

河海大学学报(自然科学版)
Journal of Hohai University(Natural Sciences)
ISSN 1000-1980,CN 32-1117/TV

《河海大学学报(自然科学版)》网络首发论文

题目: 基于 XGBoost-PSO 的混凝土重力坝体型多目标优化设计
作者: 佟大威, 杨传会, 余佳, 王佳俊, 王星
网络首发日期: 2022-11-02
引用格式: 佟大威, 杨传会, 余佳, 王佳俊, 王星. 基于 XGBoost-PSO 的混凝土重力坝体型多目标优化设计[J/OL]. 河海大学学报(自然科学版),
<https://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1117.TV.20221101.1405.025.html>



网络首发: 在编辑部工作流程中,稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定,且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式(包括网络呈现版式)排版后的稿件,可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定;学术研究成果具有创新性、科学性和先进性,符合编辑部对刊文的录用要求,不存在学术不端行为及其他侵权行为;稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准,正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性,录用定稿一经发布,不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容,只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认: 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司签约,在《中国学术期刊(网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版,以单篇或整期出版形式,在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊(网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物(ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z),所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

基于 XGBoost-PSO 的混凝土重力坝体型多目标优化设计

佟大威, 杨传会, 余佳, 王佳俊, 王星

(天津大学水利工程仿真与安全国家重点实验室, 天津 300350)

摘要: 体型优化设计一直以来都是混凝土重力坝设计工作的一项重要内容。以往研究基于静力安全标准获取经济性最优断面, 但由于地震作用对结构存在巨大破坏力, 有必要考虑地震工况对于优化设计的影响以及结构安全可靠度, 因此本文综合经济、抗震安全进行了重力坝多目标优化设计方法研究。针对以往研究以截面尺寸作为单一设计变量, 缺乏考虑材料属性对于优化设计影响的不足, 构建了包含断面尺寸、材料属性的多变量体系; 基于重力坝优化问题复杂程度高、非线性多峰值的特点, 提出 XGBoost-PSO 算法对试验方案进行寻优分析, 使优化具备良好的准确度。以某重力坝为例, 首先, 构建综合经济、抗震安全指标的多因素评价体系; 其次, 采用 ABAQUS 软件对重力坝进行有限元静动力分析, 基于计算结果采用变权功效系数法进行量化评价; 最后, 采用 XGBoost-PSO 算法进行寻优得到最终优化方案。结果表明, 优化方案与初始方案相比, 在经济、抗震安全指标上都得到了明显改善。

关键词: 重力坝; 体型优化; 多目标; 变权原理; XGBoost-PSO 算法

中图分类号: TV33 **文献标志码:** A

Multi-objective shape optimization of concrete gravity dam based on XGBoost-PSO

TONG Dawei, YANG Chuanhui, YU Jia, WANG Jiajun, WANG Xing

(State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety, Tianjin University, Tianjin 300350, China)

Abstract: Shape optimization has always been a significant content in gravity dam design. Previous studies have been based on static safety standard to obtain the most economic section. However, due to the huge destructive force of earthquake on structures, it is necessary to consider the impact of earthquake conditions and structural safety reliability. Therefore, this paper studies the multi-objective optimization method of gravity dam based on economy and seismic safety. In view of previous research taking section parameters as the single variable and lack of considering the influence of material properties for project cost and seismic safety, this paper constructs a variable system including both section parameters and material properties. Base on the characteristics of high complexity, nonlinearity and multi-peaks of gravity dam optimization, XGBoost-PSO Algorithm is proposed to optimize the design scheme, so that the optimization has good accuracy. A gravity dam is taken as an example to conduct shape optimization. Firstly, the multi-factor evaluation system with comprehensive economy and safety indicators is put forward; secondly, based on the ABAQUS software to analyze the static and dynamic model of the gravity dam, and then the variable-weight efficiency coefficient method is used for quantitative evaluation based on the finite element calculation results; Finally, XGBoost-PSO Algorithm is used for optimum seeking to obtain the final optimization scheme. The results show that, the economy and seismic safety indexes of the optimization scheme have been significantly improved compared with the initial scheme.

Key words: gravity dam; shape optimization; multi-objective; variable weight principle; XGBoost-PSO Algorithm

体型优化设计是重力坝坝工设计的重要内容之一。如何选择一个既能满足安全、稳定要求又使工程量少的坝体断面, 一直是国内外专家学者研究的重要课题^[1]。当前进行重力坝体型优化设计的主要方法是有限元数值模拟技术。文献[2-5]基于 ANSYS、ABAQUS 等有限元软件及其自带的优化

基金项目: 国家自然科学基金雅砻江联合基金 (U1965207), 天津市自然科学基金 (19JCYBJC22600), 国家自然科学基金雅砻江联合基金 (U1865204)

作者简介: 佟大威 (1982—), 男, 副教授, 主要从事结构仿真与抗震研究。E-mail: tongdw@tju.edu.cn

模块，以断面面积最小化为寻优目标进行重力坝优化设计研究。文献[6-8]基于有限元软件调用 MATLAB/FORTRAN 复合形法程序，通过数据交互方式进行断面面积最小化的体型优化设计。针对结构模型的精确性问题，建立更符合工程实际的有限元模型，可使优化结果更接近理论真实解。祁顺彬等^[9]以开裂长度为主要约束条件建立体型优化数学模型，对重力坝断面经济性进行优化分析。崔乃文等^[10]基于混凝土损伤理论和断裂力学理论模拟坝踵区损伤的扩展行为，以控制裂缝损伤范围保证坝体不至于失稳破坏为约束条件，得到即使有裂缝产生也能正常运行的断面形态。

当前重力坝体型优化设计是在满足应力、稳定的前提下寻求断面面积更小、经济更优的设计方案，在目标函数选取上采用经济指标单目标优化模式，对于安全指标仅以不超过安全限值的形式作为约束条件施加在内，存在缺乏考虑安全可靠度，尤其是抗震下的安全性能对于优化评价影响的不足。随着目前国内在建及拟建重力坝坝址地震强度越来越高，有必要在优化过程中考虑工程抗震性能，提高工程抗震能力。拱坝优化研究方面已经就强震区工程的安全、经济综合性能开展了相应探索^{[11][12]}。此外，以往优化设计以截面尺寸作为唯一的设计变量，缺乏考虑材料属性对于重力坝优化设计的影响。相关研究表明，混凝土抗拉强度、弹性模量等材料指标对结构自振特性、应力变形有着显著影响^{[13][14]}。由此，有必要综合考虑材料属性指标对于重力坝优化设计的影响。

结构优化设计问题为一类非线性多峰值全局最优问题，对于该类问题的求解智能优化算法拥有着相比传统方法更佳的性能^[15]。李恒^{[16][17]}基于遗传算法进行重力坝优化设计，与 ANSYS 等软件自带优化方法相比坝体材料更为节省，更大程度上提高了经济性。苏国韶等^[18]将人工蜂群算法应用于重力坝体型优化设计，优化效果明显且适应性良好，寻优效率高。张建华等^[19]基于并行性鲸鱼优化算法对渡槽槽身结构进行了优化设计，取得更稳定的性能和更快的收敛速度。本文鉴于 XGBoost 模型在拟合问题中的良好性能^[20]，以及 PSO 算法对于解决工程结构优化问题的良好适用性^[21]，将 XGBoost 作为 PSO 适应度函数的代理模型，采用 XGBoost-PSO 算法对重力坝结构进行优化设计分析。

综上所述，以国内西南强震区某重力坝为例，构建了断面尺寸、材料属性多因素评价体系，提出考虑经济、抗震安全重力坝体型多目标优化设计方法。首先，建立重力坝体型多目标优化数学模型，构建综合经济、抗震安全指标的多因素评价体系，选取抗拉强度、断面尺寸参数作为设计变量；然后，采用变权功效系数法对有限元计算结果进行量化评价；最后，提出 XGBoost-PSO 算法进行寻优分析得到最终优化方案。本文研究方法可为强震区重力坝体型优化设计研究提供思路和方法借鉴。

1 重力坝体型优化设计数学模型

重力坝体型多目标优化问题可表示为：

$$X = [x_1 \quad x_2 \quad \cdots \quad x_n]^T \quad (1)$$

$$\text{opt } F(X) = [f_1(X) \cdots f_m(X)] \quad (2)$$

$$s.t. \begin{cases} a \leq H(X) \leq b \\ \sigma \leq [\sigma] \\ k \leq [k] \\ L \leq [L] \end{cases} \quad (3)$$

式中： X 是由设计变量组成的向量， n 是设计变量个数； $F(X)$ 为目标函数向量，其元素是 m 个标量分目标函数，其中，经济指标用断面面积表示，抗震安全指标通过结构计算方法求解； $a \leq H(X) \leq b$ 是几何约束条件； σ 为应力， $\sigma \leq [\sigma]$ 是应力约束条件， k 为抗滑稳定安全系数， $k \leq [k]$ 是稳定约束； L 为损伤长度， $L \leq [L]$ 是损伤约束。

a. 设计变量：设计变量 $X = [x_1 \quad x_2 \quad x_3 \quad x_4]^T$ 分别为上游折坡点横距离、上游折坡点纵距离、下游折坡点横距离和混凝土抗拉强度，如图 1 所示，其中 H 为大坝总高度， h 为坝前水位， b 为坝顶宽度。

b 约束条件

几何约束：正常运行工况下应满足重力坝设计规范及其它施工要求^{[22][23]}；地震工况下的约束条件更为严格，综合规范及实际工程经验，其几何约束如式（4）所示。

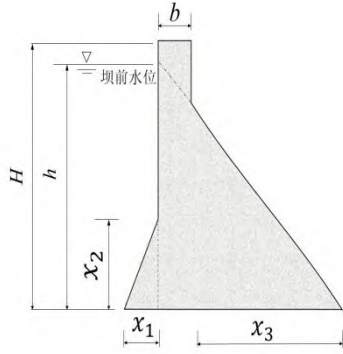


图 1 截面及设计变量

Fig.1 Section and design variables

$$\text{几何约束: } \begin{cases} \text{上游坡比 } r_u \text{ 约束: } 0 \leq r_u \leq 0.2 \\ \text{下游坡比 } r_d \text{ 约束: } 0.5 \leq r_d \leq 0.9 \\ \text{变量非负约束: } x_i > 0 \end{cases} \quad (4)$$

应力约束：静力状态下，坝踵应力不超过许用拉应力 $[\sigma_+]$ ，坝趾应力应不大于坝趾容许压应力 $[\sigma_-]$ ；稳定约束： $k \leq [k]$ ， k 为按抗剪强度公式计算的坝基面稳定安全系数，静力状态下 $[k]$ 值参考文献^[22]，地震工况 $[k]$ 值参考文献^[23]。损伤约束：地震工况下坝体损伤不超过限值，例如坝踵损伤长度不能波及灌浆帷幕，坝头部位不允许发生贯穿损伤。

c. 目标函数：以往重力坝体型优化设计追求工程经济最省，本文将抗震安全指标作为目标函数之一，基于经济、抗震安全指标进行多目标优化设计，兼顾考虑重力坝‘造价节省’和‘安全性能增强’的多目标优化需求。

经济指标，坝体混凝土造价在工程造价中占有相当比例，取单位坝宽混凝土方量（即坝体断面面积 S ）作为经济指标，断面面积由截面几何参数确定，如式（6）所示。

$$f_1(X) = S \quad (5)$$

$$S = \frac{1}{2}x_1x_2 + \frac{1}{2}(b + x_3) \cdot h + \frac{1}{2}b \left[2(H - h) + \frac{bh}{x_3 + b} \right] \quad (6)$$

安全指标，相比于静力安全指标，更关注坝体在地震动作用下的安全状态，坝体若经历地震过程后依然表现良好，基本可以判断其在静力作用下也处于安全状态，因此本文在安全指标的选取上以动力指标为准。基于混凝土损伤理论，建立能够反映损伤与能量特性的混凝土塑性损伤模型（CDP 模型）^[24]，分别从材料损伤和能量耗散角度对抗震安全进行评价。考虑到坝踵部位防渗帷幕及排水孔安全至关重要^[12]，过大的震后损伤可能使大坝的帷幕结构和排水性能受损，导致基底扬压力提升，进而威胁坝体安全稳定，因此选取坝踵基础面屈服裂缝长度（简称坝踵断裂长度 L ）作为安全指标之一。当 CDP 模型的损伤值 d 达到 0.6 以上时，视为混凝土材料发生屈服断裂，从而判定坝踵断裂范围^[25]。基于 Sidiroff^[26]提出的能量等效性假设对损伤值 d 进行计算，如式（8）所示。

$$f_2(X) = L \quad (7)$$

$$d = 1 - \sqrt{\sigma / (E_0 \varepsilon)} \quad (8)$$

式中， E_0 为弹性模量（Pa）， σ 、 ε 分别为应力、应变。

此外，地震对结构的作用实质上是一种能量的传递、转化与耗散的过程，地震波输入给坝体的能量越多，造成的混凝土损伤越严重，结构越危险，超过结构耗能能力时将产生破坏。基于能量角度探究地震动力响应及抗震性能，是一种从结构整体性能出发的重要抗震安全评价方法。本文选取损伤耗散能 E ^[27]作为目标函数之一，计算公式如式（10）。

$$f_3(X) = E \quad (9)$$

$$E = \int_0^T \frac{d_T - d_0}{1 - d_0} \sigma \varepsilon^{el} dT \quad (10)$$

式中， d_T 、 d_0 为 T 时刻、初始时刻的损伤值， ε^{el} 为弹性应变，由 $\varepsilon^{el} = \sigma / E_0$ 计算得出。

在对上述指标进行筛选与分层的基础上，建立了经济、抗震安全评价指标体系，如图 2 所示。

图 2 经济、安全评价指标体系

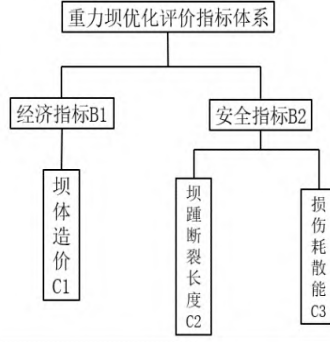


Fig.2 Economy and safety evaluation index system

2 经济、抗震安全多指标综合评价体系

2.1 变权功效系数法量化分析

以断面面积 S 、坝踵断裂距离 L 及损伤耗散能 E 为指标对优化效果进行综合评价，采用功效系数法量化各试验方案的优化效果，如式 (11) 所示。

$$D = \frac{\sum_{i=1}^3 w_i d_i}{\sum_{i=1}^3 w_i} \quad (11)$$

式中， w_i 为第 i 项指标的权重； d_i 为第 i 项指标的功效系数， D 为总功效系数。

以上三个评价指标均为随着数值增大越不利于坝体的经济安全，各单项功效系数越小，因此均属于极小型变量，此时各单项功效系数的计算见式 (12)。

$$d_i = \begin{cases} \frac{x_i^{(h)} - x_i}{x_i^{(h)} - x_i^{(s)}} \times a + b, & x_i \leq x_i^{(h)} \\ 1, & x_i \geq x_i^{(h)} \end{cases} \quad (12)$$

式中， x_i 为第 i 个评价指标计算结果； $x_i^{(h)}$ 为满意值； $x_i^{(s)}$ 为不允许值； a 和 b 为调整系数，本文分别取为 60，40。

然而传统的功效系数法权重是固定的，无法考虑权重由于评价指标数值的变化引发的变化^[28]。本文采用均衡函数的变权公式对权重进行改进。

$$w'_i = \frac{w_i c_i^{\alpha-1}}{\sum_{i=1}^m (w_i c_i^{\alpha-1})}, i = 1, 2, \dots, m \quad (13)$$

式中， α 为分类参数，对于本文重力坝优化方案评价而言，随着评价指标数值增大，对大坝优化效果的影响程度越大，因此取 $\alpha > 1$ ，参考文献^[28]的研究取 $\alpha = 1.5$ 。 w_i 为常权权重， c_i 为评价指标的标准转化量。

2.2 AHP-熵权法确定组合权重

基于 AHP-熵权法^[29]对指标权重 w_i 进行计算。运用层次分析法构造两两判断矩阵并经过一致性检验，得到评价指标的主观权重 $\alpha = [0.480, 0.405, 0.115]$ ，采用熵权法经过熵值、熵权计算得到评价指标的客观权重 $\beta = [0.414, 0.286, 0.300]$ ；将主、客观权重进行综合求得组合权重。

$$W = 0.5\alpha + 0.5\beta \quad (14)$$

代入得，断面面积 S 、坝踵断裂距离 L 、损伤耗散能 E 的权重向量 $W = [0.447, 0.346, 0.207]$ 。

3 XGBoost-PSO 算法寻优分析

在有限元分析及综合评价基础上，对试验方案进行寻优分析获取最终优化方案。鉴于 XGBoost 模型在拟合应用中的良好性能，以及 PSO 算法对于工程结构优化问题的良好适用性，将 XGBoost 作为 PSO 适应度函数的代理模型，采用 XGBoost-PSO 算法对重力坝结构进行优化分析。

3.1 XGBoost 预测模型

XGBoost 模型是在梯度提升算法 (Gradient Boosting, GDBT) 基础上优化而来^[30]。与 ANN、RF 等传统机器学习模型相比, 具有准确度高、不易过拟合、可扩展性强等特点。XGBoost 算法最优的目标函数为

$$Obj = -\frac{1}{2} \sum_{j=1}^T \frac{G_j^2}{H_j + \lambda} + \gamma T \quad (15)$$

式中, λ 、 γ 、 T 分别为固定系数、复杂度参数和树中叶节点的数量, G_j 、 H_j 分别为叶子节点 j 包含样本的一阶、二阶偏导数累加之和。

对 XGBoost 拟合性能进行验证, 以决定系数 R^2 、均方根误差 RMSE 为评价指标对 XGBoost、LR、ANN、RF 模型进行比较。如图 3 所示, XGBoost 模型在决定系数 R^2 和均方根误差 RMSE 上均有最优表现, 神经网络模型 (ANN) 及随机森林模型 (RF) 次之, 线性回归模型 (LR) 的表现不及其他模型, 表明 XGBoost 模型在试验方案的回归应用中具有良好的拟合性能。

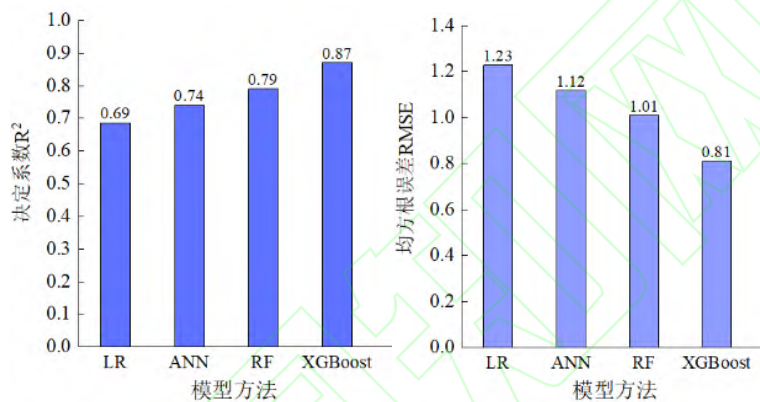


图 3 模型预测效果对比分析

Fig.3 Comparison analysis of prediction effect of models

为分析 XGBoost 模型拟合性能随数据集规模大小的变化规律, 分别取 80、120、160、200、240、280、320、360、400、430 的数据量进行回归分析, 得到不同训练样本数的学习曲线。如图 4 所示, 在样本数量达到 300 后时, 预测评价指标 (R^2 、RMSE) 均渐趋于稳定, 拟合性能趋于良好, 结果表明本文数据集规模满足精度要求。

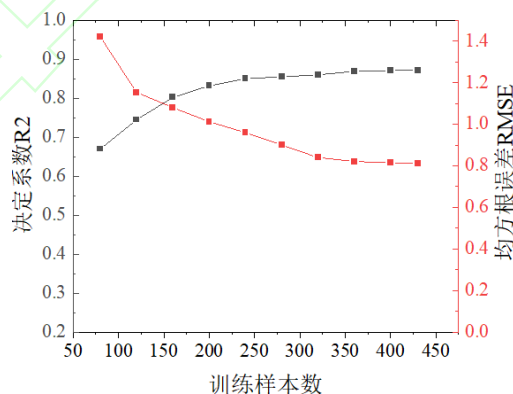


图 4 XGBoost 模型学习曲线

Fig.4 XGBoost model learning curve

3.2 PSO 算法

PSO 算法是一种模仿鸟类等群体智能觅食行为的启发式算法^[31]。该算法以鸟类群体为建模对象, “群体”中每一个鸟类个体被视为一个“粒子”, 代表算法所优化问题的一种解决方案, 所有“粒

子”构成了问题的解空间。在算法迭代过程中，粒子 d 飞行的方向由群体经验（即“群体”中所有粒子的最优位置 P_g ）及个体经验（即个体“粒子”所经历过的最优位置 P_d ）共同决定；每次迭代时，“粒子”将产生新的速度 v_d 及方向，并计算新的个体适应度 p_d 及全局适应度 p_b ，当适应度满足预设条件后迭代结束，同时得到问题的全局最优解。优化流程如图 5 所示。

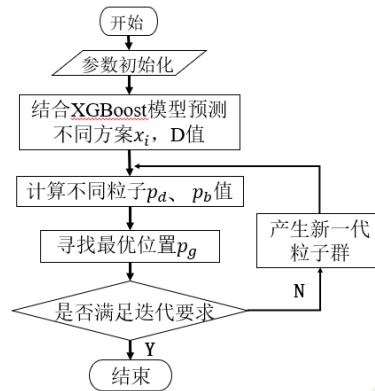


图 5 优化流程图

Fig.5 Optimization flow chart

粒子群算法的进化方程为：

$$v_d(t+1) = v_d(t) + C_1 r_1(t)[P_d(t) - p_d(t)] + C_2 r_2(t)[P_g(t) - p_d(t)] \quad (16)$$

$$p_d(t+1) = p_d(t) + v_d(t+1) \quad (17)$$

式中， C_1 、 C_2 为加速度常数， r_1 、 r_2 为两个独立的随机数。

4 工程应用

4.1 工程概况

以国内西南强震区某重力坝为例，大坝为碾压混凝土重力坝，最大坝高为 185m，坝址区地震基本烈度为VIII度，设计地震动峰值加速度高达 0.445g，位居国内已建及在建混凝土重力坝之首，抗震安全性是该工程建设与运行过程中高度关注的问题。以河床非溢流坝段（7#坝段）为研究对象，兼顾考虑体积节省和抗震性能的实际工程需求，开展考虑经济、抗震安全重力坝体型多目标优化设计研究。

计算荷载条件包括：坝体自重、静水压力、扬压力、淤沙压力、地震荷载以及地震动水压力。坝底高程为 1970.0m，上游水位 2150.0m，下游水位坝前淤沙高程 2024.0m，淤沙浮容重 8kN/m³，内摩擦角 12°，建基面抗剪断参数取：摩擦系数 $f' = 1.07$ ，粘聚力 $c' = 1.15\text{MPa}$ 。坝体混凝土采用混凝土塑性损伤模型（CDP 模型），地基岩体采用弹性模型，材料参数见表 1。扬压力沿坝基面的分布情况见图 7。

表 1 混凝土及基岩材料力学参数

Table1 Mechanical parameters of concrete and bedrock

材料类型	密度/ (kg/m ³)	静态弹性模量/ (GPa)	动态弹性模量/ (GPa)	泊松比
混凝土 C25	2400	28	42	0.167
基岩	2760	10.5	10.5	0.23

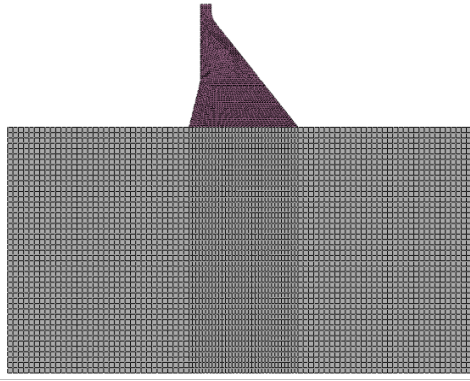


图 6 初始方案坝体-地基有限元模型

Fig.6 Dam-foundation model of initial scheme

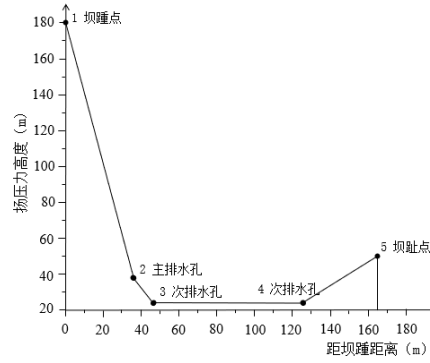


图 7 扬压力分布图

Fig.7 Uplift pressure distribution

动力计算中采用 100 年超越概率为 2%的场地相关反应谱作为目标谱，经过人工地震波拟合得到顺河、垂直向加速度时程曲线归一化图形，如图 8、图 9 所示。考虑行波效应和地基能量辐射影响，采用黏弹性人工边界进行动力边界的模拟^[32]。

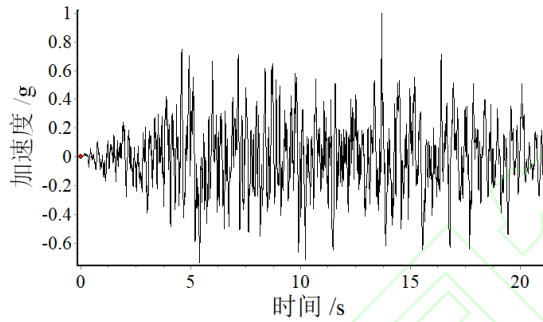


图 8 顺河向加速度时程

Fig.8 Acceleration time history along the river

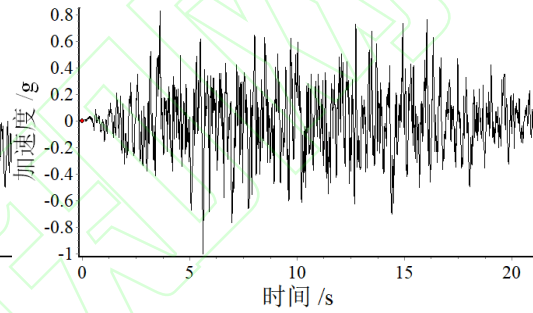


图 9 垂直向加速度时程

Fig.9 Vertical acceleration time history

4.2 结构优化设计

a. 构建样本数据库

基于选定的设计变量 x_1 - x_4 （上游折坡点横距离、上游折坡点纵距离、下游折坡点横距离和混凝土抗拉强度），采用正交抽样方法建立了 430 组变量组合试验方案，设计变量统计见表 2，试验方案见表 3。

表 2 设计变量分布规律

Table 2 Distribution of optimization variables

	x_1 (m)	x_2 (m)	x_3 (m)	x_4 (10^4 Pa)
下限值	6	60	96	145
上限值	24	100	132	226
平均值	15	80	114	184
等距间隔	1	2	2	6
划分数量	19	21	19	14

表 3 基于正交抽样的试验方案

Table 3 Scheme based on orthogonal sampling

试验编号	x_1 (m)	x_2 (m)	x_3 (m)	x_4 (10^4 Pa)
0	17.5	70	132	178
1	6	66	130	145
2	6	100	116	151
3	6	76	126	157
4	6	86	124	163
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
427	24	90	120	214
428	24	60	118	220
429	24	74	98	226

b.有限元分析及综合评价

采用 ABAQUS 软件进行重力坝有限元静动力计算，并提取各试验方案的断面面积 S 、坝踵断裂长度 L ，损伤耗散能 E 评价指标。基于经济、抗震安全综合评价体系及改进功效系数法，计算得全部方案的优化效果 D 值，从低到高排序后绘制折线图。如图 10 所示，初始方案 D 值为 70.74，仅超过样本空间中 15.1% 的样本，在整个样本空间中表现并不理想，尚有很多方案在经济、安全综合性能上优于初始方案。

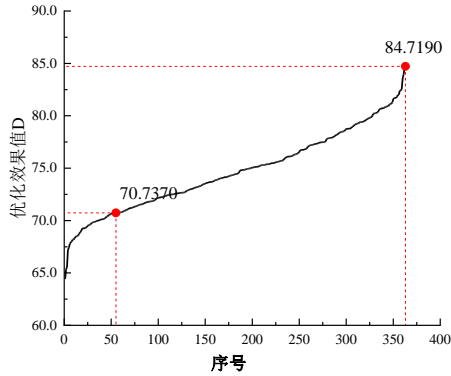


图 10 试验方案优化效果排序

Fig.10 Ranking of optimization effect of test scheme

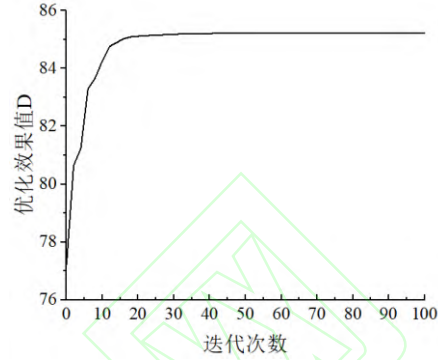


图 11 PSO 算法迭代过程

Fig.11 PSO algorithm iteration process

c.优化方案寻优分析

最后，针对样本空间基于 XGBoost-PSO 算法进行寻优分析，获取优化效果 D 值达到最大时的设计变量 X ，得到最终优化方案。图 11 为优化效果 D 值随迭代次数的变化曲线（其中，横坐标为迭代次数，纵坐标为优化效果 D ）。 D 值最大为 85.2，对应设计变量 $X=[23.4, 66.3, 107.6, 178.3]$ 。

4.3 优化结果分析

a. 优化方案、初始方案对比分析

优化方案与原始方案的设计变量及评价指标对比如表 4 所示。

表 4 优化结果对比

Table4 Comparison of optimization results

设计变量、评价指标	初始方案	试验方案 下限值	试验方案 上限值	优化方案
x_1 (m)	17.5	6	24	23.4
x_2 (m)	70	60	100	66.3
x_3 (m)	132	96	132	107.6
x_4 (10^4 Pa)	178	127	226	178.3
面积 $S(10^3\text{m}^2)$	16.5	13.1	16.9	13.8
断裂 $L(\text{m})$	16.7	4.3	27.2	10.6
能量 $E(10^5\text{J})$	13.5	8.8	22.5	14.7
优化值 D	70.7	64.5	84.7	85.2

可以得出，初始剖面形态为 $x_1=17.5\text{m}$ ， $x_2=70\text{m}$ ， $x_3=132\text{m}$ ；优化剖面形态为 $x_1=23.4\text{m}$ ， $x_2=66.3\text{m}$ ， $x_3=107.6\text{m}$ ，相比初始剖面呈现下游坡度变陡、上游坡度变缓的趋势；对于混凝土抗拉强度参数，优化前后二者相近。有限元计算结果表明，优化方案断面面积 $S=13.8 \times 10^3\text{m}^2$ ，相比初始方案 $16.5 \times 10^3\text{m}^2$ 节约混凝土土方量 16.3%；断裂长度 $L=10.6\text{m}$ ，相比初始方案 16.7m 减小坝踵裂缝长度 36.5%；耗散能 $E=14.7 \times 10^5\text{J}$ ，产生损伤耗散能与初始方案相当。

优化前后坝体损伤状态如图 12 所示，随着上游坡度变缓，有效改善了坝踵部位应力状态，震后坝踵损伤范围明显缩小；上游折坡位置出现一定程度损伤，但控制在较小范围内，不至于产生屈服断裂，因此，优化后坝体几何空间布局的协调性得到增强。优化方案在静力作用下的竖向应力分布见图 13，坝体整体呈现受压状态，应力分布良好，且在安全范围内；位移分布见图 14，最大位

移 8.4cm 发生在坝顶部位，处于正常范围内。结果表明，相比初始方案，优化方案是更经济，安全的，有效提高了该重力坝工程的经济、安全综合性能。

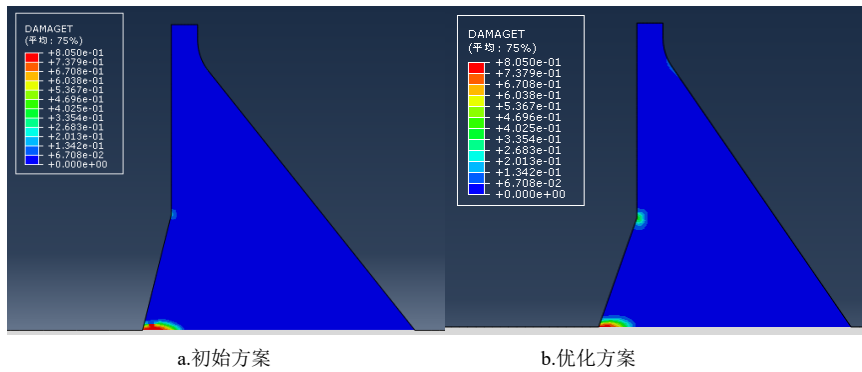


图 12 优化前后损伤状态云图

Fig.12 Damage state before and after optimization

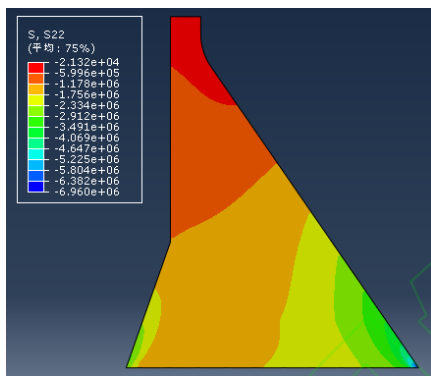


图 13 优化方案竖向应力云图

Fig. 13 Vertical stress in optimization scheme

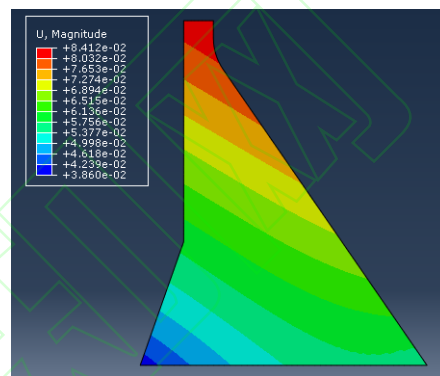


图 14 优化方案位移云图

Fig. 14 Displacement of optimization scheme

b. 多目标、单目标优化模式对比分析

经济指标单目标优化模式下的剖面形态为 $x_1=20.4m$, $x_2=72m$, $x_3=103.5m$, 如图 15 所示，与多目标优化相比，单目标优化剖面的上下游坡度更陡，断面面积进一步减小，可节约更多的混凝土方量；但其震后安全状态表现不佳，坝踵损伤范围大于多目标优化方案，甚至超过初始方案，且上游折坡的损伤程度进一步加剧，以上均将对坝体抗震安全性能产生一定威胁。因此，单目标优化方案虽然具有更优的经济性，但不具备优良的安全性能，并不适用于该类对抗震安全性能要求高的重力坝工程。

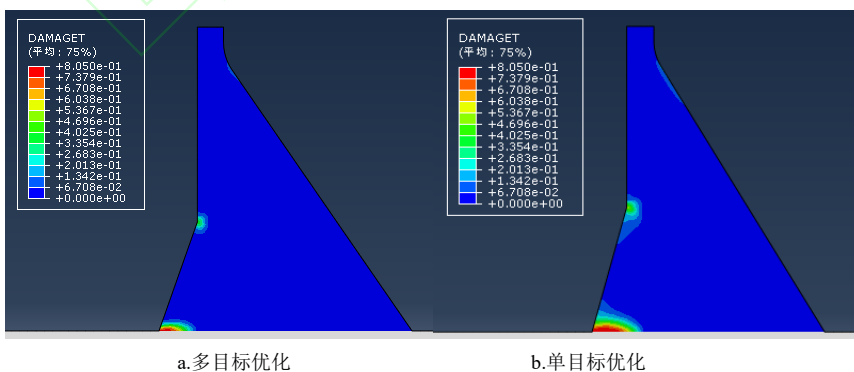


图 15 不同优化模式损伤状态云图

Fig. 15 Damage state under different optimization modes

5 结论

a.提出了综合经济、抗震安全指标的重力坝多目标优化设计研究方法,构建了断面尺寸、材料属性多变量体系,建立了经济、抗震安全综合评价体系,基于 ABAQUS 软件实现了重力坝有限元静动力分析,基于变权功效系数法实现了优化设计的量化评价,提出 XGBoost-PSO 算法实现了重力坝多目标优化的寻优分析。

b.在回归分析中,相比神经网络模型(ANN)、随机森林模型(RF)及线性回归模型(LR),XGBoost 模型在决定系数 R^2 和均方根误差 RMSE 指标上均有最优的表现,证明 XGBoost 模型具有优良的拟合性能。通过样本学习曲线表明,在样本数量达到 300 后时,预测评价指标(R^2 、RMSE)均渐趋于稳定,拟合性能趋于良好,本文选取的数据集规模满足精度要求。

c.相比原始方案,优化方案节约混凝土方量 14.1%,并使震后坝基断裂长度减小 36.5%,明显提高了工程的经济、安全综合性能。相比多目标优化模式,经济指标单目标优化模式可节约更多混凝土方量,但震后坝基损伤范围明显扩大,上游折坡位置损伤程度进一步加剧,对坝体安全状态产生一定威胁,相比之下,经济、安全多目标优化更适用于该类对抗震安全要求高的重力坝工程。

参考文献:

- [1] 刘廉纯,林皋.混凝土重力坝断面的抗震优化设计[J].土木工程学报,1984(1):49-58.(LIU Lianchun, LIN Gao. Optimum design for cross-sections of concrete gravity dams against earthquake[J]. China Civil Engineering Journal, 1984(1):49-58.)
- [2] 刘亚丽,辛全才.滚水坝断面拓扑优化[J].水力发电,2013,39(1):38-40.(LIU Yali, XIN Quancai. Topology optimization for the cross section of rolling dam[J]. Water Power, 2013, 39(1): 38-40. (in Chinese))
- [3] 何成龙,周丹,涂兴怀.基于变密度法的实体重力坝拓扑优化[J].长江科学院院报,2014,31(9):105-109.(HE Chenglong, ZHOU Dan, TU Xinghuai. Topology optimization of entity gravity dam based on variable density method[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2014, 31(9): 105-109. (in Chinese))
- [4] 胡赞.龙王沟水库枢纽工程设计与坝体断面优化[D].西北农林科技大学,2014.
- [5] 王君红.基于 ANSYS 的曲线重力坝坝形优化设计[D].兰州交通大学,2014.
- [6] 李斌,杨杰.基于双层复形法重力坝断面优化研究[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2016,44(11):228-234. (LI Bin, YANG Jie. Optimization of gravity dam section based on double-layer complex method[J]. Journal of Northwest A&F University(Natural Science Edition), 2016, 44(11): 228-234. (in Chinese))
- [7] 窦仲毅.某碾压混凝土重力坝设计及溢流断面优化[D].西北农林科技大学,2017.
- [8] 江念红,苏志敏,陈强,等.变分技术在重力坝优化设计中的应用[J].水资源与水工程学报,2013,24(2):184-187.(JIANG Nianhong, SU Zhimin, CHEN Qiang, et al. Application of variational technology in optimal design of gravity dam[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2013, 24(2): 184-187. (in Chinese))
- [9] 祁顺彬,王向东.考虑开裂约束的重力坝体型优化设计[J].长江科学院院报,2008,25(6):106-109.(QI Shunbin, WANG Xiangdong. Shape optimization design of gravity dam considering crack constraint. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2008, 25(6): 106-109. (in Chinese))
- [10] 崔乃文,王向东.基于混凝土损伤和断裂力学的重力坝体型优化设计研究[J].河海大学学报(自然科学版),2019, 49(3):347-353.(CUI Naiwen, WANG Xiangdong. Research on optimization design of gravity dam based on concrete damage and fracture mechanics. Journal of Henan University (Natural Science), 2019, 49(3): 347-353. (in Chinese))
- [11] 孙林松,张伟华,谢能刚.基于博弈理论的拱坝体形多目标优化设计[J].河海大学学报(自然科学版),2006(4):392-396. (SUN Linsong, ZHANG Weihua, XIE Nenggang. Multi-objective optimization for shape design of arch dams based on game theory[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2006(4): 392-396. (in Chinese))
- [12] 王文娟,谢能刚,孙林松.高拱坝体型多目标优化设计研究进展[J].水利水电科技进展,2007,27(1):86-90.(WANG Wenjuan, XIE Nenggang, SUN Songlin. Research progress of multi-objective shape optimal design of high arch dams[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2007, 27(1): 86-90. (in Chinese))
- [13] Pouraminian M, Pourbakhshian S, Farsangi E N. Reliability assessment and sensitivity analysis of concrete gravity dams by considering uncertainty in reservoir water levels and dam body materials[J]. Civil And Environmental Engineering Reports, 2020, 1(30): 1-17.

-
- [14] Alembagheri M, Seyedkazemi M. Seismic performance sensitivity and uncertainty analysis of gravity dams[J]. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*,2015,44(1):41-58.
- [15] 蔡新,李洪焯,武颖利,等.工程结构优化设计研究进展[J].河海大学学报(自然科学版),2011,39(3):269-276. (CAI Xin, LI Hongxuan, WU Yingli, et al. Research progress of optimal design for engineering structures[J].*Journal of Hohai University (Natural Sciences)*,2011,39(3):269-276.(in Chinese))
- [16] 李恒.基于 ANSYS 的关门嘴子水库重力坝设计与优化[D].哈尔滨工程大学,2017.
- [17] 李燕.混凝土重力坝设计优化及施工模拟研究[D].长春工程学院,2020
- [18] 苏国韶,钱坤.人工蜂群算法在重力坝断面优化设计中的应用[J].计算机工程与应用,2011,47(11):223-225+248.(SU Guoshao, QIAN Kun. Optimal design of gravity dam section using artificial bee colony algorithm[J].*Computer Engineering and Applications*,2011,47(11):223-225+248.(in Chinese))
- [19] 张建华,李静,林潮宁,等.U 型渡槽参数化有限元建模与智能优化设计研究[J].河海大学学报(自然科学版),2022, 56(9): 1-10.(ZHANG Jianhua, LI Jing,LIN Chaoning,et al.Study on parametric Finite Element Modelling and intelligent optimal design of U-shaped aqueduct[J].*Journal of Hohai University(Natural Sciences)*,2022,56(9):1-10.(in Chinese))
- [20] 吴娟,朱跃龙,金松,等.三种机器学习模型在太湖藻华面积预测中的应用[J].河海大学学报(自然科学版),2020, 48(6): 542-551.(WU Juan ,ZHU Yuelong, JIN Song,et al. Area prediction of cyanobacterial blooms based on three machine learning methods in Taihu Lake)[J].*Journal of Hohai University(Natural Sciences)*,2020,48(6):542-551.(in Chinese))
- [21] 吕伟华,袁永博.基于 PSO 的工程结构优化方法研究[J].建筑经济,2009(S1):279-281.(LYU Weihua, YUAN Yongbo. Research on optimization methods of engineering structure based on PSO[J].*Construction Economy*,2009(S1):279-281.(in Chinese))
- [22] SL319—2018.混凝土重力坝设计规范[S].
- [23] GB51247—2018.水工建筑物抗震设计标准[S].
- [24] Lee J,Fenves G L.A plastic-damage concrete model for earthquake analysis of dams[J].*Earthquake Engineering & Structural Dynamics*,2015,27(9):937-956.
- [25] 郭明.混凝土塑性损伤模型损伤因子研究及其应用[J].土木工程与管理学报,2011,28(3):128-132+163.(GUO Ming. Research and application of damage factor in concrete plastic-damage model[J].*Journal of Huazhong University of Science and Technology Urban Science*,2011,28(3):128-132+163.(in Chinese))
- [26] Li H, Yin X, Wang G. Research on UPFs-based viscoelastic artificial boundary element and ground motion input method[J]. *World Information on Earthquake Engineering*, 2017, 33(2):24-32.
- [27] 张社荣,王超,孙博.基于能量耗散的重力坝地震响应时频特征分析[J].地震工程与工程振动,2013,33(4):167-175. (ZHANG Sherong, WANG Chao ,SUN Bo.Time-frequency characteristics of seismic responses for gravity dams based on energy dissipation[J].*Earthquake Engineering and Engineering Vibration*,2013,33(4):167-175.(in Chinese))
- [28] 谢荣晖,吴学平,吴雅佩.基于 TOPSIS 变权模糊模型的混凝土坝结构安全评价[J].水力发电,2016,42(11):68-71.(XIE Ronghui, WU Xueping, WU Yapei. Structure safety assessment of concrete dam based on variable weights fuzzy model of TOPSIS[J].*Water Power*,2016,42(11):68-71.(in Chinese))
- [29] 刘宇彬,刘建华.基于层次分析法和熵权法的电网风险评估[J]. 电力科学与工程,2013(11):37-43.(LIU Yubin, LIU Jianhua. Risk assessment of power networks based on AHP and Entropy Weight Method[J].*Electric Power Science and Engineering*, 2013(11):37-43.(in Chinese))
- [30] Chen T,Guestrin C. XG Boost:a scalable tree boosting system[C]//the 22nd ACM SIGKDD International Conference. ACM,2016.
- [31] 韩峰,徐磊,张太俊.坝基岩体力学参数的 PSO-ABAQUS 联合反演[J].河海大学学报(自然科学版),2013,41(4):321-325. (HAN Feng, XULei,ZHANG Taijun. Combined inversion of mechanical parameters of rock mass of dam foundation using particle swarm optimization method and ABAQUS[J].*Journal of Hohai University(Natural Sciences)*, 2013,41(4): 321-325.(in Chinese))
- [32] 刘晶波,谷音,杜义欣.一致粘弹性人工边界及粘弹性边界单元[J].岩土工程学报,2006(9):1070-1075.(LIU Jinbo, GU Yin, DU Yixin. Consistent viscous-spring artificial boundaries and viscous-spring boundary elements[J].*Chinese Journal of Geotechnical Engineering*,2006(9):1070-1075.(in Chinese))