

DOI: 10. 20040/j. cnki. 1000-7709. 2023. 20221075

基于希尔伯特—黄变换的过闸水流脉动压力时频特性分析

张蕊¹, 沈春颖¹, 马江霞^{1,2}

(1. 昆明理工大学电力工程学院, 云南 昆明 650500; 2. 华能澜沧江水电股份有限公司, 云南 昆明 650214)

摘要: 平面闸门通过启闭控制蓄水和泄水, 在运作时容易受水流脉动压力作用而发生破坏。为研究闸门启闭运动与过闸水流的相互作用过程, 首先对不同底缘形式下的闸门启闭过程中过闸水流进行三维数值模拟, 再采用希尔伯特—黄变换对过闸水流脉动压力信号进行时频特性分析, 得到信号的时间—频率—幅值信息, 对比分析发现在前倾 45°、后倾 30°的组合式闸门底缘, 在闸门底部受脉动压力作用较平缓, 测点能量幅值的变化差值最小, 水流流态较为稳定。该研究可为平面闸门过闸水流脉动压力分析提供参考。

关键词: 平面闸门; 闸门底缘; 脉动压力; 希尔伯特—黄变换; 时频特性分析

中图分类号: TV131 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-7709(2023)05-0174-04

1 引言

平面闸门启闭过程是一个动态过程, 其闸门底部测点的脉动压力信号为非平稳非线性信号。在这个动态过程中, 研究闸门过闸水流的水动力学特性尤为重要。研究表明, 平面闸门流激振动的振源来自于过闸湍流的压力脉动, 目前关于在闸门不同开度下的水流脉动压力的研究成果较多, 但对于启闭过程中各时间尺度下脉动压力信号的时频分析相对较少。对此, 本文采用一种非线性非平稳、由数据本身驱动的信息处理方式即希尔伯特—黄变换(HHT)进行信号分解, 在闸门运行过程、由数据本身驱动的闭动态过程中, 能得到对应脉动压力信号中闸门的时间频率和幅值信息, 在确保闸门安全运行和水流流态稳定中具有一定研究意义^[1,2]。

2 希尔伯特—黄变换法原理

希尔伯特—黄变换的原理为首先通过经验模态分解(EMD)这一信息简单化分解方法, 得到有限数量固有模态函数(IMF)。将信息划分为彼此不同且独立成份的叠加。EMD 按照数据信息自身的时间尺度特征来实现信息分析, 有着高度自

适应功能。因为无需基函数, EMD 几乎能够完成所有类型信息的简单化分解, 特别是在对非线性、非稳定类型信息的解析上, 有突出优点。然后通过对每个 IMF 进行希尔伯特变换, 可以得到瞬时频率和幅值, 继而得到脉动压力信号的二维 Hilbert 图。

3 平面闸门开启过程脉动压力时频特性分析

3.1 数值模拟计算方法及网格划分

结合 GMO 刚体移动法、LES 大涡模拟和 VOF 自由追踪法, 对平面闸门开启过程中的过闸水流进行三维数值模拟。主要研究在不同平面闸门底缘型式下, 过闸水流在平面闸门启闭数值模拟中的脉动压力时频特性。模型由闸前渐缩段水体、闸前有压水体、平面闸门、闸后无压水池和尾部闸门共五部分组成(图 1), 计算域内采用三维矩形网格, 总网格数为 280 005 个单元。

计算域内具体网格采用笛卡尔直角坐标系进行模拟计算, 确定闸门处 b 区域网格精度为 1/6 cm, 闸门前 a 区域和闸门后 c 区域 z 方向网格精度为 1/6 cm(图 2)。在网格块精度组合确定后, 对各区块网格进行边界条件设置, 即闸前渐缩段水体的进水口 X_{\min} 为压力入流边界, 出水口 X_{\max}

收稿日期: 2022-05-20, 修回日期: 2022-07-22

基金项目: 国家自然科学基金项目(52069009); 昆明理工大学引进人才科研启动基金项目(KKSY201904008)

作者简介: 张蕊(2000-), 女, 硕士研究生, 研究方向为水力学, E-mail: zhangruisx@163.com

通讯作者: 沈春颖(1982-), 女, 博士、正高级实验师, 研究方向为工程水力学, E-mail: shengchunying520@163.com

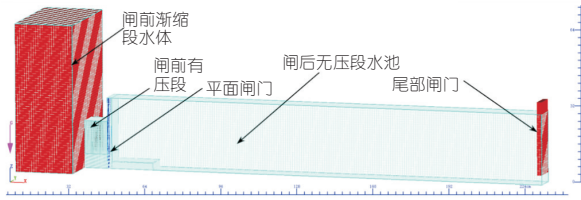
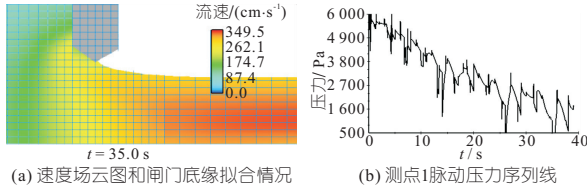


图 1 平面闸门三维计算域网格立体图

Fig. 1 3D computational domain mesh stereogram of plane gate



(a) 速度场云图和闸门底缘拟合情况 (b) 测点1脉动压力时序列线

图 2 网格精度流场及脉动压力数据

Fig. 2 Grid-accurate flow field and fluctuating pressure data

为对称边界,两边侧壁及上下边界均为壁面边界。闸前有压段的进出水口 X_{min} 、 X_{max} 设置为对称边界,两侧及上下均设置为壁面边界。平面闸门处为一单独网格块, X 方向前后均为对称边界,四周为壁面边界。闸后无压段水池进水口 X_{min} 为对称边界,出水口 X_{max} 为 Outflow 出流边界,该边界对出水口的流场紊动能进行一定的消散以避免出口扰动,将两侧 Y_{min} 和 Y_{max} 及下底面 Z_{min} 设置为壁面边界,上顶面 Z_{max} 则设定为压力边界,流体分数系数设置为 0 表示该边界为与空气的界面,内部流体能够从该边界溢出。最终结合网格块的优化选择,得到研究所需网格参数设置,具体见图 3。

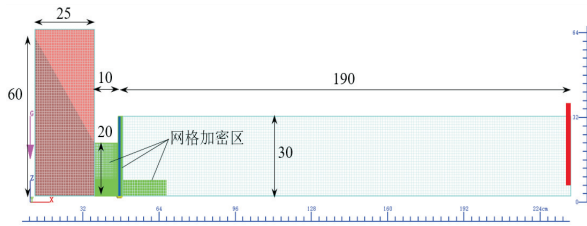


图 3 最优网格块精度组合(单位:cm)

Fig. 3 Optimal grid block precision combination

3.2 计算工况

主要模拟平面闸门启闭过程,水流经由闸前有压、闸后无压的闸门,考虑闸门底缘形态和闸门最大开度,对应计算时间为 150 s,其他相关参数统一设置见表 1。闸门底缘主要布置三个测点,具体位置分别为闸门底缘前、中、后,且随着闸门启闭运动,三个测点固定在对应闸门底缘处跟随

表 1 相关参数

Tab. 1 Related parameters

流体温度/℃	重力加速度/($m \cdot s^{-2}$)	闸门最大开度/cm	持住时间/s	闸前固定水头/cm	入流压力水头/cm	闸门启闭速度/($cm \cdot s^{-1}$)
20	-981	6	30	60	60	1/15

运动。结构物的导入一共有 4 种闸门底缘组合形式和相应 3 个测点位置,见图 4。

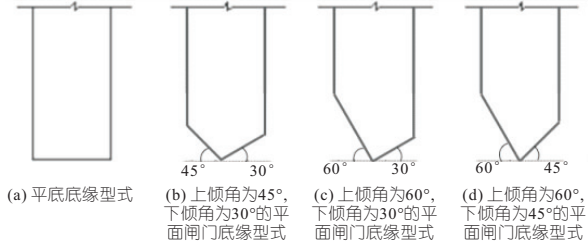


图 4 闸门底缘三个测点布置示意图

Fig. 4 Schematic diagram of the layout of three measuring points at the bottom edge of the gate

设计工况为 4 种底缘型式,闸门完整一次运行情况的三种状态,具体为开启过程、持住过程和关闭过程,共计 12 个工况。其编号按照底缘形式的 a、b、c、d 四种及闸门的三种状态命名,其中开启过程为 1、持住过程为 2、关闭过程为 3,具体情况见表 2。

表 2 工况编号

Tab. 2 Condition number

闸门状态	底缘型式(a)	底缘型式(b)	底缘型式(c)	底缘型式(d)
开启 90 s	a-1	b-1	c-1	d-1
持住 30 s	a-2	b-2	c-2	d-2
关闭 90 s	a-3	b-3	c-3	d-3

脉动压力数据为图 4 中闸门底缘的 3 个测点数据,测点 1、2、3 的位置分别为闸门底缘前、闸门底缘正下方和闸门底缘后,3 个测点的压力数据采集时间间隔为 0.01 s。闸门在启闭过程中,最大开度 h 为 6 cm,为横向对比开启和关闭状态下,12 个工况在 4 种底缘型式的脉动压力时频信号特征,将闸门运行时间对应的自启闭速度换算成相对开度 n ,并以相对开度 $n = e/h$ 来表示每个工况的横坐标对比量。将压力数据标准化处理,定义压力标准值 $K_p = (p - \bar{p})/\sigma$,其中 p 为瞬时压力数据, σ 为压力标准差, \bar{p} 为平均压力,得到一个无量纲量 K_p 。

3.3 计算结果分析

3.3.1 IMF 分量及剩余分量图 $r(t)$ 分析

由经验模态分解可得闸门开启、持住和关闭过程中,4 种闸门底缘型式共 12 个工况压力标准值的时域信号图、时域信号经过 EMD 处理之后的前三个固有模态分量(IMF)的时域信号图和一个残余分量 $r(t)$ 图,总共 5 个子图构成 EMD 的输出图。其中,闸门开启过程的分量见图 5。

在闸门开启过程中,由 3 个测点 EMD 输出图的时域信号图可得,测点 1 波动中心稳定下降且波动幅值随 n 变化有减小趋势,测点 2 的 n 在

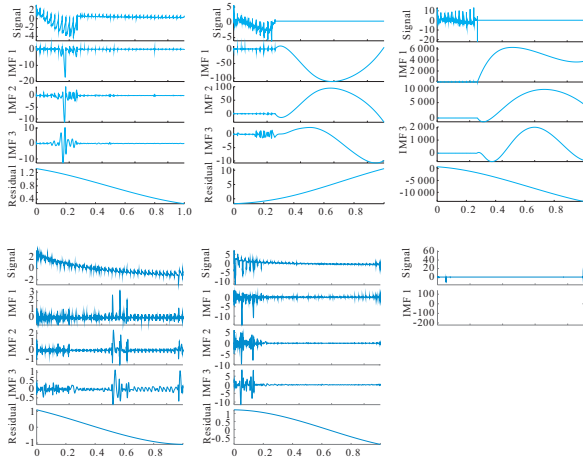


图 5 闸门开启时测点 1、2、3 分别对应不同底缘的时域信号
Fig. 5 Time domain signal diagrams of measuring points 1, 2, and 3 corresponding to different bottom edges when the gate is opened

0~0.25 之间, K_p 波动幅值在 5~-5 有稳定下降趋势, n 在 0.3~1 之间, K_p 值逐渐衰减, 测点 3 的 K_p 值稳定在 0 处, 并在 n 为 0~1 的前后出现突变值。其中, 三个测点以工况 b-1 数据波动稳定, 且突变值最小。

在闸门持住过程中, 4 个工况大致均先维持在一定数值, 发生波动变化一段时间后, 接着波动中心值增大, 不断发生波动, 直到稳定在一定数值附近出现小幅波动。而分别从三个测点的对比中发现, 由于闸门持住时闸后水流状态为淹没出流状态, 故可以观察 3 个测点值波动基本一致。

在闸门关闭过程中, 闸门关闭后闸后流态从淹没出流变为自由出流。在两种流态变化中 3 个测点的变化不同, 测点 1 中的工况底缘 b 对应工况的 K_p 数据变化稳定, 且流态衔接连续; 测点 2 中工况 b-3 的波动中心在 0 附近, 其闸门关闭瞬间 K_p 值突变较小; 测点 3 中工况 b-6 的前期波动幅值较小且关闭瞬间 K_p 值突然变小。

3.3.2 二维时频谱图分析

在闸门开启过程中, 由 3 个测点的 HHT 二

维频谱图(图 6)可知, 测点 1 的 K_p 值在 0~100 之间, 其中底缘 a 的 K_p 值均匀分布在闸门开启全过程, 组合底缘 b、c、d 的 K_p 值则集中出现闸门开启瞬间; 测点 2 的 K_p 值则较多出现在开启前期, 工况 b-1 的 K_p 值小于测点 1, 且其 K_p 值在 $n-f$ 坐标中沿着相对开度变化分布频率变小; 测点 3 的 K_p 值比测点 1、2 大得多, 并出现在 $n=0.1$ 附近。可以得出闸门开启时, 3 个测点受到脉动压力的作用各不相同, 在闸门底部产生了不均匀作用。

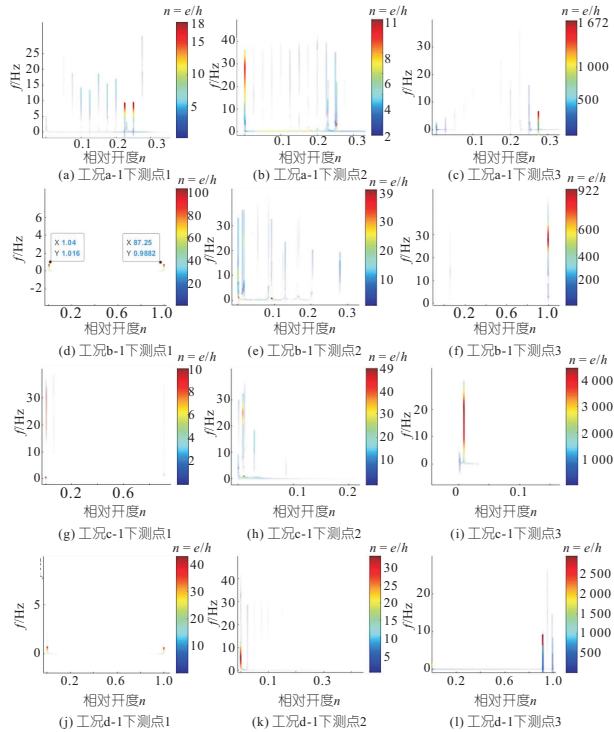


图 6 闸门开启时不同工况二维时频谱图
Fig. 6 Two-dimensional time spectrum diagram of different working conditions when the gate is opened

在闸门持住过程中, 各工况闸门持住时的 3 个测点的 K_p 时频分布相似, 主要对比 HHT 二维图的 K_p 值大小, 闸门底缘 b 的 K_p 值均较小, 且时频分布在 $n-f$ 坐标中较连续。其中四种闸门底缘差异最小的是组合底缘 b, 工况 b-2 三个测点下的 K_p 差值为 1.5; 在闸门关闭过程中, 底缘 a 在闸前、闸门底部和闸后流态变化明显, 具体为关闭前期闸后淹没出流、后期在闸门底部产生收缩断面, 相对开度 n 接近 0 时为自由出流。其中闸门底缘 b、c 的 3 个测点下 K_p 值差异最小, 工况 b-3 3 个测点下的 K_p 差值为 9。

在 HHT 二维图中, 可以获取 K_p 值在相对开度 n 与频率 f 坐标中的分布情况, 对比各工况同一 n 值的频率与 K_p 值分布情况。在这一系列流态变化中, 闸门开启中工况 b-1 的 K_p 值较小, 且其幅值在 $n-f$ 坐标中沿着相对开度变化分布频率变小; 闸门持住过程中, 工况 b-2 的差值为

1; 闸门关闭过程中, 工况 b-3 的幅值 3 个测点下差值最小为 9。可得在闸门底缘 b 中闸门上所受的脉动压力作用较均匀。

3.3.3 边际谱图分析

分析 12 个工况在 3 个测点下的脉动压力标准值信号的边际谱图所取的第一主频对应的 K_p 能量幅值, 将所有 IMF 分量瞬时频率按最小网格 0.5 Hz 划分, 将最小网格内所有分量瞬时频率进行累加即得边际谱图。如表 3 所示, 3 个测点下

表 3 测点 1、2、3 第一主频对应的 K_p 值

Tab. 3 The K_p value corresponding to the first main frequency of measuring point 1, 2 and 3

测点	启闭速度	闸门状态	底缘	底缘	底缘	底缘
			型式(a)	型式(b)	型式(c)	型式(d)
测点 1	开启 90 s		27.75	269.30	241.40	221.20
	持住 30 s		8.06	19.61	14.18	99.76
	关闭 90 s		99.77	170.50	91.48	128.40
测点 2	开启 90 s		264.40	34.22	302.30	89.89
	持住 30 s		12.92	9.18	16.23	34.14
	关闭 90 s		58.22	91.10	82.86	292.20
测点 3	开启 90 s		19.32	120.10	190.20	731.00
	持住 30 s		14.67	11.00	15.17	14.09
	关闭 90 s		88.46	126.70	46.31	26.51

K_p 值对应的第一主频均为低频信号, 在 0~1 Hz 之间, 而从 3 个测点的 K_p 值信息可知, 闸门底缘 d 的 K_p 值是 4 种闸门中最高的, 闸门底缘 b 的 K_p 值均相对较小; 就 3 个测点的 K_p 值差值来看闸门底缘 d 的差值最大, 闸门底缘 c 的差值均较小。

4 结论

a. 从 HHT 二维图中可得到闸门在底缘 b 下的脉动压力时间—频率—幅值分布平缓, 闸门底部 3 个测点的幅值相近, 闸门底部受脉动压力作用均匀。

b. 通过工况对比, 得到组合式底缘比平底底缘的脉动压力信号连续且突变值小。

参考文献:

[1] LI HONGQI, YANG ZHONGCHAO. Dynamic simulation of hydraulic characteristic of the Yinpan lock during valve opening [J]. Hydro-science and engineering, 2010(3): 101-106.
 [2] 付仙兰, 罗萍萍. 基于改进 Petri 网与希尔伯特黄变换融合的电网故障诊断[J]. 水电能源科学, 2018, 36(3): 210-214.

Time-frequency Characteristics Analysis of Pulsating Pressure of Water Flow Through Gate Based on Hilbert-Huang Transform

ZHANG Rui¹, SHEN Chun-ying¹, MA Jiang-xia^{1,2}

(1. School of Electrical Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China;
 2. Huaneng Lancang River Hydropower Inc., Kunming 650214, China)

Abstract: The plane gate controls water storage and discharge by opening and closing, and is easily damaged by the pulsating pressure of the water flow during operation. In order to study the interaction process between the opening and closing motion of the gate and the flow through the gate, this paper firstly conducted a three-dimensional numerical simulation of the flow through the gate during the opening and closing process of the gate under different bottom edge forms. And then the Hilbert-Huang transform was used to analyze the flow through the gate, and the time-frequency-amplitude information of the signal. The information analysis and comparison found that the bottom edge of the combined gate with a forward tilt of 45° and a backward tilt of 30° is gently affected by the pulsating pressure at the bottom of the gate, and the change difference of the energy amplitude at the measuring point was the smallest, and the water flow state was relatively stable. This study can provide a reference for the analysis of the pulsating pressure of the water flow through the plane gate.

Key words: plane gate; gate bottom edge; pulsating pressure; Hilbert-Huang transform; time-frequency characteristic analysis

*(上接第 181 页)

Three Dimensional Parametric Design and Application of Plane Gate in Whole Process

HA Jia^{1,2}, ZHANG Xue-cai^{1,2}, CHEN Li-ye^{1,2}, ZHANG Fu-fu^{1,2}

(1. Yellow River Engineering Consulting Co., Ltd., Zhengzhou 450003, China; 2. Key Laboratory of Water Management and Water Security for Yellow River Basin, Ministry of Water Resources(Preparation), Zhengzhou 450003, China)

Abstract: Aiming at the problems such as unstable design quality, long design cycle and large repetitive workload in the current gate design, based on the whole process three-dimensional parametric design concept, and according to the design specifications and manuals, a three-dimensional parametric design method for the whole process of gate is proposed, that is, the three-dimensional parametric geometric modeling, spatial structural analysis and engineering drawing of plane gate structure are realized on the same platform by writing corresponding programs. This method can make the gate structure transition from plane design to space design, make the design process more intuitive, improve the quality and efficiency of the design, reduce the repetitive workload caused by design changes in design process.

Key words: plane gate; whole process; three-dimensional parameterization; three-dimensional structure analysis; digital design