

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2025.05.010

城市污水提升双层泵站阶梯消能工水力特性分析及改善

徐 辉, 谢 锋, 张 睿, 冯建刚, 周旻哲, 李广磊, 饶 宁

(河海大学农业科学与工程学院, 江苏 南京 211100)

摘要:为改善城市污水提升双层泵站阶梯消能工的水力流态和消能率,减少阶梯表面冲击影响,基于数值模拟方法,采用 RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型和 VOF 模型分析了阶梯消能工的水力特性,针对阶梯消能工中水流存在的主流偏右和“水翅”等不良流态,提出“分流坎+导流墩+阶梯尾坎”的组合式整流优化方案并分析其优化效果。结果表明:分流坎可以有效增加阶梯左侧的流量,改善偏流的不良流态;导流墩和阶梯尾坎可以减小并均化阶梯出口断面的水流轴向速度,抑制“水翅”的产生;在泵站设计流量工况下,组合式阶梯消能工第一级阶梯的总流量分配均匀度提高了 0.42,水平面左侧的最大压强减小了 17%,右侧的最大压强减小了 21%,组合式阶梯消能工的消能率提升了 4.12%。
关键词:城市污水提升泵站;阶梯消能工;水力特性;整流措施;数值模拟

中图分类号: TU992

文献标志码: A

文章编号: 1000-1980(2025)05-0081-09

Analysis and improvement of hydraulic characteristics of step energy dissipators in double-layer pumping stations for urban sewage lifting

XU Hui, XIE Feng, ZHANG Rui, FENG Jiangang, ZHOU Minzhe, LI Guanglei, RAO Ning

(College of Agricultural Science and Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China)

Abstract: To improve the hydraulic flow pattern and energy dissipation rate of the step energy dissipator in the double-layer pumping station for urban sewage lifting and reduce the impact on the step surface, based on the numerical simulation method, the renormalization group (RNG) $k-\varepsilon$ turbulence model and the volume of fluid (VOF) model were used to analyze the hydraulic characteristics of the step energy dissipator. There are adverse flow patterns of the mainstream being biased to the right and “water wings” in the water flow of the step energy dissipator. To address this issue, a combined rectification optimization scheme of “diversion ramp + diversion pier + tail ramp of steps” was proposed, and its optimization effect was analyzed. The results show that the diversion ramp can effectively increase the flow on the left side of the step and improve the adverse flow pattern of the deflected flow. The diversion piers and the tail piers of the steps can reduce and homogenize the axial velocity of the water flow at the exit section of the steps and suppress the formation of “water wings”. Under the design flow conditions of the pumping station, the uniformity of the total flow distribution of the first step of the combined step energy dissipator has increased by 0.42; the maximum pressure on the left side of the horizontal plane has decreased by 17%; the maximum pressure on the right side has decreased by 21%, and the energy dissipation rate of the combined step energy dissipator has increased by 4.12%.

Key words: pumping station for urban sewage lifting; step energy dissipator; hydraulic characteristic; rectification measure; numerical simulation

随着我国城市化进程的加快以及人口的激增,城市生产生活污水量呈逐年递增趋势^[1-2],给市政排水系统带来巨大压力,而城市污水提升泵站成为有效缓解市政排水系统中污水滞留问题的重要设施。因受用地面积、已建管网布置等条件限制,上海某新建大型污水提升泵站采用了双层布置形式,其中底层设计了一座

基金项目: 江苏省创新支撑计划国际科技合作项目(BZ2023047);国家自然科学基金项目(51809081)

作者简介: 徐辉(1961—),男,教授,博士,主要从事泵站工程水力优化研究。E-mail: hxu@hhu.edu.cn

通信作者: 张睿(1984—),男,副教授,博士,主要从事水能开发利用研究。E-mail: gulie1984@163.com

引用本文: 徐辉,谢锋,张睿,等. 城市污水提升双层泵站阶梯消能工水力特性分析及改善[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2025, 53(5): 81-89.

XU Hui, XIE Feng, ZHANG Rui, et al. Analysis and improvement of hydraulic characteristics of step energy dissipators in double-layer pumping stations for urban sewage lifting [J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2025, 53(5): 81-89.

大型泵房、上层设计了两座小型泵房,可实现超大型污水处理厂的厂际连通,发挥片区水量调配、事故应急、综合调控等多重功能,从而提高污水输送和处理的安全保障程度。此外,上层泵房与下层泵房之间的互通存在水流落差过大的问题,设计采用阶梯消能工来实现水流能量的耗散。阶梯消能工由于消能效果好、空化风险低、占地面积小、施工简单且投资成本小等优点,被广泛应用于阶梯溢流坝^[3]、阶梯溢洪道^[4]、旋转阶梯竖井^[5]、阶梯河道^[6]、梯形鱼道^[7]等水利工程。但是,相比于传统水利工程,市政工程中的阶梯消能工的来流流量较小,水流流速较低,水流流态为跌落水流,同时来流具有非恒定、多向紊动等复杂特征,易对阶梯消能工的稳定运行产生不利影响。目前,针对城市污水提升泵站内采用阶梯消能工进行消能的相关研究尚显匮乏,尤其对城市污水提升泵站环境下阶梯消能工的水力特性研究仍存在较多空白。鉴于此,开展城市污水提升泵站内阶梯消能工的水力特性分析及其优化改善研究,对于丰富该领域基础理论成果与提升工程实际应用效能均具有重要意义。

阶梯消能工主要是利用多级阶梯增大水流的紊动,提高水流掺气,通过水流跌落冲击阶梯且产生旋滚来达到分散消能的目的^[8]。针对传统的阶梯消能工,学者们从阶梯水流流态^[9-11]、阶梯面压强^[12]和能量耗散^[13-16]等方面进行了深入研究。其中,国内外学者普遍将阶梯消能工中阶梯水流流态分为跌落水流、过渡水流以及滑行水流 3 种类型^[17]。针对传统的阶梯消能工中阶梯竖直面存在负压、阶梯水平面存在冲刷以及阶梯消能工的消能率提升不足等问题,一些学者提出改变阶梯形状的变阶梯消能工以及在阶梯表面增加辅助措施的组合式阶梯消能工。在改变阶梯形状方面:Ghaderi 等^[18]提出了圆形迷宫式阶梯消能工,发现其相比于常规阶梯消能工的消能率提升了 18%,且在阶梯竖直面上具有更小的负压;Ikinciogullari^[19]提出了谐波式阶梯消能工,发现波峰长度相同,循环次数较多的模型具有较高的能量耗散率;田忠等^[20-24]分别提出 V 形、倒 V 形、M 形、琴键阶、梯形凹角形的变阶梯消能工,发现改变阶梯形状后,阶梯中水流紊动更加剧烈、掺气更充分,阶梯消能工的消能效果更好。在阶梯表面增加措施方面:徐添润等^[25]提出一种梯形消能墩组合式阶梯消能工,即在阶梯表面布置梯形消能墩,其具有更高的消能率并且有效降低了阶梯表面的空化空蚀;毛钧等^[26]对比了常规阶梯消能工与增加阶梯尾坎的阶梯消能工,发现水流易在跌坎回水区形成坎后漩涡,增加水流的能量耗散,提高阶梯消能工的消能效果;李晓超等^[27]发现阶梯消能工中增加掺气坎可以提高阶梯水流中的掺气量,同时提高阶梯消能工的消能效果。

为探究上海某污水提升双层泵站所采用的阶梯消能工的水力特性,本文基于数值模拟方法分析其存在的不良水力现象,针对不良流态提出优化改进方案并研究其对污水提升双层泵站阶梯消能工的水力特性及消能率的改善效果。

1 数值模型的建立与验证

1.1 几何模型

上海某污水提升双层泵站阶梯消能工的第一级阶梯左侧宽度为 2.55 m,右侧宽度 5.75 m,其余阶梯的左侧宽度 5.35 m,右侧阶梯宽度 5.75 m,各级阶梯的高度 3.00 m(图 1)。城市污水提升双层泵站阶梯消能工的运行工况包括小流量工况 20 万 m³/d、设计工况 40 万 m³/d、大流量工况 60 万 m³/d。

定义相对临界水深 ζ 作为无量纲流量:

$$\zeta = h_c/h \tag{1}$$

其中

$$h_c = \sqrt[3]{q^2/g}$$

式中: h 为阶梯高度,m; h_c 为临界水深,m; q 为单宽流量,m²/s; g 为重力加速度,m/s²。污水提升双层泵站阶梯消能工的 3 种运行流量(20 万、40 万、60 万 m³/d)对应的相对临界水深分别为 0.055、0.087、0.114。

为观察阶梯水流流态并准确测量水流流速、断面流量等,在阶梯消能工内布置典型断面。选取在各级阶梯末端往内部延伸 0.10 m 处布置 1~6 断面,并以结构墩的中轴线为基准,将 1~6 断面分为 R1~R6 断面和 L1~L6 断面,如图 2 所示。

1.2 控制方程及边界条件

城市污水提升双层泵站阶梯消能工中水流紊动剧烈,并且阶梯中会出现水流的旋滚,因此选择对旋滚水流、大曲率流动、旋涡流动具有较高计算精度的 RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型进行模拟^[28],在计算时采用有限体积法迭

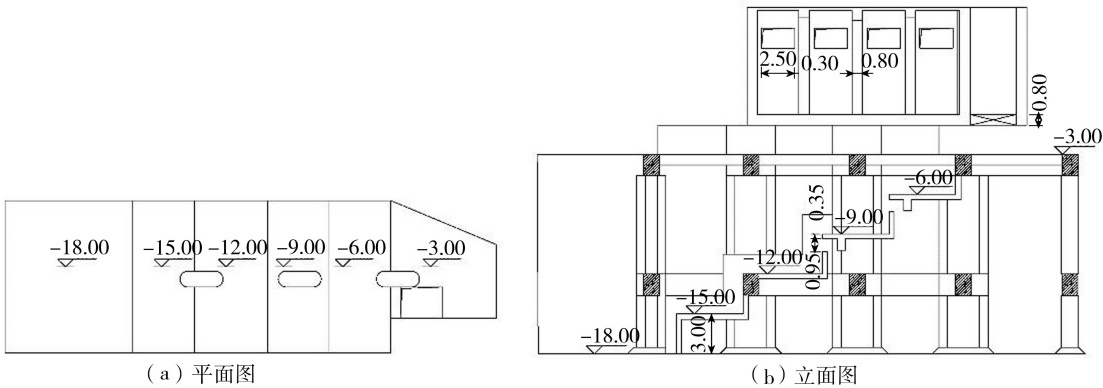


图 1 污水提升双层泵站阶梯消能工布置 (单位:m)

Fig. 1 Layout of step energy dissipator in double-layer pumping station for sewage lifting (unit: m)

代求解代数方程,压力速度耦合方式采用 PISO 格式,对自由液面的跟踪采用 VOF 模型^[29]。

基本方程:

$$\alpha_w + \alpha_a = 1 \tag{2}$$

$$\rho = \alpha_w \rho_w + (1 - \alpha_w) \rho_a \tag{3}$$

$$\mu = \alpha_w \mu_w + (1 - \alpha_w) \mu_a \tag{4}$$

$$\square \cdot \boldsymbol{U} = 0 \tag{5}$$

$$\frac{\partial(\rho \boldsymbol{U})}{\partial t} + \square \cdot (\rho \boldsymbol{U} \boldsymbol{U}) = -\square p + \square \cdot [\mu(\square \boldsymbol{U} + \square \boldsymbol{U}^T)] + \rho \boldsymbol{g} + \boldsymbol{F} \tag{6}$$

k 方程:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial[(\mu + \mu_t/\sigma_k)(\partial k/\partial x_j)]}{\partial x_i} + G_k - \rho \varepsilon \tag{7}$$

ε 方程:

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \varepsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial[\sigma_\varepsilon(\mu + \mu_t) \partial \varepsilon/\partial x_j]}{\partial x_j} + C_{1\varepsilon} \varepsilon G_k/k - C_{2\varepsilon} \rho \varepsilon^2/k \tag{8}$$

式中: α_w 、 α_a 分别为水、气体的体积分数; ρ_w 和 ρ_a 分别为水、气体的密度, kg/m^3 ; μ_w 和 μ_a 分别为水、气体的动力黏度, $\text{Pa}\cdot\text{s}$; ρ 为密度, kg/m^3 ; μ 为动力黏度, $\text{Pa}\cdot\text{s}$; μ_t 为涡的黏度系数; p 为压强, Pa ; $\boldsymbol{U}$ 为速度矢量, m/s ; $\boldsymbol{F}$ 为体积力, N ; t 为时间, s ; u_i 为速度分量, m/s ; x_i 、 x_j 为坐标分量; σ_k 、 σ_ε 分别为紊动能 k 、紊动能耗散率 ε 对应的普朗特数; G_k 为平均速度梯度引起的紊动能产生项; $C_{1\varepsilon}$ 、 $C_{2\varepsilon}$ 为常数项, $C_{1\varepsilon}=1.42$ 、 $C_{2\varepsilon}=1.68$ 。

在进行数值模拟计算时,阶梯消能工水流进口边界采用速度进口,水流出出口边界采用压力出口,压力为标准大气压,其余边界采用固壁边界,定义为无滑移边界条件。

1.3 网格划分及无关性验证

由于城市污水提升双层泵站阶梯消能工结构复杂,因此本文采用自适应能力较强的非结构化网格离散计算区域,对局部结构进行加密处理。网格数量是影响数值模拟计算效率和计算准确性的重要因素。在设计工况($\zeta=0.087$)运行条件下,选择阶梯消能工 L1 断面的断面流量比 θ_{L1} 为典型变量,以网格数量为因变量,采用五套网格方案进行网格无关性分析。其中断面流量比 θ 的定义为

$$\theta_m = Q_{mL}/Q_{m\text{总}} \tag{9}$$

式中: Q_{mL} 为 m 断面的左侧水流流量, m^3/s ; Q_m 为阶梯 m 断面内水流流量, m^3/s 。

θ 值越接近 0.5 表示该断面的左右两侧过流流量越接近。如图 3 所示,随着网格数量的增加, L1 断面的断面流量比在不断增加,当网格数量超过 452 万时,已无明显变化。考虑到计算精度与计算效率,本文选择网格数量为 452 万个,其计算网格如图 4 所示。

1.4 数值模拟结果验证

为了确保数值模拟结果的准确性,选择采用物理模型试验验证数值模拟计算结果。模型按照重力相似准则,几何比尺(原型:模型)为 15:1,建立阶梯消能工水力模型。阶梯消能工水力模型采用自循环开敞式

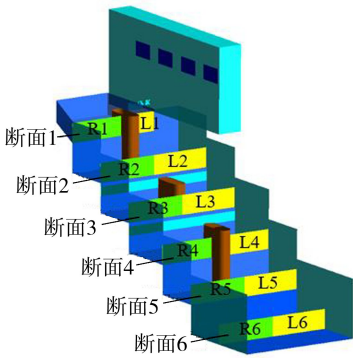


图 2 典型断面示意图

Fig. 2 Typical cross-sections

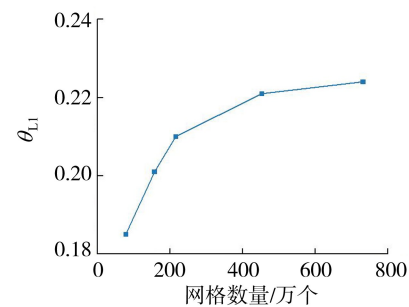


图 3 网格无关性检验

Fig. 3 Grid independence test

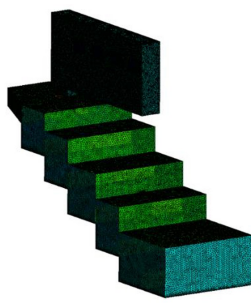


图 4 阶梯消能工三维网格

Fig. 4 Three-dimensional grid diagram of step energy dissipator

试验系统,具体布置如图 5 所示。

在设计工况($\zeta=0.087$)运行条件下,选取阶梯消能工各级阶梯的左侧断面的断面流量比 θ 为验证变量,对原型方案以及针对原型方案中不良水力特性而增加整流措施的优化方案进行数值模拟结果和物理模型试验结果进行对比,结果如图 6 所示,原型方案和优化方案的左侧断面 θ 的数学模型值与物理模型值基本吻合,误差在 5% 以内,模拟结果准确性高,表明本文采用的数值模拟方法具有良好的计算精度。

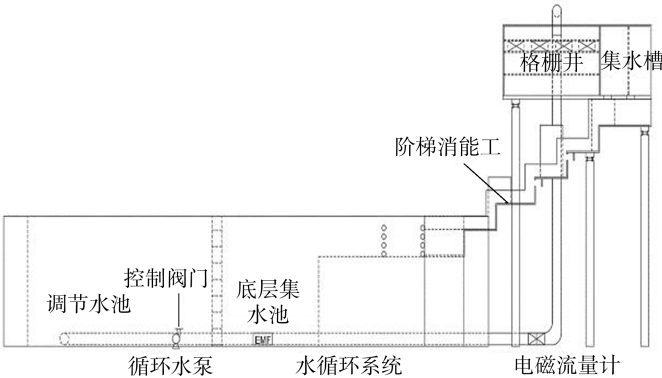


图 5 物理模型试验系统布置示意图

Fig. 5 Physical model test system layout

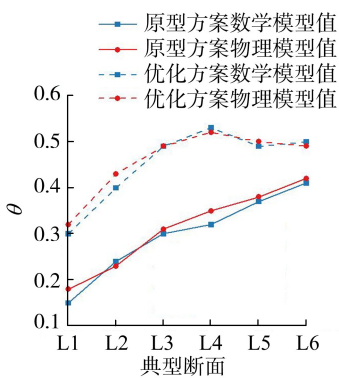


图 6 数值模拟结果验证

Fig. 6 Verification of numerical simulation results

2 原型阶梯消能工水力特性

Chanson^[30]将阶梯消能工的流态划分为 3 种类型,分别为跌落水流、过渡水流和滑行水流并提出 3 种流态的划分标准。依据 Chanson^[30]的划分标准本文中 3 种工况下阶梯消能工水流流态均为跌落水流。由图 7 可知,水流从集水槽跌落进第一级阶梯中,在阶梯末端弯曲形成水舌并自由跌落进下一级阶梯,水舌内缘中存在自由水面,水面上存在近似三角形的稳定空腔。在 $\zeta=0.087$ 和 $\zeta=0.114$ 时,阶梯内水流在第二级阶梯末端出现越级水流,即部分阶梯水流从第二级阶梯末端跃出,进而跌落到第四级阶梯,这种现象也被称为“水翅”。水翅常见于阶梯消能工小流量运行时,其易对阶梯水平面产生较大的冲击破坏,影响阶梯消能工的正常运行^[31-32]。

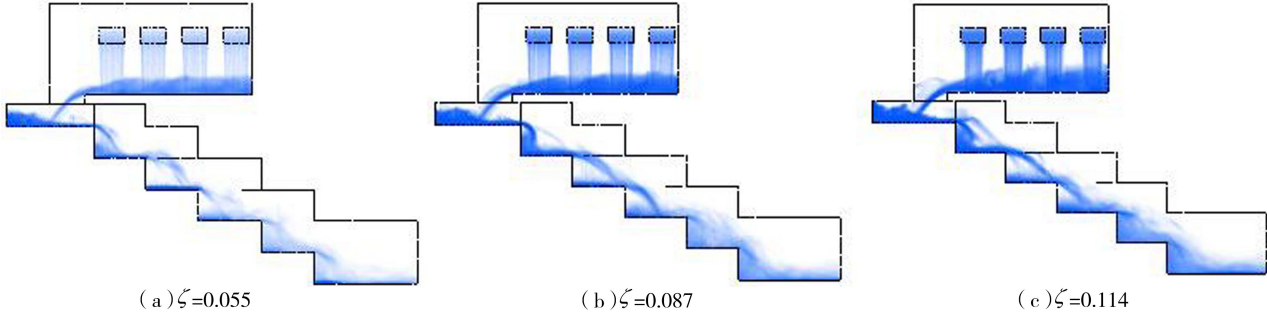


图 7 原型阶梯消能工流态

Fig. 7 Flow patterns of prototype step energy dissipator

为分析阶梯消能工阶梯段两侧断面流量分配情况,引用断面流量比 θ 和总流量分配均匀度 S 进行分析评价^[33]。由图 8 可知,3 种相对临界水深下,阶梯消能工 L1~L6 断面的断面流量比都小于 0.5,阶梯消能工的左侧断面流量较少。由图 9 可知,3 种相对临界水深下,阶梯消能工 1~6 断面的总流量分配均匀度都小于 1,阶梯消能工的左右两侧断面流量分配不均匀,存在水流偏向右侧的不良流态。

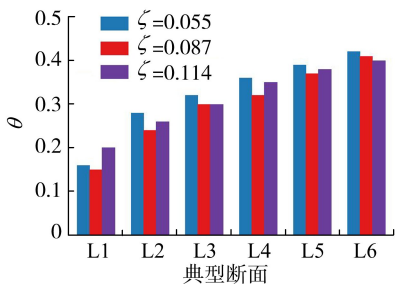


图 8 原型阶梯消能工断面流量比

Fig. 8 Cross-section flow ratio of prototype step energy dissipator

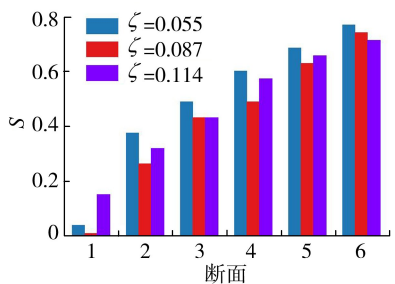


图 9 原型阶梯消能工总流量分配均匀度

Fig. 9 Uniformity of total flow distribution of prototype step energy dissipator

在 $\zeta=0.087$ 时,阶梯消能工中出现“水翅”现象,选取越级水流冲击的第 4 级阶梯水平面作为分析压强分布的典型位置。由图 10(a)可知,在水舌冲击点处出现压强奇点,压强最大值为 28.7 kPa,对阶梯水平面造成较大冲击。由图 10(b)可知(图中 l 为阶梯长度),在第 4 级阶梯水平面的测线上压强整体呈现 Δ 形分布,在相对长度 0.4~0.7 区间内,阶梯水流直接冲击在阶梯表面,使该区间出现压强剧增。此外,阶梯右侧水平面最大冲击压强为 28.7 kPa,左侧的最大冲击压强为 11.8 kPa。

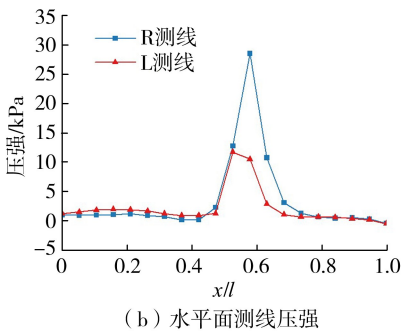
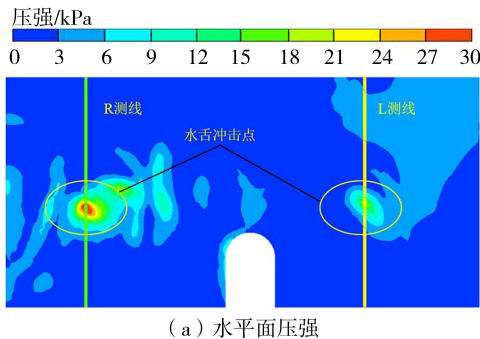


图 10 第 4 级阶梯压强分布

Fig. 10 Pressure distribution at fourth step

总体来看,城市污水提升双层泵站阶梯消能工运行时存在主流偏向右侧,导致阶梯左右两侧断面的流量分配不均和轴向流速分布不均,影响阶梯消能工中水流能量的耗散;同时,在 0.087 和 0.114 的相对临界水深下,阶梯消能工中会出现“水翅”现象,部分水流会越级跌落,对阶梯表面产生冲击破坏。这 2 种不良流态影响了阶梯消能工在泵站内的正常运行,需要提出相应的改善措施,提高阶梯消能工的运行效率。

3 阶梯消能工水力特性改善分析

3.1 组合式阶梯消能工方案

为改善阶梯消能工运行时的偏流和“水翅”等不良流态,本文提出“分流坎+导流墩+阶梯尾坎”的组合式阶梯消能工优化方案(图 11):在第一级阶梯中间布置分流坎,增加左侧断面的流量分配,同时降低第一级阶梯内的横向流速;在第一级阶梯右侧增设导流墩以减小水流的横向流速并增大阶梯水流在右侧断面的扩散范围,从而增加右侧断面的轴向流速均匀度;在各级阶梯出口处设置阶梯尾坎,增加阶梯表面的水层高度,从而增大水流的过流面积,减小阶梯水流流速,旨在抑制“水翅”的产生。

3.2 流态改善效果分析

由图 12 可知,通过增加分流坎、导流墩和阶梯尾坎的措施,组合式阶梯消能工的各级阶梯表面的水垫层高度增大,阶梯中水流的过流断面面积增大,水流流速降低,使阶梯水流在阶梯末端逐级跌落,抑制了“水

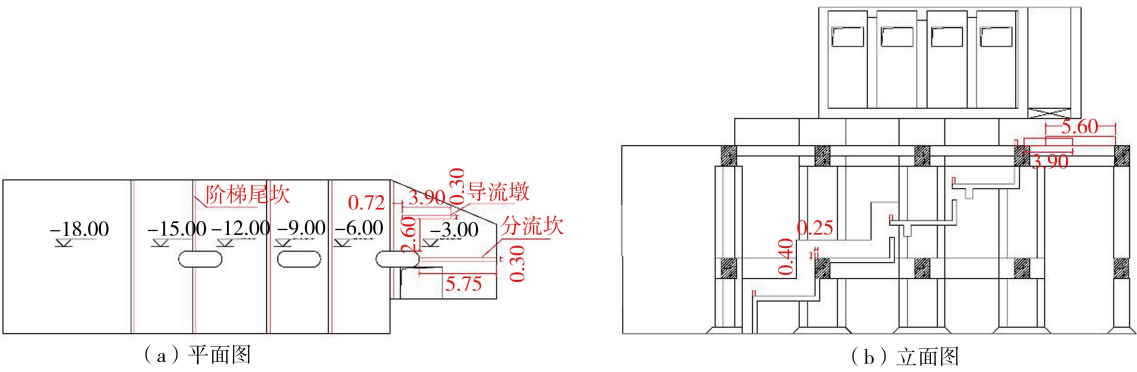


图 11 组合式阶梯消能工布置(单位:m)

Fig. 11 Layout of combined step energy dissipator (unit: m)

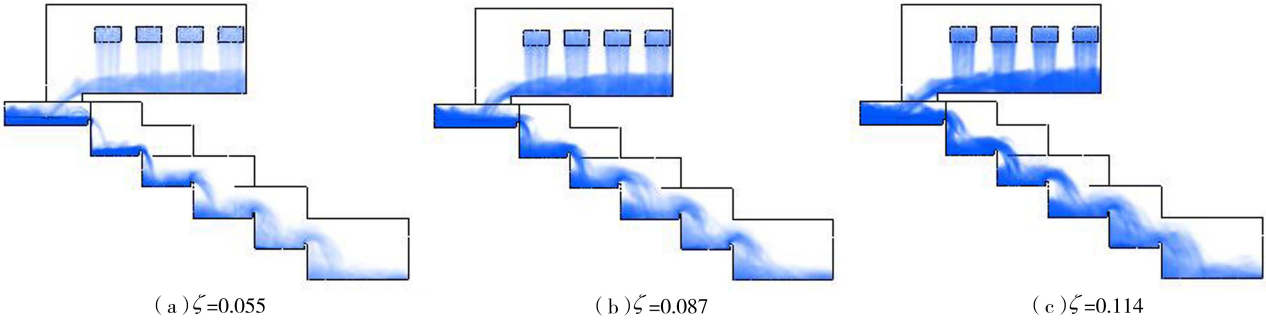


图 12 组合式阶梯消能工的水流流态

Fig. 12 Flow patterns of combined step energy dissipator

翅”的产生。

由图 13(a)可知,阶梯水流从上一阶梯自由跌落,水流冲击下一级阶梯面并分成两部分水流,其中一部分流向阶梯隅角处,与水层发生旋滚;另一部分流向阶梯末端,在水舌冲击点后发生水跃。由图 13(b)可知,增加阶梯尾坎的措施使各级阶梯表面的水流在阶梯尾坎前产生反向水流,同时反向水流与阶梯表面中向前的主流发生碰撞,在阶梯中发生水流的旋滚,促进了水流能量的耗散。

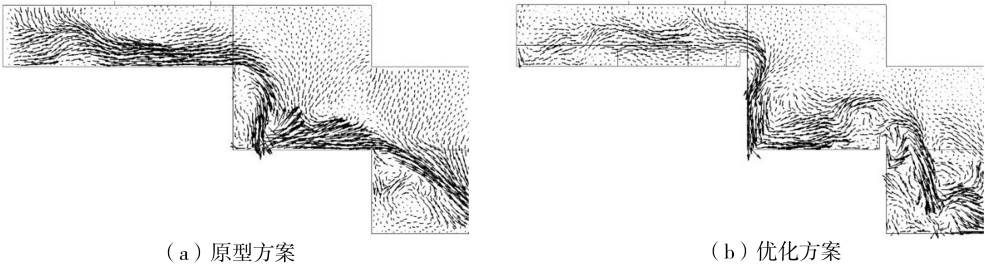


图 13 阶梯消能工优化前后的水流流速矢量($\zeta=0.087$)

Fig. 13 Flow velocity vector of step energy dissipator before and after optimization ($\zeta=0.087$)

随着第一级阶梯中分流坎的增加,水流从集水槽内跌落到第一级阶梯左侧,同时分流坎使一部分水流留在第一级阶梯左侧,使少量水流越过分流坎到第一级阶梯右侧。在水流从集水槽跌落到第一级阶梯中,通过分流坎增加第一级阶梯中左侧水流流量,提高阶梯两侧流量分配均匀性,从而避免阶梯消能工中偏流现象。由图 14 可知,组合式阶梯消能工的各级阶梯断面的总流量分配均匀度有了一定提升,其中,从 3~6 断面的总流量分配均匀度都接近 1,表示其左右断面流量分布均匀;同时,在 $\zeta=0.087$ 时,1 断面的总流量分配均匀度相比于原型方案提升了 0.42,2 断面提升了 0.45,其左右断面流量分布更趋于均匀。

为了更好地研究阶梯水流流态,选择各级阶梯出口右侧断面,引入轴向流速均匀度来分析评价^[34]。第一级阶梯中的偏右主流集中,在阶梯边壁处流出并跌落到下一级阶梯中。在第一级阶梯右侧增加导流墩的措施,可以减少来流的横向流速,使主流在第一级阶梯沿导流墩方向均匀扩散,提高第一级阶梯右侧出口断

面轴向流速分布均匀性,并使阶梯消能工中各级阶梯右侧出口断面 的轴向速度分布均匀性有一定的提高。在 $\zeta=0.087$ 时,原型方案中阶梯水流主流偏右,右侧断面轴向流速分布不均,R1 断面的轴向流速均匀度为 0.29;优化方案中各级阶梯右侧断面的轴向流速均匀度有了一定增加,R1 断面的轴向流速均匀度为 0.40,增加了 0.11,阶梯出口断面轴向流速分布更加均匀。

由图 15(a)可知,组合式阶梯消能工中阶梯水平面的压强分布有所改善,水舌冲击点的压强减小,平面压强分布趋于均匀。由图 15(b)可知,在阶梯水平面测线上的压强分布呈现 M 形,在相对长度 0.4~0.7 的区间内,由于上一级阶梯的水舌撞击阶梯表面,导致该区域内压强增大,在相对长度 0.9~1.0 中,由于水流在靠近阶梯尾坎时出现雍高,导致压强逐渐增大。组合式阶梯消能工第 4 级阶梯右侧阶梯面的最大冲击压强为 22.7 kPa,减小了 21%;其左侧的最大冲击压强为 9.8 kPa,减小了 17%。“分流坎+导流墩+阶梯尾坎”的措施抑制了阶梯中“水翅”的产生,增大了阶梯表面水垫层的高度,减小了阶梯表面的冲击破坏。

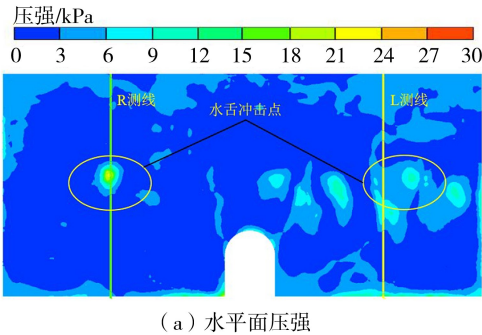


图 15 组合式阶梯消能工第 4 级阶梯压强分布 ($\zeta=0.087$)

Fig. 15 Pressure distribution at fourth step of combined step energy dissipator ($\zeta=0.087$)

由图 16 可知,随着相对临界水深的增大,阶梯消能工的消能率都在减小,同时,组合式阶梯消能工的减小幅度较小。此外,相比于原型方案,优化方案在 $\zeta=0.055,0.087,0.114$ 时的阶梯消能率分别提高了 2.48%、4.12%和 4.27%。优化方案比原型方案可以提高水流能量的耗散效率,在不同来流情况下具有高的消能率。

4 结 论

a. 相较于原阶梯消能工,“分流坎+导流墩+阶梯尾坎”的组合式阶梯消能工可以抑制阶梯中“水翅”的产生;同时,在 $\zeta=0.087$ 时,组合式阶梯消能工的第 4 级阶梯水平面的左侧最大压强减小了 17%,右侧最大压强减小了 21%,降低了阶梯水流对阶梯表面的冲击破坏影响。

b. 在不同相对临界水深下,原阶梯消能工阶梯左右两侧的流量分配不均匀,组合式阶梯消能工使各级阶梯断面的总流量分配均匀度提高了 0.11~0.45,提高了阶梯左右两侧的流量分配均匀性,改善了阶梯中存在的偏流流态。

c. 随着相对临界水深的增大,组合式阶梯消能工和原阶梯消能工的消能率逐渐下降,组合式阶梯消能工的降低幅度更小;相较于原阶梯消能工,组合式阶梯消能工的消能率提高了 2.48%~4.27%,具有更优的消能效果。

d. 原阶梯消能工表面的水流冲击压强较大,容易对其结构安全性产生不利影响。因此,后续将进一步基于流固耦合分析方法,围绕“分流坎+导流墩+阶梯尾坎”优化整流方案对城市污水提升双层泵站阶梯消能

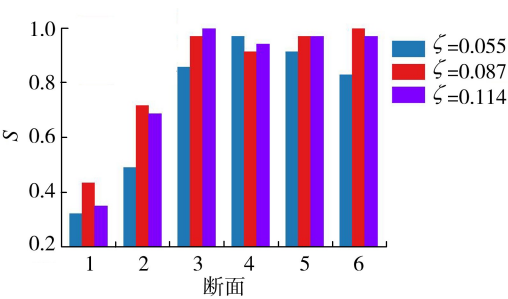
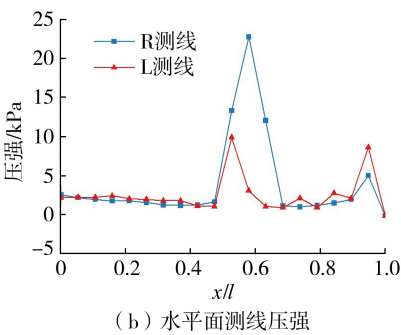


图 14 组合式阶梯消能工总流量分配均匀度

Fig. 14 Uniformity of total flow distribution of combined step energy dissipator



(b) 水平面测线压强

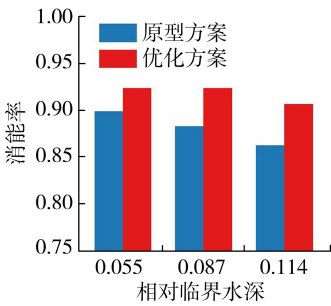


图 16 阶梯消能工的消能率

Fig. 16 Energy dissipation rate of step energy dissipator

工结构安全性的改善效果开展研究。

参考文献:

[1] 方国华,李智超,钟华昱,等. 考虑供水均衡性的南水北调东线工程江苏段优化调度[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2023,51(3):10-18. (FANG Guohua,LI Zhichao,ZHONG Huayu,et al. Optimal operation of Jiangsu section of the eastern route of the South-to-North Water Diversion Project considering the water supply balance[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2023,51(3):10-18. (in Chinese))

[2] 安莉娜,范国福,吴迪,等. 基于水资源承载力与城市经济社会发展水平耦合协调度模型的遵义市发展评价[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2023,51(2):35-41. (AN Lina,FAN Guofu,WU Di,et al. Development evaluation of Zunyi City based on coupling coordination degree model of water resources carrying capacity and urban economic and social development level[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2023,51(2):35-41. (in Chinese))

[3] 邱毅,吴欧侯,杨具瑞,等. 阶梯溢流坝面坡度对一体化消能工水力特性的影响[J]. 水利水电科技进展,2020,40(3):28-35. (QIU Yi,WU Ouyu,YANG Jurui,et al. Impact of stepped overflow dam surface slope on hydraulic characteristics of an integrated energy dissipator[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2020,40(3):28-35. (in Chinese))

[4] 陈润,李永业,张乐元,等. 溢洪道交错式阶梯消能工的消能特性研究[J]. 水电能源科学,2023,41(1):120-123. (CEHN Run,LI Yongye,ZHANG Leyuan,et al. Study on energy dissipation characteristics of staggered stepped energy dissipaters in spillway[J]. Water Resources and Power,2023,41(1):120-123. (in Chinese))

[5] SUN Jingkang,FEI Zhaodan,QIAN Shangtuo,et al. Airflow characteristics of the stepped dropshaft in the deep tunnel storage system[J]. AQUA - Water Infrastructure,Ecosystems and Society,2024,73(12):2294-2308.

[6] MISHRA R,OJHA C S P. Mitigating the after-effect of climate-induced disaster through energy dissipation using stepped storm waterway in hilly roads[J]. Journal of Water and Climate Change,2024,15(9):4343-4367.

[7] 李恒,王晓刚,郑飞东. 梯形断面鱼道内水流的三维特性分析[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2023,51(1):61-65. (LI Heng,WANG Xiaogang,ZHENG Feidong. Three-dimensional characteristics analysis of flow in trapezoidal fishway[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2023,51(1):61-65. (in Chinese))

[8] CHANSON H. Energy dissipation on stepped spillways and hydraulic challenges—prototype and laboratory experiences[J]. Journal of Hydrodynamics,2022,34(1):52-62.

[9] CHANSON H. Stepped spillway prototype operation and air entrainment:toward a better understanding of the mechanisms leading to air entrainment in skimming flows[J]. Journal of Hydraulic Engineering,2022,148(11):05022004.

[10] 张伟,李书芳,王景旭. 反弧阶梯溢洪道水力特性[J]. 水利水电科技进展,2022,42(3):75-80. (ZHANG Wei,LI Shufang,WANG Jingxu. Hydraulic characteristics of a reverse arc-stepped spillway[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2022,42(3):75-80. (in Chinese))

[11] 马朋辉,胡亚瑾,刘韩生. 台阶式溢洪道滑行流相对水力特性规律研究[J]. 水利学报,2020,51(8):997-1007. (MA Penghui,HU Yajin,LIU Hansheng. Study on the relative hydraulic characteristics of skimming flow on stepped spillways[J]. Journal of Hydraulic Engineering,2020,51(8):997-1007. (in Chinese))

[12] 赵廷红,施宇轩. 阶梯式溢流坝台阶面力学性能数值模拟研究及优化[J]. 兰州理工大学学报,2023,49(1):136-143. (ZHAO Tinghong,SHI Yuxuan. Numerical simulation and optimization of mechanical properties of step surfaces for stepped spillway[J]. Journal of Lanzhou University of Technology,2023,49(1):136-143. (in Chinese))

[13] JAHAD U A,CHABUK A,AL-AMERI R,et al. Flow characteristics and energy dissipation over stepped spillway with various step geometries:case study (steps with curve end sill)[J]. Applied Water Science,2024,14(3):60.

[14] 吴海涛,郑温刚,田丽蓉,等. 基于 SPH 的台阶式溢洪道最优消能率参数研究[J]. 水资源与水工程学报,2023,34(2):107-113. (WU Haitao,ZHENG Wengang,TIAN Lirong,et al. Optimization of energy dissipation rate parameters of stepped spillways based on SPH[J]. Journal of Water Resources & Water Engineering,2023,34(2):107-113. (in Chinese))

[15] LEBDIRI F,SEGHIR A,BERREKSI A. Multi-objective optimization of stepped spillway and stilling basin dimensions[J]. Water Supply,2022,22(1):766-778.

[16] 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 Yinghao,ZHANG Ruihai. Research on hydraulic characteristics of stepped spillways with non-uniform step lengths[J]. China Rural Water and Hydropower,2025(8):191-195. (in Chinese))

[17] KRAMER M,CHANSON H. Transition flow regime on stepped spillways:air-water flow characteristics and step-cavity fluctuations [J]. Environmental Fluid Mechanics,2018,18(4):947-965.

[18] GHADERI D,EBRAHIMNEZHADIAN H,MOLLAZADEH M. Three-dimensional analysis of the performance of circular stepped spillways in the skimming flow regime[J]. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering,2024,46(7):415.

[19] IKINCIÖGULLARI E. Energy dissipation performance of labyrinth and harmonic stepped spillways [J]. Journal of Hydroinformatics,2024,26(10):2668-2682.

[20] 田忠,许唯临,余挺,等. “V”形台阶溢洪道的消能特性[J]. 四川大学学报(工程科学版),2010,42(2):21-25. (TIAN Zhong,XU Weilin,YU Ting,et al. Characteristics of energy dissipation for “V”-type stepped spillway[J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition),2010,42(2):21-25. (in Chinese))

[21] 徐鹏,赵信峰,白兆亮. 倒 V 形阶梯与传统阶梯流场特性对比研究[J]. 水资源与水工程学报,2017,28(5):180-185. (XU Peng,ZHAO Xinfeng,BAI Zhaoliang. Comparison of the flow field in inverted V-shaped and traditional stepped spillway[J]. Journal of Water Resources & Water Engineering,2017,28(5):180-185. (in Chinese))

[22] 王磊,刁明军,朱润野,等. “M”形台阶溢洪道的消能特性[J]. 水力发电学报,2015,34(5):95-102. (WANG Lei,DIAO Mingjun,ZHU Runye,et al. Characteristics of energy dissipation of M-shape stepped spillways[J]. Journal of Hydroelectric Engineering,2015,34(5):95-102. (in Chinese))

[23] 赵一名,朱李英,李永业. 琴键阶消能工消能特性[J]. 排灌机械工程学报,2023,41(10):1043-1050. (ZHAO Yiming,ZHU Liying,LI Yongye. Characteristics of energy dissipation for keyboard-stepped energy dissipator[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering,2023,41(10):1043-1050. (in Chinese))

[24] 李少伟,张文传,王均星,等. 梯形凹角台阶式溢洪道水力特性[J]. 长江科学院院报,2022,39(6):56-63. (LI Shaowei,ZHANG Wenchuan,WANG Junxing,et al. Hydraulic characteristics of stepped spillway with trapezoidal concave angle[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute,2022,39(6):56-63. (in Chinese))

[25] 徐添润,李永业,田煜,等. 梯形消能墩组合式台阶消能工水力特性[J]. 农业工程学报,2024,40(5):82-89. (XU Tianrun,LI Yongye,TIAN Yu,et al. Hydraulic characteristics of the combined step dissipator with trapezoidal energy dissipation pier[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2024,40(5):82-89. (in Chinese))

[26] 毛钧,黄恒粤,陈焱,等. 山地城市末端排水口跌水消能特性数值模拟研究[J]. 水电能源科学,2023,41(8):139-142. (MAO Jun,HUANG Hengyue,CHEN Yao,et al. Numerical simulation of falling-sill dissipation characteristics of terminal drainage outlets in mountainous cities[J]. Water Resources and Power,2023,41(8):139-142. (in Chinese))

[27] 李晓超,乔超亚,谢敏萍,等. 掺气坎 σ 值对阶梯式溢洪道的性能影响研究[J]. 灌溉排水学报,2023,42(7):131-137. (LI Xiaochao,QIAO Chaoya,XIE Minping,et al. Influence of aeration threshold on performance of stepped spillway[J]. Journal of Irrigation and Drainage,2023,42(7):131-137. (in Chinese))

[28] 刘彬,忽彦鹏,杨磊,等. 基于 VOF 法长陡坡排水隧洞三维数值模拟[J]. 武汉大学学报(工学版),2017,50(1):43-49. (LIU Bin,HU Yanpeng,YANG Lei,et al. 3D numerical simulation of long steep drainage tunnel based on VOF method[J]. Engineering Journal of Wuhan University,2017,50(1):43-49. (in Chinese))

[29] 薛宏程,刁明军,岳书波,等. 溢洪道出口斜切型挑坎挑射水舌三维数值模拟[J]. 水利学报,2013,44(6):703-709. (XUE Hongcheng,DIAO Mingjun,YUE Shubo,et al. 3-D numerical simulation of the jet nappe in the beveled flip bucket of the spillway [J]. Journal of Hydraulic Engineering,2013,44(6):703-709. (in Chinese))

[30] CHANSON H. Hydraulics of skimming flows over stepped channels and spillways[J]. Journal of Hydraulic Research,1994,32(3):445-460.

[31] 纪伟,吴建华,阮仕平. 泄洪洞中墩水翅现象的试验研究[J]. 河海大学学报(自然科学版),2007,35(1):18-21. (JI Wei,WU Jianhua,RUAN Shiping. Experimental study on water-wing phenomena for middle-piers of discharge tunnels[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2007,35(1):18-21. (in Chinese))

[32] 余易辰,贺昌海,杨磊. 台阶式溢洪道中墩水翅影响因素及改善措施[J]. 水电能源科学,2022,40(3):140-144. (YU Yichen,HE Changhai,YANG Lei. Influencing factors and improvement measures of water wing at the end of middle-pier of stepped spillway[J]. Water Resources and Power,2022,40(3):140-144. (in Chinese))

[33] 张睿,徐辉,陈毓陵,等. 斜向管涵进流城市雨水泵站箱涵流态分析及整流措施研究[J]. 水利学报,2018,49(5):598-607. (ZHANG Rui,XU Hui,CHEN Yuling,et al. Study on the flow patterns and rectification measures of box culvert of urban storm water pumping station with oblique pipe culvert[J]. Journal of Hydraulic Engineering,2018,49(5):598-607. (in Chinese))

[34] 丁哲,张睿,陈毓陵,等. 城市排水泵站水力特性及整流措施[J]. 水利水电科技进展,2024,44(2):7-14. (DING Zhe,ZHANG Rui,CHEN Yuling,et al. Hydraulic characteristics and rectification measures of urban drainage pumping station[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2024,44(2):7-14. (in Chinese))