

# 数智技术赋能库坝系统安全管控探讨

周创兵<sup>1,2</sup>, 姚池<sup>1,2</sup>, 杨建华<sup>1,2</sup>, 蒋水华<sup>1,2</sup>, 张小波<sup>1,2</sup>, 孟京京<sup>1,2</sup>, 叶志伟<sup>1,2</sup>, 马永力<sup>1,2</sup>

(1. 南昌大学流域碳中和教育部工程研究中心, 330031, 南昌; 2. 南昌大学水工岩土工程安全江西省重点实验室, 330031, 南昌)

**摘要:** 新一代人工智能重塑了知识的发现、推理和决策过程, 推动了新一轮科技革命和产业变革, 正在改变人们的生产、生活和思维方式, 全社会各行业都在积极寻求AI赋能。以人工神经网络为代表的人工智能技术已在水利水电行业中得到大量应用, 如大坝建造、地下洞室建造、高边坡工程安全控制、库区地质灾害防控等, 取得了良好的经济社会效益和生态环境效益。然而, 这些技术的应用大多局限于某些特定领域, 泛化能力还有待加强, 亟待进一步开发水利水电行业垂直大模型。以库坝系统为研究对象, 探讨了数智技术赋能库坝系统安全管控的基本框架。该框架以通用大模型为底座, 在行业大数据的基础上, 建立机理和数据双驱动的多尺度多场耦合计算方法, 融合感知设备和施工机器人等硬件, 有望实现勘测、设计、施工和运行全过程的智能决策和控制, 全面提升库坝系统全生命周期安全管控的智能化水平, 充分发挥水利水电工程的综合效益。

**关键词:** 库坝系统; 人工智能; 数字孪生; 智能决策; AI赋能; 安全管控

**Safety control of reservoir dam system with digital intelligence technology**//Zhou Chuangbing, Yao Chi, Yang Jianhua, Jiang Shuihua, Zhang Xiaobo, Meng Jingjing, Ye Zhiwei, Ma Yongli

**Abstract:** The new generation of artificial intelligence (AI) has redefined the processes of knowledge discovery, reasoning, and decision-making, driving a new wave of technological revolution and industrial transformation. AI is profoundly altering production, daily life, and cognitive methods across all sectors, with industries actively exploring AI empowerment. Represented by artificial neural networks, AI technologies have been extensively applied in the water resources and hydropower sector, including dam construction, underground cavern excavation, high-slope safety control, and reservoir area geological disaster prevention, yielding significant economic, social, and ecological benefits. However, these applications are often confined to specific domains, with limited generalization capabilities, highlighting the urgent need for vertical large-scale AI models tailored to the water resources and hydropower sector. Taking reservoir dam systems as the research focus, this study proposes a fundamental framework for integrating digital intelligence technologies into safety control. The framework leverages a general-purpose large model as its foundational layer and develops a multi-scale, multi-field coupling computational approach driven by both mechanisms and data, utilizing industry big data. It integrates hardware components such as perception devices and construction robots to enable intelligent decision-making and control throughout the entire lifecycle of surveying, design, construction, and operation, aiming to significantly enhance the intelligence level of reservoir dam system safety control while maximizing the integrated benefits of water resources and hydropower projects.

**Keywords:** reservoir dam system; artificial intelligence; digital twin; intelligent decision-making; AI empowerment; safety control

收稿日期: 2024-12-26

作者简介: 周创兵, 中国工程院院士。

中图分类号: TV+TP39 文献标识码: B 文章编号: 1000-1123(2025)01-0007-08  
DOI: 10.3969/j.issn.1000-1123.2025.01.002

习近平总书记在致2018世界人工智能大会的贺信中指出:“新一代人工智能正在全球范围内蓬勃兴起,为经济社会发展注入了新动能,正在深刻改变人们的生产生活方式。”2024年,诺贝尔物理学奖和化学奖分别授予了人工神经网络的发明者和使用者,表达了对人工智能(Artificial Intelligence, AI)技术的充分致敬,彰显了人工智能技术在打破学科界限、推动跨学科合作方面的变革性作用,也预示着继实验归纳、理论推演、仿真模拟和数据挖掘之后,“人工智能”这一新的科学发展范式正在呈现。

目前,世界各主要国家已相继制定了人工智能相关的国家战略,开始了AI技术的军备竞赛。美国2016年制定了《美国国家人工智能研究和发展战略计划》,并于2019年和2023年进行了两次重要更新,在一些重要领域如芯片、大模型和投资等方面,对包括我国在内的各国进行了不同程度的封锁。我国在2017年印发了《新一代人工智能发展规划》,提出了人工智能技术的“三步走”战略,规划到2030年我国人工智能理论、技术与应用总体达到世界领先水平,成为世界主要人工智能创新中心。可见,人工智能已形成不可阻挡的浪潮,各行各业都应该积极寻求AI赋能。

我国是世界上高坝建设最多的国家,保障库坝系统安全是百年大计。虽然我国大坝建设水平世界领先,但数字智能化管理水平仍有待提高,大坝安全事故时有发生,亟待人工智能等现代信息技术深度赋能,切实提高库坝系统安全应急管控能力和运行效率,充分发挥水利水电工程基础设施的整体效能。

## 一、人工智能技术发展概要

人工智能的定义尚存争议,但总体而言,它是一门关于如何利用机器获得知识、表达知识和运用知识的学科。人工智能于1956年美国达特茅斯会议上被首次正式提出,至今不到70年的历史,诞生后经历过一个短暂的黄金期,20世纪70年代遭遇第一个低谷期,而后因专家系统的崛起进入新的繁荣期,但很快又由于专家系统的场景限制陷入寒冬。1993年之后,人工智能才迎来真正的春天,特别是2006年发生的三件事,事后证明彻底改变了人工智能技术的走向:这一年,辛顿提出了深度学习网络,李飞飞创建了ImageNet,英伟达发布了Tesla架构的GPU并推出CUDA平台,分别为人工智能的三要素——算法、算据和算力提供了解决方案。2012年,辛顿利用4颗GPU以84%的准确率获得ImageNet竞赛冠军,远超谷歌公司动用16 000颗CPU获得的74.8%的准确率,震惊业界。算法、算据、算力的汇聚发挥了惊人的效果,明确了新一代人工智能的主流技术路线,也为后续ChatGPT、Sora等大模型的出现奠定了基础。人工智能技术改变了传统的需要事先知道自变量和因变量函数关系的计算方式(不妨称为计算1.0),取而代之的是使用人工神经网络模型,通过利用大量已知自变量和因变量训练这个网络,获得相应的函数关系,然后再输入自变量,获得因变量的全新的计算范式(不妨称为计算2.0),其架构如图1所示。

人工智能技术与其计算载体共同构成智能计算,大致经历了通用计算装置、专家系统、深度学习和大模型计算系统四个发展阶段,发展趋势从“小模型+判

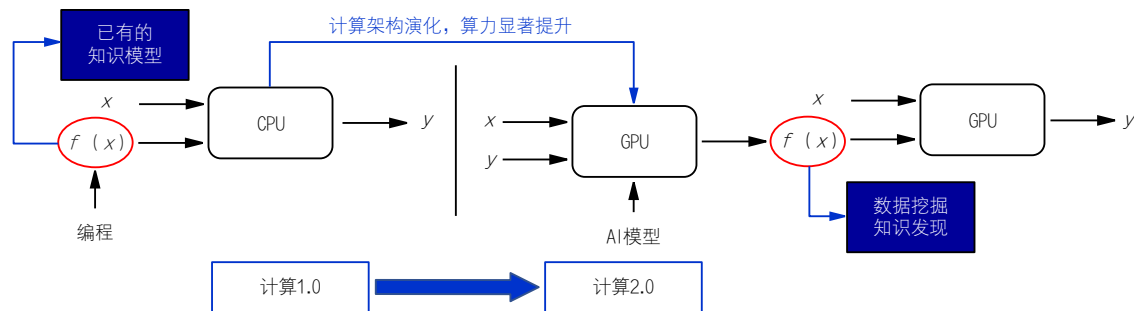


图1 人工智能引起的计算范式演变

别式”转向“大模型+生成式”。大模型具有巨大的算据规模和参数规模,对算力的需求量很大,同时具备更强的跨领域学习和自我学习能力,其发展基于技术上的标度律(Scaling Law),即训练数据规模突破一定阈值后,模型性能在学习能力和泛化能力上出现惊人的提升。大模型主要分为三类,即语言大模型、视觉大模型和多模态大模型,按照应用领域可以分为L0、L1和L2三个层级,其中:L0为通用大模型,是指不受领域限制的能同时处理多任务多应用的大模型;L1为行业大模型,是指针对特定行业或应用领域的大模型;L2为垂直大模型,是指针对特定场景和具体任务的大模型。新一代人工智能技术通过高效整合多模态跨领域知识,优化组合了劳动者、劳动资料和劳动对象,提升了生产体系的整体数智化水平和生产效率,催生了新技术、新产业、新业态和新模式的出现,促进了新质生产力的发展。

## 二、库坝工程领域数智技术应用进展

水利水电行业高度重视数智技术在生产和管理中的应用。2022年1月,水利部印发了《关于大力推进智慧水利建设的指导意见》《“十四五”期间推进智慧水利建设实施方案》《智慧水利建设顶层设计》《“十四五”智慧水利建设规划》等一系列文件,指出要通过建设数字孪生流域、“2+N”水利智能业务应用体系、水利网络安全体系、智慧水利保障体系,推进水利工程智能化改造。水库、大坝和坝基、边坡及洞室围岩组成的库坝系统(如图2所示)是保障库坝工程高水平安全运行和效益充分发挥的重要基础设施。数智技术在库坝工程领域的研究进展总结如下。

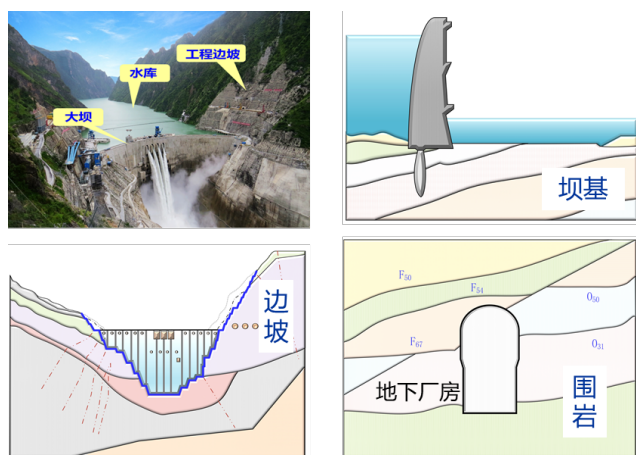


图2 库坝系统及其组成

### 1. 大坝智能建造

大坝是水利水电工程枢纽建筑物的核心组成部分。近年来,我国大坝建造逐渐从自动化、数字化向智能化发展。马洪琪、钟登华等开创性地提出了数字大坝理论,并成功应用于我国西南地区多个大型水电工程大坝建设中,实现了大坝工程建设质量、施工进度、安全监测、工程地质等信息的数字化管理。李庆斌等探讨了大坝智能建造未来发展方向与关键技术,系统梳理并阐述了大坝智能建造的关键问题与智能控制的逻辑关系,并提出了大坝建造的智能控制理论。樊启祥等结合工程实践,研发了水电工程智能建造iDam综合管理平台,提出了高海拔水电工程建造活动智能闭环控制关键参数,构建了高海拔地区水电工程智能建造三维四要素协同系统分析框架。张宗亮等通过融合大数据和全流程、智能化的管理技术,提出了水电工程规划设计、工程建设、运行管理智能解决平台HydroBIM,通过充分释放信息化和智能化价值,提高了水利工程开发建设信息融合度和工作效率。深度融合新一代信息技术,推动大坝建造智能化,是实现“安全、高质、高效、经济、绿色”建设目标的关键,大坝智能化建造与建造智能大坝是新的发展趋势。

### 2. 地下洞室智能建造

复杂的不良地质条件是制约地下洞室安全高效建设的主要因素。要实现地下洞室的安全高效建设,首先要提高地质预测预报技术水平及其信息化程度。针对地下洞室钻爆法开挖,现有的预报手段往往施作时间较长,容易造成施工停滞,降低施工效率。李术才等在钻爆法机械化施工中,提出了以凿岩台车破岩振动为震源的随钻地震波超前地质探测技术,初步实现了钻爆法隧道随钻震源的“边钻边探”,为地下洞室机械化、智能化、无人化施工作出了贡献。何川等将机械化、自动化、信息化与现有隧道建造技术相融合,通过对围岩、隧道、机械、修建、人员等信息的全面感知、泛在互联、融合处理、主动学习,建立了具有智能决策能力的隧道建造方法,突破了围岩地质环境判识、隧道机械化快速施工及动态决策、智能装备研发、装备状态检测与隧道质量监控等方面的相关技术,构建了钻爆法隧道机械化智能建造技术的基础框架。

### 3. 高边坡工程安全控制

在高边坡工程安全控制方面,冯夏庭等将智能方法如BP神经网络、支持向量机(SVM)等应用于位移反分析,有效提升了位移反分析效率和精度;将卷积神

经网络和微震信号识别相结合,提出了基于动态聚类 and 进化神经网络的安全性时空演化智能分析方法,实现了岩体破裂信息快速捕捉和时空演化分析的一体化处理。周创兵等提出了复杂岩石高边坡长期变形预测多目标反演分析框架,通过融合多源异构监测信息,系统地揭示了高边坡变形的全过程特性及多变量之间的相互影响,实现了对高边坡变形过程的动态、精确、多目标的反演分析;此外,还构建了基于饱和带地下水观测数据的非饱和参数预估-反馈分析技术,解决了确定场地尺度岩体非饱和水力参数的难题,研制了包含不同类型、不同尺度、不同阶段渗流参数的数据库及数据分析平台,为岩体渗流参数的分析、类比和确定提供了重要工具。

#### 4. 库区地质灾害智能评价

在库区地质灾害智能评价方面,唐辉明建立了“天-空-地-深”一体化监测技术与多源异构数据智能集成算法,全方位构建物理-数据双驱动的库区地质灾害数据库,提升了失效概率评估的准确性。许强等集成了地灾易发性、InSAR形变、高分影像和实地调查数据等地灾基础数据,利用深度学习算法对库区地灾进行早期识别和模式判别,实现了地灾未来变形趋势预判和预警。殷跃平等构建了强时空变化下AI赋能地灾智能实时预警系统,有效提升了“数据采集—特征提取—预警信息生成”等全过程的性能。

#### 5. 大模型平台

在水利水电领域应用大模型,可实现全局数字化建模,依托数据驱动、实时分析、实时控制与边缘计算

等技术,构建高效、安全、智能、可靠的智慧水利系统。中国水利水电科学研究院结合机理模型与数据驱动模型,研发了“SkyLIM”水科大模型,该模型具备多模态大参数算子、大规模高性能算力及大场景全过程模拟的特点,在推动我国水利高质量发展、标准化与体系化建设方面展现了巨大潜力。南京水利科学研究院也发布了自主研发的通用水模型系统“HydroN”,包含水沙输移通用模型、通用性水利工程调度专业模型和水资源调配模型,为解决水旱灾害防御、水资源调配、河湖治理与保护等水利行业重大问题提供了关键工具。

综上,以人工神经网络为代表的人工智能技术正逐步应用于库坝工程,取得了显著的经济社会效益和生态环境效益。然而,大部分应用还局限于某些库坝工程特定场景中的特定任务,主要用于数据分析预测和代理模型构建,且模型之间相互独立,尚不具备大模型级别的泛化能力,亟待开发库坝系统垂直大模型,为库坝系统的安全管控深度赋能。

### 三、数字技术赋能库坝系统安全管控探讨

#### 1. 库坝系统安全管控数字孪生平台框架

为全面提升库坝系统全生命周期的感知能力、推理能力和决策能力,实现库坝系统全生命周期的数字赋能和转型升级,亟待建立AI赋能的库坝系统数字孪生模型,其理论框架如图3所示。该库坝系统数字孪生平台主要包含三层:第一层为通过物联网与基础设施连接的感知和数据层,是数字底座;第二层为数字孪生智能核心,是核心模型;第三层为显示交互层,是用

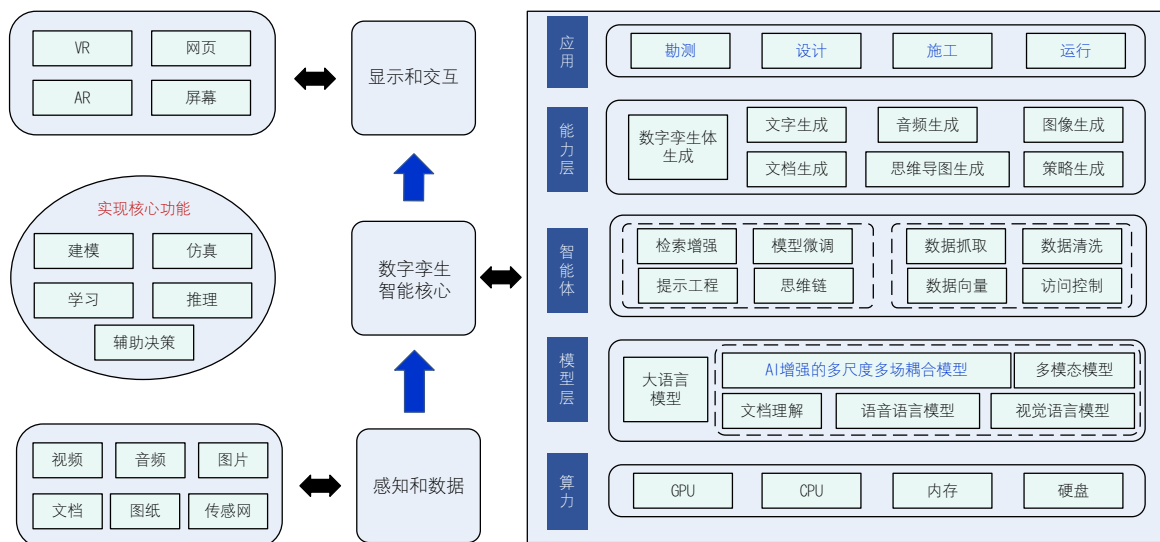


图3 数智赋能库坝系统数字孪生模型的基本框架

户界面。核心模型沿用了行业垂直大模型的一般框架,利用已有的通用大模型作为基座模型,主要创新点在于融入了一个AI增强的多尺度多场耦合计算模型,这是建立数据-模型双驱动算法的出发点。在应用层面,智能核心主要面向勘测、设计、施工、运行等库坝系统全生命周期不同阶段的安全管控场景。

需要注意的是,当前的基座大模型仍在快速发展,需要时刻关注。但是,不管通用大模型发展到何种程度,好的行业垂直大模型都需要海量的高品质专业数据。我国水利水电行业规模巨大,具备支撑条件,但仍需要行业主管部门、业主单位、设计院、施工单位、高校、科研院所等全行业各部门的深度合作,实现数据资源的共建和共享,避免信息孤岛的出现。

## 2.AI增强的多尺度多场耦合模型

岩土体是库坝系统的主要组成部分,是一种具有多尺度结构的复杂地质材料,在矿物、岩块、岩体、工程结构和区域尺度上表现出不同的力学响应;同时,库坝系统是一个渗流场、应力场、温度场和工程扰动等多场耦合作用的复杂巨系统。多尺度多场耦合作用下,库坝系统的性能评价和安全管控是水利水电工程的关键科学问题和核心技术难题,AI大模型可成为分析和预测其复杂力学行为的重要工具。

### (1)物理机制模型

水利水电行业已积累了丰富的机理模型,形成了岩土体热-水-力-化多场耦合的理论方法体系,已应用于库坝系统的力学响应研究。同时,建立了考虑岩土体多尺度效应的计算框架,在宏观尺度上,采用常

规的等效连续介质力学模型,在积分点上,通过精细化的细观力学计算来获得材料的本构关系,精确描述材料的宏观细观力学行为。然而,库坝系统涉及复杂的多尺度多场变量,相互之间的映射关系很难准确描述,现有的机理模型仍需进一步发展,以适应这些复杂的耦合作用和多尺度行为。

### (2)数据驱动模型

经过多年发展,水利水电行业已积累了大量多源、多尺度、多模态数据,对于理解和预测岩土体的复杂力学行为具有重要意义。利用深度神经网络进行数据特征提取与模式识别,构建库坝系统的多尺度多场耦合数据驱动模型,学习多尺度多场数据之间的映射关系,可有效预测多尺度多场耦合作用下岩土体的复杂力学行为。然而,当前数据驱动模型在泛化能力、可解释性、数据质量与数量、物理约束与机理融合等方面仍存在不足,亟须进一步获取高质量数据并融合物理信息。

### (3)数据和物理机制双驱动模型

为了在数据驱动模型中嵌入物理约束,一方面构造含偏微分方程和初边值条件的神经网络损失函数,将物理机制融入网络训练过程中;另一方面可以通过代表性体积单元尺度的力学试验数据,训练人工神经网络代理模型,代替本构关系,然后进行宏观力学模型计算。这种模型融合了数据驱动与物理约束,突破了纯数据驱动模型的“黑箱”局限,赋予了模型物理机制支撑,降低了对高品质数据数量的依赖,提升了模型的鲁棒性,在解决库坝系统多尺度多场耦合问题上具有极大的潜力。该模型的框架如图4所示。

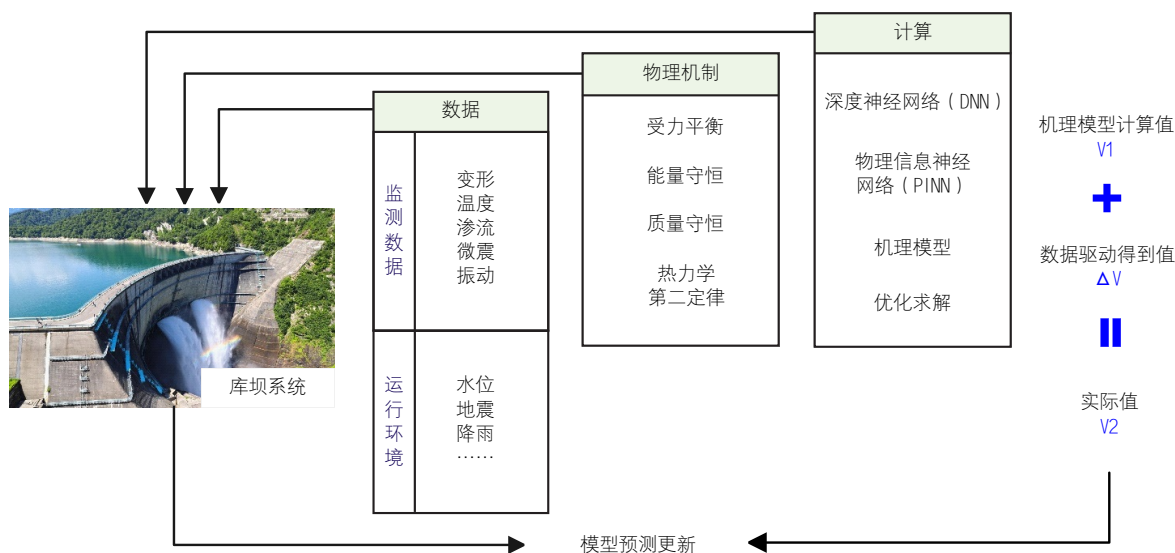


图4 数据和物理机制双驱动模型的基本框架

### 3. 勘测阶段的AI赋能

#### (1) 勘测方案设计

传统的勘测设计方案通常依赖经验,受到人员、时间和资源制约,勘测成本高,工作周期长,且在一些复杂地质条件下难以准确全面获取数据。对于无勘测数据的区域,AI技术可以基于区域地质背景(如地质构造、岩性分布、地下水等)开展智能化分析,科学合理设计勘测方案(包含勘探点位置、间距和深度),避免盲目勘探,节省勘探成本,提高勘测精度。此外,对于有稀疏勘测数据的区域,AI技术能综合利用历史勘测记录、遥感数据和最新勘测成果等,针对不同的地质条件智能设计出优化的勘测方案,还可根据实时更新的地质信息动态调整勘测方案,增强地质勘测的适用性和前瞻性。

#### (2) “天空地”综合勘测

面对多样化地貌和复杂地质结构条件,传统勘测技术往往难以满足精度要求。结合无人机、遥感与数智钻探等手段,构建“天空地”综合勘测技术体系,实现艰险山区复杂地质环境下的智能化勘测。一方面,AI赋能的无人机与遥感技术可通过采集高分辨率影像和点云数据等,实现对大范围目标区域地貌和出露地层的测量;另一方面,AI驱动为数智钻探能够快速识别复杂地质结构、隐匿断层及地下水水位变化等关键地质信息,提升地质勘测整体效率与数据可靠性。

#### (3) 三维地质模型重构

通过勘测技术获取的数据可用于重构复杂区域的三维地质模型,为后续工程设计、施工与运行提供支撑。传统的三维地质建模技术通常依赖于点位数据和勘探报告,在精度要求较高时,建模效率较低且人工干预大。相比之下,AI赋能的三维地质模型重构技术可融合钻探数据、点云、遥感影像和区域地质背景等多源异构数据,并结合地质专家知识库,生成三维地质模型。该模型不仅可以展示地貌和地质结构的空间分布,而且能动态更新地质信息,揭露地下结构的变化规律。此外,技术人员还可迅速得到地质剖面图、综合地质柱状图等,及时发现潜在的地质风险。

### 4. 设计阶段的AI赋能

#### (1) AI+CAD

由于地质条件的复杂性和库坝系统的独特性,传统的工程计算机辅助设计效率低,重复工作多,且容易错漏,不利于图纸、文档等的高质量生成和后期优化。在CAD软件中引入AI技术,通过定义一系列参数,对

库坝系统各组成部分的尺寸、形状、结构和空间布置等进行参数化设计;通过深度学习,能迅速搜索到相似模型并直接调用,可减少重复性工作,加快设计流程,提高设计效率;通过生成式人工智能,在空间、文本、拓扑和知识等多模态约束下可自动生成符合要求的设计内容,为工程设计人员提供多种选择方案;根据设计目标,依托AI技术对设计方案进行智能优化,可获得更准确和可靠的设计结果,保障设计质量。

#### (2) AI+CAE

复杂的地质条件和强烈的工程作用对库坝系统的设计具有重要影响。CAE模拟可以为库坝系统安全设计提供重要支撑,然而,库坝系统大尺度建模、高性能求解和计算结果分析给传统的CAE模拟带来了技术挑战。利用AI技术,可实现结构尺度、工程尺度乃至区域尺度的网格自动生成,在计算过程中进行参数优化,在计算结束后进行模型校验与预测。将AI技术与传统的枢纽建筑物截面设计、混凝土损伤开裂分析、结构动力响应分析、抗震抗爆分析、渗流场/温度场分析、边坡稳定性分析和施工过程安全分析等数值仿真计算融合,进行特定场景的物理规律解析,可实现库坝系统设计与工程施工之间的互馈和调优,为库坝系统施工过程中的动态设计提供理论支撑。

#### (3) AI+BIM

水利水电工程设计项目涵盖面广,涉及专业多,各类设计数据信息交流不畅,给工程高效设计带来了巨大挑战。建立基于AI+BIM的族库平台,可实现多专业模型在同一平台的设计、查看、审批和管理,促进多源信息共享、多工种协同设计;基于BIM海量数据可快速生成并比选多种设计方案,减少人工干预。AI还可赋能水利工程数字化建模,增强工程设计各参与方的协同性,提升设计阶段工作效率和信息融合度。

### 5. 施工阶段的AI赋能

#### (1) 爆破开挖

爆破技术在未来一段时间内仍然是水利水电工程坝基、边坡及地下洞室开挖的主要手段,传统爆破技术较大程度上依赖于工程经验,智能化变革势在必行。亟待将人工智能、物联网、大数据、云计算等新一代信息技术与爆破设计、施工、管理、服务等各环节生产活动相联结与融合,建立智能爆破的理论与方法,研发爆破过程多源异质信息采集与挖掘、爆破环境智能感知、爆破信息传输交互与处理等技术,实现信息深度自感知、智慧优化自决策、精准控制自执行等功能,推动爆

破技术以更科学、更智慧的方式可持续发展,达到安全、绿色、低碳、高效的工程开挖目的。

### (2) 支护加固

大型水利水电工程地质条件不确定性高,稳定性控制难度大,导致传统支护加固方案较为保守。AI技术可以解决坝基、边坡及地下洞室岩体的智能分级与支护参数优化问题。基于计算机视觉技术提取岩体结构面特征,经过三维重建、超像素分割、结构面特征融合等过程,精确获取岩体结构面产状信息,建立工程岩体精细化模型,构建岩体变形多因素时间序列智能预测模型,实时反映施工扰动与自然环境变化,进行工程岩体分级和稳定性智能判定,实现在支护过程中的智能化决策和对施工设备等受控对象的自动控制。

### (3) 施工机械

大型水利水电工程施工环境恶劣,施工效率低,多工种协同难,亟待开发具有智能感知和分析决策功能的施工机器人。施工机器人应包括用于超前勘探的钻探机器人,用于开挖作业的凿岩机器人、装药机器人、出渣机器人、除尘机器人等,用于支护加固的拱架机器人、锚杆机器人、湿喷机器人、衬砌机器人等。通过建立施工机器人远程操控系统和协同管理平台,实现人-机实时高效协同决策,支撑施工过程中岩体判识、设计交互、施工监管、质量评价等工作环节由传统模式向智能化转变,有效减少高风险环境中的作业人员,大幅提高施工质量和效率。

## 6. 运行阶段的AI赋能

### (1) 健康诊断

智能监测是库坝运行阶段安全管理的基础环节,依托AI大模型和数字孪生技术,可实现对库坝系统的精准感知与健康诊断。通过高精度传感器、无人机巡检等技术,采集和整合结构变形、渗透压力和运行参数等数据,结合数字孪生平台,构建库坝系统的动态数字化镜像。通过对数据的深度分析,识别裂缝扩展、渗漏点增多等异常,准确定位隐患点。在此基础上,结合历史数据和环境条件预测库坝系统隐患点的发展趋势,定期生成健康报告,实时掌握运行状态,提供除险加固方案,为保障库坝系统安全运行提供技术支持。

### (2) “四预”功能

在强地震、超标准洪水、地质灾害和突发性安全事件等极端复杂条件下,库坝系统运行面临诸多挑战。针对这些难题,AI赋能“四预”(预报、预警、预

演、预案)功能,通过融合历史数据和实时监测数据,可预测超汛限水位、坝体变形和边坡滑移等潜在风险;根据实时分析监测数据,调整预警阈值,可有效提高预警的时效性和精准度;借助VR/AR/MR等技术提供多情景模拟平台,优化应急演练方案,提升突发事件中的应变能力;依托AI全局优化能力,分析多坝系统和气象条件,动态调整调度方案,确保工程安全与效益平衡,从而全面提升库坝系统运行阶段的风险管控能力。

### (3) 长寿服役

著名田径运动员苏炳添在职业生涯即将结束时,通过智能体育系统分析和科学训练,延长了运动生涯,并在东京奥运会取得好成绩。受此启发,针对库坝系统长寿服役和延寿服役难题,可利用AI技术对库坝系统进行全面监测和分析,识别性能瓶颈和潜在风险,优化库坝系统的运行管理参数,建立性能服役状态预测模型,研判设施的损伤和老化趋势,进行预防性检修和维护。通过损伤识别、主动避险和运行参数优化,最终实现库坝系统的长寿服役和延寿服役。

## 四、结论与展望

以人工智能为代表的数智技术推动新一轮科技革命和产业变革,库坝系统安全管控应积极寻求AI赋能,数字流域、数智库坝和数字孪生等是时代命题。数智技术的实际应用离不开大模型及高质量的算据、算法、算力,应加快AI与勘测、设计、施工及运维的硬件设施装备深度融合,探索大模型数字孪生平台建设。尽管AI在“1到N”方面具有极高的效率,但目前还不能做“0到1”的原创工作,构建库坝数字孪生系统应当考虑数据和物理机制双驱动,以实现具有更高精度和效率的“四预”功能。需要强调的是,AI可以赋能库坝安全控制,但“赋能”不是“替代”,库坝安全本身不取决于AI,而在于工程勘测设计、施工及运行的“本质安全”。

### 参考文献:

- [1] 孙凝晖.十四届全国人大常委会专题讲座第十讲讲稿:人工智能与智能计算的发展[EB/OL].(2024-04-30)[2024-12-20].[http://www.npc.gov.cn/c2/c30834/202404/t20240430\\_436915.html](http://www.npc.gov.cn/c2/c30834/202404/t20240430_436915.html).
- [2] ZHONG D H, CUI B, LIU D H, et al.Theoretical research on construction quality real-time monitoring and system integration of core rockfill dam[J].Science

- in China ( Series E: Technological Sciences ), 2009, 52(11):3406-3412.
- [3] 马洪琪, 钟登华, 张宗亮, 等. 重大水利水电工程施工实时控制关键技术及其工程应用[J]. 中国工程科学, 2011, 13(12):20-27.
- [4] 李庆斌, 马睿, 胡昱, 等. 大坝智能建造研究进展与发展趋势[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2022, 62(8):1252-1269.
- [5] 樊启祥, 林鹏, 魏鹏程, 等. 高海拔地区水电工程智能建造挑战与对策[J]. 水利学报, 2021, 52(12):1404-1417.
- [6] ZHANG Z L, ZHANG S R, ZHAO Z Y, et al. HydroBIM—Digital design, intelligent construction, and smart operation[J]. Journal of Intelligent Construction, 2023, 1(2):9180014.
- [7] 李术才, 王鑫, 郭伟东, 等. 钻爆法机械化施工隧道随钻地震波超前地质探测技术研究[J]. 隧道建设(中英文), 2024, 44(4):617-632.
- [8] LI S C, NIE L C, LIU B. The Practice of Forward Prospecting of Adverse Geology Applied to Hard Rock TBM Tunnel Construction: The Case of the Songhua River Water Conveyance Project in the Middle of Jilin Province[J]. Engineering, 2018, 4(1):131-137.
- [9] 何川. 隧道工程智能建造技术进展——钻爆法隧道[R]. 成都: 第二十一届中国岩石力学与工程学术年会, 2024.
- [10] 冯夏庭, 周辉, 李邵军, 等. 复杂条件下岩石工程安全性的智能分析评估和时空预测系统[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(9):1741-1756.
- [11] 周创兵, 陈益峰, 姜清辉. 岩体表征单元体与岩体力学参数[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(8):1135-1142.
- [12] 周创兵, 陈益峰, 姜清辉, 等. 论岩体多场广义耦合及其工程应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(7):1329-1340.
- [13] 周创兵. 水电工程高陡边坡全生命周期安全控制研究综述[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(6):1081-1093.
- [14] 漆祖芳, 姜清辉, 周创兵, 等. 基于v-SVR和MVPSO算法的边坡位移反分析方法及其应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(6):1185-1196.
- [15] ZHOU C B, CHEN Y F, HU R, et al. Groundwater flow through fractured rocks and seepage control in geotechnical engineering: Theories and practices[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2023, 15(1):1-36.
- [16] 唐辉明. 重大滑坡预测预报研究进展与展望[J]. 地质科技通报, 2022, 41(6):1-13.
- [17] 许强, 董秀军, 李为乐. 基于天-空-地一体化的重大地质灾害隐患早期识别与监测预警[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2019, 44(7):957-966.
- [18] 殷跃平. 新三峡库区长期地质安全战略研究[J]. 中国水利, 2024(22):26-35.
- [19] 中国水利水电科学研究院. SkyLIM水科大模型[EB/OL]. (2024-05-28)[2024-12-20]. <https://skylim.iwhr.cn/homePage.html#/homepage>.
- [20] 南京水利科学研究院. 太湖流域水治理国际会议在江苏无锡召开[EB/OL]. (2024-11-16)[2024-12-20]. [http://www.nhri.cn/art/2024/11/16/art\\_32\\_78974.html](http://www.nhri.cn/art/2024/11/16/art_32_78974.html).

责任编辑 王 慧