

跌坎型底流消能工的跌坎最小深度研究

崔 召^{1a}, 张建蓉^{1b}, 张 强²

(1. 昆明理工大学 a. 电力工程学院; b. 冶金与能源工程学院, 昆明 650093;
2. 昆明市水利水电勘测设计研究院, 昆明 650231)

摘要: 跌坎型底流消能工消力池内的水力特性受到跌坎深度的影响。应用平面紊动射流理论, 以消力池内允许的最大时均动水压强为控制目标, 对于跌坎最小深度的确定方法进行了初步分析, 建立了计算跌坎最小深度值的理论公式。通过水力学试验方法, 得到消力池底板时均动水压强与跌坎最小深度之间的关系, 同时与跌坎最小深度试验值进行了比对, 对本文建立的理论公式进行了验证。

关键词: 底流消能工; 跌坎深度; 紊动射流理论; 时均动水压强; 临底流速

中图分类号: TV 653 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672 1683(2015) 03- 0510- 04

Minimum falling sill depth of the falling sill bottom flow dissipation

CUI Zhao^{1a}, ZHANG Jianrong^{1b}, ZHANG Qiang²

(1a. Faculty of Electric Power Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China;
1b. Faculty of Metallurgy and Energy Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China; 2. Kunming Water Conservancy and Hydropower Survey and Design Institute, Kunming 650231, China)

Abstract: The hydraulic characteristics of the falling sill bottom flow energy dissipation pool are affected by the falling sill depth. In order to control the allowable maximum time averaged dynamic water pressure in the dissipation pool, a method and its theoretic formula for determining the minimum falling sill depth are preliminarily analyzed and derived using the plane turbulent jet theory. Based on the hydraulic model experiments, the relationship between the time averaged dynamic water pressure on the bottom plate and the minimum falling sill depth is obtained. The calculated falling sill depth is compared with the measured value to verify the applicability of theoretic formula.

Key words: bottom flow dissipation; falling sill depth; turbulent jet theory; time averaged dynamic water pressure; underflow speed

跌坎型底流消能工^[1]是一种应用前景广阔的新型消能工, 由于跌坎^[2]的存在, 入池水流形成淹没底流流态, 通过与消力池内消能水体的强剪切紊动进行消能^[3], 能够有效解决传统底流消能工自身具有的消力池临底流速和脉动压强大的问题^[4]。

跌坎的存在对于消力池内的水力学指标具有重要影响, 消力池消能效率的程度主要取决于跌坎深度^[5]。随着跌坎深度的增加, 入池主流到达消力池底板的射程增加, 射流^[6]与消能水体剪切面积也随之增大, 使得动能通过强烈的紊动作用得以耗散, 因此消力池底板冲击区底板时均动水压强随着跌坎深度的增加而减小^[7]。本文以消力池冲击区最大时均动水压强为控制目标, 对消力池的跌坎最小深度值进行试

验研究, 旨在探讨冲击区底板时均动水压强与跌坎最小深度之间的关系。

1 跌坎型底流消能工淹没底流流态

跌坎型底流消能工入池水流在消力池中产生淹没射流和淹没水跃的混合流态, 这一混合流态在水力学上称之为淹没底流流态。入池水流与消能水体产生强烈的剪切作用, 在主流下方形成了顺时针方向的底部漩涡。入池主流迅速潜底, 冲击区后形成淹没水跃, 产生强烈的逆时针方向上部漩涡。以入射主流方向为参照, 可将消力池内流态分为: 淹没射流区、冲击区、附壁射流区, 见图 1^[8]。

收稿日期: 2014-07-01 修回日期: 2015-04-24 网络出版时间: 2015-05-13

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20150513.1505.001.html>

基金项目: 国家自然科学基金“跌坎型底流消能工水流流动结构水力特性研究”(51169008)

作者简介: 崔 召(1988-), 男, 河北邯郸人, 主要从事工程水力学方面的研究。E-mail: 442628925@qq.com

通讯作者: 张建蓉(1963-), 女, 云南保山人, 副教授, 主要从事非恒定流方面的研究。E-mail: 1186482688@qq.com

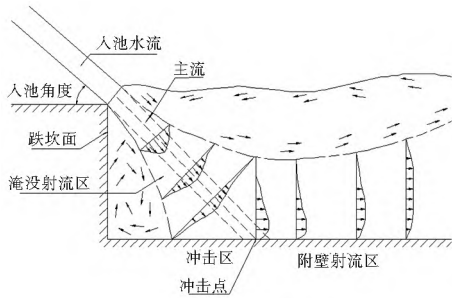


图 1 消力池内淹没底流流态示意图

Fig. 1 Schematic diagram of submerged bottom flow pattern in the dissipation pool

淹没射流主流到达消力池底板并与底板相互作用的区域称为冲击区。在冲击区，淹没射流主流冲击消力池底板，由于受到底板的约束，主流方向被迫偏转，流线弯曲，淹没射流主流流速迅速降低，主流的动能一部分转化为消力池底板上的压能^[9]，导致在冲击区消力池底板产生冲击压力^[10]。冲击区是消力池内主要的消能区域，所受到的时均动水压强突增^[11]，因此也是气蚀破坏与冲刷破坏最为严重的区域。

本文选取跌坎型底流消能工消力池冲击区底板所受到的最大时均动水压强为控制目标，着重分析了其与消力池跌坎最小深度之间的关系。

2 数值计算方法

2.1 临底流速为控制参数的跌坎最小深度

跌坎深度最小值的计算公式^[12]为

$$d_{\min} = \frac{3\sigma K_0}{4u_{\max}^2}(\sin\theta + \operatorname{tg}\theta_2 \cos\theta)$$

$$\sigma = \left[\frac{-h_c \operatorname{tg}\theta_2 + \sqrt{4(1 + (\operatorname{tg}\theta_2)^2)(d^2 + L^2) - h_c^2}}{2(1 + (\operatorname{tg}\theta_2)^2)} \right] / \left(\frac{3K_0}{4u_{\max}^2} \right)$$

$$\theta_2 = \frac{\pi}{2} - \theta - \operatorname{arctg}\left(\frac{L}{d}\right) \quad (1)$$

式中： K_0 为单位时间泄流的动量， $\rho K_0 = \rho_0 h_c u_0$ ； u_0 为水流入池流速； σ 为射流扩散系数； θ 为入池角度； u_{\max} 为最大临底流速； θ_2 为紊动射流扩散角； h_c 为收缩水深； d 为跌坎深度； L 为再附长度（由试验确定）。

需要说明的是，式(1)是建立在淹没紊动射流扩散方程的基础上，求得的跌坎深度最小值 d_{\min} 。如图 2 所示，淹没紊动射流扩散方程为

$$x = \frac{3}{4} \frac{\sigma K_0}{u_{\max}^2} \quad (2)$$

$$b = x \tan\theta_2 + \frac{h_c}{2} \quad (3)$$

式中： x 为射流长度值； b 为射流半宽值。

需要强调的是，式(2)、式(3)是在令 $u_{\max} = u_M$ 的基础上，求得的射流长度值 x 和射流半宽值 b ，但是实际情况却为 $u_{\max} < u_M$ 。因此，通过式(2)、式(3)所求得的 x 和 b 值都大于实际值，跌坎的最小深度值也大于实际所需要的值。

2.2 时均动水压强为控制参数的跌坎最小深度

根据紊动射流理论^[13]，跌坎型底流消能工淹没射流区的运动规律与自由紊动射流相似，即符合直线扩散规律。淹没射流内部压强，等同于周围流体的压强，不存在压力梯度^[14]。

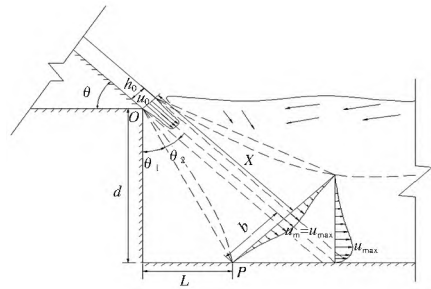


图 2 消力池内淹没射流扩散示意图

Fig. 2 Schematic diagram of submerged jet diffusion in the dissipation pool

冲击区时均动水压强是由于冲击水体受到底板的约束，流速降低，流速梯度转化为压力梯度，即动能转化为势能，也可视为动能转化为压强。

跌坎型底流消能工入池主流在冲击区的最大临底流速 u_{\max} 与消力池底板成一定的角度 θ ，与主流入池角度相同。最大临底流速 u_{\max} 可以分解为水平流速 $\cos\theta u_{\max}$ 和垂直流速 $\sin\theta u_{\max}$ 。对于跌坎型底流消能工，以消力池底板面为基准面，则由能量守恒定律可得：

$$P_{\max} = \frac{(\sin\theta u_{\max})^2}{2g} + H_d$$

$$H_d = H_0 + D \quad (4)$$

式中： P_{\max} 为冲击区最大时均动水压强，其值以水柱高度来表示； H_0 为消力池尾坎顶部出池水流深度； D 为消力池尾坎高度。

将式(4)转化为 u_{\max} 的表达式之后代入式(1)，经整理得：

$$d_{\min} = \frac{3}{8} \frac{K_0 \sigma}{(P_{\max} - H_d)g} \sin^2\theta (\sin\theta + \operatorname{tg}\theta_2 \cos\theta)$$

$$\sigma = \left[\frac{-h_c \operatorname{tg}\theta_2 + \sqrt{4(1 + (\operatorname{tg}\theta_2)^2)(d^2 + L^2) - h_c^2}}{2(1 + (\operatorname{tg}\theta_2)^2)} \right] / \left(\frac{3K_0}{4u_{\max}^2} \right)$$

$$\theta_2 = \frac{\pi}{2} - \theta - \operatorname{arctg}\left(\frac{L}{d}\right) \quad (5)$$

由式(5)可知，跌坎最小深度值 d_{\min} 与水流入池流速 u_0 、收缩水深 h_c 、射流扩散系数 σ 、入池角度 θ 、紊动射流扩散角 θ_2 以及最大时均动水压强 P_{\max} 有关。在水流入池角度和紊动射流扩散角保持不变的工况下，跌坎深度随底板时均动水压强的增大而减小。对于紊动射流扩散角 θ_2 的取值，基于平面紊动射流理论，采用高斯分布，通过试验得出紊动射流扩散角 $\theta_2 = 10^\circ$ 。1950 年 Rouse. H 通过试验研究，得到紊动射流扩散角 $\theta_2 = 10.9^\circ$ ^[15]。

上述两个紊动射流扩散角是基于平面自由紊动射流理论，而本文中由于受到固体边界的制约，紊动射流扩散角的值与上述值相比，会有所偏大。通过将实测试验数据代入(5)式计算紊动射流扩散角 θ_2 ，然后对计算结果进行加权平均，求得的紊动射流扩散角 $\theta_2 = 12.3^\circ$ ，最终采用紊动射流扩散角 $\theta_2 = 12.3^\circ$ 。

3 试验验证

3.1 试验装置

为了观测消力池内的水流流态，分析消力池底板冲击区最大时均动水压强与跌坎深度和入池角度之间的关系，特进

行水工模型试验。

水工试验模型全部采用有机玻璃制作而成,消力池底板上共布置时均动水压强测压点 48 个。消力池的尺寸为 1.2 m × 0.2 m (长 × 宽);消力池的跌坎深度分别取 0.06 m、0.08 m、0.10 m;水流入池角度分别取 15°、30°、45°;消力池的入池流量分别取 $6.135 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{s}$ 、 $8.027 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{s}$ 、 $10.320 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{s}$ 。

3.2 试验结果

跌坎型底流消能工消力池内最大的时均动水压强出现

在冲击区,时均动水压强最大的点称为冲击滞点,时均动水压强分布规律为:由冲击滞点向上下游两侧迅速下降,且压力梯度很大^[16]。因此,以冲击区最大时均动水压强作为控制目标推求跌坎最小深度值具有可行性。

本文采用水力学试验方法,通过改变入池能量、跌坎深度以及入池角度之间的关系,研究消力池冲击区底板所受到的最大时均动水压强与跌坎深度之间的关系,同时验证跌坎最小深度值理论计算公式的合理性。理论计算的跌坎最小深度值与实际跌坎深度值的对比见表 1 和图 3。

表 1 跌坎最小深度实测值与理论计算值结果比较

Tab. 1 Comparison of the measured and calculated values of minimum falling sill depth

入池角度 (°)	实际坎深 /m	实测流量 /($10^3 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	实测入池流速 /($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	实测入池水深/m	实测再附长度/m	实测最大临底流速/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	最大时均动水压强理论计算值/m	最小坎深理论计算值/m
15	0.06	6.135	2.340	0.013	0.120	1.110	0.005	0.061
15	0.08	6.135	2.050	0.015	0.160	0.900	0.003	0.081
15	0.10	6.135	2.010	0.023	0.190	0.750	0.002	0.097
30	0.06	6.135	2.230	0.021	0.065	1.610	0.033	0.058
30	0.06	8.027	2.160	0.018	0.065	1.920	0.047	0.058
30	0.06	10.320	2.400	0.020	0.070	1.960	0.049	0.060
30	0.08	6.135	2.100	0.020	0.080	1.200	0.018	0.074
30	0.08	8.027	2.250	0.026	0.085	1.350	0.023	0.076
30	0.08	10.320	1.780	0.023	0.085	1.530	0.030	0.077
30	0.10	6.135	2.000	0.019	0.090	1.100	0.015	0.089
30	0.10	8.027	2.040	0.019	0.100	1.200	0.018	0.094
30	0.10	10.320	2.030	0.025	0.100	1.210	0.019	0.093
45	0.06	6.135	2.300	0.025	0.040	1.600	0.065	0.058
45	0.06	8.027	2.260	0.020	0.040	1.750	0.078	0.058
45	0.06	10.320	2.410	0.028	0.045	2.130	0.116	0.060
45	0.08	6.135	1.710	0.018	0.055	1.290	0.042	0.080
45	0.08	8.027	2.050	0.022	0.055	1.330	0.045	0.079
45	0.08	10.320	2.160	0.030	0.060	1.670	0.071	0.081
45	0.10	6.135	1.780	0.018	0.065	1.350	0.046	0.098
45	0.10	8.027	1.900	0.026	0.070	1.360	0.047	0.100
45	0.10	10.320	2.210	0.030	0.070	1.430	0.052	0.099

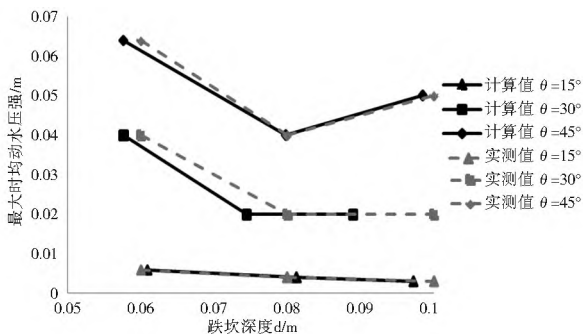


图 3 最大时均动水压强与跌坎深度对比

Fig. 3 Relationship between the maximum time averaged dynamic water pressure and falling sill depth

由图 3 可知,在入池能量不变的工况下,最大时均动水压强随着入池角度的增大而增大。这是由于入池角度增大,紊动射流流线条数减小,冲击区长度随之减小,临底流速增大,使得底板时均动水压强增大。同时可看出,由最大时均动水压强作为控制目标求得的跌坎最小深度值与试验实测

值具有良好的吻合性。

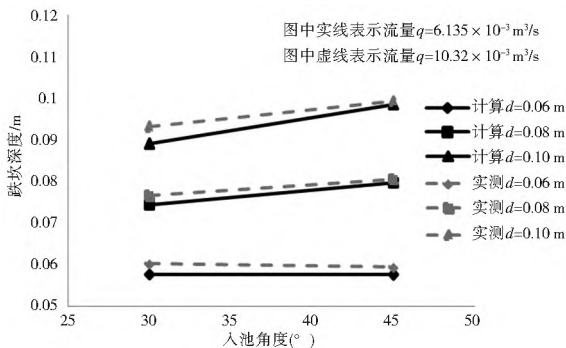


图 4 跌坎深度与入池角度对比

Fig. 4 Relationship between the falling sill depth and intake angle

由图 4 可知,跌坎深度与入池能量之间没有关系,而只与入池角度有关,其结果与理论计算公式相一致。同时可看出,跌坎深度的理论计算值与试验实测值之间具有良好的吻合性。

综上所述,跌坎最小深度的理论计算值与试验实测值基本吻合。因此由最大时均动水压强作为控制目标推求出的跌坎最小深度值的理论计算公式具有一定的合理性与可行性。

4 结语

本文基于紊动射流理论,在前人研究成果的基础上,推导出以冲击区最大时均动水压强为控制目标,计算跌坎最小深度值的理论公式。试验验证结果表明该理论公式的计算值与实测值之间具有良好的吻合性,表明该理论计算公式具有一定的合理性,可为今后的实际工程提供参考。

参考文献(References):

- [1] 田野,王海军,林赛,等.跌坎型底流消能工冲击区时均动水压强计算与试验[J].南水北调与水利科技,2014,12(5):14-17. (TIAN Ye, WANG Haijun, LIN Sai, et al. Time averaged hydrodynamic pressure and experimental study of energy dissipater with step down floor in the impact area[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2014, 12(5): 14-17. (in Chinese))
- [2] 王海军,赵伟,杨红宣,等.跌坎型底流消能工水力特性的试验研究[J].水利水电技术,2007,38(10):39-41. (WANG Haijun, ZHAO Wei, YANG Hongxuan et al. Experimental study on hydraulic characteristics of underflow for energy dissipater with step down floor[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2007, 38(10): 39-41. (in Chinese))
- [3] 王海军,张强,唐涛.跌坎式底流消能工的消能机理与水力计算[J].水利水电技术,2008,39(4):46-48. (WANG Haijun, ZHANG Qiang, TANG Tao. Energy dissipation mechanism and hydraulic calculation of falling sill bottom flow energy dissipater[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2008, 39(4): 46-48. (in Chinese))
- [4] 冯晓娟,王海军,樊晶晶.跌坎型底流消能工再附点数值模拟[J].云南水力发电,2013,29(4):38-41. (FENG Xiaojuan, WANG Haijun, FAN Jingjing. The reattachment numerical simulation of the drop type bottom current energy dissipater[J]. Yunnan Water Power, 2013, 29(4): 38-41. (in Chinese))
- [5] 冯国一,王海军,唐涛.坎深和入池能量对跌坎型底流消能工流态影响的数值模拟[J].南水北调与水利科技,2008,6(2):69-71. (FENG Guoyi, WANG Haijun, TANG Taol. Numerical simulation on the influence of step down depth and intake energy to the flow pattern of step down hydraulic jump dissipater[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2008, 6(2): 69-71. (in Chinese))
- [6] 董志勇.射流力学[M].北京:科学出版社,2005. (DONG Zhiyong. Jet Mechanics[M]. Beijing: Science Press, 2005. (in Chinese))
- [7] 郑雪,付腾吉,张闻辉,等.跌坎深度对跌坎型底流消能工水力特性影响的数值模拟分析[J].昆明理工大学学报:理工版,2010,35(2):51-55. (ZHENG Xue, FU Tengji, ZHANG Weirui, et al. Numerical simulation analysis of step down depth influence on hydraulic characteristics of energy dissipater with step down floor[J]. Journal of Kunming University of Science and Technology: Science and Technology, 2010, 35(2): 51-55. (in Chinese))
- [8] 黄海艳,张强,王海军.跌扩型底流消能工水力特性的试验研究[J].中国农村水利水电,2010(7):86-88. (HUANG Haiyan, ZHANG Qiang, WANG Haijun. Experimental research on hydraulic characteristics of underflow for energy dissipaters by hydraulic jumps with sudden expansion and abrupt drop[J]. China Rural Water and Hydropower, 2010(7): 86-88.
- [9] 王海军,王立辉,杨红宣.突扩跌坎型底流消能工突扩后立轴漩涡水力特性研究[J].水力发电学报,2010,29(2):11-14. (WANG Haijun, WANG Lihui, YANG Hongxuan. Study on hydraulic characteristics of vertical vortices of a bottom stepped energy dissipater with abrupt wall expansion[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2010, 29(2): 11-14. (in Chinese))
- [10] 陈朝,王立辉,王海军.跌扩型底流消能工消能的试验研究[J].水力发电学报,2012,31(4):145-149. (CHEN Zhao, WANG Lihui, WANG Haijun. Experimental study on energy dissipation of expanding falling-sill bottom flow energy dissipater[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2012, 31(4): 145-149. (in Chinese))
- [11] 付腾吉,张闻辉,郑雪,等.入池角度对跌坎型底流消能工水力特性影响的数值模拟[J].云南水力发电,2009,25(3):33-36. (FU Tengji, ZHANG Weirui, ZHENG Xue, et al. Numerical simulation of influence of intake angle on hydraulic characteristics of energy dissipater with step down floor[J]. Yunnan Water Power, 2009, 25(3): 33-36. (in Chinese))
- [12] 王海军,杨红宣,王立辉.跌坎型底流消能工控制临底流速的跌坎最小深度[J].水利水运工程学报,2008(1):78-81. (WANG Haijun, YANG Hongxuan, WANG Lihui. Minimum depth of falling-sill aiming at controlling underflow speed of falling-sill of falling-sill bottom flow dissipation[J]. Hydro Science and Engineering, 2008(1): 78-81. (in Chinese))
- [13] Rajaratnam N. Hydraulic jump[J]. Advances in Hydrosience, 1967, 4: J97-280.
- [14] 田忠,许唯临,王伟,等.高速淹没冲击射流的压强特性[J].水利学报,2005,36(4):401-404. (TIAN Zhong, XU Weilin, WANG Wei, et al. Experimental study on impinging pressure caused by high velocity submerged jet[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2005, 36(4): 401-404. (in Chinese))
- [15] 赖成连,赵亚光,钟志镭,等.底流消能的跌坎型消力池再附长度的试验研究[J].云南水力发电,2007,23(6):39-41. (LAI Chenglian, ZHAO Yanguang, ZHONG Zhilei, et al. Test and study of additional length of a drop type plunge pool for underflow energy dissipation[J]. Yunnan Water Power, 2007, 23(6): 39-41. (in Chinese))
- [16] 李琳.水垫塘底板水动力荷载及稳定性指标研究[D].天津:天津大学,2011. (LI Lin. Study on hydrodynamic characteristic of slabs in plunge pool and index of stability[D]. Tianjin: Tianjin University, 2011.