

DOI:10.13476/j.cnki.nsbdcqk.2020.0016

刘朋,徐国宾.平板闸门流激振动效应对启门力的影响[J].南水北调与水利科技,2020,18(1):144-149,175. LIU P, XU G B. Influence of flow vibration effect of flat gate on opening force[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2020, 18(1): 144-149, 175. (in Chinese)

平板闸门流激振动效应对启门力的影响

刘朋,徐国宾

(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:为探究流激振动对闸门启闭力的影响机理,通过对固定的上、下游水位和底缘形式的平板闸门进行流固耦合分析,结果表明引起闸门振动的激振力和由闸门振动位移产生的摩擦系数和摩擦力臂的变化是造成启闭力变化的主要原因。在前人统计的闸门振动较大的不利开度的基础上,利用波形合成法以及振动理论提出作用于闸门面板上的激振力的计算公式,并考虑其对闸门启门摩擦系数、摩擦力臂以及启门摩擦力的影响,总结出流激振动效应下平板闸门启门力的计算方法。通过与石泉水电站中孔平板闸门启门力实测资料对比发现,理论计算的结果与实际工程的实测值吻合良好,可为实际工程的启闭力计算提供一定的科学依据。

关键词:平板闸门;流激振动;激振力;启门力

中图分类号:TV663.1 文献标志码:A 开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Influence of flow vibration effect of flat gate on opening force

LIU Peng, XU Guobin

(State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety, Tianjin University, Tianjin 300354, China)

Abstract: In order to explore the mechanism of the influence of flow-induced vibration on the opening and closing force of the gate, the fluid-solid coupling analysis of the plane gates in the form of fixed upper and lower water level and bottom edge showed that the exciting force causing the vibration, the variation of friction arm and coefficient of friction caused by vibration displacement of the gate were the main causes of the change of the opening and closing force. On the basis of the unfavorable opening degree of the gate vibration calculated by the predecessors, the calculation formula of the exciting force acting on the gate panel was proposed by the waveform synthesis method and the vibration theory. The friction coefficient and friction force of the gate were considered in the calculation method of the opening force of the plane gates under the effect of the flow vibration. Comparing with the measured data of the middle plate of the Shiquan Hydropower Station, the theoretical calculation results were in good agreement with the actual measured values, which can provide a scientific basis for the calculation of the opening and closing force of the actual project.

Key words: flat gate; flow-induced vibration; exciting force; opening force

闸门是水利建筑物中必不可少的一部分,闸门的启闭问题关系到闸门能否正常运行,进而影响到

整个水利枢纽能否正常发挥其应有的功能。在实际工程中,影响闸门启闭的因素有很多,如闸门自重、

收稿日期:2019-05-23 修回日期:2019-06-24 网络出版时间:2019-07-05
网络出版地址:<http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.tv.20190703.1842.002.html>
基金项目:国家自然科学基金(51779166)
作者简介:刘朋(1994—),男,山东菏泽人,主要从事工程水力学方面的研究。E-mail:18302482583@163.com
通信作者:徐国宾(1956—),男,河北石家庄人,教授,博士,主要从事工程水力学方面的研究。E-mail:xuguob@sina.com

外加附重、水压力、行走(滑动)支承摩擦、止水摩擦、泥沙淤积等,随着人们研究的不断深入和工程实践经验的不断积累,逐渐意识到引起闸门振动的激振力对闸门支承和止水摩擦力的影响也是决定闸门启闭力的一个很重要的因素。因此如何科学合理地计算流激振动引起的闸门启闭力的变化对启闭机容量的选择非常重要。

在我国现行的《水利水电工程钢闸门设计规范》(SL 74—2013)^[1]中虽然给出了平板闸门启闭力的计算方法,但流激振动对闸门启门力的影响却未作阐述。关于闸门启门力的计算方法,目前做了很多研究,高仕赵^[2]通过分析大量实测资料,发现大部分闸门底孔前的泥沙淤积体为宾汉体,在此基础上给出了在泥沙淤积的情况下闸门启门力的计算方法,刘昉^[3]通过模型验证,进一步说明了闸门底缘形式对闸门启闭力以及持住力的影响,徐国宾等^[4]利用数值模拟探究了启闭速度对于闸门垂直水动力的影响。虽然在此基础上,启闭力的计算精度得到了提高,但也都未对流激振动做出考虑,对于振动严重的闸门,计算结果存在一定误差。随着实践经验的积累,人们意识到流激振动在水工闸门的安全运行中起着决定性的因素,国内外的学者从模型实验,理论分析和数值模拟等方面对其展开了研究,取得了一些研究成果。Hao Ren 等^[5]结合物理模型实验和数值模拟采用随机振动原理分析了水下卧倒闸门流激振动特性。张凡等^[6]利用 CEL 理论建立了水体弧形闸门流固耦合有限元模型,获得了闸门零开度下的振动应力、接触力、振动位移等的分布规律。Keiko Anami 等^[7]利用模型试验分析了启闭过程中闸门振动对弧形闸门转动轴以及侧止水摩擦的影响,证明了从摩擦维持稳定性到完全不稳定性和闸门失效的突然转变。相关研究着力于流激振动对结构稳定性的影响,并未考虑其对闸门摩擦力的影响,以及在强振动的情况下可能出现的闸门启闭力增大的情况,如果遇到极端运行工况,有可能造成闸门启闭困难。因此有必要在闸门启闭力计算公式中将流激振动诱发的激振力对闸门摩擦力的影响考虑进去,以提高闸门启闭力的计算精度。

本文从理论推导和实际工程对比两个方面出发,提出在动水中激振力对平板闸门启门力影响的计算方法。在固定底缘形式下,计算不同闸门开度下诱发的激振力,分析其对闸门启门力的影响。

1 理论依据

流激振动引发的激振力的方向大小随时间不断

改变,作用于平板闸门上的主要表现为水流向、垂直向以及侧向振动。水体对平板闸门的动水压力指向下游,在水流方向的激振力通过与动水压力叠加影响闸门的启闭力,而侧向振动将会对平板闸门的侧导向产生影响,增大闸门开启过程中的侧导向的摩擦力。

1.1 模型建立

本文将建立水闸三维流固耦合模型进一步说明。模型选用辽中某河渠水闸进行计算,闸门高 3 m,上游水位 2.5 m,利用 ANSYS 的 workbench 模块建立简化三维流固耦合数值模型,观测闸门面板受力、振动位移等情况。本模型计算区域取闸上游 8 m,闸下游 32 m,计算区域的水工建筑物包括闸门、消力池、尾水渠等,工程简化模型见图 1。流体和闸门采用非结构化网格,并对闸门附近进行网格加密。上游入口边界设定为压力入口,采用 UDF 文件给定上游侧静水压力入口边界条件,下游出口设定为压力出口,闸门表面设置为流固耦合面,计算采取 $k-\epsilon$ 紊流模型,并用 VOF 法监控自由液面,利用稳态计算流动稳定的流场条件作为瞬态计算的初始条件。计算中主要监测闸门启门过程中闸门面板受到的压强和不同开度下闸门面板振动位移。



图 1 计算模型简图

Fig. 1 A sketch of the computational model

1.2 水动力特性分析

在闸门止水固定良好的条件下,闸门的激振力主要来自上游水流的动水压力、闸门底缘的垂向水动力以及闸后回流对闸门造成的拍击。因此下泄的水流在过闸过程中产生的复杂的流动是造成闸门振动的一个很重要的因素。图 2 给出了闸门在不同的启门速度下面板压强随开度的变化关系,表明在开启过程中闸门面板受到的压强大于闸门所受的静水压强,而该静水压强在工程中多用于计算闸门启闭力。目前水工建筑高水头、大流量的特点,使闸门承载的实际压强与静水压强的差异可能会进一步拉大,如若设计不当,将可能导致闸门无法正常启闭。

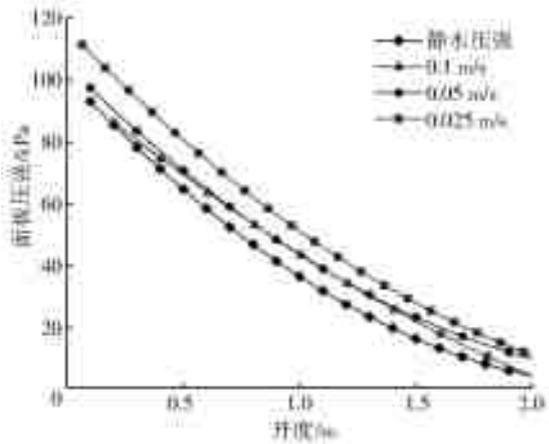


图 2 不同的启门速度下闸门压强变化
Fig. 2 Gate pressure change under different opening speeds

由图 2 知,启门速度对闸门面板的压强会有一些的影响,本次采用的启门速度 0.025、0.05、0.1 m/s 中,开启速度为 0.1 m/s 时闸门的面板压力较小,0.05 m/s 时次之,0.025 m/s 时最大,但在

不同的运行速度下,启门所需的力均大于由静水压力得到的启门力。

图 3(a)–3(d)分别为闸门相对开度为 25%和 50%时的闸门侧向和顺水流向的振动位移,从图 3 知,闸门侧向位移远小于水流向的振动位移,因此侧向振动对闸门启闭力的影响较小。在振动正位移处闸门所需要的启闭力有所增加,在负位移有所减小,同时闸门在振动过程中的振动位移变化速度远大于闸门的启闭速度,在振动负位移下闸门无法得到有效的启闭位移而会立刻转入振动正位移的状态,即闸门在启闭过程中近似处于连续的振动正位移处,造成了闸门启闭力增大的现象。闸门若在超出启闭机启闭容量和安全系数的情况下运行,将造成闸门无法正常启闭,长此以往,会加速启闭机零件的疲劳与磨损。因此提出将超出静水压力的部分纳入启闭力的计算中,确保启闭机正常工作。

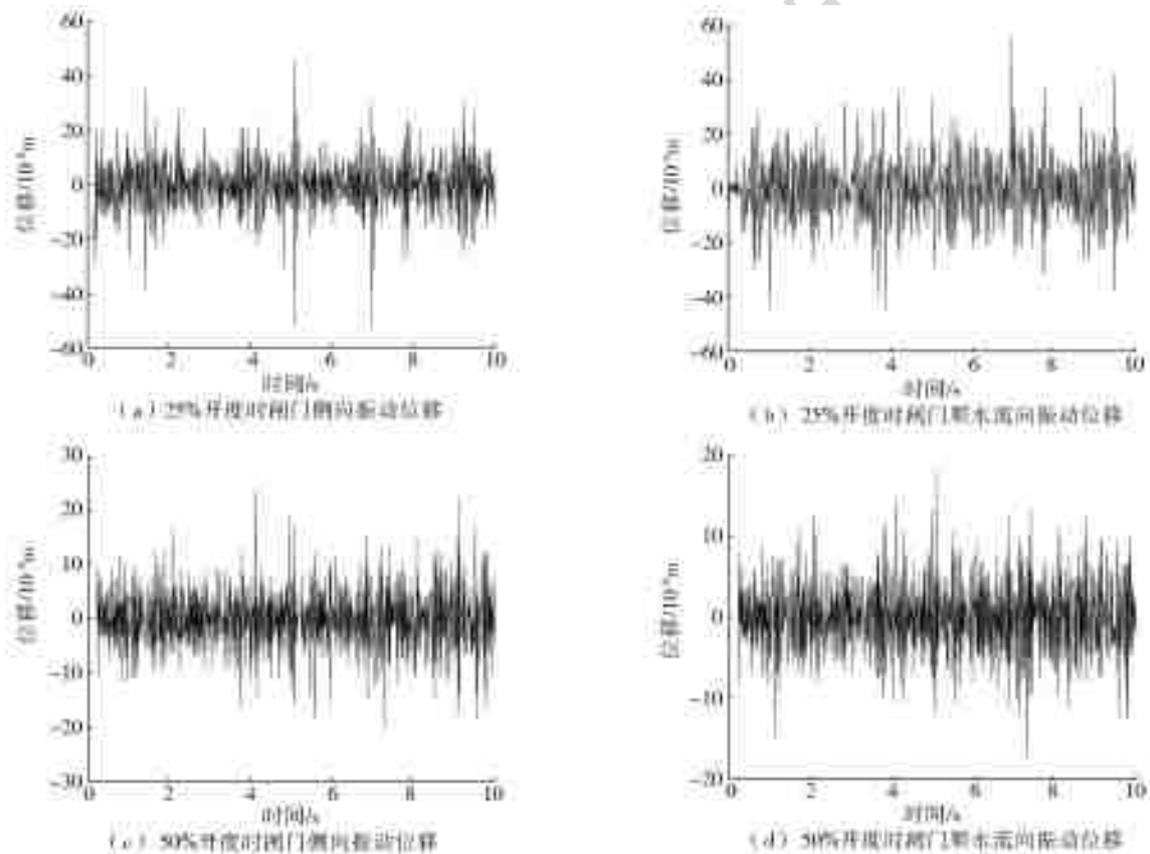


图 3 不同开度下闸门振动位移
Fig. 3 Vibration displacement of gate under different opening degrees

2 理论计算

2.1 激振力

本文在闸门底缘形式固定的前提下,分析不同开度下闸门的振动特性,选取最不利工况进行启门力计算。根据大量统计资料显示,闸门振动较大的

区域主要分布于相对开度在 37.5% 左右和 75%~85% 左右的区间^[8],因此确定为最不利开度。

评定闸门振动性能的指标主要为振动加速度、面板压力和振动频率。闸门设计首先应进行模态分析,使结构的频率避开水流荷载的不利频率,避免水力共振。其次可采用基于振动加速度的结构动力学

方程或基于点压力的波形合成法^[9]计算闸门面板所受到的水流激振力,在不利荷载工况下进行启门力计算。

采用波形合成法即将闸门面板划分成若干个单元 $A_1, A_2, A_3, \dots, A_n$, 每个单元对应布置压力测点 P_i , 将各单元面压力的时域波形在同一时刻进行合成, 形成面压力的时域波形。单元压力等于该单元压强与面积的乘积, 则面压力可表述为

$$P_j = F'(t) = \int F_j dF = \int_0^S P' dS \quad (1)$$

式中: P_j 为激振力; $F'(t)$ 为面压力; F_i 为 A_i 单元的压力; P' 为 A_i 单元的单元压强。

在观测时要对压力测点 $P_1, P_2, P_3, \dots, P_n$ 采用同步观测和同步记录, 这样才能使每个单元的压力同时合成, 得到正确的面压力。当测点数 $n \rightarrow \infty$, 即面板划分为无数个足够小的单元。式(1)可表述为

$$P_j = F'(t) = \int_0^S P' dS = \sum_{i=1}^n P'_i A_i \quad (2)$$

通过波形合成法得到的时域波形不仅包含了激振力这一随机信号的所有信息, 而且也考虑了各单元间的相互影响。但是在实际工程中不可能做到 $n \rightarrow \infty$, 即不可能布置无穷多个压力测点, 因此利用积分公式将压力测点的点压力谱转换为单元压力合力谱^[10], 公式为

$$G_{XX} = \iint_{S'S} \gamma(\omega, x, y) S_{XX}(\omega) ds \quad (3)$$

式中: $S_{XX}(\omega)$ 为点压力功率谱密度; G_{XX} 为单元压力合力谱; γ 与水流的紊流特性有关。

水流对闸门产生的激振力, 是其振动的主要外在因素, 根据动力学理论, 结构承受的惯性力 F 表示为

$$F = -Ma \quad (4)$$

式中: M 为结构的质量; a 为结构的振动加速度。

当闸门的质量一定, 振动加速度越大, 结构承受的惯性力也就越大^[11]。对于在闸门内部存在较弱的结构组件间联系的振动, 即系统的阻尼力和恢复力较小, 可利用此计算方法, 将各组件间视为铰连接, 利用加速度传感器测得各组件的振动加速度均方根值, 利用式(4)直接求得激振力。不断变化的激振力的峰值对闸门开启最不利, 但其离散性较大, 仅代表了振动的局部特征, 因此采用均方根值求解激振力。

2.2 摩擦力

在顺水流方向将激振力视为作用在闸门面板上的正压力, 和水压力一同对闸门的启门摩擦力产生

影响。摩擦力可分为支承摩擦力和止水摩擦^[12], 根据不同的支承形式选取下式计算支承摩擦力。

$$T_{zd} = \begin{cases} f_2 P_j & (\text{滑动支承}) \\ \frac{P_j}{R} (f_1 r + f) & (\text{滑动轴承}) \\ \frac{P_j f}{R} \left(\frac{P_1}{d} + 1 \right) & (\text{滚动轴承}) \end{cases} \quad (5)$$

式中: T_{zd} 为支承摩擦力; R 为滚轮半径; R_1 为滚轮轴承半径; d 为滚轮轴半径; f_1, f_2 分别为滑动摩擦系数; f 为滚动摩擦力臂。

摩擦力臂与摩擦系数在规范中只给出了取值区间, 在计算时主观影响较大, 并且由于激振力作用可能引发滚轮变形增大摩擦力臂等情况, 因此本文采用文献^[12]提供的计算方法计算摩擦系数与摩擦力臂。止水摩擦采用《水利水电工程钢闸门设计规范》(SL 74-2013)提供的计算方法计算。侧向的激振力对侧导向产生的摩擦力可根据侧导向的形式选取公式进行计算。

2.3 下吸力

在闸门开启过程中, 如果底缘形式不良, 当水流通过闸下时, 水流的一部分势能转化为动能和热能, 如果补气不充分, 会造成闸下压力能降低, 产生一定的真空度。因此在这种情况下, 开启闸门会使闸门受到来自外界大气压的附加外力, 即下吸力^[13]。

$$P_s = p_s D_2 B_{zs} \quad (6)$$

式中: P_s 为下吸力; D_2 为闸门底缘止水至主梁下翼缘的距离; B_{zs} 为闸门左右侧止水的距离; p_s 为闸门底缘 D_2 部分的平均下吸强度, 根据国内原型实测资料, 下吸力可按 20 kN/m^2 计算^[1]。对于下游倾角大于 30° 的闸门, 或虽然倾角小于 30° , 但采取了合适的补气措施的闸门, 可不计其下吸力。

2.4 平板闸门启门力计算公式

平板闸门的受力分析见图4, 综上所述, 闸门在清水中的启门力计算公式为

$$F_Q = G + G' + \bar{W} + n_T (T_{zd} + T_{zs}) + P_s \quad (7)$$

式中: F_Q 为启门力; G 为闸门重量; G' 为外加压块重量; \bar{W} 为门顶水柱的重量; n_T 为摩擦阻力安全系数, 根据文献^[1]要求, 可采用 1.2; T_{zs} 为止水摩擦力。

3 算例分析

本文选取石泉水电站中孔平板闸门^[14]实测资料进行对比分析, 石泉水电站位于汉江上游, 设计水头为 23.3 m , 设有 $11 \times 10.76 \text{ m}$ 的中孔 5 个, 中孔工作门为台车式平面钢闸门, 闸门采用 3 道间距为

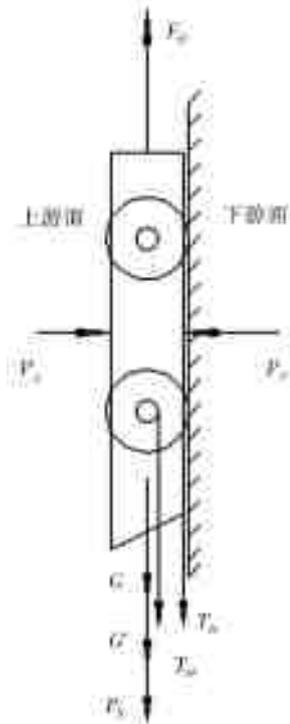


图 4 闸门受力分析
Fig. 4 Gate force analysis

2.3 m 的接力式水封,水封型式为 P60-A 型。胸墙全高 2.6 m,闸门重 112 t,加重 38 t,操作方式为动水全开全闭,闸门采用滑动轴承,滚轮半径为 0.35 m,轮轴半径为 0.08 m。启闭机为固定式,容量 2×160 t,扬程 16 m。观测时的库水位为 405.94 m,相应底坎以上水头为 19.21 m,选取此水位进行闸门启门力的验算。

该闸门由三节组成,各节门叶之间在边柱和纵梁腹板处采用螺栓连接,组装时在纵梁后翼缘处采用焊缝连接,现场观测中发现三节门叶并非整体振动,而且在垂直方向并无明显振动^[15],为测量闸门在水流向和侧向振动,在上、中、下三节门叶的一次梁的跨中布置一组振动加速度测点,测得在闸门开度 2.5~3.0 m 和 6.0~7.0 m 出现强烈振动,本文选取开度 $e=3.0$ m、6.0 m、7.0 m 进行计算,其振动加速度均方根值分别列于表 1、表 2。另外闸门在右 1/4 跨度处沿闸门高度布置了一组水压力测点,各测点时均压力值列于表 3。

表 1 不同开度时的闸门水流向振动加速度均方根值

Tab. 1 Gate water flow vibration acceleration root mean square value at different opening degrees

开度	部位		
	上节门/g	中节门/g	下节门/g
3.0 m	1.04	0.30	0.22
6.0 m	0.67	0.42	0.26
7.0 m	0.30	0.30	0.23

表 2 不同开度时的闸门侧向振动加速度均方根值

Tab. 2 Lateral vibration acceleration root mean square value of gate at different opening degrees

开度	部位		
	上节门/g	中节门/g	下节门/g
3.0 m	0.25		0.040
6.0 m	0.31		0.050
7.0 m	0.15		0.023

注:表 1、表 2 中 g 为重力加速度

表 3 不同测点的时均压力值

Tab. 3 Time-averaged pressure value at different measuring points

测点	动水压力/kPa	面积/m ²
P-4	86.24	17.216
P-5	105.84	27.976
P-6	127.40	29.052
P-7	105.84	11.836

利用波形合成法计算所得 3.0 m 开度时闸门激振力为 900.53 kN,利用式(4)计算所得到的激振力为 831.74 kN,计算误差为 7.64%,出现这种误差的主要原因为利用式(4)计算未考虑三节门叶之间的相互作用,由于摩擦系数的影响,两者间的误差对结果的影响较小,因此可以将闸门三节门叶之间看作铰连接,采用式(4)计算。

由图 5 所示简化模型分别计算各部分门叶所受激振力,闸门和胸墙的位置设为固定端,将上、中、下三节门叶之间看作铰连接。按上文所述方法,分别利用式(4)计算上、中、下门叶所受的激振力。根据实测资料,闸门滚动摩擦力臂在闸上水头为 19.21 m 时,取 0.1 进行计算;闸门开启时,闸门底缘补气充分,下吸力可忽略不计。

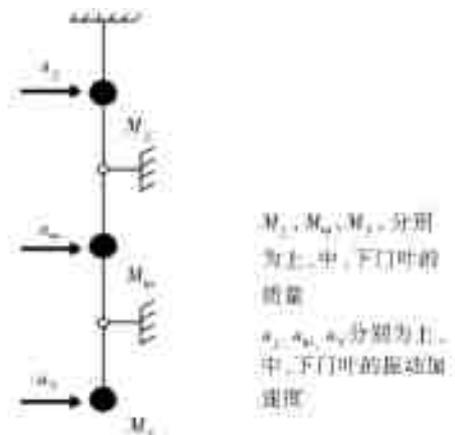


图 5 激振力计算简化模型

Fig. 5 Simplified model for exciting force calculation

根据上述资料,由本文提出的平板闸门启门力计算方法得出计算结果见表 4。由表 4 可以看出,本文计算的启门力与原型实测的启门力相比误差较

小,在开度 3.0 m 和 6.0 m 时计算误差仅不足 2%,在 7 m 开度时振动诱发的激振力虽略有减小,但其计算下的启门力相比于利用规范的计算的启门力的误差减小了 10%,而规范给出的计算公式误差均在 17%左右,因此由本文的计算方法可使理论计算误差进一步减小,因此通过实测资料可证实,故本文所提供的平板闸门启门力的计算结果是可靠的。

在石泉水电站中孔闸门中,激振力诱发的摩擦力占闸门启门力的 16%左右,随闸门开度的增加与闸前水头和闸门挡水面积的减小,作用于闸门

的激振力不断减小,其诱发的摩擦力占比也随之下降。由此,与利用规范计算的启门力相比,激振力诱发闸门启门力的变化在闸门启闭过程中占据了较大比重,在启闭机安全余量较小的闸门的运行过程中,可能会出现启闭困难等现象。在闸门设计的初期阶段应该考虑到以后在闸门的运用过程中的振动问题,对初设的闸门启门力增加一定的安全余量,并制定若出现重大问题后的处理方案,确保闸门在以后启闭过程中不会出现启闭困难而造成不必要的损失。

表 4 理论计算与实测资料对比

Tab. 4 Comparison of theoretical calculations and measured data

开度/ m	闸门 自重/ kN	闸门 附重/ kN	止水摩 擦力/ kN	正摩 擦力/ kN	侧摩 擦力/ kN	总的启 门力/ kN	实测启 门力/ kN	相对 误差/ %	激振力引起 的摩擦力占 比/%	规范计算 启门力/ kN	规范计算 相对误 差/%
3.0	1 098.7	372.8	55.6	256.5	49.5	1 833.1	1 860.0	1.4	16.7	1 595.5	17.2
6.0	1 098.7	372.8	47.0	217.2	62.1	1 797.8	1 827.5	1.6	15.5	1 556.0	17.4
7.0	1 098.7	372.8	40.1	132.7	29.6	1 673.9	1 807.9	7.4	9.7	1 540.2	17.0

4 结 论

本文通过分析平板闸门流激振动对闸门启门力的影响,得到结论如下。

(1)在实测和物理模型中,波形合成法利用压力测点单元的点压力获得单元面压力,再在同一时刻合成能有效的得到闸面板激振力。

(2)在激振力作用下做高频振动的闸门的的面板压力明显增大,其中顺流向的激振力为主要影响因素;通过改进启门力计算方法,将激振力纳入到闸门启门力的计算中,得到的计算值与实测值吻合良好,可用于实际工程的启门力计算。

(3)平板闸门启门过程中,流激振动诱发的激振力对平板闸门的摩擦力在振动严重时能达到闸门启门力的 16%左右,在闸门的启门力中占据了较大的比重。

参考文献(References):

- [1] SL 74-2013. 水利水电工程钢闸门设计规范[S]. (SL 74-2013. Design code for steel gate in water resources and hydropower projects[S]. (in Chinese))
- [2] 徐国宾,高仕赵,訾娟. 淤泥对平面钢闸门启门力影响的计算方法[J]. 水利学报,2012,43(9):1092-1096. (XU G B,GAO S Z,ZI J. Calculation method for effect of silt sediment to lifting force of plane gate[J]. Journal of Hydraulic Engineering,2012,43(9):1092-1096. (in Chinese)) DOI:10.13243/j.cnki.slxb.2012.09.015.
- [3] 刘昉,赵梦丽,冷东升,等. 不同底缘形式的平板闸门水

- 力特性数值模拟[J]. 水利水电科技进展,2017,37(5):46-50,77. (LIU F,ZHAO M L,LENG D S, et al. Numerical simulation of hydraulic characteristics of plain gate with different types of bottom edges[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2017,37(5):46-50,77. (in Chinese)) DOI:10.3880/j.issn.1006-7647.2017.05.008.
- [4] 徐国宾,訾娟,高仕赵. 平面闸门启闭过程中的动水垂直力数值模拟研究[J]. 水电能源科学,2012,30(10):132-135. (XU G B,ZI J,GAO S Z. Numerical simulation of hydrodynamic vertical force during plane gate opening and closing process[J]. Water Resources and Power,2012,30(10):132-135. (in Chinese))
- [5] REN H,LI T,ZHAO L, et al. Analysis on flow-induced vibration of underwater horizontal gate[M]. Advances in Water Resources and Hydraulic Engineering. Springer Berlin Heidelberg,2009:293-298. DOI:10.1007/978-3-540-89465-0_374.
- [6] 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. (ZHANG F,WU S J,MENG F G, et al. Numerical simulation of fluid solid coupling of radial gate based on CEL theory[J]. Water Resources and Power,2016,34(3):189-191,27. (in Chinese))
- [7] ANAMI K,ISHII N,KNISELY C W, et al. Friction-maintained dynamic stability [M]. Vibration Problems ICOVP 2011. Springer Netherlands,2011:779-785. DOI:10.1007/978-94-007-2069-5_105.

(下转第 175 页)

- [23] 王鹏,舒才,施峰,等.不同砂胶比、密度和含水性相似材料力学性质正交试验研究[J].岩土力学,2017,38(S2):229-235. (WANG P, SHU C, SHI F, et al. Orthogonal experimental study of similar materials properties of different densities, sand-binder ratios and residual moisture contents [J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38 (S2): 229-235. (in Chinese)) DOI:10.16285/j.rsm.2017.S2.032.
- [24] 尹升华,吴爱祥,李希雯.矿柱稳定性影响因素敏感性正交极差分析[J].煤炭学报,2012,37(S1):48-52. (YIN S H, WU A X, LI X W. Orthogonal polar difference analysis for sensitivity of the factors influencing the ore pillar stability [J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(S1): 48-52. (in Chinese)) DOI:10.13225/j.cnki.jccs.2012.s1.021.
- [25] 刘兴坡,陈翔,胡小婷,等.基于正交极差分析的青龙河流域 HSPF 模型参数寻优模式[J].哈尔滨工业大学学报,2018,50(2):131-138. (LIU X P, CHEN X, HU X T, et al. Orthogonal range analysis-based HSPF parameter optimization pattern for Qinglong River watershed [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2018, 50 (2): 131-138. (in Chinese)) DOI:10.11918/j.issn.0367-6234.201607069.
- [26] 刘瑞江,张业旺,闻崇伟,等.正交试验设计和分析方法研究[J].实验技术与管理,2010,27(9):52-55. (LIU R H, ZHANG Y W, WEN C W, et al. Study on the design and analysis methods of orthogonal experiment [J]. Experimental Technology and Management, 2010, 27(9): 52-55. (in Chinese)) DOI:10.16791/j.cnki.sjg.2010.09.016.
- [27] 水利部水利水电规划设计总院.水工设计手册:第七卷:泄水与过坝建筑物[M].北京:中国水利水电出版社,2014:104. China renewable energy engineering institute. Hydraulic design manual: Volume 7: Drainage and dam buildings [M]. Beijing: China Water & Power Press, 2014: 104.
-
- (上接第 149 页)
- [8] 焦修明.弧形闸门动力特性及流激振动研究[D].武汉:武汉大学,2005. (JIAO X M. Research on dynamic characteristic and flow-induced vibration of radial gate [D]. Wuhan: Wuhan University, 2005. (in Chinese))
- [9] 唐祥甫,宁廷俊,陈元清.浅谈水力学面脉动压力的计算[J].长江科学院院报,2000(4):8-11. (TANG X F, NING T J, CHEN Y Q. Elementary introduction to calculation of area fluctuating pressures in hydraulics [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2000(4): 8-11. (in Chinese)) DOI:10.3969/j.issn.1001-5485.2000.04.003.
- [10] 严根华.水动力荷载与闸门振动问题[A].振动工程学报(工程应用专辑)[C].2001:3. (YAN G H, Hydrodynamic loads and gates vibration problems [A]. Journal of Vibration Engineering [C]. 2001: 3 (in Chinese))
- [11] 汪海平.三峡泄水建筑物动力特性研究分析[D].武汉:武汉大学,2005. (WANG H P. Technology of analysis to dynamic characteristics in the sluices dam of Three Gorges Project [D]. Wuhan: Wuhan University, 2005. (in Chinese))
- [12] 高仕赵.泥沙淤积对闸门启门力的影响及行走支承和水封摩擦阻的研究[D].天津:天津大学,2013. (GAO S Z. The research on the effect of sediment to the lifting force of gate and the friction of walking-bearing and sealing-rubber [D]. Tianjin: Tianjin University, 2013. (in Chinese))
- [13] 高仕赵,徐国宾.水工闸门垂直水动力计算方法[J].工程力学,2015,32(7):236-242. (GAO S Z, XU G B. Calculation method for vertical hydrodynamic force of hydraulic gate [J]. Engineering Mechanics, 2015, 32 (7): 236-242. (in Chinese)) DOI:10.6052/j.issn.1000-4750.2013.12.1234.
- [14] 韩立.石泉水电站中孔平面工作闸门原型观测成果及分析[J].水利水电技术,1985(1):18-25. (HAN L. Prototype observation and analysis of working plane gate of middle hole in Shiquan Hydropower Station [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 1985(1): 18-25. (in Chinese)) DOI:10.13928/j.cnki.wrahe.1985.01.003.
- [15] 张双平,丁小龙,单福平.石泉水电厂中孔工作闸门振动问题的研究[J].西北电力技术,1997(4):23-29. (ZHANG S P, DING X L, SHAN F P. Study on vibration of the medium-row working gate in Shiquan Hydropower Plant [J]. Northwest China Electric Power, 1997(4): 23-29. (in Chinese))