

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2023.02.003

大型液压启闭下卧式弧形闸门流激振动及抗振优化研究

张亮¹, 徐强², 严根华^{3,4}, 董家^{3,4}

(1. 南昌市交通投资集团有限公司, 江西 南昌 330009; 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: 大型液压启闭弧形下卧门系特种门型, 其水力结构特征有其特殊性。因泄水闸泄流的弗氏数普遍较低, 下泄水流流态和对门体的作用力复杂, 且闸门面板采用全包结构, 存在较大的浮动力, 容易引起结构的动力失稳。针对下卧门结构构造及运行特点, 通过水动力荷载模型, 研究测试不同运行工况下作用于闸门结构各部位的水流脉动压力荷载, 获得脉动压力的数字特征及谱特征; 通过水弹性振动模型, 揭示了闸门发生强烈振动的原因; 通过三维有限元空间数值模型, 研究闸门的静动力特性, 取得闸门的应力位移分布及闸门结构的流固耦合振动特性, 为结构的共振分析提供科学判据。通过对闸门结构水力结构特征成果的综合分析, 提出解决闸门强烈振动的抗振优化布置方案, 确保工程运行安全。

关键词: 大型液压启闭弧形下卧门; 水动力荷载; 结构流激振动; 三维有限元数值分析; 结构抗振优化

中图分类号: TV663⁺.2

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2023)02-0013-07

Large Hydraulic Radial Gate Flow-induced Vibration and Anti-Vibration Optimization

ZHANG Liang¹, XU Qiang², YAN Genhua^{3,4}, DONG Jia^{3,4}

(1. Nanchang Transportation Investment Group Co., Ltd., Nanchang, Jiangxi 330009, China;
2. China Railway Water Resources and Hydropower Planning and Design Group, Nanchang, Jiangxi 330029, China;
3. Nanjing Hydraulic Research Institute, Ministry of Water Resources, Ministry of Transport, National Energy Administration, Nanjing, Jiangsu 210029, China;
4. State Key Laboratory of Hydrology-water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing, Jiangsu 210029, China)

Abstract: Large hydraulic opening and closing arc under the gate is a special gate type, its hydraulic structure characteristics have their own special characteristics. Because of the general low Fourier number of the drainage gate, the flow pattern of the drainage water and the force on the gate body is complex, and the gate panel adopts the whole package structure, there is a large buoyancy force which is easy to cause the dynamic instability of the structure. The hydrodynamic load model was used to analyze and test the pulsating pressure load of water flowing on various parts of the gate structure under different operating conditions and to obtain the numerical and spectral characteristics of the pulsating pressure. The hydro-elastic vibration model was used to reveal the causes of strong vibration of the gate. The 3D finite element spatial numerical model was used to determine the hydrostatic characteristics of the gate structure and to obtain the stress displacement distribution of the gate structure and the fluid-solid coupling vibration characteristics of the gate structure to provide scientific criteria for the resonance analysis of the structure. Through the comprehensive analysis of the results of the hydraulic structure characteristics of the gate structure, the optimized arrangement plans of vibration resistance to solve the strong vibration of the gate were proposed to ensure the safety of the project operation.

Keywords: large hydraulic opening and closing curved lower lying door; hydrodynamic load; structural flow excitation vibration; three-dimensional finite element numerical analysis; structural anti-vibration optimization

收稿日期: 2022-10-03

修稿日期: 2022-11-20

作者简介: 张亮(1985—), 男, 高级工程师, 主要从事水利及交通工程研究工作。E-mail: 343514941@qq.com

通讯作者: 严根华(1956—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事水工结构流激振动及抗振优化设计工作。E-mail: ghyan@nhri.cn

赣抚下游尾间综合整治工程主支枢纽泄水闸工作闸门由 2 扇 75 m 超大跨度平转式浮箱闸门和 15 扇 30 m 宽下卧式弧形闸门组成。其中一区及三区泄水闸采用大型液压启闭下卧式弧形闸门, 体型布置见图 1。闸门运行方式为动水启闭, 通常需向上提 0.5 m 小开度门底过水冲砂, 再下沉至与底板齐

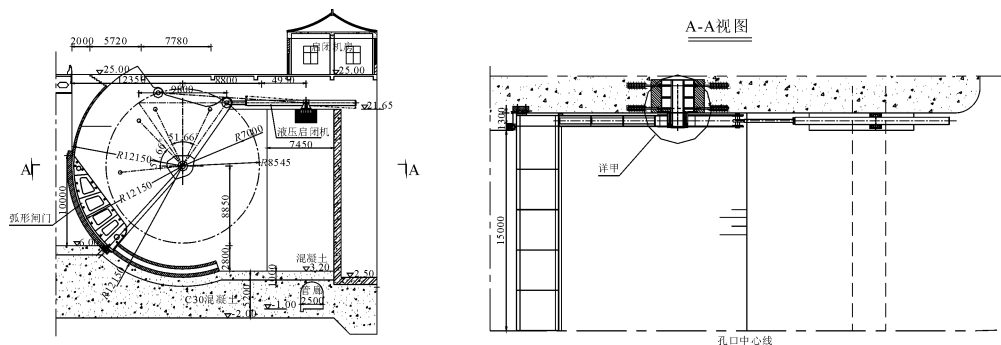


图 1 大型液压启闭下卧式弧形泄水闸闸室布置

本项研究通过物理模型和数学模型相结合的方法进行。通过 1:25 水动力模型研究下卧门及其邻近区域的水力特征, 取得门体及闸室流态、作用于门体与闸室边界的时均动水压力分布及脉动压力统计特征; 应用三维空间有限元数值分析方法, 研究分析下卧门结构的静动力特性, 取得闸门结构的位移和应力分布特征, 揭示闸门结构流固耦合振动频率和相应振型, 为结构共振分析提供判断依据^[2]; 通过专门特制的闸门支铰作用力测量装置, 测试研究不同运行工况下闸门结构的支铰作用力特征; 通过 1:25 当量相似水弹性模型^[3], 全面研究闸门结构在水流作用下的流激振动响应参数, 取得振动参数的能量谱密度等, 判断闸门结构不同开度振动程度及其危害性, 并对门体结构存在问题进行修改优化, 提出闸门抗振优化措施^[4], 为闸门结构的安全运行提供可靠保障条件。

1 下卧门水力特性试验研究

下卧门水力特性直接影响到闸门结构的运行平稳性, 因此本项研究重点对泄流状态下的闸室水流流态, 水流边界的时均动水压力和脉动压力变化过程进行仔细研究, 以便对闸门振动的安全性提供基本评估依据。

1.1 泄水闸泄流流态

该型下卧门通常需上提 0.5 m 进行小开度门底过水冲砂, 再下沉至与底板齐平敞泄, 同时还要满足不同开度的局部开启泄洪。在此过程中, 既有门底

平敞泄, 同时还要满足不同开度的局部开启泄洪。闸门全关时采用支铰及锁定装置支承。在此过程中, 既有门底过水又有门顶、门底同时过水状态, 水流流态非常复杂, 因此通过水力学模型试验研究不同开度和水位情况下的闸门流激振动安全和动力稳定问题是十分必要的^[1]。

过水又有门顶、门底同时过水状态, 水流流态非常复杂。

根据闸门局部开启要求, 泄水闸上游最高调控水位 15.5 m, 下游水位 7.27 m ~ 14.50 m。闸门不同运行工况下的水流流态见图 2。在闸门局部开启、门顶过流的情况下, 闸门门后水流一般经历淹没、临界和自由出流状态, 部分泄流工况呈现出临门水跃冲击闸门底缘流态; 门顶溢流水舌, 根据闸门开度、上下游水位, 在闸门下游面板气水界面也经历无水封闭空腔、有水封闭空腔以及无空腔泄流形态; 下泄水流受下游启闭机突出闸墩的影响, 下泄水流冲击闸墩而在门体下游形成对称的回旋水流。

当上游水位 15.50 m (上游最高调控水位)、闸门上提 0.5 m 进行底部过流冲砂时, 闸下出流流速高、水舌薄, 满足底部冲砂要求。

1.2 泄水闸水流脉动压力荷载特征

泄水闸下卧门在运行时将经历各种水流流态演变过程的水流动力作用^[5-7]。下泄水流的动力作用荷载对闸室边界、下卧门门体上游面、下游面、底缘、闸门支臂各部位的动力作用反映了下泄水流的紊动特性。因此, 本项研究分别测量了泄水闸各部位的水流脉动压力作用特性 (测点布置见图 3), 分别考查闸室旋流对结构各部位的动力作用。

门体时均压力测试数据表明, 水流流态经历自由出流、临门水跃及淹没出流等不同流态, 下游水位越高、下游淹没度就越高, 作用于门体的时均压力随淹没水深的增加而加大; 闸门开度越小, 下泄流量越

小,作用于门体时均压力就越小。作用于下卧门体时均压力值在 8.25 kPa~54.18 kPa。

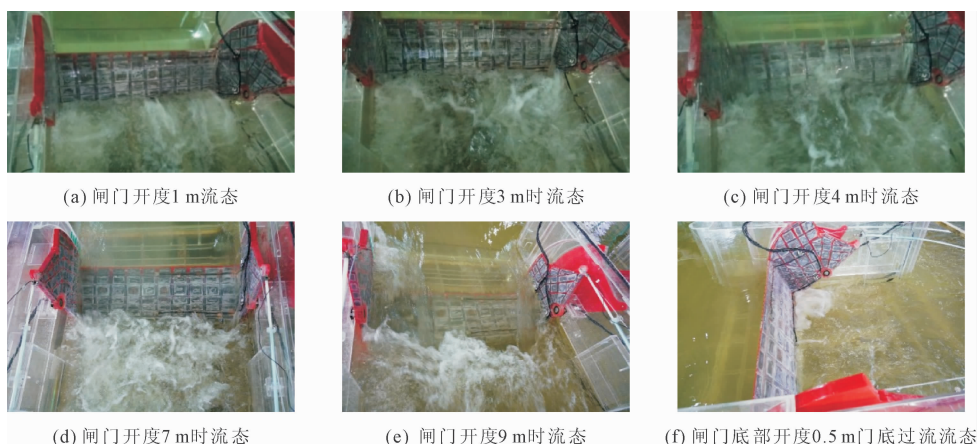


图 2 上游水位 15.5 m、下游水位 7.25 m~14.50 m、闸门不同开度门顶与门底过流流态

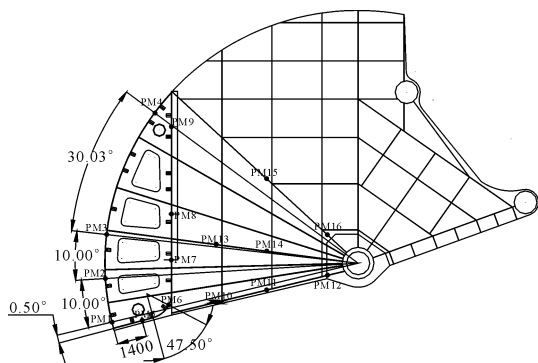


图 3 闸门门体脉动压力测点布置

闸门门体脉动压力测点用于测量不同水位及开度组合条件下闸室区域水流的脉动压力荷载特征,不同上下游水位、不同开度以及闸门门后不同水跃形态条件下闸门门体各测点脉动压力荷载特征值,包括最大值、最小值以及均方根值。试验数据显示:闸门门体脉动压力较大的区域发生在闸门底缘附近,脉动压力最大值出现在 PM1、PM2 及 PM5 测点,最大均方根值分别是 9.16 kPa、5.28 kPa 和 8.59 kPa,发生在临门水跃状态。下卧弧门运行过程中,脉动压力较大的部位基本在闸门底缘附近,这种情况下水动力荷载对闸门结构的影响将会非常明显,这也是闸门在局部开启过程中出现弱共振的主要原因。

从水流脉动压力的功率谱密度考查,随着上下游水位的变化,水流脉动压力的能量分布出现一定程度的变化。在上游水位 15.5 m 左右时,水动力荷载的主频基本在 1 Hz 以内,而上游水位在 14.35 m 左右时,水动力荷载的主频基本在 6 Hz 附近,约 5.0 Hz~6.5 Hz 范围内,而闸门 1 阶和 2 阶频率分别为

4.7 Hz、7.2 Hz,这与试验测量到闸门在上游水位 14.17 m 左右、局部开启 4 m、5 m 存在弱共振问题的结论具有很强的一致性。

泄水闸下卧门闸室边界及门体的动水压力测试成果指出:闸室时均压力测试数据显示:在闸门不同运行工况下,闸室底板的压力分布在 4.70 kPa~11.38 kPa 范围内波动;闸室侧墙的时均压力在 1.50 kPa~10.07 kPa 范围内变化,总体上看,诸时均压力测点均出现正值,未见负压存在。

闸墩底板脉动压力较大的区域发生在下卧门对应的闸墩下卧弧段及下游一段区域,脉动压力最大值出现在下卧弧段 P3、P4 测点,最大脉动均方根值分别是 13.55 kPa 和 14.85 kPa,发生在临门水跃状态。下卧门运行过程中,脉动压力较大的部位基本在闸门附近,这种情况下水动力荷载对闸门的影响将会非常明显,这也从水动力荷载方面印证了闸门弱共振现象的测量数据资料的一致性。

侧墙脉动压力较大的区域发生闸墩底板下卧弧段末端对应的部位;闸门运行工况下最大的脉动压力均方根值 5.14 kPa;上游水位越大,在相同的下游水跃状态下,侧墙脉动压力均方根值一般越大;另外,闸下水跃状态在淹没状态下侧墙的脉动压力均方根值较大(淹没程度不是很大)。从水流脉动压力的功率谱密度考查,脉动压力的主能量主要集中在 0 Hz~2.5 Hz 范围,说明水流脉动压力具有低频特征。

2 闸门结构静动力特性三维有限元分析

2.1 有限元模型的建立

针对工作闸门进行了三维有限元静动力分析:

静力分析研究闸门在各水位静水头作用下的应力和位移特性;动力特性分析研究闸门整体在自由状态、约束状态下,闸门整体、主梁及支臂的自振频率及对应的振型特征;流固耦合模态分析^[7-8]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。泄水闸下卧式工作闸门三维有限元模型包括三维几何模型和三维有限元模型,不同视角下结构模型见图 4。

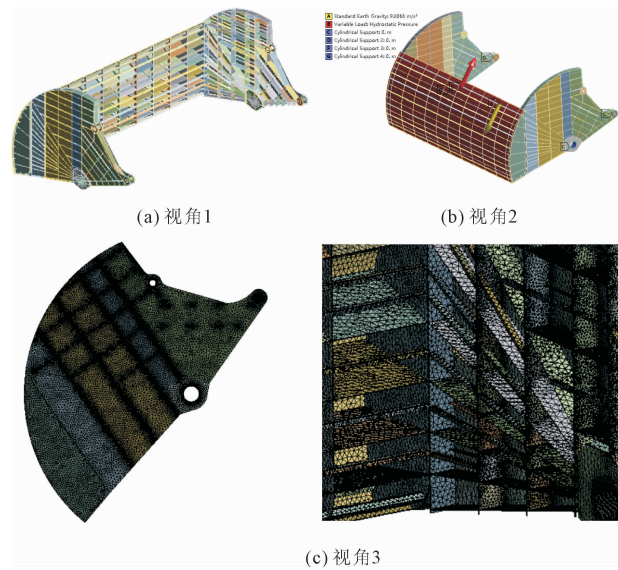


图 4 不同视角下工作闸门三维几何模型

建立的有限元模型基本信息为:共建立体 579 个;单元划分尺寸为 0.05 m~0.20 m;离散单元采用 solid185 单元,对局部部件采用局部网格加密,对

闸门共离散 148.7 万个单元,45.4 万个节点。闸门建模的体积为 58.12 m³,质量 456.2 t。将原点设在面板底缘中点时,闸门门体(不包括支座)中心位置: $X=0.5$ m, $Y=7.677$ m, $Z=0$ m。

2.2 闸门结构的动力特性

闸门固定铰部位及吊耳处保留旋转自由度。前 10 阶模态分析结果如表 1 所示,闸门变形的一阶频率为 4.773 Hz,为闸门支臂弯曲振型;闸门二阶频率为 7.41 Hz,为闸门整体旋转振型;闸门支臂弯曲变形频率为 4.773 Hz。闸门前 6 阶低阶模态振型见图 5。

表 1 闸门约束状态模态频率及振型

阶次	频率/Hz	振型形式
1	4.7730	支臂同向弯曲振型
2	7.4168	门体对固定铰的旋转
3	9.0261	门体对固定铰的弯曲
4	10.5900	支臂对固定铰一阶同向扭转
5	11.0190	支臂对固定铰一阶对向扭转
6	12.5380	支臂与门体沿门体中部一阶扭转
7	22.0130	门体上部和下部沿中部扭转
8	27.5610	门体二阶弯曲
9	29.6120	支臂与门体联合的二阶扭转
10	32.9300	支臂的二阶扭转

2.3 闸门结构流固耦合模态特性

闸门几何模型及约束状态如图 6 所示,各为不同视角下结构模型图。闸门挡水高度为 9.5 m,建模时,门前水体长度取闸门高度的 3 倍,即 28.5 m。

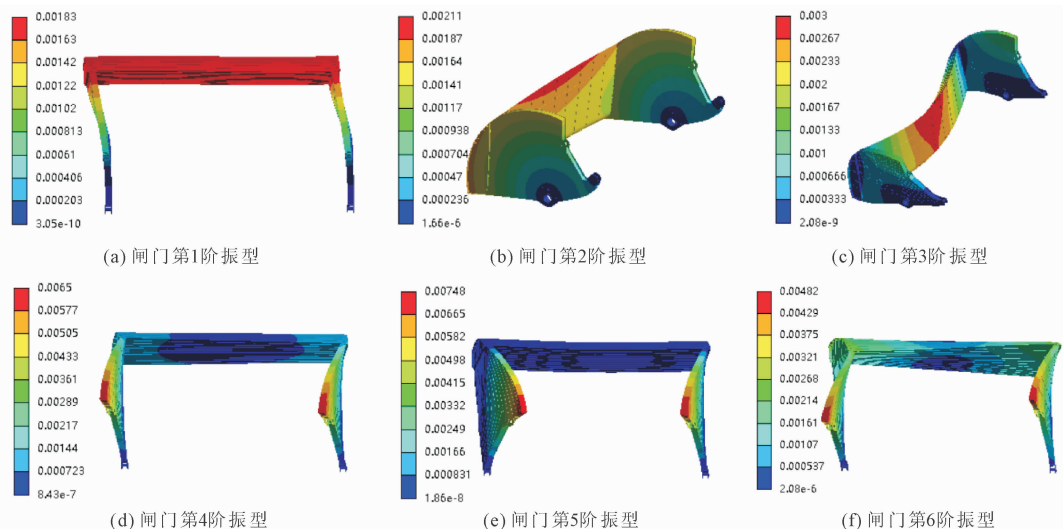


图 5 闸门约束状态各阶振型

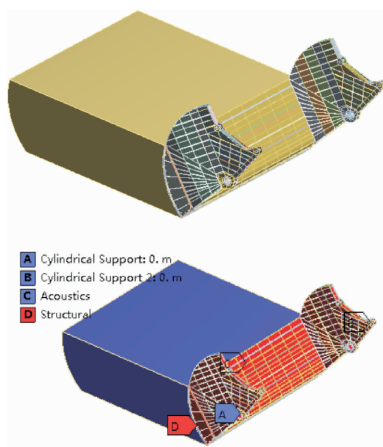


图 6 闸门流固耦合模型与约束状态

在闸门固定铰和吊耳约束条件下,前二阶振型反映流固耦合状态下的水体形态,对结构固有频率

未产生影响;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;分析结果见表 2,具体振型见图 7。

表 2 闸门约束状态流固耦合模态频率及振型

阶次	频率/Hz	振型形式
3	4.7377	门体对固定铰的侧向变形
4	7.2525	门体二阶弯曲
5	7.3998	门体对固定铰的旋转
6	7.9577	门体上部和下部沿中部扭转
7	10.9900	支臂对固定铰一阶同向扭转
8	11.3930	支臂对固定铰一阶对向扭转
9	11.4830	门体对支臂的弯曲
10	12.7970	支臂与门体沿门体中部一阶扭转

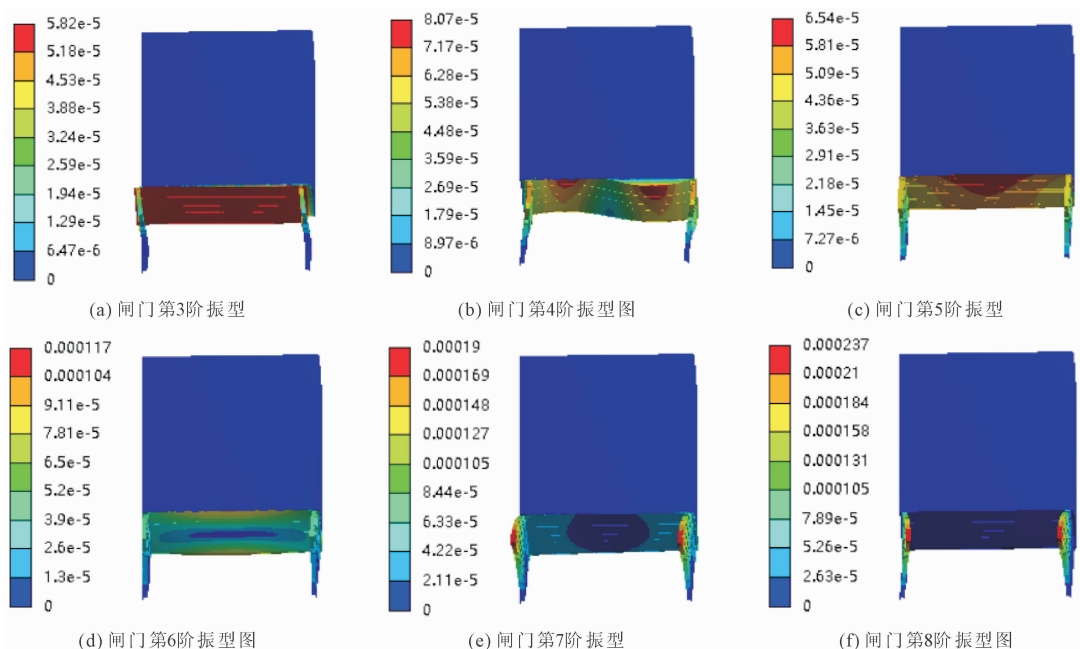


图 7 闸门流固耦合及约束状态各阶振型

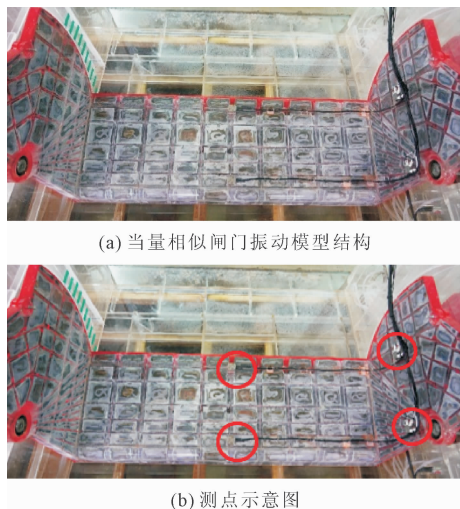
图 7 闸门结构三维有限元计算结果显示:自由模态下,闸门的 1—6 阶频率表现为刚体位移,7 阶频率为 3.270 Hz,为闸门支臂对向弯曲振型;闸门 8 阶频率为 4.540 Hz,为闸门支臂同向弯曲振型;固定铰和吊耳约束条件下,闸门变形的 1 阶频率为 4.773 Hz,为闸门支臂弯曲振型;闸门 2 阶频率为 7.410 Hz,为闸门整体旋转振型;闸门支臂弯曲变形频率为 4.773 Hz;固定铰和吊耳约束条件下流固耦合振动基频为 4.730 Hz,表现为闸门整体侧向变形;2 阶频率为 7.250 Hz,为闸门整体二阶弯曲变形;支臂第一阶弯曲振型的频率为 10.990 Hz。

3 下卧门结构的流激振动特性

闸门结构在动水作用下发生流激振动现象,这是泄水过程中下泄水流高度紊动形成的水动力脉动荷载对闸门结构产生动荷载响应的结果。为正确反演和预测下卧门的泄水振动性态,采用 1:25 闸门水弹性振动模型进行试验研究(见图 8)。

根据闸门局部开启的要求,模型试验在上游水位 15.50 m,下游控制水位 9.5 m~13.5 m,闸门开度分别为:1 m、2 m、3 m、4 m、5 m、6 m、7 m、8 m、9 m 及全开情况下进行。试验测试结果指出,下卧门在各运行工况下作局部开启泄流时闸门结构三个方向

的振动量级相互交织,在小开度 $e = 1 \text{ m} \sim 4 \text{ m}$ 时,门体底部振动加速度均方根值在 0.1 m/s^2 以内;在 $e = 5 \text{ m}$ 时,振动加速度增大到 0.17 m/s^2 ,随后随开度增大,振动加速度均方根值减小;门体顶部振动加速度均方根值较大,横向最大值达到 0.42 m/s^2 ,切向和径向最大值分别为 0.124 m/s^2 和 0.28 m/s^2 。支臂振动加速度均方根值最大值控制在 0.3 m/s^2 以内。



(a) 当量相似闸门振动模型结构

(b) 测点示意图

图 8 闸门水弹性振动模型

闸门振动数据显示,在部分开度范围内($e = 2 \text{ m} \sim 6 \text{ m}$),闸门下游水位在 $9.5 \text{ m} \sim 13.5 \text{ m}$ 之间,闸门存在弱共振现象。在小开度 $e = 1 \text{ m}$ 时,主频在 $8 \text{ Hz} \sim 11 \text{ Hz}$,而在开度 $e = 2 \text{ m} \sim 6 \text{ m}$ 时,主频大多在 $4.0 \text{ Hz} \sim 7.5 \text{ Hz}$,而大开度 $e = 8 \text{ m}$ 时,主频大多在 7.5 Hz 附近。当闸门底部和顶部同时过水时,主频大多在 $12 \text{ Hz} \sim 15 \text{ Hz}$ 。

试验过程发现,在闸门局部开启 4 m 、上游水位 14.17 m 、下游水位 $7.5 \text{ m} \sim 10.6 \text{ m}$,闸门出现不同程度的共振,尤其在下游水位 8.62 m 时;共振的主频 5.859 Hz ;共振时门体底部测点和上部测点的三向(z, θ, ρ)振动加速度均方根值分别为 $0.109, 0.390, 0.403 \text{ m/s}^2$ 和 $0.650, 0.399, 0.582 \text{ m/s}^2$,明显大于弱共振时的数据。在闸门局开 5 m 、上游水位 13.5 m 、下游水位 9.25 m ,闸门出现了较为强烈的共振;在闸门局开 3 m 以及 $6 \text{ m} \sim 9 \text{ m}$ 范围,局部开启 3 m 和 6 m 出现弱共振现象。从总体上看,下卧门原布置方案出现较大范围的强振现象。

从试验的过程来看,闸门出现强烈共振与上游水位(或闸门门顶水头)、下游水位以及闸门开度(决定闸门底梁的空间位置)密切相关:闸门门顶水

流经闸门下游面板进入下游消力池,在脱离闸门时受下游水位影响,出流水舌不稳定而在闸门尾部形成周期性的漩涡体(见图 9);闸门受浮力作用,极易受外界荷载的影响,闸门尾部周期性的漩涡体引起闸门强振。

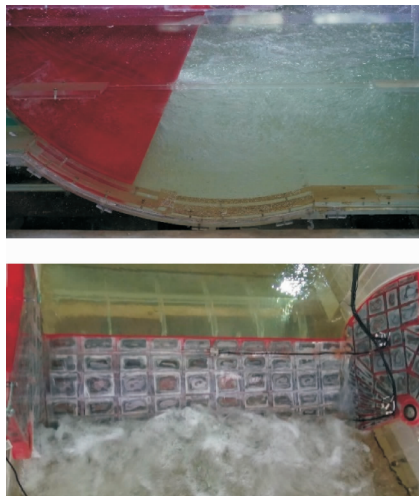


图 9 闸门强振时底部漩涡及门后水流形态

4 闸门结构动态优化设计

4.1 抗振优化修改方向

根据下卧门原布置方案存在浮动力过大,引发闸门结构强烈振动问题,以及下卧门在 $e = 2 \text{ m} \sim 6 \text{ m}$ 范围内,闸门出现弱共振现象,修改布置方案着重对原布置闸门进行了如下几方面的修改优化(见图 10—图 12)^[8-11]:(1)在闸门底缘部位沿宽度方向开设通水孔,减少浮动力,确保下部横梁隔仓充水;(2)在对应面板通水孔的闸门支臂两侧布置通(排)气孔;(3)保持闸门外弧线尺寸不变,将接近 90° 的宽厚型底缘型式调整为 30° 倾角的底缘形式;(4)闸门门铰支承墩设置 $1:2, 1:3$ 斜面贴角及 $1:3$ 椭圆型贴角进行边界过渡。

4.2 下卧门抗振优化研究

(1) 闸门浮动力及浮动失稳问题^[12-13]。通过在门体开设通水孔使闸门空腔内充水,减少门体浮动力作用,有效提高了闸门结构的整体稳定性,实现门体动力稳定目标,且闸门振动量显著减小。试验成果显示,闸门不同运行工况下,闸门未见浮动失稳现象,闸门运行稳定,且未出现明显的振动。从根本上解决了原布置方案闸门全开卧倒泄流工况下的闸门浮动失稳现象。

(2) 闸门振动的加速度特征^[14]。在闸门水弹性振动模型上布置有四个振动加速度测点(见图

13), 分别位于闸门门体中部底部 (V1) 和上部 (V2), 支臂上布置在固定铰附近 (V3) 以及支臂上部 (V4); 同时, 在支臂的顶端布置振动传感器 (V5)

及切向的位移传感器, 对闸门门体的位移进行测量分析。



图 10 闸门修改布置外形图



图 11 闸门底缘充水孔布置图

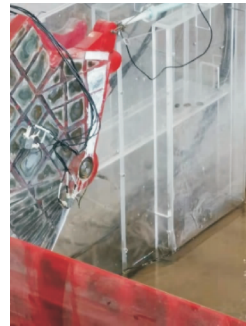


图 12 闸门启闭机支墩 1:3 贴角



图 13 下卧门修改体型振动测点布置示意图

闸门结构振动加速度测试数据显示, 闸门门体各测点三向 (z, θ, ρ) 振动加速度均方根值基本在 0.4 m/s^2 以内, 个别工况 (闸门开度 5 m 、上游水位 15.45 m 、下游水位 8.95 m 和 8.45 m) 下, 测点 V4Z 向加速度均方根值在 $0.65 \text{ m/s}^2 \sim 0.74 \text{ m/s}^2$, 各工况下未见闸门存在类似弱共振现象。从功率谱密度曲线考查, 闸门振动主频基本集中在 $7 \text{ Hz} \sim 11 \text{ Hz}$ 之间以及极低频 $0.06 \text{ Hz} \sim 0.20 \text{ Hz}$ 附近; 极低频区间频带很窄, 能量很小。

(3) 闸门振动位移特征。在闸门振动加速度测试的基础上, 对闸门各测点振动位移进行分析比较。成果指出, 各测点振动位移均方根值能够控制在 0.5 mm 以内, 最大值和最小值也基本控制在 3 mm 以内; 从位移时域过程曲线来看, 未出现共振现象, 主频基本落在 $7 \text{ Hz} \sim 11 \text{ Hz}$, 未见低频振动现象。

5 结 论

通过下卧门结构的水动力学、结构动力特性分析及闸门流激振动特性数据的测量分析和系统研究, 揭示了闸门发生强烈共振失稳的机理, 采取抗振优化布置方案和措施, 有效解决了结构共振问题, 确保了结构的动力稳定。本项研究取得如下结论:

(1) 对闸门门体进行开孔通水, 有效抑制了结构浮动力, 较好解决了闸门整体动力失稳问题, 但在部分运行工况中仍存在弱共振问题。

(2) 在闸门支臂两侧设置通 (排) 气孔可有效解决闸门面板隔仓通水时的排气问题。

(3) 根据闸下流态观测和闸门发生弱共振机理分析, 对闸门底缘结构进行修改优化, 将宽厚型闸门底缘改为 30° 倾角形式, 可有效解决部分开启状态下闸门结构的弱共振问题, 闸门振动加速度均方根值可控制在 0.4 m/s^2 。各测点振动位移均方根值亦控制在 0.5 mm 以内安全区。闸门运行总体平稳。

(4) 流态观测表明, 闸门支铰支墩采用 $1:3$ 斜面进行边界体型过渡, 可较好缓解下泄水流冲击反弹问题, 较好改善了下泄水流流态。

综上所述, 通过对液压启闭操作的大型下卧门水力特性和结构抗振优化研究, 解决了影响结构动力安全存在问题, 提出了抗振安全措施, 可确保泄水闸工程的运行安全。本项成果可为类似泄水闸工程的设计和建设提供参考。

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] 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.
- [4] Yan Genhua. Analysis and control measure on vibration of hydraulic segment gate running with small opening degree[C]//9th International Conference on Hydroinformatics, HIC, Tianjin, China, 2010.

(下转第 67 页)

(3) 各种工况作用下,弹性地基梁相比于桩基支承梁,梁的最大挠度、弯矩及剪力均相应减小。建议设计板桩码头或重力式码头的后轨道梁时按弹性地基梁进行计算,且优先使用有限元软件对轨道梁进行三维实体建模,三维模型可以考虑地基土的非线性,模拟的结果更接近轨道梁的实际受力情况,从而优化轨道梁结构。

参考文献:

- [1] 陈 文,张玉萍. 基于 ANSYS 的高桩码头轨道梁内力分析[J]. 水运工程,2014(10):71-75.
- [2] 陆 微,李春良,任增金. 钢筋混凝土轨道梁最优断面尺度的确定[J]. 水运工程,2017(7):103-107,135.
- [3] 邓 涛,戈浩波,陈章楷. 桩基支撑轨道梁结构设计影响因素分析[J]. 水运工程,2022(8):161-166,200.
- [4] 中国船舶工业总公司第九设计研究院. 弹性地基梁及矩形板的计算[M]. 北京:国防工业出版社,1983.
- [5] 张季容,姚祖恩,楼文娟. 有限单元法计算分层地基上的弹性地基梁[J]. 岩土工程学报,1986(3):16-26.
- [6] 张晓玲. 链杆法和有限元法计算弹性地基梁的比较与分析[J]. 煤炭技术,2008(12):100-101.
- [7] 高同玉. 弹性地基梁的有限元分析及其工程应用[J]. 工业建筑,2014,44(S1):871-873,870.
- [8] 庄 辉,邵传东. 三种方法下弹性地基梁挠度计算与对比[J]. 低温建筑技术,2016,38(11):65-66,69.
- [9] 廖志坚,陈尚荣,曹传祥. 深基坑开挖对邻近矩形地下通道变形影响研究[J]. 水利与建筑工程学报,2018,16(4):220-226.
- [10] 杨建晖,戴自航. 弹性地基上柱下条形基础计算的有限元法[J]. 水利与建筑工程学报,2020,18(6):95-100.
- [11] 李 潇,罗 双,曹琼琼,等. 通用模型弹性地基梁挠度方程及其适用性分析[J]. 建筑结构,2021,51(S1):1910-1913.
- [12] 林军志,杨 笛,徐绩青. 弹性地基梁板的径向基函数逼近求解方法[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版),[2022-07-14]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1190.u.20220713.0844.002.html>.
- [13] 胡钺波,梅 岭,梅国雄,等. 桩土模型中土体边界选取的有限元分析[J]. 建筑科学,2009,25(9):18-20,29.
- [14] 陈灿明,孟星宇,李 致,等. 闸基灌注桩水平承载力现场试验与反演分析[J]. 水利与建筑工程学报,2020,18(3):161-167.
- [15] 于 新,范博文. ABAQUS 的平衡初始地应力的方法研究[J]. 山西建筑,2020,46(21):1-3.
- [16] 胡长明,袁一力,梅 源,等. 基于 ABAQUS 的地层-结构法模型的地应力平衡方法研究[J]. 现代隧道技术,2018,55(4):76-86.
- [17] 马云峰. 基于 ABAQUS 岩土工程中地应力平衡的探讨[J]. 科技与创新,2014,18(8):61,64.

(上接第 19 页)

- [5] 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.
- [6] 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):12-22.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] Kolrman P. A. Flow-induced gate vibration, water-loop-kunding laboriorium[J]. Delft Hydraulics Laboratory, 1976.
- [10] 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.
- [11] 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):27-37.
- [12] 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.
- [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.
- [14] 水电工程钢闸门设计规范:NB 35055—2015[S]. 北京:中国电力出版社,2016.