

水力参数对城市景观闸坝泄流噪声的影响

王煜,洪凯,石敏

(三峡大学水利与环境学院,湖北宜昌 443002)

摘要:为有效控制城市景观闸坝泄流噪声,利用 RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型和 FW-H 声学模型进行闸坝泄流场和噪声数值模拟,分析了不同水力参数对闸坝泄流噪声及其分布特征的影响。结果表明:随着流量或堰顶水深的增大,泄流流速及动压增大,消力池内水体紊动程度及涡旋程度提高,噪声声压级和声功率谱密度增大;随着下游水深增大,泄流流速及动压减小,噪声声压级及声功率谱密度减小;不同流量和下游水深工况下泄流噪声主频集中于 500~1000 Hz,不同堰顶水深工况下噪声主频集中于 500~1200 Hz;流速与泄流区域声压级及非溢流段边壁区域声功率谱密度显著正相关,湍动能与泄流区域声压级及泄流段声功率谱密度显著正相关,动压与各区域声压级及泄流区域声功率谱密度显著正相关,涡量与非溢流段边壁区域声压级显著正相关,各流场因子与噪声主频无明显相关关系。

关键词:景观闸坝;泄流噪声;水力参数;噪声特性;数值模拟

中图分类号:TV131.3 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2025)04-0001-08

Influence of hydraulic parameters on discharge noise of urban landscape dams//WANG Yu, HONG Kai, SHI Min
(College of Hydraulic and Environmental Engineering, China Three Gorges University, Yichang 443002, China)

Abstract: To effectively control the discharge noise of urban landscape dams, the RNG $k-\varepsilon$ turbulence model and FW-H acoustic model were used to simulate the flow field and noise of dam discharge. The influence of different hydraulic parameters on the discharge noise characteristics was analyzed. The results show that with the increase of flow rate or water depth over the weir, the discharge velocity and dynamic pressure increase, the degrees of water turbulence and vortex in the stilling pool intensify, and the sound pressure level and sound power spectral density of noise increase. With the increase of downstream water depth, the discharge velocity and dynamic pressure decrease, and the sound pressure level and sound power spectral density of noise decrease. The dominant frequency of discharge noise ranges from 500 to 1 000 Hz under different flow rates and downstream water depths, and it ranges from 500 to 1 200 Hz under different water depths over the weir. The discharge velocity is significantly positively correlated with the sound pressure level in the discharge area and the sound power spectral density in the non-overflow side wall area. The turbulent kinetic energy is significantly positively correlated with the sound pressure level in the discharge area and the sound power spectral density in the discharge section. The dynamic pressure is significantly positively correlated with the sound pressure level in each region and the sound power spectral density in the discharge area. There is a significant positive correlation between the vorticity and sound pressure level in the side wall area of non-overflow section. There is no significant correlation between the flow field factors and the main frequency of the discharge noise.

Key words: landscape dam; discharge noise; hydraulic parameters; noise characteristics; numerical simulation

为充分利用城市水资源,促进城市生态文明建设,多地政府在城市河流上修建了景观闸坝^[1],其结构简单、形式多样,可具备水利、生态、景观等多种功能^[2]。然而,闸坝泄流时会产生持续、高分贝的噪声,影响河道两岸声环境^[3]。根据 GB 3096—2008《声环境质量标准》可知居民区夜间环境噪声限值为 45 dB^[4]。例如宜昌韦家嘴闸坝泄流时噪声最高达 83.9 dB,远超居民区夜间噪声限值;成都府

南河上 6 座橡胶坝运行过程中产生的泄流噪声对附近居民的日常工作及休憩产生严重影响。可见,城市低水头景观闸坝泄流噪声已成为影响附近居民生活幸福指数的重要因素。因此,研究景观闸坝泄流噪声机理及影响因素,降低闸坝运行对周边环境的噪声污染是建设环境友好型水利设施的必然要求。

针对闸坝泄流噪声特性及其影响因素,国内外学者已开展了一系列研究。例如,柴雪等^[5]开展消

基金项目:国家自然科学基金项目(52279070);宜昌市自然科学研究项目(A23-2-016)
作者简介:王煜(1976—),女,教授,博士,主要从事水力学及河流动力学研究。E-mail:wangyuhoney@163.com a

力池水流动量对泄流噪声影响的模型试验,发现噪声声压级随水流动量增大而增大;李莎莎等^[6]对无坎宽顶堰泄流噪声进行模型试验,发现泄流噪声声压级随上游流量和堰高增大而增大;王红艳等^[7]开展燕尾坎挑流消能噪声试验,得出闸门开启孔数越多,噪声声压级越大的结论;Souri 等^[8]研究了钢琴堰泄流水舌振荡引起的噪声特性,发现在堰顶处以3%~4%的曝气率进行曝气可达到最佳降噪效果;Lodomez 等^[9]对线性堰泄流噪声进行监测并提出3种降噪方案,发现在堰下增设导流板的方案降噪效果最明显;Johnson 等^[10]对低水头堰坝周围的声环境进行评估,得出宽顶堰最大声压级为1 600 Hz,流量与堰上水头均对泄流噪声有影响。由此可见,闸坝水力参数对泄流噪声有一定影响。然而,不同水力参数如何影响泄流噪声的空间分布特性却未有明确的定论。

为明确闸坝在不同水力参数条件下的泄流噪声空间分布特性,本文通过现场监测与数值模拟相结合的方法研究不同水力参数对闸坝泄流噪声空间分布特性的影响,以及泄流流场与泄流噪声的耦合关系,为城市景观闸坝的生态运行和噪声控制提供技术支撑。

1 研究区概况

求索溪是湖北宜昌三峡大学校内重要的景观水系。为抬高水位,丰富校园环境,溪上建有多座低水头闸坝,其两岸密集布置多座教学楼群及部分居民住宅,是典型的城市景观闸坝。闸坝泄水景观在美化校园环境的同时会引发连续的泄流噪声,其对周边环境造成了一定的噪声污染。为研究低水头景观闸坝泄流噪声的空间分布特性,本文选取其中一座闸坝为研究对象,现场监测其流场和噪声参数。闸坝沿坝轴线总长12.38 m,由左岸船闸、左岸非溢流坝段、溢流坝段、右岸非溢流坝段和右岸船闸组成。溢流坝段长5.50 m,泄流表孔有14个;堰高0.66 m,单孔堰宽0.3 m,溢流面坡比为1:1.2;堰后消力池长1.62 m,池尾消力坎高0.15 m(图1)。

2 研究方法

2.1 闸坝现场监测试验

2.1.1 泄流流场监测

为明确流场水动力特性对泄流噪声空间分布特征的影响,同步监测其泄流流场参数。为建立流场水动力特性与噪声特性的耦合关系,沿坝轴线在上下游共布置10个流场测点(图2测点A~J),实时监测其流速和水深,以率定数值模型参数。

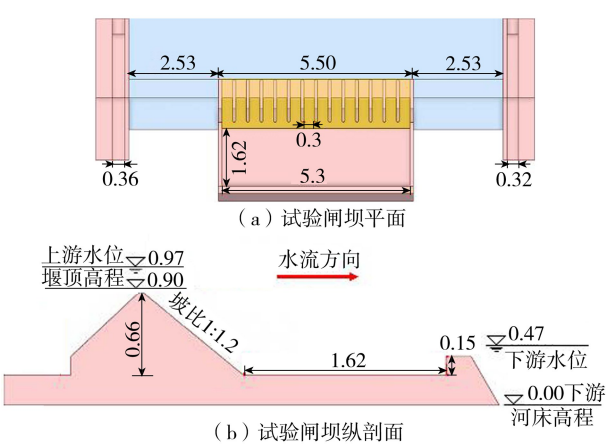


图1 试验闸坝平面及纵剖面(单位:m)

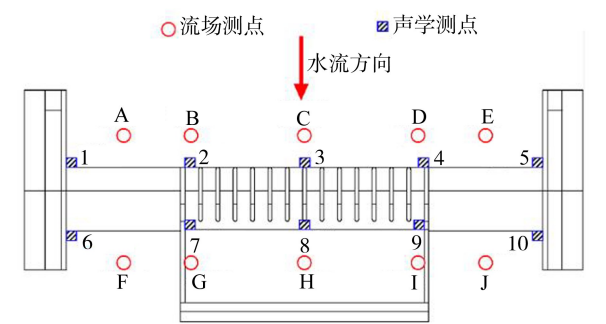


图2 现场监测测点平面布置

2.1.2 泄流噪声监测

为获取溢流坝泄流噪声空间分布特性,沿坝轴线在上下游共布置10个声学测点(测点1~10),见图2。采用CoCo-80X信号分析与数据记录仪进行泄流噪声监测,采集频率为51 200 Hz,每次测量前后对仪器进行校准。为降低环境背景噪声对泄流噪声采集的影响,监测时段选在人流及车流量较少的上午6:30—7:30,并采集相同时段无闸坝泄流时的环境背景噪声,进行背景噪声降噪处理^[11],得到各测点噪声声压级如表1所示。

表1 现场监测各测点噪声声压级 单位:dB

测点编号	原始测量声压级	背景噪声声压级	泄流噪声声压级
1	68.4	52.4	68.4
2	75.4	52.1	75.4
3	72.3	51.4	72.3
4	74.5	52.7	74.5
5	71.4	53.6	71.4
6	70.8	50.7	70.8
7	78.8	51.2	78.8
8	80.7	51.4	80.7
9	76.9	51.9	76.9
10	74.3	52.8	74.3

2.2 闸坝泄流流场及噪声特性数值模拟

2.2.1 工况拟定

以实测流量及水深数据为基础,设计了3种流量($Q=0.63\text{ m}^3/\text{s}$ 、 $1.00\text{ m}^3/\text{s}$ 、 $1.40\text{ m}^3/\text{s}$)、3种下游

水深($h=0.47\text{ m}$ 、 0.57 m 、 0.67 m)以及3种堰顶水深($H=0.02\text{ m}$ 、 0.07 m 、 0.13 m),为提高试验效率,将27种组合工况精简为7种关键工况(表2),以分析不同水力参数对闸坝泄流流场及噪声的影响。

表2 数值模拟计算工况

工况编号	$Q/(\text{m}^3/\text{s})$	H/m	h/m
1	0.63	0.07	0.47
2	1.00	0.07	0.47
3	1.40	0.07	0.47
4	0.63	0.07	0.57
5	0.63	0.07	0.67
6	0.63	0.13	0.47
7	0.63	0.02	0.47

2.2.2 数值模拟方法

采用CFD软件Fluent进行闸坝泄流流场数值模拟。其中,湍流模型选择RNG $k-\varepsilon$ 模型,该模型对闸坝泄流流线弯曲、流速梯度大等复杂流动场景适用性较强^[12-13],并引入体积分数(volume of fluid, VOF)模型追踪闸坝泄流自由表面^[14]。闸坝泄流噪声的数值模拟借助Fluent声学模块实现,采用声比拟(Ffowcs Williams-Hawkings, FW-H)方程进行计算分析,该方程可有效预测单极子、偶极子和四极子类型的噪声源传播特性^[15-16]。

2.2.3 网格划分

计算域以坝轴线为中线,向上游延长3.5 m(大于5倍堰高),以降低入流处水流扰动对近堰流场的影响,向下游延长4.5 m,使流场充分发展,沿水流方向总长8 m。同时,在堰顶上方预留空间,以观测空气流场特性。采用适应性较强的非结构化网格进行网格划分,网格总数为261万(图3)。

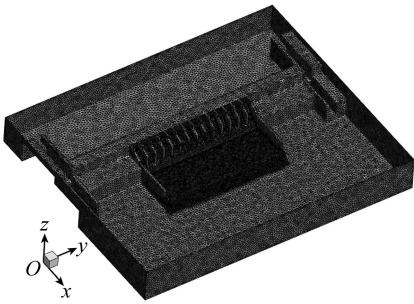


图3 闸坝网格划分

2.2.4 边界条件及初始化

水体进口采用速度进口,气体进口采用压力进口,压力大小设为标准大气压,出口边界采用压力出口;壁面采用无滑移标准壁面函数。初始时,将自由液面以下水相体积分数赋值为1,以上赋值为0。压力插值选用PRESTO算法,压力-速度耦合选择PISO算法^[17]。流场计算收敛后,将水体与固壁剧烈撞击面定义为声源面,以FW-H方程为计算条件,

预测指定接收点处噪声信号,其中远场声速为340 m/s,参考声压为 $2\times10^{-5}\text{ Pa}$ 。

2.2.5 网格无关性与数值模型验证

通过改变网格尺寸设计了5种不同网格数量(163万、225万、261万、428万、484万)的计算域模型。通过对比堰前0.5 m中心剖面流速及堰下水深值,可得163万网格模型的计算流速及水深值误差明显大于其他模型,而当网格数量大于261万时,各模型误差值接近。考虑到成本及精度要求,最终选定261万网格模型。

为验证闸坝泄流流场及噪声数值模拟的合理性,用同工况实测数据进行率定。可见各典型测点数值模拟流速与实测流速相对误差小于5%(图4(a)),模拟噪声声压级与实测噪声声压级相对误差小于10%(图4(b)),证实了采用数值模拟方法进行闸坝泄流流场和噪声计算的可行性。

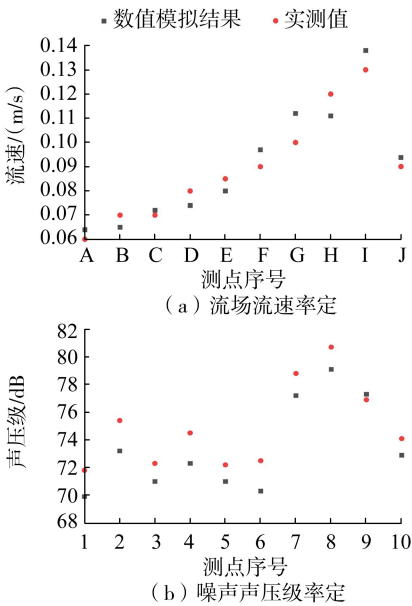


图4 数值模拟结果与实测值对比

3 结果与分析

3.1 流量对泄流噪声特性影响分析

对比不同流量工况下噪声声压级、主频及声功率谱密度变化(表3、图5)得出:随着流量增大,各监测点声压级均增大,堰体下游泄流区域(测点7、8、9)最大可增加2.6 dB。两侧非溢流段边壁区域(测点1、5、6、10)噪声主频无明显差异,均为800~900 Hz;在堰体下游泄流区域(测点7、8、9),当流量从 $0.63\text{ m}^3/\text{s}$ 增大至 $1.00\text{ m}^3/\text{s}$ 时,噪声主频增大,最高接近900 Hz;而堰体上游边壁区域(测点2、3、4)噪声主频随流量增大而降低,各流量下噪声主频集中于500~1 000 Hz。随着流量增大,声功率谱密度整体增大,最大由 0.043 W/Hz 增大至 0.116 W/Hz 。

表 3 不同流量工况泄流噪声声压级变化

$Q/(m^3/s)$	各声学测点噪声声压级/dB									
	测点 1	测点 2	测点 3	测点 4	测点 5	测点 6	测点 7	测点 8	测点 9	测点 10
0.63	69.90	71.00	72.40	72.30	71.00	70.30	77.20	77.90	77.30	72.90
1.00	70.00	71.90	73.20	72.50	71.50	71.40	77.70	78.50	78.10	73.40
1.40	70.20	74.20	74.30	72.60	71.70	71.60	79.70	80.50	79.10	73.80

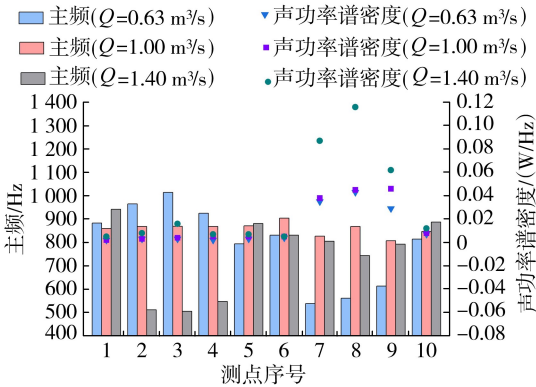


图 5 不同流量工况泄流噪声主频与声功率谱密度变化

对比不同流量工况下闸坝泄流断面流场差异(图 6、图 7)得出:随着流量增大,下泄流速与动压均增大,流速最大增加 0.23 m/s,动压最大增加 827 Pa。结合表 3 可知:流量增大使水流以更大的动能急速冲击下游水体,导致水流与溢流面的摩擦加剧,噪声声压级增大。随着流量增大,水流对消力池内水体的冲击作用更明显,流量较大时消力池内水流高动压区域明显增大,进入消力池的水流与底板间的摩擦强度及作用区域增大,使得噪声声压级增大。

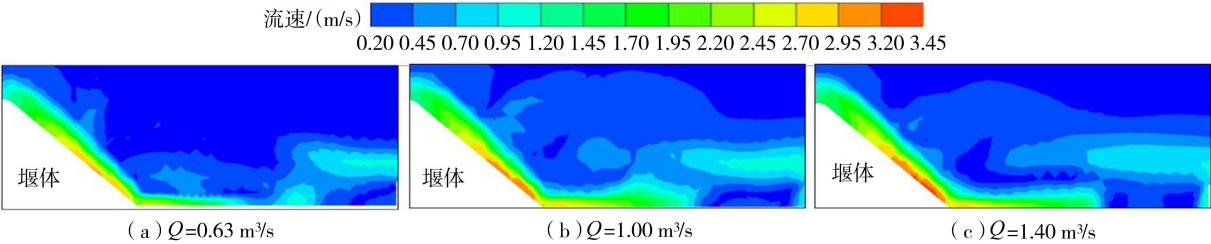


图 6 不同流量工况闸坝泄流流速分布

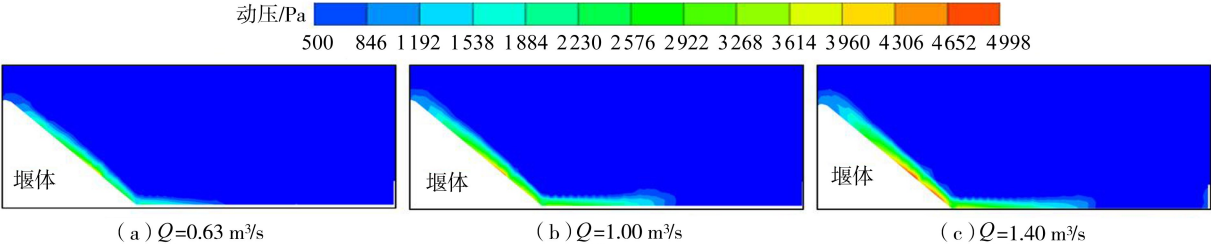


图 7 不同流量工况闸坝泄流动压分布

表 4 不同下游水深工况泄流噪声声压级变化

h/m	各声学测点噪声声压级/dB									
	测点 1	测点 2	测点 3	测点 4	测点 5	测点 6	测点 7	测点 8	测点 9	测点 10
0.47	69.90	71.00	72.40	72.30	71.00	70.30	77.20	77.90	77.30	72.90
0.57	69.50	70.80	72.20	71.40	70.00	70.10	76.10	77.20	76.90	72.60
0.67	68.60	70.00	71.70	70.90	69.00	69.80	75.00	76.00	76.40	71.10

3.2 下游水深对泄流噪声特性影响分析

对比不同下游水深工况下泄流噪声声压级、主频及声功率谱密度变化(表 4、图 8)得出:随着下游水深增大,各监测点声压级减小,最大降低 2.2 dB。两侧非溢流段边壁区域(测点 1、5、6、10)噪声主频无明显差异,均在 800 Hz 左右;在堰体下游泄流区域(测点 7、8、9),当下游水深为 0.47 m 时,噪声主频集中在 600 Hz,明显小于大下游水深工况的噪声主频。各下游水深工况下噪声主频集中于 500 ~ 1000 Hz。随着下游水深增大,声功率谱密度整体降低,最大由 0.043 W/Hz 降低至 0.014 W/Hz。

对比不同下游水深工况下闸坝泄流断面流场差异(图 9~12)得出:随着下游水深增大,近坝趾水流流速与动压减小,流速最大降低 0.70 m/s,动压最大降低 1943.2 Pa。随着下游水深增大,水体涡量最大可减小 19.58 s⁻¹。结合表 4 可知,随着下游水深增大,下泄水流受下游水体垫层的阻碍作用增大,使得坝趾水流动能及动压降低,水体内涡旋数量减少,紊动程度降低,最终导致泄流噪声声压级减小。水流进入消力池后,随着下游水深增大,下泄水流对下游

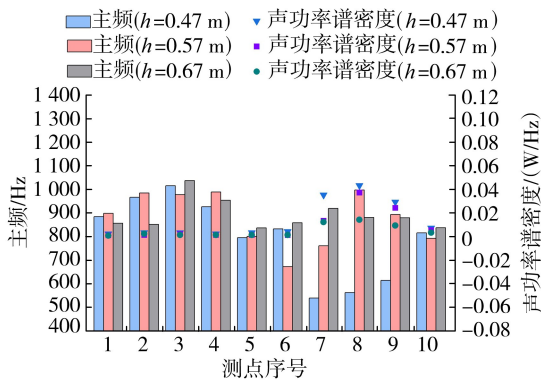


图 8 不同下游水深工况泄流噪声主频与声功率谱密度变化
水体的冲击减弱,导致消力池内水体紊动程度减弱,涡旋数量明显减少,同时水体与消力池底板等固壁结构的摩擦作用减弱,最终导致泄流噪声降低。

3.3 堰顶水深对泄流噪声特性影响分析

对比不同堰顶水深工况下泄流噪声声压级、主频和声功率谱密度变化(表 5、图 13)可知:随着堰

顶水深增大,各测点声压级增大,最大增加 6 dB。在堰体泄流区域,当堰顶水深最大($H=0.13\text{ m}$)时,噪声主频接近 1200 Hz,明显大于其他堰顶水深的噪声主频,各堰顶水深下噪声主频集中于 500~1200 Hz。随着堰顶水深增大,声功率谱密度整体增大,且在泄流区域及堰体上游边壁区域差异明显,泄流区域声功率谱密度最大由 0.011 W/Hz 增大至 0.143 W/Hz;堰体上游边壁区域声功率谱密度最大由 0.002 W/Hz 增大至 0.027 W/Hz。

对比不同堰顶水深工况下闸坝泄流断面流场差异(图 14~17)得出:随着堰顶水深增大,下泄水流流速和动压明显增大,流速最大增加 0.36 m/s,动压最大增加至 4884 Pa;同时溢流面水体表面上方空气紊动程度加剧,而溢流面水体内部涡旋程度无明显差异。结合表 5 可知:由于堰顶水深增大,水体势能转换为动能,导致水体与溢流面摩擦加剧,动压增

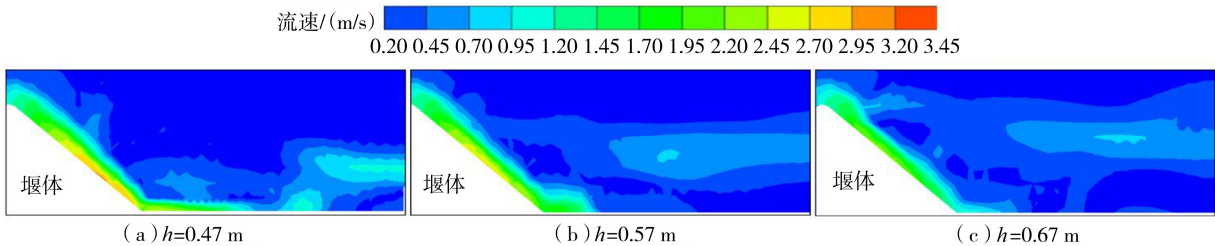


图 9 不同下游水深工况闸坝泄流流速分布

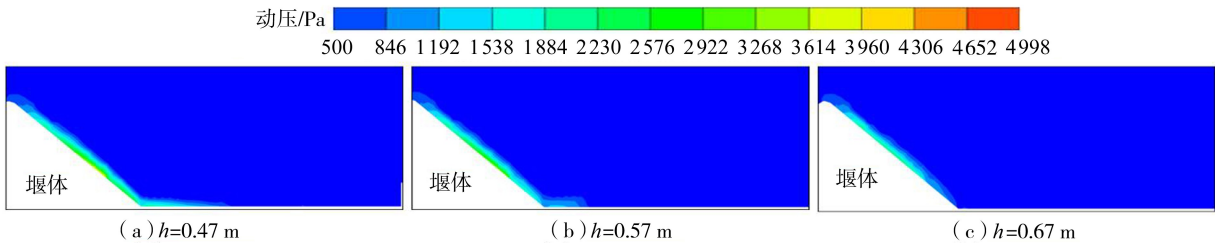


图 10 不同下游水深工况闸坝泄流动压分布

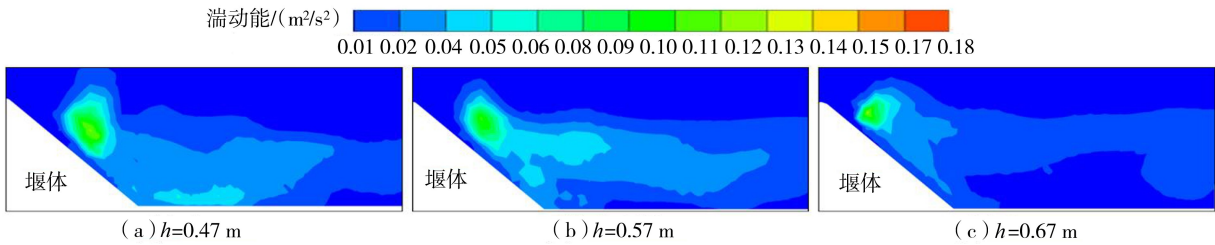


图 11 不同下游水深工况闸坝泄流湍动能分布

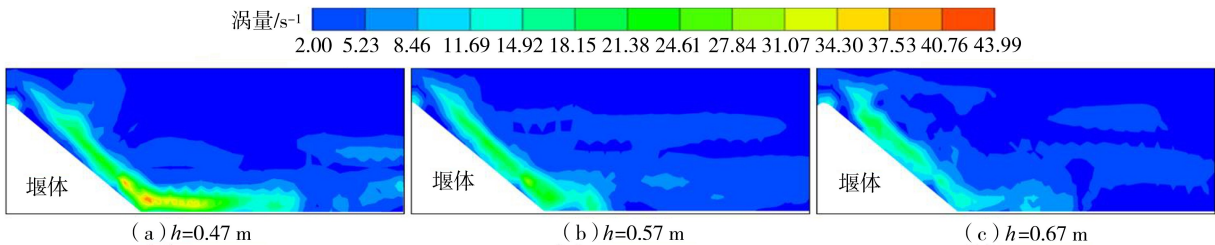


图 12 不同下游水深工况闸坝泄流涡量分布

表 5 不同堰顶水深工况泄流噪声声压级分布

H/m	各声学测点噪声声压级/dB									
	测点 1	测点 2	测点 3	测点 4	测点 5	测点 6	测点 7	测点 8	测点 9	测点 10
0.02	68.60	69.10	70.60	68.60	69.50	70.10	75.70	76.50	76.00	71.80
0.07	69.90	71.00	72.40	72.30	71.00	70.30	77.20	77.90	77.30	72.90
0.13	70.60	74.40	74.60	73.80	72.40	72.40	81.70	81.50	80.00	74.30

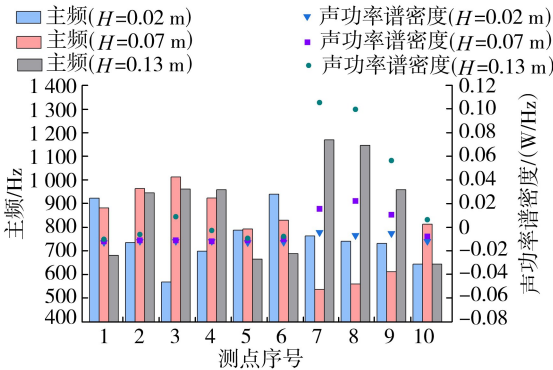


图 13 不同堰顶水深工况泄流噪声主频与声功率密度变化

大,虽未直接影响水体内部涡旋,但高速泄流激发的表面空气紊动加剧,水气两相作用更明显,最终导致噪声声压级增大。当下泄水流流入消力池后,由于堰顶水深增大,下泄水体对下游水体的冲击更剧烈,导致消力池内水体紊动程度、涡旋程度提高,且消力池内水体流速及动压更大,最终引发高分贝泄流噪声。

3.4 闸坝泄流流场与泄流噪声相关性分析

为明确不同水力参数下闸坝泄流流场因子与泄流噪声特性指标的相关关系,采用 Pearson 相关性分析方法进行研究。该方法可衡量变量之间的关联

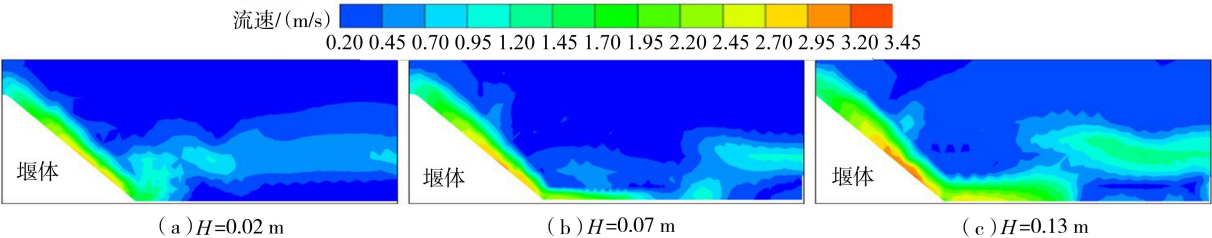


图 14 不同堰顶水深工况闸坝泄流流速分布

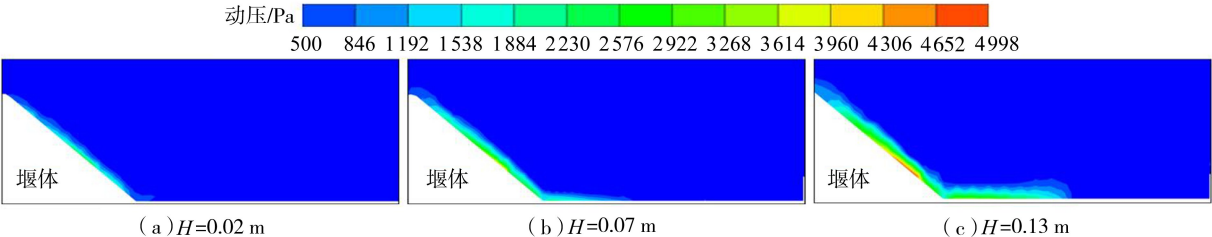


图 15 不同堰顶水深工况闸坝泄流动压分布

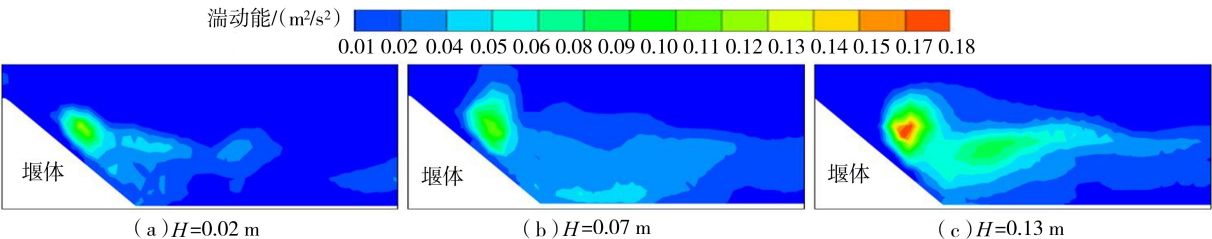


图 16 不同堰顶水深工况闸坝泄流湍动能分布

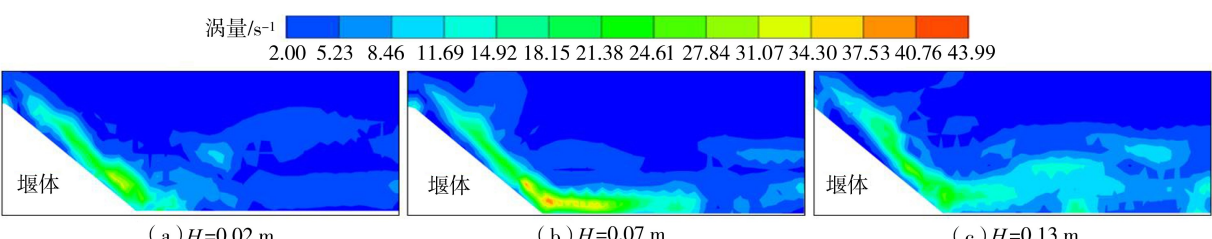


图 17 不同堰顶水深工况闸坝泄流涡量分布

程度,通常以显著性概率 p 和 Pearson 相关系数作为表征^[18],若 $p<0.05$ 且 Pearson 相关系数大于 0 则表示显著正相关;若 $p<0.05$ 且 Pearson 相关系数小于 0 则表示显著负相关;其余则不相关。

不同泄流流场因子与噪声声压级的 Pearson 相关系数及显著性概率如表 6 所示,可见流速及湍动能和堰体下游泄流区域(测点 7、8、9)的声压级显著正相关;涡量和两侧非溢流段边壁区域(测点 1、5、10)的声压级显著正相关;而动压与近坝区域所有测点的声压级均显著正相关。这表明,泄流流速及湍动能增大会使堰体泄流区域噪声声压级增大;堰面及消力池底板动压增大会使近坝区域噪声声压级增大;涡量增大会使堰体两侧区域噪声声压级增大。

表 6 泄流流场因子与噪声声压级相关性分析

流场因子	流场因子与各测点声压级的 Pearson 相关系数									
	测点 1	测点 2	测点 3	测点 4	测点 5	测点 6	测点 7	测点 8	测点 9	测点 10
流速	0.538	0.647	0.710	0.575	0.599	0.820 *	0.820 *	0.839 *	0.774 *	0.749
湍动能	0.352	0.632	0.636	0.502	0.472	0.887 **	0.850 *	0.799 *	0.777 *	0.627
涡量	0.830 *	0.533	0.658	0.703	0.839 *	0.616	0.582	0.622	0.629	0.798 *
动压	0.818 **	0.818 *	0.891 **	0.830 *	0.839 *	0.860 *	0.862 *	0.895 **	0.888 **	0.768 *

注: * 表示在 $p<0.05$ 水平上显著相关; ** 表示在 $p<0.01$ 水平上显著相关。下同。

表 7 泄流流场因子与声功率谱密度相关性分析

流场因子	流场因子与各测点声功率谱密度的 Pearson 相关系数									
	测点 1	测点 2	测点 3	测点 4	测点 5	测点 6	测点 7	测点 8	测点 9	测点 10
流速	0.810 *	0.700	0.648	0.706	0.823 *	0.834 *	0.697	0.743	0.664	0.804 *
湍动能	0.637	0.773 *	0.842 *	0.931 **	0.585	0.699	0.854 *	0.817 *	0.825 *	0.860 *
涡量	0.597	0.402	0.315	0.417	0.772 *	0.758 *	0.423	0.521	0.623	0.437
动压	0.858 *	0.736	0.678	0.726	0.819 *	0.809 *	0.758 *	0.834 *	0.886 *	0.738

表 8 泄流流场因子与噪声主频相关性分析

流场因子	流场因子与各测点噪声主频的 Pearson 相关系数									
	测点 1	测点 2	测点 3	测点 4	测点 5	测点 6	测点 7	测点 8	测点 9	测点 10
流速	-0.188	-0.252	-0.407	-0.408	-0.138	-0.097	0.076	-0.097	-0.286	-0.076
湍动能	-0.721	-0.021	-0.156	-0.085	-0.590	-0.171	0.664	0.427	0.103	-0.540
涡量	-0.079	-0.008	-0.047	-0.130	0.156	-0.052	-0.190	-0.216	-0.580	0.351
动压	-0.283	-0.148	-0.159	-0.225	-0.057	-0.272	0.144	-0.003	-0.217	0.190

4 结 论

- a. 随着流量增大,下泄水流流速及动压增大,泄流噪声声压级与声功率谱密度增大;流量较小时,堰体下游泄流区域噪声主频明显较小;不同流量下噪声主频集中于 500~1 000 Hz。
- b. 随着下游水深增大,下泄水流受下游水体垫层阻碍作用增大,溢流面水流流速及动压减小,消力池内水体紊动程度减弱,噪声声压级及声功率谱密度减小。不同下游水深噪声主频集中于 500~1 000 Hz。
- c. 随着堰顶水深增大,下泄水流流速及动压增大,消力池内水体紊动程度及涡旋程提高,噪声声压级及声功率谱密度增大。在堰体泄流区域,堰顶水

泄流流场因子与声功率谱密度、噪声主频的相关性分析分别如表 7 和表 8 所示,可见流速与两侧非溢流段边壁区域(测点 1、5、6、10)的声功率谱密度显著正相关;湍动能和堰体下游泄流区域(测点 7、8、9)及堰体上游边壁区域(测点 2、3、4)的声功率谱密度显著正相关;涡量和各区域测点的声功率谱密度几乎无显著相关关系;而动压与堰体下游泄流区域(测点 7、8、9)及两侧非溢流段边壁区域(测点 1、5、6)的声功率谱密度显著正相关。这表明,水体湍动能及动压增大会使堰体泄流区域的噪声声功率谱密度增大;泄流流速增大会使堰体两侧区域的噪声声功率谱密度增大。各泄流流场因子与噪声主频无明显相关关系。

- d. 流速及湍动能和堰体泄流区域的噪声声压级显著正相关,而动压与近坝区域的噪声声压级显著正相关;湍动能和堰体下游泄流区域及堰体上游边壁区域的声功率谱密度显著正相关;涡量和各区域声功率谱密度几乎无显著相关关系;各泄流流场因子与噪声主频无明显相关关系。

参考文献:

[1] CHANG Nini, ZHANG Qionghua, WANG Qian, et al. Current status and characteristics of urban landscape lakes in China [J]. Science of the Total Environment, 2020,

- [2] 王加虎,殷荣胜,李丽,等. 泸瀾河流域城市橡胶坝群景观流量补水调度研究[J]. 水利水电技术(中英文), 2022,53(8):152-160. (WANG Jiahu, YIN Rongsheng, LI Li, et al. Research of regulation of landscape flow of rubber dam group in Chanba River Basin based on finite traversal method [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2022,53(8):152-160. (in Chinese))
- [3] 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))
- [4] 郑买富,刘丽,孙仕仙,等. 勐海县城声环境功能区噪声污染状况调查[J]. 安徽大学学报(自然科学版), 2020, 44(4):92-100. (ZHENG Maifu, LIU Li, SUN Shixian, et al. Investigation of noise pollution status of acoustic environmental function zone in Menghai County [J]. Journal of Anhui University (Natural Science Edition), 2020, 44(4):92-100. (in Chinese))
- [5] 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))
- [6] 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))
- [7] 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))
- [8] SOURI J, AKBARI H, NEYSHABOURI S A A S, et al. A study of nappe oscillations and effects of aeration on environmental noise of piano key weirs with different shapes[J]. Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering, 2023, 47(3):1813-1830.
- [9] LODOMEZ M, CROOKSTON B M, TULLIS B P, et al. Mitigation techniques for nappe oscillations on free-overfall structures[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2019, 145(2):04018086.
- [10] JOHNSON N, KANG Jian, HATHWAY E A. Acoustics of weirs; potential implications for micro-hydropower noise [J]. Renewable Energy, 2014, 71:351-360.
- [11] 舒科闻. 论工业企业厂界噪声监测中背景噪声测量和噪声测量值修正[J]. 环境与发展, 2020, 32(7):170-171. (SHU Kewen. On background noise measurement and noise measurement value correction in noise monitoring of industrial plant[J]. Environment and Development, 2020, 32(7):170-171. (in Chinese))
- [12] 丁哲,张睿,陈毓陵,等. 城市排水泵站水力特性及整流措施[J]. 水利水电科技进展, 2024, 44(2):7-14. (DING Zhe, ZHANG Rui, CHEN Yuling, et al. Hydraulic characteristics and rectification measures of urban drainage pumping station [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2024, 44(2):7-14. (in Chinese))
- [13] SHAHABI M, AHADIYAN J, GHOMESHI M, et al. Numerical study of the effect of a V-shaped weir on turbulence characteristics and velocity in V-weir fishways [J]. River Research and Applications, 2023, 39(1):21-34.
- [14] 南军虎,代江龙,李伟,等. 体型参数对旋流排沙渠道水沙特性的影响[J]. 水利水电科技进展, 2024, 44(3):64-72. (NAN Junhu, DAI Jianglong, LI Wei, et al. Influence of shape parameters on characteristics of water and sediment in desilting channel with swirling flow [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2024, 44(3):64-72. (in Chinese))
- [15] CHEN Changsheng, LI Guoping, MA Zhenlai, et al. A numerical study of the hydrodynamic noise of podded propulsors based on proper orthogonal decomposition[J]. Journal of Marine Science and Engineering, 2023, 11(11):2054.
- [16] TESTA C, PORCACCHIA F, MUSCARI R, et al. Noise field properties of marine propellers in open water[J]. Ocean Engineering, 2023, 288:116194.
- [17] 邱毅,吴欧侯,杨具瑞,等. 阶梯溢流坝面坡度对一体化消能工水力特性的影响[J]. 水利水电科技进展, 2020, 40(3):28-35. (QIU Yi, WU Ouyu, YANG Jurui, et al. Impact of stepped overflow dam surface slope on hydraulic characteristics of an integrated energy dissipator [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2020, 40(3):28-35. (in Chinese))
- [18] 张兰,叶琪瑶,李立,等. 钱塘江南源流域异常水质预测及影响因素分析[J]. 中国环境监测, 2023, 39(增刊1):27-35. (ZHANG Lan, YE Qiyao, LI Li, et al. Prediction of abnormal water quality and analysis of influencing factors in the southern source of Qiantang River Basin [J]. Environmental Monitoring in China, 2023, 39(Sup1):27-35. (in Chinese))

(收稿日期:2024-07-24 编辑:骆超)