

泄流结构振动反演与安全控制指标研究进展

李火坤,王 刚

(南昌大学建筑工程学院,江西 南昌 330031)

摘要:结合最新国内外泄流结构振动反演与安全控制指标相关研究成果和相关工程实例,从泄流结构材料参数振动反演、振源识别及泄流结构振动安全控制指标等三方面综述了泄流结构振动反演及安全控制指标的最新研究进展,总结了当前泄流结构振动安全的关键问题;指出今后泄流结构振动反演与安全控制指标研究可围绕泄流结构材料参数反演数学模型和其求解算法创新、泄流结构振源荷载时域识别和等效荷载处理技术创新、泄流结构振动疲劳安全控制标准和人体舒适度综合评价方法创新等几个方面开展。

关键词:泄流结构;振动反演;材料参数;振源;安全控制指标

中图分类号:TV652 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2020)02-0081-09

Research progress on vibration inversion and safety control index of flood discharge structures//LI Huokun, WANG Gang(*School of Civil Engineering and Architecture, Nanchang University, Nanchang 330031, China*)

Abstract: Combining the latest domestic and international research results with related engineering cases, the updated research progress on the vibration inversion and safety control index of discharge structures were reviewed from the aspects of dynamic inversion of material parameters, vibration source identification and vibration safety control index of flood discharge structures. The key issues of vibration safety for current flood discharge structures were summarized. It is pointed out that the future research on vibration inversion and safety control index of flood discharge structures should be focused on the innovation of the mathematical model of material parameter inversion and corresponding solving algorithms, the time-domain identification of vibration source load and equivalent load processing, the vibration fatigue safety control standards and comprehensive assessment methods of human comfort.

Key words: flood discharge structure; vibration inversion; material parameters; vibration source; safety control index

目前,我国已建成的水利枢纽工程位居世界第一,特别是在长江中上游、雅砻江、澜沧江、黄河上游等已形成了世界上规模最大的特大水利水电枢纽群。这些特大水利枢纽的泄流结构(如溢流重力坝、拱坝、泄洪闸、导墙等)具有高水头、大流量、单宽泄洪消能功率高等特点,在宣泄洪水时,高速水流携带的巨大能量极易造成泄流结构的强烈振动甚至结构的破坏,其长期运行安全保障的技术难度居世界之最。为加强国家重大基础设施安全研究,“重大灾害监测和防御”已被列入国家中长期科技发展规划的“公共安全”重点领域及其优先主题,《中国学科发展战略·水利科学与工程》^[1]中提出“严酷自然条件下的高坝水库群安全”为我国未来水安全面临的挑战之一,高坝水库群的长期运行安全是水安全保障的基本战略目标。

据统计,全世界正服役的水利枢纽中约有 1/3 的泄流结构曾遭受不同程度的破坏,如 2017 年 2 月发生的美国奥洛维尔(Oroville)大坝溢洪道泄槽破坏,导致 18.8 万人紧急撤离^[2];美国德州 Texarkana 坝隔水墙与底板连接处发生断裂,迹象表明断裂主要是由于振动疲劳破坏所导致,在隔墙倒塌之前,曾发生过剧烈的侧向振动,底部混凝土压碎深度达 0.6~0.9 m;与此类振动疲劳破坏实例相似的还有美国新泽西州 Navajo 坝隔水墙的振动破坏,苏联巴帕津斯基水利枢纽溢洪道消力池内的导墙振动破坏,美国加州 Trinity 坝隔墙的振动疲劳破坏等^[3]。我国的重大工程泄流结构的泄洪流量大、水头高,单宽泄洪消能功率高出国外同规模工程 3~10 倍^[4],因此高速水流产生的振动危害更甚。早在 20 世纪 80 年代,由于泄洪振动而影响工程运行安全的事例

就时有发生,如 1982 年,大化水电站泄洪闸在泄流中发现,当流量介于 $2\,000 \sim 8\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 时,闸墩会有明显的横向振动,观测到的最大振幅达 3 mm ,已超过按苏联以建筑物高度 $1/10^5$ 作为振幅允许值的范畴^[5];1987 年,乌江渡水电站原型观测发现左岸滑雪道式溢洪道右导墙振动剧烈,当闸门开度大于 4 m 时,导墙振动有随着闸门开度增大而加大的趋势,在闸门全开时,其侧向振动最大振幅达 2 mm 。近些年这一现象仍然存在,如某水电站泄洪闸在泄洪期间(泄洪流量约 $2.4\text{ 万 m}^3/\text{s}$)闸墩发生强烈振动^[6-7],振动频率较低,越靠近下游震感越强烈,现场目测最大振幅达 $5 \sim 8\text{ mm}$,已影响运行人员的正常操作及工程运行安全,泄洪流量为 $6\,795\text{ m}^3/\text{s}$ 时闸墩实测最大双倍振幅达到了 $676\text{ }\mu\text{m}$,出于安全考虑,该工程进行了抗振加固处理^[8];2012 年,向家坝水电站开闸泄洪时,诱发下游场地发生振动现象,后经枢纽泄洪科学调控有效减缓了场地振动危害^[9];淮安三站自投入运行后,机组和泵房出现了比较剧烈的振动,为此,通过研究分析结构振动问题,提出了结构抗振减振措施^[10]。

由于泄洪诱发振动的复杂性,泄洪振动响应的定量预测及其振动安全控制指标的确定难度较大,在工程设计阶段,采用水弹性模型进行试验模拟预测仍是目前行之有效的手段^[11];在工程运行阶段,现有的泄洪水力学原型观测主要是起到反馈和验证设计的作用,原型水动力荷载的特征(即振源特征)与泄流结构振动响应之间关系仍需进一步明确,在泄流结构振动安全控制指标研究方面仍需完善;针对运行期的泄流结构,基于原型实测响应,并采用反演分析方法研究泄流结构体系真实材料特性、振源特性及其振动安全控制指标具有重要意义。本文从泄流结构材料参数振动反演、振源识别及泄流结构振动安全控制指标等三方面综述泄流结构振动反演及安全控制指标的研究进展,总结当前泄流结构振动安全的关键科学问题和技术瓶颈,可为泄流结构安全运行和反馈设计等相关研究工作提供参考。

1 泄流结构材料参数振动反演研究进展

泄流结构混凝土和基础岩体材料参数(弹性模量、泊松比、刚度、阻尼等)是其安全监测和结构数值模拟计算中不可或缺的重要数据,对于修正泄流结构数值模型和运行期安全评价有着重要作用,工程中常用的确定方法是现场取样进行测试,但该方法工作量大且有益于原结构,难以全面掌握结构材料特性,对于大体积泄流结构而言,不经济也不全面。处于正常服役期的泄流结构,伴随运行年限的

增加,受材料老化、损伤的累积以及环境等因素的影响,其结构性态会有所调整 and 改变,表现为泄流结构或基岩的实际材料参数和设计或初始服役试验得到的值不相符^[12]。而作为泄流结构实际工作性态最真实反映的原型实测资料,蕴含了结构性态随时间变化的规律,因此利用原型实测资料反演泄流结构及其基岩物理力学参数是一种很有效的方法。在水工建筑物安全监控领域,有关利用原型实测资料进行水工建筑物材料参数反演的方法主要分为两种:基于静态监测资料的材料参数反演方法和基于振动测试的动力材料参数反演方法。其中基于静态监测资料(如静力变形)的水工建筑物材料参数反演及其健康诊断在近几十年来一直是我国水工建筑物安全监控研究领域的热点,取得了大量丰硕的成果^[13-16],为保障我国的水利枢纽工程安全运行作出了重要贡献。

近年来,随着结构识别技术的发展,基于振动测试的动力材料参数反演也得到了重视,由于振动实测响应所包含的结构振动模态信息更全面地反映了结构整体力学行为特征,因此根据振动实测数据进行泄流结构材料参数反演所得到的结果往往优于根据静态监测资料反演所得到的结果。但是,对于大刚度的泄流结构而言,现场振动测试较为困难,且受环境背景噪声影响大,只有较低几阶的振动模态数据是可靠的,仍有许多关键技术有待突破,也是目前研究的热点问题之一。练继建等^[17]在拱坝和导墙水弹性模型试验中,提出利用反分析方法对模型试验中的不相似材料参数(泊松比、阻尼比)进行修正;马震岳等^[18]结合某抽水蓄能电站地下厂房结构的振动测试数据,引入改进的遗传算法并结合 ANSYS 软件,反演识别了混凝土材料的动态弹性模量和围岩边界动态参数;冯新等^[19-20]基于数值模型探讨了使用不完全模态观测数据反演混凝土坝分区弹性模量问题,利用不完全模态数据建立了材料参数识别的优化反演模型和求解方法;随后,康飞等^[21]在此基础上提出了一种用于材料参数反演的混合单纯形人工蜂群算法,基于数值模型,建立了基于不完全模态测试数据的混凝土重力坝动力材料参数反演模型,提高了识别精度;刘振平等^[22]提出了一种基于坝体加速度峰值和反应谱的坝体动力参数反演方法,利用地震中的加速度响应信号反演了坝体的动力参数;王登刚等^[23]考虑模态观测数据的不确定性,引入不确定问题求解的区间分析思想,建立了利用先验约束条件的混凝土重力坝动态参数的区间反演模型,采用约束变尺度法求解获得了坝体混凝土和基岩动弹性模量参数的区间范围。

在与原型工程振动实测资料为基础进行材料参数反演研究方面,陈维江^[24]将试验模态分析与动力反演分析相结合,以试验模态与计算模态偏差为目标函数,根据某水电站厂房振动测试资料进行了厂房结构动力反演,得到混凝土平均动弹性模量及混凝土与外围岩石之间的传力形式;程琳等^[25]根据强震观测数据,对某混凝土坝进行了模态参数识别,在此基础上采用多输出支持向量机模型(M-SVM)代替有限元模型建立了材料动参数和结构各阶模态参数之间的非线性关系,基于遗传算法对大坝弹性模量进行了反演;Proulx 等^[26]总结分析了瑞士拱坝 10 年的地震响应数据,通过对不同时期采集的地震响应数据进行量化,反演和修正了拱坝的动力材料参数,并输入数值模型进行了拱坝抗震性能计算;Cantiem^[27]在瑞典的 Norsjö 拱坝上进行了强迫振动试验(采用产生正弦稳态振动的机械式起振机),以模态频率信息为依据,基于有限元模型修正技术反演了拱坝动力特性参数;Wang 等^[28]基于反分析理论,利用大坝地震响应提出了基于模型修正和遗传算法的大坝物理力学参数反演方法。从目前的研究成果来看,结合大坝原型振动实测资料进行坝体材料参数反演的困难在于较难获取原型坝体(如无法利用泄流作为激励源的非溢流坝)的振动数据,由于刚度太大,难以人工激振,而地震激励数据又难以获取。相比较而言,各类型泄流结构有一个共同特点,即在泄流过程中高速水流携带的巨大能量能激发结构振动,现场实测容易实施,具有适时性。李火坤等^[29]基于拱坝泄洪原型振动实测响应数据,采用随机子空间法辨识了拱坝运行工作模态参数,构建了反映各拱坝-地基分区动弹性模量与模态参数(频率、振型)之间非线性关系的响应面模型并替代有限元模型,建立了动弹性模量反演的优化数学模型,反演出各分区弹性模量参数,结果表明,基于反演结果的拱坝模态振型计算值与识别值在数值和变化规律上吻合较好,反演结果可靠,为确定泄流结构运行期材料参数提供了一种新的思路。

采用泄流激励获取泄流结构原型振动响应,并基于输入未知条件下的模态参数识别方法精准辨识泄流结构工作模态参数,以此作为泄流结构材料参数反演依据是目前比较行之有效的办法,该方法的研究涉及输入未知条件下利用有限实测响应精确提取泄流结构多阶模态参数、材料参数反演数学模型的建立以及模型求解的最优算法等方面,其中泄流激励下泄流结构振动响应的降噪、工作模态定阶与模态参数精准辨识和材料参数反演数学模型的构造及最优参数的寻优算法是需要解决的关键问题。

2 泄流结构振源识别研究进展

在多数情况下,受技术条件或工作环境的限制,作用在泄流结构上的整体水动力面荷载(振源)难以直接测量甚至无法测量,因此通过泄流结构在水动力荷载作用下产生的振动响应(位移、加速度)来对其多源或不确定性随机动态载荷进行反演和识别具有重要意义,原型泄流结构振源的确定对研究制定泄流结构振动安全控制指标和标准至关重要。动态荷载识别研究起源于 20 世纪 70 年代末,经过近些年的不断发展,在各工程领域都得到了应用,传统上动态荷载识别方法主要分为频域法和时域法。频域法是通过在频域内建立系统的频率响应函数模型,通过系统的输出来识别动态输入的过程;在该研究领域,Jia 等^[30]针对随机动态荷载识别的不适定性问题,提出了基于加权总体最小二乘法的动态荷载频域识别方法,有效降低了识别误差;彭凡等^[31]针对以加速度频响函数反演频域动态荷载的病态问题,提出将测点响应与待求激励在频域中进行归一化变换,构造 Tikhonov 泛函进行正则化求解,有效提高了动荷载的反演精度。总体上,频域法一般只适用于稳态动态荷载或随机动态荷载识别,其核心在于获取变换矩阵,并要求信号样本具有一定的长度,存在频响函数病态不适定性问题。

相比较而言,时域法在随机振动领域的荷载识别研究相对还比较少,Desanghere 等^[32]将模态坐标变换方法引入动态荷载识别过程,首次提出了动态荷载时域方法;Prawin 等^[33]基于加速度时程响应,采用移动窗重叠技术提出了基于动态主成分分析(DPCA)的集中力在线荷载识别重构方法;王静等^[34]结合精细积分法提出了一种新的冲击型动荷载时域识别方法,在识别过程中假设动荷载在时间步长内为线性函数;张勇成^[35]采用正交多项式法对二维分布动荷载进行了时域识别,并指出该方法中 Duhamel 积分具有时间累积误差效应。由于时域法在时域中能够直接识别荷载,无须借助快速傅里叶变换,避免了频域法中因截断带来的泄漏误差,同时对确定性问题减少了部分计算量^[36],因此具有广泛的应用前景;但其抗噪声干扰能力差,仍需进一步研究提高其抗噪性能。

在水利工程领域,动态荷载识别的研究不多,主要集中在水电站机组与厂房动态荷载识别和水工结构水弹性模型流激振动试验研究领域,频域法和时域法都有涉及。张建伟等^[37-38]基于泵站机组和管道的振动实测数据,利用频谱分析和数理统计方法确定管道振动的振源贡献,对各种动荷载作用效果

及管道的振动响应进行了评价和预测;宋志强等^[39]提出了基于正交多项式分解的水力机组动荷载时域识别方法,利用正交多项式的正交性质及位移、速度、加速度的导数关系,建立了各阶模态位移和模态荷载的关系式,该方法具有所需测点信息少、计算效率和精度高、可识别任意形式时变动荷载等优点;王海军等^[40]以水电站厂房结构和机组现场振动测试数据为基础,基于遗传算法对混流式水轮机轴向水推力进行了动荷载时域识别;张璐璐^[41]采用遗传算法对地下式厂房结构在机组运行过程中的振动荷载进行了反演,实现了利用少量测点的实测数据反馈出厂房结构的振动位移变化;李守巨等^[42]基于 RBF 神经网络提出了水轮机振动荷载参数识别方法,解决了振动荷载参数识别反演不适定问题;苑希民等^[43]以线性多自由度体系在随机荷载作用下振动的正分析为基础,建立了结构振动荷载谱的反分析方程;张陆陈等^[44]通过原型观测和模拟试验识别不同脉动压力下的振动响应,建立最大面脉动压力与场地振动速度之间的相关关系来实现场地振动速度的预测;练继建等^[45-46]提出了水工结构流激振动响应的反分析方法,以拱坝水弹性模型为例,从频域角度反馈分析出拱坝泄洪孔口等效荷载谱,实现了对流激振动的振源分析;张建伟等^[47]基于小波及随机振动理论,以拉西瓦水弹性模型为背景,提出了基于小波正交算子变换的拱坝泄洪多振源反分析方法,通过少量测点的动位移实测值,反分析各等效激励荷载时程线,首次实现了水动力荷载的时域识别;李火坤等^[48-49]基于拱坝等原型工程实测动力响应,在频域内反演了振源荷载功率谱,并以此作为输入计算了结构整体动态响应场。目前,泄流结构振源荷载识别多数采用的是频域法,实践证明,该方法需要进行快速傅里叶变换,会因信号截断带来泄漏误差,存在一定的不适定性;而动态荷载时域识别法直接在时域中对荷载进行识别,极大地保留了原始信号信息,降低了因信号截断带来的误差。根据不同类型泄流结构(如拱坝、导墙、泄洪闸等),针对水流作用的不同部位,可将泄流结构振源荷载等效为多个相互独立的面脉动荷载进行荷载识别,从而将泄流结构多振源荷载的时域识别问题转化为在已知测点响应矩阵和单位脉冲响应函数矩阵条件下反求荷载矩阵的数学反问题。

在求解该数学反问题时是将荷载作为结构作用点处的离散激励荷载向量进行处理的,因此需考虑水流脉动荷载的点-面转换问题,林继镛等^[50-51]提出了水流脉动压力的幅值、频谱点-面转换关系式,精度可满足工程需要。泄流结构时域荷载识别过程

中,振动响应受环境背景噪声干扰大,原始振动响应信号的噪声剔除至关重要,练继建等^[52]提出了基于奇异熵降噪的泄流结构振动响应重构方法,可解决原始振动响应信号降噪与重构问题。在求解荷载向量矩阵方法方面,脉冲响应函数矩阵的病态性会放大求逆过程中较小的输入误差,从而影响荷载识别的精确性和稳定性,采用 Tikhonov 正则化方法^[53]可改善荷载识别反问题的病态性,提高荷载识别的稳定性和抗噪性。

3 泄流结构振动安全控制指标研究进展

描述结构振动特性的参数较多,如振动速度、加速度、位移、应力以及频率等,因诱发结构振动的振源以及安全评价对象不同,故对于采用何种参数作为结构振动安全控制指标,不同领域的观点各不相同。我国 SL266—2014《水电站厂房设计规范》中将位移振幅作为机墩振动安全控制指标,其控制标准为最大垂直振幅不超过 0.15 mm、最大水平振幅不超过 0.2 mm。在建筑结构振动控制领域,已出台了相关标准,主要以建筑物楼面和基础的振动速度峰值作为控制指标,控制标准以 GB 50868—2013《建筑工程容许振动标准》为依据;对于建筑物振动对人体的影响,主要以建筑物垂向振动加速度振级作为控制指标,其控制标准与地区范围、时间(日夜)等有关,也已经出台了相关标准,如 GB 10070—88《城市区域环境振动标准》、GB/T 50355—2005《住宅建筑物室内振动限值及其测量方法标准》。目前,国内外有关振动安全控制指标研究的趋势已发展到不只以单一指标作为判据,而是综合考虑振动速度、频率、位移和加速度等多项指标^[54-56]。

已有的工程破坏实例表明,水流脉动压力长期作用下产生的随机振动会导致泄流结构疲劳破坏,而有关泄流结构振动安全的控制指标与控制标准方面,尚未出台统一的标准,相关研究也比较少。泄流结构振动安全控制指标主要考虑两个方面:一是评估振动对泄流结构自身安全的影响;二是评估人体对泄流结构振动反应的舒适度。

关于振动对泄流结构自身安全影响的评估,目前还没有统一的指标与控制标准,对于坝身泄洪拱坝的振动、溢洪道及消力池导(隔)墙的振动、泄洪闸闸墩的振动等,目前多采用动位移作为控制指标,仍是参考苏联按建筑物高度的 $1/10^5$ 作为“允许振幅”,此标准过于保守,且没有反映频率变化对允许振幅的影响以及建筑物本身的重要性和功能。同时,泄流结构在不同位置面临的振动情况各异,振动安全指标与控制标准也将有所不同^[57]。对于导墙

结构,练继建等^[58]认为若仅从结构自身安全性角度,可将允许振幅提高到1/40 000的结构高度。在以混凝土结构动应力作为控制指标研究方面,练继建等^[58]以三峡导墙为例,将0.45倍的混凝土静力极限强度作为混凝土疲劳强度的控制标准,提出了导墙结构特征与流激振动安全性的关系,给出了导墙结构参数与结构流激振动安全之间的关系式;李火坤等^[59]开展了三峡导墙原型泄洪振动测试,参考以前标准,以动位移最大振幅和最大动应力两个指标评价导墙振动安全。对于水垫塘结构,练继建等^[60]以二滩拱坝水垫塘动力响应原型观测为基础,研究底板-锚固钢筋-基岩-水流荷载流固耦合模型,分析水垫塘底板失稳过程中不同阶段的动位移响应特性,提出了以动位移响应参数为控制指标来判别水垫塘底板的稳定性;随后,杨弘等^[61]将水垫塘结构安全监控指标细化,选取对底板安全稳定影响较大的特征值作为监控指标,建立了包含频域指标、幅值域指标和分形指标的水垫塘结构安全监控指标体系。对于泄洪闸结构,李火坤等^[7]以蜀河水电站泄洪闸闸墩为例开展了原型振动测试,提出评价闸墩结构振动安全的控制指标为动位移最大振幅和最大动应力;陈林等^[8]采用了动位移均方差为控制指标,计算出闸墩不同加固减震形式的流激振动响应,比选出适宜的闸墩抗振加固措施。对于闸门结构,练继建等^[62]提出了对闸门安全影响最大的振动形式,并给出了负阻尼失稳和负刚度失稳两种形式,总结了各类闸门的振动稳定性研究成果,确定了不同类型闸门的稳定性指标;张翌娜等^[63]利用排列熵方法计算振动响应信号的序列熵值,对比弧形闸门不同工况下振动性态和熵值变化规律,采用排列熵值来实现闸门运行状态监测。从目前的研究来看,泄流结构振动安全控制指标及标准仍主要参考几十年前的国外标准,泄流结构振动安全与振源荷载特征、结构材料特性、振动疲劳之间的关系需要进一步明确,泄流结构振动安全的控制指标和标准的研究尚有待进一步深入和完善。

关于人体对泄流结构振动反应舒适度的评估,目前还没有一个统一的模式,相关研究很少,Reiher和Meister提出的Meister感觉曲线,已作为泄流结构振动对人体危害评估的评价参考之一^[3]。朱光汉等^[64-67]详细总结和分析了传入人体的振动和环境振动的评价方法与评价量,指出环境振动对人体影响的因素主要包括频率、强度、振动方向、振动暴露时间等,并对人体与环境振动国际标准ISO 2631《Mechanical vibration and shock-Evaluation of human exposure to whole-body vibration》的适用范围进行了

分类。冯浩祥等^[68]根据国际标准ISO 5982—2001《Mechanical vibration and shock-Range of idealized values to characterize seated-body biodynamic response under vertical vibration》规定的竖向人体动力模型,建立了具有非经典阻尼的人与结构耦合运动方程,并在国际标准ISO2631的基础上,提出了由小波变换求得频带能量,进而评价人体舒适度的方法。董霜等^[69]基于人体振动模型讨论了环境振动对人体的影响及人体对振动影响的舒适度评价标准,分析了相关主要因素。车啸飞等^[70]基于对海洋平台实测振动响应,结合相关评价导则和国家标准研究了振动对人体的影响,提出了人体感受振动的评价流程。李火坤等^[71]在对某泄洪闸闸墩原型振动测试的基础上,反演了闸墩整体动位移场,采用基于烦恼率的评价模型对闸墩振动舒适度进行了评价。

4 研究展望

随着大量的泄流结构投入运行,由于高速泄洪水流的强烈紊动,其脉动压力作用于结构上诱发结构的强烈振动现象依然存在,对其振动危害的全面把控和安全评价是高水头大流量泄流结构运行安全控制的关键问题之一,具体可从以下方面开展研究:

a. 泄流结构材料参数振动反演研究。在泄流过程中高速水流携带的巨大能量能激发结构振动,易于实施现场振动实测,具有适时性,且泄流激励下泄流结构工作模态参数更全面地反映了结构整体力学行为特征,因此应利用精准模态参数识别方法辨识泄流结构的工作模态参数,研究泄流结构-地基各分区材料参数反演数学模型的构造方法,建立泄流结构模态参数与材料参数之间非线性数学模型;此外,还应研究构造材料参数反演的最优化目标函数及求解智能优化算法,改进参数反演的不适定性,提高参数反演的精度与稳定性等。

b. 泄流结构振源识别研究。泄流结构振源时域识别法直接在时域中对荷载进行识别,减少了因截断带来的误差,精度较高,因此,应深入研究泄流结构振源荷载的时域识别方法;应在考虑水流脉动荷载的点-面相关关系的基础上,研究泄流结构振源识别的等效荷载处理方法;研究建立振源时域识别的数学模型及其求解方法,最大程度地抑制噪声影响,对于振源识别的稳定性和精度是至关重要的。

c. 泄流结构振动安全控制指标研究。工程实践表明,泄流结构长期处于水动力荷载下易发生疲劳破坏,因此明确泄流结构振动安全与振源特征、结构材料特性、振动疲劳之间的关系至关重要;分析泄流结构薄弱部位,研究振源荷载激励频带与泄流结

构固有频率之间的对应关系,阐明泄流结构振动疲劳破坏机制,研究泄流结构在水动力荷载循环作用下的损伤分布和应力分布的变化规律,确定泄流结构振动疲劳安全控制标准,对于合理评价泄流结构自身的振动安全意义重大;此外,在泄流结构振动对人体舒适度影响的评价方面,应考虑振动频率、振动强度、振动持续时间、人体暴露时间、工作方式等因素,研究振动对人体舒适度的影响,建立人体对泄流结构振动反应舒适度综合评价体系。

参考文献:

[1] 国家自然科学基金委员会,中国科学院. 中国学科发展战略·水利科学与工程[M]. 北京:科学出版社,2016.

[2] 周兴波,周建平,杜效鹄. 美国奥罗维尔坝溢洪道事故分析与启示[J]. 水利学报,2019,50(5):650-660. (ZHOU Xingbo, ZHOU Jianping, DU Xiaohu. Lessons from the Oroville Dam spillway failure analysis [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2019, 50 (5): 650-660. (in Chinese))

[3] 练继建,杨敏. 高坝泄流工程[M]. 北京:中国水利水电出版社,2008.

[4] 练继建,杨阳,胡少伟,等. 特大水利水电枢纽调控与安全运行研究进展与前沿[J]. 工程科学与技术,2017,49(1):27-32. (LIAN Jijian, YANG Yang, HU Shaowei, et al. Research progresses and frontiers on control and safety operation of super-large hydraulic complex [J]. Advanced Engineering Sciences, 2017, 49(1): 27-32. (in Chinese))

[5] 马斌,练继建,杨敏. 大比尺高拱坝泄洪振动水弹性模型研究[J]. 中国工程科学,2008(11):23-29. (MA Bin, LIAN Jijian, YANG Min. Hydro elastic model experimental study on large scale high arch dam vibration by discharge flow[J]. Strategic Study of CAE, 2008(11): 23-29. (in Chinese))

[6] 练继建. 蜀河水电站工程泄洪闸闸墩泄洪振动分析研究[R]. 天津:天津大学,2013.

[7] 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. (LI Huokun, YANG Min, CHEN Lin, et al. Operational safety evaluation of sluice pier[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2014, 34(5): 938-946. (in Chinese))

[8] 陈林,杨敏,李火坤,等. 泄洪闸闸墩抗振加固措施研究[J]. 水利水电技术,2016,47(9):28-33. (CHEN Lin, YANG Min, LI Huokun, et al. Study on seismic strengthening measures for pier of flood discharge gate [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2016, 47(9): 28-33. (in Chinese))

[9] LIAN Jijian, ZHANG Yan, LIU Fang, et al. Analysis of the

ground vibration induced by high dam flood discharge using the cross wavelet transform method[J]. Journal of Renewable & Sustainable Energy, 2015, 7(4): 1783-1795.

[10] 肖烨,丁晓唐. 淮安三站结构振动特性及抗振分析[J]. 水利水电科技进展,2016,36(6):86-89. (XIAO Ye, DING Xiaotang. Vibration characteristics and resistance of structures of Third Huaian Pumping Station[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2016, 36(6): 86-89. (in Chinese))

[11] 崔广涛,马斌. 泄流诱发水工结构振动问题的综合集成研讨[J]. 水利水电科技进展,2010,30(1):1-10. (CUI Guangtao, MA Bin. Comprehensive compound method for flow-induced vibration of hydraulic structures [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2010, 30(1): 1-10. (in Chinese))

[12] 苏怀智,雷鹏,顾冲时,等. 混凝土坝材料参数区间反演分析方法[J]. 河海大学学报(自然科学版),2008,36(5):654-658. (SU Huaizhi, LEI Peng, GU Chongshi, et al. Interval back analysis for mechanical parameters of a concrete dam[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2008, 36(5): 654-658. (in Chinese))

[13] 吴中如,顾冲时. 重大水工混凝土结构病害检测与健康诊断[M]. 北京:高等教育出版社,2005.

[14] SONG Jintao, GU Chongshi, SU Huaizhi, et al. Observed displacement data-based identification method of structural damage in concrete dam [J]. Engineering Failure Analysis, 2016, 66: 202-211.

[15] QIN Xiangnan, GU Chongshi, CHEN Bo, et al. Multi-block combined diagnosis indexes based on dam block comprehensive displacement of concrete dams[J]. Optik-International Journal for Light and Electron Optics, 2017, 129: 172-182.

[16] 冯帆,邱信蛟,张国新,等. 基于施工期变形监测的特高拱坝力学参数反演研究[J]. 岩土力学,2017,38(1):237-246. (FENG Fan, QIU Xinjiao, ZHANG Guoxin, et al. Inversion of mechanical parameters of super-high arch dam based on deformation monitoring during construction period[J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(1): 237-246. (in Chinese))

[17] 练继建,崔广涛,董淑芳. 水工结构流激振动响应的反分析[J]. 水利水电技术,1998,29(8):51-54. (LIAN Jijian, CUI Guangtao, DONG Shufen. Flow-induced vibration back analysis for hydraulic structure[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 1998, 29(8): 51-54. (in Chinese))

[18] 马震岳,孙万泉,陈维江. 基于遗传算法的地下发电厂房动态识别[J]. 大连理工大学学报,2004,44(2):292-296. (MA Zhenyue, SUN Wanquan, CHEN Weijiang. Dynamic identification for underground power house based on genetic algorithm[J]. Journal of Dalian University of

- Technology, 2004, 44(2): 292-296. (in Chinese))
- [19] 冯新, 周晶, 范颖芳. 基于模态观测的混凝土坝反演分析[J]. 水利学报, 2004(2): 101-105. (FENG Xin, ZHOU Jing, FAN Yingfang. Inverse analysis of concrete dam with modal measurements[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2004(2): 101-105. (in Chinese))
- [20] 冯新, 周晶, 陈健云, 等. 一种重力坝分区弹模反演新方法[J]. 大连理工大学学报, 2002, 42(4): 480-484. (FENG Xin, ZHOU Jing, CHEN Jianyun, et al. A new method for inversion of sub-regional elastic modulus of concrete gravity dam[J]. Journal of Dalian University of Technology, 2002, 42(4): 480-484. (in Chinese))
- [21] 康飞, 李俊杰, 许青. 混合蜂群算法及其在混凝土坝动力材料参数反演中的应用[J]. 水利学报, 2009, 40(6): 736-742. (KANG Fei, LI Junjie, XU Qing. Hybrid simplex artificial bee colony algorithm and its application in material dynamic parameter back analysis of concrete dams[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2009, 40(6): 736-742. (in Chinese))
- [22] 刘振平, 迟世春, 任宪勇. 基于土石坝动力特性的坝料动力参数反演[J]. 岩土力学, 2014, 35(9): 2594-2601. (LIU Zhenping, CHI Shichun, REN Xianyong. Back analysis of dynamic parameters of dam materials based on earth-rockfill dam dynamic characteristics[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(9): 2594-2601. (in Chinese))
- [23] 王登刚, 刘迎曦, 李守巨. 混凝土坝振动参数区间逆分析[J]. 大连理工大学学报, 2002, 42(5): 522-526. (WANG Denggang, LIU Yingxi, LI Shouju. Interval inversion analysis for vibration parameters of concrete dam[J]. Journal of Dalian University of Technology, 2002, 42(5): 522-526. (in Chinese))
- [24] 陈维江. 大坝安全监测及厂房动力反演分析模型研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2002.
- [25] 程琳, 王冬冬, 杨杰, 等. 基于强震观测和多输出支持向量机的混凝土坝材料动参数反演[J]. 振动工程学报, 2017, 30(3): 466-474. (CHENG Lin, WANG Dongdong, YANG Jie, et al. Back-analysis method based on strong-motion record and multiple-output support vector machine used to determine the dynamic material parameters of concrete dams[J]. Journal of Vibration Engineering, 2017, 30(3): 466-474. (in Chinese))
- [26] PROULX J, DARBRE G. R. Earthquake response of large arch dams observational evidence and numerical modeling [C]// The 14th World Conference on Earthquake Engineering. Beijing: Seismological Society of China, 2008: 1-8.
- [27] CANTIENI R. Assessing a dam's structural properties using forced vibration testing [C]// International Conference On Safety, Risk and Reliability-Trends in Engineering. Malta: International Association for Bridge and Structural Engineering, 2001: 351-352.
- [28] WANG Weiqiang, KUANG Yahong, LI Shaohua, et al. Analysis of the ground vibration induced by high dam flood discharge using the cross wavelet transform method[J]. Journal of Renewable & Sustainable Energy, 2015, 7(4): 1783-1795.
- [29] LI Huokun, WANG Gang, WEI Bowen, et al. Dynamic inversion method for the material parameters of a high arch dam and its foundation [J]. Applied Mathematical Modelling, 2019, 71: 60-76.
- [30] JIA You, YANG Zhichun, GUO Ning, et al. Random dynamic load identification based on error analysis and weighted total least squares method[J]. Journal of Sound and Vibration, 2015, 358(3): 111-123.
- [31] 彭凡, 王樑, 肖健, 等. 基于加速度反演频域动载荷的一种正则化途径[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2017, 44(2): 75-79. (PENG Fan, WANG Liang, XIAO Jian, et al. A regularization approach of dynamic load identification in frequency domain by acceleration responses[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2017, 44(2): 75-79. (in Chinese))
- [32] DESANGHERE G, SNOEYS R. Indirect identification of excitation forces by modal coordinate transformation[C]// Proceedings of the 3rd IMAC. Orlando: Union College (New York), 1985: 685-690.
- [33] PRAWIN J, RAO A R M. An online input force time history reconstruction algorithm using dynamic principal component analysis[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2018, 99: 516-533.
- [34] 王静, 陈海波, 王靖. 基于精细积分的冲击荷载时域识别方法研究[J]. 振动与冲击, 2013, 32(20): 81-85. (WANG Jing, CHEN Haibo, WANG Jing. Impulsive load identification in time domain based on precise time-integration method[J]. Journal of Vibration and Shock, 2013, 32(20): 81-85. (in Chinese))
- [35] 张勇成. 二维分布动载荷时域识别技术[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2007.
- [36] 赵凤遥. 水电站厂房结构及水力机械动力反分析[D]. 大连: 大连理工大学, 2006.
- [37] 张建伟, 江琦, 王涛. 基于原型观测的梯级泵站管道振源特性分析[J]. 农业工程学报, 2017, 33(1): 77-83. (ZHANG Jianwei, JIANG Qi, WANG Tao. Analysis of vibration characteristics of pipeline of trapezoid pumping station based on prototype observation[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(1): 77-83. (in Chinese))
- [38] 张建伟, 江琦, 刘轩然, 等. 基于 PSO-SVM 算法的梯级泵站管道振动响应预测[J]. 农业工程学报, 2017, 33(11): 75-81. (ZHANG Jianwei, JIANG Qi, LIU Xuanran, et al. Prediction of vibration response for pipeline of cascade pumping station based on PSO-SVM algorithm[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural

- Engineering,2017,33(11):75-81. (in Chinese))
- [39] 宋志强,刘云贺.基于正交多项式分解的水轮机竖向动荷载识别[J].水利学报,2016,47(11):1449-1455. (SONG Zhiqiang, LIU Yunhe. Vertical dynamic load identification of hydraulic turbine based on orthogonal polynomial decomposition [J]. Journal of Hydraulic Engineering,2016,47(11):1449-1455. (in Chinese))
- [40] 王海军,练继建,杨敏,等.混流式水轮机轴向动荷载识别[J].振动与冲击,2007,26(4):123-125. (WANG Haijun, LIAN Jijian, YANG Min, et al. Identification of axial dynamic load of a Francis turbine [J]. Journal of Vibration and Shock, 2007, 26 (4): 123-125. (in Chinese))
- [41] 张璐璐.基于振动响应的地下厂房荷载反演分析[D].天津:天津大学,2012.
- [42] 李守巨,刘迎曦,宋树川,等.基于RBF神经网络的水轮机振源参数识别方法[J].大连理工大学学报,2007,47(1):6-10. (LI Shouju, LIU Yingxi, SONG Shuchuan, et al. Identification procedure of vibrating load parameters of hydraulic generator with RBF neural network [J]. Journal of Dalian University of Technology,2007,47(1):6-10. (in Chinese))
- [43] 苑希民,何玉敖,崔广涛.结构动力的反分析方法研究[J].工程力学,1996(增刊2):321-325. (YUAN Ximin, HE Yuao, CUI Guangtao. Study on structural dynamic back analysis method [J]. Engineering Mechanics, 1996 (Sup2):321-325. (in Chinese))
- [44] 张陆陈,范雪梅,骆少泽,等.高坝泄洪消能诱发场地振动的预测方法[J].水利水电科技进展,2018,38(6):66-69. (ZHANG Luchen, FAN Xuemei, LUO Shaoze, et al. Prediction method of ground vibration induced by flood discharge and energy dissipation of high dams [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2018,38(6):66-69. (in Chinese))
- [45] 练继建,崔广涛,林继镛.高拱坝泄流振动的计算分析与验证[J].水利学报,1999(12):23-32. (LIAN Jijian, CUI Guangtao, LIN Jiyong. Analysis on flow-induced vibration of over flow high arch dam and its verification [J]. Journal of Hydraulic Engineering,1999(12):23-32. (in Chinese))
- [46] 练继建,马斌,李福田.高坝流激振动响应反分析方法[J].水利学报,2007,38(5):575-581. (LIAN Jijian, MA Bin, LI Futian. Back analysis algorithm for response of flow-induced vibration in overflow high dam [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2007, 38 (5): 575-581. (in Chinese))
- [47] 张建伟,练继建,马斌,等.基于泄流响应的高拱坝振源时域识别[J].天津大学学报,2008,41(9):1124-1129. (ZHANG Jianwei, LIAN Jijian, MA Bin, et al. Time domain identification of excitation source for high arc dam based on discharge flow vibration response [J]. Journal of Tianjin University, 2008, 41 (9): 1124-1129. (in Chinese))
- [48] 李火坤,邓冰梅,魏博文,等.基于有限测点的高拱坝原型整体动位移场反演研究[J].振动与冲击,2016,35(10):1-8. (LI Huokun, DENG Bingmei, WEI Bowen, et al. Inversion of the whole dynamic displacement field of a prototype high arch dam based on limited points measurement [J]. Journal of Vibration and Shock,2016,35(10):1-8. (in Chinese))
- [49] LI Huokun, WANG Yujie, WEI Bowen. Back analysis algorithm for overall dynamic displacement field of prototype high arch dam based on the limited measurement [J]. Journal of Vibration and Control, 2017, 23 (20): 3431-3447.
- [50] 林继镛,练继建.二元射流作用下点面脉动壁压的幅值计算[J].水利学报,1988(12):34-40. (LIN Jiyong, LIAN Jijian. Calculation of the point and area wall fluctuating pressure amplitude by two-dimensional jets [J]. Journal of Hydraulic Engineering,1988(12):34-40. (in Chinese))
- [51] 林继镛,练继建.二元淹没射流脉动壁压的相关与频谱特征[J].天津大学学报,1994,27(6):691-697. (LIN Jiyong, LIAN Jijian. Correlation and spectrum characteristics of wall fluctuating pressure by two-dimensional submerged jets [J]. Journal of Tianjin University,1994,27(6):691-697. (in Chinese))
- [52] LIAN Jijian, LI Huokun, ZHANG Jianwei. ERA modal identification method for hydraulic structures based on order determination and noise reduction of singular entropy [J]. Science in China Series E: Technological Sciences, 2009,52(2):400-412.
- [53] 肖悦,陈剑,李家柱,等.动态载荷时域识别的联合去噪修正和正则化预迭代方法[J].振动工程学报,2013,26(6):854-863. (XIAO Yue, CHEN Jian, LI Jiazhu, et al. A joint method of denoising correction and regularization preconditioned iteration for dynamic load identification in time domain [J]. Journal of Vibration Engineering,2013,26(6):854-863. (in Chinese))
- [54] PAU A, VESTRONI F. Vibration assessment and structural monitoring of the Basilica of Maxentius in Rome [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2013, 41 (1/2):454-466.
- [55] MATSUDA T, SHIMIZU T. Study on correspondence between evaluation of vibration sensation, average method, and measurement density of acceleration levels for impact vibration in prefabricated housing floor [J]. Journal of Building Engineering,2017,10:124-139.
- [56] 邓成发,许昌,葛国昌.大坝爆破振动响应评估分析[J].长江科学院院报,2012,29(4):26-29. (DENG Chengfa, XU Chang, GE Guochang. Modal analysis and wavelet transform in evaluating dam vibration response

- caused by blasting[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2012, 29(4): 26-29. (in Chinese))
- [57] 李成业. 泄流结构水力拍振机理及动态健康监测技术研究[D]. 天津: 天津大学, 2013.
- [58] 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(11): 33-37. (LIAN Jijian, CUI Guangtao, HUANG Jinlin. Study on flow induced vibration of spillway guide wall[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1998(11): 33-37. (in Chinese))
- [59] 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. (LI Huokun, LIAN Jijian, LIU Yongzhi. Prototype observation of flood discharge-induced vibration and its dynamic identification and safety evaluation of Three Gorges left guide wall[J]. Hydro-Science and Engineering, 2010(3): 59-64. (in Chinese))
- [60] 练继建, 杨弘, 李福田. 水垫塘底板稳定性的动位移响应识别方法研究[J]. 水利学报, 2007, 38(6): 717-723. (LIAN Jijian, YANG Hong, LI Futian. Method for predicting the stability of plunge pool slabs based on identification of dynamic displacement response[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2007, 38(6): 717-723. (in Chinese))
- [61] 杨弘, 练继建, 冯永祥, 等. 高坝水垫塘泄洪安全实时监控研究[J]. 水力发电学报, 2008, 27(3): 93-100. (YANG Hong, LIAN Jijian, FENG Yongxiang, et al. Study on safety real time monitoring system for flood discharge of plunge pool in high dam[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2008, 27(3): 93-100. (in Chinese))
- [62] 练继建, 彭新民, 崔广涛, 等. 水工闸门振动稳定性研究[J]. 天津大学学报, 1999(2): 171-176. (LI Jijian, PENG Xinmin, CUI Guangtao, et al. On the stability of gate vibrations[J]. Journal of Tianjin University, 1999(2): 171-176. (in Chinese))
- [63] 张翌娜, 马晓君, 张建伟, 等. 基于排列熵算法的弧形闸门振动状态监测[J]. 水电能源科学, 2018, 36(7): 163-166. (ZHANG Yina, MA Xiaojun, ZHANG Jianwei, et al. Vibration state monitoring of radial gate based on permutation entropy method[J]. Water Resources and Power, 2018, 36(7): 163-166. (in Chinese))
- [64] 朱光汉, 王正玲. 传入人体的振动和环境振动的评价与标准[J]. 振动与冲击, 1992(3): 66-70. (ZHU Guanghan, WANG Zhengling. Evaluation and criteria for vibration and environmental vibration introduced into human body[J]. Journal of Vibration and Shock, 1992(3): 66-70. (in Chinese))
- [65] 朱光汉, 王正玲. 传入人体的振动和环境振动的评价与标准(二)[J]. 振动与冲击, 1992(4): 65-67. (ZHU Guanghan, WANG Zhengling. Evaluation and criteria for vibration and environmental vibration introduced into human body[J]. Journal of Vibration and Shock, 1992(4): 65-67. (in Chinese))
- [66] 朱光汉, 王正玲. 传入人体的振动和环境振动的评价与标准(续)[J]. 振动与冲击, 1993(1): 66-69. (ZHU Guanghan, WANG Zhengling. Evaluation and criteria for vibration and environmental vibration introduced into human body[J]. Journal of Vibration and Shock, 1993(1): 66-69. (in Chinese))
- [67] 朱光汉, 王正玲. 传入人体的振动和环境振动的评价与标准(连载)[J]. 振动与冲击, 1993(2): 53-60. (ZHU Guanghan, WANG Zhengling. Evaluation and criteria for vibration and environmental vibration introduced into human body[J]. Journal of Vibration and Shock, 1993(2): 53-60. (in Chinese))
- [68] 何浩祥, 闫维明, 张爱林, 等. 竖向环境振动下人与结构相互作用及舒适度研究[J]. 振动工程学报, 2008, 21(5): 446-451. (HE Haoxiang, YAN Weiming, ZHANG Ailin, et al. Human-structure dynamic interaction and comfort evaluation in vertical ambient vibration[J]. Journal of Vibration Engineering, 2008, 21(5): 446-451. (in Chinese))
- [69] 董霜, 朱元清. 环境振动对人体的影响[J]. 噪声与振动控制, 2004(3): 22-25. (DONG Shuang, ZHU Yuanqing. Effects of environmental vibration on man[J]. Noise and Vibration Control, 2004(3): 22-25. (in Chinese))
- [70] 车啸飞, 张大勇, 岳前近, 等. 基于实测的导管架海洋平台振动对人员安全评价[J]. 海洋工程, 2011, 29(4): 68-73. (CHE Xiaofei, ZHANG Dayong, YUE Qianjin, et al. Human safety assessment based on field monitoring vibrations of the offshore jacket platforms[J]. The Ocean Engineering, 2011, 29(4): 68-73. (in Chinese))
- [71] 李火坤, 钟艺伟, 王刚. 基于烦恼率的某泄洪闸闸墩振动舒适度评价[J]. 南昌大学学报(工科版), 2019, 41(1): 34-39. (LI Huokun, ZHONG Yiwei, WANG Gang. Vibration comfort evaluation of a sluice gate based on annoyance rate[J]. Journal of Nanchang University (Engineering and Technology), 2019, 41(1): 34-39. (in Chinese))

(收稿日期: 2019-07-31 编辑: 熊水斌)

