DOI:10.11705/j.issn.1672-643X.2021.01.20

巴塘水电站导流洞平面闸门流激振动试验研究

刘 昉,李文胜,王延召,吴敏睿,盛传明,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 300350)

摘 要:针对巴塘水电站导流洞动水闭门过程中门体出现振动的问题,根据水弹性和重力相似准则建立比尺为1 :25的物理模型。通过模型试验,对平面闸门在闭门阶段的振动加速度、持住力以及门体应变等参量进行试验测 定。试验结果表明:闸门在局开挡水时,水平向最大单倍位移幅值为91.974 μm,振动危害较小;结构最大 Mises 应 力值为11.32 MPa,闸门整体应力满足强度要求,平面闸门安全可靠。通过 ANSYS Workbench 平台对闸门进行模态 分析。结果表明:干模态基频为40.05 Hz,湿模态基频为35.40 Hz,闸门挡水时脉动主频在10 Hz 以内,与湿模态第 1 阶频率相差较大,闸门产生共振的可能性较低。本文采取的水弹性模型试验技术能够较好地反映平面闸门的动 力特性,能够较为准确地预测和分析闸门的流激振动响应特性,可为类似工程的结构优化设计及运行安全监测提 供参考。

Experiments on flow-induced vibration of the plain gate in the diversion tunnel of Batang Hydropower Station

LIU Fang, LI Wensheng, WANG Yanzhao, WU Minrui, SHENG Chuanming, XU Guobin

(State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety, Tianjin University, Tianjin 300350, China)

Abstract: Aiming at the vibration problem of the gate body during hydrodynamic closing of the diversion tunnel in Batang Hydropower Station, a physical model with a scale of 1:25 was established according to the criteria of hydro-elasticity and gravity similarity. The vibration acceleration, holding force and strain of the plain gate in the closing phase were measured in the model test. The results show that the maximum horizontal single-fold displacement amplitude is 91.974 μ m, with which the gate vibration is unlikely to happen. The maximum Mises value of the structure is 11.32 MPa, the overall stress of the gate meets the strength requirements, and the plain gate is safe and reliable. Then a modal analysis of the plain gate was carried out using ANSYS Workbench. The analysis results show that the dry mode fundamental frequency is 40.05 Hz, the wet mode fundamental frequency is 35.40 Hz, and the main pulsation frequency is within 10 Hz when the gate is retaining water, which is significantly different from the wet mode order 1 frequency, so the possibility of gate resonance is low. The hydrodynamic model test adopted in this paper is suitable for the simulation of the dynamic characteristics of plain gates, it can predict and analyze the gate response to flow-induced vibration accurately. This research can provide some reference for the structural optimization design and operation safety monitoring of plain gates in similar projects. **Key words**; plain gate; hydro-elastic model test; flow-induced vibration; modal analysis

收稿日期:2020-07-18; 修回日期:2020-10-24

基金项目:国家自然科学基金项目(51779166);国家重点研发计划项目(2016YFC0401707)

作者简介:刘昉(1979-),男,辽宁抚顺人,博士,副教授,硕导,主要研究领域:工程水力学。

通讯作者:徐国宾(1956-),男,河北石家庄人,博士,教授,博导,主要研究领域:工程水力学和泥沙运动力学。

1 研究背景

闸门挡水时,在水流脉动压力作用下常常发生 振动,结构振动与其固有特性和外部激励荷载密切 相关,而剧烈的闸门振动会对枢纽工程的安全稳定 运行造成严重影响^[1-3]。闸门因剧烈振动而无法正 常工作的实例屡见不鲜,轻则会对闸门自身材料造 成疲劳损伤,重则会导致结构发生动力失稳而破 坏^[4],如刘家峡平面工作闸门振动应力超出设计容 许应力、四川狮子滩水电站定轮工作门在运行时发 生剧烈垂向振动、西津电站船闸输水廊道上闸首的 平面定轮工作门由于闸门振动导致定轮悬臂轮止轴 板剪断、轮子脱落。所以,研究闸门振动问题具有重 要的现实意义,一直是水利工程中的重点研究课 题^[5-6]。通过比较水流脉动频率与结构自振频率, 进行共振校核,作为判断闸门结构设计参数选择优 劣的标准^[7-8]。为进一步明确闸门的振动情况,通 常采用水弹性模型试验或数值计算手段进行分析. 对闸门流激振动响应进行预测,规范和指导闸门的 运行方式,确保结构振动处于安全范围内^[9-12]。明 确闸门的振动问题是保证水工钢闸门安全运行的重 要环节,研究闸门结构在水动力载荷作用下的动力 稳定性及安全性等问题具有重要意义[13-15]。

目前国内外研究闸门振动的方法主要是制作弹 性相似模型进行试验,通过测算闸门结构振动时附 近的水力特性,判断闸门是否会出现较为危险的共 振行为。为研究巴塘水电站导流洞平面闸门局开泄 流过程中的闸门振动问题,本文利用完全水弹性物 理模型进行模拟试验,比较了门体上水流脉动频率 和闸门自振频率,并对闸门结构进行应变测试,探究 运行时的闸门结构振动和变形特征。通过水弹性试 验对闸门流激振动响应进行预测,期望为闸门结构 优化设计提供技术指导^[16-18]。

2 模型建立

2.1 工程概况

巴塘水利枢纽工程以发电为主,正常蓄水位初 拟为2545 m,死水位为2541 m。图1给出了该工 程导流洞进口段纵剖面图,其中进口底板高程为 2487.0 m,洞身长796.03 m,进口引渠长30.0 m, 导流洞洞身段断面型式为城门洞型,断面尺寸为12 m×14 m(宽×高),平面闸门型式为潜孔平面闸门, 闸门尺寸为7.8 m×14.2 m(宽×高)。进水塔孔口 按2孔设计,单孔口尺寸为6 m×14 m(宽×高)。 进水塔闸室段长 18 m,宽 24 m,塔高 48 m,塔后设 25 m 长渐变段,由方型洞渐变为城门洞型,隧洞底 坡 i = 5.02 %。在原型中,工作闸门为平面闸门,其 门叶结构主要材质为 Q345 钢,弹性模量 E = 200GPa,泊松比 $\mu = 0.3$,钢结构密度为 $\rho = 7.85 \times 10^3$ kg/m³。平面闸门运行速度为 1.5 m/min,梁格中布 置铅皮进行配重,确保闸门能够动水闭门。门体采 用滑块支承方式,配合单吊点 6 300 kN 固定卷扬机 进行启闭操作。



图 1 巴塘水利枢纽工程导流洞进口段纵剖面图(单位:m)

2.2 物理模型试验方法及测点布置

模型按重力相似准则进行设计,整体模型模拟 范围为导流洞进水口至导流洞中段,为敞口泄流条 件。整个模型由引水口(水箱内)、闸室段、渐变段、 有压洞段、尾水渠5部分组成。表1给出了各物理 量的模型比尺参数。

闸门模型试验研究分为两个阶段,第1阶段为 平面闸门动水压力模型试验,该模型采用有机玻璃 制作而成,其目的为满足糙率相似以及便于观察闸 下和导流洞内的水流流态,主要测量闸门结构所受 的时均水压力和脉动水压力,闸门模型如图2(a)所 示。第2阶段为平面闸门流激振动试验研究,该模 型中闸门采用完全水弹性材料制作,模型严格满足 结构弹性相似和水力学相似。本试验所采用的水弹 性模型材料按照水弹性相似率的要求研制,用来模 拟门叶结构的刚度及变形,所选模型材料的密度为 7.8×10³ kg/m³,模型的综合动摩擦系数f为0.26~ 0.30,模型如图2(b)所示。

在模型门体上、下游和底缘位置共布置了8个 压力测点。压力传感器测量范围为-4~30 kPa,分 辨率为0.01 kPa,误差≤±0.3% F.S.(满量程),自 振频率大于300 Hz。通过中国水利水电科学研究 院研制的 DJ800 多功能监测仪采集系统,测量闸门 门体上的动水压力。此外,在平面闸门水弹性相似 模型的主横梁翼缘板及主纵梁翼缘板等主要构件上 共布置15 个动应力测点(BFH120 – 5AA – X30 型 电阻应变计)及在门顶上布置3个电压型加速度传 感器(测量范围为10 m/s²;灵敏度为0.5 V/ms⁻²; 分辨率为5×10⁻⁵ m/s²)。各测点的布置位置如图 2(c)所示。通过动态电阻应变仪和北京东方振动 和噪声技术研究所研制的DASP智能采集系统配合 恒流供电器进行闸门应变加速度的采集。 在模型试验中,闸门模型的启闭速度由电机控制,启闭速度在0~1.5 m/min 范围内调节。同时将 闸门顶部水平向振动加速度测点 J2、闸门上部中间 纵梁动应变测点 Y15 和闸门底缘处脉动压力测点 D4 作为评估闸门振动、应变和水流脉动压力等参量 变化特性的典型测点。

表1 各物理量模型比尺参数

参数名称	几何比尺 L_r	流速比尺 <i>V</i> ,	时间比尺 T_r	糙率比尺 <i>n</i> ,	压强比尺 P_r	流量比尺 Q_r	频率比尺 f_r
模型比尺	25.00	5.00	5.00	1.71	25.00	3125.00	0.20



图 2 闸门模型及监测点群布置

3 试验结果分析

3.1 水动力荷载

作用在闸门门体上的水压力可分为脉动压力和 时均压力^[19],通过分析时域、幅值特征和频域能量 分布特性等,可以获得水流的脉动特性。利用模型 试验测得不同工况下作用在闸门上的局部脉动水压 力,本文将平面闸门底缘处测点 D4 作为脉动水压 力典型测点,着力分析闸门底缘区域水流脉动压力 的变化特征。模型试验工况主要包括3种运行水头 和5种闸门局开条件,其中运行水头分别为14、13 和12 m, 闸门相对开度分别是0.09、0.1、0.2、0.3 以及0.5。图3给出了各运行水头下测点 D4 的脉 动压力与闸门相对开度的关系;图4给出了运行水 头为14 m 时,测点 D4 的压力时程线及经 FFT 变换 后的功率谱密度曲线。由图 3、4 可知,底缘区域的 水流脉动压力随闸门开度的增大而减小,随运行水 头的升高而增大;闸门时均压力分布规律较好,水流 脉动能量的主频较低且分布于1Hz以下,脉动能量

频率集中于10 Hz 以内。



图 3 各运行水头下测点 D4 脉动压力与闸门相对开度的关系

3.2 动应力响应分析

试验观测表明,各测点动应力响应均方差值在 0.1 MPa 以内。保持上游水位稳定时,闸门在小开 度区域动应力的均方差值相对较大,运行水头由 12 m 升高至 14 m 时,闸门动应力均方差在 0.02 ~ 0.08 MPa之间,脉动应力均方差最大为 0.08 MPa, 表明上游水头在运行期内变化时,对闸门动应力响 应影响较小。若按 6 倍均方差计算应力幅值为0.48 MPa,脉动应力较小。闸门结构受力特征良好,其刚

MPa

度和强度均满足设计要求,闸门可平稳、安全运行。 运行水头为14m、闸门在不同相对开度运行时,各 动应力测点的测量结果见表2。

闸门由全开至全关过程中,门体上部典型测点 Y15的应力时域过程线如图 5 所示,在不同运行水 头下,门体上部典型测点 Y15 的时均应力与闸门相 对开度关系曲线如图 6 所示。由图 5 、6 可知,在闸 门关闭的全过程中,门体振动比较平稳,相同运行水 头下门体典型测点 Y15 应力基本不随闸门开度的 变化而变化;测点 Y15 时均应力随运行水位的升高 而增大,闸门不同开度下门体典型测点 Y15 的应力 值最大为 11.32 MPa(运行水位为 14 m),闸门承受 的动应力较小,满足动应力不大于材料允许应力 20% 的要求^[20]。



图 4 测点 D4 压力时程线及其功率谱密度曲线(运行水头 14 m)

|--|

闸门							动应	力测点	编号						
相对开度	Y1	Y2	Y3	Y4	Y5	Y6	Y7	Y8	Y9	Y10	Y11	Y12	Y13	Y14	Y15
0.09	0.054	0.080	0.043	0.078	0.047	0.051	0.064	0.024	0.015	0.031	0.015	0.023	0.025	0.010	0.041
0.10	0.039	0.049	0.032	0.046	0.034	0.035	0.060	0.016	0.010	0.018	0.013	0.013	0.020	0.006	0.038
0.20	0.033	0.034	0.030	0.027	0.027	0.023	0.032	0.011	0.015	0.013	0.022	0.012	0.027	0.014	0.044
0.30	0.021	0.022	0.017	0.020	0.018	0.014	0.029	0.009	0.009	0.009	0.010	0.008	0.006	0.003	0.002
0.50	0.020	0.035	0.008	0.042	0.020	0.029	0.017	0.017	0.013	0.023	0.008	0.013	0.011	0.007	0.020





3.3 加速度及位移响应分析

平面闸门在运行水头为14 m 局部开启运行时, 门体顶部典型测点 J2 的加速度均方差值以及将加 速度信号经过二次积分得到的振动位移均方差值如 表3 所示。

由表 3 可知,不同闸门开度下门体 3 个方向振动 加速度均方差均在 0.060 m/s² 以内,振动位移均方 差值在 35 μm 以内。试验观测表明,上游水头由 12 m 升高至 14 m 时,测点 J2 的加速度均方差最大值由 0.015 m/s² 增大到 0.058 m/s²,各点加速度(水平向、





垂向、侧向)均方差量级相当,最大为0.058 m/s²,按3 倍均方差计算加速度幅值约为0.174 m/s²;位移均方 差由0.393 μm 增大到 30.658 μm;按3 倍均方差计 算最大位移幅值约为91.974 μm。依据美国阿肯色 河通航枢纽中心提出的按振动位移均方差值划分水 工钢闸门振动强弱的标准^[20],位移均方差值为0~ 0.050 8 mm 的振动对结构的影响可以忽略不计;位 移均方差值在0.050 8~0.254 0 mm 之间的振动为微 小振动;位移均方差值在0.254 0~0.508 0 mm 之间 的振动为中等振动,位移均方差值大于0.508 0 mm 的振动为严重振动。因此,该导流洞平面闸门在局部 开启挡水时的振动属于微小振动。

表 3 运行水头 14 m 闸门不同相对开度典型测点 J2 的 加速度均方差和位移均方差

闸门相		加速度均	肉方差/($m \cdot s^{-2}$)	位移均方差/µm			
	对开度	侧向	垂向	水平向	侧向	垂向	水平向	
	0.09	0.0416	0.0155	0.0353	4.766	5.102	30.658	
	0.10	0.0409	0.0154	0.0365	2.385	2.094	14.116	
	0.20	0.0300	0.0150	0.0462	2.808	2.463	18.044	
	0.30	0.0314	0.0158	0.0580	2.338	2.028	14. 191	
	0.50	0.0281	0.0163	0.0294	2.089	3.700	21.847	

图7为运行水头14m时,门体顶部典型测点J2 不同方向的加速度均方差与闸门相对开度的关系曲 线。在闸门关闭过程中门体下落较为平稳,闸门在 各相对开度运行时的各测点振动加速度值较小。由 图7可看出,3个方向的加速度响应中,水平向振动 加速度均方差值相对较大,侧向次之,垂向最小;随 着闸门开度逐渐增大,门体侧向振动响应逐渐减小, 垂向振动响应先减小后略有增大,水平向振动响应 先增大后减小,在闸门相对开度为0.3 时达到最大, 其后有所减小^[21]。



图 8 为运行水头 14 m、闸门相对开度为 0.3 时,由傅里叶变换得出的典型测点 J2 水平向加速度 时程线和功率谱密度曲线。由图 8 可知,闸门主要 的振动能量集中在 1.0 Hz 之内,主频为 0~0.4 Hz, 与水流脉动频率基本一致。因此,闸门结构振动表 现为水流脉动荷载作用下的低频受迫振动。通过时 域积分,可由实测加速度过程得到闸门振动位移的 变化过程,其结果表明,闸门振动位移稳定,主频为 0.19 Hz,能量主要集中在 1.0 Hz 以内。





4 闸门模态分析

通过 ANSYS Workbench 平台对平面闸门进行 结构模态分析^[22-23]。在计算干模态时,闸门和钢丝 绳分别采用壳单元(Shell63)和杆单元(Beam188)进 行模拟;在湿模态分析中,闸门上、下游水体采用 ANSYS 单元库中的三维流体声单元(Fluid3D)模 拟^[24-25];流固耦合分析时,闸门的主横梁、主纵梁及 面板等主要结构用实体单元(SOLID45)进行模拟。 上游顺水流方向水体长度取 20 m,下游顺水流方向 水体长度取 6 m。上游静水压力作用明显,故顺水 流向只在滑块承压处施加位移约束,同时在闸门底 槛施加位移约束。闸门是由 6 300 kN 固定卷扬式 启闭机配合拉杆完成动水起闭,钢丝绳直径在 50~ 80 mm 范围内选取,弹性模量 $E = (1.05 ~ 1.15) \times 10^5$ MPa,所以钢丝绳用竖向力杆单元模拟。受拉杆的作用,在吊绳吊点处施加全约束,以便获得平面闸门的频率和振型。数值计算得出的平面闸门相对开度为0.09 的情况下,前4 阶自振频率和振型如表4 所示,其中干湿模态1 阶振型特征见图9。

表 4 闸门相对开度为 0.09 时闸门干湿 模态前 4 阶自振频率和振型

模态	干模态	工造大柱尔	湿模态	湿模态
阶数	频率/Hz	丁悞心付仙	频率/Hz	特征
1	40.05	闸门上下振动	35.40	闸门上下振动
2	56.71	闸门整体向左振动	40.35	闸门上下振动
3	64.34	闸门左右扭动	57.58	闸门左右振动
4	66.07	闸门下侧左右振动	64.90	闸门左右扭动



图 9 闸门相对开度为 0.09 时干湿模态 1 阶振型特征

由表4和图9可看出,平面闸门前4阶干模态 的最小自振频率约为40Hz,表现为闸门整体垂向 振动,闸门开度对自振频率影响不大。在动水的作 用下,闸门湿模态受水体附加质量的影响,其自振频 率较在空气中无水时降低20%~30%。同一振型 的自振频率湿模态与干模态变化相似,随闸门开度 增加,流固耦合影响程度减小。

5 结 论

通过对巴塘水电站导流洞平面闸门流激振动试 验分析,结果表明:

(1) 闸门脉动压力幅值随开度的增大而减小、 随运行水头的升高而增大。门体所受的水流脉动压 力主要能量频率集中于10 Hz 范围内,主频分布于1 Hz 以下。平面闸门1 阶干模态频率为40.05 Hz,1 阶湿模态频率为35.40 Hz,1 阶频率远离水流脉动 激励的高能区域,平面闸门产生共振的可能性较低。

(2)利用该模型能够定量测量分析该平面闸门 的动力特性及流激振动响应特性,能够为闸门的结 构设计和运行管理提供有力技术支持。该平面闸门 局部开启运行时,门体动应力响应值、加速度响应值 及动位移响应值均较小,闸门运行平稳,振动属于微 小量级,说明闸门结构受力特性良好,强度和刚度均 满足设计要求。

参考文献:

- [1] 潘树军,王新.大型平面钢闸门流激振动模型试验与数 值模拟[J].水电能源科学,2011,29(8):148-151.
- [2] SALAVATI M. Approximation of structural damping and

input excitation force[J]. Frontiers of Structural and Civil Engineering, 2017,11(2):244-254.

- [3] 骆少泽,张陆陈,樊宝康.超大型弧门流激振动试验研究 [J].工程力学,2009,26(S2):241-244.
- [4] 林 鹏,石 杰,周 华,等. 乌东德坝肩结构面影响及协调加固稳定分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35 (S2):3937-3946.
- [5] GU Hua, YAN Genhua. Analysis of vibration mode of hydraulic gate structure [J]. Advanced Materials Research, 2011,199-200:966-972.
- [6] 高峰虎,李长寿,王新,等.五道水库泄洪洞工作闸门流 激振动研究[J].黑龙江大学工程学报,2012,3(1):17
 -21.
- [7] 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,2011,32(S1):382-387.
- [8] 古华,严根华.水工闸门流固耦合自振特性数值分析 [J].振动、测试与诊断,2008,28(3):242-246+301.
- [9] PASKONOV V M, BEREZIN S B, KORUKHOVA E S. A dynamic visualization system for multiprocessor computers with common memory and its application for numerical modeling of the turbulent flows of viscous fluids [J]. Moscow University Computational Mathematics and Cybernetics, 2007,31(4):133-142.
- [10] 李火坤. 深孔平板工作闸门流激振动物模 数模预测 [J]. 南昌大学学报(工科版),2007,29(4):395 – 400.
- [11] 李火坤,练继建.水工弧形闸门流激振动特性物模 数模联合预测与安全分析[J].水力发电学报,2007,26(3):69-76.
- [12] 吴杰芳,张林让,余 岭,等. 闸门流激振动全水弹性模型试验的原型验证[J]. 长江科学院院报, 2005,22
 (5):62-64.
- [13] 邓铭江,李红伟,杨长征,等.严寒地区大型倒虹吸工 程管道应力及水力安全控制[J].水利与建筑工程学 报,2017,15(1):113-120.
- [14] 文林森,王才欢,杨伟,等.水工附环闸门闭门过程水 力特性数值模拟研究[J].长江科学院院报,2017,34 (10):68-73.
- [15] 万继伟,燕军乐,张文远,等.三河口水利枢纽泄洪放空 底孔事故闸门水力学及流激振动试验研究[J].水利水 电技术,2019,50(1):118-125.
- [16] 高振海,康亮,刘鹏. 蕉东闸桥大跨度水闸流量模型试 验研究[J]. 广东水利水电,2006(6):18-20+27.
- [17] 张文远,张东,章晋雄,等.小浪底水库孔板洞弧形工 作闸门流激振动原型观测研究[J].水利水电技术, 2015,46(3):101-104.
- [18] 章晋雄,吴一红,张东,等. 高水头平面闸门动水关闭 的水动力特性数值模拟研究[J]. 水力发电学报, 2013,32(5):184-190.

- [19] HE Shihua, YANG Tingting, SHEN Chunying. Numerical simulation of hydraulic characteristics of vertical lift gate for different openings [C]//Proceedings of the 2016 5th International Conference on Energy and Environmental Protection (ICEEP 2016), 2016.
- [20] 张文远,杨 帆,章晋雄,等. 白鹤滩水电站泄洪洞工作 弧门流激振动模型试验研究[J]. 噪声与振动控制, 2018,38(Z1):422-426.
- [21] 严根华,阎诗武,樊宝康,等. 高水头大尺寸闸门流激振动原型观测研究[J]. 水力发电学报, 2001,20(4):
 65-75.
- [22] 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.

- [23] FABUNMI J A. Effects of structural modes on vibratory force determination by the pseudoinverse technique [J]. AIAA Journal, 1986,24(3):504 - 509.
- [24] 袁宝珺. 平面钢闸门流激振动数值模拟与优化设计 [J]. 水利规划与设计, 2017(6):112-114.
- [25] GUO Chunli, WANG Guodong, XIAO Juliang. Numerical simulation for hydraulic characteristics of cylindrical valve in runaway protection process[C]//IEEE 2009 Asia – Pacific Power and Energy Engineering Conference, Wuhan, China, 2009.

