



DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2017.05.026

杨宇, 张家明, 陈维亮. 跌坎型底流消能工跌坎深度在工程优化设计中的应用[J]. 南水北调与水利科技, 2017, 15(5): 170-175. YANG Yu, ZHANG Jia ming, CHEN Wei liang. Application of falling sill depth of the falling sill bottom flow energy dissipator in engineering optimization design[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2017, 15(5): 170-175. (in Chinese)

跌坎型底流消能工跌坎深度 在工程优化设计中的应用

杨宇¹, 张家明², 陈维亮²

(1. 昆明理工大学 电力工程学院, 昆明 650000; 2. 楚雄欣源水利电力勘察设计有限责任公司, 云南 楚雄 675000)

摘要: 以某工程导流泄洪隧洞底流消能工为试验研究对象, 原方案试验中, 在闸门半开工况下, 下泄水流出现脱离泄槽底板现象, 不利于下泄水流的消能, 经研究, 改变变坡段底板坡度, 同时将泄槽的两个坡段改成一个坡段; 原方案底流消能工消力池内均发生远驱式水跃, 消能效果差, 通过研究采用以最大临底流速为控制目标的最小跌坎深度计算公式, 确定消力池底板高程。经两次优化试验后, 消除了闸后水流脱离泄槽底板的现象, 下泄水流流态稳定, 消力池内形成稳定的淹没水跃消能, 出池水流与下游水流衔接较好, 消力池内临底流速和时均动水压强均明显降低, 消能效果好。

关键词: 跌坎型底流消能工; 跌坎深度; 临底流速; 消能效果; 水力学试验

中图分类号: TV 653 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-1683(2017)05-0170-06

Application of falling sill depth of the falling sill bottom flow energy dissipator in engineering optimization design

YANG Yu¹, ZHANG Jia ming², CHEN Wei liang²

(1. Faculty of Electric Power Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650000, China;
2. Chuxiong Xin Yuan Water Conservancy and Electric Power Survey and Design Co. Ltd., Chuxiong 675000, China)

Abstract: This paper took the bottom flow energy dissipator of a diversion spillway tunnel of a project as the object of study. In the original test scheme, when the gate was half open, the discharged flow was off the bottom of the discharge chute, which was not conducive to dissipating the energy of the discharged flow. In this study, we altered the slope of the floor in the pressing slope section, and reduced the two slope sections of the discharge chute into one slope section. In the original scheme, there were repelled hydraulic jumps in the stilling pool, resulting in poor energy dissipation. To tackle this problem, we adopted a calculation formula of the minimum falling sill depth that was aimed at controlling the maximum underflow speed, and determined the elevation of the floor of the stilling pool. After two optimization experiments, we eliminated the phenomenon in which the flow out of the gate was off the bottom of the discharge chute. The discharged flow was in a steady regime. There were stable submerged jumps to dissipate the energy in the stilling pool. The water flow out of the stilling pool connected well with the downstream flow. The underflow speed and time averaged dynamic water pressure in the stilling pool were significantly reduced. The dissipation effect was good.

Key words: falling sill bottom flow energy dissipator; falling sill depth; underflow speed; energy dissipation effect; hydraulic test

收稿日期: 2016-07-01 修回日期: 2016-10-19 网络出版时间: 2017-08-29
网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20170829.1926.016.html>
基金项目: 国家自然科学基金(51169008)

Fund: National Natural Science Foundation of China(51169008)

作者简介: 杨宇(1991-), 女, 湖南益阳人, 主要从事工程水力学方面的研究。E-mail: 1366929687@qq.com

通讯作者: 张家明(1970-), 男, 云南楚雄人, 高级工程师, 主要从事水利工程规划设计工作。E-mail: yncxzm@vip.sina.com

跌坎型底流消能工是一种适用于高水头、大单宽流量消能的新型消能工^[1]。它是在常规底流消能的泄槽末端将底板垂直向下开挖形成适当高度的跌坎而形成的^[2]。如图 1 所示,由于跌坎的存在,消力池前端形成一定厚度的水垫,不仅增大了入射水流的射程,而且增加了下泄水流的消能水体。根据紊动射流衰减规律,主流流速沿程减小^[3];水流进入消力池后形成淹没射流,主流附近形成漩涡与消力池内的水体发生强烈的紊动、剪切、掺混作用^[4]。因此跌坎有效降低了消力池内的临底流速,时均动水压强等水力学指标。与传统的底流消能相比,跌坎型底流消能工提高了消能效率,消力池内水流流态稳定,有效解决消力池底板抗冲保护难度大的问题,扩大了底流消能工的工程应用范围^[5]。跌坎深度直接影响消力池内水流流态,临底流速及消能率,因此,选择一个合适的跌坎深度是确定消力池体型的关键所在^[6]。

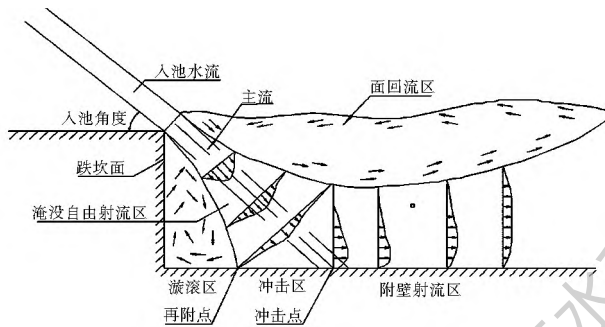


图 1 跌坎型底流消能工消力池内流态、流速分区示意图

Fig. 1 Sketch of flow regime and velocity distribution in falling sill bottom flow stilling pool

1 工程概况

某水库位于云南省永仁县。水库坝址距离永仁县城 53 km。水库最大坝高为 95 m,正常蓄水位为 1 846 m,总库容为 2 391.5 万 m³。水库工程规模属中型,工程等别为 0 等。工程由水库枢纽、引水工程及输水工程组成,水库枢纽主要由拦河坝、溢洪道、输水泄洪放空隧洞组成。输水泄洪放空隧洞布置于左岸,采用“龙抬头”和导流隧洞结合而成,输水泄洪放空隧洞进口底板高程为 1 801.30 m,全长 456.18 m,其中洞身段长 357.68 m,与导流洞结合段长 230.3 m。输水泄洪放空隧洞为有压洞,洞身为直径 3.0 m 的圆形断面,出口段设工作闸室,设 1 道 2.5 m×2.5 m 弧形工作闸门控制泄洪,设计消力池长 38 m,池宽 8 m,边墙顶部高程为 1 756.78 m,底板高程为 1 750.78 m。原隧洞出口及消能段纵剖面图和平面图见图 2、图 3。

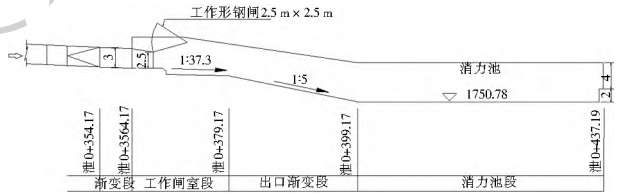


图 2 原隧洞出口及消能段纵剖面图

Fig. 2 The longitudinal profile of the original tunnel outlet and energy dissipation section

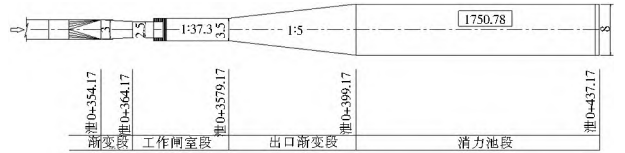


图 3 原隧洞出口及消能段平面图

Fig. 3 The plan of the original tunnel outlet and energy dissipation section

2 试验模型

试验模型按照重力相似准则进行设计,并满足阻力相似要求^[7]。模型比尺为 1:40。试验模型由水库、溢洪道、泄洪隧洞、消力池、尾水护坦段及下游河道组成,泄洪隧洞和消力池均采用 8 mm 厚透明有机玻璃制作而成,消力池尾水护坦段采用水泥砂浆抹面,用动床料模拟下游河床,在消力池底板上沿程安装测压管。模型试验工况共 7 个: $P=0.1\%$, $P=0.5\%$, $P=2\%$, $P=3.33\%$, $P=5\%$, $P=10\%$, $P=20\%$,选取特征工况作为分析对象,如表 1 所示,设计($P=2\%$)、消能防冲($P=3.33\%$)以及闸门半开($P=20\%$)这三种工况。

表 1 模型试验工况

Tab. 1 Model test conditions

工况	频率 (%)	入库流量 / (m ³ ·s ⁻¹)	输水泄洪洞 闸门开度/m	水位 /m	输水泄洪洞下泄 流量/(m ³ ·s ⁻¹)
1	2	548	全开	1 847.30	121.6
2	3.33	479	全开	1 847.03	121.4
3	20	220	1.5(半开)	1 846.56	86.9

3 原方案存在的问题及解决思路

3.1 原方案存在的问题

工况 3 进行试验时发现: 闸后下泄水流脱离泄槽底板,冲击消力池底板,极易引发冲刷破坏,进而诱发空蚀破坏^[8];入池水流流态不稳定,消能效果差。

原方案为底流消能,试验发现各工况下消力池内均发生远驱式水跃,水流流态不稳定,临底流速较大,消能效果差,对下游河床有较大的冲刷。

3.2 原方案问题解决的思路

工况 3 为闸门半开,若为理想水体,则闸前闸后

水流流线呈对称分布。实际水体具有黏滞性,出闸水流流心有向上的趋势,形成脱离泄槽底板的水流,不利于消力池消能。需改变出闸水流的方向以消除水流流心向上,使水流贴底板下泄,同时对泄槽段进行优化,使入池水流平顺。

发生远驱式水跃是由于消力池内消能水体不足,因此必须优化消力池体型以增加消能水体方能提高消能效果、降低消力池出池流速、避免下游河床受到冲刷破坏。

3.3 原方案问题之一的解决措施

针对闸门半开时下泄水流出现脱离泄槽底板现象,在不影响控制段过流能力的条件下,改变压坡段底板坡度,与压坡段顶板坡度保持一致,为 1:6.5;将泄槽的两个坡段改成一个坡段,坡度为 1:6.97。隧洞出口与泄槽段纵剖面图和平面图如图 4、图 5 所示。压坡段底板改变了出闸水流的方向,消除了水流泄洪段脱离底板现象,坡段的改变使入池水流平顺,有利于消力池消能。

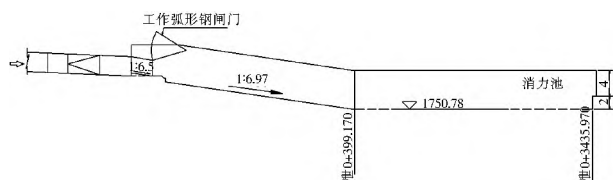


图 4 隧洞出口与泄槽段纵剖面图
Fig. 4 The longitudinal profile of tunnel outlet and discharge chute section

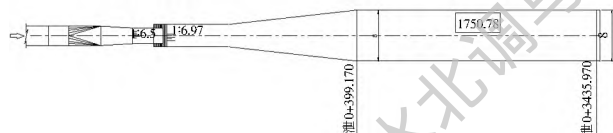


图 5 隧洞出口与泄槽段纵平面图

Fig. 5 The plan of tunnel outlet and discharge chute section

3.4 原方案问题之二的解决措施

原方案问题之一解决后,试验发现各工况下消力池内仍出现远驱式水跃。为了避免消力池内出现远驱式水跃,以减轻对底板的冲刷,必须加大池内水深,使入池水流形成淹没底流流态。跌坎深度直接影响消力池内的水流流态、临底流速、时均动水压强、消能率等水力学指标^[9]。跌坎深度过小,主流的射程缩短,相应的临底流速会增大,消能效果不佳,且消力池中冲击区会存在强烈的漩滚,对消力池的安全稳定不利;跌坎深度过大,一方面工程造价会提高,另一方面虽然降低了临底流速和脉动压强,但是消力池内容易形成淹没混合流,高速水流不再临底,而是出现在消力池水体的中上层,使得表面流速大,波动大,消能效果差,出池余能也较大^[10]。因此选

择一个合适的跌坎深度是设计消力池至关重要的因素。根据紊动射流理论^[3],研究得到以最大临底流速为控制目标的最小跌坎深度计算公式如下。

如图 6 所示的几何关系:

$$d = |op| \cos\theta_1 = \frac{x}{\cos\theta_2} \sin(\theta_1 + \theta_2) = \frac{x}{\cos\theta_2} (\sin\theta_1 \cos\theta_2 + \cos\theta_1 \sin\theta_2) \quad (1)$$

根据射流轴线上流速 $u_M = \frac{\sqrt{3}}{2} \left(\frac{K_0 \sigma}{x} \right)^{\frac{1}{2}}$, 由此可

得 $x = \frac{3OK_0}{4u_M^2}$ 。

$$d_{min} = \frac{3OK_0}{4u_M^2} (\sin\theta_1 + \text{tg}\theta_2 \cos\theta_1) \quad (2)$$

$$\alpha = \left[\frac{-h_c \text{tg}\theta_2 + \sqrt{4[1 + (\text{tg}\theta_2)^2(d^2 + L^2)] - h_c^2}}{2(1 + (\text{tg}\theta_2)^2)} \right] / \left(\frac{3K_0}{4u_M^2} \right)$$

$$\theta_2 = \frac{\pi}{2} - \theta_1 - \arctg \left(\frac{L}{d} \right) \quad (3)$$

式中: K_0 为单位时间泄流的动量, $\rho K_0 = \rho u_0^2 h_c$; u_0 为水流入池流速; σ 为射流扩散系数; θ 为入池角度; u_M 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。

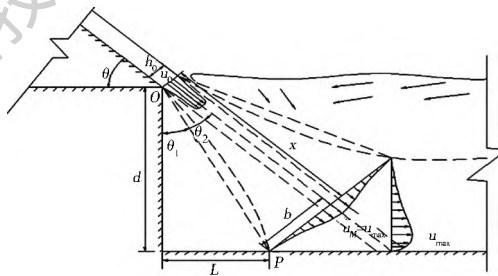


图 6 跌坎型底流消能工消力池中水流扩散示意图
Fig. 6 Sketch of diffusion of flow in falling sill bottom flow stilling pool

为确定射流扩散系数和射流扩散角,采用水力学试验的方法,对跌坎型底流消力池进行试验,分别测量了入池角度为 15°、30°、45° 及跌坎深度分别为 6、8、10 cm 等 21 个工况下的下泄流量及水头、入池水深、流速、特征断面流速和底板压力分布。通过式 (3) 计算射流扩散系数和射流扩散角,然后对计算结果进行加权平均。初步计算得 $\sigma = 2.99$ 和 $\theta_2 = 12.06^\circ$, 选取其中 13 个工况进行验证分析,各工况下最小跌坎深度理论值与实际坎深的比较见表 2。

由表 2 可知,最大相对误差为 5%,说明最小跌坎深度理论值与试验值具有良好的吻合性。工程消力池底板采用 C35 钢筋混凝土衬砌,根据《水工建筑物抗冲磨防空蚀混凝土技术规范》,在通过的流速小于 15 m/s 的消力池,宜采用 C35、C40 的混凝土^[12]。基于此,运用以最大临底流速为控制目标的

表 2 最小跌坎深度理论值与实际坎深比较

Tab. 2 The comparison between theoretical value and experimental value of minimum falling sill depth

入池角度 (°)	实际坎深 /m	实测流量 / (10 ³ m ³ ·s ⁻¹)	实测入池流速 / (m·s ⁻¹)	实测入池水深 /m	实测再附长度 /m	实测最大临底流速 / (m·s ⁻¹)	射流扩散角 θ ₂ (°)	射流扩散系数 σ	最小跌坎深度理论值/m	相对误差 (%)
15	0.06	6.135	2.340	0.013	0.120	1.110	11.57	3.00	0.059	1.67
15	0.08	6.135	2.050	0.015	0.160	0.900	11.57	2.97	0.079	1.25
15	0.10	6.135	2.010	0.023	0.190	0.750	12.76	1.67	0.098	2.00
30	0.06	6.135	2.230	0.021	0.065	1.610	12.71	2.76	0.058	3.00
30	0.08	8.027	2.250	0.026	0.085	1.350	13.26	2.03	0.077	3.75
30	0.10	6.135	2.000	0.019	0.090	1.100	18.01	2.65	0.098	2.00
30	0.10	8.027	2.040	0.019	0.100	1.200	15.00	3.25	0.098	2.00
30	0.10	10.320	2.030	0.025	0.100	1.210	15.00	2.52	0.097	3.00
45	0.06	6.135	2.300	0.025	0.040	1.600	11.31	1.74	0.057	5.00
45	0.08	8.027	2.050	0.022	0.055	1.330	10.49	2.37	0.078	2.50
45	0.10	6.135	1.780	0.018	0.065	1.350	11.98	4.88	0.098	2.00
45	0.10	8.027	1.900	0.026	0.070	1.360	10.01	3.08	0.098	2.00
45	0.10	10.320	2.210	0.030	0.070	1.430	10.01	2.17	0.097	3.00

最小跌坎深度公式, 计算得坎深为 3 m。工况二, 入池角度 8.2°, 坎深 3 m, 入池流量为 121.4 m³/s, 实测入池流速为 28.38 m/s, 实测入池水深为 3.2 m, 消力池内实测最大临底流速为 12.34 m/s, 用该方法计算得最大临底流速为 12.40 m/s, 说明该方法具有较强的可靠性。在原方案的基础上将消力池底板高程整体降低 3 m, 各试验工况下消力池内均发生淹没水跃, 临底流速明显降低, 出池水流稳定, 消能效果好。因此最终隧洞出口及消能段纵剖面图和平面图分别如图 7、图 8 所示。

各试验工况下测得特征点处的水面线高度沿程变化趋势如图 9 所示。各工况下泄槽段(里程 370 m 至 399 m)水流流态稳定, 没有出现下泄水流脱离泄槽底板现象; 消力池内(里程 399 m 至 437 m)均发生淹没水跃, 水面线先壅高后降低, 出池水流流态稳定。

4.2 流速与混凝土强度

各试验工况下消力池内实测最大临底流速分布如表 3 所示。根据《水工建筑物抗冲磨防空蚀混凝土技术规范》, 在含沙量小于或等于 2 kg/m³ 情况

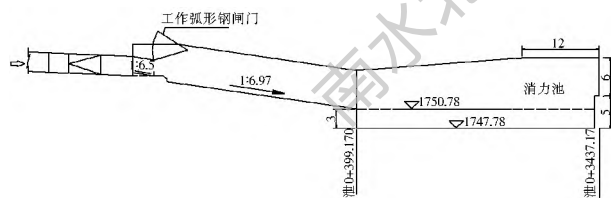


图 7 隧洞出口及消能段纵剖面图

Fig. 7 The longitudinal profile of tunnel outlet and energy dissipation section

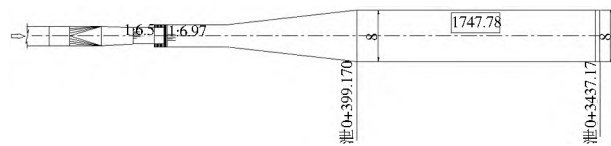


图 8 隧洞出口及消能段平面图

Fig. 8 The plan of tunnel outlet and energy dissipation section

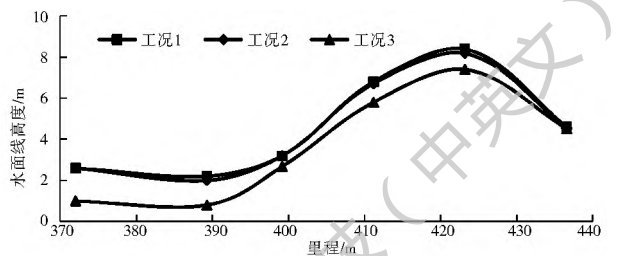


图 9 各工况下隧洞出口段与消能段水面线

Fig. 9 Height of water surface line at tunnel outlet and energy dissipation section in different conditions

4 试验结果分析

4.1 水面线

水面线测点沿隧洞出口及消能段中轴线布置,

下, 通过的流速大于 25 m/s 的消力池底板, 宜采用强度等级为 C40 及以上的混凝土; 通过的流速在小于 15 m/s 范围内, C35 的混凝土即满足要求^[12]。在消能防冲工况下(工况 2) 原方案消力池内最大临底流速为 26.0 m/s, 优化方案中消力池内最大临底流速为 12.34 m/s, 可知消力池设置跌坎后下泄水流能量得到充分耗散, 底流速极大衰减, 从而降低了对混凝土的强度要求。

表3 各工况消力池内实测最大临底流速分布

Tab. 3 Measured maximum underflow speed in stilling pool in different conditions

工况	实测最大临底流速/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
1	12.33
2	12.34
3	14.93

4.3 时均动水压强

沿消力池底板中轴线布置7个压力测点,测得各试验工况下消力池底板时均动水压强沿程变化趋势如图10所示。各工况下时均动水压强变化趋势一致,先急剧增加,后减小到最小值再缓慢增加,这是由于入射主流到达消力池底板的过程中,主流轴线最大流速极度衰减^[13],一部分动能转化为消力池底板上的压能,导致冲击区底板时均动水压强急剧增大^[14];由于跌坎的存在,增加了消力池内的消能水体,增大了入射水流^[15]的射程,主流流速沿程衰减,在冲击与附壁射流交界区域主流射向底板发生转向,

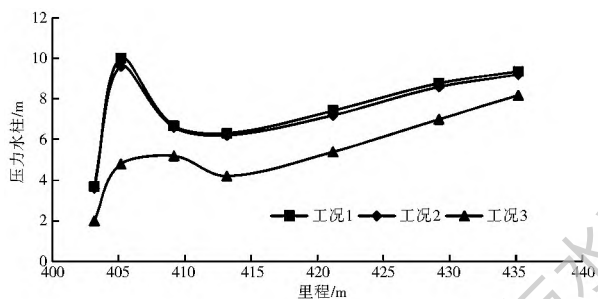


图10 消力池底板时均动水压强分布

Fig. 10 Distribution of time averaged dynamic water pressure on the bottom of the stilling pool

主流再附后形成淹没水跃^[16],淹没系数变大,时均动水压强减小;在附壁射流区呈现流速降低,水深增加,时均动水压强缓慢递增。

5 结论

本文以某工程为例,研究了在高水头条件下,跌坎型底流消能工跌坎深度在工程优化设计中的应用问题。通过优化隧洞出口段和消能段稳定了入池水流,降低了消力池内各项水力学指标,成功解决了消力池内出现远驱式水跃问题。基于紊动射流理论,采用以最大临底流速为控制目标的跌坎深度计算公式确定跌坎深度,通过水力模型试验表明,具有较好的合理性和可靠性,可为其他实际工程提供参考。

参考文献(References):

[1] 孙双科. 我国高坝泄洪消能研究的最新进展[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2009, 7(2): 249-255. (SUN Shuangke. Sun

mary of research on flood discharge and energy dissipation of high dams in China [J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2009, 7(2): 249-255. (in Chinese)) DOI: 10.13244/j.cnki.jjwhr.2009.02.007

- [2] 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]. Hydr Science and Engineering, 2008(1): 78-81. (in Chinese)) DOI: 10.16198/j.cnki.1009-640x.2008.01.015
- [3] 刘沛清. 自由紊动射流理论[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2008. (LIU Peiqing. The free turbulent jet theory [M]. Beijing: Beihang University Press, 2008. (in Chinese))
- [4] 张功育, 汤健, 王海军. 跌坎式底流消能工的消能机理分析与研究[J]. 南水北调与水利科技, 2005, 3(6): 43-45. (ZHANG Gongyu, TANG Jian, WANG Haijun. Analysis and research of energy dissipation for falling sill bottom flow [J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2005, 3(6): 43-45. (in Chinese)) DOI: 10.13476/j.cnki.nsr dqk.2005.06.014
- [5] 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 dissipator with step down floor [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2007, 38(10): 39-41. (in Chinese)) DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2007.10.018
- [6] 王海军, 赵伟, 杨红宣, 等. 坎深和入池角度对跌坎型底流消能工水力特性影响的试验研究[J]. 昆明理工大学学报: 理工版, 2007, 32(5): 87-90. (WANG Haijun, ZHAO Wei, YANG Hongxuan, et al. Test study on the influence of step depth and intake angle to hydraulic characteristic of the lip energy dissipater of hydraulic jump [J]. Journal of Kunming University of Science and Technology: Science and Technology, 2007, 32(5): 87-90. (in Chinese)) DOI: 10.16112/j.cnki.53-1223/n.2007.05.021
- [7] SL 155-95, 水工模型试验规程, 2版[S]. (SL 155-95, Hydraulic model test procedure, 2nd Edition [S]. (in Chinese))
- [8] 张闻辉, 王海军, 郑雪, 等. 跌坎型底流消能工混凝土底板冲磨破坏机理分析[J]. 昆明理工大学学报: 理工版, 2010, 35(1): 74-78. (ZHANG Wenhui, WANG Haijun, ZHENG Xue, et al. Erosion and destroy mechanism of concrete base plate in step down energy dissipator [J]. Journal of Kunming University of Science and Technology: Science and Technology, 2010, 35(1): 74-78. (in Chinese))
- [9] 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 Wenhui, et al. Numerical simulation analysis of step down depth influence on hydraulic characteristics of energy dissipator with step down floor [J]. Journal of Kunming University of Science and Technology (Science and Technology), 2010, 35(2): 51

55. (in Chinese)
- [10] 孙双科,柳海涛,夏庆福,等.跌坎型底流消力池的水力特性与优化研究[J].水利学报,2005,36(10).(SUN Shuangke, LIU Haitao, XIA Qingfu, et al. Study on stilling basin with step down floor for energy dissipation of hydraulic jump in high dams [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2005, 36(10). (in Chinese)) DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.2005.10.008
- [11] 崔召,张建蓉,张强.跌坎型底流消能工的跌坎最小深度研究[J].南水北调与水利科技,2015,13(3):510-513.(CUI Zhao, ZHANG Jianrong, ZHANG Qiang. Minimum falling sill depth of the falling-sill bottom flow dissipation [J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2015, 13(3): 510-513. (in Chinese)) DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2015.03.024
- [12] DL/T 5207. 水工建筑物抗冲磨防空蚀混凝土技术规范[S]. (DL/T 5207, Technical specification for abrasion and cavitation resistance of concrete in hydraulic structures [M]. (in Chinese))
- [13] 张长高. 水动力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2008. (ZHANG Chang gao. Hydrodynamics [M]. Beijing: Higher Education Press, 2008. (in Chinese))
- [14] 吴智源, 张建蓉, 崔召, 等. 跌坎型底流消能工冲击区时均动水压强分布与抗冲磨强度确定[J]. 南水北调与水利科技, 2015, 13(6): 1118-1123. (WU Zhi yuan, ZHANG Jianrong, CUI Zhao, et al. Distribution of time averaged dynamic water pressure and abrasion resistance in the impact zone of bottom flow dissipation with step down floor [J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2015, 13(6): 1118-1123. (in Chinese)) DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2015.06.021
- [15] 董志勇. 射流力学[M]. 北京: 科学出版社, 2005. (DONG Zhi yong. Jet mechanics [M]. Beijing: Science Press, 2005. (in Chinese))
- [16] 黄海艳, 张强, 王海军. 跌坎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 Hai yan, ZHANG Qiang, WANG Hai jun. Experimental research on hydraulic characteristics of underflow for energy dissipators by hydraulic jumps with sudden expansion and abrupt drop [J]. China Rural Water and Hydropower, 2010(7): 86-88. (in Chinese))
- [17] Rajaratnam N. Turbulent jets [M]. Amsterdam: Elsevier Science Publ Co, 1976.
- [18] Stanisic M. The mathematical theory of turbulence [M]. New York: Springer Verlag, 1984.
- [19] Rajaratnam N. Hydraulic jumps [J]. Advances in Hydroscience. 1967, 4(1): 197-280.
- [20] Frost W, Moulden T H. Hand book of turbulence [M]. New York: Plenum Press, 1977.

《南水北调与水利科技》编辑部郑重声明

《南水北调与水利科技》自创刊以来,从未委托任何中介机构、网站及个人征稿,请广大读者、作者提高警惕,不要通过他人投稿,更不要向他人或不明机构缴纳任何费用。

编辑部投稿网址: www.nsbdqk.net, 电话: 0311- 85020535, 85020639, 85020512。

《南水北调与水利科技》编辑部