

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2024.05.005

平面闸门爬行振动物理模型试验研究

王延召¹, 徐国宾²

(1. 江苏科技大学船舶与海洋工程学院, 江苏 镇江 212003;
2. 天津大学水利工程仿真与安全国家重点实验室, 天津 300354)

摘要: 基于物理模型试验, 研究了平面闸门在动水闭门过程中动水压力、持住力和闸门爬行振动强度的变化特征, 分析了闸门竖向水流作用和闸门支承摩擦对爬行振动的影响。结果表明: 随着平面闸门开度减小, 爬行振动强度和振动周期逐渐增大, 振动主频率逐渐减小, 并与简化系统固有频率范围一致; 闸门竖向水流作用在强度和频域上与爬行振动间存在显著差异, 水流脉动压力不是引起闸门爬行振动的主要因素; 闸门支承摩擦是诱发爬行振动的主要因素, 证实了理论模型中简化摩擦因素的合理性。

关键词: 平面闸门; 爬行振动; 动水压力; 摩擦致振

中图分类号: TV312 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2024)05-0037-08

Experimental study on physical model of slip-stick vibration of plane gate

WANG Yanzhao¹, XU Guobin²

(1. School of Naval Architecture and Ocean Engineering, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang 212003, China;
2. State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety, Tianjin University, Tianjin 300354, China)

Abstract: Based on the physical model test, this paper studies the variation characteristics of hydrodynamic pressure, holding force and slip-stick vibration response of a plane gate during the transient closing of the gate, and discusses the influence of vertical hydrodynamic pressure and the friction factor of the gate support on the slip-stick vibration. The results show that the amplitude and period of slip-stick vibration increase gradually with the opening of the gate, and the vibration dominant frequency decreases, which is consistent with the natural frequency of the simplified system. There is a significant difference in intensity and frequency domain between the vertical hydrodynamic pressure and the slip-stick vibration, and the flow pulsation factor is not the main factor causing the slip-stick vibration. The friction characteristics of gate support is the main factor causing the slip-stick vibration, proving the rationality of the simplification of friction in theoretical model.

Key words: plane gate; slip-stick vibration; hydrodynamic pressure; friction-induced vibration

平面闸门因具有结构简单、操作运行方便、容易配合其他建筑物布置的特点, 在高水头水利工程中常用作事故闸门。平面事故闸门运行工况多为动水闭门、静水启门, 闸后复杂的水流条件会给闸门运行安全造成严重威胁^[1-3]。高坝泄流诱发的闸门不利振动由于其成因复杂、问题多发, 是工程水力学领域中的重要研究课题^[4-6]。现有研究认为闸门振动主要由以下几个因素诱发: 由闸下底缘区域的水流脉动和重附着过程而引起的流激振动^[7-13]、闸门有效过流面积变化导致的流量脉动和流量惯性而引起的闸门振动^[14]、闸门支承滚轮受力不均而导致的闸门颤振^[15]、高速水流和止水密封问题而诱发的空化振动^[16-18]和泄洪水流导致的坝体振动进而导致闸门的伴生振动^[19]等。为了控制闸门振动响应, 多数学者主要是针对闸后不良水流流态进行相关研究, 且平面闸门多处于固定开度条件, 对闸门在动水闭门过程中的振动问题关注较少^[20-24]。

在平面闸门动水闭门过程的原型观测试验中, 出现一种间歇性的振动现象, 被称为爬行振动。季树凯等^[25]对引黄涵闸出现的爬行振动问题进行了理论研究, 指出闸门支承与轨道间的动静摩擦转化是诱发闸门

基金项目: 国家自然科学基金项目(51779166)

作者简介: 王延召(1991—), 男, 讲师, 博士, 主要从事水工结构振动研究。E-mail: wangyanzhao_27@163.com

引用本文: 王延召, 徐国宾. 平面闸门爬行振动物理模型试验研究[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2024, 52(5): 37-44.

WANG Yanzhao, XU Guobin. Experimental study on physical model of slip-stick vibration of plane gate[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2024, 52(5): 37-44.

爬行振动的主要因素。梁超等^[26]利用系统控制理论,构建了平面闸门爬行振动理论模型,并提出了闸门控振措施。上述理论模型将平面闸门爬行振动归因于闸门支承与轨道间的动静摩擦转化,弱化了水流的作用。强烈的平面闸门爬行振动会给闸门自身和附属结构造成严重的威胁^[27-28],有必要深入研究平面闸门爬行振动的形成机制。本文通过物理模型试验,着重研究平面闸门在动水闭门过程中爬行振动与水流脉动压力间的关系,阐明平面闸门爬行振动的诱发因素,以期为平面闸门振动控制提供参考。

1 物理模型试验

1.1 模型布置

根据重力相似和水流相似准则,结合某水利工程结构布置,建立模型比尺为1:25的物理模型,总体布置如图1所示。长度、流速、时间、流量、加速度、位移、力、压强的相似比尺分别为25、5、5、3 125、1、25、15 625、25。模型主要由上游水箱、有压洞段、平面闸门闸室段、弧形闸门闸室段及明流尾水渠段等组成。在模型试验中,平面闸门孔口尺寸为0.24 m×0.48 m(宽×高),平面闸门尺寸为0.312 m×0.50 m(宽×高);闸门底缘采用后倾角30°形式;闸门支承为滚轮支承,采用上游侧止水;闸门吊点为单吊点形式,闭门速度为0.01 m/s。在距离平面闸门闸室段下游侧4.0 m位置处为弧形闸门,其孔口尺寸为0.28 m×0.26 m(宽×高)。

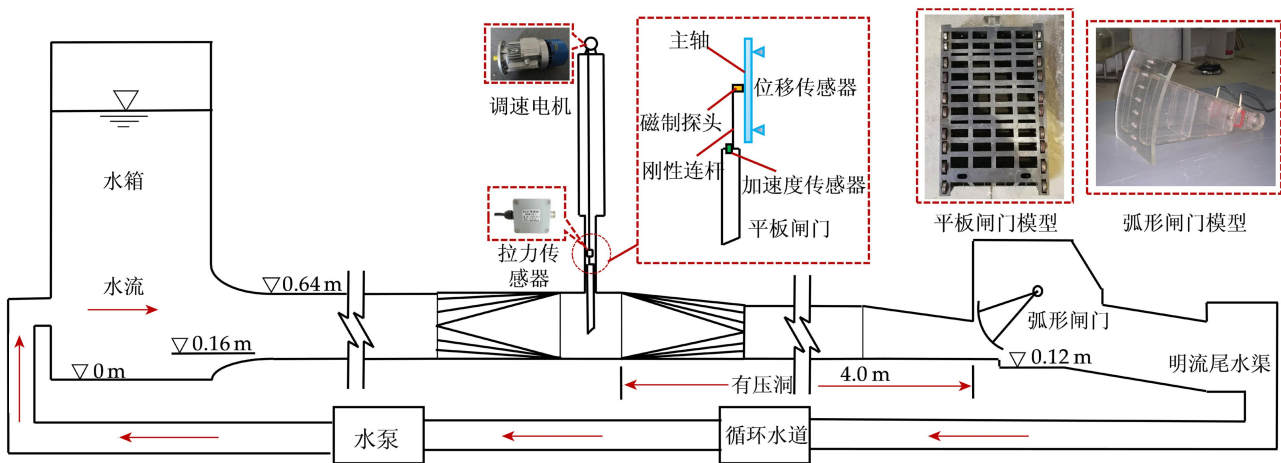


图1 物理模型试验布置
Fig.1 Layout of physical model test

1.2 试验工况

在模型试验中,平面闸门进口侧边界条件给定上游闸前水深,分别为0.8、1.0、1.2 m,出口侧边界条件由平面闸门下游侧弧形闸门开度(e_{sg})控制, e_{sg} 依次为0.25、0.50、0.75和1.0,弧形闸门后接明流尾水渠。模型试验主要研究平面闸门在动水闭门过程中的爬行振动特性,当平面闸门由全开下落至全关时,钢绳索长度变化范围在3.65~4.13 m之间。测试物理量包括由DJ800测试系统测量的动水压力、由加速度传感器测量的振动加速度和由磁滞位移传感器测量的闸门位移。采用北京东方噪声与振动研究所开发的数据采集与信号处理智能系统进行数据采集、传输和处理,其中采样频率为200 Hz,采样时长为平面闸门闭门整个过程。

2 结果与分析

2.1 动水压力

由图2(a)可知,当 $e_{sg}=0.25$ 时,底缘动水压力 P 先增加后减小,最大值为7.12 kPa,对应平面闸门开度 $e=0.5$ 。随着弧形闸门开度增大,闸门底缘动水压力变化过程中先增大的区段逐渐弱化并消失,后表现为随平面闸门下落而逐渐减小。在平面闸门底缘完全脱离水体后,由于闸下高速水流带动周围空气,使得底缘处测点压力变为负值。在弧形闸门各开度条件下,平面闸门在闭门过程中底缘脉动压力均较小,其均方根最大值为0.5 kPa,出现在弧形闸门开度 $e_{sg}=0.75$ 、平面闸门开度 $e=0.4$ 时。

由图2(b)可知,在 $e_{sg}=0.25$ 时,门顶动水压力先增大后减小,最大值为5.56 kPa。对比底缘动水压力发现,二者处于最大值时对应的平面闸门开度相同。原因在于,物理模型试验中平面闸门无法达到与原型闸门

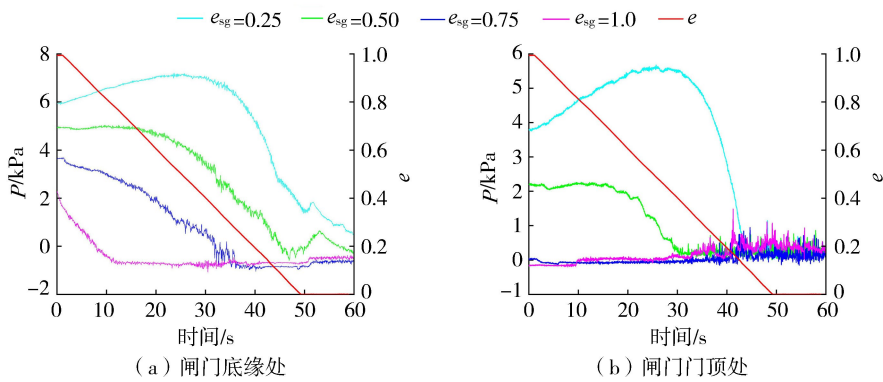


图 2 动水压力随闭门时间的变化

Fig. 2 Variation of hydrodynamic pressure with the time of gate-closing

相同的止水效果,导致闸门面板在处于高水压时出现漏水。闭门初期,闸前水压力增加,闸门顶部止水漏水并向门井补充,致使门顶和底缘水头增大;当过闸流量小于下游出流流量后,门井内水体补充到下游,门顶水头逐渐减小。随弧形闸门开度增加,下游边界出流能力增加,门井内水位减小。在 e_{sg} 为 0.75、1.0 时,平面闸门在整个闭门过程,门顶水头为零,而门顶脉动压力变化显著。原因是在平面闸门门顶无水体后,门井内空气经门顶向下游有压洞内进行通风补气,导致闸门门顶处测点压力变化剧烈。

2.2 闭门持住力

图 3(a) 为平面闸门持住力时均值随闭门时间的变化关系。在弧形闸门为小开度时,随着平面闸门闭门下落,持住力时均值先减小后增大,在完全闭门时迅速减小至零。在此过程中,面板水推力增大导致闸门摩擦阻力增大。综合闸门底缘和门顶动水压力的变化情况,竖向动水压力(底缘动水压力与门顶动水压力的差)随闸门下落逐渐减小,与持住力的变化趋势一致,表明由面板水推力产生的摩擦阻力对持住力的影响弱于门体竖向动水压力。然而,在弧形闸门为大开度时,闸门门顶水压力为零,闸门底缘水压力随闸门下落而逐渐减小,竖向动水压力对持住力的作用减弱。此时,闸门面板水推力产生的竖向摩擦阻力作用显著,表现为随闸门下落,竖向摩擦阻力增大,持住力减小。

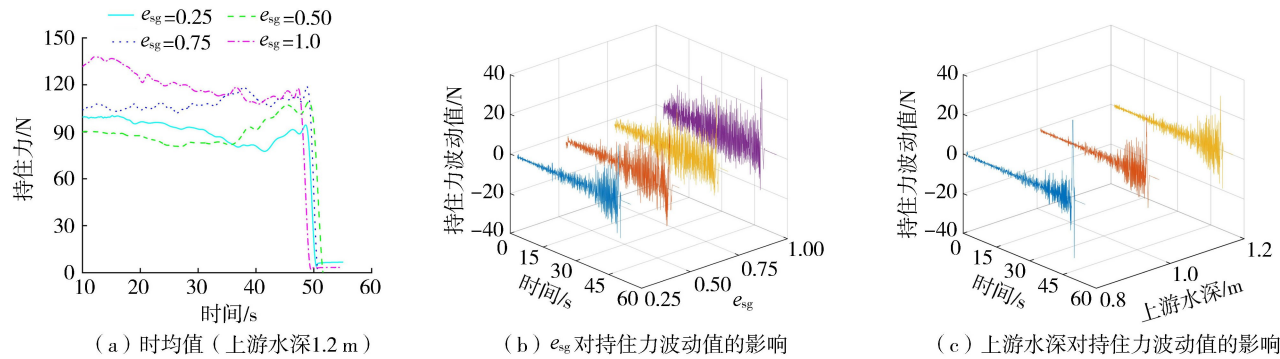


图 3 闭门持住力特性

Fig. 3 Characteristic of holding force in gate-closing process

由图 3(b) 可知,弧形闸门为小开度时,平面闸门下落初期的持住力波动值较小,在闸门下落 40 s 附近,持住力波动值突然增大,并持续至闸门完全闭门。在相同上游水深(1.2 m)条件下,随着弧形闸门开度增大,持住力波动值出现突变时所对应的平面闸门开度增大。由图 3(c) 可知,在相同弧形闸门开度下($e_{sg} = 0.25$),上游水深变化主要影响持住力波动值大小,没有对波动值出现突变时所对应的时间产生显著影响。

综合各工况下的闭门时间,发现平面闸门均在 50 s 附近实现完全闭门,没有出现闭门失效现象。闭门时间的一致性说明爬行振动不会影响闭门失效问题,这与滑块支承平面闸门在爬行振动过程中伴随着闭门失效问题有所不同,表明平面闸门爬行振动与闭门失效诱发机制并不相同^[29]。

2.3 爬行振动

由图 4(a) 可知,加速度变化特征与持住力波动值变化特征一致,加速度最大值约为 1.5 m/s^2 。由于持

住力波动值与闸门爬行振动强度相关程度较高^[29],弧形闸门开度和上游水深对爬行振动加速度的影响和对持住力波动值的影响是一致的。

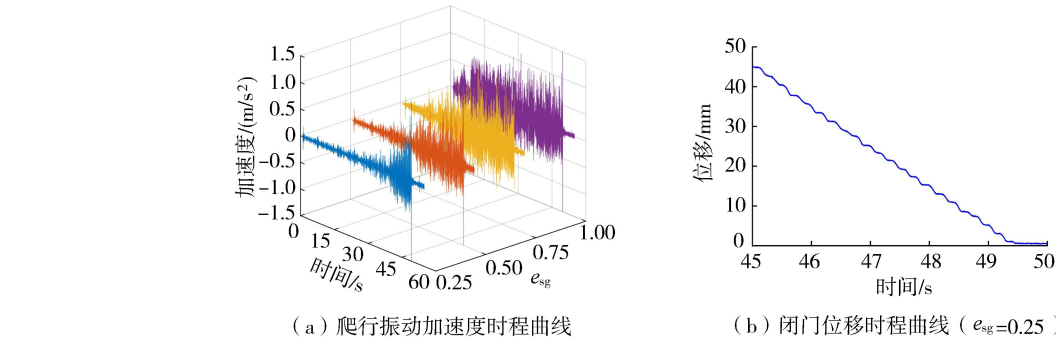


图4 爬行振动时域特征

Fig.4 Time domain characteristics of slip-stick vibration

由图4(b)可知闭门位移呈显著的台阶状特征。在物理模型试验中,可以直观地观察这种台阶状位移过程,具体表现为间歇性的振动下落现象。在平面事故闸门原型观测试验中,当闸门出现爬行振动时,现场测试人员可以感受到明显的振感,并伴随尖锐的声音从事故闸门井深处传出^[19]。

由图5(a)可知,红色区域为振动主频显著区,表示为闸门振动能量。在闸门闭门初期,爬行振动能量很小,没有表现出显著的主频特征。随着闸门下落,振动主频逐渐显著,并呈逐渐减小的趋势。图5(b)给出了闭门过程中不同时间节点下的振动功率谱密度图,随着闸门下落,闭门时间增加,爬行振动响应逐渐增大,振动主频峰值特征逐渐显著。

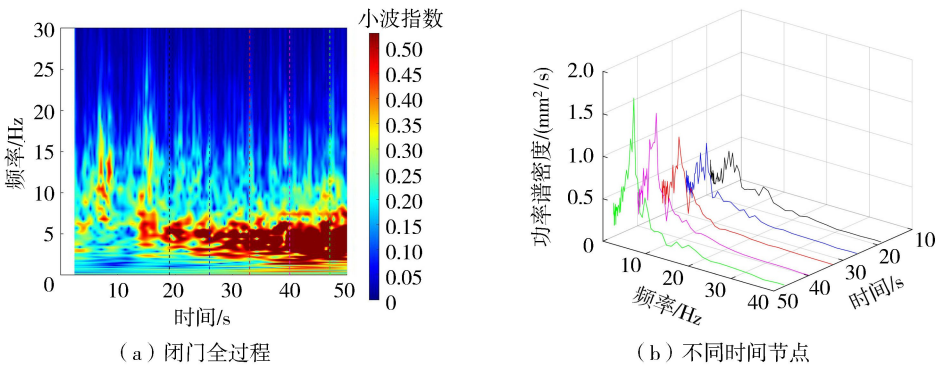


图5 爬行振动频域特征 ($e_{sg}=0.25$)

Fig.5 Frequency domain characteristics of slip-stick vibration ($e_{sg}=0.25$)

3 讨论

3.1 动水压力对爬行振动的影响

对于平面闸门的振动,多数研究认为闸门底缘区域水流脉动压力是引起闸门流激振动的主要原因^[7-14]。本文将对平面闸门在闭门过程中的竖向水流脉动载荷和闸门振动载荷进行比较,着重研究二者在作用强度和频率上的关系。

图6中将闸门振动作用等效为钢绳索拉力波动值,竖向水流脉动作用等于闸门竖向脉动压力与闸门横截面面积的乘积。由图6(a)可知,平面闸门闭门初期,闸后有压洞内处于较长时间的满流状态,平面闸门门体可与水体有充分的相互作用,钢绳索拉力波动值与竖向水流脉动作用力在数值大小上相差较小。然而,在此阶段平面闸门没有表现出明显的爬行振动特征,无法说明闸门竖向脉动压力对爬行振动的影响。随着平面闸门下落,竖向水流脉动作用力与闸门振动间的差距逐渐增大,特别是在平面闸门下落至小开度时,闸门振动作用力较大,约为竖向水流脉动作用力的7.5倍。由图6(b)可知,闸门竖向水流脉动作用较小,与闸门爬行振动作用在数值上不相匹配。在弧形闸门其他开度条件下,闸门振动作用力与竖向水流脉动作用力间的差距均较大。尤其是在弧形闸门全开、平面闸门下落至小开度时,平面闸门闸后自由出流,闸门底缘水流

因偏转而脱空,水流对底缘基本没有作用,而此时闸门振动强度随闭门而增大。

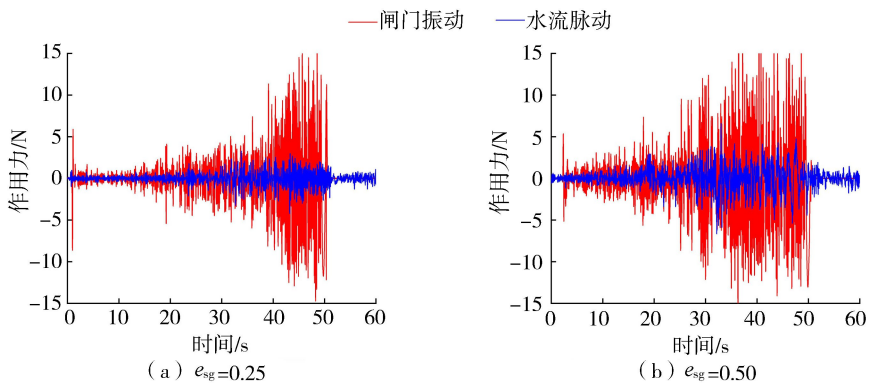


图 6 水流脉动压力与闸门振动压力比较

Fig. 6 Comparison of loads between fluid excitation and gate vibration

为分析竖向水流脉动作用力与爬行振动在频域上的关系,需明确闸门爬行振动的主频特征。参考已有研究^[14,22],将平面闸门竖向振动简化为单自由度振动,其固有频率表示为

$$\omega = \sqrt{EA/Lm}$$

(1)

式中: E 为钢绳索弹性模量; A 为钢绳索断面面积; m 为等效系统的质量; L 为闸门与启闭机之间的钢绳索长度,随闸门启闭而发生变化。

不考虑闸门与水流间的流固耦合效应时,平面闸门由全开下落至全关时,等效系统主频由 6.02 Hz 逐渐减小至 5.72 Hz。简化系统固有频率发生变化的原因为平面闸门闭门下落, L 增大,导致 ω 逐渐减小。

由图 7(a)可知,平面闸门竖向脉动压力主频较小,主要集中在 0.5 ~ 1.5 Hz 之间。然而,在平面闸门闭门过程中,爬行振动主频逐渐减小,由 7 Hz 减小至 5 Hz(图 7(b))。对比图 7(a)(b)可知,闸门竖向水流脉压在频域上与闸门爬行振动存在较大的差异。综上,闸门竖向水流脉压在数值和频域上与爬行振动存在显著差异,平面闸门竖向水流脉压无法促使或激发平面闸门在闭门过程中出现爬行振动。

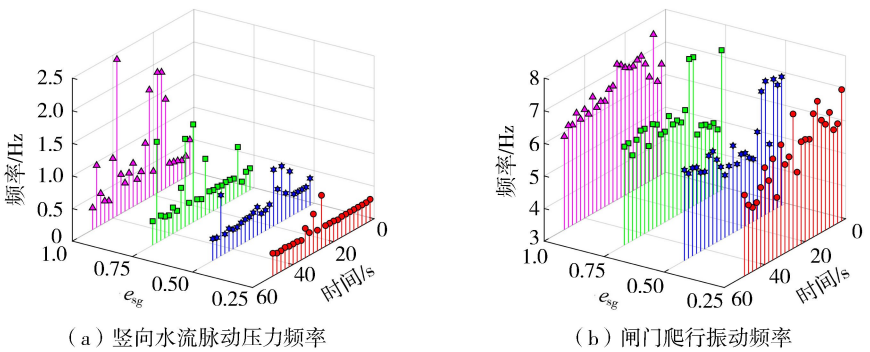


图 7 竖向水流脉动压力频率与闸门爬行振动频率时程曲线

Fig. 7 Time series of fluid excitation frequency and gate vibration frequency

此外,在物理模型试验中考虑了平面闸门与水流间的流固耦合效应,平面闸门爬行振动主频由 7 Hz 减小至 5 Hz,包含简化系统理论频率范围(5.72 ~ 6.02 Hz),并与单自由度振动简化系统的理论频率变化趋势基本一致,由此可说明平面闸门爬行振动是一种自激振动。

3.2 摩擦因素对爬行振动的影响

为形成与锈蚀滚轮支承平面闸门的对照试验,选择不锈钢滚轮支承平面闸门进行闭门试验。对照试验主要差异在于所采用的滚轮不同,平面闸门质量和止水条件是相同的。由图 8 可知,在相同的水位与边界条件下,不锈钢支承闸门爬行振动强度较锈蚀支承闸门有显著减小,表明闸门支承与轨道间的摩擦特性导致了闸门振动强度的差异。然而,有关闸门支承与轨道间摩擦特性问题的研究较少,在已有平面闸门爬行振动的理论研究^[25-26]中,通常是将闸门支承与轨道间摩擦关系进行简化,以动静摩擦系数差值作为控制要素。因此,模型试验结果说明平面闸门支承摩擦特性是引起闸门爬行振动的直接因素,可证明在理论模型中有关支

承与轨道间摩擦关系简化的合理性。

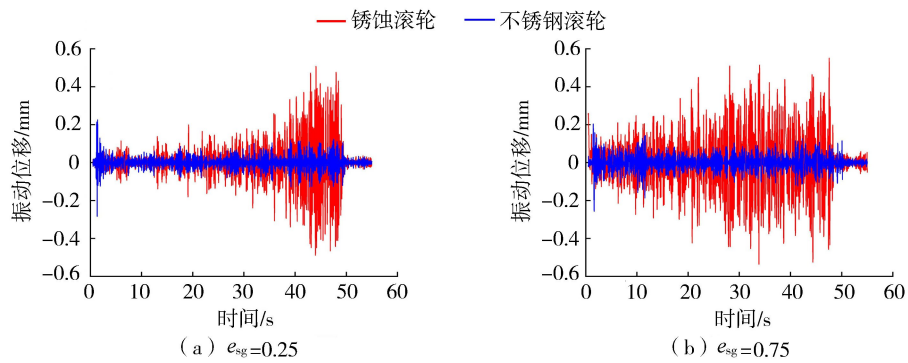


图8 支承材料对爬行振动的影响

Fig.8 Effect of gate support material on slip-stick vibration

由图9(a)可知,在弧形闸门开度 $e_{sg}=0.25$ 时,平面闸门闸后多为满流状态,锈蚀支承闸门底缘脉动压力明显大于不锈钢支承闸门的脉动压力,表明平面闸门爬行振动会增加底缘脉动压力。然而,比较图8(b)和图9(b)可知,在弧形闸门开度 $e_{sg}=0.75$ 时,闸门振动强度差异明显,不同支承闸门底缘的脉动压力过程相差较小。产生这种现象的原因是,在弧形闸门大开度时,平面闸门下落后,闸后有压洞内水流快速进入明满流过渡状态,闸门振动对底缘脉动压力的影响被有压洞内水气两相流所引起的压力脉动所掩盖,无法准确分析闸门爬行振动对底缘脉动压力的影响。此后,平面闸门底缘区域水流完全脱空,与空气直接接触,闸门爬行振动不会影响闸门底缘脉动压力。因此,相较于边界条件引起水流变化对底缘脉动压力的影响,平面闸门爬行振动对底缘脉动压力的影响相对较弱。

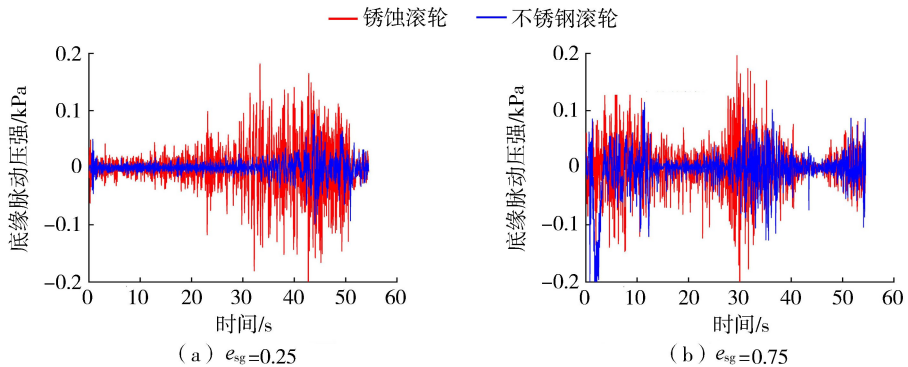


图9 爬行振动对底缘脉动压强的影响

Fig.9 Effect of slip-stick vibration on pulsating pressure of gate bottom

3.3 摩擦致振与流激振动

在平面闸门固定开度时,闸后淹没出流保证了闸门底缘与水体的充分接触,实现水流与闸门结构间相互作用。对平面闸门在固定开度条件下的底缘涡脱特性的大量研究表明,平面闸门振动是由闸门底缘附近流动水体的分离和重附着引起的,与海洋工程中管线涡激振动类似^[30]。然而,在闸后自由出流条件下,平面闸门底缘与水流脱离,闸门受到的流体激励较小,水流脉动难以诱发闸门在竖向的振动,闸门主要表现为受水击、流道内浪涌等作用而引起闸门在顺水流向的振动问题^[31]。

大多研究对平面闸门边界约束条件的限制较弱,缺乏对摩擦因素与闸门振动关系的研究。通过比较不同材质滚轮支承闸门模型试验结果发现,在平面闸门闭门过程中,门体所受的流体载荷和流体载荷对闸门竖向振动的影响基本一致。当闸门由锈蚀支承变为不锈钢支承后,闸门支承与轨道间的摩擦特性发生变化,在模型试验中直接反映在平面闸门爬行振动强度上的差异。此外,在摩擦理论中,动静摩擦转化源于接触面的相对运动,即接触面相对运动导致摩擦系数的非线性变化,由此产生的振动称为摩擦致振^[32]。对平面闸门而言,这种相对运动对应于闸门处于运动状态。然而,在平面闸门处于固定开度时,闸门支承与轨道间没有相对运动,不会产生接触面摩擦系数的非线性变化,爬行振动不会出现。因此,平面闸门爬行振动是一种由闸门闭门运动而引起的摩擦致振。

4 结 论

- a. 随着平面闸门闭门下落,闸门爬行振动强度和周期均增大,爬行振动的频率范围与等效简化系统的理论频率一致,平面闸门爬行振动是一种自激振动。
- b. 平面闸门爬行振动在振动强度和频域特征上与闸门竖向水流脉动相差较大,闸门竖向流体激励不是诱发爬行振动的主要因素。平面闸门爬行振动对底缘脉动压力的影响弱于水流边界条件变化对脉动压力产生的影响。
- c. 不同支承条件下的平面闸门爬行振动强度不同,闸门与轨道间的摩擦因素是闸门闭门过程中产生爬行振动的主要原因。平面闸门爬行振动是一种由闸门闭门下落而引起的摩擦致振。

参考文献:

[1] 练继建,杨阳,胡少伟,等. 特大水利水电枢纽调控与安全运行研究进展与前沿[J]. 工程科学与技术,2017,49(1):27-32. (LIAN Jijian,YANG Yang,HU Shaowei,et al. Research progresses and frontiers on control and safety operation of super-large hydraulic complex[J]. Advanced Engineering Sciences,2017,49(1):27-32. (in Chinese))

[2] 李国庆,杨纪伟,杨波,等. 天桥水电站泄洪洞工作闸门启闭力原型观测成果分析[J]. 水利水电技术,2005,36(10):1-4. (LI Guoqing,YANG Jiwei,YANG Bo,et al. Analysis on prototype observation on lifting power of spillway tunnel working gate for Tianqiao Hydropower Station[J]. Water Resources and Hydropower Engineering,2005,36(10):1-4. (in Chinese))

[3] 付亮,陈龙,张晓曦,等. 柘溪水电厂事故闸门振动原因及减振措施研究[J]. 水力发电学报,2014,33(1):207-214. (FU Liang,CHEN Long,ZHANG Xiaoxi,et al. Study on the cause and suppression of emergency gate vibrations at Zhexi Hydropower Station[J]. Journal of Hydroelectric Engineering,2014,33(1):207-214. (in Chinese))

[4] 王伟,杨永全,许唯临,等. 孔板泄洪洞事故闸门动水下门实验研究[J]. 水利学报,2003,34(1):39-44. (WANG Wei,YANG Yongquan,XU Weilin,et al. Experimental study on emergency gate shutting in orifice tunnels[J]. Journal of Hydraulic Engineering,2003,34(1):39-44. (in Chinese))

[5] 刘昉,谷欣玉,李文胜,等. 动水关闭的平面事故闸门体型优化试验研究[J]. 农业工程学报,2019,35(12):142-149. (LIU Fang,GU Xinyu,LI Wensheng,et al. Structural optimization of emergency plate gate for closure in moving water[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2019,35(12):142-149. (in Chinese))

[6] MA Chao,SHENG Chuanming, LIAN Jijian,et al. Failure analysis of a leaf gate jammed in closing process[J]. Engineering Failure Analysis,2020,110:104391.

[7] NAUDASCHER E,ROCKWELL D. Oscillator-model approach to the identification and assessment of flow-induced vibrations in a system[J]. Journal of Hydraulic Research,1980,18(1):59-82.

[8] THANG N D. Gate vibrations due to unstable flow separation[J]. Journal of Hydraulic Engineering,1990,116(3):342-361.

[9] THANG N D, NAUDASCHER E. Vortex-excited vibrations of underflow gates[J]. Journal of Hydraulic Research,1986,24(2):133-151.

[10] ISHII N,KNISELY W, NAKATA A. Coupled-mode vibration of gates with simultaneous over-and underflow[J]. Journal of Fluids and Structures,1994,8(5):455-469.

[11] 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. (YAN Genhua, DONG Jia, SUN Yunxi. Flow-induced vibration control and prototype measurement verification of large upwelling arch gate[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2020,40(5):55-61. (in Chinese))

[12] 彭思贤,赵兰浩,毛佳. 大宽高比弧形钢闸门流激振动数值分析[J]. 水利水电科技进展,2022,42(3):90-96. (PENG Sixian,ZHAO Lanhao,MAO Jia,et al. Numerical analysis of flow-induced vibration of a steel radial gate with large width to height ratio[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2022,42(3):90-96. (in Chinese))

[13] BILLETER P, STAUBLI T. Flow-induced multiple-mode vibrations of gates with submerged discharge[J]. Journal of Fluids and Structures,2000,14(3):323-338.

[14] 杨敏,练继建,林继镛. 水流诱发平板闸门振动的激励机理[J]. 水动力学研究与进展,1997,12(4):437-449. (YANG Min, LIAN Jijian,LIN Jiyong. Excited mechanism of flow-induced vibrations of plate gate[J]. Journal of Hydrodynamics,1997,12(4):437-449. (in Chinese))

[15] 谢省宗. 闸门振动的流体弹性理论[J]. 水利学报,1963(5):64-67. (XIE Xingzong. The hydro-elastic theory of gate vibration [J]. Journal of Hydraulic Engineering,1963(5):64-67. (in Chinese))

[16] 王国玉,曹树良. 通气对空化引起振动的影响[J]. 水力发电学报,2001,20(2):55-62. (WANG Guoyu,CAO Shuliang. Ventilation effects on cavitation induced-vibration[J]. Journal of Hydroelectric Engineering,2001,20(2):55-62. (in Chinese))

[17] 朱瑞虎,吴腾,丁坚. 开通闸条件下船闸安全运行试验[J]. 河海大学学报(自然科学版),2017,45(5):445-450. (ZHU Ruihu,WU Teng,DING Jian. Experimental study on the safe operation of ship lock running as an open channel[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2017,45(5):445-450. (in Chinese))

[18] 杨斌,干量,刘礼华. 三峡升船机闸门气压伸缩水封水密特性仿真设计[J]. 河海大学学报(自然科学版),2018,46(6):558-564. (YANG Bin,GAN Liang,LIU Lihua. Simulation design on the water-tightness of air-pressure telescopic water seal in the Three Gorges ship lift gate[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2018,46(6):558-564. (in Chinese))

[19] 梁超. 高坝泄流诱发结构和场地振动机理和减振方法研究[D]. 天津:天津大学,2017.

[20] DEMIREL E,ARAL M M. A design for vortex suppression downstream of a submerged gate[J]. Water, 2020,12(3):750.

[21] PENG Yong,ZHANG Jianmin,XU Weilin, et al. Experimental optimization of gate-opening modes to minimize near-field vibrations in Hydropower Stations[J]. Water,2018,10(10):1435.

[22] ERDBRINK C D,KRZHIZHANOVSKAYA V V,SLOOT L P A. Reducing cross-flow vibrations of underflow gates:experiments and numerical studies[J]. Journal of Fluids and Structures,2014,50:25-48.

[23] 陈晓楠,靳燕国,许新勇,等. 南水北调中线干线智慧输水调度的思考[J]. 河海大学学报(自然科学版),2023,51(5):46-55. (CHEN Xiaonan,JIN Yanguo,XU Xinyong,et al. Thinking on smart water dispatching in the South-to-North Water Diversion Middle Route Project[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2023,51(5):46-55. (in Chinese))

[24] 梁超,练继建,张金良. 高坝泄流诱发闸门伴生振动的双调谐 TMD 减振方法研究[J]. 振动与冲击,2019,38(18):1-8. (LIANG Chao,LIAN Jijian,ZHANG Jinliang. Double TMD vibration damping method for reducing the hydraulic gate accompanying vibration induced by high dam flood discharge[J]. Journal of Vibration and Shock,2019,38(18):1-8. (in Chinese))

[25] 季树凯,周灵杰,汉高,等. 引黄涵闸闸门关闭过程振动分析[J]. 水利水电技术,2001,32(12):64-66. (JI Shukai,ZHOU Lingjie,HAN Gao,et al. Analysis of vibration in the process of close of culvert gate[J]. Water Resources and Hydropower Engineering,2001,32(12):64-66. (in Chinese))

[26] 梁超,张金良,练继建,等. 高坝泄流诱发事故闸门的爬行振动研究[J]. 水利学报,2018,49(12):1503-1511. (LIANG Chao,ZHANG Jinliang,LIAN Jijian,et al. Research on slip-stick vibration of emergency gate induced by high dam flood discharge [J]. Journal of Hydraulic Engineering,2018,49(12):1503-1511. (in Chinese))

[27] 刘昉,吴敏睿,李文胜,等. 弱爬振现象对平板闸门振动的影响研究[J]. 水力发电学报,2021,40(2):149-157. (LIU Fang,WU Minrui,LI Wensheng,et al. Study on influence of weak climbing vibration on plane gate vibration [J]. Journal of Hydroelectric Engineering,2021,40(2):149-157. (in Chinese))

[28] 王延召,徐国宾,刘昉. 事故闸门爬行振动数值反演与影响因素分析[J]. 水力发电学报,2022,41(2):55-62. (WANG Yanzhao,XU Guobin,LIU Fang. Numerical inversion of creeping vibration of emergency gates and its influencing factors[J]. Journal of Hydroelectric Engineering,2022,41(2):55-62. (in Chinese))

[29] WANG Yanzhao,XU Guobin,LI Wensheng,et al. Characteristics of plane gate vibration and holding force in closing process by experiments[J]. Applied Sciences,2020,10(17):6111.

[30] DAI H L,WANG L,QIAN Q,et al. Vortex-induced vibrations of pipes conveying fluid in the subcritical and supercritical regimes [J]. Journal of Fluids and Structures,2013,39:322-334.

[31] 沈春颖,何士华,杨婷婷,等. 平面直升闸门流固耦合振动同步测试模型试验研究[J]. 振动与冲击,2016,35(19):219-224. (SHEN Chunying,HE Shihua,YANG Tingting,et al. Model tests for synchronous measurement of fluid-structure interaction vibration of a plane vertical lift gate[J]. Journal of Vibration and Shock,2016,35(19):219-224. (in Chinese))

[32] 刘延柱,陈立群. 非线性振动[M]. 北京:高等教育出版社,2001.