

挑流阶梯溢洪道挑流特性

钱尚拓^{1,2,3}, 张浩达⁴, 刘光远⁴, 吴建华⁴, 冯建刚³, 何强^{1,2,3}

(1. 西藏农牧大学水利土木工程学院, 西藏 林芝 860000; 2. 西藏土木水利电力工程技术研究中心, 西藏 林芝 860000;
3. 河海大学农业科学与工程学院, 江苏 南京 210098; 4. 河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 为避免挑流阶梯溢洪道挑流发生半淹没射流, 导致前置阶梯段压力分布异常、水翅现象严重以及结构振动等问题, 采用物理模型试验结合理论分析, 设计了 3 种试验模型, 研究设置通风井、延长进口水平段对挑流段水流流态和水力特性的影响。研究表明: 设置通风井与延长进口水平段能显著改善挑流流态, 有效减弱水翅现象, 顺利消除负压等不利水力条件; 得出了挑流阶梯溢洪道的最大运行流量和掺气池最小长度的计算表达式, 可为挑流阶梯溢洪道的结构设计和工程运行提供参考。

关键词: 挑流阶梯溢洪道; 挑流水舌; 掺气池; 流态; 水力特性

中图分类号: TV651.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-7647(2025)06-0019-07

Ski-jump characteristics of ski-jump stepped spillways // QIAN Shangtuo^{1,2,3}, ZHANG Haoda⁴, LIU Guangyuan⁴, WU Jianhua⁴, FENG Jiangang³, HE Qiang^{1,2,3} (1. College of Water Conservancy and Civil Engineering, Tibet Agriculture and Animal Husbandry University, Linzhi 860000, China; 2. Research Center of Civil, Hydraulic and Power Engineering of Tibet, Linzhi 860000, China; 3. College of Agricultural Science and Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 4. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: To prevent the semi-submerged jet in ski-jump stepped spillways, which leads to abnormal pressure distributions, severe water wing phenomena and structural vibrations in the upstream step section, a combination of physical model tests and theoretical analysis was used, and three types of test models were designed to study the influence of installing ventilation shafts and extending the inlet horizontal section on the flow pattern and hydraulic characteristics of the ski-jump section. The results show that installing ventilation shafts and extending the inlet horizontal section can significantly improve the ski-jump flow pattern, effectively mitigate the water wing phenomenon, and successfully eliminate adverse hydraulic conditions such as negative pressure. The maximum operating discharge for the ski-jump stepped spillway and the minimum length of the aeration basin were determined, providing a reference for the structural design and operation of ski-jump stepped spillways.

Key words: ski-jump stepped spillway; ski-jump jet; aeration basin; flow pattern; hydraulic characteristics

随着高坝大型水电工程不断规划与建设, 高速水流引发的技术难题日益受到关注^[1-3]。阶梯溢洪道作为一种有效的消能形式, 近年来受到了广泛的重视^[4-6]。张伟等^[7]提出反弧阶梯结构, 通过将阶梯水平面改为反弧面, 显著提升了掺气效果和消能率。Qian 等^[8-9]提出在阶梯溢洪道上游设置由挑流段、前置阶梯段和掺气池组成的前置掺气结构, 命名为挑流阶梯溢洪道, 并验证了其在提高消能和掺气方面的作用^[10-11]。挑流阶梯溢洪道结合了挑流结构和阶梯结构的优点, 通过挑流段和掺气池对水流进行预掺气, 再进入阶梯溢洪道消能, 在实现水流充

分掺气和高效消能的同时, 有效解决了空蚀和雾化等问题^[12-16]。

阶梯溢洪道通常存在 3 种水流流态, 随着流量的增大依次为跌落水流 (nappe flow)、过渡水流 (transition flow) 和滑行水流 (skimming flow)^[17-18]。挑流阶梯溢洪道中, 挑流段两侧设置边墙, 其下游连接前置阶梯段, 使得水流在不同流态下的水舌形态与传统挑流水舌有所不同。薛万云等^[19]研究表明, 挑流水舌入水激溅是雾化的主要因素。随着流量的增大, 挑流段水流如图 1 所示依次形成 3 种不同的水舌形态, 分别命名为跌落水舌、自由射流水舌和半

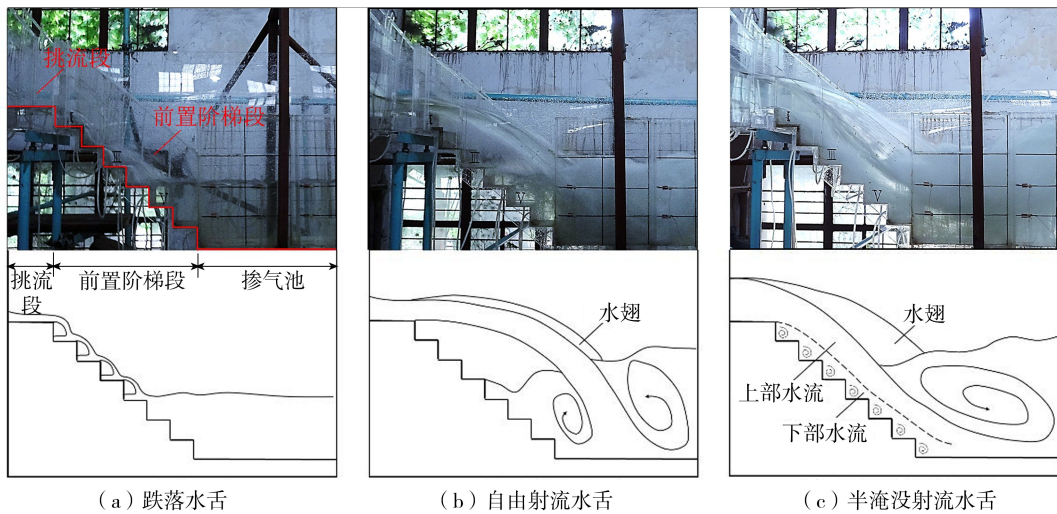


图1 挑流阶梯溢洪道的挑流段水舌试验照片和形态示意图

淹没射流水舌。流量较小时,水流因动能不足无法形成射流,在挑流段末端弯曲产生跌落水舌,沿前置阶梯段逐级下跌,直至掺气池水垫。随着流量的增大,水流动能足以在挑流段形成自由射流水舌,越过前置阶梯段,直接冲击掺气池水垫,在射流水舌下方形成稳定负压空腔,两侧边壁出现水翅。随着流量的进一步增大,回水淹没空腔,水舌演变为半淹没射流水舌,下部水流受负压紧贴阶梯,形成显著的掺气旋滚,上部水流因下部水流的支撑作用,类似于在光滑溢洪道上流动,两侧水翅现象进一步加剧。

Liu 等^[20]研究指出,精准把握不同结构水流特征是解决工程难题的关键。挑流段作为挑流阶梯溢洪道的核心功能部分,其水流流态和水力特性决定了整体结构设计的安全性。Deng 等^[21-24]研究表明,半淹没射流常伴随异常压力分布、剧烈水翅和结构振动。相较而言,自由射流流态具有负压空腔稳定、水翅较小和携气能力较强等优点,有利于挑流阶梯溢洪道平稳泄流,配合掺气池水垫能更有效地发挥前置掺气作用。因此,系统研究挑流段水流流态和水力特性具有重要意义,通过结构改进,尽可能维持自由射流流态,避免半淹没射流流态。

本文针对挑流阶梯溢洪道挑流可能存在的半淹没射流及剧烈水翅和结构振动问题,拟采用物理模型试验结合理论分析,研究挑流段水流流态和水力特性,通过优化结构参数和控制流量范围,避免不良流态的形成。研究结果可为挑流阶梯溢洪道的结构设计和工程运行提供参考。

1 试验装置与方法

1.1 试验装置

试验在河海大学高速水流实验室进行。挑流阶梯溢洪道试验装置由水泵、进水管、大型供水池、

挑流阶梯溢洪道物理模型及水循环系统组成。物理模型由有机玻璃制作,采用重力相似准则,其阶梯形状参考某水利水电工程的阶梯溢洪道,以 1 : 40 比例缩放。图 2 为挑流阶梯溢洪道几何结构和水流流态示意图,结构包括进口段、挑流段、前置阶梯段、掺气池和阶梯消能段。本文通过 M1、M2 和 M3 共 3 种试验模型,研究设置通风井和延长进口水平段对挑流流态的影响。以 Qian 等^[10]提出的挑流阶梯溢洪道结构为初始模型 M1,核心参数包括:进口水平段长度为 50.0 cm;WES 段尺寸为 33.0 cm × 20.5 cm (长×高),其轮廓由符合方程 $y = x^{1.85}/25.52$ 的曲线及切线组成;挑流段水平设置,长度为 33.0 cm;前置阶梯段设有 6 级阶梯 B1 ~ B6,每级阶梯长度 $l_s = 11.0$ cm,高度 $h_s = 9.0$ cm;掺气池的长度为 88.0 cm,高度为 33.0 cm,下游连接阶梯消能段。模型 M2 在模型 M1 首级阶梯增设 5.5 cm × 4.5 cm (长×宽)的矩形通风井(图 2);模型 M3 则在模型 M2 基础上,将进口水平段延长至 138 cm,以优化入流条件。图中 WES 段起点的流速和水深分别为 v_0 和 h_0 ,内缘挑距、外缘挑距和最大水翅高度分别为 L_1 、 L_u 和 H_f ,射流宽度 $W_j = L_u - L_1$ 。

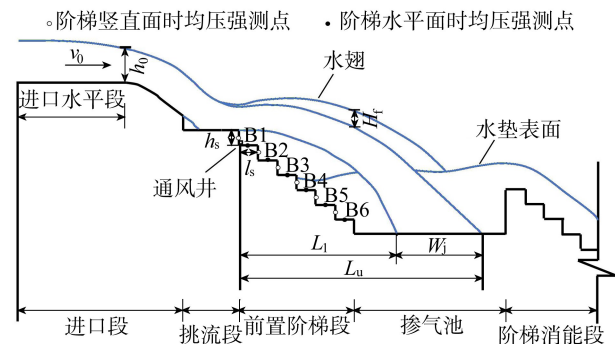


图2 挑流阶梯溢洪道几何结构和水流流态示意图

1.2 试验工况及方法

试验在 9 种工作水头下进行,即 0.05、0.10、0.15、0.20、0.25、0.30、0.35、0.40、0.45 m,分别对应原型单宽流量 $q = 2.52、10.28、19.13、32.18、47.39、62.92、89.25、118.00、144.71 \text{ m}^2/\text{s}$,相应的进口弗劳德数 Fr 分别为 0.975、1.160、1.303、1.365、1.403、1.516、1.828、1.966、2.042。基于 Fr 相似准则,且控制临界水深与阶梯高度的比值在原型与模型中一致,推导出流量比尺为 $40^{1.5} : 1$,速度比尺为 $40^{0.5} : 1$ 。使用钢尺测量 $L_1、L_u$ 和 H_f ,采用测压计测量时均压强(以水头表示),其中 L_1 和 L_u 测量误差范围为 $\pm 6.5\%$, H_f 测量误差范围为 $\pm 9.0\%$ 。

2 结果与分析

2.1 挑流流态对比

图 3 对比分析了 Fr 分别为 0.975、1.516 和 1.966 时,模型 M1、M2 和 M3 的流态变化。试验过程显示:当 $Fr \leq 0.975$ 时,模型 M1、M2 和 M3 挑流段均形成跌落水舌(图 3(a)、图 3(d)、图 3(g));当 $1.160 \leq Fr \leq 1.516$ 时,跌落水舌转变为自由射流水舌(图 3(b)、图 3(e)、图 3(h));当 $Fr \geq 1.828$ 时,模型 M1 射流下方空腔完全消失,出现半淹没射流水舌(图 3(c)),而模型 M2 和 M3 通过设置通风井与大气连通,负压空腔相对稳定,不仅未出现半淹没射流,且自由射流水舌较平稳(图 3(f)、图 3(i))。结果表明:通风井能在大单宽流量($Fr \geq 1.828$,即 $q \geq 89.25 \text{ m}^2/\text{s}$)时抑制半淹没射流水舌的出现;模型 M1 因无通风井,内缘挑距最

短,射流宽度最大;模型 M3 设置了通风井且延长了进口水平段,虽外缘挑距较短,但内缘挑距接近模型 M2 且射流宽度最小,进一步优化了挑流流态。

2.2 水舌挑距理论分析

首先通过理论分析,讨论挑流段射流水舌挑距的影响因素,以及流量变化对其的影响。如图 4 所示,水舌微元体主要受竖直向下的重力 G ,垂直表面的压力 P ,和始终与速度方向相反的摩擦力 S 作用。假设微元体最终落入掺气池底部,且前置阶梯和出口结构不影响其运动轨迹,则微元体的挑距 L 符合以下关系式:

$$L = f(y_0, v_0, \beta_0, Y_1, Y_2, S, P, g, \rho) \tag{1}$$

式中: y_0 为微元体与挑流段高差,计算内缘挑距时 $y_0 = 0$,计算外缘挑距时 $y_0 = h_j$ (h_j 为射流水舌的起跳水深); v_0 和 β_0 分别为微元体的初速度和出射角; Y_1 为从水垫表面到挑流段之间的高差; Y_2 为微元体入水点处的水垫深度; g 为重力加速度; ρ 为水的密度。

为便于计算分析,将微元体的挑距 L 分为空中挑距 L_a 和水下挑距 L_b 两部分。同时,作出以下假设。假设 1:仅考虑重力作用,忽略压力与摩擦力,按自由抛射体轨迹计算 L_a ;假设 2:微元体入水后速度方向保持不变,直至冲击掺气池底部,据此计算 L_b 。由于微元体的初速度与 Fr 呈正相关,下面通过分析微元体的初速度与挑距之间的关系,探讨 Fr 对射流水舌挑距的影响。

a. 微元体入水前:假设微元体从挑流段末端到达水垫表面的时间为 t_1 ,则 L_a 和 Y_1 可分别表示为

$$L_a = t_1 v_0 \cos \beta_0 \tag{2}$$

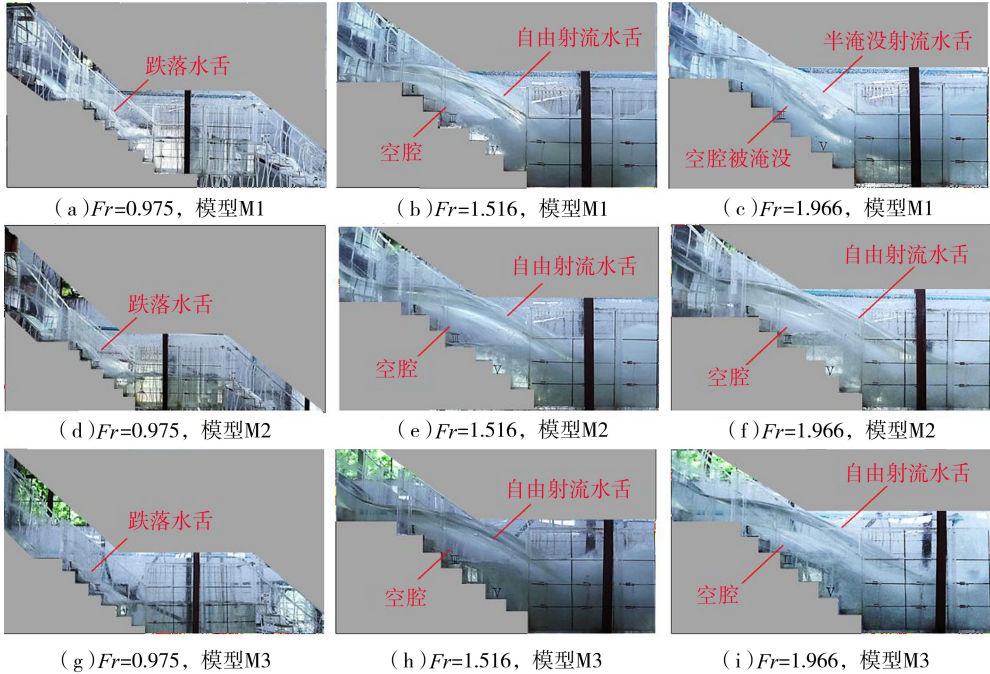


图 3 不同工况下模型 M1、M2、M3 流态对比

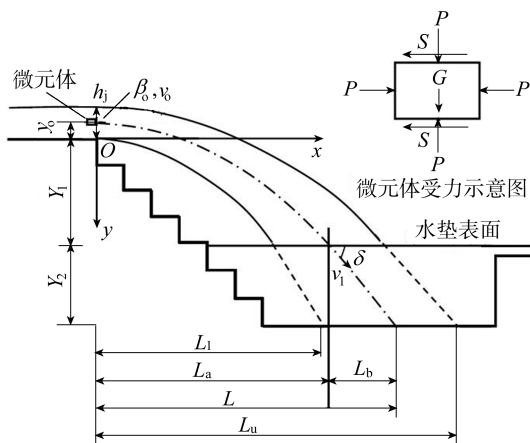


图4 挑流段的射流水舌微元体挑距和受力示意图

$$Y_1 = t_1 v_0 \sin \beta_0 + 0.5 g t_1^2 - y_0 \quad (3)$$

将式(3)代入式(2)以消去 t_1 , 得到

$$L_a = \frac{\cos \beta_0}{g} \left[-v_0^2 \sin \beta_0 + v_0 \sqrt{v_0^2 \sin^2 \beta_0 + 2g(Y_1 + y_0)} \right] \quad (4)$$

式(4)反映了空中挑距与初速度的关系。对式(4)求导后整理可得

$$\frac{\partial L_a}{\partial v_0} = 2 \cos \beta_0 \left[-v_0 \sin \beta_0 \sqrt{v_0^2 \sin^2 \beta_0 + 2g(Y_1 + y_0)} + v_0^2 \sin^2 \beta_0 + g(Y_1 + y_0) \right] / \left[g \sqrt{v_0^2 \sin^2 \beta_0 + 2g(Y_1 + y_0)} \right] \quad (5)$$

考虑到 $\beta_0 \neq 90^\circ$ 、 $Y_1 + y_0$ 和 g 均大于 0, 则 $\partial L_a / \partial v_0 > 0$, 表明挑流段的射流水舌微元体的空中挑距随初速度的增大而单调递增。

b. 微元体入水后: 微元体在入水点处的速度 v_1 沿水平和竖直方向的分量 v_{1x} 和 v_{1y} 分别为

$$v_{1x} = v_0 \cos \beta_0 \quad (6)$$

$$v_{1y} = v_0 \sin \beta_0 + g t_1 \quad (7)$$

因此, 微元体的入水角 δ 可表示为

$$\tan \delta = \frac{v_{1y}}{v_{1x}} = \frac{\sqrt{v_0^2 \sin^2 \beta_0 + 2g(Y_1 + y_0)}}{v_0 \cos \beta_0} \quad (8)$$

根据三角形的相似准则可知:

$$L_b = \frac{Y_2}{\tan \delta} = \frac{Y_2 v_0 \cos \beta_0}{\sqrt{v_0^2 \sin^2 \beta_0 + 2g(Y_1 + y_0)}} \quad (9)$$

对式(9)求导可得:

$$\frac{\partial L_b}{\partial v_0} = \frac{2gY_2 \cos \beta_0 (Y_1 + y_0)}{1.5 [v_0^2 \sin^2 \beta_0 + 2g(Y_1 + y_0)]} \quad (10)$$

考虑到 $\beta_0 \neq 90^\circ$, 并且 $Y_1 + y_0$ 、 Y_2 和 g 均大于 0, 则 $\partial L_b / \partial v_0 > 0$, 表明挑流段的射流水舌微元体的水下挑距同样随初速度的增大而单调递增。

综上所述, 微元体的空中挑距和水下挑距均随初速度的增大而单调递增。由此推断, 在上述假设

的前提下, 挑流阶梯溢洪道挑流段射流水舌的内、外缘挑距也随着 Fr 的增大而单调递增。

2.3 水舌特性试验验证

图5展示了模型 M1、M2 和 M3 中挑流段水舌的相对内缘挑距 L_1/l_s 随 Fr 的变化。随着 Fr 的增大, 3 种模型的 L_1/l_s 均表现出先增大后减小的规律。其中, 模型 M1 的 L_1/l_s 在 $Fr = 1.343$ 时达到最大值, 模型 M2 和 M3 的 L_1/l_s 在 $Fr \approx 1.706$ 时达到最大值。在相同的 Fr 下, 模型 M2 和 M3 的 L_1/l_s 很接近, 均明显大于模型 M1, 且与模型 M1 的差距随着 Fr 的增大而增大。当 Fr 从 1.160 增加到 1.516 时, 模型 M1 和 M2 的 L_1/l_s 之差从 0.355 增至 2.200, 增长了约 519.72%。当 $Fr \geq 1.828$ 时, 模型 M1 挑流段形成半淹没射流水舌, 空腔完全被回水淹没, 使得内缘挑距的测量和研究已无意义, 模型 M2 和 M3 挑流段则始终呈自由射流水舌流态, 测得模型 M2 和 M3 通风井内的平均风速分别超过 3.68 m/s 和 4.06 m/s。

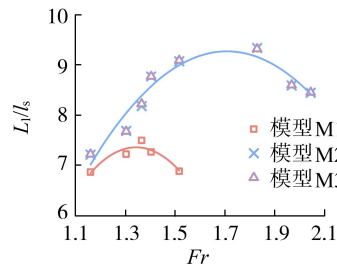


图5 L_1/l_s 随 Fr 的变化

试验结果表明, 随着 Fr 的增大, 模型 M1、M2 和 M3 中挑流段射流水舌的内缘挑距先增大后减小, 规律与理论分析存在差异, 主要原因在于射流水舌空腔存在负压, 对水舌微元体有吸附作用。在未设置通风井的模型 M1 中, 空腔负压对射流水舌的吸附作用随流量增大而增大, 水舌微元体表面所受合力的大小与流量成正比, 方向指向阶梯表面侧, 造成内缘挑距先增大后减小。模型 M2 和 M3 设置了通风井, 通风井吸入的空气有效减小了空腔负压, 降低了水舌微元体所受合力。相较于模型 M1, 模型 M2 和 M3 获得了更大的内缘挑距, 并在试验工况范围内保持了空腔的稳定。可见, 设置通风井可以有效稳定射流水舌并获得更大的内缘挑距。

图6展示了模型 M1、M2 和 M3 中挑流段水舌的相对外缘挑距 L_u/l_s 随 Fr 的变化。可见 3 种模型的 L_u/l_s 均随 Fr 的增大而增大, 变化规律与理论分析一致。当 Fr 较小时, 模型 M1、M2 和 M3 的 L_u/l_s 差距较小, 随 Fr 的增大, 差距增大。在相同的 Fr 下, 模型 M1 的 L_u/l_s 最小, M2 的最大, 主要原因是空腔负压的形成, 令水流整体受力更偏向于阶梯表

面侧,与微元体受力分析吻合。

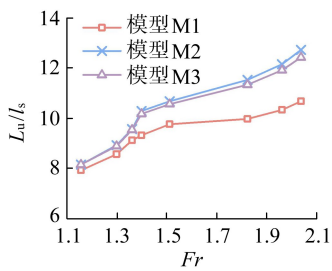


图6 L_u/l_s 随 Fr 的变化

图7展示了模型M1、M2和M3中挑流段水舌的相对射流宽度 W_j/l_s 随 Fr 的变化。由图7可知, W_j/l_s 随 Fr 的增大而增大,且增大趋势不断提高。在相同的入流条件下,模型M3的 W_j/l_s 最小,模型M1的最大,且两者差距随 Fr 的增大而增大。水舌轨迹的变化趋势与图3所示一致。

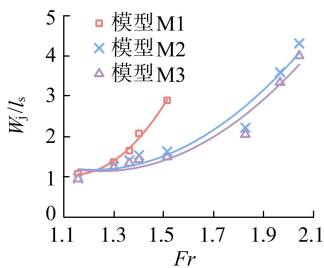


图7 W_j/l_s 随 Fr 的变化

2.4 前置阶梯段压力特性

当挑流段处于跌落水流状态时,前置阶梯段的时均压强较低。为进一步分析不同水流状态对前置阶梯段压强的影响,对自由射流和半淹没射流流态下各阶梯的时均压强进行了测量,测点布置在各级

阶梯(B1~B6)的竖直面和水平面的中心(图2),测得时均压强结果见图8(以水头表示)。结果表明,前置阶梯段的时均压强分布明显受射流流态及其冲击位置的影响。在自由射流流态下($q=62.92\text{ m}^2/\text{s}$),阶梯B1~B3多处于射流水舌产生的空腔内,压强标记为0。随着流量的增大,掺气池内回水逐渐增高,空腔尺寸逐渐减小。其余阶梯则被掺气池中的水体淹没,在相同入流条件下,阶梯表面压强随水深增大而增大;在每级阶梯内,压强随流量增大而增大。

当模型M1处于半淹没射流流态下(q 分别为 89.25 、 $118.00\text{ m}^2/\text{s}$),前两级阶梯出现负压,同时在B3位置观察到压力异常升高, $q=89.25\text{ m}^2/\text{s}$ 时阶梯竖直面压强达 8.80 m ,水平面压强达 10.80 m , $q=118.00\text{ m}^2/\text{s}$ 时阶梯竖直面压强达 10.00 m ,水平面压强达 12.00 m 。B1和B2位于被回水淹没的空腔之中,淹没空腔内复杂的流动特性使得阶梯表面产生负压;同时,半淹没射流水舌受到空腔负压的吸附作用,直接冲击前置阶梯段,B3刚好位于冲击区内,造成该级阶梯表面的时均压强骤增。负压以及压强的异常升高会对结构安全造成严重不利影响,可能导致空蚀破坏。

图8中,模型M2和M3的时均压强相近,且分布合理,均远小于M1。表明模型M2和M3通过通风井吸入大量空气,有效防止了空腔内出现负压,射流能够平稳跃入掺气池,而不会冲击和冲刷前置阶梯段。模型M3延长了进口水平段,改善了外缘挑距问题,但前置阶梯段的压强分布与模型M2没有明显差异。

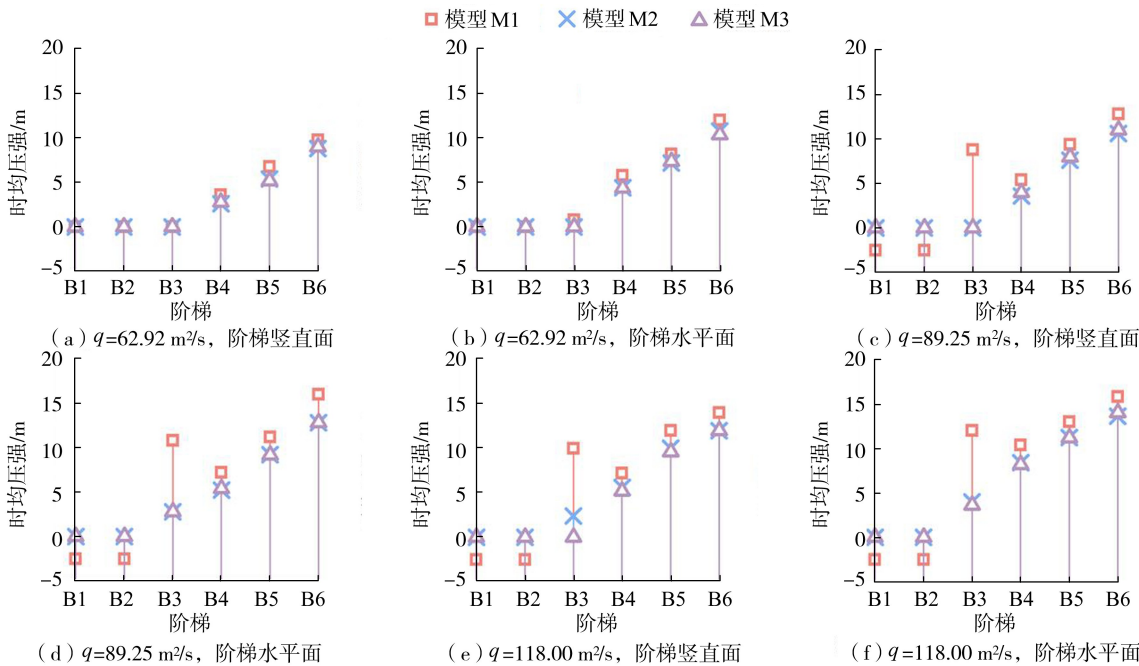


图8 不同流量下模型M1、M2和M3的前置阶梯段阶梯竖直面和水平面时均压强

2.5 水翅高度

当挑流阶梯溢洪道的挑流段形成自由射流水舌或半淹没射流水舌时,射流水舌两侧观察到一定程度的水翅现象,会危害结构安全性和稳定性。本文用水翅高度反映挑流段射流水舌的水翅特性。图 9 展示了模型 M1、M2 和 M3 中挑流段射流水舌的相对水翅高度 H_f/h_s 随 Fr 的变化。

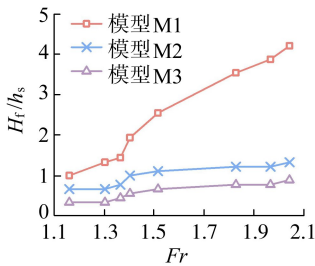


图 9 H_f/h_s 随 Fr 的变化

可见 H_f/h_s 随着 Fr 增大而线性增大。在不同的入流工况下,模型 M1 的 H_f/h_s 最大,M2 次之,M3 最小。当 $Fr=1.160$ 时,模型 M1 和 M3 的 H_f/h_s 差值为 0.667,而当 $Fr=2.042$ 时,该差值达 3.333。随着 Fr 的增大,模型 M1 的水翅现象愈发严重,尤其当挑流段形成半淹没射流水舌时,射流水舌完全被负压吸附在前置阶梯段表面而贴壁下泄,与两侧跃起的水翅形成鲜明对比(图 3(c)),该流态极不稳定,掺气池内水流强烈旋转、紊动,导致结构振动剧烈。模型 M2 和 M3 通过设置通风井,降低了射流水舌的空腔负压,并且降低效果随流量的增大而提高,相较于模型 M1 水翅现象得到有效控制。模型 M3 在模型 M2 的基础上,将进口水平段的长度由 50.0 cm 延长至 138.0 cm,进一步增强了来流的稳定性和平顺性,从而有效缓解了水翅现象。

总体而言,显著的空腔负压影响射流轨迹,减小了内缘挑距,形成的半淹没射流直接冲击前置阶梯段,造成阶梯表面时均压强骤增,并产生明显的水翅现象。设置通风井能有效减弱空腔负压的作用,形成更稳定的自由射流,避免冲击前置阶梯段,并显著改善水翅现象,而延长进口水平段能进一步提高流态稳定性。

2.6 最大运行流量和掺气池最小长度

射流宽度越大,所需掺气池尺寸越大,通过延长进口水平段可稳定流态,缩短射流外缘挑距,控制射流宽度。模型 M3 兼具自由射流流态和较短的射流宽度,然而随着流量的增大,挑流段流态会从自由射流转变为半淹没射流,故需要确认其最大运行流量 q_{3c} 以避免半淹没射流的产生,并给出掺气池的最小长度 l_b 。

将模型 M3 能维持自由射流流态的最大单宽流

量确定为其最大运行流量。根据图 5,模型 M3 的 L_1/l_s 与 Fr 的关系可表示为

$$L_1/l_s = -7.528Fr^2 + 25.69Fr - 12.65 \quad (11)$$

试验表明,当 L_1/l_s 小于某个临界值时会出现半淹没射流流态,而维持自由射流流态的最小 L_1/l_s 为 6.891。将该值代入式(11),计算出 $Fr=2.268$,进而得到相应的最大运行流量 $q_{3c}=183.99\text{ m}^2/\text{s}$ 。

对于模型 M3,为保证结构和运行安全,同时避免挑流阶梯溢洪道中挑流段出现半淹没射流流态,入流的单宽流量应满足 $q < q_{3c}$ 。同时,建议下游掺气池的尺寸应足够大,以容纳射流和水流旋转。因此,掺气池的最小长度需满足 $l_b > W_j$ 。根据图 7,模型 M3 的 W_j/l_s 可表示为

$$W_j/l_s = 4.243Fr^2 - 10.63Fr + 7.801 \quad (12)$$

将最大运行 $Fr=2.268$ 代入式(12),计算出相应的 W_j/l_s 为 5.517。即模型 M3 的掺气池最小长度应满足

$$l_b \geq 5.517l_s \quad (13)$$

考虑到几何比尺和流量比尺,以上表达式适用于基于模型 M3 参数缩放设计,且 $0.73\text{ m}^2/\text{s} \leq q_{3c} \leq 183.99\text{ m}^2/\text{s}$, $11\text{ cm} \leq l_s \leq 440\text{ cm}$ 的原型结构。

3 结 论

a. 挑流阶梯溢洪道射流下方易产生负压,令挑流在前置阶梯段压强大、水翅现象严重,易出现半淹没射流流态,致前置阶梯段负压显著、压强异常升高,不利于结构安全;且射流宽度大,会带来结构成本高、开挖量大等问题。

b. 增设通风井可通过吸入空气平衡空腔负压,有效抑制半淹没射流并维持自由射流流态,相较初始模型可显著增大内缘挑距、缩短射流宽度、降低水翅高度,同时使前置阶梯段压强分布均匀,消除负压及压强异常升高现象,降低空蚀风险;在此基础上延长进口水平段,可进一步优化入流流态和水舌特性,获得更小的射流宽度即掺气池最小长度。

c. 建立了挑流阶梯溢洪道最大运行流量和掺气池最小长度的表达式,从理论层面揭示了维持自由射流需要控制运行流量上限,且掺气池需提供足够的长度以适应射流的充分扩散,为工程设计中掺气池尺寸的确定和运行中流量的调控提供了理论依据。

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] WU Jianhua,FENG Shurong,WU Weiwei,et al. Hydraulic characteristics of partial opening of the working gate for a discharge tunnel[J]. Journal of Hydrodynamics,2007,19 (4):488-493.
- [3] 王锋辉. 二滩水电站泄洪雾化及防护[J]. 大坝与安全, 2011 (5): 42-46. (WANG Fenghui. Influence of discharging foggy and its protection at Ertan hydropower station [J]. Dam & Safety, 2011 (5): 42-46. (in Chinese))
- [4] 李书芳,王景旭,高坡,等. 阶梯溢洪道结构形式和应用研究概述[J]. 水电能源科学,2022,40(11): 111-114. (LI Shufang,WANG Jingxu,GAO Po,et al. Overview of structure and application of stepped spillway [J]. Water Resources and Power, 2022, 40 (11): 111-114. (in Chinese))
- [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 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))
- [6] 冉雨博,刘超,邓军,等. 斜切挑坎横向压力差研究[J]. 中国水利水电科学研究院学报(中英文), 2025, 23 (1): 54-65. (RAN Yubo, LIU Chao, DENG Jun, et al. Study on transverse pressure difference of oblique cutting flip bucket [J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2025, 23 (1): 54-65. (in Chinese))
- [7] 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))
- [8] QIAN Shangtuo, WU Jianhua, MA Fei. Hydraulic performance of ski-jump-step energy dissipater [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2016, 142 (10): 05016004.
- [9] WU Jianhua, QIAN Shangtuo, MA Fei. A new design of ski-jump-step spillway [J]. Journal of Hydrodynamics, 2016, 28 (5): 914-917.
- [10] QIAN Shangtuo, WU Jianhua. Hydraulic characteristics of the aeration basin in a ski-jump-step spillway [J]. Water Supply, 2020, 20 (3): 922-929.
- [11] WU Jianhua, QIAN Shangtuo, WANG Yu, et al. Residual energy on ski-jump-step and stepped spillways with various step configurations [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2020, 146 (4): 06020002.
- [12] 马飞,刘进,吴建华. 陡坡阶梯溢洪道预掺气研究[J]. 水动力学研究与进展: A 辑, 2022, 37 (6): 777-782. (MA Fei, LIU Jin, WU Jianhua. Study on pre-aeration of stepped spillways with steep slopes [J]. Chinese Journal of Hydrodynamics, 2022, 37 (6): 777-782. (in Chinese))
- [13] PFISTER M, HAGER W H, MINOR H E. Bottom aeration of stepped spillways [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2006, 132 (8): 850-853.
- [14] PFISTER M, HAGER W H, MINOR H E. Stepped chutes: pre-aeration and spray reduction [J]. International Journal of Multiphase Flow, 2006, 32 (2): 269-284.
- [15] QIAN Shangtuo. Ski-jump-step energy dissipators [C] // Proceedings of the 35th IAHR World Congress. Beijing: Tsinghua University Press, 2013: 471-480.
- [16] ZAMORA A S, PFISTER M, HAGER W H, et al. Hydraulic performance of step aerator [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2008, 134 (2): 127-134.
- [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] QIAN Shangtuo, WU Jianhua, XU Hui, et al. Transition flow occurrence on stepped channels [J]. Journal of Hydraulic Research, 2022, 60 (3): 487-495.
- [19] 薛万云,杨家修,杜帅群,等. 基于 CFD 的挑流泄洪雾化特性研究[J]. 水利水电科技进展, 2020, 40 (4): 16-20. (XUE Wanyun, YANG Jiaxiu, DU Shuaiqun, et al. Study on characteristics of flood discharge atomization of ski-jump jet based on CFD [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2020, 40 (4): 16-20. (in Chinese))
- [20] LIU Guangyuan, QIAN Shangtuo, FENG Jiangang, et al. Inception line of air entrainment for converging stepped spillways [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2025, 151 (1): 06024010.
- [21] DENG Jun, XU Weilin, ZHANG Jianming, et al. A new type of plunge pool-multi-horizontal submerged jets [J]. Science in China Series E: Technological Sciences, 2008, 51 (12): 2128-2141.
- [22] FITZGERALD J A, GARIMELLA S V. A study of the flow field of a confined and submerged impinging jet [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1998, 41 (8/9): 1025-1034.
- [23] FRIZELL K W. Hydraulic model studies: aeration of the submerged jet-flow gates at Seminole Dam [R]. Denver: Bureau of Reclamation, 1990.
- [24] KOTSOVINOS N E, ANGELIDIS P B. The momentum flux in turbulent submerged jets [J]. Journal of Fluid Mechanics, 1991, 229: 453-470.

(收稿日期: 2025 - 06 - 06 编辑: 骆超)