

基于分数阶模式的高拱坝变形安全监控研究构想

杨光^{1,2}, 顾昊¹, 刘尚蔚², 包腾飞¹, 孙锦³, 栾博文²

(1. 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210098;
2. 华北水利水电大学水利学院, 河南 郑州 450046;
3. 华北水利水电大学测绘与地理信息学院, 河南 郑州 450046)

摘要:为科学监控服役过程中高拱坝的变形安全,基于高拱坝结构特性和服役特点,在分析分数阶元件模型、混凝土坝物理力学参数反演、混凝土坝变形安全监控发展动态的基础上,依据分数阶建模理论,提出了一种高拱坝变形安全监控研究思路与构想:围绕高拱坝变形性态分数阶数值模拟以及基于分数阶模式的单测点和测点群变形安全监控这两个互相关联的科学问题,沿着“分数阶元件模型→物理力学参数反演→单测点变形安全监控→测点群变形安全监控”的研究主线,遵循“基础到深入、简单到复杂、现象到本质、理论到应用、局部到整体、一维到多维”的原则开展研究。为实现研究构想,重点需攻克三维高应力状态下高拱坝加速流变效应分数阶元件模型、分数阶元件模型弹性和黏弹性物理力学参数反演,以及高拱坝时效变形分数阶分析模型这3个关键的科学技术问题。

关键词:分数阶模式;高拱坝;变形性态;安全监控;数值模拟;参数反演

中图分类号:TV698.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2022)05-0085-09

Research proposal for deformation safety monitoring of high arch dams based on fractional-order modeling theory//YANG Guang^{1,2}, GU Hao¹, LIU Shangwei², BAO Tengfei¹, SUN Jin³, LUAN Bowen²(1. *State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China*; 2. *School of Water Conservancy, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450046, China*; 3. *College of Surveying and Geo-informatics, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450046, China*)

Abstract: Considering the structural characteristics and operation characteristics of high-arch dams, and based on the shortcomings of existing research in the aspects of fractional-order element models, physical and mechanical parameter inversion of concrete dams, and deformation safety monitoring development of concrete dams, a research proposal is developed based on the fractional-order modeling theory to scientifically monitor the deformation behavior of high arch dams in operating conditions. Fractional-order numerical simulation of deformation characteristics of high arch dams and fractional-order model-based deformation safety monitoring approaches of single observation point and observation point group are two interrelated scientific problems of the research proposal. The main research process is as follows, fractional element model construction, physical and mechanical parameter inversion, deformation monitoring of single observation point, deformation monitoring of observation point group. Basic to in-depth, simple to complex, phenomenon to essence, theory to application, local to whole, one-dimensional to multidimensional are the research principles. Three key scientific and technical problems should be solved to realize the research proposal, which are fractional-order element model of accelerated rheology of high arch dams in three-dimensional high stress state, elastic and viscoelastic parameter inversion of fractional element model, and fractional-order analysis model of time-dependent deformation of high arch dams.

Key words: fractional-order modeling; high arch dam; deformation behavior; safety monitoring; numerical simulation; parameter inversion

我国是世界上高坝数量最多的国家,预计在未 来一段时间内,全球规划坝高超过 200 m 的高坝中,

基金项目:国家自然科学基金(52109155);水文水资源与水利工程科学国家重点实验室“一带一路”水与可持续发展科技基金(2019492211);华北水利水电大学高层次人才启动项目(202005002)

作者简介:杨光(1989—),男,讲师,博士,主要从事水工结构安全监控研究。E-mail: yangguanghhu@outlook.com

通信作者:顾昊(1990—),男,讲师,博士,主要从事水工结构安全监控研究。E-mail: ghao@hhu.edu.cn

我国建设数目将超过总数的 50%^[14]。拱坝是一种超静定的空间壳体结构,超载能力可达设计荷载的 5~11 倍,相同坝址处,若坝高相同,拱坝体积一般仅为重力坝的 1/5~1/2,因此,拱坝以其突出的安全性和经济性,在高坝建设中备受青睐^[56]。

拱坝安全历来被广泛关注,尤其对于高拱坝,一旦失事,将造成灾难性的后果,更是被赋予了极高的要求。变形是拱坝结构性态演变的直观反映,亦是衡量结构安全与否的重要指标^[6]。有效地分析和监控拱坝变形性态,采取合理的控制措施,对确保工程安全意义重大。随着我国水电开发事业的深入推进,一批高拱坝已建成投产,这些高坝大库集中于雅砻江、澜沧江、金沙江、大渡河等大江大河上,呈现出流域梯级高坝群分布特点,山高谷深,地形和地质条件复杂,工程安全受高库水推力、高应力水平、深层断裂等诸多因素制约,工程规模与技术难度在不少方面均超出了现行设计规范和以往的认知。原位监测资料显示,高拱坝的变形规律不同于中低拱坝。例如:在外荷载的持续作用下,高拱坝呈现出复杂的时效变形^[7-8],在蓄水初期尤为显著,较大的时效变形将引起拱坝结构性态的调整;在蓄水阶段,库盘在库水压力的作用下发生沉降变形,进而导致近坝区岩体的牵连下沉,而上下游的沉量差将使建基面向上游倾斜,带动高拱坝向上游变形^[9-11];水库蓄水后,河谷谷幅缩窄,高拱坝受到挤压后弦长变短,出现向上游的变形^[12-15],原有的受力-变形体系发生改变。我国的锦屏一级、溪洛渡等高拱坝工程均发生了上述变形现象,坝体的徐变效应、近坝区及库盘岩体的蠕变效应(两者统称为流变效应)是重要的诱发因素。

随着电子计算机性能的提升,数值模拟被应用于高拱坝变形性态分析中,一定程度上解释了变形变化的驱动机制。纵观已有研究成果,流变效应表征是制约高拱坝变形性态数值模拟客观性的重要因素。在众多流变力学模型中,元件模型因使用简单且物理意义较为明确,在工程中得到了广泛的应用。经典元件模型基于整数阶微积分理论构建,虽然已被广泛应用于实际工程中,但自身仍存在一定缺陷,例如,为较好地拟合流变试验结果,整数阶元件模型所需参数较多,且 Newton 黏壶仅描述了线性流变过程。因此,整数阶元件模型难以有效表征高拱坝复杂的流变效应。分数阶微积分是研究运算阶次为分数的微积分理论,是常规整数阶微积分的推广^[16],已被成功应用于诸多领域,其相对于整数阶微积分的优势也逐渐被发掘。基于分数阶微积分建立的元件模型不仅保留了整数阶元件模型的优点,而且可描述宽频范围内的非线性流变力学关系。因此,依

据分数阶模式,探究科学的高拱坝变形性态数值模拟技术,在此基础上,结合现代力学、数学和坝工知识,研究高拱坝变形安全监控方法,具有重要的理论意义和实践价值。

本文在分析高拱坝服役特点和流变特性的基础上,重点评述分数阶元件模型、混凝土坝物理力学参数反演、混凝土坝变形安全监控的发展动态,在此基础上,提出基于分数阶模式的高拱坝变形安全监控研究主线,提炼需要着重解决的关键科学问题。

1 高拱坝的结构特性和服役特点

与中低拱坝相比,高拱坝的结构特性可总结为:①结构刚度较低^[17]。高拱坝结构高、跨度大,相对于中低拱坝整体刚度较低,而应力水平却较高,材料潜能已基本利用充分,一旦局部开裂,更容易向整体失稳极限状态演化。②空间关联性明显^[17]。高拱坝上部单薄,受坝基和岸坡约束较小,柔度大,尤其是高悬臂梁顶和大跨径拱圈中部,容易出现空间关联性变化。③失稳过程渐变^[18]。高拱坝失稳是一个渐变过程,可分为线弹性变形阶段、准线弹性变形阶段、局部屈服变形阶段以及破坏阶段。

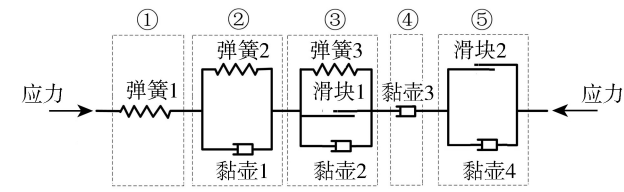
通过类比分析典型工程,高拱坝的服役特点可归纳为:①地形情况多样。两岸坝肩一般为高出坝顶数百米的陡峭边坡,河谷有 V 形有 U 形,亦分“对称”和“非对称”两种^[19]。②地质构造复杂,坝基内广泛存在软弱岩带、断层破碎带、软弱夹层等地质缺陷^[19]。③库水推力大^[19]。统计表明,我国坝高大于 250 m 拱坝的平均库水推力达到 1 280 万 t,是国外同类大坝的 2.35 倍,如锦屏一级约为 1 280 万 t,小湾约 1 700 万 t,溪洛渡约 1 300 万 t。④应力水平高,压应力安全储备较低^[20]。坝高超过 200 m 拱坝的最大压应力可达 9.00~11.00 MPa^[20],小湾拱坝最大压应力为 10.37 MPa,拉应力最大值达 1.18 MPa。⑤渗透水压力高。高渗透水压力会引起大坝材料物理力学性能下降,特别是地质缺陷体的内部填充物或细颗粒,易被渗透水流带走^[21]。此外,在高渗透水压力的作用下,上游表面裂缝易发展为劈头缝^[22],导致结构刚度降低,同时也形成了渗透通道,使冻融和渗透溶蚀等环境侵蚀作用加剧。⑥互馈作用显著^[11-15]。高拱坝坝体、近坝区和库盘是整体的受力-变形体系,近坝区和库盘的变形对坝体结构性态有较大影响,导致库盘沉降、谷幅缩窄,同时,坝体承受的荷载通过水平拱和悬臂梁传到岸坡和基岩,也一定程度上影响了近坝区和库盘的服役性态。⑦高陡边坡稳定性、坝体温度裂缝、强震损伤、高速水流等也是我国高拱坝安全服役面临的较

为突出的问题^[23]。

2 研究现状

2.1 分数阶元件模型

整数阶元件模型采用弹簧、Newton 黏壶和滑块的串并联组合,表征弹性、塑性、黏弹性以及黏塑性^[24]。由 3 种力学元件可组合成 5 种整数阶基本元件模型,分别称之为 Hooke 体、Kelvin 体、村山体、Newton 体和 Bingham 体,如图 1 所示。将 5 种整数阶基本元件模型串联组合,可以得到 15 种整数阶元件模型。实际上,仅由整数阶基本元件串联而成的模型,无论构型如何复杂,均不能表征加速流变过程。为描述加速流变过程,需将黏塑性元件 (Bingham 体) 进行改进,目前常用的改进方法可归结为三类:①黏滞系数随时间 (或应力水平) 变化;②屈服应力随时间 (或应力水平) 变化;③两者均随时间 (或应力水平) 变化。



①Hooke 体;②Kelvin 体;③村山体;④Newton 体;⑤Bingham 体

图 1 整数阶基本元件模型

分数阶微积分是研究运算阶次为分数的微积分理论,常用的 3 种定义方法包括:Riemann-Liouville (R-L) 定义、Caputo (C) 定义和 Grunwald-Letnikov (G-L) 定义。从本质来看,分数阶微积分是整数阶微积分向阶数为分数的推广,当分数阶微积分的阶次 $\alpha \in N$ 时,两者是一致的,并且由于分数阶微积分自身的特点,决定其与过去的历史信息相关,即分数阶微积分的记忆功能,而整数阶微积分则不具备记忆功能。近年来,一些学者引入分数阶微积分理论,建立了分数阶元件模型。唐皓等^[25]考虑岩石残余强度,建立了损伤变量修正系数,并引入到分数阶 Kelvin 模型中,实现了加速流变过程的模拟;刘忠玉等^[26]基于 Caputo 型分数阶导数,修正了 Kelvin 模型,描述了饱和黏土的一维流变本构关系;Liao 等^[27]针对冻土蠕变特性,构建了分数阶元件模型,通过试验验证了模型的有效性;Khajehsaeid^[28]结合流变试验,发现分数阶模型对试验数据的拟合效果优于整数阶模型;Colombaro 等^[29]应用 Caputo 型分数阶导数,建立了分数阶 Scott-Blair 模型;Sun 等^[30]运用分数阶微积分,针对珊瑚砂的蠕变特性,建立了分数阶元件模型;苏腾等^[31]将分数阶 Scott-Blair 模型和变系数分数阶元件相融合,较好地描述了岩体

的非线性蠕变行为;杨光^[32]探究了衰减、稳态以及加速流变的分数阶表征方法,构建了高拱坝坝体和近坝区分数阶元件模型;黄明华等^[33]推导了分数阶 Merchant 模型的柔度函数,给出了地基中洞周超孔隙水压力的分数阶黏弹性解答;李德建等^[34]基于 Zener 模型,建立了与弛豫时间相关的变阶分数阶元件模型。

总体来看,相比整数阶元件模型,分数阶元件模型存在如下优势:①分数阶微积分的阶次是连续的,更适用于描述具有记忆及时间依赖性的流变现象。②求导阶次表征了软物质流变过程中硬化作用与恢复作用的强弱关系,阶次越高,恢复作用越明显;阶次越低,硬化作用越显著。③分数阶元件模型既能描述 Hooke 体和 Newton 体的力学性质,亦可刻画介于两者之间的非线性黏性关系,表征范围更宽泛。④由于分数阶微积分阶次连续,分数阶元件模型更有利于模拟加速流变过程。⑤分数阶元件模型可在参数较少且构型简单的前提下,实现对流变全过程更优的表征。现有关于分数阶元件模型的研究集中于流变试验分析,一维应力状态模型较多。实际运行过程中,高拱坝坝体、近坝区和库盘均处于三维应力状态,然而,目前关于三维模型的研究却较少,尤其是三维高应力状态下表征加速流变效应的分数阶元件模型更少。因此,基于分数阶建模理论,研究三维应力状态下高拱坝坝体、近坝区及库盘分数阶元件模型的构建方法,进而实现高拱坝变形性态分数阶数值模拟,尚需展开深入的研究和探讨。

2.2 混凝土坝物理力学参数反演

物理力学参数对高拱坝变形性态数值模拟结果的准确性影响较大,因此,需客观确定模型参数的真实值。运用已有资料,反推混凝土坝的物理力学参数,称为参数反演分析。Liu 等^[35]借助有限元、无约束拉格朗日支持向量机和文化遗传算法,提出了高拱坝坝体综合弹性模量和坝基综合变形模量的分区反演方法;何志磊等^[36]基于分数阶微积分理论,建立了非定常分数阶元件模型,分析了模型参数对蠕变效应的影响;Jaroslav 等^[37]建立了广义分数阶黏弹性模型,剖析了参数取值对流变效应的影响;王少伟等^[38]利用现场位移监测数据和坝体混凝土徐变试验数据,对拱坝黏弹性工作状态进行了反演分析;张杰等^[39]建立了分数阶 Kelvin 模型,利用流变试验数据,反演出模型参数;魏博文等^[40]综合应用粗糙集与神经网络,结合变形原位监测资料,建立了具备区间参数反演功能的混凝土坝变形混合模型;Huang 等^[41]将分数阶微积分引入广义 Kelvin 模型中,建立了考虑水化程度的混凝土分数阶徐变模型,

反演了模型物理力学参数;于怀昌等^[42]构建了分数阶 Poynting-Thomson 模型,结合嵌入 Levenberg-Marquardt 算法的非线性最小二乘法(LM-NLSF),实现了物理力学参数反演;宋勇军等^[43]建立了考虑低温影响的分数阶元件模型,结合通用全局优化算法和 Levenberg-Marquardt 算法,反演出模型参数。通过上述分析可知,实际工程中一般采用数值模拟与智能寻优相结合的优化反演技术,即将参数反演转化为搜索目标函数的全局最优解,具体可归结为两条途径,即试验资料反演和原位监测资料反演。归纳已有研究成果,关于分数阶元件模型物理力学参数的反演方法相对较少,且集中于流变试验资料反演。在运行阶段,高拱坝的物理力学参数常与设计、试验值存在较大差异,仅利用试验资料是不够的,将流变试验和变形原位监测相集成,可更为客观地确定物理力学参数。高拱坝服役过程中处于弹性或黏弹性状态,特殊情况下可能处于黏塑性状态,因此,借助流变试验资料,可反演出黏塑性参数,并初步获取弹性和黏弹性参数。在此基础上,可依据变形原位监测资料,实现对弹性和黏弹性参数的反演。综上,为确保高拱坝变形性态分数阶数值模拟的客观性,需要综合利用流变试验和变形原位监测资料,提出高拱坝坝体、近坝区及库盘分数阶元件模型物理力学参数反演方法。

2.3 混凝土坝变形安全监控

运用原位监测资料,开展混凝土坝变形性态的跟踪监控与安全预报,是确保工程安全服役的重要手段。Chen 等^[44]应用径向基(RBF)神经网络和核主成分分析(KPCA)理论,构建了高混凝土坝变形安全监控模型;Su 等^[45-46]使用相空间重构、小波支持向量机和改进的粒子群寻优算法,提出了一种变形监控模型复合建模技术,同时建立了考虑时变因素影响的碾压混凝土拱坝变形监控模型;李明超等^[47]提出了大坝变形交互式时变预测模型,有效完成了大坝变形预测优化循环过程;胡德秀等^[48]借助稳健估计理论和极限学习机,建立了大坝变形安全监控模型;Lin 等^[49]基于高斯过程回归,构建了大坝变形预测模型;李明超等^[50]综合考虑因子相关性、动态因果关系和序列相似性,建立了兼顾相关性和相似性的大坝变形动态监控模型;王继敏等^[51]建立了变截距面板监控模型,分析了锦屏一级拱坝的变形规律;Wang 等^[52]应用空间聚类理论和主成分分析方法,提出了一种高拱坝变形安全监控模型建模方法;牛景太^[53]提出了基于奇异谱分析与粒子群优化支持向量机的混凝土坝变形监控模型;任秋兵等^[54]从前端处理、网络结构和外延预测 3 个方面出

发,提出了适用于不同类型水工建筑物的安全监控优化深度模型;Yang 等^[55]应用弹性有限单元法,模拟了结构形式、地形、地质和高库水压力协同作用下高拱坝的变形效应,并预测了大坝变形发展规律。

由以上分析可知,关于混凝土坝变形安全监控模型的研究已取得了长足进展,现代数学、人工智能等前沿理论和技术已被成功应用,多维数据建模、复合建模等新理念也相继被提出。总体来看,统计模型、混合模型和确定性模型是 3 种基本监控手段,其中,统计模型属于经验模式的范畴,建模较简单,而混合模型和确定性模型则不同程度结合了大坝的结构特点及荷载状况,模型的精度、稳健性和外延性比统计模式均有所提高,确定性模型的精度最高,但受制于数值模拟技术;此外,现有模型大多基于单测点变形建立,对变形空间分布、各部位变形间相互影响等隐含特征的考虑欠缺,高拱坝是典型的空壳结构,单点变形行为不足以真实反映高拱坝服役过程中的结构性态变化,隐含特征包含有高价值状态信息,而现有研究涉及较少。

受到边界约束、地质条件、材料性质、荷载的综合影响,高拱坝变形变化规律呈现出群体相似特征,相比于单测点,测点群变形性态更能如实反映结构的运行状态。一些学者考虑群体变形相似特征,建立了变形安全监控模型^[56-58],尽管取得了一定进展,但仍存在如下不足:①将测点群内个体变形统一解释为水压、温变和时效分量(HST),未刻画边界约束等因素的影响,这些因素对个体变形的作用效应存在一定差异,难以理论表征;②现有时效变形分析模型多采用经验构型,例如指数函数、双曲函数、多项式,无法有效表征高拱坝复杂的时效变形规律;③与 HST 配套使用的置信区间准则^[55]依据典型小概率原理建立,仅可辨识出单测点的异常变形。因此,为有效地监控高拱坝变形安全,依据分数阶模式,建立科学的高拱坝时效变形分析模型,并以此为基础,针对单测点和测点群,提出适用于高拱坝的变形安全监控模型构建方法,需重点研究和解决。

3 研究思想与构想

基于分数阶模式的高拱坝变形安全监控研究将围绕“高拱坝变形性态分数阶数值模拟”和“基于分数阶模式的单测点和测点群变形安全监控”这两个互相关联的科学问题,沿着“分数阶元件模型构建→物理力学参数反演→单测点变形安全监控→测点群变形安全监控”的主线,遵循“基础到深入、简单到复杂、现象到本质、理论到应用、局部到整体、一维到多维”的原则开展研究,其技术路线如图 2 所示。

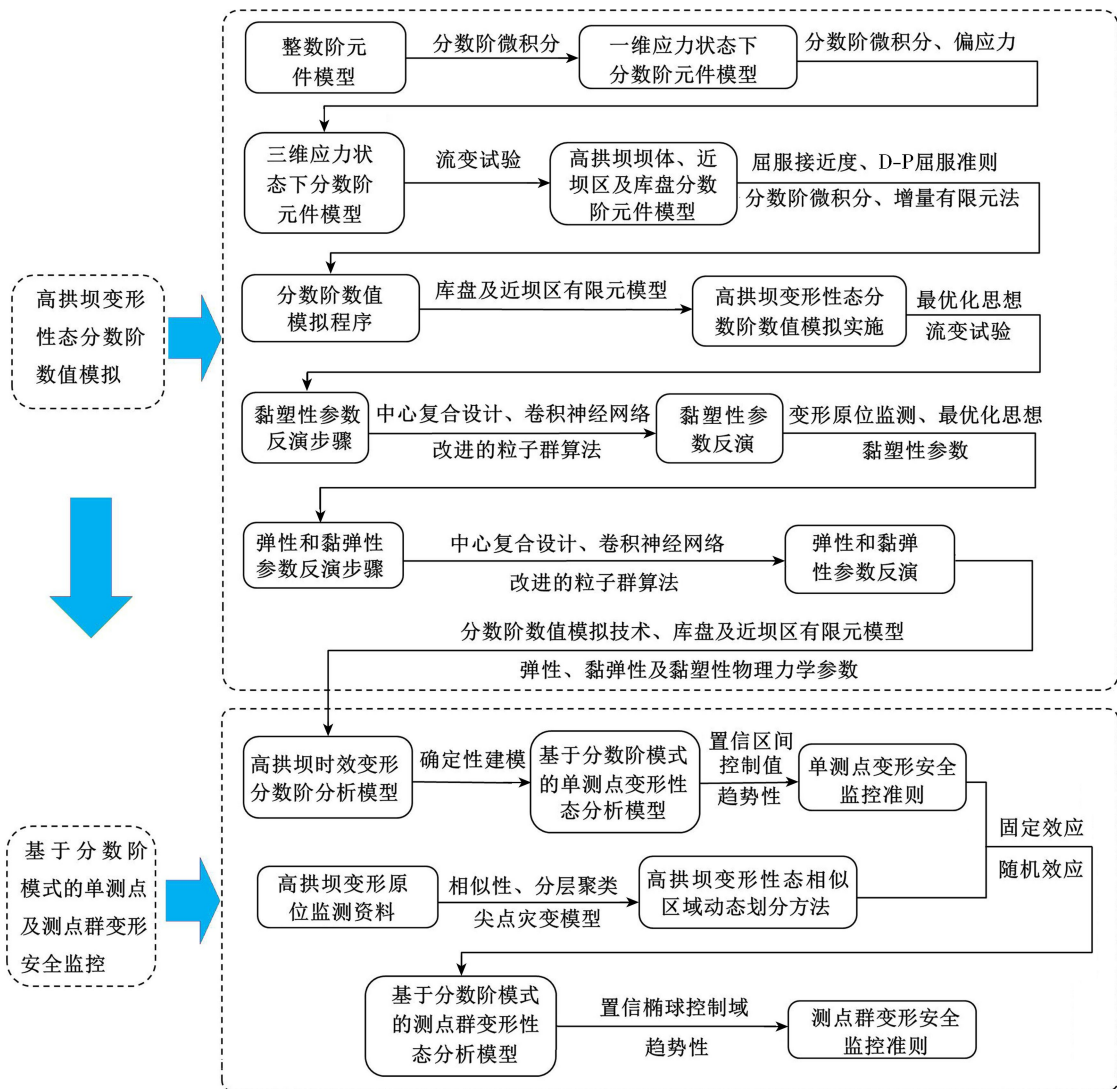


图2 基于分数阶模式的高拱坝变形安全监控研究技术路线

3.1 高拱坝变形性态分数阶数值模拟

3.1.1 分数阶元件模型

a. 一维应力状态下流变效应全过程的分数阶元件模型。通过对高拱坝流变效应特征及整数阶元件模型建模原理的探究,应用分数阶微积分理论,推导分数阶 Kelvin 体、分数阶村山体 and 分数阶 Bingham 体的应力-应变关系,以刻画衰减和稳态流变效应;通过搭建分数阶 Bingham 体黏滞系数随时间的衰减关系,建立变黏滞系数分数阶 Bingham 体,用于描述加速流变效应;以上述研究为基础,建立表征一维应力状态下流变效应全过程的分数阶元件模型。

b. 高拱坝坝体、近坝区及库盘分数阶元件模型。依据分数阶微积分理论,针对偏应力,推导三维应力状态下分数阶 Kelvin 体、分数阶村山体、分数阶 Bingham 体、变黏滞系数分数阶 Bingham 体的应力-应变关系;以上述研究为基础,通过对流变特性的辨识,建立高拱坝坝体、近坝区及库盘分数阶元件模型。

c. 分数阶数值模拟实施方法。融合 Drucker-

Prager 屈服准则和屈服接近度,构建流变效应各阶段的分段应力阈值准则;运用增量有限元法和分数阶微积分运算,搭建分数阶 Kelvin 体、分数阶村山体、分数阶 Bingham 体和变黏滞系数分数阶 Bingham 体黏性应变增量与时间增量的数学关系;以上述研究为基础,开发分数阶数值模拟程序,开展高拱坝坝体-近坝区-库盘变形性态分数阶数值模拟,具体步骤为:①模拟库盘大范围变形规律;②以库盘变形为边界条件,施加于近坝区有限元模型;③模拟近坝区和坝体的变形性态。

3.1.2 分数阶元件模型物理力学参数反演

a. 黏塑性物理力学参数反演目标函数。以流变试验与分数阶数值模拟无限接近为最优化目标,搭建黏塑性参数反演目标函数,步骤为:①利用衰减流变试验资料,构造 Hooke 体弹性参数和分数阶 Kelvin 体(或分数阶村山体)黏弹性参数的反演目标函数;②应用稳态流变试验资料,构建分数阶 Bingham 体黏塑性参数的反演目标函数;③结合加

速流变试验资料,建立变黏滞系数分数阶 Bingham 体黏塑性参数的反演目标函数。

b. 黏塑性物理力学参数反演。具体步骤为:①借助中心复合设计,优化获取待反演参数的样本组合;②利用分数阶数值模拟技术,计算不同参数组合下的应变值;③运用卷积神经网络,构建待反演参数与应变计算值间的非线性映射关系;④引入随机惯性权重和异步变化学习因子,并改进粒子群寻优算法,实现对反演目标函数全局最优值的搜索,反演出黏塑性参数,并初步获取弹性和黏弹性参数。

c. 弹性物理力学参数反演目标函数。以水压变形与分数阶数值模拟结果无限接近为最优化目标,遵循库盘→近坝区→坝体的顺序,构建弹性参数反演目标函数,具体为:①由库盘沉降资料中分离出变形水压分量,构建库盘弹性参数的反演目标函数;②利用建基面附近测点变形监测资料,分离出水压变形,建立近坝区弹性参数的反演目标函数;③应用坝体变形监测资料,分离变形水压分量,构造坝体弹性参数的反演目标函数。

d. 弹性物理力学参数反演。具体步骤为:①利用中心复合设计和初步的弹性参数,优化设计待反演弹性参数的样本组合;②运用分数阶数值模拟,计算不同弹性参数组合下的水压变形;③应用卷积神经网络,构建待反演弹性参数与水压变形计算值间的非线性映射关系;④结合改进的粒子群寻优算法,实现弹性物理力学参数的优化反演。

e. 黏弹性物理力学参数反演目标函数。以测点变形监测过程与分数阶数值模拟结果无限接近为最优化目标,按照库盘→近坝区→坝体的顺序,构建弹性参数反演目标函数,具体为:①依据库盘沉降变形监测资料,创建库盘黏弹性参数的反演目标函数;②利用建基面附近测点变形监测资料,构建近坝区黏弹性参数的反演目标函数;③应用坝体变形监测资料,构造坝体黏弹性参数的反演目标函数。

f. 黏弹性物理力学参数反演。具体步骤为:①运用中心复合设计和初步的黏弹性参数,优化设计待反演黏弹性参数的样本组合;②应用分数阶数值模拟,针对时段内的荷载情况,模拟不同参数组合下的变形过程;③利用卷积神经网络,确定待反演黏弹性参数与变形过程模拟结果的非线性映射关系;④结合改进的粒子群寻优算法,优化反演黏弹性物理力学参数。

3.2 基于分数阶模式的单测点和测点群变形安全监控

3.2.1 单测点变形安全监控

a. 高拱坝时效变形分数阶分析模型。以典型

高拱坝工程为例,结合原位监测资料,借助工程类比分析方法,定性分析库盘及近坝区变形对高拱坝变形性态的影响;依据分数阶数值模拟和反演的物理力学参数,应用库盘大范围有限元模型,模拟库盘变形变化规律,以库盘变形作为约束条件,施加于近坝区精细化有限元模型,模拟库盘及近坝区流变对高拱坝变形性态的作用效应;在此基础上,提出高拱坝时效变形分数阶分析模型的构建方法。

b. 单测点变形性态分析模型。借助确定性建模原理,利用分数阶数值模拟,构建高拱坝水压变形和温变变形分析模型;在此基础上,结合高拱坝时效变形分数阶分析模型,建立基于分数阶模式的单测点变形性态分析模型。

c. 单测点变形安全监控准则。利用置信区间法,构建高拱坝单测点变形变化的控制值;以此为基础,考虑时效变形趋势性,建立高拱坝单测点变形性态正常、基本正常、轻度异常、重度异常和恶性异常的 5 级安全监控准则。

3.2.2 测点群变形安全监控

a. 高拱坝变形性态相似区域动态划分。综合考虑绝对特征、增量特征和增速特征,依据 Euclidean 距离,建立单测点变形变化相似指标,结合 Average-link 距离,构建测点群变形变化相似指标;在此基础上,借助分层聚类方法,提出高拱坝变形变化相似区域动态划分的递进策略,并利用尖点灾变模型确定最优分区方案。

b. 测点群变形性态分析模型。以变形变化特征相似的测点群为研究对象,引入固定效应和随机效应,表征测点群内个体变形变化的差异效应;在此基础上,结合单测点变形性态分析模型,借助面板数据建模理论,提出基于分数阶模式的高拱坝测点群变形性态分析模型构建方法。

c. 测点群变形安全监控准则。依据置信椭圆原理,建立测点群变形变化控制域;在此基础上,考虑时效变形的趋势性,建立高拱坝测点群变形性态正常、基本正常、轻度异常、重度异常和恶性异常的 5 级安全监控准则。

d. 模型参数估计与有效性评定。应用 Housman 检验方法,采用固定效应或随机效应构型进行决策,在此基础上,运用广义最小二乘法估计监控模型参数,从总体拟合优度和变量重要性两个角度评价监控模型的有效性。

3.3 需解决的关键科学问题

a. 基于分数阶微积分和整数阶元件模型建模原理,研究并提出适用于刻画三维高应力状态下高拱坝加速流变效应的分数阶元件模型,此为保障高

拱坝流变效应全过程模拟客观性的前提。

b. 综合利用流变试验和变形原位监测资料,探究高拱坝坝体、近坝区和库盘的分阶元件模型弹性和黏弹性物理力学参数的反演方法,此为确保高拱坝变形性态分阶数值模拟有效性的基础。

c. 依据分阶数值模拟,分析库盘和近坝区流变对高拱坝变形性态的作用效应,据此构建高拱坝时效变形分阶分析模型,此为基于分阶模式的单测点及测点群变形安全监控模型的核心。

4 结 语

分阶元件模型相比于整数阶模型存在以下优势:①适用于描述具有记忆及时间依赖性的流变现象;②求导阶次表征了软物质流变过程中硬化作用与恢复作用的强弱关系,物理意义更明确;③既能描述 Hooke 体和 Newton 体的力学性质,亦可刻画介于两者之间的非线性黏性关系,表征范围更宽泛;④更有利于模拟加速流变过程,并可在参数较少且构型简单的前提下,实现对流变全过程更优的表征。因此,基于分阶微积分理论,建立高拱坝变形性态分阶数值分析模型,在此基础上,充分利用变形监测信息,提出单测点和测点群变形安全监控方法,可为高拱坝安全运行和险情应急提供理论、方法及技术的支持。

为实现基于分阶模式的高拱坝变形安全监控的研究构想,需针对高拱坝变形性态分阶数值模拟以及基于分阶模式的单测点和测点群变形安全监控展开理论、方法和技术的研究和探讨,重点需攻克三维高应力状态下高拱坝加速流变效应分阶元件模型、分阶元件模型弹性和黏弹性物理力学参数的反演,以及高拱坝时效变形分阶分析模型这3个关键科学技术问题。

参考文献:

[1] 中华人民共和国水利部. 2019 年全国水利发展统计公报[M]. 北京:中国水利水电出版社,2020.

[2] IJHD. 2018 world atlas & industry guide[R]. Wallington: International Journal of Hydropower and Dams,2018.

[3] BARLA G, FAN Q, PENG L. Introduction to the special issue “super high arch dams and underground caverns in China” [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2018,51(8):2447-2450.

[4] 周建平,杜效鹄,周兴波,等. 世界高坝研究及其未来发展趋势[J]. 水力发电学报,2019,38(2):1-14. (ZHOU Jianping, DU Xiaohu, ZHOU Xingbo, et al. Research on high dams and developing trends [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2019, 38 (2): 1-14. (in

Chinese))

[5] 刘六宴,温丽萍. 中国高坝大库统计分析[J]. 水利建设与管理, 2016 (9): 12-16. (LIU Liuyan, WEN Liping. Analysis on high dam large reservoir statistics in China [J]. Water Conservancy Construction and Management, 2016(9):12-16. (in Chinese))

[6] FAN Q, WANG Z, XU J, et al. Study on deformation and control measures of columnar jointed basalt for Baihetan super-high arch dam foundation[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2018,51(8):2569-2595.

[7] 顾冲时,苏怀智,王少伟. 高混凝土坝长期变形特性计算模型及监控方法研究进展[J]. 水力发电学报,2016, 35 (5): 1-14. (GU Chongshi, SU Huaizhi, WANG Shaowei. Advances in calculation models and monitoring methods for long-term deformation behavior of concrete dams[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2016, 35 (5): 1-14. (in Chinese))

[8] WANG S, XU Y, GU C, et al. Hysteretic effect considered monitoring model for interpreting abnormal deformation behavior of arch dams: a case study[J]. Structural Control and Health Monitoring, 2019,26(10):e2417.

[9] ZHENG D, XU Y, YANG M, et al. Deformation and stress behavior analysis of high concrete dam under the effect of reservoir basin deformation[J]. Computers and Concrete, 2016,18(6):1153-1173.

[10] FU X, GU C, QIN D. Deformation features of a super-high arch dam structural system [J]. Optik, 2017, 130: 681-695.

[11] 吴邦彬,顾冲时,陈波,等. 分叉型库盘变形及对特高拱坝变形性态的影响[J]. 水利水电科技进展,2019,39(6):31-36. (WU Bangbin, GU Chongshi, CHEN Bo, et al. The deformation of bifurcation reservoir basin and its influence on deformation behavior of a super-high arch dam[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2019,39(6):31-36. (in Chinese))

[12] 程立,刘耀儒,潘元伟. 锦屏一级拱坝左岸边坡长期变形对坝体影响研究[J]. 岩石力学与工程学报,2016,35(2):4040-4052. (CHENG Li, LIU Yaoru, PAN Yuanwei, et al. Research on influence of left bank slopes long-term deformation on dam body for Jinping I arch dam [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016,35(2):4040-4052. (in Chinese))

[13] 梁国贺,胡昱,樊启祥,等. 溪洛渡高拱坝蓄水期谷幅变形特性与影响因素分析[J]. 水力发电学报,2016,35(9):101-110. (LIANG Guohe, HU Yu, FAN Qixiang, et al. Analysis on valley deformation of Xiluodu high arch dam during impoundment and its influencing factors[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2016, 35 (9): 101-110. (in Chinese))

[14] 何柱,刘耀儒,杨强,等. 溪洛渡拱坝谷幅变形机制及变形反演和长期稳定性分析[J]. 岩石力学与工程学报,

- 2018,37(2):4198-4206. (HE Zhu, LIU Yaoru, YANG Qiang, et al. Mechanism of valley deformation of Xiluodu arch dam and back analysis and long-term stability analysis[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(2): 4198-4206. (in Chinese))
- [15] 武明鑫,江汇,张楚汉. 高混凝土坝蓄水河谷-库坝变形规律[J]. 水力发电学报, 2019, 38(8): 1-13. (WU Mingxin, JIANG Hui, ZHANG Chuhan. General rules of dam-valley deformation due to reservoir impoundment[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2019, 38(8): 1-13. (in Chinese))
- [16] GUO B, PU X, HUANG, et al. Fractional partial differential equations and their numerical solutions[M]. New Jersey: World Scientific, 2015.
- [17] 丁晓唐. 高拱坝结构稳定转异和体形优化分析理论和方法[D]. 南京: 河海大学, 2005.
- [18] WANG X, LIU Y, TAO Z, et al. Study on the failure process and nonlinear safety of high arch dam and foundation based on geomechanical model test [J]. Engineering Failure Analysis, 2020, 116: 104704.
- [19] 周建平, 杜效鹄. 中国特高拱坝建设特点与关键技术问题[J]. 水力发电, 2012, 38(8): 29-32. (ZHOU Jianping, DU Xiaohu. Characteristics and key technologies of super-high arch dam construction in China [J]. Water Power, 2012, 38(8): 29-32. (in Chinese))
- [20] 李子昌. 特高拱坝应力与整体安全度控制指标研究 [D]. 北京: 清华大学, 2010.
- [21] 王少伟, 包腾飞. 渗透溶蚀对高混凝土坝长期变形影响的数值分析[J]. 长江科学院院报, 2020, 37(6): 62-69. (WANG Shaowei, BAO Tengfei. Numerical analysis on influence of leakage dissolution on long-term deformation of high concrete dam [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2020, 37(6): 62-69. (in Chinese))
- [22] 张国新, 刘毅, 刘有志, 等. 高混凝土坝温控防裂研究进展[J]. 水利学报, 2018, 49(9): 1068-1078. (ZHANG Guoxin, LIU Yi, LIU Youzhi, et al. Reviews on temperature control and crack prevention of high concrete dam [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2018, 49(9): 1068-1078. (in Chinese))
- [23] 王仁坤. 我国特高拱坝的建设成就与技术发展综述 [J]. 水利水电科技进展, 2015, 35(5): 13-19. (WANG Renkun. Review of construction achievements and technological development of super-high arch dam in China [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2015, 35(5): 13-19. (in Chinese))
- [24] 汤灿. 混凝土受压徐变模型及应力-应变关系研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.
- [25] 唐皓, 李强, 王东坡, 等. 基于分数阶微积分及改进弹塑性体的流变模型[J]. 防灾减灾工程学报, 2016, 36(6): 978-983. (TANG Hao, LI Qiang, WANG Dongpo, et al. A rheology model based on fractional calculus and improved elastoplastic element [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2016, 36(6): 978-983. (in Chinese))
- [26] 刘忠玉, 杨强. 基于分数阶 Kelvin 模型的饱和黏土一维流变固结分析 [J]. 岩土力学, 2017, 38(12): 3680-3687. (LIU Zhongyu, YANG Qiang. One-dimensional rheological consolidation analysis of saturated clay using fractional order Kelvin's model [J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(12): 3680-3687. (in Chinese))
- [27] LIAO M, LAI Y, LIU E, et al. A fractional order creep constitutive model of warm frozen silt [J]. Acta Geotechnica, 2017, 12(2): 377-389.
- [28] KHAJEHSAEID H. A comparison between fractional-order and integer-order differential finite deformation viscoelastic models; effects of filler content and loading rate on material parameters [J]. International Journal of Applied Mechanics, 2018, 10(9): 1850099.
- [29] COLOMBARO I, GARRA R, GIUSTI A, et al. Scott-Blair models with time-varying viscosity [J]. Applied Mathematics Letters, 2018, 86: 57-63.
- [30] SUN Y, CHEN C. Fractional order creep model for coral sand [J]. Mechanics of Time-Dependent Materials, 2019, 23(4): 465-476.
- [31] 苏腾, 周宏伟, 赵家巍, 等. 基于变阶分数阶导数的岩石蠕变模型 [J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38(7): 1355-1363. (SU Teng, ZHOU Hongwei, ZHAO Jiawei. A creep model of rock based on variable order fractional derivative [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, 38(7): 1355-1363. (in Chinese))
- [32] 杨光. 基于分数阶理论的高拱坝变形性态分析方法 [D]. 南京: 河海大学, 2019.
- [33] 黄明华, 胡可馨, 赵明华. 分数阶黏弹性地基中洞周超孔隙水压力消散特性分析 [J]. 岩土工程学报, 2020, 42(8): 1446-1455. (HUANG Minghua, HU Kexin, ZHAO Minghua. Dissipation characteristics of excess pore-water pressure around tunnels in viscoelastic foundation using a fractional-derivative model [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, 42(8): 1446-1455. (in Chinese))
- [34] 李德建, 刘校麟, 韩超. 基于等效黏弹性的变阶分数阶岩石损伤蠕变模型 [J]. 岩土力学, 2020, 41(12): 3829-3831. (LI Dejian, LIU Xiaolin, HAN Chao. Variable-order fractional damage creep model based on equivalent viscoelasticity for rock [J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, 41(12): 3829-3831. (in Chinese))
- [35] LIU C, GU C, CHEN B. Zoned elasticity modulus inversion analysis method of a high arch dam based on unconstrained Lagrange support vector regression (support vector regression arch dam) [J]. Engineering with Computers, 2017, 33(3): 443-456.

- [36] 何志磊,朱珍德,朱明礼,等. 基于分数阶导数的非定常蠕变本构模型研究[J]. 岩土力学,2016,37(3):737-744. (HE Zhilei, ZHU Zhende, ZHU Mingli, et al. An unsteady creep constitutive model based on fractional order derivatives[J]. Rock and Soil Mechanics,2016,37(3):737-744. (in Chinese))
- [37] JAROSLAV S, MARYANA L, OLHA M, et al. Mathematical modeling of visco-elastic state of materials with fractal structure [C] //IEEE 14th International Conference on the Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics (CADSM). Lviv, Ukraine: IEEE,2017:35-38.
- [38] 王少伟,徐丛,苏怀智. 锦屏一级拱坝黏弹性工作性态反演分析[J]. 水利水电科技进展,2020,40(5):62-69. (WANG Shaowei, XU Cong, SU Huaizhi. Back analysis of viscoelastic working behavior for Jinping-I Arch Dam [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2020,40(5):62-69. (in Chinese))
- [39] 张杰,魏永强,仇学明,等. 岩石流变分数阶模型研究[J]. 计算力学学报,2017,34(2):263-266. (ZHANG Jie, WEI Yongqiang, QIU Xueming, et al. Research on fractional order models of rock rheology [J]. Chinese Journal of Computational Mechanics,2017,34(2):263-266. (in Chinese))
- [40] 魏博文,袁冬阳,李火坤,等. 基于参数区间反演修正混合模型的混凝土坝位移监控指标确定方法[J]. 岩石力学与工程学报,2018,37(2):4151-4160. (WEI Bowen, YUAN Dongyang, LI Huokun, et al. Method for determining displacement monitoring index of concrete dam based on the hybrid model considering parameter interval inversion modification [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2018,37(2):4151-4160. (in Chinese))
- [41] HUANG Y, XIAO L, BAO T, et al. Fractional order creep model for dam concrete considering degree of hydration [J]. Mechanics of Time-Dependent Materials,2019,23(3):361-372.
- [42] 于怀昌,史广诚,刘汉东,等. 基于分数阶微积分的岩石非线性黏弹性应力松弛模型研究[J]. 应用基础与工程科学学报,2019,27(1):194-204. (YU Huaichang, SHI Guangcheng, LIU Handong, et al. A nonlinear viscoelastic stress relaxation model of rock based on fractional calculus [J]. Journal of Basic Science and Engineering,2019,27(1):194-204. (in Chinese))
- [43] 宋勇军,张磊涛,任建喜,等. 低温环境下红砂岩蠕变特性及其模型研究[J]. 煤炭学报,2020,45(8):2795-2803. (SONG Yongjun, ZHANG Leitao, REN Jianxi, et al. Creep property and model of red sandstone under low temperature environment [J]. Journal of China Coal Society,2020,45(8):2795-2803. (in Chinese))
- [44] CHEN S, GU C, LIN C, et al. Safety monitoring model of a super-high concrete dam by using RBF neural network coupled with kernel principal component analysis [J]. Mathematical Problems in Engineering,2018,2018:1712653.
- [45] SU H, LI X, YANG B, et al. Wavelet support vector machine-based prediction model of dam deformation [J]. Mechanical Systems and Signal Processing,2018,110:412-427.
- [46] 徐韧,苏怀智,杨立夫. 基于 GP XGBoost 的大坝变形预测模型[J]. 水利水电科技进展,2021,41(5):41-46. (XU Ren, SU Huaizhi, YANG Lifu. Dam deformation prediction model based on GP-XGBoost [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2021,41(5):41-46. (in Chinese))
- [47] 李明超,任秋兵,沈扬. 贝叶斯框架下的大坝变形交互式时变预测模型及其验证 [J]. 水利学报,2018,49(11):1328-1338. (LI Mingchao, REN Qiubing, SHEN Yang. Prediction model for interactive time series evolution and its verification of dam deformation under Bayesian framework [J]. Journal of Hydraulic Engineering,2018,49(11):1328-1338. (in Chinese))
- [48] 胡德秀,屈旭东,杨杰,等. 基于 M-ELM 的大坝变形安全监控模型[J]. 水利水电科技进展,2019,39(3):75-80. (HU Dexiu, QU Xudong, YANG Jie, et al. A safety monitoring model of dam deformation based on M-ELM [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2019,39(3):75-80. (in Chinese))
- [49] LIN C, LI T, CHEN S, et al. Gaussian process regression-based forecasting model of dam deformation [J]. Neural Computing and Applications,2019,31(12):8503-8518.
- [50] 李明超,任秋兵,孔锐,等. 多维复杂关联因素下的大坝变形动态建模与预测分析 [J]. 水利学报,2019,50(6):687-698. (LI Mingchao, REN Qiubing, KONG Rui, et al. Dynamic modeling and prediction analysis of dam deformation under multidimensional complex relevance [J]. Journal of Hydraulic Engineering,2019,50(6):687-698. (in Chinese))
- [51] 王继敏,顾冲时,张晨,等. 基于面板时空模型的锦屏一级大坝变形性态分析 [J]. 水力发电学报,2020,39(11):21-30. (WANG Jimin, GU Chongshi, ZHANG Chen, et al. Deformation behavior analysis of Jinping arch dam based on spatiotemporal model of variable intercept panel data [J]. Journal of Hydroelectric Engineering,2020,39(11):21-30. (in Chinese))
- [52] WANG S, XU C, GU C, et al. Displacement monitoring model of concrete dams using the shape feature clustering-based temperature principal component factor [J]. Structural Control and Health Monitoring,2020,27(10):e2603.

(下转第120页)

- China Rural Water and Hydropower, 2020 (11): 174-178. (in Chinese))
- [14] 张天航. 基于大系统理论的复杂地形土方调配优化研究[D]. 邯郸:河北工程大学, 2020.
- [15] 孙国良,伊力哈木·亚尔买买提,张宽,等. 基于小波变换与 IAGA-BP 神经网络的短期风电功率预测[J]. 电测与仪表, 2021 (1): 1-11. (SUN Guoliang, YILIHAM Yaermamat, ZHANG Kuan, et al. Short-term prediction of wind power based on wavelet transform and IAGA-BP neural network [J]. Electrical Measurement and Instrumentation, 2021(1): 1-11. (in Chinese))
- [16] 陈爽,张志,肖锦初,等. 基于 MEA-BP 神经网络的超声挤压加工表面粗糙度预测[J]. 河南理工大学学报(自然科学版), 2021, 40 (5): 104-109. (CHEN Shuang, ZHANG Zhi, XIAO Jinchu, et al. Surface roughness prediction of ultrasonic extrusion processing based MEA-BP neural network [J]. Journal of Henan Polytechnic University (Natural Science Edition), 2021, 40(5): 104-109. (in Chinese))
- [17] 田正宏,苏伟豪,郑祥,等. 基于 GA-BP 神经网络的碾压混凝土压实度实时评价方法[J]. 水利水电科技进展, 2019, 39 (3): 81-86. (TIAN Zhenghong, SU Weihao, ZHENG Xiang, et al. Real-time evaluation method of RCC compactness based on GA-BP neural network [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2019, 39(3): 81-86. (in Chinese))
- [18] 李明超,段志龙. 耦合风险因素的大型地下厂房施工进度仿真分析[J]. 水利水电科技进展, 2014, 34(5): 39-44. (LI Mingchao, DUAN Zhilong. Simulation analysis of construction schedule of large underground powerhouses coupled with risk factors [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2014, 34 (5): 39-44. (in Chinese))
- (收稿日期:2021-07-15 编辑:施业)
-
- (上接第 57 页)
- [16] 李宗坤,陈乐意,孙颖章. 偏最小二乘回归在渗流监控模型中的应用[J]. 郑州大学学报(工学版), 2006, 27(2): 117-119. (LI Zongkun, CHEN Leyi, SUN Yingzhang. Application of partial least-squares regression to seepage monitoring model [J]. Journal of Zhengzhou University (Engineering Science), 2006, 27(2): 117-119. (in Chinese))
- [17] 杨杰,胡德秀,吴中如. 大坝安全监控模型因子相关性及不确定性研究[J]. 水利学报, 2004, 35(12): 99-105. (YANG Jie, HU Dexiu, WU Zhongru. Multiple co-linearity and uncertainty of factors in dam safety monitoring model [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2004, 35(12): 99-105. (in Chinese))
- [18] 梁波. 土石坝测压管水位观测资料分析方法[J]. 大坝与安全, 2005(4): 41-43. (LIANG Bo. Discussion on data analysis of piezometric level in earth-rock dam [J]. Dam & Safety, 2005(4): 41-43. (in Chinese))
- [19] WANG Shaowei, XU Yingli, GU Chongshi, et al. Monitoring models for base flow effect and daily variation of dam seepage elements considering time lag effect [J]. Water Science and Engineering, 2018, 11(4): 344-354.
- [20] 虞鸿,包腾飞,薛凌峰. 降雨滞后效应的数值模拟[J]. 水力发电学报, 2010, 29(4): 200-206. (YU Hong, BAO Tengfei, XUE Lingfeng. Numerical simulation of the hysteretic effects of rainfall [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2010, 29(4): 200-206. (in Chinese))
- [21] 沈晶鑫,郑东健. 改进温度分量的拱坝变形时空分布模型[J]. 水利水电技术, 2018, 49 (5): 38-43. (SHEN Jingxin, ZHENG Dongjian. Improved temperature component-based spatio-temporal distribution model for arch dam deformation [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2018, 49 (5): 38-43. (in Chinese))
- [22] 薛建凯. 一种新型的群智能优化技术的研究与应用[D]. 上海:东华大学, 2020.
- (收稿日期:2021-08-13 编辑:熊水斌)
-
- (上接第 93 页)
- [53] 牛景太. 基于奇异谱分析与 PSO 优化 SVM 的混凝土坝变形监控模型[J]. 水利水电科技进展, 2020, 40(6): 60-65. (NIU Jingtai. Dam deformation monitoring model based on singular spectrum analysis and SVM optimized by PSO [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2020, 40(6): 60-65. (in Chinese))
- [54] 任秋兵,沈扬,李明超,等. 水工建筑物安全监控深度分析模型及其优化研究[J]. 水利学报, 2021, 52(1): 71-80. (REN Qiubing, SHEN Yang, LI Mingchao, et al. Safety monitoring model of hydraulic structures and its optimization based on deep learning analysis [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2021, 52(1): 71-80. (in Chinese))
- [55] YANG G, GU H, CHEN X D, et al. Hybrid hydraulic-seasonal-time model for predicting the deformation behaviour of high concrete dams during the operational period [J]. Structural Control and Health Monitoring, 2021, 28(3): e2685.
- [56] CHEN B, HU T Y, HUANG Z S, et al. A spatio-temporal clustering and diagnosis method for concrete arch dams using deformation monitoring data [J]. Structural Health Monitoring, 2019, 18(5/6): 1355-1371.
- [57] SHI Z, GU C, QIN D. Variable-intercept panel model for deformation zoning of a super-high arch dam [J]. Springer Plus, 2016, 5: 898.
- [58] SHAO C, GU C, YANG M, et al. A novel model of dam displacement based on panel data [J]. Structural Control and Health Monitoring, 2018, 25(1): e2037.
- (收稿日期:2021-10-26 编辑:骆超)