

上翻式拱形闸门的流激振动控制及原型观测验证

严根华^{1,2},董家^{1,2,3},孙云茜^{1,2,3}

(1. 南京水利科学研究院水工水力学研究所,江苏 南京 210029;
2. 南京水利科学研究院水文水资源与水利工程国家重点实验室,江苏 南京 210029;
3. 河海大学水利水电学院,江苏 南京 210098)

摘要:通过物理模型和数值模型相结合的方法,系统研究了大跨度上翻式拱形闸门水动力荷载、结构动力特性和流激振动特性,揭示了闸门结构的流激振动强烈共振现象及成因。针对存在的强烈振动的问题,通过减小闸门底缘下游倾斜面水平面投影面积、缩减闸门底部小横梁尺寸等方式来进行结构优化。优化后的工程现场原型观测结果显示,推荐布置方案有效控制了闸门的有害振动,运行平稳,安全可靠,验证了物理模型试验成果的正确性。

关键词:大型上翻式拱形闸门;水动力荷载;流激振动;共振特性;抗振优化;原型观测

中图分类号:TV34 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2020)05-0055-07

Flow-induced vibration control and prototype measurement verification of large upwelling arch gate//YAN Genhua^{1,2}, DONG Jia^{1,2,3}, SUN Yunxi^{1,2,3} (1. *Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China*; 2. *State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China*; 3. *College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China*)
Abstract: Through the combination method of physical model and numerical model, the hydrodynamic load, structural dynamic characteristics and flow-induced vibration characteristics of a large-span upwelling arch gate were studied systematically. The strong resonance phenomenon and causes of flow-induced vibration of the gate structure are revealed. Aiming at the problem of strong vibration, structural optimization was carried out by reducing the size of the projected area of the inclined plane downstream of the gate and the small cross beam at the bottom of the gate. The results of the optimized field prototype measurement show that the proposed scheme can effectively control the harmful vibration of the gate, which makes the gate run stably, safely and reliably, and the correctness of the physical model test is verified.
Key words: large upwelling arch gate; hydrodynamic load; flow-induced vibration; resonant characteristic; anti-vibration optimization; prototype observation

大型上翻式拱形闸门是一种新型大跨度轻型闸门,体型美观、操作方便,适合于城市水环境建设,是近年来我国开始广泛应用的新型特色门型。但其弯月形出流特性明显区别于常规直升式平面闸门和弧形闸门,且其跨度大、结构轻、刚度弱,若体型布置不当,常常在动水荷载作用下产生强烈振动危害,因此为确保闸门结构的运行安全,需要对结构的水动力荷载、动力特性及抗振体型等进行仔细深入的研究,提出适合于各种运行环境的能够安全运行的操作规程和抗振优化方案^[1-4]。

这种门型的基本特征是闸门支铰均布置在两侧闸墩,启闭机采用固定式卷扬机或液压启闭机,约束条件弱,刚度低,结构共振频率低,水流脉动压力主能量往往集中在低频区,容易诱发闸门结构产生共振

现象。本文结合某城市水环境水生态整治工程,研究上翻式拱形闸门的流激振动及抗振优化方案,其经验可为类似工程的设计和建设提供参考依据^[5]。

1 大型上翻式拱形闸门流激振动特性

1.1 闸门结构布置特征

某工程采用上翻式拱形闸门,水闸孔口采用开敞式,泄水孔采用单孔,孔净宽40 m,闸室长度25.0 m。水闸总长128 m,包括闸室段长25 m、外江防冲槽长8 m、海漫长22 m、铺盖长20 m、内河道铺盖长20 m、海漫长15 m、防冲槽长8 m等。水闸为开敞式单孔泄闸,闸孔尺寸为40 m×5.19 m(宽×高),底槛高程-3.0 m。边墩厚4.0 m,泄水闸宽度较大,不设检修门。闸门为上翻式拱形钢闸门,工程布置见图1和图2。

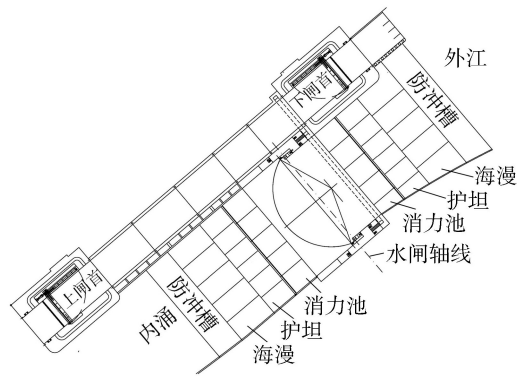


图1 水闸平面布置

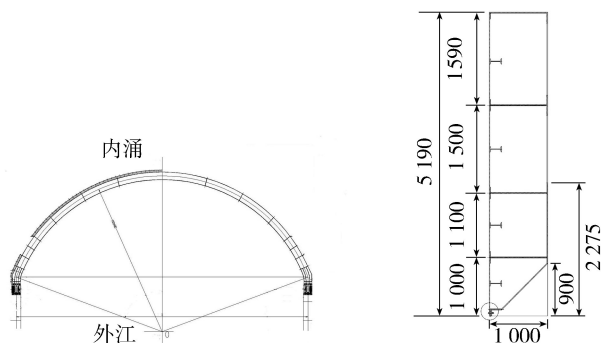


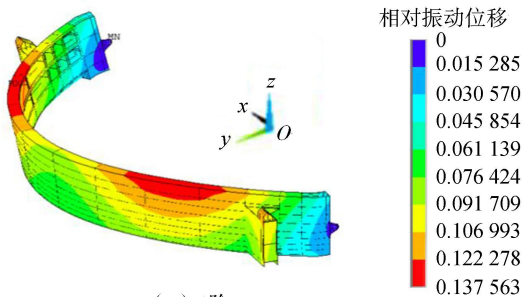
图2 泄水闸门叶结构(单位:mm)

1.2 闸门结构的动力特性

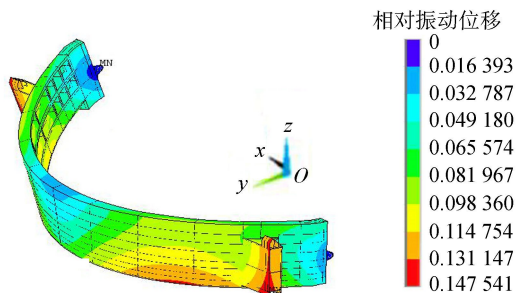
上翻式拱形闸门工作状态下孔口宽度 40.0 m, 门高 5.19 m。采用 ANSYS 有限元分析软件建模。模型共有 35 839 个节点、215 034 个自由度。考虑启闭机油缸后,总质量为 167.29 t。模型边界条件为启闭油缸为固定端、油缸和吊耳梁连接部位以及支铰部位均释放其绕 x 轴转动自由度。表 1 列出了闸门结构无水状态和考虑流固耦合情况下的若干低阶振动模态频率值,相应状态下的前 3 阶振动模态见图 3 和图 4。计算结果显示,无水状态的闸门振动基频为 2.70 Hz,表现为闸门两侧上部面板径向弯曲振动变形;2 阶振动频率为 2.80 Hz,为闸门两侧下部面板径向弯曲振动变形;闸门中部面板径向弯曲振动变形频率为 6.69 Hz。闸门流固耦合前 3 阶固有频率分别为 2.11 Hz、2.75 Hz 及 3.97 Hz,分别表现为闸门面板中上部径向弯曲变形、面板距中部两侧的径向变形振动及局部弯扭变形。分析结果指出,流场对闸门结构的固有振动特性产生明显影响,1 阶基频下降 22%,3 阶模态频率下降 40%。从总体上看,闸门振动基频很低,若闸门结构体型设计不当,在水动力荷载作用下容易激发强烈振动,并导致闸门结构的共振破坏^[6]。

表1 闸门结构低阶振动模态频率 Hz

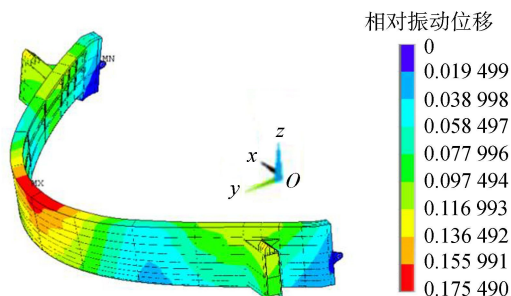
状 态	1 阶	2 阶	3 阶	4 阶
无水干模态	2.70	2.80	6.69	7.17
流固耦合	2.11	2.75	3.97	4.29



(a) 1阶



(b) 2阶



(c) 3阶

图3 闸门无水干模态低阶振型

1.3 上翻式闸门的引排水流态特征

上翻式拱形钢闸门具有开闸排水和引水两大运行工况。其水动力特性因其构造不同,与普通闸门相比有所不同。开闸排水时,随着下游水位变化将出现自由出流、临界出流和淹没出流 3 种不同形式的流态,对应水跃形态分别为自由水跃、临界水跃和淹没水跃。水流受拱形门底缘弧线出流影响,表现出闸下两侧水流往中部汇聚现象。闸后中部区域单宽流量加大,流速增高,水跃跃首下移;而闸室两侧出现回流,可上逆至闸门底缘处,加剧了水流紊动程度,这是闸门小开度排水出现强烈振动的一个重要诱因。

引水工况的闸下出流流态表现为发散形态,侧边水流撞击左右侧墙后,造成沿边墙水面壅高,形成水面横比降,加大了横向分速,侧边的挤压水流也成为激发闸门振动的振源。

从引排水水流流态角度考查,上翻式闸门底缘部位的不稳定紊动水流及分离型漩涡的不稳定重附着现象是导致闸门结构振动的重要振源,需要对闸门结构体型优化来改善水动力作用条件,从而避免闸门结构产生强烈共振现象。

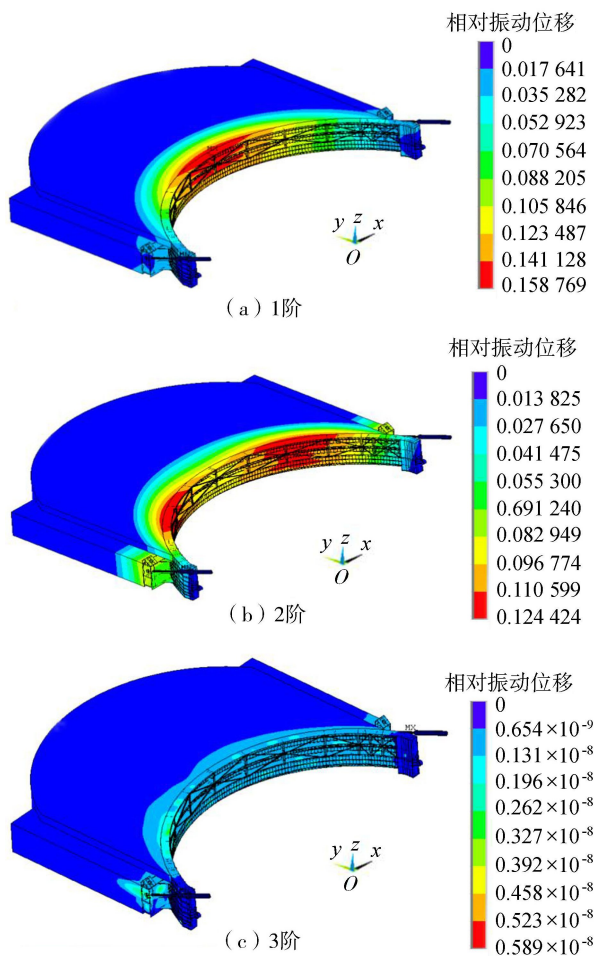


图4 闸门流固耦合低阶振型

1.4 水流脉动压力荷载特性

上翻式拱形闸门的动水压力荷载由时均动水压力和水流脉动压力2部分荷载构成。其中水流脉动压力则是诱发闸门振动的主要动力源。作用于闸门结构某部位的动水压强总量为

$$P(t) = P_0 + P'(t) \quad (1)$$

式中: $P(t)$ 为作用于门体某点的总压强; P_0 为时均动水压力; $P'(t)$ 为叠加于时均压力之上压力脉动部分。由于该型闸门结构布置新颖、结构跨度大,门下出流流态复杂,水跃、波浪、底缘不稳定漩涡重附着现象等均对门体引起的压力脉动作用,动荷载作用比较复杂^[6]。

由前所述,上翻门排引水时流态不同,沿门宽方向的动水荷载具有非均匀特征,闸孔中部和边部差异较大,具有明显的3维空间特征。模型试验分别测取了闸门中心线、边断面和闸门宽1/4断面的水流脉动压力。图5绘出了排水工况正常状态和闸门发生共振现象(外江水位-2.20 m、内涌水位0.80 m、开度0.52 m)时典型测点脉动压力均方根值时域曲线及功率谱密度。分析结果显示:作用于门体上的水流脉动压力随开度和泄流量的加大而增加,底缘部位

脉动压力最大,主要由门后旋滚、不稳定分离和重附着漩涡产生。水流脉动压力的主能量集中在频率 $f=0 \sim 10$ Hz范围,其中优势频率集中在5 Hz以内,主频率约为1.5~2.5 Hz。闸门处于共振状态时的水流脉动压力出现谐波现象(图5(b)),相应共振水流脉动频率约2.9 Hz(图5(c))。

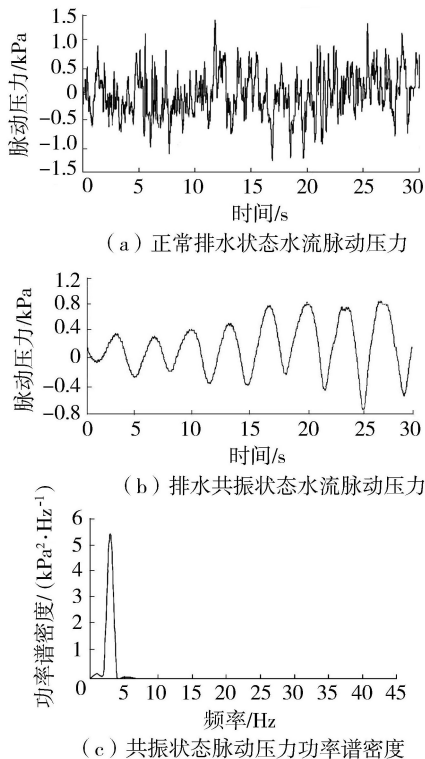


图5 上翻门排水共振状态典型测点脉动压力过程及功率谱密度

1.5 闸门水弹性振动模型试验

该闸门采用单跨宽度达40 m的液压启闭上翻式拱形钢闸门,需要满足双向挡水、局部开启防洪排涝要求。由于闸门跨度大、门形特殊、功能多、运行条件复杂,局部开启存在流激振动安全风险,因此对闸门结构开展流激振动研究十分必要。根据结构运动方程,研制开发了同时满足几何尺寸、水流运动相似、结构动力相似(质量密度、弹性模量、泊松比等参数的相似性)的水弹性振动模型^[7],经推导得到如下参数的比尺要求为^[8]:几何比尺 L_r ;质量和密度比尺 $\rho_r=1$;弹性模量比尺 $E_r=L_r$;泊松比比尺 $\mu_r=1$;阻尼比尺 $C_r=L_r^{2.5}$ 。工程原型闸门采用钢质上翻拱形钢闸门结构,物理力学指标分别为:容重78.5 kN/m³、弹性模量210 GPa、泊松比0.3,选定的水弹性模型几何比尺 $L_r=20$ 。水弹性模型材料按水弹性相似原理,其基本物理力学指标应为:容重78.5 kN/m³、弹性模量10.5 GPa、泊松比0.3。采用重金属粉、高分子材料等进行多组分特种材料试验,并运用专用模具特制适合本工程采用的型材。测试结果表明:选

用的水弹性材料基本达到材料密度 $\rho_m = \rho'_p$ (ρ'_p 为原型闸门材料密度), 结构弹性模量 $E_r = E_p$ 的要求。在此基础上精心制作结构尺寸相似、满足水弹性相似要求的闸门水弹性振动试验模型^[9]。

在特制的水弹性闸门模型上分别布置了振动和应力测点, 测取上翻式拱形闸门顺水流方向(x 方向), 切线方向或垂直水流方向(y 向)及铅锤方向(z 向)的振动加速度、振动位移以及振动应力等动力响应参数。通过专用测试分析设备进行动态数据的测量和分析, 分别获得闸门振动过程的谱特征和数字特征, 揭示闸门振动的频域能量分布及振动量级。

测试和分析结果显示, 水闸排水时, 在内涌水位 0.8 m、外江水位 -0.5 m, 闸门开度 $n \geq 1.0$ m 时闸门运行相对平稳, 振动量不大; 当外江水位变幅在 -2.0 ~ -0.5 m、 $n < 1.0$ m 时, 下泄水流漩滚位于闸门底缘附近, 底缘的不稳定重附着涡旋形成较大脉动作用力, 激发了闸门结构强烈共振现象, 这种共振振动量级较正常情况相比表现出低阻尼、大幅度增加特点, 导致闸门水弹性振动模型因强烈振动而多次损毁。其特征是闸门结构共振区间宽, 振动强度大, 易导致闸门结构及启闭系统的整体破坏。图 6(a) 绘出了内涌水位 0.80 m、外江水位 -0.50 m 排水工况各测点(V1、V2、V3、V4) 铅锤向加速度均方根值随开度变化关系, 图 6(b) 为闸门典型测点共振过程线, 图 6(c) 为典型测点振动功率谱密度。从频谱分析可以看出闸门共振激发区的共振频率为 2.9 ~ 4.0 Hz。图 6(d) 为闸门拍振共振过程线, 图 6(e) 为闸门正常状态振动过程线, 图 6(f) 为典型测点振动功率谱密度曲线。

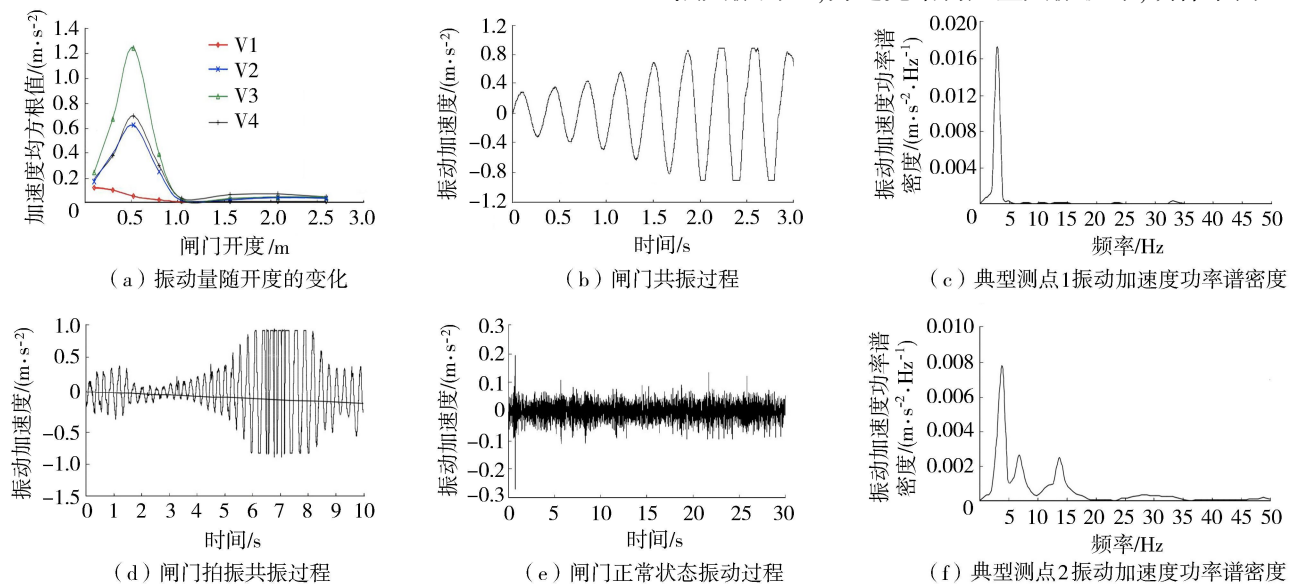


图 6 排水工况闸门结构各测点振动加速度随开度变化

2 闸门强烈振动的成因及其控振措施

2.1 闸门强烈振动成因分析

水弹性振动试验结果显示, 该型闸门的自振特性表现出共振频率低, 在流固耦合条件下, 闸门前 3 阶固有频率分别为 2.11 Hz、2.75 Hz 和 3.97 Hz, 反映闸门面板中上部径向弯曲变形、闸门两侧面板上、下部径向弯曲变形振动。总体上说, 闸门振动频率较低, 这是大跨度、低刚度的结构构造特性所决定的。闸门局部开启条件下的水流脉动压力作用荷载显示, 作用于门体的脉动压力的主能量集中在 $f=0 \sim 10$ Hz 范围, 其中优势频率集中在 5 Hz 以内, 主频率约为 1.5 ~ 3.0 Hz。

当闸门处于排水工况时, 在 $n=0.5$ m 情况下, 综合考察各运行工况下北闸闸门 3 个方向的振动加速度存在如下关系: $a_z > a_y > a_x$ 。试验测得各运行工况下闸门结构振动加速度最大均方根分别为 x 方向 0.359 m/s²、 y 方向 0.602 m/s²、 z 方向 1.361 m/s²。从频谱分析可以看出闸门共振激发区的共振频率为 2.9 ~ 4.0 Hz。

根据水动力荷载、结构动力特性及振动响应数据的综合分析显示, 闸门结构的强烈共振的主要原因是动水压力荷载的主能量激发的^[10]。其振型主要反映结构的垂向振动形态和局部径向变形。因此首先需要从解决水动力荷载对闸门结构的不利动力作用着手, 而优化闸门结构体型, 是控制闸门振动的最经济和比较有效的优先考虑措施和方向^[11]。

2.2 闸门振动控制措施

鉴于闸门原设计方案在多个运行工况下产生强烈共振问题, 为避免结构产生共振破坏, 确保水闸运

行安全,进行了多个闸门体型优化和流激振动控制方案试验,最终提出同时适合于排水和引水2种工况、没有强振现象、运行平稳的闸门结构抗振优化布置方案。该方案采用如下综合优化措施^[12]:通过调整闸门底缘下游倾斜面水平面投影面积,减小下节浮箱空间,以降低闸门底缘的浮动力;缩减闸门底部小横梁尺寸以削减闸门底缘顶托力。试验结果表明,在水位差20~130 cm范围,水闸排水运行时,闸门结构最大振动加速度均方根为0.025 m/s²,最大振动应力均方根为1.0 MPa。优化修改后的闸门结构振动量处于安全的微小可控范围。

显然上述优化控制措施有效改善了作用于闸门的水流动力作用,不同运行工况下振动量微弱,运行平稳,实现了同时满足水闸排水泄洪和引水双向运行安全,达到了良好的闸门振动控制目标。

3 闸门振动原型观测及其成果验证

根据模型试验成果,闸门结构的最终工程设计采用模型试验提出的抗振优化方案进行修改调整,完建后的水闸见图7和图8。现场闸门流激振动原型观测试验时,设定水闸内外水位差 Δh 分别为20 cm、40 cm、80 cm、100 cm 4种情况,同时设定不同闸门开度,进行多组次详细研究,重点考察不同运行工况下作用于结构的水流脉动压力、闸门振动加速度、动位移及振动应力等各种流激振动动力参数,评价振动控制措施的效果及闸门运行的安全性^[13]。



图7 水闸雄姿

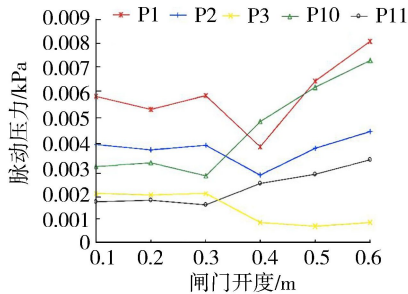


图8 闸门全开泄流状态

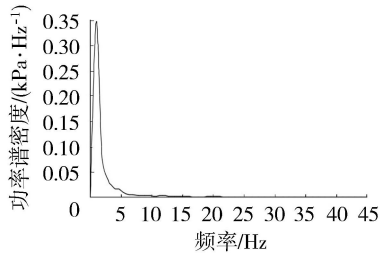
3.1 闸门结构脉动压力特征

水流脉动压力重点测量闸门中断面、中心偏左

28°及中心偏左53°3个断面的邻近底缘部位上下游水流脉动压力变化特征。测试结果显示, $\Delta h=20\sim100$ cm时,闸门各断面测点的最大脉动压力的均方根在0.126 kPa以内,其中门前底缘部位为0.103 kPa,门后底缘部位为0.095 kPa; $\Delta h=100$ cm、 $n=2.0$ m时闸门结构不同测点(P1、P2、P3、P10、P11)位置的脉动压力均方根随开度的变化及典型测点脉动压力功率谱密度如图9所示。从频谱密度曲线可知,闸门水流的脉动压力具有低频特征,其能量优势频率主要集中在5.0 Hz以内的低频区,主频约为1.0 Hz左右。总体上看,闸门结构的脉动压力不大,与模型试验结果基本一致。



(a) 脉动压力随开度的变化



(b) 典型测点脉动压力功率谱密度

图9 闸门结构脉动压力随开度的变化及典型测点脉动压力功率谱密度

3.2 闸门结构振动加速度特征

重点检测了闸门中断面、中心偏左、偏右28°及中心偏左53°4个断面的闸门结构振动加速度。测试结果显示,在 $\Delta h=20\sim100$ cm时,闸门结构的最大振动加速度均方根分别为 x 方向0.015 m/s²、 y 方向0.013 m/s²和 z 方向0.029 m/s²,振动量随闸门开度的增大而逐渐减小;闸门启闭杆振动量较门体略大,其最大振动加速度分别为 $a_x=0.024$ m/s²、 $a_y=0.036$ m/s²和 $a_z=0.0199$ m/s²。显然,闸门门体和启闭杆振动均不大,闸门可以安全运行^[14]。

设计排水工况($\Delta h=100$ cm)典型测点振动加速度均方根随开度的变化和功率谱密度曲线如图10和图11所示。从频谱密度曲线可知,该闸门振动加速度具有低频特征,其能量优势频率主要集中在10 Hz以内的低频区,但在20~30 Hz区间也会有小范围的能量聚集。

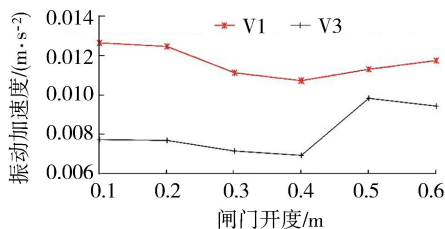


图 10 闸门结构振动加速度随开度的变化

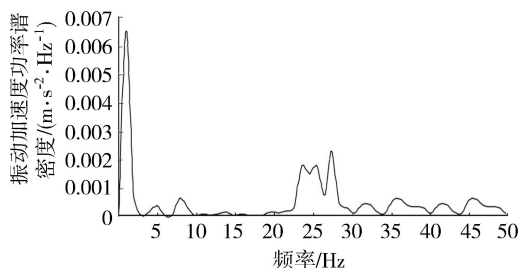


图 11 闸门振动功率谱密度

3.3 闸门结构振动位移特征

闸门振动位移测量与振动加速度测量同步进行。结果显示,在 $\Delta h=20 \sim 100$ cm 时,闸门结构的最大振动位移均方根值分别为 x 方向 $0.0487 \sim 0.2476$ mm、 y 方向 $0.0816 \sim 0.2165$ mm、 z 方向 $0.0165 \sim 0.0207$ mm。从总体上看,闸门结构的振动位移量不大。排水工况闸门典型测点振动位移过程和功率谱密度如图 12 和图 13 所示。该闸门振动位移具有低频特征,其能量优势频率主要集中在 3.0 Hz 以内的低频区,主频约为 1.0 Hz 左右。

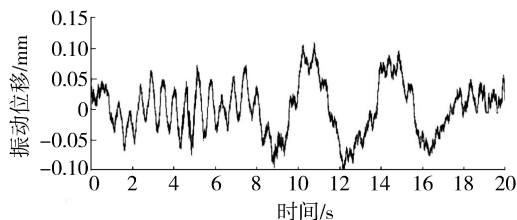


图 12 排水工况闸门典型测点振动位移时域过程

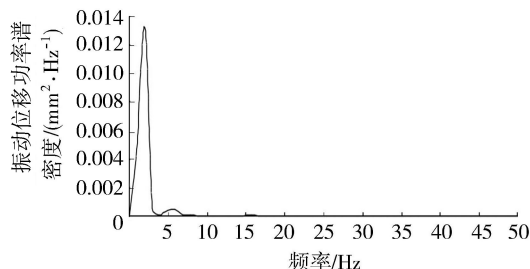


图 13 典型测点振动位移功率谱密度

3.4 闸门结构振动应力特征

排水运行时闸门运行平稳,振动量较小,从而引起的闸门振动应力亦较小,各运行工况振动应力量级基本相当。现场实测各运行工况下闸门结构振动应力最大均方根为 6.1 MPa。显然,闸门结构振动应力量级不大,满足结构安全运行要求。

3.5 模型试验与原型观测成果比较

闸门结构抗振优化方案流激振动试验结果表明,闸门在各运行工况下运行平稳,振动量较小,共振现象消失。在 $\Delta h=20 \sim 130$ cm 时闸门结构最大振动加速度均方根在 x, y, z 3 个方向上分别为 0.025 m/s²、 0.015 m/s² 和 0.012 m/s²;最大振动应力均方根值为 1.0 MPa。

工程现场原型观测测试结果表明,闸门振动量随闸门开度的增大而逐渐减小。相应工况下,闸门门体结构 3 个方向最大振动加速度均方根值分别为 0.013 m/s²、 0.015 m/s² 和 0.029 m/s²。显然,闸门门体的振动量与模型试验值基本接近。闸门启闭杆振动量较门体略大,现场试验测得各运行水位差条件下启闭杆 3 个方向最大振动加速度分别为 0.036 m/s²、 0.020 m/s² 和 0.024 m/s²。从频谱密度曲线可知,该闸门振动加速度具有低频特征,其能量优势频率主要集中在 10 Hz 以内的低频区,但在 $20 \sim 30$ Hz 的局部频域区间存在微弱振动能量。

此外,原型观测实测闸门结构最大振动应力均方根值为 6.1 MPa,比模型试验值略大,但二者均处于 10 MPa 以内的同一个数量级内,同属于安全的微小振动范畴。从总体上看,闸门门体和启闭杆振动量均不大,闸门可以安全运行。

上述数据对比表明,模型试验与原型观测闸门振动响应量级基本一致,反映了通过水弹性振动模型试验提出的结构抗振优化方案,较好反演了闸门结构的流激振动响应特征,证明模型试验成果的正确性。

4 结 论

a. 采用水弹性振动模型、结构水动力荷载模型及结构动力特性数值分析模型相结合的方法可以正确反演具有复杂流动条件的大跨度上翻式拱形闸门的振动响应特征、揭示闸门结构的大幅度强烈共振现象,是提出抗振优化控制措施的良好基础。

b. 大跨度拱形闸门结构跨度大,约束刚度弱,振动基频低,运行过程中容易诱发闸门结构的强烈振动。

c. 闸门浮箱浮力的合理使用,需综合考虑闸门启闭机容量和结构运行的平稳性两方面因素,并需优先考虑闸门结构不稳定振荡现象的控制。

d. 闸门结构底缘形式的优劣直接关系到闸门泄水操作的振动安全性,不合理的底缘形式常常引发闸门结构的强烈振动,特别是底缘下方分离型漩涡的不稳定重复着现象是产生强烈涡激振动振源之一,必须予以认真处理。

e. 大跨度闸门结构的强振控制措施需综合考虑浮箱利用、底缘上托力、闸下分离型漩涡的不稳定重附着激励力消除等因素,提出有效的闸门结构体型,从而确保水闸工程的运行安全。

参考文献:

[1] 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. (YAN Genhua. Flow-induced vibration and control measures of the large-span special gate [J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2018,16(5): 1-11. (in Chinese))

[2] 马斌,张泽,赵钊. 基于相关性方差贡献率的高坝泄洪振动数据级融合方法[J]. 水利水电科技进展,2020,40(2):36-41. (MA Bin,ZHANG Ze,ZHAO Zhao. A data level fusion method for high dam flood discharge vibration based on correlation variance contribution rate [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2020,40(2):36-41. (in Chinese))

[3] 李火坤,王刚. 泄流结构振动反演与安全控制指标研究进展[J]. 水利水电科技进展,2020,40(2):81-89. (LI Huokun,WANG Gang. Research progress on vibration inversion and safety control index of flood discharge structures[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2020,40(2):81-89. (in Chinese))

[4] 刘鹏,高振海,严根华,等. 大跨度上翻式拱形钢闸门振动特性及抗振优化[J]. 水利水电科技进展,2011,31(3):74-79. (LIU Peng,GAO Zhenhai,YAN Genghua,et al. Vibration characters and anti-vibration optimization of long-span-flip arch steel gates[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2011,31(3):74-79. (in Chinese))

[5] 龚登位,张德选,胡木生. 高坝大库水电站泄洪闸门原型观测试验[J]. 水力发电,2015,41(10):64-66. (GONG Dengwei, ZHANG Dexuan, HU Musheng. Prototype measurement experiment of high-head and large-flow flood discharge gate in hydropower station[J]. Water Power,2015,41(10):64-66. (in Chinese))

[6] 严根华. 水工闸门自激振动实例及其防治措施[J]. 振动. 测试与诊断,2013,33(增刊2):203-208. (YAN Genhua. Self-induced vibration case and controlling measure of hydraulic gate [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis,2013,33(Sup2):203-208. (in Chinese))

[7] 姬锐敏,蒋昌波,许尚农,等. 弧形闸门流激振动原型观测方法探讨[J]. 交通科学与工程,2013,29(2):71-78. (JI Ruimin, JIANG Changbo, XU Shangnong, et al. Prototype observation methods of radial gate flow-induced vibration [J]. Journal of Transport Science and Engineering ,2013,29(2):71-78. (in Chinese))

[8] 中华人民共和国水利部. 水利水电工程钢闸门设计规范:SL74—2013 [S]. 北京:水利水电出版社,2013.

[9] 严根华,陈发展. 溢流坝表孔弧形闸门流激振动原型观测研究[J]. 水力发电学报,2012,31(2):140-145. (YAN Genhua, CHEN Fazhan. Prototype observation and study of flow-induced vibrations of radial gate at spillway dam outlet [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2012,31(2):140-145. (in Chinese))

[10] 严根华,阎诗武. 流激闸门振动及动态优化设计[J]. 水利水运科学研究,1999(1):14-24. (YAN Genhua, YAN Shiwu. Flow-induced vibration of hydraulic gates and their optimization design[J]. Hydro-Science and Engineering, 1999(1):14-24. (in Chinese))

[11] 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. (YAN Genhua. Application tendency and anti-vibration countermeasure of large and wide gates in China [J]. Hydro-Science and Engineering,2009(4):134-142. (in Chinese))

[12] YAN Genhua, ZHAO Jianping. Experiments and researches on flow-induced vibrationon of large radial working gate in sand sluicing chamber[C]//International Association of Hydraulic Engineering and Research (IAHR), Hohai University. Advances in Water Resources and Hydraulic Engineering: Proceedings of 16th IAHR-APD Congress and 3rd Symposium of IAHR-ISHS(V). Nanjing:Hohai University,2008:112-121.

[13] 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. (YAN Genhua. Research development of flow-induced gate vibration [J]. Hydro-Science and Engineering, 2006(1):66-73. (in Chinese))

[14] 严根华,阎诗武,樊宝康,等. 高水头大尺寸闸门流激振动原型观测研究[J]. 水力发电学报,2001,20(4):65-75. (YAN Genhua, YAN Shiwu, FAN Baokang, et al. Study of flow-induced vibration for the high-head and large dimension gate[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2001,20(4):65-75. (in Chinese))

(收稿日期:2019-08-26 编辑:郑孝宇)

