



# 高水头船闸平底廊道反弧形阀门 净动水启门力恒定流试验\*

刘猛<sup>1</sup>, 胡亚安<sup>2</sup>, 严秀俊<sup>2</sup>

(1. 上海河口海岸科学研究中心, 河口海岸交通行业重点实验室, 上海 201201; 2. 南京水利科学研究院, 通航建筑物建设技术交通行业重点实验室, 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏南京 210029)

**摘要:** 通过恒定流试验对平底廊道反弧形阀门净动水启门力进行了研究, 结果表明: 1) 底缘压力下降是反弧形阀门产生净动水启门力的最主要原因; 2) 各开度下反弧形阀门净动水启门力与孔口水流弗劳德数的平方成线性关系; 3) 阀门厚度变化对反弧形阀门最大净动水启门力影响较小。

**关键词:** 高水头船闸; 反弧形阀门; 恒定流; 净动水启门力; 净动水压力分布

中图分类号: U 641

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2016)12-0082-07

## Steady flow experiment on net hydrodynamic uplifting force of reversed tainter value in flat-bottom galleries of high-head lock

LIU Meng<sup>1</sup>, HU Ya-an<sup>2</sup>, YAN Xiu-jun<sup>2</sup>

(1. Shanghai Estuarine and Coastal Research Center, Key Laboratory of Estuarine & Coastal Engineering Ministry of Transports, Shanghai 201201, China; 2. 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:** Net hydrodynamic uplifting force of reversed tainter value in flat-bottom galleries of high-head lock was studied through steady flow tests, main result as follows: 1) The pressure decreased on hemline is the main reason that increase net hydrodynamic uplifting force; 2) The net hydrodynamic uplifting force of reversed tainter value has linear relation with square of Froude number of orifice current in every opening; 3) The thickness change of value has little influence on the maximum net hydrodynamic uplifting force.

**Keywords:** high-head lock; reversed tainter value; steady flow; net hydrodynamic uplifting force; net hydrodynamic pressure distribution

船闸输水阀门启闭频繁、工作条件复杂, 除阀门空化特性及防空化措施是船闸设计和建设中的关键技术难题外, 保证阀门启闭系统的可靠性及启闭的灵活性也是广大科研设计人员极为重视的问题, 而阀门最大启门力直接关系到启闭机容量的设计。在高水头船闸中, 双面板全包反弧形阀门(简称反弧形阀门)由于其良好的性能得到广

泛应用, 近几十年来, 该门型的使用已经趋于标准化(如阀门面板不透水、底缘角度在关闭时为90°、支臂包护方式采用半圆形等), 其启门力公式可以表示为  $F=f(F_{\text{门浮重}}, F_{\text{吊杆浮重}}, F_{\text{摩擦阻}}, F_{\text{净}})$ , 其中阀门、吊杆浮重以及各种摩擦阻力对启门力的影响都可根据结构设计确定, 而阀门净动水启门力  $F_{\text{净}}$  由于成因复杂至今只能通过试验确定, 无相

收稿日期: 2016-09-16

\*基金项目: 国家重点研发计划 (2016YFC0402001)

作者简介: 刘猛 (1983—), 男, 硕士, 副研究员, 从事河口水沙运动及河口航道治理等方面研究。

关公式可以计算。

南京水利科学研究院早在 20 世纪 70 年代针对葛洲坝船闸对阀门的形式进行过研究<sup>[1-3]</sup>, 指出了不同形式阀门启门力特性之间的区别, 后来又针对选定的反弧形阀门进行了深入的研究<sup>[4]</sup>, 研究了作用水头、底缘角度及支臂包护方式等对净动水启门力的影响。2007 年, 南京水利科学研究院又对作用水头的影 响进行了深入研究<sup>[5]</sup>, 得到在启门速率较小时, 阀门最大净动水启门力与初始作用水头近似成线性关系的结论, 美国设计手册中的数据经过整理也有同样结论, 图 1 显示了不同形式阀门单宽净动水启门力峰值  $F_p$  与初始作用水头  $\Delta H$  的近似线性关系。

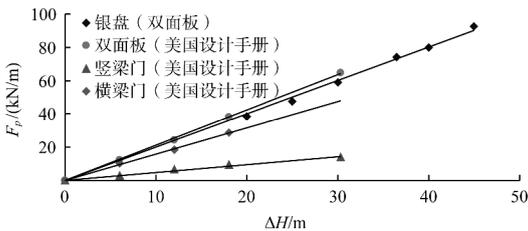


图 1 不同形式阀门净动水启门力峰值与作用水头的关系

影响反弧形阀门净动水启门力的因素较多, 如作用水头、输水系统阻力特性、廊道体型、开门速率以及阀门尺寸等, 但归根结底它们都是通过改变阀门周围的流速场和压力场来影响和决定阀门净动水启门力的大小。本文拟通过恒定流试验首先对高水头船闸平底廊道中反弧形阀门净动水启门力的形成原因及其规律进行深入研究, 然后着重研究了阀门孔口水流弗劳德数 ( $Fr_l = v/\sqrt{gr}$ ) 及门厚 ( $d/r$ ) 变化对反弧形阀门净动水启门力的影响, 最后总结提出恒定流条件下平底廊道中反弧形阀门净动水启门力的计算方法, 为进一步研究非恒定流作用下平底廊道中反弧形阀门净动水

启门力的计算方法奠定基础。由于高水头船闸反弧形阀门最大启门力一般处于  $n=0.3\sim 0.6$  开度, 主要集中在  $n=0.4\sim 0.5$  开度附近, 考虑工程实际应用需要, 本文仅对  $n=0.2\sim 0.7$  开度内净动水启门力进行研究。

## 1 研究方法

本文主要通过物理模型试验及理论分析方法对恒定流条件下平底廊道中反弧形阀门净动水启门力进行研究。图 2 为模型阀门段布置, 阀门外弧面半径  $r$  为 237.5 mm, 阀门处廊道断面宽  $b$  为 138 mm、高  $h$  为 163 mm。试验所采用反弧形阀门门厚  $d$  分别为 10、35、50 mm, 支臂包护方式相同, 均为半圆形, 阀门关闭时, 底缘角度均为  $90^\circ$ 。图 3 为模型整体布置, 上游水库由平水槽稳定水位, 通过溢流孔稳定及控制闸室水位; 整个系统中设置了 3 道阀, 阀 1 用于供水及断水, 阀 2 用于调节输水廊道流量, 阀 3 用于排空闸室内部水体; 阀门净动水启门力是通过电阻式拉力传感器测量, 测量误差为 0.5%, 流量使用电磁流量计测量。为了扩大试验中阀门断面流速变化的范围, 更好得到孔口水流弗劳德数 ( $Fr$ ) 对阀门净动水作用力的影响规律, 在恒定流试验时, 同时控制上下游水位不变, 通过调节阀 2 来改变孔口流速。

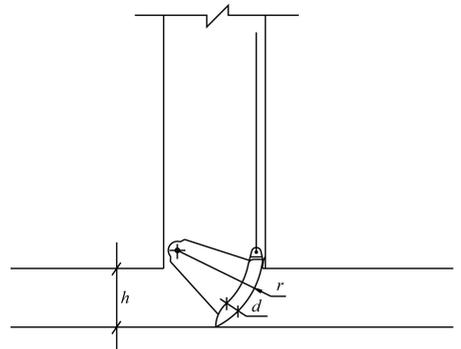


图 2 阀门段布置

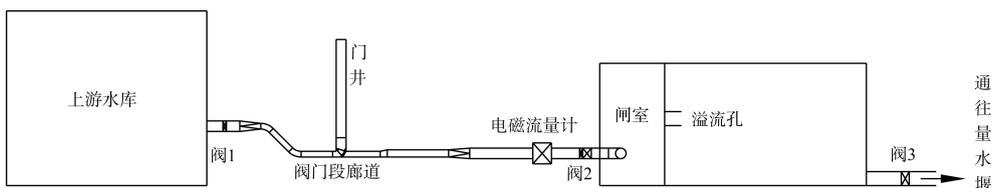


图 3 模型整体布置

### 2 研究成果

阀门与吊杆的连接见图4,  $M$  为阀门净动水力矩,  $F_{净}$  为阀门净动水启门力, 由几何关系可得净动水启门力  $F_{净}$  与净动水力矩  $M$  的关系为:

$$F_{净} = k_1 M \quad (1)$$

式中:  $k_1 = \cos\theta_n / (R \cos\varphi_n)$ , 为几何参数, 由设计而定, 各船闸一般不同, 但每个船闸是固定的。

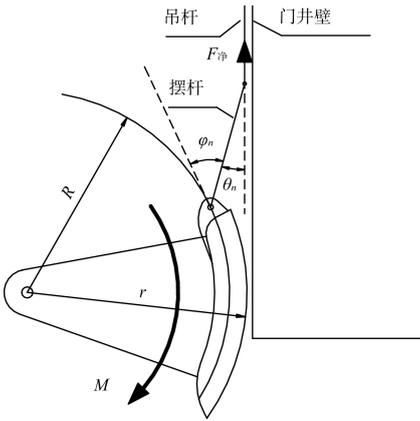


图4 门体与吊杆连接

下面将对净动水力矩  $M$  的变化规律进行研究, 寻找其计算公式, 然后引入几何参数  $k_1$ , 从而获得阀门净动水启门力计算公式。

### 2.1 反弧形阀门门体压力分布

在恒定流条件下, 对门厚  $d$  为 50 mm 的反弧形阀门门体压力分布进行测量, 由于阀门内、外弧面压力方向通过门轴, 对净动水作用力没有影响, 试验仅测定了底缘、顶缘及上下支臂的压力分布, 共布置了 22 个测点, 测点布置见图 5。

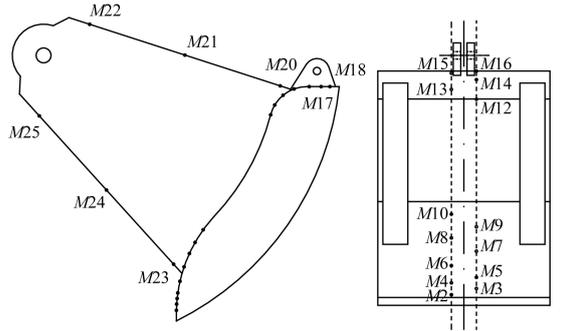


图5 测点布置

图6反映的是恒定流条件下, 阀门门体压力分布相对于静水条件下(该处静水条件下门井水位和对应开度恒定流条件下门井水位相同)的变化量, 即净动水压力分布, 计算时假设门体压力分布沿轴向不变。

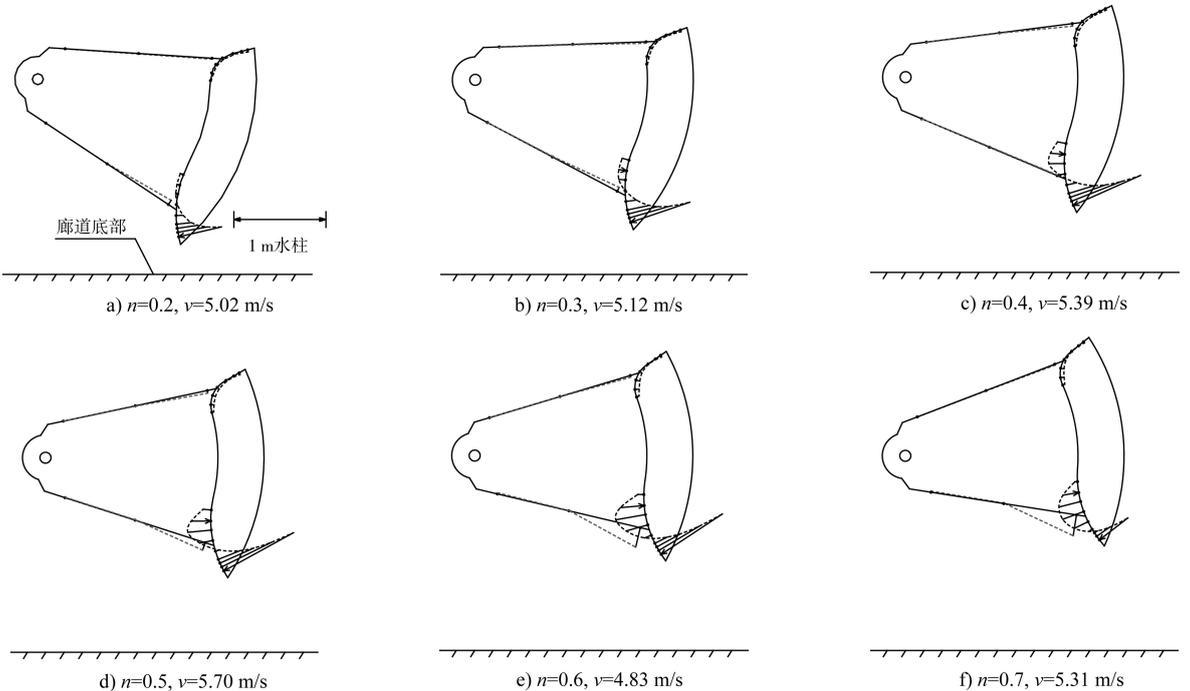


图6 门体净动水压力分布 ( $d=50$  mm)

由图 6 可见, 各开度阀门门体净动水压力分布规律较为相似, 主要表现为:

1) 上支臂、顶缘净动水压力为负值, 数值较小, 且分布较均匀;

2) 下支臂压力分布较上支臂复杂, 距门轴较近区域, 净动水压力小且分布均匀; 距门轴较远区域, 压力分布不均匀, 距离越远压力 (绝对值) 也越大, 小开度时 ( $n \leq 0.4$ ) 为负压, 大开度 ( $n \geq 0.5$ ) 时为正压;

3) 底缘净动水压力分布极不均匀, 形成明显正压区和负压区, 正压区靠近内弧面, 负压区靠近外弧面。随着阀门开度的增大, 正压区范围不断扩大, 负压区范围逐渐减小, 正、负压区的压力数值整体上均先增大后减小, 在  $n = 0.5$  开度附近达到最大。

由门体净动水压力产生的净动水力矩可表示为:

$$M_{\text{净}} = \int_0^r \rho g b x (h_1 \cos \alpha_1 - h_2 \cos \alpha_2) dx \quad (2)$$

令  $q = x/r$ , ( $0 \leq q \leq 1$ ), 式(2)可变换为:

$$M_{\text{净}} = \int_0^1 \rho g b q r^2 (h_1 \cos \alpha_1 - h_2 \cos \alpha_2) dq \quad (3)$$

$$\text{设 } m = \rho g b q r^2 (h_1 \cos \alpha_1 - h_2 \cos \alpha_2) \quad (4)$$

式中:  $\rho$  为水的密度;  $g$  为重力加速度;  $b$  为门体计算宽度, 支臂处取两个支臂厚度之和, 门叶处取门宽, 即廊道宽度;  $x$  为力臂, 即计算圆周半径;  $r$  为阀门外弧半径;  $h_1$ 、 $h_2$  分别为计算圆周与门体上下交点处的净动水压力;  $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$  分别为计算圆周与门体上下交点处法线和该处计算圆周切线的夹角 (图 7)。

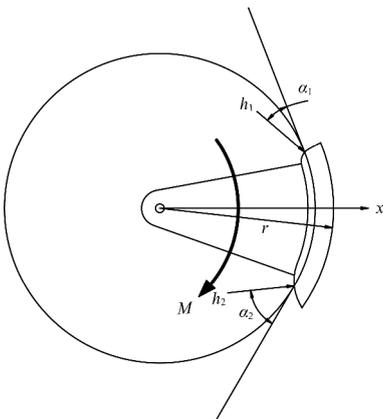
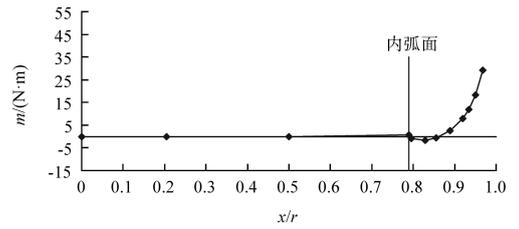
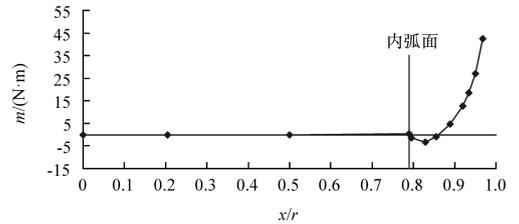


图 7 净动水力矩计算示意图

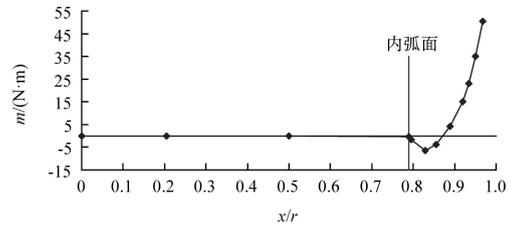
选取阀门上 11 个半径不同的圆周“切片单元”进行  $m$  值计算, 并绘出了其沿径向的分布曲线 (图 8), 横坐标为各计算圆周相对半径 ( $x/r$ ), 纵坐标为  $m$ ,  $m$  沿横坐标轴的积分值为 (由净动水压力分布产生的) 阀门净动水力矩  $M_{\text{净}}$ , 正值表现为下吸力, 负值为上托力, 其计算结果 (已换算为净动水启门力) 见表 1, 计算值与实测值吻合良好, 可见, 高水头船闸反弧门净动水启门力主要是由净动水压力分布决定, 其他作用力 (如黏性力) 相对可以忽略不计。



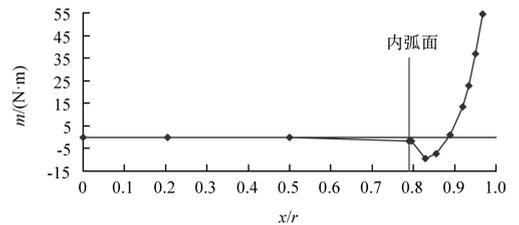
a)  $n=0.2, v=5.02 \text{ m/s}$



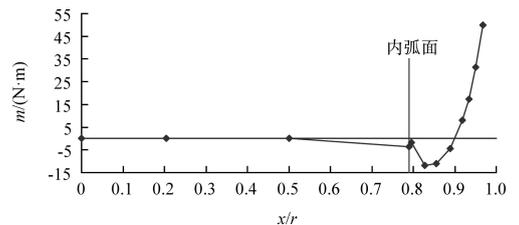
b)  $n=0.3, v=5.12 \text{ m/s}$



c)  $n=0.4, v=5.39 \text{ m/s}$



d)  $n=0.5, v=5.70 \text{ m/s}$



e)  $n=0.6, v=5.99 \text{ m/s}$

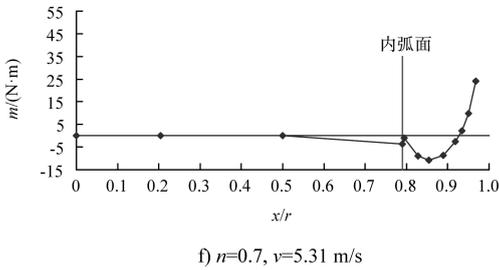


图8 阀门  $m$  值分布

表1 净动水启门力计算值与实测值比较

$n$	启门力/N			
	实测值	计算值	门叶部分	支臂部分
0.2	12.78	11.42	11.04	0.38
0.3	17.58	17.12	16.81	0.31
0.4	20.46	18.90	19.18	-0.28
0.5	20.25	18.52	19.88	-1.36
0.6	10.47	12.51	15.40	-2.89
0.7	-2.28	0.67	3.74	-3.07

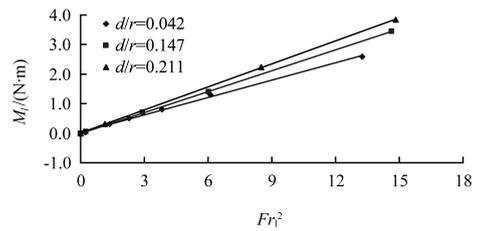
由图8和表1可见,各开度阀门  $m$  值分布规律相似,支臂区( $0 < x/r < 0.7895$ )  $m$  值较小,其积分值(即支臂区净动水力矩)在小开度( $n \leq 0.3$ )时为正值,大开度时为负值,整体而言,其对阀门净动水力矩的影响在  $n \leq 0.5$  开度时不大,约在10%以内,但大开度时影响较大;门叶区  $m$  值沿径向变化较大,靠近内弧面区域为负值,它是产生浮托力的最主要的原因,远离内弧面区域为正值,是产生下吸力的最主要的原因,随着阀门开度的增大,负值区范围不断增大,正值区范围不断缩小,该区产生的净动水作用力在  $n = 0.5$  开度附近达到最大(约 19.88 N)。由门叶区  $m$  值分布曲线可知,中间开度( $0.6 \geq n \geq 0.4$ )时,当  $x/r$  趋向 1 时,  $m$  值迅速增加,表明阀门绝大部分净动水启门力(下吸力)是由底缘尖端的较小区域压力下降产生的。

2.2 恒定流下反弧形阀门净动水力矩特性

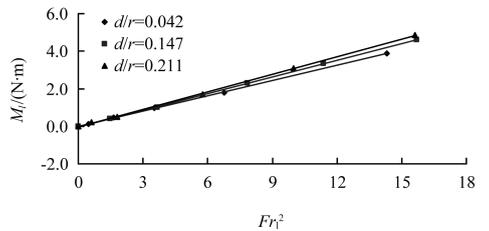
国内6座典型高水头船闸输水阀门(均采用反弧形阀门)门厚尺寸见表2<sup>[6-11]</sup>,  $d/r$  范围在 0.093~0.211,为了研究门厚( $d/r$ )对净动水力矩的影响,试验选取3种门厚( $d/r$  分别为 0.042、0.147、0.211)的反弧形阀门进行试验,结果见图9。

表2 国内6座典型高水头船闸阀门门厚

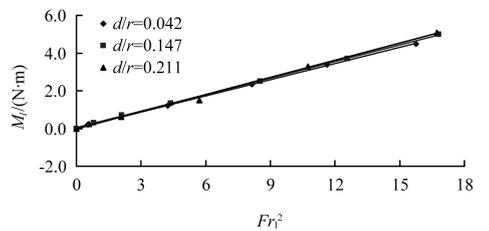
船闸名称	阀门半径 $r/\text{mm}$	阀门厚度 $d/\text{mm}$	$d/r$	设计 水头/m	廊道 高度/m
三峡船闸	7 000	648	0.093	45.20	4.5
草街船闸	5 200	650	0.125	26.50	3.6
银盘船闸	3 800	800	0.211	36.46	2.6
葛洲坝船闸	8 000	600	0.075	27.00	5.5
大化船闸	4 000	400	0.100	29.00	2.6
乐滩船闸	4 000	400	0.100	29.10	2.6



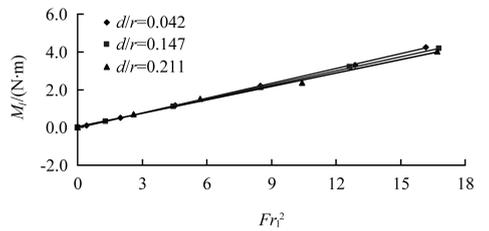
a)  $n=0.2$



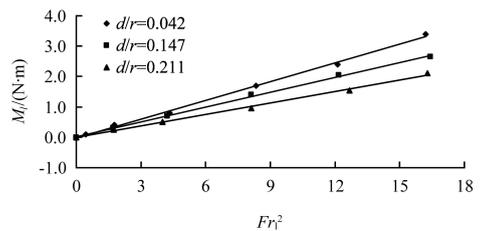
b)  $n=0.3$



c)  $n=0.4$



d)  $n=0.5$



e)  $n=0.6$

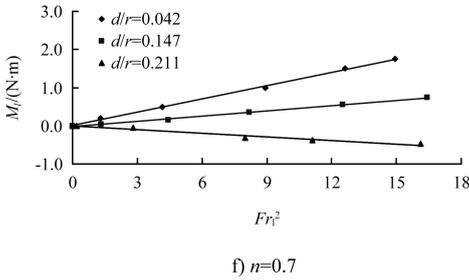


图 9 净动水力矩  $M$  与  $Fr^2$  关系

1) 各开度下反弧形闸门的净动水力矩与孔口弗劳德数的平方 ( $Fr_1^2$ ) 成线性关系, 其斜率  $k_2$  ( $k_2 = M/Fr_1^2$ ) 随着开度  $n$  的变化而变化。  $k_2$  与  $n$  的关系见图 10, 随着开度的增大,  $k_2$  先增大, 后减小, 最大值出现在  $n=0.3 \sim 0.5$  开度,  $d/r$  越大,  $k_2$  的峰值对应的开度越小。

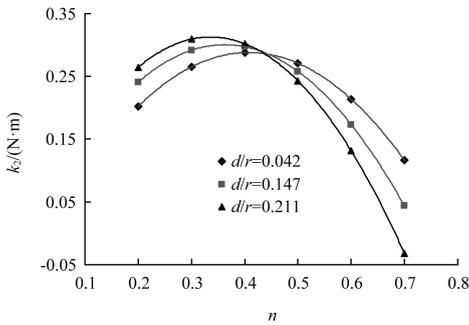


图 10  $k_2$  与  $n$  的关系

2)  $d/r$  对  $k_2$  影响较大。  $k_2$  与  $d/r$  的关系见图 11,  $n \leq 0.3$  开度时,  $k_2$  随着  $d/r$  的增大而增大;  $n \geq 0.5$  时,  $k_2$  随着  $d/r$  的增大而减小;  $n = 0.4$  开度附近时,  $k_2$  受  $d/r$  变化影响相对较小。由于闸门净动水启门力峰值通常出现在  $n = 0.3 \sim 0.5$  开度, 而该区间  $k_2$  受  $d/r$  变化的影响较小, 这表明门厚 ( $d/r$ ) 变化对最大净动水启门力影响不明显。

**2.3 恒定流下反弧形闸门净动水启门力计算**

试验及分析成果表明, 恒定流下模型的反弧形闸门净动水力矩计算公式可以表示为:

$$M_l = k_2 Fr_1^2 \quad (5)$$

其中,  $k_2$  值可从图 11 上直接查取, 或根据式(6)进行计算:

$$k_2 = \left[ -17.888 \left( \frac{d}{r} \right)^2 + 0.951 \left( \frac{d}{r} \right) - 2.009 \right] \cdot \left[ n + 0.423 \left( \frac{d}{r} \right) - 0.425 \right]^2 + 0.448 \left( \frac{d}{r} \right)^2 + 0.033 \left( \frac{d}{r} \right) + 0.286 \quad (6)$$

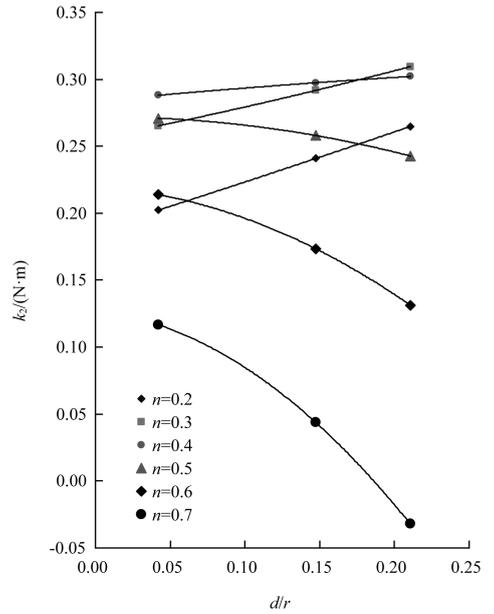


图 11  $k_2$  与  $d/r$  的关系

将式(5)推广适用于原型反弧形闸门净动水力矩计算。任何一个原型反弧形闸门都可以根据  $d/r$  及  $n$  计算或查取  $k_2$  值, 这是一个模型基本值。原型与模型因尺度不同而引起的力矩变化可用无量纲数  $k_3$  表示, 其表达式为:

$$k_3 = \frac{M_{净P}}{M_{净0}} = \frac{\int_0^1 \rho g b_P q r_P^2 (h_{P1} \cos \alpha_{P1} - h_{P2} \cos \alpha_{P2}) dq}{\int_0^1 \rho g b_0 q r_0^2 (h_{01} \cos \alpha_{01} - h_{02} \cos \alpha_{02}) dq} \quad (7)$$

式中: 下标 0 代表模型参量; 下标 P 代表原型参量。

假设门体压力轴向均匀分布, 由重力相似准则可知:

$$k_3 = \frac{b_P r_P^2 \int_0^1 q (h_{P1} \cos \alpha_{P1} - h_{P2} \cos \alpha_{P2}) dq}{b_0 r_0^2 \int_0^1 q (h_{01} \cos \alpha_{01} - h_{02} \cos \alpha_{02}) dq} = \frac{b_P}{b_0} \left( \frac{r_P}{r_0} \right)^3 = \frac{b_P}{0.138} \left( \frac{r_P}{0.2375} \right)^3 \quad (8)$$

式中： $b_p$ 、 $r_p$  的单位为  $m$ 。

综上，在恒定流条件下，平底廊道中反弧形阀门净动水启门力计算公式可以表示为：

$$F_{净} = k_1 k_2 k_3 Fr_1^2 \tag{9}$$

式中： $k_1 = \frac{\cos\theta_n}{R\cos\varphi_n}$ ，为几何参数 ( $m^{-1}$ )； $k_2 = f\left(n, \frac{d}{r}\right)$ ，

可从图 11 上查取或根据式(6)计算； $k_3 = \frac{b_p}{0.138} \cdot$

$\left(\frac{r_p}{0.2375}\right)^3$ ，为比尺参数； $Fr_1 = v/\sqrt{gr}$  为孔口水流

弗劳德数； $r$  为反弧形阀门外弧面半径 ( $m$ )。

### 3 结语

1) 高水头船闸反弧门净动水启门力主要是由门体净动水压力分布决定的。恒定流条件下，反弧形阀门底缘净动水压力分布极不均匀，形成正压区和负压区，随着阀门开度的增大，正压区范围不断扩大，而负压区范围逐渐减小。

2) 底缘压力下降是反弧形阀门产生净动水启门力的最主要原因，越是靠近底缘尖端区域，压力下降对净动水启门力影响越大；支臂区压力变化也是产生净动水启门力的一个原因，其在  $n \leq 0.5$  开度时对净动水启门力影响不大，所占比例在 10% 以内，但大开度时影响较大。

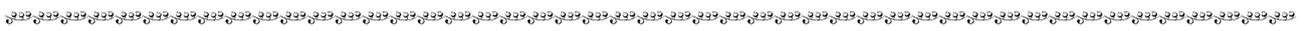
3) 恒定流条件下，各开度反弧形阀门净动水力矩与孔口水流弗劳德数的平方 ( $Fr_1^2$ ) 成线性关系，门厚 ( $d/r$ ) 变化对最大净动水启门力影响不明显。

4) 本文提出了恒定流下平底廊道反弧形阀门净动水启门力的计算公式。

### 参考文献：

- [1] 南京水利科学研究院.三三〇工程 2# 船闸上闸首输水廊道反弧形门水工模型试验初步成果[R].南京:南京水利科学研究所,1972.
- [2] 南京水利科学研究院.三三〇工程 2# 船闸上闸首输水廊道反弧形门水工模型试验报告(二)[R].南京:南京水利科学研究所,1974.
- [3] 南京水利科学研究院.三三〇工程 2# 船闸输水阀门水力学试验阶段报告(三)—泄水阀门水力学试验[R].南京:南京水利科学研究所,1974.
- [4] 南京水利科学研究院.三峡永久船闸阀门水动力学特性研究[R].南京:南京水利科学研究所,2001.
- [5] 西南京水利科学研究所.部超高水头枢纽通航建筑物关键技术研究[R].南京:南京水利科学研究所,2007.
- [6] 胡亚安,李君,李中华.红水河大化船闸输水系统水力特性原型调试研究[J].水运工程,2008(3):87-92.
- [7] 胡亚安,李君,宗慕伟.红水河乐滩船闸输水系统水力特性原型调试研究[J].水运工程,2008(1):6-13.
- [8] 胡亚安,郑楚珮.葛洲坝一号船闸输水阀门空化特性原型观测[J].水科学进展,1994,5(3):235-241.
- [9] 胡亚安,张瑞凯.三峡船闸底扩与顶扩体型水力特性综合研究[J].水科学进展,1998,9(2):164-169.
- [10] 南京水利科学研究所.三峡永久船闸阀门水动力学特性研究[R].南京:南京水利科学研究所,2001.
- [11] 南京水利科学研究所.嘉陵江草街船闸施工图阶段阀门水力学试验研究[R].南京:南京水利科学研究所,2007.

(本文编辑 武亚庆)



## 著作权授权声明

全体著作权人同意：论文将提交《水运工程》期刊发表，一经录用，本论文数字化复制权、发行权、汇编权及信息网络传播权将转让予《水运工程》期刊编辑部。