DOI:10.3969/j.issn.1004-4701.2021.03-08

混凝土坝流激响应分析与性状诊断方法研究进展

魏博文，李火坤，黎良辉

（南昌大学建筑工程学院，江西 南昌，330031）

摘 要：混凝土坝在泄洪时泄流结构不断经受高速水流的拍击振动，所造成的老坝裂缝拓展和坝体累积损伤关乎整个水利工程的运行安危，依托对坝体泄流结构进行安全监测与诊断是保障混凝土坝稳定运行与健康服役的重要技术手段. 文中在概括混凝土坝静动态监测与测试技术、流激振动响应分析方法与服役性态信息融合诊断等方面所开展科研工作的基础上，论述了混凝土坝流激响应特性和体征判诊方法的现有研究成果，并结合混凝土坝运行体征状态探讨了当前研究的不足与亟待发展和完善的研究领域，以期进一步完善混凝土坝泄流激振监控理论体系，为混凝土坝长效服役和运行管理提供理论依据与决策支持.

关键词：混凝土坝；流激振动；服役性态；安全诊断

中图分类号：TV131.3+3 **文献标识码**：A **文章编号**：1004-4701(2021)03-0199-07

0 引言

我国水能资源可开发容量及高坝在役数量和坝高均居世界首位，其长效健康服役关系到整个水利工程的安危，已成为关乎国计民生、社会稳定的公共安全问题，同时，“重大灾害监测和防御”、“重大生产事故预警与救援”也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[1,2]。服役期高混凝土坝受静、动荷载与不确定环境因素协同作用，致使处在服役期的老坝裂缝不断扩展及坝体累积损伤愈发加剧，严重影响了大坝的正常运行和健康服役[3,4]。

泄流结构在宣泄洪水时，强烈紊动的水流往往携带巨大的能量，极易造成其强烈振动甚至结构的破坏，同时由泄流诱发的结构振动也是水利水电工程运行中出现的普遍现象[5]。对于传统研究提升高坝泄水建筑物安全性能方面，大多专注于优化泄水建筑物设计研究以提高其安全性，其优化设计的主要依据是物理模型试验结果并辅以数值仿真分析成果，然而目前水工模型试验结果因高速多相流的相似率及工程运行工况与物理试验存在一定偏差，更难以考量运行期混凝土坝受高水头及波浪拍振等静动荷载的累积损伤及结构初始缺陷等[6]。目前对大坝安全监测、观测资料分析研究，多集中于坝体静态效应量及荷载的监测体系等方面（主要包括变形监测、渗流监测、应变应力监测、环境量等）；对坝体泄水结构的观测手段侧重于水力学要素观测（动水压力观测、渗压观测、流速观测等），但仅凭单一水力学监测分析成果难以诠释其工作性态并及时判诊内在病症及隐患[7]。本文在阐述混凝土坝静动态监测与测试技术、流激振动响应分析方法与服役性态信息融合诊断等方面现有研究成果的基础上，提出了当前混凝土坝流激响应特性和体征判诊研究中亟待解决的重要科学问题，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 大坝静动态监测与测试技术

大坝安全监测是工程建设、管理和研究中不可忽

收稿日期：2021-04-23
项目来源：国家自然科学基金资助项目(51779115，51869011).
作者简介：魏博文(1981-)，男，博士，教授.

视的重要工作，为保障已建枢纽的运行安全，目前基于水工建筑物的荷载及效应量进行长期、系统的安全监测是监控大坝服役状态的主要方法。在静态效应量安全监测方面，静态效应量或荷载的监测资料是对坝体结构工作状态的真实反映，及时合理分析监测资料是判诊其工作状态的重要手段，国内外学者已在该领域展开了大量的研究工作[8]。Léger 和 Seydou[9]采用简化确定性模型描述大坝的温度变形，对 Canada 某混凝土重力坝（坝高 40m）的模型物理参数进行了校核，并用该模型外推了极端天气下的大坝变形情况；Gu et al.[10]为解决大坝安全监控确定性模型、混合模型中水压分量数学模型易出现拐点病态问题，通过分析模型中出现拐点的病因，提出了针对不同拐点病态的判据及相应处理方法；Li et al.[11] 就传统线性回归模型预报非平稳监测时序偏差问题方面，改进并提出了一种基于协整理论修正序列误差的大坝监测数据分析模型；笔者[12]提出了一种考虑大坝位移残差序列混沌效应的遗传神经网络预测模型。如今国内外对大坝数学监测模型的研究工作逐渐向纵深方向发展，各种新理论、新方法也已被引入到该领域中[13]。而对于坝体泄水建筑物静态效应量的监测主要是定性观测其静力工作状态，若在坝体某局部范围内未设置监测点，往往无法监测到该处损伤的出现，尚需融合其他监测或检测信息（如现场检测信息）进行综合判断，弥补静态效应量监测的不足，提高坝体病害监测与诊断的可靠性。

在坝体流激振动测试方面，现有的水工建筑物结构隐患及病害（损伤）检测方法主要有人工探视法、破损法及无损检测法。其中，常用于水工结构的无损检测方法有波动法和振动法。波动法现场检测可以了解坝体内部存在的缺陷、隐患和险情，检查坝体本身及地基质量，已在水利工程建设、管理与维护等领域得以成功应用[14]，但该方法需预知发生损伤的区域，对结构水下部位的病害或隐患检测难以实施。而基于振动法的水工结构病害（或损伤）识别方法较好地弥补了波动法的不足，突破了传统实验法的局限，可对复杂结构进行整体定量损伤检测。国外学者 Sevim et al.[15]通过考虑泄流状态下大坝动力特性与非泄流时的差异特点，并利用泄流激励作为泄水建筑物结构模态参数识别与损伤诊断的激励源，对其工作模态参数进行了合理识别和整体性损伤诊断。此外，Sani et al.[16]在频域内提出了一种基于“理想耦合模式”拱坝模态识别方法，避免了传统坝体–库水耦合动力分析的复杂编程分析，并在 Morrow Point 拱坝上进行了原型测试试验；张建伟等[17]提出了基于小波阈值与经验模态分解联合激振信号降噪方法，能有效提取低信噪比泄流结构的价值信息，而难以区分密频结构激振信号的混沌效应；李火坤、笔者[18] 针对传统数据融合算法对信号相似度要求高以及固定融合系数的缺陷，提出了基于方差贡献率的结构动态响应数据融合算法。需要指出的是，在环境背景噪声等干扰下，坝体初期病害或损伤引起的整体模态参数变化会被噪声所覆盖，直接选用该法难以适用；而水力学监测（如脉动压力、空化噪声监测等）对此类病害信号具有较高的灵敏度，可有效弥补该无损动态检测技术的不足。

在水力学监测方面，水动力荷载是大坝泄水建筑物的运行重要荷载，随着下泄水流产生的巨大能量及水流脉动往往是造成泄水建筑物结构受损破坏的关键因素，水流诱发结构剧烈振动，也直接影响到坝体安全泄洪[19–21]。中国水利水电科学研究院[22]对二滩拱坝坝身泄洪水力学及流激振动进行了系统的原型观测，现场测点布设示意如图 1 所示，包括表孔水力学特性、坝体

图 1 现场观测测点布设示意图

及进水口泄洪流激振动特性、中孔弧形工作闸门流激振动特性等，据此对其坝体工作性态进行了安全评估；杨弘等[23]通过将传感器埋设在结构体内部可免受水流冲刷及侵蚀干扰，并结合水力要素测试结果，提出了防护结构（主要针对水垫塘底板）的综合安全监控模型和监控指标，研发的相应泄洪安全实时监控系统已在二滩和拉西瓦工程中得以应用。

2　混凝土坝流激振动响应分析方法

有关泄流诱发结构振动研究，国内外学者[24,25]从其流激振动诱发机制入手，对流体诱发结构振动形成机理开展了大量的研究工作；认为大多数情况下大坝流激振动主要是随机性激励力所致，其作用于结构边壁的脉动压力一般呈各态历经平稳随机特点，可运用随机函数理论进行分析，其相应的结构振动分析则可应用随机振动理论。混凝土坝流激振动响应分析方法主要分为泄流诱发振动响应正、反分析两类。泄流结构流激振动响应正分析与一般随机振动分析不同的是需要考虑水流–结构耦合动力效应荷载，包括附加质量、刚度、阻尼效应荷载。同时，由于水流动力荷载的时空随机分布和相关特性十分复杂，若不能有效处理可能出现计算结果大相径庭。因而正确处理水流动力荷载复杂的时空相关特性是至关重要的，主要是正确处理“点”脉动压力与“面”脉动荷载的相关性问题。对此近年来比较常用的是采用流激振动响应谱分析方法或历程分析（瞬态分析）方法，通过大型有限元软件建立数学–力学模型直接计算结构响应谱或响应历程，其中计算荷载可通过泄流结构整体荷载（面荷载）模型试验测量并进行相似律换算获得[26,27]。

此外，基于传统线弹性本构关系展开的结构流激振动正分析难以合理描述结构内部累积损伤特征[28]，现行混凝土本构关系多是基于某一特定结构及受载条件建立的，故建立流固耦联下泄水结构运行性态仿真分析模型亦是难以回避的又一关键问题。对其本构模型研究，国外学者 Voyiadjis et al.[29]采用两个损伤张量和两个损伤准则来分别描述混凝土受拉和受压时的力学性能损伤，建立了基于热力学和弹塑性损伤力学的混凝土各向异性塑性损伤模型；Zheng et al.[30]从混凝土基本损伤机理出发，采用受拉损伤因子和受剪损伤因子分别替代混凝土拉压状态下微观损伤对材料宏观力学特征的影响效应，提出了基于连续损伤理论的新混凝土塑性损伤模型；笔者[31]基于碾压混凝土坝层面力学渐变特性，建立了坝体层面影响带黏弹塑性流变本构模型。从现有的研究成果来看，采用数学–力学模型开展高坝流激振动正分析仍是高效可靠的分析手段，为此，结合坝体内外因素共同作用的累积损伤特征，开展融合多因素效应的混凝土坝流激振动响应分析模型研究尤为必要，这也是揭示大坝整体服役性能演化规律的理论依据。

由于高速泄流的水动力荷载与结构相互作用的复杂性，至今仍难以全面描述不同类型泄流结构的振源特征（特别是原型工程），因而常采用反分析方法对多振源或不确定动荷载作用下的高坝结构体系在动态特性研究具有重要意义[32,33]。目前，有关动态载荷识别的研究主要以频域荷载识别方法和时域荷载识别方法为主。限于水流激振原理及水工建筑物的复杂性，振源识别在该领域的研究相对较少，主要有：练继建等[34]提出了水工结构流激振动响应的反分析方法，同时结合正反分析方法用少量测点动位移测值反馈出了整个结构的动位移场和动应力场，并就水弹性模型中不相似因素对其振动响应的影响进行了修正；李成业等[35,36]运用 EMD 与小波阈值联合滤波方法对泄流激振响应信号进行了有效处理，并提出了一种基于改进 HHT 的高拱坝模态参数识别方法；He et al.[37] 通过对坝体流激振动传感器位置的优化布设，提出了一种基于 IMPSO 法识别高拱坝模态参数的新方法。对此反分析还需加以说明的是，大坝结构中物理参数的反演亦是其振动仿真分析的重要问题，黄耀英等[38]基于变形监测资料建立了一种混凝土坝与基岩时变参数反演三步法，依次从力学机制上解析龙羊峡重力拱坝拱冠梁在 2 530~2 610 m 高程的径向时效位移向上游变位的原因；康飞等[39]运用混合单纯形人工蜂群算法，建立了一种基于不完全模态测试数据的混凝土坝动力材料参数识别的优化反演模型；笔者[40]提出了一种基于 GA–APSO 混合罚模型的混凝土坝力学参数优化反演方法，还同 Li[41]一道就泄洪激励下坝体强烈振动现象，提出了一种基于遗传算法和有限元模态分析的拱坝原型整体动位移场反演方法。根据大坝布置的有限动力响应测点数据反馈出结构振动模态参数和激励源的作用特性，进而解析获取结构动位移场和动应力场，有效地弥补了静态监测指标的不足，对高坝运行性态做出科学有效评价具有重

要研究价值；同时随着时下计算机技术高速发展及智能算法的更新，运用先进数值算法进行结构流激振动反分析的研究将成为重要的研究方向之一。

3 大坝服役性态信息融合诊断研究

信息融合诊断是利用计算机技术将来自多个传感器或多源的观测时序信息进行分析和处理为对象系统安全运行提供的决策支持，采用信息融合（亦称数据融合，Data Fusion）和人工智能技术对自动化监测数据进行处理分析是目前的发展趋势之一，除涉及实测资料的物理意义、噪声、非平稳和小样本等外，其大坝综合分析和建模中还涉及量纲、权重、矛盾证据、数据降维及数据同化等 [42,43]。对于长期处于固–液–气耦合赋存环境下的混凝土坝而言，其病变症状常常是多重病害损伤累积的结果，而其静动态监测及测试结果与响应特征和激励源之间的映射关系呈非线性，单凭大坝静态原型监测效应量难以实现对其进行科学全面诊断。

在大坝工作性态的综合诊断过程中，由于不同诊断体系中的不同指标层中指标对大坝的影响程度皆不相同，还需对其各评价指标的重要性和贡献程度进行权重分析，对于综合评价指标权重的确定方法，一般可分为主观赋权法、客观赋权法和主客观组合赋权法，其中主客观组合赋权法发展较快[44]。在大坝安全领域，施玉群等[45]运用信息熵理论对大坝监测多效应量进行赋权，利用聚类分析方法描述多效应量之间的关联关系，建立了基于信息熵理论的大坝健康状态多效应量聚类融合诊断模型。这些权重方法亦可应用于静动结合的混凝土坝运行性态安全诊断中，但如何依据样本信息来筛取适应的权重方法进行指标赋权，是保障在役大坝工作性态综合诊断结果可靠和准确的关键。由于监测信息表现形式的多样性，以及安全监测与状态诊断系统对其海量数据快速处理能力的要求，传统信息处理方法已难以满足其信号采集、特征提取、状态识别和诊断决策的需求[46]。

目前，大坝性态融合诊断方法研究尚处于探索阶段，其主要方法有：Bayes 推理法，D–S 证据推理法、模糊积分法、人工神经网络法。Gu et al.[47]基于主成分分析与最优估计理论，提出了融合大坝多效应监控信息的奇异值诊断方法；He et al.[48]基于 Bayes 理论并采用方差作为特征参数，建立了大坝多测点信息融合监控模型，为定量描述大坝安全状态和诊断异常测点提供了新方法；Wu et al.[49]从经济效益、大坝安全、环境与生态评估的角度，建立了基于证据理论的层间评估的融合算法和基于模糊数学的模糊合分法，构建了大坝服役状态合评判模型；Liu et al.[50]跳出传统单一测点监测预警的监控方法，利用信息融合技术，提出了一种基于多源监测信息融合的大坝性态诊断及监测预警方法；张建伟等[51]根据现场实测的结构动位移时程，分别用随机子空间方法和系统特征实现方法对厂房结构的模态参数进行时域辨识，提出运用距离的概念对结构所属的健康状况进行量化评价的方法；笔者[52,53]利用碾压混凝土坝多点静态监测序列，提出了一种基于粗糙集与模糊集的大坝工作性态安全诊断方法。

4 研究展望

目前，在混凝土坝流激响应特性及体征判诊方法方面取得了一些有益的研究成果，并且部分成果已成功应用于混凝土坝的运行体征诊断工作中。但是，在工程实际当中因高速泄洪水流引发的泄水建筑物破坏事例屡见不鲜，鉴此，高坝泄流激振问题俨然已成为大坝安全控制领域亟待解决的重要问题，如何围绕大坝运行安全控制为中心，及时分析高坝泄水建筑物动态安全监测信息，把控因其结构服役性能劣化催生的灾害性破坏发生，进而科学判诊混凝土坝运行体征健康与否，不但具有多方面的理论意义，更拥有明确的应用前景。因此，笔者认为就混凝土坝流激响应特性及体征判诊方法可以从以下几个方面开展进一步深入研究。

(1) 传统基于静态监测效应量的大坝安全监测与流激振动测试及水力学要素监测的研究相对较为独立，有关联合运用各项监测及检测手段，充分利用各自监测的优势和监测数据对各类病害所反映的信息特征进行信息融合，据此开展运行期混凝土坝立体化监测、监控的系统研究相对较少。因此，如何根据多传感器获得的监测（或检测）数据，通过信息融合分析与处理，进而对大坝服役性态安全做出全面判诊是一个重要的研究方向。

(2) 当前所建立的混凝土坝流激振动响应演化行为仿真，大都是基于宏观力学层面本构关系展开分析探究，未能从其内部力学性能行为演化的角度建立其

相应的本构模型，为此亟需从静动力响应特征引起筑坝材料微细观行为劣化角度，揭示混凝土坝损伤力学性能演化机制，深入分析坝体内力学性能演变与其诸因素间的关系，弥补并发展混凝土坝运行效能多尺度演化分析及监控理论当前的不足。

(3)信息融合在大坝安全监测领域的研究，多集中于对坝体多个同一类型静态效应量监测信息的融合方面，而未结合坝体累积损伤演化特性，有关联合大坝静态和动态监测信息用以提升其安全评判水平的研究鲜有报道，为此，研究如何联合利用混凝土坝多维静、动态监测面板数据，综合考虑坝体结构累积损伤特性，建立其运行体征健康判诊分析模型，具有一定的现实意义和研究价值。

参考文献：

[1] 顾冲时，苏怀智. 混凝土坝工程长效服役与风险评定研究述评[J]. 水利水电科技进展，2015，35(5)：1-12.

[2] 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]. 科学出版社，2016.

[3] 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.

[4] Lian J J，Zhang Y，Liu F，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)：1-22.

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

[6] 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.

[7] Wei B W，Xie B，Li H K，et al. An improved Hilbert - Huang transform method for modal parameter identification of a high arch dam [J]. Applied Mathematical Modelling，2021(91)：297-310.

[8] 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]. 高等教育出版社，2005.

[9] Léger P，Seydou S. Seasonal thermal displacements of gravity dams located in northern regions[J]. Journal of Performance of Constructed Facilities，2009，23(3)：166-174.

[10] Gu C S，Wang Y C，Peng Y，et al. Ill-conditioned problems of dam safety monitoring models and their processing methods. Sci China Tech Sci，2011，54(12)：3275-3280.

[11] Li F Q，Wang Z Y，Liu G H. Towards an Error Correction Model for dam monitoring data analysis based on Cointegration Theory[J]. Structural Safety，2013，43(6)：12-20.

[12] 魏博文，彭圣军，徐镇凯. 顾及大坝位移残差序列混沌效应的 GA-BP 预测模型[J]. 中国科学：技术科学，2015，45(5)：541-546.

[13] 吴中如，顾冲时，苏怀智，等. 水工结构工程分析计算方法回眸与发展[J]. 河海大学学报：自然科学版，2015，43(5)：395-405.

[14] C. Bernstone，A. Heyden. Image analysis for monitoring of crack growth in hydropower concrete structures [J]. Measurement，2009，42(6)：878-893

[15] Sevim B，Bayraktar A，Altun k A C，et al. Dynamic Characteristics of a Prototype Arch Dam [J]. Experimental Mechanics，2011，51(5)：787-791.

[16] Sani A A，Lotfi V. Dynamic analysis of concrete arch dams by ideal-coupled modal approach[J]. Engineering Structures，2010，32(5)：1377-1383.

[17] 张建伟，江琦，赵瑜，等. 一种适用于泄流结构振动分析的信号降噪方法[J]. 振动与冲击，2015，34(20)：179-184.

[18] 李火坤，刘世立，魏博文，等. 基于方差贡献率的泄流结构多测点动态响应融合方法研究 [J]. 振动与冲击，2015，34(19)：181-191.

[19] 刘昉，练继建，辜晋德. 基于自回归模型的水流脉动压力频谱特征研究[J]. 水利学报，2009，40(11)：1397-1402.

[20] Shurtz T E，Thomson S L. Influence of numerical model decisions on the flow-induced vibration of a computational vocal fold model [J]. Computers & Structures，2013，122(2)：44-54.

[21] 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.

[22] 中国水利水电科学研究院. 二滩水电站高双曲拱坝水力学及流激振动原型观测[R]. 国家科技成果数据库(知网版)，2006.

[23] 杨弘，练继建，冯永祥. 高坝水垫塘泄洪安全实时监控系统研究[J]. 水力发电学报，2008，27(3)：93-100.

[24] Witkov C，Liebovitch L S. Predicting optimal drive sweep rates for autoresonance in Duffing-type oscillators：A beat method using Teager - Kaiser instantaneous frequency [J]. Journal of Sound & Vibration，2010，329(8)：1154-1164.

[25] 练继建，李成业，刘昉. 环境激励下二滩拱坝拍振机理的研究[J]. 振动与冲击，2012，31(3)：1-7.

[26] 魏博文，钟紫蒙，李火坤. 基于 HHT-RDT 算法的高拱坝泄流结构工作模态识别方法 [J]. 振动与冲击，2020，39(10)：106-113.

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

[28] 胡少伟,陆俊,范向前. 混凝土损伤断裂性能试验研究进展[J]. 水利学报,2014,45(S1):10-18.

[29] Voyiadjis G Z, Taqieddin Z N, Kattan P I. Anisotropic damage-plasticity model for concrete [J]. International Journal of Plasticity,2008,24(10):1946-1965.

[30] Zheng F G, Wu Z R, Gu C S, et al. A plastic damage model for concrete structure cracks with two damage variables [J]. Science China-Technology Science,2012,55(11):2971-2980.

[31] 魏博文,徐镇凯,徐宝松. 碾压混凝土坝层面影响带黏弹塑性流变模型[J]. 水利学报,2012,43(9):1097-1102.

[32] 李火坤,王刚,魏博文,等.基于敏感性分析与粒子群算法的拱坝原型动弹性模量反演方法 [J]. 水利学报,2020,51(11):1401-1411.

[33] 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.

[34] 练继建,马斌,李福田. 高坝流激振动响应的反分析方法[J]. 水利学报,2007,38(5):575-581.

[36] 李成业,刘昉,马斌,等. 基于改进 HHT 的高拱坝模态参数识别方法研究[J]. 水力发电学报,2012,31(1):48-55.

[36] 李成业,练继建,刘昉,等. EMD 与小波阈值联合滤波方法的改进及其在泄流结构振动分析中的应用 [J]. 振动与冲击,2013,32(19):63-70.

[37] He L J, Lian J J, Ma B, et al. Optimal multiaxial sensor placement for modal identification of large structures [J]. Structural Control & Health Monitoring,2014,21(1):61-79.

[38] 黄耀英,黄光明,吴中如,等. 基于变形监测资料的混凝土坝时变参数优化反演 [J]. 岩石力学与工程学报,2007,26(z1):2941-2945.

[39] 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.

[40] 魏博文,徐镇凯,李火坤. 基于 GA-APSO 混合罚模型的混凝土坝力学参数优化反演[J]. 中南大学学报(自然科学版),2015,46(11):4211-4217.

[41] Li H K, Wang Y J, Wei B W. Inversion algorithm for the whole prototype dynamic displacement field of a high arch dam based on limited measuring points [J]. Journal of Vibration and Control,2017,23(20):3431-3447.

[42] 刘国华, 吴志根. 引入信息熵理论的砼结构损伤动力识别新思路[J]. 振动与冲击,2011,30(6):162-171.

[43] Su H Z, Wu Z R, Wen Z P. Identification Model for Dam Behavior Based on Wavelet Network [J]. Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering,2007,22(6):438-448.

[44] Liu H C, Liu L, Wu J. Material selection using an interval 2-tuple linguistic VIKOR methodconsidering subjective and objective weights [J]. Materials & Design,2013,52(24):158-167.

[45] 施玉群, 何金平. 基于信息熵的大坝多效应量聚类融合诊断模型[J]. 水力发电学报,2013,32(5):239-243.

[46] 李庆斌,林鹏. 论智能大坝[J]. 水力发电学报,2014,33(1):139-146.

[47] Gu C S, Zhao E F, Jin Y, et al. Singular value diagnosis in dam safety monitoring effect values [J]. Science China-Technology Science,2011,54(5):1169-1176.

[48] He J P, Tu Y Y, Shi Y Q. Fusion Model of Multi Monitoring Points on Dam Based on Bayes Theory [J]. Procedia Engineering,2011,15(11):2133-2138.

[49] Wu Z R, Xu B, Gu C S, et al. Comprehensive evaluation methods for dam service status. Sci China Tech Sci, 2012,55(8):2300-2312.

[50] Liu X, Wu Z R, Yang Y, et al. Information fusion diagnosis and early-warning method for monitoring the long-term service safety of high dams[J]. Journal of Zhejiang University-Science A:Applied Physics & Engineering,2012,13(9):687-699.

[51] 张建伟,李火坤,练继建,等. 基于环境激励的厂房结构损伤诊断与安全评价 [J]. 振动、测试与诊断,2012,32(4):670-674.

[52] 魏博文. 碾压混凝土坝服役性态及诊断方法研究 [D]. 南京:河海大学博士学位论文,2013.

[53] Wei B W, Liu B, Yuan D Y, et al. Spatiotemporal hybrid model for concrete arch dam deformation monitoring considering chaotic effect of residual series[J]. Engineering Structures,2021,228(1):111488.

编辑:张绍付

Research progress of concrete dam flow-induced response analysis and behavior diagnosis method

WEI Bowen，LI Huokun，LI Lianghui
(School of Civil Engineering and Architecture，Nanchang University，Nanchang 330031，China)

Abstract: The discharge structure of the concrete dam is constantly subjected to the slap and vibration of the high-speed water flow during the flood discharge. The crack expansion of the old dam and the accumulated damage of the dam body caused by the flood discharge are related to the safety of the entire water conservancy project. The safety monitoring and diagnosis of the discharge structure of the dam body are important technical means to ensure the stable operation and healthy service of concrete dam. Based on the scientific research carried out in the aspects of concrete dam static and dynamic monitoring and testing technology，flow-induced vibration response analysis method，and service behavior information fusion diagnosis，the present research achievements on the flow induced response characteristics and behavior diagnosis method of concrete dam are discussed. Combined with the operation characteristics of concrete dam，the deficiencies of current research and the research fields that need to be developed and improved are discussed，in order to further improve the theoretical system of discharge induced vibration monitoring of concrete dam and provide theoretical basis and decision support for long-term service and operation management.

Key words: Concrete dam；Flow-induced vibration；Service behavior；Safety diagnosis

翻译：魏博文

叶建春在调研督导防汛工作时强调 打好防汛主动仗 确保人民生命财产安全

2021 年 5月 23 日，江西省委副书记叶建春来到省直相关单位调研督导防汛工作。他强调，要深入贯彻落实习近平总书记关于防灾减灾救灾重要论述，按照党中央、国务院决策部署和省委、省政府工作要求，坚持“以防为主、防抗救相结合”的原则，强化监测预警，注重统筹协调，细化工作举措，打好防汛主动仗，确保人民群众生命财产安全。

副省长罗小云陪同调研。

进入主汛期以来，叶建春非常关注防汛工作，“五一”假期专程到省应急管理厅检查值守情况，此后又到赣江吉安段巡河并调研峡江水利枢纽防汛准备工作。再次来到省应急管理厅，叶建春视频连线听取有关地市防汛工作汇报。他指出，当前强对流天气频发重发，防汛形势不容乐观，防汛大战不容有失。要从讲党性、讲政治、讲大局的高度，坚决贯彻党中央关于推进应急管理体制机制改革的决策部署，理顺防汛体系，坚持优化协同高效原则，发挥好省防指牵头抓总作用和各部门专业优势，做到合理分工、高效协调、有序防控，确保各项防汛举措落实落细。

在省气象局和省水文监测中心，叶建春详细了解当前天气形势及河道流量、水位等情况，勉励工作人员弘扬科学精神，坚持实事求是，提供准确数据，筑牢防灾减灾第一道防线。叶建春强调，要相信科学、尊重科学，切实运用好天气预报和水文监测成果，把防汛举措制定得更加周密。要关心爱护专业技术人员，为他们创造良好工作环境，充分释放他们的聪明才智。

叶建春来到省消防救援总队，了解抗洪抢险人员、物资等准备情况，对救援队伍枕戈待旦的状态、精准施救的思路给予肯定。在省水利厅，叶建春查看水库实时监控等情况，要求优化调度，加强水库山塘除险加固，保护江河安澜人民安宁。叶建春强调，要坚持人民至上、生命至上，坚决克服麻痹思想和侥幸心理，立足防大汛、抢大险、抗大灾，对各类防汛安全隐患进行再排查再整改。要组织开展防汛救灾演练，强化汛期安全知识宣传，凝聚全社会参与防汛抗洪的共识与合力，把保障人民群众生命财产安全这件实事办好，助推我省党史学习教育务求实效、走在前列。

(http://slt.jiangxi.gov.cn/art/2021/5/24/art_27165_3371405.html，2021-06-04，江西日报 张武明)