampling methods for reliability analysis [J]. Structural Safety, 2022, 97: 102216.
- [36] 李云贵, 赵国藩. 结构体系可靠度的近似计算方法 [J]. 土木工程学报, 1993, 26(5): 70-76. (LI Yungui, ZHAO Guofan. An approximate method for structural system reliability analysis [J]. China Civil Engineering Journal, 1993, 26(5): 70-76. (in Chinese))

(收稿日期: 2024-03-03 编辑: 俞云利)

(上接第 97 页)

- [29] 朱伯芳. 论混凝土坝的水管冷却 [J]. 水利学报, 2010, 41(5): 505-513. (ZHU Bofang. On pipe cooling of concrete dams [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2010, 41(5): 505-513. (in Chinese))
- [30] 朱诚, 王昭敏, 隆锋, 等. 基于 ABC-BP 神经网络的地铁盾构地表沉降预测 [J]. 河海大学学报 (自然科学版), 2023, 51(4): 72-80. (ZHU Cheng, WANG Zhaomin, LONG Feng, et al. Prediction of ground settlement of subway shield based on ABC-BP neural network [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2023, 51(4): 72-80. (in Chinese))
- [31] 刘云飞, 张俊然. 深度神经网络学习率策略研究进展 [J]. 控制与决策, 2023, 38(9): 2444-2460. (LIU Yunfei, ZHANG Junran. Research advances in deep neural networks learning rate strategies [J]. Control and Decision, 2023, 38(9): 2444-2460. (in Chinese))
- [32] 刘相杰, 刘小生, 张龙威. 基于二次模态分解和深度学习的大坝变形预测模型 [J]. 水利水电科技进展, 2024, 44(3): 101-106. (LIU Xiangjie, LIU Xiaosheng, ZHANG Longwei. Dam deformation prediction model based on quadratic modal decomposition and deep learning [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2024, 44(3): 101-106. (in Chinese))

(收稿日期: 2024-05-16 编辑: 俞云利)