



# 曹娥江清风枢纽船闸闸下流态研究

林一楠, 孙逸豪, 何 昆

(浙江省水利河口研究院, 浙江 杭州 310016)

**摘要:** 曹娥江新建清风枢纽船闸东侧将原翻板闸拆除, 改建为 10 孔泄水闸, 泄水闸东侧为清风枢纽电站, 船闸下游河道狭窄导致泄水闸和电站下泄水流对船闸下游引航道流态造成不利影响。采用整体物理模型试验研究不同流量和泄水闸开启方式对船闸下游引航道的影响。试验表明: 当河道流量大于  $850 \text{ m}^3/\text{s}$  时, 无论采用何种泄水闸开启方式都无法使船闸下游引航道流速满足规范要求; 当河道流量小于  $850 \text{ m}^3/\text{s}$  时, 采用所有闸门均匀开启的方式均有利于减弱泄水闸下游回流强度, 同时使引航道流速满足规范要求。

**关键词:** 曹娥江; 清风枢纽; 船闸; 闸下流态

中图分类号: U 641

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2022)06-0127-05

## Flow pattern downstream of Qingfeng lock on Cao'e River

LIN Yi-nan, SUN Yi-hao, HE Kun

(Zhejiang Institute of Hydraulics and Estuary, Hangzhou 310016, China)

**Abstract:** To the east of the new Qingfeng Junction Locks on the Cao'e River, the original flap gate was dismantled and converted into a 10-hole sluice gate, with the Qingfeng Junction Power Station to the east of the sluice gate. The narrowing of the river channel downstream of the locks leads to adverse effects on the flow regime of the approach channel downstream of the locks due to the discharge of water from the spillway and the power station. Thus an overall physical model test was used to study the effect of different flow rates and spillway opening methods on the downstream approach channel of the locks. The test shows that when the river's flow discharge is greater than  $850 \text{ m}^3/\text{s}$ , no matter what kind of opening method for the sluice gate is used, the flow rate in the lock's downstream approach channel cannot meet the specification requirements; when the river's flow discharge is less than  $850 \text{ m}^3/\text{s}$ , the way of using all the gates to open evenly is conducive to weakening the downstream backflow intensity of the sluice gate, and the channel's flow rate meet the specification requirements.

**Keywords:** Cao'e River; Qingfeng Hub; ship lock; flow pattern downstream of lock

船舶由主航道进入引航道后, 船速减小使得舵效降低, 船舶姿态不易操纵, 若引航道流速过大或者存在明显回流则可能造成靠船困难甚至船撞事件<sup>[1-3]</sup>, 因此对河道下泄流量和泄水闸开启方式有很高的要求<sup>[4-6]</sup>。笔者通过模型试验研究不同泄水闸开启方式对下游流态的影响, 推荐了较合理的闸门开启方式, 并在这种闸门开启方式下研究满足引航道流速要求的最大下泄径流量<sup>[7-9]</sup>。

对于闸下流态良好的河段, 可采用平面二维数学模型计算<sup>[10]</sup>, 但是二维平面数模无法模拟闸底出流。清风枢纽船闸工程前期已经开展数模计算相关工作, 由于工程河段条件相对复杂, 为更好地模拟船闸和泄水闸下游局部流态, 进行物理模型试验。本次模型试验采用大范围表面流场拍摄系统研究船闸下游的流场条件, 为工程设计提供依据。

收稿日期: 2021-10-22

作者简介: 林一楠(1989—), 男, 硕士, 工程师, 从事河口水动力泥沙研究、物理模型试验研究。

1 工程概况

曹娥江是钱塘江下游 I 级支流，流域面积 4 481 km<sup>2</sup>，主流平均比降 0.7‰。工程上游约 2 km 处有花山水文站，根据花山水文站(1983 年前为东沙埠站)的流量资料统计，多年平均径流量为 74.0 m<sup>3</sup>/s，年径流总量为 23.3 亿 m<sup>3</sup>。曹娥江径流年际变化很大，花山站最大年平均流量为 120 m<sup>3</sup>/s(1973 年)，最小年平均流量 32 m<sup>3</sup>/s(2004 年)。船闸上游河道宽度约 500 m，而下游河道仅约 250 m，因此船闸上游库区流速较小，而下游流速较大。枢纽平面布置见图 1。

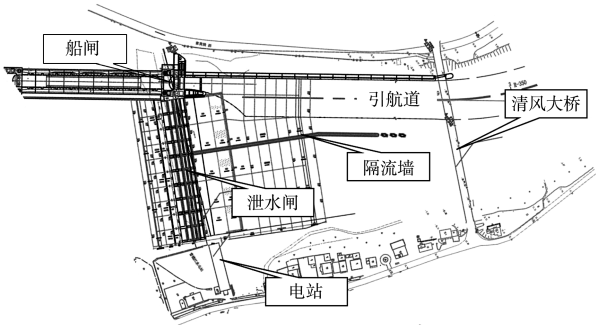


图 1 枢纽平面布置

本次新建清风船闸设计等级为Ⅳ级，采用坝上式布置，新建船闸拟布置于枢纽左岸，靠近左岸防洪堤。新建船闸轴线与原枢纽坝轴线交角约 75°，与改建后枢纽坝轴线夹角 80.5°，下闸首位于枢纽挡水线上，右侧与 10 孔泄水闸相接。船闸闸室有效尺度 165 m×14 m×4.0 m(长×宽×槛上水深)。上闸首按照 20 a 一遇洪水加超高设计，上闸首顶高 17.0 m。上闸首闸门按照 10 a 一遇洪水加超高设计，闸门顶高程为 15.0 m。闸室墙顶按照上游 10 a 一遇洪水位加超高设计，其中墙顶高程 15.1 m。下闸首顶高按人字门顶高加安装高度设计，下闸首顶高 18.7 m。上游导航墙和靠船墩顶高程 12.5 m；下游导航墙和靠船墩顶高程 9.0 m，下游引航道底高程-0.7 m。

船闸右侧为 14 m×10 孔泄水闸。并在第 4 与第 5 口泄水闸之间增设长约 220 m 的导流墙和 3 座导流墩，隔流墙顶高程 8.5 m。

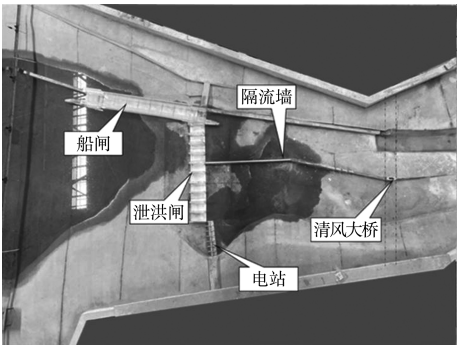
2 模型设计与验证

2.1 模型设计

物理模型的模拟范围包含清风枢纽、新建船闸、清风大桥、上三高速桥等特征建筑物，模拟河段长约 7.0 km(图 2)。工程河段弯道较多，工程附近流态复杂。为准确模拟弯道流态和施工前后的水流变化，本次模型采用正态设计。对工程区域水位、流速、流态进行研究。主要考虑工程研究范围、河段岸线和地形特征、涉水工程尺度以及设备和场地因素，确定模型比尺为 1:80。模型比尺参数见表 1。



a) 整体



b) 局部

图 2 物模照片

表 1 模型比尺参数

平面比尺	垂直比尺	流速比尺	水流连续时间比尺
$\lambda_l$	$\lambda_h$	$\lambda_u = \lambda_v = \lambda_h^{1/2}$	$\lambda_{t_i} = \lambda_l / \lambda_u$
80	80	8.9	8.9

2.2 水位验证

由于物理模型范围内没有实测水位资料，本次物理模型率定水位资料由经过验证的一维数学模型提供。整体物理模型采用一维数学模型 20 a 一遇洪水条件下的水位计算成果对水面线进行率

定。物理模型范围共布置 8 个水位测点，分别位于清风枢纽上/下游、清风大桥上/下游、弯曲河段

和上三高速公路桥上/下游。水位测点布置见图 3，率定结果见表 2。

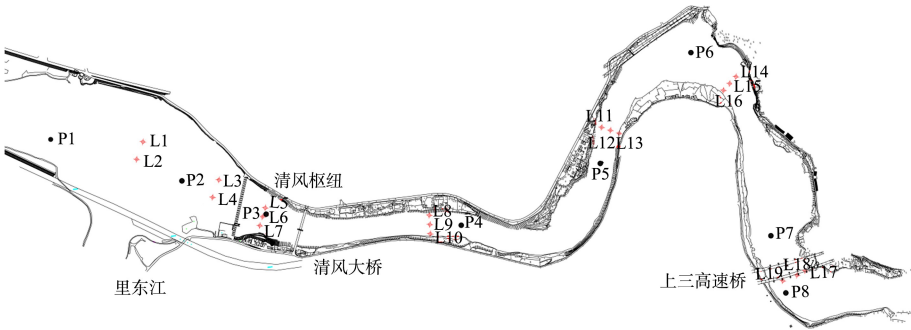


图 3 水位及流速测点布置

表 2 模型沿程水位验证结果

点号	数模计算值/m	物模试验值/m	误差/m
P1	16.04	16.08	0.04
P2	16.05	16.09	0.04
P3	15.86	15.80	-0.06
P4	15.42	15.38	-0.04
P5	15.03	14.96	-0.07
P6	14.98	14.94	-0.04
P7	14.37	14.40	0.03
P8	14.30	14.34	0.04

续表3

点号	数模流速/(m·s <sup>-1</sup> )	物模流速/(m·s <sup>-1</sup> )	误差/%
L12	2.5	2.8	11
L13	3.2	3.4	6
L14	2.3	2.2	5
L15	2.5	2.9	14
L16	2.0	2.2	9
L17	2.5	2.7	7
L18	3.5	3.4	3
L19	2.8	2.6	8

2.3 流速验证

采用 20 a 一遇洪水条件下的数模计算成果对沿程流速分布进行校核。共选取枢纽上、下游共 19 个代表点进行流速对比，测流断面分布见图 3，沿程流速校核成果见表 3。由表 3 可知，数模计算成果与物模试验成果沿程各断面的流速分布特征基本一致，各代表点流速比较接近，流速误差绝对值在 20% 以内，因此模型能较好地反映本河段流速分布情况。

表 3 流速验证成果

点号	数模流速/(m·s <sup>-1</sup> )	物模流速/(m·s <sup>-1</sup> )	误差/%
L1	0.5	0.6	17
L2	1.7	1.8	6
L3	1.3	1.5	13
L4	1.9	1.9	0
L5	2.2	2.3	4
L6	2.4	2.4	2
L7	1.6	1.9	16
L8	2.6	2.8	7
L9	3.6	3.2	13
L10	1.8	2.2	18
L11	0.5	0.6	17

3 方案研究

3.1 泄水闸开启方式试验

泄水闸的开启方式直接影响下游流态，若开启方式不合理则可能产生不良流态，对船闸通过能力和电站尾水下泄造成不利影响，更可能对涉水建筑物造成不良影响。因此在 800 m<sup>3</sup>/s 径流量条件下，分别对开启第 5 孔、第 7 孔、第 8 孔、第 9 孔和 5~10 孔均匀开启的泄水闸调度方式进行试验，并采用大范围 PIV 表面流场监测装置得到各工况的下游流态见图 4。

如图 4a) 所示，单独开启第 5 孔泄水闸时，由于主流靠左侧隔流墙下泄，电站出流经下游凸体挑向左岸，两股流汇合后在凸体下游靠近右岸处形成一顺时针回流，主流在出隔流墙末端后经清风大桥桥墩右侧下泄，桥墩左侧形成回流区，下泄能力较弱。

如图 4b) 所示，单独开启第 7 孔泄水闸时，闸下流态与单独开启第 5 孔时基本相似，在闸下形成顺时针回流，主流通过隔流墙末端后主要通过

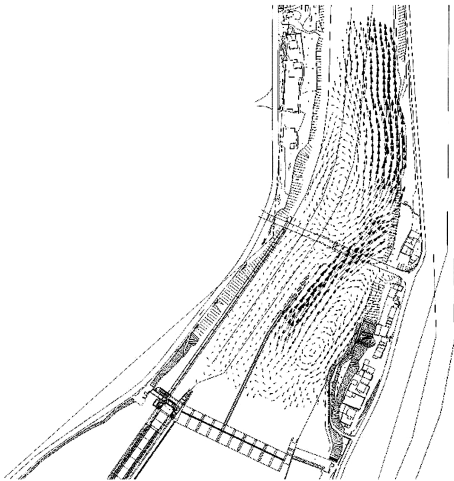
清风大桥桥墩右侧下泄。

如图 4c) 所示, 单独开启第 8 孔泄水闸时, 泄水闸下泄水流和电站出流混合, 在靠近隔流墙附近形成一逆时针回流, 回流范围覆盖了隔流墙右侧的江道, 回流区下游的水流相对平顺, 主流出隔流墙末端后被桥墩分为左右两股下泄。

如图 4d) 所示, 单独开启第 9 孔泄水闸时, 由于泄水闸下泄水流和电站出流位置接近, 两股水流在右岸凸体上游即汇合成一股, 经凸体挑流后与河道呈一定夹角向下游流动, 下游形成多个回流区。在主流与隔流墙之间形成一逆时针回流, 又在凸体下游右岸附近形成一顺时针回流, 在清风大桥左跨附近形成逆时针回流, 在回流区下游主流逐渐扩散至整个断面。

如图 4e) 所示, 均匀开启 5~10 孔泄水闸时, 下游断面流速分布较为均匀, 不存在较大的流速差异, 虽然电站的出流在一定程度上破坏了断面流速分布的均匀性, 但由于电站出流的流量占比较小对水流影响有限, 下游河道仅在引航道下游形成回流流速小于 0.15 m/s 的回流区。

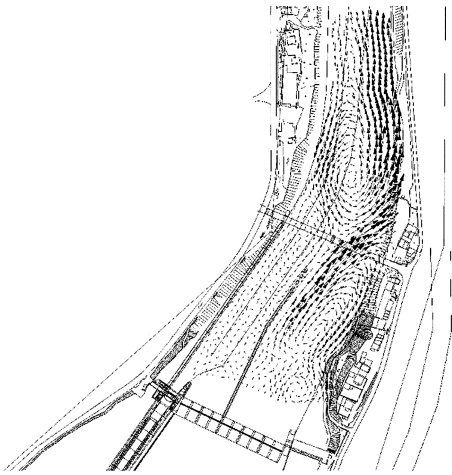
由于表面流场拍摄范围有限, 在拍摄范围外利用旋桨流速仪进行了补充测量。根据测量成果, 单独开启第 5 孔时对下游流态影响范围最远, 可至闸下约 1 km, 而均匀开启 5~10 孔对下游流态影响范围较小, 可至闸下约 700 m。因此均匀开启 5~10 孔泄水闸是较合理的闸门开启方式。



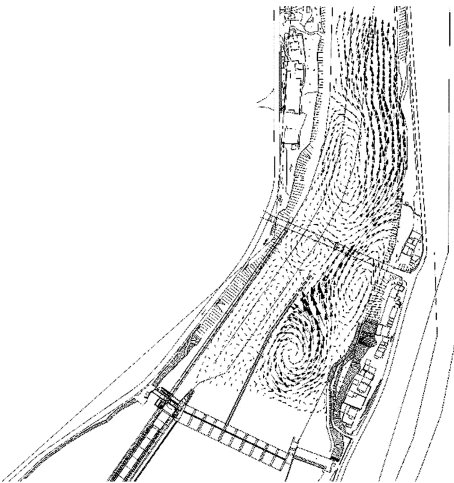
b) 开启第7孔泄水闸



c) 开启第8孔泄水闸

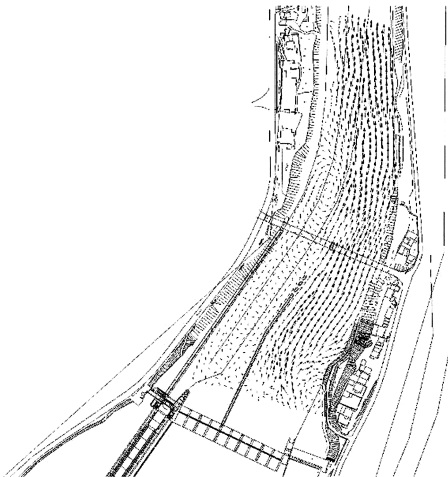


a) 开启第5孔泄水闸



d) 开启第9孔泄水闸





e) 均匀开启5~10孔泄水闸

图 4 各工况的下游流态

3.2 最大安全通航流量试验

为满足《船闸总体设计规范》中引航道流速要求的最大通航流量，分别进行台汛期平均流量 200 m<sup>3</sup>/s、最大安全通航流量 850 m<sup>3</sup>/s 和 1 a 一遇

流量 1 000 m<sup>3</sup>/s 3 种流量条件下的试验，闸下水位由数学模型计算提供。试验时参照正常通航条件下闸门启闭和电站运行方式：清风枢纽电站正常发电，同时开启隔流墙右侧 6 孔泄水闸进行泄流，左侧 4 孔泄水闸关闭。工况设计见表 4。

不同流量条件下航道范围内最大纵向流速、最大横向流速、最大回流流速和船闸下游水位见表 5。由表 5 可知，在 3 种流量条件下，导航段受隔流墙掩护均为静水状态，而隔流墙下游靠船段区域由于河道右侧水流扩散，水流流速有所增大，且水流流速与航道呈一定角度，导致在 850 m<sup>3</sup>/s 流量条件下靠船段最大横向流速达到 0.15 m/s，为最大横向流速标准的临界值。在 1 000 m<sup>3</sup>/s 流量条件下靠船段最大横向流速达到 0.18 m/s，超出相关流速标准，因此上游 850 m<sup>3</sup>/s 为船闸下游最大安全通航流量。

表 4 最大安全通航流量试验条件

工况	上游流量/(m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> )	枢纽上游水位/m	下边界水位	电站状态	泄水闸状态
1	200	10.4(正常蓄水位)	数学模型提供	满发流量	第 5~10 孔均匀开启
2	850				
3	1 000				

表 5 最大安全通航流量试验成果

工况	流量条件/(m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> )	船闸下游水位/m	区域	最大纵向流速/(m·s <sup>-1</sup> )	最大横向流速/(m·s <sup>-1</sup> )	最大回流流速/(m·s <sup>-1</sup> )	是否满足规范要求
1	200	5.95	导航段	0.00	0.00	0.00	是
			靠船段	0.07	0.05	0.06	
			口门区	0.38	0.07	0.09	
2	850	7.70	导航段	0.00	0.00	0.00	是
			靠船段	0.23	0.15	0.20	
			口门区	1.20	0.21	0.29	
3	1 000	8.50	导航段	0.00	0.00	0.00	否
			靠船段	0.24	0.18	0.22	
			口门区	1.30	0.24	0.31	

4 结论

- 1)在 800 m<sup>3</sup>/s 流量条件下单独开启闸门均会导致下游产生明显回流；均匀开启 5~10 孔泄水闸可使闸下水流较为平顺，回流范围和回流强度相对较小，有利于船舶停靠和进出引航道。
- 2)正常通航条件下，水流经 5~10 孔泄水闸

下泄后会在隔流墙下游引航道区产生小范围回流。在均匀开启 5~10 孔泄水闸且径流量大于 850 m<sup>3</sup>/s 时引航道横向流速超过 0.15 m/s 的限制条件，因此 850 m<sup>3</sup>/s 为最大安全通航流量。