

DOI:10.13476/j.cnki.nsbdkk.2021.0080

宋蕾,欧斌,刘中明,等.重力坝可靠性分析的 IPSO-Kriging 模型[J].南水北调与水利科技(中英文),2021,19(4):768-775.
SONG L,OU B,LIU Z M,et al. Reliability analysis of gravity dam based on IPSO-Kriging model[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology,2021,19(4):768-775. (in Chinese)

重力坝可靠性分析的 IPSO-Kriging 模型

宋蕾¹,欧斌²,刘中明¹,盛明强³

(1. 南昌工学院人居环境学院,南昌 330108; 2. 云南农业大学水利学院,昆明 650201;
3. 南昌大学建筑工程学院,南昌 330031)

摘要:针对传统概率可靠性分析方法在重力坝可靠性分析方面因结构自身性能不确定性及功能函数高度非线性等影响,其解析过程中收敛性差、精度低且耗时较长等问题,结合改进粒子群算法(particle swarm optimization, PSO)、Kriging 模型提出一种基于 IPSO-Kriging 模型的重力坝可靠性分析方法。借助 PSO 全局寻优能力强和鲁棒性强等优点,通过对算法本身加以变异操作、惯性权重和高斯加权等诸多方面进行重构(improved PSO, IPSO),依靠 IPSO 算法的群体搜索能力克服模式搜索法寻得参数 θ^* 易陷入局部最优值和对初始值较敏感的缺点,确保在任意初始值条件下都能获得极大似然条件下搜索到的最优参数 θ^* ,进而改善传统 PSO 收敛速度慢和早熟等问题。通过构建融合 IPSO 算法 IPSO-Kriging 数学模型,建立基于 IPSO-Kriging 模型的重力坝可靠性优化模型。经实例考证所建方法既能合理考量参数变异性,又能在提升精度基础上减少仿真计算次数以实现重力坝工程可靠性的高效计算。

关键词:重力坝;Kriging 模型;粒子群算法;结构可靠度;数值优化

中图分类号:TV1;TV135 文献标志码:A 开放科学(资源服务)标志码(OSID):



重力坝是我国高坝建设中的主要坝型之一,如何及时全局地把控重力坝实时服役可靠性,以保证其健康长效服役直接危及国计民生,乃至严重影响整个社会安定和生态环境^[1]。重力坝在静动荷载、恶劣环境和材料老化等多种因素协同作用下,其功能函数常表现为高度非线性,甚至难以用显式的数学模型给予刻画,这导致传统分析手段^[2-3]应用于重力坝工程可靠性过程中存在一定的局限性。如:JC 法因局限于线性或低非线性显式问题而难以适用;蒙特卡罗法(Monte Carlo method, MCM)虽能够结合有限元仿真技术而规避此制约,但大量仿真计算所产生的时间成本使其同样难以被直接广泛应用^[4]。

近些年,为突破结构功能函数的高度非线性和非显性等因素限制,在结构领域发展起来的代理模

型方法逐渐被国内外学者广泛研究和应用。在结构工程中,代理模型方法主要有响应面法(response surface methodology, RSM)^[5]、神经网络法、支持向量机(support vector machine, SVM)和 Kriging 模型等方法。代理模型方法其核心是基于有限的数值仿真计算成果,通过回归拟合得到一个解析函数,以此来近似代替复杂的功能函数。邱道宏等^[6]基于量子遗传算法-支持向量机提出了一种岩爆分类模型可靠性检查方法,结合实际工程表明所建方法在满足精度要求同时拥有较强的可操作性;刘扬等^[7]基于神经网络法发展了一种钢桁梁结构体系的可靠性优化模型,实现了钢桁梁结构体系可靠性的高效计算。RSM 法常采用不含交叉项二项式模型来近似拟合结构的功能函数,然其对高度非线性结构可靠度的计算精度不及其他代理模型^[5-8]。Kaymaz 等^[9]指出,

收稿日期:2020-07-09 修回日期:2020-09-10 网络出版时间:2020-10-29

网络出版地址:<https://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1430.TV.20201029.1109.002.html>

基金项目:江西省教育厅青年基金(GJJ1711105)

作者简介:宋蕾(1983—),女,江西南昌人,讲师,主要从事工程结构安全控制与管理研究。E-mail: songleincu@163.com

通信作者:欧斌(1983—),男,湖南岳阳人,讲师,博士,主要从事水利工程安全监测与评价研究。E-mail: oubin418@126.com

RSM 法计算量大,且对于高度非线性可靠性问题往往出现无法收敛和精度不足的情况。为此,Kriging 模型因较其他模型具有更优的预测能力和灵活性,而逐渐被广泛应用于结构可靠性分析^[10-11]。Gaspar 等^[12]指出,与多项式回归模型相比,Kriging 模型求解的失效概率更为准确。为更好满足重要工程精度的需求,对代理模型拟合精度的要求也随之提高,尤其是重力坝这样极为复杂的结构工程。因此,从 Kriging 模型基本原理入手探研一种合理的优化方案,使其拥有更高的拟合能力和鲁棒性,以实现复杂重力坝工程可靠度的高效计算。Kriging 模型构建关键在于对相关模型参数 θ 的确定,研究表明,参数 θ 对 Kriging 模型的拟合效果有着重要影响^[13]。考虑到传统 Kriging 模型中模式搜索法搜寻的最优参数 θ^* 全局寻优能力差和对初始值较敏感等缺陷^[14]。采用 PSO 算法并对算法本身实施变异操作、惯性权重和高斯加权等方法改进措施;在此基础上,基于改进的 PSO 算法优化 Kriging 模型以克服模式搜索法的缺陷,构建具有更强且稳定预测能力 IPSO-Kriging 模型;最后,在通过显式数值算例验证所建方法精度和效率前提下,结合实际工程运用 ABAQUS 仿真软件和 Matlab 平台研发相应的实施程序,以实现重力坝可靠度的高效计算。

1 基于改进 PSO-Kriging 算法的非线性数值模型

1.1 PSO 算法基本原理

Kriging 模型作为一种近似统计模型,对于任意输入变量 $x \in \mathbf{R}^n$ 与响应值 y 的关系为

$$y(x) = \sum_{i=1}^p \beta_i f_i(x) + z(x) = \mathbf{f}(x)^T \boldsymbol{\beta} + z(x) \quad (1)$$

式中: $\mathbf{f}(x)^T = [f_1(x), f_2(x), \dots, f_p(x)]$ 为回归模型; $\boldsymbol{\beta} = [\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_p]^T$ 为回归模型系数; $z(x)$ 为随机误差,其均值为 0、方差为 σ^2 。则 $z(w)$ 和 $z(x)$ 协方差

$$\text{cov}[z(w), z(x)] = \sigma^2 R(\theta; w, x) \quad (2)$$

式中: $R(\theta; w, x)$ 是以 θ 为参数的相关模型,其中 $(w, x \in \mathbf{R}^n)$ 。

在 Matlab 的 DACE 工具箱中提供了多个相关函数形式,Kaymay^[15]测试了线性、指数和高斯等 3 种函数对 Kriging 模型的影响,结果证明高斯函数更适用于非线性极限状态函数的问题。本文采用高斯函数形式,即

$$R(\theta; w, x) = \exp\left(-\sum_{k=1}^n \theta_k (w_k - x_k)^2\right) \quad (3)$$

假定随机抽样 m 个坐标点组成的 n 维样本点矩阵为 $\mathbf{S} = [s_1, s_2, \dots, s_m]^T$,其响应值矩阵为 $\mathbf{Y} =$

$[y_1, y_2, \dots, y_m]^T$ 。定义 $\mathbf{R} = (R_{ij})_{m \times m}$ 为 \mathbf{S} 中坐标点的相关矩阵,其中 $R_{ij} = R(\theta; s_i, s_j)$, $(i, j = 1, 2, \dots, m)$ 。根据响应值矩阵构造 m 维权系数向量 $\mathbf{C} = [c_1, c_2, \dots, c_m]^T$,采用线性加权叠加方式来预测待测点 x 的响应值,预测模型可描述为

$$\hat{y}(x) = \mathbf{C}^T \mathbf{Y} \quad (4)$$

若需获取更为准确的预测值 $\hat{y}(x)$,则需预测期望方差最小,即

$$\min_{\theta} \Psi(\theta) = |\mathbf{R}(\theta; \mathbf{S})|^{1/m} \sigma^2 \quad (5)$$

由上式可知,Kriging 模型的建立可转化为对相关系数最优解 θ^* 的优化问题。

1.2 PSO 算法的改进

PSO 算法作为数值分析的先进算法之一,具有全局收敛速度较快、参数较少和易实现等优点,广泛应用于非线性和离散化实际工程优化问题^[16-18]。在 PSO 算法中,将 m 个优化问题的最优解想象成 n 维搜索空间上的 m 个粒子,每个粒子都有一个适应度值 F_i 和速度 \mathbf{V}_i ,速度 \mathbf{V}_i 决定了粒子每次迭代中移动方向和距离,每个粒子根据其个体极值 \mathbf{P}_i 和全局极值 \mathbf{P}_g 结合下式更新粒子的位置和速度

$$\begin{cases} \mathbf{V}_{t+1,i} = w\mathbf{V}_{t,i} + c_1 S_1 (\mathbf{P}_{t,i} - \mathbf{X}_{t,i}) + \\ \quad c_2 S_2 (\mathbf{P}_{t,g} - \mathbf{X}_{t,i}) \\ \mathbf{X}_{t+1,i} = \mathbf{X}_{t,i} + \mathbf{V}_{t+1,i} \end{cases} \quad (6)$$

式中: $\mathbf{V}_i = [V_{i1}, V_{i2}, \dots, V_{in}]^T$ 为粒子的速度; w 为惯性权重; $\mathbf{X}_i = [x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{in}]^T$ 为粒子的位置; c_1 和 c_2 为学习因子,均取 2; S_1 和 S_2 是 $(0, 1)$ 的随机数; t 为当前迭代次数。各粒子追随当前最优粒子不断地在全局搜索空间中搜索相关系数 θ 最优解 θ^* 。

考虑到 PSO 算法存在后期收敛速度慢和早熟等不足之处,对 PSO 算法从以下 3 个方面加以改进,以提高算法自身的收敛性和搜索精度。

(1) 考虑到粒子在搜索后期易陷入局部最优的缺陷。借鉴遗传算法的变异操作引入 PSO 算法以改善粒子搜索能力,并通过识别粒子的适应度值作为判断标准来提高收敛效率。其变异操作采用下式

$$\text{If } (S_i < C_v) \text{ then } v_{id} = S_2 \times S_3 \times V_{\max} \quad (7)$$

式中: C_v 取值为 0.9; $S_i (i \in M)$, M 为适应度较差的粒子数; S_2 和 S_3 为 $(0, 1)$ 的随机数,当 $S_3 \leq 0.5$ 时取值为 1,否则取值为 -1。

(2) 惯性权重 w 对粒子速度的更新影响巨大,在搜索初期选用较大的惯性权重有利于全局搜索,搜索后期选用较小的惯性权重有利于局部搜索,从

而平衡粒子全局搜索和局部搜索性能^[19-20]。为此,引入平均聚焦距离 D_{mean} 和最大聚焦距离 D_{max} 的概念,即

$$D_{\text{mean}} = \frac{\sum_{i=1}^m \sqrt{\sum_{d=1}^n (P_{id} - P_{gd})^2}}{m} \quad (8)$$

$$D_{\text{max}} = \max_{i=1,2,\dots,m} \left(\sqrt{\sum_{d=1}^n (P_{id} - P_{gd})^2} \right) \quad (9)$$

式中:各参数定义同式(6)。则可定义粒子当前的聚焦变化率为

$$\lambda = \frac{D_{\text{max}} - D_{\text{mean}}}{D_{\text{max}}} \quad (10)$$

研究^[21]表明:惯性权重随聚焦距离变化率 λ 呈凸趋势变化时粒子收敛性效果最佳,通过下式来调整惯性权重,即

$$w = \begin{cases} \ln(a - \lambda) + b & \lambda \geq 0.05 \\ 0.75 + S/4 & \lambda < 0.05 \end{cases} \quad (11)$$

式中: $a=1.2, b=0.6$; S 是(0,1)的随机数。

(3)针对 PSO 算法早熟的问题,采用高斯加权后的全局极值以增强粒子搜索后期的收敛能力,其高斯加权的均值和方差分别取适应度函数的平均值和方差,即

$$E[F(\mathbf{X}_i)] = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m F(\mathbf{X}_i) \quad (12)$$

$$\sigma^2 = \frac{1}{m-1} (F(\mathbf{X}_i) - E[F(\mathbf{X}_i)])^2 \quad (13)$$

式中: $E[F(\mathbf{X}_i)]$ 和 σ^2 分别为所有粒子的适应度函数的平均值和方差。将所有粒子当前的最小适应度值 F_{min} 作为高斯加权的中心,则高斯加权的全局因子 $\Delta(\mathbf{X}_i)$ 为

$$\Delta(\mathbf{X}_i) = \frac{\exp(-F(\mathbf{X}_i) - F_{\text{min}})^2}{2\sigma^2} \quad (14)$$

将所有粒子的个体极值 \mathbf{P}_i 和 $\Delta(\mathbf{X}_i)$ 进行加权平均可得到种群的全局极值,即

$$\mathbf{P}_g = \frac{\sum_{i=1}^m (\mathbf{P}_i \times \Delta(\mathbf{X}_i))}{\sum_{i=1}^m \Delta(\mathbf{X}_i)} \quad (15)$$

1.3 融合 IPSO 算法的 Kriging 优化模型及实施流程

通过上述对传统 PSO 算法改进的基础上,可有效改善 PSO 算法易陷入局部最优、收敛速度慢和早熟等问题,还可保证更好的收敛性和精度;进而亦能帮助优化 Kriging 模型快速地解析建构的目标功能函数。

考虑到模式搜索法寻得参数 θ^* 易困于局部最优值和对初始值较敏感等缺点,融合 IPSO 算法替换原有模式搜索法优化 Kriging 模型。首先,在 Matlab 平台中通过导入相应参数信息,调用 DACE(de-

sign and analysis of computer experience)工具箱输入 [dmedel,perf]=dacefit(\mathbf{S}, \mathbf{Y} , regr, corr, theat₀, lob, upb)命令,便可完成初始 Kriging 模型的建立。首先,theat₀、lob 和 upb 分别为相关参数 θ 的初始值及上、下界限;其次,基于编写的 IPSO 算法,直接调出 dacefit 函数实施 IPSO 算法替换模式搜索法的程序编写,从而得到新建函数 IPSOdacefit;最后,基于原导入参数信息调用新建函数 [dmedel,perf]=IPSOdacefit(\mathbf{S}, \mathbf{Y} , regr, corr)来建立 IPSO-Kriging 模型。所建新模型无需输入初始值 θ_0 ,有效规避了 θ_0 选值对最优参数 θ^* 的影响,可在极大似然条件下高效搜索到最优参数 θ^* ,使得 IPSO-Kriging 模型具有更强拟合和预测能力。

2 基于 IPSO-Kriging 模型的重力坝可靠指标计算

2.1 重力坝单元可靠指标计算模型

重点针对重力坝单元强度破坏和抗滑稳定性两个方面进行可靠性分析。

(1)考虑重力坝单元强度的破坏,由于重力坝受力状态极为复杂,根据单元的第一主应力 σ_1 、第二主应力 σ_2 和第三主应力 σ_3 ,在三维状态下重力坝单元强度破坏的响应值函数为

$$\begin{cases} g(x) = \sigma_1 - \frac{(\sigma_2 + \sigma_3)\alpha}{2} - f_t, \sigma_2 \leq \frac{\sigma_1 + \alpha\sigma_3}{1 + \alpha} \\ g(x) = \frac{(\sigma_1 + \sigma_2)}{2} - \alpha\sigma_3 - f_t, \sigma_2 > \frac{\sigma_1 + \alpha\sigma_3}{1 + \alpha} \end{cases} \quad (16)$$

式中: $g(x)$ 为重力坝单元强度的功能函数(响应值); $\alpha = f_t/f_c$, α 为无量纲系数, f_t 和 f_c 为重力坝单元的抗拉强度和抗压强度。

(2)考虑重力坝抗滑稳定性,其失稳破坏的响应值函数可表示为

$$g(x) = \sum_{i=1}^k (-f \cdot \sigma_{yi} + c - \tau_{xyi}) b_i \quad (17)$$

式中: k 为滑移面上单元总数; f 和 c 分别为材料的摩擦系数和黏聚力; σ_{yi} 和 τ_{xyi} 分别为单元 i 的正应力和剪应力; b_i 为单元 i 沿滑动面的边长。

2.2 重力坝单元可靠指标优化计算

针对上述构建的混凝土重力坝单元可靠指标计算模型,需根据参数的变异信息抽样获取 m 组参数样本点,结合重力坝实际情况建立其结构有限元模型,对 m 组参数样本点进行仿真计算来获取其对应响应值,依此选取所建 IPSO-Kriging 模型进行其功能目标函数的构建及解析。可靠指标 β 指的是在标准正态坐标系中原点 O 到极限状态曲面最短的距

离,其线性和非线性曲线下 β 几何含义见图 1。

因此,可靠指标 β 的约束优化模型可表示为

$$\begin{cases} \text{find} & u^* \\ \min_{x^*} & \beta = \sqrt{\sum_{i=1}^n u_i^2} \\ \text{st.} & g(x^*) = g(F^{-1}(\Phi(u^*))) = \epsilon \end{cases} \quad (18)$$

式中: $g(x) = 0$ 为极限状态方程; x^* 为原概率分布坐标空间设计验算点; u^* 为标准正态空间设计验算点; $F^{-1}(x)$ 为随机变量 x 的累积分布函数 $F(x)$ 的

逆函数; $\Phi(x)$ 为标准正态分布函数; ϵ 为收敛允许误差值,取 0.001。

考虑到 Kriging 模型为半参数化插值模型,并不给出具体表达式^[22]。式(16)可通过 DACE 工具箱中 predictor 函数来实现所建 IPSO-Kriging 模型的转换输出,式(18)便转化为 x^* 的优化求解问题。为此,基于 IPSO-Kriging 模型的重力坝可靠指标计算流程见图 2,虚线框内为 IPSO 算法改进及 IPSO-Kriging 模型建立过程。

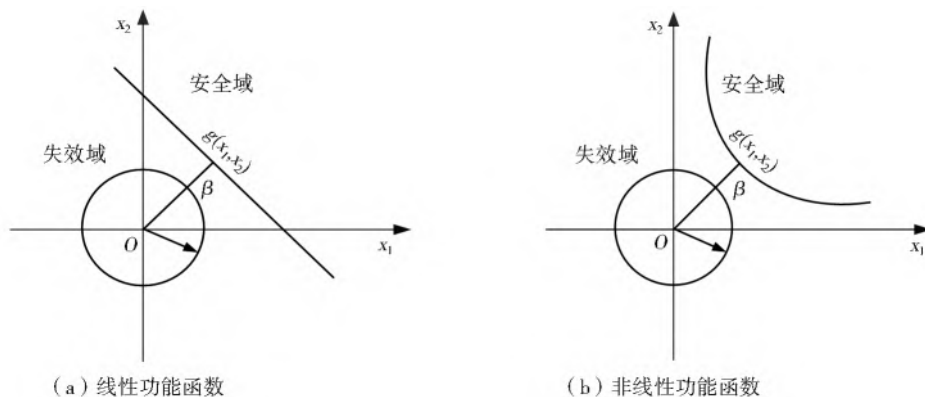


图 1 在线性和非线性下 β 几何定义

Fig. 1 Geometric definition of β under linear and nonlinear conditions

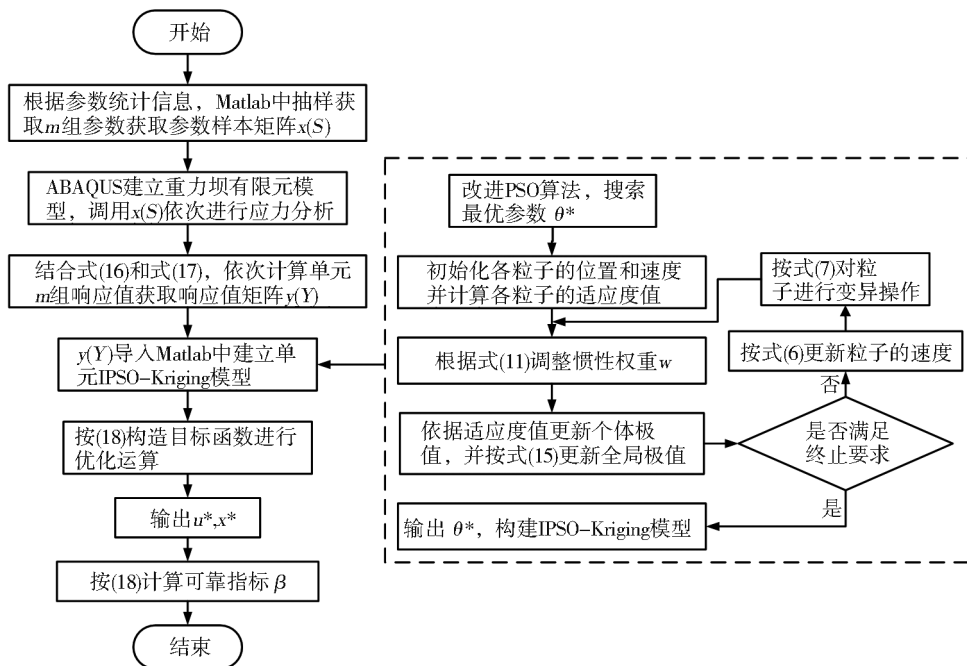


图 2 可靠指标计算流程

Fig. 2 Flow chart of reliability calculation

3 实例考证

3.1 工程基本资料

某混凝土坝是以发电为主的 1 级重力坝,从左岸至右岸分别为 1~6 号坝段。根据工程地质勘测资料,该重力坝工程所处基岩致密坚硬且无明显的潜在深层裂缝断层,因此不考虑大坝沿坝基深层滑

面滑动失稳失效模式。选用 5 号坝段作为研究对象,采用本文所提方法剖析该坝段单元强度及沿坝基面抗滑稳定可靠性。该坝段全长 64.0 m,坝顶高程 179.0 m,最大坝高 101.0 m,最小坝高 44.5 m,大坝上游正常蓄水位 173.0 m。该坝段设有 1 个泄水底孔,底槛高程 115.4 m,采用弧形闸门挡水。根据该坝段具体情况,建模从坝踵向上游取 1.5 倍最

大坝高,坝址向下游取 1 倍最小坝高,坝基深度取 78 m。结合有限元 ABAQUS 构建 5 号坝段三维建模模型见图 3,其中该模型共划分 28 883 个单元和 31 851 个节点。

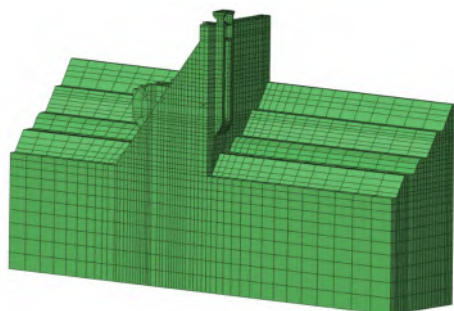


图 3 5 号坝段网格划分

Fig. 3 Modeling dimensions and mesh map of 5 # dam

3.2 计算参数确定

重力坝考虑的荷载组合为:校核洪水位、相应下游水位、坝体自重和渗透压力。结合大坝的试验数据、设计资料及原型监测资料,考虑坝体和坝基的物理力学参数变异性对重力坝结构性能的影响程度,将影响较小的参数视为定值见表 1,影响较大的参数视为不确定变量见表 2。

表 1 确定性参数统计

Tab. 1 Deterministic parameters statistics

基岩		扬压力系数 α	上游水深 H/m	坝体	
密度 $\rho_r / (kg \cdot m^{-3})$	泊松比 μ_r			密度 $\rho_r / (kg \cdot m^{-3})$	泊松比 μ_r
2 580	0.202	0.30	67.8	2 400	0.167

表 2 不确定性参数统计

Tab. 2 Non-deterministic parameters statistics

随机变量	分布类型	均值	变异系数
混凝土抗拉强度 f_t/MPa	正态	1.50	0.10
混凝土抗压强度 f_c/MPa	正态	16.50	0.10
坝体滑移面摩擦系数 f	对数	1.02	0.15
坝体滑移面凝聚力 c/MPa	正态	1.14	0.20
坝体弹模 E_c/GPa	正态	28.20	0.10
基岩弹模 E_r/GPa	正态	18.60	0.10
岩基滑移面摩擦系数 f'	对数	0.71	0.15
岩基滑移面凝聚力 c'/MPa	正态	0.82	0.20

3.3 重力坝可靠指标的计算

为有效地分析重力坝的可靠性,其参数样本点的合理选取至关重要。首先,采用中心复合设计方法依托材料参数的统计信息抽样获取了 40 组参数样本点;其次,利用 ABAQUS 软件调用 Matlab 平台将 40 组参数样本点依次执行仿真模拟,并提取坝体所

有单元应力值导入 Matlab,结合式(16)和式(17)判断计算获取其对应的响应值;最后,执行相应的程序构建 5 号坝段单元强度和抗滑稳定的 IPOS-Kriging 模型,结合式(18)优化计算单元强度破坏和抗滑稳定可靠指标 β 。为直观反映重力坝可靠指标情况,图 4 给出了单元强度破坏可靠指标 $\beta_{单}$ 的分布云图。

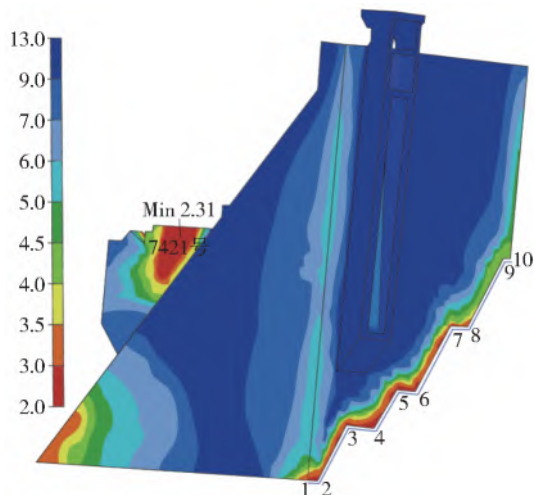


图 4 坝体单元可靠指标分布云图

Fig. 4 Reliability index of dam elements

根据规范要求,对于大(I)型水利枢纽可靠指标应大于目标可靠指标 $\beta_T = 4.2$,方可认为其结构处于安全状态。由图 4 可知:在坝体的坝踵和坝趾附近出现了不少单元 $\beta_{单}$ 小于目标可靠指标 β_T ,相比坝趾单元,坝踵单元的可靠性更低;整体而言,高程越高,坝体单元可靠指标相对越大,失效破坏的可能性越小。在实际工程中,重力坝易在坝踵和坝趾位置处先行发生破坏,并向坝体或坝基内部发展形成一条贯通的破坏通道,进而威胁到大坝的整体安全。

另外,该坝段兼有泄洪功能,在坝体中部设有一个泄水孔,并采用弧形挡水闸门。由图 4 可看出,在大坝下游坝面闸门的牛腿处也出现了不少可靠指标 $\beta_{单}$ 小于 β_T 的单元,甚至部分单元 $\beta_{单}$ 相比坝踵和坝趾单元还低,其中,牛腿处的 7 421 号单元的可靠指标 $\beta_{单}$ 最小,为 2.31。究其原因,主要是上游水体充满整个泄水孔道,水荷载直接作用于弧形挡水闸门,并将推力直接传递给闸墩的牛腿构件,进而导致牛腿的部分单元产生集中拉应力,而又因混凝土主要为受压构件,加之未考虑混凝土的加筋影响,从而导致了牛腿构件的单元可靠指标 $\beta_{单}$ 整体偏小。为进一步分析该坝段抗滑稳定性,根据前述计算步骤结合式(18)计算 5 号坝段沿建基面抗滑稳定可靠指标 $\beta_{滑}$ 为 4.79 大于目标可靠指标 β_T ,表明该坝段抗滑稳定满足要求。

3.4 方法比对分析

通过混凝土重力坝可靠性分析可知,所建方法能较好地诠释该典型坝段关键部位强度和稳定最不利状况,并给出其相应可靠性指标。考虑到重力坝可靠性分析中功能函数为非线性程度较高的隐式函数的特点,为进一步考证本文方法的有效性与科学性,选用一显式非线性数值算例作为校验分析样本,

以验证所建方法与其他方法的优势与特点。该结构功能函数为高非线性凸函数,具体表达式为

$$g(x_1, x_2) = \exp(0.4x_1 + 7) - \exp(0.3x_2 + 5) - 200 = 0 \quad (19)$$

式中: x_1, x_2 相互独立且服从标准正态分布。

主要选取 4 种数值分析方法对上式功能函数进行解析并计算其可靠指标,计算结果见表 3。

表 3 不同方法计算结果
Tab. 3 The results of different methods

方法	总抽样点数/个	迭代次数/次	x_1^*	x_2^*	可靠指标 β	相对误差/%
MCS 法	106				2.685	0
JC 法	不收敛				NAN	
RSM 法	135	27	-2.566	1.049	2.772	3.24
Kriging 模型	120	4	-2.537	0.792	2.638	1.75
本文方法	60	2	-2.446	1.073	2.662	0.86

在算例中,介于 MCS 法特点可将其计算结果视为该函数真实结果参考值,并将其他方法同 MCS 法计算结果进行比对。从表 1 可看出:本文方法计算结果与 MCS 法最为接近,误差仅为 0.86%,且所需的抽样点数也是最少的,为 60 个。相对传统 Kriging 模型和 RSM 法,本文方法无论从精度还是效率方面都表现出更强的优势,尤其是 RSM 法抽样点数更多,精度反而更差,误差为 3.24%。这也与前述分析 RSM 法的劣势之处相符合。JC 法则无法适用于本高度非线性数值算例可靠指标的求解,出现了不收敛情形。由此可见,本文方法应用于功能函数为高度非线性可靠性分析问题时,既有更高的计算效率也节约计算成本,能更好地满足精度要求。

综上可知,以某实际重力坝工程为依托,考虑到重力坝功能函数高度非线性和非显性等特点,应用所构建的 IPSO-Kriging 模型和可靠指标优化计算方法实现了重力坝可靠指标的高效计算。在此基础上,结合显式数值算例同其他方法比对,在验证了本文方法可行性的同时,论证了本文方法在精度和效率方面表现更为突出。主要归功于所改进的 PSO 算法(IPSO)较强的寻优能力及 IPSO-Kriging 模型较强的拟合能力,在对非线性程度高的复杂结构工程可靠性分析问题上具有独特优势。

4 结 论

(1)通过对 PSO 算法实施变异操作、惯性权重和高斯加权等方法的改进,并将其引入 Kriging 模型中,提出了一种基于 IPSO 算法全局寻优能力优

化 Kriging 模型,可有效解决传统 Kriging 模型求解中局部最优及初始值选取难等问题。

(2)根据可靠指标几何定义和优化算法有机结合建立了可靠指标优化计算模型,提出了基于 IPSO-Kriging 模型的重力坝可靠指标优化设计方法,考虑结构参数的变异性对结构安全性的影响,此方法提高计算精度的同时,又可减少仿真次数节约计算成本开销。

(3)基于所建 IPSO-Kriging 模型优势及本文方法高效性,借鉴有限元仿真平台优势,构建了结构极限状态可靠度有限元模型,并研制相应实施程序,经实例考证本文方法较其他方法具有较高的计算精度和效率且表现良好的适应性和鲁棒性,本文方法为重力坝等水工结构的可靠性问题提供了一种有效地分析手段。

参考文献(References):

- [1] 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 C S, SU H Z. 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)) DOI: 10.3880/j.issn.1006-7647.2015.05.001.
- [2] LOW B K, TANG W H. Efficient spreadsheet algorithm for First-Order reliability method[J]. Journal of Engineering Mechanics, 2007, 133(12): 1378-1387. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9399(2007)133:12(1378).
- [3] 李育超,凌道盛,陈云敏,等. 蒙特卡洛法与有限元相结合分析边坡稳定性[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24

- (11); 1933-1941. (LI Y C, LING D S, CHEN Y M, et al. Slope stability analysis using Monte Carlo technique with FEM [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24 (11): 1933-1941. (in Chinese)) DOI: 10. 16285/j. rsm. 2004. s2. 014.
- [4] 胡冉, 李典庆, 周创兵, 等. 基于随机响应面法的结构可靠度分析[J]. 工程力学, 2010, 27(9): 192-200. (HU R, LI D Q, ZHOU C B, et al. Structural reliability analysis using stochastic response surface method[J]. Engineering Mechanics, 2010, 27(9): 192-200. (in Chinese))
- [5] 蒋水华, 祁小辉, 曹子君, 等. 基于随机响应面法的边坡系统可靠度分析[J]. 岩土力学, 2015, 36(3): 809-818. (JIANG S H, QI X H, CAO Z J, et al. System reliability analysis of slope with stochastic response surface method[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(3): 809-818. (in Chinese)) DOI: 10. 16285/j. rsm. 2015. 03. 027.
- [6] 邱道宏, 李术才, 张乐文, 等. 基于模型可靠性检查的 QGA-SVM 岩爆倾向性分类研究[J]. 应用基础与工程科学学报, 2015, 23(5): 981-991. (QIU D H, LI S C, ZHANG L W, et al. Research on QGA-SVM rock burst orientation classification based on model reliability examination[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2015, 23(5): 981-991. (in Chinese)) DOI: 10. 16058/j. issn. 1005-0930. 2015. 05. 012.
- [7] 刘扬, 鲁乃唯, 殷新锋. 基于体系可靠度的桁架梁结构优化设计[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2014, 45(10): 3629-3636. (LIU Y, LU N W, YIN X F. Structural optimization design of steel truss beam based on system reliability[J]. Journal of Central South University(Science and Technology), 2014, 45(10): 3629-3636. (in Chinese))
- [8] 蔡宁, 赵明华. 边坡稳定可靠度替代模型分析[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2014, 45(8): 2851-2856. (CAI N, ZHAO M H. Analysis of alternative model for slope stability reliability[J]. Journal of Central South University(Science and Technology), 2014, 45(8): 2851-2856. (in Chinese))
- [9] KAYMAZ I, MCMAHON C A. A response surface method based on weighted regression for structural reliability analysis[J]. Probabilistic Engineering Mechanics, 2005, 20(1): 11-17. DOI: 10. 1016/j. probengmech. 2004. 05. 005.
- [10] 苏永华, 罗正东, 张盼凤, 等. 基于 Kriging 的边坡稳定可靠度主动搜索法[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(10): 1863-1869. (SU Y H, LUO Z D, ZHANG P F, et al. Active searching algorithm for slope stability reliability based on Kriging model[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(10): 1863-1869. (in Chinese))
- [11] 韩忠华. Kriging 模型及代理优化算法研究进展[J]. 航空学报, 2016, 37(11): 3197-3225. (HAN Z H. Kriging surrogate model and its application to design optimization: A review of recent progress[J]. Acta Aeronautica ET-Astronautica Sinica, 2016, 37(11): 3197-3225. (in Chinese)) DOI: 10. 7527/s1000-6893. 2016. 0083.
- [12] GASPAR B, TEIXEIRA A P, SOARES C G. Assessment of the efficiency of Kriging surrogate models for structural reliability analysis[J]. Probabilistic Engineering Mechanics, 2014, 37(4): 24-34. DOI: 10. 1016/j. probengmech. 2014. 03. 011.
- [13] 刘瞻, 张建国, 王灿灿, 等. 基于优化 Kriging 模型和重要抽样法的结构可靠度混合算法[J]. 航空学报, 2013, 34(6): 1347-1355. (LIU Z, ZHANG J G, WANG C C, et al. Hybrid structure reliability method combining optimized Kriging model and importance sampling[J]. Acta Aeronautica ET Astronautica Sinica, 2013, 34(6): 1347-1355. (in Chinese)) DOI: 10. 7527/s1000-6893. 2013. 0235.
- [14] 郑恩让, 姜苏英. 基于改进粒子群优化算法的分数阶 PID 控制[J]. 控制工程, 2017(10): 116-121. (ZHENG E R, JIANG S Y. Fractional order PID control based on improved particle swarm optimization[J]. Control Engineering, 2017(10): 116-121. (in Chinese)) DOI: 10. 14107/j. cnki. kzgc. 150837.
- [15] KAYMAZ I. Application of Kriging method to structural reliability problems[J]. Structural Safety, 2005, 27(2): 133-151. DOI: 10. 1016/j. strusafe. 2004. 09. 001
- [16] 杨丽, 佟操, 陈闯, 等. 基于 Kriging 模型和遗传算法的齿轮修形减振优化[J]. 航空动力学报, 2017, 32(6): 1412-1418. (YANG L, TONG C, CHEN C, et al. Vibration reduction optimization of gear modification based on Kriging model and genetic algorithm[J]. Journal of Aerospace Power, 2017, 32(6): 1412-1418. (in Chinese)) DOI: 10. 13224/j. cnki. jasp. 2017. 06. 018.
- [17] GARG H. A hybrid PSO-GA algorithm for constrained optimization problems[J]. Applied Mathematics & Computation, 2016, 274(11): 292-305. DOI: 10. 1016/j. amc. 2015. 11. 001.
- [18] 柴宝仁, 谷文成, 韩金库. 基于混沌粒子群算法的 Ad Hoc 网络优化研究[J]. 北京理工大学学报, 2017, 37(4): 381-385. (CHAI B R, GU W C, HAN J K. Research on Ad Hoc network optimization based on chaotic particle swarm optimization[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2017, 37(4): 381-385. (in Chinese)) DOI: 10. 15918/j. tbit1001-0645. 2017. 04. 010.
- [19] NICKABADI A, EBADZADEH M M, SAFABAKHSH R. A novel particle swarm optimization algorithm with adaptive inertia weight[J]. Elsevier Science Publishers B. V., 2011, 11(4): 3658-3670. DOI: 10. 1016/j.

- asoc. 2011, 01. 037.
- [20] 姜凤利,张宇,王永刚.一种基于引导策略的自适应粒子群优化算法[J].计算机应用研究,2017,30(12):1-6. (JIANG F L, ZHANG Y, WANG Y G. Adaptive particle swarm optimization algorithm based on guiding strategy[J]. Application Research of Computers, 2017, 30(12): 1-6. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1001-3695. 2017. 12. 018.
- [21] LAN C M, LI H, PENG J Y, et al. A structural reliability-based sensitivity analysis method using particles swarm optimization: Relative convergence rate [J]. Journal of Zhejiang University-Science A (Applied Physics & Engineering), 2016, 17(12): 961-973. DOI: 10. 1631/jzus. A1500255.
- [22] 陈志英,任远,白广忱,等.粒子群优化的 Kriging 近似模型及其在可靠性分析中的应用[J].航空动力学报,2011,26(7):1522-1530. (CHEN Z Y, REN Y, BAI G C, et al. Particle swarm optimized Kriging approximate model and its application to reliability analysis[J]. Journal of Aerospace Power, 2011, 26(7): 1522-1530. (in Chinese)) DOI: 10. 13224/j. cnki. jasp. 2011. 07. 003.

Reliability analysis of gravity dam based on IPSO-Kriging model

SONG Lei¹, OU Bin², LIU Zhongming¹, SHENG Mingqiang³

(1. Institute of Human Settlements, Nanchang Institute of Science and Technology, Nanchang 330108, China;

2. College of Water Conservancy, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China;

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

Abstract: Aiming at the reliability analysis of gravity dams by traditional probabilistic reliability analysis methods, the analysis process has poor convergence, low accuracy, and long time consumption due to the influence of the structural performance uncertainty and the high nonlinearity of the function. Combined with improved particle swarm optimization (IPSO) and the Kriging model, a reliability analysis method of gravity dam based on the IPSO-Kriging model is proposed. The particle swarm optimization (PSO) algorithm is reconstructed employing mutation operation, inertial weight, and Gaussian weight, to improve the traditional PSO algorithm's slow convergence speed and early maturity. The IPSO and Kriging model are integrated to establish the reliability optimization model of gravity dam based on the IPSO-Kriging model.

Under the synergistic action of many factors, such as static and dynamic load, bad environment, and aging of materials, the functional function of a gravity dam is often highly nonlinear, which is difficult to be described by an explicit mathematical model. This leads to the limitation of the traditional analysis method in the process of gravity dam engineering reliability. To break through the constraints of highly nonlinear and non-dominant structural function, it is intended to explore a reasonable optimization scheme based on the basic principle of the Kriging model to make it have higher fitting ability and robustness, to achieve accurate and efficient calculation of reliability of complex gravity dam engineering.

Considering the traditional Kriging model, the pattern search method has poor global optimization ability and is sensitive to the initial value. The PSO algorithm is adopted and variation operation, inertial weight, and Gaussian weight are implemented to improve the algorithm. On this basis, the IPSO algorithm is used to optimize the Kriging model to overcome the defects of the pattern search method and build the IPSO-Kriging model with stronger and stable predictive ability. Finally, on the premise of explicit numerical examples to verify the accuracy and efficiency of the established method, the ABAQUS simulation software and Matlab implementation program are used in combination with the actual engineering to realize the efficient calculation of gravity dam reliability.

Based on the actual gravity dam engineering, considering the highly nonlinear and non-dominant characteristics of gravity dam function, the constructed IPSO-Kriging model and the reliability index optimization calculation method are applied to realize the efficient calculation of the reliability index of gravity dam. This is mainly attributed to the following unique advantages of the IPSO-Kriging model in reliability analysis of complex structural engineering with high nonlinear degree: (1) The variation operation, inertial weight, and Gaussian weight of PSO algorithm are improved and introduced into the Kriging model. An IPSO algorithm based optimization Kriging model is proposed, which could effectively solve the problems of the local optimal solution and difficult initial value selection in the traditional Kriging model. (2) The reliability index optimization calculation model is established based on the organic combination of reliability index definition and optimization algorithm, and the reliability index optimization design method of a gravity dam is proposed based on the IPSO-Kriging model. The method presented can improve the calculation accuracy and reduce the number of simulations to save the calculation cost. (3) Based on the advantages of the established IPSO-Kriging model and the high efficiency of the proposed method, the finite element model of structural limit state reliability is built with the help of the advantages of the finite element simulation platform, and the corresponding implementation program is developed. Compared with other methods, this method has higher calculation accuracy and efficiency, and good adaptability and robustness.

Key words: gravity dam; Kriging model; particle swarm optimization; structural reliability; numeric optimization