

DOI: 10.20040/j.cnki.1000-7709.2023.20221925

# 新型液压子母闸门静力特性与动力特性分析

姚燕生<sup>1a</sup>, 郑 飞<sup>1a</sup>, 杨 毅<sup>2</sup>, 苏一旺<sup>3</sup>, 黄振东<sup>4</sup>, 张 勇<sup>1b</sup>, 丁 琨<sup>1b</sup>

- (1. 安徽建筑大学 a. 安徽省工程机械智能制造重点实验室; b. 环境与能源工程学院, 安徽 合肥 230601;  
2. 安徽水安建设集团股份有限公司, 安徽 合肥 230601; 3. 安徽省胜达液坝坝科技有限公司, 安徽 安庆 246000;  
4. 安徽省六安恒源机械制造有限公司, 安徽 六安 237000)

**摘要:**为解决新型液压闸门在现实环境下难以制造、试验、调试等问题,基于数字孪生仿真平台对历史闸门运行数据进行分析并传递,通过数值模拟仿真分析设计闸门在静水压力下不同子闸门开度的闸门整体应力、变形变化,同时分析在空气中及流固耦合作用下闸门整体振动频率变化,并模拟了不同开度子闸门处的流体域流动状态。结果表明,随着子闸门开度的增加,闸门所受应力值在 58~67.5 MPa 之间变化,所受变形变化不明显;与空气中的闸门自振频率相比,流固耦合作用会适当降低闸门的自振频率;不同子闸门开度会影响流体域的流动状态,且开度增加会降低水体流速。研究结果为其在实际运行、维护及优化闸门性能提供一定的参考。

**关键词:** 数字孪生; 数值模拟; 流固耦合; 振动频率; 流体域

**中图分类号:** TV663

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-7709(2023)08-0196-04

## 1 引言

液压闸门是近几年发展推广的新闸门类型<sup>[1]</sup>,其广泛应用于河道、出水口和排水渠道等系统中,具有防洪排涝、挡潮蓄水等作用,可满足灌溉、发电和生活用水等需要<sup>[2,3]</sup>,对其实际运行情况已进行了很多研究。张凡等<sup>[4]</sup>利用有限元软件建立水体—闸门流固耦合模型,通过数值模拟获得闸门振动位移、应力的变化分布规律;李桑军等<sup>[5]</sup>发现水体与闸门的流固耦合作用影响闸门的振动频率,且频率随耦合面积增大而降低;李炳阳等<sup>[6]</sup>分析闸门不同开度下的湿模态特性,发现闸门开度越小振动频率降低得越多。随着河道治理日益完善,闸门在满足蓄水、引水等基本功能外,还需优化景观、维护水体生态平衡,因此利于生态环境的新型水闸设计已成为一个重要的研究方向。但在闸门创新设计时很多参数为人为估计或参考范例设定,加上闸门制造周期长、现实测试条件难、试验成本高,导致新产品的验证应用难度大。鉴此,本文应用数字孪生的数字化模型映射技术<sup>[7,8]</sup>,对实际闸门的运行数据传递分析创新设计出新型液压子母闸门,对新型闸门整体建模并进行数值模拟,研究其在静水压力下的应力应

变效应及流固耦合作用下的振动特性,确定新型闸门在不同子闸门开度下的运行状态,结果为新型闸门能否满足实际工程应用和闸门优化设计提供了科学依据。

## 2 液压子母闸门的静力特性分析

### 2.1 模型获取与数值仿真

依托实际应用中的液压闸门和平面闸门,利用数字孪生仿真平台将两类闸门实际应用模型数据进行信息传递,完成物理实体向数字模型的转化,基于转化后数字模型的相关数据创新设计液压子母闸门。液压子母闸门由母闸门、子闸门、液压缸、支承座等组成,通过数值模拟仿真平台对新型闸门整体建模,对部分结构进行一定简化,建立模型见图 1。闸门跨度 6 m、挡水高度 3 m,在门叶中间部位对称分布两个尺寸相同的矩形孔口(长 0.6 m,宽 0.6 m)。闸门主要材料属性<sup>[9]</sup>见表 1。

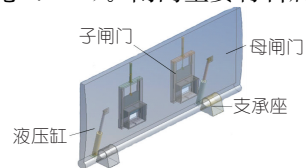


图 1 液压子母闸门三维模型

Fig. 1 3D model of hydraulic child-parent gate

收稿日期: 2022-09-16, 修回日期: 2022-10-19

基金项目: 国家“十二五”水体污染控制与治理科技重大专项(2014ZX07303-003-09); 产学研合作项目(D202122612)

作者简介: 姚燕生(1973-), 男, 博士、教授、硕导, 研究方向为数字化设计与制造, E-mail: y.ys@163.com

表 1 Q235 钢材料特性

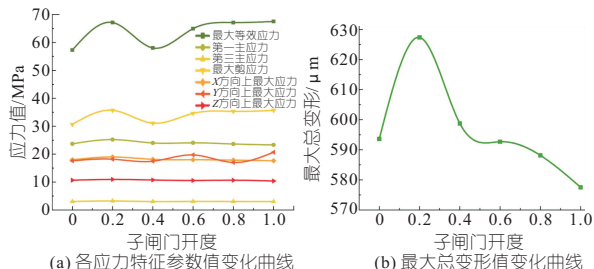
Tab. 1 Q235 steel material properties

弹性模量 $E/10^{11} \text{ Pa}$	泊松比 $\mu$	密度 $\rho$ $/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	最大容许正应力 $[\sigma]/(\text{N} \cdot \text{mm}^{-2})$	最大容许剪应力 $[\tau]/(\text{N} \cdot \text{mm}^{-2})$
2.06	0.3	7 850	150( $>16 \text{ mm}$ ) 160( $\leq 16 \text{ mm}$ )	90( $>16 \text{ mm}$ ) 95( $\leq 16 \text{ mm}$ )

结合已有闸门实际运行中水压力荷载分布及外部环境因素变化情况等,基于数字孪生技术映射的数字模型数据,对闸门进行数值模拟仿真。

### 2.2 应力、变形结果分析

闸门在运行过程中主要承受迎水面静水压力和自身重力,数值模拟仿真时以迎水面方向为水流方向(即 X 轴方向),拦水高度设为 3 m(即 Y 轴方向),根据闸门实际工作运行特点,约束支承座全部自由度,对液压缸与地基铰接处释放切向转动自由度,其余自由度全部约束。以子闸门在其开度 0、20%、40%、60%、80%、100% 下为研究对象,得到在不同子闸门开度下的应力、变形特征参数值变化曲线见图 2。由图 2 可知,闸门变形很小,从子闸门全关闭至子闸门全开启,整体变形幅值范围在 0.57~0.63 mm 之间,在子闸门开度为 20% 时,变形达到最大,接着随子闸门开度的增加变形呈下降趋势,子闸门全开时变形最小。当闸门需放水时,在控制流量的前提下,适当增加子闸门开度能降低闸门构件变形,保护闸门构件的原有性能。开度在 0~40% 之间时,等效应力值呈先增后减变化,可见子闸门开启初期,闸门受水流瞬时冲击作用突然增加,经缓冲后,闸门和流水之间达到相对稳定的运行状态,闸门所受应力相应减小,再随开度增加,通过闸门的水流量越来越大,作用在闸门上的动水压力增加,所受等效应力值增加。在子闸门开度为 40% 时最小等效应力值为 58 MPa,全开时闸门所受等效应力有最大值为 67.5 MPa,升幅达 16.38%。最大剪应力参数值变化与最大等效应力参数值变化曲线基本保持一致,其余各应力参数值随子闸门开度的变化



基本保持相对稳定。闸门容许最大应力 $[\sigma]=150 \text{ MPa}$ ,而  $150 \text{ MPa} > 67.5 \text{ MPa}$ ,闸门最大变形值为 0.63 mm,根据《水利水电工程钢闸门设计规范》规定<sup>[10]</sup>,闸门的允许挠度为  $W/600$ ,本文闸门的允许挠度为  $L = 6\ 000 \text{ mm}/600 = 10 \text{ mm} > 0.63 \text{ mm}$ ,则闸门整体强度、刚度符合要求。

图 3 为子闸门全开时母闸门的应力、变形云图。由图 3 可知,在此运行工况下,母闸门所受的最大应力约为 27.426 MPa,位置在靠近底梁附近。母闸门的第一主应力集中在门叶和底梁交界处,两侧板与底梁交接处向内延伸至支承座位置及两子闸门与底梁之间的区域均为应力分布较集中的部分,门叶和底梁的交界处附近出现较大应力是因为水流压力在母闸门上面呈三角形分布,越接近底梁水的作用力就会越大,左边子闸门的左上角和右边子闸门的右上角分别有局部应力水滴型扩散的形状,子闸门该部分可能是未用圆角过渡而导致,使应力增大。因此,在设计母闸门时应注意加强门叶与底梁交界处的强度及将子闸门的拐角改成圆角过渡以优化闸门强度。子闸门全开时母闸门剪应力分布情况与其所受 von-Mises 应力分布情况相似,所受最大剪应力约为 14.397 MPa。母闸门的最大变形发生在顶梁区域,最大值约为 0.6 mm,在 x、y、z 三个方向上的变形主要集中在子闸门和底梁中间的区域及子闸门上部,整体母闸门变形值不到 1 mm,几乎可忽略。

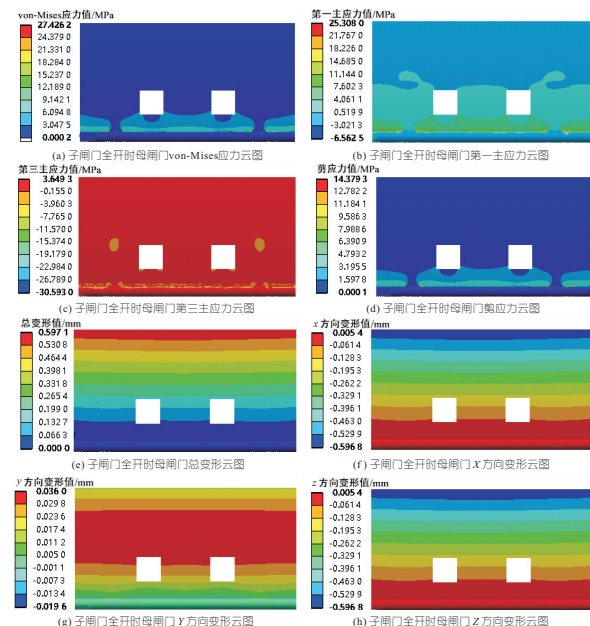


图 3 子闸门全开时母闸门的应力云图和变形云图  
Fig. 3 Stress cloud map and deformation cloud map of parent gate when sub-gate is fully opened

### 3 液压子母闸门的振动特性分析

Fig. 2 Variation curves of stress and deformation characteristic parameters of hydraulic child-parent gate under different opening degrees of sub-gate

### 3.1 空气中液压子母闸门自振特性分析

通过数值模拟仿真得到液压子母闸门在空气中时的固有频率值见表 2。由表 2 可知,液压子母闸门在空气中不论子闸门处于何种开度下,闸门固有频率值均随迭代阶次增加而逐渐增大,且闸门的整体固有频率值变化基本一致,第 1 阶固有频率值均约为 18 Hz。以第 1 阶模态频率为例,随着子闸门开度的增加,闸门整体固有频率值呈下降趋势,在子闸门全开时第 1 阶模态频率值最低为 18.01 Hz。总的来说,子闸门开度的变化对闸门整体固有频率影响不大,但可改变子闸门开度调整闸门整体第 1 阶模态频率。

表 2 空气中液压子母闸门在不同子闸门开度下前 10 阶固有频率

Tab. 2 The first 10 natural frequencies of hydraulic child-parent gate in air under different sub-gate openings

阶数	不同子闸门开度下液压子母闸门固有频率/Hz					
	0	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0
1	18.26	18.08	18.05	18.06	18.03	18.01
2	29.71	29.63	29.61	29.64	29.66	29.66
3	58.42	58.40	58.40	58.45	58.45	58.47
4	63.35	63.33	63.14	63.29	63.07	63.45
5	63.90	64.22	63.38	63.63	63.28	63.48
6	67.03	68.09	67.43	67.73	67.42	67.71
7	68.01	68.64	67.70	67.80	67.96	67.79
8	109.47	109.76	109.86	109.83	108.70	99.85
9	118.38	122.38	122.26	118.06	111.11	100.30
10	119.42	122.63	123.73	118.68	111.49	100.87

### 3.2 流固耦合下液压子母闸门振动特性分析

通过 ANSYS 数值模拟仿真平台建立流体域与闸门有限元分析模型,依据数字孪生仿真平台监测分析河道闸门水流历史数据,以上游侧水位 2 m、下游侧水位 1.4 m、前后取 10 m 的流体域为例,对流体域上游侧端施加 1.5 m/s 速度入口,下游侧端施加 0 Pa 压力出口,水体顶面为自由面,其余面为壁面,选取水和闸门交界面为流固耦合面,计算液压子母闸门处于同一运行水头下不同子闸门开度时的振动特性,获得液压子母闸门前 10 阶振动频率<sup>[11]</sup>。

图 4 为不同子闸门开度时受流固耦合作用和在空气中各迭代阶次的模态频率变化曲线。由图 4 可知,从整体变化趋势看,不论是否考虑流固耦合作用及在任何子闸门开度下,闸门振动频率均随迭代阶次的增加而逐渐增加,迭代阶数越高,增加越明显。而在流固耦合作用下,任何子闸门开度的闸门第 1 阶模态频率均低于空气中闸门自振频率,可见流固耦合作用会降低闸门的振动频率。当子闸门开启后,水体会通过子闸门由上游侧流向下游侧,在动水压力的作用下闸门会产生不同

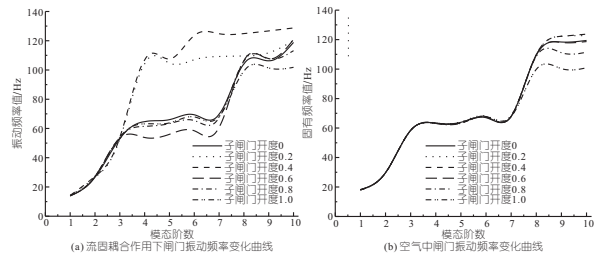


图 4 流固耦合作用及空气中不同子闸门开度下闸门振动频率参数变化曲线

Fig. 4 Fluid-structure interaction and variation curves of gate vibration frequency parameters under different sub-gate opening degrees in air

的振动频率。在子闸门全关闭至全开启之间,闸门的第 1 阶模态频率保持在 14 Hz 左右,除在子闸门开度 20%、40%时,从第 3 阶模态频率起,闸门频率发生突变式增长,其余开度下闸门整体频率变化基本一致。水流脉动的高能区集中在 0~10 Hz<sup>[5]</sup>,经流固耦合作用分析,闸门第 1 阶振动频率远离水流脉动的高能区,闸门结构不易发生共振。

由数值仿真结果可知,不同子闸门开度下其前 6 阶振型变化基本类似。图 5 为子闸门开度为 20%时母闸门振型。由图 5 可知,1 阶振型表现为母闸门靠近顶梁附近振动,底梁中部振幅较大;2 阶振型表现为门叶两侧上端反向弯曲振动,两端拐角振幅较大,门叶中部振幅较小;3 阶振型表现为门叶两侧顶端同向弯曲振动,门叶中部区域振幅增大;4 阶振型表现为母闸门呈 S 型振动,门叶两侧端及子闸门对应位置的顶梁部分振幅较大,且左侧子闸门对应位置的顶梁相对右侧位置振动偏大;5 阶振型表现为母闸门整体弧形弯曲振动;6 阶振型表现为母闸门 S 型振动明显,两子闸门对应位置的顶梁部分振幅较大。通过对母闸门振型分析,发现比较容易产生振动的部分是顶

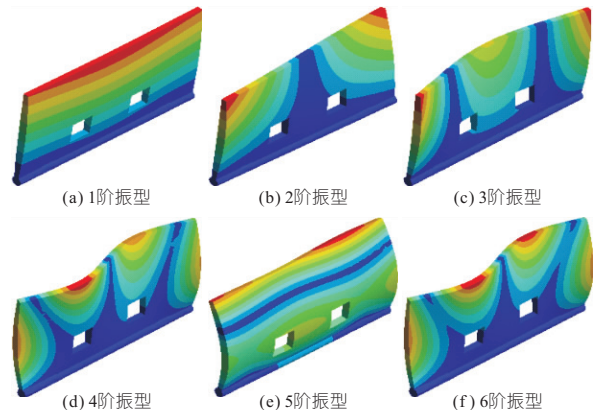


图 5 子闸门开度 20%时母闸门的前 6 阶振型图  
Fig. 5 The first 6 vibration modes of parent gate when opening of sub-gate is 20%

梁附近区域和门叶两侧端,因此可加强母闸门的这些部位的刚度,以改善闸门整体刚度。

随着子闸门开度的变化,子闸门开启处的水体流速也会发生变化。以入口流速 1.5 m/s、出口常压为例,获得运行水头 2 m 不同子闸门开度下的子闸门处水体流速云图。由图 6 可知,在子闸门全关闭时,流体域中的速度分布很均匀,在靠近河岸附近,局部区域水体流速低于入口流速,在流固交界处水体与闸门碰撞时,水体流速会明显增大。当子闸门开度为 20% 时,水体流速突变式明显增大,且经两子闸门流出的局部水体径直流向下游,再随子闸门开度增至全开,水体流速不断降低,但相较于入口流速,位于子闸门处的水体流速还是很大,改变的是原先经两子闸门流出的局部水体由基本无干扰,到之后两处局部水体开始互相干扰、互相交汇,直至最终汇聚。子闸门开度的增加会降低闸门下游水体流速,改变流体域流动状态,也可通过控制子闸门开度控制水体的流速和流量实现对下游进行冲淤,防止下游淤积过度堆积。

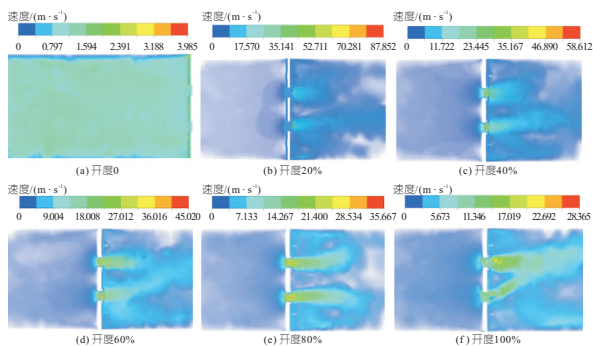


图 6 运行水头 2 m 不同开度下的子闸门处水体流速云图

Fig. 6 Cloud map of water velocity at sub-gate under operating water head of 2 m and different openings

## 4 结论

### Analysis of Static and Dynamic Characteristics of A New Type of Hydraulic Child-parent Gate

YAO Yan-sheng<sup>1a</sup>, ZHENG Fei<sup>1a</sup>, YANG Yi<sup>2</sup>, SU Yi-wang<sup>3</sup>, HUANG Zhen-dong<sup>4</sup>, ZHANG Yong<sup>1b</sup>, DING Kun<sup>1b</sup>  
 (1a. Key Laboratory of Intelligent Manufacturing of Engineering Machinery; 1b. School of Environment and Energy Engineering, Anhui Jianzhu University, Hefei 230601, China; 2. Anhui Shui'an Construction Group Co., Ltd., Hefei 230601, China; 3. Anhui Shengda Hydraulic Dam Technology Co., Ltd., Anqing 246000, China; 4. Anhui Luan Hengyuan Machinery Manufacturing Co., Ltd., Lu'an 237000, China)

**Abstract:** In order to solve the problem that the new hydraulic gate is difficult to manufacture experiment and debug in the real environment, the historical gate operation data was analyzed and transmitted based on the digital twin simulation platform. The designed gate was analyzed through numerical simulation, and the overall stress and deformation changes of the gate with different sub-gate opening degrees under hydrostatic pressure were analyzed. At the same time, the overall vibration frequency changes of the gate under the action of air and fluid-structure interaction were analyzed. The flow state of the fluid domain at the sub-gates with different opening degrees was simulated. The results show that with the increase of the opening of the sub-gate, the stress value of the gate varies from 58 MPa to 67.5 MPa, and the deformation change is not obvious; Compared with the natural vibration frequency of the gate in the air, the fluid-structure coupling effect will appropriate reduce the natural vibration frequency of the gate; Different sub-gate openings will affect the flow state of the fluid domain, and increasing the opening will reduce the water velocity. The results provide some references for its actual operation, maintenance and optimization of gate performance.

**Key words:** digital twin; numerical simulation; fluid-structure coupling; vibration frequency; fluid domain

a. 基于数值模仿真软件分别模拟新型闸门在静水压力和自重下的应力变形、流固耦合作用时闸门振动特性及水体流态。闸门整体强度、刚度符合要求,低阶次的振动频率远离水流脉动的高能区 0~10 Hz,不易发生共振。

b. 新型闸门满足工程应用,且通过控制子闸门的开启程度可控制水体的流量和流速,从而实现冲淤功能。

### 参考文献:

- [1] 黄振东,刘鹏鹏,胡霜天. 液压升降坝启升机构的优化与改进[J]. 水电能源科学, 2019, 37(8): 167-169, 176.
- [2] 刘昉,李文胜,王延召,等. 巴塘水电站导流洞平面闸门流激振动试验研究[J]. 水资源与水工程学报, 2021, 32(1): 136-142.
- [3] 田国政. 基于 Ansys Workbench 的流固耦合下不同开度弧形闸门应力变形分析研究[J]. 水利科学与寒区工程, 2020, 3(2): 62-67.
- [4] 张凡,巫世晶,孟凡刚,等. 基于 CEL 理论的弧形闸门流固耦合的数值模拟[J]. 水电能源科学, 2016, 34(3): 189-191, 27.
- [5] 李桑军,秦战生. 基于 ANSYS 的流固耦合弧形闸门振动特性研究[J]. 水力发电, 2018, 44(1): 64-67.
- [6] 李炳阳,杨旭亮. 基于 ANSYS Workbench 的弧形闸门流固耦合数值分析[J]. 水利技术监督, 2021(11): 143-147, 177.
- [7] 刘大同,郭凯,王本宽,等. 数字孪生技术综述与展望[J]. 仪器仪表学报, 2018, 39(11): 1-10.
- [8] 赵龙刚,刘汉生,张小平,等. 基于数字孪生的车路协同虚拟仿真平台研究[J]. 移动通信, 2021, 45(6): 7-12.
- [9] 张磊涛. 新型平面液压活动坝静动力特性分析及结构优化设计[D]. 西安:西安理工大学, 2018.
- [10] 中华人民共和国水利部. 水利水电工程钢闸门设计规范: SL 74-2013[S]. 北京:中国水利水电出版社, 2013.
- [11] 沈远航,朱召泉. 考虑流固耦合的泵闸组合闸门结构自振特性研究[J]. 中国农村水利水电, 2021(2): 13-17, 23.