

文章编号: 2097-096X(2025)-01-0066-07

对称三角薄壁折线堰的泄流能力研究

易晨立¹, 杨校礼¹, 吴凯², 方陈卓¹, 袁辰扬¹

(1. 河海大学 水利水电学院, 江苏 南京 210098; 2. 无锡市锡山区鹅湖镇水利管理站, 江苏 无锡 214000)

摘要: 近年来由于工程实际的需要, 各种型式的折线堰在水利工程中的应用逐渐增多。在众多折线堰型中, 三角形折线堰最为基础又研究较少, 因此本文以平面上的对称三角薄壁折线堰这一基本堰型为例, 在因次分析的基础上, 结合物理模型试验分析了凹型和凸型两种典型堰型流态特征与过堰水流泄流影响机理, 重点研究了关键参数堰轴夹角和相对溢流前缘宽度对泄流能力的影响。研究表明, 两类典型折线堰的过堰水流呈现出不同的特殊流态, 导致其对泄流能力的影响也不尽相同。本文寻求了所研究关键参数之间的相关性, 并发现在河谷宽度一定条件下, 堰轴夹角 $\theta = \pi/3$ 有较好泄流效果。

关键词: 薄壁折线堰; 泄流能力; 因次分析; 堰轴夹角; 相对溢流前缘宽度

中图分类号: TV135.2

文献标识码: A

doi: 10.13244/j.cnki.jiwhr.20240146

1 研究背景

我国水旱灾害频繁而严重, 水旱灾害占各类自然灾害直接经济总损失的 60% 左右^[1]。近年来水土流失和极端气候等诱发了非常规洪水的频繁出现^[2], 由工程防洪向洪水风险综合管理转变面临诸多挑战^[3], 因而长时间内仍需采用工程防洪。在国内水库除险加固工程中, 可采用自溃堰^[4]或对泄水建筑物进行改扩建, 通过增大泄流能力来加强水利枢纽的防洪功能。

我国早期修建的水利工程中溢流堰多采用直线正堰, 近年来存在梯级拦水堰与曲线槽岸组合从而提升过鱼能力^[5]; 当需要增大泄流时, 常用增加溢流前缘宽度或降低堰顶高程来提高泄流能力。此外还有环形堰^[6]、琴键堰^[7-10]、折线堰等不同堰型, 而折线堰可以在不改变原有溢流前缘宽度的条件下提升泄流能力数倍于直线堰, 且鉴于其有效、实用、经济并有观赏性的特点^[11], 是许多泄流建筑物改扩建工程的备选堰型之一。安徽广德县管家坝, 在国内首次将坝体原有直线溢流堰改建成迷宫型式折线堰^[12], 过流能力提高了近两倍; 浙江宁波三溪浦水库, 将溢流坝布置为两段正堰和一段侧堰相交的折线堰型式, 以满足各特征工况下设计泄流能力要求。折线堰体型分类繁多, 过流水力特性较为复杂, 前人的研究成果集中在复杂迷宫堰^[12-16], 也有研究直线折线堰^[17], 而对最基本的三角形折线堰的泄流能力研究却相对较少。实际工程设计中, 改直线型溢流前缘为折线型后, 却因缺少相应的理论研究基础而无法更好地优化布置体型, 设计时若能比较准确地确定其泄流能力, 可以达到控制泄水建筑物规模, 节省工程投资的目的。因此深入研究折线堰中最基本型式—三角形薄壁折线堰的泄流特性是具有一定理论意义和实际应用价值的。若无特别说明, 下文所述折线堰均指三角形薄壁折线堰。

2 试验设计

2.1 折线堰物理参数的确定 本文所研究折线堰堰轴线在平面上由两斜交堰在河谷位置相交形成, 在

收稿日期: 2024-08-08; 网络首发时间: 2024-11-11

网络首发地址: <https://link.cnki.net/urlid/10.1788.TV.20241108.1625.002>

基金项目: 国家自然科学基金项目(52379061); 江苏省自然科学基金项目(BK20230099)

作者简介: 易晨立(2000-), 硕士生, 主要从事水力学及河流动力学研究。E-mail: 1191482407@qq.com

通信作者: 杨校礼(1973-), 博士, 副教授, 主要从事水力学及河流动力学研究。E-mail: yangxiaoli@hhu.edu.cn

同溢洪道宽度情况下，其溢流前缘宽度比直线堰要长，因此泄流能力也明显增强。影响折线堰的泄流能力因素很多，主要几何参数有堰轴夹角 θ 、左堰边长 a 、右堰边长 b 、溢流前缘宽度 B 、堰高 P 、堰壁厚度 T ，其他影响因素还有上游堰上水头 H 、下游水头 h 、重力加速度 g 、上游行进流速 v 、流量 Q 等，见图 1。

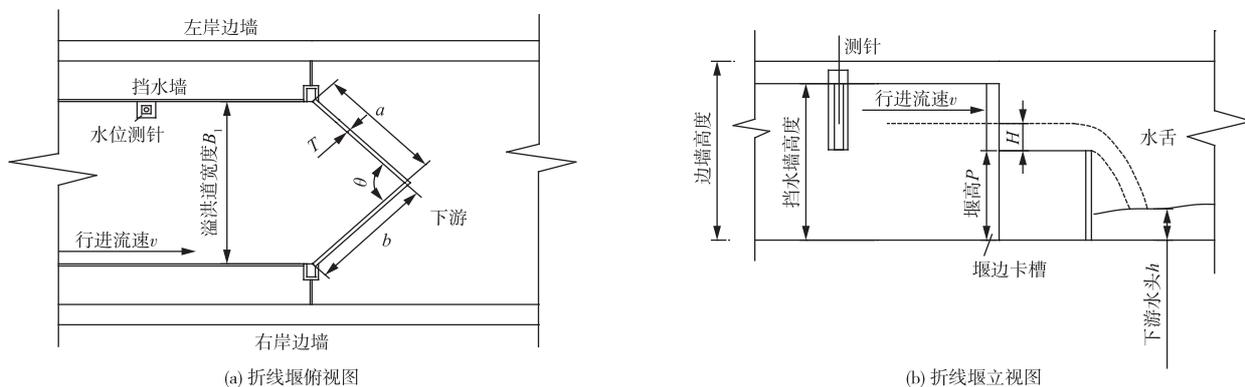


图 1 折线堰示意图

Fig.1 Schematic diagram of polyline weir

由于物理参数众多，可做一些合理的假设和简化，说明如下：(1)由伯努利方程，一般将行进流速 v 换算成水头叠加到 H ，此处 H 为考虑行进流速 v 的堰上水头。(2)前人研究结果表明，堰型为薄壁堰 ($T/H < 2/3$) 的情况下，堰壁厚度对于水舌形状没有影响^[18]，因此泄流研究可以略去堰壁厚度 T 。(3)溢流前缘宽度 $B = a + b$ ，考虑到工程中多为对称布置型式，本文也仅研究此对称型式即 $a = b = B/2$ 的情况，因此选取 B 作为折线堰体型的关键尺寸。(4)本研究只考虑过堰水流为自由出流的情况，下游水位不影响堰的泄流能力，因此略去下游水头 h 。

则函数关系式为：

$$f(\theta, B, H, P, g, Q) = 0 \quad (1)$$

由因次分析可得

$$f_1\left(\theta, \frac{B}{H}, \frac{P}{H}, Q/(g^{1/2}H^{5/2})\right) = 0 \quad (2)$$

并可转化为

$$Q = g^{1/2}H^{5/2}f_2\left(\theta, \frac{B}{H}, \frac{P}{H}\right) \quad (3)$$

式中：无因次数 θ 为堰轴夹角； B/H 为相对溢流前缘宽度； P/H 为相对堰高。

而对于矩形薄壁堰(直线堰)，自由出流和无侧收缩的传统堰流公式：

$$Q = m_0 B \sqrt{2g} H^{3/2} \quad (4)$$

流量系数 m_0 一般用雷保克公式计算：

$$m_0 = f_4(H, P) = 0.4034 + 0.0534 \frac{H}{P} + \frac{1}{1610H - 4.5}$$

为与矩形薄壁堰堰流公式比较，将式(3)改写为：

$$Q = f_3\left(\theta, \frac{P}{H}\right) B \sqrt{2g} H^{3/2} \quad (5)$$

式(5)中令 $m_w = f_3\left(\theta, \frac{P}{H}\right)$ ，为折线堰的流量系数。

可见，与直线堰相比，折线堰由于体型的改变，其流量系数 m_w 不但与堰高和水深有关，其数值还取决于堰轴夹角。

因次分析给出了折线堰流量的计算方法。一是由式(4)直接进行计算，在无更多研究成果的情况

下，并考虑到薄壁堰的泄流规律，仍用雷保克公式来计算其流量系数。此方法形式简单但忽略了 θ 的影响，误差较大。本文将重新分析折线堰流量公式的推导过程，力求找到其中关键参数的相关性。

由式(3)有：

$$Q/(g^{\frac{1}{2}}H^{\frac{5}{2}})=f_2\left(\theta, \frac{B}{H}, \frac{P}{H}\right) \quad (6)$$

f_2 是 θ 、 B/H 和 P/H 的函数，将 P/H 的泄流影响用雷保克公式描述，则 f_2 可改写为：

$$f_2\left(\theta, \frac{B}{H}, \frac{P}{H}\right)=m_0f_5\left(\theta, \frac{B}{H}\right) \quad (7)$$

其中， m_0 是雷保克流量系数，则式(6)可改写为：

$$Q/(m_0g^{\frac{1}{2}}H^{\frac{5}{2}})=f_5\left(\theta, \frac{B}{H}\right) \quad (8)$$

f_5 仅是 θ 和 B/H 的函数，不同 θ 时无因次数 $Q/(m_0g^{\frac{1}{2}}H^{\frac{5}{2}})$ 和 B/H 关系如图2。

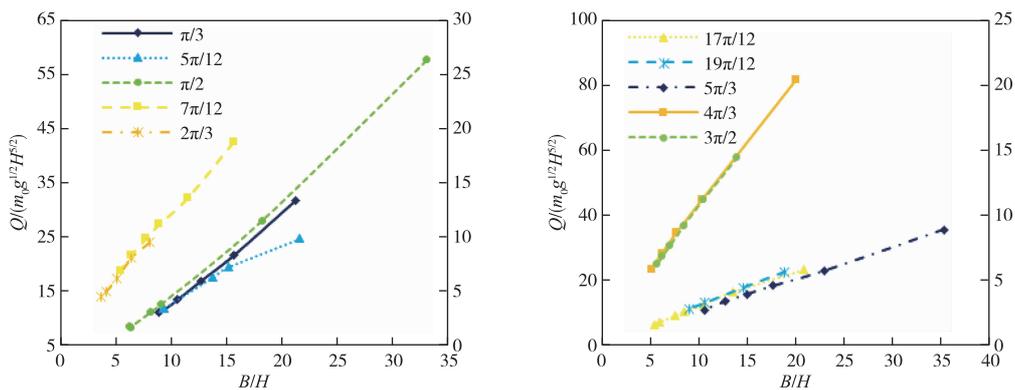


图2 $Q/(m_0g^{\frac{1}{2}}H^{\frac{5}{2}})$ 与 B/H 关系

Fig.2 Relationship between $Q/(m_0g^{\frac{1}{2}}H^{\frac{5}{2}})$ and B/H

由图2可见， $Q/(m_0g^{\frac{1}{2}}H^{\frac{5}{2}})$ 和 B/H 总是存在正相关关系，这一规律是拟合能运用于工程实际的折线堰流量公式的重要基础。但限于试验条件，后续推导有待进一步研究。

2.2 试验方案 因次分析建立了流量和泄流影响因素的函数关系，且由流量系数 m_w 可知，试验应主要考虑 θ 和 P/H 变化时下泄流量的规律。因此试验设计采用不同堰轴夹角 θ 的折线堰作为试验方案，凸型折线堰($0<\theta<\pi$)：堰轴夹角分别为 $\pi/3$ 、 $5\pi/12$ 、 $\pi/2$ 、 $7\pi/12$ 、 $2\pi/3$ ；凹型折线堰($\pi<\theta<2\pi$)：堰轴夹角分别为 $4\pi/3$ 、 $17\pi/12$ 、 $3\pi/2$ 、 $19\pi/12$ 、 $5\pi/3$ 。模型布置如图1所示。

3 试验结果及分析

3.1 两种典型堰型流态 不同方案下的折线堰具有某些相似的水力现象，但也由于体型参数的变化，泄流上表现出各自的特点，很难准确统一地描述折线薄壁堰的过堰水流流态特征，所以本文对于凸型折线堰和凹型折线堰的过堰水流流态特征进行分开描述。

3.1.1 凸型折线堰流态 试验中随着流量不断加大，过堰水流经历了不通气、半通气和完全通气状态。通气状态下，当水位高过堰顶一定高度时，水流全部从堰边挑射而出，形成稳定的水舌，除边墙处略厚外，水舌厚度沿堰边基本不变，折角处出现了水舌相对两侧堰壁较薄的特殊流态，本文称为“折角水流”（见图3）。

3.1.2 凹型折线堰流态 凹型折线堰的过堰水流流态与凸型折线堰大致相似，但与凸型折线堰不同的是，一是凹型折线堰过堰水流通气后，左右侧水流过堰时在折角处撞击形成一股水流，其水舌厚度比两侧的水舌厚度厚的多，且折角处水流局部呈现淹没过流的现象，称为“自淹现象”（见图4），水位

继续抬高时，折角被水流完全淹没，形成了一条与水流方向垂直的“堰面”；其次凹型折线堰对边墙的干扰比凸型更为敏感，水舌厚度在边墙处更大。



图3 折角水流流态
Fig.3 Angular flow pattern



图4 自淹现象
Fig.4 self-flooding phenomenon

3.1.3 过堰水流泄流影响机理分析 流线可反映水流的流向和流速大小。试验结果表明，过堰水流流向与堰轴夹角和流量大小有关：小流量时，溢流前缘处水流的流线与堰轴线近似垂直，水流能充分利用溢流空间；随着流量增大，过堰水流方向由垂直堰轴线逐渐向主流正向靠拢，两斜交堰对水流的导向作用减小，泄流能力逐渐变弱。而且通过试验发现， θ 越小，左、右堰边在折角处的相互干扰越严重，这种现象也越为明显。折线堰流线示意图如图 5。

3.2 折线堰实际泄流量与理论值的比较 直线正堰的水舌厚度沿堰长基本相同，流态也较为均匀；而从折线堰流态分析看出，由于“折角水流”和“自淹现象”的存在，折线堰过堰水流流态沿堰长方向分布更为复杂。图 6 以堰轴夹角 $\theta=2\pi/3$ 和 $\theta=4\pi/3$ 为例对比了实测流量值和用矩形薄壁堰堰流公式计算值(溢流前缘宽度以 $B=a+b$ 计)。可见，加入无因次数 θ 后，实测流量值比理论计算值小，且随着堰上水头增加，两者差值越大。且其他各方案也有此种规律。说明折线堰在考虑 θ 这一变量时，由于其泄流影响机理的变化，矩形薄壁堰堰流公式不适用于折线堰的流量计算。

3.3 堰轴夹角 θ 对泄流能力的影响 本试验是在河谷宽度相同的情况下进行的，可以通过堰轴夹角不同时的堰上水头 H 和实测流量 Q 关系(见图 7)直观了解各方案下的泄流能力。

为方便分析，取堰上水头 0.06 m 时 10 种方案下的过流量比较， $\theta=\pi/3$ 时泄流能力最大，而 $\theta=4\pi/3$ 时泄流量最小。相比直线堰，堰轴夹角 $\theta=\pi/3$ 时泄流能力增大了 91%。当 $0<\theta<\pi$ 时，凸型折线堰泄流能力与堰轴夹角 θ 负相关；当 $\pi<\theta<2\pi$ 时，凹型折线堰泄流能力与堰轴夹角 θ 近似正相关；当 $\theta=\pi$ 时，即为直线堰的情况，泄流能力为最小。除 $\theta=\pi$ 外，泄流能力 $\propto |\pi-\theta|$ ，其规律符合水力学基本原理。值得注意的是， $|\pi-\theta|$ 相等时，凸型折线堰的泄流能力也略大于凹型折线薄壁堰的泄流能力。从泄流影响机理来看，一是与凹型折线堰出现的“自淹现象”有关：大流量时，水舌变得宽厚并形成了与水流方向垂直的“堰面”，阻止了过堰水流的自由下落；二是与两侧边墙干扰有关，水流的水力边界剧变处容易形成过堰水流“堵塞”。

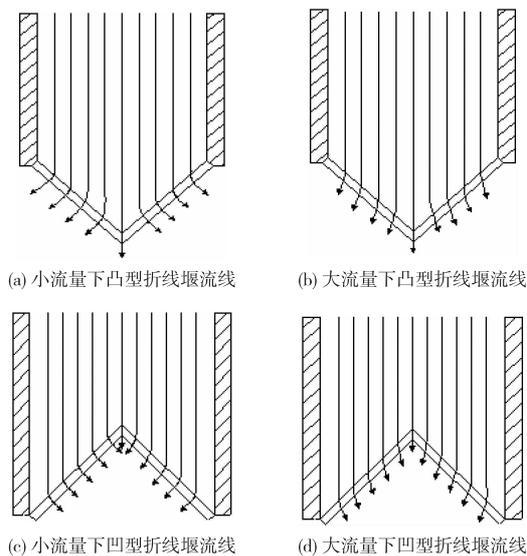


图5 折线堰在不同流量下的流线图

Fig.5 Flow diagram of polyline weir at different discharge

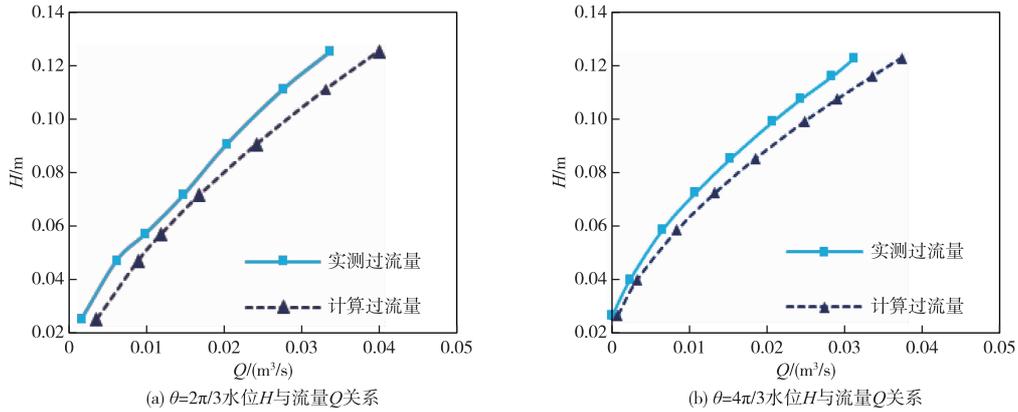


图 6 实测流量与计算流量对比图
Fig.6 Comparison diagram of the measured discharge and the calculated discharge

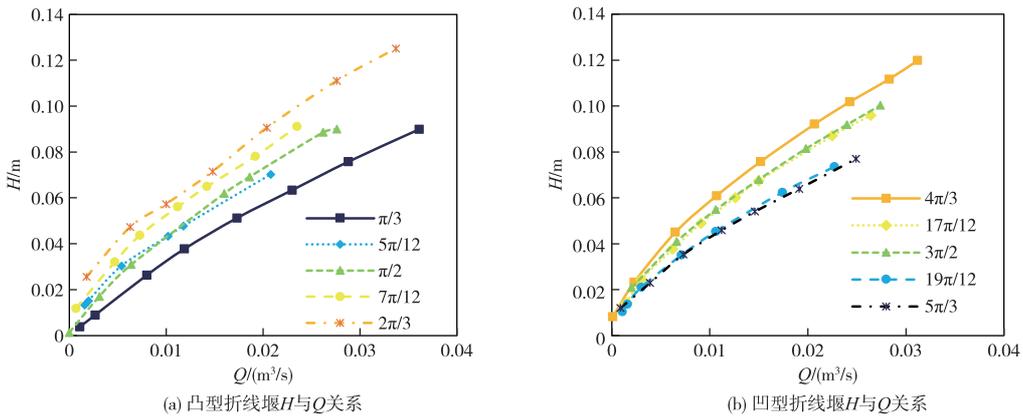


图 7 不同 θ 堰上水头 H 与实测流量 Q 关系
Fig.7 Relationship between head H and the measured discharge Q under different θ

3.4 折线堰综合流量系数 流量系数是综合考虑溢流堰体型的流量损失系数，折线堰流量系数反映了考虑堰轴夹角和相对堰高变化后泄流量的减少程度。本文取具有代表性的 6 种堰轴夹角进行分析，其 m_w 与 H/P 的关系曲线见图 8。

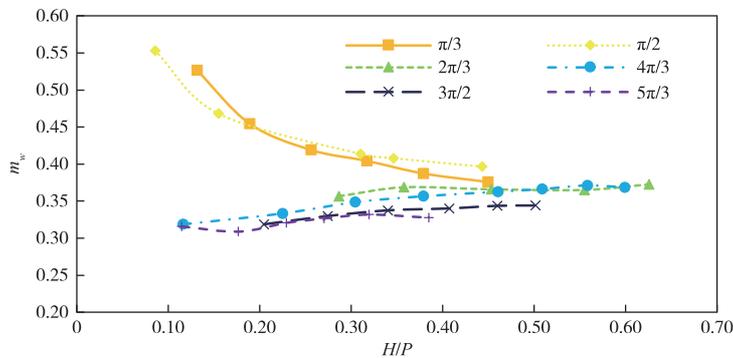


图 8 不同 θ 流量系数 m_w 与相对堰上水头 H/P 关系
Fig.8 Relationship between discharge coefficients m_w and the relative head H/P under different θ

由图 8 曲线可知，当 $\theta = \pi/3$ 和 $\theta = \pi/2$ 时 m_w 随 H/P 的增大而减小，且减小的趋势越来越小，最后 m_w 曲线接近于水平；其他堰轴夹角 θ 时， m_w 则是随 H/P 的增大而增大，最后趋于稳定。可见，当 H/P 大于某数值时， m_w 都会平稳，且数值在 0.30~0.43 之间。对 m_w 呈现的变化规律，其原因是：小流量时水流处于未通气或半通气的不稳定流态状态，尚不能形成足够厚度的泄流水舌，因此流量系数差异

大；而大流量下泄流虽然稳定，但溢流前缘宽度和堰边相互干扰会随 θ 的不同而改变，两者共同作用导致了各堰轴夹角条件下 m_w 的稳定值略有不同。实际上，本文研究目的是在有限的地理条件下尽可能增加折线堰的泄流能力，因此，较大流量时的流量系数研究才更具实际意义。

4 结论

(1) 相比直线堰，折线堰由于溢流前缘宽度的增加，泄流能力可显著提高，当堰上水头为 0.06 m 时，泄流能力提高了 91%。

(2) “折角水流”和“自淹现象”特殊流态造成水舌沿堰长方向形状不一，这是折线堰与直线堰泄流影响机理的差异，因此直接套用传统流量公式计算折线堰泄流量适用性较低。

(3) 在既定河谷宽度条件下，减小堰轴夹角 θ ，可增大溢流前缘宽度，有利于泄流；但也会加大左、右堰边相互干扰，阻滞流动。综合两因素，取 $\theta = \pi/3$ 时具有较好的泄流效果，可为相关工程的设计提供参考。

参 考 文 献：

- [1] 吕娟, 凌永玉, 姚力玮. 新中国成立 70 年防洪抗旱减灾成效分析[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2019, 17(4): 242-251. (LÜ J, LING Y Y, YAO L W. Analysis on the effect of flood and drought disaster prevention in the 70 years since the founding of New China[J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2019, 17(4): 242-251. (in Chinese))
- [2] 仇蕾, 王慧敏, 马树建. 极端洪水灾害损失评估方法及应用[J]. 水科学进展, 2009, 20(6): 869-875. (QIU L, WANG H M, MA S J. Assessment method for extreme flood disaster losses and its application[J]. Advances in Water Science, 2009, 20(6): 869-875. (in Chinese))
- [3] 向立云, 张大伟, 何晓燕, 等. 防洪减灾研究进展[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2018, 16(5): 362-372. (XIANG L Y, ZHANG D W, HE X Y, et al. Research progress in flood control and disaster reduction [J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2018, 16(5): 362-372. (in Chinese))
- [4] 郭军, 董兴林. 淮河和渭河防洪工程中的实用新技术探讨[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2004, 2(2): 73-77. (GUO J, DONG X L. Application of new techniques on flood control for Huaihe River and Weihe River[J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2004, 2(2): 73-77. (in Chinese))
- [5] 牛子厚, 吴鑫森, 秦增乐, 等. 梯级拦水堰与曲线槽岸组合的河道水流特性与过鱼效果研究[J]. 中国水利水电科学研究院学报(中英文), 2023, 21(2): 183-193. (NIU Z H, WU X M, QIN Z L, et al. Study on river flow characteristics and fish passing effect of combination of cascade weir and curved channel bank [J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2023, 21(2): 183-193. (in Chinese))
- [6] 郭新蕾, 夏庆福, 付辉, 等. 新型旋流环形堰竖井泄洪洞数值模拟和特性分析[J]. 水利学报, 2016, 47(6): 733-741, 751. (Guo X L, Xia Q F, Fu H, et al. Numerical study on flow of newly vortex drop shaft spillway[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2016, 47(6): 733-741. (in Chinese))
- [7] 李国栋, 苗洲, 高蓓, 等. 琴键堰不同溢流前缘泄流特性的数值模拟研究[J]. 水力发电学报, 2015, 34(8): 77-84. (LI G D, Miao Z, Gao B, et al. Numerical study on discharge capacity of piano-key weir at its different overflow edges[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2015, 34(8): 77-84. (in Chinese))
- [8] 郭新蕾, 杨开林, 夏庆福, 等. 琴键堰泄流能力特性分析[J]. 水利学报, 2014, 45(7): 867-874, 882. (GUO X L, YANG K L, XIA Q F, et al. Discharge capacity characteristics of piano key weir[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2014, 45(7): 867-874, 882. (in Chinese))
- [9] 祁媛媛, 李国栋, 李珊珊, 等. 琴键堰过流水力特性数值模拟[J]. 南水北调与水利科技, 2018, 16(1): 164-169, 175. (QI Y Y, LI G D, LI S S, et al. Numerical simulation of hydraulic characteristics of piano-key

- weir[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2018, 16(1): 164-169, 175. (in Chinese))
- [10] 王中浩, 马飞, 林智晟. 某水电站琴键堰体型优化试验研究[J]. 水资源与水工程学报, 2024, 35(1): 109-116. (WANG Z H, MA F, LIN Z S. Structural optimization of Piano Key Weirs in a hydropower station[J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2024, 35(1): 109-116. (in Chinese))
- [11] 施仁浦. 提高溢流堰溢流能力的研究[J]. 水利水电技术, 1997(2): 61-63. (SHI R P. Study on increasing spilling capacity of spillweir[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 1997(2): 61-63. (in Chinese))
- [12] 任苇. 迷宫堰在溢洪道(溢流坝)改造中的应用思路[J]. 西北水电, 2010(4): 42-47. (REN W. Application of Labyrinth Weir in spillway modification[J]. Northwest Hydropower, 2010(4): 42-47. (in Chinese))
- [13] 李稳坐, 邱勇, 尹韬, 等. 基于堰流基本公式的 W 型迷宫堰过流能力拟合分析[J]. 人民珠江, 2017, 38(7): 69-72. (LI W Z, Q Y, Y T, et al. Fitting analysis of flow capacity of W labyrinth weir based on the basic formula of weir flow[J]. Pearl River, 2017, 38(7): 69-72. (in Chinese))
- [14] 刘金贵. 对迷宫堰流量公式的新探索[J]. 山西水利科技, 1997(3): 54-59. (LIU J G. New exploration of the flow formula for labyrinth weir[J]. Shanxi Hydrotechnics, 1997(3): 54-59. (in Chinese))
- [15] 彭新民, 崔广涛, 贾树宝. 迷宫堰泄流能力及水力特性的试验研究[J]. 天津大学学报, 2003(6): 727-730. (PENG X M, CUI G T, JIA S B. Study on discharge capacity of labyrinth weir[J]. Journal of Tianjin University, 2003(6): 727-730. (in Chinese))
- [16] 曾甄, 张志军. 迷宫堰流量系数的探讨[J]. 中国农村水利水电, 2005(4): 49-52. (ZENG Z, ZHANG Z J. Discussion on the discharge coefficient of labyrinth weir[J]. China Rural Water and Hydropower, 2005(4): 49-52. (in Chinese))
- [17] 周鑫宇, 邱勇, 葛亚飞, 等. 直角折线堰堰体各组成部分过流能力分析[J]. 人民黄河, 2023, 45(11): 146-150. (ZHOU X Y, Q Y, GE Y F, et al. Analysis of the overflow capacity of each component of right angle broken line weir[J]. Yellow River, 2023, 45(11): 146-150. (in Chinese))
- [18] 何建京, 赵振兴. 水力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2010. (HE J J, ZHAO Z X. Hydraulics[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2010)

Study of discharge capacity of symmetric triangular thin-walled polyline weir

YI Chenli¹, YANG Xiaoli¹, WU Kai², FANG Chenzhuo¹, YUAN Chenyang¹

(1. College of Water Conservancy & Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. Wuxi City Xishan District Ehu town water conservancy management station, Wuxi 214000, China)

Abstract: Recently, due to practical engineering needs, the application of various types of polyline weir in water conservancy projects has gradually increased. Among many polyline types, triangular polyline is the most basic and rarely studied. Therefore the basic weir type of symmetrical triangular thin-wall polyline weir is taken as an example in this paper. On the basis of dimensional analysis and physical model researches, flow characteristics of two typical weir types, concave and convex, and mechanism of weir flow are analyzed. We focused on the influence of key parameters such as weir shaft angle and the relative width of the overflow leading edge. The results show that the flow through the weir of the two types of typical polyline weirs presents different special flow patterns, resulting in different effects on the discharge capacity. The correlation between the key parameters studied is sought and it is found weir shaft angle $\theta = \pi/3$ has a better discharge effect under a given valley width.

Keywords: thin-wall polyline; discharge capacity; dimensional analysis; weir shaft angle; relative width of the overflow leading edge

(责任编辑: 王学风)