中国科学: 技术科学 2026 年 第 56 卷 第 7 期: 1697 ~ 1709
SCIENTIA SINICA Technologica techcn.scichina.com
《中国科学》杂志社 SCIENCE CHINA PRESS
论 文 复杂恶劣条件下水电开发基础科学问题专刊

高坝泄洪挑流鼻坎体型自适应优化方法与应用

张建民[1,2*], 许唯临[1,2], 雷刚[1,3]

1. 四川大学山区河流保护与治理全国重点实验室, 成都 610065
2. 四川大学水利水电学院, 成都 610065
3. 四川省水利规划研究院, 成都 610072
* E-mail: zhangjianmin@scu.edu.cn

收稿日期: 2025-12-22; 接受日期: 2026-02-11; 网络版发表日期: 2026-07-06
国家自然科学基金(批准号: 51625901)资助项目

摘要 本文以水利工程泄洪消能防冲系统协调性为视角, 将生物学中的适应性思维引入到挑流消能防冲问题中, 运用适应性理论中“系统”“协调”等属性特征, 分析挑流鼻坎体型优化设计的关键要素之间关联关系, 革新传统挑坎正向优化方法, 探索提出挑流鼻坎体型自适应性优化方法. 该方法以泄洪消能防冲设计最关注的技术经济性综合最优等设计要求为目标, 基于泄洪建筑物消能区所处河道地形地质条件及其挑流水力特性, 以冲刷区适宜性水力冲击荷载为导向, 以挑流入水单宽流量最小化及其适宜的空间分布为切入点, 运用人工神经网络和快速非支配排序遗传算法NSGA-II等手段, 反向求解挑坎体型参数优化解集, 以挑坎体型智能反演优化为牵引, 针对满足设计要求的消能效果、冲刷程度、防护方案等核心指标综合较优的目标问题, 运用水力学挑流消能理论和多目标优化等人工智能知识, 基于少样本数据寻优方法获得与目标相适应、相匹配的挑坎体型优化参数, 本文将该方法运用于高坝工程挑流消能防冲问题中, 提出了直线型入水的大斜切挑跌组合式扭曲挑坎体型和翻卷式月牙形入水的鹰嘴型挑坎体型, 实现了防冲效果较好挑流体型优化设计目标, 形成了一套消能效率较高、冲刷程度较轻、防护方案难度降低、工程投资较小的挑坎设计优化的自适应性理论和技术体系, 研究成果可为挑流消能防冲设计优化提供科学支撑, 并能应用于其他消能型式的优化设计中.

关键词 自适应优化方法, 挑流鼻坎, 数值模拟, 多目标优化, 快速非支配排序遗传算法NSGA-II

1 引言

水电工程中的消能方式主要有底流消能、挑流消能、面流消能和消力戽消能等. 底流消能和面流消能一般用于中低的水头、泄量不大的电站. 在全球范围内坝高大于70 m的高坝工程中, 超过70%采用挑流消能[1~8], 国内超过200 m高坝全部采用挑流消能(图1). 挑流消能主要是利用挑流鼻坎将高速水流挑射至空中, 并使水舌在空中扩散, 分散后落入下游河道或水垫塘[8], 入水后形成剪切旋滚使水体强烈紊动进行消能.

引用格式: 张建民, 许唯临, 雷刚. 高坝泄洪挑流鼻坎体型自适应优化方法与应用. 中国科学: 技术科学, 2026, 56: 1697–1709
Zhang J M, Xu W L, Lei G. An adaptive optimization method for flip bucket geometry in high-dam flood discharge and its application (in Chinese). Sci Sin Tech, 2026, 56: 1697–1709, doi: 10.1360/SST-2025-0431

© 2026 《中国科学》杂志社

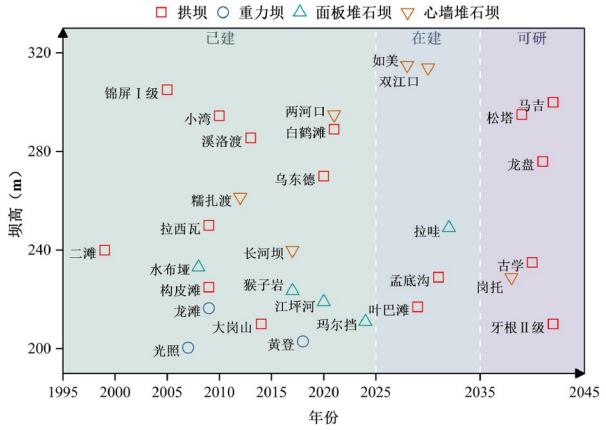


图 1 (网络版彩图)中国200 m以上高坝挑流消能工程项目统计

Figure 1 (Color online) Summary of ski-jump energy dissipation projects for high dams (>200 m) in China.



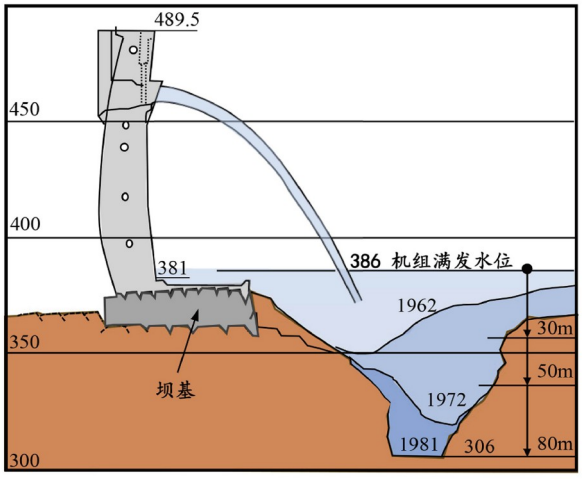


图 2 (网络版彩图)卡里巴大坝冲刷破坏及其演变过程

Figure 2 (Color online) Scour-induced damage and its evolution at Kariba Dam.

虽然大部分能量在水垫塘或下游河道内得以消刹，但是余能仍然会对水垫塘或河床底部带来冲击和冲刷，形成冲坑. 这就涉及到下游河道的防护问题, 当下游冲刷的深度和范围超过一定限度，将严重威胁大坝、岸坡或泄水建筑物自身的安全. 例如非洲的卡里巴大坝, 其下游河床的最大冲刷深度达80 m(图2)，形成“圆桶形”冲坑, 已严重威胁到大坝安全.

采用护坡护底的人工防护结构，就要考虑底板能承受的压力，以便确定底板的厚度；若采用岸边泄洪就要考虑下游河道两岸地质条件，选择合适的挑坎形式, 控制水舌落点位置，预测冲刷坑深度. 因此，如何减轻挑流消能对下游河道不利影响，涉及到如何优化挑坎体型，核心是弄清挑射水流对河床冲击情况以及减小对河床、岸坡的破坏情况. 如何较为准确预测水流对河床的冲刷破坏范围、破坏程度是专家普遍关心的问题. 大多数研究表明水舌对河床或岸坡的影响破坏主要源于射流水下扩散过程中产生的动水压力及其带来的脉动荷载，与水垫深度、单宽泄量、入水角度、河谷地形地质条件等因素密切相关[9]，特别是目前我国大型水利水电工程大多建在偏远山区、深山峡谷当中，因其大泄量及地形限制，大多采用挑流消能, 因此，挑流鼻坎体型优化研究是解决消能冲刷与防冲保护问题的关键.

目前挑流鼻坎设计主要依据经验公式、物理模型试验、三维数值模拟、智能算法设计等，采用正向设计方式，先根据经验初步提出一种挑流鼻坎体型，再根据物理模型试验结果或数值模拟结果进行修正并论证, 直到满足设计要求为止. 国内工程如锦屏一级、两河口、拉哇、瀑布沟、观音岩等均是通过物理模型优化试验确定最终挑坎体型[10~16].

本文解决挑坎优化问题是将其看作反问题，先明确优化目标，再采用智能算法和理论分析方法通过逆向思维反求实现或接近目标的挑坎体型参数. 再针对性地对候选优化体型进行三维数值模拟，获取人工智能算法所需的预测样本，再筛选出推荐的挑流鼻坎最终优化体型. 其特点在于迅速、准确，并能精确控制目标条件，避免了人为经验判断所带来的误差，显著提升了设计的精确度. 例如, Hojjati等人[17]采用NSGA多目标算法, 根据溢洪道初始设计边界条件, 对挑坎水力学参数进行了优化.

2　挑坎体型优化自适应方法

自适应性理论最早源于生物学领域，原始解释为生物为适应环境而调整自身行为和机能的一种现象，以求生存和发展. 《辞海》中将其描述为“生物在生存竞争中适应环境条件而形成一定形状的现象，它是自然选择的结果”. 随着对生物适应性本质的深入理解，适应性概念逐渐涵盖到其他学科领域，并被描述为一个系统、组织或个体在与其所处客观环境(包括自然、社会和人文环境等)相互作用的过程中，调整自身条件以适应环境并对环境产生相应影响的过程.

水利水电工程挑流消能中，挑坎对控制水舌形态及落点起到关键作用，挑坎优化的主要目的是控制水舌形态、落水位置及减轻下游河道冲刷，同时降低工程施工难度和减少工程量. 为了达到安全泄洪的目标，其中一个重要优化思想是控制入水位置，减小入水单宽流量，分散入水，降低荷载，减轻冲刷. 传统挑坎体型的优化思路主要是改变挑坎参数来得到想要的挑流形态，然后判断这种挑坎的消能防冲情况是否满足设计目标，若不满足设计则重复上述过程. 但是，这种正向思维的设计思路需要大量的试错工作，难以直接与水下消能防冲特性建立明确、准确的联系(图3).

既然挑坎决定消能防冲特性，那么将设计要求的、适宜的消能防冲方案作为目标反向确定挑坎体型则是一个典型的反问题求解过程. 因此，本文采用自适应理论，首先根据设计要求和工程特点提出消能防冲目标，再通过智能反演求解方法获得满足上述目标要求的挑坎体型参数. 概括地说就是采用逆向思维，根据工程自身属性，首先进行冲刷适应性评估，找到与适宜的冲刷特性要求或冲击荷载要求相适应的入水单宽流量曲线，然后依据此曲线采用机器学习及多目标优化算法来反向求解出所需要的挑坎体型及其参数优选集合，最终根据决策寻优分析得到需要的挑坎体型，这种方法是一种以目标为导向，将给定的经济技术指标最优的适宜的冲刷程度作为目标，然后这种冲刷情况对应一个唯一的入水单宽流量及其空间分布函数(一元或二元函数). 对于一维问题就是入水单宽流量自适应性曲线，最后通过需要的入水单宽流量自适应曲线遵循反问题求解获得挑坎体型参数最佳取值范围的优化路线. 这种挑坎优化过程，本文称之为基于自适应性理论的挑坎优化方法.

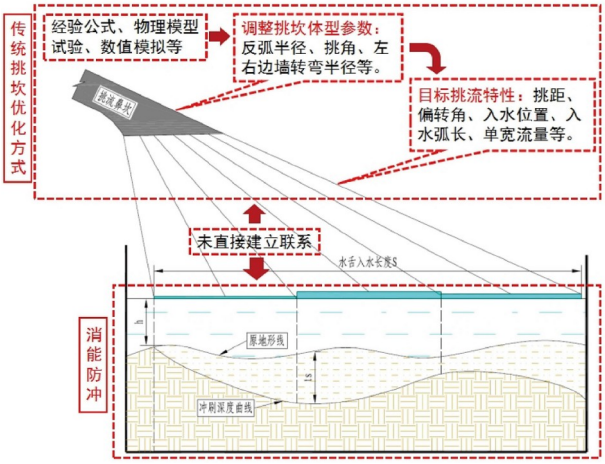


图 3　(网络版彩图)传统挑坎优化思路及存在问题

Figure 3　(Color online) Conventional optimization approach for ski-jump buckets and its associated problem.

冲刷深度T_s计算公式为[18]

$$T_s = K_s q^m H^n - h_t, \tag{1}$$

式中，H为水头；q为下泄水流单宽流量；h_t为水垫深度；m，n均为指数，一般为正值；K_s为反映河床抗冲能力的特性参数. 在水头、水垫深度和冲刷系数K_s确定后，主要受入水单宽流量控制. 并与单宽流量q呈正相关的函数，那么q可表示为T_s的函数:

$$q = f(T_s). \tag{2}$$

实际河岸和河床抗冲能力存在空间分布差异，K_s可以被视为空间分布函数(图4). 泄洪过程中，即使入水单宽流量相同，抗冲能力差的地方冲坑也较深，抗冲能力强的地方冲坑较浅，因此，冲坑深度满足如下目标函数关系:

$$T_s = f(x, y, z). \tag{3}$$

首先，根据工程设计要求和需要获得适宜的冲刷深度分布函数，而冲刷深度取决于底部荷载特性，河床底部荷载分布$p(x)$满足如下目标:

$$p < p_{\max}. \tag{4}$$

$P_{\max}$为底板能承受最大冲击动压. 底部荷载需要满足如下目标函数关系:

$$p = f(v, b_0, \theta, h_0, h_p), \tag{5}$$

式中，p表示河床底部荷载，v表示挑射水流速度，θ表示

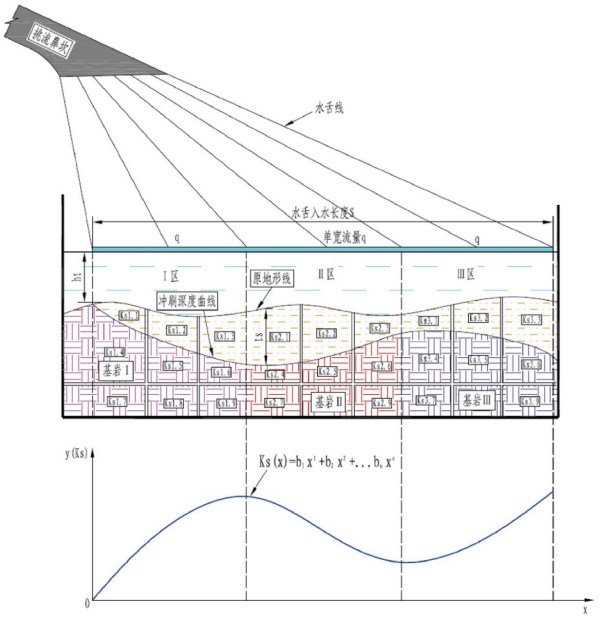


图 4 (网络版彩图)自适应性冲坑特性研究思路

Figure 4 (Color online) Conceptual methodology for investigating self-arising scour characteristics.

射流角度, h_0表示水垫深度, h_p表示两股水流碰撞高度. 底部荷载特性取决于入水单宽流量分布, 入水单宽流量分布取决于挑坎体型. 这就需要建立射流速度、射流角度、水垫深度、碰撞高度与冲击动压之间的关系, 来适应底部能承受的最大的冲击压强, 不至于对底部产生冲击破坏, 这种适应关系称为“自适应性冲击压力分布关系”. 进而获得适宜的入水单宽流量分布曲线, 最后依据入水单宽流量分布曲线通过反问题求解获取挑坎体型参数, 从而完成挑流鼻坎设计优化.

本文自适应方法的技术流程见图5.

3 挑流鼻坎体型自适应优化的实现

3.1 影响因素分析

斜切挑坎应用非常广泛, 其水舌形态主要受底板反弧半径R、左右边墙半径R_1和R_2及底板斜切角φ影响, 体型及水舌形态如图6所示. 选定采用挑流消能的溢洪洞, 溢洪洞宽度为B, 与下游河道轴线交角为ψ, 挑坎采用常规斜切挑坎, 底板反弧半径为R, 两侧边墙半径分别为R_1, R_2, 两侧挑角为θ_1, θ_2, 底板斜切角为φ, 斜切挑坎两侧水舌挑距分别为L_1, L_2, 因反弧边墙造成的两侧水舌偏转角分别为α_1, α_2, 平面位置上挑坎两侧距岸边垂直距离分别为W_1, W_2, 水舌落点与岸边垂直距离分别为W'_1, W'_2, 入水长度为S.

3.1.1 挑距

挑距的计算公式为[18]

$$L_0=\zeta^2 H\left(1\pm\sqrt{1+\frac{H_k-h_t}{\zeta^2 H\sin^2\theta}}\right)\sin 2\theta, \tag{6}$$

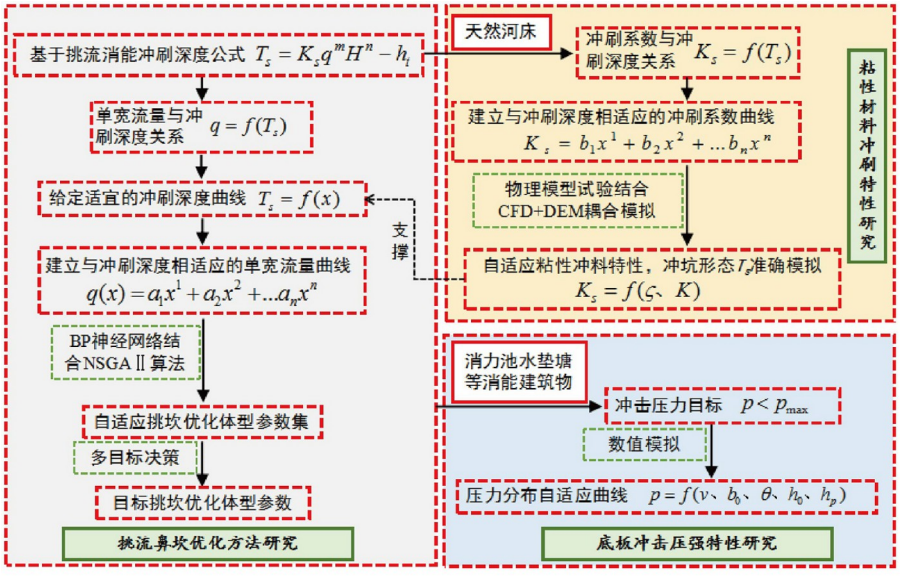


图 5 (网络版彩图)自适应方法技术流程

Figure 5 (Color online) Technical workflow of the adaptive methodology.

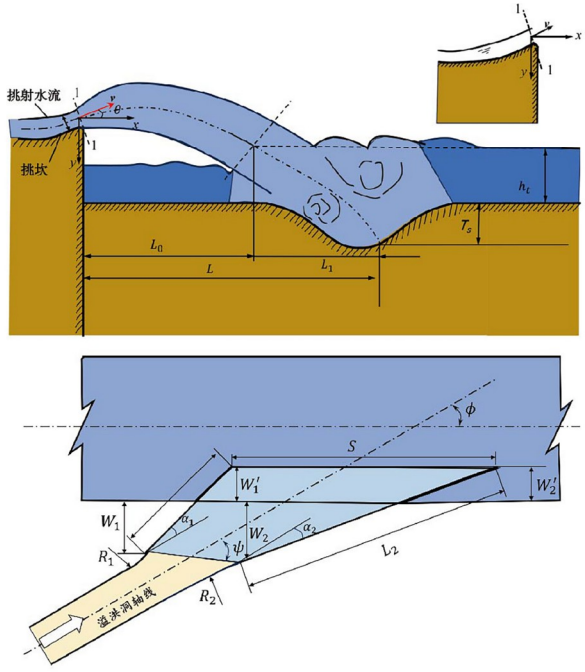


图 6　(网络版彩图)挑流消能水舌示意图

Figure 6　(Color online) Schematic of the ski-jump bucket energy-dissipation jet.

式中, L_0为水平射程; H为库水位至挑坎顶部高差; θ为出流速度与水平方向夹角, 即挑射角度, 角度为正公式取+号, 角度为负公式取−号; H_k为挑坎高度; h_t为冲坑后的下游水深; ζ为流速系数, 根据长江流域规划办公室原型观测及模型试验资料得出的经验公式[18]:

$$\zeta=\sqrt[3]{1-\frac{0.055}{\sqrt{K_E}}},\ K_E=\frac{q}{\sqrt{gH^3}}, \tag{7}$$

式中, q为单宽流量, K_E为流能比, g为重力加速度.

3.1.2　水舌落点

挑坎两侧水舌挑距计算公式分别为

$$L_1=\zeta^2H\left(1+\sqrt{1+\frac{H_k-h_t}{\zeta^2H\sin^2\theta_1}}\right)\sin2\theta_1, \tag{8}$$

$$L_2=\zeta^2H\left(1+\sqrt{1+\frac{H_k-h_t}{\zeta^2H\sin^2\theta_2}}\right)\sin2\theta_2. \tag{9}$$

由图6平面几何位置关系可得

$$W'_1=L_1\sin(\phi+\alpha_1)-W_1, \tag{10}$$

$$W'_2=L_2\sin(\phi+\alpha_2)-W_2. \tag{11}$$

根据图6几何位置关系, 当水舌弧长与岸边基本平行时, 计算理论入水弧长如下:

$$S=\frac{R_1(1-\cos\alpha_1)+R_2(1-\cos\alpha_2)+B}{\sin\varphi}+\frac{\pi[L_1(\alpha_1+\theta_k)+L_2(\alpha_2+\theta_k)]}{180^\circ}. \tag{12}$$

水舌出挑坎后会扩散, θ_k一般约5°.

由图7可知, 左侧偏转角越小, 右侧偏转角越大越容易落入最佳落实区.

3.1.3　入水弧长

图8为两侧挑角、偏转角分别为15°、33.5°和10°、5°时弧长变化曲线. 可以看出, 入水弧长随着挑角增加呈现先增大后减小趋势, 随着偏转角的增加呈指数型增长, 表明偏转角对弧长影响因素远大于挑角, 即左右边墙转弯半径R_1, R_2. 同时入水弧长随着斜切角(斜切坎与洞轴线夹角)增大而逐渐减小趋于平缓, 斜切角大于一定值后对弧长影响迅速减弱.

实际水利工程中, 为了使挑坎适应不同地形地貌, 同时落水位置更加适宜精确, 有时需要设计更为复杂的挑坎体型, 如扭面斜切挑坎、“偏转型”斜切挑坎等异形挑坎, 这些异型挑坎的水舌落水形状有的类似一字型, 有的类似月牙形, 仅采用理论分析很难完全满足设计要求, 这就需要采用更为精确、智能的优化方法.

3.2　挑坎体型智能反演优化算法

NSGA-II算法的优越性在于, 它采用了快速非支配排序算法, 计算复杂度比之前的NSGA大大地降低, Pareto解集稳定性好, 分布均匀, 能保证种群的多样性, 同时具有运行速度快、解集的收敛性好的优点. 研究表明[19~22], 相比大多数其他多目标算法, NSGA-II算法得到的最优解集(Pareto解)范围更加固定, 计算更加深入, 结果更稳定, 如张晓萍等人[19]对比了多目标粒子群优化算法MOPSO和NSGA-II算法在异形复合挑坎多目标求解方面的应用, 表明NSGA-II算法在求解类似挑坎多目标参数方面结果更精确稳定, 综合分析本文采用NSGA-II算法对挑坎参数进行反演计算, 来求解Pareto最优解.

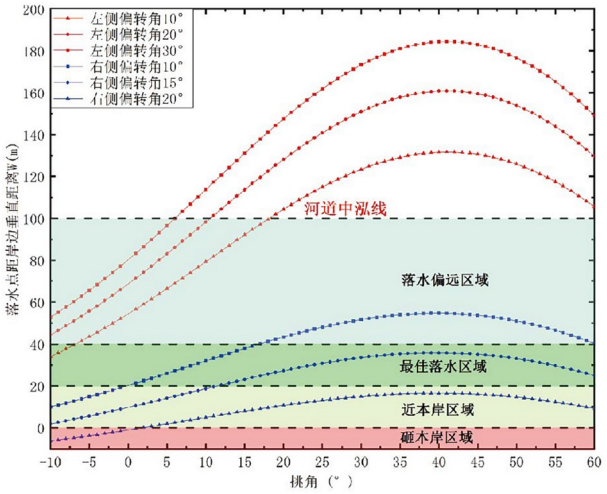


图 7 (网络版彩图)挑流消能水舌示意图

Figure 7 (Color online) Schematic of the ski-jump bucket energy-dissipation jet.

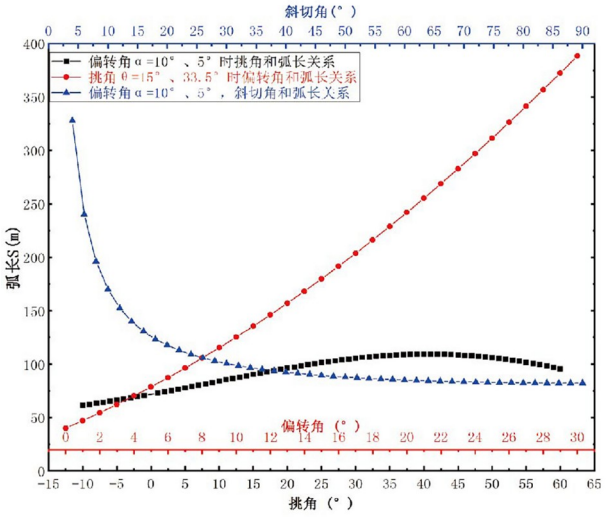


图 8 (网络版彩图)挑角、偏转角与弧长关系曲线

Figure 8 (Color online) Relationship curve of bucket angle, deflection angle, and arc length.

3.2.1 NSGA-II算法

在多目标优化问题中，首先需要确定非支配解集，即不受其他解支配的解集合．如果在该解集中只存在一个解，其就被定义为最优解；然而，若存在多个解，则在给定目标条件下需要进行选择，这些就被称为“Pareto解”，代表了在多个目标下相对优越的解决方案，表示如下: 有N个目标，$f_1(X_i), f_2(X_i), f_3(X_i), \cdots, f_n(X_i)$, $X = X_1, X_2, \cdots, X_m$, X是各函数中的变量，使各目标均取极大值，有以下内容:

$$\max = \left\{f_1(X_i), f_2(X_i), \ldots, f_N\left(X_i | x_i \in x\right),\ i = 1, 2, \ldots, m\right\}. \tag{13}$$

这个问题的非劣解X_i^H表示在所有情况下都找不到一组X_i值，使得对所有的$f_i(X_i)$ (i = 1, 2, ⋯, N)，都有$f_i(X_i) = X_i^H$．即找不到一个或一组X_i值使 $f_i(X-i) > f_j(X_i^H)$，或者$f_i(X_i) > f_j(X_j^H)$，则X_i^H就是非劣解．若另有一组X_i值，使得$f_i(X_i) = f_j(X_i^H)$，则这组X_i值亦为非劣解. NSGA-II算法的流程见图9.

3.2.2 多目标方法决策

图10展示了多目标决策方法的研究路线．首先选定需要优化的挑坎作为研究对象，初步确定挑坎参数，如挑角、反弧半径、偏转角、左右边墙半径等作为控制变量，得到与之相对应的挑流特性值，如挑距、入水弧长、水舌偏转角度、单宽流量等.

随后，采用正交试验法进行试验设计，利用数值模拟或物理模型方法进行计算，以获取挑流特性的初始数据样本集.

用BP神经网络方法进行数据集扩充，以第一步中确定的挑坎参数特性为输入层，挑流特性参数为输出层，通过BP神经网络进行机器学习，并对学习效果进行评价; 为保证反演精度，对初始数据样本库进行进一

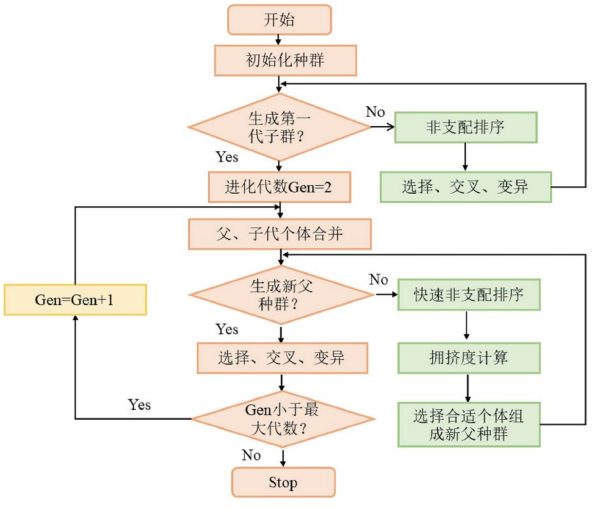


图 9 (网络版彩图) NSGA-II算法流程

Figure 9 (Color online) Flowchart of the NSGA-II algorithm.

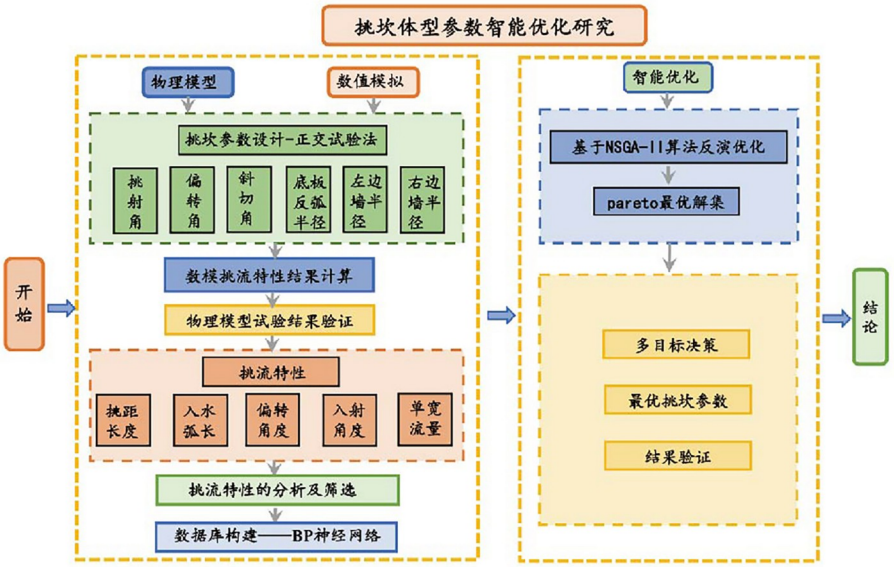


图 10　(网络版彩图)多目标决策路线

Figure 10　(Color online) Methodological framework for multi-objective decision-making.

步扩充, 并再次进行机器学习, 并对学习效果再次进行评价.

利用NSGA-II多目标算法对扩充的数据集进行优化, 根据实际工程挑流消能特性建立多目标函数, 再设置约束条件, 用NSGA-II算法进行智能优化, 得到最优解集范围和与之相对应的挑坎体型参数.

最后, 利用多目标决策方法得出最优挑坎参数.

多目标决策目的是科学、合理地优化和确定多个相互矛盾的目标, 在多目标决策过程中, 一些方案可以相互比较和淘汰, 这些方案被称为劣解, 另外一些方案则无法相互比较和淘汰, 即使在多目标考虑下也不可称为最佳解, 而是被归类为“非劣解”[19].

要想得到优化挑坎体型的决策结果, 首先必须获得不同因素的影响权重, 也就是数据归一化处理.

(1) 归一化: 归一化是一种将物理量的数值转换为无量纲相对值的处理方法, 为确保数据值的大小不影响总分, 需要对数据进行归一化处理. 例如, 当两种目标函数的指向相反时, 一个可能越大越好(如水舌弧长), 而另一个则可能越小越好(如单宽流量). 因此, 通过采用极差变换法, 可以将各项指标转换为相同的度量尺度, 以利于后续的加权处理和应用.

对于水舌弧长目标函数f_1, 取$x_i^* = \max x_{ij}$, $x'_i = \min x_{ij}$, 则有

$$y_{ij} = \frac{x_{ij} - x'_i}{x_i^* - x'_i}. \tag{14}$$

对于单宽流量目标函数f_2, 取$x_i^* = \min x_{ij}$, $x'_i = \max x_{ij}$, 则有

$$y_{ij} = \frac{x'_i - x_{ij}}{x'_i - x_i^*}. \tag{15}$$

经过极差变换处理后, 指标值范围均为[0, 1]. 即最优值为1, 最劣值为0.

(2) 线性加权: 归一化后权重需进行线性加权或非线性加权, 针对本文中的挑坎体型参数优化问题, 将对入水弧长和单宽流量进行权重分配, 并采用组合式的线性加权方法:

$$u_i = \sum_{j=1}^{2} \omega_j y_{ij}, \tag{16}$$

其中, ω_j为权重系数, u_i为综合值.

(3) 排序: 组合加权后, 取最大值进行排序, 公式如下:

$$u_{\max} = \max u_i \ (1 \leqslant i \leqslant m), \tag{17}$$

其中, m值为优化后的体型个数.

(4) 决策结果: 根据加权结果, 得出排序靠前的目标解作为我们需要的优化解.

3.3 直线型水舌入水挑坎反演优化

某高坝工程泄洪系统由2条溢洪洞和1条放空洞组成, 均布置在右岸, 洞轴线与下游河道夹角约30°, 单条溢洪洞最大泄量均为4406.38 m^3/s; 放空洞最大泄量2608.92 m^3/s.

出口河道狭窄, 初步确定采用的挑坎体型为斜切式扩散挑坎, 理想的入水形状是“直线形状”, 尽量靠近本岸入水, 水舌效果见图11.

挑坎优化目标主要有三点: 一是落点位置尽量靠近本岸; 二是直线水舌最长; 三是下泄入水单宽流量q分配均匀. 用数学公式表示如下.

(1) 位置落点f_1:

$$f_1 = \begin{cases} x_{\min} \leqslant x \leqslant x_{\max}, \\ y_{\min} \leqslant y \leqslant y_{\max}, \end{cases} \tag{18}$$

式中, f_1表示位置落点目标, 可通过约束条件实现.

(2) 水舌入水宽度最大目标f_2:

$$f_2 = \max\{S_n\},\ n = 1, 2, \dots, \tag{19}$$

其中, S_n为第n个的挑坎体型所对应的水舌入水弧长.

(3) 单宽流量分布均匀目标f_3:

$$f_3 = \min\{\sigma_n\},\ n = 1, 2, \dots, \tag{20}$$

其中, σ_n为第n个的挑坎体型所对应的单宽流量均方根.

对于目标f_3要说明的是, 如图12为某挑坎体型入水单宽流量分布示意图, 其单宽流量分布函数$q(x)$呈波动起伏状, 可以记为

$$q(x) = a_1x_1 + a_2x^2 + \cdots + a_nx^n. \tag{21}$$

在本工程中, 根据河床地质特性, 希望单宽流量分配越均匀越好, 即$q(x)$接近常数, 因此在这里单宽流量q分配均匀程度用均方差σ表示, 均方差σ越小表示单宽流量分配越均匀.

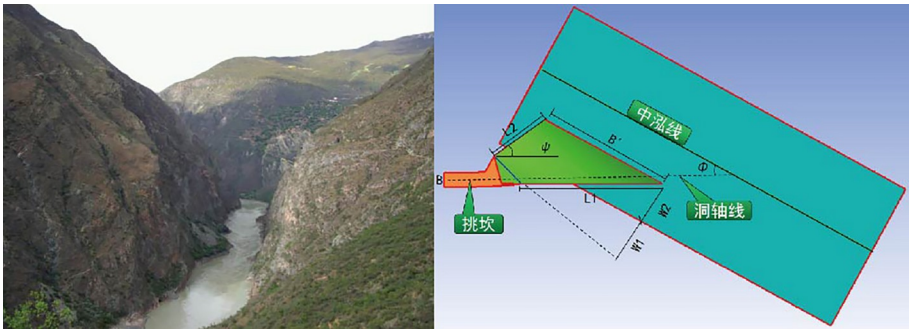


图 11 (网络版彩图)适宜水舌落水位置
Figure 11 (Color online) Optimal jet trajectory impact location.

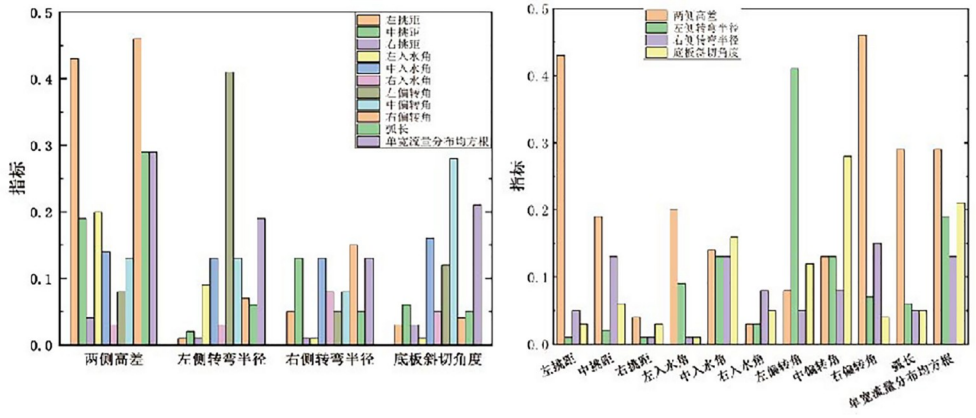


图 12 (网络版彩图)挑坎体型参数与水力特性指标权重
Figure 12 (Color online) Weights of ski-jump bucket geometric parameters and hydraulic performance indices.

对于本工程窄深河谷特点入水弧长和单宽流量分配同等重要，令水舌入水宽度及单宽流量分配权重均为0.5进行组合式的线性加权, 决策结果如下.

NSGA-II算法和Pareto解集如图13. 其对应的入水弧长为102.6 m, 单宽流量均方差为15.8, 对应体型参数为两侧高差19.9 m, 左侧转弯半径102.9 m, 右侧转弯半径480.3 m, 底板斜切角度137.7°. 根据上述决策结果选取的挑坎体型参数进行试验和数值验证，水舌基本呈直线型分布，扩散效果较好，单宽流量峰值分布在30~40 m^2/s之间波动，分布较为饱满，分布效果较好，达到了优化目标(图14).

3.4　月牙型水舌入水挑坎反演优化

某高坝工程岸边溢洪道具有“高水头，大泄量”的特点, 泄洪水头约170 m, 最大下泄流量6060 m^3/s.

该工程消能区主要特点是横向上河道消能区范围较大，纵向上在下游河道不远处设有交通大桥等永久性建筑物，这就需要入水落水点尽量沿横向伸展，同时又希望能达到“入水弧长较长，流量分配均匀”这样才能有较好的消能效果，优化目标为“月牙形”入水形状. 这样既增加了入水弧长，同时又达到了想要的水舌落点. 挑坎初步设计形态如图15所示.

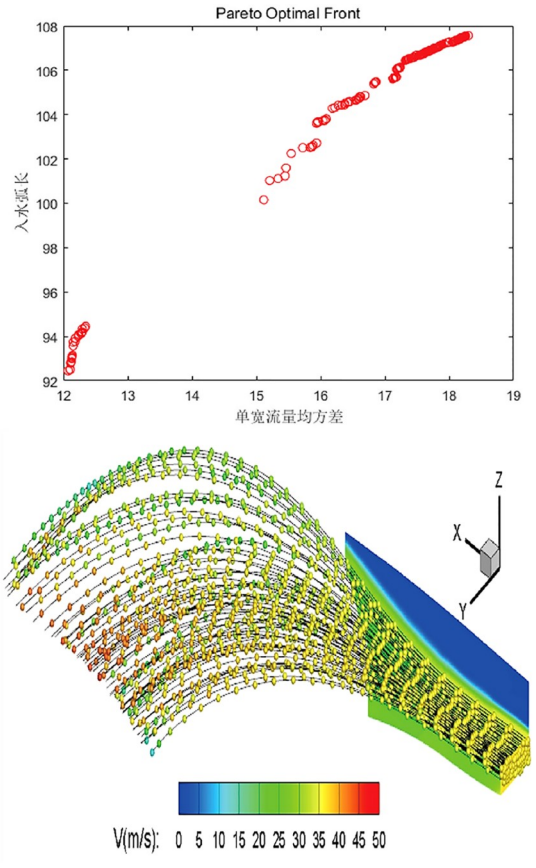


图 13　(网络版彩图) NSGA-II算法Pareto解集与直线形水舌

Figure 13　(Color online) Pareto solution set from the NSGA-II algorithm and the rectilinear jet.

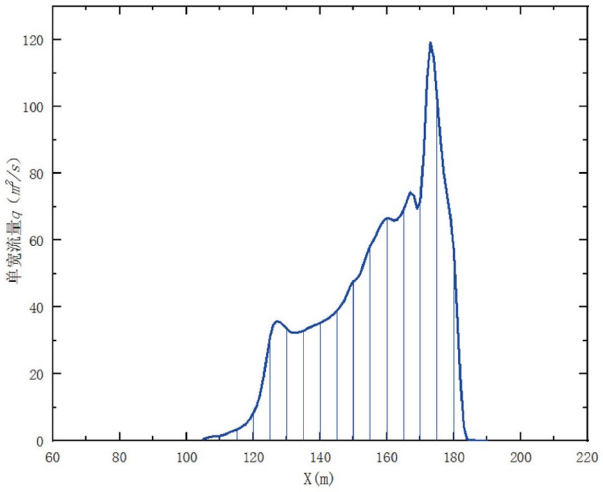


图 14　(网络版彩图)挑坎优化体型入水单宽流量

Figure 14　(Color online) Unit discharge at impact of the optimized bucket geometry.

对于本工程来说，假设入水弧长和单宽流量分配同等重要，令水舌入水弧长权重为0.5，单宽流量分布均方根权重为0.5，进行组合式的线性加权，决策结果如下.

NSGA-II算法和Pareto解集如图16. 其对应的入水宽度为85.73 m，单宽流量均方差为64.34，对应体型参数为反弧半径71.65 m, 左侧转弯半径121.42 m, 右侧转弯半径350 m，底板斜切角度158.1°. 挑坎体型参数进行模型验证，水舌效果如图17所示：水舌基本呈月牙形分布，整体扩散效果较好，单宽流量主要分布在40~80 m^2/s之间波动，入水单宽分布相对平均，达到了优化目标.

4　结论与讨论

传统挑坎优化中多采用正向求解，且挑坎优化与水下消能防冲特性难以直接建立联系，未体现消能防冲优化问题的系统性和协调性，本文针对该问题，基于自适应性理论，采用智能反演算法和多目标决策寻

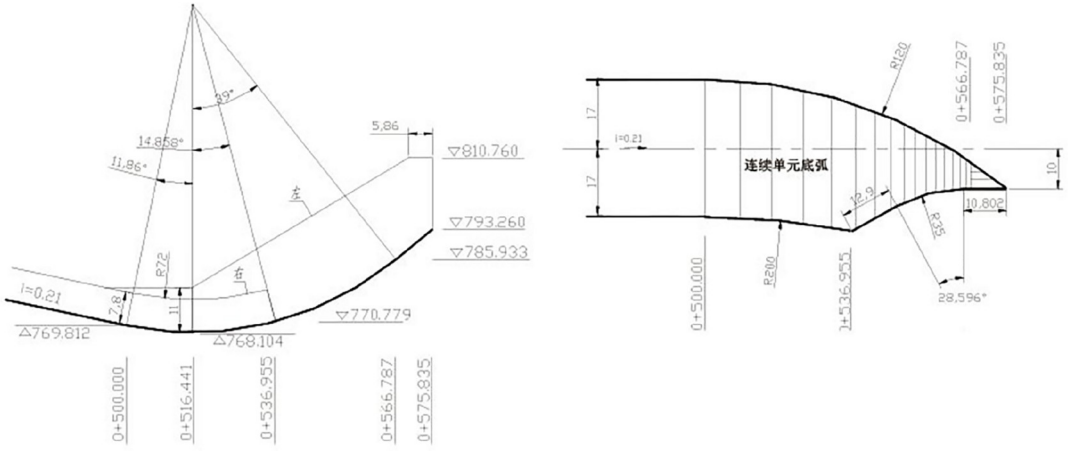


图 15 溢洪道出口鼻坎初步设计体型

Figure 15 Preliminary design geometry of the spillway outlet bucket.

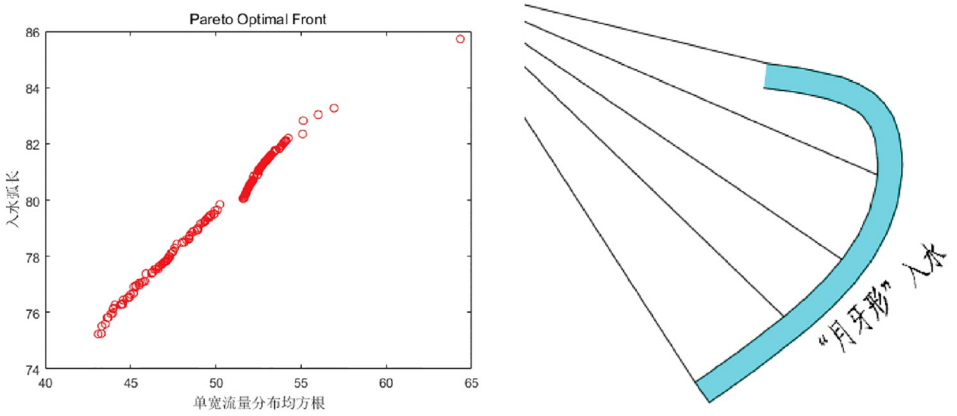


图 16 (网络版彩图) NSGA-II算法Pareto解集与月牙形水舌

Figure 16 (Color online) Pareto solution set from the NSGA-II algorithm and the crescent-shaped jet.

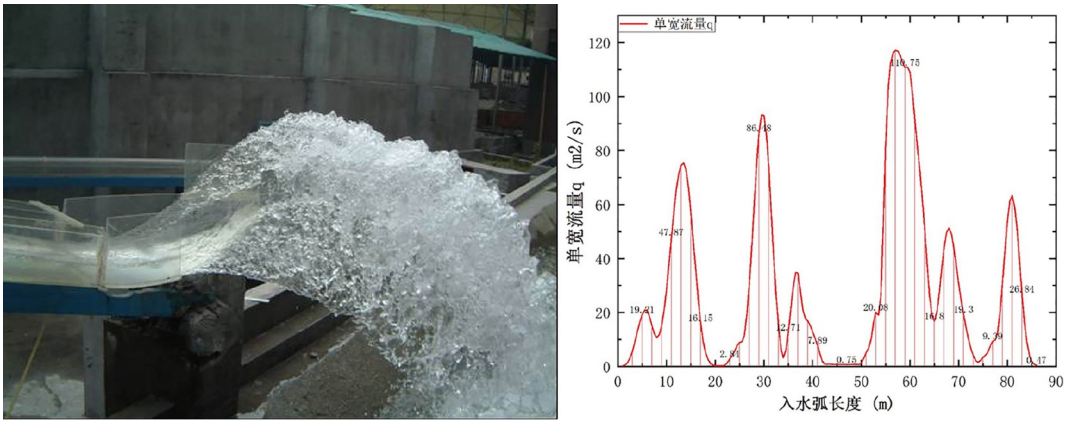


图 17 (网络版彩图)月牙型水舌挑坎效果及单宽流量分布

Figure 17 (Color online) Pareto solution set from the NSGA-II algorithm and the crescent-shaped jet.

优方法进行了挑坎体型优化研究, 结论如下.

(1) 通过对影响挑射水流消能防冲效果的因素进行分析, 采用“逆向思维”, 根据给定的优化目标如设计要求的冲坑深度, 确定底部荷载分布, 进而得到适宜的入水单宽流量曲线, 最后通过智能反演映射对应算法和多目标决策寻优算法, 得出想要的符合设计要求的挑坎体型参数. 基于自适应性理论提出了一套自适应挑坎优化方法, 即目标→“自适应性”曲线→优化结果的优化路径.

(2) 针对直线型和月牙形水舌入水形态的挑坎水力特性及其影响因素开展了深入系统的分析, 根据水舌形态变化与挑坎体型参数的对应关系, 通过反问题求解的方法获得了挑坎优化体型参数范围, 明确了挑坎优化方向, 为设计优化提供科学依据.

(3) 采用BP神经网格和NSGA-II算法相结合的方法实现反演优化. 首先确定单宽流量目标, 将BP神经网络生成的挑流特性数据集作为样本, 然后通过NSGA-II多目标算法得到Pareto最优解集, 最后进行多目标决策, 依据权重因素求解最优挑坎参数.

(4) 以“直线型”和“月牙形”入水形式为研究对象, 对较为复杂的挑坎进行了验证优化, 研究表明, 以模型试验及数值模拟为基础, 用BP神经网络进行机器学习, 最后用NSGA-II算法进行智能反演优化的方法是可行的, 相比传统模型试验体型优化更加准确, 本文工作也为今后开展泄洪消能设计的智能化和数字化提供了技术支持.

当然, 这种“自适应挑坎智能反演优化方法”同样适用于多股来流同时泄洪的情况, 除挑坎体型参数外, 还需要考虑各泄水建筑物之间的距离、流量分配、挑射角度等.

参考文献

1 Dai H C, Xu W L. Research flood releasing safety of flood discharge structure with high-head & large-discharge (in Chinese). J Hydroelectr Eng, 2009, 35: 14–17 [戴会超, 许唯临. 高水头大流量泄洪建筑物的泄洪安全研究. 水力发电学报, 2009, 35: 14–17]

2 Wang J M, Yang H. Research on key technology of flood discharge and energy dissipation for Jinping Ⅰ Hydropower Station (in Chinese). Yangtze River, 2017, 48: 85–90 [王继敏, 杨弘. 锦屏一级水电站泄洪消能关键技术研究. 人民长江, 2017, 48: 85–90]

3 Wang K Z. Summary on the design of flood discharge and energy dissipation structures in China and abroad (in Chinese). Water Power, 2020, 46: 68–72 [王康柱. 国内外泄洪消能建筑物设计综述. 水力发电, 2020, 46: 68–72]

4 Sun S K. Summary of research on flood discharge and energy dissipation of high dams in China (in Chinese). J China Inst Water Resour Hydropower Res, 2009, 7: 249–255 [孙双科. 我国高坝泄洪消能研究的最新进展. 中国水利水电科学研究院学报, 2009, 7: 249–255]

5 Tong X W. Summary on the development of hydraulic engineering and hydraulics in China (in Chinese). Water Power, 2004, 30: 69–73 [童显武. 中国水工水力学的发展综述(续). 水力发电, 2004, 30: 69–73]

6 Wang A L, Deng Z G. Development and challenges of super high dams in China and other countries (in Chinese). Water Power, 2015, 41: 45–47 [王爱玲, 邓正刚. 我国超级高坝的发展与挑战. 水力发电, 2015, 41: 45–47]

7 Liu N. Problems and challenges on flood control for large rivers (in Chinese). J Hydraul Eng, 2018, 49: 19–25 [刘宁. 大江大河防洪关键技术问题与挑战. 水利学报, 2018, 49: 19–25]

8 Liang S Y. Discussion on flip-bucket energy dissipation of high-dam spillways (in Chinese). Water Resour Plan Des, 2017, 164: 64–66 [梁尚英. 高坝溢洪道挑流消能探讨. 水利规划与设计, 2017, 164: 64–66]

9 Cui G T, Lin J Y, Liang X R. Study on the action forces of arch-dam spillway nappe on the riverbed and their effects (in Chinese). J Hydraul Eng, 1985, 8: 58–63 [崔广涛, 林继镛, 梁兴蓉. 拱坝溢流水舌对河床作用力及其影响的研究. 水利学报, 1985, 8: 58–63]

10 Zhang L, Zhang J, Guo Y, et al. Numerical simulation of the hydraulic performances and flow pattern of swallow-tailed flip bucket. Math Problems Eng, 2020, 2020: 1–14

11 Palermo M, Pagliara S. D-jump in rough sloping channels at low Froude numbers. J Hydro-Environ Res, 2017, 14: 150–156

12 Wu J, Licheng C, Ma F, et al. Hydraulics of crest spillway with large unit discharge and low Froude number. J Hydrodyn, 2015, 27: 242–247

13 Yang S L. Hydraulic design of a single-arc, obliquely cut, double-diffusion bucket energy dissipator (in Chinese). Yangtze River, 2004, 35: 20–21 [杨首龙. 单圆弧斜切双扩散坎消能工的水力设计. 人民长江, 2004. 35: 20–21]

14 Liu X L, Zhang W Z. The investigation of dynamic characteristics of jet-flow in open-air (in Chinese). J Hydroelectr Eng, 1988, 7: 46–54 [刘宣烈, 张文周. 空中水舌运动特性研究. 水力发电学报, 1988, 7: 46–54]

15 Liu S H, Qu B. Experimental investigation on the section configuration of jumping nappe (in Chinese). Eng J Wuhan Univ, 2004, 37: 1–3 [刘士和, 曲波. 挑流水舌断面形态的演化. 武汉大学学报(工学版), 2004, 37: 1–3]

16 Ning J H, Ning L Z, Ning B B, et al. Characteristics of the trajectory nappe and its influence (in Chinese). J Eng Heilongjiang Univ, 2017, 8: 1–6 [宁景昊, 宁利中, 宁碧波, 等. 挑流水舌特性及其影响. 黑龙江大学工程学报, 2017, 8: 1–6]

17 Hojjati S H, Salehi Neyshabouri S A A. The objective design of triangular bucket for dam's spillway using Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II: NSGA-II. Sci Iranica, 2017, 24: 19–27

18 Wu C G. Hydraulics, 5th ed. (in Chinese). Beijing: Higher Education Press, 2016 [吴持恭. 水力学, 第5版. 北京: 高等教育出版社, 2016]

19 Zhang X P, Zhang J M. BP neural network-based study on inversion of shape parameter of composite flip bucket (in Chinese). Water Resour Hydropower Eng, 2022, 53: 138–147 [张晓萍, 张建民. 基于BP神经网络的复合型挑坎体型参数反演研究. 水利水电技术(中英文), 2022, 53: 138–147]

20 Yin D. Improvement and application of multi-objective particle swarm optimization algorithm (in Chinese). Dissertation for Master's Degree. Yangzhou: Yangzhou University. 2021 [尹丹. 多目标粒子群优化算法的改进与应用. 硕士学位论文. 扬州: 扬州大学. 2021]

21 Cui Q Y. The study on multi-objective FJSP based on improved NSGA-II (in Chinese). Dissertation for Master's Degree. Kunming: Kunming University of Science and Technology. 2015 [崔庆勇. 基于改进NSGA-II算法的多目标FJSP研究. 硕士学位论文. 昆明: 昆明理工大学. 2015]

22 Lu Y X. Research on improvement and application of NSGA-II multi-objective optimization method (in Chinese). Dissertation for Master's Degree. Taiyuan: Taiyuan University of Technology. 2017 [路艳雪. NSGA-II多目标优化算法的改进及应用研究. 硕士学位论文. 太原: 太原理工大学. 2017]

An adaptive optimization method for flip bucket geometry in high-dam flood discharge and its application

ZHANG JianMin[1,2], XU WeiLin[1,2] & LEI Gang[1,3]

[1] *State Key Laboratory of Hydraulics and Mountain River Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China*
[2] *College of Water Resource and Hydropower, Sichuan University, Chengdu 610065, China*
[3] *Sichuan Water Resources Planning and Research Institute, Chengdu 610072, China*

Adopting the perspective of systemic coordination in hydraulic energy dissipation and scour prevention systems, this study introduces adaptive thinking from biology to address the challenges of energy dissipation and scour control in flip bucket hydraulics. By employing the attributes of "system" and "coordination" derived from adaptation theory, it analyzes the interrelationships among key factors influencing the geometric design of flip buckets. This work represents a departure from conventional forward-design optimization approaches by proposing a self-adaptive optimization methodology for flip bucket geometry. The proposed method aims to achieve comprehensive techno-economic optimum in energy dissipation and scour prevention design. Based on topographic and geological conditions of the energy dissipation zone and the hydraulic characteristics of the ski-jump jet, it uses allowable impact load in the scour area as a suitability criterion, with minimization and spatial optimization of unit discharge at impact as the starting point. Artificial neural networks and the fast non-dominated sorting genetic algorithm II (NSGA-II) are employed to inversely derive an optimized set of bucket geometric parameters. Guided by this intelligent inversion framework, multi-objective optimization is performed concerning energy dissipation efficiency, scour control, and protection measures. By integrating ski-jump hydraulics with multi-objective decision-making and small-sample learning, the method ultimately produces bucket shape parameters that match the desired performance targets. This study applies the proposed method to energy dissipation and scour prevention in high-dam projects. Two bucket configurations are introduced: a large obliquely cut and twisted flip bucket combined with a plunge structure that produces a rectilinear jet entry, and an eagle-beak-type bucket that generates a rolled crescent-shaped jet. Both designs achieve the optimization objective of enhanced scour prevention. An adaptive theoretical and technical framework has been established for flip bucket design, resulting in higher energy dissipation efficiency, reduced local scour, simplified protective measures, and lower project costs. The findings provide scientific support for the optimization of ski-jump energy dissipation and scour protection design, and can be extended to other types of energy dissipation structures.

self-adaptive optimisation method, flip bucket, numerical simulation, multi-objective optimisation, NSGA-II

doi: 10.1360/SST-2025-0431