

· “高坝通航水力学研究”专栏(6) ·



高水头船闸输水阀门启闭力特性研究^{*}

胡亚安, 严秀俊, 薛 淑

(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, 江苏 南京 210029)

摘要: 高水头船闸输水阀门在运行过程中受水动力荷载作用影响, 工作条件非常复杂, 直接影响阀门的启闭力。由于阀门启闭力是决定启闭机容量和阀门自重的关键设计参数, 因此有必要开展专门研究。1) 针对反弧门形式, 分析了阀门启闭速率、阀后廊道体型、阀门作用水头对启闭力的影响。2) 通过改变阀门门型、底缘形状、支臂包护方式等形状系数, 研究阀门的形状阻力对阀门动水启闭力的影响, 获得相关规律。3) 采用三峡船闸阀门启闭力原型观测数据对模型试验值进行验证, 两者结果吻合度较好, 三峡船闸输水阀门启闭机容量和阀门自重可以满足动水开启和关闭的要求。

关键词: 高水头船闸; 输水阀门; 启闭力; 三峡船闸

中图分类号: U 642

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2021)02-0001-06

Study on hydrodynamic hoist load characteristics of filling and emptying valve in high head navigation lock

HU Ya-an, YAN Xiu-jun, XUE Shu

(Nanjing Hydraulic Research Institute, Key Laboratory of Navigation Structure Construction Technology, Ministry of Transport, PRC, Nanjing 210029, China)

Abstract: The operating conditions of filling and emptying valve in high head navigation lock are very complex during operation due to hydrodynamic load, which directly affects the hoist load of the valve. As the hydrodynamic hoist load is the key design parameter to determine the capacity and dead load of the valve, it is necessary to carry out special research. 1) Specific to reverse tainter valve, the influences of valve opening and closing rate, culvert type at valve section, and the water head on the hydrodynamic hoist load are analyzed. 2) By changing structure parameters such as panel structure, the shape of valve's bottom edge, and arms wrapping, the influence of the shape resistance of valve on hydrodynamic hoist load are studied, and the relevant laws are obtained. 3) The field observation data of the valve hydrodynamic hoist load of the Three Gorges ship lock is used to verify the model test values. The results show that the two results are in good agreement, and the capacity and a dead load of filling and emptying valve in the Three Gorges ship lock can meet the requirements of the hydrodynamic operation.

Keywords: high head navigation lock; filling and emptying valve; hydrodynamic hoist load; the Three Gorges ship lock

船闸输水阀门启闭频繁、工作条件复杂, 保证阀门系统的可靠性及启闭的灵活性是工程设计

和研究人员极为重视的问题, 其中阀门启闭力直接关系启闭机容量及门体结构设计。

收稿日期: 2020-04-10

***基金项目:** 国家重点研发计划项目(2016YFC0402006、2016YFC0402007)

作者简介: 胡亚安(1955—), 男, 博士, 教授级高工, 从事通航建筑物水力学研究。

1 阀门启闭力特性分析

反向弧形阀门闭门力 F_w 可表示为^[1]：

$$F_w = \frac{1}{R_1} [n_T(T_{zi}r_0 + T_{zs}r_1) + P_i r_3 - n_G G r_2] \quad (1)$$

式中： F_w 为反向弧形阀门闭门力(kN)，计算结果为正值时表示需加重，为负值时表示阀门依靠自重可以关闭； R_1 为配重或下压力对阀门转动中心的力臂(m)； n_T 为摩擦阻力安全系数，取 1.2； T_{zi} 为支承摩阻力(kN)，按平面闸门和平面阀门启闭力计算方法求得； r_0 为转动铰摩阻力对阀门转动中心的力臂(m)； T_{zs} 为止水摩阻力(kN)，按平面闸门和平面阀门启闭力计算方法求得，侧止水橡皮预留压缩量时，计入因压缩橡皮而引起的摩阻力； r_1 为止水摩阻力对阀门转动中心的力臂(m)； P_i 为上托力(kN)，宜通过模型试验确定，初步估算时参照平面闸门和平面阀门的有关规定计算； r_3 为上托力对阀门转动中心的力臂(m)； n_G 为计算闭门力用的阀门自重修正系数，取 0.9~1.0； G 为阀门自重(kN)； r_2 为阀门自重对阀门转动中心的力臂(m)。

启门力 F_Q 的计算式为：

$$F_Q = \frac{1}{R_2} [n_T(T_{zi}r_0 + T_{zs}r_1) + n'_G G r_2 + G_j R_1 + P_x r_4] \quad (2)$$

式中： F_Q 为反向弧形阀门启门力(kN)； R_2 为启门力对阀门转动中心的力臂(m)； n_T 为摩擦阻力安全系数，取 1.2； n'_G 为计算启门力用的阀门自重修正系数，取 1.1； G_j 为加重块重力(kN)； P_x 为下吸力(kN)，宜通过模型试验确定，初步估算时参照平面闸门和平面阀门的有关规定计算； r_4 为下吸力对阀门转动中心的力臂(m)。

水流对阀门的动水作用主要表现在以下两个方面：1) 上游来流在门井区形成的漩滚对门体的上托力和阀门底缘处边界分离和贴附所导致的下吸力，这一因素既反映为门型对启闭力的影响，也表现了不同门体外形对漩滚水流的阻尼作用，而下吸力则主要反映了底缘形式对启闭力的影响。2) 阀门启闭过程中，门井水位急剧下降(开启)和上升(关闭)的惯性对门体结构的冲击力以及门区流态特性的作用，反映为启闭速率对启闭

力的影响，它主要表现了启闭过程的非恒定流特性^[2-4]。

典型高水头船闸阀门动水启闭力过程线见图 1。阀门开启过程中，启门力呈现先上升、后下降的变化规律，而阀门关闭过程中，闭门力呈现先下降、后上升、再下降的变化规律。在整个启闭过程中，动水启闭力存在最大值和最小值。最大值出现在阀门开启过程中，表现为来流对底缘的下吸力最大，其开度与门后压力低谷区一致；而最小值发生在动水关闭过程中，关门初期，由于门井水位快速上升，门井漩滚加强，水流对门体的上托力剧增，导致闭门力陡降，从而出现最小值。

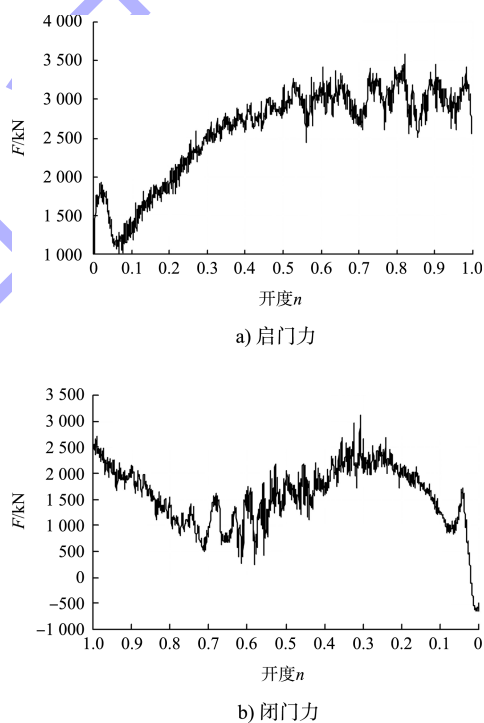


图 1 阀门动水启闭力过程线

启门力的峰值决定了启闭机的容量，而最小闭门力则关系到阀门能否依靠自重正常关闭，以确定启闭杆件是否受压，从而决定了阀门的自重。启门力和闭门力的大小及其脉动是分析阀门启闭力特性的重要参数。

2 阀门段廊道水流对启闭力的影响

2.1 阀门启闭速率对启闭力的影响

以三峡船闸中间级闸首输水阀门为例，说明启闭速率对启闭力的影响。图 2 给出了船闸在不

同工作水头下阀门以不同速率开启时净动水启门力峰值 F 及开门全过程脉动均方根值 $\bar{\sigma}$ 与开门速率的关系曲线。

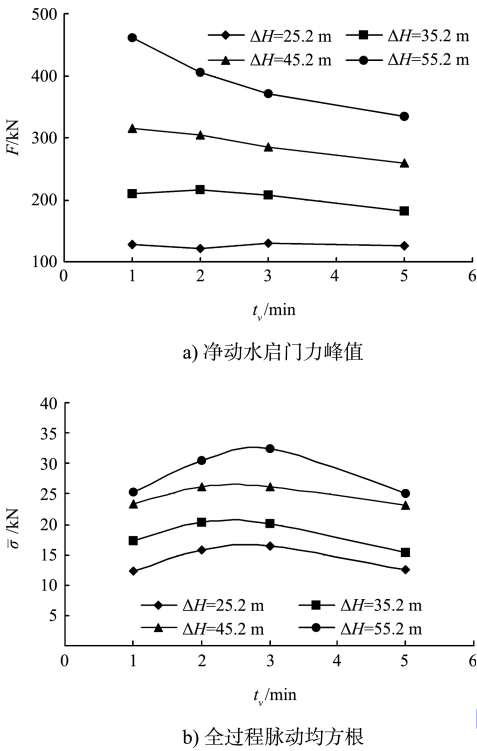


图2 不同初始作用水头下的 F 和 $\bar{\sigma}$ 与开门速率的关系

初始作用水头不同, 其启门力峰值与开门速率的关系也不尽相同, 在 $H_0 = 25.2$ m 条件下, 净动水启门力峰值以 $t_v = 5$ min 为最大, 随着作用水头增大, 最大净动水启门力峰值所对应的开门方式朝快速开启方式移动, 在 $H_0 = 45.2 \sim 55.2$ m 水头作用下, 净动水启门力峰值以 $t_v = 1$ min 为最大。而启门力的脉动均以 $t_v = 3$ min 为最大。启门力的脉动主要受到廊道水流的影响, 其脉动能量也主要集中在低频段, 约为 10 Hz 以内, 主频为 1~2 Hz, 见图 3。

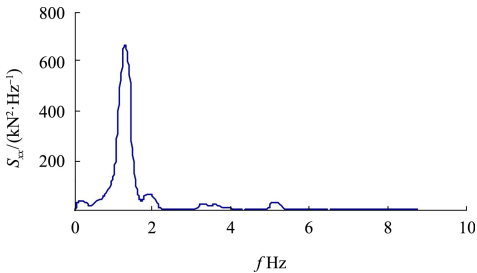


图3 启门力脉动功率谱密度 ($t_v = 5$ min)

2.2 阀门后廊道体型对启闭力的影响

在三峡船闸设计阶段, 针对阀门后顶扩与底

扩两种廊道体型开展了研究, $t_v = 2$ min 时, 底扩和顶扩体型下阀门净动水启门力见图 4, 其对应的门后廊道顶典型测点压力水头过程线见图 5。门后廊道体型对启门力峰值的影响不大, 但峰值发生的开度不同, 底扩和顶扩体型启门力峰值对应的开度分别为 $n = 0.3$ 和 $n = 0.4$, 与两种体型门后流态由平稳型转化为剧烈振荡型的开度相吻合。

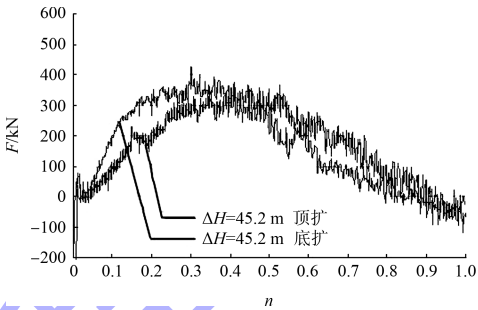


图4 两种门后廊道体型阀门净动水启门力过程线

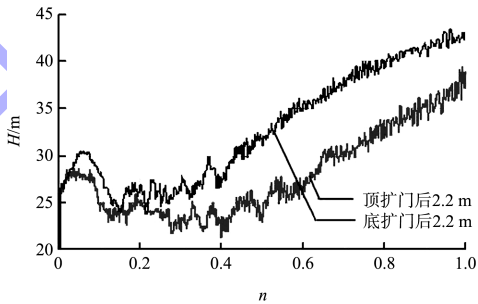


图5 两种门后廊道体型门后典型测点压力水头过程线

2.3 阀门作用水头对启闭力的影响

不同工作水头下阀门净动水启门力峰值与作用水头的关系见图 6。美国船闸设计手册^[5] 也给出了阀门作用水头与启门力的关系, 3 种门型下初始作用水头与启门力峰值的关系见图 6(均换算为三峡船闸中间级阀门宽度 4.2 m)。

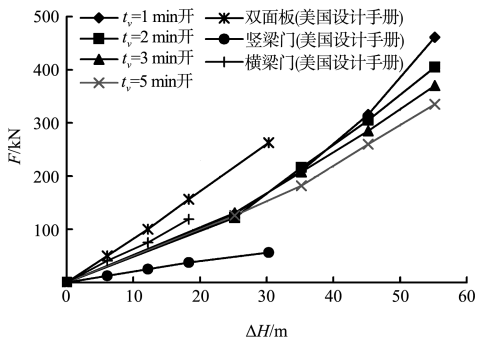


图6 初始作用水头与启门力峰值的关系

3 种门型下最大动水启门力与作用水头呈现较好的单调递增变化规律，其中相同水头下双面板门型启门力最大、竖梁门最小。启门力脉动强度亦随作用水头的增大而增大，见图 7。

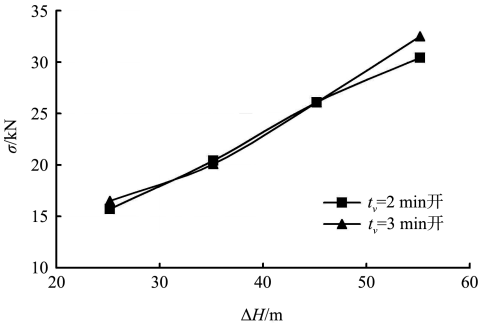


图 7 启门力脉动强度与作用水头的关系

3 阀门体型对启闭力的影响

3.1 阀门门型

阀门门型在葛洲坝和三峡船闸研究中分为竖梁式及双面板式，两种门型在梁系布置上有较大差异。前者主横梁布置在竖梁的后翼缘面，与竖梁翼板焊接，梁系均不加包板或局部包封；而后者主横梁布置在竖梁前翼面上与竖梁横板及翼缘板焊接，面板及支臂梁系全部以包板包封，形成双面板。竖梁式阀门的竖梁腹板与面板构成一个平顺的水流通道，减小了门井漩滚对门叶的冲击，其动水启门力峰值及脉动强度均小于双面板式阀门。然而，双面板式阀门主横梁与竖梁及面板紧密结合，构成一个高刚度的门叶且支臂直接与面板连接，因此其整体性较好，抗振能力明显优于竖梁式阀门。鉴于以上原因，三峡船闸输水阀门最终确定采用双面板门型，见图 8。

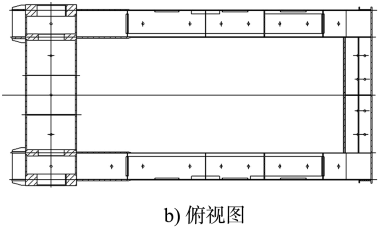
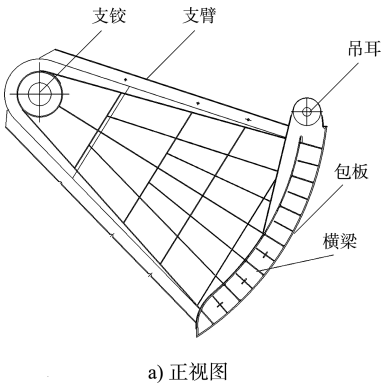
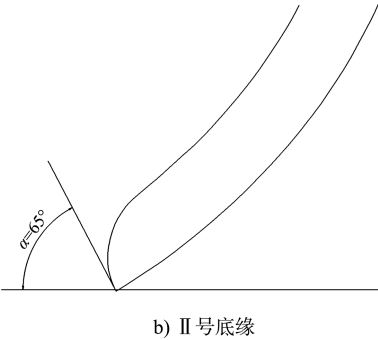
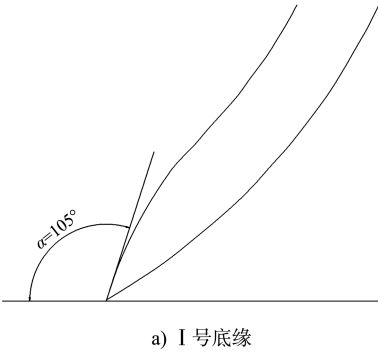


图 8 三峡双面板门型

3.2 阀门底缘形式优化

双面板门型底缘较厚，底缘形状是影响启门力大小及其脉动的主要因素；且门体底缘处于高速水流作用下，较易发生空化，底缘形状也是影响底缘区水流空化特性的重要因素，因此底缘形式的优化研究应同时考虑启门力和底缘空化两个方面的因素。利用三峡船闸 1:10 阀门非恒定流常压和减压模型，研究了 4 种底缘形状下阀门启门力与空化特性。4 种典型的底缘布置见图 9。表 1 给出了阀门最大净动水启门力 \bar{F}_{\max} 、最小净动水闭门力 \bar{F}_{\min} 、阀门段不发生空化所对应的初始淹没水深值 H_{di} 。



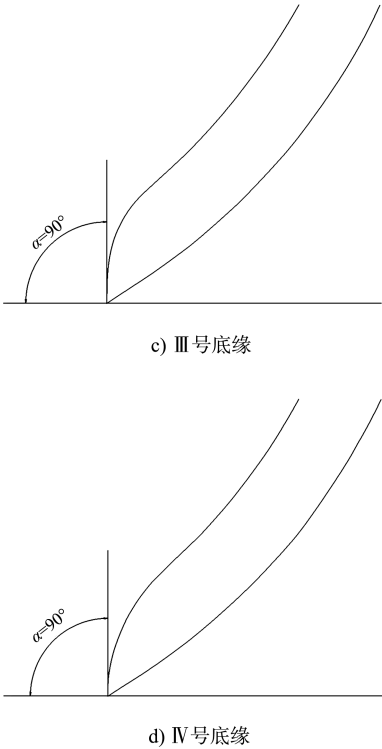


图 9 底缘布置

表 1 不同底缘形式下阀门水动力特征值

体型	\bar{F}_{\max}/kN	\bar{F}_{\min}/kN	H_{d}/m
I ($\alpha=105^\circ$)	270	-240	30.0
II ($\alpha=65^\circ$)	600	-50	25.0
III、IV ($\alpha=90^\circ$)	330	-190	27.0

试验结果表明： α 越大，底缘越薄，阀门净动水启门力越小，相对而言对降低启闭机容量有利，然而尖锐的底缘加剧了底缘处水流的分离，最易发生底缘空化。综合启门力和空化因素，同时考虑到阀门底止水布置需要一定的长度，三峡船闸最终在 $\alpha=90^\circ$ 的 IV 号底缘的基础上选择了 III 号底缘形式。

3.3 支臂包护方式

阀门支臂直接承受动水启闭过程中门井水流的作用，为改善门井水流对支臂的冲击作用，对阀门支臂采取包护方式是必要的，这一点与水工泄水建筑物有较大差异。在早期研究中探讨了不同支臂包护方式对阀门动水启闭力的影响^[6]，见图 10。

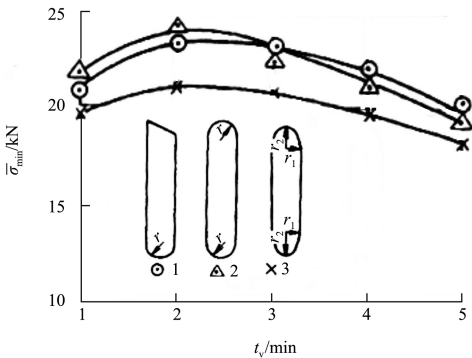
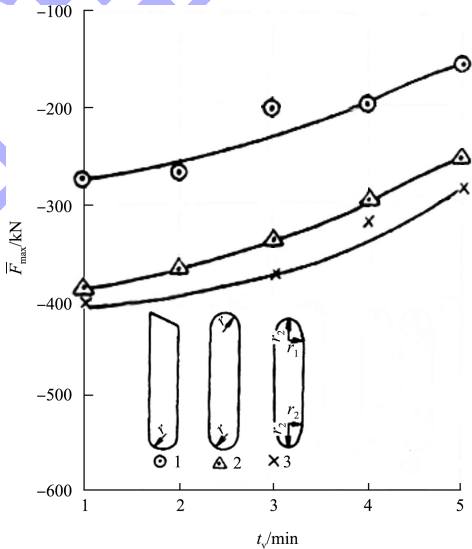
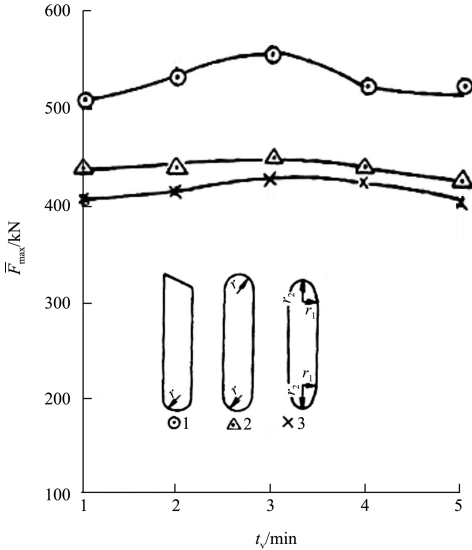


图 10 阀门支臂包护方式的影响

结果显示,采用流线型的支臂包护方式,减小了门井水流对支臂的冲击力,启门力峰值与脉动均有明显降低。将支臂上缘改为半圆柱形包裹后, \bar{F}_{\max} 减小 80~100 kN;改为椭圆包裹后, \bar{F}_{\max} 减小 100~120 kN,且 $\bar{\sigma}$ 亦有较明显减小。目前我国高水头船闸普遍采用半圆形支臂全包形式。

4 三峡船闸阀门启闭力原型观测成果

在设计水头下,现场观测的北线船闸 4 闸首阀门动水启门力过程线见图 11。启门过程中,在 $n=0.5$ 开度,动水启门力最大,最大值为 1 370.0 kN,小于设计的 1 800.0 kN,整个启门过程启门力脉动较小,相对而言,以接近全开时启门力脉动略大,最大脉动幅值小于 170.0 kN。

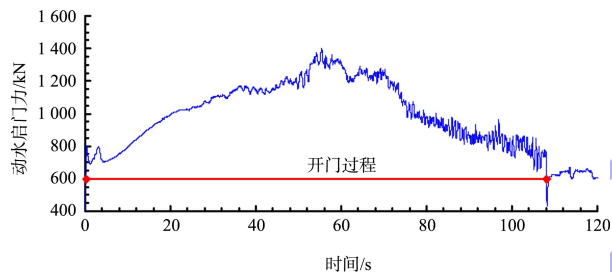


图 11 开门过程阀门动水启门力过程线

阀门开启过程中的净动水启门力的变化曲线见图 12。最大净动水启门力出现在阀门开启 54 s,相当于孔口开度 0.4 左右,约为 550 kN。整个开门过程,动水作用主要表现为下吸力,在接近全开时段,门井漩滚较强,净动水启门力为负值,动水作用表现为上托力。

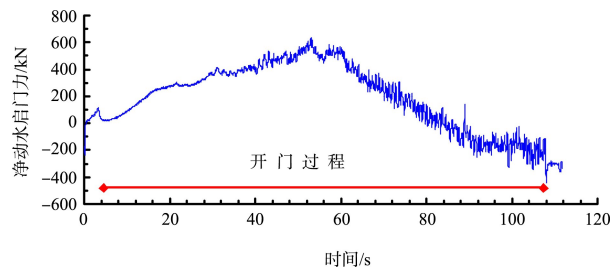


图 12 开门过程阀门净动水启门力过程线

为克服惯性超高降,采取了剩余水头 6 m 提前关阀的运行方式。关门过程,最小闭门力为

450.0 kN,闭门力的脉动较小,最大脉动幅值小于 100 kN,吊杆仍为受拉状态,即依靠自重可以实现动水关门要求,并且有较大富余度。

5 结论

1) 输水阀门启门力峰值随作用水头的增大而增大,其变化规律主要与阀门形式、开启速率有关,阀后廊道体型对启门力峰值的影响不大。

2) 综合水力特性及结构特性,推荐反弧门采用双面板竖梁结构门型,底缘与廊道底板在阀门全关状态时呈 90°夹角,阀门支臂上缘采用半圆柱形包裹。

3) 三峡船闸中间级闸首观测成果表明,在 45.2 m 设计水头下,各闸首最大动水启门力约为 1 370 kN,正常关闭工况最小闭门力 450 kN,启闭力脉动不大,最大脉动幅值不超过 170 kN。观测成果与模型试验值较为接近。设计的 1 800 kN 启闭机容量和阀门自重可以满足动水开启和关闭的要求。

参考文献:

- [1] 四川省交通厅内河勘察规划设计院.船闸闸阀门设计规范: JTJ 308—2003[S].北京:人民交通出版社,2003.
- [2] 胡亚安.三峡永久船闸阀门水动力学特性研究:“九五”国家科技攻关子题报告[R].南京:南京水利科学研究院,2001.
- [3] 张瑞凯,胡亚安,李云.三峡永久船闸北线船闸水力学关键技术原型观测研究[R].南京:南京水利科学研究院,2005.
- [4] 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(2):3-5.
- [5] U.S. Army Corps of Engineers. Hydraulic design of navigation locks[M]. Washington: U.S. Army Corps of Engineers, 2006.
- [6] 须清华,张瑞凯.通航建筑物应用基础研究[M].北京:中国水利水电出版社,1999.