

基于振动响应的水工结构有限元模型修正研究进展

李火坤¹, 唐义员¹, 柳波^{1,2}, 王刚^{1,2}

(1. 南昌大学工程建设学院, 江西 南昌 330031; 2. 江西省灌溉试验中心站, 江西 南昌 330201)

摘要: 鉴于准确的有限元模型对于评估和分析水工结构安全性能的重要意义, 在深入分析国内外相关研究成果的基础上, 从矩阵型和参数型修正的角度, 系统综述了基于振动响应的水工结构有限元模型修正方法的发展脉络及最新研究进展, 探讨和总结了当前水工结构有限元模型修正方法的关键问题。指出未来研究可结合人工智能技术, 从高效采样策略与高精度代理模型开发、多源信息融合与振动特性精准提取以及面向全生命周期的实时动态模型修正等方面开展研究, 以提高基于振动响应的有限元模型修正方法的实用性, 为水工结构智能运维提供技术支撑。

关键词: 水工结构; 振动响应; 有限元模型修正; 参数反演; 人工智能

中图分类号: TV31

文献标志码: A

文章编号: 1006-7647(2025)05-0070-11

Research progress on updating of finite element model for hydraulic structures based on vibration response//LI Huokun¹, TANG Yiyuan¹, LIU Bo^{1,2}, WANG Gang^{1,2} (1. School of Infrastructure Engineering, Nanchang University, Nanchang 330031, China; 2. Jiangxi Irrigation Experimental Center Station, Nanchang 330201, China)

Abstract: Due to the importance of accurate finite element models in assessing and analyzing the safety performance of hydraulic structures and on the basis of in-depth analysis of relevant research results at home and abroad, this paper systematically reviews the development and latest research progress of finite element model updating technology for hydraulic structures based on vibration response, with reference to both matrix-based and parameter-based updating approaches. Key issues of current finite element model updating technology for hydraulic structure are discussed and summarized. It is pointed out that future research can be carried out by combining artificial intelligence technology, from the aspects of high-efficiency sampling strategy and high-precision surrogate model development, multi-source information fusion and accurate extraction of vibration characteristics, and real-time dynamic model updating for the whole life cycle, so as to improve the practicability of vibration response-based finite element model updating technology and provide technical support for intelligent operation and maintenance of hydraulic structures.

Key words: hydraulic structures; vibration response; finite element model updating; parameter inversion; artificial intelligence

随着计算机技术的快速发展,有限元建模已成为保障水工结构健康服役和长效运行的一种重要手段,被广泛用于水工结构的优化设计^[1-2]、健康监测^[3-4]、损伤检测^[5-6]等领域。水利部在2024年印发的《关于推进水利工程建设数字孪生的指导意见》^[7]中提出“深化水利工程建设全要素和全过程数字映射、智能模拟、前瞻预演”。有限元建模以其强大的结构力学行为模拟能力,能够在为数字孪生模型提供力学性能描述基础的同时,推动数字孪生模型结构分析能力的数字赋能。然而,实际工程在

长期服役过程中,由于材料老化、外部环境变化等因素,其结构材料参数及边界条件等会发生变化,使得基于工程设计角度构建的有限元模型难以反映实际结构的力学特性。结构有限元模型修正方法的提出是为了提高模型可靠性,该方法属于力学反分析问题,即以结构实测静、动力响应数据为基础,修正有限元模型以最小化有限元模拟及实测结果之间的误差,以达到提高有限元模型模拟精度的目的。

根据所采用实测数据类型不同,有限元模型修正方法大致可以分为基于静力监测与基于振动响

基金项目: 国家自然科学基金项目(52479065, 52509097); 江西省“双千计划”科技创新高端人才项目(jxsq2023201017); 江西省自然科学基金(20232ACB204027, 20252BAC200637); 江西省水利厅科技课题(202325ZDKT05, 202526YBKT21)

作者简介: 李火坤(1981—),男,教授,博士,主要从事泄流结构水动力灾变防控研究。E-mail: lihuokun@ncu.edu.cn

通信作者: 柳波(1996—),男,助理研究员,博士,主要从事泄流结构运行安全动力学诊断研究。E-mail: liubo@ncu.edu.cn

应的修正方法,其中基于静力监测的修正方法在水工结构领域发展得较早。20 世纪 80 年代,吴中如等^[8]率先在国内提出利用原型位移观测数据修正混凝土坝有限元模型的静弹性模量与线膨胀系数,并基于佛子岭连拱坝工程观测数据进行了应用与验证。几十年来,基于静力监测的模型修正方法是水工结构健康监测领域长期关注的焦点,为保障水工结构运行安全发挥了重要作用^[9-12]。

随着结构动态监测技术的发展,基于振动响应的模型修正方法受到越来越多的关注,成为目前行之有效的方法之一^[13]。该方法主要通过振动测试获取实际结构的动力学特性,而后对结构有限元模型的边界条件或动力材料参数进行修正以使结构数值模型能真实反映实际工程物理特性。同时,由于水工结构的振动响应所包含的信息能够全面反映结构整体力学行为特征,因此开展基于振动响应的有限元模型修正对于全面掌握水工结构整体运行性态具有重要意义。

本文立足于基于振动响应的结构有限元模型修正基本理论,全面梳理基于振动响应的有限元模型修正方法在水工结构领域的应用与发展历程,并重点对基于振动响应的水工结构有限元模型修正方法的最新研究进展进行了总结,以期在水工结构智能运维提供技术支撑。

1 基于振动响应的水工结构有限元模型修正方法

根据修正量的不同,基于振动响应的有限元模型修正方法可以分为矩阵型修正方法与参数型修正方法两大类^[11],其中矩阵型修正方法又可以分为整体型和元素型方法,参数型修正方法可以分为传统参数型修正方法和基于灵敏度、智能优化算法、代理模型的参数型修正方法。

1.1 矩阵型修正方法

矩阵型修正方法以模型的质量、刚度及阻尼矩阵为修正对象,在一定约束条件下,直接修改系统矩阵以实现模型修正。该方法出现较早,其中最早出现并发展的是 Berman 与 Baruch 在 20 世纪 70 年代提出的参考基方法^[14-16],该方法假设结构系统的质量^[14]、实测模态^[15]与刚度矩阵^[16]中的其中之一为不变参考基,并基于正交性条件构建目标函数,然后通过拉格朗日乘子法求解待修正的整体质量与刚度矩阵以获得修正的有限元模型。随后,Wei^[17]提出综合利用对称性条件、正交性条件构建目标函数,同时修正质量矩阵和刚度矩阵。针对试验模态数据不完备的问题,Thoren^[18]和 Caesar 等^[19]提出了

混合矩阵型修正方法,结合试验模态与分析模态数据修正质量与刚度矩阵,避免了参考基准法中逆矩阵的运算。此外,该领域还发展了逆特征值法^[20]、摄动法^[21]、广义逆变法^[22]等方法用于修正模型系统矩阵。然而,使用整体矩阵型修正方法获取的系统矩阵可能失去应有的带状和稀疏性,甚至会出现负刚度值和虚元。为保持修正后系统矩阵的稀疏与带状特性,Kabe^[23]提出在动力学约束与对称性约束条件下修正刚度矩阵。此外,众多学者将矩阵元素的连通性作为约束条件,通过调整系统矩阵中的非零元素来实施模型修正^[24-25],这类修正系统矩阵部分元素的方法也被称为元素型修正方法。由于矩阵型修正方法针对系统元素矩阵进行修正,修正后的矩阵元素难以与结构体型、材料分区等建立直接关联,导致物理意义不够明确,因而在水工结构模型修正领域应用较少。总体上,矩阵型修正方法具有修正精度高、流程简便等优势,但随着科学技术的不断发展,在水工结构模型修正研究领域,该方法逐渐被参数型修正方法所取代。

1.2 参数型修正方法

参数型修正方法的步骤为:首先构建结构有限元模型,而后将修正过程转化为带约束的优化问题,以实际结构与有限元模型计算动力学特性之间的误差构建目标函数,通过优化调整水工结构模型参数使优化目标函数最小,进而达到模型修正的目的。由于更新后的模型可以较好地代表水工结构真实的工作性态,因而可利用其进行进一步的结构分析、损伤评估及健康监测等工作。

1.2.1 传统参数型修正方法

传统参数型修正方法主要通过试算或凭借经验调整有限元模型参数,使有限元模型的动力特性与实测结果尽可能一致。Cantieni 等^[26]采用伺服液压振动发生器对瑞典 Norsjö 拱坝实施了强迫振动测试,并基于识别的模态参数试算调整动弹性模量和边界条件的刚度,进而对拱坝模型进行了修正,尽管部分模态振型模态置信度准则(MAC)值较低,但模型与实际结构模态参数的整体吻合效果较为理想。Proulx 等^[27]与 Alves 等^[28]分别对 Emosson 大坝与 Pacoima 大坝进行强迫振动测试,而后基于经验调整了模型的动弹性模量与阻尼参数,并将修正后的模型用于模拟拱坝在地震作用下的响应特性。Tarinejad 等^[29]采用两种不同类型的激振器对伊朗 Shahid Rajaee 拱坝开展了强迫振动试验并对有限元模型的参数进行了调整,最终得到了与试验结果较为一致的模态频率和阻尼比。Gauron 等^[30]对加拿大 Daniel-Johnson 连拱坝进行了强迫振动测试,通过

调整有限元模型参数成功匹配了拱坝前八阶识别振动模态,为后续抗震分析提供了精确模型。然而,对于大体积水工结构而言,强迫振动通常需要采用大型激励器或者水下爆破等方法对结构进行激励,这类方法通常能够激起较大的结构响应,但同时存在价格昂贵、操作不便等问题。随着振动测试与运行模态识别技术的发展,基于环境激励的运行模态分析不需要大型激励设备,仅利用交通、风、水流、地震等环境激励,即可获取结构动力响应并实现模态参数的识别,从而为水工结构模型修正提供标定基准。为此,Daniell 等^[31]采用平均归一化的功率谱方法,识别环境振动下的 Claewern 大坝模态参数并将其与有限元模型进行对比,结果显示二者结果吻合较好,证明了采用环境激励替代强迫振动是识别大坝模态参数的理想手段。Sevim 等^[32-33]采用增强频域法获取了土耳其的 Berke 拱坝运行模态参数,并通过调整材料属性显著减小了模型计算与试验识别模态参数之间的差异。Buflì 等^[34]通过无人机测绘技术建立了意大利 Ridracoli 坝的精细三维几何结构,并结合长期结构监测数据对坝体有限元模型材料及基础岩体的参数进行了修正。侯志英等^[35]利用随机子空间法识别环境振动下的大坝模态参数,并通过试算法对龙羊峡重力拱坝模型的坝体与地基材料参数进行了反演与修正,反演得到的参数值与设计值存在较为明显的差异,表明了对模型进行修正的必要性。综合来看,传统参数型修正方法能够基于经验或简单理论指导较为便捷地缩小模型修正误差,然而,由于此类方法大多仅基于固有频率或频谱进行试算调整,较为依赖于主观经验,缺乏对模态振型等动力特性的综合利用。随着水工结构数值分析对精细化模拟需求的提升,这类方法在缩小模型修正误差方面的能力仍有待进一步提升。

1.2.2 基于灵敏度的参数型修正方法

基于灵敏度的参数型修正方法主要是以结构有限元模型中待修正的物理参数为设计变量,利用灵敏度分析建立参数变化与响应变化之间的显式线性近似关系,以最小化试验测试和模型计算之间的误差为目标函数,利用模型特征量对物理参数求偏导数获取灵敏度信息以指导参数调整的方向和步长,从而迭代求解出使模型响应与实测响应一致或最接近的物理参数以修正有限元模型。Fox 等^[36]基于结构模型的特征方程推导出线性结构中求解一阶灵敏度的公式,此后国内外学者对该方法进行了广泛的研究与改进。例如:Nelson^[37]、Lim 等^[38]分别对一阶灵敏度公式进行了简化,提升了基于灵敏度的参数型修正方法的计算效率和实用性;Chen 等^[39]采

用矩阵扰动技术重新计算了特征解并评估了特征数据灵敏度;Kim 等^[40]研究了有关二阶灵敏度的模型修正方法的效果;Mottershead 等^[41]对基于灵敏度的结构动力学模型修正技术进行了全面总结与讨论。在水工结构领域,韩建平等^[42]以实测模态频率为基准,基于灵敏度分析确定了对渡槽空腹桁架拱有限元模型频率影响较大的参数并进行了修正,经过三次迭代后模态频率误差显著降低,实现了简单有限元模型的简便快速修正;吴思远等^[43]根据弧形闸门完全水弹性模型实测数据,基于特征灵敏度优化方法对弧形闸门主框架有限元模型节点质量进行了修正,结果表明该方法只需数次迭代即可将修正后模态频率与实际闸门频率的相对误差降至 2% 以内。总体上,基于灵敏度的参数型修正方法虽然具有明确的物理意义且流程简便,对于型式较为简单的结构通常具有较好的适用性,但对于大型复杂水工结构而言,由于模型待修正参数与动力特性之间具有高度非线性关系以及灵敏度矩阵的病态或不可导问题,可能导致目标函数存在多个局部最优点,灵敏度分析结果可能会陷入局部最优点而影响模型修正精度。因此,如何获取待修正参数的全局最优解还有待进一步研究。

1.2.3 基于智能优化算法的参数型修正方法

基于智能优化算法的参数型修正方法不再依赖灵敏度矩阵的显式推导,而是把修正问题看作一个黑箱全局优化问题。通过在可行参数域内,利用智能优化算法在全局范围内寻找一组结构参数,使有限元模型计算得到的响应与实测响应之间的误差指标最小化,以实现有限元模型的修正,基本流程如图 1 所示。此类方法在水工结构领域得到了广泛研究与应用。例如:王登刚等^[44]通过引入区间分析方法,建立了基于先验约束条件的区间反演模型并采用约束变尺度方法进行求解,实现了利用有限模态观测数据反演混凝土重力坝坝体和基岩的动弹性模量区间范围;马震岳等^[45]建立了结构优化遗传动力识别通用模型,基于改进的遗传算法 (genetic algorithm, GA) 识别了某抽水蓄能电站地下厂房的动弹性模量和围岩边界动态参数;冯新等^[46]通过引入正则化思想和模拟退火-单纯形算法,利用不完全模态观测数据识别混凝土坝分区动弹性模量,有效抑制了观测噪声的影响;王海军等^[47]基于结构有限元模型计算频率和 Morlet 小波变换方法识别频率建立了结构最优化动力识别目标函数,结合采用单亲遗传算子的改进 GA 算法,实现了电站厂房的模型参数的修正;康飞等^[48]针对智能算法用于参数反演时出现的收敛速度慢及易陷入局部最优等问题,提

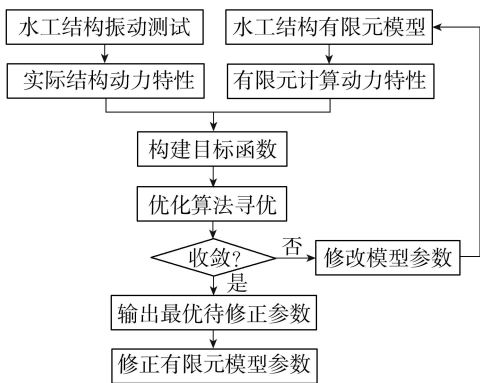


图1 基于智能优化算法的修正方法基本流程

出了一种混合单纯形人工蜂群算法,并将其应用于混凝土重力坝动力材料参数识别,结果表明该算法具有较高的精度及计算效率;丁晓唐等^[49]基于模型计算与实测频率误差构建了反演目标函数,采用改进的粒子群优化 (particle swarm optimization, PSO) 算法进行求解,对考虑流固耦合的南水北调工程穿黄渡槽模型的动弹性模量进行了反演与修正; García-Palacios 等^[50]基于环境模态试验得到的模态参数结果,使用蒙特卡洛方法生成了大量随机变量组合,并通过最小化目标函数来优化材料属性,显著提高了模型精度;Wang 等^[51]提出了一种基于模态参数识别的土石坝动态参数更新方法,并基于弱震记录下的土石坝识别模态参数与多群体 GA 算法反演了坝体模型材料参数,修正后模型的动力特性与实际值高度吻合,为土石坝地震响应分析提供了高精度分析模型;吴西杰等^[52]基于贝叶斯理论,以确定性更新的结果作为不确定性更新的参数初始值对渡槽结构有限元模型参数进行更新,有效提高了计算效率;刘振平等^[53]利用地震下的实测余震加速度时程识别了模态参数,并采用 GA 算法反演了紫坪铺面板堆石坝土石坝的最大动剪切动弹性模量系数和指数,结果表明反演所得坝料参数比室内动三轴试验结果的精度更高;王朝辉等^[54]考虑动剪模量衰减曲线和阻尼比增长曲线的影响,并结合 PSO 算法与实测地震加速度反应谱反演了鲤鱼潭大坝坝料的多个动力参数,可为土石坝抗震模拟提供基础。总体上,上述各类基于智能算法的模型修正方法主要通过 GA、PSO 等优化算法在全局范围内迭代求解最优模型参数,以降低陷入局部极小值的风险,从而提高了模型的修正精度。但该过程需反复调用有限元模型,计算量随迭代次数显著增加。因此,如何针对复杂水工结构建立能够替代大量有限元模型计算的代理模型以及更加高效的智能优化算法,对于提升其计算效率至关重要。

对于水工结构有限元模型修正而言,准确的实

测标定基础对于构建准确的模型修正优化目标函数至关重要。以往多将实测振动响应经处理后的模态特性或频谱特性作为模型修正的标定基准,从而降低有限元模型修正的复杂度。但这一处理过程不可避免存在误差。为进一步充分利用水工结构振动响应所包含的信息,有学者通过融合时域、频域等多种信息来构建目标函数。张宏洋等^[55]基于正交试验法确定了对紫坪铺面板堆石坝加速度反应敏感性较强的待反演参数,并构建了联合加速度时程峰值和反应谱特征点数值的优化目标函数,而后采用改进的 PSO 算法进行了优化求解,结果表明该反演模型计算的动力参数能够较为准确地反映土体的动力特性,动力计算的加速度反应与实际计算成果基本一致,可满足实际工程精度要求。刘振平等^[56]通过联合加速度时程峰值和频谱特性构建了模型修正优化目标函数,并利用 GA 算法识别了鲤鱼潭大坝坝料的动力参数。Fang 等^[57]提出了一种基于时频域信息的混凝土坝动态材料参数联合反演方法,采用改进的多目标非支配排序遗传算法进行多目标优化求解,避免了人为对不同量纲目标函数进行加权融合。综合来看,通过融合时频域多源信息构建目标函数,能够更充分地挖掘水工结构振动响应中蕴含的有效信息,因此,如何通过振动时域、频域多源信息融合提升水工结构有限元模型修正精度仍值得进一步深入研究。

1.2.4 基于代理模型的参数型修正方法

近年来,代理建模技术的快速发展为结构有限元模型修正提供了一种高效计算工具,该技术先用较少的有限元样本建立输入参数 (如材料属性、几何形状等) 与输出响应 (如结构的动态特性) 之间的代理模型,从而快速预测原始模型的响应,以代替耗时的有限元模型更新计算过程,其中代理模型构建基本流程如图 2 所示。在此基础上,可结合全局最优化算法搜索最优参数,进一步实现有限元模型的高效精准修正。根据代理模型的构建方法 and 应用特点,基于代理模型的修正方法可以分为基于多项式响应面的修正方法、基于机器学习的修正方法和基

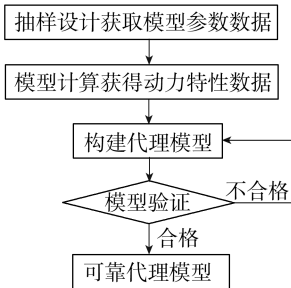


图2 代理模型构建基本流程

于深度学习的修正方法。

1.2.4.1 基于多项式响应面的修正方法

多项式响应面是一种典型的显式代理模型,其基于有限样本点构建相对简单的多项式函数来拟合有限元模型参数与动力特性之间的显示映射关系,具有操作简便、数学含义明确的优势^[58]。

张建伟等^[59]将基于信息融合技术获取的完整渡槽实测频率作为模型修正的目标值,构建了拟合渡槽结构的材料参数与频率关系的二次多项式响应面模型,并结合非线性最优化求解实现了对渡槽有限元模型的精确修正,有效解决了大型渡槽结构有限元模型的精度问题。Li 等^[60]基于奇异熵的随机子空间方法识别了实际拱坝的模态参数,结合三阶多项式响应面模型和遗传算法,实现了对高拱坝有限元模型的精确高效修正。李火坤等^[61]提出了一种基于响应面与智能算法的拱坝有限元模型修正方法,在分析二滩拱坝流固耦合有限元模型不同区域动弹性模量对模态参数影响规律的基础上,基于敏感性分析结果确定了待反演的参数,并构建了待反演参数与模态参数的三阶多项式响应面模型,各阶频率和典型测点归一化振型系数响应面误差均在 5%以内;利用自适应惯性权重的 PSO 算法对目标函数进行寻优求解,实现了对拱坝有限元模型分区动弹性模量的修正,修正后模型前三阶固有频率与对应识别结构频率误差均在 2%以内。

此外,基于响应面的模型修正方法被应用于水工结构的损伤识别中,宋固全等^[62]建立了拱坝结构子区域动弹性模量与节点振型之间的三阶多项式响应面模型,并基于模型修正方法实现了拱坝结构的损伤识别。李火坤等^[63]以水闸底板脱空参数作为待修正模型参数,通过构建脱空参数与模态参数的三阶含二次交叉项的多项式响应面模型,优化求解脱空参数,为软基水闸实际工程底板脱空检测提供了一种可行的动力学方法。总体上,基于多项式响应面的模型修正方法能够有效提高计算效率。然而,由于多项式拟合响应面模型本质上是一种局部拟合,对复杂的非线性关系拟合能力有限,且多项式的形式直接影响响应面的计算效率与精度,响应面模型函数形式的确定以及精度的提高还有待进一步研究^[64]。对于大型水工结构这种复杂结构而言,如何提升这类方法的复杂非线性建模能力还有待进一步研究。

1.2.4.2 基于机器学习的修正方法

机器学习技术因其在处理复杂的非线性关系方面表现出良好的拟合与泛化性能,在工程领域得到了广泛应用。近年来,学者们将机器学习技术引入

水工结构有限元模型修正领域,并逐渐成为当前的研究热点。例如:程琳等^[65]提出了一种基于强震观测数据和多输出支持向量回归 (multi-output support vector regression, M-SVR) 的混凝土坝材料参数反演方法,利用强震观测数据识别大坝模态频率并作为目标值,随后基于少量模型计算数据构建了 M-SVR 代理模型以替代有限元模型,减少了后续优化计算中有限元模型计算次数;Sevieri 等^[66]基于广义多项式混沌展开构建了混凝土重力坝模型材料参数与模态参数之间的代理模型,并结合改进的马尔可夫链蒙特卡洛方法与大坝测试模态参数对意大利某重力坝有限元模型进行了修正;王茂华等^[67]通过构建 M-SVR 模型代替有限元模型计算了坝体测点加速度反应谱值,有效节约了计算时间;Wang 等^[68]采用径向基函数神经网络建立了岩土参数与动态响应的映射关系,并采用多群体 GA 算法反演模型参数,实现了弱地震下的大坝岩土体动态参数反演修正;Kang 等^[69]采用高斯过程回归 (Gaussian process regression, GPR) 模型代替有限元模型快速获取计算模态参数,并引入 Jaya 算法进一步提高了反演效率,实现了重力坝及拱坝有限元模型的高效修正;Liu 等^[70]利用水下爆炸产生的振动响应获取模态参数,通过构建 SVR 代理模型并结合 PSO 算法对坝体和基础材料的动弹性模量进行了反演与修正;Wu 等^[71]通过 GPR 代理模型拟合动弹性模量与模态参数之间的复杂非线性关系,替代耗时的有限元模拟,随后引入多目标鲸海鞘算法以识别拱坝模型参数;Li 等^[72]采用了多项式混沌展开 (polynomial chaos expansions, PCE)、克里金 (Kriging)、多项式混沌 Kriging (PCK) 和支持向量回归 (support vector regression, SVR) 4 种代理模型对拱坝模型参数与模态参数函数关系进行了拟合和对比,在此基础上,结合振动监测数据与贝叶斯优化算法对拱坝有限元模型进行了修正,结果表明在保持精度的前提下,代理模型的引入能大幅提高反演效率;Li 等^[73]比较了人工神经网络、PCE、Kriging 和 SVR 4 种代理模型对拱坝有限元模型参数与动力特性的拟合精度,结果表明 PCE 和 Kriging 模型对拱坝模型动力特性的预测精度较高。此外,针对机器学习代理模型的拟合效果在一定程度上受其自身超参数影响的问题,近年来有学者提出对机器学习代理模型进行改进以提高拟合精度。例如:李火坤等^[74]利用 GA 算法对 SVR 代理模型进行超参数优化,有效提高了 SVR 代理模型的拟合效果,并采用改进的 PSO 算法求解目标函数,实现了软基水闸有限元模型的修正;Wang 等^[75]构建了基于 PSO 算法优化的 Kriging 代理模型,并

采用鲸鱼优化算法实现了软基水闸模型参数的高效识别与修正,修正后模型模态参数与实际值吻合良好,为软基水闸模型的高效修正提供了新思路。为综合利用不同类型代理模型的优势,Li 等^[76]采用融合加权平均策略的 3 种代理模型(PCE、SVR 和 Kriging 模型)构建了具有更强泛化能力和更高精度的集成代理模型,并结合优化求解算法对拱坝模型进行了修正,从而实现了拱坝结构的高效损伤识别。

总体上,机器学习技术的引入显著提高了代理模型的非线性表征能力和预测精度。目前基于机器学习的代理模型研究主要集中在 PCE、SVR、Kriging 等传统机器学习技术^[77-79],然而这些机器学习技术通常被认为是黑盒模型,自身内部参数和结构复杂,难以直观解释其内部工作原理和决策过程;训练样本量过少可能导致基于机器学习的代理模型精度不足或过拟合;样本质量不足会导致模型学习错误模式;超参数的不当选择可能导致模型效果欠佳。在应用机器学习构建代理模型过程中仍需关注样本质量、超参数敏感性和过拟合风险等问题。另一方面,随着水工结构有限元模型复杂度和精度要求的不断提高,仍需探索表征能力更强、可解释性更好、泛化性能更优的代理模型。

1.2.4.3 基于深度学习的修正方法

近年来,深度学习技术快速发展并在复杂非线性映射建模领域展现出显著优势。Liu 等^[80]将深度学习技术引入拱坝有限元模型修正中,借助贝叶斯优化的长短期记忆神经网络优异的非线性映射能力,拟合了拱坝有限元模型材料参数与模态参数之间的复杂非线性关系,并直接利用实测振动模态参数作为输入,反演了相应拱坝有限元模型材料参数,为水工结构有限元模型修正提供了新的思路。Luo 等^[81]将固体力学弹性原理嵌入神经网络的损失函数中,构建了以测点位移与应力为输入的物理信息神经网络模型,随后使用少量数据样本在训练过程中逐步调整,得到了待修正的重力坝模型参数,一定程度上弥补了传统神经网络可能需要大量数据以及泛化能力受限的不足。当前有关深度学习在基于振动响应的水工结构模型修正中的应用还相对较少。在工程结构有限元模型修正领域,深度学习技术得到了较多的研究与应用。例如:Park 等^[82]训练卷积神经网络以建立动态响应与结构刚度变量之间的关系,直接利用动态结构响应测量数据实现了模型参数的快速准确反演与修正,避免了模态识别过程中可能产生的误差与大量优化迭代计算;Bruno 等^[83]提出了一种基于深度强化学习(deep

reinforcement learning, DRL)的结构模型修正方法,构建了智能代理系统,通过训练智能代理,学习如何调整结构控制参数以最小化数值模型与实测频率之间的差异,为多智能体在线、自动化模型修正提供了一种新思路。此外,贝叶斯深度神经网络^[84]、深度生成网络^[85]、物理反馈增强神经网络^[86]等模型的应用,进一步增强了结构模型修正的准确性与智能化程度,可为基于振动响应的水工结构有限元模型修正提供较好的借鉴。

综上,经过多年的研究与发展,基于振动响应的水工结构有限元模型修正方法取得了众多研究成果,形成了矩阵型与参数型两类主要方法,其中矩阵型修正方法流程简便但相对缺乏明确物理意义,在水工结构领域应用较少;参数型修正方法以模型参数为修正对象,成为水工结构有限元模型修正领域应用的主流方法。参数型修正方法中,传统参数型方法通过少量计算实现修正,计算负担相对较低,适用于对精度要求不高的场景;基于灵敏度的方法通过灵敏度分析指导修正,操作相对便捷,适用于复杂程度不高的线性或弱非线性结构的模型修正问题;基于智能优化算法的方法可实现全局优化,相对精度较高,但对于大型复杂水工结构计算效率低,适用于计算耗时相对较短的水工结构;基于代理模型的修正方法结合了优化算法的全局寻优与代理模型快速计算的优点,但其反演流程相对复杂且较为依赖代理模型的精度,适用于计算耗时的大型复杂水工结构。

2 讨论与展望

2.1 讨论

- a. 现有的有限元模拟往往基于诸多假设,例如对边界条件和载荷的简化处理,以及对流固耦合效应的近似描述。这些假设虽然在一定程度上简化了模型的建立过程,但同时也引入了潜在的误差,导致模拟结果与实际结构响应之间存在偏差。因此,亟待从模型的内在机理出发,深入剖析这些假设对模型精度的影响机制,并探索相应的建模策略以降低简化假设对模型精度的影响。
- b. 水工结构在服役环境中受水流噪声等干扰,实测振动响应易受噪声影响,从而降低动力特性识别精度,最终影响模型修正的准确性。此外,基于单一时域或频域信息构建的目标函数难以充分利用振动测试信息,仍需进一步挖掘结构振动测试信息,构建具有抗噪鲁棒性的反演目标函数,以提升模型修正的准确性与鲁棒性。
- c. 水工结构有限元模型参数与动力特性之间

存在复杂的非线性映射关系,导致修正参数最优解的获取面临挑战。智能优化算法的引入在一定程度上提高了修正精度,然而,优化算法有时存在收敛速度慢以及稳定性不足的问题,影响修正效率和结果的可靠性。因此,亟待研究高效稳定的智能寻优算法。

d. 为应对智能优化算法的计算效率挑战,常引入代理模型以替代有限元计算。然而,这些代理模型的构建、训练、泛化能力和精度受样本数量、质量、算法选择及超参数调优等因素制约,亟须构建高效、鲁棒、高精度的代理模型,以提高模型修正的效率与准确性。

2.2 展望

随着水利工程数字孪生建设的推进,对水工结构有限元模型的高保真性提出了更高要求,现有基于振动响应的水工结构有限元模型修正方法虽已取得显著进展,但仍面临诸多挑战,亟待进一步深化研究。基于此,未来水工结构有限元模型修正方法可从以下方面开展研究:

a. 代理模型的引入大幅提高了有限元模型修正的计算效率,而其构建效果高度依赖于训练数据集的质量,当前采样策略多集中于拉丁超立方抽样或经验性抽样设计方法,此类方法在探索高维参数空间时可能存在效率瓶颈,因此未来可考虑引入高效采样策略(主动学习、自适应采样),以有限的计算资源构建高质量数据集,从而提高代理模型精度;另一方面,目前在水工结构动力学模型修正领域应用的代理模型主要集中在多项式响应面模型与传统机器学习模型,近年来深度学习、集成学习、强化学习、物理信息神经网络等人工智能技术蓬勃发展,在复杂非线性映射建模方面展现出显著优势,未来可进一步通过人工智能构建泛化能力更强、可解释性更好、精度更高的代理模型,如基于卷积神经网络、循环神经网络自动提取数据深层特征构建复杂映射关系;基于集成学习组合多类型学习器以提高模型的泛化能力和鲁棒性;通过强化学习以连续、自适应、目标导向的智能决策持续提高代理模型准确性;利用物理信息神经网络使用少量数据集构建高精度代理模型,进一步提升模型修正的效率和精度。

b. 准确全面的实测振动响应是水工结构有限元模型修正的基础,然而水工结构在复杂服役环境下,背景噪声、水流噪声等环境因素会影响振动监测数据及后续动力特征信息提取的准确性,因此有关复杂环境下水工结构振动响应噪声高效剔除与振动特性精准提取方面的研究有待进一步深入。此外,当前模型修正多依赖单一类型数据,往往使得振动

响应中包含的动力特征信息未能得到充分利用,未来可通过数据级融合、特征级融合、决策级融合以及多模态融合等技术深入挖掘结构振动响应时域、频域等多源信息,以进一步提高模型修正的可靠性。

c. 当前基于振动响应的有限元模型修正方法在水工结构安全性能分析与诊断中得到了较为广泛的应用,但其大多是基于单次振动测试数据进行反演与修正的,实际水工结构在运行过程中由于材料老化、环境变化等因素,其力学行为具有时变特性,目前对于反映水工结构实际运行过程的在线模型修正方法较为缺乏。未来可进一步结合人工智能和结构多传感器实时健康监测技术,探索针对水工结构全生命周期的实时同步模型修正机制,以更好地发挥有限元模型修正方法在数字孪生建设中的互馈作用,推动数字孪生模型在结构分析中的数字赋能,助力水利工程智能运维与数字孪生建设。

参考文献:

[1] LIU Rui, MA Gang, KONG Fanhui, et al. Pareto-guided active learning for accelerating surrogate-assisted multi-objective optimization of arch dam shape [J]. Engineering Structures, 2025, 326: 119541.

[2] 佟大威, 杨传会, 余佳, 等. 基于 XGBoost-PSO 的混凝土重力坝体型多目标优化设计 [J]. 河海大学学报(自然科学版), 2023, 51 (3): 91-98. (TONG Dawei, YANG Chuanhui, YU Jia, et al. Multi-objective shape optimization of concrete gravity dam based on XGBoost-PSO [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2023, 51 (3): 91-98. (in Chinese))

[3] ZHANG Kang, GU Chongshi, ZHU Yantao, et al. A mathematical-mechanical hybrid driven approach for determining the deformation monitoring indexes of concrete dam [J]. Engineering Structures, 2023, 277: 115353.

[4] DE SORTIS A, PAOLIANI P. Statistical analysis and structural identification in concrete dam monitoring [J]. Engineering Structures, 2007, 29 (1): 110-120.

[5] PEREIRA S, MAGALHÃES F, GOMES J P, et al. Vibration-based damage detection of a concrete arch dam [J]. Engineering Structures, 2021, 235: 112032.

[6] 李波, 刘明军, 马奕仁, 等. 基于平均曲率模态和最小二乘支持向量机的混凝土拱坝损伤识别方法研究 [J]. 长江科学院院报, 2013, 30 (11): 113-118. (LI Bo, LIU Mingjun, MA Yiren, et al. Damage identification of concrete arch dam using mean curvature mode and least squares support vector machine [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2013, 30 (11): 113-118. (in Chinese))

[7] 水利部印发《关于推进水利工程建设数字孪生的指导意见》的通知 [J]. 中华人民共和国水利部公报, 2024

- (2):10-13.
- [8] 吴中如,陈继禹,范树平.用反演分析法推求连拱坝混凝土的力学参数和断裂韧度[J].大坝观测与土工测试,1986(1):3-11.(WU Zhongru, CHEN Jiyu, FAN Shuping. The calculation of mechanical parameter and fracture toughness of concrete in multiple-arch dam with inversion analysis method[J]. Hydropower and Pumped Storage, 1986(1):3-11. (in Chinese))
- [9] 杨杰,刘智,宋锦焘,等.基于SSA-MSVR的混凝土拱坝材料参数反演模型[J].水利水电科技进展,2023,43(5):53-57.(YANG Jie, LIU Zhi, SONG Jintao, et al. Inversion model of material parameters for concrete arch dams based on SSA-MSVR[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2023, 43(5):53-57. (in Chinese))
- [10] SEVIERI G, ANDREINI M, DE FALCO A, et al. Concrete gravity dams model parameters updating using static measurements[J]. Engineering Structures, 2019, 196: 109231.
- [11] 赵迪,张宗亮,陈建生.粒子群算法和ADINA在土石坝参数反演中的联合应用[J].水利水电科技进展,2012,32(3):43-47.(ZHAO Di, ZHANG Zongliang, CHEN Jiansheng. A combined application of particle swarm optimization algorithm and ADINA for parametric inversion of earth-rock dams[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2012, 32(3):43-47. (in Chinese))
- [12] 袁俊平,邱豪磊,胡有方,等.土石坝力学参数反演技术研究进展与展望[J].水利水电科技进展,2021,41(3):1-10.(YUAN Junping, QIU HaoLei, HU Youfang, et al. Research progress and prospects on inversion technology of mechanical parameters for earth-rockfill dams[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2021, 41(3):1-10. (in Chinese))
- [13] 李火坤,王刚.泄流结构振动反演与安全控制指标研究进展[J].水利水电科技进展,2020,40(2):81-89.(LI Huokun, WANG Gang. Research progress on vibration inversion and safety control index of flood discharge structures[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2020, 40(2):81-89. (in Chinese))
- [14] BARUCH M. Optimization procedure to correct stiffness and flexibility matrices using vibration tests[J]. AIAA Journal, 1978, 16(11):1208-1210.
- [15] BERMAN A. Mass matrix correction using an incomplete set of measured modes[J]. AIAA Journal, 1979, 17(10): 1147-1148.
- [16] BARUCH M. Methods of reference basis for identification of linear dynamic structures[J]. AIAA Journal, 1984, 22(4):561-564.
- [17] WEI Fushang. Mass and stiffness interaction effects in analytical model modification[J]. AIAA Journal, 1990, 28(9):1686-1688.
- [18] THOREN A R. Derivation of mass and stiffness matrices from dynamic test data[C]//Proceedings of the 13th Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference. San Antonio: AIAA, 1972:1-6.
- [19] CAESAR B, PETER J. Direct update of dynamic mathematical models from modal test data[J]. AIAA Journal, 1987, 25(11):1494-1499.
- [20] LANCASTER P, MAROULAS J. Inverse eigenvalue problems for damped vibrating systems[J]. Journal of Mathematical Analysis and Applications, 1987, 123(1): 238-261.
- [21] 张德文,周欣.动力模型修正之最简摄动法的一种特定公式[J].强度与环境,1986(5):10-16.(ZHANG Dewen, ZHOU Xin. A specific formulation of the simplest perturbation method of dynamic model correction[J]. Structure & Environment Engineering, 1986(5):10-16. (in Chinese))
- [22] 张德文,张欧骐.模型修正中一种特殊广义逆的性质与功能[J].宇航学报,1990(3):34-38.(ZHANG Dewen, ZHANG Ouqi. Property of a special generalized inverse in the model correction[J]. Journal of Astronautics, 1990(3):34-38. (in Chinese))
- [23] KABE A M. Stiffness matrix adjustment using mode data[J]. AIAA Journal, 1985, 23(9):1431-1436.
- [24] SMITH S W, BEATTIE C A. Secant-method adjustment for structural models[J]. AIAA Journal, 1991, 29(1):119-126.
- [25] 张景绘, NATKE H G. 复杂动力学系统计算模型的修改[J]. 振动工程学报, 1991, 4(4):38-47.(ZHANG Jinghui, NATKE H G. The parametric identification of complex dynamic structural models using modal transformation[J]. Journal of Vibration Engineering, 1991, 4(4):38-47. (in Chinese))
- [26] CANTIENI R, WIBERG U, PIETRZKO S, et al. Modal investigation of a dam[C]//Proceedings of the International Society for Optical Engineering. Santa Barbara: SPIE, 1998:1151-1157.
- [27] PROULX J, DARBRE G R, KAMILERIS N. Analytical and experimental investigation of damping in arch dams based on recorded earthquakes[C]//Proceedings of the 13th World Conference on Earthquake Engineering. Vancouver: IAEE, 2004:68.
- [28] ALVES S W, HALL J F. System identification of a concrete arch dam and calibration of its finite element model[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2006, 35(11):1321-1337.
- [29] TARINEJAD R, AHMADI M T, HARICHANDRAN R S. Full-scale experimental modal analysis of an arch dam; the first experience in Iran[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2014, 61-62:188-196.

- [30] GAURON O, BOIVIN Y, AMBROISE S, et al. Forced-vibration tests and numerical modeling of the Daniel-Johnson multiple-arch dam[J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2018, 32(2): 04017137.
- [31] DANIELL W E, TAYLOR C A. Effective ambient vibration testing for validating numerical models of concrete dams[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 1999, 28(11): 1327-1344.
- [32] SEVIM B, BAYRAKTAR A, ALTUNİŞİK A C. Finite element model calibration of Berke arch dam using operational modal testing[J]. Journal of Vibration and Control, 2011, 17(7): 1065-1079.
- [33] SEVIM B, ALTUNİŞİK A C, BAYRAKTAR A. Structural identification of concrete arch dams by ambient vibration tests[J]. Advances in Concrete Construction, 2013, 1(3): 227-237.
- [34] BUFFI G, MANCIOLA P, DE LORENZIS L, et al. Calibration of finite element models of concrete arch-gravity dams using dynamical measures: the case of Ridracoli[J]. Procedia Engineering, 2017, 199: 110-115.
- [35] 侯志英, 周天宇, 马宁, 等. 龙羊峡重力拱坝模态识别与材料参数反演[J]. 振动、测试与诊断, 2024, 44(4): 771-777. (HOU Zhiying, ZHOU Tianyu, MA Ning, et al. Modal parameter identification and inverse analysis of Longyangxia gravity arch dam[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2024, 44(4): 771-777. (in Chinese))
- [36] FOX R L, KAPOOR M P. Rates of change of eigenvalues and eigenvectors[J]. AIAA Journal, 1968, 6(12): 2426-2429.
- [37] NELSON R B. Simplified calculation of eigenvector derivatives[J]. AIAA Journal, 1976, 14(9): 1201-1205.
- [38] LIM K B, JUNKINS J L, WANG B P. Re-examination of eigenvector derivatives[J]. Journal of Guidance, Control and Dynamics, 1987, 10(6): 581-587.
- [39] CHEN J C, GARBA J A. Analytical model improvement using modal test results[J]. AIAA Journal, 1980, 18(6): 684-690.
- [40] KIM K O, ANDERSON W J, SANDSTROM R E. Nonlinear inverse perturbation method in dynamic analysis[J]. AIAA Journal, 1983, 21(9): 1310-1316.
- [41] MOTTERSHEAD J E, LINK M, FRISWELL M I. The sensitivity method in finite element model updating: a tutorial[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2011, 25(7): 2275-2296.
- [42] 韩建平, 董小军, 钱炯. 基于环境振动测试的钢筋混凝土渡槽空腹桁架拱有限元模型修正[J]. 兰州理工大学学报, 2009, 35(5): 122-125. (HAN Jianping, DONG Xiaojun, QIAN Jiong. Finite element model updating of arched Vierendeel truss of RC aqueduct based on ambient vibration test[J]. Journal of Lanzhou University of Technology, 2009, 35(5): 122-125. (in Chinese))
- [43] 吴思远, 王正中, 王岳, 等. 基于 Isight-MSC Patran/Nastran 联合仿真的弧形闸门动力模型修正[J]. 振动与冲击, 2018, 37(19): 62-68. (WU Siyuan, WANG Zhengzhong, WANG Yue, et al. Dynamic model updating for a radial gate based on simulation with Isight-MSC Patran/Nastran[J]. Journal of Vibration and Shock, 2018, 37(19): 62-68. (in Chinese))
- [44] 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))
- [45] 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))
- [46] 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))
- [47] 王海军, 练继建, 张社荣, 等. 基于 Morlet 小波变换和改进遗传算法的动态识别[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2009, 41(4): 193-196. (WANG Haijun, LIAN Jijian, ZHANG Sherong, et al. Dynamic identification based on Morlet wavelet transform and modified genetic algorithm[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2009, 41(4): 193-196. (in Chinese))
- [48] 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))
- [49] 丁晓唐, 王振兴, 赵辉. 考虑流固耦合的渡槽结构动力参数反演[J]. 水电能源科学, 2015, 33(5): 80-82. (DING Xiaotang, WANG Zhenxing, ZHAO Hui. Dynamic parametric inversion of aqueduct structure considering fluid solid coupling[J]. Water Resources and Power, 2015, 33(5): 80-82. (in Chinese))
- [50] GARCÍA-PALACIOS J H, SORIA J M, DÍAZ I M, et al. Ambient modal testing of a double-arch dam: the experimental campaign and model updating[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2016, 744: 012037.
- [51] WANG Maohua, CHI Shichun, LIU Zhenping. Dynamic parameters updating of earth-rock dams based on modal

- parameter identification [J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2023, 27(10): 4163-4175.
- [52] 吴西杰, 张龔, 尹进步, 等. 采用贝叶斯理论的渡槽结构有限元模型更新方法[J]. 水利水运工程学报, 2024(6): 148-156. (WU Xijie, ZHANG Yan, YIN Jinbu, et al. A finite element model updating method for aqueduct structures based on Bayesian theory [J]. Hydro-Science and Engineering, 2024(6): 148-156. (in Chinese))
- [53] 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))
- [54] 王朝辉, 贾宇峰, 迟世春. 基于粒子群算法的鲤鱼潭大坝坝料动参数反演[J]. 人民长江, 2016, 47(19): 96-101. (WANG Zhaohui, JIA Yufeng, CHI Shichun. Dynamic material parameter inversion of Liyutan earth dam based on particle swarm optimization [J]. Yangtze River, 2016, 47(19): 96-101. (in Chinese))
- [55] 张宏洋, 韩鹏举, 马聪, 等. 基于改进粒子群算法的土石坝动力参数反演研究[J]. 水利水电技术(中英文), 2023, 54(6): 110-123. (ZHANG Hongyang, HAN Pengju, MA Cong, et al. Research on back analysis of dynamic parameters of earth-rock dam based on improved particle swarm optimization algorithm [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2023, 54(6): 110-123. (in Chinese))
- [56] 刘振平, 迟世春, 赵显波, 等. 鲤鱼潭大坝坝料动力参数反演[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(4): 761-768. (LIU Zhenping, CHI Shichun, ZHAO Xianbo, et al. Back analysis of dynamic parameters of Liyutan dam materials [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37(4): 761-768. (in Chinese))
- [57] FANG Zheng, SU Huaizhi, WEN Zhiping. Joint back-analysis for dynamic material parameters of concrete dam based on time-frequency domain information [J]. Structural Control and Health Monitoring, 2019, 26(9): e2385.
- [58] 冯亚新, 江兆强, 孙一清, 等. 基于改进响应面的邓肯-张 E-B 模型参数全局敏感性分析[J]. 水利水电科技进展, 2023, 43(2): 44-50. (FENG Yaxin, JIANG Zhaoqiang, SUN Yiqing, et al. Global sensitivity analysis of parameters in Duncan-Chang E-B model based on improved response surface [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2023, 43(2): 44-50. (in Chinese))
- [59] 张建伟, 温嘉琦, 赵瑜, 等. 信息融合与响应面联合的渡槽结构模型修正[J]. 振动、测试与诊断, 2018, 38(6): 1130-1137. (ZHANG Jianwei, WEN Jiaqi, ZHAO Yu, et al. Finite element model updating of aqueduct structure based on information fusion and RSM [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2018, 38(6): 1130-1137. (in Chinese))
- [60] 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.
- [61] 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. (LI Huokun, WANG Gang, WEI Bowen, et al. Inversion of prototype dynamic elastic modulus of arch dam based on sensitivity analysis and particle swarm optimization [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2020, 51(11): 1401-1411. (in Chinese))
- [62] 宋固全, 廖群, 张纯, 等. 基于响应面理论的高拱坝模型修正损伤识别研究[J]. 水力发电学报, 2016, 35(9): 87-94. (SONG Guquan, LIAO Qun, ZHANG Chun, et al. Model updating method for damage identification of high dam based on response surface theory [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2016, 35(9): 87-94. (in Chinese))
- [63] 李火坤, 余杰, 王刚, 等. 软基水闸底板脱空动力学反演模型构建与试验验证[J]. 农业工程学报, 2020, 36(21): 145-153. (LI Huokun, YU Jie, WANG Gang, et al. Model construction of dynamic inversion and experimental verification for the void of sluice floor on the soft foundation [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 36(21): 145-153. (in Chinese))
- [64] 邓苗毅, 任伟新. 基于响应面方法的结构有限元模型修正研究进展[J]. 铁道科学与工程学报, 2008, 5(3): 42-45. (DENG Miaoyi, REN Weixin. Study on structure finite element model updating based on response surface methodology [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2008, 5(3): 42-45. (in Chinese))
- [65] 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))
- [66] SEVIERI G, DE FALCO A. Concrete gravity dams FE models parameters updating using ambient vibrations [C]//Proceedings of the 3rd ECCOMAS Thematic Conference on Uncertainty Quantification in Computational Sciences and Engineering. Crete: ECCOMAS, 2019: 286-297.
- [67] 王茂华, 迟世春, 相彪, 等. 弱震情况下高土石坝坝料动力参数反演分析[J]. 岩土工程学报, 2020, 42(2): 289-

298. (WANG Maohua, CHI Shichun, XIANG Biao, et al. Back analysis of dynamic parameters of high earth-rock dam materials under weak earthquakes [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, 42 (2): 289-298. (in Chinese))
- [68] WANG Maohua, CHI Shichun, XIE Yunfei, et al. Dynamic parameters inversion analysis of rockfill materials considering interaction effects based on weak earthquakes [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2020, 130:105968.
- [69] KANG Fei, WU Yingrui, LI Junjie, et al. Dynamic parameter inverse analysis of concrete dams based on Jaya algorithm with Gaussian processes surrogate model [J]. Advanced Engineering Informatics, 2021, 49:101348.
- [70] LIU Yijia, LU Wenbo, WANG Gaohui, et al. Structural parameter inversion of a gravity dam based on the dynamic response induced by an underwater explosion [J]. Journal of Vibration and Control, 2023, 29(7/8): 1577-1589.
- [71] WU Yingrui, KANG Fei, ZHANG Yantan, et al. Structural identification of concrete dams with ambient vibration based on surrogate-assisted multi-objective salp swarm algorithm [J]. Structures, 2024, 60:105956.
- [72] LI Yifei, HARIRI-ARDEBILI M A, DENG Tongfa, et al. A surrogate-assisted stochastic optimization inversion algorithm: parameter identification of dams [J]. Advanced Engineering Informatics, 2023, 55:101853.
- [73] LI Yifei, CAO Maosen, HOA T N, et al. Metamodel-assisted hybrid optimization strategy for model updating using vibration response data [J]. Advances in Engineering Software, 2023, 185:103515.
- [74] 李火坤, 王刚, 余杰, 等. 基于模态参数及 BAS-PSO 优化算法的软基水闸有限元模型参数修正方法 [J]. 工程力学, 2021, 38(9): 246-256. (LI Huokun, WANG Gang, YU Jie, et al. Finite element model parameter updating of sluices on a soft foundation based on modal parameters and BAS-PSO optimization algorithm [J]. Engineering Mechanics, 2021, 38(9): 246-256. (in Chinese))
- [75] WANG Gang, LI Huokun, LIU Bo, et al. A novel dynamic model parameter updating methodology of a sluice based on vibration response [J]. Structures, 2023, 55:215-230.
- [76] LI Yifei, MINH H L, CAO Maosen, et al. An integrated surrogate model-driven and improved termite life cycle optimizer for damage identification in dams [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2024, 208: 110986.
- [77] 马建婷, 康飞, 姜成磊, 等. 高拱坝参数反演的 Jaya-高斯过程回归模型 [J]. 水利水电科技进展, 2022, 42 (4): 74-79. (MA Jianting, KANG Fei, JIANG Chenglei, et al. Jaya-Gaussian process regression model for parameter inversion of high arch dams [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2022, 42(4): 74-79. (in Chinese))
- [78] EREIZ S, DUVNJAK I, JIMÉNEZ-ALONSO J F. Review of finite element model updating methods for structural applications [J]. Structures, 2022, 41:684-723.
- [79] KE Qin, LI Mingchao, REN Qiubing, et al. Rockfill material uncertainty inversion analysis of concrete-faced rockfill dams using stacking ensemble strategy and Jaya optimizer [J]. Water Science and Engineering, 2023, 16 (4): 419-428.
- [80] LIU Bo, LI Huokun, WANG Gang, et al. Dynamic material parameter inversion of high arch dam under discharge excitation based on the modal parameters and Bayesian optimised deep learning [J]. Advanced Engineering Informatics, 2023, 56:102016.
- [81] LUO Danni, MO Haixing, LI Qingbin, et al. Solution of stress and deformation field and inversion of material parameter for gravity dams based on physics-informed neural networks [J]. Journal of Computational Science, 2025, 89:102613.
- [82] PARK H S, OH B K. CNN-based model updating for structures by direct use of dynamic structural response measurements [J]. Engineering Structures, 2024, 307: 117880.
- [83] BRUNO G, PARISI F, RUGGIERI S, et al. An intelligent agent-based method for model updating of structures with multiple uncertain parameters via deep reinforcement learning [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2025, 234:112832.
- [84] 何宇轩, 尹涛, 王曦. 有限元模型修正中的贝叶斯深度神经网络构架优化设计 [J]. 振动与冲击, 2025, 44 (6): 184-190. (HE Yuxuan, YIN Tao, WANG Xi. Architecture design of the Bayesian deep neural network in structural model updating [J]. Journal of Vibration and Shock, 2025, 44(6): 184-190. (in Chinese))
- [85] WANG Tairan, BI Sifeng, ZHAO Yanlin, et al. Data-driven stochastic model updating and damage detection with deep generative model [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2025, 232:112743.
- [86] XIE Kaizhong, LIANG Dong, QIN Yue, et al. Method for identifying boundary conditions of CFST arches using physically enhanced machine learning [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2024, 213:111335.

(收稿日期: 2025-06-29 编辑: 俞云利)