DOI:10.3880/j. issn. 1006–7647.2018.05.001
·庆贺吴中如院士80华诞专刊论文·

大坝服役非概率可靠性分析方法

顾冲时[1,2],张晶梅[1,2]

(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. 河海大学水利水电学院,江苏 南京 210098)

摘要:针对大坝服役可靠性影响因子具有非概率不确定特征的情况,建立了定量刻画大坝服役可靠性非概率影响因子的Info-gap模型,运用Info-gap决策理论和体积比非概率可靠性度量方法,提出了大坝服役非概率可靠性分析方法,拟定了大坝服役非概率目标可靠度。应用提出的非概率方法分析了某大坝结构服役可靠性,各功能模式可靠性分析结果说明了该方法的工程适用性,同时也验证了所拟定大坝服役非概率目标可靠度的合理性。

关键词:大坝;服役可靠性;非概率不确定性;Info-gap模型;非概率可靠度

中图分类号:TV642 **文献标志码**:A **文章编号**:1006–7647(2018)05–0001–09

Non-probabilistic reliability analysis methods of dam service performance//GU Chongshi[1,2], ZHANG Jingmei[1,2]

(1. *State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering*, *Hohai University*, *Nanjing* 210098, *China*; 2. *College of Water Conservancy and Hydropower Engineering*, *Hohai University*, *Nanjing* 210098, *China*)

Abstract: Aiming at the non-probabilistic characteristics of the factors influencing dam service reliability, a non-probabilistic Info-gap model is established to quantifiably describe the non-probabilistic uncertainty of the influence factors. A non-probabilistic reliability analytical method of dam service performance is proposed based on two non-probabilistic reliability measures, Info-gap decision theory and the volume ratio. Non-probabilistic target reliability indexes of dam service performance are then preliminarily determined. The proposed non-probabilistic method is used to analyze the structural service reliability of a dam. The results of the reliability analysis in various function modes demontrste the engineering applicability of the method and the varified rationality of the determined non-probabilistic target reliability as well.

Key words: dam; service reliability; non-probabilistic uncertainty; Info-gap model; non-probabilistic reliability

我国已建成各类水库大坝9.8万余座,其数量居世界首位,它们在防洪、灌溉、供水、发电和航运等方面产生了非常显著的社会和经济效益[1-2]。随着服役年限的增长,在役大坝的老化和病害问题日益凸显,大坝的健康服役受到威胁。目前,我国大坝工程管理模式正逐渐从传统的安全管理向风险管理过渡[3-5]。大坝服役性态受多种因素的影响,如水文水力不确定性导致的库水位、坝基扬压力和风浪等荷载作用的不确定性,工程地质和筑坝材料等不确定性引起的坝基抗剪强度、混凝土强度等的不确定性,所以,大坝本质上是一个复杂的不确定性系统[6-7],充分考虑影响因素不确定性的可靠性分析是大坝风险管理的重要环节。通过对大坝进行服役可靠性分析,评价其服役安全性,对提高我国大坝管理水平具有十分重要的理论意义和现实意义。

传统大坝服役可靠性分析一般采用随机概率方法,当不确定因子为随机因子且能获取其概率统计特征时,随机分析结果能较好地反映大坝服役可靠性。但是,在大坝众多不确定影响因子中,有些因子的统计资料匮乏,无法确定其完整的概型分布,还有些因子并非具有严格随机性[8],这在一定程度上制约了随机方法在大坝服役可靠性分析中的应用。

为能在不确定性因子的统计资料很少时实现结构的可靠性分析,Ben-Haim[9-10]针对因子的基本波

基金项目:国家重点研发计划(2016YFC0401601);国家自然科学基金(51739003,51479054)

作者简介:顾冲时(1962—),男,教授,博士,主要从事水工结构安全监控与健康诊断研究。E-mail:csgu@hhu. edu. cn

通信作者:张晶梅(1990—),女,博士,主要从事水工结构安全监控研究。E-mail:44098@hhu. edu. cn

动界限相对较易确定的特点,提出了采用凸集模型来刻画该种不确定性的方法,并于20世纪90年代,首次从非概率的角度开展了结构可靠性分析方面的研究,用在保证结构安全的前提下能够允许的最大不确定性波动程度来度量可靠性;之后,Ben-Haim[11] 将凸集模型进一步扩展为 Info-gap (Information gap)模型。

非概率方法仅需掌握影响因子的基本波动范围,因此,一些学者开始尝试将其用于解决影响因子统计信息匮乏情况下的大坝服役可靠性分析中。彭友文[12]采用凸集模型描述影响因子的不确定性,在此基础上建立了重力坝风险率评价的非概率模型;张勇等[13]结合响应面有限元法建立了高拱坝的非概率可靠度计算模型;夏雨等[14]采用区间凸集模型刻画拱坝材料参数的不确定性,利用有限元建模得到坝体单元的非概率可靠度;Su 等[15]构建了基于不确定参数区间凸集模型的重力坝非概率时变可靠度计算模型。非概率可靠性分析理论在坝工领域的研究和应用尚不多见,而且已有研究中并没有深入探讨非概率可靠性度量指标(即可靠度)的普适形式,因此,应在提出较为合适的非概率可靠度基础上,进一步研究大坝服役可靠性分析的非概率方法。

针对上述问题,本文将分散度参数引入 Info-gap 理论,建立定量刻画大坝服役可靠性非概率影响因子的 Info-gap 模型;研究 Info-gap 决策理论和体积比非概率可靠性度量方法,提出大坝服役非概率可靠性分析方法;拟定大坝服役非概率目标可靠度,并将其作为对非概率可靠性分析结果进行评估的标准;应用所提非概率方法对某大坝进行结构服役可靠性分析,以验证该方法的工程适用性。

1 大坝非概率不确定性分析模型

在影响大坝服役可靠性的众多不确定因子中,由于现场试验或监测条件有限,有些因子的统计资料很少(如影响大坝稳定的抗剪强度指标),还有些因子受人为干扰而不具有严格的随机性(如库水位等),这些原因导致了大坝服役可靠性影响因子的不确定性不能简单用随机概率分布描述,而 Info-gap 模型可以解决该问题。

1.1 引入分散度参数的 Info-gap 模型

在非概率 Info-gap 理论中,不确定性采用 Info-gap 模型替代随机概率分布来描述[16]。设 $\boldsymbol{S}$ 为不确定性向量 $\boldsymbol{x}$ 所在的 Banach 空间,$\boldsymbol{D}$ 为 $\boldsymbol{S}$ 的子集,Info-gap 模型 $U(\gamma,\bar{\boldsymbol{x}})$ 是由 $\mathbf{R}_+\times\mathbf{D}$ 到 $\mathbf{D}$ 的幂集上的映射,是关于$(\gamma,\bar{\boldsymbol{x}})$的集值函数,其中:$\bar{\boldsymbol{x}}$ 为模型的中心点;$\mathbf{R}_+$ 为非负实数集;γ 为模型的不确定性水平参数,表征模型的波动范围。$U(\gamma,\bar{\boldsymbol{x}})$ 描述 $\boldsymbol{x}$ 以 $\bar{\boldsymbol{x}}$ 为中心的不确定性波动,其从两个层面刻画 $\boldsymbol{x}$ 的不确定性:①对于某一确定的 γ 取值,$\boldsymbol{x}$ 在凸集合 $U(\gamma,\bar{\boldsymbol{x}})$ 中是不确定的;②γ 的取值具有不确定性,即 $U(\gamma,\bar{\boldsymbol{x}})$ 是一个层层向外扩展的凸集合套。

参数 γ 通常附带量纲,为了消除量纲尺度的影响,某些无量纲化方法被提出[17-18]。若 $\boldsymbol{x}$ 通常在 $\boldsymbol{U}_0(\theta,\bar{\boldsymbol{x}})$ 内取值,其中 θ 是 γ 的某一具体取值,定义 θ 为模型 $U(\gamma,\bar{\boldsymbol{x}})$ 的分散度参数,表征因子向量 $\boldsymbol{x}$ 的实际离散程度。这里用 $\theta\alpha(\alpha\in\mathbf{R}_+)$ 替代 γ,则 $U(\gamma,\bar{\boldsymbol{x}})$ 转化为新的 Info-gap 模型 $U(\alpha,\bar{\boldsymbol{x}},\theta)$,$\alpha$ 是模型 $U(\alpha,\bar{\boldsymbol{x}},\theta)$ 的无量纲相对不确定性水平参数(后面简称为不确定性水平参数)。

实际工程中,有些不确定因子的完整概率分布信息不易取得,但其基本波动范围却相对容易掌握,这时取 α 为1,称集合 $U(1,\bar{\boldsymbol{x}},\theta)$ 为 $\boldsymbol{x}$ 的基本不确定性波动,可以采用下式确定分散度参数 θ:

$$\theta=\max\{\gamma \mid U(\gamma,\bar{\boldsymbol{x}}) \subseteq \{\boldsymbol{x} \mid x_i \in [x_{li},x_{ui}]\}\} \tag{1}$$

式中:x_i 为 $\boldsymbol{x}$ 的分量;x_{li} 和 x_{ui} 分别为 x_i 基本变化区间的下界和上界。

区间 Info-gap 模型和椭球 Info-gap 模型是最为常见的两种 Info-gap 模型:

$$U_I(\alpha,\bar{x},\theta)=\left\{x \,\middle|\, |x_i-\bar{x}_i| \leqslant \theta_i\alpha, i=1,2,\cdots,n\right\} \quad \alpha\in\mathbf{R}_+ \tag{2}$$

$$U_E(\alpha,\bar{x},\theta)=\{x \mid (\boldsymbol{x}-\bar{\boldsymbol{x}})^{\mathrm{T}}\boldsymbol{W}(\boldsymbol{x}-\bar{\boldsymbol{x}}) \leqslant (\theta\alpha)^2\} \quad \alpha\in\mathbf{R}_+ \tag{3}$$

式中:$\boldsymbol{x}=(x_1,x_2,\cdots,x_n)^{\mathrm{T}}$;$\boldsymbol{\theta}=(\theta_1,\theta_2,\cdots,\theta_n)^{\mathrm{T}}$ 是区间模型的 n 维分散度向量;θ 为椭球模型的分散度参数;$\boldsymbol{W}$ 为表征椭球形状的实对称正定矩阵。

一般地,当不确定向量 $\boldsymbol{x}$ 由 m 个子向量 $\boldsymbol{x}_k(k=1,2,\cdots,m)$ 构成,即 $\boldsymbol{x}=(\boldsymbol{x}_1^{\mathrm{T}},\boldsymbol{x}_2^{\mathrm{T}},\cdots,\boldsymbol{x}_m^{\mathrm{T}})^{\mathrm{T}}$,可分别用 m 个 Info-gap 模型描述各个子向量 $\boldsymbol{x}_k$ 的不确定性,于是,描述 $\boldsymbol{x}$ 不确定性的 Info-gap 模型 $U(\alpha,\bar{\boldsymbol{x}},\theta)$ 可通过 m 个子模型 $U_k(\alpha,\bar{\boldsymbol{x}}_k,\boldsymbol{\theta}_k)$ 复合构成:

$$U(\alpha,\bar{\boldsymbol{x}},\boldsymbol{\theta})=\bigcap_{k=1}^{m} U_k(\alpha,\bar{\boldsymbol{x}}_k,\theta_k) \tag{4}$$

式中:$\bar{\boldsymbol{x}}=(\bar{\boldsymbol{x}}_1^{\mathrm{T}},\bar{\boldsymbol{x}}_2^{\mathrm{T}},\cdots,\bar{\boldsymbol{x}}_m^{\mathrm{T}})^{\mathrm{T}}$ 为复合模型的中心点;$\boldsymbol{\theta}=(\theta_1,\theta_2,\cdots,\theta_m)^{\mathrm{T}}$ 为 m 个子模型分散度构成的复合模型分散度向量;$U_k(\alpha,\bar{\boldsymbol{x}}_k,\theta_k)$ 描述子向量 $\boldsymbol{x}_k$ 在其子空间中的不确定性。

1.2 大坝非概率不确定影响因子的 Info-gap 模型

考虑大坝某一服役功能模式的响应函数 $g(\boldsymbol{x})$,$\boldsymbol{x}=(x_1,x_2,\cdots,x_n)^{\mathrm{T}}$ 为影响因子向量,包括上下游水

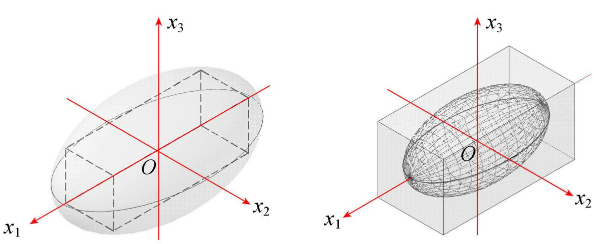
位 H_1 和 H_2、扬压力系数 a、泥沙淤积高度 h_n、混凝土容重 γ_c、岩土体抗剪强度指标(摩擦系数 f' 和黏聚力 c')、混凝土抗压强度 σ_c 和抗拉强度 σ_t 等因子,描述大坝服役可靠性分析中非概率影响因子 $\boldsymbol{x}$ 的一个最简单的 Info-gap 模型为区间模型,其表征形式如式(2)所示。

上述区间 Info-gap 模型几何特征为一个层层嵌套的超长方体模型,由区间运算、扩展可知,大坝功能函数达到极值时,各影响因子往往同时取极值,但实际中该工况几乎不存在,而且有些因子如抗剪强度指标 c' 和 f' 之间往往呈负相关[19-20],因此,区间模型高估了因子的不确定程度,导致结果偏保守。因此,考虑采用如下超椭球 Info-gap 模型来刻画大坝服役可靠性影响因子,具体模型表达式参见式(3)。

大坝服役可靠性非概率影响因子超椭球 Info-gap 模型的基本层($\alpha=1$)通常以超长方体模型为基础有外接和内切两种确定方法,如图 1 所示。图 1(a)确定的最小外接椭球超出了长方体的区域,而前面已分析过采用区间长方体模型所得结果偏保守,外接模型将会导致工程不经济问题的出现。图 1 (b)的最小内切椭球模型确定的因子基本波动范围虽然比长方体的小,但依据有关概率理论中的“3σ”准则[21],各影响因子将 3σ 范围视为其基本变化范围比较符合工程实际,此时不确定点落在长方体和其内切椭球之间区域的概率仅为 0.575%,概率是相当小的。综上,可建立如下内切超椭球 Info-gap 模型来刻画大坝服役可靠性影响因子的非概率不确定性:

$$U_E(\alpha,\bar{x},\theta)=\left\{\boldsymbol{x}\left|\frac{(x_1-\bar{x}_1)^2}{e_1^2}+\frac{(x_2-\bar{x}_2)^2}{e_2^2}+\cdots+\frac{(x_n-\bar{x}_n)^2}{e_n^2}\leqslant(\theta\alpha)^2\right.\right\}\qquad\alpha\in\mathbf{R}_+\tag{5}$$

式中 $e_i(i=1,2,\cdots,n)$ 为对角矩阵 $\boldsymbol{W}$ 的对角元素,决定椭球模型的形状。



(a) 外接模型　　(b) 内切模型

图 1　非概率不确定因子的三维空间几何描述

对大坝某具体服役功能可靠性影响因子 $\boldsymbol{x}=(H_1,H_2,a,\gamma_c,\cdots,\sigma_c,\sigma_t,f',c')^{\mathrm{T}}$,式(5)可进一步具体化为如下形式:

$$U_E(\alpha,\bar{x},\theta)=\frac{(H_1-\bar{H}_1)^2}{e_{H_1}^2}+\frac{(H_2-\bar{H}_2)^2}{e_{H_2}^2}+\frac{(a-\bar{a})^2}{e_a^2}+\cdots+\frac{(f'-\bar{f}')^2}{e_{f'}^2}+\frac{(c'-\bar{c}')^2}{e_{c'}^2}\leqslant(\theta\alpha)^2\tag{6}$$

大坝服役可靠性非概率影响因子内切超椭球 Info-gap 模型 $U_E(\alpha,\bar{x},\theta)$ 中各参数的确定方法如下:模型因子中心点 $\bar{\boldsymbol{x}}=(\bar{x}_1,\bar{x}_2,\cdots,\bar{x}_n)^{\mathrm{T}}$ 中的 $\bar{x}_i=(x_{li}+x_{ui})/2$;模型分散度参数 θ 和决定椭球模型形状的对角矩阵 $\boldsymbol{W}$ 可联合取为 $\boldsymbol{W}/\theta^2=\mathrm{Diag}\left[1/(\theta e_1)^2,1/(\theta e_2)^2,\cdots,1/(\theta e_n)^2\right]$,其中 $\theta e_i=(x_{ui}-x_{li})/2$。

2　大坝服役非概率可靠性分析

大坝服役可靠性分析需与使用功能目标(模式)联系,大坝各功能模式在整个服役过程中始终存在可靠和失效两种状态,可用功能函数 $g(\cdot)$ 来定义大坝某服役功能模式所处的工作状态 Z:

$$Z=g(\boldsymbol{x})=g(x_1,x_2,\cdots,x_n)=r-s\tag{7}$$

式中:r 为大坝允许的抗力效应项;s 为大坝所承受的作用效应项。

当 $Z>0$ 时,大坝某服役功能模式处于可靠状态;$Z<0$ 对应失效状态;$Z=0$ 为极限状态,$g(\boldsymbol{x})=0$ 称为极限状态方程,该方程表示了可靠和失效之间的临界状态。

2.1　大坝服役非概率可靠度

基于提出的非概率影响因子超椭球 Info-gap 模型,有机融合 Info-gap 决策理论和体积比非概率可靠性度量方法,构建大坝服役非概率可靠性度量指标(可靠度)表达式,并研究其求解方法。

首先研究基于 Info-gap 决策理论[11,22]的大坝服役非概率可靠性度量方法。决策的有效性一般可由研究对象回馈函数 $Y(\boldsymbol{d},\boldsymbol{x})$ 的取值表征,其中 $\boldsymbol{d}$ 为决策向量,根据研究对象的需要确定。设 c_r 是使决策有效所限定的最低临界反馈值,c_o 为决策者想要得到意外机会收获时应达到的另一临界反馈值,分别定义决策向量 $\boldsymbol{d}$ 相应于 c_r 和 c_o 的稳健度函数 $R_o(c_r,\boldsymbol{d})$ 和机会度函数 $O_p(c_o,\boldsymbol{d})$:

$$R_o(c_r,\boldsymbol{d})=\max\{\gamma,(\min_{\boldsymbol{x}\in U(\gamma,\bar{x})}Y(\boldsymbol{d},\boldsymbol{x})\geqslant c_r)\}\tag{8}$$

$$O_p(c_o,\boldsymbol{d})=\min\{\gamma,(\max_{\boldsymbol{x}\in U(\gamma,\bar{x})}Y(\boldsymbol{d},\boldsymbol{x})\geqslant c_o)\}\tag{9}$$

从以上两式可以看出,稳健度函数表示在决策 $\boldsymbol{d}$ 下满足回馈函数值不低于 c_r 时所允许 $\boldsymbol{x}$ 的最大不确定性波动程度;而机会度函数的意义则是使回馈函数值大于 c_o 所需 $\boldsymbol{x}$ 的最小不确定性波动程度。

下面运用 Info-gap 决策理论,构建大坝服役非概率可靠性度量指标的表达式。

从 Info-gap 决策理论的角度看,功能函数 $g(\boldsymbol{x})$

可视为大坝某一服役功能状态的回馈函数,为使大坝处于安全状态,$g(\boldsymbol{x})$的取值必须大于0。当大坝服役可靠性非概率影响因子超椭球 Info-gap 模型 $U_E(\alpha,\bar{x},\theta)$的中心点处于安全域 $\boldsymbol{\Omega}_s=\{\boldsymbol{x}\mid g(\boldsymbol{x})>0\}$时,$g(\boldsymbol{x})=0$ 是保证大坝安全的最低要求,于是取最低临界回馈值 $c_r=0$,则大坝安全的稳健度函数$\hat{a}$ 为

$$\hat{a}=\max\left\{\alpha \mid \min_{\boldsymbol{x}\in U_E(\alpha,\bar{x},\theta)} g(\boldsymbol{x}) \geqslant 0\right\} \tag{10}$$

$\hat{a}$ 值越大表示大坝服役功能性态越可靠。

当因子非概率 Info-gap 模型 $U_E(\alpha,\bar{x},\theta)$的中心点位于失效域 $\boldsymbol{\Omega}_f=\{\boldsymbol{x}\mid g(\boldsymbol{x})<0\}$时,大坝服役可靠性较低,只能期望尽量处于安全状态。此处取期望回馈值 $c_o=0$,则大坝安全的机会度函数 $\hat{b}$ 为

$$\hat{b}=\min\left\{\alpha \mid \max_{\boldsymbol{x}\in U_E(\alpha,\bar{x},\theta)} g(\boldsymbol{x}) \geqslant 0\right\} \tag{11}$$

$\hat{b}$ 值越大则表示大坝服役功能可靠性越低。

融合上述稳健度函数和机会度函数的定义,初步构建如下大坝服役非概率可靠度 $\boldsymbol{\eta}$:

$$\boldsymbol{\eta}=\operatorname{sgn}[g(\bar{\boldsymbol{x}})]\max\left\{\alpha \mid \min_{\boldsymbol{x}\in U_E(\alpha,\bar{x},\theta)} \left\{\operatorname{sgn}[g(\bar{\boldsymbol{x}})]g(\boldsymbol{x})\right\} \geqslant 0\right\} \tag{12}$$

其中 $$\operatorname{sgn}(t)=\begin{cases}1 & t>0\\ -1 & t\leqslant 0\end{cases}$$

由式(12)可知,非概率可靠度 $\boldsymbol{\eta}$ 反映的是大坝非概率影响因子的扩展超椭球空间中,以不确定性水平参数 α 度量的模型中心点 $\bar{\boldsymbol{x}}$ 到极限状态面 $g(\boldsymbol{x})=0$的最近距离。现将原非概率影响因子超椭球 Info-gap 模型 $U_E(\alpha,\bar{x},\theta)$标准化为单位超球扩展空间 $U_B(\alpha,0,1)$,由式(12)的定义并结合 $\boldsymbol{\eta}$ 的几何含义,大坝服役非概率可靠度 $\boldsymbol{\eta}$ 又可转化为如下的形式:

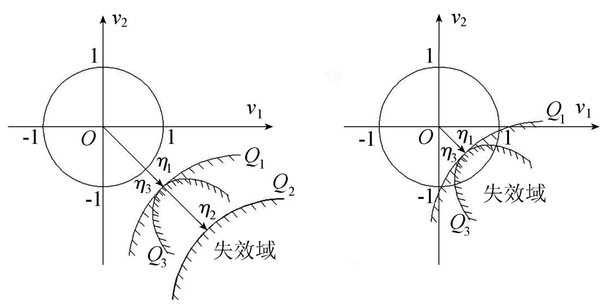
$$\boldsymbol{\eta}=\operatorname{sgn}[g'(0)]\min\{\alpha=\sqrt{\boldsymbol{v}^T\boldsymbol{v}}\mid \boldsymbol{v}\in U_B(\alpha,0,1)\}$$
$$\text{s.t. } g'(\boldsymbol{v})=g(\boldsymbol{x})=0 \tag{13}$$

式中:$\boldsymbol{v}$ 为非概率影响因子 $\boldsymbol{x}$ 标准化后的单位超球空间向量;$g'(\boldsymbol{v})$为非概率影响因子单位超球扩展空间 $U_B(\alpha,0,1)$中的大坝极限状态方程。

由式(13)可知,非概率可靠度 $\boldsymbol{\eta}$ 在几何上又可表征为标准化单位超球扩展空间中从原点到极限状态面的最短距离。当 $\boldsymbol{\eta}>1$ 时,大坝非概率影响因子实际确定的基本超椭球 Info-gap 空间 $U_E(1,\bar{\boldsymbol{x}},\theta)$与失效域 $\boldsymbol{\Omega}_f$ 相互分离,即对 $\forall \boldsymbol{x}\in U_E(1,\bar{\boldsymbol{x}},\theta)$,有 $g(\boldsymbol{x})>0$,表示大坝处于安全状态;当 $\boldsymbol{\eta}<-1$ 时,$U_E(1,\bar{\boldsymbol{x}},\theta)$被 $\boldsymbol{\Omega}_f$ 完全覆盖,有 $g(\boldsymbol{x})<0$,表示大坝处于失效状态;当$-1\leqslant\boldsymbol{\eta}\leqslant 1$ 时,$U_E(1,\bar{\boldsymbol{x}},\theta)$与 $\boldsymbol{\Omega}_f$ 发生交叉干涉,$g(\boldsymbol{x})>0$ 和 $g(\boldsymbol{x})<0$ 均有可能,大坝可能处于可靠状态,也可能处于失效状态。

然而上述大坝服役非概率可靠度 $\boldsymbol{\eta}$ 某种程度上有一定片面性,下面以二维标准化空间为例来说明。如图 2(a)所示,极限状态曲面 Q_2 对应的非概率可靠度 $\boldsymbol{\eta}_2$ 大于极限状态曲面 Q_1 的 $\boldsymbol{\eta}_1$,表明 Q_2 的可靠性大于 Q_1,其真实地反映了大坝影响因子基本超球 Info-gap 模型圆域距离失效域的远近,即当基本模型圆域与失效域互相分离时,$\boldsymbol{\eta}$ 能较好地反映并比较不同极限状态曲面对应的大坝服役非概率可靠性程度。如果不同极限状态曲面上的最有可能失效点重合,也即它们到原点的距离相等,那么不同极限状态曲面对应的 $\boldsymbol{\eta}$ 相等,正如图 2(a)中所示 Q_1 的 $\boldsymbol{\eta}_1$ 与 Q_3 的 $\boldsymbol{\eta}_3$ 相等。而当模型圆域与失效域互相交叉发生干涉时,如图 2(b)所示,虽然 Q_1 的 $\boldsymbol{\eta}_1$ 与 Q_3 的 $\boldsymbol{\eta}_3$ 相同,但 Q_1 和 Q_3 对应的失效域与圆域交叉干涉的面积不同,这说明 $\boldsymbol{\eta}$ 已不能充分反映并比较不同极限状态曲面对应的大坝服役非概率可靠性程度。

实质上,$\boldsymbol{\eta}$ 的扩展几何含义只捕捉到了极限状态曲面上最可能失效点这一点的信息,这对于模型域与失效域相互分离时度量大坝服役功能的绝对安全程度是较合理的,相应物理含义较明确;但当基本模型域与失效域发生干涉时,大坝服役功能已不能保证处于绝对安全状态,只考虑最可能失效点这一点的信息达不到要求,此时 $\boldsymbol{\eta}$ 已无区分明确的物理含义,而应该充分利用干涉域的信息对大坝服役非概率可靠性程度重新进行合理地度量。



(a) $\eta>1$　　(b) $-1\leqslant\eta\leqslant1$

图 2　非概率可靠度 η 的平面几何含义

为弥补上述缺陷,当$-1\leqslant\boldsymbol{\eta}\leqslant 1$ 时,即两域干涉时,定义如下基于体积比的非概率可靠度 R:

$$R=\frac{V_{\text{safe}}\{g(\boldsymbol{x})>0,\boldsymbol{x}\in U_E(1,\bar{\boldsymbol{x}},\theta)\}}{V_{\text{all}}\{\boldsymbol{x}\in U_E(1,\bar{\boldsymbol{x}},\theta)\}} \tag{14}$$

式中:V_{safe}为因子基本 Info-gap 模型 $U_E(1,\bar{\boldsymbol{x}},\theta)$的安全域超体积;$V_{\text{all}}$为模型 $U_E(1,\bar{\boldsymbol{x}},\theta)$的区域总体积。

综上分析,可将两种非概率度量指标相结合,同时考虑到 $\boldsymbol{\eta}<-1$ 时可靠度在实数域内的连续性,提出如下大坝服役非概率可靠度 $\boldsymbol{\kappa}$:

$$\kappa=\begin{cases}\eta=\mathrm{sgn}[g(\bar{\boldsymbol{x}})]\max\left\{\alpha \,\middle|\, \min\limits_{\boldsymbol{x}\in U_{\mathrm{E}}(\alpha,\bar{\boldsymbol{x}},\theta)}\{\mathrm{sgn}[g(\bar{\boldsymbol{x}})]g(\boldsymbol{x})\}\geqslant 0\right\} & \eta>1\\ \dfrac{V_{\mathrm{safe}}\{g(\boldsymbol{x})>0,\boldsymbol{x}\in U_{\mathrm{E}}(1,\bar{\boldsymbol{x}},\theta)\}}{V_{all}\{\boldsymbol{x}\in U_{\mathrm{E}}(1,\bar{\boldsymbol{x}},\theta)\}} & -1\leqslant\eta\leqslant 1\\ \mathrm{sgn}[g(\bar{\boldsymbol{x}})]\max\left\{\alpha \,\middle|\, \min\limits_{\boldsymbol{x}\in U_{\mathrm{E}}(\alpha,\bar{\boldsymbol{x}},\theta)}\{\mathrm{sgn}[g(\bar{\boldsymbol{x}})]g(\boldsymbol{x})\}\geqslant 0\right\}+1 & \eta<-1\end{cases}\tag{15}$$

$\kappa\in(-\infty,+\infty)$，$\kappa$ 越大表示大坝服役可靠性越高。当 $\kappa>1$ 时，大坝非概率影响因子实际确定的基本超椭球 Info-gap 空间 $U_{\mathrm{E}}(1,\bar{\boldsymbol{x}},\theta)$ 与失效域 $\boldsymbol{\Omega}_{\mathrm{f}}$ 相互分离，即对 $\forall\boldsymbol{x}\in U_{\mathrm{E}}(1,\bar{\boldsymbol{x}},\theta)$，有 $g(\boldsymbol{x})>0$，表示大坝服役功能是安全的；当 $\kappa<0$ 时，$U_{\mathrm{E}}(1,\bar{\boldsymbol{x}},\theta)$ 被 $\boldsymbol{\Omega}_{\mathrm{f}}$ 完全覆盖，$g(\boldsymbol{x})<0$，表示大坝处于失效状态；当 $0\leqslant\kappa\leqslant 1$ 时，$U_{\mathrm{E}}(1,\bar{\boldsymbol{x}},\theta)$ 与 $\boldsymbol{\Omega}_{\mathrm{f}}$ 发生交叉干涉，$g(\boldsymbol{x})>0$ 和 $g(\boldsymbol{x})<0$ 均有可能，大坝可能安全，也可能失效。上述构建的大坝服役非概率可靠性度量指标物理含义比较明确，是在因子统计数据较少的情况下，对大坝服役可靠性的一种更加合理的非概率度量。

2.2 大坝服役非概率可靠度的求解

大坝服役非概率可靠度 κ 是融合了基于 Info-gap 决策理论的非概率可靠度 η 和基于体积比的非概率可靠度 R 构建的，因此，其计算可归结为 η 的求解和 R 的求解两部分。

将原大坝非概率影响因子超椭球 Info-gap 空间 $U_{\mathrm{E}}(\alpha,\bar{\boldsymbol{x}},\theta)$ 标准化为单位超球扩展空间 $U_{\mathrm{B}}(\alpha,0,1)$，当采用多个超椭球 Info-gap 模型描述非概率影响因子时，大坝服役非概率可靠度 η 的几何定义式(13)又可写成如下的形式：

$$\eta=\mathrm{sign}[g'(0)]\min\left\{\max_{i=1,2,\cdots,k}\left(\alpha_i=\sqrt{\boldsymbol{v}_i^{\mathrm{T}}\boldsymbol{v}_i}\,\middle|\,\boldsymbol{v}_i\in U_B^i(\alpha_i,0,1)\right)\right\}$$

$$\text{s. t. } g'(\boldsymbol{v})=g(\boldsymbol{x})=0\tag{16}$$

若每个超球中只包含一个因子，式(16)中的 η 便退化为多个区间因子描述的区间非概率可靠度，而令 $k=1$ 时 η 可退化为单个超球模型描述时的非概率可靠度，则非概率可靠度 η 求解的极值问题可转化为标准化空间中原点到极限状态曲面最短距离的求解问题，即：

$$\eta=\mathrm{sgn}[g'(0)]\frac{1}{\sqrt{k}}\min\sqrt{\sum_{i=1}^{k}\alpha_i}$$

$$\text{s. t. } G(\boldsymbol{v})=\frac{1}{2}\left\{[g'(\boldsymbol{v})]^2+C\left[\sum_{i=1}^{k-1}(\alpha_i-\alpha_{i+1})^2+(\alpha_k-\alpha_1)^2\right]\right\}=0\tag{17}$$

式中：C 为权重系数；$G(\boldsymbol{v})$ 为重新构造的极限状态方程约束函数。

非概率可靠度 η 的求解类似于随机可靠度求解，只是两种求解的极限状态方程约束函数与迭代空间有所区别。在大坝服役功能函数非线性程度较高的情况下，采用传统的改进一次二阶矩法等容易出现迭代不收敛的问题，鉴于此，采用改进的有限步长迭代法(MLSA)来求解 η。MLSA 法是在有限步长迭代法[23]的基础上，通过对迭代步长进行一维优化搜索，以确保每一次迭代都采用最优步长，使收敛速度加快，同时减少了确定保证收敛的初始步长的试算次数，解决了功能函数非线性程度较高情况下难以确定初始步长以保证迭代收敛的难题[24]。Liu 等[25]进行步长一维搜索依据的非负评价函数是根据拉格朗日函数的两个极值条件构造得到的，但该方法并不一定能获得目标函数的极小值。而增广拉格朗日函数可以弥补该缺陷[26]，故可依此函数的极值条件构造新的评价函数 $m(v)$：

$$m(\boldsymbol{v})=\left\|\boldsymbol{v}-\frac{[\nabla G(\boldsymbol{v})]^{\mathrm{T}}\boldsymbol{v}\,\nabla G(\boldsymbol{v})}{\|\nabla G(\boldsymbol{v})\|^2}+r_1G(\boldsymbol{v})\,\nabla G(\boldsymbol{v})\right\|^2\tag{18}$$

式中：r_1 为罚系数；$\nabla G(\boldsymbol{v})$ 的表达式为

$$\nabla G(\boldsymbol{v})=g'(\boldsymbol{v})\,\nabla g'(\boldsymbol{v})+C\sum_{i=1}^{k-1}(\alpha_i-\alpha_{i+1})\left(\pm\frac{\partial\alpha_i}{\partial\boldsymbol{v}}\mp\frac{\partial\alpha_{i+1}}{\partial\boldsymbol{v}}\right)+C(\alpha_k-\alpha_1)\left(\pm\frac{\partial\alpha_k}{\partial\boldsymbol{v}}\mp\frac{\partial\alpha_1}{\partial\boldsymbol{v}}\right)\tag{19}$$

式(19)中正负号的选取由下式确定：

$$\pm\frac{\partial\alpha_i}{\partial\boldsymbol{v}}=\begin{cases}+\dfrac{\partial\alpha_i}{\partial\boldsymbol{v}} & \mathrm{sgn}\underset{\boldsymbol{v}_i=0,\boldsymbol{v}_j\neq 0,j\neq i}{[g'(\boldsymbol{v})]}>0\\ -\dfrac{\partial\alpha_i}{\partial\boldsymbol{v}} & \mathrm{sgn}\underset{\boldsymbol{v}_i=0,\boldsymbol{v}_j\neq 0,j\neq i}{[g'(\boldsymbol{v})]}<0\end{cases}\tag{20}$$

在标准化空间中，MLSA 法的迭代公式为：

$$\boldsymbol{a}_{l+1}=\frac{\boldsymbol{v}_l-\lambda_l\nabla G(\boldsymbol{v}_l)}{\|\boldsymbol{v}_l-\lambda_l\nabla G(\boldsymbol{v}_l)\|}\tag{21}$$

$$\boldsymbol{\eta}_{l+1}=-\frac{G(\boldsymbol{v}_l)-[\nabla G(\boldsymbol{v}_l)]^{\mathrm{T}}\boldsymbol{v}_l}{(\boldsymbol{a}_{l+1})^{\mathrm{T}}\nabla G(\boldsymbol{v}_l)}\tag{22}$$

$$\boldsymbol{v}_{l+1}=\boldsymbol{a}_{l+1}\boldsymbol{\eta}_l\tag{23}$$

式中：$\boldsymbol{a}$ 为梯度矢量；λ 为可调节步长；下标 l 为迭代步数。

当采用 MLSA 法求得 η 之后，若 $-1\leqslant\eta\leqslant 1$，则需求体积比非概率可靠度 R。但大坝不确定影响因子众多，其功能函数的变量空间维数必然较高，空间安全域的超体积计算比较困难。当大坝不确定影响

因子的波动范围用基本超椭球 Info-gap 模型($\alpha=1$)来描述时,因子在超椭球内任意一点取值的可能性是相同的,因此可将不确定因子视为服从超椭球内的均匀概率分布,于是便可采用 Monte-Carlo 法(MCS)求解 R。

若 $\eta<-1$,则令 $\kappa=\eta+1$。综合上述即可完成大坝服役非概率可靠度 κ 的求解。

3 大坝服役非概率目标可靠度拟定

由前面第 2 节分析可知,当大坝服役非概率可靠度 $\kappa>1$ 时,大坝某服役功能处于可靠状态,但 $\kappa>1$ 这一范围过于宽泛,而实际工程中一般需要具体的取值作为参考标准,即要确定一个兼具工程目标功能安全性和经济性的最小值,此处称该值为非概率目标可靠度 κ_{T},可作为对大坝服役非概率可靠性分析结果进行评估的标准。由于缺乏坝工非概率可靠性分析的实际工程统计资料,所以以此为基础拟定大坝服役的 κ_{T} 存在困难,而随机概率目标可靠度 β_{T} 可通过 GB50199—2013《水利水电工程结构可靠性设计统一标准》[27] 校准得到,若能获取 κ_{T} 和 β_{T} 的关系,便可以 β_{T} 为标准,初步拟定 κ_{T}。大坝某一服役功能在满足 $\kappa>1$ 的情况下,因此在推求 κ_{T} 和 β_{T} 的关系时,可以将式(15)中的 κ 退化为 Info-gap 决策理论非概率可靠度 η。下面先来推求大坝非概率可靠度 η 和随机概率可靠度 β 的关系。

考虑大坝某一服役功能函数 $g(\boldsymbol{x})$,假定影响因子均服从正态分布,其联合分布密度函数为

$$f(\boldsymbol{x})=(2\pi)^{-\frac{n}{2}}\,|\boldsymbol{C}|^{-1/2}\exp\left[-(\boldsymbol{x}-\boldsymbol{\mu})^{\mathrm{T}}\boldsymbol{C}^{-1}(\boldsymbol{x}-\boldsymbol{\mu})/2\right] \tag{24}$$

式中:$\boldsymbol{\mu}=(\mu_1,\mu_2,\cdots,\mu_n)^{\mathrm{T}}$ 为 $\boldsymbol{x}$ 的均值向量;$\boldsymbol{C}$ 为 $\boldsymbol{x}$ 的协方差矩阵。

采用超椭球 Info-gap 模型 $U_{\mathrm{E}}(\alpha,\bar{\boldsymbol{x}},\theta_x)$ 描述正态随机向量 $\boldsymbol{x}$ 的不确定性:

$$U_{\mathrm{E}}(\alpha,\bar{\boldsymbol{x}},\theta_x)=\{\boldsymbol{x}\,|\,(\boldsymbol{x}-\boldsymbol{\mu})^{\mathrm{T}}\boldsymbol{W}(\boldsymbol{x}-\boldsymbol{\mu})\leqslant(\theta_x\alpha)^2\}=\{\boldsymbol{x}\,|\,(\boldsymbol{x}-\boldsymbol{\mu})^{\mathrm{T}}\boldsymbol{C}^{-1}(\boldsymbol{x}-\boldsymbol{\mu})\leqslant(k\alpha)^2\}\quad \alpha\in\mathbf{R}_+ \tag{25}$$

式中 k 为非概率影响因子超椭球 Info-gap 模型的基本波动范围离差相比于标准差 σ_i 的倍数。

超椭球 Info-gap 模型 $U_{\mathrm{E}}(\alpha,\bar{\boldsymbol{x}},\theta_x)$ 下的大坝非概率可靠度 η 为

$$\eta=\mathrm{sign}(g(\bar{\boldsymbol{x}}))\max\left\{\alpha\,\middle|\,\min_{x\in U_{\mathrm{E}}(\alpha,\bar{x},\theta_x)}(\mathrm{sign}(g(\bar{\boldsymbol{x}}))g(\boldsymbol{x}))\geqslant0\right\} \tag{26}$$

根据前面分析过的 η 的几何含义,其求解可转化为下式的优化问题:

$$\eta=\mathrm{sign}(g(\bar{\boldsymbol{x}}))d\quad \mathrm{s.t.}\begin{cases}d=\min F(\boldsymbol{x})\\ g(\boldsymbol{x})=0\end{cases} \tag{27}$$

式中:$F(\boldsymbol{x})$ 为因子 Info-gap 模型 $U_{\mathrm{E}}(\alpha,\bar{\boldsymbol{x}},\theta_x)$ 空间中的任意点 $\boldsymbol{x}$ 到模型中心点 $\bar{\boldsymbol{x}}$ 以 α 度量的距离表达式,d 为 $F(\boldsymbol{x})$ 最小值,对于上述超椭球模型 $U_{\mathrm{E}}(\alpha,\bar{\boldsymbol{x}},\theta_x)$ 容易得到:

$$F(\boldsymbol{x})=[(\boldsymbol{x}-\boldsymbol{\mu})^{\mathrm{T}}\boldsymbol{C}^{-1}(\boldsymbol{x}-\boldsymbol{\mu})]^{1/2}/k \tag{28}$$

大坝某服役功能模式的随机可靠度 β 可定义为

$$\beta=\Phi^{-1}(P_{\mathrm{s}})=-\Phi^{-1}(P_{\mathrm{f}}) \tag{29}$$

$$P_{\mathrm{s}}=1-P_{\mathrm{f}}=1-P(Z<0)=1-\iint\limits_{Z<0}\cdots\int f(x_1,x_2,\cdots,x_n)\,\mathrm{d}x_1\mathrm{d}x_2\cdots\mathrm{d}x_n \tag{30}$$

式中:P_{s} 和 P_{f} 分别为大坝某服役功能模式的可靠和失效概率;$\Phi(\cdot)$ 为标准正态累积概率分布函数。

随机可靠度 β 的几何含义为不确定因子标准化正态空间中坐标原点到极限状态曲面的最短距离。具体计算时先将正态随机因子 $\boldsymbol{x}$ 转换成标准独立正态随机因子 $\boldsymbol{y}=\boldsymbol{T}(\boldsymbol{x}-\boldsymbol{\mu})$,其中:$\boldsymbol{T}=\boldsymbol{\Lambda}^{1/2}\boldsymbol{Q}$;$\boldsymbol{Q}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\Lambda}\boldsymbol{Q}=\boldsymbol{C}^{-1}$;$\boldsymbol{\Lambda}$ 为对角矩阵;$\boldsymbol{Q}$ 为正交矩阵。

由几何含义可得,β 可通过如下优化问题求解:

$$\beta=\min\|\boldsymbol{y}\|^2\qquad \mathrm{s.t.}\ g'(\boldsymbol{y})=0 \tag{31}$$

同样通过标准化变换,当 $\eta>1$ 时,式(27)中大坝非概率可靠度 η 的求解可转化为

$$\eta=\min\{\|\boldsymbol{y}\|^2/k\}\qquad \mathrm{s.t.}\ g'(\boldsymbol{y})=0 \tag{32}$$

从两种可靠度转化后的定义式(31)和式(32)可以看出,两者结构形式相同,同时容易得到 $\eta=\beta/k$。于是,可以认为 κ_{T} 与 β_{T} 也存在如下的正比关系:

$$\kappa_{\mathrm{T}}=\beta_{\mathrm{T}}/k \tag{33}$$

在式(33)中,β_{T} 已由规范校准得到。如表 1 所示,水工结构破坏划分为两类,延性破坏是有预兆及非突发性的,属一类破坏;脆性破坏是无预兆及突发性的,属二类破坏。

表 1 不同结构安全级别的大坝随机目标可靠度

破坏类型	Ⅰ级	Ⅱ级	Ⅲ级
一类破坏	3.7	3.2	2.7
二类破坏	4.2	3.7	3.2

因此,拟定 κ_{T} 的关键在于 k 值的合理选取。依据概率论知识,取某一显著性水平 α,其对应 $P_\alpha=\alpha$ 的事件认为是不可能发生的小概率事件。工程中一般取 $\alpha=1\%\sim5\%$[28],通过查表易得到 α 相应的 k 值,再由表 1 中的 β_{T} 及式(33)便可得各显著性水平 α 下的非概率目标可靠度,计算结果如表 2 所示。

鉴于在分析非概率可靠度与随机可靠度的关系时,假定所有不确定因子均服从正态分布,导致可靠

性分析结果偏保守;同时考虑现场监测和试验技术的提升以及荷载预测分析方法准确性的提高等,所需信息的不确定性程度大大降低。在表2的基础上综合上述各种因素,初步拟定出表3非概率目标可靠度 κ_T 的建议值。

表2 不同显著性水平下的大坝非概率目标可靠度

置信水平/%	离差倍数	一类破坏			二类破坏		
		Ⅰ级	Ⅱ级	Ⅲ级	Ⅰ级	Ⅱ级	Ⅲ级
1	2.576	1.44	1.24	1.05	1.63	1.44	1.24
2	2.326	1.59	1.38	1.16	1.81	1.59	1.38
3	2.170	1.70	1.47	1.24	1.94	1.70	1.47
4	2.054	1.80	1.56	1.31	2.05	1.80	1.56
5	1.960	1.89	1.63	1.38	2.14	1.89	1.63

表3 不同结构安全级别的大坝非概率目标可靠度

破坏类型	Ⅰ级	Ⅱ级	Ⅲ级
一类破坏	1.3	1.2	1.1
二类破坏	1.4	1.3	1.2

4 工程实例

以某服役重力坝为例,应用提出的非概率方法对其进行结构服役可靠性分析,以验证非概率可靠性分析方法的有效性和适用性。

4.1 工程概况

某水电站工程属I等枢纽工程,主要挡水建筑物为重力坝,该大坝为1级水工建筑物。坝顶高程179.0 m,水库正常蓄水位173.0 m,设计洪水位为174.76 m(0.2%),校核洪水位为177.80 m(0.02%),下游水位基本稳定,属不完全调节水库。5号典型挡水坝段横剖面如图3所示,上游面垂直,下游面在高程168.0 m以上垂直,以下坝面坡度为1∶0.75,坝顶宽度7.0 m,坝底高程80.0 m,坝底宽度73.0 m,防渗帷幕距上游面水平距离为6 m,坝基面近似水平。

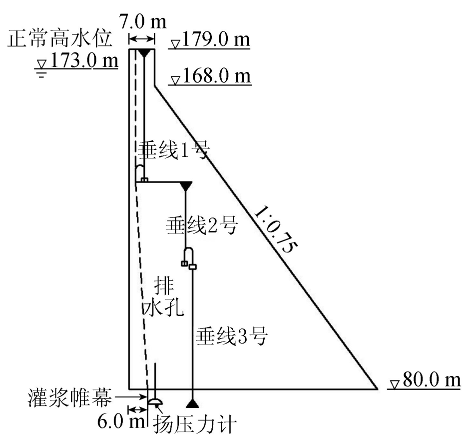


图3 某重力坝非溢流坝段典型剖面

对于该在役大坝,其外部几何尺寸均视为确定值,根据对该工程相关的设计、实测及试验等资料的收集整理,得到影响大坝结构服役可靠性的不确定因子基本变化范围如表4。

表4 不确定因子及其变化范围

变化范围	H_1/m	a	f'	c'/MPa	σ_t/MPa	σ_c/MPa	γ_c/(kN·m^{-3})
下限	81	0.28	0.7	0.4	1.1	10.5	23.5
上限	98	0.36	1.3	1.3	1.8	17.5	25.0

4.2 大坝结构服役功能模式分析

重力坝是按抗滑稳定和强度安全两个主要功能目标都满足要求来设计的,因此,重力坝结构服役可靠性分析时通常重点考虑其与这两个主要功能目标的联系。典型重力坝横剖面受力如图4所示,其中,H_1、H_2 分别为上下游水深;H_3 为坝前淤沙高度;W_1 为坝体自重;W_2、W_3、W_4 分别为作用在坝体的上游水重、下游水重和淤沙重力;P_1、P_2、P_3 分别为上下游静水压力和水平淤沙压力;P_u 为坝基扬压力。本节荷载作用均针对单宽坝体而言。

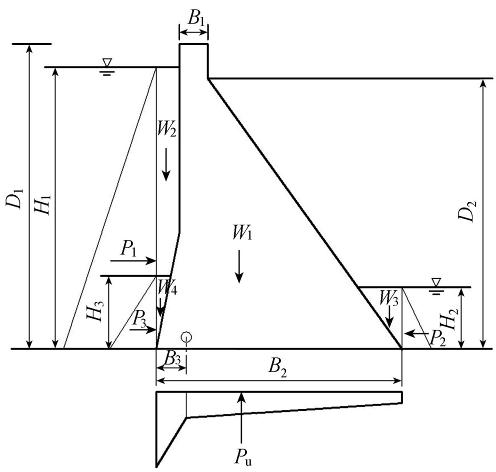


图4 重力坝横剖面受力示意图

由于重力坝的几何尺寸通常很大,尺寸变异可忽略不计,因此主要将上下游水深、扬压力系数 a、坝体混凝土容重 γ_c 及抗剪断强度参数等因子作为抗滑稳定可靠性分析的主要影响因子。而强度安全可靠性分析时,需考虑坝踵及坝趾的应力状态和材料抗拉及抗压强度之间的关系,故混凝土抗拉强度 σ_t 和抗压强度 σ_c 等因子也应作为强度安全可靠性分析的影响因子。参照重力坝设计规范分别建立重力坝沿坝基面滑动、坝踵抗拉、坝趾抗压3种主要结构功能模式的功能函数 Z_1、Z_2 和 Z_3:

$$Z_1 = g_1(H_1, H_2, H_3, \gamma_c, a, c', f') = c'A + f'\left(\sum W - P_u\right) - (P_1 + P_3 - P_2) \quad (34)$$

$$Z_2 = g_2(H_1, H_2, H_3, \gamma_c, \alpha, \sigma_t) = \sigma_t + \left(\sum W - P_u\right)/B + 6\sum W/B^2 \quad (35)$$

$$Z_3 = g_3(H_1, H_2, H_3, \gamma_c, \alpha, \sigma_c) = \sigma_c - \left(\sum W - P_u\right)/B + 6\sum W/B^2 \quad (36)$$

式中:c'为抗剪断凝聚力;f'为抗剪断摩擦系数;σ 为滑动面上的正应力;A 为滑动面面积; $\sum W$ 为坝基面以上的垂直作用的合力,以向下为正; $\sum M$ 为荷载对坝基面形心的力矩总和,逆时针为正;P_u 为作用于坝基面上的扬压力;B 为坝基厚度。

该重力坝 5 号典型坝段结构相对较复杂,其建基面岩石局部强风化,该坝段工作条件较其他坝段更加恶劣,因此选取 5 号典型坝段作为代表对该坝进行结构服役可靠性分析。将坝体几何尺寸及表 4 中的影响因子代入式(34)~(36),得到坝基抗滑、坝踵抗拉和坝趾抗压 3 种主要结构功能模式的功能函数:

$$Z_1=(3\,597\gamma_c-365aH_1-30H_1)f'+73\,000c'-5H_1^2 \tag{37}$$

$$Z_2=\sigma_t+99.6\gamma_c-9.18aH_1-1.58H_1-1.88\times10^{-3}H_1^3 \tag{38}$$

$$Z_3=\sigma_c+\gamma_c+0.82aH_1-0.76H_1-1.88\times10^{-3}H_1^3 \tag{39}$$

4.3 大坝非概率不确定影响因子的 Info-gap 模型

在该重力坝结构服役非概率可靠性分析中,可采用内切超椭球 Info-gap 模型来刻画上述非概率影响因子 $\boldsymbol{x}=(H_1,a,\gamma_c,f',c',\sigma_t,\sigma_c)^{\mathrm{T}}$,根据表 4 中的因子基本变化范围,可得模型因子中心点 $\bar{\boldsymbol{x}}=(\bar{H}_1,\bar{a},\bar{\gamma}_c,\bar{f'},\bar{c'},\bar{\sigma}_t,\bar{\sigma}_c)^{\mathrm{T}}=(89.5,0.32,24.25,1.0,0.85,1.45,14)^{\mathrm{T}}$,模型分散度参数 θ 和相应的对角矩阵为 $\boldsymbol{W}/\theta^2=\mathrm{Diag}(1/8.50^2,\ 1/0.04^2,\ 1/0.75^2,\ 1/0.30^2,\ 1/0.45^2,\ 1/0.35^2,\ 1/3.50^2)$,于是可得大坝非概率不确定影响因子的超椭球 Info-gap 模型:

$$\frac{(H_1-89.5)^2}{8.50^2}+\frac{(a-0.32)^2}{0.04^2}+\frac{(\gamma_c-24.25)^2}{0.75^2}+\frac{(f'-1.0)^2}{0.30^2}+\frac{(c'-0.85)^2}{0.45^2}+\frac{(\sigma_t-1.45)^2}{0.35^2}+\frac{(\sigma_c-14)^2}{3.50^2}\leqslant\alpha^2 \tag{40}$$

4.4 大坝结构服役非概率可靠性分析结果

根据上述非概率影响因子的超椭球 Info-gap 模型和功能函数式(37)(38)(39),采用 MLSA 法求解得到坝基抗滑、坝踵抗拉和坝趾抗压 3 种功能模式 Info-gap 决策理论非概率可靠度 $\eta_i(i=1,2,3)$。因目前大坝服役可靠性较高,3 种模式 η_i 均大于 1,所以暂时无须计算体积比非概率可靠度 R_i(均为 1),最后得到该坝 3 种功能模式的非概率可靠度 $\kappa_i(i=1,2,3)$,列于表 5 中。

表 5　重力坝各功能模式非概率可靠度

功能模式	η_i	R_i	κ_i
坝基抗滑	1.749	1	1.749
坝踵抗拉	2.459	1	2.459
坝趾抗压	2.581	1	2.581

从表 5 中可知,该重力坝坝基抗滑、坝踵抗拉和坝趾抗压 3 种功能模式的非概率可靠度 $\kappa_i(i=1,2,3)$分别为 1.749、2.459 和 2.581,根据文中非概率可靠度的物理含义可知,当 $\kappa_i>1$ 时,表示该坝结构各服役功能模式目前均处于可靠状态。

4.5 大坝服役非概率目标可靠度的合理性分析

已知该坝结构安全等级为一级,依据表 3 初步拟定的 κ_{T},该坝发生二类破坏的 κ_{T} 为 1.4,由 $\kappa_i>\kappa_{\mathrm{T}}$ 可知,该坝 3 种功能模式的非概率可靠性分析结果均达到了表 3 的要求,而且有一定裕度,说明本文确定的 κ_{T} 是符合实际的。值得注意的是,文中给出的只是非概率目标可靠度的初步建议值,随着服役时间的增加,需利用实际工程统计资料对该目标值进一步修正。

5 结　语

随着我国众多大坝工程 50 年设计基准期的临近,以及病险坝数量的日益增加,大坝服役可靠性分析已成为大坝风险管理领域的热点研究问题之一。本文针对影响大坝服役可靠性的不确定因子的非概率特性,提出了大坝服役非概率可靠性分析方法。

a. 为表征影响大坝服役可靠性的不确定因子的非概率特征,研究了非概率 Info-gap 理论,建立了大坝服役可靠性非概率影响因子的内切超椭球 Info-gap 模型,解决了传统随机概率模型不能在影响因子统计信息较少时适用的问题。

b. 研究了 Info-gap 决策理论和体积比非概率可靠性度量方法,通过内切超椭球 Info-gap 模型对影响因子非概率特征的刻画,提出了大坝服役非概率可靠性分析方法,探讨了所提非概率可靠度的求解技术。该方法构建的非概率可靠性度量指标物理含义明确,是对大坝服役可靠性的更加合理的非概率度量。

c. 应用提出的非概率方法分析了某大坝结构服役可靠性,各功能模式可靠性分析结果揭示了大坝当前处于可靠状态,说明了该方法的工程适用性,同时验证了本文拟定的大坝服役非概率目标可靠度的合理性。

d. 当不确定因子确为随机因子且统计信息足以确定其概型及数字特征时,采用随机方法分析大坝服役可靠性比较严谨;而非概率可靠性分析方法

并非是要取代随机概率方法,只是补充实现了影响因子统计信息较少时的服役可靠性分析,其目的是进一步完善大坝服役可靠性分析的体系。

参考文献:

[1] 贾金生. 中国大坝建设60年[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2013.

[2] 中华人民共和国国家统计局. 2014中国统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 201.

[3] 彭雪辉, 蔡跃波, 盛金保, 等. 中国水库大坝风险标准研究[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2015.

[4] 顾冲时, 苏怀智. 混凝土坝工程长效服役与风险评定研究述评[J]. 水利水电科技进展, 2015,35(5):1-12. (GU Chongshi, SU Huaizhi. Current status and prospects of long-term service and risk assessment of concrete dams [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2015,35 (5):1-12. (in Chinese))

[5] 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))

[6] DESMOND H, GREGORY B. Risk and uncertainty in dam safety[M]. London:Thomas Telfrod, Ltd., 2004.

[7] MCCANN M W, PAXSON G. Uncertainty in dam failure consequence estimates [C]//3rd European conference on flood risk management, Lyon: EDP Sciences,2016:1-8.

[8] 朱伯芳. 关于可靠度理论应用于混凝土坝设计的问题[J]. 土木工程学报, 1999, 32(4): 10-15. (ZHU Bofang. On the application of reliability theory to design of concrete dams [J]. China Civil Engineering Journal, 1999,32(4): 10-15. (in Chinese))

[9] BEN-HAIM Y. Convex models of uncertainty in applied mechanics[M]. Amsterdam: Elsevier, 1990.

[10] BEN-HAIM Y. A non-probabilistic measure of reliability of linear systems based on expansion of convex models [J]. Structural Safety, 1995,17(2):91-109.

[11] BEN-HAIM Y. Info-gap decision theory: decisions under severe uncertainty [M]. 2nd ed. London: Academic Press, 2006.

[12] 彭友文. 混凝土重力坝风险评价模型及预警指标研究[D]. 南京: 河海大学, 2008.

[13] 张勇, 赖国伟, 程睿, 等. 高拱坝的非概率可靠性分析[J]. 中国农村水利水电, 2008(5):62-65. (ZHANG Yong, LAI Guowei, ZHANG Diji, et al. Non-probabilistic reliability analysis of high arch dams [J]. China Rural Water and Hydropower, 2008(5):62-65. (in Chinese))

[14] 夏雨, 张仲卿, 赵小莲, 等. 基于非概率可靠度理论的拱坝安全度评价[J]. 水利水运工程学报, 2010(3): 79-83. (XIA Yu, ZHANG Zhongqing, ZHAO Xiaolian, et al. Safety analysis of arch dam based on non-probability theory [J]. Hydro-Science and Engineering, 2010(3): 79-83. (in Chinese))

[15] SU Huaizhi, LI Jinyou, WEN Zhiping, et al. Dynamic non-probabilistic reliability evaluation and service life prediction for arch dams considering time-varying effects [J]. Applied Mathematical Modelling, 2016, 40 (15/16):6908-6923.

[16] BEN-HAIM Y. Uncertainty, probability and information-gaps[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2004, 85(1/2/3):249-266.

[17] 亢战, 罗阳军. 桁架结构非概率可靠性拓扑优化[J]. 计算力学学报, 2008,25(5):589-594. (KANG Zhan, LUO Yangjun. Topology optimization of truss structures for non-probabilistic Reliability [J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2008, 25 (5): 589-594. (in Chinese))

[18] 刘成立, 吕震宙, 罗志清, 等. 一种通用的稳健可靠性指标[J]. 机械工程学报, 2011, 47 (10): 192-198. (LIU Chengli, LÜ Zhenzhou, LUO Zhiqing, et al. A general robust reliability index [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47 (10): 192-198. (in Chinese))

[19] 顾冲时. 碾压混凝土坝安全诊断与预警的理论和方法[M]. 南京: 河海大学出版社, 2013.

[20] Electric Power Research Institute. Uplift pressures, shear strengths, and tensile strengths for stability analysis of concrete gravity dams[R]. California: EPRI, 1992.

[21] 王梓坤. 概率论基础及其应用[M]. 北京: 北京师范大学出版社, 2007.

[22] BEN-HAIM Y. Design certification with information-gap uncertainty[J]. Structural Safety, 1999, 21 (3): 269-289.

[23] 赵国藩, 曹居易, 张宽权. 工程结构可靠度[M]. 北京: 科学出版社, 2011.

[24] 周凌. 可靠性算法与超空泡航行体结构屈曲可靠性研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学, 2010.

[25] LIU P L, KIUREGHIAN A D. Optimization algorithms for structural reliability[J]. Structural Safety, 1991,93(3): 161-177.

[26] SANTOS S R, MATIOLI L C, BECK A T. New optimization algorithms for structural reliability analysis [J]. CMES-Computer Modeling in Engineering & Sciences, 2012, 83(1):23-55.

[27] 中华人民共和国住房和城乡建设部,中华人民共和国国家质量监督检验检疫局. 水利水电工程结构可靠性设计统一标准:GB 50199—2013[S]. 北京:中国计划出版社,2013.

[28] 顾冲时, 吴中如. 大坝与坝基安全监控理论和方法及其应用[M]. 南京: 河海大学出版社, 2006.

(收稿日期:2018-05-04 编辑:郑孝宇)