

水平多股淹没射流水力特性及消能分析

张建民¹, 王玉蓉¹, 杨永全¹, 许唯临¹, 李艳玲¹, 曾雄辉², 程浩²

(1. 四川大学高速水力学国家重点实验室, 四川 成都 610065; 2 国家电力公司中南勘测设计研究院, 湖南 长沙 410014)

摘要: 针对不能采用挑流消能型式的大型水电工程, 提出了多股多层水平淹没射流新型消能型式。它是利用与下游消力池底板具有一定高差且基本平行的多股射流进入消能水体的中间, 在每一股射流的四周形成强剪切并各有一个较为稳定的三元紊动旋滚的水平多股淹没射流进行消能。对该消能方式的水力特性和消能特性进行理论分析, 推导出三元水平多股淹没射流水力参数计算公式, 计算结果表明它是一种流态稳定、适应性强、低雾化、高消能率, 有利于降低临底流速的新型消能方式。

关键词: 水平多股淹没射流; 水力特性; 消能机理; 理论分析; 水力计算

中图分类号: TV135.22 文献标识码: A 文章编号: 1001-6791(2005)01-0018-05

高水头大单宽流量泄洪消能一直是水利工程界极为关注的研究课题。挑流消能形式结构简单, 消能效果显著, 缺点是雾化影响严重。传统的底流消能雾化较低, 但临底流速较大, 底板的抗冲保护难度很大。面流消能雾化影响介于挑流消能和底流消能之间, 但表面波浪影响较远, 不利于下游防冲保护^[1]。因此, 解决底流消能临底流速较大, 消力池底板稳定性等问题就成为工程设计关键技术难题。Rajanatnam^[2]、Hager^[3,4]、Iwao Ohtsu^[5]等对有跌坎或对称扩宽的底流消能水力特性进行了详细的试验研究。Katakam^[6]对既有跌坎又有对称扩宽的底流消能水力特性进行了研究, 结果表明, 既有跌坎又有对称扩宽的底流消能率最高, 而且下游流态最稳定。为解决泄洪前沿宽度有限, 单宽流量较大的水电工程的泄洪消能难题, 本文提出了多股多层水平淹没射流新型消能型式。分析了多股多层水平淹没射流消能时的水力特性及消能特性, 以便为工程设计提供理论依据。

1 消能机理

如图 1 所示, 水平多股多层淹没射流新型消能形式是利用与下游消力池底板具有一定高差且基本平行的多股射流进入消能水体的中间, 在每一股射流的四周形成强剪切并各有一个较为稳定的三元紊动旋滚的水平多股淹没射流进行消能。

研究表明, 水流弗劳德数 Fr 为 2~5 时, 二元水跃旋滚时均消能率仅 20%~45%, 消能效果并不理想。如某大型工程消力池进口流速约为 40 m/s, 如采用传统的底流消能型式, 临底流速很大, 水流弗劳德数 Fr 约为 7.5, 其实际消能率仅 60% 左右, 而且需要的下游水位很高, 难以满足工程运行要求。采用有跌坎的底流消能型式, 消能率略有提高, 但跌坎高度对下游流态非常敏感, 在下游水位较低时, 可能形成面流流态, 跌坎太低, 临底流速依然很大, 不能根本解决工程实际问题。采用水平多股多层淹没射流消能型式, 坝脚处的水流流速基本不变, 而水流弗劳德数 Fr 约为 4, 这样可以更好地适应下游水位的变化, 实际消能率提高到 70% 左右。在同等条件下, 二元水跃的实际消能率不到 60%。

水平多股多层淹没射流新型消能型式之所以具有雾化较低, 消能效率较高, 流态稳定等特点, 主要原因是: ① 每股射流均增加了两侧的强剪切层; ② 扩大了参与消能的水体体积, 增加了单位水体消能率; ③ 增加了各股射流之间的水下碰撞和掺混强度, 提高了消能率; ④ 减小了水流弗劳德数, 更加适应下游尾水的变化, 流态更加稳定; ⑤ 解决了低弗劳德数水跃消能率低的难题, 减小了下游尾水波动; ⑥ 跌坎可以适当提高, 从而显著降低临底流速; ⑦ 形成稳定的多股多层淹没射流不仅依靠下游尾水的高低, 而且与出口宽度和下游尾

收稿日期: 2003-08-16; 修订日期: 2003-12-30

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (50479062); 国家杰出青年科学基金项目 (50329928); 国家电力公司重点科研资助项目

作者简介: 张建民 (1972-), 男, 湖北黄梅人, 四川大学副教授, 博士, 主要从事水工水力学方面的科研和教学工作。

E-mail: jmzhangscu@263.net.cn

水宽度有关，只要合理选择体型参数如坎高、出口宽度等就能形成稳定的淹没射流，因此，更能适应实际工程运行要求；⑧由于坎高处于不同的高程，各股之间又有一定的间距，因此，避免了一段时间为面流，另一段时间为底流，流态反复过渡的情况；⑨坎高的设计可根据下泄流量和下游尾水关系，选择两层或多层，坎较低的可以适应较低的下游水位，坎较高的可以适应较高的下游水位，因此，设计灵活，便于应用。

2 理论分析

如图 1 所示，多股多层水平淹没射流分两层，每一层射流股数分别为 n 和 m ，出口高度分别为 s_1 和 s_2 ，宽度分别为 b_1 和 b_2 ，每一孔的出口收缩断面水深分别为 h_1 和 h_2 ，下游消力池宽度为 B ，水深为 h_t ，应用动量方程，可列出 2-2 断面和 3-3 断面的动量方程：

$$n \frac{1}{2} \rho g h_1^2 b_1 + P_s + m \frac{1}{2} \rho g h_2^2 b_2 - \frac{1}{2} \rho g h_t^2 B = \rho \left[\frac{Q^2}{h_t B} - \frac{Q_1^2}{h_1 n b_1} - \frac{Q_2^2}{h_2 m b_2} \right] \quad (1)$$

式中 P_s 为跌坎对消力池水体作用力；由下式确定^[4]

$$P_s = P_{s1} + P_{s2} = \rho g n b_1 s_1 \left[h_1 + \frac{s_1}{2} \right] + \rho g m b_2 s_2 \left[h_2 + \frac{s_2}{2} \right] \quad (2)$$

将式(2)带入式(1)，经整理可得方程组：

$$\begin{aligned} Y_1 &= \frac{2nFr_1^2 [KY_1\beta_1 - n(1+K)]}{K\beta_1 \left[\frac{1}{2}\beta_1 Y_1^2 - n(S_1+1)^2 \right]} \\ Y_2 &= \frac{2mFr_2^2 [Y_2\beta_2 - m(1+K)]}{\beta_2 \left[\frac{1}{2}\beta_2 Y_2^2 - m(S_2+1)^2 \right]} \end{aligned} \quad (3)$$

式中 Fr_1 、 Fr_2 分别为出口断面水流弗劳德数， $Fr_1^2 = v_1^2/g h_1$ ， $Fr_2^2 = v_2^2/g h_2$ ； Y_1 、 Y_2 分别为消力池末端水深与出口水深之比， $Y_1 = h_t/h_1$ ， $Y_2 = h_t/h_2$ ； β_1 、 β_2 分别为消力池宽度与单个射流出口宽度之比， $\beta_1 = B/b_1$ ， $\beta_2 = B/b_2$ ； S_1 、 S_2 分别为出口高度与出口断面水深之比， $S_1 = s_1/h_1$ ， $S_2 = s_2/h_2$ ； K 为流量分配比， $K = Q_1/Q_2$ 。当多股多层水平淹没射流进行消能时，必须同时满足上述两式。

当仅有单层多股射流，由式(1)、式(2)可得

$$Y_1 = \frac{2nFr_1^2 \left\{ Y_1 - \frac{n}{\beta_1} \right\}}{\beta_1 \left\{ Y_1^2 - \left[(S_1+1)^2 - \left[1 - \frac{n}{\beta_1} \right] \right] \right\}} \quad (4)$$

令 $n = 1$ ，式(4)与文献[6]的结果一致，文献[6]给出了消力池下游水位与上游水位之比的理论结果 Y_{th} 和试验结果 Y_{exp} 的比较，两者吻合较好(图 2)。因此，研究单层多股水平淹没射流仍具有十分重要的理论指导意义。

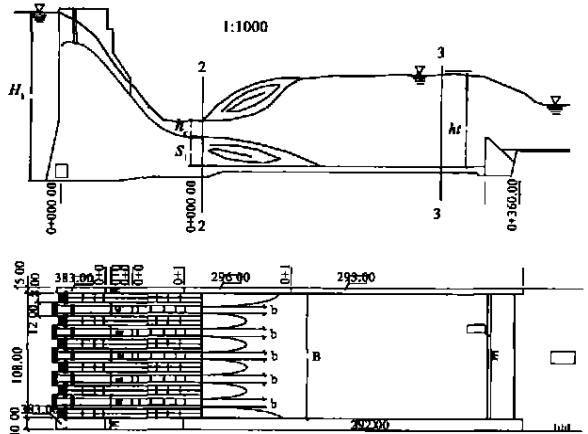


图 1 水平多股淹没射流流动模式计算示意图

Fig. 1 Definition sketch of multi horizontal jets

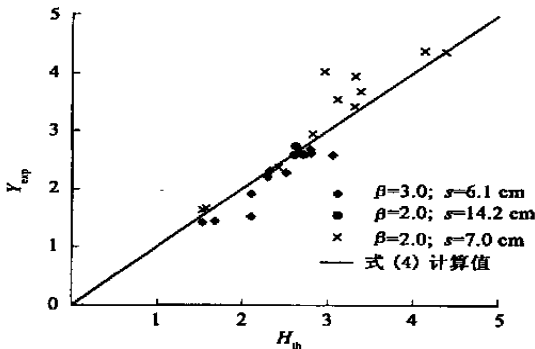


图 2 式(4)计算结果与模型试验结果的比较(模型试验结果引自 Katakam, 1998)

Fig. 2 Comparison between calculated value and experimental value(Refer to Katakam, 1998)

3 消能率

多股多层水平淹没射流的消能率根据图 1 中断面 2-2 和断面 3-3 的能量方程求得:

$$E_{2-2} = \frac{K}{1+K} \left(h_1 + \frac{v_1^2}{2g} + s_1 \right) + \frac{1}{1+K} \left(h_2 + \frac{v_2^2}{2g} + s_2 \right) \quad (5)$$

$$E_{3-3} = h_t + \frac{v_t^2}{2g} \quad (6)$$

能量损失 $\Delta E = E_{2-2} - E_{3-3} \quad (7)$

消能率 $\eta_{MHSJ} \quad \eta_{MHSJ} = \frac{\Delta E}{E_{2-2}} = 1 - \left[\frac{\left(\frac{Y_2}{Y_1} \right) \left(\frac{K}{1+K} \right) \left(\frac{Y_2 + (1+K)^2 \frac{m^2 Fr_2^2}{2Y_2^2 \beta_2^2}}{1 + S_1 + \frac{Fr_1^2}{2}} \right) + \left(\frac{1}{1+K} \right) \left(1 + S_2 + \frac{Fr_2^2}{2} \right)}{\left(\frac{Y_2}{Y_1} \right) \left(\frac{K}{1+K} \right) \left(1 + S_1 + \frac{Fr_1^2}{2} \right) + \left(\frac{1}{1+K} \right) \left(1 + S_2 + \frac{Fr_2^2}{2} \right)} \right] \quad (8)$

当仅有单层多股射流, 由式(8)可得

$$\eta_{BJ} = \frac{\Delta E}{E_{2-2}} = 1 - \left[\frac{\left(Y_1 + \frac{n^2 Fr_1^2}{2Y_1^2 \beta_1^2} \right)}{\left(1 + S_1 + \frac{Fr_1^2}{2} \right)} \right] \quad (9)$$

跌坎淹没射流消能率 $\eta_{BJ}^{[3]} \quad \eta_{BJ} = \frac{\Delta E}{E_{2-2}} = 1 - \left[\frac{\left(Y_1 + \frac{Fr_1^2}{2Y_1^2} \right)}{\left(1 + S_1 + \frac{Fr_1^2}{2} \right)} \right] \quad (10)$

突扩淹没射流消能率 $\eta_{BJ}^{[4]} \quad \eta_{BJ} = \frac{\Delta E}{E_{2-2}} = 1 - \left[\frac{\left(Y_1 + \frac{n^2 Fr_1^2}{2Y_1^2 \beta_1^2} \right)}{\left(1 + \frac{Fr_1^2}{2} \right)} \right] \quad (11)$

假如某消力池总宽度 16 m, 流量为 2000, 水头为 100 m。采用只有突扩、只有跌坎和既有突扩又有跌坎的底流消能, 应用式(9)~式(11)的消能率计算结果见图 3。可见, $\eta_{BJ} > \eta_{BJ}$, $\eta_{BJ} > \eta_{SJ}$ 。由于出口宽度减小, 水流弗劳德数减小, 但由于突扩比增大, 其消能率仅略有减小。同样的突扩比, 设置跌坎高度能够增加消能率。综合两种因素, 采用多股淹没射流, 通过减小出口宽度, 能够提高跌坎高度, 又不减小消能率, 同时, 可以大大降低临底流速, 减轻底板冲蚀破坏。

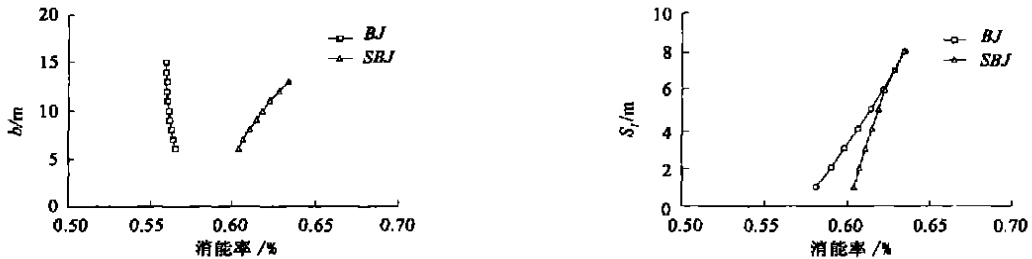


图 3 消能率的比较

Fig. 3 Comparison of energy dissipated ratios

4 计算结果与分析

运用上述理论分析方法，对多股多层水平淹没射流的水力特性和消能特性进行了分析。图 4 为射流出口相对水深 h_t/h_1 与射流出口 Fr_1 之间的关系。计算表明，①当相对出口宽度 B/nb_1 确定后，随着 Fr_1 增加，形成稳定淹没射流所需的下游水位急剧增加；在射流出口 Fr_1 一定的情况下，相对出口高度越大，所需要的下游水位越高。因此，在下游水位一定时，要满足射流被淹没，调整淹没出流高度是有效的方法；②当射流相对出口高度 s/h_1 确定后，在一定的弗劳德数 Fr_1 条件下，随着射流出口宽度的增加，所需要的下游水位越大。因此，在下游水位一定时，为了形成稳定的淹没射流和避免出现面流流态，尽量减小射流出口宽度和射流出口高度。

图 5 为下游相对水深 h_t/h_1 与消能率之间的关系。计算表明，①射流出口高度越大，消能率 η 越高，但射流出口高度对消能率的影响较小；②射流出口宽度越大，消能率越低，射流出口宽度对消能率的影响也较小；③水流弗劳德数 Fr_1 越大，消能率越大。当射流出口水流弗劳德数 Fr_1 大于 5.0 时，射流出口水深对消能率的影响减小；④弗劳德数 Fr_1 相同，下游水深越大，淹没度越大，消能率越小。上述分析结果与平底矩形水跃的理论分析结果，水流弗劳德数 Fr_1 大于 6.0 消能率接近 80% 是一致的。

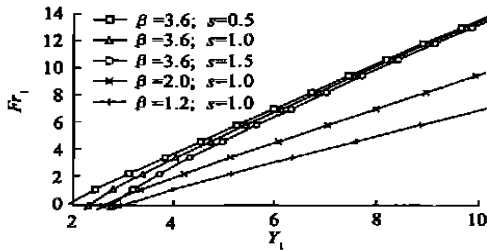


图 4 h_t/h_1 与 Fr_1 之间的关系 (n 、 β 、 S 确定)

Fig. 4 Relatives of h_t/h_1 and Fr_1 (Defined n , β , S)

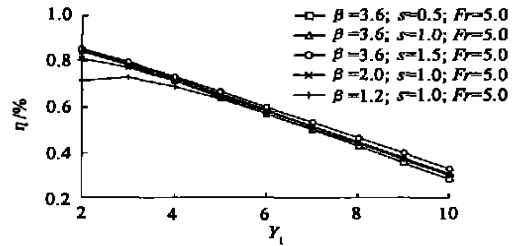


图 5 h_t/h_1 与 η 之间的关系 (n 、 β 、 S 确定)

Fig. 5 Relatives of h_t/h_1 and η (Defined n , β , S)

图 6、图 7 为淹没射流个数与下游水位和消能率的关系。计算表明，①淹没射流个数越多，形成稳定流态所需要的下游水深越小；②在出口水流弗劳德数 Fr_1 一定的情况下，射流个数对消能率的影响不大。

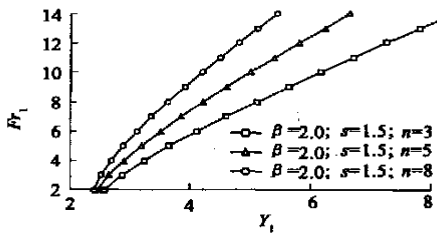


图 6 h_t/h_1 与 Fr_1 之间的关系 (β 、 S 确定)

Fig. 6 Relatives of h_t/h_1 and Fr_1 (Defined β , S)

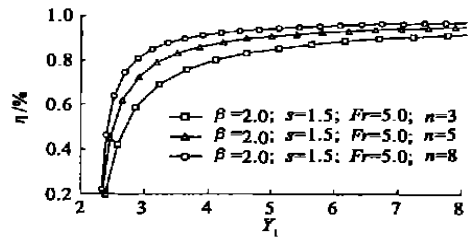


图 7 h_t/h_1 与 η 之间的关系 (β 、 S 、 Fr 确定)

Fig. 7 Relatives of h_t/h_1 and η (Defined β , S , Fr)

由于恒定总流分析方法无法反映消力池出坎水流波动能量，因此，得出了图 7 的结果。实际情况是，流态越稳定，波动能量越小，因此，可以推断，多股多层水平射流消能后的出坎水流波动能量必然小于单股淹没射流。因此，多股多层水平射流的总的消能率最大。反过来，多股多层水平射流消能效果最好，对下游的影响最小，因此，这种消能方式具有消能效率较高，流态稳定等特点，同时其雾化对环境的影响较低。

5 结 论

(1) 与二元淹没射流(Special Jump and B-Jump)比较, 空间三元淹没射流(Special B-jump)消能率高, 对下游水位适应性好。

(2) 三元淹没射流的出口高度对流态稳定影响显著。

(3) 在水流弗劳德数 Fr_1 确定后, 水流宽度越窄, 下游淹没射流越稳定。

(4) 三元淹没射流出口高度和出口宽度对消能率的影响均较小。

(5) 水流弗劳德数 Fr_1 对消能率的影响最大, 当弗劳德数 Fr_1 大于 6.0 以上, 下游淹没射流的消能率均达到 80%。

(6) 射流的淹没度越大, 消能率越低。

(7) 在相同条件下, 淹没射流个数对消能率的影响不大。

上述结论对实际工程设计具有一定的参考价值。

参考文献:

- [1] 吴持恭. 水力学(下册) [M]. 北京: 高等教育出版社, 1982. 1-38.
- [2] Rajanatham N, Subramanya K. Hydraulic jumps below abrupt symmetrical expansions[J]. J Hydr Div, ASCE, 1968, 94(2): 481-503
- [3] Hager W H. B jumps at abrupt channel drops[J]. J Hydr Engg, ASCE, 1985, 111(5): 861-866
- [4] Hager W H. Hydraulic jump in non prismatic rectangular channels[J]. J Hydr Res Delf, The Netherlands, 1985, 23(1): 21-25
- [5] Iwao Ohtsu, Youichi Yasuda, Motoyasu Ishikawa, Submerged hydraulic jump below abrupt expansions[J]. J Hydr Engg, ASCE, 1999, 125(5): 492-499.
- [6] Katakam V, Seetha Ram, Rama Prasad. Spatial B Jump at channel enlargements with abrupt drop[J]. J Hydr Engg, ASCE, 1998, 124(6): 643-646.

Energy dissipation and hydraulics characteristics of multi-horizontal submerged jets^{*}

ZHANG Jian-min¹, WANG Yurong¹, YANG Yong-quan¹, XU Weilin¹, LI Yailing¹, ZENG Xionghui², CHENG Hao²

(1. State Key Hydraulics Laboratory on High Speed Flows, Sichuan University, Chengdu 610065, China;

2. Mid-South Design and Research for Hydroelectric Projects, Changsha 410014, China)

Abstract: In this paper, the multi-horizontal submerged jets (MHSJ), a good design of energy dissipation, is presented. The MHSJ comes into being by the special ways with horizontal and parallel jets and a needed distance to the bottom of bed when jets enter into the still downstream basin. In this arrangement, the number of strong stress and the turbulence among water surface, the high speed flow and the bottom of basin are twice more than enlarge or shorten jump. Therefore, the MHSJ is a kind of efficient energy dissipation in the term of making use of the strong stress and the 3-D turbulence vortexes. The hydraulic characteristics and dissipated energy ratio are studied theoretically, and the formula to calculate the conjugate water depth and energy dissipated ratio are obtained. These results show that the MSBJ is a good dissipation energy type with less local precipitation, more dissipated energy rate, well applicability, and wide practicability.

Key words: multi-horizontal submerged jets; hydraulic characteristics; energy dissipated mechanics; theoretic analysis; hydraulic design

* The project is supported by the National Natural Science Foundation of China(No. 50479062) and the National Science Fund for Distinguished Young Scholars of China (No. 50325928).