

基于阶梯式溢流坝优化的 山区河流水利枢纽设计

侯伟建, 虞奎, 马煜州

(无锡市水利设计研究院有限公司, 江苏 无锡 214000)

摘要:针对山区河流陡峭、流速高以及含沙量高而导致的传统溢流坝消能率不足,下游冲刷剧烈的问题,通过对传统溢流坝进行改进,提出反弧式和二级消力池结合的阶梯式溢流坝,以此提高溢流坝的消能率,降低下游冲刷。对优化后的溢流坝进行模拟测试,其结果显示,反弧阶梯式溢流坝的消能率能够达到79.3%,相对于以前的直角阶梯溢流坝有所提高,并且消力池出口的水流流速可由5.73 m/s降低至3.82 m/s。而在实际测试结果中也显示,使用反弧阶梯式溢流坝后,在单宽流量为0.2 m²/s、0.6 m²/s和1.2 m²/s时,消能率分别为78.4%、69.5%和62.1%,高于传统溢流坝的72.1%、58.3%和49.2%。由上述结果可知,研究提出的溢流坝能够有效提高其消能率,降低下游冲刷力,从而为山区河流水利枢纽泄洪消能提供高效、经济、低冲刷的新坝型。

关键词:溢流坝;反弧式;二级消力池;山区河流;消能率

中图分类号:TP213 文献标识码:A 文章编号:1007-7839(2026)03-0051-0005

Design of a hydraulic hub for mountainous rivers based on the optimization of a stepped overflow dam

HOU Weijian, YU Kui, MA Yuzhou

(Wuxi Water Conservancy Design and Research Institute Co., Ltd., Wuxi 224000, China)

Abstract: Aiming at the problems of insufficient energy dissipation efficiency and severe downstream erosion of traditional overflow dams caused by the steep slope, high flow velocity and high sediment concentration of mountainous rivers, a stepped overflow dam combining reverse-arc and two-stage stilling basin is proposed by improving the traditional overflow dam, so as to enhance the energy dissipation efficiency and reduce downstream erosion. Simulation tests were carried out on the optimized overflow dam. The results show that the energy dissipation efficiency of the reverse-arc stepped overflow dam can reach 79.3%, which is higher than that of the conventional rectangular stepped overflow dam. The flow velocity at the stilling basin outlet can be reduced from 5.73 m/s to 3.82 m/s. The field test results also show that with the reverse-arc stepped overflow dam, the energy dissipation efficiencies are 78.4%, 69.5% and 62.1% at unit discharges of 0.2 m²/s, 0.6 m²/s and 1.2 m²/s respectively, which are higher than 72.1%, 58.3% and 49.2% of the traditional overflow dam. The above results indicate that the proposed overflow dam can effectively improve energy dissipation efficiency and reduce downstream scouring intensity, thus providing a highly efficient, economical and low scouring new dam type for flood discharge and energy dissipation of mountainous river water control projects.

Key words: overflow dam; reverse-arc; two-stage stilling basin; mountainous rivers; energy dissipation rate

收稿日期: 2025-12-20

作者简介: 侯伟建(1993—),男,工程师,硕士,研究方向为水利、水利规划设计、工程设计。E-mail: xiecong@163.com

由于山区地势陡峭,山区河流具有流速快、泥沙含量高、下游冲刷剧烈的特征^[1]。溢流坝是坝顶可泄洪的水工建筑物,具有挡水和排水的功能,用于山区河流的调控中^[2]。但由于山区河流水流能量巨大,传统溢流坝不能够满足山区河流的消能需求,从而导致水流对下游河床造成严重的冲刷,不仅会影响周边生态环境,还对水利枢纽的整体安全性构成威胁。为了解决上述问题,近年来,许多学者对溢流坝进行了研究,例如,程伟科等^[3]使用仿真分析对混凝土重力溢流坝的温控问题进行分析,并根据分析结果对溢流坝进行优化,测试结果显示,优化后整体温度应力得到有效控制。而王一帆等^[4]为了对溢流坝的消能率进行优化,使用了多级消力池对水流流速进行控制,测试结果显示,其消能率能够达到70.12%。尽管上述研究在一定程度上提高了溢流坝的消能效果,但在山区河流的特殊环境下仍存在以下不足。首先,在面对高流速、大流量的山区洪水时,溢流坝无法充分消耗水流能量,导致下游冲刷问题依旧严重^[5]。其次,阶梯式溢流坝水流在最后的台阶上时,其流速依旧过大,会增加空蚀风险。

此次研究针对以上不足,设计出一种带有反弧式台阶和二级消力池的阶梯溢流坝,通过反弧式台阶降低溢流坝最后反弧阶段的空蚀风险,并使用二级消力池降低水流的流速,从而减小下游冲刷程度。研究的创新点在于,在直角阶梯溢流坝的基础上,将直角台阶替换为反弧式台阶,通过其独特的结构形式,优化水流流态,增强水流掺气,提高消能效率,从而有效降低下游冲刷,并且设计二级消力池,通过两个消力池减少水流对下游的冲击。

1 反弧阶梯式溢流坝的优化设计

1.1 阶梯式溢流坝

山区中的河流、溪流等水流具有坡度大、流速快、泥沙含量高的特点。在山区建立溢流坝水利枢纽能够在汛期将洪水通过溢洪道或坝身孔口进行泄洪,还可灵活调节水库水位,满足山区灌溉、供水以及发电等需求^[6]。阶梯式溢流坝是一种结合了阶梯溢流和重力坝特点的水利工程,能够改变水流流态,提高掺气效率,从而提高消能效率。直角式阶梯溢流坝的使用范围最为广泛,普通溢流坝和直角式阶梯溢流坝的基本结构如图1所示。

由图1(a)可知,普通溢流坝的基本结构由顶部曲线段、中间直线段以及底部反弧段构成。顶部曲

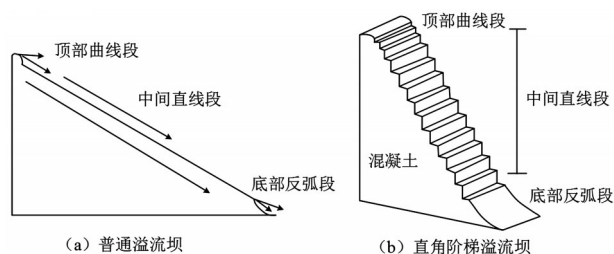


图1 普通溢流坝和直角阶梯溢流坝

线段位于坝顶,是为了使水流平稳流过坝顶,避免产生过大的负压和振动。中间直线段则是连接顶部曲线段和底部反弧段的部分,主要是对水流起到过渡和引导作用。而底部反弧段位于溢流坝末端,通常为一个反向的圆弧曲线,以此将水流平稳地过渡到空中或者下游地区,防止水流冲击,以实现消能防冲的效果。但溢流坝中间直线段之间的落差较大,会产生巨大的冲击力,虽然底部反弧段能够抵消部分冲击力,但其抵消后依旧存在较大的冲击力,会对坝体造成影响。由图1(b)可知,直角阶梯溢流坝在标准溢流坝的基础上,其溢流面表面呈现出阶梯状的直角转折特点。在中间直线段,其由多个水平台阶构成,每个台阶具有一定的宽度和高度,水流能够通过台阶形成跌落,实现消能,以此降低水流对坝体的冲击力。

1.2 反弧阶梯式溢流坝

虽然直角阶梯溢流坝能够在一定程度上降低水流对坝体的冲击力,但当该溢流坝在水流量过大、高度过高时,水流在最后的台阶上的流速依旧过大,溢流坝的反弧段会出现二次负压峰值水柱,增加空蚀风险。下游冲坑深度会随着水流量增加,而冲坑深度的增加会使溢流坝消力池底板向下加深,增加混凝土的用量^[7]。所以此次研究对直角阶梯式溢流坝进行改进,将连续反弧嵌入到台阶中,以提高溢流坝的消能效率。此外,还在溢流坝末端的底部反弧段设计出一个二级消力池,通过两个消力池,再次降低水流的冲击力,提高溢流坝消能效率。新型溢流坝的基本结构如图2所示。

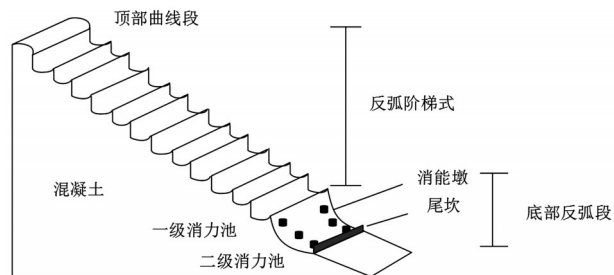


图2 新型溢流坝结构

由图2可知,该溢流坝用反弧改变水流的射流角度,将剩余动能转化为空中势能,再回落到下一级阶梯,实现二次跌落、二次掺气和二次消能。并且在每一级台阶,设置“微挑舌”使得水流呈15~20度挑射,再次消除水流的冲击力。而在溢流坝末端设置二级消力池,其中,一级消力池位于台阶末端,承接经过反弧阶段消能后的水流,并且在池内设置消能墩和尾坎,形成涡流剪切作用,进一步消耗残余能量,稳定水流流态,为水流进入二级消力池创造条件。二级消力池位于反弧段末端,通过二次水跃实现再次消能,降低底部流速与压力,抑制水流对下游的冲刷。并避免消力池底板过度下挖,减少混凝土用量成本,使其能够适应不同山区流水的流量变化,提高其适用性。而反弧半径根据台阶高度确定,其计算公式为

$$R=(2.5\sim 4.0)\cdot h \quad (1)$$

式中: R 为反弧半径; h 为台阶高度。

为了对优化后的溢流坝的性能进行分析,需要计算出溢流坝的消能率,其计算公式为

$$\eta = \frac{E_1 - E_2}{E_2} \times 100\% \quad (2)$$

其中,
$$\begin{cases} E_1 = H + \frac{v_0^2}{2g} \\ E_2 = h_2 + \frac{v_1^2}{2g} \end{cases} \quad (3)$$

式中: η 为消能率; E_1 为上游总能量; E_2 为下游出池能量; H 为坝上水头高度; v_0 为坝前水流流速; h_2 为二级消力池出口处的水深; v_1 为二级消力池出口处的水流的平均流速; g 为重力加速度,取 9.8 m/s^2 。

而为了对新型溢流坝的性能进行测试,研究设计了一种模型试验,在某一水利馆中进行。试验中使用到的装置有水箱、蓄水池、水泵、阀门、有机玻璃等。利用水箱模拟山区中的水流,流量范围为 $0\sim$

120 L/s ,使用有机玻璃搭建反弧式阶梯,使用蓄水池作为消力池。使用水泵和阀门对水流流量进行调节,利用高速摄像机拍摄水流挑射、水跃形态,帧率为 $1\ 000 \text{ fps}$;而有机玻璃具有透明可视化的特点,可用于观测水流流态和掺气过程。并且模拟时,为了分析反弧阶梯弧度对消能率的影响,设计了2种不同的阶梯尺寸,第一种为长宽和弧度半径分别为 $10 \text{ cm} \times 5 \text{ cm} \times 6 \text{ cm}$,台阶数量为20的小反弧(L_{\min}),第二种为 $20 \text{ cm} \times 10 \text{ cm} \times 12 \text{ cm}$,台阶数量为10的大反弧(L_{\max})。直角阶梯溢流坝的尺寸也分为大直角(R_{\max})和小直角(R_{\min}),其长宽和台阶数量与反弧阶梯溢流坝大弧度和小弧度相同。模拟山区水流流动后,使用测针和超声地形仪测量下游冲坑深度,使用光纤掺气仪测量台阶与反弧段断面掺气率。上下游流速使用毕托管测速仪进行测量,其测量精度为 0.01 m/s 。

2 反弧阶梯式溢流坝的效果分析

2.1 模拟试验结果分析

为了验证提出的反弧阶梯式溢流坝的性能结果,此次研究对设计出的 L_{\min} 、 L_{\max} 、 R_{\min} 和 R_{\max} 溢流坝的各项性能进行了计算,首先分析了4个溢流坝的消能率变化情况,其结果如图3所示。

由图3(a)可知,随着单宽流量的增大,溢流坝的消能率在不断降低,但在不同配置的溢流坝中, L_{\min} 的消能率一直高于其他溢流坝,在单宽流量为 $0.1 \text{ m}^2/\text{s}$ 时, L_{\min} 、 L_{\max} 、 R_{\max} 和 R_{\min} 溢流坝的消能率分别为 73.2% 、 72.1% 、 68.3% 和 65.2% 。当单宽流量增加至 $0.5 \text{ m}^2/\text{s}$ 时,4种溢流坝的消能率分别降低至 54.3% 、 52.1% 、 40.2% 和 38.1% 。该结果表明,反弧式阶梯溢流坝的消能率高于直角阶梯溢流坝,而当弧度小,台阶多时,其消能率要高一些。由图3(b)可知,当坝高与临界水深之比越高,溢流坝非流态

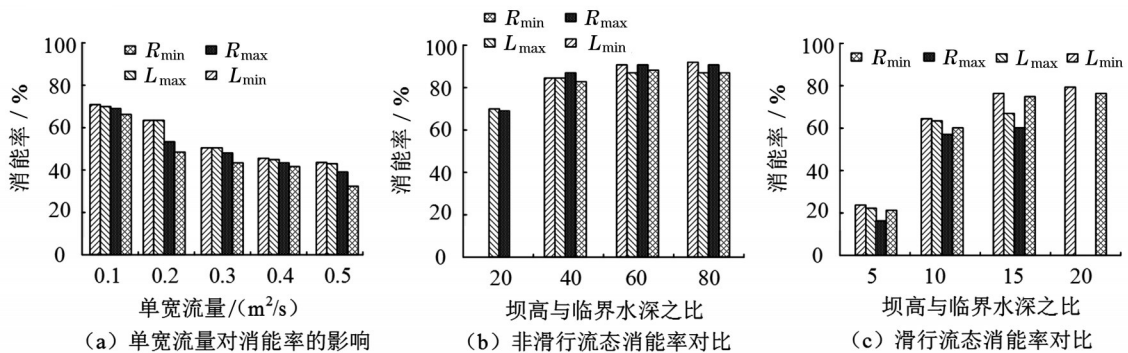


图3 溢流坝消能率对比

的消能率越高,并且 L_{\min} 的消能率依旧高于其他溢流坝的消能率。由图3(c)可知, L_{\min} 的滑行流态消能率也高于其他3种溢流坝,当坝高与临界水深之比为15时,4种溢流坝的消能率分别为79.3%、63.2%、60.1%和78.3%。由上述结果可知,设计出的反弧阶梯式溢流坝的消能率最优。再对4种溢流坝的下游冲坑深度和消力池出口水流流速进行分析,其结果如图4所示。

由图4(a)可知,4种溢流坝中, L_{\min} 的冲击深度最小,平均为3.82 m,而 R_{\min} 的冲击深度最大,平均值为6.93 m。 L_{\max} 和 R_{\max} 的冲击深度与 L_{\min} 和 R_{\min} 比较接近。由该结果可知,研究设计出的反弧式阶梯溢流坝能够降低下游冲击深度,从而减少混凝土用量。从图4(b)中可以看出,4种溢流坝中, L_{\min} 中消力池出口的水流流速最小,平均为3.82 m/s,而 R_{\min} 溢流坝中消力池出口的水流流速较大,达到了6.73 m/s。由上述模

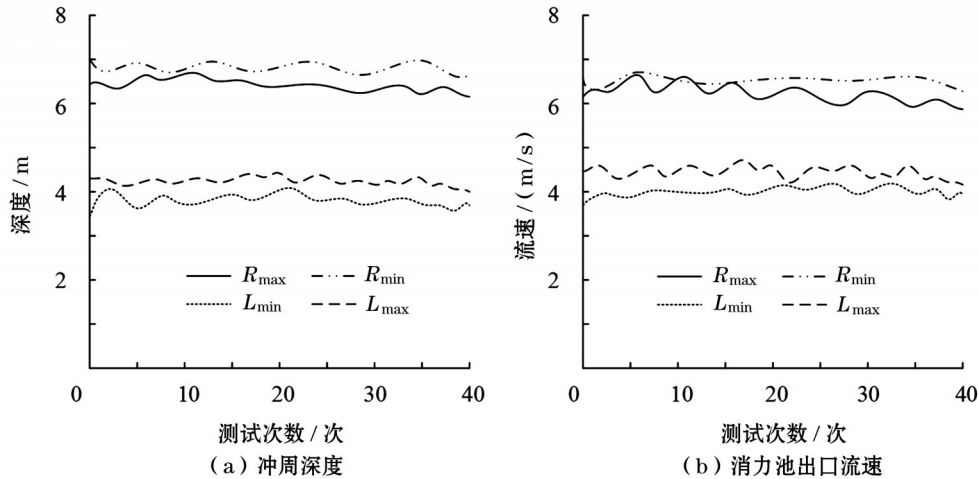


图4 冲击深度和流速分析

拟测试结果可知,研究提出的添加了二级消力池的反弧式阶梯溢流坝能够提高溢流坝的消能率,降低下游的冲击深度以及水流在消力池出口的流速。

2.2 实际测试结果分析

对4种溢流坝的模拟测试结果进行分析,验证了反弧阶梯式结构能够提高溢流坝的消能率并降低溢流坝下游冲击深度和消力池出口流速。此次研究利用该方式对实际的水流进行了测试。以吊嘎河流域人工阶梯—深潭系统为此次研究对象,吊嘎河为金沙江二级支流,位于云南省东北部,属于坡度大、流速快的典型山区河流。该河流全长26.4 km,天然落差约420 m,最大单级断面落差47 m。在该河流的K12+850-K13+180段对反弧阶梯式溢流坝进行测试,坝高15 m,顶宽4 m,共20级台阶,单级高0.6 m、宽0.8 m,在第3、6、9、12、15级台阶中部设 $\phi 50$ mm强制通气孔,每级台阶末端设5 cm高、10 cm长的挑舌,反弧半径为0.9 m。下游一级消力池位于第20级台阶下游,长12 m,池深2.5 m,池内布设两排消能墩,墩高1.2 m、宽0.8 m,墩距2.0 m;二级消力池以斜坡衔接,池长8.0 m,池深1.5 m,混凝土等级为C50。对溢流坝性能进行测量时,其测量点位如表1所示。

表1 测量点位

点位	位置	点位	位置
1	坝前30 m	6	一级消力池入口
2	坝顶堰顶中线	7	一级消力池尾坎顶
3-1~3-20	1~20阶台阶水平面中部	8	二级消力池入口
4	通气口出口	9	二级消力池出口
5	20级挑舌出口	10	下游30 m河道中心

在低流量 $0.2 \text{ m}^3/\text{s}$ 和中流量 $0.6 \text{ m}^3/\text{s}$ 下分别稳定2 h进行观察,在高流量 $1.2 \text{ m}^3/\text{s}$ 时持续0.5 h进行观察,每个条件下观察50次,取平均值作为结果。选择点位1、点位6、点位8、点位9的河流流速测量结果进行观察,并计算3种条件下溢流坝的消能率,并将其与以前传统的溢流坝消能率进行对比。点位1能够得到水库即将泄出的单位重量水体总体机械能,作为后续计算消能率的基准值。点位6与点位1之间的差距能够计算出反弧台阶的消能率。点位8是经过一级消能池后的残余能量,可得到一级消能池的实际效率,而点位9与点位8之间的差,则可计算出二级消力池的消能率,也是所有消能措施

结束后,水流泄流回归河道的剩余能量,可得到整个溢流坝的消能率。通过上述4个点位即可将反弧台阶、二级消力池以及整个溢流坝的消能率计算清楚,并减少不必要的计算,其结果如图5所示。

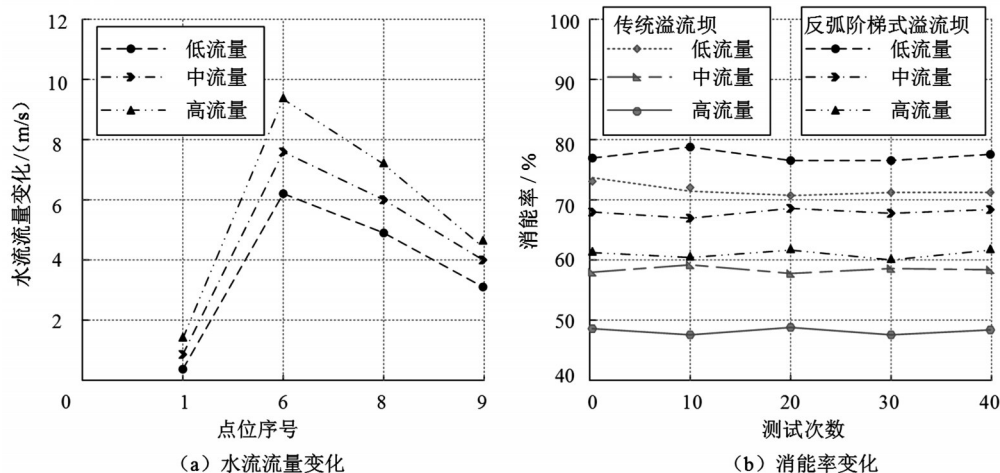


图5 流速和消能率变化

点位9,二级消力池出口的水流流速分别降低至3.8 m/s、4.0 m/s和4.2 m/s,该结果说明二级消力池能够有效降低水流流速。由图5(b)可知,使用此次研究提出的反弧阶梯式溢流坝后,其在低流量、中流量和高流量情况下,消能率分别为78.4%、69.5%和62.1%;而以前的溢流坝在低、中、高流量下,其消能率分别为72.1%、58.3%和49.2%。由该结果可知,反弧阶梯式溢流坝能够提高消能率。综上可知,基于反弧式和二级消力池的阶梯式溢流坝能够有效降低山区河流的流量,提高溢流坝消能率。

3 结论

此次研究为了解决山区河流中由于地势陡峭、河流流速高导致的溢流坝消能率不足、下游冲刷剧烈的问题,使用了反弧阶梯式溢流坝,并增加了二级消力池对山区河流中的溢流坝进行优化,并通过模拟试验和实际测试对新型溢流坝的性能进行了分析。模拟测试结果显示,反弧阶梯式溢流坝的消能率整体高于直角阶梯溢流坝。在“吊嘎河流域人工阶梯—深潭系统”中进行实际测试时,反弧阶梯式溢流坝在低单宽流量下,其消能率为78.4%,高于传统溢流坝的72.1%;在单宽流量下,其消能率能够达到69.5%,也高于传统溢流坝的58.3%,并且在高单宽流量下,反弧阶梯式溢流坝也高于传统溢流坝。此外,使用二级消力池后,相较于一级消力池,其在低、中、高单宽流量下,分别将水流流速降低了

由图5(a)可知,单宽流量越高,水流流量也比较大。当单宽流量 $0.2 \text{ m}^2/\text{s}$ 、 $0.6 \text{ m}^2/\text{s}$ 和 $1.2 \text{ m}^2/\text{s}$ 时,点位6,即一级消力池入口的水流流速分别为6.1 m/s、7.8 m/s和9.2 m/s,而在低、中、高单宽流量条件下,

2.3 m/s、3.8 m/s和5.0 m/s,由此可知,二级消力池能够有效降低水流流速。上述结果显示研究提出的新型溢流坝能够提高消能率、降低下游冲刷深度。但此次研究仅对比了“大、小”两种反弧半径与台阶尺寸,未对挑舌角度、墩型布置等其他参数进行分析,未来可进一步分析其他参数对溢流坝性能的影响,进一步优化其性能。

参考文献:

- [1] 黄平,胡海松. 溢流坝泄洪闸门间隔开启方式数值模拟研究[J]. 吉林水利,2024(5):7-11.
- [2] 赵鲁松,孙自永,马瑞,等. 青藏高原季节冻土山区河流的溶解性碳输出特征及控制因素[J]. 地球科学,2024,49(3):1177-1188.
- [3] 程伟科,周子典,王胜乐,等. 尚义碾压混凝土重力坝溢流坝段温控仿真分析[J]. 水电能源科学,2024,42(12):122-127.
- [4] 王一帆,杨磊,向金虎,等. 顺直型与弯曲型联合消能多级消力池水力特性研究[J]. 中国农村水利水电,2025,5(3):113-118.
- [5] 陆小伟,洪大林,谢瑞. 安峰山水库溢洪闸泄流及闸下消能试验研究[J]. 江苏水利,2005(9):13-15.
- [6] ZHANG W T, LIU J F, XU Z X, et al. Study on debris flow discharge characteristics of check dam spillway[J]. Physics of Fluids, 2024, 36(8): 83120-83131.
- [7] 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.