

大型泄洪冲沙闸弧形工作闸门的水动力特性及抗振措施研究

严根华^{1,2}, 李新燕³, 侍贤瑞⁴, 董家^{1,2}

(1. 南京水利科学研究院, 江苏 南京 210029; 2. 水灾害防御全国重点实验室, 江苏 南京 210029;
3. 中国电建集团北京勘测设计研究院, 北京 100024; 4. 水利部发展研究中心, 北京 100038)

摘要: 基于大型泄洪闸规模、孔口尺寸和下泄流量大, 由此带来的闸下消能、闸门水动力作用荷载更加复杂, 闸门结构的抗振能力也相对减弱, 结构的流激振动问题也更加突出, 已经成为影响工程运行安全的制约性因素。以某工程泄洪冲沙闸为依托, 开展闸门水力学、结构动力特性、水弹性振动特征、抗振优化措施、弧形闸门支臂的动力稳定性等问题系统研究。揭示泄洪闸弧形闸门结构存在的问题, 提出优化结构动力性能及合理运行操作方式等控振减振措施, 对确保泄洪闸弧形工作闸门的运行安全提供了可靠技术保障。

关键词: 泄洪冲沙闸; 弧形工作闸门; 水动力荷载; 静动力特性; 流激振动; 结构抗振优化

中图分类号: TV663⁺.3

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2025)01-0001-06

Hydrodynamic Characteristics and Anti-vibration Measures of the Radial Service Gate of Large-scale Flood Discharge and Sediment Flushing Sluices

YAN Genhua^{1,2}, LI Xinyan³, SHI Xianrui⁴, DONG Jia^{1,2}

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

2. Key Laboratory of Flood & Drought Disaster Defense, Nanjing, Jiangsu 210029, China;

3. Beijing Engineering Corporation Limited, Beijing 100024, China;

4. Development Research Center of the Ministry of Water Resources, Beijing 100038, China)

Abstract: With the rapid development of China's water conservancy and hydropower engineering construction and the continuous improvement of manufacturing and construction levels, the scale of flood discharge sluices has increased rapidly, and the sizes of orifices and the discharge flow rates have been continuously enlarged. As a result, the energy dissipation below the sluices and the hydrodynamic action loads on the gates have become more complex, the anti-vibration ability of the gate structures has been relatively weakened, and the flow-induced vibration problems of the structures have become more prominent, which have already become restrictive factors affecting the operation safety of the projects. In view of the hydraulic structure situation of the flood discharge and sediment flushing sluices in a certain project, this paper conducts a systematic study on issues such as the hydraulics of the gates, the dynamic characteristics of the structures, the characteristics of hydroelastic vibrations, the anti-vibration optimization measures, and the dynamic stability of the radial gate arms. It reveals the existing problems of the radial gate structures of the flood discharge sluices and proposes vibration control and reduction measures such as optimizing the dynamic behavior of the structures and adopting reasonable operation methods, which hopefully could provide reliable technical references for ensuring the operation safety of the radial service gates of the flood discharge sluices.

Keywords: flood discharge and sediment flushing sluices; radial service gates; hydrodynamic loads; static and dynamic characteristics; flow-induced vibration; structural anti-vibration optimization

近年来,我国水利水电工程建设呈现高速发展势头,低水头、大尺寸、大流量泄洪闸不断涌现,最大孔口尺寸已达到 $14\text{ m} \times 25\text{ m}$ (宽 $\times$ 高),孔口面积达到 350 m^2 以上。弧形工作闸门的支臂长度也达到 30 m 之多。由于孔口尺寸的不断加大,闸门运行时的水流流态也将经历自由出流、临界出流(临门水跃)、淹没出流等各种复杂流态特征,由此产生的水动力荷载作用更加复杂多变,闸门流激振动问题也日益突出,需要引起高度重视和关注^[1-4]。本文针对我国目前水力结构综合指标较高的典型大型泄洪冲沙闸工程,进行闸门水力学、结构动力特性、结构抗振优化措施进行系统研究,寻找影响工程运行安全的问题,提出解决改善措施,确保泄洪闸运行安全。

本文研究的依托工程泄水建筑物共设 12 孔冲砂泄洪闸,孔口尺寸均为 $14\text{ m} \times 25\text{ m}$ (宽 $\times$ 高),工作闸门采用弧形工作闸门和上悬挂式液压启闭机 ($2 \times 5000\text{ kN}$ 液压启闭机) 启闭。在工作闸门的上游侧设有一道上游检修闸门,由坝顶 $3600\text{ kN}/2 \times 800\text{ kN}/400\text{ kN}$ 双向门式启闭机配合自动挂脱梁操作。

这种大尺寸泄洪闸的最大优点可以提高单宽流量,节省工程投资和运行管理费用,但由于泄洪闸孔口尺寸较大,致使这种大型泄洪闸弧形工作闸门的框架刚度相对较低,加上支臂长度达 30 m ,结构动力稳定性也需高度重视。此外由于下游水位变幅很大,闸下出流将经历复杂流态的动力作用,尤其是闸下出流旋滚(或临门水跃)对闸门结构产生的动力冲击荷载常常诱发闸门结构的强烈振动;处理不当还会诱发出出现闸门整体或支臂、面板等部件的共振。因此,需要通过水动力条件和结构动力特性优化相结合的途径进行妥善处理^[5]。

1 泄洪闸水力特性和动荷载作用

1.1 泄洪闸工作闸门振动和动荷载作用关系分析

泄洪闸弧形工作闸门泄水或冲沙运行时将受到门前来流、漩涡及门后旋滚等水动力荷载的作用,这些荷载将与上下游水位变化、出闸流量、闸门开度以及下游门后流态密切相关。闸门结构的振动与作用荷载之间的关系为^[1]:

$$S_x(\omega) = \sum_{r=1}^N \sum_{s=1}^N H_{xP_r}^*(\omega) H_{xP_s}(\omega) S_{P_r P_s}(\omega) \quad (1)$$

式中: $S_x(\omega)$ 为闸门结构在水流动力荷载作用下的随机响应谱密度; $H_{xP_r}^*(\omega)$ 或 $H_{xP_s}(\omega)$ 为结构所论

点与荷载作用点 P_r 或 P_s 之间的传递函数,涵盖了闸门结构的频率、振型、阻尼等动力特性参数; $S_{P_r P_s}(\omega)$ 为所论点 r, s 水流脉动压力荷载之间的互谱密度,反映闸门体两点之间水动力荷载的性质。

由此可见,影响闸门结构振动响应特征的主要受制于结构本身的动力特性和作用力荷载的频域能量分布和荷载分布的时空特性。因此,优化结构的动力特性或调整作用于门体的水动力脉动荷载均可改变结构的动力响应。显然分别仔细研究不同运行工况下的作用于闸室和闸门结构的水流流态和脉动压力荷载、闸门结构的动力特性以及动荷载作用下的结构水弹性振动响应,揭示三者之间的相互关系,并提出安全抗振措施,是有效解决泄洪闸弧形工作闸门发生有害振动的基本出发点和根本途径。

1.2 泄洪闸流态和脉动压力荷载特征

大型泄洪闸运行工况复杂,闸下流态将经历自由出流、临界出流及淹没出流等多变流态,作用于门体的水动力荷载涉及到门前水流脉动压力、两侧漩涡动力作用以及门后水跃强旋滚冲击等荷载作用,这些水动力荷载随上下游水位、闸门开度、下泄流量等因素有关。作用于闸门结构的作用力由两部分构成:

$$P(t) = p_0 + p'(t) \quad (2)$$

式中: $P(t)$ 为作用于闸门的水动力荷载; p_0 为动水荷载的时均部分作用力; $p'(t)$ 为动水荷载的脉动部分作用力。 p_0 对结构的静强度起到控制作用,而 $p'(t)$ 则是导致闸门结构产生振动的主要振源。

泄洪闸孔口尺寸很大、水头较高,工作闸门上下游水位变幅大,上游进口漩涡可能会对闸门结构产生不利动力作用,以及下游水跃对弧形闸门支臂、面板等局部结构和整体结构的冲击作用,以及由此导致的结构强烈振动问题。同时,该闸门的设计泄水流量较大,有局部开启控泄要求,门后水位变幅大,闸下出流经历深度淹没出流、淹没出流、临界出流(临门水跃)、自由出流(远驱式水跃)等,因此闸门结构承受水动力荷载变化复杂多变,流态复杂。试验主要测试闸门时均动水压力荷载和由于上游水流脉动和下泄水流的强烈紊动及水封漏水而引起的压力脉动荷载。从试验的角度验证闸门在水压力作用下动力安全问题,确保闸门结构安全运行。

闸门结构脉动压力试验结果表明,闸门启闭过程中作用于门体上的水流脉动压力随闸门开度变化而变化,闸门底缘部位测点由于受到闸下高速水流影响,其脉动压力相对较大;闸门上部测点脉动压力

所受扰动小而逐渐降低。各运行工况闸门上游面板最大脉动压力均方根值随高程提高而递减(6.36 kPa~3.15 kPa)。工作门门体脉动压力的主能量分布在 5 Hz 范围,优势频率主要集中在 1.0 Hz 以内,较高频率的脉动能量已迅速衰减。

闸后由于水流翻滚在反弧中部脉动压力达到最大值,该处脉动压力最大值在 28.67 kPa~61.42 kPa 范围变化;闸墩侧壁脉动压力最大值发生在挑坎前反弧中部位置,为 37.34 kPa。

泄洪闸闸室段水流脉动压力的谱密度主要能量集中在 2 Hz 以内,优势频率在 0.2 Hz 左右。

1.3 弧形工作闸门脉动压强系数

弧形闸门运行过程中,上游面板及门后梁格部位的脉动压力随闸门开度和下游水深、流态的变化而变化,尤其当门后形成临门水跃时脉动压力将达到最大值,形成水动力荷载冲击,从而危及闸门结构的运行安全。

根据水流脉动压力测量结果,按照各态历经平稳随机过程脉动压力最大值出现几率 99.7% 情况下,可用 3 倍脉动均方根值进行估计^[6]:

$$P_{\max 99.7\%} = 3 \sqrt{p^2} \quad (3)$$

定义 C_1 为脉动压强系数:

$$C_1 = \sqrt{p^2} / \left(\frac{1}{2} \rho u^2 \right) \quad (4)$$

$$\text{则: } \sqrt{p^2} \approx C_1 \left(\frac{1}{2} \rho u^2 \right) \quad (5)$$

式中: $\sqrt{p^2}$ 为水流脉动均方根值; u 为来流平均流速。

根据试验结果,利用式(3)—式(5)可得闸室底板反弧处水流脉动压强系数 $C_1 = 0.18$, 闸门体最大水流脉动压强系数一般小于 $C_1 = 0.1$; 但若门后出现临门水跃时,水跃荷载对闸门结构的冲击作用表现为水跃跃头对闸门结构的冲击,这种冲击现象可能是不稳定的。此时的荷载系数不仅与闸下流速有关,更与下游水位直接相关。因此闸门结构动力荷载设计取值时需考虑该方面的因素。

2 闸门结构的动力特性及其优化

闸门结构运行过程中出现强烈振动的根本原因往往在于水流脉动压力荷载的高能频率区激发闸门结构的低阶固有频率,引发结构共振或强振现象。因此避免结构产生危害性振动的首要措施就是改变作用于闸门结构水动力荷载的频域特性和作用力量级,此外就是调整闸门的固有振动特性,使之有效避

免共振和强烈振动问题的发生^[7]。

2.1 闸门结构的静力特性

弧形闸门有限元模型共建立体元 335 个;单元划分尺寸为 0.1 m;离散单元采用 solid185 单元,闸门共离散 1 818 614 个单元,597 672 个节点。闸门建模的体积为 57.799 m³,质量 427 t。将原点设在面板底缘中点时,重心位置坐标为 $X:3.18$ m, $Y:13.18$ m, $Z:0$ m。

在校核洪水位工况下,弧形工作闸门设计水头为 25 m,考虑波浪压力,增加 0.5 m 水头,为 25.5 m,闸门门体受到自重荷载。

(1) 位移计算

闸门结构的最大位移约为 103 mm,发生启闭杆中部,主要由闸门自重引起;隐去启闭杆后闸门最大位移为 48 mm,发生在面板底缘角点,以刚体旋转为主。门叶下部变形约 48 mm,中部变形约 44 mm,上部变形约 40 mm。下主梁径向位移 10 mm 左右,中主梁径向位移 9 mm~11 mm,上主梁径向位移 8 mm~9 mm。

(2) 应力计算

最大应力 288 MPa,发生在中支臂与抗剪板部位,该应力为挤压产生的局部应力集中交界处;二级应力为 181 MPa,发生在 7#次横纵翼缘与中部主横梁翼缘交界处,该应力为挤压产生的局部应力集中。挡水面板总体应力在 50 MPa 以下。支臂结构的应力为 50 MPa~80 MPa 左右。支铰结构的局部最大应力为 171 MPa。下主梁应力在 80 MPa 以下,中主梁应力在 70 MPa 以下,上主梁应力在 50 MPa 以下。

2.2 闸门结构的动力特性

在闸门仅支铰约束、考虑流固耦合条件下闸门横向弯曲变形频率为 0.91 Hz;闸门整体切向旋转变形频率为 1.477 Hz;支臂第一阶弯曲振型的频率为 7.91 Hz^[8-9]。图 1 绘出了闸门结构低阶模态振型图。

2.3 闸门结构的优化设计

从总体上看,闸门结构基频偏低,一阶横向振动频率仅 0.91 Hz,水流脉动压力高能区优势频率也接近 1.0 Hz,容易落入水流动力作用荷载的高能区,因此需要进行结构抗振优化,以提高闸门结构的抗振能力^[10-11]。

优化方案将支铰加厚至 150 mm,面板厚度调整到 20 mm,并于将支臂宽度增加 10%,以提高其抗弯刚度。这样闸门流固耦合条件下闸门整体侧移振型频率为 1.955 Hz,较原方案提高了 117%,固有频

率增加一倍以上;支臂第一阶弯曲振型的频率为 10.667 Hz,较原方案提高了 34.9%。在启门工况下,最大应力 212 MPa,发生在 7#次横纵翼缘与中部主横梁翼缘交界处的翼缘板上,该应力为挤压产生的局部应力集中;二级应力为 185 MPa,发生在支铰。三级应力为 153 MPa,发生在中部主横梁翼缘

与 7#次横纵翼缘交界处的翼缘上,该应力为挤压产生的局部应力集中;下主梁径向位移 9 mm 左右,中主梁径向位移 10 mm 左右,上主梁径向位移 8 mm 左右。下主梁应力在 95 MPa 以下,中主梁应力在 60 MPa 以下,上主梁应力在 40 MPa 以下。控振优化效果明显。

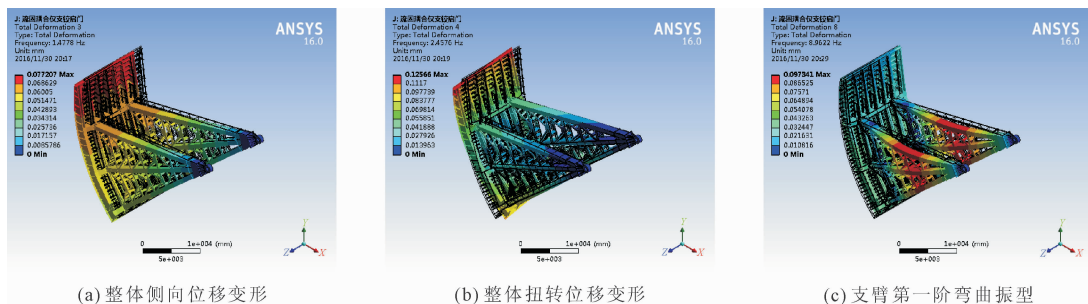


图 1 闸门结构低阶模态振型图

3 闸门结构的流激振动特性

从本质上讲,闸门流激振动属于水弹性振动范畴。闸门结构在动水作用下的运行符合如下动力方程:

$$(-\omega^2[M] + j\omega[C] + [K])\{\delta\} = \{F(\omega)\} \quad (6)$$

根据结构运动方程,闸门的水弹性模型应当同时满足几何尺寸,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),经推导如下参数的比尺要求为:几何比尺: L_r ;质量密度比尺: $\rho_r = 1$;弹性模量比尺: $E_r = 1$;泊松比比尺: $\mu_r = 1$;阻尼比尺: $C_r = L^{2.5}$ 。冲砂泄洪闸工作闸门采用弧形钢闸门,其基本物理力学指标为:容重 $7.85 \times 10^4 \text{ N/m}^3$ 、弹性模量 $2.10 \times 10^5 \text{ MPa}$ 、泊松比 0.3。水弹性振动模型几何比尺 $L_r = 25$,按水弹性相似原理,闸门模型材料的物理力学指标应为:容重 $7.85 \times 10^4 \text{ N/m}^3$ 、弹性模量 $0.84 \times 10^4 \text{ MPa}$ 、泊松比 0.3。目前市场上没有同时满足上述参数的型材,因此需进行专门研制。该材料运用重金属粉、高分子材料等进行多组分特种材料研制,并运用专用模具特制所需的型材。测试结果表明:选用的水弹性材料基本达到材料密度 $\rho_m = \rho_p$,结构弹性模量 $E_r = L_r$ 的要求。

3.1 闸门结构振动加速度特征

为获取工作闸门运行过程中的流激振动特性,在特制的水弹性闸门模型上布置了 4 个振动测点,每个测点分别测取闸门径向(ρ 向),切向(θ 向)及

横向(z 向)三个方向的振动量。结构振动数据采用随机振动理论及其谱分析方法进行,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。

试验结果显示,各运行工况闸门结构三个方向的振动量级相互交织,但基本存在 $V_\rho > V_z > V_\theta$ 变化关系,且在中小开度以下当闸后呈现淹没及临界出流时振动量级表现出显著增加的趋势。不同方向闸门结构振动加速度最大均方根值分别为,顺水流向(ρ 向)为 0.55 m/s^2 、转角方向(θ 向)为 0.36 m/s^2 、横向(z 向)为 0.12 m/s^2 ;从频谱分析可以看出闸门振动频率主要集中在 $20 \text{ Hz} \sim 120 \text{ Hz}$ 以内,其中优势频率为 $40 \text{ Hz} \sim 80 \text{ Hz}$ 。

3.2 闸门结构振动应力特征

闸门振动应力测量结果表明,冲砂泄洪闸弧形工作闸门运行过程中闸门结构的动应力量值不仅受到上游工作水头的影响,而且与闸门开度、水封漏水射流以及下游水位密切相关。试验数据指出,闸门结构振动应力最大均方根值分别为上支臂 0.53 MPa、中支臂为 0.41 MPa、下支臂为 0.59 MPa、上主横梁为 0.18 MPa、中主横梁为 0.12 MPa、下主横梁为 1.11 MPa、边纵梁为 1.44 MPa、内部纵梁为 0.36 MPa、闸门面板为 1.11 MPa。

从频谱分析可以看出,闸门振动频率主要集中在 3 Hz 以内,其中优势频率主要为 0.98 Hz (见图 2)。从总体上看,闸门体整体的动应力值不大,满足安全运行要求^[12-13]。

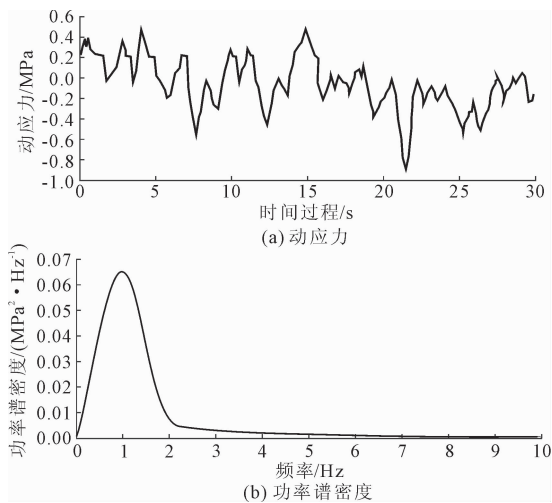


图2 工作闸门典型测点闸门动应力时域过程
($H_{\text{上}}=233 \text{ m}$ 、 $H_{\text{下}}=228.7 \text{ m}$ 、 $e=3.5 \text{ m}$)

4 弧形闸门支臂的动力稳定性分析

本泄洪冲沙闸弧形工作闸门孔口尺寸大,支臂长度达 30 m,工作闸门局部开启过程中,闸门面板上游将经受正向和下游反向动水压力的作用,鉴于闸门支臂作为柔长杆件,泄洪闸局部开启状态,在经历不利流态时闸门的支臂振动将进入动力不稳定区。产生闸门强烈振动和支臂动力失稳的主要原因由如下两种情况:(1)闸门底缘处产生临门水跃,在该水动力荷载作用下闸门产生冲击性振动;(2)当下游出现不稳定水跃冲击作用时,对闸门的门叶下部结构作周期性冲击激励。这种作用力往往表现为参数振动。由于泄洪冲沙闸闸门支臂较长,支臂动力稳定需要高度重视和关注。

从水动力作用状态分析,从闸门面板传来的时均动水压力和水流脉动压力的作用,闸门支臂结构主要运行工况均处于受压状态,存在动力稳定问题。闸门支臂的动力稳定性方程为:

$$EI \frac{\partial^4 v}{\partial x^4} + (p_0 + p_l \cos \theta t) \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + m \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} = 0 \quad (7)$$

式中: EI 为闸门支臂断面抗弯刚度; v 为支臂挠度函数; p_0 为作用于闸门支臂的轴向静荷载; p_l 为轴向随机荷载; m 为支臂单位长质量; θ 为外荷载激励频率。支臂挠度函数可用下式表示:

$$v(x, t) = f_x(t) \sin \frac{k\pi x}{l} \quad (k = 1, 2, \dots) \quad (8)$$

则式(7)可表示为:

$$\frac{d^2 f_k}{dt^2} + \omega_k^2 \left[1 - \frac{p_0 + p_l \cos \theta t}{p_{E(k)}} \right] f_k = 0 \quad (k = 1, 2, \dots) \quad (9)$$

式(9)可转变为如下 Mathiem 方程:

$$\frac{d^2 f}{dt^2} + \Omega^2 [1 - 2\mu \cos \theta t] f = 0 \quad (10)$$

式中: Ω_k 为支臂在上游轴向时均动水压力荷载 p_0 作用下的结构振动固有频率,表示为:

$$\Omega_k = \omega_k \sqrt{1 - \frac{p_0}{p_{E(k)}}} \quad (11)$$

$$\omega_k = \frac{k^2 \pi^2}{l^2} \sqrt{\frac{EI}{m}} \quad (12)$$

$$p_{E(k)} = \frac{k^2 \pi^2 EJ}{l^2} = k^2 p_E \quad (13)$$

$$p_E = \frac{\pi^2 EJ}{l^2} \quad (14)$$

$$\text{动力激发系数: } \mu_k = \frac{p_l}{2(p_{E(k)} - p_0)} \quad (15)$$

式(14)包含了水流作用荷载激励频率 θ ,结构支臂固有频率 Ω_k 及闸门支臂轴向作用力幅值量级等参数。求解上述 Mathiem 方程可取得闸门支臂结构三个动力不稳定区域的数学表达式:

第一不稳定区域:

$$\theta_1 = 2\Omega \sqrt{1 - \mu + \frac{\mu^2}{8 + 9\mu}}; \theta_1 = 2\Omega \sqrt{1 - \mu - \frac{\mu^2}{8 - 9\mu}} \quad (16)$$

第二不稳定区域:

$$\theta_2 = \Omega \sqrt{1 + \frac{1}{3}\mu^2}; \theta_2 = \Omega \sqrt{1 - 2\mu^2} \quad (17)$$

第三不稳定区域:

$$\theta_3 = \frac{2}{3}\Omega \sqrt{1 - \frac{9\mu^2}{6 + 9\mu}}; \theta_3 = \frac{2}{3}\Omega \sqrt{1 - \frac{9\mu^2}{8 - 9\mu}} \quad (18)$$

弧形闸门结构的自振频率 ω_k ,水流动水压力产生的闸门支臂轴向作用力 p_0 ,门后水跃旋滚和水流脉动压力荷载 $p(t)$ 的优势频率 θ ,以及轴向力作用引起的支臂轴向刚度变化的固有振动频率 Ω_k 等参数是闸门支臂产生动力不稳定的主要因素。通过对泄洪冲沙闸弧形工作闸门水流脉动压力、时均总压力、闸门结构的固有特性成果的综合分析,可以对闸门支臂结构的动力稳定安全性进行分析,典型闸门结构的水流脉动压力的主能量集中在 2 Hz 范围内。闸门支臂的弯曲振动频率在 10.0 Hz 以上(见图 3),因此闸门作局部开启运行时,水流动荷载高能区和闸门支臂频率比 $\frac{\theta}{2\Omega}$ 小于 0.1,动力激发系数亦小于 0.1,显然闸门支臂结构避开了动力不稳定区(见图 4),因此

泄洪闸泄流时支臂结构不会因动力失稳而出现强烈振动现象。但为避免闸室出现临门水跃或不稳定水跃对闸门结构的冲击作用,尽量避免闸门在上述流态状态下泄流操作。

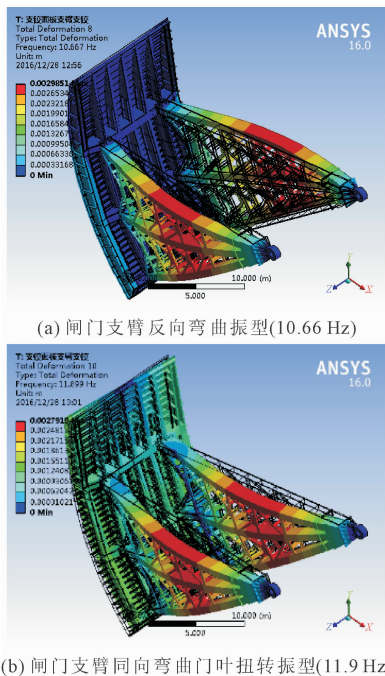


图3 闸门支臂弯曲振动型式

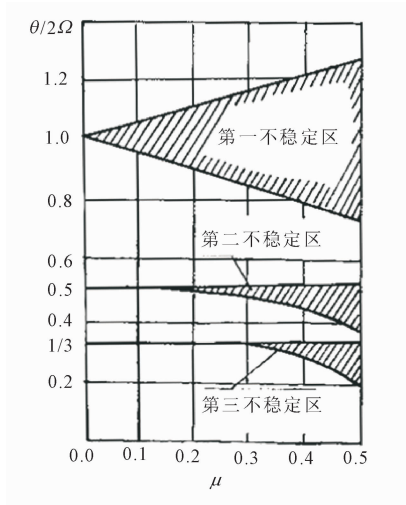


图4 动力稳定与不稳定区

5 结论

通过对大型泄洪冲沙闸的水动力荷载、结构动力特性、闸门结构流激振动状况的测量和研究,获得如下结论:

(1) 闸门结构脉动压力试验结果表明,闸门启闭过程中作用于门体上的水流脉动压力随闸门开度变化而变化,闸门底缘部位测点由于受到闸下高速

水流影响,其脉动压力相对较大;闸门上部测点脉动压力所受扰动小而逐渐降低。各运行工况闸门上游面板最大脉动压力均方根值随高程提高而递减(6.36 kPa~3.15 kPa)。工作门门体脉动压力的主能量分布在5 Hz范围,优势频率主要集中在1.0 Hz以内,较高频率的脉动能量已迅速衰减。

(2) 在闸门仅支铰约束、考虑流固耦合条件下闸门横向弯曲变形频率为0.91 Hz,整体切向旋转变形频率为1.477 Hz;支臂第一阶弯曲振型的频率为7.91 Hz。总体上看,闸门结构的振动基频较低,存在结构共振的危险,需要进行抗振优化修改设计。

(3) 优化方案的闸门流固耦合整体侧向位移振型频率为1.955 Hz,较原方案提高了117%,固有频率增加一倍以上;支臂第一阶弯曲振型的频率为10.667 Hz,较原方案提高了34.9%。在启门工况下,最大应力212 MPa,发生在7#次横纵翼缘与中部主横梁翼缘交界处的翼缘板上,该应力为挤压产生的局部应力集中;次高应力为185 MPa,发生在支铰部位,结构控振优化效果明显。

(4) 闸门流激振动响应试验结果显示,各运行工况闸门结构三个方向的振动量级相互交织,但基本存在 $V_p > V_z > V_\theta$ 变化关系,且在中小开度以下当闸后呈现淹没及临界出流时振动量级表现出显著增加的趋势。不同方向闸门结构振动加速度最大均方根值分别为,顺水流向(ρ 向)为0.55 m/s²、转角方向(θ 向)为0.36 m/s²、横向(Z 向)为0.12 m/s²;从频谱分析可以看出闸门振动频率主要集中在20 Hz~120 Hz以内,其中优势频率为40 Hz~80 Hz。

(5) 闸门振动应力测量结果表明,冲沙泄洪闸弧形工作闸门运行过程中闸门结构的动应力量值不仅受到上游工作水头的影响,而且与闸门开度、水封漏水射流以及下游水位密切相关。试验数据指出,闸门结构振动应力最大均方根值2.0 MPa。从频谱分析可以看出,闸门振动频率主要集中在3 Hz以内,其中优势频率主要为0.98 Hz。从总体上看,闸门结构整体动应力值不大,满足动强度要求^[14]。因此闸门结构的动应力不是动力安全的控制因素。

(6) 泄洪闸泄流时弧形闸门支臂结构动力稳定性分析结果显示,不会因动力失稳而出现强烈振动现象。但为避免闸室出现临门水跃或不稳定水跃对闸门结构的冲击作用,尽量避免闸门在上述流态状态下泄流操作,以确保闸门结构的长期安全运行。

(下转第40页)

- 44.
- [9] 朱自强,郭有军,刘涛影. 地质雷达超前地质预报正演模拟及应用研究[J]. 铁道科学与工程学报,2018,15(1):148-155.
- [10] 肖建平,吴旭东,柳建新,等. 探地雷达隧道衬砌病害检测正演模拟及应用[J]. 物探化探计算技术,2017,39(4):425-429.
- [11] 申耀伟,尤哲敏. 高铁运营隧道衬砌质量地质雷达检测技术[J]. 铁道建筑,2012(12):57-60.
- [12] 孙忠辉,刘金坤,张新平,等. 基于 GprMax 的隧道衬砌地质雷达检测正演模拟与实测数据分析[J]. 工程地球物理学报,2013,10(5):112-118.
- [13] 成杏梅,胡文宝,肖柏勋,等. 层状介质探地雷达响应正演的积分方程算法[J]. 江汉石油学院学报,2003(1):41-43,6.
- [14] 吴丰收,曾昭发,黄玲,等. 探地雷达信号的高阶时间域有限差分模拟[J]. 物探化探计算技术,2009,31(4):308-313,287-288.
- [15] 方宏远. 基于辛算法的层状结构探地雷达检测正演研究[D]. 大连:大连理工大学,2012.
- [16] 赵晓博. 地质雷达在隧道衬砌质量检测中的应用[J]. 工程地球物理学报,2013,10(1):107-110.
- [17] 蒋建国,刘程,陈媛,等. 地质雷达正演模拟及在断层富水带超前地质预报的应用研究[J]. 铁道科学与工程学报,2019,16(11):2801-2808.
- [18] 杨峰,彭苏萍,刘杰,等. 衬砌脱空雷达波数值模拟与定量解释[J]. 铁道学报,2008,30(5):92-96.
- [19] 王石磊,高岩,齐法琳,等. 铁路运营隧道检测技术综述[J]. 交通运输工程学报,2020,20(5):41-57.
- [20] 李尧,李术才,徐磊,等. 隧道衬砌病害地质雷达探测正演模拟与应用[J]. 岩土力学,2016,37(12):3627-3634.
- [21] 刘新荣,舒志乐,朱成红,等. 隧道衬砌空洞探地雷达三维探测正演研究[J]. 岩石力学与工程学报,2010,29(11):2221-2229.
- [22] 赵常要,殷殿英,窦顺,等. 探地雷达在隧道检测中里程偏差修正方法探讨[J]. 现代隧道技术,2011,48(6):79-81.
- [23] 赵常要,窦顺,赵守全. 探地雷达层厚度值提取技术研究[J]. 地球物理学进展,2018,33(1):441-444.

(上接第 6 页)

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [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] 严根华. 大坝泄水闸门结构流激振动监测及强烈振动控制技术研究[J]. 大坝与安全,2016(3):44-54.
- [6] Yan Genhua. 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.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 黄红,高振海,严根华,等. 大型上翻式拱形钢闸门流固耦合静动力特性研究[J]. 固体力学学报,2011,32(S1):376-381.
- [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] 闸门水力模型试验规程:SL159—2012[S]. 北京:中国水利电力出版社,2012.
- [13] Kolrman P A. Flow-induced gate vibration, water-loop-kunding laboratorium[J]. Delft Hydraulics Laboratory, 1976,164.
- [14] 水利水电工程钢闸门设计规范:SL 74—2019[S]. 北京:中国水利电力出版社,2020.