突扩跌坎水舌落点冲击力分析及底坡优化

徐一民[1,2]，刘善均[1]，许唯临[1]，王　韦[1]

（1. 四川大学水力学与山区河流开发保护国家重点实验室，成都　610065；
2. 昆明理工大学电力学院，昆明　650051）

摘要：工程实践证明掺气减蚀是一种既经济又有效的减蚀措施。给出了较新型的掺气设施——突扩跌坎水舌下缘落点的一种计算方法，分析和计算了水舌对下游底板的冲击力。通过优化底坡和底板体型，使水流对底板的冲击力减小，减弱溅水强度，从而弱化突扩跌坎水舌引起的水翅。优化结果显示坎后底板型式宜采用上凸曲线型，所得结论得到了试验验证。

关键词：水利水电工程；突扩跌坎；冲击力；底坡优化
中图分类号：TV-9　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1674-2850(2009)02-0339-6

Analysis on impulsive force of jet flow through an aerator with vertical drop and sudden lateral enlargement and bottom slope optimization

XU Yimin[1,2], LIU Shanjun[1], XU Weilin[1], WANG Wei[1]

(1. *State Key Laboratory of Hydraulics and Mountain River Engineering, Sichuan University, Chengdu* 610065, *China*;
2. *Electricity Institute, Kunming University of Science and Technology, Kunming* 650051, *China*)

Abstract: Engineering practice proved that aeration is an economical and effective measure to alleviate cavitation, the paper establishes a method for calculating drop point of jet flow from an aerator with vertical drop and sudden lateral enlargement, as a relatively new aeration facility. Impulsive forces on lower floor by jet flow from the aerator are analyzed and calculated in the paper. By optimizing bottom slope and floor shape, impulsive force of jet flow from the aerator is reduced and thus the water wing caused by jet flow is weakened. The optimum result shows that the shape of floor is better to be convex carve. Conclusions in this paper are tested and verified well with experimental data.

Key words: water conservancy and hydropower engineering; sudden enlargement and bottom drop; impulsive force; bottom slope optimization

0　引言

在高水头泄水建筑物中，由于高速水流的作用而引起的空蚀破坏，常导致工程不能安全运行。为了减免空蚀破坏，必须采取有效的工程措施。其中掺气减蚀已被工程实践证明是一种既经济又有效的减蚀措施。突扩跌坎掺气方案是较新型的掺气设施，水流经过突扩跌坎下泄时，形成射流，在两侧突扩的边壁之间和跌坎下方的底部形成空腔。侧空腔和底空腔相连成为空气通道，以达到掺气减蚀的目的。突扩跌坎掺气设施形式简单，有利于水流掺气，其另一个优点是有利于采用偏心铰弧门同曲面液压密封止水，保证闸门止水的安全可靠和优良运行。因此，国内外许多工程都采用了突扩跌坎的掺气设施。但是由于工程经验不够丰富，理论研究也还不够深入，在国内外已建工程中如龙羊峡泄洪底孔、

基金项目：高等学校博士学科点专项科研基金（20030610038）
作者简介：徐一民（1962—），男，副教授，主要研究方向：水力学教学及试验研究
通信联系人：刘善均，研究员，博士生导师，主要研究方向：水工水力学. E-mail：drliushanjun@vip.sina.com

巴基斯坦的塔贝拉泄洪洞均出现了空蚀破坏[1]。发生空蚀破坏的主要原因是突扩跌坎体型不能适应水力条件的要求、通气不畅及施工质量差等，因此有必要通过试验来研究突扩跌坎掺气减蚀的水流特性以满足工程需要。目前，不少学者开展了这方面的研究，并已取得许多成果[1~5]，但还有很多问题尚待研究。水流经突扩跌坎射出，在下游渠道底板交汇处容易形成高压冲击点，对底板产生较强的冲击力，同时水流在渠道两侧溅起形成较高的水翅，使流态恶化。由于突扩是形成侧向水翅的根源[6]，而跌坎下游渠道底坡和底板的形态，会对水流与下游渠道底板交汇处的冲击力及水翅的高度产生显著影响，因而有必要对突扩跌坎水流进行研究，优化跌坎后渠道底坡，以获得跌坎射流的良好流态。

结合某工程排沙洞闸室后突扩跌坎的水力学模型试验，对射流水舌的运动轨迹、水舌落点、水流对底板的冲击力及坎后渠道底坡进行深入分析研究。

1 水舌下缘落点计算

如图1所示，建立坐标系，则跌坎后内缘水舌轨迹方程为：

$$Z = Z_0 - X\tan\theta_0 - \frac{1}{2}g\left(\frac{X}{V\cos\theta_0}\right)^2, \qquad (1)$$

其中，Z 为水舌轨迹高程坐标；Z_0 为闸室底板高程；θ_0 为出流的俯角；V 为跌坎出口处流速；X 为水舌轨迹水平距离坐标；g 为重力加速度。

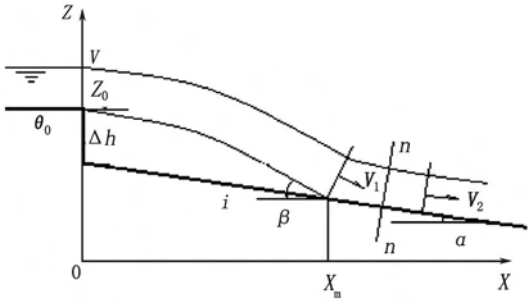


图 1 跌坎水舌示意图

Fig. 1 Sketch of water jet through an aerator

1.1 直线型底坡

若底板为一坡到底的型式，则底板的高程方程为：

$$Z_m = Z_0 - \Delta h - iX, \qquad (2)$$

其中，Δh 为跌坎高度；i 为闸后段洞身底坡。

为了求解交点坐标，令式（1）与式（2）的右边相等，有

$$Z_0 - \Delta h - iX = Z_0 - X\tan\theta_0 - \frac{1}{2}g\left(\frac{X}{V\cos\theta_0}\right)^2.$$

解之，得到水舌轨迹下缘与底板的交点坐标

$$X_m = \frac{(i-\tan\theta_0) + \sqrt{(\tan\theta_0 - i)^2 + \dfrac{2g\Delta h}{V^2\cos^2\theta_0}}}{\dfrac{g}{V^2\cos^2\theta_0}}, \qquad (3)$$

水舌轨迹线与水平线交角

$$\tan\beta = \left.\frac{dZ}{dX}\right|_{x=X_m} = \tan\theta_0 + \frac{gX_m}{V^2\cos^2\theta_0} = i + \sqrt{(\tan\theta_0 - i)^2 + \frac{2g\Delta h}{V^2\cos^2\theta_0}},$$

所以

$$\beta = \tan^{-1}\left(i + \sqrt{(\tan\theta_0 - i)^2 + \frac{2g\Delta h}{V^2\cos^2\theta_0}}\right), \qquad (4)$$

其中，β 为水舌交于底板处与水平面的夹角。底坡坡角 $\alpha = \sin^{-1} i$，因此，水流与底坡的夹角

$$\lambda = \beta - \alpha = \tan^{-1}\left(1 + \sqrt{(\tan\theta_0 - i)^2 + \frac{2g\Delta h}{V^2\cos\theta_0}}\right) - \sin^{-1} i. \qquad (5)$$

当底坡为折线型时，根据出流速度计算落点落在何段，采用该段的底坡计算，跌坎高度则以该段

延长至 $X=0$ 处的截距计算。

1.2 抛物线底坡

设抛物线方程为 $Z=kX^2$，则底板的高程方程为：

$$Z_m = Z_0 - \Delta h - kX^2, \tag{6}$$

同样，为求落点的坐标，令式（1）和式（6）的右边相等，可解出交点坐标为：

$$X_m = \frac{-\tan\theta_0 + \sqrt{\tan^2\theta_0 + 2g\Delta h\left(\frac{1}{V^2\cos^2\theta_0} - 2k\right)}}{\frac{g}{V^2\cos^2\theta_0} - 2k}, \tag{7}$$

水流与水平线交角

$$\tan\beta = \left.\frac{dZ}{dX}\right|_{x=X_m} = \tan\theta_0 + \frac{gX_m}{V^2\cos^2\theta_0}$$

$$= \tan\theta_0 + \frac{-\tan\theta_0 + \sqrt{\tan^2\theta_0 + 2g\Delta h\left(\frac{1}{V^2\cos^2\theta_0} - 2k\right)}}{1 - 2k\frac{V^2\cos^2\theta_0}{g}},$$

所以

$$\beta = \tan^{-1}\left[\frac{-k\frac{V^2\sin 2\theta_0}{g} + \sqrt{\tan^2\theta_0 + 2g\Delta h\left(\frac{1}{V^2\cos^2\theta_0} - 2k\right)}}{1 - 2k\frac{V^2\cos^2\theta_0}{g}}\right], \tag{8}$$

底板与水平线交角

$$\tan\alpha = \left.\frac{dZ_m}{dX}\right|_{x=X_m} = 2kX_m = 2k\frac{-\tan\theta_0 + \sqrt{\tan^2\theta_0 + 2g\Delta h\left(\frac{1}{V^2\cos^2\theta_0} - 2k\right)}}{\frac{g}{V^2\cos^2\theta_0} - 2k},$$

$$\alpha = \tan^{-1}\left[2k\frac{-\tan\theta_0 + \sqrt{\tan^2\theta_0 + 2g\Delta h\left(\frac{1}{V^2\cos^2\theta_0} - 2k\right)}}{\frac{g}{V^2\cos^2\theta_0} - 2k}\right],$$

水流与底坡的夹角

$$\lambda = \beta - \alpha.$$

2 落点冲击力计算

根据观察，溅水的强度与水流冲击力在法线上的分量有直接关系，为了计算其数值，可利用动量原理，即动量变化等于冲量：

$$\boldsymbol{F}\Delta t = m\Delta\boldsymbol{V} \quad \Rightarrow \quad \boldsymbol{F} = \frac{m}{\Delta t}\Delta\boldsymbol{V} = \rho Q(\beta_1\boldsymbol{V}_1 - \beta_2\boldsymbol{V}_2) = \rho A\boldsymbol{V}(\beta_1\boldsymbol{V}_1 - \beta_2\boldsymbol{V}_2),$$

式中，$\boldsymbol{F}$ 为力矢量；A 为闸室出口面积；$\boldsymbol{V}$ 为闸室出口平均流速；$\boldsymbol{V}_1$ 和 $\boldsymbol{V}_2$ 为速度矢量（如图 1 所示）；β_1，β_2 为动量修正系数，可近似取值为 1.0；$\boldsymbol{V}_1$ 与 $\boldsymbol{V}_2$ 的数值与 $\boldsymbol{V}$ 相差不大，近似取为 $\boldsymbol{V}$，Q 为流量冲击力，其在法向上的分量

$$F_n = \rho A V^2 \sin(\beta - \alpha). \tag{9}$$

式(9)还可以改写成下列形式：

$$F_n = 2\rho g A \frac{V^2}{2g}\sin(\beta-\alpha) = 2\gamma H_e A\sin(\beta-\alpha) = 2\varphi^2\gamma A\sin(\beta-\alpha), \tag{10}$$

式中，H_e 为闸室出口处的能头；φ 为排沙洞有压段的流量系数；ρ 为液体密度。

3　底坡优化

由于跌坎下游渠道底坡和底板的形态会对水流与下游渠道底板交汇处的冲击力及水翅的高度产生显著影响，因而有必要对底坡进行优化。事实上，跌坎后水舌冲击在底板上所引起的侧向水翅主要是受水流冲击力的影响，冲击力减小了，溅水强度就会减弱，水翅高度自然就会减小。至此，可采用式（10）定量计算溅水强度，对于不同的底板型式，分别计算各级流量下的溅水强度，将溅水强度分布情况进行比较，以判别何种型式底板可使溅水强度降低至最小，以此对底坡进行优化。

4　试验验证

某工程排沙洞闸室后为突扩跌坎，矩形明槽宽度由 b=3.0 m 突扩为 B=4.6 m，坎高Δh=1.2 m，坎前底板坡度 i=0. 试验在几何比尺为 λ_L=70 的正态模型上进行。试验选用 5 组流量：Q=254，238，196，176，141 m^3/s， 分别对应的库水位 Z=643.52，625.37，600.18，589.88，574.36 m. 为了进行比较，对 5 种方案的底坡进行了对比试验。

根据分析，当惯性力非常大时，（内缘）水流将沿闸底板水平出流，θ_0=0，当惯性力与重力相比不是绝对占优时，水流将受重力作用向下偏转一定的角度，因此，根据试验资料，将偏角与佛氏数建立关系，如图 2 所示。

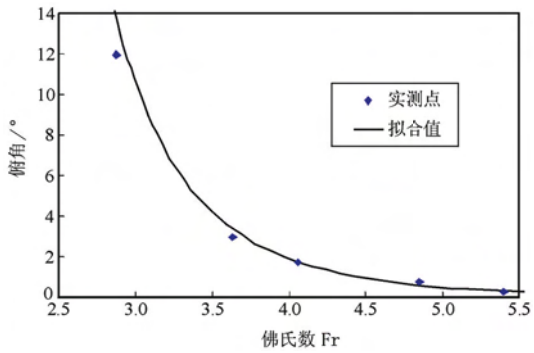


图 2　内缘水舌偏角与佛氏数的关系
Fig. 2　Relationship between angle and Froude number

图 2 中的拟合关系为：

$$\theta_0 = \left(\frac{9}{40}\mathrm{Fr}\right)^{-6}. \tag{11}$$

按式（11）计算的偏角再代入到式（1）计算的轨迹线，如图 3 所示，符合情况良好。其余 4 种底坡方案上水舌下缘的轨迹为直线型底坡、折线型底坡、平段加陡坡段型底坡（其平段长 L=8 m）和抛物线型底坡。如图 4～图 6 所示。图 7 为各方案的水流冲击力计算结果，图中出现折点是因为底板坡度变化，流速变化后水舌落砸在不同的坡段所致。

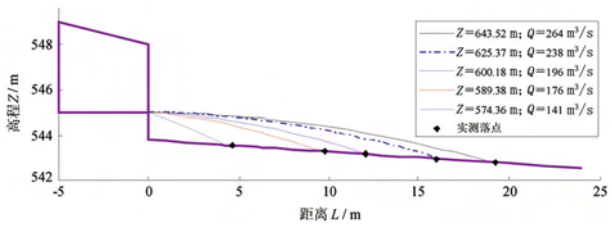


图 3　水舌轨迹计算值与实测落点的比较
Fig. 3 Comparison of experimental and computed result for water jet trajectory

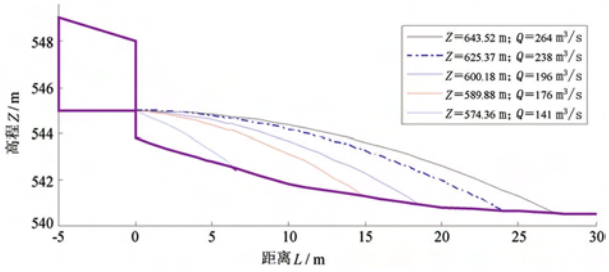


图 4　折线底板（内缘）水舌轨迹
Fig. 4 Water jet trajectory of bending bottom (inner edge)

如图 4 所示，很小的流量时，水舌落点位于跌坎后第一段，底坡最陡，交角被抵消很多，流速也

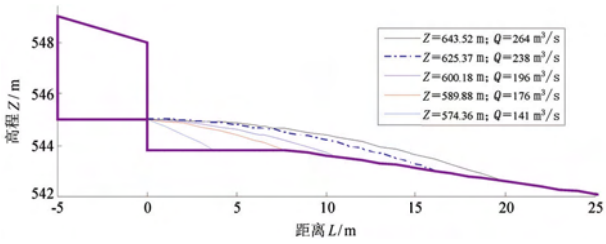


图 5 “平直－陡坡”底板（内缘）水舌轨迹
Fig. 5 Water jet trajectory of “horizontal-steep” bottom (inner edge)

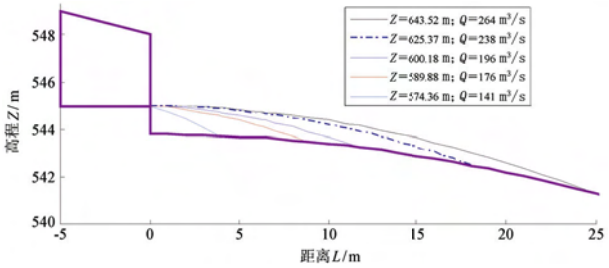


图 6 抛物线（k=0.004）底板（内缘）水舌轨迹
Fig. 6 Water jet trajectory of parabolic curve (k=0.004) bottom (inner edge)

很小，水流的法向冲击力很小；大流量时（Q>200 m³/s），落水点位于第三段，底坡较缓，而水舌与底板的交角相差不大，但流速大，速度的平方则成倍增大，按式（9）或式（10）计算的冲击力相应增大，表明溅水强度很大。

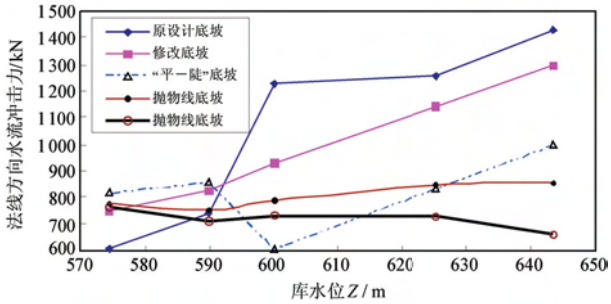


图 7 各方案冲击力计算结果
Fig. 7 Result of impulsive force of jet flow

为降低溅水强度，结合图 4 的水舌曲线进行分析，并注意到流速值的大小，基本结论是通过底板形状可以改善溅水强度，但方案 1 采用的下凹形状的底板使高流速的水舌落点更远，水舌与底板的交角更大，水流冲击力更大，未达到减轻溅水强度的效果。此方案在大流量时水舌落点冲击底板在渠道两侧所形成的水翅高度很大。因而应采用“上凸”形状的底板，即先缓后陡的形状，如图 5 所示，明显减小了大流速水舌与底板的交角，改善了溅水的影响。在 x=L 处底板存在转折，考虑到高流速水舌越过了该点，只有低流速（V<20 m/s）才落砸在折点之前并流经该点，不会产生显著的水流脱壁而出现较大的负压，水流空化数较大，且水流的侧空腔和底空腔将充分掺气，掺气浓度很高（由于比尺不是足够大，模型上未反映掺气的情况），可以起到掺气减蚀的作用。

经过深入分析，采用抛物线形状底板，其水舌落点将进一步缩短，高流速水舌与底板的交角更小，水流冲击力更弱，如图 5、图 6 所示。图 5 的抛物线形状底板上凸得太过，使水舌落点上移，挑距变短，水舌下的空腔体积减小，不利于水流充分掺气。如图 6 所示的底板型式则比较好，为 5 个方案中最佳。

从各方案水流冲击力计算结果（如图 7 所示）看，方案 1 的冲击力最大，方案 5 的冲击力最小。在试验的最大流量时，前者的最大冲击力约为后者的 2 倍。对于优化后的底坡，由于水流冲击力减小，溅水强度减弱，水翅的高度随之减小。此结论在试验中得到了验证。

在设计水位下观测了排沙洞闸室出口段的水面线，如图 8 所示，其中底缘水面线与计算值相当吻合，如图 9 所示。测量了水面高程线和溅水情况，溅水最大高度约 1.4 m，加上该处水深 1.9 m，溅水最高处距底板 3.3 m.



图 8 设计工况排沙洞闸室出口段水面线
Fig. 8 Water surface at the outlet section of lock chamber for desilting tunnel under the design condition

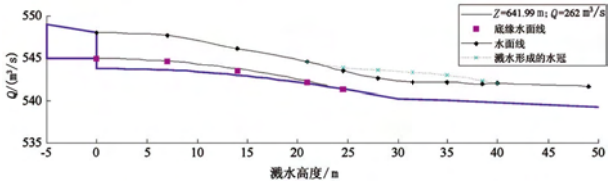


图 9 排沙洞闸室出口段溅水情况
Fig. 9 Flow status at the outlet section of lock chamber for desilting tunnel

5 结论

1）推导的突扩跌坎水舌落点的计算方法经试验验证具有较高精度；

2）水舌与下游底板交汇处水流的冲击力与底板的坡度及底板型式密切相关，上凹型底板受水流的冲击力大于上凸型底板；

3）坎后的底板型式：曲线型上凸型底板优于折线型上凸型底板，但上凸程度不宜太大，以免减小水舌挑距，影响水流掺气；

4）通过优化坎后底板型式，降低水流冲击力，减弱溅水强度，从而可极大地削弱水翅。

[参考文献] (References)

[1] 肖兴斌，王才欢，王业红. 弧形闸门突扩跌坎式通气减蚀研究进展综述[J]. 长江科学院院报，2000，17（5）：31～34.
XIAO X B，WANG C H，WANG Y H. Review on study of aerators with sudden lateral enlargement and bottom drop at taintor gate region[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute，2000，17(5)：31～34.（in Chinese）

[2] 聂孟喜，吴广镐. 侧向折流器对侧空腔和底空腔掺气参数的影响[J]. 清华大学学报（自然科学版），2003，43(8)：1116～1119.
NIE M X，WU G H. Effect of lateral deflector on aeration in the bottom and lateral cavities of flows over spillways[J]. Journal of Tsinghua University (Natural Science)，2003，43(8)：1116～1119.（in Chinese）

[3] 肖兴斌. 泄洪深孔掺气减蚀研究[J]. 水电站设计，2003，19（2）：85～89.
XIAO X B. Study on aeration of low level flood discharging outlets for alleviating cavitation[J]. Design of Hydroelectric Power Station，2003，19(2)：85～89.（in Chinese）

[4] 朱荣林. 突扩跌坎式通气设施的若干问题[A]. 中国水利科学研究院科学研究论文集（第 21 集)[C]. 北京：水利电力出版社，1986.
ZHU R L. Some problems of aerators with sudden lateral enlargement and bottem drop[A]. Collected papers of China Iustitute of Water Resources and Hydropower research (the 21th)[C]. Beijing：Hydraulic Power Press，1986.（in Chinese）

[5] 长江水利委员会设计院枢纽处. 三峡工程泄洪深孔突扩突跌式掺气设施研究成果[R]. 武汉：长江水利委员会设计院，No. 16，1996.
Yangtze River Hydro-conservancy Committee Design Project. Research on aerator with sudden enlargement and sudden drop device in deep flood discharging orifices of Three Gorges Project[R]. Wuhan：Yangtze River Hydro-Conservancy Committee，No. 16，1996.（in Chinese）

[6] 时启燧. 掺气减蚀设施的研究与应用[R]. 北京：水利水电科学研究院，1994
SHI Q S. Research and application of aerated facilities[R]. Beijing：Water Conservancy and Hydropower Science Institute，1994.（in Chinese）