

# 基于 SPH 的台阶式溢洪道最优消能率参数研究

吴海涛<sup>1,2,3</sup>, 郑温刚<sup>1</sup>, 田丽蓉<sup>1,2,3</sup>, 高仁祖<sup>1</sup>, 顾声龙<sup>1,2,3</sup>

(1. 青海大学 水利电力学院, 青海 西宁 810016; 2. 黄河上游生态保护与高质量发展实验室, 青海 西宁 810016; 3. 水利部江河源区水生态治理与保护重点实验室, 青海 西宁 810016)

**摘要:** 为研究台阶式溢洪道的消能规律, 明确台阶式溢洪道的最优消能率参数, 利用 DualSPHysics 对台阶式溢洪道水流特征进行模拟, 并通过与典型案例的对比分析验证了 SPH 方法对台阶式溢洪道水流模拟的适用性与准确性, 模拟结果表明 SPH 方法可以较好地模拟台阶式溢洪道上的水流特征。通过建立不同单宽流量、台阶段坡度和台阶数目的共计 288 种工况对台阶式溢洪道消能规律及其影响因素进行了研究。结果表明: 在其他条件一定的情况下, 台阶式溢洪道的消能率与单宽流量呈负相关关系; 台阶数目对台阶式溢洪道消能率的影响并不显著, 但是存在一个台阶数目能使台阶式溢洪道的消能率达到最大值, 该最优消能率对应的台阶数目在 78 ~ 81 阶范围内, 此结论对指导实际工程应用有一定的参考价值。

**关键词:** 台阶式溢洪道; 最优消能率; 光滑质点水动力学(SPH); 数值模拟

中图分类号: TV135.2

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2023)02-0107-07

## Optimization of energy dissipation rate parameters of stepped spillways based on SPH

WU Haitao<sup>1,2,3</sup>, ZHENG Wengang<sup>1</sup>, TIAN Lirong<sup>1,2,3</sup>, GAO Renzu<sup>1</sup>, GU Shenglong<sup>1,2,3</sup>

(1. School of Water Resources and Electric Power, Qinghai University, Xining 810016, China; 2. Laboratory of Ecological Protection and High Quality Development in the Upper Yellow River, Xining 810016, China;

3. Key Laboratory of Water Ecology Remediation and Protection at Headwater Regions of Big Rivers, Ministry of Water Resources, Xining 810016, China)

**Abstract:** The flow characteristics of the stepped spillway is simulated by DualSPHysics in order to study the energy dissipation law and find the optimal parameters of the stepped spillway. Here, the applicability and accuracy of the smoothed particle hydrodynamics (SPH) method in the water flow simulation of the stepped spillway is verified through comparative analysis. Then, the energy dissipation law of the stepped spillway is studied by establishing a total of 288 working conditions with different single-width flow rates, stage gradients and the number of steps. The results show that the energy dissipation rate of the stepped spillway is negatively correlated with the single-width flow rate when the other parameters are constant; the number of steps has no significant effect on the energy dissipation rate of the stepped spillway, but there is a certain step number when the energy dissipation rate of the stepped spillway reaches the maximum value. According to the simulation results, the number of steps corresponding to the optimal energy dissipation rate is in the range of 78 - 81 steps. This conclusion has a certain referential value for the practical engineering.

**Key words:** stepped spillway; optimal energy dissipation rate; smoothed particle hydrodynamics (SPH); numerical simulation

收稿日期: 2022-05-09; 修回日期: 2022-11-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(51869025); 青海大学青年科研基金项目(2022-QGY-9)

作者简介: 吴海涛(1994—), 男, 青海海东人, 博士研究生, 研究方向为计算流体力学。

通讯作者: 顾声龙(1982—), 男, 河北泊头人, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为计算流体力学。

## 1 研究背景

消能特性是台阶式溢洪道研究的热点和重点,由于台阶式溢洪道上的水流高度混掺、沿程水力参数多变,是复杂的气-液两相流,导致开展深入研究的难度较大。针对台阶式溢洪道消能率的早期研究中,Chanson<sup>[1]</sup>和Rajaratnam<sup>[2]</sup>提出了台阶式溢洪道上跌落水流和滑行水流流态的消能率计算公式,随后国内外专家学者通过物理模型试验及数值模拟的方法进一步对台阶式溢洪道的参数(如:单宽流量、台阶高度、溢洪道坡度等)对其消能率的影响开展了大量研究。但至今对台阶式溢洪道中台阶的作用仍不明确,关于不同因素对台阶式溢洪道消能率的影响,除明确了单宽流量对消能率的影响,即消能率与单宽流量呈负相关关系,随单宽流量的增大而减小<sup>[3]</sup>之外,其他因素的影响尚未得到统一的结论,尤其是台阶数量及坡度对消能率的影响<sup>[4]</sup>。

研究台阶式溢洪道的消能规律,明确台阶式溢洪道的最优消能参数需要大量数据作为理论支撑,而数值模拟无疑是开展此项研究最为便利和经济的方法。目前对溢洪道水流的模拟大多是基于网格的欧拉法(Euler method),但台阶式溢洪道存在水流挑射、水气强烈混掺、水流破碎等现象,因而此类方法应用于台阶式溢洪道的研究存在一定的局限性。而无网格法的兴起为求解复杂自由表面流动提供了新的解决方法,同时也为开展台阶式溢洪道消能规律的模拟研究提供了可行的技术手段。光滑质点流体动力学(smoothed particle hydrodynamics, SPH)是目前常用的一种无网格粒子法,最早由Monaghan<sup>[5]</sup>提出并应用于天体物理流体动力学和天体动力学。目前,SPH方法已经应用到了更广泛的流体计算问题之中<sup>[6-7]</sup>。

得益于SPH方法的纯拉格朗日性质以及在处理自由表面、破碎水流等问题上的优势,该方法在溢洪道水流研究中也较为广泛的应用。Husain等<sup>[8]</sup>利用二维开源程序SPHysics模拟了台阶式溢洪道上非充气区域的滑行水流以研究台阶面的压力分布规律;Moreira等<sup>[9]</sup>利用单相SPH方法对台阶式溢洪道的水流特性和消能特性进行了研究,并与有限体积法的模拟结果进行对比,得到了指导工程实践的理论依据;Gu等<sup>[10]</sup>利用二维开源程序parallelSPHysics结合物理模型试验开展了台阶式溢洪道水流特性的模拟研究,但由于在模拟过程中未考虑气体的影响,使得模拟结果与实测数据存在一定的

误差,在Gu等<sup>[11]</sup>的后续研究中,发现气-液两相SPH方法对台阶式溢洪道水流的模拟更为准确和稳定。在气-液两相SPH方法中,加入了空气粒子参与计算,考虑了空气对水流的影响,也能取得较高的模拟精度,但大量空气粒子的加入很大程度上增加了计算量,对程序的计算效率是一个很大的挑战。

DualSPHysics<sup>[12]</sup>(<https://dual.sphysics.org>)是一组C++、CUDA和Java代码,专为复杂的自由表面流动而开发,旨在处理实际工程问题,其重要的特点是它在使用大量粒子时仍可保证计算的效率。本文利用DualSPHysics开源代码模拟了台阶式溢洪道的典型案例并进行对比验证,通过两相SPH模型来研究台阶式溢洪道的单宽流量、台阶数目和台阶阶段坡度对其消能率的影响,为实际工程应用提供一定的参考依据。

## 2 SPH 基本理论

SPH与有限元法和有限差分法不同,它并不用网格来划分计算域,而是将计算域离散为一系列的粒子,这些粒子具有各自的质量、加速度等物理量,粒子之间通过核函数相互作用。在计算流程上,SPH方程的建立可以分为两个步骤:第一步是核近似,第二步是粒子近似。核近似实现了场变量或场变量梯度的插值,而粒子近似则实现了对核近似积分表达式的粒子离散。

### 2.1 控制方程

在拉格朗日框架中,流体动力学的Navier-Stokes方程(N-S方程)可以写为质量守恒方程和动量守恒方程。

质量守恒方程:

$$\frac{d\rho}{dt} = -\rho \nabla \cdot v \quad (1)$$

动量守恒方程:

$$\rho \frac{dv}{dt} = -\nabla P + g \quad (2)$$

式中: $\rho$ 为密度,kg/m<sup>3</sup>;  $v$ 为流速,m/s;  $P$ 为压力,Pa;  $g$ 为重力加速度,m/s<sup>2</sup>;  $\frac{d}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} + \nabla \cdot v$ 为物质导数。

对于弱可压缩流体,通过以下状态方程来封闭控制方程。

$$P = B \left[ \left( \frac{\rho}{\rho_0} \right)^\gamma - 1 \right] \quad (3)$$

式中: $\gamma$ 为常数, $\gamma = 7$ ;  $\rho_0$ 为初始密度,取 $\rho_0 = 1\ 000$  kg/m<sup>3</sup>; 系数 $B$ 与数值声速 $c$ (m/s)相关,通过 $B =$

$c^2\rho_0/\gamma$  计算。

对气-液两相模拟中气体压力的计算,Colagrossi 等<sup>[13]</sup> 提出在方程式(3) 中增加背景压力 $\chi$  来避免拉伸不稳定,同时需加入人工黏聚力项<sup>[14]</sup> 来获得清晰的两相交界面,所以最终的状态方程为:

$$P = B \left[ \left( \frac{\rho}{\rho_0} \right)^\gamma - 1 \right] + \chi - \beta \rho^2 \quad (4)$$

式中:系数 $\beta$  表示表面张力的影响。

### 2.2 N-S 方程的 SPH 形式

根据 SPH 的离散思想,将 SPH 形式的 N-S 方程的质量守恒方程和动量守恒方程表达如下。

质量守恒方程:

$$\frac{d\rho_i}{dt} = \sum_j m_j v_{ij} \nabla_i W_{ij} \quad (5)$$

动量守恒方程:

$$\frac{d v_i}{dt} = - \sum_j m_j \frac{P_i + P_j}{\rho_i \rho_j} \nabla_i W_{ij} + g \quad (6)$$

式中: $m$  为粒子质量; $v_{ij} = v_i - v_j$  为  $i$  粒子和  $j$  粒子的速度差, m/s;  $W$  为 SPH 的光滑核函数;  $\nabla_i W_{ij}$  为从  $i$  粒子到  $j$  粒子的核函数梯度。

为了解决模拟中密度不连续的问题,以避免流场中产生压力波动,Antuono 等<sup>[15]</sup> 在质量守恒方程中加入耗散项,引入了  $\delta$ -SPH 格式。

$$\frac{d\rho_i}{dt} = \sum_j m_j v_{ij} \nabla_i W_{ij} + 2\delta h c_0 \cdot \sum_j [(\rho_j - \rho_i) \cdot \frac{r_{ij} \nabla_i W_{ij} \cdot \frac{m_j}{\rho_j}}{r_{ij}^2}] \quad (7)$$

式中: $\delta$  为耗散项系数,在本文的模拟中取值为 0.1;  $h$  为光滑长度, m;  $r_{ij} = r_i - r_j$  为  $i$  粒子与  $j$  粒子的距离, m。

在动量守恒方程中,常采用 Monaghan<sup>[16]</sup> 提出的人工黏性以增加耗散,抑制模拟过程中产生的非物理振荡,使 SPH 模拟更加稳定。

$$\frac{d v_i}{dt} = - \sum_j m_j \left( \frac{P_i + P_j}{\rho_i \rho_j} + \prod_{ij} \right) \nabla_i W_{ij} + g \quad (8)$$

$$\prod_{ij} = \begin{cases} -\frac{\alpha \mu_{ij} \bar{c}_{ij}}{\bar{\rho}_{ij}} & (v_{ij} \cdot r_{ij} < 0) \\ 0 & (v_{ij} \cdot r_{ij} > 0) \end{cases} \quad (9)$$

式中: $\prod_{ij}$  为人工黏性; $\alpha$  为人工黏性系数,决定了黏性耗散率; $\mu_{ij} = h v_{ij} \cdot r_{ij} / (r_{ij}^2 + \eta^2)$ ,  $\eta^2 = 0.01 h^2$  用于防止由于两粒子相距太近而导致的分母过小; $\bar{c}_{ij} = 0.5(c_i + c_j)$  为平均声速, m/s。

本研究中其余重要参数的设置和相关模拟方法为:时间积分采用 Verlet 积分框架更新粒子的速度

和位置;核函数采用 5 次 Wendland 函数实现粒子间的相互作用;边界条件采用标准动力边界条件以防止粒子的穿透,根据模拟经验,该边界条件在溢洪道水流流动的模拟中具有较好的精度;为了改善自由表面的追踪,采用了表面张力修正<sup>[17]</sup> 对自由表面进行校正;人工黏性的使用可以很好地抑制数值振荡,在自由表面流动过程的模拟中,人工黏性也具备良好的模拟精度<sup>[16]</sup>,同时考虑到计算成本问题,采用人工黏性来增加耗散而未使用湍流模型。

## 3 数值模型验证

### 3.1 物理试验模型

模型验证案例中的物理试验模型选择 Chanson 等<sup>[18]</sup> 在昆士兰大学开展的台阶式溢洪道试验,通过将模拟结果与模型试验结果进行对比分析来验证数值模型的精度。该台阶式溢洪道模型长度为 2.70 m,宽度为 1.00 m,台阶面坡度为 21.8°,通过一个长 0.60 m 的宽顶堰连接台阶段,每级台阶宽度  $a = 0.25$  m,高度  $b = 0.10$  m,台阶后连接消力池,模型如图 1 所示。在上述案例模型试验中,研究了 0.046 ~ 0.182 m<sup>3</sup>/s 流量范围内台阶上的流态变化和水流特性,本文选择了其中第 2 系列 Q22 号工况,即单宽流量为 0.058 m<sup>2</sup>/s,因此此工况下能够清晰地观察到滑行水流到跌落水流的形成,可以充分验证数值模型在不同流态下的适用性和模拟精度。

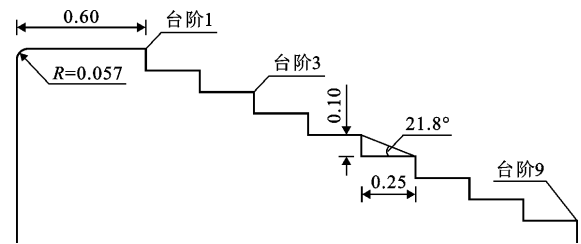


图 1 台阶式溢洪道案例试验模型示意图(单位:m)

### 3.2 数值模型

本文利用 DualSPHysics\_v4.4 进行数值模拟,数值模型按照与试验模型 1:1 的比例建立,为尽可能减少台阶上粒子飞溅对模拟精度的影响,本文数值模拟采用气-液两相的 SPH 模型,数值模型如图 2 所示。通过入流边界条件的设置来实现水头的稳定,根据模拟经验,初始粒子间距设置为 0.005 m 时,可保证适当计算量的前提下获得较高的模拟精度,此模型共 453 000 粒子,模拟时间为 20 s,利用 Gefore RTX 2080 GPU @ 1.8GHz 显卡进行 GPU 并行计算,计算耗时为 34 ~ 35 h。

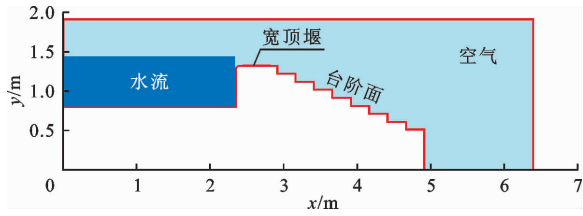


图2 台阶式溢洪道案例数值模型示意图

### 3.3 验证结果与分析

图3给出了水流稳定后台阶式溢洪道上的试验流态和模拟流态对比。

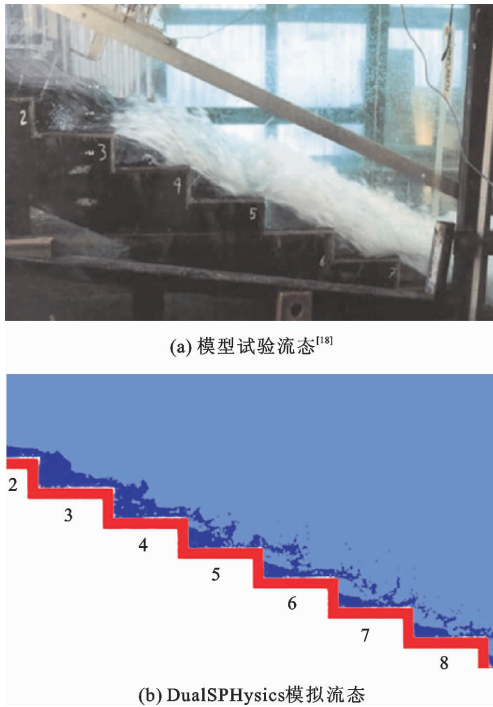


图3 台阶式溢洪道上的试验流态与模拟流态对比

从图3中可以看出, DualSPHysics 可以较好地模拟出台阶面上稳定水流的基本流态, 包括水面线和空腔的位置, 同时气-液两相 SPH 方法的应用很好地抑制了单相 SPH 方法中在台阶段粒子飞溅、计算不稳定的情况。

图4给出了第3~8号台阶上水深和流速的模拟值和试验值的对比结果及其相对误差分布情况。根据参考文献[18]中的参数设置, 分别采用无量纲数  $Y_{90}/d_c$  和  $V_{90}/V_c$  来描述空气浓度为90%处的水深和流速的变化规律, 其中  $Y_{90}$ 、 $V_{90}$  分别为特征水深(m)和特征流速(m/s);  $d_c$ 、 $V_c$  分别为临界水深(m)和临界流速(m/s), 其计算公式如下:

$$d_c = \sqrt[3]{q_w^2/g} \tag{10}$$

$$v_c = \sqrt[3]{g \cdot q_w} \tag{11}$$

式中:  $q_w$  为溢洪道入流单宽流量,  $m^2/s$ ;  $g$  为重力加速度,  $m/s^2$ 。

图4表明, 在本案例中 DualSPHysics 能较好地反映台阶上水深和流速的沿程变化趋势, 在出现跌落水流的6号台阶处, 虽然自由表面流动更为复杂, 但 DualSPHysics 仍有较好的模拟表现。从误差结果来看, 6号台阶处水深和流速的相对误差也为最小, 这也充分显示出气-液两相 SPH 方法在跌落水流的模拟中具有很大的潜力。在本案例的 DualSPHysics 模拟中, 模拟水深的平均相对误差为 13.08%, 模拟流速的平均相对误差为 7.06%。

根据以上的研究与分析, DualSPHysics 模型在本文选用的案例中可以较好地反映出台阶式溢洪道水流的基本特性, 同时对于台阶面上出现的滑行水

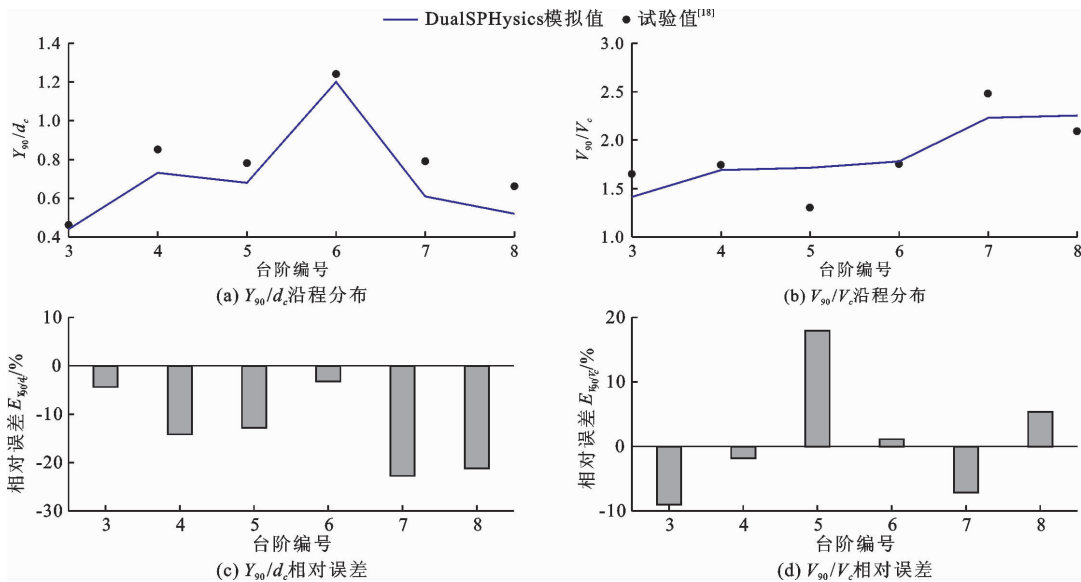


图4 溢洪道台阶段水深和流速的模拟值与试验值的对比结果及其相对误差

流和跌落水流两种流态而言, DualSPHysics 的模拟结果均显示出较好的准确性和鲁棒性, 可以满足本文后续对不同工况下台阶式溢洪道消能规律研究的需求。

## 4 台阶式溢洪道最优消能率参数

### 4.1 模拟参数设计

为了探讨和明确台阶式溢洪道消能率的影响因素, 根据现有相关研究和工程实际, 本文选择 30 ~ 100 共 6 种台阶数、15.95° ~ 60.00° 共 8 种台阶面坡度以及 0.118 8 ~ 0.244 8 m<sup>2</sup>/s 共 6 种单宽流量进行数值模拟, 对其溢洪道消能率进行分析。具体台阶数、台阶坡度及单宽流量如表 1 所示。

表 1 台阶式溢洪道的台阶数、台阶坡度及单宽流量模拟参数

台阶数 $N$	单宽流量 $q/(m^2 \cdot s^{-1})$	台阶坡度 $\alpha/(^\circ)$
30	0.1188	15.95
40	0.1414	21.80
50	0.1653	26.57
60	0.1905	33.69
80	0.2170	38.67
100	0.2448	45.00
		51.30
		60.00

建立如图 5 所示的台阶式溢洪道模型, 粒子间距设为 0.005 m, 同样采用入流边界条件来稳定水流, 通过不同台阶数目、台阶面坡度和单宽流量的组合来计算各参数组合下的台阶式溢洪道的消能率, 各组合的计算历时均为 20 s。

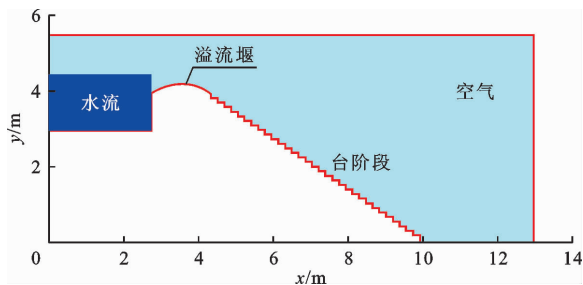


图 5 台阶式溢洪道数值计算模型示意图

台阶式溢洪道消能率的计算公式如下:

$$E_1 = H_0 + H_1 \quad (12)$$

$$E_2 = h_2 \cos \alpha + \frac{v_2^2}{2g} \quad (13)$$

$$\Delta E = E_1 - E_2 \quad (14)$$

$$\eta = \frac{E_1 - E_2}{E_1} \times 100\% = \frac{\Delta E}{E_1} \times 100\% \quad (15)$$

式中:  $E_1$  为 1-1 断面的总能量, m;  $H_0$  为 2-2 断面到溢流堰堰顶的垂直距离, m;  $H_1$  为堰上水头, m;  $E_2$  为 2-2 断面的总能量, m;  $h_2$  为 2-2 断面的水深, m;  $v_2$  为 2-2 断面的平均流速, m/s;  $\alpha$  为溢洪道台阶面的坡度, ( $^\circ$ );  $g$  为重力加速度, m/s<sup>2</sup>;  $\Delta E$  为能量损耗, m。消能率计算图如图 6 所示。

### 4.2 结果分析与讨论

不同参数值组合下的台阶式溢洪道总消能率计算结果如图 7 所示。

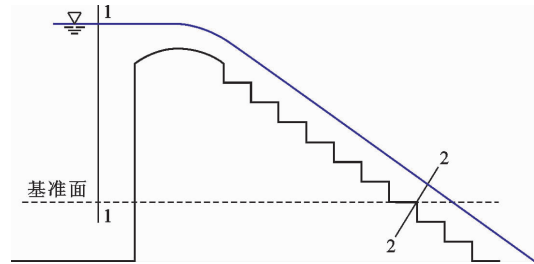


图 6 台阶式溢洪道消能率计算示意图

关于单宽流量对台阶式溢洪道消能率的影响, 通过对比图 7(a) ~ 7(f) 可以发现, 当台阶面坡度和台阶数目不变的情况下, 台阶式溢洪道的总消能率随着单宽流量的增大而降低, 这主要是因为随着流量的增加, 水流所携带的总能量也呈增加趋势, 此结论与 Shahheydari 等<sup>[3]</sup>、田嘉宁<sup>[19]</sup>的研究结论一致。关于台阶面坡度对台阶式溢洪道消能率的影响, 对比图 7 中 8 种坡度的消能率可以发现, 坡度为 15.95° 时消能率最大, 随着坡度的增加消能率逐渐降低, 即当单宽流量和台阶数目一定时, 台阶式溢洪道总消能率与坡度大小呈负相关趋势, 坡度越小则总消能率越大, 这是因为坡度越小时溢洪道长度就越长, 随着流程的增加, 水流的沿程水头损失也就越大, 相应的消能效果越好。关于台阶数目对台阶式溢洪道消能率的影响, 由图 7 可以看出, 在相同流量和台阶面坡度下, 台阶式溢洪道的消能率随着台阶数目的变化而小幅波动且无明显规律, 但每种组合中都存在一个台阶数使得台阶式溢洪道的消能率达到最大值, 并且在不同流量和不同坡度下, 各组合中所具有最优消能率的台阶数目趋于一致, 在本文所有模拟组合中, 除坡度为 51.30°、60.00° 的部分组合外, 其余组合基本都是在台阶数目为 80 阶时达到了最优消能率。

为进一步探讨台阶数目与台阶式溢洪道消能率之间的关系, 对各参数值组合对应的最优消能率下

的台阶数目进行梳理,并用 Akima 插值的方法得到各组合下台阶式溢洪道最优消能率的台阶数。Akima 插值所获得的曲线比三次样条函数插值曲线更光滑、更自然,同时插值精度也优于三次样条函数插值<sup>[20]</sup>。以台阶面坡度为 15.95° 为例,在单宽流量  $q=0.1188\text{ m}^2/\text{s}$  时,对于 30、40、50、60、80、100 阶 6

种台阶数目的台阶式溢洪道,其总消能率分别为 93.33%、94.28%、93.66%、94.8%、95.09%、93.23%,最大消能率所对应的台阶数目为 80 阶,通过 Akima 插值后的结果如图 8 所示。由图 8 得出在此工况下最优消能率对应的台阶数目为 74 阶,其总消能率为 95.21%。

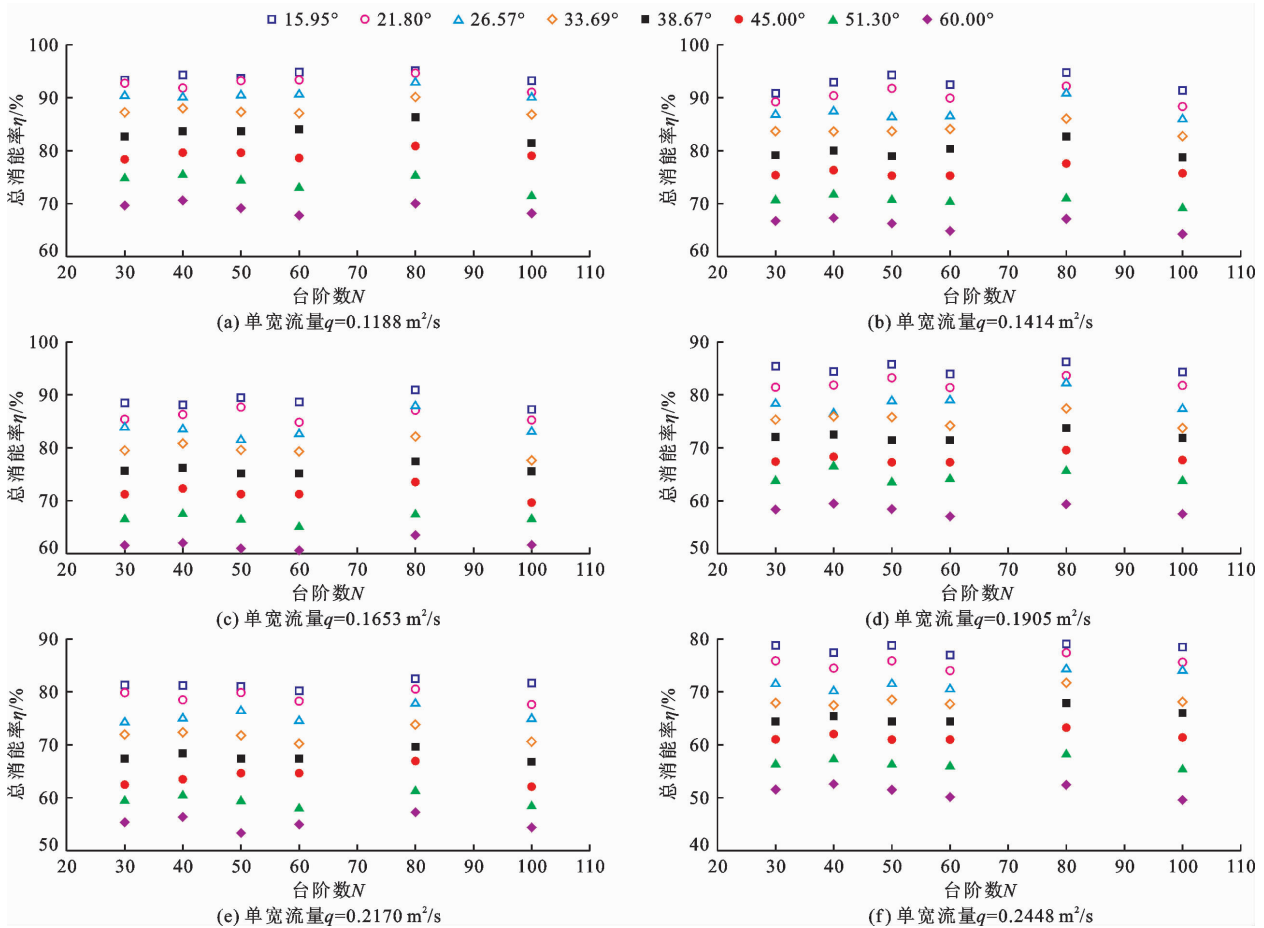


图 7 不同参数值组合下的台阶式溢洪道总消能率计算结果

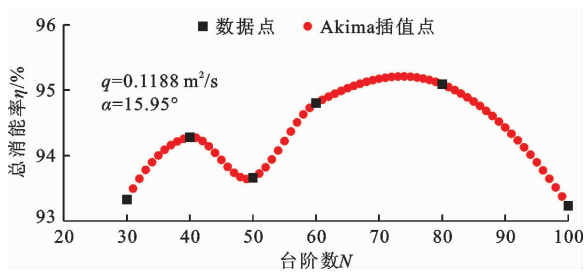


图 8 台阶式溢洪道最优消能率相应台阶数的 Akima 插值

按照以上方法将本文所有参数值组合下最优消能率对应的台阶数目进行 Akima 插值,所得最优台阶数如图 9 所示。为了寻找适用于大多数组合下的最优台阶数,对偏离平均值较远的结果进行剔除,从图 9 中可以发现,当台阶数目处于 78~81 阶时(图 9 中的阴影区域),可以满足大部分组合下达到最优

消能率的要求。

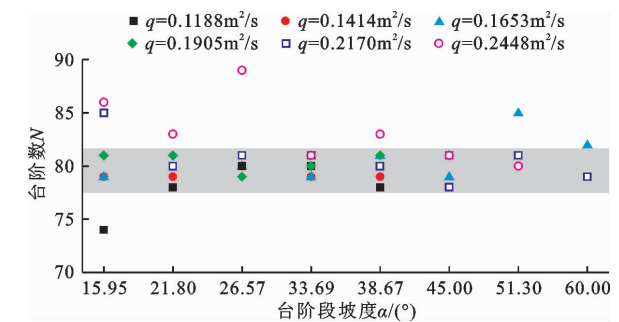


图 9 各参数值组合下最优台阶数 Akima 插值结果

上述分析结论是基于大量模拟案例的统计结果,其物理成因及机理有待进一步研究,可能是因为在此阶段坡度一定的情况下,台阶数量过少则无法使水流充分碰撞、混掺导致其无法消耗下泄水流的巨大能

量;而台阶数量过多时,则各台阶之间的落差减小,甚至趋近于光滑溢洪道,也会导致消能率的降低。

根据田嘉宁等<sup>[21]</sup>、Felder 等<sup>[22]</sup>的研究,在不同坡度或者均匀、非均匀台阶下,台阶数目对消能率几乎无影响,这一结论也可佐证本文得出的在不同单宽流量和台阶段坡度下,最优消能率所对应的台阶数目趋于一致的结论,但是与现有研究结论不同的是:本文认为在相同单宽流量和台阶面坡度的条件下,台阶式溢洪道的消能率与台阶数之间并非呈现出一定的线性关系,而是存在一个拐点的台阶数目使得台阶式溢洪道的消能率达到最优,根据本文的研究,拐点台阶数目的范围在 78~81 之间。为进一步验证该结论,根据统计理论,计算出 99.9% 置信度下,最佳消能率对应的台阶数置信区间为 67~81 之间,本文所得结论符合置信区范围。在实际工程建设中,溢洪道单宽流量和台阶段坡度需结合当地地形以及泄洪需求来决定,所以可以通过控制台阶数目以达到台阶式溢洪道的最优消能率。本文研究的台阶式溢洪道台阶段坡度、台阶数目以及单宽流量的范围较广,所得结论具有一定的普适性。

## 5 结 论

本文利用 DualSPHysics 开源程序代码模拟了台阶式溢洪道上的水流特征,并对影响台阶式溢洪道消能率的关键参数进行研究,得到了以下结论:

(1) DualSPHysics 能够较好地还原台阶式溢洪道上的水流特征,通过对台阶面上水深和流速的模拟与对比发现,模拟结果可以较好地反映水深和流速的沿程变化趋势,水深和流速的平均相对误差分别为 13.08% 和 7.06% ;

(2) 在台阶面坡度和台阶数目一定的情况下,台阶式溢洪道的消能率随单宽流量的增加而减小;在单宽流量和台阶数目一定的情况下,随台阶面坡度的减小而增大;

(3) 台阶式溢洪道的消能率在单宽流量和台阶面坡度一定的情况下,存在一个台阶数目使得台阶式溢洪道的消能率达到最优;在单宽流量和台阶面坡度不同的情况下,台阶数目对台阶式溢洪道消能率的影响并不显著,所能达到最优消能率所对应的台阶数目趋于一致。在本文研究的案例中,台阶数目在 78~81 范围内可以满足大部分参数值组合下对台阶式溢洪道最优消能率的要求。

本文系统研究了台阶式溢洪道台阶面坡度、台阶数目以及单宽流量对消能率的影响,得到了台阶式溢

洪道的最优消能率参数。但本文的研究主要基于数值模拟,在今后的研究中,还须通过物理模型试验或者原型观测对模拟结果进行进一步的验证分析。

### 参考文献:

- [1] CHANSON H. Comparison of energy dissipation between nappe and skimming flow regimes on stepped chutes[J]. *Journal of Hydraulic Research*, 1994, 32(2): 213–218.
- [2] RAJARATNAM N. Skimming flow in stepped spillways[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1990, 116(4): 587–591.
- [3] SHAHHEYDARI H, NODOSHAN E J, BARATI R, et al. Discharge coefficient and energy dissipation over stepped spillway under skimming flow regime[J]. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 2015, 19: 1174–1182.
- [4] 马朋辉. 台阶式溢洪道滑行流水力参数变化规律研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2021.
- [5] MONAGHAN J J. Smoothed particle hydrodynamics[J]. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 1992, 30: 543–574.
- [6] VIOLEAU D, ROGERS B D. Smoothed particle hydrodynamics (SPH) for free-surface flows: past, present and future[J]. *Journal of Hydraulic Research*, 2016, 54(1): 1–26.
- [7] LIU Moubin, ZHANG Zhilang. Smoothed particle hydrodynamics (SPH) for modeling fluid–structure interactions[J]. *Science China Physics, Mechanics & Astronomy*, 2019, 62: 984701.
- [8] HUSAIN S M, MUHAMMED J R, KARUNARATHNA H U, et al. Investigation of pressure variations over stepped spillways using smooth particle hydrodynamics[J]. *Advances in Water Resources*, 2014, 66: 52–69.
- [9] MOREIRA A, LEROY A, VIOLEAU D, et al. Dam spillways and the SPH method: two case studies in Portugal[J]. *Journal of Applied Water Engineering and Research*, 2019, 7(3): 228–245.
- [10] GU Shenglong, REN Liqun, WANG Xing, et al. SPHysics simulation of experimental spillway hydraulics[J]. *Water*, 2017, 9(12): 973.
- [11] GU Shenglong, ZHENG Wengang, WU Haitao, et al. Dual-SPHysics simulations of spillway hydraulics: a comparison between single-and two-phase modelling approaches[J]. *Journal of Hydraulic Research*, 2022, 60(5): 835–852.
- [12] ZHANG Feng, CRESPO A, ALTOMARE C, et al. Dual-SPHysics: a numerical tool to simulate real breakwaters[J]. *Journal of Hydrodynamics*, 2018, 30: 95–105.
- [13] COLAGROSSI A, LANDRINI M. Numerical simulation of interfacial flows by smoothed particle hydrodynamics[J]. *Journal of Computational Physics*, 2003, 191(2): 448–475.

(下转第 120 页)

效益为  $134.47 \times 10^4$  元,减排生态效益比发电经济效益高  $53.98 \times 10^4$  元。因此,因地制宜发展绿色小水电对于实现“碳达峰”、“碳中和”目标可起到重要作用,小水电减排二氧化碳的生态效益和其发电的经济效益具有协同效应。

#### 参考文献:

- [1] 方玉建,张金凤,袁寿其. 欧盟 27 国小水电的发展对我国战略思考[J]. 排灌机械工程学报,2014,32(7): 588-599+605.
- [2] 王煌,周买春,刘远,等. 水力学法估算广东省山区小水电站减脱水河段生态需水量的探讨[J]. 水力发电学报,2014,33(2):154-161.
- [3] 王亦楠. 小水电整治不能“一刀切拆除”[J]. 中国经济周刊,2021(14):100-103.
- [4] 陈昂,吴森,沈忱,等. 河道生态基流计算方法回顾与评估框架研究[J]. 水利水电技术,2017,48(2):97-105.
- [5] 徐宗学,李鹏,侯昕玥. 河道生态基流理论基础与计算方法研究[J]. 人民黄河,2019,41(10):119-127.
- [6] 黄康,李怀恩,成波,等. 基于 Tennant 方法的河流生态基流应用现状及改进思路[J]. 水资源与水工程学报,2019,30(5):103-110.
- [7] 刘树锋,陈记臣,关帅. 基于改进 FDC 法的小水电生态流量计算与生态调度研究[J]. 长江科学院院报,2020,37(8):29-34.
- [8] 周李智,王万良,徐新黎,等. 基于生态惩罚的混联梯级小水电群优化调度[J]. 水力发电学报,2015,34(7):45-56.
- [9] 王万良,张羽方,徐新黎,等. 梯级小水电群动态多目标优化调度[J]. 浙江工业大学学报,2016,44(6):591-600.
- [10] 李萌,龚群超,潘家华. 碳中和目标下中国小水电价值评估与发展战略转型[J]. 北京工业大学学报(社会科学版),2022,22(2):86-104.

- [11] 李仟,马跃先,郑佩佩. 基于 AHP-Fuzzy 法的绿色小水电综合评价[J]. 水电能源科学,2018,36(6):154-157.
- [12] 贾立敏,曾露,田志超,等. DPSIR 模型下小水电可持续发展评价指标体系研究[J]. 中国农村水利水电,2010(10):113-114+117.
- [13] 董哲仁,张晶,赵进勇. 生态流量的科学内涵[J]. 中国水利,2020(15):15-19.
- [14] 秦毅,李时. 应对水文序列非一致性变化影响的溯源重构法研究[J]. 水利学报,2021,52(7):807-818.
- [15] 张梦如,万芳,杨肖丽. 板桥水库电站增效扩容改造及方案评价[J]. 水资源与水工程学报,2017,28(5):174-179.
- [16] 陈俊旭,赵红玲,吕燕,等. 红河流域径流演变分异及其特征[J]. 水电能源科学,2018,36(10):22-26.
- [17] 王中根,赵玲玲,陈庆伟,等. 关于生态流量的概念解析[J]. 中国水利,2020(15):29-32.
- [18] 王鹏全,吴元梅,杨旭亮. 考虑水文非一致性变异的河道基本生态流量[J]. 水利水运工程学报,2021(2):64-71.
- [19] 郑小康,侯红雨,付永锋. 基于改进 Tennant 法的湟水流域河道内生态环境需水量分析[J]. 南水北调与水利科技,2015,13(4):681-685+690.
- [20] 范肖予,肖娟,白露,等. 河道生态基流量的年内同频率展布计算法[J]. 水电能源科学,2017,35(3):24-26.
- [21] 张文晴,侯精明,王俊琿,等. 耦合 NSGA-II 算法与高精度水动力模型的 LID 设施优化设计方法研究[J]. 水资源与水工程学报,2022,33(4):133-142.
- [22] 舟丹. 节约 1 度(kW·h)电或 1kg 煤到底减排了多少“二氧化碳”或“碳”? [J]. 中外能源,2011,16(11):58.
- [23] 董金池,翁慧,庞凌云,等. 中国石化和化工行业二氧化碳减排技术及成本研究[J]. 环境工程,2021,39(10):32-40.

(上接第 113 页)

- [14] NUGENT S, POSCH H A. Liquid drops and surface tension with smoothed particle applied mechanics[J]. Physical Review E, 2000, 62(4): 4968.
- [15] ANTUONO M, COLAGROSSI A, MARRONE S, et al. Free-surface flows solved by means of SPH schemes with numerical diffusive terms[J]. Computer Physics Communications, 2010, 181(3): 532-549.
- [16] MONAGHAN J J. Simulating free surface flows with SPH [J]. Journal of Computational Physics, 1994, 110(2): 399-406.
- [17] HU Xiangyu, ADAMS N A. A multi-phase SPH method for macroscopic and mesoscopic flows [J]. Journal of Computational Physics, 2006, 213(2): 844-861.
- [18] CHANSON H, TOOMBES L. Experimental investigations of air entrainment in transition and skimming flows down a stepped chute[J]. Canadian Journal of Civil Engineering, 2002, 29(1): 145-156.
- [19] 田嘉宁. 台阶式泄水建筑物水力特性试验研究[D]. 西安:西安理工大学,2005.
- [20] 聂桂根,万剑华. Akima 插值法在测量中的应用[J]. 测绘科技动态,1998(3):31-34.
- [21] 田嘉宁,安田,阳一,等. 台阶式泄水建筑物的消能分析[J]. 水力发电学报,2009,28(2):96-100+127.
- [22] FELDER S, CHANSON H. Energy dissipation down a stepped spillway with nonuniform step heights[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2011, 137(11): 1543-1548.