

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2018.01.012

浅俯淹没射流水力特性

张春财^{1,2}, 杜宇³, 赵润达^{1,2}

(1. 长沙理工大学水利工程学院, 湖南 长沙 410114; 2. 水沙科学与水灾害防治湖南省重点实验室, 湖南 长沙 410114;
3. 湖南水利水电职业技术学院水利建筑工程系, 湖南 长沙 410131)

摘要: 为探讨浅俯淹没射流的水力特性,采用粒子成像测速技术获得水垫塘精细流场,系统分析淹没射流区和附壁射流区纵面二维流速分布规律。通过研究获得了淹没射流区和附壁射流区沿程流速衰减和垂直于主流断面流速分布的公式。结果表明,浅俯淹没射流沿入射角射入水垫塘,射流潜底的俯角大于入射角;淹没射流区沿程流速衰减率大于附壁射流区;淹没射流区和附壁射流区沿程各垂直于主流的断面流速分布具有相似性或自保持性。

关键词: 浅俯淹没射流;淹没射流区;附壁射流区;水力特性;粒子成像测速;淹没射流入射角;淹没射流俯角;水垫塘

中图分类号:TV135.2⁺3 文献标志码:A 文章编号:1000-1980(2018)01-0078-05

Research on the hydrodynamic characteristics of shallow submerged jet with depression angle

ZHANG Chuncai^{1,2}, DU Yu³, ZHAO Runda^{1,2}

(1. School of Hydraulic Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China;
2. Key Laboratory of Water-Sediment Sciences and Water Disaster Prevention of Hunan Province, Changsha 410114, China;
3. Department of Hydraulic Construction Engineering, Hunan Technical College of Water Resources and HydroPower, Changsha 410131, China)

Abstract: In order to study the hydrodynamic characteristics of shallow submerged jet with depression angle, detailed flowing field of plunge pool was obtained by the Particle Image Velocimetry (PIV) technology, and the law of the two-dimensional longitudinal velocity distribution was analyzed systematically. Formulas of the velocity attenuation along the flow-path and the velocity distribution of cross section perpendicular to the primary flow in the submerged plunged jet region and wall attached jet region have been obtained from the study. The results showed that the shallow submerged jet issued into the plunge pool by a incidence angle and the depression angle of dived jet was larger than the incidence angle. Attenuation ratio of velocity in the submerged plunged jet region was greater than that in the wall attached jet region. Besides, the velocity distribution of the cross section perpendicular to the primary flow had similarity or self-holding.

Key words: shallow submerged jet with depression angle; submerged plunged jet region; wall attached jet region; hydrodynamic characteristics; Particle Image Velocity; incidence angle; depression angle; water cushion

在我国西部山区河流上修建的高坝枢纽具有水头高、流量大、河谷窄的特点,其下游消能防冲是工程建设的关键性问题。传统底流消能在中、低水头电站得到广泛应用,但无法满足高坝大单宽泄洪功率的要求,

基金项目: 国家自然科学基金(50279040);湖南省教育厅科学研究重点项目(2014A006)

作者简介: 张春财(1976—),男,讲师,博士,主要从事高速水力学和计算水力学研究。E-mail: echun_1226@163.com

引用本文: 张春财,杜宇,赵润达. 浅俯淹没射流水力特性[J]. 河海大学学报(自然科学版),2018,46(1):78-82. DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2018.01.012.

水垫塘内近底流速大、底板稳定性差^[1-3];挑流消能具有良好的消能效果,但泄洪时产生的雾化对环境的影响难以避免^[4-6]。为此,长沙理工大学水利学院和中国水电顾问集团中南勘测设计研究院科学研究所结合位于云南托巴水电站的消能工方案研究^[7-8],设计溢流坝末端底部高程降低至下游水面以下,下泄水舌经跌坎以一定俯角从水垫浅表层潜入下游水体,形成浅俯淹没射流,经初步研究,发现浅俯淹没射流水舌完全位于水下,是一种低雾化的消能方式,能有效减小水垫塘内的水跃长度、降低近底流速。已有的研究成果^[9-12]表明,射流在水垫塘内紊动扩散,沿主流方向形成 3 个不同性质的子区域,即淹没射流区(I 区)、冲击射流区(II 区)和附壁射流区(III 区)。如图 1 所示,在淹没射流区,射流水舌以俯角潜入下游水垫并沿程扩散,淹没射流与周围水体发生强烈剪切;在冲击射流区,潜底主流流线急剧弯曲,流速迅速减小,冲击水垫塘底板,形成较大的动水压强;在附壁射流区,主流贴底射出、沿程扩散并迅速跃起,其顶部形成较大的横轴涡滚。

1 物理模型

试验利用向家坝水电站冲沙孔物理模型,按重力相似准则设计,模型比尺为 1 : 40。物理模型包括上游水库、排沙洞、水垫塘及下游回水池等 4 部分。上游水库为宽大型钢板蓄水池。射流出口宽 $b_0=0.15\text{ m}$ 、高 $h=0.09\text{ m}$,射流入池平均流速 $v_0=3.699\text{ m/s}$,跌坎高 $s=0.5\text{ m}$,设计射流喷嘴入水角 $\alpha=15^\circ$ 。调整下游出口闸门开度,下游水垫深度 $H=0.7\text{ m}$ 时,水垫塘中形成临界淹没射流。水垫塘为试验段,布置在长 6 m、宽 0.3 m、高 1 m 的玻璃水槽中。水垫塘下游设计跌水流入回水池,由水泵向大型钢板蓄水池供水。流场测试采用美国 TSI 公司生产的粒子图像测速仪(PIV),系统组成和采样参数见文献[13]。需要说明的是,水垫塘模型尺寸大而 PIV 采样范围有限,不能同时对整个流场进行同时测试,故采用一次放水过程、分块多次测试,对每一幅图像数据进行处理,最后分析整个水垫塘流速数据,获得浅俯淹没射流的水垫塘流场结构如图 2 所示。

为分析方便,图 2 所示水垫塘中轴面设置原坐标系 xOz 和参考坐标系 $XO'Z$ 。冲击滞点 S 即为原坐标系原点 O ,沿附壁射流主流方向(纵向)设为 x 轴,与附壁射流主流垂直(竖向)设为 z 轴;底坎面与射流中轴线交点为参考坐标系原点 O' ,沿淹没射流主流方向(轴向)设为 X 轴,与淹没射流主流垂直(垂向)设为 Z 轴。

2 试验结果与分析

2.1 淹没射流区水力特性

淹没射流区, MM 为沿淹没射流垂向(Z 轴)的断面, $v_{\max}$ 为垂向断面上的最大流速,主流线为射流各垂向断面上最大流速点的连线。图 3 给出了主流线位置。设射流入射角为 α ,淹没射流潜底俯角为 θ 。根据紊动射流理论,自由射流沿流程可分为初始段和主体段^[14]:在射流初始段 $x/x_0<0.2$ ($x_0=1.07\text{ m}$),淹没射流沿入射角 α 射入水垫塘,即 $\theta\approx\alpha$;射流主体段 $0.2<x/x_0<1$,淹没射流向上游发生一定偏转,即 $\theta>\alpha$ 。分析其原因,射流主流线位置受潜底主流流程 $s/(b_0\sin\theta)$ 相对值的影响,相同跌坎高度和入水宽度下,入射角越大,水下流程越长,主流段因流速衰减更易受上游涡滚挤压的影响而偏向上游。因此,与前人研究较大入射角的直线扩散^[15-17] $\theta=\alpha$ 相比,滞点位置更靠上游。由图 3 可见,射流初始段长度比主体段短,对主流线位置影响小,故射流主流线在水下近似为直线,俯角 $\theta=28.35^\circ$,回归分析得到主流线位置公式(相关系数 $R^2=0.9958$):

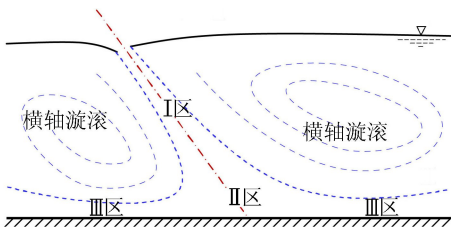


图 1 淹没射流分区示意图
Fig.1 Partition schematic diagram of a submerged jet

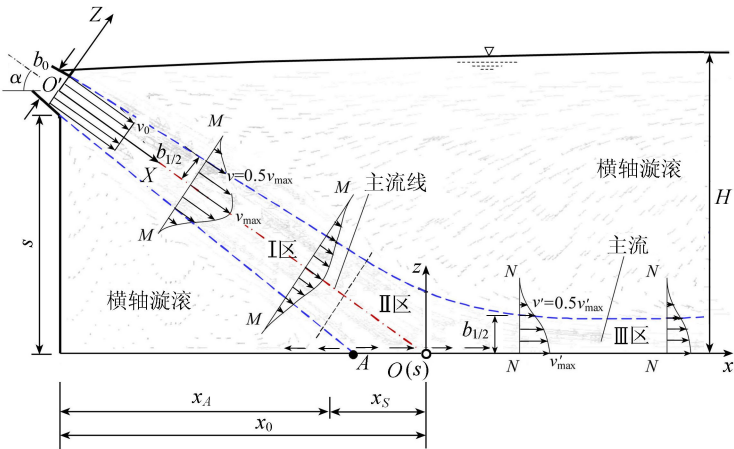


图 2 浅俯淹没射流水流结构
Fig.2 Flow structure of a shallow submerged jet

$$z = -0.5395x + 0.0109 \tag{1}$$

淹没射流区主流线上最大流速沿轴向(X 方向)流程衰减如图4所示, X/b_0 和 $v_{\max}/v_0$ 分别为 X 坐标和 MM 断面最大流速的无量纲量。由图4可见,初始段射流与周围水体发生的剪切,尚未影响到射流主流线, $v_{\max}$ 衰减慢;主体段射流主流线流速沿程衰减速度快,在冲击区附近,最大流速衰减至射流出口流速的48.2%。经回归分析,得到射流主流线在主体段上的最大流速衰减公式($R^2 = 0.9958$):

$$\frac{v_{\max}}{v_0} = -0.0029\left(\frac{X}{b_0}\right)^2 - 0.018\left(\frac{X}{b_0}\right) + 1.0198 \tag{2}$$

在淹没射流区,射流在初始段垂向断面(MM 断面)的流速分布较均匀。射流在主体段与平面自由紊动射流主体段水流结构相似,主流在断面 MM 上的流速分布是相似的或自保持的,可用函数表示为

$$\frac{v}{v_{\max}} = f\left(\frac{Z}{b_{\frac{1}{2}}}\right) \tag{3}$$

式中: $b_{1/2}$ ——射流特征尺寸。

定义流速 $v=v_{\max}/2$ 点的 Z 值为淹没射流沿 X 方向运动的射流半扩展厚度。

以 $(Z/b_{1/2})^2$ 为横坐标,以 $\ln(v/v_{\max})$ 为纵坐标,二者之间的关系如图5所示,作线性回归,得到关系式($R^2 = 0.9349$):

$$\ln\left(\frac{v}{v_{\max}}\right) = -0.8312\left(\frac{Z}{b_{\frac{1}{2}}}\right)^2 \tag{4}$$

根据式(4)可得

$$\frac{v}{v_{\max}} = \exp\left[-0.8312\left(\frac{Z}{b_{\frac{1}{2}}}\right)^2\right] \tag{5}$$

Rajaratnam在文献[18]中,给出了无限水深平面自由射流下,描述不同射流断面平均流速分布的2种形式的经验方程为

$$\frac{v}{v_{\max}} = \exp\left[-0.693\left(\frac{Z}{b_{\frac{1}{2}}}\right)^2\right] \tag{6}$$

$$\frac{v}{v_{\max}} = 1 - \tanh^2\left(0.881\frac{Z}{b_{\frac{1}{2}}}\right) \tag{7}$$

以 $Z/b_{1/2}$ 为横坐标, $v/v_{\max}$ 为纵坐标,将试验数据点绘在图6中,并将式(5)~(7)表达的关系曲线绘制于图中。由图6可知,在淹没射流区下部,即近冲击区,射流流速小于无限水深自由射流流速,这是由于受水垫塘底板约束,射流流速衰减加快所引起的。

2.2 附壁射流区水力特性

淹没射流潜底后形成底板动水压强较大的冲击区,冲击区底板动水压强最大的点为冲击滞点。在滞点上下游射流偏转形成上下游附壁射流区:上游附壁射流区范围和流速较小,水流相对平稳;下游附壁射流区范围和流速大,水流紊动剪切剧烈,是需要重点研究的区域,即本文研究的内容。在附壁射流区, NN

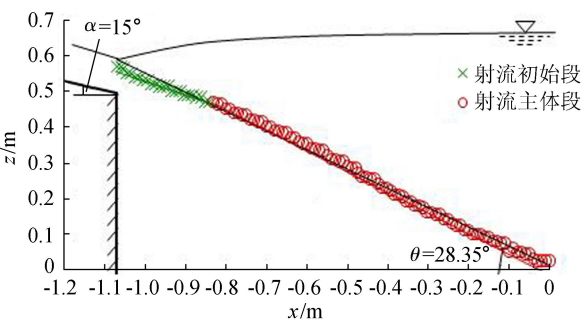


图3 淹没射流区主流线位置

Fig.3 Mainstream position in the region of submerged jet

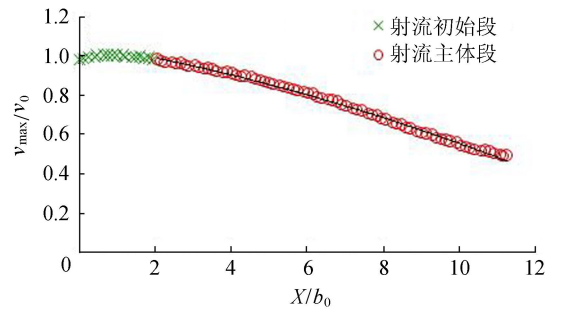


图4 淹没射流区最大流速衰减情况

Fig.4 Maximum velocity attenuation in the region of submerged jet

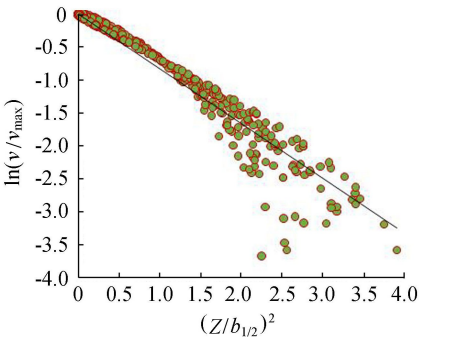


图5 淹没射流区流速的线性回归

Fig.5 Linear-regression of the velocity in the region of submerged jet

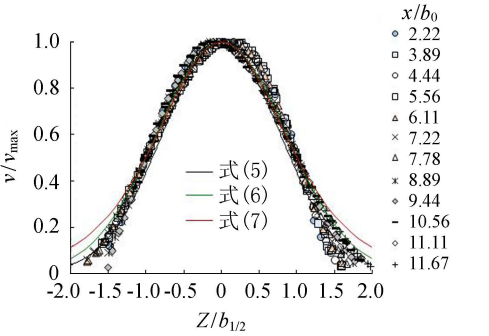


图6 淹没射流区流速的无量纲分布

Fig.6 Non-dimensional velocity in the region of submerged jet

为沿附壁射流竖向(z 轴)的断面, $v'_{\max}$ 为竖向断面上的最大流速,研究发现附壁射流主流线在近水垫塘底板且沿程衰减, $v'_{\max}$ 亦可称为近底流速。图 7 描述了主流线流速的衰减情况, x/b_0 和 $v'_{\max}/v_0$ 分别为 x 坐标和 NN 断面最大流速的无量纲量。由图 7 可知,滞点处最大流速为射流出口流速的 50.76%,附壁射流区最大流速呈线性衰减,与淹没射流区主流线流速比较,附壁射流区最大流速衰减率小。回归分析得到线性公式($R^2=0.9777$):

$$\frac{v'_{\max}}{v_0} = -0.0155\left(\frac{x}{b_0}\right) + 0.4946$$

(8)

在附壁射流区,由滞点处起的 NN 断面与淹没射流主体段的 MM 断面流速分布类似,也具有相似性,因此, NN 断面流速的分析方法与淹没射流区采用相同的方法。如图 8 所示,以 $(z/b_{1/2})^2$ 为横坐标,以 $\ln(v'/v'_{\max})$ 为纵坐标,二者之间线性回归得到的关系式($R^2=0.9327$):

$$\ln\left(\frac{v'}{v'_{\max}}\right) = -0.7382\left(\frac{z}{b_{1/2}}\right)^2$$

(9)

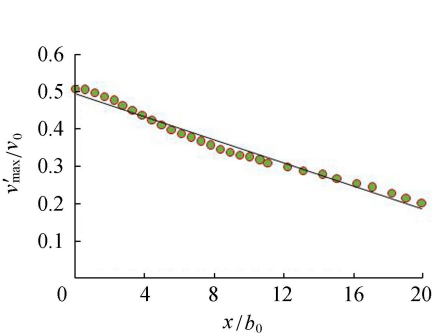


图 7 附壁射流区最大流速衰减

Fig.7 Maximum velocity attenuation in the region of wall attached jet

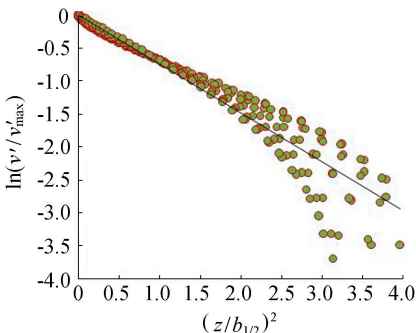


图 8 附壁射流区流速的线性回归结果

Fig.8 Linear-regression of the velocity in the region of wall attached jet

根据式(9)可得 $z/b_{1/2}$ 和 $v'/v'_{\max}$ 之间的关系式:

$$\frac{v'}{v'_{\max}} = \exp\left[-0.7382\left(\frac{z}{b_{1/2}}\right)^2\right]$$

(10)

文献[9]给出了大入射角下附壁射流区不同射流断面的流速分布公式:

$$\frac{v'}{v'_{\max}} = \exp\left[-0.645\left(\frac{z}{b_{1/2}}\right)^2\right]$$

(11)

将 $z/b_{1/2}$ 与 $v'/v'_{\max}$ 的试验数据,以及式(10)(11)(5)和(6)指数曲线关系绘于图 9。由图 9 可知,在水垫塘的淹没射流区、附壁射流区与无限水深平面自由射流区,垂直于主流断面的流速分布具有较类似的分布,只是受到壁面边界影响和射流与漩涡间剪切作用大小的不同,公式中的系数有一定差别。附壁射流流态可理解为淹没射流或自由射流,滞点为射流的起始位置,水垫塘底板为射流的对称轴。

3 结 论

- a. 在淹没射流区的初始段,射流沿入射角射入水垫塘,淹没射流俯角等于入射角;在淹没射流区主体段,射流偏向上游,淹没射流俯角大于入射角。初始段长度远小于主体段,射流主流线可近似为直线,射流俯角大于入射角。
- b. 淹没射流区和附壁射流区的射流主流流速沿流程衰减,在淹没射流区初始段流速衰减小,主体段流速衰减大,在附壁射流区流速线性衰减。淹没射流区流速衰减率大于附壁射流区。

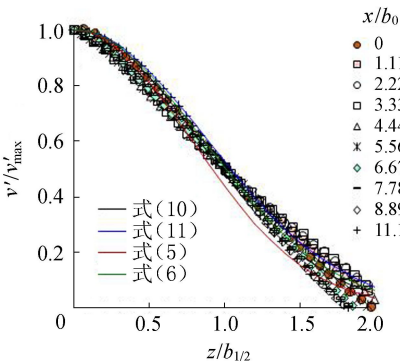


图 9 附壁射流区流速的无量纲分布
Fig.9 Non-dimensional velocity in the region of wall attached jet

c. 淹没射流区和附壁射流区垂直于主流的断面流速,与无限水深平面自由射流具有类似的分布规律,且沿程各断面流速分布具有相似性或自保持性。

参考文献:

[1] 岳鹏博,周赤,姜伯乐,等. 底流消力池空化特性探讨[J]. 水力发电学报, 2013, 32(6): 104-107. (YUE Pengbo, ZHOU Chi, JIANG Bole, et al. Discussion on cavitation characteristics of bottom flow still basin[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2013, 32(6): 104-107. (in Chinese))

[2] 李志高,翟静静,向光红. 跌坎型底流消能试验研究[J]. 人民长江, 2009, 40(23): 28-29. (LI Zhigao, ZHAI Jingjing, XIANG Guanghong. Study of stilling basin with step-down floor[J]. Yangtze River, 2009, 40(23): 28-29. (in Chinese))

[3] 孙双科,柳海涛,夏庆福,等. 跌坎型底流消力池的水力特性及优化研究[J]. 水利学报, 2005, 36(10): 1188-1193. (SUN Shuangke, LIU Haitao, XIA Qingfu, et al. Study of hydraulic characteristics and optimization of stilling basin with step-down floor[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2005, 36(10): 1188-1193. (in Chinese))

[4] 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): 89-95. (SUN Shuangke. Summary 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): 89-95. (in Chinese))

[5] 杜俊慧,姜伯乐,李国勇,等. 泄洪消能设计与试验研究[J]. 人民长江, 2008, 39(4): 31-33. (DU Junhui, JIANG Bole, LI Guoyong, et al. Test and design on energy dissipation of discharged flood[J]. Yangtze River, 2008, 39(4): 31-33. (in China))

[6] 王思莹,刘向北,陈端. 挑流水舌泄洪雾化源形成过程研究[J]. 长江科学院院报, 2015, 32(2): 53-57. (WANG Siying, LIU Xiangbei, CHEN Duan. Formation of atomization source caused by flood discharge flow nappe[J]. Journal of Yangtze River Scientific Reseach Institute, 2015, 32(2): 53-57. (in Chinese))

[7] 李延农,戴晓兵,吴沛涛,等. 云南省澜沧江托巴水电站重力坝低雾化泄洪消能水工整体模型试验报告[R]. 长沙: 中国电建集团中南勘测设计研究院有限公司, 2014.

[8] 李延农,戴晓兵,吴沛涛,等. 云南省澜沧江托巴水电站重力坝新挑流消能水工整体模型试验报告[R]. 长沙: 中国电建集团中南勘测设计研究院有限公司, 2013.

[9] POREH M, CERMARK J E. Flow characteristics of a circular submerged jet impinging normally on a flat boundary[C]//Anon. Preceedings of Sixth Midwestern Conference on Fluid Mechanics. Sixth Midwestern Conference on Fluid Mechanics. Austin, Tex; University of Texas,1959: 198-212.

[10] BELTAOS S, RAJARATNAM N. Impingement of axisymmetric developing jets[J]. Journal of Hydraulic Research, IAHR, 1977, 15(4): 311-326.

[11] RAJARATNAM N, SUBRAMANYA K. Plane turbulent reattached wall jets[J]. Journal of the Hydraulics Division, ASCE, 1968, 94(1): 95-112.

[12] 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 Rerources and Hydropower Engineering, 2007, 38(10): 39-41. (in Chinese))

[13] 蒋昌波,刘洋,邓斌,等. 出渗对均匀大粒径泥沙附近水动力特性影响[J]. 水科学进展, 2017,28(1): 1-9. (JIANG Changbo, LIU Yang, DENG Bin, et al. Effect of upward seepage on hydrodynamic characteristics around uniform coarse grains [J]. Advances in Water Science, 2017,28(1): 1-9. (in Chinese))

[14] 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.

[15] 崔召,王海军,田野. 跌坎型底流消能工淹没射流区流速衰变规律[J]. 南水北调与水利科技, 2016, 14(5): 157-162. (CUI Zhao, WANG Haijun, TIAN Ye. Formula of flow rate rate decay of submerged jet area in falling-sill bottom-flow energy dissipation[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science &Technology, 2016, 14(5): 157-162. (in Chinese))

[16] 李乃稳,李龙国,庄文化,等. 水垫塘冲击射流附壁区的水力特性[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2015, 47(3): 14-20. (LI Naiwen, LI Longguo, ZHUANG Wenhua, et al. Hydraulic characteristics of the wall-jet region in a pool with an oblique submerged jet[J]. Journal of Sichuan University(Engineering Science Edition), 2015, 47(3): 14-20. (in Chinese))

[17] 刘沛清,高季章,李永梅. 高坝下游水垫塘内淹没冲击射流实验[J]. 中国科学(E辑): 技术科学, 1998, 28(4): 370-377. (LIU Peiqing, GAO Jizhang, LI Yongmei. Experiments on the submerged jet in a plunge pool[J]. Science in China Series E: Technological Sciences, 1998, 28(4): 370-377. (in Chinese))

[18] RAJARATNAM N. Turbulent jets[M]. Amsterdam: Elsevier Science Publication Corporation, 1976.