

高拱坝深孔窄缝挑坎水舌空中运动特性及抛距计算

周茂林¹ 李乃稳^{1,2*} 王斌²

(四川大学水力学与山区河流开发保护国家重点实验室¹, 水利水电学院², 成都 610065)

摘要 窄缝挑坎应用于高拱坝深孔后,其出射水流内外缘抛距是确定拱坝下游消能水垫塘长度的重要依据。结合窄缝挑坎应用于高拱坝深孔后的水舌空中运动特性,依据几何相似原理和自由抛射体运动原理,建立了其内外缘抛距的计算方法,计算结果同模型试验结果吻合良好。

关键词 水力学 高拱坝 窄缝挑坎 水舌抛距

中图法分类号 TV131.4; **文献标志码** A

窄缝挑坎是收缩式消能工的一种,一般应用于泄洪洞或溢洪道的末端,而应用在高拱坝坝身泄洪中孔或深孔的工程和研究不多,国内只有乌江东风水电站双曲拱坝坝身中孔(坝高 162 m)^[1],对于坝高 200 m 以上的高拱坝则较少,李乃稳,许唯临等^[2]在锦屏一级水电站(坝高 305 m)整体模型上将窄缝挑坎应用于深孔并结合表孔宽尾墩,实现了高拱坝表深孔水流空中无碰撞消能的目的。

目前,高拱坝泄洪消能多采用坝身孔口挑跌流和下游水垫塘相结合的形式,水垫塘的长度则由拱坝坝身孔口水舌内外缘抛距决定。窄缝挑坎应用于高拱坝坝身深孔,为不影响深孔弧形工作闸门的运行,应布置在闸门门槽之后并尽量靠近出口末端,其射流水舌受侧墙横向缩窄的影响而形成竖向及纵向扩散的窄长水流,内外缘挑角不同于挑坎挑角,其水舌内外缘抛距无法按照常规挑坎的水舌抛距公式进行计算^[3-5]。因此,对于窄缝挑坎应用于高拱坝坝身泄洪深孔,建立其水舌抛距计算方法,

对于窄缝挑坎在高拱坝深孔上的应用和下游消能水垫塘设计是非常有必要的。

本文在充分研究高拱坝深孔窄缝挑坎出射水舌空中运动特性的基础上,根据几何相似原理,同时结合自由抛体空中运动原理,建立了高拱坝深孔窄缝挑坎水舌内外缘出射角和内外缘抛距的计算方法,并同模型试验值进行了比较。

1 水舌空中运动特性

窄缝挑坎应用于高拱坝泄洪深孔后其射流水舌的重要特点是竖向及纵向扩散显著,空中呈窄而高且长的水流流态,出射水舌内外缘挑角不同于常规挑坎水舌内外缘出射角,水舌内外缘体抛距差别较大。

当急流经过窄缝挑坎时,水流受收缩边墙的影响形成急流冲击波,从而使收缩段中水面线急剧上升,流线倾角将不同于常规挑坎而沿垂线发生急剧变化,越接近表面,流线与水平方向夹角越大,这样当水体流出收缩段后,不同水深的水流质点将以不同的运动方向射向下游,从而形成空间纵向扩散水舌。

忽略空气阻力、掺气、破碎等影响,将水舌视为

2010年4月8日收到

第一作者简介:周茂林(1979—),男,四川成都人,硕士。研究方向:工程水力学。

* 通讯作者简介:李乃稳。Email:gxqlnw@yahoo.com.cn。

连续介质,任一水质点的空中运动均可看作是具有一定初速度和出射角的自由抛射运动。窄缝挑坎出口断面的缩窄,出射水舌流速方向沿垂向变化较大,因而水舌出射后受惯性作用沿不同方向运动,其运动状态如图1所示。根据质点抛射理论,沿不同方向运动的水流质点其水平抛射距离在某一出射角运动时最大,定义此水流出射角为最大抛距的出射角 φ_m 。对于出射角大于 φ_m 的水流质点在上升到最高点时会较快跌落下来(如图1中虚线所示),这部分水体在跌落下来时受到其底部水体的顶托而附着于底部水体外缘并随底部水体向下游运动;只有出射角小于 φ_m 的水流质点才会做自由抛射运动,按 φ_m 运动的水流质点与水舌内缘的水流质点的最大水平抛射距之间的差值,即为水舌的纵向扩散距离。

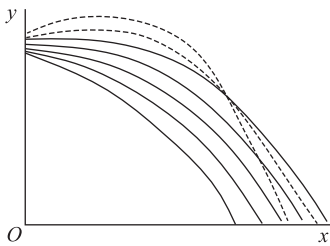


图1 水舌空中运动示意图

2 水舌抛距计算公式

忽略空气阻力、掺气、破碎等影响,将水舌视为连续介质,根据质点自由抛射体理论可得如下水流质点运动轨迹计算公式^[6]。

$$\varphi > 0: L = \frac{v^2 \cos\varphi \sin\varphi}{g} \left(1 + \sqrt{1 + \frac{2gH}{v^2 \sin^2\varphi}} \right) \quad (1)$$

$$\varphi < 0: L = \frac{v^2 \cos\varphi \sin\varphi}{g} \left(-1 + \sqrt{1 + \frac{2gH}{v^2 \sin^2\varphi}} \right) \quad (2)$$

$$\varphi = 0: L = v \sqrt{\frac{2H}{g}} \quad (3)$$

式中: L 为水质点从射流出口断面到下游水垫塘水面的水平距离,m; H 为水质点从射流出口断面到下

游水垫塘水面的垂直距离/m,对于水舌外缘跳距计算: $H = h_c + Z, L = L_1$;水舌内缘跳距计算: $H = Z, L = L_2$; g 为重力加速度, 9.81 m/s^2 ; φ 为水质点的初速度与水平面的夹角。

由式(1)~式(3)可以看出,只要确定了 v 和 φ 的大小,即可准确计算高拱坝深孔窄缝挑坎出射水舌的空中运动轨迹和水平抛距,因此问题的关键在于如何确定水舌运动初速度 v 和水舌出射角 φ 。

3 出口流速 V

据有关文献[1,6],窄缝挑坎应用于高拱坝泄洪深孔时,其出口处的水流速度大小变化不大,而流速方向变化较大,因此在窄缝挑坎水舌抛距计算中可以用深孔出口断面平均流速代替水流质点流速。

根据连续方程,窄缝挑坎出口流速 V 采用式(4)计算。

$$V = \frac{Q}{bh} \quad (4)$$

式(4)中: b 为深孔出口挑坎处的宽度,m; h 为深孔出口的高度,m。

4 水舌出射角 φ

4.1 水舌内外缘出射角计算

基本假设:窄缝收缩式消能工应用于高拱坝深孔后其运行水头较高,出射水舌流速较高(在30米以上),并且在窄缝挑坎收缩段内运动距离较短,忽略重力对其运动轨迹的影响。

已知条件:

(1)深孔体型参数:深孔宽 b 、高 h ,压坡段曲线,压坡角 θ_1 、出口挑角 θ_2 ;

(2)窄缝收缩段体型参数:收缩比 β 、收缩段长度 L 。

以深孔进口直线段起点为 $(0,0)$ 点,建立坐标系(图1),1、2点坐标分别标为 $(x_1, y_1), (x_2, y_2)$,3、4点坐标分别标为 $(x_3, y_3), (x_4, y_4)$,5、6点坐标分别标为 $(x_5, y_5), (x_6, y_6)$ 。

水舌进入窄缝收缩段之前,受深孔出口体型和

惯性作用影响,其上缘沿压坡角 θ_1 方向运动,下缘沿挑坎挑角 θ_2 方向运动,在 A、B 点进入收缩段后受流到缩窄的影响,其水舌在竖向扩散,在 C、D 点流出收缩段后在空中向下游水垫塘运动,水舌内外缘出射角发生明显变化。

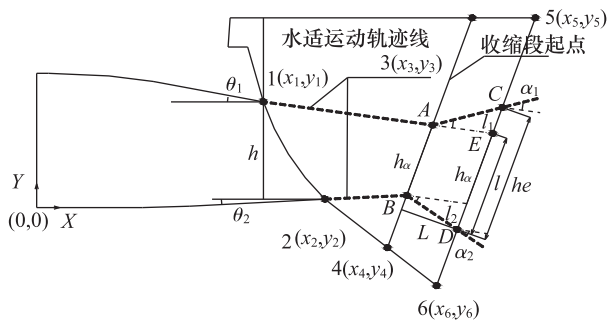


图2 出射水舌在窄缝收缩段的流动示意图

水舌进入窄缝收缩段前,其轨迹线为过 1、2 点的直线,方程为:

$$1-A \text{ 点直线方程: } y = \tan\theta_1 \cdot x + y_1 - x_1 \tan\theta_1 \quad (5)$$

$$2-B \text{ 点直线方程: } y = \tan\theta_2 \cdot x + y_2 - x_2 \tan\theta_2 \quad (6)$$

窄缝挑坎收缩端面线(3、4 点)起点,即 3-4 直线方程为:

$$y = \left(\frac{y_3 - y_4}{x_3 - x_4} \right) \cdot x + y_4 - \left(\frac{y_3 - y_4}{x_3 - x_4} \right) x_4 \quad (7)$$

令 $k = \frac{y_3 - y_4}{x_3 - x_4}$, 式(7)为:

$$y = kx + y_4 - kx_4 \quad (8)$$

联立上述方程,得出水舌进入窄缝挑坎收缩段起点 A、B 点坐标。

$$A \text{ 点坐标: } x_A = \frac{y_1 + kx_4 - y_4 - x_1 \tan\theta_1}{k - \tan\theta_1} \quad (9)$$

$$y_A = \frac{\tan\theta_1 (y_1 + kx_4 - y_4 - x_1 \tan\theta_1)}{k - \tan\theta_1} + y_1 - x_1 \tan\theta_1 \quad (10)$$

$$\text{同理, B 点坐标: } x_B = \frac{y_2 + kx_4 - y_4 - x_2 \tan\theta_2}{k - \tan\theta_2} \quad (11)$$

$$y_B = \frac{\tan\theta_2 (y_2 + kx_4 - y_4 - x_2 \tan\theta_2)}{k - \tan\theta_2} + y_2 - x_2 \tan\theta_2 \quad (12)$$

A、B 点之间的长度即为水舌进入窄缝收缩段起始断面的高度 h_a , 则:

$$h_a = |AB| = \sqrt{(x_A - x_B)^2 + (y_A - y_B)^2} \quad (13)$$

窄缝挑坎收缩段起点宽度为 B, 出口宽度为 b, 则: $S_A = h_a \cdot B$ 。

b 为深孔出口处的宽度, 有: $B = b + 2b'$ (b' 为深孔弧形闸门槽的点宽度, 一般为 0.5 m)

忽略水流在窄缝挑坎收缩段内的局部水头损失, 则有:

$$v_A = v_e = V \quad (14)$$

窄缝挑坎出口处水流断面为 S_e , 则存在: $S_e = S_A$, 又因为: $S_e = h_e \cdot B'$, 式中: $B' = \beta \cdot B$, 故窄缝出口处水深 h_e :

$$h_e = \frac{S_e}{B'} = \frac{h_a B}{\beta B} = \frac{h_a}{\beta} \quad (15)$$

水舌在高速流经窄缝挑坎收缩段时受流道横向缩窄的作用, 如忽略重力的影响, 则水舌受侧墙横向挤压而均匀沿竖向扩散, 存在 $l_1 = l_2$ 。水舌在 C、D 两点流出窄缝挑坎。如图 2 所示, 只要求出 C、D 两点坐标, 则直线 AC、BD 的斜率即分别为水舌外缘和内缘出射角, 根据几何关系, 则有:

$$l_1 = l_2 = \frac{h_e - h_a}{2} \quad (16)$$

$$C, E \text{ 点间的间距: } l_1 = \frac{h_e - h_a}{2} \quad (17)$$

$$E, D \text{ 点间的间距: } l = l_2 + h_a = \frac{h_e + h_a}{2} \quad (18)$$

窄缝挑坎出口断面线与收缩段起始断面线平行, 则其直线方程为:

$$y = kx + y_5 - kx_5 \quad (19)$$

AE 为 1-A 直线的延长线, 则联立方程, E 点坐标为:

$$x_E = \frac{y_1 + kx_5 - y_5 - x_1 \tan\theta_1}{k - \tan\theta_1} \quad (20)$$

$$y_E = \frac{\tan\theta_1 (y_1 + kx_5 - y_5 - x_1 \tan\theta_1)}{k - \tan\theta_1} + y_1 - x_1 \tan\theta_1 \quad (21)$$

显然已知 E 点坐标、CE 间距离和过 CE 的直线方程,则可根据如下公式联立方程求 C 点 (x_C, y_C) 的坐标:

$$l_1 = |CE| = \sqrt{(x_C - x_E)^2 + (y_C - y_E)^2} \quad (22)$$

$$y_E = kx_E + y_5 - kx_5 \quad (23)$$

同理可以求得 D 点坐标 (x_D, y_D) 。

则,水舌外缘出射角 φ_1 :

$$\varphi_1 = \tan^{-1} \left(\frac{y_A - y_C}{x_A - x_C} \right) \quad (24)$$

水舌内缘出射角 φ_2 :

$$\varphi_2 = \tan^{-1} \left(\frac{y_B - y_D}{x_B - x_D} \right) \quad (25)$$

4.2 抛距最大质点出射角 φ_m

根据自由抛体运动方程,有如下关系式:

$$\frac{g}{2v^2} L^2 + L \sin \varphi \cos \varphi - H \cos^2 \varphi = 0 \quad (26)$$

式中 H 为水质点到下游水垫塘水面的垂直距离, m; 在 v, H 一定的情况下, 对式(26)两端对 θ 求导, 并令 $\frac{dL}{d\theta} = 0$, 得抛距最大的水质点的出射角

φ_m [6]:

$$\varphi_m = \sin^{-1} \frac{1}{\sqrt{2 + \frac{2gH}{v^2}}} \quad (27)$$

对于水舌出射角大于 φ_m 的质点, 当上升到最高位置后会较快跌落下来, 在水舌主体顶托作用下下落, 只有出射角等于 φ_m 的质点, 能够挑射的最远。

由式(18)计算水舌外缘出射角 φ_1 , 并判断与 φ_m 的关系, 如大于 φ_m , 则取 φ_m 为最远抛距计算水舌外缘出射角, 如小于 φ_m , 则直接取 φ_1 为最远抛距计算水舌外缘出射角。

求得水舌内外缘出射角 φ_1 、 φ_2 和水流速度 V 后, 即可根据公式(1)~(3)计算窄缝挑坎水舌空中运动轨迹和内外缘抛距。

针对不同体型参数的窄缝挑坎, 在相同来流条件下计算了其内外缘抛距, 其值列入表 1。同时, 为了检验本计算方法的正确性, 在锦屏一级水电站整体水工模型(比尺为 1:100)上进行了模型试验, 测量了深孔窄缝出射水舌内外缘抛距, 也一并列入表 1 中。

表 1 窄缝挑坎水舌抛距计算及试验

体型	$Q/(m^3 \cdot s^{-1})$	$V_c/(m \cdot s^{-1})$	$\varphi_1/^\circ$	$\varphi_m/^\circ$	$\varphi_2/^\circ$	L_1/m			L_2/m			H/m
						计算	试验	误差/%	计算	试验	误差/%	
$\beta=0.3$ $L=3.0$ m	1 256.9	41.90	23.13	31.49	-73.99	286.44	277.10	3.37	31.94	34.90	-8.48	148.96
	1 234.3	41.14	23.13	31.20	-73.99	279.76	264.00	5.97	31.72	32.10	-1.18	148.96
	1 175.8	39.18	23.13	30.41	-73.99	262.80	250.00	5.12	31.06	29.90	3.88	148.96
$\beta=0.45$ $L=3.0$ m	1 263.14	42.10	12.36	31.57	-45.80	270.73	270.00	0.27	94.94	83.00	14.39	148.96
	1 197.75	39.93	12.36	30.71	-45.80	254.64	264.00	-3.55	92.36	87.00	6.16	148.96
	1 166.66	38.89	12.36	29.71	-45.80	247.01	253.00	-2.37	89.34	84.00	6.36	148.96
$\beta=0.60$ $L=3.0$ m	1 254.85	41.83	4.06	31.46	-28.73	245.62	250.00	-1.75	140.49	134.00	4.84	148.96
	1 220.00	40.67	4.06	31.01	-28.73	238.45	243.00	-1.87	137.92	132.00	4.48	148.96
	1 171.77	39.06	4.06	30.35	-28.73	228.53	227.00	0.67	134.26	131.00	2.49	148.96

由表 1 可见, 模型试验值与计算结果相比较, 二则吻合较好, 可知本文提出的计算方法是可行的, 可以获得较为准确的计算结果, 可作为窄缝挑坎应用于高拱坝深孔时下游消能水垫塘的设计计算依据。

5 结语

(1) 本文运用自由体抛射运动原理, 采用几何相似方法, 提出了窄缝挑坎应用于高拱坝深孔后其

水舌内外缘出射角及抛距的计算方法。

(2)利用本计算方法计算的高拱坝深孔窄缝挑坎水舌内外缘抛距与模型试验值吻合良好,说明本文所提出的深孔窄缝挑坎水舌空中运动轨迹及内外缘抛距计算方法是可行的,可用于窄缝挑坎应用于高拱坝深孔时的设计计算。

参 考 文 献

1 章 鹏,梁 英,苏 勇. 窄缝消能工在高薄拱坝坝身中孔上的应用. 水力发电,2000;26(2):46—49

- 2 李乃稳,许唯临,周茂林,等. 高拱坝坝身表孔和深孔水流无碰撞泄洪消能试验研究. 水利学报,2008;39(8):58—65
- 3 夏毓常. 溢流坝鼻坎挑流水舌抛距的计算. 水利水电科学研究,1980;(1):45—52
- 4 宁利中. 挑流水舌抛距及其影响因素概述. 水资源与水工程学报,2004;15(3):36—39
- 5 陈革墙,江忠勤. 关于鼻坎挑流水舌抛距的分析. 浙江水利水电专科学校学报,1999;(2):1—3
- 6 李乃稳. 高拱坝收缩式表深孔无碰撞泄洪消能方式研究. 成都:四川大学博士学位论文,2008

The Hydrodynamic Characteristics and Calculation of the Nappe Trajectory Distance from Orifice with Slit-type Bucket in a High-arch Dam

ZHOU Mao-lin¹, LI Nai-wen^{1,2}, WANG Bin²

(State Key Lab of Hydraulics and Mountain River Eng¹, College of Hydraulic & Hydroelectric Engineering², Sichuan University, Chengdu 610065, P. R. China)

[Abstract] When the slit-type buckets are applied to the orifices in a high-arch dam, the nappes trajectory distance is basic to the design of the plunge pool. The hydrodynamic characteristics of nappes from orifices with slit-type buckets in a high-arch dam are studied. And based on the geometric similarity and law of free falling body movement, the method of nappes trajectory distance calculation is put forward. The results are in good agreement with those of model test.

[Key words] hydraulics high arch dam slit-type nappe trajectory distance

(上接第 4414 页)

Design and Implementation of the Data ECC in High Speed and Large Capacity Solid State Storage System Based on FPGA

HUA Bin^{1,2}, HUANG Jie-wen^{1,2}, ZHOU Zhang-lun^{1,2}, SUN Jian-tao^{1,2}, ZHANG Ping¹

(Institute of Electronics Chinese Academy of Sciences¹, Beijing 100190, P. R. China;
Graduate School of Chinese Academy of Sciences², Beijing 100049, P. R. China)

[Abstract] Solid state recorder (SSR) is currently regarded as the most reliable form of data storage medium, but within its life time, single bit error may develop with SSR. To solve this problem, a dedicated error correction method for high-speed and large-capacity solid state storage system based on FPGA is designed. Through comparing the ECC stored in the flash block during the write operation with the ECC calculated by the current read operation, an ECC error is detected and the data is corrected with a correcting capability up to 1 bit/512 B. Simple electrical system and strong correcting capability are achieved by using this method. Experimental results show that the design completely fulfils the need of high-speed data recording and ensure the reliability of the large-capacity SSR.

[Key words] solid state recorder FPGA FLASH ECC