

DOI: 10. 20040/j. cnki. 1000-7709. 2023. 20230396

# 一种消除闸前立轴漩涡的横向消涡栅的水力特性研究

岳 振<sup>1</sup>, 陈海坤<sup>2</sup>, 田 忠<sup>1</sup>

(1. 四川大学水力学与山区河流开发保护国家重点实验室, 四川 成都 610065;  
2. 中国电建集团贵阳勘测设计研究院有限公司, 贵州 贵阳 550081)

**摘要:** 在金沙江 CB 水电站水工模型试验中, 泄洪闸前出现了偶发的贯穿性漩涡, 为了消除该漩涡, 对已有的一种垂向消涡栅进行了改进, 并提出了一种新的横向消涡栅, 试验测量了该型消涡栅的闸前流场、漩涡尺度、漩涡产生频率等参数, 并分析了其消涡效果。结果表明, 本文所提出的横向消涡栅相较以往的垂向消涡栅有更好的消涡效果, 是一种成本低廉、高效的泄洪闸消涡设施。

**关键词:** 泄洪闸; 立轴漩涡; 模型试验; 横向消涡栅; 垂向消涡栅

**中图分类号:** TV671 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-7709(2023)10-0200-04

## 1 引言

水工建筑物进水口前生成的立轴漩涡会产生多种危害, 如过水能力下降、水流流态恶化、建筑物脉动压力变幅增加等。进水口前所产生的漩涡根据其所产生的位置可划分为自由表面漩涡、流体内部漩涡、管道螺旋流, 其中自由表面漩涡在实际工程中所造成的危害最大。美国 Alden 实验室<sup>[1]</sup>将自由表面漩涡分为表面涡纹漩涡、表面凹陷漩涡、染料核漩涡、明显下陷漩涡、间歇性吸气漩涡、持续性吸气漩涡, 当建筑前出现间歇性吸气漩涡或持续性漩涡等有害漩涡时, 采用消涡措施消除立轴漩涡是必要的。对于消涡措施已进行了大量研究, 如谌诚等<sup>[2]</sup>针对抽水蓄能发电同发同抽时产生的立轴漩涡提出了抬高死水位和再增设隔墙两种消涡方案; 邹敬民等<sup>[3]</sup>将消除旋涡的结构物分为水平布置防涡梁、V 型防涡梁和阶梯立式防涡梁, 详细地阐述了不同种类结构物的适用条件; 严根华等<sup>[4]</sup>认为进水口前滞水区内不同流速水体的碰撞是立轴漩涡产生的主要原因, 提出固定式消涡栅的结构尺寸和安装高程需综合进水口前滞水区范围、水工建筑物运行水位等水力因素进行设计; 赵晶等<sup>[5]</sup>通过优化在闸前近坝区的导水墙体型改善进水口水流流态, 消除闸前间歇性吸气漩涡。金沙江上游 CB 水电站采用混合式

开发, 为径流式电站, 在电站水工模型试验中, 泄洪闸前出现了偶发的吸气漩涡。本文针对金沙江 CB 水电站闸坝漩涡问题, 采用水力学模型试验方法, 研究了闸前漩涡特性, 进而提出了一种新的横向消涡栅, 并深入研究了消涡效果, 结果可为解决泄洪闸前漩涡问题提供参考。

## 2 试验装置及测试手段

### 2.1 试验装置

CB 水电站首部枢纽包括左岸河床式厂房、左岸鱼道、右岸非溢流坝段, 从左到右依次布置河床泄水坝段, 河床泄水坝段包括五孔泄洪闸和一孔冲沙闸。试验模型为正态模型, 比尺为 1:60, 为了保证进、出流的相似性, 模拟范围从坝轴线上游 400 m 至坝轴线下游 450 m, 试验模型见图 1、2。试验遵循重力相似(弗劳德数相似)准则, 几何比尺  $\lambda_L = 60$ , 流速比尺  $\lambda_v = \lambda_L^{0.5} = 7.746$ , 流量比尺

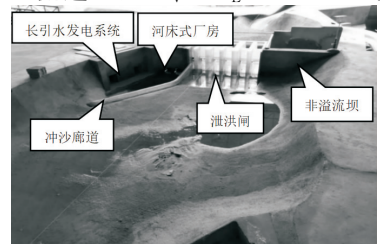


图 1 模型照片

Fig. 1 Model photos

收稿日期: 2023-03-16, 修回日期: 2023-05-17

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(51939007)

作者简介: 岳振(1999-), 男, 硕士研究生, 研究方向为水力学及河流动力学, E-mail: yuezhen@stu.scu.edu.cn

通讯作者: 田忠(1977-), 男, 研究员、硕导, 研究方向为高速水力学, E-mail: tianzhong@scu.edu.cn

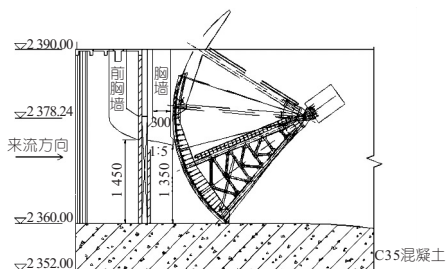


图 2 泄洪闸剖面图(单位:cm)

Fig. 2 Sluice gate profile

$$\lambda_Q = \lambda_L^{2.5} = 27\ 885, \text{糙率比尺 } \lambda_n = \lambda_L^{1/6} = 1.979.$$

### 2.2 测试手段

在试验过程中,闸前漩涡的流态通过高精度相机进行观测;漩涡出现位置、漩涡半径、闸门开度通过钢尺量测完成;闸前流场通过 PIVlab 对数字图像处理得到,PIVlab 是由 THIELICKE W 等<sup>[6]</sup>开发的粒子图像测速系统,已广泛应用于流动测量领域,且精度较高<sup>[7]</sup>。

## 3 漩涡成因及几种消涡方式对比分析

### 3.1 漩涡成因

试验时,五孔泄洪闸开启,冲沙闸关闭,调整闸门开度,使各频率洪水闸前水位为正常蓄水位(2 387 m)。试验中,在# 1、# 2、# 5 泄洪闸前出现立轴漩涡,其中# 1 泄洪闸前漩涡强度和漩涡出现频率明显高于# 2、# 5 泄洪闸前漩涡,因此选取# 1 泄洪闸作为研究对象。消能防冲工况(流量  $Q = 7\ 070\ \text{m}^3/\text{s}$ ,库水位为 2 387 m)时的闸前漩涡见图 3,此时闸门开度为 11.5 m。

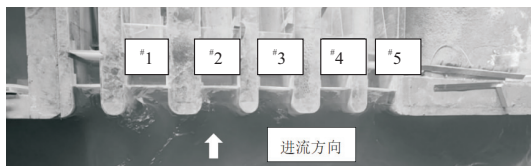


图 3 泄洪闸前漩涡

Fig. 3 Vortex in front of sluice gate

CB 水电站进水口漩涡的出现原因主要是水体流经孔口时横断面收缩导致流速增加,从而导致流速和压力分布不均匀,产生不平衡的切向力。此外,水面的湍动可能会影响水流,使孔口前沿处的水流受阻并形成吸气漩涡。

### 3.2 几种消涡方式对比分析

为了消除进水口漩涡,可采用多种方法,如优化进水口设计、改变边界条件等,进水口的设计应尽量保证来流边界的对称性,避免进口轴线与来流的夹角过大,此外,也可通过增加淹没水深或降低近流速来减小进口前漩涡产生的可能性。当这些方法在实际工程中难以适用时,可通过建造

专门的建筑物或安装专门的结构物来消除进水口立轴漩涡,一些常用的消涡结构物包括消涡梁、消涡格栅、浮体和防涡板,消涡梁通常有水平、V 型和阶梯立式三种布置形式,而消涡格栅则可分为垂向和水平两种,本文对比了两种垂向消涡栅和一种横向消涡栅的消涡效果。

#### 3.2.1 一对垂向消涡栅

为了消除闸前漩涡,刘洁洁<sup>[8]</sup>提出了一种垂向消涡栅,垂向消涡隔栅主要通过横向截断漩涡水流,破坏漩涡形成条件。该消涡栅高度从泄洪闸底板延伸到顶部,考虑到该消涡栅靠近水面部分起主要消涡效果,且较长的消涡栅会对泄洪闸过流能力产生一定的影响,本文改进了垂向消涡栅的长度。试验中在# 1 泄洪闸前设置了一对消涡栅,消涡栅宽度、长度、高度分别为 0.30、3.00、11.76 m,离闸墩距离为 1.5 m。布置图见图 4。

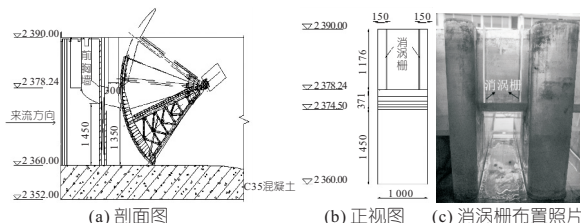


图 4 一对垂向消涡栅布置图(单位:cm)

Fig. 4 Arrangement of a pair of vertical eddy-eliminating barriers

试验观测了闸前水位为 2 387 m,闸门开度为 11.5 m 时的闸前水流流态,并通过 PIVlab 处理数字图像得到闸前流场。

图 5(a)为# 1 泄洪闸安装了一对垂向消涡栅后的闸前流态。由图 5(a)可知,闸前仍会出现贯穿性漩涡,但其漩涡直径从 1.5 m 减至 1.0 m,漩涡产生频率从 40 次/min 减至 21 次/min。由采用 PIVlab 处理后得到的闸前流场(图 5(b))可知,闸前表层仍存在漩涡环形流速区域。

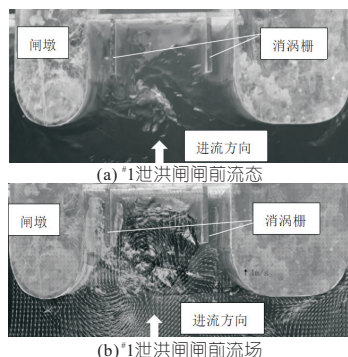


图 5 一对垂向消涡栅对漩涡的影响

Fig. 5 Effect of a pair of vertical eddy-eliminating barriers on vortex

此外,为了探究淹没水深对闸前漩涡的影响,

试验观测了闸门不同开度下的闸前流态,并测量了闸前水位、漩涡大小、相对淹没水深  $S_r$  ( $S_r$  为淹

没水深与进水口直径的比值)、闸孔平均流速等参数,结果见表 1。

表 1 不同闸门开度对闸前漩涡的影响

Tab. 1 Effect of different gate opening on vortex in front of sluice gate

开度 /m	闸前水位/m	相对淹没水深( $S_r$ )	闸孔平均流速 /( $m \cdot s^{-1}$ )	进水口 $Fr$ 数	漩涡出现频率 /( $次 \cdot min^{-1}$ )	漩涡距左闸墩距离/m	漩涡距离前胸墙距离/m	漩涡直径/m
12	2 387	1.25	11.67	1.08	32	3.00	2.08	1.70
10	2 387	1.70	10.99	1.11	17	3.24	2.29	1.00
8	2 387	2.38	10.31	1.17	12	3.48	2.40	0.60
6	2 387	3.50	9.67	1.26	5	3.90	2.76	0.36
4	2 387	5.75	12.30	1.96				
2	2 387	12.50	16.29	3.68				

由表 1 可知,当闸门开度超过 6 m 时,闸前开始出现立轴漩涡,且随着闸门开度的增加,相对淹没水深逐渐减小,漩涡出现频率和漩涡尺寸逐渐增加。

### 3.2.2 两对垂向消涡栅

在闸前设置一对垂向消涡栅有时会引起新的立轴漩涡,因此在<sup>#</sup>1泄洪闸前设置一对消涡栅的基础上增设一对消涡栅,两对垂向消涡栅宽度、长度、高度、间距分别为 0.30、3.00、11.76、0.30 m,离闸墩距离为 1.5 m。格栅布置位置见图 6。

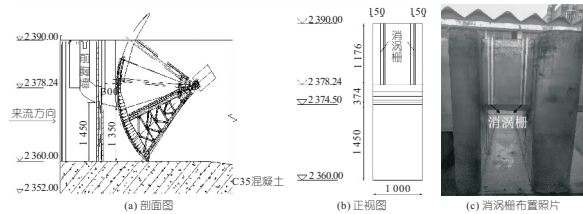


图 6 两对垂向消涡栅布置(单位:cm)

Fig. 6 Arrangement of two pairs of vertical eddy-eliminating barriers

试验观测了闸前水位为 2 387 m,闸门开度为 11.5 m 时的闸前水流流态,并通过 PIVlab 处理数字图像得到闸前流场。

图 7(a)为<sup>#</sup>1泄洪闸安装了两对垂向消涡栅后的闸前流态。由图 7(a)可知,<sup>#</sup>1泄洪闸闸前已无贯穿性漩涡出现,但闸前水流波动较大。由

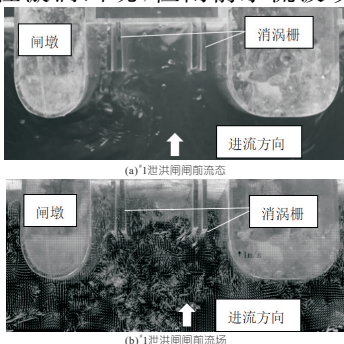


图 7 两对垂向消涡栅对漩涡的影响

Fig. 7 Effect of two pairs of vertical eddy-eliminating barriers on vortex

采用 PIVlab 处理后得到的闸前流场(图 7(b))可知,闸前表层无明显漩涡环形流速区域。

试验还观测了闸门不同开度时的闸前流态,结果表明,闸前流态受闸门开度的影响较小,在闸门各开度下闸前均无贯穿性漩涡的产生,但当闸门开度超过 8 m 时,闸前水面有较大的波动。

### 3.2.3 横向消涡栅

现有的一些消涡设施应用于泄洪闸前漩涡消除时存在一些问题,如消涡浮排,在闸前水位有较大的波动时,可能会与闸门发生碰撞,从而对设施结构和泄洪闸闸门产生不利影响;消涡梁由于其在闸前需占用较大空间,会影响进水口的过水能力。本文提出了一种横向消涡栅,其设计简易、受力均匀、对进水口过流能力影响小。

横向消涡栅主要通过垂直方向截断漩涡水流,破坏漩涡形成条件。消涡栅安装高程为 2 385 m,长 10 m,宽 7.5 m,孔眼尺寸为 0.9 m×0.6 m,栅梁、栅条截面尺寸为 0.3 m×0.3 m。其结构布置见图 8。

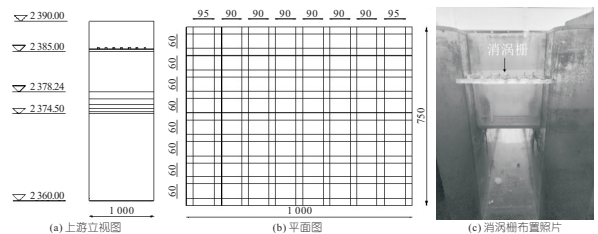


图 8 横向消涡栅的布置(单位:cm)

Fig. 8 Arrangement of horizontal eddy-eliminating barriers

试验观测了闸前水位为 2 387 m,闸门开度为 11.5 m 时的闸前水流流态,并通过 PIVlab 处理数字图像得到闸前流场。

图 9(a)为<sup>#</sup>1泄洪闸安装了横向消涡栅后的闸前流态。由图 9(a)可知,<sup>#</sup>1泄洪闸闸前已无贯穿性漩涡出现,且闸前水流稳定。图 9(b)为采用 PIVlab 处理后得到的闸前流场。由图 9(b)可知,闸前表层无明显漩涡环形流速区域。



图 9 横向消涡栅对漩涡的影响

Fig. 9 Effects of horizontal eddy-eliminating barriers on vortex

试验还观测了闸门不同开度时的闸前流态,结果表明,闸前水流流态受闸门开度影响较小,在闸门各开度下闸前水位稳定,且无贯穿性漩涡的产生。

综合三组消涡试验可知,相较于以往的垂向消涡栅,本文所提出的横向消涡栅在各开度下均能有效地消除闸前立轴漩涡,且在各开度下闸前水位均稳定。

## 4 结论

a. 本文对已有的一种垂向消涡栅做出改进,提出了一种消涡效果较好的横向消涡栅,该横向消涡栅可有效消除由进水口横断面收缩所引起的泄洪闸前漩涡且闸前水位稳定,其结构简单,效果显著。

b. 垂向消涡栅的间隔与横向消涡栅的安装高

度均对消涡结果影响较大,本文只找出了相对较优的方案,并未对其影响规律做深入研究。

## 参考文献:

- [1] HITE J E. Vortex formation and flow separation at hydraulic intakes [D]. Pullman, WA: Washington State University, 1993.
- [2] 谏诚, 赵建钧, 安建峰. 抽水蓄能电站同发同抽工况下漩涡特性的研究[J]. 水电能源科学, 2019, 37(5): 145-155.
- [3] 邹敬民, 高树华, 于艳丽, 等. 进水口防涡措施研究[J]. 水动力学研究与进展, 2000, 15(4): 463-466.
- [4] 严根华, 陈发展, 胡去劣. 进水口漩涡及消涡栅试验研究[C]//第三届全国水力学与水利信息学大会论文集. 南京: 河海大学出版社, 2007: 329-334.
- [5] 赵晶, 刁明军, 赵静, 等. 闸坝式枢纽工程闸前导水墙体型优化研究[J]. 中国农村水利水电, 2017(2): 186-189.
- [6] THIELICKE W, SONNTAG R. Particle image velocimetry for MATLAB: Accuracy and enhanced algorithms in PIVlab [J]. Journal of open research software, 2021, 9(1). DOI:10. 5334/jors. 334.
- [7] 汪泓璋. 长江中游九江河道冲淤演变数值模拟研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2022.
- [8] 刘洁洁. 闸前漩涡消涡试验及数值模拟研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2018.

## Study on Hydraulic Characteristics of a Horizontal Eddy-elimination Barriers Eliminating Vertical Vortex in Front of Sluice Gate

YUE Zhen<sup>1</sup>, CHEN Hai-kun<sup>2</sup>, TIAN Zhong<sup>1</sup>

- (1. State Key Laboratory of Hydraulics and Mountain River Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China;
2. POWERCHINA Guiyang Engineering Corporation Limited, Guiyang 550081, China)

**Abstract:** In the hydraulic model test of the CB hydroelectric station in Jinsha River, occasional penetrating vortexes were observed in front of the sluice gate. In order to eliminate the vortex, this paper improved a vertical eddy-eliminating barriers and proposed a new horizontal eddy-eliminating barriers. The flow field in front of the sluice gate, vortex scale, and vortex generation frequency of the new horizontal eddy-eliminating barriers were measured and analyzed for its vortex elimination effect. The results show that the proposed horizontal eddy-eliminating barriers has better vortex elimination effect than the previous vertical eddy-eliminating barriers, and it is a low-cost and efficient vortex elimination facility for sluice gate.

**Key words:** sluice gate; vertical vortex; model test; horizontal eddy-eliminating barriers; vertical eddy-eliminating barriers