

大跨度浮体门动力稳定及流激振动试验研究

陶小平¹, 应国华², 严根华^{3,4}, 董家^{3,4}

(1. 江西省赣抚尾閤整治有限公司, 江西 南昌 330029;

2. 中铁水利水电规划设计集团有限公司, 江西 南昌 330029);

3. 水利部交通运输部国家能源局 南京水利科学研究院, 江苏 南京 210029;

4. 水文水资源与水利工程国家重点实验室, 江苏 南京 210029)

摘 要: 随着我国水闸工程的不断兴建, 超大尺寸的泄水闸不断涌现。巨型浮体门也开始应用于超大跨度闸孔的挡泄水运行。由于该型闸门采用浮箱单侧立轴平面旋转型门型, 其运行特征与常规直升式或上翻式弧形闸门不同, 且需在动水中启闭运行, 存在水动力作用和水位雍高等带来的门体振荡、动力稳定等一系列技术难点, 因此通过特制的 1:25 水弹性振动模型考查不同下泄流量及不同启闭速度下浮体门的振动和稳定性特征。通过闸门结构的水力结构特征试验, 系统进行闸门启闭运行的稳定性和安全性研究, 获得大闸孔闸门结构在特定条件下的振动加速度、振动位移、刚体晃动量以及闸门支铰力、支铰立轴动态位移等动力参数。揭示浮体门闭门过程中动水流速和自动闭门关系, 提出避免出现闸墩碰撞, 启闭门钢丝绳全程受力控制等措施。获得了需要严格控制闸孔下泄水流流速流量、降低闸门启闭速度, 确保浮体门运行安全性的基本结论。该项研究成果为类似大型泄(挡)水闸工程设计建设提供了参考依据。

关键词: 大跨度浮体门; 水动力荷载; 闸门稳定性; 启闭力; 抗振优化设计

中图分类号: TV663

文献标识码: A

文章编号: 1672—1144(2022)06—0007—08

Dynamic Stability and Flow-induced Vibration on Giant Floating Body Gates

TAO Xiaoping¹, YING Guohua², YAN Genhua^{3,4}, DONG Jia^{3,4}

(1. Jiangxi Province Ganfu Coccyx Renovate Co., Ltd., Nanchang, Jiangxi 330029, China;

2. Zhongtie Hydropower Planning and Design Group Co., Ltd., Nanchang, Jiangxi 330029, China;

3. Ministry of Water Ministry of Transport of the People's Republic of China, National Energy Administration, Nanjing Institute of Water Resources, Nanjing, Jiangsu 210029, China;

4. State Key Laboratory of Hydrology and Water Resources and Water Conservancy Engineering, Nanjing, Jiangsu 210029, China)

Abstract: With the continuous construction of sluice gate projects in China, oversized sluice gates continue to emerge. Giant floating body gates are also beginning to be used for blocking and releasing water in the operation of oversized span gates. Because this type of gate adopts the floating box single side vertical axis plane rotation type gate, its operation characteristics are different from the conventional penning gate or upturned arc gate, and it needs to open and close in the moving water, there are a series of technical difficulties such as oscillation and dynamic stability of the gate brought by the hydrodynamic action and water level, etc. Therefore, the vibration and stability characteristics of the floating body gate under different discharge flow and different opening and closing speeds are investigated through the specially designed 1:25 hydro-elastic vibration model. Through the hydraulic structural characteristics test of the gate structure, the stability and safety characteristics of the gate opening and closing operation is carried out systematically, and the dynamic parameters such as vibration acceleration, vibration displacement, rigid body sway and gate support hinge force and dynamic displacement of the support hinge vertical axis are obtained for the gate structure of large gate

bore under specific conditions. the relationship between dynamic water flow rate and automatic closing in the process of floating body gate closing, and propose measures to avoid collision of gate pier and control the whole force of wire rope of opening and closing gate was revealed. The basic conclusion are as follows. The flow rate of water under the gate bore needs to be strictly controlled to reduce the speed of gate opening and closing, and ensure the safety of floating body gate operation was obtained. The research results could provide a reference basis for the design and construction of similar large drainage (retaining) gate projects.

Keywords: large span floating body gate; hydrodynamic load; gate stability; opening and closing force; optimized design for vibration resistance

江西赣抚下游尾间综合整治工程主支枢纽大闸孔采用巨型浮体门结构(见图 1),闸门底部浮箱体宽 10 m、高 5 m、长 79 m,设计上游挡水位 15.50 m,闸门静水压力 18 005 kN。闸门由下部浮箱、中间段及顶部翻板闸门组成。中间段为挡水体由浮箱门钢底板、钢闸墩组成。顶部液压翻板平面钢闸门由门底支铰座、门叶、门背支撑杆、液压启闭机组成。每扇闸门宽 4.8 m,高 1.0 m。由设在门底的两个支铰作为转动中心,面板设在迎水面,梁系设在背水面。每扇浮箱门设 13 扇翻板闸门,12 个中间隔墩(0.8 m),2 侧各一个边墩(3.5 m)。翻板闸门直立挡水,卧倒行洪,闸门卧倒后面板与底板齐平。门后设支撑杆和液压启闭机,

闸门在挡水位置靠支撑杆支撑。浮箱式闸门采用绞车启闭,两侧闸墩各 1 台,启闭时用不同的设备拉动闸门。钢闸门的沉浮与启闭过程中的稳定至关重要,采用加荷载、增加分舱、控制各分舱水位、上下游设置空舱、调整上部荷载位置等方法。浮箱式闸门门库底高程按闸门的吃水深度、启门时最低水位控制,浮起转动后在门库内可充水下沉保持稳定后锁定,门库底高程 7.5 m。浮箱式闸门在下游面设防冲撞装置,防止冲撞破坏。除靠钢丝绳拉紧外,在门顶设锁定装置。翻板闸门的运行方式为动水启闭。液压启闭机型号为 QPPYII-2×63 kN,扬程约 0.8 m,启闭机油缸可绕铰座摆动,支撑杆设在油缸内侧。翻板闸门门顶高程 16.00 m,门底高程 15.00 m,挡水为直立状态,可以局部开启调节流量形成瀑布景观效果。

浮箱式闸门通常要求静水启闭,而本工程大孔闸因为下游敞泄直接流入鄱阳湖,即便通过常规孔泄水闸调控也不可能实现静水启闭,动水启闭带来的一系列问题,需通过模型试验研究闸门启闭水位差、水位雍高、泄流流态解决闸门流激振动及运行稳定等问题^[1-3]。

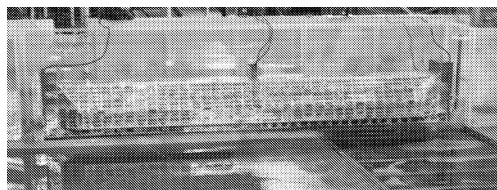


图 1 浮动门门库安装近景

1 浮体门结构的流激振动响应特征

本工程大闸孔浮体门属于大尺寸单铰浮动巨型箱式闸门,有别于常规门型。本次模型试验根据泄水闸运行工况,分别进行了不同流量和不同闸门启闭速度条件下的闸门振动特性测试,获得了浮体门运行安全性评估数据^[4-5]。

1.1 闸室水流流态特征

本工程浮体门的运行特征与常规直立式或上翻式闸门不同,系采用单侧立轴平面旋转型门型,且闸门运行过程中采用浮运的方式进行,闸门开启或关闭到位后再充水下沉进行挡水。闸门由全开进行关闭操作的流态变化情况见图 2。水流流态观测显示,在闸门开度大于 $n_0 = 0.5$ 开度范围内闸室水流平顺,未见不利流态产生;开度小于 $n_0 = 0.3$ 后,闸门头部与闸墩之间的缺口溢流出现水面波动现象,此时除闸门底部出流外,缺口部分流量减小,水面略有雍高,门端部绕流现象加剧,缺口后出现漩涡,这时对闸门结构形成一定的激励力^[6-7]。

1.2 大孔闸浮体门启闭特性

闸门开启与闭门过程具有不同的受力和振动变化过程。闭门过程开始阶段运行比较平稳,当闸门关闭至 2/5 开度时,闸门振动量达到最小值,随后闸门振动量开始逐步增加,当闸门接近全关位时振动量达到最大值,而且这个最大值出现在闸门闭门瞬间的冲击值。这种闸门结构振动现象与闭门过程水流流态和作用力演变过程特性完全一致,因为在接近闸门小开度时门体端部水流现象复杂,开始出现严重的水流绕流现象,水面雍高,此外门头端部出现

旋涡激励力。另一方面,闸门在接近关闭位时,上游来流的流速由于受到闸门关闭的影响,其流速逐步由全开时的 v_0 值,降低至 v_1 值,门体部分部位的流速接近于零 $v_1=0$,这在闸门接近全关位更加突出。

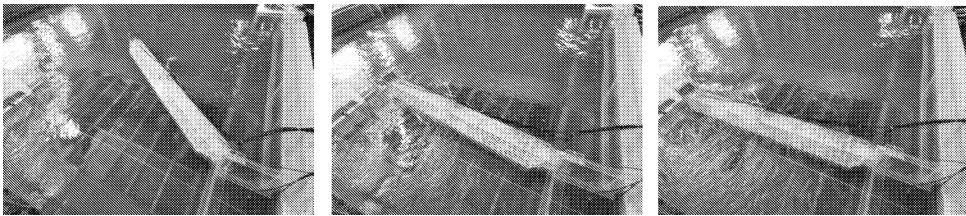


图 2 典型开度闸室水流流态

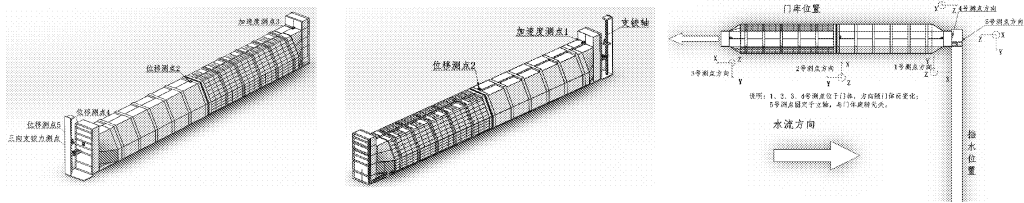


图 3 闸门振动测点布置图

模型试验按大流量 ($Q=920\text{ m}^3/\text{s}$) 和小流量 ($489\text{ m}^3/\text{s}$) 两种不同流量条件进行了浮体门运行特征研究,考查了不同下泄流量对闸门振动和平稳性影响的研究^[8-9]。

典型大流量启门过程振动加速度特征见图 4。试验成果指出:在大流量 ($Q=920\text{ m}^3/\text{s}$) 条件下,闸门启闭过程中的振动量出现在顺水流方向,闭门过程略小。此外,不同闸门启闭速度对闸门的振动量具有如下规律:变频 10 Hz~20 Hz,折合原型启门时

1.3 闸门结构的振动加速度特征

为了比较全面地研究考查闸门结构运行过程中的运行平稳性,在闸门门体上布置安装了 5 个振动加速度传感器,测点布置见图 3。

间 40 min~90 min 范围内时,闸门的振动量相对较小;随着启闭速度提高,变频至 30 Hz(折合原型启门时间 25 min)时,闸门振动量达到最大值,其中闸门启门最大振动加速度值为 11.63 m/s^2 ($V3y$),出现在闸门端部的 $V3y$ 方向(顺水流方向)。而在启门钢丝绳拉力作用下,闭门过程最大振动加速度值为 4.77 m/s^2 ,同样出现在闸门端部的 $V3y$ 方向(顺水流方向);轴向略小, 3.78 m/s^2 ($V1x$)。

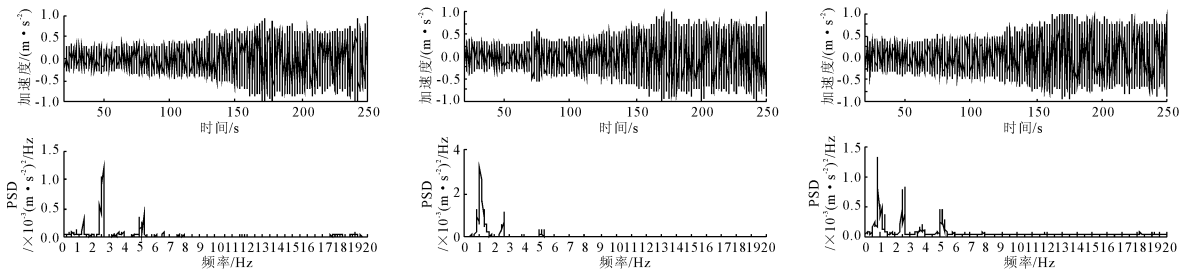


图 4 变频 50 Hz 启门过程 3#测点三向(XYZ)振动加速度特征

小流量($489\text{ m}^3/\text{s}$)条件下,闸门端部的振动量相对较大,近支铰处门体结构振动量减小,受到振动能量传递耗损等影响,紧靠立柱位置的支铰振动量最小。

此外,不同闸门启闭速度对闸门的振动量具有与大流量时相同的变化规律:变频 30 Hz,闸门启门最大振动量出现在闸门端部位置,三向最大振动加

速度值分别为 $1.46\text{ m/s}^2\sim1.61\text{ m/s}^2$;闸门近支铰处的振动量略小,三向振动加速度值分别为 $0.89\text{ m/s}^2\sim1.02\text{ m/s}^2$;而闭门过程最大振动量同样出现在闸门端部位置,三向最大振动加速度值分别为 $1.96\text{ m/s}^2\sim2.48\text{ m/s}^2$;靠近支铰处的门体振动量略小,三向振动加速度值分别为 $0.80\text{ m/s}^2\sim1.02\text{ m/s}^2$ 。紧靠立柱的支铰垂向振动量为 1.33 m/s^2

($V4x$)。

在当闸室微小流量、启闭速度 90 min 下, 闸门启门最大振动加速度值为 1.25 m/s^2 ($V4x$) 及 0.83 m/s^2 ($V3z$); 而闭门过程最大振动加速度值为 1.45 m/s^2 ($V4x$) 及 1.06 m/s^2 ($V1z$)。较大的振动量均出现在闸门近支铰处的垂向。

应当指出, 闸门闭门过程中由于启门钢丝绳发挥了反向拉力作用, 减缓了闭门速度, 有效解决了闭门瞬间的强大冲击力, 因此促使闭门振动量得到大大缓解。尤其是即将关闭的瞬间, 若没有启门卷扬机的拉力作用, 闸门将在动水流速的作用下出现强烈冲击闸墩的现象, 可能导致闸门结构和闸墩土建结构的损坏^[10-12]。

考虑到本工程大闸孔闸门结构尺寸大, 因此大闸孔浮体门的启闭操作尽可能以慢速启闭为宜。

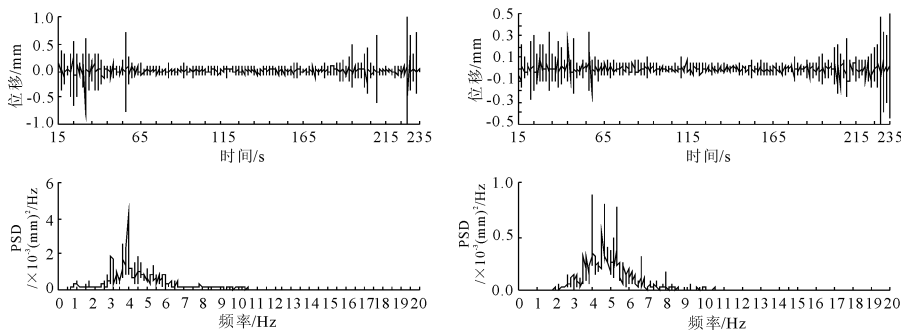


图 5 变频 50 Hz 闭门过程 4#测点 XY 二向振动位移特征

2 闸门结构的低频晃动特性

大孔闸浮体门启闭运行中, 在动水作用下表现出振动和低频晃动两种振动形态, 其中闸门箱体结构的低频晃动属于整体刚体位移性质, 图 6 绘出了闸门刚体位移测点方向示意图。闸门低频晃动量测试结果显示, 在大流量 ($920 \text{ m}^3/\text{s}$) 条件下, 闸门在启闭门过程中, 受到水流动力和启闭机牵引系统的影响, 闸门出现竖向 (Y 向) 和垂直门轴向的方向 (X 向) 的低频晃动刚体位移现象。调频 10 Hz 启闭速度下, 闭门时最大垂直门轴向的方向 (X 向) 最大晃动值为 186.35 mm , 竖向 (Y 向) 最大晃动值为 94.97 mm ; 启门时最大垂直门轴向的方向 (X 向) 最大晃动值为 154.6 mm , 竖向 (Y 向) 最大晃动值为 182.05 mm 。当启闭速度由调频 20 Hz ~ 50 Hz 启闭速度时, 闭门时最大垂直门轴向的方向 (X 向) 最大晃动值为 $127.65 \text{ mm} \sim 199.97 \text{ mm}$, 竖向 (Y 向) 最大晃动值为 $60.42 \text{ mm} \sim 139.57 \text{ mm}$; 启门时最大垂直门轴向的方向 (X 向) 最大晃动值为 $97.44 \text{ mm} \sim 369.92$

1.4 闸门结构的振动位移特征

闸门振动位移测试结果显示, 在大流量条件下, 除门体刚体晃动出现的大位移外, 由流激振动诱发的浮体门弹性振动位移量从闸门端部开始向支铰处方向逐渐增大, 近支铰处门体结构振动位移量达到最大。这是支铰和立柱的刚度相比于门体结构而言要小得多的缘故, 符合结构动力变化一般规律。

此外不同闸门启闭速度对闸门的振动位移量同样具有如下变化规律: 在目前的试验条件下, 变频 10 Hz ~ 20 Hz (折合原型启门时间 90 min ~ 40 min), 范围内时, 闸门的振动位移量相对较小, 随着启闭速度提高, 变频至 30 Hz (折合原型启门时间 25 min) 时, 闸门振动位移量达到较大值; 再进一步提高启闭速度, 闸门的振动位移量呈现减小趋势。

mm, 竖向 (Y 向) 最大晃动值为 $55.49 \text{ mm} \sim 69.65 \text{ mm}$ 。从闸门刚体晃动的频谱曲线 (见图 7) 可知, 门体在启闭过程中的刚体晃动位移的主能量集中在 1 Hz 左右, 具有低频晃动特征。

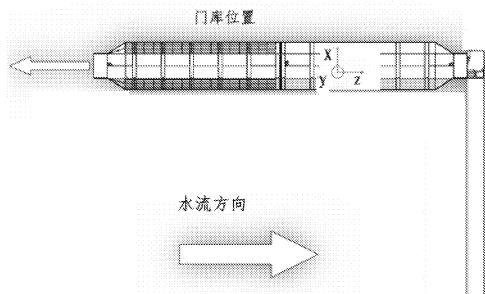


图 6 闸门刚体位移测点方向示意图

随着闸室下泄流量的减小, 闸门的晃动量也明显下降, 这是水流动力减弱, 对门体作用力下降的缘故。

3 闸门结构支铰动力特征试验

闸门支铰动力测量将集中在支铰力和支铰立柱

的动力响应测量两个方面。支铰力重点考查闸门运行过程中支铰部位顺水流方向(F_x)、闸门垂向(F_y)和门体的轴向(F_z)的三个方向的受力变化情况。针对浮体门启闭过程中的支铰力作用特征,设计了可以同时测量闸门支铰 F_x 、 F_y 、 F_z 三向受力荷载的测试装置(见图 8)。

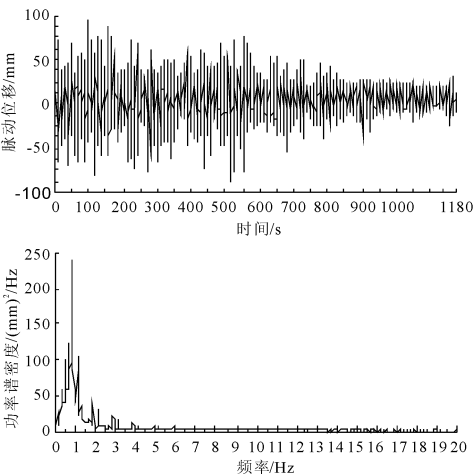


图 7 10 Hz 闭门工况下闸门 Y 向晃动位移频谱曲线

大闸孔浮体门支铰力特征数据显示,当下泄大流量时,支铰门体轴向作用力(F_z)2 626. 52 kN, 1 731. 01 kN(顺水流方向 F_x),此时的矢量合力约 3 200 kN,典型支铰三向受力变化过程线见图 9。下

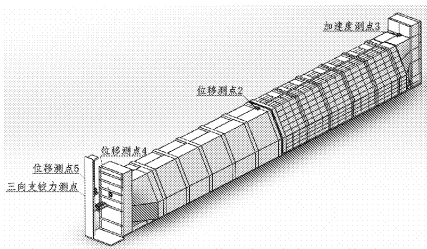
泄小流量时,支铰门体轴向作用力(F_z)733. 35 kN,支铰顺水流方向(F_x)作用力 214. 84 kN,相应的矢量合力约 764. 17 kN,支铰力出现明显下降趋势。说明随着下泄流量的逐渐减小,闸门支铰力将会有进一步的下降(见图 10)。

从总体上看,浮体门立柱振动位移同样表现出立柱沿着闸门的轴线方向振动位移最大,顺水流方向次之,垂向最小(垂向无约束)的变化规律,这符合闸门结构的构造特征。

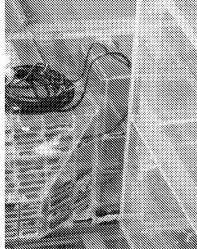
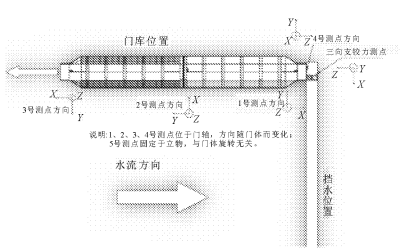
4 闸门结构门顶溢流特征

当闸门全关、门顶溢流时,水流在小门位置跌落,溢流水舌下方可以通气;脱离小门时的跌落水流表现出脉动式的出流水舌现象,对应下游底板跌落水流的冲击位置存在变化,试验测量得到的跌落水流冲击位置距下游底板起始位置的距离在 17. 5 cm ~ 19. 5 cm 之间变化(见图 11(a))。

由跌落水流落入下游底板形成冲击脉动压力跌落点处冲击脉动压力的时域过程及频谱曲线(见图 11(b))可以看出,跌落处的冲击压力最大值约 4. 5 kPa,水流冲击压力的主能量集中在 1. 5 Hz 频率范围以内。从总体上看,闸门全关位、门顶出现溢流工况时,水舌冲击压力量级不大。



(a) 三向支铰力在模型中的布置方向



(b) 三向支铰力测点布置

图 8 闸门支铰力测量仪及其布置情况

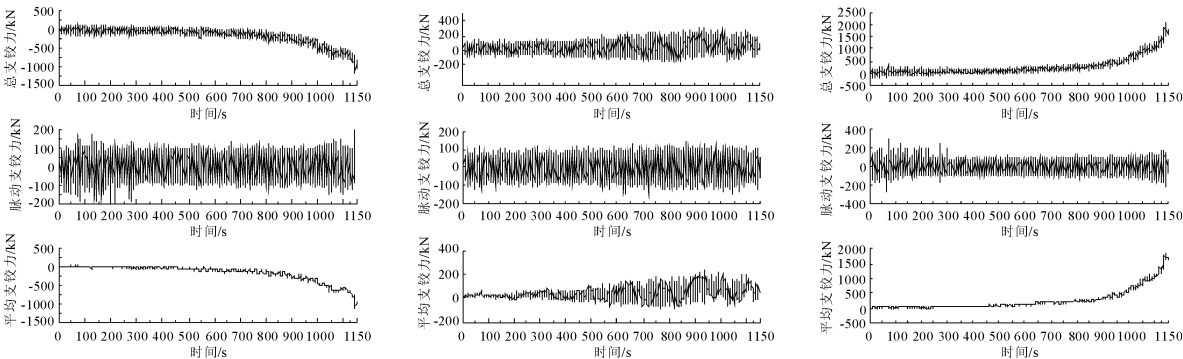


图 9 大流量变频 10 Hz 闭门时闸门三向(XYZ)支铰力随时间变化过程

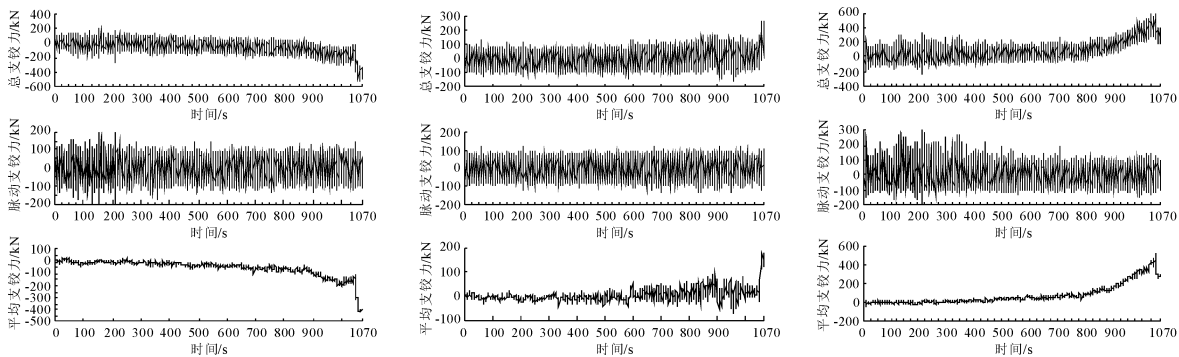
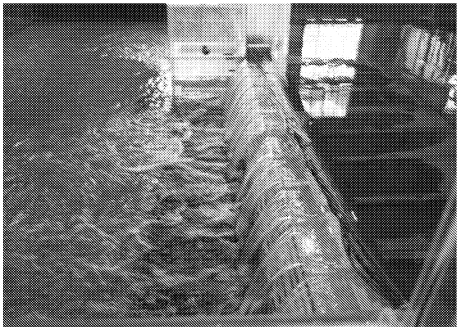


图 10 小流量变频 10 Hz 闭门时闸门三向(XYZ)支铰力随时间变化过程

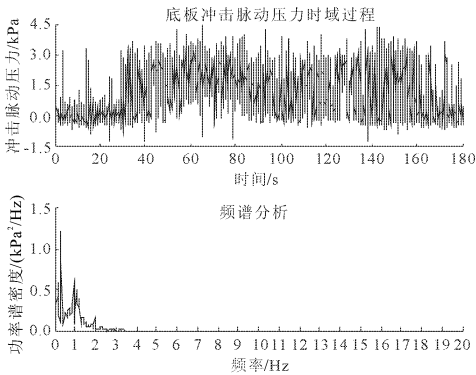
5 闸门结构的启闭力特征

大闸孔浮体门的启闭力试验表明:若按设计给定工况(上游水位为 14.68 m、下游水位 14.5 m),启闭速度按 90 min(变频 10 Hz)控制考虑,闸门闭门过程中的部分时段存在闭门拉力传感器与启门拉力传感器同时受力,其它时间段由于水流流速的动力作用,闭门钢丝绳不受力,而启门侧卷扬机钢丝绳始终需要拉力作用。由闭门曲线(见图 12)可知,大

约在 300 s~670 s 这个范围内闭门拉力传感器与启门拉力传感器同时受力,测到的最大和最小闭门力分别为 233.3 kN 和 -1 804.0 kN,这个现象说明只要河道存在动水流速,这就要求闸门闭门过程启门侧钢丝绳应始终处于受拉状态,以免产生闸门与闸墩结构的碰撞问题。此外在闸门某个闭门开度出现启门和闭门卷扬机不协调性现象,因此需妥善解决好启闭门钢丝绳的协调问题,其闭门最大值可以消除。



(a) 不同视角闸门门顶溢流态图



(b) 底板冲击脉动压力时域过程及谱密度曲线

图 11 门顶溢流流态与水舌底板冲击压力特征

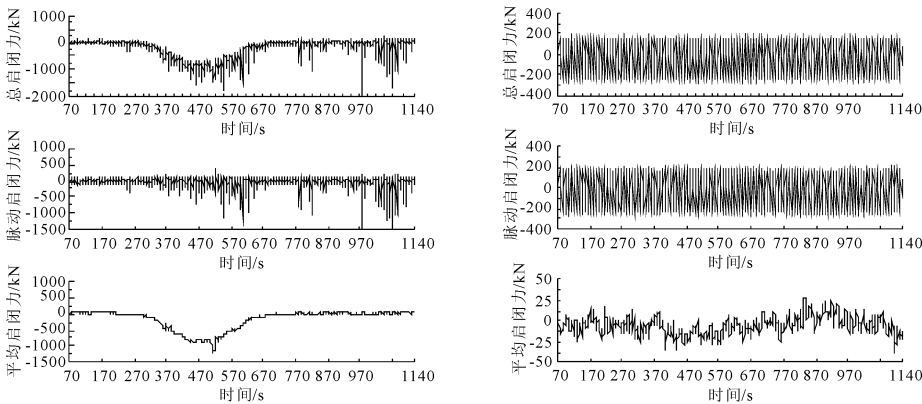


图 12 闭门速度 10 Hz(原型 90 min)运行工况闭门、启门受力变化过程

试微小流量闸门启闭力验结果显示,在启闭速度 10 Hz(90 min)条件下,闭门过程中,浮体门闭门传感器受力 84.0 kN,启门传感器最大受力值为 158.0 kN;启门过程中,闸门启门传感器的最大受力值 85.7 kN。启闭过程的闸门闭门力值比启门力要大些。

随着闸门启闭速度的进一步减小,闸门启闭力值呈现出下降趋势。在启闭速度 7 Hz(130 min)条件下,闭门过程中时,浮体门闭门传感器受力 116.4 kN,启门传感器最大受力值为 99.5 kN;启门过程中,闸门启门传感器的最大受力值 90.2 kN。

不同启闭速度的启闭机受力数据表明:该项试验获得如下二点主要结论:(1)无论浮体门处于闭门状态,还是启门状态,启门侧卷扬机始终处于受拉状态;(2)随着闸室水位差减小,流速降低,以及启闭时间延长,浮体门两侧启闭机的受力会进一步减小,出现启闭力下降趋势。

6 闸门结构静动力特性三维有限元分析

6.1 闸门流固耦合动力特性

流固耦合模态分析主要研究闸门在考虑水体的附加质量影响时闸门自振频率及振型^[14-15],图 13

绘出了闸门流固耦合计算模型。

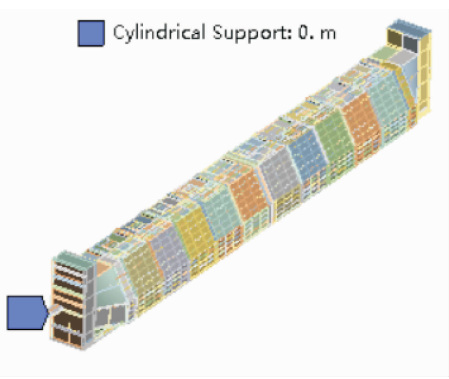


图 13 闸门结构计算模型与约束状态

在闸门固定铰和吊耳约束条件下,闸门变形的 3 阶频率为 4.73 Hz,为闸门整体侧向变形;闸门 4 阶频率为 7.25 Hz,为闸门整体二阶弯曲变形;支臂第一阶弯曲振型的频率为 10.99 Hz;闸门典型振型绘于图 14。

6.2 闸门结构的静力特性

在调控水位工况下(水位 15.5 m),闸门计算水头为 10.2 m(底板高程 5.3 m),闸门门体受到自重荷载。闸门约束状态采用支铰柱铰,底部采用无摩擦支撑约束,下水水封位置也采用无摩擦支撑约束。闸门结构的位移和应力计算结果绘于图 15。

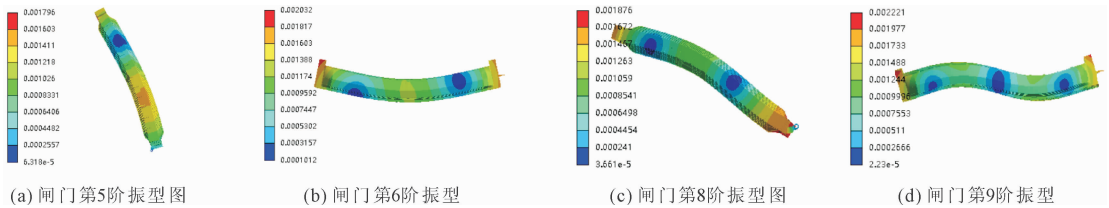


图 14 典型闸门结构振型图

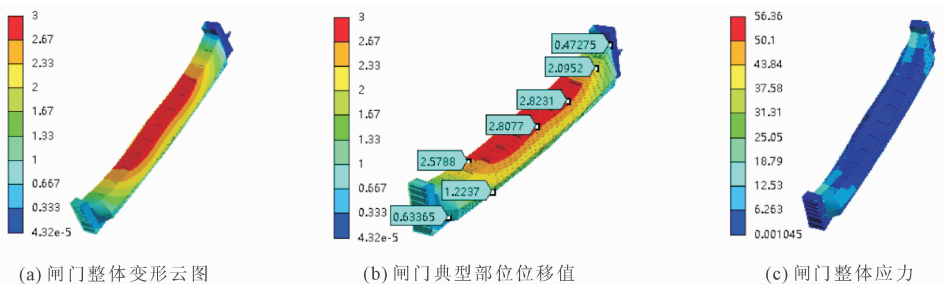


图 15 闸门整体位移与应力分布

计算结果显示,闸门结构的最大变形为 3 mm 左右,发生在门体顶部。门体整体变形很小,能够满足闸门对挠度的基本要求。闸门最大应力 56.4 MPa,应力较大的区域分布在闸门两端。整体来讲,

闸门应力能够满足要求^[13]。

7 结 语

本工程大闸孔浮体门的运行特征与常规直立式

或上翻式闸门不同,系采用浮动单侧立轴平面旋转型门型。本项成果通过大尺度水弹性振动模型,考查测试了大闸孔浮体闸门不同下泄流量及不同启闭速度条件下启闭运行过程中的振动和稳定性特征,系统取得了闸门振动安全性评价数据和资料。获得了水流动力作用、闸门结构启闭力、闸门结构低频晃动以及振动加速度、振动位移,以及支铰立柱的振动特性等动力参数,取得如下安全性评估结论:

(1) 浮体门结构的水流流态观测指出,下泄流量越大,该型闸门在关闭过程,尤其接近全关位时缺口溢流的绕流现象更为明显,反之随着出闸流量的减少而趋于平顺。

(2) 浮体门流激振动试验结果显示,下泄流量对闸门结构的动力稳定产生重要影响。大流量时闸门启门最大振动加速度值为 11.63 m/s^2 ($V3y$),出现在闸门端部的的顺水流向;而小流量时闸门振动量显著减小,测到的启门最大振动加速度值为 1.61 m/s^2 。显然,在小流量条件下闸门振动量比大流量时明显减小。

(3) 不同闸门启闭速度对闸门的振动量具有较大影响。原型启门时间 $40 \text{ min} \sim 90 \text{ min}$ 范围内时,闸门的振动量相对较小;随着启闭速度提高,启门时间 25 min 时,闸门振动量达到最大值。鉴于本工程大闸孔闸门结构尺寸巨大,浮体门的启闭操作应尽可能以慢速启闭为宜。

(4) 试验成果指出,闸门闭门过程中由于启门侧钢丝绳发挥了反向拉力作用,减缓了水流动力推动的闭门速度,有效削弱了闭门瞬间的冲击力。因此,在大型浮体门的启闭机设计中,只要河道存在水流流速,则需要考虑闭门过程启门侧卷扬机钢丝绳施加反向拉力作用,以策安全。

从总体上看,在妥善解决好门体晃动、闭门过程启门侧卷扬机钢丝绳施加拉力防止关门瞬间动水自闭碰撞,以及支铰与立轴扭别等问题后,大闸孔浮体门可以在工程中应用。

参考文献:

- [1] 严根华. 我国大跨度闸门应用趋势与抗振对策[J]. 水利水运工程学报, 2009(4): 134-142.
- [2] 严根华. 大跨度特型闸门流激振动及控振措施研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2018, 16(5): 1-11.
- [3] Kolrman P A. Flow-induced gate vibration: Prevention of

self-excitation computation of dynamic gate behaviour and the use of models[D]. Delft: Delft Hydraulics Laboratory, 1976.

- [4] 严根华,董家,孙云茜. 上翻式拱形闸门的流激振动控制及原型观测验证[J]. 水利水电科技进展, 2020, 40(5): 55-61.
- [5] Yan G H. Analysis and control measure on vibration of hydraulic segment gate running with small opening degree[C]//9th International Conference on Hydroinformatics, HIC 2010, Tianjin, China.
- [6] 严根华. 水动力荷载与闸门振动[J]. 水利水运工程学报, 2001(2): 10-15.
- [7] 严根华, 阎诗武. 水工闸门流激振动及动态优化设计[J]. 水利水运科学研究, 1999(1): 12-22.
- [8] Yan G H. Experiments and researches on flow-induced vibration of large radial working gate in sand sluicing chamber[C]//16th Asia and Pacific Division Congress of the International Association of Hydraulic Engineering and Research/3rd IAHR International Symposium on Hydraulic Structures - Advances in Water Resources and Hydraulic Engineering, October, 2008.
- [9] Yan G H. Experiments and researches on flow-induced vibration of large radial working gate in sand sluicing chamber[C]//16th Asia and Pacific Division Congress of the International Association of Hydraulic Engineering and Research/3rd IAHR International Symposium on Hydraulic Structures - Advances in Water Resources and Hydraulic Engineering, October, 2008.
- [10] 严根华, 阎诗武, 樊宝康. 水工泄水结构动态优化方法及其在弧形闸门中的应用[J]. 水利水运科学研究, 1993(2): 127-137.
- [11] 严根华, 阎诗武, 樊宝康. 水工泄水结构振动的模态分析与有限元综合法[J]. 振动. 测试与诊断, 1994, 14(1): 1-7.
- [12] 严根华. 水工闸门流激振动研究进展[J]. 水利水运工程学报, 2006(1): 66-73.
- [13] 水电工程钢闸门设计规范: NB 35055—2015[S]. 北京: 中国电力出版社, 2015.
- [14] 严根华, 阎诗武. 水工弧形闸门三维水弹耦合共振频率的数值计算[J]. 水利水运科学研究. 1993(1): 45-53.
- [15] 辛华荣, 王建, 严根华, 等. 大型平面有轨对拉式弧形闸门的流激振动特性及抗振措施研究[J]. 水利水运工程学报, 2012(6): 87-94.