

边表孔闸前吸气旋涡试验研究

马飞,王宇

(河海大学水利水电学院,江苏南京 210098)

摘要:针对多泄洪表孔的边表孔闸前极易产生强烈的吸气旋涡的问题,试验观察了边表孔闸前水流流态,分析了旋涡成因,并详细研究了工作水头、闸门开度、绕流距离及相邻表孔运行方式对吸气旋涡的影响以及吸气旋涡对表孔侧墙压力的影响。结果表明:该吸气旋涡主要是由边墩绕流效应引起,是发生在边表孔的特殊水流现象;旋涡涡心直径随工作水头和绕流距离的增大而增大,随闸门开度的增大而减小;相邻表孔全开与局部开启相比,边表孔闸前旋涡更大;吸气旋涡导致表孔下游侧墙出现负压,可能造成侧墙空蚀破坏,在实际工程中应注意对此类旋涡进行控制。

关键词:吸气旋涡;泄洪表孔;工作闸门;边墩绕流;试验研究

中图分类号:TV131.3⁺² **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2016)06-0035-04

Experimental study of vortex with air core in front of side crest outlet gate//MA Fei, WANG Yu(*College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China*)

Abstract: Large free-surface vortex with air-core easily occurs in front of gate at the side crest outlets. A series of physical model tests were conducted to observe the flow patterns, analyze the cause of vortex formation, study the influences of operating head, gate opening, distance from side pier to the reservoir bank and the operation conditions of crest outlet adjacent to side crest outlet on vortex, and discuss the effect of vortex on pressure of crest outlet surface. The results demonstrate that, the large vortex with air-core is mainly generated by flow around side pier, which is a special hydraulic phenomenon occurring at the side crest outlets. The air-core diameter of vortex decreases with the increase of gate opening, and increases with increasing operating head and distance from side pier to the reservoir bank; moreover, the vortex is larger when the gate of crest outlet adjacent to side crest outlet in fully opening than in partially opening conditions; the vortex leads to the occurrence of sub-pressure at the sidewall and even cavitation damage, so it should be controlled for practical engineering.

Key words: air core vortex; crest outlet; operation gate; flow around side-pier; experimental study

具有自由表面的吸气旋涡常发生在水电站的进水口或检修闸门槽处,它会引起降低过流能力、水流波动、空蚀破坏、结构振动及吸入水面漂浮物并堵塞进水口等问题^[1]。根据旋涡的形态和强度,可定性地分为不吸气旋涡、间歇性吸气旋涡和吸气旋涡三大类,其中对工程安全危害最大的是吸气旋涡^[2]。若干年来,吸气旋涡问题吸引了众多研究者的关注, Luca 等^[3] 试验研究了旋涡吸气发生点, Georg 等^[4] 研究了旋涡卷吸空气量, Jens 等^[5] 用 PIV 观测了旋涡流场。然而,由于存在气水交界面,理论上研究吸气旋涡的形成和发展仍较为困难^[6-7]。研究表明,进水口前旋涡的影响因素主要有淹没水深、进口形状、边界条件等^[8], 进水口淹没水深对旋涡的形成和发展是重要的^[9], 然而,由于旋涡的影响

因素较多,准确预测进水口的临界淹没水深仍是十分困难的。所以工程中常采用的消涡措施还是消涡梁、消涡栅和隔墙等^[10]。

除了进水口和闸门槽外,表孔闸门局部开启形成闸孔出流时,闸前往往也会出现旋涡。裴少锋^[11] 试验研究了对称进口边界条件下的表孔闸前旋涡,发现一个闸孔前常有左、右两个强度相同的旋涡。在闸门开度较大的工况下,会出现严重的间歇吸气漏斗旋涡。然而,对于多表孔中的边表孔,其边墩与库岸之间存在一定距离,因此边墩的绕流效应较中墩大很多。当边表孔闸孔出流时,边墩绕流效应会形成强度较大的旋转流动,从而促进了闸前吸气旋涡的形成和发展。本文试验观察了这种因边墩绕流效应引起的表孔闸前吸气旋涡,并研究了工作水头、闸门开度、边

墩绕流距离和相邻闸门运行方式对吸气旋涡的影响以及此类旋涡对表孔侧墙压力分布的影响。

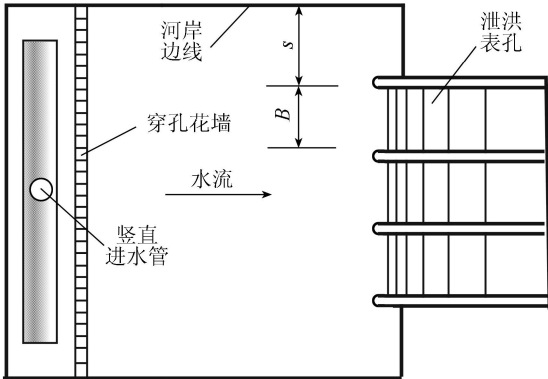
1 试验装置与方法

试验在河海大学高速水流实验室进行。模型试验以某水电枢纽工程为原型,模型比尺为1:80。该枢纽工程由碾压混凝土重力坝、坝身开敞式溢流表孔和右岸引水发电系统地下厂房等主要建筑物组成。最大坝高121.00 m,河床坝段布置3孔开敞式溢流表孔,表孔尺寸为13.00 m×20.50 m(宽×高),设计最大下泄流量为11 166 m³/s。图1为表孔物理模型照片。表孔泄洪时,水流自岸边向边墩内侧横向流动,产生边墩绕流,因此将边墩内侧到库岸的距离定义为绕流距离。本研究涉及的物理参数如下:绕流距离 s ,闸门开度 e ,表孔工作水头 H ,表孔净宽 B (模型尺寸 $B=16.25$ cm),各参数于图2中示出。试验中工作水头用水位测针测量,测量精度为0.1 mm。表1列出了模型试验参数,其中,M1~M4用于研究工作水头的影响,M5~M7用于研究闸门开度的影响,M8~M10用于研究绕流距离的影响,M11、M12与M2、M3用于研究相邻表孔运行方式的影响。



图1 表孔物理模型

为了研究吸气旋涡强度,需要测量旋涡涡心直径。直接测量水面处的涡心直径误差较大,水面以下1 cm深度附近涡心变化较小,试验中将此处的旋



(a) 平面图

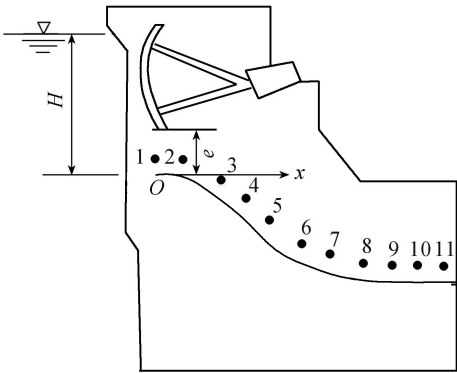
涡直径定义为涡心直径,用 D 表示。测量时采用测针竖向定位,用游标卡尺测量涡心直径,由于旋涡的不稳定性,多次测量后取平均值,涡心直径测量精度为2 mm。为了研究旋涡对侧墙压力的影响,在左边表孔左侧墙沿程布置了11个测压点,测压点距表孔底板均为3 cm。堰顶为 x 坐标轴原点,测压点1~11的 x 坐标分别为0、7.0 cm、9.2 cm、16.3 cm、22.0 cm、29.0 cm、37.5 cm、45.8 cm、53.0 cm、56.4 cm和59.0 cm,见图2(b)。

表1 模型试验参数

方案编号	e /cm	H /cm	s /cm	中表孔运行方式
M1	3.5	12.0~33.5	35.0	中表孔全开
M2	5.6	12.0~33.5	35.0	中表孔全开
M3	8.0	12.0~33.5	35.0	中表孔全开
M4	12.8	12.0~33.5	35.0	中表孔全开
M5	2.7~17.6	22.1	35.0	中表孔全开
M6	2.7~17.6	28.9	35.0	中表孔全开
M7	2.7~17.6	33.3	35.0	中表孔全开
M8	5.6	28.9	5.0~35.0	中表孔全开
M9	5.6	20.0	5.0~35.0	中表孔全开
M10	8.0	28.9	5.0~35.0	中表孔全开
M11	5.6	20.4~38.7	35.0	中表孔局部开启
M12	8.0	20.4~38.7	35.0	中表孔局部开启

2 流态观察

图3是试验方案M8的左边表孔闸前流态照片(中表孔全开,左边表孔闸门开度为5.6 cm,工作水头为28.9 cm,绕流距离为35 cm)。从图3中的水流流线可以看出:左边表孔左边墩绕流效应十分明显,漩涡转流自库岸始,直至左边表孔的右边墩处。在漩涡转流的作用下,闸前产生了一个较大的吸气旋涡。吸气旋涡通过闸门底缘向下游流动,在表孔下游侧墙附近溃灭,引起水流波动。所以,本试验观察到的表孔闸前吸气旋涡是由边墩绕流效应引起的,由于该旋涡较强且极易发生,所以对工程安全的危害较大。试验也观察了中表孔闸前旋涡情况,中表



(b) 立面图

图2 模型试验装置示意图

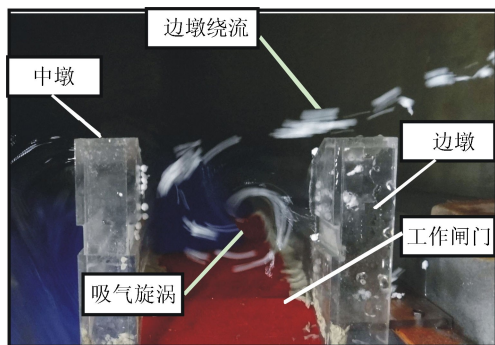


图3 左边表孔闸门前的吸气旋涡

孔闸前旋涡是成对出现的,即一个闸孔前有左、右两个旋涡。中表孔闸门小开度时仅在检修门槽附近出现微弱旋涡,无吸气。在闸门开度大且淹没深度一定时,才会出现间歇性吸气漏斗旋涡,这和对称进口边界条件下的表孔闸前旋涡现象是一致的^[11]。

3 吸气旋涡的特性

3.1 工作水头和闸门开度对吸气旋涡的影响

试验研究中,中表孔闸门全开。以左边表孔为例,图4给出了绕流距离一定($s=35\text{ cm}$),不同闸门开度下的相对工作水头 H/e 与旋涡涡心直径 D 的关系。从图4可以看出:在不同闸门开度下,当相对工作水头 H/e 达到某一临界值时,边表孔闸前开始形成吸气旋涡,并且涡心直径 D 随 H/e 的增大而线性增加。尽管在对称进口条件下的单表孔试验中发现闸前旋涡存在临界淹没深度^[11],但由于边墩绕流引起的边表孔闸前旋涡强度较大,且边表孔工作水头有限,水深达不到临界淹没深度。反而,当工作水头增大时,下泄流量增大,边墩绕流效应增强,从而加大了水流旋转速度,旋涡涡心直径随之增大。图5给出了绕岸距离一定($s=35\text{ cm}$),不同工作水头下的相对闸门开度 e/H 与涡心直径 D 的关系。由图5可知,当工作水头一定时,闸门开度增大,涡心直径随之减小。这主要是因为,若工作水头不变,闸门开度减小,则淹没水深增大。当淹没水深较小时,增大淹没水深会增强旋转流动,故闸门开度减小使闸前旋涡增大。因此,在表孔工作闸门运用中,应尽可能避免边表孔小开度运行。

3.2 绕流距离对吸气旋涡的影响

如前所述,边表孔闸前吸气旋涡是由边墩绕流引起的,所以绕流距离是闸前旋涡的重要影响因素。试验时中表孔闸门全开,图6给出了左边表孔在不同闸门开度和工作水头下的相对绕流距离 s/B 与旋涡涡心直径 D 的关系。由图6可以看出,当绕流距离大于某一临界值时,闸前旋涡开始吸气。绕流距离增加,边墩绕流效应增强,其引起的旋涡涡心直径

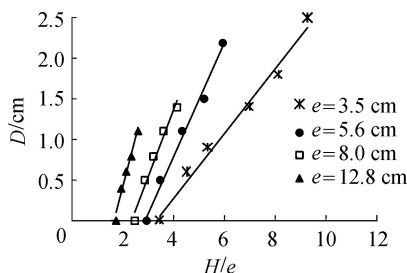


图4 相对工作水头与涡心直径的关系

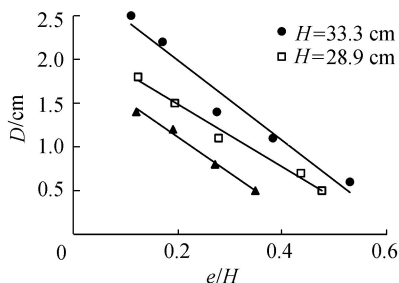


图5 相对闸门开度与涡心直径的关系

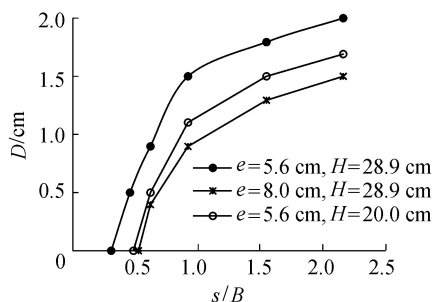


图6 相对绕流距离与涡心直径的关系

相应增大。然而当相对绕流距离 s/B 增大至0.9以后,闸前吸气旋涡涡心直径增速显著减小。为了减小绕流距离,从而减免边表孔闸前吸气旋涡,可采用在边表孔边墩上游设置导流墙等工程措施。

3.3 吸气旋涡对表孔侧墙压力的影响

为了研究吸气旋涡对表孔侧墙压力的影响,选择了相同水力条件下(中表孔全开,左表孔闸门开度为5.6 cm,工作水头分别为25.0 cm和33.3 cm)有吸气旋涡和无吸气旋涡两种情况下的表孔侧墙压力进行比较。当绕流距离 $s=35\text{ cm}$ 时,左表孔闸前发生了较大吸气旋涡;当绕流距离 $s=0$ 时,闸前无吸气旋涡(图7)。从图7还可以看出:当闸前发生吸气旋涡时,闸后表孔侧墙压力出现了负压,负压最大值达到了 -0.44 kPa ;而闸前无吸气旋涡的表孔侧墙压力正常,无负压发生。究其原因,是闸前旋涡吸气后形成涡管,涡管周围的水流压强为负压,当涡管接触到下游边墙壁面附近时,边墙壁面相应产生负压。所以,闸前吸气旋涡会引起下游边墙产生空蚀破坏,在实际工程中应注意对此类旋涡进行控制。另外需要说明的是,本研究中表孔出口采用窄缝坎挑流消能,故表孔出口段侧墙压力陡然增高。

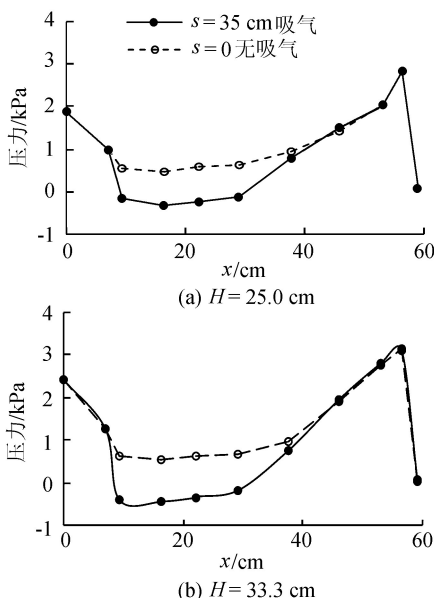


图7 表孔侧墙压力沿程分布 ($e=5.6\text{ cm}$)

3.4 中表孔运行方式对边表孔闸前旋涡的影响

前述研究是在中表孔工作闸门全开情况下进行的。中表孔作为边表孔的相邻表孔,其闸门运行方式对表孔进水口流态有显著影响,那么也一定会影响边表孔闸前旋涡。试验中观察到:当中表孔闸门与边表孔同步开启时,在边表孔闸前也产生了吸气旋涡(图8)。为了研究相邻表孔闸门运行方式对边表孔闸前旋涡的影响,以左边表孔为例,图9给出了中表孔全开和局部开启下边表孔闸前涡心直径的比较(中表孔局部开启时开度与边表孔相同)。由图9可知,中表孔全开工况边表孔闸前涡心直径大于局部开启工况,因为中表孔全开时,边表孔边墩绕流效应更强,从而闸前旋涡较大。因此,在实际工程运行中,边表孔局部开启泄洪时,与其相邻的表孔应尽可能避免全开运行。

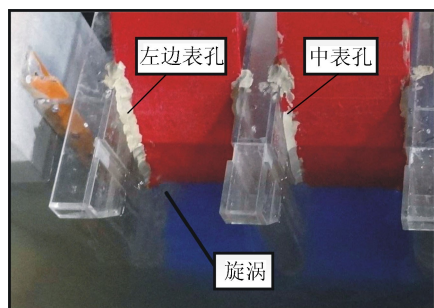


图8 中表孔局部开启时边表孔闸前吸气旋涡 ($s=35\text{ cm}$, $e=8\text{ cm}$, $H=25\text{ cm}$)

4 结论

在边墩绕流效应作用下,边表孔闸前极易出现较大的吸气旋涡。由于表孔工作水头有限,试验中未发现该吸气旋涡的临界淹没深度。旋涡涡心直径

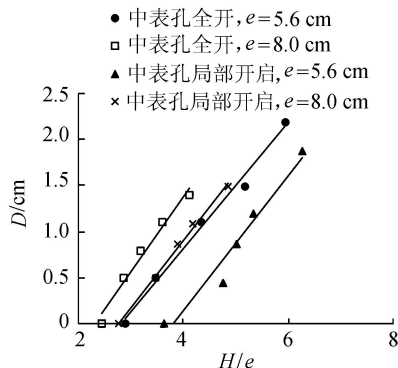


图9 中孔不同运行方式下边表孔闸前涡心直径的比较

随工作水头和绕流距离的增大而增大,随闸门开度的增大而减小,故边表孔应尽可能避免小开度运行,另外可设置导流墙以减小绕流距离,减免吸气旋涡。表孔闸前吸气旋涡随水流向下游流动时,涡管接触到表孔侧墙并在其附近溃灭,使侧墙壁面产生负压,带来空化空蚀风险。与边表孔相邻的中表孔运行方式对边表孔闸前旋涡有显著影响,相邻表孔全开较局部开启时边表孔闸前旋涡的涡心直径更大,故工程中应避免边表孔局部开启而与其相邻的中表孔全开运行的情况。

参考文献:

- [1] LI Haifeng, CHEN Hongxun, MA Zhen, et al. Experimental and numerical investigation of free surface vortex[J]. Journal of Hydrodynamics, 2008, 20(4): 485-491.
- [2] 段文刚, 黄国兵, 张晖, 等. 几种典型水工建筑物进水口消涡措施试验研究[J]. 长江科学院院报, 2011, 28(2): 21-27. (DUAN Wengang, HUANG Guobing, ZHANG Hui, et al. Experimental research on vortexes eliminating of several typical hydraulic intakes [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2011, 28(2): 21-27. (in Chinese))
- [3] LUCA C, MATTEO N, GIANFRANCO C. Experimental study on unstable free surface vortices and gas entrainment onset conditions[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2014, 52(1): 221-229.
- [4] GEORG M, MARTIN D, ROBERT M B. Vortex-induced air entrainment rates at intakes[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2015, 141(11): 04015026.
- [5] JENS K, GEORY M, ROBERT M B. PIV measurements of air-core intake vortices[J]. Flow Measurement and Instrumentation, 2014, 40: 74-81.
- [6] CHEN Yunliang, WU Chao, YE Mao, et al. Hydraulic characteristics of vertical vortex at hydraulic intakes[J]. Journal of Hydrodynamics, 2007, 19(2): 485-491.

(下转第89页)

面尺寸加大至 0.35 m×0.90 m 以上时,可使泵站结构自振频率错开脉动压力频率超过 20%,从而使其远离水流脉动压力频率,达到抗振减振的目的。

参考文献:

[1] 李玉莹,高峰,李清华,等.大型灯泡贯流泵站振动计算方法[J].水利水电科技进展,2014,34(5):69-73. (LI Yuying,GAO Feng,LI Qinghua,et al. Computing method of vibration in large bulb tubular pump system [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2014,34(5):69-73. (in Chinese))

[2] 王新,李同春,潘树军.淮阴三站泵房振动分析[J].水利水电科技进展,2008,28(5):49-53. (WANG Xin,LI Tongchun, PAN Shujun. Vibration analysis of the pumphouse of the third Huaiyin Pumping Station [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2008,28(5):49-53. (in Chinese))

[3] 邢磊,李同春,王新.淮阴三站灯泡式贯流泵抗振安全度评价[J].水电能源科学,2008,26(5):116-118. (XING Lei,LI Tongchun,WANG Xin. Evaluation of anti vibration safety degree of bulb tubular pumping station structure[J]. Water Resources and Power,2008,26(5):116-118. (in Chinese))

[4] 赵路静,张燎军,张汉云,等.钢制流道立式轴流泵站振动特性分析及安全评价[J].水电能源科学,2016,34(1):146-149. (ZHAO Lujing,ZHANG Liaojun,ZHANG Hanyun,et al. Vibration characteristics analysis and safety evaluation of steel-made flow passage in vertical axial-flow pumping station[J]. Water Resources and Power,2016,34(1):146-149. (in Chinese))

[5] 李四海,陈松山,周正富,等.竖井贯流泵装置压力脉动数值分析[J].水电能源科学,2015,33(7):175-179. (LI Sihai, CHEN Songshan, ZHOU Zhengfu, et al. Pressure fluctuation numerical analysis of shaft tubular pump device[J]. Water Resources and Power,2015,33(7):175-179. (in Chinese))

[6] 欧阳金惠,三峡电站厂房结构振动研究[D].北京:中

国水利水电科学研究院,2005.

[7] 马震岳,王溢波,董毓新,等.红石水电站机组振动及诱发厂坝振动分析[J].水力发电,2000(9):52-54. (MA Zhenyue,WANG Yibo,DONG Yuxin,et al. Analysis of generating unit vibration and its induction effect on the powerhouse and dam vibration in the Hongsi Hydro Station [J]. Journal of Hydroelectric Engineering,2000(9):52-54. (in Chinese))

[8] 陈婧,马震岳,刘志明,等.水轮机压力脉动诱发厂房振动分析[J].水力发电学报,2004,30(5):24-27. (CHEN Jing,MA Zhenyue,LIU Zhiming,et al. Vibration analysis of power house due to the pressure pulsation of hydro-turbine. [J]. Journal of Hydroelectric Engineering,2004,30(5):24-27. (in Chinese))

[9] 张燎军,魏述和,陈东升.水电站机厂房振动传递路径的仿真模拟及结构振动特性研究[J].水力发电学报,2012,31(1):108-113. (ZHANG Liaojun,WEI Shuhe, CHEN Dongsheng. Simulation of transmission path and study on structural vibration of hydropower house [J]. Journal of Hydroelectric Engineering,2012,31(1):108-113. (in Chinese))

[10] 丁晓唐,王云极,江泉,等.淮安第三抽水站泵站贯流泵房动力特性的数值和测试研究[J].河海大学学报(自然科学版),2008,36(1):49-53. (DING Xiaotang,WANG Yunji,JIANG Quan,et al. Numerical and testing research on dynamic characteristics of a tubular pump house of the third Huaian Pumping Station [J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2008,36(1):49-53. (in Chinese))

[11] 邢永欣.灯泡贯流式厂房结构计算分析[D].西安:西安理工大学,2006.

[12] 胡志刚.大型水电站地下厂房结构振动计算研究[D].天津:天津大学,2003.

[13] 马震岳,董毓新.水电站机组及厂房振动的研究与治理[M].北京:中国水利水电出版社,2004.

(收稿日期:2015-11-10 编辑:熊水斌)

(上接第 38 页)

[7] FRANK S G, SUSAN J G, MARC V, et al. Free surface intake vortices: scale effects due to surface tension and viscosity[J]. Journal of Hydraulic Research, 2014, 52(4): 513-522.

[8] YANG J, LIU Ting, BOTTACIN B A, LIN Chang. Effects of intake-entrance profiles on free-surface vortices [J]. Journal of Hydraulic Research, 2014, 52(4): 523-531.

[9] WANG Yingkui, JIANG Chunbo, LIANG Dongfang. Investigation of air-core vortex at hydraulic intakes [J].

Journal of Hydrodynamics, 2010, 22(5): 696-701.

[10] 党媛媛,韩昌海.进水口旋涡问题研究综述[J].水利水电科技进展,2009,29(1):90-94. (DANG Yuanyuan, HAN Changhai. Study of intakes vortex [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2009, 29(1): 90-94. (in Chinese))

[11] 裴少锋.闸前旋涡水力特性及消除措施试验研究[D].大连:大连理工大学,2012.

(收稿日期:2016-05-10 编辑:骆超)