

过水设施水流噪声的形成机理及影响因子研究综述

王 煜,石 敏,卢晓春

(三峡大学水利与环境学院,湖北 宜昌 443002)

摘要:为提高水流噪声对过水设施运行状态的监测效率,需明确水流噪声形成的机理及其与过水设施运行及结构参数之间的相互关系。分析和总结了河道与水电站常用过水设施水流噪声的形成机理及影响因子,指出常用过水设施水流噪声特征与其运行工况及流道结构特征密切相关,水流流速、流量与形成的水流噪声声级呈正相关关系;流道结构形式越复杂则水流紊动越激烈,水流噪声形成机理也越复杂。过水设施水流噪声声级和频率随流道水动力特性和结构边界特性同步变化,可作为过水设施运行及流道状态的信号源,实时监测过水设施的运行状态和安全,保障过水设施的安全。

关键词:水流噪声;过水设施;形成机理;影响因子;特征值

中图分类号:TV6 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2023)01-0009-06

A review on formation mechanism and influencing factors of water noise of overflow facilities//WANG Yu, SHI Min, LU Xiaochun(College of Hydraulic and Environmental Engineering, China Three Gorges University, Yichang 443002, China)

Abstract: To improve the monitoring efficiency of water noise on the operation status of overflow facilities, it is necessary to clarify the formation mechanism of water noise and its relationship with the operating and structural parameters of overflow facilities. The formation mechanism and influencing factors of water noise of common overflow facilities of river channels and hydropower stations were analyzed and summarized. It is concluded that the characteristics of water noise of common overflow facilities are closely related to their operating conditions and channel structure characteristics. The flow velocity and flow rate are positively correlated with the noise level of water flow. The more complex the flow channel structure is, the more intense the flow turbulence is and the more complex the formation mechanism of water noise will be. The water noise level and frequency of overflow facilities change synchronously with the hydrodynamic characteristics and structural boundary characteristics of the passage, which can be used as the state signal source for the operation of overflow facilities. Monitoring the operation state and safety in real time can ensure the safety of overflow facilities.

Key words: water noise; overflow facilities; formation mechanism; influencing factor; eigenvalue

水流通过大型过水设施,如溢流堰、水闸、水轮机、引水隧洞以及泄洪孔等,由于水流复杂的流道边界,往往导致水流高速紊动,进而引发高分贝水流噪声,对过水设施及其附属建筑的安全造成一定威胁。城市景观水体中常用过水设施如低堰、闸坝的运行也会产生一定程度的水流噪声,有的甚至会超过居住环境噪声标准,污染环境,不利于周边居民的身心健康。例如:湖南蓝山县舜水河坝产生了扰民的水流冲击声,遭到周边居民的投诉;福建永安市城市慢线 1 号生态坝从投入使用以来产生的冲击噪声经 4 次检测均超过居住环境噪声标准,严重影响了周围

居民的正常生活,最终通过降噪措施得到改善;福州市富泉乡三级电站运行中水力发电机组产生的噪声对周边居民产生了难以忍受的噪声污染。为提高过水设施的运行安全和寿命,减少环境噪声污染,有必要对常用过水设施水流噪声的形成机理及关键影响因子进行深入研究。

水流噪声特征与水流水动力特性和过流边界特性密切相关,不同水流特性及过流边界将产生不同声级(本文所述“声级”均采用 A 计权声级)、不同频率、不同音色的噪声。过水设施中有压流道与无压流道形成具有不同特征的水流噪声;不同类型的无

压泄水建筑物(如溢流堰等)泄水时会在消力池中形成不同类型的水跃,水跃紊动程度及掺气浓度具有较大差别,相应地,形成的水流噪声声级不同;水电站水轮机有压流道在不同的运行工况下产生具有不同声级和频率的水流噪声。水流流经不同材料构成的压力水管形成不同声级的水流噪声,如水流流经硬聚氯乙烯塑料管道与流经铸铁管道产生的水流噪声声级明显不同^[1];水流进入水电站进水口时,由于断面收缩形成的加速收缩流会产生较大声级的水流噪声;水流进入水电站水轮机流道,由于水轮机复杂流道边界以及水轮机转轮、导叶等过流部件的阻流作用,产生较大声级及频率范围的水流噪声,同时会对水力发电机组运行安全和电站工作人员的身体健康造成较大影响^[2]。胡志华等^[3]对浑河中相同流量条件下的不同泄水建筑物进行了水流噪声研究,发现橡胶坝水流噪声频率最大,其次是渠首滚水坝,最后是翻板闸。可见,不同过水设施产生的水流噪声具有不同的特征,与过水设施结构及运行特点密切相关,可作为实时监测过水设施运行状态及流道特性的有效信号源,特别是对于有压引水隧洞、压力管道、水轮机流道等难以直接监测流道水流特性的过水设施,可通过水流噪声有效监测其运行状态及流道特征,及时识别运行故障和流道缺陷,确保过水设施运行安全。然而,不同过水设施水流噪声的产生机理不同,影响因子较多,如何识别影响水流噪声的关键因子是提高水流噪声对过水设施运行安全诊断效果的关键问题。因此,探明过水设施水流噪声的形成机理及影响因子对提高过水设施噪声监测效率、保护环境和人类健康都具有重大的意义。

1 过水设施水流噪声特征及产生机理

声音是由物体振动产生的,一切不规则的声信号称为噪声。据研究,人类长期处于超过 50 dB 噪声的环境下,容易引发听力下降以及头疼等疾病^[4]。高速水流通过过水设施,如消力池、水闸、溢流堰、水轮机流道等,往往会产生高于 50 dB 的水流噪声,对周边环境和人类健康造成威胁,例如:水流通过米易县城北闸坝工程产生的最大水噪声值为 73.9 dB^[5];某市景观坝所形成的跌水噪声在夜间达到 60 ~ 63 dB^[6]。水电工程中高速水流与流道摩擦撞击形成的水流噪声甚至会高至 100 dB 以上,例如:乌弄龙水电站运行发生异常时水机室流道噪声高达 108 dB^[7];刘殿程^[8]对某水电站水轮机机坑和蜗壳进人孔噪声进行测量,其声压高达 106 dB。水电工程中巨大的水流噪声不但造成周边环境的噪声污染,同时也给水电工程的安全运行带来威胁。

噪声根据频率可分为低频噪声(小于 500 Hz)、中频噪声(500 ~ 2 000 Hz)和高频噪声(大于 2 000 Hz)。人的可听音范围为 20 ~ 20 000 Hz。常用过水设施水流噪声频率范围较广,低至因大坝溢洪道泄洪产生的 0 ~ 10 Hz 的超低频噪声^[9],高至因水轮机流道水流空化形成的 20 kHz 以上的超声波^[10]。

水流噪声是指在不涉及流动诱发的结构共振发声时由于运动流体与固体边界相互作用以及流体内部湍流所引起的辐射噪声,其主要激发机理是由于固体与流体的相对运动以及流体自身的不规则运动所激起的流体内部应力及压力扰动在介质中的传递^[11]。Lighthill 流体声学理论中流体动力声源根据不同的激发机理分为单极子声源、偶极子声源以及四极子声源^[12]。单极子声源是和流体介质的脉动质量有关的单点声源^[13],周围的流体通过膨胀或收缩适应该种径向运动,从而形成一个球体对称声场;偶极子声源是在流速较高的条件下流体遇到物体产生作用力引起涡流而形成,也称为力声源,辐射指向性为 8 字形;四极子声源又被称为应力声源,因运动流体自身的黏滞应力作用而产生,该种声源由两个距离相近、大小相同而相位相反的偶极子构成,声源辐射具有较强的指向性,在偶极子轴向及垂向处的声压为 0,对角处的声压值最大^[12]。Lighthill 流体声学理论建立在不存在固体边界或固体边界对流场影响不大的情况下,但实际上流体与固体边界存在的相互作用直接影响流场,已有学者对静止固体边界对流体动力声场的影响以及运动固体边界声场进行了研究^[13];Powell^[14]提出涡声理论,低马赫数条件下的等熵绝热流体,其产生的流体动力场和辐射声场的基本且唯一的源是涡。

噪声声源不同,其声辐射形成的声场也不同,根据声辐射特性可对水流噪声进行监测。过水设施水流噪声按其产生机理通常分为水流自身紊动产生的噪声(四极子声源)、水流与固定部件撞击产生的噪声(偶极子声源)、水流中的空腔从发展到破裂产生的噪声以及水流掺气产生的噪声(单极子声源)^[15]。

1.1 水流自身紊动产生的噪声

液体具有黏滞性,液体与流道边界的摩擦导致各流束之间具有相对运动,流速较快的流束与流速较慢的流束形成方向相反的切应力从而导致液体形成涡体,发生激烈的紊动,形成水流噪声。湍流中随机性和拟序结构运动的规律性,导致流体的各种物理参数(如速度、压力和温度等)随时空近乎随机变化,湍流物理参数的这种脉动是诱发水动力噪声的首要原因^[16]。胡志华^[15]在测量该类型噪声时,选择平直段水槽进行测量再减去水流与流道作用噪

声,以此计算出水流自身紊动产生的噪声,该实验测得在水流流速小于 6 m/s 时其噪声谱显示为衰减下降的曲线,主频位于 500 Hz 以下的低频段。水流通过压力管道流入水电站,在管道弯管处由于内侧水流流速梯度较大,水流易形成旋涡,管道内流速越大,流速梯度越大,则越容易形成涡体,从而产生噪声^[17]。

1.2 水流与固定部件撞击产生的噪声

水流与固定部件撞击产生的噪声是指水流流动过程中与流道中的闸墩、尾坎、阀门、转轮等固有部件发生摩擦撞击产生的噪声或是水流在水下撞击消能设施形成的冲击噪声。胡志华^[15]将消力池底板脉动压力引起的振动噪声作为水流与建筑物噪声。该种噪声的实质为脉动压力作用的结果,固体边界振动等外力对流体产生影响,使流体边界受到脉动压力作用而产生噪声。

1.3 水流中的空腔从发展到破裂产生的噪声

水流在流动过程中,因压力降低至气化压力时,水体会发生气化,形成气泡或是气泡团,这些气泡或气泡团形成的空腔会随着水流运动发展直至破裂,在这个过程中空腔的膨胀-压缩-破裂导致流体内部压力脉动。空化流的压力脉动包括 3 种不同特性的分量:紊流基础噪声,其噪声频带较宽,幅值较小,并与空化数大小无关;空化即将发生时出现的低频振荡,当空化数减小到临界空化数时发生,一般频率为几十赫兹,类似于周期振荡;空泡溃灭产生的压力脉冲,其幅值很大,可达上万个大气压,历时很短,仅数微秒至几十微秒^[18]。目前针对过水设施水流噪声的研究多集中在高速水流形成的空化噪声^[19-20],且部分高流速泄水水工建筑物针对空化噪声进行水力学安全监测^[21],本文主要集中于其余水流噪声机理的研究。

1.4 水流掺气产生的噪声

水流在紊动的过程中流速增加,紊动强度迅速增大,水流中的涡体绕流产生升力,当涡体具有的竖向瞬时动能足够大时,能够克服水流表面张力和自身重力跃出水面,在重力作用下重新落入水中,带入空气形成气泡^[22]。从空气掺入到水流中随水流掺混流动至破灭的过程,形成激烈的水流掺气噪声。田茹妍^[23]将水滴滴落水面掺入空气形成水声的机理分为:脉动辐射噪声、初生气泡噪声及次生气泡噪声。该种噪声受掺气机理、掺气水深、掺气浓度、掺气条件等因素的影响^[24],不同位置的掺气浓度与过水设施结构形式相关^[25-26],且水流掺气程度以及气泡的位置对水流断面平均流速具有影响^[27],不同工况下的噪声受诸多因子综合作用。张宏伟等^[28]研究表明适当的掺气浓度会使掺气水流的声速显著降

低;压强的减小和相间传热的增强可使声速减小、衰减加快,所以水流中掺气水流噪声的采集会受到一定的影响。

2 过水设施水流噪声关键影响因子研究

水流噪声特征与水流水动力特征、过流边界特征密切相关,是水流特性与其边界特性及其相互耦合作用的综合表征。为明确水流特性及其过流建筑物特性对水流噪声特性的影响,识别影响水流噪声表征的水力要素及产生机理,国内外学者通过大量的实际工程的噪声监测和分析进行了水流噪声特性影响因子的相关研究。

2.1 过水设施水动力特性对水流噪声的影响

Vracar 等^[29]对欧洲 3 大河流(多瑙河、萨瓦河和蒂萨河)进行观测,发现水流噪声频率动态变化区间在 100 Hz 以下,频率主要集中在 20 ~ 30 Hz,多瑙河、萨瓦河水流流速相近,所形成的噪声为 20 ~ 30 dB,蒂萨河的水流流速高于多瑙河和萨瓦河,噪声水平达 40 dB,得出影响噪声大小动态变化的原因为河流流速的结论。Dubey 等^[30]通过物理模型试验模拟城市供水系统管道得出其噪声功率谱密度的分布以及特征,在没有水流通过时,功率谱密度峰值 100 Hz,轻度取决于外部噪声,其噪声的概率密度函数呈现一个非高斯分布的稳定分布,恒定流量通过时,流场呈高斯分布,频率 10 Hz 时声级为 120 dB,超过 10 kHz 后声级下降至 40 dB 以下,说明管道内的水流噪声与管道流量密切相关。Lian 等^[9,31]对锦屏一级水电工程溢流坝进行水流噪声监测,结合数值模拟结果得出坝下水垫塘淹没射流诱发低频水流噪声的结论,同时发现水垫塘涡度与低频水流噪声具有较强的相关性,得出水垫塘强剪切层是低频噪声的主要声源区的结论,可见泄水建筑物低频水流噪声的形成与水流涡度脉动特征相关。郭维东等^[32]发现同一溢流堰产生水流噪声的声级值随流量的增大而增大。李莎莎等^[5,33]通过对无坎宽顶堰水流噪声研究发现,下泄水流产生的水流噪声会随着上游流量与堰高的增加而增加,随下游水深的增加而减小,且在下游水深由 10 cm 增加到 20 cm 时,水流噪声值减小幅度最大;在堰高和上游流量一定的条件下,水流噪声与水压力均随下游水深的增加而减小,但水流噪声的减小幅度远小于水压力,分析原因可能为噪声是由水流自身的紊动以及对堰趾的冲击产生,在后续研究中得出堰趾产生的湍流强度会随堰高、上游流量及下游水深的增加而增加,而冲击水噪声与之相反,通过不断调整水流下跌高度与堰高的比值,当比值为 0.244 时水流下跌处的水噪

声最小,说明流道边界设置条件对水流紊动程度具有决定性作用。

由此可见,过水设施运行工况参数不同,造成流道具有不同的水动力特性,影响了水流噪声特征^[34]。其中流道过流流速越大,产生的水流噪声声级越大。这是因为流道流速增大,水流紊动强度增大,水体中易形成大量涡体,造成水流噪声声级增大。另外,流道水压力不均匀分布及水流相对运动对水流噪声特征具有较大影响。

2.2 过水设施结构形式对水流噪声的影响

过水建筑物结构形式及边界特性对水流噪声也有较大影响。袁常乐等^[35]对圆柱以及方柱进行水下远场噪声分析模拟,发现在均匀流中方柱产生的辐射噪声大于圆柱,但高频噪声衰减速度较快;圆柱在水中产生的辐射噪声有更宽的频域,说明过水建筑物体型对水流噪声衰减及频域特征有较强的影响。王红艳等^[36]根据相似性原理对燕尾坎挑流消能水流噪声进行模型试验研究,发现挑流消能产生的水流噪声主频段位于低频段且噪声强度波动最大,噪声声级最大值出现在频率 32 Hz、40 Hz 处,测点越靠近坝体,低频段波动幅度越大,中频段波动幅度小。郭维东等^[32]监测了不同堰型(WES 堰、宽顶堰)在相同流量和测点条件下产生的水流噪声,发现在整个噪声声级频谱过程中宽顶堰出现 3 个波形,而 WES 堰出现 2 个波形;宽顶堰噪声声级的最大值在低频段 500 Hz 处,而 WES 堰主要在中频段 2000 Hz 处;宽顶堰噪声声级的最小值在高频段 8000 Hz 处,而 WES 堰在低频段 31.5 Hz,说明过水设施结构形式对水流噪声声级具有较大影响。杨蟠^[37]通过对比无坎宽顶堰下游的下凹型缓坡、直线型缓坡、上凸型缓坡与阶梯型缓坡 4 种不同结构形式的缓坡产生的水流噪声,得出直线型缓坡的噪声声级最低。张邱杰^[38]采用闸门与直线型缓坡衔接布置于无坎宽顶堰下游面,并对比 3 种不同的衔接方式(闸门半圆上端,闸门半圆中端,闸门半圆下端)产生的水流噪声特性,发现采用闸门半圆中端与直线型缓坡的衔接方式时,堰体过水产生的水流噪声最小。另外通过对堰体下游面跌水进行水动力数值模拟,结合水流噪声监测结果得出无坎宽顶堰跌水水流噪声主要由下泄水体对下游边界和水体的冲击摩擦引起,因此堰体下游不同的结构特征造成不同的水流噪声特征。齐春风等^[39]发现消力池底板上铺设钢膜,消力池前端旋滚区产生的涡旋更为破碎,可有效降低底板处的水流脉动能量。由此可见,过水设施结构形式的不同造成水流流态及水动力特性的不同,使其产生的水流噪声声级及频率产

生较大的差异,过水设施结构形式是水流噪声的重要影响因子。

过水设施过流面结构形式决定了水流的紊动程度。水流流经时与流道固定部件撞击分流形成涡体,产生激烈的紊动和不规则脉动压力。脉动压力在固定部件与水流之间相互传递,在高流速情况下可能在流道某些特定部位形成水体空化,增加空化噪声。

2.3 过水设施材料特征对水流噪声的影响

对于不同材质的过水设施由于表面粗糙度的不同,水流与边界的切向摩擦产生切向力,进而形成不同形态的涡体。低速水流涡体未在相邻流层相互掺混,水流较为稳定;高速水流动体紊动激烈,与低速水流相比形成的水流噪声具有较大的差异。对于明渠或管道等结构简单的过水设施,水流噪声通常应为水流与固体边界的摩擦引出的水流紊动产生。过水设施材料特性的不同,对水流的摩擦效应不同,如流道边界糙率变大后,流体的流速分布不同,紊动强度也不同^[40],进而诱发出不同声级的水流噪声。王灿祥^[41]针对水流通过塑料管道、无缝钢管和铸铁管 3 种不同材质的管道产生的水流噪声的时频特性进行了试验和分析,发现管道材质的杨氏模量越低,水流噪声信号频率越低,塑料管道水流噪声信号频率主要分布在 5 ~ 50 Hz;铸铁管道分布在 1000 Hz 左右;无缝钢管分布在 400 ~ 600 Hz。

3 结 语

过水设施产生水流噪声主要由水流高强度紊动,流层之间及与固体边界的摩擦、碰撞等相互作用引起,其噪声声级及频率特征与过水设施结构特性、材料特性、运行工况密切相关,是多种因素共同作用的结果,且过水设施水流噪声呈现出连续宽频等特点。水流噪声的形成机理不同,对应的频谱特征具有较大的差异,在噪声形成的不同阶段其呈现出的频谱也有所区别。由此可见,过水设施水流噪声声级、频率、音色是水流水动力特性变化及其与过流边界相互作用的综合动态表征,实时反映过水设施水流运行状态及流道运行状态,可作为实时监测信号,诊断过水设施的运行状态及安全,同时评估过水设施运行对环境的影响。然而,目前国内外对过水设施水流噪声的研究主要聚焦在某些具体过水设施水流的降噪方法上,针对水流噪声特征值与水流水动力参数、边界特性参数之间的相互关系却少有研究,缺乏建立水流噪声表象与流场特征之间的对应关系,难以借助噪声信号对过水设施运行和安全状态进行实时诊断。

水流通过过水设施下泄过程中,受其边界特性的影响水动力状态常发生较大变化,或加速、或湍动、或涡旋、或剪切,伴随边界形状和结构的变化将产生不同特征的水流噪声,因此,水流通过过水设施产生的水流噪声与水流特性一一对应,同时也反映了过水建筑物运行的实时状态。目前不同情况下过水设施水流噪声形成机理错综复杂,应深入开展水流噪声特征值与水流水动力特性及其边界特性的相互关系研究,明确影响过水设施水流噪声的关键因子,量化水流噪声与水动力参数及边界参数的相互关系,构建不同结构、不同形状、不同材料、不同尺寸水利设施在典型水流工况运行下的水流噪声数据库,为通过噪声特征准确识别水流及过水设施运行状态提供基础。

参考文献:

[1] 常金秋. 浅谈住宅给排水噪声防治[J]. 上海应用技术学院学报, 2002, 2 (3): 205-208. (CHANG Jinqiu. Elementary introduction on the noise control for water supply and drainage in buildings[J]. Journal of Shanghai Institute of Technology, 2002, 2 (3): 205-208. (in Chinese))

[2] ALIMOHAMMADI I, SANDROCK S, GOHARI M R. The effects of low frequency noise on mental performance and annoyance[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2013, 185 (8): 7043-7051.

[3] 胡志华, 郭维东, 谢芳芳, 等. 河道泄水建筑物下泄水流噪声特性分析[J]. 中国农村水利水电, 2013 (4): 72-74. (HU Zhihua, GUO Weidong, XIE Fangfang, et al. A study of characteristics of the sluice flow noise of river discharge structure [J]. China Rural Water and Hydropower, 2013 (4): 72-74. (in Chinese))

[4] BASNER M, BABISCH W, DAVIS A, et al. Auditory and non-auditory effects of noise on health[J]. The Lancet, 2014, 383 (9925): 1325-1332.

[5] 李莎莎. 无坎宽顶堰下泄水流噪声的降噪措施研究[D]. 绵阳: 西南科技大学, 2020.

[6] 王恭兴, 张麒麟, 廖彬秀. 跌水景观坝噪声分析与整治方案[J]. 工程建设与设计, 2020 (23): 94-96. (WANG Gongxing, ZHANG Qilin, LIAO Binxiu. Noise analysis and treatment scheme of the landscape dam[J]. Construction & Design for Project, 2020 (23): 94-96. (in Chinese))

[7] 祁英明, 王超, 李长勇. 基于噪声频谱分析的乌弄龙水电站卡门涡共振快速判断与处理[J]. 大电机技术, 2021 (5): 82-87. (QI Yingming, WANG Chao, LI Changyong. Fast judgment and treatment of Karman vortex resonance in Wunonglong hydropower station based on noise spectrum analysis[J]. Large Electric Machine and Hydraulic Turbine, 2021 (5): 82-87. (in Chinese))

[8] 刘殿程. 水轮机异响问题的分析和处理[J]. 云南水力

发电, 2021, 37 (7): 210-213. (LIU Diancheng. Analysis and treatment of abnormal sound of hydroturbine [J]. Yunnan Water Power, 2021, 37 (7): 210-213. (in Chinese))

[9] LIAN Jijian, WANG Xiaoqun, ZHANG Wenjiao, et al. Multi-source generation mechanisms for low frequency noise induced by flood discharge and energy dissipation from a high dam with a ski-jump type spillway [J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2017, 14 (12): 1482.

[10] 蒋小辉. 水轮机流动噪声检测与分析[D]. 武汉: 华中科技大学, 2009.

[11] 周心一, 吴有生. 流体动力性噪声的相似关系研究[J]. 声学学报, 2002 (4): 373-378. (ZHOU Xinyi, WU Yousheng. Study of similarities for fluid-dynamic noise [J]. Acta Acustica, 2002 (4): 373-378. (in Chinese))

[12] 王玉. 三维刚性壁面空腔流动机制与水动噪声研究[D]. 天津: 天津大学, 2012.

[13] 余鑫. 高坝泄洪诱发低频声波特性及调控降噪研究[D]. 天津: 天津大学, 2020.

[14] POWELL A. Theory of vortex sound[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 1964, 36 (1): 177-195.

[15] 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.

[16] 李环, 刘聪尉, 吴方良, 等. 水动力噪声计算方法综述[J]. 中国舰船研究, 2016, 11 (2): 72-89. (LI Huan, LIU Congwei, WU Fangliang, et al. A review of the progress for computational methods of hydrodynamic noise[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2016, 11 (2): 72-89. (in Chinese))

[17] 毛成, 苏立, 潘月国, 等. 小水电站压力管道水动力学特性研究[J]. 人民长江, 2021, 52 (1): 151-157. (MAO Cheng, SU Li, PAN Yueguo, et al. Study on hydrodynamic characteristics of pressure pipelines in small hydropower stations[J]. Yangtze River, 2021, 52 (1): 151-157. (in Chinese))

[18] 孙小鹏, 薛盘珍, 吕家才. 泄流的压力脉动及其概化设计[J]. 水动力学研究与进展(A辑), 1997, 12 (1): 102-112. (SUN Xiaopeng, XUE Panzhen, LYU Jiakai. Release pressure fluctuation and its conceptual design[J]. Chinese Journal of Hydrodynamics, 1997, 12 (1): 102-112. (in Chinese))

[19] 李昕, 张建民, 彭勇, 等. 有压闸室通气孔布置优化研究[J]. 水电能源科学, 2017, 35 (5): 120-123. (LI Xin, ZHANG Jianmin, PENG Yong, et al. Optimization arrangement of air vent pipe in pressure gate chamber[J]. Water Resources and Power, 2017, 35 (5): 120-123. (in Chinese))

[20] 王佳俊, 潘罗平, 曹树良. 小波变换应用于水轮机空化信号检测[J]. 水力发电学报, 2013, 32 (4): 215-220. (WANG Jiajun, PAN Luoping, CAO Shuliang. Wavelet transforms applied to cavitation noise analysis for hydro-

- p turbine[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2013, 32 (4): 215-220. (in Chinese))
- [21] 於三大, 邓浩, 陈绪春. 三峡大坝泄洪建筑物水力学安全监测[J]. 水电自动化与大坝监测, 2004, 28(2): 47-50. (YU Sanda, DENG Hao, CHEN Xuchun. Hydraulic safety monitoring of flood discharge structure of Three Gorges Dam [J]. Dam Observation and Geotechnical Tests, 2004, 28(2): 47-50. (in Chinese))
- [22] 吴持恭. 明渠水气二相流[M]. 成都: 成都科技大学出版社, 1989.
- [23] 田茹妍. 水滴入水过程及其水噪声试验研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2017.
- [24] 邓军, 许唯临, 曲景学, 等. 明渠水流自掺气对断面平均流速的影响[J]. 水力发电学报, 2003 (4): 88-94. (DENG Jun, XU Weilin, QU Jingxue, et al. The influence of aeration on average velocity of self-aerated chute flow [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2003 (4): 88-94. (in Chinese))
- [25] 张红梅, 刘经强, 于新雨, 等. 突扩式跌坎消力池掺气特性试验[J]. 水利水电科技进展, 2021, 41 (6): 82-87. (ZHANG Hongmei, LIU Jingqiang, YU Xinyu, et al. Experimental research on aeration characteristics of a stilling pool with drop sill and sudden expansion [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2021, 41(6): 82-87. (in Chinese))
- [26] 李贵吉, 张建民. 前置突扩跌掺气设施曲线阶梯水流掺气特性数值计算[J]. 水利水电科技进展, 2021, 41 (4): 46-52. (LI Guiji, ZHANG Jianming. Numerical calculation of aerated flow characteristics in a curve-floor stepped tunnel with pre-sudden lateral enlargement and bottom drop aerator [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2021, 41(4): 46-52. (in Chinese))
- [27] 练继建, 任盼红, 刘东明, 等. 明渠完全掺气水流水力特性数值模拟研究[J]. 水力发电学报, 2022, 41 (4): 1-8. (LIAN Jijian, REN Panhong, LIU Dongming, et al. Numerical simulations on hydraulic characteristics of fully aerated water flows in open channel [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2022, 41 (4): 1-8. (in Chinese))
- [28] 张宏伟, 刘之平, 张东, 等. 掺气水流声速的研究[J]. 水利学报, 2013, 44 (9): 1015-1022. (ZHANG Hongwei, LIU Zhiping, ZHANG Dong, et al. Study on the sound velocity in an aerated flow [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2013, 44(9): 1015-1022. (in Chinese))
- [29] VRACAR M S, MIJIC M. Ambient noise in large rivers (L) [J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2011, 130(4): 1787-1791.
- [30] DUBEY A, LI Zhao, LEE P, et al. Measurement and characterization of acoustic noise in water pipeline channels[J]. IEEE Access, 2019, 7: 56890-56903.
- [31] LIAN Jijian, ZHANG Wenjiao, GUO Qizhong, et al. Generation mechanism and prediction model for low frequency noise induced by energy dissipating submerged jets during flood discharge from a high dam [J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2016, 13(6): 594.
- [32] 郭维东, 谢方芳, 胡志华, 等. 溢流堰下泄水流噪声频谱分析[J]. 沈阳农业大学学报, 2011, 42 (2): 235-237. (GUO Weidong, XIE Fangfang, HU Zhihua, et al. Spectrum analysis of discharge flow noise of the overflow weir [J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2011, 42(2): 235-237. (in Chinese))
- [33] 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))
- [34] 许志雯, 赵兰浩, 杜帅群, 等. 高坝泄洪诱发场地振动响应分析及传播规律[J]. 水利水电科技进展, 2021, 41 (2): 36-41. (XU Zhiwen, ZHAO Lanhao, DU Shuaiqun, et al. Response analysis and propagation law of site vibration induced by high dam flood discharge [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2021, 41 (2): 36-41. (in Chinese))
- [35] 袁常乐, 万德成. 不同几何形状水下远场噪声分析[C]//第三十一届全国水动力学研讨会论文集(上册). 厦门: 上海《水动力学研究与进展》杂志社, 2020: 474-481.
- [36] 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))
- [37] 杨蟠. 无坎宽顶堰水噪声产生机理与降噪措施的物理模型实验研究[D]. 绵阳: 西南科技大学, 2018.
- [38] 张邱杰. 底横轴翻转闸门水噪声产生机理及降噪措施研究[D]. 绵阳: 西南科技大学, 2021.
- [39] 齐春风, 练继建, 刘昉, 等. 底流钢膜消力池底板上表面脉动压力试验[J]. 水利水电科技进展, 2018, 38 (2): 33-38. (QI Chunfeng, LIAN Jijian, LIU Fang, et al. Experimental study on fluctuating pressure acting on the upper surface of the slab in a underflow stilling basin with a steel membrane [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2018, 38(2): 33-38. (in Chinese))
- [40] 江会昌, 吴军君. 不同糙体对水流和糙率特性影响试验研究[J]. 浙江水利科技, 2021, 49 (3): 22-28. (JIANG Huichang, WU Junjun. Experimental study on influence of different roughness on flow and roughness characteristics [J]. Zhejiang Hydraulics, 2021, 49 (3): 22-28. (in Chinese))
- [41] 王灿祥. 基于声信号的供水管道泄漏检测定位系统研究[D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2015.

(收稿日期: 2022-03-02 编辑: 俞云利)