



# 升船机船厢卧倒门启闭方式 对厢内船舶系缆力的影响\*

胡亚安, 李中华, 赖东亮

(南京水利科学研究院, 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室,  
通航建筑物建设技术交通行业重点实验室, 江苏 南京 210029)

**摘要:** 结合思林、岩滩等升船机承船厢卧倒门不同启闭方式下船舶系缆力模型试验资料, 通过概化模型对升船机承船厢卧倒门启闭过程船舶受力影响因素进行分析, 提出了承船厢启闭过程船舶纵向系缆力计算方法。利用建立的系缆力计算方法, 对保障升船机船厢内船舶系缆安全的卧倒门启闭速度及对接水位差标准进行探讨, 提出相关建议。

**关键词:** 升船机; 卧倒门; 启闭方式; 系缆力

中图分类号: U 642.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2016)12-0148-05

## Influence of different tumble gate operation of ship lift chamber on vessels mooring force

HU Ya-an, LI Zhong-hua, LAI Dong-liang

(Nanjing Hydraulic Research Institute, State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering,  
Key Laboratory of Navigation Structure Construction Technology, Ministry of Transport, PRC, Nanjing 210029, China)

**Abstract:** A generalized mathematical model is built to analyse the vessels mooring force influence factor using the experimental data of different tumble gate operations of Silin, Yantan, etc. shiplift, and a calculation methods of longitudinal mooring force caused by tumble gate operation are proposed. Based on the calculation methods, the shiplift chamber gate opening velocity and dock errors of water depth are suggested to ensure the safety of vessel in chamber.

**Keywords:** ship lift; tumble gate; gate operation; mooring force

升船机是通航建筑物的一种主要形式, 升船机与上、下游对接过程承船厢及引航道水力问题是升船机运行过程中较为关键的问题。对于升船机承船厢卧倒门启闭速率及船舶系缆力等, 目前国内均无相关的规范标准<sup>[1-2]</sup>, 需要通过物理模型试验研究卧倒门启闭影响因素, 为升船机的设计和安全运行提供技术依据。本文结合乌江思林、红水河岩滩等升船机承船厢不同启闭方式下船舶系缆力试验资料<sup>[3-5]</sup>, 对升船机承船厢卧倒门开启速度、开门水位差等与船舶系缆力之间影响进行

分析, 建立了承船厢卧倒门开启过程船舶系缆力计算公式, 并根据升船机运行特点, 从船厢内船舶停泊安全性出发, 给出了升船机卧倒门合理的开启速度 and 对接水位差控制要求和建议。

### 1 船厢门启闭水动力特性

升船机船厢门开启时, 由于船厢内外存在的水位差及卧倒门的扰动, 船厢门开启过程在厢内形成推进波系, 当该波系碰到顶端厢壁时, 将发生固壁反射, 并在船厢连通引航道的限制性水

收稿日期: 2016-09-16

\*基金项目: 国家重点研发计划 (2016YFC0402002, 2016YFC0402006); 国家自然科学基金 (51479123)

作者简介: 胡亚安 (1965—), 男, 博士, 教授级高级工程师, 从事通航水力学研究。

域内形成反射叠加波, 影响船厢内的船舶停泊安全; 船厢门关闭后, 升船机立即开始升降船厢, 此时引起的船厢内水面波动不仅影响船厢内船舶停泊安全, 还影响升船机的整体运行安全。因此, 需要对船厢门启闭过程的水动力特性进行研究, 确定合理船厢门启闭方式。

### 1.1 船舶系缆力模型试验

图 1 为 500 吨级升船机船厢纵向系缆力与船厢内外不同水位差开门的变化情况。由图 1 可见, 船舶纵向系缆力随船厢内外水位差的增大迅速增大, 且相同开门速率下船厢正向水位差时的船舶纵向系缆力值要比反向水位差时略大(定义船厢水位高于引航道水位时开门水位差为负, 低于引航道水位为正)。船厢内外水位差为  $-0.2\text{ m}$  时, 卧倒门以  $60\text{ s}$  开启, 船厢内停泊船舶的纵向系缆力达到  $26.7\text{ kN}$ ; 船厢内外水位差减小到  $-0.1\text{ m}$  时, 纵向系缆力明显减小, 卧倒门以  $60\text{ s}$  开启, 纵向系缆力为  $15.4\text{ kN}$ 。船厢内外水位差为  $0.2\text{ cm}$  时, 卧倒门以  $60\text{ s}$  开启, 达到  $27.6\text{ kN}$ ; 船厢内外水位差减小到  $0.1\text{ m}$ , 纵向系缆力减小到  $20.8\text{ kN}$ 。

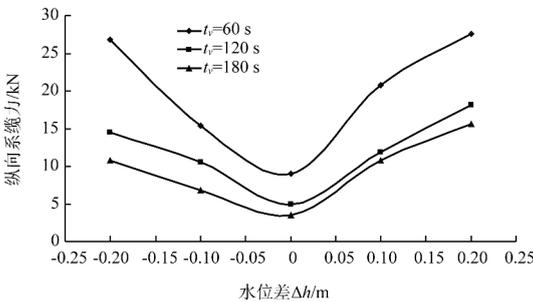


图 1 纵向系缆力与水位差关系

由图 2 可见, 相同水位差情况下, 卧倒门开启时间小于  $2\text{ min}$  时, 船舶纵向系缆力受开门速率影响较为明显, 卧倒门开门时间大于  $2\text{ min}$  后, 纵向系缆力受开门速率的影响迅速减小。卧倒门开启时间由  $1\text{ min}$  延长至  $2\text{ min}$ , 内外水位差为  $-0.2\text{ cm}$  时, 纵向系缆力由  $26.7\text{ kN}$  下降到  $14.5\text{ kN}$ , 减小  $47\%$ 。开门时间大于  $2\text{ min}$ 、相同水位差条件下, 进一步延长开门时间对纵向系缆力减小效果已不十分明显。

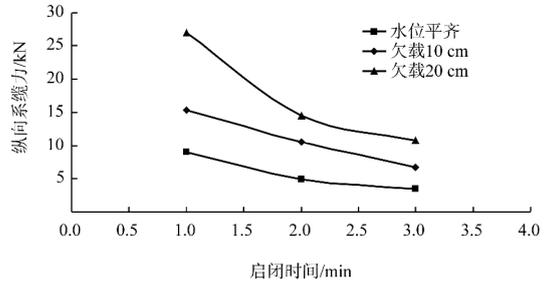


图 2 纵向系缆力与开门时间关系

图 3 为船厢内船舶最大横向系缆力模型实测值。由图 3 可见, 船厢内外最大水位差达到  $0.2\text{ m}$ , 船厢门以  $t_v = 1\text{ min}$  的时间开启,  $500\text{ t}$  船舶的最大横向系缆力也不超过  $2\text{ kN}$ , 因此横向系缆力不是确定卧倒门启闭方式的控制因素。

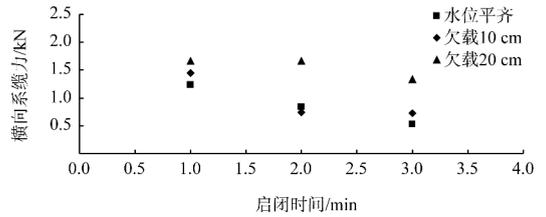


图 3 最大横向系缆力与开启时间及开启水位关系

系列物理模型试验资料表明, 船厢门启闭过程挤压船厢内水体及船厢内外水位差产生的纵向推进波是纵向系缆力的主要产生原因, 纵向系缆力是决定船厢启动方式的主要控制因素。

### 1.2 纵向系缆力影响因素

承船厢卧倒门启闭过程, 假定: 1) 船厢内只有纵向水流运动, 且认为水流纵向加速度远大于垂向及横向加速度; 2) 船厢横断面的流速分布均匀; 3) 压力按静水压力分布; 4) 船舶在任何水平方向不运动, 并忽略动水质量以及阻尼力的作用, 则承船厢内水流和船舶的运动可由下列方程组表示:

连续方程:

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial t}(A_k - A_m) = 0 \quad (1)$$

运动方程:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{Q^2}{A_k - A_m} \right) + g(A_k - A_m) \frac{\partial h}{\partial x} + g \frac{Q|Q|}{c_0^2(A_k - A_m)R} = 0 \quad (2)$$

式中： $A_k=Bd$ ，为承船厢横断面面积； $W=\rho\nabla$ 为船舶排水量， $\nabla$ 为静水中船舶的水下体积； $c_0$ 为谢才系数； $R$ 为水力半径。

承船厢启闭过程船厢内船舶纵向力  $P$  是浅水长波引起的船舶纵向力，主要是由水面倾斜造成的，而其他因素为次要因素，即有

$$P \approx -\frac{\partial h}{\partial x} W \tag{3}$$

由式(2)可以得到：

$$-\frac{\partial h}{\partial x} = \frac{1}{g(A_k - A_m)} \left[ \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{Q^2}{A_k - A_m} \right) + g \frac{Q|Q|}{c_0^2(A_k - A_m)R} \right] \tag{4}$$

分析式(4)，由于船厢门启闭过程产生的流量值较小，该式右边括号内的第1项远大于第2项、第3项，近似将第2、3项假定为一常数项，并将微分形式改写成差分形式，代入式(3)得：

$$P \approx \frac{W}{g(A_k - A_m)} \frac{\Delta Q}{\Delta t} + C \tag{5}$$

因此，卧倒门启闭引起的船厢内流量变化率  $\frac{\Delta Q}{\Delta t}$  以及船舶排水量  $W$ 、船舳横剖面面积  $A_m$ 、船厢过水断面面积  $A_k$  等是影响船厢内船舶停泊条件的主要因素。

### 1.3 平水启闭船厢门

平水启闭船厢门时，船厢内流量变化主要是由卧倒门启闭过程挤压船厢内的水体，将卧倒门运动轨迹范围内的水体推入(开门)或推出(关门)引起的。因此，卧倒门启闭过程引起的流量变率主要与船厢门启闭时间  $t_v$ 、船厢水深  $h$ 、卧倒门高度  $d$ 、船厢宽度  $b$  等因素有关，假定  $d \approx h$ ，则卧倒门平水开启时，船厢内流量变量可表示为：

$$\frac{\Delta Q_p}{\Delta t} \propto f\left(\frac{bh^2}{t_v}\right) \tag{6}$$

将式(6)代入式(5)可得：

$$P_p \approx \frac{W}{g(A_k - A_m)} \left( \frac{\Delta Q}{\Delta t} + C \right) = \frac{W}{A_k - A_m} f\left(\frac{bh^2}{t_v}\right) + C \tag{7}$$

记  $k = \frac{Wbh^2}{(A_k - A_m)t_v}$ ，将不同规模升船机、不同速率平水开启卧倒门时最大纵向系缆力  $P$  与  $k$  的

模型实测值绘制成图4，可见平水开启卧倒门时，船厢内停泊船舶的最大纵向系缆力  $P_p$  与  $\frac{Wbh^2}{(A_k - A_m)t_v}$  基本成线性关系，通过数据拟合可得，船厢平水启闭卧倒门时，开启时间与船舶纵向系缆力间存在以下关系：

$$P_p = 0.152 \frac{Wbh^2}{(A_k - A_m)t_v} + 0.8 \tag{8}$$

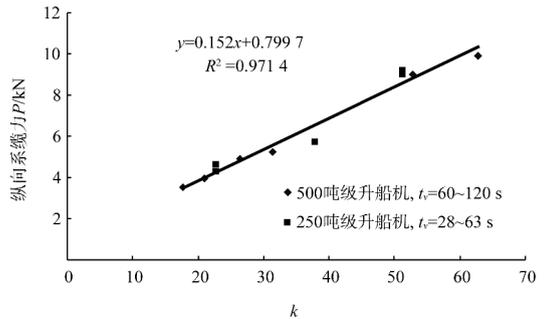


图4 平水开启船舶纵向系缆力与  $k$  的关系

### 1.4 水位差开启船厢门

船厢有水位差开启卧倒门时船厢内流量变化由两部分组成，一部分为水位差引起的流量  $Q_c$ ，另一部分为卧倒门开启挤压水体引起的流量  $Q_m \approx Q_p$ 。定义流入船厢的流量为正，流出为负，则正向水位差开门时  $Q_c$  和  $Q_m$  方向相同，均为正；反向水位差开启时  $Q_c$  和  $Q_m$  方向相反， $Q_c$  为负，可以忽略  $Q_m$  的影响。根据式(5)，有水位差开启卧倒门时船舶纵向系缆力可以由式(9)表示：

$$P_z \approx \frac{W}{g(A_k - A_m)} f\left(\frac{\Delta Q}{\Delta t}\right) = \frac{W}{g(A_k - A_m)} f\left(\frac{\Delta Q_c}{\Delta t}\right) + \frac{W}{g(A_k - A_m)} f\left(\frac{\Delta Q_p}{\Delta t}\right) \tag{9}$$

$$\text{记 } \frac{\Delta Q_c}{\Delta t} \approx f\left(\frac{\Delta h \sqrt{gh}}{t_v}\right), P_c = \frac{W}{g(A_k - A_m)} f\left(\frac{\Delta Q_c}{\Delta t}\right),$$

代入式(9)可得：

$$P_z = \frac{W}{g(A_k - A_m)} f\left(\frac{\Delta Q_c}{\Delta t}\right) + \frac{W}{g(A_k - A_m)} f\left(\frac{\Delta Q_p}{\Delta t}\right) = P_c + P_p \tag{10}$$

因此，船厢有水位差开启时的船舶系缆力可以表示为由水位差引起的系缆力及平板门开启引起的系缆力之和，反向水位差时  $Q_m \approx 0$ ，因此可

以忽略  $P_p$  的影响。记  $K_c = \frac{W\Delta hb}{A_k - A_m} \sqrt{\frac{gh}{t_v}}$ ,  $P_c = P_z - P_p$ ,

其中  $P_z$  为有水位差开门时模型实测的船舶系缆力,  $P_p$  按平水开启的系缆力拟合公式(8)计算, 根据试验资料可以绘制成如图 5 所示的  $P_c - K_c$  曲线, 可见水位差引起的最大纵向系缆力  $P_c$  与

$\frac{W\Delta hb}{A_k - A_m} \sqrt{\frac{gh}{t_v}}$  基本成线性关系, 通过数据拟合可得

船厢平水启闭卧倒门时, 开门速率与船舶纵向系缆力间存在以下关系:

$$P_c = 0.4064 \frac{W\Delta hb}{A_k - A_m} \sqrt{\frac{gh}{t_v}} \quad (11)$$

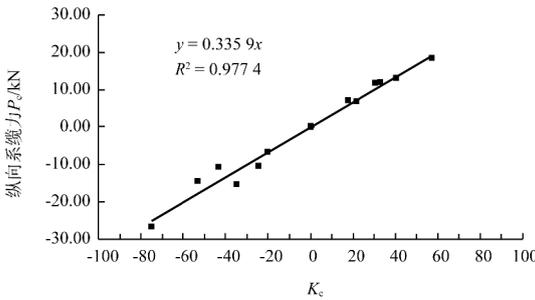


图 5 纵向系缆力与  $K_c$  关系

将式(8)和(11)代入式(10), 可得有水位差开门时船厢内船舶系缆力计算公式(12)和(13)。

$\Delta h \geq 0$  时:

$$P_z = 0.334 \frac{W\Delta hb}{A_k - A_m} \sqrt{\frac{gh}{t_v}} + 0.152 \frac{Wb^2}{(A_k - A_m)t_v} + 0.8 \quad (12)$$

$\Delta h < 0$  时:

$$P_z = 0.334 \frac{W\Delta hb}{A_k - A_m} \sqrt{\frac{gh}{t_v}} \quad (13)$$

## 2 承船厢门启闭及对接标准

图 6 为根据式(12)~(13)计算绘制的船舶纵向系缆力随开门水位及开门时间的变化关系曲线。由图 6 可见, 在相同水位差情况下, 开门速率越快, 船舶纵向系缆力越大, 开门时间大于 120 s 后, 开门速度对纵向系缆力的影响明显减小; 相同开门速度情况下, 开门水位差越大, 纵向系缆力越大, 且正向水头开门的纵向系缆力要大于反向水头。

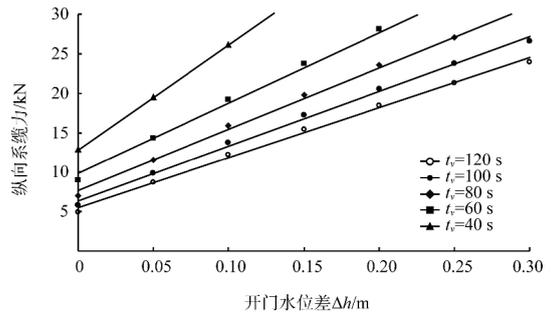


图 6 船厢开门水位与纵向系缆力关系

目前国内对升船机承船厢卧倒门启闭时船厢内船舶停泊条件无明确的规范要求, 一般根据物理模型试验成果结合工程设计相关要求综合确定。表 1 为根据本文公式计算的 500 t 升船机不同开门速度和水位差下的船舶系缆力值。由表 1 可见, 要将船舶纵向系缆力控制在 12.5 kN 以内, 开门水位差为 0.05 m 时, 船厢开门时间  $t_v$  应大于 80 s; 开门水位差 0.1 m 时, 开门时间  $t_v$  应大于 120 s; 开门水头差 0.2 m, 开门时间应大于 280 s。

表 1 纵向系缆力控制标准计算

水位差/m	纵向系缆力/kN						
	$t_v = 40$ s	$t_v = 60$ s	$t_v = 80$ s	$t_v = 100$ s	$t_v = 120$ s	$t_v = 180$ s	$t_v = 280$ s
0.00	12.8	8.8	7.0	5.7	4.9	3.5	2.5
0.05	19.5	14.2	11.6	9.9	8.7	6.6	5.0
0.10	26.1	19.7	15.9	13.7	12.2	9.7	7.5
0.15	32.8	25.1	19.8	17.2	15.4	12.9	10.1
0.20	39.4	30.5	23.6	20.6	18.5	16.0	12.5
0.25	46.1	36.0	27.1	23.7	21.3	19.1	15.1
0.30	52.7	41.4	30.2	26.6	23.9	22.3	17.6

图7是以12.5 kN纵向系缆力作为控制标准绘制的船厢开门速率与对接水位差临界曲线,开门速率与水位差在该曲线上方才能保证开门过程船厢内纵向系缆力小于12.5 kN。由该曲线可以看出,随着开门水位差的增多,为保障船厢内船舶停泊安全,船厢门的开门时间迅速延长,因此从升船机运行效率考虑,船厢允许的最大开门水位不宜太大。

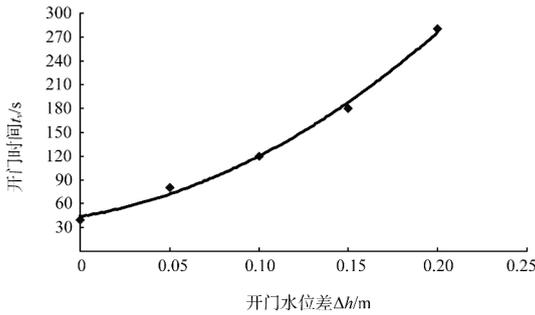


图7 船厢开门时间与对接水位差临界曲线

其他升船机工程,可以根据船厢内停泊船舶允许最大系缆力控制标准,利用本文建立的系缆力计算公式确定合理的卧倒门启闭速度和允许开门水位差。综合国内外升船机的实践经验,500吨级升船机船厢卧倒门开启过程,船厢内外水位差最大不超过 $\pm 0.1$  m,船厢门关闭时间应大于80 s,

开启时间控制应大于120 s。

### 3 结语

本文结合思林、岩滩等升船机承船厢卧倒门不同启闭方式下船舶系缆力试验资料,对承船厢卧倒门启闭过程船舶系缆力影响因素及系缆力估算问题进行研究,提出了有水位差开门时船厢内船舶系缆力计算公式(12)和(13)。升船机设计中可以利用本文建立的系缆力计算公式,结合设计允许的船舶最大系缆力,快速确定合理的卧倒门启闭时间和允许开门水位差。

### 参考文献:

- [1] SL 660—2013 升船机设计规范[S].
- [2] DL/T 5399—2007 水电水利工程垂直升船机设计导则[S].
- [3] 李中华,胡亚安,宣国祥.乌江思林水电站垂直升船机1:10全整体物理模型试验研究报告——承船厢及引航道水力学研究[R].南京:南京水利科学研究院,2010.
- [4] 胡亚安,李中华.乌江构皮滩三级升船机运行安全研究[R].南京:南京水利科学研究院,2012.
- [5] 包钢鉴,陈锦珍.广西岩滩升船机整体模型试验研究报告[R].南京:南京水利科学研究院,1996.

(本文编辑 武亚庆)

## · 消 息 ·

### 世界最宽单塔斜拉桥合龙

11月14日,由二航局承建的厦漳同城大道西溪主桥成功合龙,成为目前世界上最宽的单塔斜拉桥。

厦漳同城大道是一条现代化城市快速路,连接厦门、漳州两地,线路全长26 km,全线按双向6车道至8车道一级公路标准设计,主道设计行车时速80 km。

二航局承建的厦漳同城大道第三标段位于漳州龙海市,是一座跨九龙江、沙洲岛的特大型桥梁,全长3.1 km。西溪主塔高134.6 m,跨径布置为88 m+200 m,中跨钢箱梁宽47 m,边跨混凝土梁宽51 m,桥宽在单塔斜拉桥中位居世界第一,主桥设计为“斜塔+超宽混合梁+扭背索”的组合结构形式。

二航局先后设计了新型钢护筒导向架和新型钢板桩围堰结构,研发了国内最大变幅桥面吊机,首次在主塔施工中使用动臂塔吊,成功攻克了复杂地质桩基施工、塔墩梁固结段和钢混结合段复杂结构施工、超宽边跨梁混凝土主梁施工等多项施工难题。