



# 感潮河段三角门船闸启闭机受力试验分析\*

吴 腾<sup>1</sup>, 蔡守军<sup>2</sup>, 丁 坚<sup>1</sup>, 曹建中<sup>2</sup>

(1. 河海大学 海岸灾害及防护教育部重点实验室, 江苏南京 210098;

2. 南通市航道管理处, 江苏南京 226006)

**摘要:** 建立了焦港三角门船闸物理模型。通过模型试验研究开通闸运行条件下闸门启闭机的受力, 确定启闭机受力能满足开通闸要求的临界控制条件。控制条件分别为: 上游高水位控制时, 能进行开通闸运行的临界上下游初始水位差应小于0.39 m; 上游中水位控制时, 能进行开通闸的临界上下游初始水位差应小于-0.34~0.38 m; 上游低水位控制时, 能进行开通闸的临界上下游初始水位差应小于-0.37~0.43 m。三角闸门开关门的受力变化规律可为开通闸运行研究提供参考。

**关键词:** 船闸; 物模试验; 受力分析; 开通闸

中图分类号: U 617.4

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2014)01-0140-07

## Experimental study on force of sluice gate hoist for tidal reach

WU Teng<sup>1</sup>, CAI Shou-jun<sup>2</sup>, DING Jian<sup>1</sup>, CAO Jian-zhong<sup>2</sup>

(1. Key Laboratory of Coastal Disaster and Defence, Ministry of Education, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. Nantong Waterways for Manage Bureau, Nanjing 226006, China)

**Abstract:** A physical model on Jiaogang ship lock is set up, and the force of sluice gate hoist is studied by the model. The results show that the upper and down sluice gate can be opened in the same time in the following conditions: 1) The original tide range is less than 0.39 m when upstream water stage is 3.71 m; 2) The original tide range is from -0.34 m to 0.38 m when the upstream water stage is 1.64 m; 3) The original tide range is from -0.37 m to 0.43 m when the upstream water stage is 0.96 m. The force variation law of sluice gate hoist provides reference for the similar study.

**Key words:** ship lock; physical model; experiment force analysis; sluice gate

焦港船闸位于江苏境内, 属于连申线南通段, 处于长江感潮河段, 其下游引航道水位受长江潮汐涨落影响, 与上游内河水位差呈动态变化趋势。在不同季节, 船闸上下游可能产生零水位差情况, 该条件下可将上下闸门同时开启, 船舶直接通行, 这种“上下闸门同时开启, 船舶直接通行”的状态称为开通闸运行。开通闸运行可大大提高船闸通过能力, 一次通闸可运行数十分钟至数小时, 船舶通过能力可达正常开闭闸门灌水运转的10倍以上, 如上游江阴船闸每年开通闸通过的货运量占全年总货运量2/3以上, 效果十分

显著<sup>[1-4]</sup>, 但开通闸过程中, 安全保证十分突出。当上下游水位差过大时, 闸门启闭机所承受的推力或者拉力也会逐渐增大, 甚至会破坏启闭机的正常运行, 导致闸门不能正常开关, 进而导致事故的发生。传统的开通闸运行虽有多年成功经验, 但都停留在经验管理的水平上, 容易受人员变动, 气候、水文条件等因素影响, 安全性不稳定<sup>[5-6]</sup>。因此, 对开通闸的安全运行条件进行深入研究是十分必要的, 以实现最大程度的利用潮汐开通闸, 同时免于经验操作的盲目性, 提高通闸运行的安全度。本文通过模型试验进行开通闸条

收稿日期: 2013-04-21

\*基金项目: 武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室开放基金(2011B085)

作者简介: 吴腾(1979—), 男, 讲师, 主要从事航道整治研究。

件下闸门启闭机受力分析, 掌握启闭机的受力规律, 确定最佳开通闸临界条件。

### 1 模型的设计

本文开通闸试验中需要研究闸门的受力, 因此, 重力作用是主要的考虑因素, 要求模拟重力相似, 采用正态模型。为了使试验精确, 模型应尽量放大, 根据模型场地的条件, 选取几何比尺为 25, 其余模型比尺设计见表 1, 模型见图 1。

表 1 水流运动相似比尺

| 项目   | 计算值    |
|------|--------|
| 几何比尺 | 25     |
| 流速比尺 | 5      |
| 时间比尺 | 5      |
| 流量比尺 | 3 125  |
| 糙率比尺 | 1.71   |
| 受力比尺 | 15 625 |

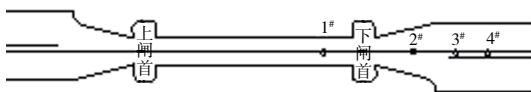


图 1 试验测点分布

### 2 模型验证

为了保证模型的相似性, 在下闸首上、下游选定 2 个固定点 (1#, 2# 测点, 如图 1 所示) 进行验证。验证试验的条件为: 闸室水位 2.4 m, 下游水位 2.7 m, 同时开启上下游闸门。测点流速以及闸门启闭机受力验证如图 2~6。可见, 试验值与实测值符合较好, 验证结果满足《内河航道与港口模拟技术规程》要求。

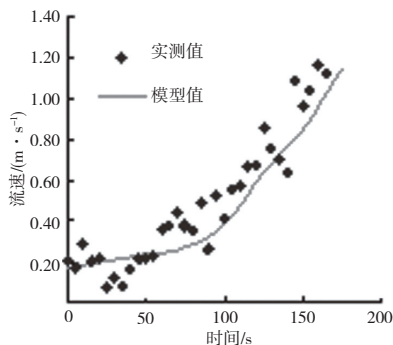


图 2 1#测点闸室流速验证

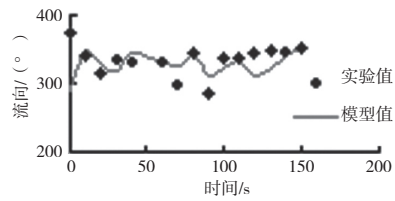


图 3 1#测点闸室流向验证

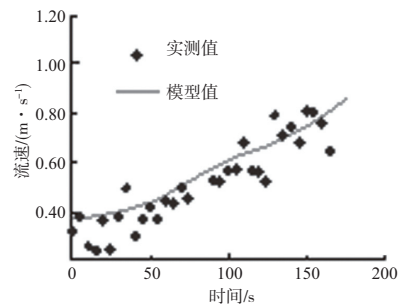


图 4 2#测点下引航道流速验证

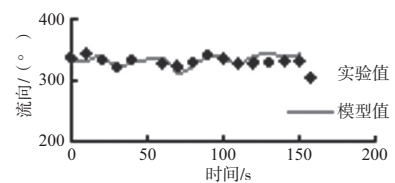


图 5 2#测点下引航道流向验证

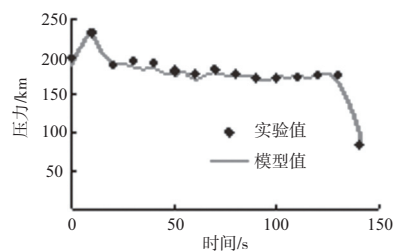


图 6 开门时启闭机受力验证

### 3 焦港船闸开通闸闸门启闭机受力分析

#### 3.1 试验条件

根据特征水位和船闸运行中可能发生的不利组合情况, 确定船闸各种使用情况的不利组合。上游分别选定高 (3.71 m)、中 (1.64 m)、低 (0.96 m) 3 组水位, 下游采用典型潮位过程, 潮位过程线见图 7 和 8。分别为洪水年洪水大潮过程线和洪水中水大潮过程线。

焦港船闸三角门启闭机最大受力设计值为 300 kN, 需确定满足启闭机受力时的临界上下游水位差 (本文取 1#, 2# 测点的初始静止水位差做参考, 下文均同)。

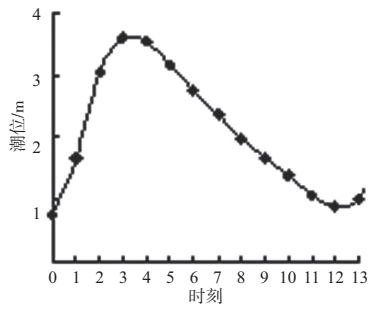


图7 洪水年洪水大潮潮位过程线

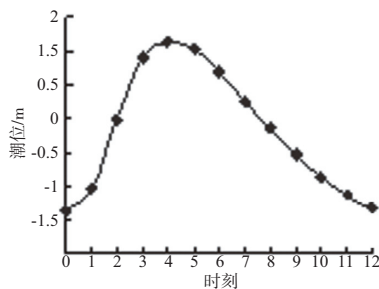


图8 洪水年中水大潮潮位过程线

### 3.2 试验结果

#### 1) 上游高水位试验分析。

表2试验条件为：上游水位控制3.71 m，下游采用洪水年长江洪季大潮涨落潮过程线进行控制。由表2可知：在上游水位比下游水位高1.0，0.8 m条件下，开门时启闭机受力不大，关门时启闭机最大受力均超过300 kN；当上游水位比下游水位高0.5 m时，开关门启闭机最大受力均未超过300 kN，涨潮时最大受力为235 kN，落潮时最大受力为266 kN。

表2 上游水位3.71 m时启闭机最大受力

| 水位/m | 水位差/m | 开门/kN | 关门/kN | 控制条件     |
|------|-------|-------|-------|----------|
| 2.71 | 1.0   | 164   | 331   | 洪洪<br>大涨 |
| 2.91 | 0.8   | 160   | 300   |          |
| 3.21 | 0.5   | 170   | 235   |          |
| 2.71 | 1.0   | 160   | 340   | 洪洪<br>大落 |
| 2.91 | 0.8   | 173   | 310   |          |
| 3.21 | 0.5   | 187   | 266   |          |

#### 2) 上游中水位试验分析。

表3试验条件为：上游水位控制1.64 m，下游采用洪水年长江洪季大潮涨落潮过程线进行控制。由表3可知：涨潮时当上游水位高于下游水位，水位差小于0.4 m时开关门闸门受力均未超过

极限值；当水位差为0.8 m时关门条件下启闭机受力达到302 kN，超过设计极限值；当下游水位高于上游水位时，水位差-0.3，-0.4 m启闭机受力能满足要求，水位差-0.8，-1.2 m时，启闭机开门受力均超过300 kN，超过最大设计值。同样，落潮时上下水位差为0.3，0.4，-0.3，-0.4 m时，启闭机受力能满足要求，而其余工况启闭机最大受力超过设计最大值，不宜开关门。

表3 洪水年长江洪、中季大潮上游水位

1.64 m时启闭机最大受力

| 季节   | 水位/m | 水位差/m | 开门/kN | 关门/kN | 控制条件     |
|------|------|-------|-------|-------|----------|
| 洪季   | 0.84 | 0.8   | 176   | 302   | 洪洪<br>大涨 |
|      | 1.24 | 0.4   | 183   | 240   |          |
|      | 1.34 | 0.3   | 200   | 216   |          |
|      | 1.94 | -0.3  | 250   | 170   |          |
|      | 2.04 | -0.4  | 276   | 162   |          |
|      | 2.44 | -0.8  | 355   | 166   |          |
|      | 2.84 | -1.2  | 430   | 165   |          |
|      | 1.04 | 0.6   | 186   | 316   | 洪洪<br>大落 |
|      | 1.24 | 0.4   | 207   | 228   |          |
|      | 1.34 | 0.3   | 205   | 220   |          |
|      | 1.94 | -0.3  | 251   | 179   |          |
|      | 2.04 | -0.4  | 291   | 168   |          |
| 2.44 | -0.8 | 360   | 155   |       |          |
| 2.84 | -1.2 | 447   | 158   |       |          |
| 中季   | 0.64 | 1.0   | 213   | 332   | 洪中<br>大涨 |
|      | 0.84 | 0.8   | 214   | 325   |          |
|      | 1.04 | 0.6   | 220   | 269   |          |
|      | 1.24 | 0.4   | 220   | 235   |          |
|      | 0.84 | 0.8   | 194   | 324   | 洪中<br>大落 |
|      | 1.04 | 0.6   | 195   | 295   |          |
|      | 1.24 | 0.4   | 199   | 247   |          |
| 1.34 | 0.3  | 206   | 237   |       |          |

涨潮时，水位差为1.0，0.8 m，关门时启闭机最大受力超过300 kN，水位差0.6，0.4 m时受力均超过20 kN；落潮时，水位差0.8 m时关门最大受力为324 kN，超过最大设计值，其余工况均能满足要求，但水位差为0.6 m时，关门启闭机最大受力为295 kN，十分接近设计值，故也不宜开门关门。

#### 3) 上游低水位试验分析。

表4为长江洪水年洪、中季大潮上游水位0.96 m时启闭机最大受力，涨落潮条件下，水位差-0.7 m

开门时启闭机最大受力分别为311 kN和380 kN, 其余开关门工况闸门启闭机受力均小于300 kN。

表4 洪水年长江洪、中季大潮上游水位0.96 m时  
启闭机最大受力

| 季节   | 水位/m | 水位差/m | 开门/kN | 关门/kN | 控制条件     |
|------|------|-------|-------|-------|----------|
| 洪季   | 1.26 | -0.3  | 260   | 196   | 洪洪<br>大涨 |
|      | 1.46 | -0.5  | 272   | 183   |          |
|      | 1.66 | -0.7  | 311   | 179   |          |
|      | 1.26 | -0.3  | 266   | 174   | 洪洪<br>大落 |
|      | 1.46 | -0.5  | 283   | 249   |          |
|      | 1.66 | -0.7  | 380   | 172   |          |
| 中季   | 0.36 | 0.6   | 211   | 270   | 洪中<br>大涨 |
|      | 0.56 | 0.4   | 220   | 225   |          |
|      | 0.66 | 0.3   | 225   | 219   |          |
|      | 1.06 | 0.1   | 227   | 172   |          |
|      | 1.36 | -0.4  | 236   | 170   |          |
|      | 1.56 | -0.6  | 312   | 155   |          |
|      | 0.36 | 0.6   | 194   | 304   |          |
|      | 0.56 | 0.4   | 220   | 238   |          |
|      | 0.66 | 0.3   | 232   | 209   |          |
|      | 1.06 | -0.1  | 255   | 184   |          |
| 1.36 | -0.4 | 263   | 170   |       |          |
| 1.56 | -0.6 | 306   | 170   |       |          |

涨潮期间水位差为-0.6 m开门时, 启闭机受力为312 kN, 超过设计值, 水位差为0.4, 0.3, 0.1, -0.4 m时最大受力均能满足要求。落潮期间, 水位差为0.6 m关门和-0.6 m开门时, 启闭机受力超过最大值, 其余工况能满足要求。

#### 4 开通闸运行最大流速分析

本次试验取1#和2#流速测点(图1)进行流速分析, 其中1#测点位于闸室中, 2#测点位于下游喇叭口附近。表5为上游水位3.71, 1.64, 0.96 m时试验过程中测点的最大流速。表中水位差越大流速相对越大, 水位差绝对值为1.0, 0.8 m时均可能出现流速大于2 m/s的数值, 不满足规范要求; 水位差绝对值小于0.5 m时流速基本在1.5 m/s以内, 明显小于2 m/s。因此, 单就流速而言, 水位差绝对值小于0.5 m时能进行开通闸运行。

表5 上游不同水位时测点最大纵向流速

| 水位/m | 水位/m | 水位差/m | 最大纵向流速/(m·s <sup>-1</sup> ) |      | 备注       |
|------|------|-------|-----------------------------|------|----------|
|      |      |       | 1#测点                        | 2#测点 |          |
| 3.71 | 2.71 | 1.0   | 2.37                        | 1.97 | 洪洪<br>大涨 |
|      | 2.91 | 0.8   | 1.70                        | 1.30 |          |
|      | 3.21 | 0.5   | 1.33                        | 0.70 |          |
|      | 2.71 | -1.0  | 2.44                        | 1.80 | 洪洪<br>大落 |
|      | 2.91 | -0.8  | 1.81                        | 1.37 |          |
|      | 3.21 | -0.5  | 1.37                        | 1.02 |          |
| 1.64 | 0.84 | 0.8   | 2.27                        | 1.62 | 洪中<br>大涨 |
|      | 1.24 | 0.4   | 1.24                        | 0.84 |          |
|      | 2.04 | -0.4  | 1.10                        | 0.51 |          |
|      | 2.24 | -0.8  | 2.18                        | 1.35 |          |
|      | 1.14 | 0.5   | 1.27                        | 0.85 |          |
|      | 1.34 | 0.3   | 1.06                        | 0.56 |          |
|      | 2.14 | -0.5  | 1.65                        | 0.92 |          |
|      | 2.24 | -0.8  | 2.11                        | 1.33 |          |
|      | 0.64 | 1.0   | 2.04                        | 1.47 |          |
|      | 0.84 | 0.8   | 1.82                        | 1.64 |          |
| 1.14 | 0.5  | 1.22  | 0.67                        |      |          |
| 0.84 | 0.8  | 1.81  | 1.21                        |      |          |
| 1.14 | 0.5  | 1.12  | 0.69                        |      |          |
| 1.34 | 0.3  | 0.78  | 0.65                        |      |          |
| 0.96 | 1.46 | -0.5  | 1.25                        | 0.73 | 洪洪<br>大涨 |
|      | 1.96 | -1.0  | 2.18                        | 1.85 |          |
|      | 1.46 | -0.5  | 1.32                        | 0.75 | 洪洪<br>大落 |
|      | 1.96 | -1.0  | 2.49                        | 1.74 |          |
|      | 0.46 | 0.5   | 1.42                        | 1.34 |          |
|      | 0.56 | 0.5   | 1.25                        | 0.86 |          |
|      | 1.36 | -0.4  | 1.15                        | 0.90 |          |
|      | 1.46 | -0.5  | 1.45                        | 1.14 |          |
|      | 0.46 | 0.5   | 1.34                        | 1.04 |          |
|      | 0.56 | 0.4   | 1.15                        | 0.83 |          |
| 1.36 | -0.4 | 1.21  | 0.92                        |      |          |
| 1.46 | -0.5 | 1.26  | 0.89                        |      |          |

#### 5 开通闸运行临界条件分析

三角门闸门启闭机设计受力需小于300 kN, 考虑一定的安全系数, 取安全值为:

$$F_{\max} = \frac{300}{1.2} = 250 \text{ kN} \quad (1)$$

式中: 顺流开门和逆流关门时启闭机受力较为安全, 安全系数取为1, 最大临界受力仍为300 kN。

1) 上游水3.71 m时开通在运行临界水位。

图9a)和b)分别为上游水位3.71 m时洪水年洪水期大潮涨潮和落潮时启闭机受力。由图9可

知，涨落潮时关门启闭机受力大于开门情况，故关门为该条件下最不利情况。涨潮关门时受力与水位差关系为：

$$F=10x^2+137x+184 \quad (2)$$

落潮时关门启闭机受力与水位差关系为：

$$F=6.7x^2+138x+195.3 \quad (3)$$

式中： $F$ 为启闭机受力， $x$ 为上下游水位差，上游高于下游时为正值，反之为负值，以下均同。可求得涨潮时临界水位差为0.47 m，落潮时的临界水位差为0.39 m。综合开门和关门的条件，能进行开通闸运行的临界水位差为0.39 m。

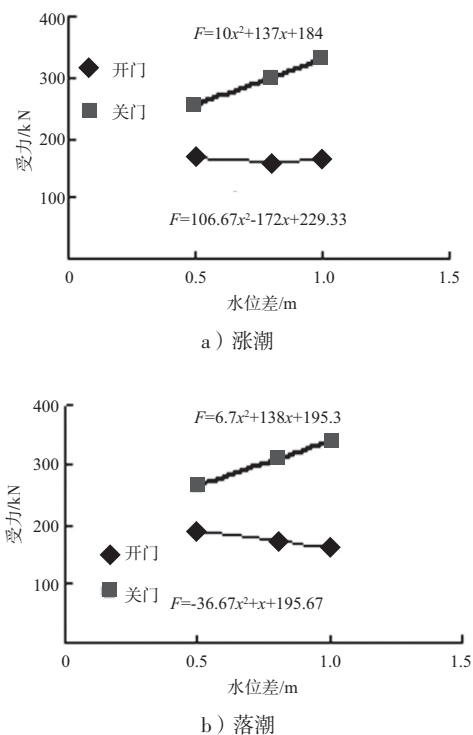


图9 上游水位3.71 m时洪水年洪水期大潮涨、落潮闸门启闭机受力

2) 上游水位1.64 m时开通闸临界条件。

①洪水年洪水期大潮涨潮开通闸临界条件。

图10 a), b)分别为上游水位1.64 m时洪水年洪水期大潮涨、落潮闸门受力，图中开门时启闭机受力逐渐减小，关门时启闭机受力逐渐增大。涨潮开门时受力与水位差的关系为：

$$F=60.79x^2-93x+201.4 \quad (4)$$

关门时受力与水位差关系为：

$$F=59.1x^2+89.2x+191.1 \quad (5)$$

落潮开门时受力与水位差关系为：

$$F=96.21x^2-79.56x+211.82 \quad (6)$$

关门时受力与水位差关系为：

$$F=71.7x^2+112.8x+195.9 \quad (7)$$

综合开关门条件，上游水位1.64 m时洪水年洪水期大潮落潮开通闸的临界水位差条件为-0.34~0.38 m。

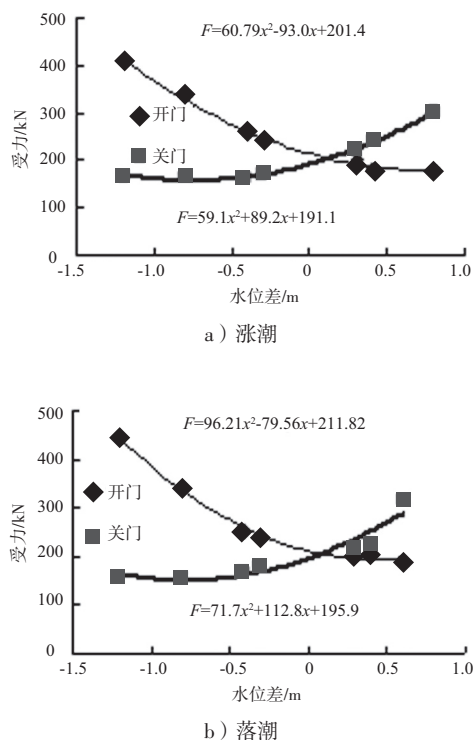


图10 上游水位1.64 m时洪水年洪水期大潮涨、落潮闸门启闭机受力

②洪水中水期大潮涨潮开通闸临界条件。

图11 a), b)分别为上游水位1.64 m时洪水年中水期大潮涨、落潮闸门启闭机受力。图中开门时启闭机受力逐渐减小，关门时启闭机受力逐渐增大，关门时为不利条件。关门时受力与水位差关系分别为：

$$F=-168.7x^2+409.7x+94.5 \quad (8)$$

$$F=-35.8x^2+222.7x+170 \quad (9)$$

综合涨、落潮以及开门、关门时启闭机受力，开通闸临界水位差为0.38 m。

取①和② 2种条件下开关门的重叠条件区域，上游水位1.64 m时开通闸临界条件为-0.34~0.38 m。

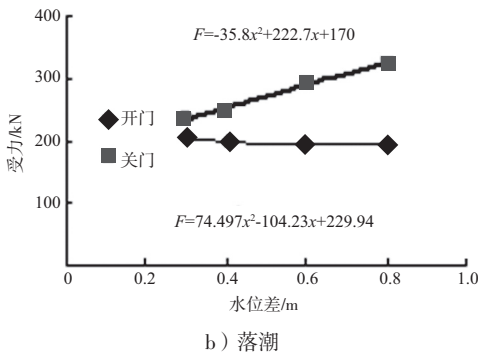
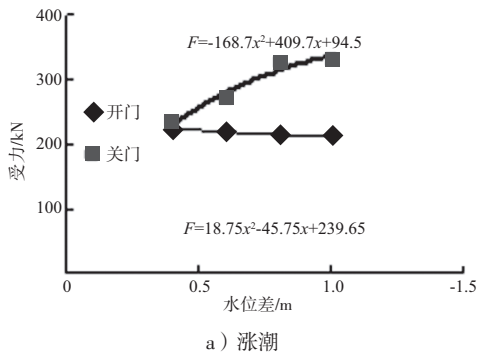


图 11 上游水位 1.64 m 时洪水年中水期大潮涨、落潮闸门启闭机受力

3) 上游水位 0.96 m 时开通闸临界条件。

①洪水年洪水期大潮涨潮开通闸临界条件。

图 11 a), b) 分别为上游水位 0.96 m 洪水年洪水期大潮涨、落潮启闭机受力, 开门时启闭机受力较大, 与水位差关系为:

$$F = 87.5x^2 - 90x + 205.12 \quad (10)$$

可求得临界水位差为 -0.37 m。

落潮开门时受力与水位差关系为:

$$F = 750x^2 + 415x + 303 \quad (11)$$

可得到关门时临界值为 -0.69 m。

综合开门关门控制条件, 上游水位 0.96 m 时, 洪水年洪水期大潮落潮开关门临界水位差为 -0.37 m。

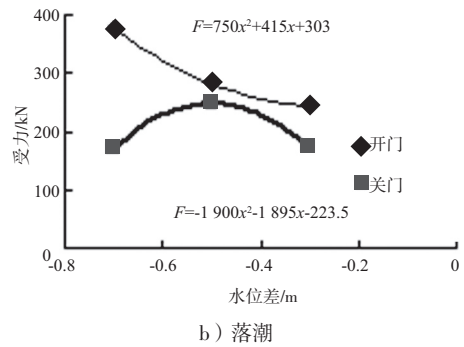
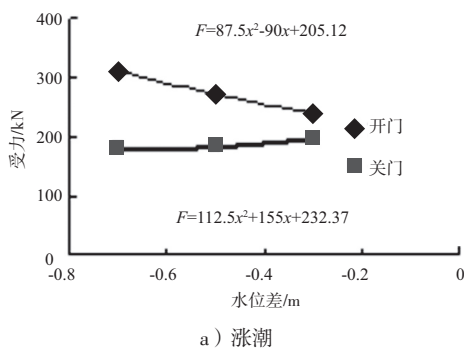


图 12 上游水位 0.96 m 洪水年洪水期大潮涨、落潮启闭机受力

②洪水年中水期大潮涨潮开通闸临界条件。

图 12 a), b) 分别为上游水位 0.96 m 洪水年中水期大潮涨、落潮启闭机受力, 开门时受力与水位差关系式为:

$$F = 137.79x^2 - 54.97x + 205 \quad (12)$$

关门时受力关系式为:

$$F = 115.7x^2 + 88.7x + 174 \quad (13)$$

落潮开门时受力与水位差关系式为:

$$F = 53.44x^2 - 65.12x + 216.3 \quad (14)$$

关门时受力与水位差关系式为:

$$F = 151.9x^2 + 98.1x + 180.4 \quad (15)$$

综合流速和受力, 洪水年中水期大潮落

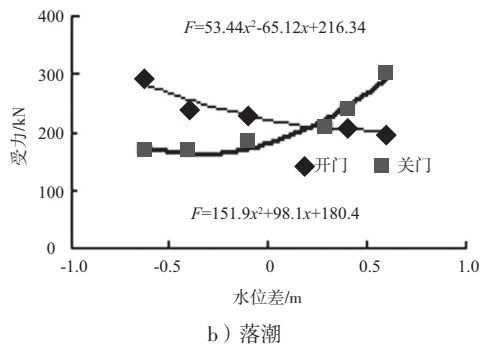
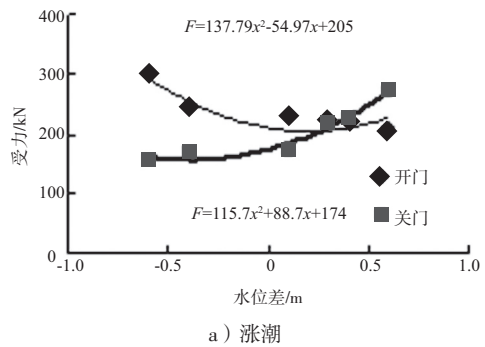


图 12 上游水位 0.96 m 洪水年中水期大潮涨潮、落启闭机受力

潮开通闸临界条件能开通闸运行的临界水位差为-0.39~0.43 m。

综合考虑洪水年大水期和洪水中水期两组极端条件，上游水位0.96 m时开通闸临界上下游水位差条件为-0.37~0.43 m。

### 6 结论

1) 物模验证试验表明，物模在潮位、流速、启闭机受力等多方面的验证是成功的，符合规范要求，模型与原型相似，可用于开通闸临界条件的研究。

2) 焦港三角门船闸开通闸行启闭机受力能满足要求的临界控制条件为：上游为高水位（3.71 m）控制时，能进行开通闸运行的临界上下游水位差应小于0.39 m；上游中水位（1.64 m）控制时，能进行开通闸的临界上下游水位差应小于-0.34~0.38 m；上游低水位（0.96 m）控

制时，能进行开通闸的临界上下游水位差应小于-0.37~0.43 m。

### 参考文献：

- [1] 杨红, 张幸农. 感潮河段船闸下引航道水沙运动及泥沙淤积[J]. 海洋工程, 2004, 22(4): 86-93.
- [2] 王振喜. 关于船闸通过能力计算中若干问题探讨[J]. 水运工程, 1998(6): 19-22.
- [3] 陈璐, 王辉. 京杭运河邵伯三线船闸平面布置难点及对策[J]. 水运工程, 2009(12): 136-138.
- [4] 林江. 三角闸门启闭力计算问题的分析[J]. 中国水运, 2007, 7(8): 23-24.
- [5] 李安中, 常福田. 闽江竹岐至文山里河段航道整治动床模型试验研究报告[R]. 南京: 河海大学, 1993.
- [6] 吴腾, 李远发, 洪建. 聚类统计方法在高含沙水流挟沙力公式验证中的应用[J]. 水利学报, 2007, 38(7): 852-856.

(本文编辑 郭雪珍)

(上接第127页)

### 5 结论

2000年以来，随着北港逐步发展，中港分流比有所减小，中港进口段航宽呈减小趋势，且进口段航路向不平顺方向发展，不利于中港航道条件的稳定，需要密切跟踪本水道的变化，并采取工程措施稳定并改善中港航道条件。本文针对贵池水道存在的问题及航道发展的要求，对贵池水道治理对策进行了探讨。初步研究表明，对于贵池水道，需结合水利河势控制工程，通过实施一定的工程措施，限制北港发展，稳定并改善中港的航道条件。可采取的控制守护工程措施包括北港控制工程、崇文洲洲头及右缘守护工程、凤凰洲左缘守护工程和右岸泥洲一带守护工程，下阶段可将北港控制工程和洲头工程作为研究重点。同时，对贵池水道下一步系统治理提出如下建议：

1) 结合最新的原型观测资料，深入分析河道新的变化及演变趋势，并研究三峡工程蓄水运用对贵池水道演变及航道条件的影响，为整治方案

的提出提供技术支撑。

2) 由于影响贵池水道航道条件的影响因素较复杂，治理方案需结合数学模型和物理模型进行分析并优化。下阶段将进一步采用定、动床数学模型计算与定、动床物理模型试验相结合的手段对整治方案进行深入研究。

### 参考文献：

- [1] 余文畴. 长江河道演变与治理[M]. 中国水利水电出版社, 2005.
- [2] 李晓勇, 汪峰. 长江贵池河段河势演变对崩岸影响及整治措施[J]. 安徽水利水电职业技术学院学报, 2010, 10(4): 70-71.
- [3] 杨昌道, 浦玉炳. 贵池汽车轮渡码头淤积成因浅析[J]. 水运工程, 2002(7): 6-9.
- [4] 程久苗. 长江贵池河段河道演变及池州港岸线资源利用评价[J]. 长江流域资源与环境, 1995, 4(2): 120-124.

(本文编辑 郭雪珍)