

DOI: 10.20040/j.cnki.1000-7709.2026.20250402

均匀及不均匀步长台阶式溢洪道水流自掺气研究

武英豪^{1,2}, 黄玉上^{1,2}, 孙梦梦^{1,2}

(1. 黄河勘测规划设计研究院有限公司, 河南 郑州 450003;
2. 水利部黄河流域水治理与水安全重点实验室(筹), 河南 郑州 450003)

摘要: 为研究台阶式溢洪道水流自掺气的发生机理及明确步长的不均匀布置对水流自掺气的影响, 采用计算流体力学的方法对台阶式溢洪道上的水汽两相流进行数值模拟, 包括凹形、凸形、随机形和半均匀形台阶方案。结果表明, 相较于传统均匀台阶方案, 凹形、凸形台阶方案不适宜水流自掺气的快速发生, 初始掺气点位置分别后延 6.4%、7.0%; 随机形台阶方案虽能促进湍流边界层发展, 但其随机步长分布的不确定性会引发显著水面波动; 半均匀形台阶方案在保证流态相对稳定的前提下, 能大幅前移初始掺气点的位置(前移 18.8%), 具有更广阔的应用前景。

关键词: 台阶式溢洪道; 不均匀步长; 水流自掺气; 数值模拟

中图分类号: TV651.1; TV135.2

文献标志码: A

文章编号: 1000-7709(2026)01-0143-04

Research on Self-aeration of Stepped Spillways with Uniform and Non-uniform Step Lengths

WU Ying-hao^{1,2}, HUANG Yu-shang^{1,2}, SUN Meng-meng^{1,2}

(1. Yellow River Engineering Consulting Co., Ltd., Zhengzhou 450003, China;

2. Key Laboratory of Water Management and Water Security for Yellow River Basin,

Ministry of Water Resources (Under Construction), Zhengzhou 450003, China)

Abstract: Computational fluid dynamics (CFD) method was used to numerically simulate the two-phase flow on stepped spillways to investigate the initiation mechanism of self-aeration in stepped spillways and clarify the impact of step length on the self-aeration characteristics of stepped spillways with non-uniform step lengths, including concave, convex, random, and semi-uniform step length configurations. Compared with the traditional uniform steps scheme, the results show that both concave and convex configurations prove unsuitable for rapid initiation of self-aeration, leading to a 6.4% and 7.0% posterior shift in the aeration inception points. Although random step configuration promotes the development of turbulent boundary layers to some extent, the inherent uncertainty in their step length arrangements induces excessive surface fluctuations. The semi-uniform step scheme can significantly move forward the position of the initial aeration point (by 18.8%) while ensuring a relatively stable flow state, which has a broader application prospect.

Key words: stepped spillway; non-uniform step length; self-aeration; numerical simulation

1 引言

当表面与大气相接的高流速水流通过泄水建筑物时, 会将空气从水面裹挟进水流中, 以气泡形式随流运动, 逐渐发展为乳白色的水汽混合体流动, 这种水流称为水汽两相流或掺气水流, 这种现象称为水流自掺气^[1-2]。对于空气掺入水流的具

体过程, 观点各异, 目前较流行湍流边界层理论^[3]。台阶式溢洪道与光滑溢洪道水流自掺气过程的不同之处在于, 底部台阶既增加了溢流面的不平整度, 又促使底部水流陷落于台阶空腔内产生漩涡, 两者均加剧了水流湍动的剧烈程度, 促使湍流边界层迅速向水面发展, 初始掺气点位置大幅前移, 防止溢洪道壁面发生空蚀破坏, 并耗散更多的水体能量, 其自掺气典型发展过程见图 1。

收稿日期: 2025-03-06, 修回日期: 2025-04-17, 接受日期: 2025-04-28

作者简介: 武英豪(1997-), 男, 硕士、工程师, 研究方向为水工水力学, E-mail: 1126392403@qq.com

通讯作者: 孙梦梦(1989-), 男, 高级工程师, 研究方向为水利规划, E-mail: 524031835@qq.com

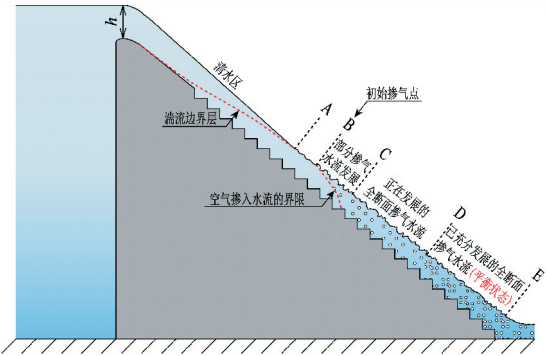


图 1 台阶式溢洪道自掺气发展过程示意图
Fig. 1 Schematic of self-aeration evolution on stepped spillway

不均匀台阶式溢洪道是通过台阶高度或步长的不均匀布置,来实现自身体型的变化,进而影响水流的能量耗散。ZUHAIRA A A 等^[4]发现合理的不均匀布置可大幅前提初始掺气点的位置;武英豪等^[5]提出一种短台阶与长台阶交替布置的方案(步长比为 1 : 3),形成了半均匀形台阶结构,可在每组台阶上方诱导生成连通的回旋涡流区域,有助于推动湍流边界层的快速发展。不均匀台阶式溢洪道保留了传统台阶的直角形状,且未增设辅助消能工,具有与传统台阶式溢洪道相似的水力特性,具有更广阔的工程应用前景。本文旨在研究不同步长组合形式对台阶式溢洪道水流自掺气的影响,以期工程实践提供理论指导。

2 试验方案与方法

所有计算模型均采用固定高度 $h=1\text{ m}$ 的 25 级台阶结构,确保溢洪道内水流充分发展。入流边界条件采用宽顶堰形式,坐标系以水库底部起点为原点, x 轴沿水流方向(上游至下游), y 轴垂直向上。CHANSOON H 等^[6-7]发现当 $h_k/h \geq 1.5$ (h_k 为矩形明渠临界水深)时,水流从跌落流向滑行流过渡。本试验工况设定为 $h_k/h=2.0$,处于滑行流充分发展的稳定区间,可规避过渡流态的随机性干扰。

设定两种试验方案:①均匀步长方案。在坡度 $33.69^\circ \sim 15.95^\circ$ 范围内设置 7 种均匀步长体型(步长 L 分别取 1.25、1.5、2.0、2.2、2.5、3.0、3.5 m),全局模型结构见图 2。②非均匀步长方案。

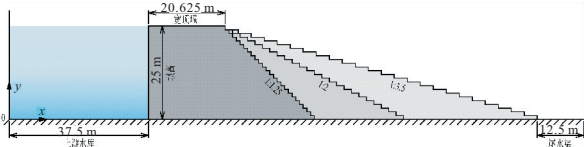


图 2 计算模型结构示意图
Fig. 2 Schematic of computational model

通过调整台阶步长 L 的分布规律,构建 6 种差异化体型(凹形、凸形、3 种随机形、半均匀形)。

6 种差异化体型的具体参数为:①凹/凸形。凹形体型步长从首级 1 m 线性递增至末级 3.875 m;凸形体型则反向递减(3.875 m $\rightarrow$ 1 m)。②随机形。在固定坡比 1 : 2.2 且标准差与凹/凸形相近的条件下(表 1,表 1 中各型式台阶均采用固定高度 $h=1\text{ m}$; N 为台阶总级数,取为 25),生成 3 组随机步长序列。③半均匀形。根据现有研究成果,长短台阶步长比值为 1 : 3 可诱导生成连通的回旋涡流区域^[5],采用 1、3 m 步长交替排列的周期性结构。

表 1 非均匀台阶溢洪道几何参数
Tab. 1 Geometric parameters of non-uniform stepped spillways

台阶 编号	不同型式台阶的步长 L/m					
	凹形	凸形	随机 1	随机 2	随机 3	半均匀形
1	1.000	3.875	2.0	2.50	1.50	1
2	1.125	3.750	1.5	2.00	3.50	3
3	1.250	3.625	3.0	1.00	1.25	1
4	1.375	3.500	1.0	3.50	2.50	3
5	1.500	3.375	2.5	2.00	3.50	1
6	1.625	3.250	3.5	2.25	1.75	3
7	1.750	3.125	1.0	2.00	2.75	1
8	1.875	3.000	2.5	3.50	2.00	3
9	2.000	2.875	3.0	1.00	1.50	1
10	2.125	2.750	2.0	1.50	2.25	3
11	2.250	2.625	1.5	3.00	1.00	1
12	2.375	2.500	3.0	2.00	3.50	3
13	2.500	2.375	1.0	1.00	1.25	1
14	2.625	2.250	2.5	3.50	2.50	3
15	2.750	2.125	3.5	2.00	3.00	1
16	2.875	2.000	1.0	2.25	1.75	3
17	3.000	1.875	2.5	2.00	2.75	1
18	3.125	1.750	3.0	3.50	2.00	3
19	3.250	1.625	2.0	1.00	2.50	1
20	3.375	1.500	1.5	2.00	1.25	3
21	3.500	1.375	3.0	2.50	1.00	1
22	3.625	1.250	1.0	2.00	3.00	3
23	3.750	1.125	2.5	1.50	1.50	1
24	3.875	1.000	3.0	3.50	3.50	3
平均坡度			1 : 2.2	1 : 2.2	1 : 2.2	1 : 2
标准差	0.884	0.884	0.846	0.846	0.843	1.022

基于 Flow 3D[®] 平台的 RNG $\kappa-\epsilon$ 模型开展 CFD(Computational Fluid Dynamics, CFD)数值模拟。Flow 3D[®] 软件中的掺气模型是根据水体的失稳力和稳定力来控制自由液面掺气是否发生,当失稳力大于稳定力时,掺气即发生。

失稳力 P_i 与湍动能 κ 呈线性相关:

$$P_i = \rho_m \kappa \tag{1}$$

式中, ρ_m 为水气混合相的密度。

稳定力 P_d 由表面张力和重力两部分组成:

$$L_T = \mu_T^{3/4} \kappa / \epsilon \tag{2}$$

$$P_d = \rho_m g_n L_T + \sigma / L_T \tag{3}$$

式中, L_T 为湍动长度; μ_T 为湍流模型常数, 在 RNG κ - ϵ 模型中为 0.084 5; g_n 为垂直于水面的重力分量; σ 为表面张力系数。

网格内单位时间内掺入的气体体积 δ_v 为:

$$\delta_v = \begin{cases} k_{air} A_s [2(P_t - P_d) / \rho_m] & P_t > P_d \\ 0 & P_t \leq P_d \end{cases} \tag{4}$$

式中, k_{air} 为调节的对称系数, 默认为 0.05; A_s 为气液交界面表面积。

掺气模型通过失稳力与稳定力的差值来控制掺入气体量, 而失稳力又与湍动能呈线性相关, 即水流湍动能越大, 掺气越充分, 符合公认的湍流边界层理论^[8]。

采用二维网格, 通过 GCI(Grid Convergence Index)方法验证网格尺寸的合理性^[9], 并结合长度比尺为 1 : 12.5 的物理模型试验进行数据复核^[10]。以 $L = 1.25$ m 方案为例, 选取三种正方形网格尺寸(边长分别为 0.037 5、0.05、0.066 7 m), 分别对应网格 1、2、3。结果表明, 网格 2 计算的竖直断面流速和湍动能的 $G_{GCI_{21}}$ (网格 2 相对于网格 1 的收敛指数)均不超过 5%^[11]。此外, 数模计算与物模试验的初始掺气点位置对比(表 2、图 3)显示, 偏差范围在 1 个台阶内, 验证了计算精度的可靠性。

表 2 初始掺气点物理与数值模型对比

Tab. 2 Physical vs. numerical model comparison of initial aeration point

模型几 何参数	工况 h_k/h	初始掺气点台阶编号	
		数模计算	物模实测
$h = 1$ m $L = 1.25$ m $N = 25$	1.2	9	8
	1.4	9	9
	1.6	10	10
	1.8	10	11
	2.0	11	12

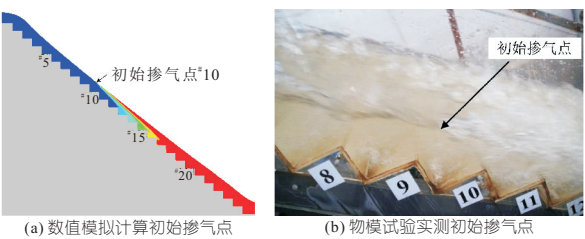


图 3 初始掺气点物理与数值模型对比 ($L = 1.25$ m)

Fig. 3 Physical vs. numerical model comparison of initial aeration point ($L = 1.25$ m)

3 均匀步长台阶式溢洪道水流自掺气研究

绘制各步长均匀台阶方案的整体湍动能发展

云图, 见图 4。水流经过首级台阶时, 湍动开始产生, 其边界层从底板快速向水面发展, 厚度逐渐增加, 最终发展至水面, 形成全断面湍流。步长 1.25 m 至步长 3.50 m 的 7 种均匀台阶方案的边界层与水面的“相交点”分别位于# 10、# 10、# 9、# 9、# 8、# 7、# 7 台阶上方。边界层与水面相交之后形成全断面湍流, 断面湍动能沿程逐渐发展, 由底部至水面大致呈逐渐减小的趋势。

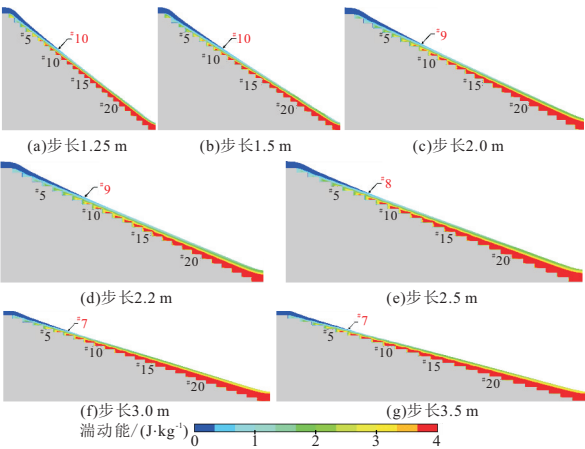


图 4 均匀步长台阶方案水流湍动能沿程发展
Fig. 4 Turbulent kinetic energy on uniform stepped spillways

绘制各步长均匀台阶方案的掺气浓度云图, 见图 5。图 5 中清晰展示了初始掺气点的位置, 以及清水区、部分掺气区和全断面掺气区的分布范围, 各步长均匀台阶方案中水流自掺气的特征参数见表 3。随着步长的增长, 初始掺气点对应的台阶编号逐渐上移, 距台阶段起点的水平长度却在逐渐增长。初始掺气点与湍流边界层发展至水面的位置基本重合, 稍落后于“相交点”, 说明全断面湍流仅作为水流自掺气发生的必要条件^[5]。随着步长递增, 部分掺气区横跨的台阶数量逐渐减少, 但其水平长度基本保持不变。说明初始掺

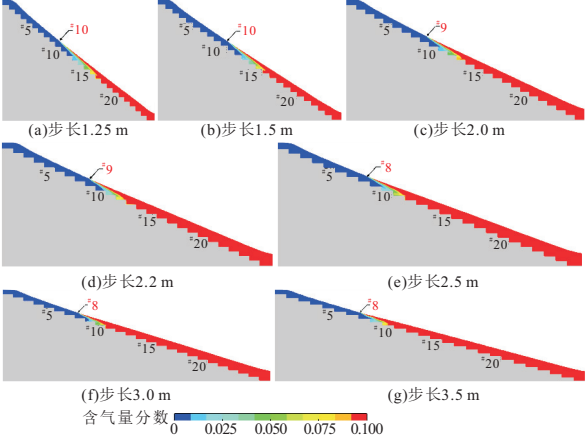


图 5 均匀台阶溢洪道掺气分布特性

Fig. 5 Aeration distribution characteristics of uniform stepped spillways

表 3 均匀步长台阶方案水流自掺气特征参数
Tab.3 The characteristic parameters of aeration on uniform stepped spillways

步长 L/m	工况 h_k/h	湍流边界 层与水面 交点对应 台阶编号	初始掺 气点对 应台阶 编号	初始掺气 点与台阶 段起点水 平距离 x^+/m	部分掺 气区横 跨台阶 数量	部分掺 气区水 平长度 D/m
1.25	2.0	10	10	11.19	6.4	8.00
1.50	2.0	10	10	13.35	5.2	7.95
2.00	2.0	9	9	15.80	4.0	8.00
2.20	2.0	9	9	16.72	3.6	7.92
2.50	2.0	8	8	17.75	3.2	8.00
3.00	2.0	7	8	19.50	2.7	8.10
3.50	2.0	7	8	21.35	2.3	8.05

气点后,掺气由水面向底部的发展不再受步长影响,而主要受流量和水深控制,流量越大则部分掺气区的水平长度越长。

4 不均匀步长台阶式溢洪道水流自掺气研究

不均匀步长台阶方案在试验工况下的掺气浓度发展见图 6。凹形、凸形、3 种随机形、半均匀形台阶方案中初始掺气点分别位于# 11、# 8、# 9、# 9、# 8、# 8 台阶上方。

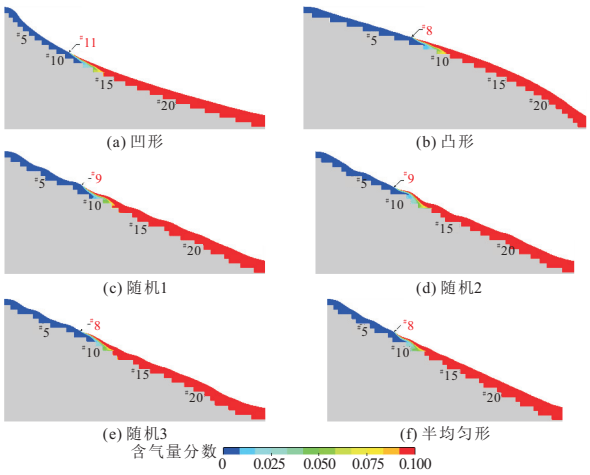


图 6 不均匀台阶溢洪道掺气分布特性
Fig.6 Aeration distribution characteristics of non-uniform stepped spillways

统计不均匀步长台阶方案中湍流边界层与水面的“相交点”及初始掺气点距台阶段起点的水平距离和直线距离,并以初始掺气点与台阶段起点上水面的连线作为清水区的近似坡线,数模计算近似坡度下均匀步长台阶方案中初始掺气点与台阶段起点的直线距离,并将两者进行对比,见表 4。不均匀步长台阶方案中,凸形台阶方案的清水区近似坡线(坡比为 1 : 3.3)最缓,导致初始掺气点至台阶段起点的距离最长;半均匀形台阶方案的坡线(坡比为 1 : 2)虽不是最陡(凹形台阶方案

表 4 不均匀与均匀步长台阶方案初始掺气点对比
Tab.4 Comparison of initial aeration point between uniform and non-uniform stepped spillways

不均匀 形式	初始掺气点 至台阶段起点		清水区 近似坡比	对应均匀步长方案 初始掺气点	
	水平	直线		直线	偏差/%
	距离/m	距离/m		距离/m	
凹形	14.56	17.29	1 : 1.56	16.27	6.4
凸形	22.00	22.99	1 : 3.3	21.49	7.0
随机 1	15.50	17.03	1 : 2.2	18.56	-8.3
随机 2	15.95	17.52	1 : 2.2	18.56	-5.6
随机 3	15.38	16.89	1 : 2.2	18.56	-9.0
半均匀形	13.00	14.53	1 : 2.0	17.91	-18.8

最陡,清水区近似坡比为 1 : 1.56),但初始掺气点至台阶段起点的距离最短。

相较于各自清水区近似坡度对应均匀步长台阶方案的初始掺气点,凹形和凸形台阶方案的实际初始掺气点位置均有所延后,偏差分别为 6.4%、7.0%,两者偏差幅度较为接近;3 种随机形和半均匀形台阶方案的实际初始掺气点位置均有所前移,其中半均匀形台阶方案的前移幅度最大,为 -18.8%,致使其成为水流自掺气发生最快的方案。

5 结论

- a. 相较于传统均匀台阶方案,凹形、凸形台阶方案不适宜水流自掺气的快速发生。
- b. 随机形台阶方案虽能促进湍流边界层发展,但其随机步长分布的不确定性会引发显著水面波动。
- c. 半均匀形台阶方案在保证流态相对稳定的前提下,能大幅前移初始掺气点的位置,具有更广阔的应用前景。

参考文献:

[1] 杨永全,汝树勋,张道成,等. 工程水力学[M]. 北京: 中国环境科学出版社,2003. (YANG H Q, RU Y S, ZHANG D C, et al. Engineering hydraulics [M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2003. (in Chinese))

[2] 邓军,许唯临,卫望汝. 明渠自掺气水流[M]. 北京: 科学出版社,2018. (DENG J, XU W L, WEI W R. Open-channel self-aerated flow[M]. Beijing: Science Press,2018. (in Chinese))

[3] 唐毓朔,邓军,卫望汝,等. 明流脉动压强特性对自掺气发展影响试验研究[J]. 人民黄河,2019,41(6): 111-115. (TANG Y S, DENG J, WEI W R, et al. Experimental study on the influence of fluctuating pressure characteristics to the self-aerated open channel flow developing region [J]. Yellow River, 2019, 41(6): 111-115. (in Chinese))

参考文献:

- [1] 顾国彪, 郑小康, 阮琳. 浅谈中国未来大型水电装备技术挑战与创新[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(17): 6959-6973. (GU G B, ZHENG X K, RU-AN L. Discussion on the technical challenges and innovations of large hydropower equipment in the future in China [J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(17): 6959-6973. (in Chinese))
- [2] 王志勇, 王勇. 金窝电站水导轴承烧瓦、烧轴事故原因浅析[J]. 水电站机电技术, 2018, 41(1): 38-40, 61. (WANG Z Y, WANG Y. An analysis of the causes of water guide bearing burnt tile and burnt shaft accidents in Jinwo Power Station [J]. Mechanical & electrical technique of hydropower station, 2018, 41(1): 38-40, 61. (in Chinese))
- [3] 卿启维, 邓方雄, 李文斌, 等. 喷嘴射流径向偏移斗叶对冲击式水轮机稳定性的影响[J]. 排灌机械工程学报, 2023, 41(12): 1283-1289, 1296. (QING Q W, DENG F X, LI W B, et al. Effect of radial offset bucket blades of nozzle jet on stability of Pelton turbines [J]. Journal of drainage and irrigation machinery engineering, 2023, 41(12): 1283-1289, 1296. (in Chinese))
- [4] 王慧斌, 李德友, 段雪晴, 等. 基于谐响应分析的冲击式水轮机转轮共振预测[J]. 大电机技术, 2024(2): 50-57, 96. (WANG H B, LI D Y, DU-AN X Q, et al. Resonance prediction of pelton turbine runner based on harmonic response analysis [J]. Large electric machine and hydraulic turbine, 2024(2): 50-57, 96. (in Chinese))
- [5] 钟一谔. 转子动力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 1987. (ZHONG Y E. Rotor dynamics [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1987. (in Chinese))
- [6] 蔡爽, 杨彬, 张海库, 等. 500 MW 级冲击式水轮机设计制造可行性研究[J]. 大电机技术, 2023(1): 53-59. (CAI S, YANG B, ZHANG H K, et al. Feasibility study on design and manufacture of 500MW pelton turbine [J]. Large electric machine and hydraulic turbine, 2023(1): 53-59. (in Chinese))
- [7] 付亮, 王治国, 王佩. 灯泡贯流式机组水导轴承振动评估[J]. 水利水电技术(中英文), 2024, 55(7): 104-113. (FU L, WANG Z G, WANG P. Vibration evaluation of water guide bearing of bulb tubular unit [J]. Water resources and hydropower engineering, 2024, 55(7): 104-113. (in Chinese))
- [8] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 水轮机基本技术条件: GB/T 15468-2020[S]. 北京: 中国标准出版社, 2020. (Standardization Administration of the People's Republic of China. Fundamental technical requirements for hydraulic turbines: GB/T 15468-2020 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2020. (in Chinese))
- [9] 赵玺, 朱李, 赖喜德, 等. 基于 Workbench 的水轮机轴疲劳寿命分析[J]. 中国农村水利水电, 2015(9): 169-171, 174. (ZHAO X, ZHU L, LAI X D, et al. Fatigue life analysis of the turbine shaft based on workbench [J]. China rural water and hydropower, 2015(9): 169-171, 174. (in Chinese))
- [10] 徐永. 大型水轮发电机组轴系动力学建模与仿真分析[D]. 武汉: 华中科技大学, 2012. (XU Y. Dynamic modeling and simulation analysis of the shaft system for large hydro-turbine generator units [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2012. (in Chinese))
- *****
- (上接第 146 页)
- [4] ZUHAIRA A A, AL-HAMD R K S, ALZABEE-BEE S, et al. Numerical investigation of skimming flow characteristics over non-uniform gabion-stepped spillways [J]. Innovative infrastructure solutions, 2021, 6(4): 225.
- [5] 武英豪, 张瑞海. 不均匀台阶式溢洪道消能特性研究[J]. 中国农村水利水电, 2025(8): 191-195. (WU Y H, ZHANG R H. Research on hydraulic characteristics of stepped spillways with non-uniform step lengths [J]. China rural water and hydropower, 2025(8): 191-195. (in Chinese))
- [6] CHANSON H, PAINTAL A S. Hydraulics of stepped chutes and spillways [J]. Applied mechanics reviews, 2003, 56(1): B10-B11.
- [7] BOES R M, HAGER W H. Hydraulic design of stepped spillways [J]. Journal of hydraulic engineering, 2003, 129(9): 671-679.
- [8] 董宗师. 分层水气湍流及高速掺气水流的精细模拟 [D]. 武汉: 武汉大学, 2020. (DONG Z S. Meticulous simulation of stratified air-water turbulent flow and high-velocity aerated flow [D]. Wuhan: Wuhan University, 2020. (in Chinese))
- [9] 王海波, 沈立群, 张晋锋, 等. 台阶式溢洪道数值模拟计算精度评价方法[J]. 中国农村水利水电, 2023(2): 239-245, 254. (WANG H B, SHEN L Q, ZHANG J F, et al. Evaluation method of numerical simulation calculation accuracy of stepped spillway [J]. China rural water and hydropower, 2023(2): 239-245, 254. (in Chinese))
- [10] 张文传. 多体型台阶式溢洪道湍流特性及消能机理研究 [D]. 武汉: 武汉大学, 2020. (ZHANG W C. Research on turbulence characteristics and energy dissipation mechanism of multiform stepped spillways [D]. Wuhan: Wuhan University, 2020. (in Chinese))
- [11] 武英豪, 李继伟. 步长对台阶式溢洪道消能特性的影响[J]. 水电能源科学, 2024, 42(8): 92-96. (WU Y H, LI J W. Study on influence of step length on energy dissipation of stepped spillway [J]. Water resources and power, 2024, 42(8): 92-96. (in Chinese))