

我国闸坝类泄流结构脉动压力谱密度特征研究综述

黄锦林^{1,2}

(1. 广东省水利水电科学研究院, 广东 广州 510635; 2. 广东省水动力学应用研究重点实验室, 广东 广州 510635)

摘要: 随着高水头、大流量泄流结构的兴建, 高速泄洪水流产生的脉动荷载对泄流结构的安全影响巨大, 特别是高速泄流诱发泄流结构振动问题尤为突出。在前人研究的基础上对我国闸坝等泄流结构上的脉动荷载谱密度特征进行了分析总结, 总体上, 脉动压力荷载的谱密度基本类型主要分为4种, 其与水流的流态和泄流结构型式存在对应关系, 闸坝泄流结构的脉动压力谱密度均属于4种基本类型中的一种或某几种的组合。从分析总结作用于导墙、闸门、闸墩上的脉动压力谱密度来看, 其均属于窄带噪声谱。文章可供类似泄洪建筑物脉动压力研究参考。

关键词: 闸坝泄流; 泄流结构; 脉动压力; 谱密度; 荷载类型

中图分类号: TV131.3⁺3

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2017)05-0129-06

Summarization on the characteristics study of fluctuating pressure spectrum density of sluice-dam discharge structures in China

HUANG Jinlin^{1,2}

(1. Guangdong Research Institute of Water Resources and Hydropower, Guangzhou 510635, China;

2. Guangdong Key Laboratory of Hydrodynamic Application Research, Guangzhou 510635, China)

Abstract: With the construction of high head and large flow discharge structure, the pulsating load caused by high-speed water flow has had a huge impact on the safety of the discharge structure, especially the discharge structure vibration problem induced by high-speed discharge is prominent. In this paper, fluctuating pressure spectral density characteristics on the sluice-dam discharge structure were analyzed and summarized. On the whole, spectral density of fluctuating pressure loads are mainly divided into four categories, and their variation corresponds to the flow and structure form. Fluctuating pressure spectral density of the sluice-dam discharge structure belongs to one or more of the four basic types. Through the analysis of the spectral density analysis of fluctuating pressure on the guide wall, gate and pier, all the spectral density of fluctuating pressure belongs to narrow band noise spectrum. The article can be used as reference in the similar water fluctuating pressure building research.

Key words: discharge of gate and dam; discharge structure; fluctuating pressure; spectrum density; load types

1 研究背景

随着我国水利工程中大量高水头、大流量、超高速的泄水建筑物的兴建, 泄流结构在泄水过程中承受水流脉动压力问题一直受到学术界和工程界的广泛关注。在专家学者的共同努力下, 我国在水流脉动压力方面的研究取得了实质性的进展。水利工程中的高速水流属于紊流运动^[1], 20世纪30年代, 国外专家学者们就通过原型观测与模型试验对各种

泄水建筑物的水流脉动荷载进行了研究^[2], 而我国则在20世纪50年代后开始开展脉动压力的研究工作。60年代人们发现, 切变流场中随机的小尺度结构与具有一定规律性的大尺度涡旋结构(相干结构)并存^[3], 其中相干结构是指在紊流场中不规则的触发的一种序列运动, 但就它本身的强度、形态和运动(出现时间和空间位置)而言, 仍具有随机性, 它是紊流脉动产生及由此引起各种物理效应的原因。

收稿日期: 2017-05-16; 修回日期: 2017-06-19

基金项目: 广东省水利科技创新基金项目(2014-08)

作者简介: 黄锦林(1971-), 男, 江西赣州人, 博士, 教授级高级工程师, 从事水利水电工程及防洪减灾研究工作。

近几十年来,国内外专家学者通过大量水工原型观测研究发现,闸坝泄流时产生的脉动压力荷载一般具有随机特性,可以用概率方法和随机数据的统计函数加以描述。脉动压力在泄洪流量恒定时一般属于各态历经的平稳随机过程,泄洪流量改变时,仍可按不同的平稳随机过程进行处理^[4]。在研究动水问题时,各种情况下的水流压力脉动的谱密度曲线是至关重要的资料,脉动压力谱密度能直观地反映出脉动压力的能量和频率分布情况,对于研究泄流结构振动安全及基于泄流激励的泄流结构健康诊断具有重要价值。本文结合水流脉动压力特点,对闸坝泄流时作用于导墙、闸门、闸墩上的脉动压力谱密度特性进行分析总结,并对闸坝泄流脉动压力下结构所面临的问题及下一步研究重点进行展望。

2 脉动压力谱密度类型

闸坝泄流时水流脉动压力对泄水建筑物的不利影响主要有:(1)使建筑物的瞬时荷载增大,设计时对强度要求提高;(2)当脉动主频率接近建筑物的固有频率时,可能会引起建筑物的强迫振动;(3)增加空蚀的可能性。

假设脉动压力为各态历经的平稳随机过程,以 $p(t)$ 表示某点脉动压力,用功率谱密度函数 $G(f)$ 表征 $p(t)$ 的频率结构为:

$$G(f) = \lim_{\Delta f \rightarrow 0} \frac{1}{\Delta f} \left[\lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T p^2(t, f, \Delta f) dt \right] \quad (1)$$

式中: $p(t, f, \Delta f)$ 为 $p(t)$ 在 f 至 $f + \Delta f$ 频率范围内的

分量; $G(f)$ 定义在 $(0 \leq f < \infty)$ 频率域,是单边谱密度。

$p(t)$ 的自相关函数 $R(\tau)$ 与 $G(f)$ 互为傅立叶变换,即:

$$\begin{aligned} G(f) &= 2 \int_{-\infty}^{+\infty} R(\tau) e^{-j2\pi f\tau} d\tau \\ &= 4 \int_0^{\infty} R(\tau) \cos(2\pi f\tau) d\tau \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} R(\tau) &= \int_{-\infty}^{+\infty} S(f) e^{j2\pi f\tau} df \\ &= \int_0^{\infty} G(f) \cos(2\pi f\tau) df \end{aligned} \quad (3)$$

$p(t)$ 的均方值 ψ^2 与 $G(f)$ 有如下关系:

$$\psi^2 = \int_0^{\infty} G(f) df \quad (4)$$

$p(t)$ 的取值规律可通过概率密度函数进行描述,试验表明, $p(t)$ 的振幅分布密度按正态分布^[5],若已知某点 $p(t)$ 的谱密度 $G(f)$,便可求出与 $G(f)$ 有关的 $p(t)$ 其他统计函数,进而可分析 $p(t)$ 的统计特性。因此,谱密度是脉动压力分析中最重要的统计参数之一。

一种类型的谱密度与一种水流内部结构和能量分布形式相对应,即表示谱密度类型与水流的流态和内部结构存在大抵对应的关系。文献[6]通过大量原型观测资料分析表明,水流脉动压力的谱密度可分为4种基本类型:(1)有限带宽的近似白噪声谱;(2)宽带噪声谱;(3)具有优势频率的宽带噪声谱;(4)窄带噪声谱,详见图1。

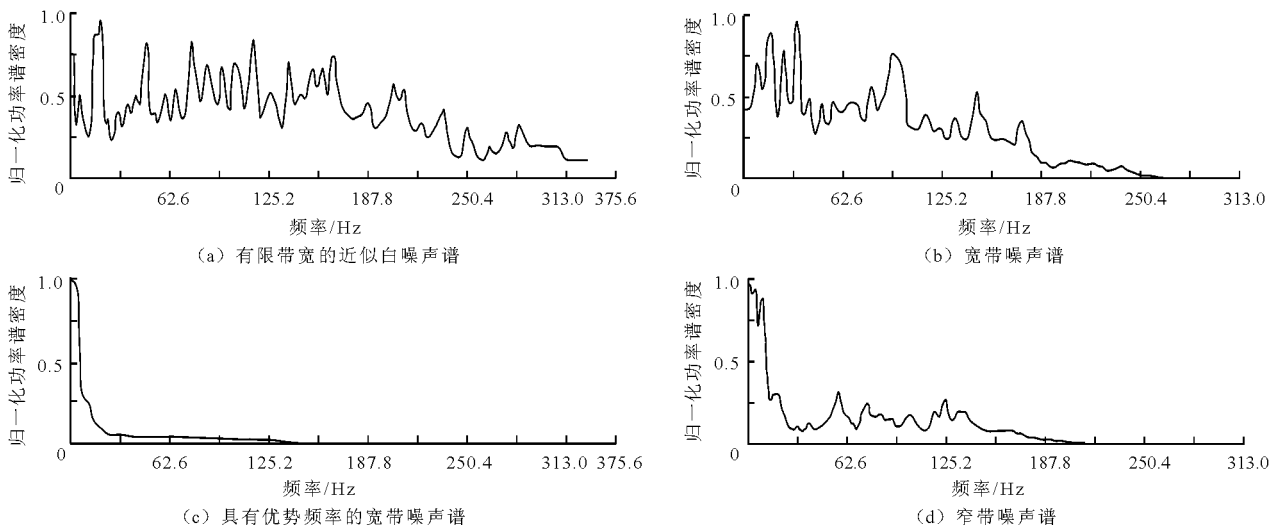


图1 脉动压力的谱密度类型^[6]

由于脉动结构是有尺度的,当水流内部包含以某种瞬间速度运动的大小不等的各种尺度脉动结构时,在谱密度图上则表现为频带较宽,各频率分量的

能量基本接近或大致相等,脉动能量在频带内较均匀地分布,没有十分突出的能量集中区,此类脉动压力谱密度常为近似白噪声谱(如图1(a)所示)或宽

带噪声谱(如图1(b)所示)。当水流内部包含多种尺度的脉动结构,且脉动结构中存在能量相对较大而明显占优势的频率分量时,在谱密度图上则表现为频带较宽,脉动能量在频带内较均匀地分布,但有明显、突出的峰值,此类脉动压力谱密度常为具有突出优势频率的宽带噪声谱(如图1(c)所示)。当水流内部仅以某种尺度的脉动结构为主时,在谱密度图上表现为脉动能量主要集中在狭窄的一个或几个区域,且在狭窄的频区上有突出的峰值,此类脉动压力谱密度常为窄带噪声谱(如图1(d)所示)。一般情况下,闸坝泄流结构的脉动压力谱密度均属于上述4种基本谱型中的一种或某几种的组合。

3 闸坝泄流结构脉动压力谱密度特征

不同泄水建筑物在泄流条件下的水流脉动压力谱有不同的特征^[5],同类型的闸坝泄水建筑物在类似泄洪条件下的水流脉动压力谱密度特性服从一定的统计规律,本文结合导墙(包括水垫塘底板)、闸门和闸墩等泄流结构脉动压力原型观测或模型试验成果,对获得的脉动压力谱密度特征进行归纳总结,以供水利工程技术人员参考。

3.1 作用于导墙上的脉动压力谱密度特征

紊流场产生的水流脉动压力不利于导墙结构的稳定运行,长时间作用会对导墙结构产生一定程度的损伤乃至破坏。文献[7-8]等通过三峡水利枢纽左导墙模型试验分析了挑流消能区导墙上的脉动压力沿水流方向和水深方向的分布规律,结果表明导墙上脉动压力与水流紊动强度有关;沿水流方向上脉动压力幅值的最大处出现在在水舌冲击区,水舌内缘上游漩滚很弱,脉动压力在水舌内缘向上游方向有减小趋势;水舌外缘下游漩滚强烈,脉动压力在水舌外缘向下游呈先略减小后略增大趋势,且与水流形态分布规律一致,这主要与水舌入水后产生横向旋滚及水舌入水角较小等因素有关。沿水深方向呈下部小上部大的分布规律,且合力作用点明显比静水压力高,其不利于导墙结构的稳定运行。运

行条件相同的情况下,脉动压力的优势频率随泄洪水头的增加也逐步增大。挑流消能区导墙上典型脉动压力谱密度如图2所示,该区域导墙上的脉动压力能量多集中在低频范围,优势频率小于1 Hz,且频带较窄,在3 Hz以内。

文献[9]结合向家坝水电站工程,采用模型试验对底流消能区导墙上的脉动压力分布规律进行了研究,结果表明:作用于导墙上的脉动压力在水跃首部最大,沿水流方向逐渐减小;水深方向分布呈底部小上部稍大的趋势,最大值出现在1/2左右的水跃旋滚高度处。底流消能区导墙上脉动压力能量集中在超低频范围,且频带很窄,在0~16 Hz频带内,优势频率均小于0.25 Hz,典型点脉动压力谱密度如图3所示。文献[10]对底流消能区脉动荷载特性进行了模型试验,分析了不同比尺紊动区内的脉动壁压主频特性,结果表明各比尺下脉动壁压主频在5 Hz以内,表现为具有突出优势频率的宽带噪声谱。文献[11]对梨园水电站溢洪道内水流脉动压力特性进行模型试验,发现水跃区底部水流脉动压力主频分布在0.1~1.0 Hz之间,属于低频脉动,能量集中在低频;在泄槽急流区脉动压力主频分布于2.0~3.0 Hz之间。文献[12]以某工程为例,对消力池底流消能区水流脉动荷载进行了模型试验,发现水流脉动压力主频在5 Hz以内,表现为具有突出峰值的窄带噪声谱。文献[13]依托高坝洲水电站消力池导墙模型试验对作用于导墙上的脉动壁压进行分析,结果表明:作用于消力池导墙上的水流脉动压强分布不均,且脉动壁压强度的最值与水位差之比与下游水深无关;导墙上的脉动壁压主要由窄带低频脉动引起,能量分布集中在4 Hz以下,脉动优势频率范围为0.12~0.99 Hz。文献[14]对乌江银盘水电站消力池导墙脉动压力特性进行了模型试验,结果表明作用于导墙及底板上的脉动压力处于低频范围,优势频率在4.59 Hz以下,属于低频特性,跃首与跃尾的优势频率较为突出,水跃中间段高频能量比重增加,主频向高频移动。文献[15]对泄

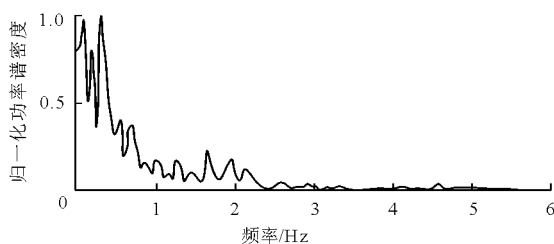


图2 挑流消能区导墙上典型脉动压力谱密度

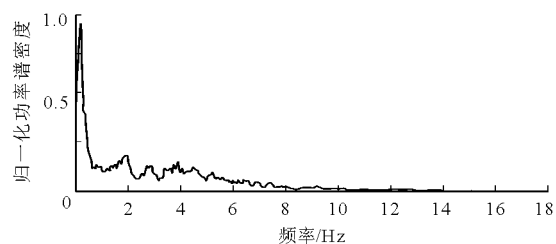


图3 底流消能区导墙上典型点脉动压力谱密度

洪底孔平底消力池导墙脉动压力随水流方向及水深方向特性进行模型试验研究,通过频谱分析获得了导墙上 145 个功率谱密度曲线,结果表明消力池导墙上的脉动压力是窄带低频脉动,优势频率在 0.3 ~ 7.25 Hz 之间,优势频率在 2 ~ 4 Hz 之间占了 60% 以上。文献[16-18]针对向家坝水电站泄洪诱发场地振动这一工程问题,开展了泄洪水流脉动荷载特性模型试验研究,分析了泄洪孔口、跌坎、导墙、消力池底板及尾坎的脉动荷载特性,发现各部位水流脉动荷载的频带均较窄或脉动能量主要集中在一个或几个狭窄的频率区间,功率谱密度函数特征表现为在频率区间内存在突出的峰值的窄带噪声谱,虽然各部位脉动压力频谱分布及主频不尽相同,但都分布于 0.5 ~ 1.5 Hz 之间。文献[19]以水垫塘底板为例,通过模型试验分析了清水与含沙水流的脉动荷载特性,从频谱特性来看,含沙水流与清水水流的功率谱较为相似,无明显的优势频率,且大部分能量集中在 0.4 Hz 以内,水流主要以低频大尺度旋涡为主。文献[20]对水垫塘底板脉动压力进行了模型试验分析,结果表明脉动能量主要集中在 0 ~ 1.0 Hz 范围,属于典型的低频脉动。文献[21]通过模型试验研究了水垫塘异型构造底板缝隙水流脉动压力特性,从脉动压力频谱特性分析来看,脉动压力能量在 10 Hz 以内,能量集中频带较窄,主频在 1 Hz 以内。文献[22]应用大涡紊流模型,对水跃区脉动壁压进行了数值模拟,并与实验结果进行了对比,从模拟结果来看,主旋滚区内脉动壁压的功率谱密度具有明显的峰值,峰值频率约 2.5 Hz 左右,同样为具有突出峰值的窄带噪声谱特征。文献[23]将三峡左导墙泄洪振动进行原型观测结果与模型试验成果对比,发现水流的优势频率较明显,导墙低阶振动频率比水流脉动优势频率大,由水流脉动压力激励所致的结构产生低阶共振的可能性小。以上可见,脉动压力分布规律与水流流态关系密切,水流紊动强度越大的位置,脉动压力就越大;作用于导墙上的脉动压力是由低频大尺度旋涡引起,其压力谱属于窄带噪声谱。

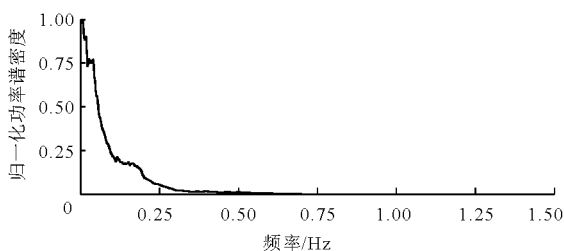


图4 弧形闸门面板上典型脉动压力谱密度

3.2 作用于闸门上的脉动压力谱特性

闸门上的脉动荷载与很多因素有关,比如闸门结构类型、泄流条件、作用的闸门部位以及闸门开度等。本文主要对泄流结构中的弧形闸门、平面闸门和翻板闸门上的脉动压力谱密度特性进行总结分析。文献[24-26]等以新政航电枢纽弧形闸门为例,对其进行了水动力学模型试验,依据实测脉动压力响应信号分析了作用于闸门面板上的脉动压力荷载特性,作用于闸门上的脉动荷载能量大部分具有正态分布特征,且主要集中在 0.5 Hz 以下,频带极窄,能量大于 1.0 Hz 的几乎为零,典型脉动压力谱密度如图 4 所示。文献[27]等通过对边孔弧形闸门水流脉动压力进行分析表明,闸门部位的脉动主频不随闸门开度、上下游水位差的变化而变化,且分布没有固定规律;脉动压力在频域的能量分布主要在 0 ~ 0.25 Hz 的频率范围内,同样具有低频特征。文献[28]以一拱形钢闸门为例,开展了水流脉动压力荷载特性模型试验,试验结果表明作用于闸门门体上的水流脉动荷载的主要能量集中在 1 ~ 10 Hz 范围,且优势频率在 5 Hz 以内,在某些工况下作用于闸门上的脉动荷载还出现了谐波现象,谐波主频约 2.9 Hz。文献[29]对表孔弧形闸门进行了水动力荷载测试,发现弧形闸门面板所承受的水流脉动压力主要能量集中在 15 Hz 以内,且脉动荷载的优势频率集中在 5 Hz 以内。文献[30]对积石峡平面工作闸门进行试验研究,得到的典型脉动压力谱密度如图 5 所示,由图 5 可知作用于平面闸门上的脉动压力能量集中在低频范围,主频在 1 Hz 以内,频带较窄。文献[31]以某一翻板闸门为例,基于模型试验研究得出不同闸门开度时作用于其面板上的整体脉动压力分布规律,脉动压力荷载功率谱图如图 6 所示。不同闸门开度工况下,作用于翻板闸门面板上的脉动能量均处于低频范围,优势频率不超过 1 Hz,频带很窄,在 10 Hz 以内。综合以上研究成果来看,作用于闸门上的脉动压力荷载能量均集中在低频范围,且频带很窄,属于窄带噪声谱。

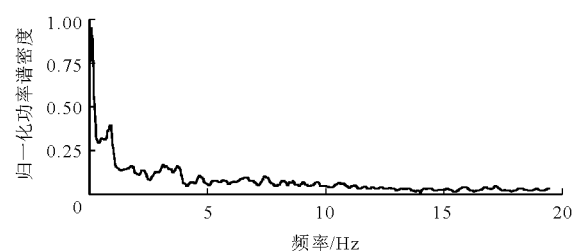


图5 平面闸门面板上典型脉动压力谱密度

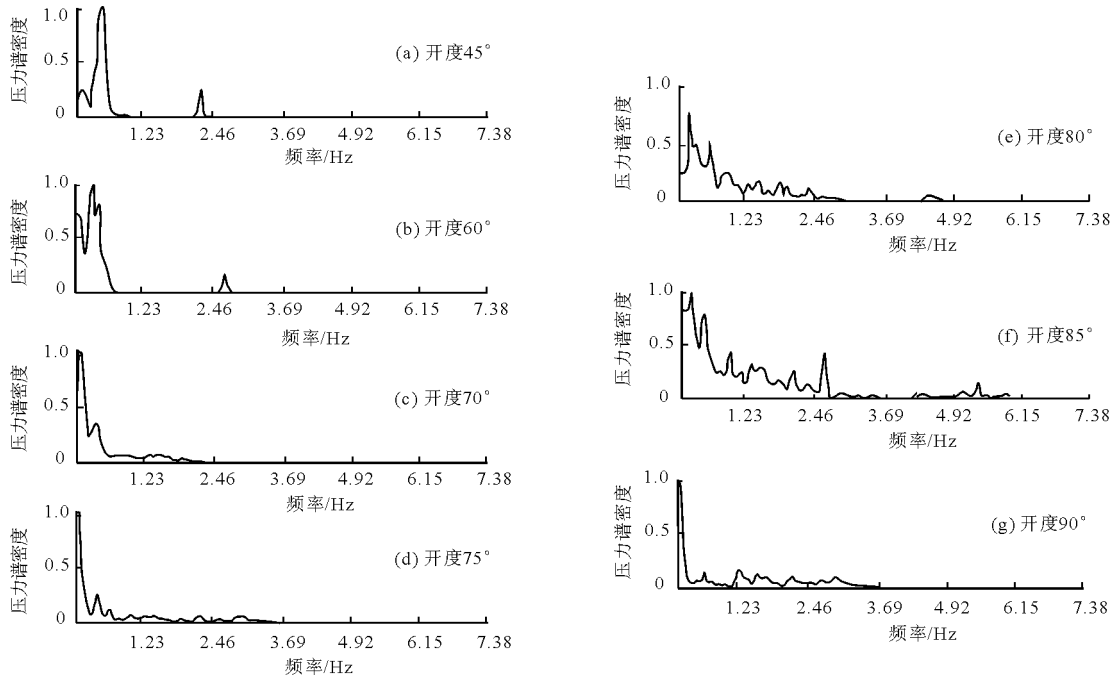


图 6 翻板闸门开度变化时的脉动压力归一化功率谱密度

3.3 作用于闸墩上的脉动压力谱特性

随着工程技术的不断更新与完善, 水工建筑物结构施工所用的材料逐步趋于轻型化(如水闸闸墩), 结构泄流期间会因自身刚度变小而产生较大幅度的振动, 对建筑物结构的安全运行十分不利。某水电站工程泄洪闸在运行期出现了较为强烈的振动, 为分析产生振动的原型, 文献[32-33]通过模型试验(如图 7 所示)对其泄水运行期间作用于闸

墩上的脉动荷载进行了分析。试验结果表明, 作用于闸墩上的脉动压力主频在 5 a 一遇和校核洪水工况下均很低, 在 0.05 Hz 以内, 脉动频带能量多集中在 2 Hz 范围内, 如图 8~10 所示。低水位工况下的脉动能量频带稍微有变宽的趋势, 但大部分集中在 10 Hz 以内, 荷载谱密度峰值在 0.5 Hz 左右, 总体上作用于闸墩上的脉动压力谱密度频带均较窄, 属于窄带噪声谱。

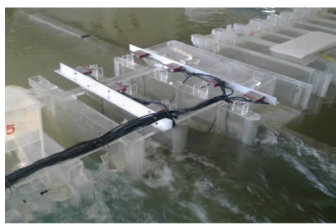


图 7 闸墩整体荷载试验图

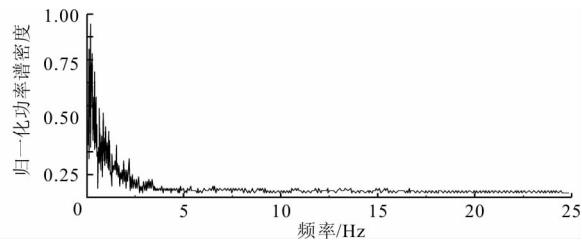


图 8 校核工况下脉动压力谱密度

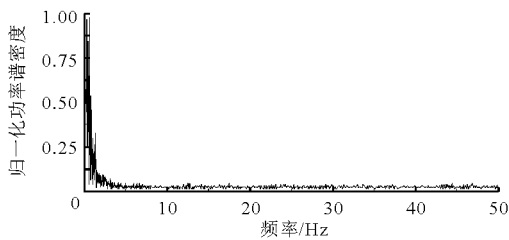


图 9 5 a 一遇工况下脉动压力谱密度

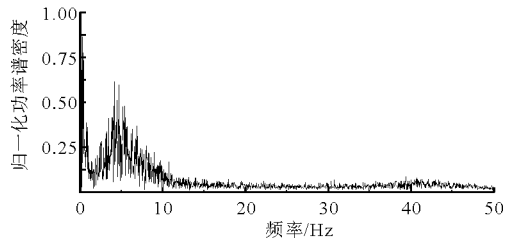


图 10 低水位典型工况下脉动压力谱密度

4 结 论

按照我国计量标准, 对于振动频率而言: 0.002

~0.1 Hz 为超低频范围, 0.1~20 Hz 为低频范围, 20~5 000 Hz 为中频范围, 5 000~50 000 Hz 为高频范围。从现有的研究成果来看, 虽然作用于闸坝泄

流结构上的水流脉动压力谱密度特征有所不同,但脉动压力主频率均很低,且能量多分布在低频范围内,属于低频脉动,脉动压力的谱密度为窄带噪声谱。实际工程中的闸坝泄流结构几何形状多种多样,工作条件极其复杂,在脉动压力长期作用下,容易发生振动或疲劳破坏。因此,对闸坝泄流脉动压力下的结构振动问题仍需作进一步的研究。

针对闸坝类泄流结构的脉动压力问题,提出如下几点建议:(1)闸坝泄水建筑物结构设计时应着重考虑水流流态问题,尽量避免产生不利的脉动压力,且应使其自振频率避开脉动压力的主频率,以免结构产生强迫振动;(2)由于泄水建筑物结构逐步趋于轻型化,结构的自振频率趋于减小,应进一步加强流激振动及结构抗振性能的研究工作;(3)应积极开展闸坝泄流结构的原型观测,特别是出现问题结构的原型观测,及时对观测数据进行分析总结,避免再发生类似问题。

参考文献:

- [1] 梁在朝. 在我国开展工程湍流研究的设想[J]. 力学进展,1994,24(4):483-488.
- [2] 阎诗武. 水流压力脉动的谱分析及普特征[J]. 水利水运科学研究,1981(3):17-33.
- [3] 刘士和,梁在朝. 湍流相干结构与小尺度结构之间的相互作用[J]. 应用数学和力学,1995,16(12):1091-1099.
- [4] 曾昭扬,徐培忠,李未显. 水流脉动压力下结构的随机振动分析[J]. 水利学报,1983,14(1):15-26.
- [5] 梁在朝,黄纪忠. 论脉动壁压的振幅、频率的概率分布规律[J]. 武汉水利电力学院院报,1980,(1):69-81.
- [6] 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.
- [7] 张声鸣,陈建. 导墙动水压力特性研究[J]. 长江科学院院报,1996,13(1):14-20.
- [8] 练继建,崔广涛,黄锦林. 导墙结构的流激振动研究[J]. 水利学报,1998,29(11):33-37+68.
- [9] 练继建. 向家坝水电站消力池底板和导(隔)墙结构水弹性模型试验研究[R]. 天津:天津大学水利水电工程系,2003.
- [10] 张少济. 高坝消力塘透水底板脉动壁压特性及其相似率研究[D]. 天津:天津大学,2012.
- [11] 刘博静. 急流脉动压力相似律及其特性研究[D]. 天津:天津大学,2013.
- [12] 张陆陈,骆少泽,王新,等. 射流簇底流消能泄水诱发场地振动特性研究[J]. 水电能源科学,2015,33(11):72-74+121.
- [13] 刘士和,张晶. 消力池导墙点面脉动壁压特性研究[J]. 武汉大学学报(工学版),2010,43(6):681-684.
- [14] 李静,姜伯乐,袁玲玲. 乌江银盘水电站消力池及导墙脉动压力特性研究[J]. 西北水电,2009(5):77-82.
- [15] 张声鸣. 消力池导墙脉动压力特性的研究[J]. 长江科学院院报,1995,12(1):11-18.
- [16] 张龔,练继建,刘昉,等. 基于模型试验的高坝泄洪诱发场地振动影响因素研究[J]. 振动与冲击,2016,35(16):30-37.
- [17] 李淑君. 向家坝泄洪诱发场地振动振源分析研究[D]. 天津:天津大学,2013.
- [18] 张龔. 高坝泄洪诱发场地振动振源特性与传播规律研究[D]. 天津:天津大学,2015.
- [19] 张铭,尤超,赵荣. 高含沙水流脉动特性试验研究[J]. 水利水电技术,2016,47(11):82-88.
- [20] 姚震. 锦屏一级高拱坝水垫塘底板泄洪振动响应特性研究[D]. 天津:天津大学,2013.
- [21] 马斌,岳颖. 水垫塘异型构造底板缝隙水流脉动压力特性研究[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版),2016,49(1):96-102.
- [22] 李名川,刘昉. 水跃区脉动壁压的大涡模拟[J]. 中国农村水利水电,2012(11):97-99.
- [23] 李火坤,练继建,刘永智. 三峡左导墙泄洪振动原型观测及其动态识别与安全评估[J]. 水利水运工程学报,2010(3):59-64.
- [24] 李火坤,练继建,杨敏. 新政航电泄洪弧形闸门水动力特性模型试验研究[J]. 中国农村水利水电,2006(10):61-65.
- [25] 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.
- [26] 李火坤. 弧形闸门流激振动特性及其结构优化研究[D]. 天津:天津大学,2004.
- [27] 李小超,汤凯,张戈,等. 边孔弧形闸门水流脉动压力特性研究[J]. 实验力学,2015,30(6):749-756.
- [28] 刘鹏,高振海,严根华,等. 大跨度上翻式拱形钢闸门振动特性及抗振优化[J]. 水利水电科技进步,2011,31(3):74-79.
- [29] 严根华,陈发展. 溢流坝表孔弧形闸门流激振动原型观测研究[J]. 水力发电学报,2012,31(2):140-145.
- [30] 练继建. 黄河积石峡水电站工程中孔泄洪洞进口水力学及闸门振动试验报告[R]. 天津:天津大学水利水电工程系,2006.
- [31] 练继建. 内蒙古兴安盟乌兰哈达水利枢纽工程液压翻板启闭力试验研究[R]. 天津:天津大学水利水电工程系,1996.
- [32] 练继建. 蜀河水电站工程泄洪闸闸墩泄洪振动分析[R]. 天津:天津大学水利水电工程系,2013.
- [33] 李火坤,杨敏,陈林,等. 泄洪闸闸墩原型振动测试、预测与安全评价[J]. 振动. 测试与诊断,2014,34(5):938-946+981,982.