

# 长输水隧洞中段有压平面闸门启闭力及稳定性试验

杨 敏,牛利敏,陈 林,李会平

(天津大学建筑工程学院,天津 300072)

**摘要:**针对某输配水工程长输水隧洞中段有压平面闸门的动水启闭过程,根据重力相似准则建立水力学模型以研究闸门动态启闭力和静态持住力的变化特征及闸门底缘的水动力特性。结果表明:闸门的动水启闭力在小开度范围内变化剧烈且最大启闭力发生在相对开度0.05附近,持住力与启闭力随闸门开度变化规律基本一致;与底主梁不开孔方案比较,当底主梁开孔率27%时闸门最大动水启门力和闭门力分别减小5.7%和7.8%,降低幅度较小;该工程设计底缘形式的闸门振动是稳定的,闸门整体结构与水流发生共振的可能性很小,能够保障闸门稳定运行。

**关键词:**平面闸门;长输水隧洞;启闭力;底主梁开孔;底缘形式;稳定性

**中图分类号:**TV663+.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2016)03-0041-06

**Experimental study on hoisting force and stability of pressured plane gate located in middle of long water delivery tunnel//**YANG Min, NIU Limin, CHEN Lin, LI Huiping( *School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China* )

**Abstract:** Based on the gravity similarity criterion, a hydraulic model was built so as to study the variation characteristics of the dynamic hoisting force and static holding force of the gate and the hydrodynamic characteristics of its bottom frontier during the operation process of the pressured plane gate located in the middle of a long water delivery tunnel for a water distribution network. The results show that the hoisting force changes greatly within the range of the small opening degree and the maximum hoisting force occurs near the relative opening degree of 0.05. The holding force and hoisting force show a similar change with the gate opening. Compared with the non-perforated girder, the maximum opening and closing forces for the bottom girder with an opening rate of 27% decrease by 5.7% and 7.8%, respectively, showing a small reduction. The vibration of the gate with a designed type of bottom frontier is stable for the project and resonance of the gate and water flow is nearly impossible, guaranteeing the stability of the gate operation.

**Key words:** plane gate; long water delivery tunnel; hoisting force; perforated bottom girder; type of bottom frontier; stability

闸门启闭力的估算对闸门启闭机的选型有重要作用,是闸门正常运行的前提。潜孔式平面闸门在启闭过程中门体水动力荷载受闸门结构体型、作用水头、流速、启闭速度等诸多因素的影响,变化非常复杂,目前还很难准确计算,一直是闸门设计中的重点和难点<sup>[1-2]</sup>。常见的潜孔式平面闸门一般布置在隧洞进出口处,启闭过程中闸门上下游水位保持不变,闸门井内水位变化较小。而当闸门布置在长距离输水隧洞中间位置时,成为有压闸门,闸门在启闭过程中水力条件跟常见潜孔式平面闸门不同,表现在若闸门为下游侧止水,闸门在全关状态时闸门井内水位与隧洞进口处水位相同;若闸门为上游侧止水,则闸门在全关状态时闸门井水位与下游水位相

同,闸门在启闭过程中闸门井内水位随开度变化降低或升高。闸底过流流量与水头、开度、流量系数等有关,对于长输水隧道中段有压平面闸门,由于闸门井内水位随开度变化无法准确计算且随开度增大的变化规律尚不明确,流量变化可能不是单一的递增或递减,且变化还与闸门在长隧洞中的位置有关,水力条件很复杂。

前人的研究大多针对常见潜孔式平面闸门的启闭力<sup>[3-5]</sup>,而对长距离输水隧洞中段的有压闸门启闭力较少提及。由于水力条件的复杂性和水力参数的不确定性,很难通过数值模型对此进行研究。本文通过水力学模型试验研究该类闸门在动水中的启闭力特性、底主梁开孔对长距离输水隧洞中段有压闸

作者简介:杨敏(1956—2015),男,教授,主要从事水工水力学研究。E-mail:minyang@163.com

通信作者:牛利敏(1989—),女,硕士研究生,主要从事水工水电站建筑物动静力分析研究。E-mail:niulimin1989@163.com

门启闭力的影响及闸门底缘脉动压力特性,通过流激振动响应分析闸门的振动稳定性。

## 1 模型设计及试验方法

### 1.1 原型简介

某输配水工程的输水隧洞长 112 km,该控制闸闸门位于距隧洞下游出口 500 m 处,为长输水隧洞中段有压控制闸。工程上游水库设计水位 108 m,校核水位 114 m,最低引水水位 86 m,输水隧洞设计过流流量  $38.8 \text{ m}^3/\text{s}$ ,设计加大流量  $47.6 \text{ m}^3/\text{s}$ 。闸室段孔口尺寸为  $4.0 \text{ m} \times 5.0 \text{ m}$  (宽 $\times$ 高),闸门面板朝向来水侧,封水布置在闸门下游边梁后翼缘,钢闸门尺寸为  $5.47 \text{ m} \times 5.40 \text{ m}$  (宽 $\times$ 高),总质量 35 t。工作闸门门叶结构示意图如图 1 所示。

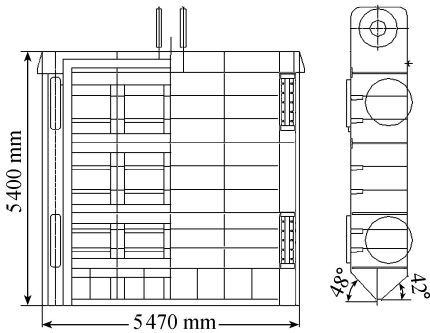


图 1 工作闸门门叶结构示意图

### 1.2 模型总体布置

根据试验目的和试验条件,隧洞及闸门水力学模型按重力相似准则设计,并考虑阻力相似,模型比尺选定  $\lambda_l = 25$ ,相应的力比尺  $\lambda_F = 15625$ ,速度比尺  $\lambda_v = 5$ ,流量比尺  $\lambda_Q = 3125$ ,时间比尺  $\lambda_t = 5$ 。模型总体布置示意如图 2 所示,模型范围包括上游引水段、中部控制闸闸室段、下游配水井段 3 个部分,调节阀上游隧洞段采用钢管制作,调节阀下游隧洞段及闸室段采用有机玻璃制作以方便观察水流流态。图 3 为中部控制闸闸室段试验模型。闸门中墩右侧闸门采用有机玻璃制作,满足几何相似,左侧闸门采用有机玻璃制作并用铅块进行配重,满足几何相似和重力相似。

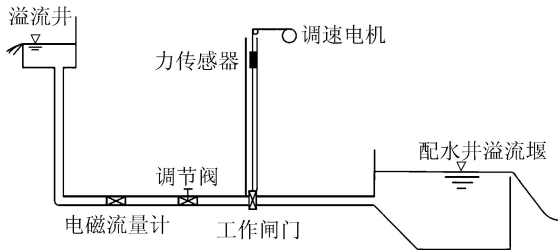


图 2 模型总体布置示意图

### 1.3 试验方法

潜孔式平面钢闸门启闭力的计算方法按照



图 3 闸门控制室段试验模型

SL74—2013《水利水电工程钢闸门设计规范》确定。平面钢闸门启闭力的计算包括闸门门顶下压力、底缘上托力、下吸力、止水与埋件的摩阻力、行走支承与轨道间的摩阻力、闸门自重。在闸门中墩右侧闸门上下游面板、底缘斜板及下游侧底主横梁布置若干测点测量闸门的动水压力;左侧闸门吊索上方装有力传感器并通过调速电动机控制闸门启闭速度来测量持住力和动态启闭持住力。

通过拉力传感器直接测量闸门启门力和闭门力,规定启闭力竖直向上方向为正。启门力和闭门力均是指钢丝绳对闸门竖直向上的拉力,其中启门力的大小和方向与规范中一致,闭门力指闭门持住力,与规范中规定的闭门力大小相等方向相反。动态闭门过程中若钢丝绳受拉,即传感器测得闭门力为正时闸门可以正常关闭。原型和模型闸门止水摩擦力一般很难相似,目前闸门启闭力试验主要通过测量闸门门体的动水压力分布,计算作用在闸门上的各项水力载荷,再结合闸门摩擦系数计算运行时的止水摩擦力,最后得到闸门动水关闭的启闭力和持住力。闸门最大启闭力可通过试验结果加上修正项得到。按闸门 6 min 完成闭门从全开到全关和启门从全关到全开过程模拟。

### 1.4 试验工况设计

闸门控制室上游溢流井控制上游水头,中间设有电磁流量计及调节阀,以控制调节管道过流流量,下游配水井的溢流堰保持溢流状态以控制下游水位。为方便分析比较,增加一组流量为 2 倍设计流量 ( $Q_0 = 77.6 \text{ m}^3/\text{s}$ ) 的试验工况。试验工况见表 1 ( $Z_u$  为上游水位,  $H_d$  为水头差,  $Q_0$  为闸门全开初始过流流量),工况 1-1、1-2、1-3 水头差相同流量不同,工况 1-1、2-1、3-1 流量相同水头差不同。表中数据均已换算到原型。相对开度 0.2 以下的闸门开度定义为小开度。试验时每隔 0.1 相对开度测量闸门持住力。

对于长输水隧洞中段的有压平面闸门无法进行整体模拟,水力条件难以相似,试验中通过流量调节

表 1 试验工况

| 工况  | $Z_u/\text{m}$ | $H_d/\text{m}$ | $Q_0/(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$ |
|-----|----------------|----------------|----------------------------------------|
| 1-1 | 108            | 36.55          | 38.8                                   |
| 1-2 | 108            | 36.55          | 58.0                                   |
| 1-3 | 108            | 36.55          | 77.6                                   |
| 2-1 | 86             | 14.55          | 38.8                                   |
| 3-1 | 114            | 42.55          | 38.8                                   |

阀调节流量并起到模拟长输水隧洞沿程水头损失的作用。上游溢流井由挡板控制水位,保持上游溢流井和下游配水井为溢流状态,并在闸门处于全开(开度 $e=1$ )状态时调节管道过流流量,试验过程中不再转动流量调节阀。同一工况下重复闭门、启门过程两次测量闸门动水启闭力,待各开度闸底水流流态稳定后测量闸门静态持住力及面板和底缘的脉动压力。

## 2 启闭力和持住力特性

### 2.1 启闭力变化特征

试验测得在不同工况下闸门动水启闭力随闸门开度的变化规律基本一致。工况 1-1 启门力和闭门力随开度变化曲线见图 4。从图 4 可知,动水启门时,启门力随闸门相对开度增大而急剧上升,至闸门相对开度 0.05 左右时达到最大值;之后启门力迅速下降,在闸门相对开度约 0.2 之后启门力下降渐趋平缓,相对开度约 0.3 以后闸门启门力基本在一定值附近波动。

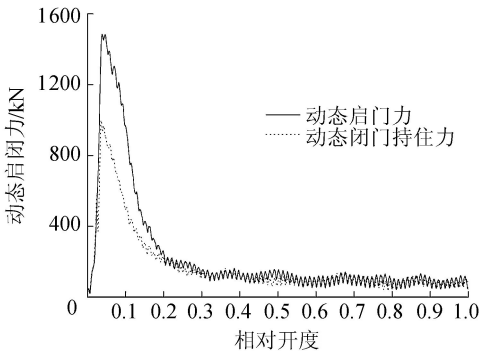


图 4 工况 1-1 闸门动态启闭力与开度的关系

影响闸门启闭力的因素主要有闸门自重、门顶水柱压力、止水和滚轮摩擦力、闸门底缘压力等。闸门自重是一定的,摩擦力与闸门面板上压力有关,试验测得各开度下闸门面板压力随开度呈下降趋势但下降幅度很小,因此,闸门摩擦力变化对启闭力影响较小,且相对于门顶水柱压力较小。而闸门在全关状态时,由于闸门下游面板止水,闸门井内水位较高,闸门门顶垂直水压力较大。闸门在开启过程的小开度范围内,闸门从不过流向过流状态转变时闸下水流流态发生剧烈变化,由底缘斜板测点和下游底主梁测点的脉动压力可知,闸门底缘压力表现为上托力,其值相对于门顶水压力较小,因此在开启过程的小开度范围内闸门启门力急剧上升达到最大

值。随着开度逐渐增大,闸门井水位逐渐下降,且在相对开度 0.2 之前下降速度较快,门顶水柱压力随之减小,闸门底缘上托力随闸门开度的增大有小幅度的减小,闸门启门力随之减小,在此之后闸门井水位下降趋缓,同时大开度时闸底过流流量增加缓慢,流速变化较小,过流流态基本稳定,闸门底缘上托力变化较小,对闸门启门力影响较小。

闸门在各工况下的最大启门力和最大闭门力见图 5。在上游水位保持不变,水头差相同时,随着流量的增大,闸门最大启门力和最大闭门力也随之增大(工况 1-1、1-2、1-3)。在上下游水位相同时,流量增加 1 倍,最大启门力由 1 577.8 kN 增加到 1 852.2 kN,增加 17%;最大闭门力则由 1 068.2 kN 增大到 1 156.4 kN,增加 9%(工况 1-1、1-3)。在管道过流流量不变时,随着上下游水头差增大,闸门最大启门力和最大闭门力也随之增大(工况 1-1、2-1、3-1)。最大启门力在水头差 14.55 m 时为 872.2 kN,水头差 42.55 m 时则为 1 871.8 kN,增加 115%;最大闭门力则由 656.6 kN 增大到 1 146.6 kN,增加 75%。可以看出,长输水隧洞中段有压闸门的最大启闭力对上下游水头差的变化比较敏感,而流量的变化对闸门的最大启闭力影响较小。

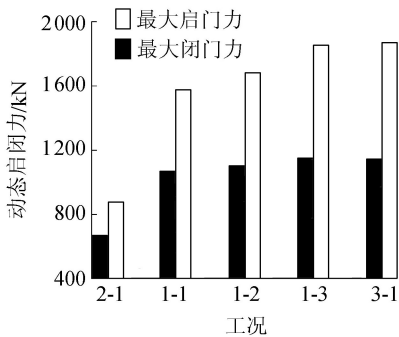


图 5 各工况下最大启门力和闭门力

小开度时门顶水柱压力较大,对闸门的最大启闭门力进行摩擦力校核,接近全关状态时面板压力取上游最高水头 74 m,止水摩擦系数取最大值 0.7,滚动摩擦力臂取 1 mm,得到闸门最大启闭力为 2 185 kN,最大闭门力为 877.9 kN,闸门启闭机容量 5 000 kN 能满足启闭要求。

### 2.2 持住力变化特征

图 6 为闸门全开,初始流量相同、上下游水头差不同(工况 1-1、2-1、3-1)时闸门各个开度下的时均持住力。与图 1 对比可知,闸门持住力变化与动水启闭过程曲线规律基本一致。在最小的相对开度条件下测得的闸门持住力最大,且随着开度的增大,闸门持住力降低。

对常见潜孔式平面闸门的研究<sup>[6-8]</sup>表明,闸门持

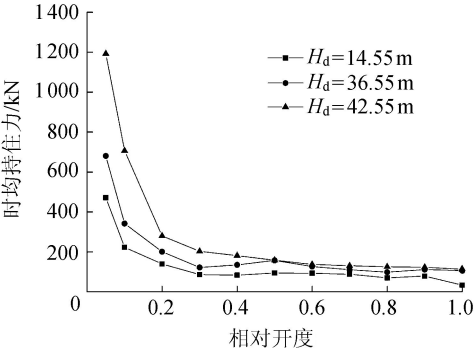


图6 时均持住力与开度的关系

住力最大值一般不出现在较小开度时,而是出现在中间某个开度。而长输水隧洞中的平面闸门最大持住力出现在较小开度,其主要原因是开度较小时门顶水柱压力较大。因此,闸门在隧洞中的布置位置对闸门水动力特性有很大的影响。

### 3 底主梁开孔对启闭力的影响

影响闸门启闭力的主要因素为水流的动水垂直力<sup>[9]</sup>,包括下吸力、上托力、门顶水柱压力。平面闸门底缘形式决定着底缘压力分布,对闸门动水垂直力有着较重要的影响,进一步影响着闸门启闭力和闸门启闭机的选择。启门力的主要影响因素为水流的下吸力,即闸门系统各部件上下表面的水压力之合力,主要是底主梁上下表面的水压力差,其他部件上下表面的水压力差相对较小。章晋雄等<sup>[7]</sup>的Mica水电站进水口平面闸门底缘优化方案试验表明,在底主梁开孔能够有效降低闸门启闭力,随着底缘及底主梁开孔增大,闸门竖向水力荷载下降。练继建等<sup>[8]</sup>的叙利亚迪什林水电站底孔事故闸门持住力试验表明,闸门底缘开孔能够明显降低闸门持住力和启闭力。周通<sup>[10]</sup>的积石峡水电站泄洪洞中孔事故闸门底主梁开孔率优化研究表明,当底主梁开孔率30%以内时,优化效果随开孔面积的增加而提高;当底主梁开孔率大于30%时,优化效果与底主梁开孔率的关系不再明显。

为进一步研究设计底缘形式的闸门底主梁开孔对长输水隧洞有压平面闸门启闭力的影响,设计3种闸门结构方案。方案一:初始方案,即底主梁不开孔;方案二:底主梁开4个直径0.3m的孔,开孔面积占10%;方案三:底主梁开4个直径0.5m的孔,开孔面积占27%。在工况1-1条件下进行试验。

3种闸门结构动水启门力和动水闭门力随开度变化的规律基本一致,最大值都发生在相对开度0.05附近。各方案下的最大启门力和最大闭门力如表2所示。底主梁开孔时,闸门动水启闭力变化趋势与不开孔时相同,相同闸门开度下启闭力量值相

差不大。闸门底主梁开孔后,最大启门力和最大闭门力都有一定程度的降低,开孔面积占比10%时最大启门力和闭门力分别为1470.0kN和989.8kN,开孔面积占比增大到27%后的最大启闭力分别为1450.4kN和921.2kN,相比不开孔方案分别降低5.7%和7.8%,降低幅度不大。表3为上述开孔率与最大启闭力关系成果与文献<sup>[7-8]</sup>的对比。因此,对于该长输水隧洞工程中段设计底缘形式的闸门,底主梁开孔对降低闸门最大动水启闭力作用不明显,同时闸门底主梁开孔率过大会削弱闸门结构强度,对结构自身安全不利,实际工程中应在保证闸门自身结构强度的条件下再考虑是否开孔。

表2 底主梁开孔方案下闸门最大启闭力 kN

| 启闭力 | 方案一    | 方案二    | 方案三    |
|-----|--------|--------|--------|
| 启门力 | 1538.6 | 1470.0 | 1450.4 |
| 闭门力 | -999.6 | -989.8 | -921.2 |

表3 开孔率与最大启闭力关系研究成果对比 %

| 研究成果              | 开孔率  | 最大启闭门力降幅      |
|-------------------|------|---------------|
| 文献 <sup>[7]</sup> | 23.9 | 14.3(闭)       |
| 文献 <sup>[8]</sup> | 21.6 | 18.7(闭)       |
| 本文                | 10   | 4.5(启),1.0(闭) |
|                   | 27   | 5.7(启),7.8(闭) |

## 4 闸门运行稳定性

### 4.1 闸门底缘压力

闸门在运行过程中启闭力与水流流态和闸门结构形式,特别是与闸门底缘形式密切相关,平面闸门底缘形式决定了闸下水流流态<sup>[11]</sup>,且闸门底缘体型影响闸门抗振效果<sup>[12]</sup>,对闸门系统的安全运行有着重要的作用。工程中闸门采用具有前倾角的混合型闸门结构底缘形式,分别在底缘斜板和下游侧底主横梁的中间部位左右对称布置两个测点以测量闸门底缘的上托力。图7和图8分别为校核工况下闸门底缘斜板和下游侧底主横梁测点的脉动时均压力和脉动压力均方差与开度的关系。其中,1号和2号测点布置在底缘斜板上左右侧中心,3号和4号测

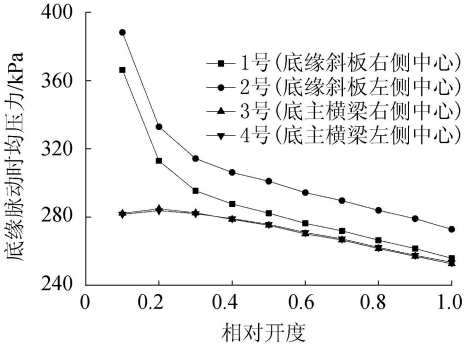


图7 底缘斜板和底主横梁时均压力与开度关系

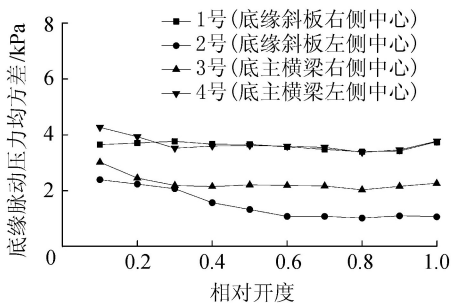


图8 底缘斜板和主横梁脉压均方差与开度关系

点布置在底主横梁上左右侧中心。

根据测试结果,脉动压力时均值变化符合一般规律,流量水头越大时均压力越大。底缘斜板上1号测点的时均压力值小于2号测点,是由于水流流态在沿闸门宽度方向上不一致,在靠近中墩的2号测点处水流流速较大,对底缘的冲击压力较大。底主横梁上3号和4号测点脉动压力在各开度时的大小及随开度的变化基本一致。总体来看各测点脉动压力随着开度的增大呈下降趋势。水流在不同开度下底缘斜板和下游侧主梁上的脉动压力均方差集中在1~5 kPa之间,最大值不超过5 kPa,脉动部分较小。

从试验过程中水流流态来看,闸门启闭速度较小,在闸门整个启闭过程中,闸门前后均为满流,闸门底缘和下游没有出现立轴漩涡和漩滚水流等不稳定的水流流态,闸下过流平顺,但需要注意的是闸门实际运行时闸下出流是否会存在明满流过度或明流流态,实际工程运行时应对原型加强观测,进一步论证通气孔的合理性和对动水启闭力的影响。

#### 4.2 闸门自振特性分析与共振校核

流激振动问题涉及到水流与结构的相互作用,运用有限元软件 ANSYS 建立闸门的三有限元模型,在闸门各主要构件满足强度和刚度的基础上考虑流固耦合效应对闸门模态的影响,分别模拟闸门在空气和水中的自振特性。在水中的计算区域为上下游各15 m水体。平面闸门干模态(空气中)、湿模态(水中)下有限元计算模型如图9和图10所示。

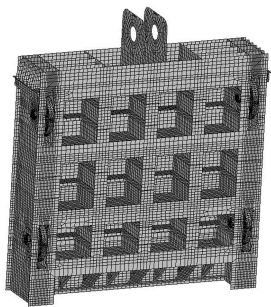


图9 干模态闸门有限元计算模型

在自振特性分析中,前几阶振动均发生在吊耳处,工程上更为关心的是闸门整体振动,滤去闸门局

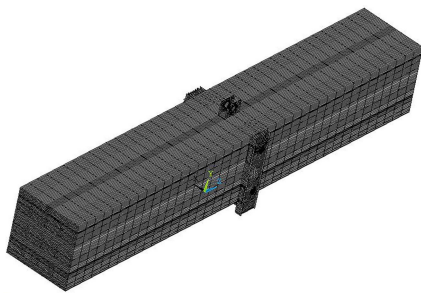


图10 湿模态闸门有限元计算模型

部结构振动,得到闸门的干模态和湿模态整体振动,前3阶自振频率如表4所示。干模态第1阶振动为闸门上部区域顺水流方向的弹性振动,第2阶振动为闸门上、下部垂直于水流方向的反向振动(扭动),第3阶振动为闸门下部区隔顺水流方向的弹性振动。湿模态第1阶振动为闸门整体顺水流方向的弹性振动,第2阶为闸门上部区域沿水流方向的弹性振动,第3阶为闸门整体顺水流方向的扭动。闸门干、湿模态基频分别为71.63 Hz和31.81 Hz,频率较大。湿模态下由于面板上下游水体的阻尼作用,基频有相应的降低,流体对闸门自振特性影响显著。

表4 闸门整体结构干、湿模态的前3阶自振频率 Hz

| 模态  | 1阶    | 2阶    | 3阶    |
|-----|-------|-------|-------|
| 干模态 | 71.63 | 81.8  | 83.55 |
| 湿模态 | 31.81 | 53.11 | 74.97 |

对闸门各测点的脉动压力时程线进行频谱分析,计算得到各种工况下各个测点作用水流的脉动主频均小于5 Hz。典型测点(2号)在最不利工况(工况3-1)下的归一化功率谱密度如图11所示。

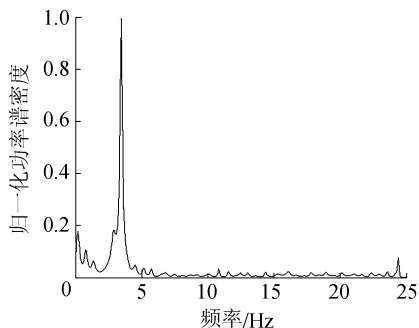


图11 典型测点(2号)功率谱密度

一般而言,水流的频率较小,本试验中根据脉动压力频谱分析结果,各测点水流脉动压力的主频均在5 Hz以内,而闸门的干、湿模态基频较大,因此,该工程中的平面闸门与水流发生共振的可能性不大。

## 5 结 论

a. 对布置在长隧洞中段有压平面闸门的水力学模型试验表明,闸门启闭过程中小开度时动水垂直压力变化较大,最大启闭力和持住力峰值集中在

小开度范围以内,并且随开度的增减变化很快,闸门动水启闭的最不利开度在小开度范围内。

b. 与前人的常见潜孔式闸门底主梁开孔研究成果对比发现,在潜孔式闸门底主梁开孔能够显著降低闸门启闭力,而对于长输水隧洞中段的有压平面闸门,当底主梁开孔增大到 27% 时闸门最大动水启闭力分别只降低 5.7% 和 7.8%,降幅不大,底主梁开孔对最大启闭力降低作用不明显。

c. 设计底缘形式的闸门闸下水流平顺,脉压时均值在小开度内变化较大,脉压均方差在整个开度范围内变化较小,闸门结构干、湿模态的基频与水流脉动主频相差较大,发生共振的可能性不大。模型试验表明该工程闸门门底水流的下曳力变化不大且数值较小,底缘压力对启闭力影响较小。但平面闸门运行中水流诱发闸门结构弹性变形振动因素有很多,例如水封漏水引起的闸门整体自激振动,而这个问题在模型试验中无法模拟,因此,对于长输水隧洞下的深孔闸门水流诱发闸门结构振动问题还有待于进一步深入研究。

参考文献:

[ 1 ] 余俊阳,易春,罗文强,等.小湾拱坝放空底孔闸门设计研究[C]//水电 2006 国际研讨会论文集.北京:中国水利水电出版社,2006;126-134.

[ 2 ] 龙朝晖.溪洛渡水电站深孔事故闸门和工作闸门的设计[J].水电站设计,2003,19(1):12-18. ( LONG Zhaohui. Design of deep hole accident gate and working gate of Xiluodu Hydropower Station[J]. Electromechanical Technology of Hydropower Station,2003,19(1): 12-18. ( in Chinese))

[ 3 ] 刘永胜,严根华,赵建平.电站进水口快速闸门振动特性研究[J].固体力学学报,2011,10(增刊1):382-387. ( LIU Yongsheng, YAN Genhua, ZHAO Jianping. Study on vibration characteristics of stop gate[J]. Acta Mechanica Solida Sinica,2011,10(Sup1):382-387. ( in Chinese))

[ 4 ] 练继建.黄河积石峡水电站工程中孔泄洪洞进口水力学及闸门振动试验报告[R].天津:天津大学,2006.

[ 5 ] 郝鑫,黄海燕,王海军,等.高水头平面闸门小开度的数值模拟与试验对比[J].南水北调与水利科技,2012,10(1):30-34. ( HAO Xin, HUANG Haiyan, WANG Haijun, et al. Comparison of numerical simulation and experimental measurements on bulkhead gate with high head and small opening [ J ]. South to North Water Transfers and Water Science&Technology, 2012, 10 ( 1 ) : 30-34. ( in Chinese ) )

[ 6 ] 张文远.溪洛渡水电站泄洪洞事故闸门启闭力及流激振动试验研究[D].北京:中国水利水电科学研究院,2006.

[ 7 ] 章晋雄,吴一红,张东,等.基于改造底缘的水电站事故平面闸门启闭力优化试验研究[J].水利水电技术,

2013,44(7):134-137. ( ZHANG Jinxiong, WU Yihong, ZHANG Dong, et al. Experimental study on optimization of hoisting force of emergency plane gate for hydropower station based on improvement of its bottom edge [ J ]. Water Resource and Hydropower Engineering, 2013, 44 ( 7 ) : 134-137. ( in Chinese ) )

[ 8 ] 练继建,林继铺,叙利亚迪什林水电站底孔事故闸门持住力实验报告[R].天津:天津大学,1995.

[ 9 ] 李洪波,韩平.闸门水力特性综述[J].南水北调与水利科技,2005,3(2):56-58. ( LI Hongbo, HAN Ping. Summarization of hydraulic characteristic of the sluice gate [ J ]. South to North Water Transfers and Water Science&Technology, 2005, 3 ( 2 ) : 56-58. ( in Chinese ) )

[ 10 ] 周通.高压平面闸门水力特性及流激振动研究[D].天津:天津大学,2006.

[ 11 ] 肖兴斌,王业红.高水头平板闸门水力特性研究[J].水利水电科技进展,2001,21(4):29-32,46. ( XIAO Xingbin, WANG Yehong. Study on the hydraulic characteristic of plane gate with the high water head [ J ]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2001, 21 ( 4 ) : 29-32, 46. ( in Chinese ) )

[ 12 ] 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 Genhua, 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 ) )

( 收稿日期:2015 - 04 - 18 编辑:郑孝宇)

+++++  
(上接第 40 页)

[ 12 ] 王保田,陈西安.悬挂式防渗墙防渗效果的模拟试验研究[J].岩石力学与工程学报,2008,27(1):2767-2771. ( WANG Baotian, CHEN Xian. Research on effect of suspended cut-off wall with simulation test [ J ]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27 ( 1 ) : 2767-2771. ( in Chinese ) )

[ 13 ] 王晓燕,党发宁,田威,等.大渡河某水电站围堰工程中悬挂式防渗墙深度的确定[J].岩土工程学报,2008,30(10):1565-1568. ( WANG Xiaoyan, DANG Faning, TIAN Wei, et al. Determination of depth of suspended cut-off walls in cofferdam of a hydraulic power station in Dadu River [ J ]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30 ( 10 ) : 1565-1568. ( in Chinese ) )

[ 14 ] 罗玉龙,吴强,詹美礼,等.考虑应力状态的悬挂式防渗墙-砂砾石地基管涌临界界降试验研究[J].岩土力学,2012,33(增刊1):73-78. ( LUO Yulong, WU Qiang, ZHAN Meili, et al. Study of critical piping hydraulic gradient of suspended cut-off wall and sand gravel foundation under different stress states [ J ]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33 ( Sup1 ) : 73-78. ( in Chinese ) )

[ 15 ] SKEMPTON A W, BROGAN J M. Experiments on piping in sandy gravels[J]. Geotechnique, 1994, 44(3):449-460.

( 收稿日期:2015 - 05 - 27 编辑:郑孝宇)