



淹没水深对船闸一字闸门 运行水阻力矩的影响*

刘本芹^{1,2}, 李云^{1,2}, 陈琼¹, 徐新敏¹

(1. 南京水利科学研究院, 江苏南京 210029;

2. 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: 与人字闸门相比, 一字闸门可以较好地适应我国西部河流上的“窄高型”船闸, 但关于大型一字闸门运行水动力特性的研究几乎为空白。为了探究大型一字闸门运行水阻力矩变化规律, 针对淹没水深这一主要因素开展了系列基础研究。通过比尺为 1:20 的一字闸门及启闭机联动物理模型试验, 分析了闸门启闭过程水阻力矩变化特性, 得到了水阻力矩峰值与淹没水深和角加速度的关系式。结果表明, 淹没水深越大, 水阻力矩峰值对角加速度的变化越敏感, 一字闸门在大淹没水深下宜采用无级变速运行方式, 尽可能减小启闭初始及末了的角加速度值, 从而降低水阻力矩峰值, 减小启闭机设计难度。

关键词: 船闸; 一字闸门; 水阻力矩; 淹没水深

中图分类号: U 641

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2016)12-0059-05

Effect of submergence on hydrodynamic resisting torque of single leaf gate operation

LIU Ben-qin^{1,2}, LI Yun^{1,2}, CHEN Qiong¹, XU Xin-min¹

(1. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China;

2. 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: Compared with miter gate, the single leaf gate can commendably adapt to the “narrow high type” ship locks on the river in Western China, but the study on the hydrodynamic characteristics of the large single leaf gate is almost blank. In order to explore the change characteristics of hydrodynamic resisting torque in large single leaf gate operation, we carry out a series of basic research on submergence which is the main factor. Through associated physical model test of the single leaf gate and the hydraulic hoist with the scale 1:20, the change characteristics of the hydrodynamic resisting torque during the opening and closing process are analyzed and the relationship between the maximum torque and the submergence and the angular acceleration is obtained. The results show that the greater the submergence is, the more sensitive the maximum torque to the change of the angular acceleration will be. The single leaf gate should adopt the stepless change speed under the large submergence condition to decrease the initial and final angular acceleration, which can reduce the maximum torque and the hydraulic hoist design difficulties.

Keywords: ship lock; single leaf gate; hydrodynamic resisting torque; submergence

我国西部河流水量及水位随季节变化大, 河势狭窄, 水利枢纽多为高坝, 通航船闸体型多为

“窄高型”, 船闸闸门具有运行水头高、淹没水深和水位变幅大的特点, 下闸首闸门的高宽比普遍

收稿日期: 2016-09-16

*基金项目: 国家重点研发计划 (2016YFC0402008); 交通运输部科技项目 (2013329746280)

作者简介: 刘本芹 (1977—), 女, 硕士, 高级工程师, 从事通航建筑物水力学科研工作。

超过了4.0。这类船闸的工作闸门采用人字闸门将面临两大问题：1) 人字闸门通过背拉杆调整闸门扭曲度，高宽比太大时安装难度大，达不到精度要求；2) 人字闸门为两扇闸门，高宽比太大时难以满足两扇闸门运行同步性及关闭状态密水性等要求。采用一字闸门能够显著降低闸门门体的“高宽比”，可较好地解决上述人字闸门存在的结构方面的问题。与此同时，对于西部超高水头船闸而言，由于闸门淹没水深及水位变幅都非常大，一字闸门的启闭门力及运行水阻力矩将成倍增加。为了适应我国西部山区通航河流各梯级船闸设计和建设需求，本文通过物理模型试验，针对淹没水深这一影响一字闸门动水阻力矩的主要因素，开展了系列基础研究，以便掌握一字闸门在不同淹没水深下的运行动力特性和动水阻力矩变化规律，提出降低一字闸门启闭门力峰值的科学运行方式，为一字闸门在高水头船闸上的应用奠定基础。

1 物理模型设计

船闸一字闸门在上下游水位齐平时启闭运行，门体绕旋转轴在水中旋转时受到水流对其产生的动水阻力，该阻力的大小及其变化规律是一字闸门启闭机及其结构设计的重要依据。根据我国山区通航河流的航道标准及高水头单级船闸的设计规模，船闸口门宽度一般为12 m，最大水头在30 m以上，以此为基础条件设计一字闸门水动力特性研究物理模型。

一字闸门原型启闭机的主要技术参数如下：

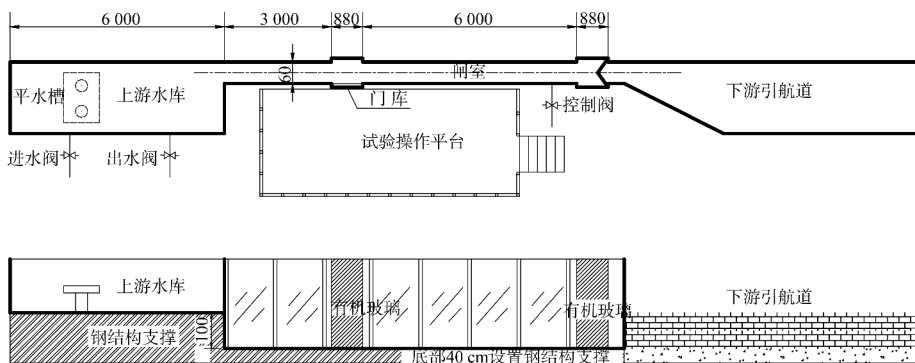
- 1) 启闭机容量：正常工作状态下，油缸推力（闭门力）2 000 kN，油缸拉力（启门力）1 800 kN；非正常工作状态下的闭门力为3 200 kN。
- 2) 油压：开门油压 16.3 MPa，关门油压 9.4 MPa。
- 3) 油缸内径 $\phi 520$ mm，活塞杆径 $\phi 360$ mm。
- 4) 工作行程 6 866 mm，全行程为 7 000 mm。

1.1 模型比尺

物理模型按重力相似准则设计，同时满足几何相似、水流运动相似、门体重心相似及启闭机运动相似。物理模型总体要求为：1) 液压启闭系统满足闸门运行要求；2) 闸门工作段几何边界严格相似；3) 进、出水流条件基本相似。依据JTJ/T 235—2003《通航建筑物水力学模拟技术规程》及SL 161.2—2013《船闸水力模拟技术规程》的相关规定和要求^[1-2]，确定本文一字闸门水动力学研究物理模型的几何比尺为1:20，并计算出时间比尺 $\lambda_t = \lambda_l^{0.5} = 1:4.47$ ，速度比尺 $\lambda_v = \lambda_l^{0.5} = 1:4.47$ ，力的比尺 $\lambda_F = \lambda_l^3 = 1:8\ 000$ ，力矩比尺 $\lambda_M = \lambda_l^4 = 1:160\ 000$ 。

1.2 模型范围

为了较好地模拟原型中一字闸门运行条件，反映一字闸门实际运行时水动力特性，在分析一字闸门运转时可能影响范围的基础上，确定模型制作范围包括闸首及上、下游5倍以上闸首口门宽度的水域，模型整体布置由上游水库、上游渠道、闸首、门龛、门叶、顶底枢、启闭系统、闸室、下游引航道及相关平水设施等几部分组成，模型总体设计平纵面布置及试验水槽见图1。



a) 物模总体布置 (单位: mm)



b) 试验水槽

图 1 物理模型总体布置及试验水槽

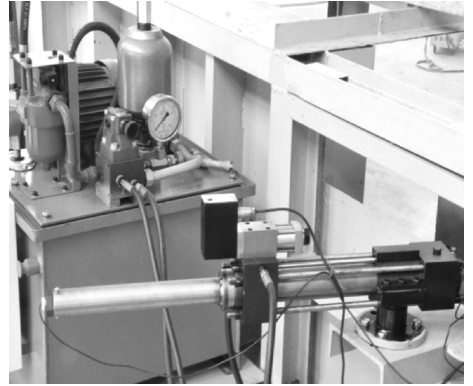


图 3 模型一字闸门启闭系统

1.3 一字闸门结构及启闭系统

模型一字闸门门体结构、顶底枢、启闭机杆件及门库布置见图 2。为了保证模型一字闸门的运动相似, 研制了图 3 所示的一字闸门伺服式液压启闭系统。该系统由油源(包括电机、齿轮泵、蓄能器、空气滤清器、溢流阀、过滤器等)、油缸及活塞杆、伺服阀等组成; 其控制系统由计算机、A/D 和 D/A 伺服放大器、伺服阀、安装在活塞杆上的位移传感器组成。这套系统具有运行平稳、精度高、易控制等特点, 可满足试验要求。实际操作时, 计算机按照给定的一字闸门启闭机活塞杆运动方式及参数计算后给出控制信号, 经 D/A 向位置系统发出位置指令信号, 位置系统跟踪指令信号运动, 实现不同参数设置条件下的各种运动方式, 如匀速、一级无级变速等。

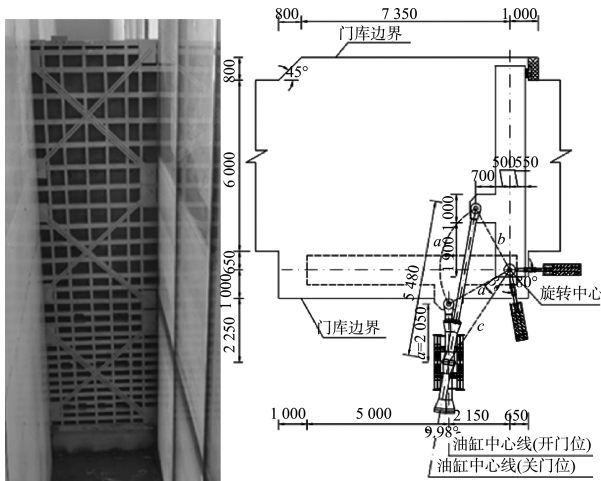


图 2 模型一字闸门结构、启闭机杆件及门库布置
(单位: mm)

2 动水阻力矩变化特性

2.1 阻力矩分析

Lejeune A 提出启闭总阻力矩 M 的组成公式如下^[3]:

$$M = M_f + M_i + M_s + M_v + M_w + M_h \quad (1)$$

式中: M_f 为机械摩阻力矩; M_i 为闸门惯性阻力矩; M_s 为淤泥阻力矩; M_v 为风阻力矩; M_w 为波浪阻力矩; M_h 为动水阻力矩, 动水阻力矩是由闸门运转时闸门两侧水位差而产生的阻力矩 M_e 及水体阻力矩 M_n 两部分组成。

模型试验过程中不考虑 M_s 、 M_v 、 M_w , 测得的总阻力矩 M 包含:

$$M = M_f + M_i + M_h \quad (2)$$

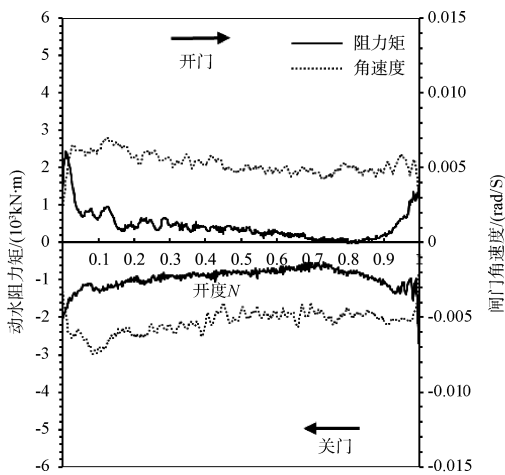
因此, 一字闸门启闭过程中的动水阻力矩可由测得的总阻力矩减去门体惯性阻力矩和机械摩阻力矩获得。

2.2 动水阻力矩特性

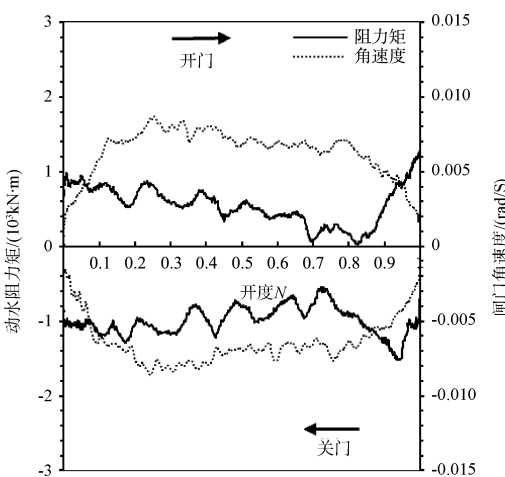
一字闸门启闭机活塞杆匀速运行过程, 门体运行初期存在瞬时启动加速度, 需克服巨大水体惯性阻力作用, 动水阻力矩出现峰值; 随着开门或关门过程的进展, 活塞杆运行速度基本稳定, 门体角速度变化较小, 动水阻力矩显著降低; 在运行末期门体角速度迅速减小, 动水阻力矩又达到一峰值。由此得出, 一字闸门启闭运行过程的动水阻力矩曲线是两头大、中间小的马鞍形状, 见图 4a), 闸门启动初期的动水阻力矩峰值大于运

行末期,受门库边界的影响,关门初期动水阻力矩波动特征明显。

一字闸门无级变速运行方式下,运行初期和末期角速度均存在一定变速时间,在该时段内逐渐由零增大到某一稳定值或由该值逐渐降为零,因此与匀速运行相比能够较大幅度地降低动水阻力矩峰值,相同运行时间下,开、关门过程动水阻力矩峰值分别降低 45%、30%。启闭运行全过程的动水阻力矩曲线仍基本呈现两端大、中间小的特征,见图 4b)。



a) 匀速



b) 对称一级无级变速,增减速时间为90 s

图 4 一字闸门 5 min 启闭运行动水阻力矩变化特性曲线

试验得到的大型一字闸门启闭运行过程动水阻力矩总体变化特性与已有人字闸门运行特性基本一致^[4-5]。

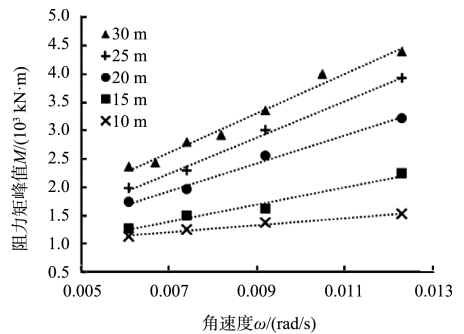
3 淹没水深对动水阻力矩的影响

通过开展系列不同淹没水深、不同运行方式下的一字闸门及启闭机联动物理模型试验,针对受边界条件影响较小的开门初和关门末阶段的动水阻力矩峰值加以分析,得出匀速运行动水阻力矩峰值与淹没水深和角速度的关系(图 5)以及一级无级变速运行动水阻力矩峰值与淹没水深和角加速度的关系(图 6)。

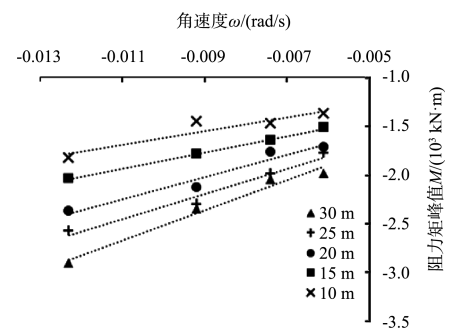
匀速运行时,开门初和关门末的动水阻力矩峰值与角速度成正相关的线性关系,采用最小二乘法求得表 1 中不同淹没水深匀速运行方式下的一字闸门动水阻力矩峰值与角速度的运算关系,各淹没水深下的动水阻力矩峰值均可以表示为

$$M = k_y \omega + b_y \quad (3)$$

式中: M 为动水阻力矩峰值($10^3 \text{ kN}\cdot\text{m}$); ω 为闸门角速度(rad/s); b_y 为截距,可查表 1; 斜率 k_y 与淹没水深 H 的关系见图 7a),随着淹没水深增加,曲线斜率线性增加,说明淹没水深越大,一字闸门开门初及关门末动水阻力矩峰值对闸门角速度的变化越敏感,且敏感程度随淹没水深线性增加。



a) 开门初



b) 关门末

图 5 匀速运行动水阻力矩峰值与淹没水深和角速度的关系

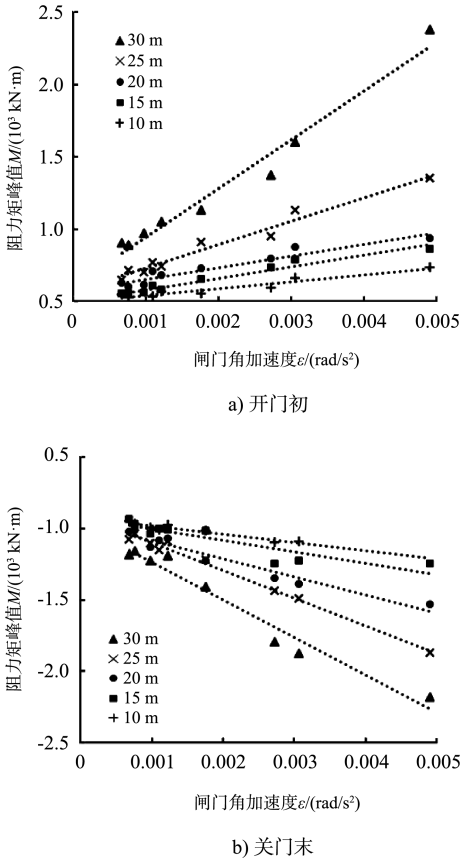


图 6 变速运行动水阻力矩峰值与淹没水深和角加速度的关系

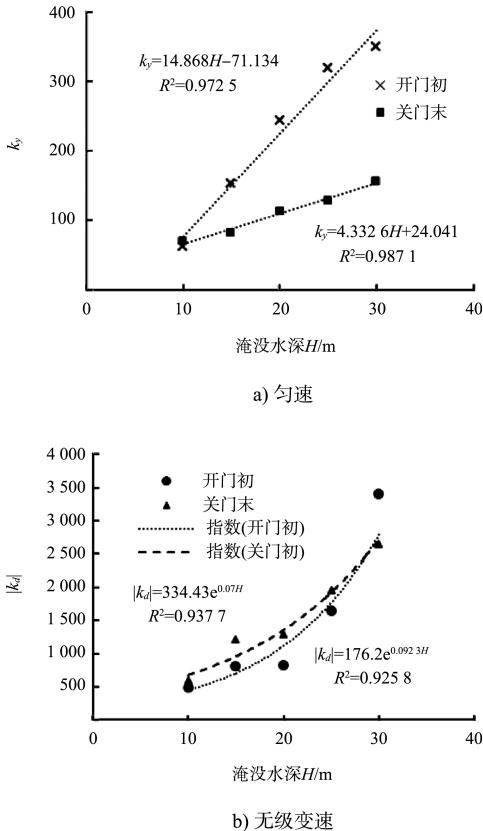


图 7 曲线斜率与淹没水深关系

表 1 不同淹没水深下一字闸门启闭机匀速运行 k_y 、 b_y 及相关系数 R^2

淹没水深/m	开门初			关门末		
	k_y	b_y	R^2	k_y	b_y	R^2
30	350	0.148	0.983 6	155	-0.965	0.976 4
25	320	-0.008	0.995 7	129	-1.030	0.972 8
20	245	0.216	0.991 3	114	-0.999	0.955 4
15	153	0.309	0.964 5	84	-1.014	0.998 4
10	62	0.766	0.975 4	71	-0.914	0.864 7

一级无级变速运行时, 开门初和关门末的动水阻力矩峰值主要与这一时段一字闸门的角加(减)速度有关, 二者成线性正相关关系(图 6), 表 2 给出了不同淹没水深变速运行方式下的一字闸门动水阻力矩峰值与角加(减)速度的运算关系, 各淹没水深下的动水阻力矩峰值均可表示为

$$M = k_d \varepsilon + b_d \quad (4)$$

式中: M 为动水阻力矩峰值 ($10^3 \text{ kN} \cdot \text{m}$), ε 为一字闸门角加(减)速度值 (rad/s^2); b_d 为截距, 可查表 2; 斜率 $|k_d|$ 与淹没水深 H 的关系见图 7b), 随着淹没水深的增大, 线性相关曲线的斜率 $|k_d|$ 成指数型增加, 说明淹没水深越大, 一字闸门开门初及关门末动水阻力矩峰值对闸门角加(减)速度的变化越敏感, 且敏感程度随淹没水深成指数增加。

表 2 不同淹没水深下一字闸门启闭机变速运行 k_d 、 b_d 及相关系数 R^2

淹没水深/m	开门初			关门末		
	k_d	b_d	R^2	k_d	b_d	R^2
30	3 392	0.601	0.970 6	-2 639	-0.971	0.962 6
25	1 632	0.666	0.966 9	-1 941	-0.905	0.988 2
20	808	0.673	0.918 3	-1 271	-0.959	0.948 2
15	803	0.598	0.961 1	-1 207	-0.869	0.895 4
10	481	0.589	0.930 4	-582	-0.924	0.914 2

研究表明, 一字闸门在大淹没水深条件下启闭运行时, 对闸门运行角加速度尤为敏感。因此, 在确定的启闭时间范围内, 一字闸门启闭机设计时宜采用无级变速运行方式, 使闸门运行角速度在一段时间内逐渐增加或减小, 尽可能减小闸门启闭初始及末了的角加速度值, 从而降低动水阻力矩峰值。同时, 根据文中研究得到的动水阻力矩峰值与淹没水深的关系式, 可估算最大淹没水深下开门初及关门末的动水阻力矩峰值, 在此基础上设计一字闸门启闭机能力。 (下转第 81 页)