

宽顶堰泄流水上噪声影响因素及其频谱特征研究

王大国¹, 余涛¹, 水庆象², 陈雨欣¹, 范艺¹

(1. 西南石油大学土木工程与测绘学院; 2. 西华大学流体及动力机械教育部重点实验室)

摘要:为降低宽顶堰泄流水上噪声并为工程优化设计提供依据,采用物理模型试验与数值模拟相结合的方法,研究了宽顶堰泄流水上噪声的影响因素及其频谱特征。通过物理模型试验探讨了上游流量、下游水深和堰高对水上噪声声压级及脉动压力均方根的影响,建立了水上噪声声压级与各影响因素之间的定量关系,分析了水上噪声A计权频谱特征;利用数值模拟探讨了液滴和气泡群对水上噪声的影响,揭示了水上噪声A计权频谱特征的变化原因。结果表明:水上噪声声压级和脉动压力均方根与上游流量和堰高呈正相关关系,与下游水深呈负相关关系,其中上游流量的影响最为显著,其次为下游水深和堰高;气泡破裂产生的高频噪声导致水上噪声的A计权频谱主频位于高频段;上游流量和堰高的增加导致A计权频谱中高频声压级升高,而下游水深的增加导致A计权频谱中高频声压级降低。

关键词:水上噪声;宽顶堰;脉动压力均方根;回归分析;频谱分析;气泡破裂

Influencing factors and spectral characteristics of water noise induced by flow over broad-crested weir//Wang Dagu¹, Yu Tao¹, Shui Qingxiang², Chen Yuxin¹, Fan Yi¹ (1. School of Civil Engineering and Geomatics, Southwest Petroleum University; 2. Key Laboratory of Fluid and Power Machinery, Ministry of Education, Xihua University)

Abstract: To reduce the water noise induced by flow over broad-crested weirs and provide a basis for engineering optimization, a combined approach integrating physical model experiments and numerical simulations was adopted to investigate the influencing factors and spectral characteristics of the water noise. Physical model experiments were conducted to examine the effects of upstream discharge, downstream water depth, and weir height on the sound pressure level of water noise and the root mean square of fluctuating pressure. Quantitative relationships between the water noise sound pressure level and these influencing factors were established, and the A-weighted spectral characteristics of the water noise were analyzed. Numerical simulations were employed to investigate the effects of droplets and bubble clusters on water noise and reveal the causes of variations in the A-weighted spectrum. The results show that both the sound pressure level of water noise and the root mean square of fluctuating pressure are positively correlated with upstream discharge and weir height, and negatively correlated with downstream water depth. Among these factors, upstream discharge exhibits the most significant influence, followed by downstream water depth and weir height. High-frequency noise generated by bubble bursting leads to the dominant frequency of the A-weighted spectrum of water noise being located in the high-frequency range. Increasing the upstream discharge and weir height raises the high-frequency sound pressure level in the A-weighted spectrum, whereas increasing the downstream water depth reduces the high-frequency sound pressure level.

Key words: water noise; broad-crested weir; root mean square of fluctuating pressure; regression analysis; spectrum analysis; bubble bursting

随着国家持续推动环境保护与生态水利发展,越来越多城市通过修建景观坝来优化河道生态环境、提升城市景观形象^[1]。作为景观坝中一种广泛应用的水工建筑物,宽顶堰在泄流时产生的水上噪声会造成噪声污染,对周边居民的身心健康和生活质量产生不利影响^[2-3]。为降低此类噪声污染,改善

居民生活环境,有必要深入探讨宽顶堰泄流水上噪声的影响因素及其频谱特征。

在宽顶堰水流中,气液两相流噪声的产生机理十分复杂,不仅涉及堰坝结构及水力条件对水流流态的影响^[4-5],也与气泡的形貌演变过程密切相关。针对水流噪声的影响因素,郭维东等^[6]通过物理模

基金项目:国家自然科学基金项目(42171108)

作者简介:王大国(1975—),男,教授,博士,主要从事岩土工程、生态修复及减噪研究。E-mail:dan_wanguo@163.com

通信作者:水庆象(1988—),男,讲师,博士,主要从事湍流模式理论及应用研究。E-mail:shuiqix@163.com

型试验研究了不同条件下 WES 堰下泄水流噪声频谱,发现水上噪声频谱值与消力池尾坎高度、消力池长度和流量有关。段文刚等^[7]通过现场原型观测了三峡大坝深孔和表孔的泄洪水动力特性,并与模型试验对比,发现深孔和表孔检修门槽区、表孔工作门槽区、泄槽末端挑流鼻坎部位以及反弧挑坎部位均存在少量高频噪声。李莎莎等^[8]通过物理模型试验分析了水流噪声与上游流量、下游水深及堰高之间的关系,发现水流噪声与上游流量和堰高呈正相关关系,与下游水深呈负相关关系,且水流对底板的冲击作用及水流自身紊动是产生水流噪声的主要原因。柴雪等^[9]通过物理模型试验分析了消力池中水流噪声与水流动量的关系,发现水流噪声声压级与水流动量之间存在线性正相关关系。Guo 等^[10]通过物理模型试验研究了不同水力条件下橡胶坝下游消力池中的水流噪声,发现水流噪声随消力池长度和尾坎高度增大而减小,随上游流量增大而增大。Xu 等^[11]通过物理模型试验研究了空化气泡质心与水听器位于同一水平线工况时,单个气泡参数对空化气泡破裂噪声强度的影响,发现气泡的圆度、尺寸和间距均会影响噪声辐射。尽管上述原型观测与物理模型试验能够揭示在不同水流条件(如流速、流量、水深等)下水流噪声的变化趋势,但在捕捉下泄水流的复杂流态特征、解析气泡生成与演化机制以及揭示水流噪声产生机理等方面仍存在局限性。

数值模拟方法能够提供复杂流动的高时空分辨率数据,便于分析流动机制,同时可更加精确地揭示水流-气泡混合流的动态特性以及气泡生成与演化过程^[12-14]。这一优势在宽顶堰泄流研究中尤为重要,泄流在重力作用下携带一定量的空气进入下游水体,在水面以下形成大量的多尺度气泡,水面以上则产生液体飞溅并形成雾化液滴,而气泡与液滴在自由面附近发生掺混,导致气泡在水面破裂^[15]。张亚磊等^[16]通过电火花激发空化泡试验研究了自由液面附近空化泡的溃灭特性,发现空气泡和自由液面对空化泡的影响主要体现在溃灭方向和溃灭形态上,且自由液面对空化泡的作用强度明显大于空气泡。张伟等^[17]结合试验与 OpenFOAM 数值模拟研

究了射流卷气入水过程中气泡群的生成与演化规律及其声学特征,发现气泡形成会伴随噪声产生,其主要频率均小于 1 kHz。韩旺等^[18]通过数值模拟研究了气泡完整溃灭周期内的流场变化和压力波产生机制,发现气泡的膨胀过程伴随压力波向外辐射,使得局部高压区域以声速向外传播。Deng 等^[19]通过数值模拟研究了不同体积分数气泡簇的声音辐射行为,发现气泡簇中气泡大小的分布对其声辐射几乎没有影响。Wang 等^[20]采用 OpenFOAM 研究了楔形钝体尾流中多尺度空化流的气泡效应,发现气泡增强了高频区域的压力谱密度强度,这与高频噪声的产生密切相关。

既有研究虽已广泛探究了水流噪声的影响因素及气泡动力学,但针对宽顶堰泄流水上噪声的影响因素和频谱特征研究仍处于起步阶段。此外,现有研究成果多局限于单一研究手段,尚未形成多方法融合的交叉研究体系。鉴于此,本文通过物理模型试验与数值模拟相结合的方法,探讨宽顶堰泄流水上噪声的影响因素,分析水上噪声 A 计权声压级频谱特征的变化规律,以为宽顶堰降噪设计提供理论支撑。

1 试验方案

1.1 试验模型

试验在一个长 30 m、宽 1.2 m、深 1.2 m 的自循环水槽中进行,水槽主要由供水阀门、供水箱、玻璃槽身、宽顶堰模型以及尾门格栅组成。宽顶堰模型布置在距离上游进水口 14 m 处,模型尺寸为长度 $L=0.5$ m,宽度 $B=1.2$ m,高度可通过拆卸调节。水泵房通过输水管道向供水箱供水,通过调节球形阀门控制上游来流量,下游出水口设置不同高度的尾门格栅控制下游水深。试验水槽模型剖面如图 1 所示。

1.2 测点布置

传感器采用 CY200 系列智能数字压力传感器,测量范围为 0~20 kPa,输出信号为 0~5 V,动态频响为 5000 Hz,布置在宽顶堰模型下游水槽底部平面中轴线上,第一个压力测点 P1 距离宽顶堰模型 0.3 m,相邻压力测点 P1、P2、P3、P4 之间的水平间距均为 0.8 m。传声器采用 AWA14423 型传声器,

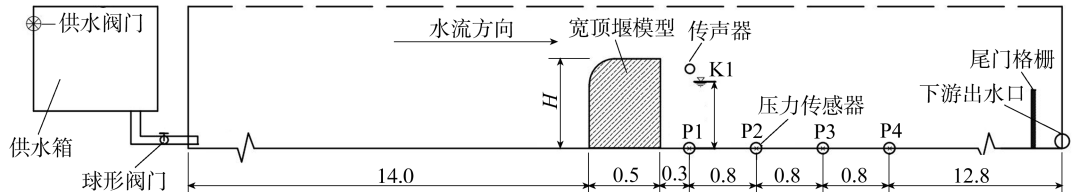


图 1 试验水槽模型剖面(单位:m)

并搭配 AWA14604E 型前置放大器使用,其频率范围为 10~20 000 Hz,总谐波失真 $\leq 0.1\%$,布置在 P1 测点同一竖向轴线上,位于水面以上约 10 cm 处,记为水上噪声测点 K1。压力传感器和传声器的具体布置见图 1。

1.3 试验工况

将宽顶堰下游区域设定为测量观测区域,设置了上游流量 Q 、下游水深 h 及堰高 H 3 个变量,每个变量包含 5 个水平:上游流量分别为 15、30、45、60、75 L/s,下游水深分别为 10、20、30、40、50 cm,堰高分别为 50、60、70、80、90 cm,扣除堰高为 50 cm 时对应的水深为 50 cm 的工况,共有 120 组工况。每组工况重复测量 3 次,取其平均值作为该工况的最终试验数据。

1.4 背景噪声处理

根据 HJ 706—2014《环境噪声监测技术规范噪声测量值修正》规定,背景噪声测点与噪声源测点位置相同,背景噪声测量在噪声源测量之前进行,单次测量时长为 1 min。本文试验中背景噪声值约为 58 dB,大部分工况下试验噪声测量值与背景噪声值的差值(ΔL_1)大于 10 dB,根据规范要求,此部分噪声测量结果无需修正;少部分工况下 ΔL_1 (修约到个位数)介于 3~10 dB 之间,噪声测量结果需要进行修正。根据噪声测量值的修正规则,当 $\Delta L_1 = 3$ dB 时,修正值为 -3 dB;当 $\Delta L_1 = 4、5$ 时,修正值为 -2 dB;当 $\Delta L_1 = 6、7、8、9、10$ 时,修正值为 -1 dB。

2 数值方法

2.1 控制方程和数值求解方法

InterFoam 求解器采用体积分数法 (VOF) 追踪流体界面,VOF 方法通过求解体积分数 α 的输运方程确定两相分布,其中 α 表示某一计算单元内液相所占的体积分数,其取值范围为 0~1。 α 的输运方程可以表示为:

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \nabla \cdot (\mathbf{u}\alpha) = 0 \quad (1)$$

式中: \mathbf{u} 为流场中速度矢量; t 为时间。

为保证 α 保持在 0~1 之间,采用多维通用显式限界器 (MULES) 算法来保证其有界性^[21]。获得体积分数 α 后,采用加权平均法计算两种不混溶流体的密度 ρ 和动力黏度 μ :

$$\rho = \alpha\rho_1 + (1 - \alpha)\rho_g \quad (2)$$

$$\mu = \alpha\mu_1 + (1 - \alpha)\mu_g \quad (3)$$

式中:下标 1 和 g 分别表示液相和气相。

假定流体为不可压缩流体且忽略热传导,其控制方程包括连续性方程和动量方程:

$$\frac{\partial \alpha\rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha\rho\mathbf{u}) = 0 \quad (4)$$

$$\rho \left(\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u} \right) = -\nabla P + \rho\mathbf{g} + \mu \nabla^2 \mathbf{u} + \mathbf{F}_s \quad (5)$$

其中

$$\mathbf{F}_s = \sigma k' \mathbf{n}$$

式中: P 为压力,Pa; \mathbf{g} 为重力加速度, m/s^2 ; \mathbf{F}_s 为表面张力源项; σ 为表面张力系数; \mathbf{n} 为曲面微元的单位法向量; k' 为自由界面的平均曲率,通常 $k' = -\nabla \cdot \mathbf{n}$ 。

本文采用雷诺时均方法对控制方程进行雷诺时均处理,再采用标准 $k-\varepsilon$ 两方程湍流模型^[22],基于涡黏假设对雷诺应力项进行封闭。采用有限体积法对控制方程进行离散和求解,通过在各离散单元体上对微分形式的控制方程进行空间与时间积分实现数值求解。在空间离散化策略上,采用二阶迎风格式对动量方程、紊动能方程和紊动能耗散率方程的对流项进行离散,对扩散项则采用二阶中心差分格式进行离散;在时间离散化策略上,采用二阶隐式后向差分格式进行时间积分,并引入自适应时间步长策略,通过动态调整时间步长,确保局部库朗数始终小于 0.5^[23]。在 InterFoam 求解框架中,离散后的方程组采用结合压力耦合方程组的半隐式 (SIMPLE) 算法和压力隐式算子分裂 (PISO) 算法的 PIMPLE 算法进行求解。PIMPLE 算法的核心思想是将每个时间步长视为一个稳态流动过程,先通过 SIMPLE 算法求解压力-速度耦合问题,再通过 PISO 算法的迭代过程完成单个时间步长的求解。

2.2 计算域和边界条件

图 2 给出了 $H = 70$ cm 时计算域大小。采用二维笛卡尔坐标系 (x, y) 定义流场,其中 x 轴沿来流方向(顺流方向), y 轴为竖直方向,垂直于 x 轴,坐标原点位于宽顶堰前缘下方位置。计算域尺寸为 $16.5 \text{ m} \times 1.2 \text{ m}$ (长 \times 宽),宽顶堰尺寸为 $0.5 \text{ m} \times 0.7 \text{ m}$ (长 \times 宽)。如图 2 所示,绿色和橙色虚线分别表示入口和出口边界,蓝色实线表示与大气环境交互的自由液面边界,红色实线表示水槽底部固壁边界。计算域采用结构化网格划分,并对坝体周围及流场变化剧烈的区域进行网格局部加密。根据宽顶堰高度和下游水深条件调整加密区范围,具体调整方法如图 3 所示。

数值模型的边界条件设置如下:入口压力采用零梯度条件,速度采用变高度流量入口速度条件;出口压力采用零梯度条件,速度采用进出口条件;下壁面压力采用零梯度条件,速度采用无滑移条件;大气边界压力采用总压力条件,速度采用压力进出口速度条件。

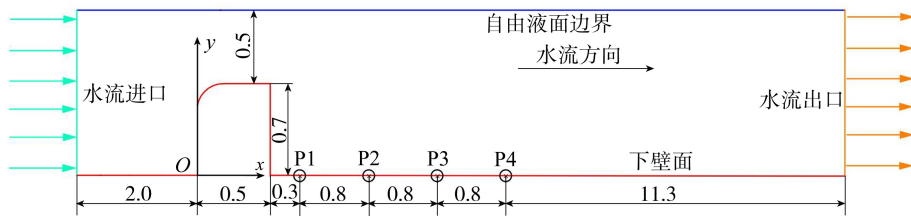


图2 计算域和坐标系(单位:m)

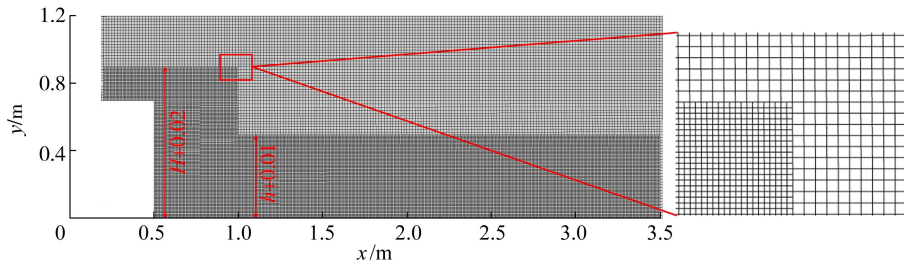


图3 网格局部加密示意图

2.3 网格无关性与数值模型验证

为检验数值模型有效性和可靠性,先选取 $H=70\text{ cm}$ 、 $h=30\text{ cm}$ 、 $Q=75\text{ L/s}$ 工况下 P1 测点 ($x=0.8\text{ m}$ 、 $y=0.005\text{ m}$) 的时均压力来验证不同网格尺寸对数值模拟结果的影响,将数值模型划分为 4 种不同尺寸的网格,各组网格计算所得的时均压力见表 1。

表 1 不同网格尺寸对时均压力的影响

| 网格尺寸/(mm×mm) | 时均压力/kPa | |
|--------------|----------|------|
| | 数值模拟 | 物理试验 |
| 33.3×33.3 | 3.628 | 3.54 |
| 25.0×25.0 | 3.591 | 3.54 |
| 16.6×16.6 | 3.577 | 3.54 |
| 14.3×14.3 | 3.576 | 3.54 |

从表 1 可以看出,随着网格尺寸的缩小,P1 测点处时均压力模拟值逐渐趋于物理试验值。当非加密区域的网格尺寸由 $16.6\text{ mm} \times 16.6\text{ mm}$ 缩小至 $14.3\text{ mm} \times 14.3\text{ mm}$ 时,模拟精度并无显著提升,但计算成本显著增加。综合考虑模拟精度与计算效率,后续所有工况的数值模拟均采用非加密区网格尺寸为 $16.6\text{ mm} \times 16.6\text{ mm}$,加密区域网格尺寸为非加密区域的 1/2。

图 4 对比了 P1 测点处数值模拟与试验测得的时均压力。从图 4 可以看出,数值模拟结果虽略高于试验实测值,但二者变化趋势一致,且所有数据点均处于 97% 置信区间内,表明数值模拟结果与实测结果吻合良好。

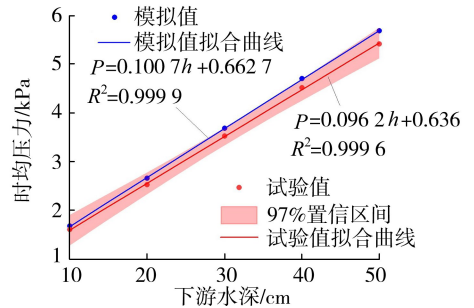


图4 P1 测点处数值模拟和试验的时均压力比较

级^[24]表示试验中噪声大小。声压级 L_p 的计算公式为:

$$L_p = 20 \lg(P'/P_0) \quad (6)$$

式中: P' 为某点声压, kPa; P_0 为基准声压,取值为 $2 \times 10^{-8}\text{ kPa}$,即正常人耳的听阈。

图 5 给出了不同堰高下水上噪声声压级与上游流量和下游水深的关系。由图 5 可知,随着上游流量的逐步增大,水上噪声声压级不断增大;随着下游水深逐渐增大,水上噪声声压级逐渐减小。各试验工况中,水上噪声声压级最大值出现在 $Q=75\text{ L/s}$ 、 $h=10\text{ cm}$ 的工况,最小值出现在 $Q=15\text{ L/s}$ 、 $h=50\text{ cm}$ 的工况。

图 6 给出了不同下游水深下水上噪声声压级与上游流量和堰高的关系。由图 6 可知,随着上游流量和堰高的逐步增大,水上噪声声压级呈增大趋势。各试验工况下,水上噪声声压级最大值出现在 $Q=75\text{ L/s}$ 、 $H=90\text{ cm}$ 的工况,最小值出现在 $Q=15\text{ L/s}$ 、 $H=50\text{ cm}$ 的工况。

3.2 脉动压力波动分析

宽顶堰泄流的压力脉动幅值采用脉动压力均方根^[25](P_{RMS})进行分析。 P_{RMS} 是衡量压力波动强度的常用指标,能较好地反映压力波动的能量分布特征。

3 试验结果与分析

3.1 水上噪声声压级分析

为便于量化分析和比较噪声大小,引入声压

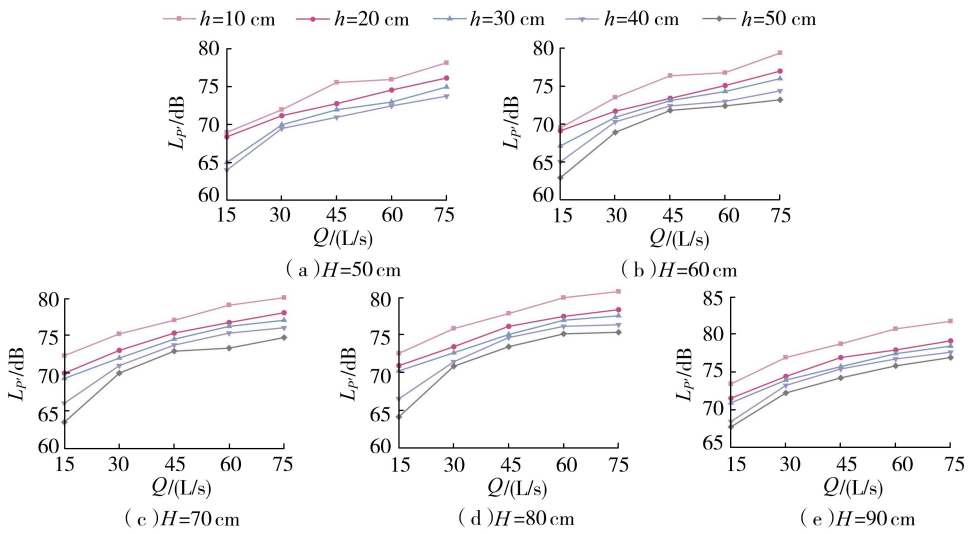


图5 不同堰高下水上噪声声压级与上游流量和下游水深的关系

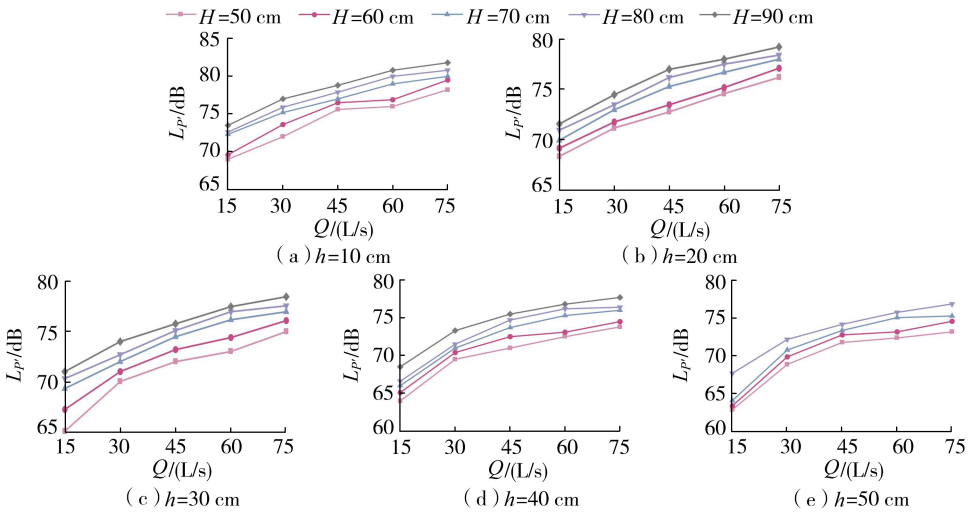


图6 不同下游水深下水上噪声声压级与上游流量和堰高的关系

图7给出了不同堰高下P1测点脉动压力均方根与上游流量和下游水深的关系。由图7可知,当堰高恒定时,P1测点的压力脉动均方根随上游流量的增大而增大,随下游水深的增大而减小。脉动压

力均方根最大值出现在 $h = 10\text{ cm}$ 、 $Q = 75\text{ L/s}$ 的工况,最小值出现在 $h = 50\text{ cm}$ 、 $Q = 15\text{ L/s}$ 的工况。

图8给出了不同上游流量下P1测点脉动压力均方根与堰高和下游水深的关系。由图8可知,在

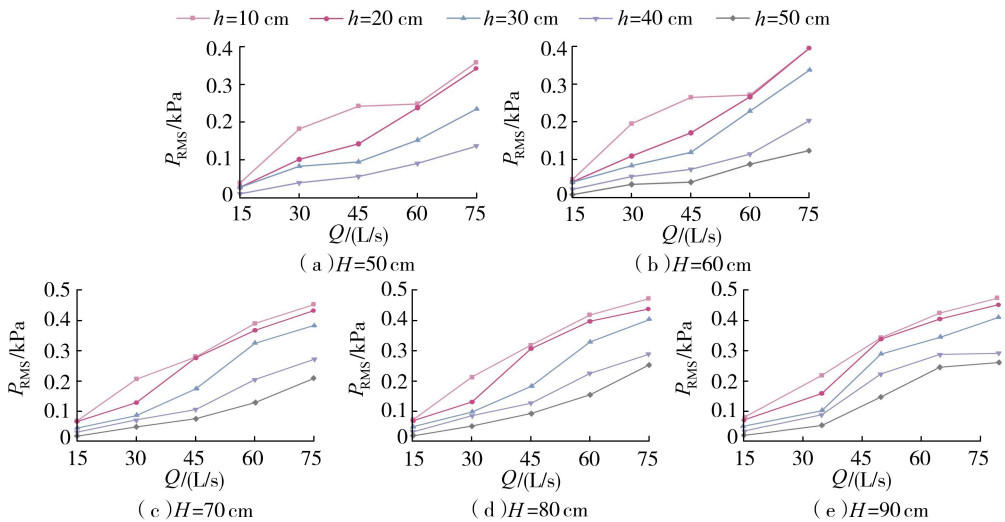


图7 不同堰高下P1测点脉动压力均方根与上游流量和下游水深的关系

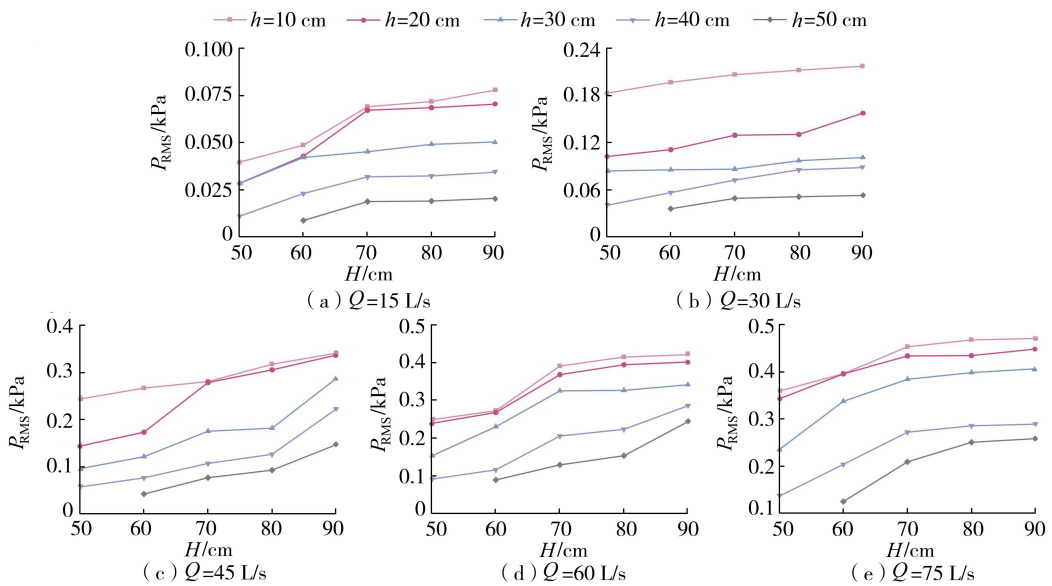


图8 不同上游流量下P1测点脉动压力均方根与堰高和下游水深的关系

上游流量一定情况下, P1测点脉动压力均方根随堰高的增大而增大, 随下游水深增大而减小。脉动压力均方根最大值出现在下游水深 $h=10\text{ cm}$ 、堰高 $H=90\text{ cm}$ 的工况, 最小值出现在 $h=50\text{ cm}$ 、 $H=50\text{ cm}$ 的工况。

3.3 水上噪声影响因素分析

由前面分析结果可知, 随着上游流量和堰高的增大, 水上噪声声压级和脉动压力均方根均呈上升趋势; 随着下游水深的增大, 两者均呈现下降趋势。这表明水上噪声声压级和脉动压力均方根的变化趋势一致。

为了研究水上噪声声压级和脉动压力均方根与堰高、上游流量、下游水深之间的关系, 以及进一步明确水上噪声声压级与脉动压力均方根之间的关系, 本文采用皮尔逊相关系数法和多元线性回归法分析变量间的相关性, 并构建变量间的定量关系。为消除量纲的影响, 采用极小值方法对变量进行无量纲化处理。

皮尔逊相关系数 r 表征两个变量之间的相关程度, 具体划分标准见文献[26]。表2给出了水上噪声声压级和脉动压力均方根与各影响因素的相关性, 可见水上噪声声压级和脉动压力均方根与堰高、上游流量呈正相关关系, 与下游水深呈负相关关系,

且水上噪声声压级与脉动压力均方根呈正相关关系, 其中上游流量对水上噪声声压级和脉动压力均方根的影响最大, 下游水深处之, 堰高最小。

表2 水上噪声声压级和脉动压力均方根与各影响因素的相关性

| 变量 | 水上噪声声压级 | 脉动压力均方根 | 堰高 | 上游流量 | 下游水深 |
|---------|---------|---------|---------|---------|----------|
| 水上噪声声压级 | 1 | 0.896** | 0.327** | 0.780** | -0.427** |
| 脉动压力均方根 | | 1 | 0.244** | 0.787** | -0.455** |
| 堰高 | | | 1 | | |
| 上游流量 | | | | 1 | |
| 下游水深 | | | | | 1 |

注: **表示在0.01水平上相关性显著。

表3给出了水上噪声声压级和脉动压力均方根与各影响因素的回归分析结果。由表3可知, 基于自变量堰高、上游流量、下游水深建立的两个回归方程对因变量水上噪声声压级和脉动压力均方根具有较高的解释能力, 其决定系数 R^2 分别为0.962和0.953; 以脉动压力均方根为自变量建立的对水上噪声声压级回归方程的决定系数 R^2 为0.896, 说明线性回归方程的拟合度较强。各自变量的方差膨胀因子(VIF)介于1~5之间, 表明自变量之间共线性程度相对较低, 可以认为自变量之间不存在显著多重共线性问题。

表3 水上噪声声压级和脉动压力均方根与各影响因素的回归分析结果

| 因变量 | 自变量 | 回归分析方程 | R^2 | 显著性 | VIF |
|---------|---------|---|-------|--------|-------|
| 水上噪声声压级 | 堰高 | $L_{p'} = 0.221H + 0.457Q - 0.276h + 0.357$ | 0.962 | <0.001 | 1.008 |
| | 上游流量 | | | | |
| | 下游水深 | | | | |
| 脉动压力均方根 | 堰高 | $P_{RMS} = 0.239H + 0.639Q - 0.4h + 0.133$ | 0.953 | <0.001 | 1.008 |
| | 上游流量 | | | | |
| | 下游水深 | | | | |
| 水上噪声声压级 | 脉动压力均方根 | $L_{p'} = 0.646P_{RMS} + 0.319$ | 0.896 | <0.001 | 1.008 |

3.4 水上噪声频谱特征

对采集的声压原始数据进行快速傅里叶变换和汉宁窗处理得到噪声的初步频谱,随后根据频率范围确定 1/3 倍频程,并采用振动振级方法将其转换为未计权 1/3 倍频声压级频谱,最后对各频带施加 A 计权修正,获得 A 计权 1/3 倍频声压级频谱。根据声学特性及声级分布范围,将频率划分为 3 个频段^[27]:0~350 Hz 为低频段,350~1 000 Hz 为中频段,1 000~8 000 Hz 为高频段。

图 9 给出了 K1 测点在 $H=50、60\text{ cm}$, $Q=45、60\text{ L/s}$ 条件下不同工况的水上噪声 A 计权 1/3 倍频程频谱。由图 9 可知,各工况下水上噪声的主频及主能量区均位于高频段;在高频区,同一频率下声压级随下游水深的增大而逐渐减小,其中最大值出现在下游水深 $h=10\text{ cm}$,最小值出现在 $h=50\text{ cm}$ 的工况。由图 9(c)(d) 可知,在不同上游流量下,水上噪声 A 计权频谱主频均出现在高频段,当 $h=10\text{ cm}$ 、

$H=60\text{ cm}$ 时, $Q=45、60\text{ L/s}$ 对应的主频值分别为 67.6、68.2 dB。由图 9(a)(c) 可知,在 $Q=45\text{ L/s}$ 、 $h=10\text{ cm}$ 时, $H=50、60\text{ cm}$ 对应的水上噪声 A 计权频谱的主频幅值分别为 66.8、67.6 dB,幅值逐渐变大。由此可得出水上噪声 A 计权声压级随下游水深的增大而减小,随上游流量和堰高的增大而增大,其主频均位于高频段。

4 数值模拟结果与分析

根据文献[28]的研究,水工建筑物泄流过程中气泡破裂所产生的噪声属于高频噪声范畴。为进一步理解水上噪声 A 计权频谱在高频段的变化原因,本文结合数值模拟手段,分析气泡破裂与水上噪声之间的关系。

4.1 水气界面液滴对水上噪声的影响

图 10 给出了 $H=90\text{ cm}$ 、 $Q=75\text{ L/s}$ 、 $h=50\text{ cm}$ 工况下宽顶堰下游的瞬时流态。由图 10 可知,在

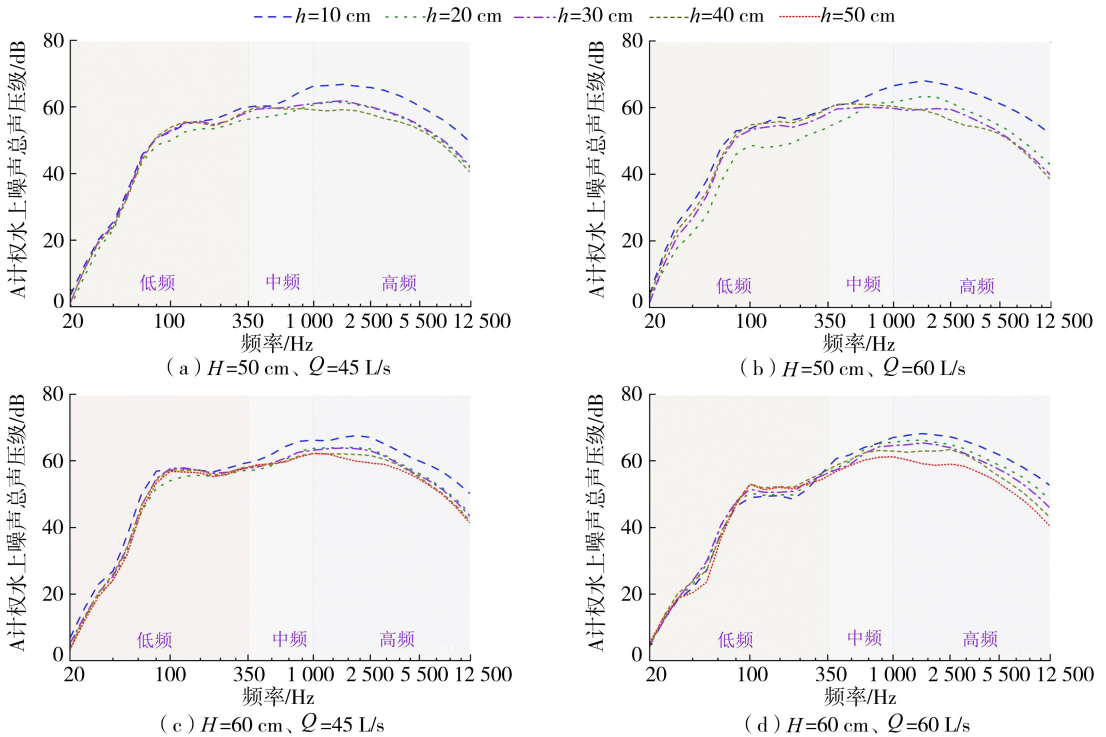


图 9 不同工况下 K1 测点的水上噪声 A 计权 1/3 倍频程频谱

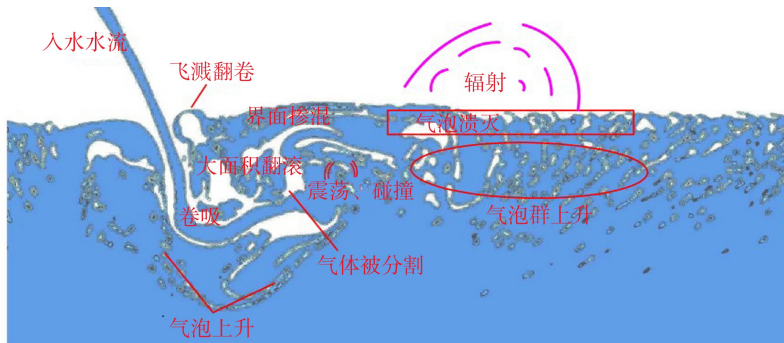


图 10 $H=90\text{ cm}$ 、 $Q=75\text{ L/s}$ 、 $h=50\text{ cm}$ 工况下宽顶堰下游的瞬时流态

水-气界面处,宽顶堰泄流对下游水体产生强烈撞击,导致水流剧烈混合,引发水面上液滴飞溅雾化和水-气界面的翻卷破裂^[29-30],水面下形成的大量微小气泡对噪声的产生具有显著影响^[31]。液滴在强大冲击力作用下迅速破碎,产生更小的液滴和气泡,气泡在震荡、破裂过程中激发声波辐射,产生水上噪声^[32]。同时,水流的卷吸效应引起水面大面积翻滚,加剧了水气间的紊动交换,空气被分割后,在剪切力和压力下逐渐聚集形成气泡^[33],气泡受浮力驱动上升至水面并最终破裂。在水-气界面处,液滴飞溅雾化以及小气泡破裂释放的瞬时高强度辐射声波,是宽顶堰泄流水上噪声的重要来源之一。

4.2 微小气泡群对水上噪声的影响

泄流撞击水面后形成的水下微小气泡群在浮力作用下上升,其间会经历碰撞、聚集或破裂等现象。图 11 给出了 $H=90\text{ cm}$ 、 $Q=75\text{ L/s}$ 、 $h=50\text{ cm}$ 工况下宽顶堰下游 $x=0.5\sim 1.5\text{ m}$ 、 $y=0\sim 0.8\text{ m}$ 范围, $t=20.4\sim 21.5\text{ s}$ 时段内气泡演化过程。由图 11 可知,在该时间段内,单个气泡经历了初生、生长、分裂、融合和破裂等演变过程。这些过程中气泡界面的突然变化导致局部压力的瞬时变化,进而对噪声辐射产生影响^[34]。具体来看,在 $t=20.4\sim 20.8\text{ s}$ 时间段内,在水面漩涡卷吸和浮力共同作用下,气泡向上移动并发生分裂,形成两个新的气泡,分别标记为气泡 1 和气泡 2(图 11(e))。在 $t=20.9\sim 21.3\text{ s}$ 时间段内,气泡 1 和气泡 2 在水流运动和湍流效应的影响下继续上升,其中气泡 2 与邻近气泡发生融合,在水-气界面处形成一个较大的气泡,而气泡 1 在水中继续经历分裂和与周围气泡的融合过程(图 11(j))。在 $t=21.4\sim 21.5\text{ s}$ 时间段内,气泡 2 融合形成的大气泡在上升过程中,随水深减小,外部

水体压力降低,气泡内部压力使气泡体积逐渐增大,表面张力作用使气泡形态变得不稳定,最终导致气泡发生垂直溃灭并释放气体(图 11(1))。在气泡垂直溃灭过程中,气泡内部高压气体迅速释放,产生强烈的冲击波,这些冲击波以声波形式向水面上方传播,形成水上噪声。

综合图 10 和图 11 的分析可见,气泡在水-气界面破裂时会释放声能,并以声波形式向空气中辐射,从而形成水上噪声。因此,气泡破裂产生的噪声是宽顶堰泄流水上噪声的主要声源之一。

4.3 不同试验变量对气泡数量的影响

图 12 给出了不同上游流量、下游水深和堰高工况下宽顶堰下游 $x=0.5\sim 3.5\text{ m}$ 、 $y=0\sim 0.8\text{ m}$ 范围内气泡数量变化。由图 12(a)(d)(g) 对比分析可知,当 $h=30\text{ cm}$ 、 $H=60\text{ cm}$ 时,随着上游流量的增大,宽顶堰的泄流流量与动量相应增大,对下游水面的冲击力显著增强,使得泄流进入下游水体的深度显著增加,水-气界面的扰动和翻滚现象加剧,液滴飞溅更为剧烈,从而导致下游水体中气泡数量显著增多。由图 12(b)(e)(h) 对比分析可知,当 $Q=60\text{ L/s}$ 、 $H=60\text{ cm}$ 时,随着宽顶堰下游水深的增加,泄流对下游水面的冲击得以缓解,泄流进入下游水体的深度减小,水-气界面的扰动和翻滚现象逐渐减弱,导致下游水体中气泡数量有所减少。由图 12(c)(f)(i) 对比分析可知,当 $Q=60\text{ L/s}$ 、 $h=30\text{ cm}$ 时,随着堰高的增加,泄流进入下游水体的深度略有增加,水-气界面的扰动与翻滚现象以及液滴飞溅的程度轻微增强,导致下游水体中的气泡数量有所增加。

4.4 水上噪声 A 计权频谱变化分析

综合分析图 9~12 及第 3.4 节的研究结果可

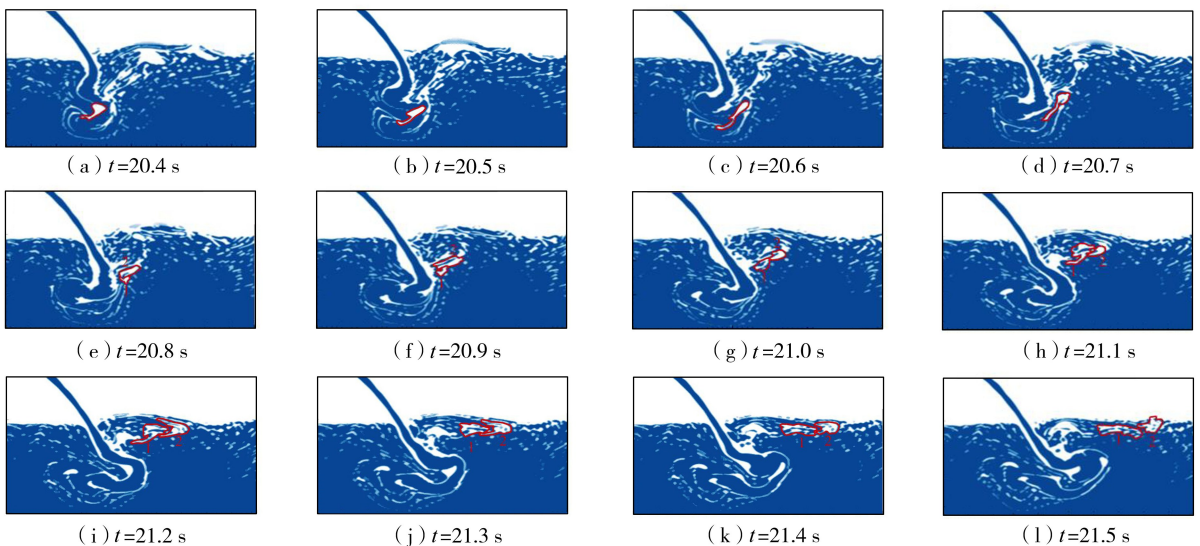


图 11 $H=90\text{ cm}$ 、 $Q=75\text{ L/s}$ 、 $h=50\text{ cm}$ 工况下宽顶堰下游 $t=20.4\sim 21.5\text{ s}$ 时段内气泡变化

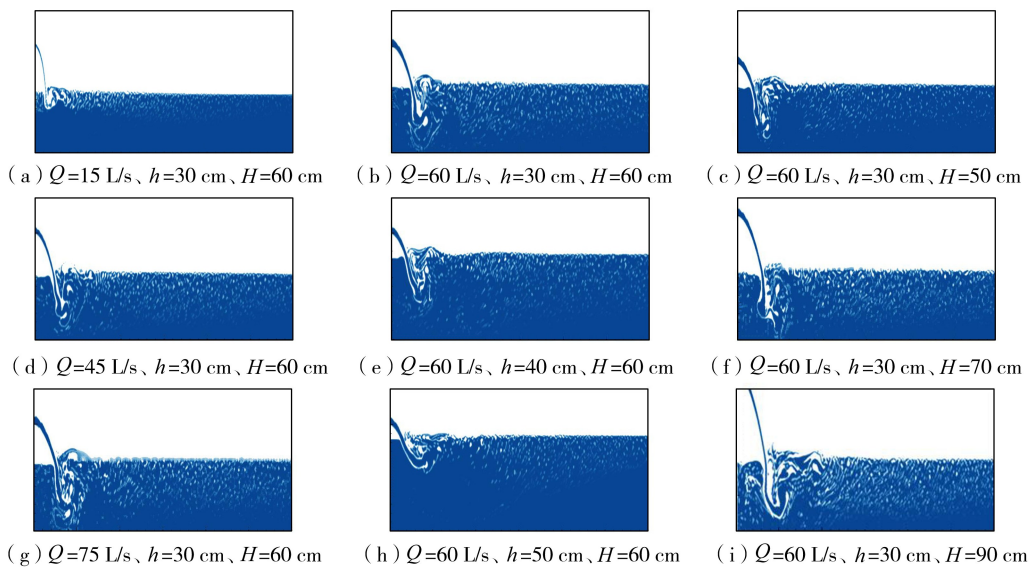


图 12 不同上游流量、下游水深和堰高工况下气泡数量变化

知,水上噪声的 A 计权频谱变化主要受上游流量、下游水深以及堰高 3 个因素影响。随着上游流量和堰高的增加,泄流进入下游水体深度加大,水体内部的扰动与翻滚现象加剧,液滴飞溅效应增强。这些变化促进气泡数量增长并导致大量气泡破裂,产生更多的高频噪声。因此,上游流量和堰高增加会导致水上噪声 A 计权频谱中高频成分声压级升高。

另一方面,随着下游水深的增加,泄流进入下游水体深度减小,水-气界面扰动与翻滚现象减弱,液滴飞溅强度降低。这些变化会减少气泡数量以及气泡破裂,降低高频噪声产生。因此,下游水深增加使得水上噪声的 A 计权频谱中高频成分声压级降低。

5 结论

a. 宽顶堰下游泄流入水区域的水上噪声声压级和下游脉动压力均方根与堰高、上游流量呈正相关关系,与下游水深呈负相关关系。其中,上游流量对水上噪声声压级和脉动压力均方根的影响最为显著,下游水深次之,堰高的影响相对较小。

b. 宽顶堰水上噪声的 A 计权频谱主频集中在高频段,其主要声源为气泡破裂时产生的高频噪声。

c. 上游流量和堰高增加导致气泡数量增多,使得水上噪声 A 计权频谱中的高频成分声压级随之升高;而下游水深增加导致气泡数量减少,使得水上噪声 A 计权频谱中的高频成分声压级相应降低。

参考文献:

[1] 万军芳,郭新超,胡恩,等. 基于 WQI 和 TLI 的渭河关中流域城市典型坝控景观河道水质评价[J]. 环境工程, 2022,40(2):66-70. (Wan Junfang, Guo Xinchao, Hu En, et al. Water quality assessment of typical dam controlled

urban scenic rivers in Guanzhong section of Weihe River basin based on WQI and TLI [J]. Environmental Engineering, 2022, 40(2):66-70. (in Chinese))

[2] Mehrotra A, Shukla S, Shukla A K, et al. A comprehensive review of auditory and non-auditory effects of noise on human health [J]. Noise & Health, 2024, 26(121):59-69.

[3] Xu Bingshu. Prediction of environmental pollution hazard index of water conservancy system based on fuzzy logic [J]. International Journal of Thermofluids, 2024, 21: 100549.

[4] 王煜,石敏,卢晓春. 过水设施水流噪声的形成机理及影响因子研究综述[J]. 水利水电科技进展, 2023, 43(1):9-14. (Wang Yu, Shi Min, Lu Xiaochun. A review on formation mechanism and influencing factors of water noise of overflow facilities [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2023, 43(1):9-14. (in Chinese))

[5] 王煜,洪凯,石敏. 水力参数对城市景观闸坝泄流噪声的影响[J]. 水利水电科技进展, 2025, 45(4):1-8. (Wang Yu, Hong Kai, Shi Min. Influence of hydraulic parameters on discharge noise of urban landscape dams [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2025, 45(4):1-8. (in Chinese))

[6] 郭维东,金明星,赵光昱,等. 不同条件下 WES 堰下泄流水噪声试验研究[J]. 人民黄河, 2017, 39(2):116-119. (Guo Weidong, Jin Mingxing, Zhao Guangyu, et al. Analysis of the water noise value of the WES weir under different conditions [J]. Yellow River, 2017, 39(2):116-119. (in Chinese))

[7] 段文刚,侯冬梅,王才欢,等. 三峡大坝泄水建筑物水力学原型观测与分析[J]. 水利学报, 2019, 50(11):1339-1349. (Duan Wengang, Hou Dongmei, Wang Caihuan, et al. Hydraulic prototype observation and analysis of Three

- Gorges Dam discharge structures[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2019, 50(11):1339-1349. (in Chinese))
- [8] 李莎莎,李硕,王大国,等.无坎宽顶堰水噪声产生机理物理模型试验研究[J].人民长江,2020,51(1):195-202. (Li Shasha, Li Shuo, Wang Daguo, et al. Physical model test on water noise generating mechanism in broad-crested ridge-free weir[J]. Yangtze River, 2020, 51(1): 195-202. (in Chinese))
- [9] 柴雪,郭维东,管福瑞,等.消力池内部水流动量对水噪声的影响[J].人民黄河,2020,42(3):97-100. (Chai Xue, Guo Weidong, Guan Furui, et al. Influence of flow momentum on water noise in the stilling basin[J]. Yellow River, 2020, 42(3):97-100. (in Chinese))
- [10] Guo Weidong, Tian Ruyan, Wang Yi. Experiment research on water noise of the rubber dam[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2018, 113(1): 012147.
- [11] Xu Weilin, Li Jianbo, Luo Jing, et al. Effect of a single air bubble on the collapse direction and collapse noise of a cavitation bubble[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2021, 120:110218.
- [12] 袁浩,詹蝶,宋翔,等.基于格子玻尔兹曼方法的附壁型空化泡演化模拟[J].水利水电科技进展,2024,44(4):7-13. (Yuan Hao, Zhan Die, Song Xiang, et al. Simulation on evolution of an attached-wall cavitation bubble based on lattice Boltzmann method[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2024, 44(4):7-13. (in Chinese))
- [13] 杜先荣,尹建勇,张永学,等.基于OpenFOAM的缺陷壁面附近空化泡动力学过程模拟[J].水利水电科技进展,2025,45(1):39-46. (Du Xianrong, Yin Jianyong, Zhang Yongxue, et al. Simulation of cavitation bubble dynamics near defective wall surface based on OpenFOAM[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2025, 45(1):39-46. (in Chinese))
- [14] 冉彬君,汪磊,袁浩,等.基于格子玻尔兹曼方法的近壁区空化泡生长溃灭过程模拟[J].水利水电科技进展,2023,43(5):32-37. (Ran Binjun, Wang Lei, Yuan Hao, et al. Simulation of growth and collapse processes of near-wall cavitation bubbles with lattice Boltzmann method[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2023, 43(5):32-37. (in Chinese))
- [15] 张晓嵩,和康健,万德成.船海结构物水气泡混合流机理及数值模拟方法研究进展[J].中国舰船研究,2022,17(3):1-28. (Zhang Xiaosong, He Kangjian, Wan Decheng. Research progress on mechanism and numerical simulation methods of water-air-bubble mixed flow around marine structure[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2022, 17(3):1-28. (in Chinese))
- [16] 张亚磊,许唯临,张祺,等.自由液面附近空化泡的溃灭特性[J].水利学报,2017,48(2):127-134. (Zhang Yalei, Xu Weilin, Zhang Qi, et al. Collapse characteristics of the cavitation bubble near free surface[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2017, 48(2):127-134. (in Chinese))
- [17] 张伟,陈晓明,王宗龙,等.射流卷气入水形成气泡群的实验与数值模拟研究[J].水动力学研究与进展,2021,36(6):793-797. (Zhang Wei, Chen Xiaoming, Wang Zonglong, et al. Numerical and experimental study of air-entrainment for jet impinging[J]. Chinese Journal of Hydrodynamics, 2021, 36(6):793-797. (in Chinese))
- [18] 韩旺,朱兵.自由空间单气泡溃灭过程研究[J].水动力学研究与进展,2024,39(1):58-65. (Han Wang, Zhu Bing. Study on collapse process of single bubbles in free space[J]. Chinese Journal of Hydrodynamics, 2024, 39(1):58-65. (in Chinese))
- [19] Deng Fuqiang, Zhang Lingxin, Wang Peng, et al. Influence of distribution parameters on acoustic radiation from bubble clusters[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2024, 111: 107066.
- [20] Wang Ziyang, Cheng Huaiyu, Bensow R E, et al. Numerical evaluation of the bubble dynamic influence on the characteristics of multiscale cavitating flow in the bluff body wake[J]. International Journal of Multiphase Flow, 2024, 175:104818.
- [21] Duy T N, Nguyen V T, Phan T H, et al. An enhancement of coupling method for interface computations in incompressible two-phase flows[J]. Computers & Fluids, 2021, 214:104763.
- [22] Ahmadi M, Mirjalily S A A, Oloomi S A A. Simulation of pollutant dispersion in urban street canyons using hybrid RANS-LES method with two-phase model[J]. Computers & Fluids, 2020, 210:104676.
- [23] Shui Qingxiang, Duan Cuie, Wu Xinyi, et al. A hybrid dynamic Smagorinsky model for large eddy simulation[J]. International Journal of Heat and Fluid Flow, 2020, 86: 108698.
- [24] 宁舜山,张倩,肖伟,等.形状变化对空腔噪声的抑制效果[J].振动与冲击,2021,40(22):209-215. (Ning Shunshan, Zhang Qian, Xiao Wei, et al. Effect of the shape change of cavity on aerodynamic noise suppression[J]. Journal of Vibration and Shock, 2021, 40(22):209-215. (in Chinese))
- [25] 杨帆,高慧,刘超,等.轴流泵装置出水流道内流脉动与流动噪声试验分析[J].农业机械学报,2018,49(3):144-149. (Yang Fan, Gao Hui, Liu Chao, et al. Experiment analysis on flow-induced pulsation and noise in outlet conduit of vertical axial-flow pumping system[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(3):144-149. (in Chinese))

(下转第 23 页)

- Analysis of river regime evolution in Jiubao-Dazhangzhuang reach of the lower Yellow River based on remote sensing [J]. *Yellow River*, 2022, 44 (2): 55-57. (in Chinese))
- [11] 窦明, 乔若辉, 郑钊, 等. 基于遥感影像的黄河下游游荡型河段主槽演变特征研究 [J]. *中国农村水利水电*, 2023 (6): 120-127. (Dou Ming, Qiao Ruohui, Zheng Zhao, et al. Research on the evolution characteristics of the main channel in the Lower Reaches of the Yellow River based on remote sensing images [J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2023(6):120-127. (in Chinese))
- [12] 裴亮, 潘丽. 基于 Landsat 8 卫星 OLI 影像的合肥市水体信息提取方法研究 [J]. *测绘与空间地理信息*, 2018, 41(9):143-146. (Pei Liang, Pan Li. Study on the method of extracting water information in Hefei based on Landsat 8 satellite OLI image [J]. *Geomatics & Spatial Information Technology*, 2018, 41(9):143-146. (in Chinese))
- [13] 夏军强, 程亦菲, 周美蓉, 等. 黄河下游游荡段河势演变及模拟技术 [J]. *中国水利*, 2023 (20): 20-25. (Xia Junqiang, Cheng Yifei, Zhou Meirong, et al. River regime evolution and simulation technique in wandering section of the lower Yellow River [J]. *China Water Resources*, 2023 (20):20-25. (in Chinese))
- [14] Xia Junqiang, Li Xiaojuan, Li Tao, et al. Response of reach-scale bankfull channel geometry to the altered flow and sediment regime in the lower Yellow River [J]. *Geomorphology*, 2014, 213:255-265.
- [15] 姚文艺, 高亚军, 安催花, 等. 百年尺度黄河上中游水沙变化趋势分析 [J]. *水利水电科技进展*, 2015, 35(5): 112-120. (Yao Wenyi, Gao Yajun, An Cuihua, et al. Analysis of trend of runoff and sediment load in upper and middle reaches of Yellow River at century scale [J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2015, 35(5):112-120. (in Chinese))
- [16] 高宗军, 冯国平. 黄河水沙变化趋势及成因分析 [J]. *地下水*, 2020, 42 (1): 147-151. (Gao Zongjun, Feng Guoping. Analysis on the trend and cause of water and sediment in the Yellow River [J]. *Ground Water*, 2020, 42 (1):147-151. (in Chinese))
- [17] 林秀芝, 董晨燕, 苏林山, 等. 黄河小北干流冲淤与水沙响应关系分析 [J]. *人民黄河*, 2019, 41(5): 5-8. (Lin Xiuzhi, Dong Chenyan, Su Linshan, et al. Analysis of the relationship between scouring and silting and response of water and sediment in Xiaobeiganliu Reach of the Yellow River [J]. *Yellow River*, 2019, 41(5): 5-8. (in Chinese))
- [18] 余倩, 安瑞冬, 李嘉, 等. 辫状河流形态形成及演变机制分析 [J]. *水电能源科学*, 2019, 37(6): 40-43. (Yu Qian, An Ruidong, Li Jia, et al. Analysis of formation and evolution mechanism of braided river [J]. *Water Resources and Power*, 2019, 37(6):40-43. (in Chinese))

(收稿日期:2024-10-16 编辑:俞云利)

(上接第 10 页)

- [26] 尚敏, 廖芬, 马锐, 等. 白家包滑坡变形与库水位、降雨相关性定量分析研究 [J]. *工程地质学报*, 2021, 29 (3): 742-750. (Shang Min, Liao Fen, Ma Rui, et al. Quantitative correlation analysis on deformation of Baijiabao landslide between rainfall and reservoir water level [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2021, 29 (3): 742-750. (in Chinese))
- [27] 王红艳, 张法星, 刘昶. 燕尾坎挑流消能噪声的影响因素分析 [J]. *水电能源科学*, 2019, 37(8): 80-83. (Wang Hongyan, Zhang Faxing, Liu Chang. Analysis of influencing factors of ski-jump energy dissipation noise with dovetail camp [J]. *Water Resources and Power*, 2019, 37(8):80-83. (in Chinese))
- [28] 胡志华. 消力池水流噪声产生机理及影响因素研究 [D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2015.
- [29] 薛万云, 杨家修, 杜群祥, 等. 基于 CFD 的挑流泄洪雾化特性研究 [J]. *水利水电科技进展*, 2020, 40(4): 16-20. (Xue Wanyun, Yang Jiayou, Du Shuaiqun, et al. Study on characteristics of flood discharge atomization of ski-jump jet based on CFD [J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2020, 40(4):16-20. (in Chinese))
- [30] Zhang Xiaosong, Wang Jianhua, Wan Decheng. An improved multi-scale two phase method for bubbly flows [J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 2020, 133: 103460.
- [31] 于连杰, 赵伟文, 万德成. 含水气界面水动力噪声计算方法研究与应用进展综述 [J]. *中国舰船研究*, 2022, 17 (5): 85-102. (Yu Lianjie, Zhao Weiwen, Wan Decheng. Research progress and application of computational method for hydrodynamic noise from air-water interface [J]. *Chinese Journal of Ship Research*, 2022, 17(5): 85-102. (in Chinese))
- [32] Wang Zhaoyuan, Yang Jianming, Stern F. High-fidelity simulations of bubble, droplet and spray formation in breaking waves [J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2016, 792:307-327.
- [33] 张袁宁, 刘刚, 童富果. 基于水气两相流的泄洪雾化机理及规律研究 [J]. *水动力学研究与进展*, 2020, 35 (4): 515-525. (Zhang Yuanning, Liu Gang, Tong Fuguo. Mechanism and change law of water-air two-phase flood discharge atomization [J]. *Chinese Journal of Hydrodynamics*, 2020, 35(4):515-525. (in Chinese))
- [34] Song J H, Johansen K, Prentice P. An analysis of the acoustic cavitation noise spectrum: the role of periodic shock waves [J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2016, 140(4):2494-2505.

(收稿日期:2024-12-28 编辑:雷燕)