

基于出射流速的反弧鼻坎挑距计算

李书芳¹, 吴建华², 马飞²

(1. 河北工程大学水利水电学院, 河北 邯郸 056038; 2. 河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 为了提高挑距计算精度及进一步补充和完善挑距理论计算方法, 从出射流速的角度提出水舌上、下缘挑距的计算方法。该方法基于反弧鼻坎上流线同心圆假设, 同时考虑反弧段离心力压强和静水压强, 推导了鼻坎反弧段势流流速分布函数, 利用出坎断面流速分布函数, 得到水舌上、下缘出射流速的理论计算式, 从而实现水舌上、下缘挑距的计算。采用模型试验和原型观测资料对计算方法进行了验证, 结果表明, 在相对出坎水深为 0.15~0.25 范围内, 该方法对水舌上、下缘挑距均有较好的计算精度。

关键词: 挑距; 挑流消能; 反弧鼻坎; 流速分布; 出射流速

中图分类号: TV653⁺.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-7647(2020)02-0058-05

Calculation of jet trajectory distance of flip bucket based on takeoff velocity//LI Shufang¹, WU Jianhua², MA Fei²
(1. College of Water Conservancy and Hydroelectric Engineering, Hebei University of Engineering, Handan 056038, China;
2. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: To improve the precision and to further complement and perfect the calculation theories for jet trajectory distance, a calculation method for the upper and lower jet trajectory distances in the perspective of the takeoff velocity was proposed. Based on the concentric circle assumption of the streamline on the flip bucket with the consideration of the centrifugal force and the hydrostatic pressure, the potential flow velocity distribution function was derived. Theoretical calculation formulas for the velocity of the upper and lower trajectory were obtained from the takeoff velocity distribution and then the jet trajectory distance calculation was realized. The calculation method was verified by both model tests and prototype observation datum, showing a reasonable accuracy for the upper and lower trajectory distance when the relative takeoff water depth is between 0.15 and 0.25.

Key words: jet trajectory distance; ski-jump energy dissipation; flip bucket; velocity distribution; takeoff velocity

在水利水电工程建设中, 尤其高拱坝建设中, 挑流消能因其经济可靠、结构简单, 被工程中广泛采用^[1-2]。其中水舌挑距是影响水垫塘设计及岸坡安全性的关键技术指标, 在高坝建设的推动下, 国内外学者在挑距研究方面取得了丰硕的成果。通常根据质点运动的抛射体理论计算水舌挑距^[3]。当鼻坎结构选定, 挑距的影响因素有出射角^[4-8]、出射流速^[9-10]、空气阻力^[11-12]、水舌掺气^[13-14]、环境气压^[15]等。由于水流受到反弧曲率的影响, 水舌实际出射角并不完全等于鼻坎挑角, 但是对高速水流情况下的反弧鼻坎, 水舌出射角可近似用鼻坎挑角代替^[16]。空气阻力和水舌掺气也是影响挑距的重要

因素, 当流速小于 13 m/s 时, 水舌轨迹线为抛物线, 但当流速大于 40 m/s 时, 理论挑距比实测挑距减小 30% 以上^[9]。同时, 由于水舌挑射过程中分散掺气, 水流运动轨迹与质点抛射体轨迹发生偏离。因此, 刘宣烈等^[11]提出了考虑空气阻力影响的水舌水平挑距计算式; 刘士和等^[13]在平面充分掺气散裂射流的数学模型的基础上, 提出了考虑掺气及空气阻力影响的水舌挑距计算式。最近研究表明, 环境气压也对水舌挑距产生影响, 环境气压越低, 挑距越远, 环境气压每下降 10 kPa, 挑距增大 1.5%^[15]。当水舌出射角用鼻坎挑角代替, 且不考虑空气、掺气和气压的影响时, 挑距的主要影响因素为出射流速。

基金项目: 国家自然科学基金(51579076); 河北省自然科学基金(E2019402102)

作者简介: 李书芳(1981—), 女, 讲师, 博士, 主要从事水工水力学研究。E-mail: shuili_1981@126.com

通信作者: 马飞(1973—), 男, 副教授, 博士, 主要从事水工水力学研究。E-mail: mafei921@163.com

在 DL/T 5166—2002《溢洪道设计规范》中,出射流速可按断面平均流速的 1.1 倍计。当泄槽较长时,可按水面线推算坎顶水深,进而求出断面平均流速,或者取流速系数,根据能量方程计算出射流速^[16-17]。孙红娟等^[18]结合实测挑距由抛物线公式反推得到出射流速的经验式,但由于实测挑距受前述诸因素影响,所得出射流速并非实际意义上的流速。

水舌上、下缘挑距范围决定了水垫塘的位置和尺寸,对于连续鼻坎,在高速水流情况下,水舌上、下缘出射角相差较小,可用鼻坎挑角代替,则影响挑距的主要因素为上、下缘出射流速的差异。尽管目前关于水舌挑距的研究已经相对成熟,但直接从水舌上、下缘出射流速的角度着手研究的尚不多见。本文通过理论分析,结合前人研究成果,从势流理论出发,探讨水舌上、下缘出射流速的计算方法,进而对反弧鼻坎水舌上、下缘挑距进行计算。

1 模型试验

模型试验在河海大学高速水流实验室进行,以某工程泄洪中孔为例,仅研究水平来流情况。试验布置平面图和实物照片分别如图 1 和图 2 所示。试验系统包括水泵、进水管、平水塔、试验水箱、试验模型、量水堰和回水渠等。试验模型主体由有机玻璃制作,采用短有压进口,由进口段、有压段、明流渠段和鼻坎段组成。有压段出口设弧形闸门以控制来流水深,通过调整上游水位控制单宽流量。渠道底坡为 0,鼻坎出口底板距下游底板高约 65 cm,鼻坎反弧半径 $R=50\text{ cm}$,挑角 $\beta=45^\circ$ 。试验单宽流量 q 如表 1 和表 2 所示。

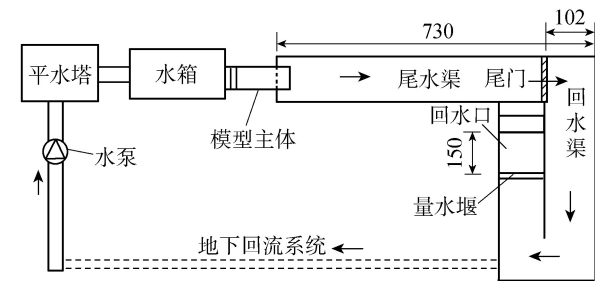


图 1 试验装置整体布置平面示意图(单位:cm)



图 2 模型试验照片

2 反弧段流速分布

如图 3 所示,任取反弧段某断面建立正交坐标系,法线方向为 y ,切向方向为 x ,坐标原点 O 位于底板。在鼻坎反弧段,由于重力和离心力的共同作用,势流流速沿曲面方向(即 x 方向)和垂直于曲面的方向(即 y 方向)都有变化。研究反弧段任意断面流速沿水深方向的分布形式,在反弧段势流区任取一距壁面为 y' 的微元体为研究对象,假设沿微元体所在断面任一点的总能量保持不变,则有^[19]:

$$\frac{p}{\rho g} + y' \cos \theta + \frac{u^2}{2g} = H \quad (1)$$

式中: u 为反弧段势流流速; H 为反弧段任意断面以底板为基准的位置总水头; p 为微元体动水压强; ρ 为水的密度; g 为重力加速度; θ 为微元体所在断面与铅直方向的夹角,如图 3 所示。将式(1)对 y' 求导,忽略沿水深方向流层之间的能量损失,即 $\partial H/\partial y' = 0$,则有:

$$\frac{\partial p}{\partial y'} + \rho g \cos \theta + \rho u \frac{\partial u}{\partial y'} = 0 \quad (2)$$

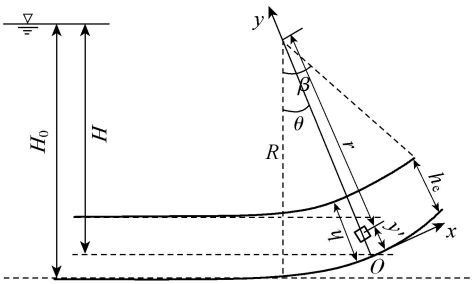


图 3 反弧段水流示意图

反弧段任一微元体的动水压强 p 由静水压强和离心力压强两部分组成,则 p 可用下式计算^[20]:

$$p = \rho g(h - y') \cos \theta + \frac{\rho(h - y')^2 u^2}{r} \quad (3)$$

式中: h 为反弧断水深; r 为微元体曲率半径,基于同心圆假设,有 $r=R-y'$ 。将式(3)对 y' 求导后代入式(2),整理得到:

$$\frac{\partial u}{\partial y'} = \frac{u}{R - y'} \frac{R - h}{2h + R - 3y'} \quad (4)$$

将式(4)移项、变形并积分,则有:

$$\ln u = \frac{1}{2} \ln \left(3 \left| \frac{y' - R}{3y' - R - 2h} \right| \right) + C_0 \quad (5)$$

式中: C_0 为积分系数。

当 $y' = 0$ 时,流速 u 等于壁面势流流速 u_w ,即 $u = u_w$,将其代入式(5)得出 C_0 为

$$C_0 = \ln \left(\frac{u_w}{\sqrt{R/(2h + R)}} \right) \quad (6)$$

将式(6)代入式(5),在同心圆假设下有 $y' < h < R$,整

理得到:

$$u = u_w \sqrt{\frac{(R - y')(R + 2h)}{R(R - 3y' + 2h)}} \quad (7)$$

式(7)即为本文得到的反弧段势流流速分布形式,其推导过程中,同时考虑了静水压强和离心力压强的影响。

3 水舌上、下缘出射流速

如图3所示,设出坎断面水深为 h_e ,对反弧鼻坎,假设出坎水流沿 h_e 均匀分布,则沿 h_e 积分可得到单宽流量 q :

$$\int_0^{h_e} u dy' = q \quad (8)$$

当 $y' = 0$ 时, $u = u_w$;当 $y' = h_e$ 时, $u = u_a$,其中 u_a 为出坎断面的表面势流流速。为便于说明,设水舌上、下缘出射流速分别为 v_1 和 v_2 ,并取 $v_1 = u_a, v_2 = u_w$,则有 $y' = 0$ 时, $v_1 = u_a$; $y' = h_e$ 时, $v_2 = u_w$ 。

在对式(8)积分时,需要用到出口断面水深 h_e 。工程中出坎断面水深通常不易测量,本文为方便计算,取出口断面水深 h_e 近似等于反弧底部水深,根据辛玉传^[21]得到的反弧底部水深经验公式计算

$$\frac{h_e}{R} = 0.016 + 1.15 \left(\frac{q}{R\sqrt{gH_0}} \right)^{1.25} \quad (9)$$

式中: H_0 为以反弧最低点为基准的上游水头; h_e/R 为相对出坎水深。

将式(7)代入式(8),利用柯特斯积分公式积分得到:

$$v_1 = v_2 \sqrt{1 + \frac{2h_e}{R}} \quad (10)$$

$$v_2 = \frac{q}{C_1} \quad (11)$$

其中 $C_1 = \frac{h_e}{90} \sqrt{1 + \frac{2h_e}{R}} \left(7 \sqrt{\frac{R}{R+2h_e}} + 32 \sqrt{\frac{4R-h_e}{4R+5h_e}} + 12 \sqrt{\frac{2R-h_e}{2R+h_e}} + 32 \sqrt{\frac{4R-3h_e}{4R-h_e}} + 7 \right)$

式(10)和(11)分别为水舌上、下缘出射流速计算式。

4 挑距计算

4.1 计算方法

以鼻坎出口底板位置为原点,利用抛物线公式计算挑距:

$$L_j = x_{oj} + \frac{v_j^2 \sin(2\alpha_j)}{2g} \left[1 + \sqrt{1 + \frac{2g(d + y'_{oj})}{v_j^2 \sin^2 \alpha_j}} \right] \quad (12)$$

式中: L_j 为挑距; d 为鼻坎出口位置距下游水舌落点(或冲坑最深点)的高差; α_j 为水舌出射角; (x_{oj}, y'_{oj}) 为水舌起始点坐标;下标 $j=1,2$ 分别表示水舌上缘和下缘物理量。

挑距计算步骤如下:①取水舌上、下缘出射角 α_1 和 α_2 均近似等于鼻坎挑角;②利用式(9)计算出坎断面水深 h_e ;③利用式(10)和(11)分别计算水舌上、下缘出射流速;④利用式(12)计算水舌上、下缘挑距,对水舌上缘有 $x_{o1} = -h_e \cos \alpha_1, y'_{o1} = h_e \cos \alpha_1$,对下缘有 $x_{o2} = 0, y'_{o2} = 0$;⑤将计算结果与实测资料进行对比。

4.2 计算结果验证

利用实测挑距资料对水舌上、下缘挑距的计算结果进行了验证。对水舌上缘挑距,验证资料除了采用本文物理模型试验资料外,还采用了文献[22]中的原型观测资料,原型资料包括国内双牌、东马庄、水府庙、恒仁、上犹江、柘溪、丰满7个工程实测挑流鼻坎末端至下游水面或冲坑最深点的水平射距^[22]。计算结果如表1所示,表中 $L_{1测}$ 为通过模型试验或原型观测获得的上缘挑距, $L_{1计}$ 为本文方法计算所得水舌上缘挑距。此外,还将本文方法与规范建议的出射流速取1.1倍断面平均流速计算所得挑距 L'_1 进行了对比。需要说明的是,模型试验的上缘挑距为鼻坎末端到水舌上缘最远点的水平长度,原型观测的挑距为鼻坎末端至下游水面或冲坑最深点的距离(详见文献[22])。

由于没有搜集到关于水舌下缘挑距的其他模型或原型观测资料,因此,仅利用本文试验数据对反弧鼻坎水舌下缘挑距计算结果进行了验证,计算结果如表2所示,表中 $L_{2测}$ 为通过模型试验获得的下缘挑距, $L_{2计}$ 为本文方法计算所得水舌下缘挑距。

由表1可知,本文方法计算的水舌上缘挑距与模型试验结果的最大相对误差为4.11%,与原型观测结果的最大相对误差为11.26%,而常规方法计算所得挑距与模型试验结果最大相对误差为12.27%,与原型观测结果最大相对误差则达到46.28%,表明尽管本文计算过程中没有考虑原型中水舌掺气和空气阻力对挑距的影响,但是本文方法对水舌上缘挑距的预测精度较常规方法高。

由表2可知,在本文试验范围 $0.15 \leq h_e/R \leq 0.25$ 内,由出射流速计算式(11)得到的下缘挑距与模型试验结果的相对误差均在10.00%以内,表明本文提出的水舌下缘挑距计算方法具有较好的计算精度。

表 1 水舌上缘挑距计算结果

数据来源	R/m	$\beta/(^{\circ})$	$q/(m^2 \cdot s^{-1})$	h_e/R	d/m	$L_{1测}/m$	$L_{1计}/m$	L'_1/m	$\frac{L_{1计}-L_{1测}}{L_{1测}}/\%$	$\frac{L'_1-L_{1测}}{L_{1测}}/\%$
模型试验	0.5	45.0	0.23	0.15	0.65	1.56	1.59	1.63	1.96	4.29
	0.5	45.0	0.25	0.15	0.65	1.73	1.77	1.80	2.22	4.04
	0.5	45.0	0.29	0.15	0.65	2.20	2.15	2.17	-2.13	-1.21
	0.5	45.0	0.32	0.15	0.65	2.52	2.50	2.51	-0.97	-0.55
	0.5	45.0	0.36	0.24	0.65	1.56	1.57	1.49	0.45	-4.10
	0.5	45.0	0.38	0.24	0.65	1.71	1.70	1.61	-0.36	-5.76
	0.5	45.0	0.44	0.25	0.65	2.08	2.04	1.89	-1.98	-9.04
	0.5	45.0	0.49	0.25	0.65	2.51	2.41	2.20	-4.11	-12.27
原型观测 ^[22]	13.0	25.0	27.80	0.10	29.32	71.00	70.76	53.86	-0.33	-24.14
	13.0	25.0	45.90	0.17	32.22	83.00	75.33	52.52	-9.24	-36.72
	13.0	25.0	36.50	0.13	39.38	85.00	79.42	57.05	-6.56	-32.88
	13.0	25.0	49.30	0.18	35.36	84.00	77.88	53.12	-7.29	-36.76
	8.0	22.0	10.95	0.09	20.70	41.00	39.44	27.94	-3.80	-31.86
	8.0	22.0	23.47	0.21	28.65	50.00	44.37	26.86	-11.26	-46.28
	16.0	25.0	56.00	0.15	25.21	80.15	79.24	58.10	-1.13	-27.51
	16.0	25.0	48.30	0.13	39.30	94.00	92.73	68.12	-1.35	-27.53
	10.7	22.0	46.10	0.18	20.68	80.00	78.82	53.00	-1.48	-33.75
	15.0	30.0	34.30	0.08	32.37	133.00	118.42	104.01	-10.97	-21.80
	15.0	30.0	36.90	0.08	23.54	105.00	115.44	103.42	9.94	-1.51
	12.0	25.0	38.20	0.11	22.62	110.00	109.41	87.83	-0.54	-20.15

表 2 水舌下缘挑距计算结果

$q/(m^2 \cdot s^{-1})$	h_e/R	$L_{2测}/m$	$L_{2计}/m$	$\frac{L_{2计}-L_{2测}}{L_{2测}}/\%$
0.23	0.15	1.22	1.32	8.60
0.25	0.15	1.35	1.46	8.30
0.29	0.15	1.65	1.75	6.51
0.32	0.15	1.95	2.02	3.73
0.36	0.24	1.15	1.19	4.00
0.38	0.24	1.32	1.28	-2.51
0.44	0.25	1.60	1.51	-5.59
0.49	0.25	1.95	1.75	-10.00

注:模型试验的 $R=0.5m, \beta=45^{\circ}, d=0.65m$ 。

5 结论

- a. 本文提出的基于出射流速的挑距计算方法计算的水舌上、下缘挑距与模型试验结果的最大相对误差分别为 4.11% 和 10.00%, 计算的水舌上缘挑距与文献[22]中原型观测结果的最大相对误差为 11.26%, 精度较高。
- b. 本文计算方法适用于相对出坎水深为 0.15 ~ 0.25 范围, 满足 SL319—2005《混凝土重力坝设计规范》中建议的 $R=(4 \sim 10)h_e$, 其超过该范围的适用性有待更多的实测资料验证。

参考文献:

[1] 薛宏程,刁明军,岳书波,等. 溢洪道出口斜切型挑坎挑射水舌三维数值模拟[J]. 水利学报,2013,44(6): 703-709. (XU Hongcheng, DIAO Mingjun, YUE Shubo, et al. 3-D numerical simulation of the jet nappe in the beveled flip bucket of the spillway [J]. Journal of

Hydraulic Engineering, 2013, 44 (6): 703-709. (in Chinese))

[2] 练继建,桑林瀚,缙文娟,等. 高拱坝表孔宽尾墩体型参数对泄流能力的影响[J]. 水利水电科技进展,2018, 38 (3): 1-7. (LIAN Jijian, SANG Linhan, GOU Wenjuan, et al. Effects of flaring gate piers with different shape parameters on discharge capacity of surface spillway in a high arch dam [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2018, 38(3):1-7. (in Chinese))

[3] 宁利中. 挑流水舌挑距及其影响因素概述[J]. 水资源与水工程学报, 2004, 15(3): 35-39. (NING Lizhong. Discussion on the horizontal length of jet flow and its factors of influence [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2004, 15 (3): 35-39. (in Chinese))

[4] WATANABE G. Supercritical flow on the circularly curved face[J]. Proceedings of the Japan Society of Civil Engineers,1976: 37-46.

[5] 杭传儒,郭子中. 反弧鼻坎上流线坦化的试验研究 [J]. 华东水利学院学报, 1983(3): 20-30. (HANG Chuanru, GUO Zizhong. Experimental study on the flattening of flow profile at the arc flip bucket[J]. Journal of East China Institute of Water Resources,1983(3): 20-30. (in Chinese))

[6] HELLER V, HAGER W H, MINOR H E. Ski jump hydraulics[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2005, 131(5): 347-355.

[7] STEINER R, HELLER V, HAGER W H, et al.

- Deflector ski jump hydraulics[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2008, 134(5): 562-571.
- [8] LUCAS J, HAGER W H, BOES R M. Deflector effect on chute flow[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2013, 139(4): 444-449.
- [9] 川上谦太郎, 武珂璘. 关于挑流式溢洪道水平挑射距离的研究[J]. 浙江水利科技, 1976(2): 42-53. (KAWAKAMI K, WU Kelin. A study on the computation of horizontal distance of jet issued from ski-jump spillway[J]. Zhejiang Water Conservancy Technology, 1976(2): 42-53. (in Chinese))
- [10] WU Jianhua, XU Zhun, YAO Li, et al. Ski-jump trajectory based on take-off velocity[J]. Journal of Hydrodynamics, 2016, 28(1): 166-169.
- [11] 刘宣烈, 张文周. 空气阻力对挑流水舌的影响[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 1982(2): 70-80. (LIU Xuanlie, ZHANG Wenzhou. Effect of air resistance to a trajectory jet[J]. Journal of Tianjin University (Natural Science and Engineering Technology Edition), 1982(2): 70-80. (in Chinese))
- [12] WU Jianhua, ZHANG Xiaoyan, MA Fei, et al. Ski jump trajectory with consideration of air resistance[J]. Journal of Hydrodynamics, 2015, 27(3): 465-468.
- [13] 刘士和, 曲波. 平面充分掺气散裂射流研究[J]. 水动力学研究与进展(A辑), 2002, 17(3): 376-381. (LIU Shihe, QU Bo. Investigation of plane aerated jet[J]. Chinese Journal of Hydrodynamics, 2002, 17(3): 376-381. (in Chinese))
- [14] 辜晋德, 赵建钧, 安建峰. 挑流水垫塘掺气比尺效应试验[J]. 水利水电科技展, 2019, 39(2): 61-65. (GU Jinde, ZHAO Jianjun, AN Jianfeng. Experimental study on scale effect of a aerated jet in a plunge pool[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2019, 39(2): 61-65. (in Chinese))
- [15] 庞博慧, 马洪琪. 高海拔地区气压环境对高速水流水舌挑距的影响[J]. 水力发电学报, 2018, 37(2): 88-95. (PANG Bohui, MA Hongqi. Influence of low atmospheric pressure on trajectory distance of high velocity jet nappes at high altitude[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2018, 37(2): 88-95. (in Chinese))
- [16] 中国水利水电科学研究院. 水工模型试验[M]. 北京: 水利电力出版社, 1985.
- [17] 朱祖国, 王均星, 查双全. 山区溢洪道挑距计算中流速系数确定方法的探讨[J]. 中国农村水利水电, 2011(4): 141-143. (ZHU Zuguo, WANG Junxing, ZHA Shuaquan. Research on the efflux coefficient in the calculation of the horizontal length of jet flow in spillways in mountain areas[J]. China Rural Water and Hydropower, 2011(4): 141-143. (in Chinese))
- [18] 孙红娟, 马飞, 骆超. 平底差动坎的流态和水舌挑距[J]. 水电能源科学, 2017, 35(3): 98-100. (SUN Hongjuan, MA Fei, LUO Chao. Flow regime and trajectory distance of jet flow in differential bucket[J]. Water Resources and Power, 2017, 35(3): 98-100. (in Chinese))
- [19] 李建中, 牛争鸣. 溢流坝反弧段的流速分布[J]. 西安理工大学学报, 1990, 6(4): 227-235. (LI Jianzhong, NIU Zhengming. Velocity distribution in the reverse arc of the spillway dam[J]. Journal of Xi'an University of Technology, 1990, 6(4): 227-235. (in Chinese))
- [20] 张宗惠. 挑流鼻坎反弧半径的拟定[J]. 水利学报, 1982, 13(11): 49-53. (ZHANG Zonghui. Preparation of the arc flip bucket radius[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1982, 13(11): 49-53. (in Chinese))
- [21] 辛玉传. 挑坎上的水流运动分析和挑距的简化计算[J]. 郑州工学院学报, 1984, 5(1): 35-44. (XIN Yuchuan. The analysis of water flow motion and the simplified calculation of ski-jump distance[J]. Journal of Zhengzhou Institute of Technology, 1984, 5(1): 35-44. (in Chinese))
- [22] 刘宣烈, 刘钧, 姚仲达, 等. 空中掺气水舌运动轨迹及射距[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 1989, 22(2): 23-30. (LIU Xuanlie, LIU Jun, YAO Zhongda, et al. The trajectory and range of aeration water flow[J]. Journal of Tianjin University (Natural Science and Engineering Technology Edition), 1989, 22(2): 23-30. (in Chinese))

(收稿日期: 2019-07-08 编辑: 雷燕)

