

安全-生态-智能库坝建设的挑战与展望

周创兵¹, 向 衍^{2,3}, 姚 池¹, 盛金保^{2,3}

(1. 南昌大学流域碳中和教育部工程研究中心, 330031, 南昌;
2. 水利部 交通运输部 国家能源局南京水利科学研究院, 210029, 南京; 3. 水利部大坝安全管理中心, 210029, 南京)

摘要:我国已建成全球规模最大的库坝体系, 水库大坝在防洪、发电、通航、供水等方面发挥了不可替代的作用。然而, 大量早期建设的库坝工程服役时间长、对运行环境和功能需求变化的适应性不够; 超标准洪水增大了土坝溃决风险; 快速城镇化加大了“城市头顶一盆水”的库坝潜在风险; 同时, 水库淤损、生态环境影响以及非常规安全风险等也带来严峻挑战。安全大坝、生态大坝、智能大坝是应对新挑战的库坝发展新理念, 具有内在的历史逻辑、理论逻辑和现实逻辑。安全层面, 需从传统工程安全拓展至系统安全层次, 通过功能评估、韧性提升与除险加固等提升风险防控能力; 生态层面, 要求通过工程和非工程措施, 最大限度减小工程对河流生态系统的负面影响, 并主动发挥其防洪减灾、调水调沙等正向生态效益; 智能层面, 应加快库坝透彻感知、智能运维、智能诊断和自主决策的技术突破, 建设数字孪生库坝系统, 实现库坝全生命周期的数智化管控。未来, 需要从保障国家水安全的战略高度, 统筹推进安全-生态-智能库坝建设与运维, 为流域防洪工程建设、国家水网工程建设及复苏河湖生态环境等提供坚实基础。

关键词: 大坝; 安全; 生态; 智能; 库坝工程; 数字孪生

Challenges and prospects of safe, ecological, and smart reservoir and dam construction

ZHOU Chuangbing¹, XIANG Yan^{2,3}, YAO Chi¹, SHENG Jinbao^{2,3}

(1. Engineering Research Center of Watershed Carbon Neutralization of Ministry of Education, Nanchang University, Nanchang 330031, China; 2. Nanjing Hydraulic Research Institute, Ministry of Water Resources, Ministry of Transport, National Energy Administration, Nanjing 210029, China; 3. Dam Safety Management Center of the Ministry of Water Resources, Nanjing 210029, China)

Abstract: China has established the world's largest reservoir and dam system, in which reservoirs and dams play irreplaceable roles in flood control, power generation, navigation, and water supply. However, a large number of projects constructed in the early stages feature long service life and insufficient adaptability to changes in operating environments and functional requirements. Floods exceeding design standards increase the risk of earth dam failure, while rapid urbanization poses greater potential risk to the reservoirs and dams described as “a basin of water over cities”. Meanwhile, reservoir sedimentation, ecological and environmental influences, and unconventional safety risks pose severe challenges. The concepts of safe dams, ecological dams, and smart dams represent the new development philosophy for addressing the emerging challenges, possessing their inherent historical, theoretical, and practical logic. From a safety perspective, it is necessary to expand from traditional engineering safety to system safety level, and enhance risk prevention and control capacity via functional assessment, resilience improvement, and risk mitigation and reinforcement.

收稿日期: 2026-01-09

作者简介: 周创兵, 中国工程院院士, 流域碳中和教育部工程研究中心主任。

基金项目: 中国工程院科技战略咨询项目 (2025-XZ-61); 国家自然科学基金项目 (52479130、U23B0150、U2443230)。

From the ecological perspective, both engineering and non-engineering measures are required to minimize the adverse effect of projects on river ecosystems, while proactively giving play to the positive ecological benefits of reservoirs and dams, such as flood control and disaster reduction, and water-sediment regulation. From the intelligence perspective, greater efforts should be made to achieve technological breakthroughs in comprehensive perception, intelligent operation and maintenance, intelligent diagnosis, and autonomous decision-making of reservoirs and dams, and digital twin reservoir-dam systems should be established to enable the digital and intelligent management of reservoirs and dams throughout the entire life cycle. In the future, from the strategic height of ensuring national water security, it is necessary to coordinate the construction, operation, and maintenance of safe, ecological, and smart reservoirs and dams to provide a solid foundation for the construction of basin flood control projects, the development of national water networks, and the restoration of river and lake ecosystems.

Keywords: dam; safety; ecology; smart; reservoir and dam project; digital twin

中图分类号: TV62 文献标识码: A 文章编号: 1000-1123(2026)02-0001-10

DOI: 10.3969/j.issn.1000-1123.2026.02.001

一、引言

2025年12月5日,习近平总书记在四川省成都市都江堰同法国总统马克龙进行友好交流。都江堰令我们深切感受到了中华民族卓越的治水智慧及古代水利工程的不朽伟绩。可以说,一部中华文明史,大半部治水史。这与我国独特的地理地形和季风性气候特征密切相关。习近平总书记指出,水资源时空分布极不均匀、水旱灾害频发,自古以来是我国基本水情。正是在这样的自然环境下,水利工程建设在我国自古以来就占据着极其重要的地位。

新中国成立以来,我国经过70多年持续不断的实践探索,水库大坝建设取得了举世瞩目的成就。目前,我国已建成水库大坝约9.5万座,高坝数量居世界首位,100 m以上高坝超过250座,占全球总数的25%,尤其是300 m级高坝建设和运行处于国际领先水平。从规模宏大的三峡水利枢纽,到代表不同类型坝工技术巅峰的锦屏一级拱坝(坝高305 m)、双江口心墙堆石坝(坝高315 m)及大石峡混凝土面板砂砾石坝(坝高247 m),一系列“世界之最”标志着我国已从水利大国迈向水利强国。这些工程在防洪减灾、清洁能源生产、农业灌溉、城乡供水、内河航运及生态调节等方面发挥了不可替代的综合效益,成为支撑经济社会可持续发展的关键基础设施。

库坝工程在发挥综合效益的同时,亦存在着巨大潜在风险,国内外历史上不乏惨痛教训。如1959年法国马尔帕塞拱坝坝肩失稳、1963年意大利瓦依昂拱

坝库岸滑坡、1976年美国提堂土坝管涌、我国“75·8”板桥水库溃坝等重大灾害案例,均警示着库坝安全的极端重要性。我国库坝安全形势曾一度严峻:土石坝占比高达92%,老化病害问题普遍,1954—2021年累计溃坝3558起,多年平均溃坝率约0.5‰。经过长期持续不懈的病险水库除险加固与安全管理体系强化,进入21世纪后,溃坝率显著下降至0.05‰以下,并于2022—2025年连续4年实现溃坝事故“零发生”。这一历史性转变,标志着我国水库大坝安全状况得到了根本性改善,我国已稳步迈入世界低溃坝率国家前列。

尽管成就斐然,但我国库坝安全仍面临多重叠加的严峻挑战。首先,自然因素风险加剧:近半水库已服役运行超50年,工程老化与材料性能劣化问题日益凸显;普遍存在的库区淤积导致有效库容衰减,功能效益降低;极端天气事件频发、超标准洪水及强震等持续考验工程设防标准与应急能力。其次,社会承灾体脆弱性上升:水库下游地区经济社会高度聚集,一旦水库失事,后果将呈指数级放大。此外,非传统安全威胁增强:在全球地缘政治复杂多变的背景下,关键水利基础设施可能面临的非对称威胁增加。因此,库坝安全已超越一般工程安全范畴,日益成为关乎人民生命财产、经济可持续发展乃至国家总体安全的重要组成部分。

面对新形势、新要求,库坝工程已逐步超越防洪、发电、通航、供水等传统功能范畴,全球坝工领域正经历理念重塑、技术革新与模式再造的深刻变革。2025年5月,水利部部长李国英在国际大坝委员会第28届大会暨93届年会上提出的“构建安全大坝、生态大坝、

智能大坝”倡议,被完整纳入《世界(成都)宣言》,成为国际坝工界的普遍共识。水库大坝已成为流域防洪工程体系的重要组件、国家水网建设的重要节点、河湖生态环境复苏的重要支撑。

二、安全-生态-智能库坝的内在逻辑与本质特征

1. 内在逻辑

安全大坝、生态大坝、智能大坝的提出,具有深刻的历史逻辑、理论逻辑和现实逻辑。我国是水利大国,更是水利古国。因势利导利用自然、改造自然,实现兴水利、除水害的目的,是古代水利的基本特征,并由此建成了都江堰、郑国渠等工程。从历史逻辑看,中国几千年治水实践经验表明,水库大坝作为重要水利设施,安全是永恒底线,生态是内在要求,而智能化则是古老智慧在数字时代的拓新。三者层层递进,统一于人水和谐的生态文明发展理念。河湖是一个不断演化的自然系统,水库大坝建设使这一系统成为“自然-工程”耦合系统。该系统具有复杂的物质-能量-信息的输入输出及运行机制,有生态系统与生命周期。为应对极端天气、地质灾害等影响,系统应具备自适应性和可恢复力。因此,库坝安全是该系统的本质属性,是兴利除害的前提。水库大坝对生态系统的影响既有负效应,也有正效应,关键在于“趋利避害”,主动创造生态价值。现代水利工程是涉及防洪、发电、航运、生态、供水、灌溉等功能的复杂巨系统,充分利用现代信息技术、数智技术等进行水库大坝智能建设和智慧运维,可以更好发挥其综合效益。因此,系统论、演化论、控制论及协同论等是安全大坝、生态大坝、智能大坝建设的理论逻辑。从现实逻辑看,安全大坝是应对极端

天气、超标准洪水、强烈地质作用的安全底线;生态大坝是践行习近平生态文明思想、推进人水和谐的刚性约束;智能大坝是实现库坝工程高质量发展、保障国家水安全的强大引擎。

2. 本质特征

安全大坝、生态大坝、智能大坝是面向新需求、应对新挑战所提出的库坝工程发展的战略理念,三者相互关联,是有机统一的整体(见图1),共同构成了现代水库大坝高质量发展的核心内涵。

首先是安全大坝,其内涵已超越了传统工程安全的范畴,拓展到了系统安全,涵盖工程安全、公共安全、生态安全、生产安全与防灾安全等。其核心目标是要确保工程自身稳定可靠,更致力于在极端灾害事件中保障人员安全、减轻灾害损失、维护社会稳定,体现了从单一结构防御到全过程、多维度风险系统管控的演进。本质要求是构建贯穿规划设计、建设运行全生命周期的韧性安全保障体系。近年来,水利行业构建现代化水库运行管理矩阵,推进全覆盖、全要素、全天候、全周期“四全”管理,强化预报、预警、预演、预案“四预”措施,确保风险隐患早预测、早发现、早处置、早消除,接续推进水库大坝除险加固,严格落实大坝安全责任制等,安全大坝建设取得显著成效。

其次是生态大坝,其内涵是践行“人水和谐”理念,将生态环境保护置于优先位置,建设的不仅是系统安全的库坝,更是生态友好的库坝。其核心目标是在实现库坝功能的同时,维护和改善流域生态环境,保障河湖生存与健康演化。本质要求是要充分认识库坝阻隔对河流连续性、水文节律、水沙输移及生态系统产生的影响,通过工程与非工程措施,主动减缓、修复、补偿其对水环境与水生态的不利影响。近年来,

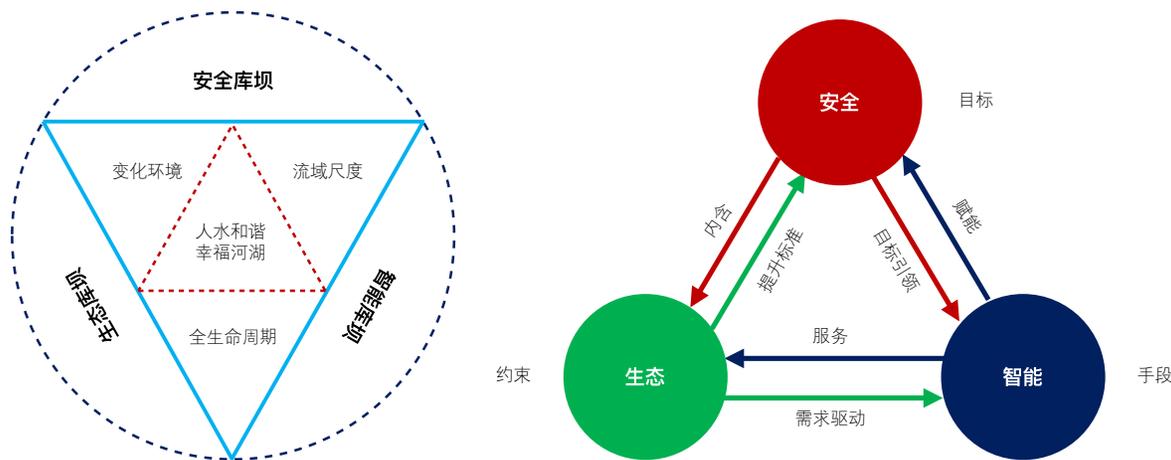


图1 新时代库坝系统建设和管理的核心理念

水利水电行业通过推行生态融合设计、建设大坝过鱼设施、创新分层取水技术、发展绿色施工工艺等,最大限度减轻工程对生态的影响。统筹流域水资源、水生态、水环境,开展以水库群联合调度为手段的生态调度,主动修复河流生态。同时,开展典型水库调水调沙、生态补水、河口压咸等,在生态大坝建设方面取得了重要进展。

再者是智能大坝,其内涵是通过透彻感知与数智技术,使得库坝具有全域感知、智能诊断和决策、自主馈控等能力,优质高效地服务于安全大坝、生态大坝建设。其核心目标是实现库坝服役状态的透彻感知、智能分析、前瞻决策与智慧运维。本质要求是构建一个与物理库坝实时交互、深度耦合的数字孪生体。近年来水利行业加快推进数字孪生水利体系建设,建立“天空地水工”一体化监测感知系统,全覆盖、全要素、全天候、全时空采集库坝性态和环境信息,对监测数据进行同步映射、诊断分析,强化数字孪生“四预”功能,实现更精准的风险预警、更高效的工程运维和更科学的应急管理,从而全面提升灾害防御、工程可靠性与公共安全保障能力。面对复杂条件和极端环境挑战,智能库坝建设将贯穿全生命周期,在流域尺度实现风险超前预警与多目标精准调控,协同保障库坝安全并动态满足生态需求,有力支撑智慧水利建设。

三、安全库坝面临的挑战和关键问题

从系统安全角度,探讨几个有代表性的库坝安全挑战与问题。

1. 极端水文事件下的土坝溃决问题

观测数据显示,过去70年间,我国400 mm等降水量线整体呈向西北移动的趋势,降水总量偏多、暴雨频发成为常态。近年来,我国极端水旱灾害呈现气温升高引起暴雨洪水和干旱事件增加,极端水旱灾害发生地点随机、时间随机、强度随机的“一增加三随机”明显态势,特别是区域性洪水、突发性山洪、长历时干旱增多,致灾因素和传导链条复杂,灾害叠加外溢效应加剧。案例表明,土坝溃决风险主要由超标准洪水等极端水文事件引发,溃坝形式以漫顶和渗透破坏(流土、管涌等)为主。为了保证超标准洪水条件下水库大坝“漫而不溃、漫而缓溃”的安全底线所采取的工程措施包括坝顶硬化与加设防浪墙、开挖临时泄洪通道、建设防渗墙、采用高压喷射灌浆及土工膜防渗等。上述措施中,有的看似技术门槛不高,却非常实用有效。

如在应对超标准洪水时,开挖临时溢洪道便是一种及时有效的应急处置方式。但也需注意,某些临时工程在长期泄洪振动下,可能与坝体之间产生空隙,间接引发渗流问题,成为一种潜在病害。

2. 动物巢穴对堤坝安全的威胁与防控问题

在气候变化背景下,白蚁、老鼠、獾等动物在堤坝中形成的巢穴,已成为引发管涌、渗漏甚至溃坝的重要原因。依赖人工巡查或普通探地雷达,难以有效识别坝体内的小型孔洞或动物早期巢穴。在治理方面,传统的灌浆治理常需大面积开挖,不仅破坏坝体结构,而且成本高、周期长,不适用于分布广泛、规模较小的洞穴治理。针对这些挑战,水利部白蚁防治重点实验室(依托中国水利水电科学研究院)在智能检测与治理技术上已取得相应进展,研发的国内首套四频超宽带脉冲三维探地雷达与多频超宽带脉冲三维探地声呐,显著提升了对小型洞穴的探测灵敏度,研制的“锥探验证—灌浆一体化微创机器人系统”,实现了探、诊、治的微创化作业,减少了对坝体结构的破坏。值得指出的是,此类风险管控未来应转向“源头防控、早期阻断”,研究白蚁等动物的生物习性,在洞穴形成早期甚至动物活动初期即进行干预,实现风险前置、防患于未然。

3. 水库淤损情势与对策问题

据不完全统计,全国水库平均淤积率约11.28%,但不同流域差异显著,黄河流域水库淤积率超过36%,而长江流域约为4.24%,呈现“北高南低”区域特征。水库淤积导致的库容损失问题已不容忽视。针对淤积问题,可从两类思路着手应对:对于具备排沙条件的水库,可通过沙峰调度、高频排沙、射流或气动扰动等动态清淤手段,增强泥沙输移能力;对于无排沙设施的水库,则需采取工程清淤措施。当前技术难点不在于清淤设备本身——我国在清淤船、绞吸船等技术上已处于世界领先水平,真正的挑战在于清淤过程与生态保护、资源环境的协调,特别是清淤固废的消纳与资源化利用问题。

4. “城市头顶一盆水”水库大坝安全问题

随着城市化进程的快速推进,城市空间不断向河流上游及周边丘陵区域扩展,使得城市的大量人口、资产与关键基础设施暴露在上游水库可能因极端天气和超标准洪水引发的水灾害风险之下,此即“城市头顶一盆水”水库的由来。当前,主要存在以下风险:一是部分早期建设的库坝工程标准偏低,防洪与抗震能力不足;二是预测预警体系相对滞后,小型水库自动化监测覆盖率较低,甚至存在监测空白;三是城市扩张侵占行洪区

与蓄滞洪区,加之下游河道缩窄,进一步加剧洪水威胁。对此,应当通过综合措施,将此类水库大坝的潜在风险转化为可预测、可调控、可承受的安全状态。首先,要加快工程加固与升级改造,优先解决可能引发重大公共安全问题的隐患。其次,要优化国土空间与系统规划,严格控制城市向高风险区域扩张,逐步恢复河道自然滞洪空间。第三,要推进水利工程复合灾害链衍生研究,创新水利工程韧性提升成套关键技术。第四,要健全城市水灾害应急与管理体系,持续提升城市安全相关应急管理能力。

5. 非常规因素引发的库坝安全问题

当前复杂国际环境下,由非常规因素引发的库坝安全问题不容忽视。高坝大库因其显著的社会经济影响与重要战略价值已成为战争及恐怖袭击的潜在重点目标。典型的如俄乌冲突中第聂伯河梯级水电站遭到系统性破坏,特别是卡霍夫卡大坝的精准打击与溃决进一步凸显了高坝大库在非常规情况下的脆弱性,应引起各方的高度关注。对此亟须研究极端冲击荷载下的高坝大库毁伤机理与破坏模式,阐明不同坝型在不同冲击荷载下的损伤过程与传播规律,研发受损后的快速识别与安全评估技术,建立不同坝型的评估方法与判据。

从工程运行角度看,要更加关注梯级水库的安全调控与应急方案,尤其是在极端状况下水库运行控制水位的确定。高坝大库一旦遭受到高风险的非常规因素影响,其快速放空能力与智慧化调控技术就显得至关重要。当前许多高坝存在放水速度慢甚至无法完全放空的问题,近年中国电建集团贵阳勘测设计研究院等单位已针对高坝大库放空问题开展技术攻关并取得了重要进展,应进一步关注。

6. 服役性能演化与链生灾害库坝安全问题

由于工程长期运行,材料老化问题日益凸显。服役性能演化涉及复杂的物理、力学与化学作用,包括多场耦合、多过程交互影响等关键机理。为此,需要揭示材料劣化与结构老化规律,明确损伤扩展对库坝应力、渗流状态的改变及其对整体安全稳定的影响程度。库坝服役性能劣化可能会引发坝体变形损伤开裂、溶蚀性渗漏等病害。一些水下或深埋病害已成为库坝安全探测和加固的重点。

强震是链生灾害的重要灾害源。我国西部地区地质环境复杂,地震烈度高,容易因强震引发一系列次生灾害,对库坝区泄水闸门、泄洪洞、坝肩高边坡等关键水工建筑物影响显著,严重时危及库坝安全,必须加强

针对性防治。

滑坡灾害在高坝大库区极为典型。强降雨及库水位周期性变动常引发岸坡变形失稳,进而产生滑坡、涌浪等连锁反应,对库坝安全构成严重威胁。我国西南高山峡谷区曾多次因巨型滑坡堵江形成堰塞湖,对梯级水库群构成重大风险,危及公共安全。对此需要研究链生灾害孕育机制、传导规律、风险评估与防控等。

围绕库坝安全,我国已在“十三五”“十四五”期间开展了系列技术攻关。例如,“十四五”期间,南京水利科学研究院依托国家重点研发计划项目“高坝深埋病害精准诊断与可视化除险技术装备”,在高土石坝病变灾变模拟理论与深埋病害探测修复技术、高混凝土坝病变灾变模拟方法与隐性裂缝探测修复技术,以及300 m级水头高坝大库安全高效放空与智能控制技术等方面取得重要进展。

四、生态库坝面临的挑战及关键技术问题

生态库坝建设就是要通过工程和非工程措施抑制或减缓库坝生态负效应,强化其生态正效应。

1. 高坝下泄水流水温调节技术

库坝蓄水后常形成明显的水温分层现象。对于200~300 m级高坝,水库水温夏季通常表现为上暖下冷,冬季则相反,而底层水温常年趋于稳定。若直接从固定高程泄水,会导致下泄水温与自然河道的水温节律出现显著偏差——夏季过低、冬季过高,从而对下游水生生物尤其是鱼类的生长与繁殖造成不利影响。

我国大多数已建水库在规划设计阶段未充分考虑该问题,缺乏有效的水温调控措施。新建水库虽可通过设置叠梁门、多层取水口或前置挡墙等结构缓解水温分层影响,但对大量已蓄水运行的水库而言,这类改造往往难以实施。

近年来中国电建集团中南勘测设计研究院研发了“柔性幕墙技术”,为解决这一难题提供了可行路径。该技术通过在进水口前方布设柔性幕墙有效阻隔中下层低温水,并通过调节幕墙顶部高程实现分层取水。其突出优势在于:①支持水下施工,适用于已蓄水水库,改造过程不影响水库正常运行;②在保障电站发电效益的同时,显著调节下泄水温,减轻对下游生态的负面影响。该技术已形成设计方法、柔性结构体系、专用施工装备与控制系统,并在贵州三板溪水库成功应用。监测数据表明,该技术在生态大坝领域具有重要的创新价值与应用潜力。

2. 高坝过鱼技术

水库大坝建成后,阻隔了上下游之间的物质与能量交换,对鱼类洄游造成显著影响。低坝及闸坝尚可通过鱼道等设施辅助鱼类通行,而高坝过鱼则一直是一项世界性难题。其困难主要源于:一是现有工程大多在初期设计中未系统考虑过鱼需求;二是高坝水头大、水流条件复杂,传统过鱼设施适用性受限;三是存在“生态陷阱”风险,即若将下游鱼类直接放入上游水库,会因水温、流速等生境差异导致其难以适应甚至无法繁殖,从而丧失生态意义。

我国自2010年起在彭水、龙开口等水电站开展相关研究,重点攻关集鱼效率、高坝适用性以及避免“生态陷阱”等三大技术难题。长江设计集团有限公司针对300 m级高坝研发了“水电站发电尾水口集鱼方法及升鱼机装置”。该技术利用电站尾水流态,构建三维诱鱼流场,通过室内实验与现场监测优化流场设计,显著提升集鱼效率。系统还配套生态化运转与动态放养监控机制,确保鱼类在适宜流动水体中存活与繁衍。该套技术方案已在乌东德水电站成功应用,监测数据表明其过鱼效果显著优于国内同类设施;在白鹤滩水电站等工程中的推广应用效果也良好。该成果为高坝工程有效过鱼及生态保护提供了重要技术支撑。

3. 生态调度与生态修复技术

除工程措施外,非工程手段同样至关重要。生态调度方面,南京水利科学研究院、中国水利水电科学研究院等单位共同研发了水量-水质-生物多要素耦合的水库生态调度技术。该技术重点研究水动力与水温对鱼类繁殖的影响,提出“涨水促进产卵、落水促进孵化”的协同调度策略,并构建统筹防洪、发电与生态的多目标调度模型,已在实践中取得积极成效。

在生态修复方面,也涌现出一些具有广泛前景的技术。南昌大学提出的共轭土工程技术,主要针对工程裸露面、水库消落带及底泥改造等场景,通过生物基质与高分子材料改造土壤结构与理化性质,使其更符合植被恢复与生境营造的要求,在工程裸露面、矿山、河湖消落带生态修复中得到成功应用,已具备规模化推广潜力。重庆大学提出的微生物诱导碳酸钙沉积(MICP)裂缝修复技术(亦称“生物建造”),在南海岛礁加固与文物修复领域已得到成功应用,其核心是利用微生物代谢诱导碳酸钙沉淀,实现对坝体裂缝的仿生修复,目前已在土木与岩土工程中形成一套完整的技术体系,具备在水利工程中推广应用的潜力。

4. 库坝生态正效应及典型工程

我们既要切实建设好生态友好型大坝,又要实事求是地宣传库坝系统的正向生态效益。首先,防洪减灾是库坝最根本的生态效益。洪水失控必然引发河道变迁与生态灾难,历史经验表明,有效防洪是流域安澜与生态稳定的基石,是关乎民生福祉的最大生态保障。其次,库坝工程调水调沙是生态保护的生动实践。以小浪底水利枢纽工程为代表的调水调沙运行,有效缓解了黄河下游河道萎缩状况,抑制了河口侵蚀,实现了关键河段的冲淤平衡,生态效益显著。第三,水库在压咸补淡方面起到了关键作用。例如在珠江口,通过水库调度抵御咸潮、保障淡水供应。第四,生态补水功能日益凸显。例如在2022年长江全流域罕见旱情中,通过水利部“长江流域水库群抗旱保供水联合调度专项行动”实施的生态补水有效缓解了区域用水紧张状况,保障了下游农田灌溉与生态基流。

生态库坝建设不应停留于“建坝与否”的简单争论,而应转向如何以更具生态适应性的方式,进行库坝的规划、建设与运维。这就要求我们体现“上善若水,水利万物而不争”的文化精髓,在开发与保护中实现人水和谐共生。如鄱阳湖水利枢纽,其作为一项规划多年的水利工程,建设理念具有鲜明的生态导向,体现“建闸不建坝、调枯不控洪、拦水不发电,江湖两利、动态调控,生态优先、绿色发展”原则,然而因引发广泛讨论导致该工程长期未能实施,究其本质是对传统水利工程生态化实践存在误解。第一,须跳出鄱阳湖、立足长江大系统看待这个工程。鄱阳湖流域是长江的重要组成部分,其流域面积占长江流域的9%,年均入江水量约占长江径流量的16%,因此鄱阳湖的治理与保护不仅仅是鄱阳湖流域或江西省的局部事宜,更是事关长江流域大保护的重大工程。第二,须从历史演化视角,评估工程的必要性与紧迫性。近几十年来受气候变化与高强度人类工程活动共同影响,鄱阳湖水文情势与生态系统已发生显著变化,例如枯水期提前、持续时间延长,“丰水一片、枯水一线”的自然节律受到严重干扰,湖区生态功能退化风险加剧,已经到了不得不采取人工干预修复生态的紧要关头。第三,需要把握工程本质属性,科学定位工程功能。该工程虽被冠以“水利枢纽”之名,但其主要功能并非防洪、发电,而是生态调控。其根本目标在于通过水位调节,涵养湖区水源,维持湿地生境稳定,保护生物多样性,并辅助改善区域小气候,本质上是维持鄱阳湖生态系统健

康的水利基础设施,是传统水利工程生态化的生动实践。第四,应坚持对立统一,辩证地看待这一工程。任何工程皆具有双重性,关键是其利大于弊还是弊大于利。该枢纽采用闸坝设计,汛期可敞泄行洪,最大程度减少对自然水文过程的干扰,在非汛期通过科学调控能发挥积极的生态效益。生态水利的核心在于“趋利避害”,科技创新正是实现这一目标、优化工程效益的重要支撑。

五、智能库坝面临的挑战及关键技术问题

智能库坝建设覆盖智能设计、智能建造、智能感知、智能分析、智能决策与智能运维,涉及技术模式与管理体的系统性变革。

1. 智能库坝核心架构及技术挑战

智能库坝的核心架构,一般可划分为感知、分析、决策、应用四个层次。感知层是基础,需要实现全域、连续、精准的透彻感知,覆盖库坝内部结构与外部环境。分析层是核心,需要针对单个工程、梯级系统及流域等不同尺度,构建相应的分析模型与分析软件。决策层是关键,需要依据历史数据、实时监测数据与预测数据的融合与反馈,形成决策支持。应用层是目标,需要构建智慧决策系统与云服务平台,形成“端-网-云”融合的完整体系,完成从智能感知、融合挖掘到辅助决策的全过程。推进智能库坝建设面临如下技术挑战:

其一,全面精准感知难度大。实现“天空地水工”一体化透彻监测实属不易,而最困难的部分在于岩土体与结构内部等“看不见、摸不着”区域的监测感知。既有工程存在传感器历史埋设不足、设备老化失效等问题,新建或改造监测体系又面临成本与技术的约束。多模态感知能力不足,不同感知手段(如视觉、声学、变形、渗流)的数据融合技术尚不成熟。

其二,感知体系协同性不足。天基(卫星遥感)、空基(航空)、地基监测的精度、频次各异,如何实现一般性监测与关键部位专项监测的协同,是提升感知效率的难点。

其三,数据治理与应用存在瓶颈。海量数据在汇集、管理过程中面临标准不一、质量不高、关键属性缺失等问题,导致“数据孤岛”现象普遍存在。数据处理算法与前沿智能技术存在“代差”,制约了数据价值的深度挖掘。

其四,数字孪生技术有待深化。当前许多数字孪生项目仍停留于可视化层面,其核心应是物理实体与

数字模型之间基于内在物理力学机制的实时、高保真映射与同步,并融合机理模型与数据驱动分析。

2. 既有库坝数智化改造的差异化路径

党的二十届四中全会提出推进传统基础设施更新和数智化改造。我国现有水库数量庞大,工程规模、管理技术等差异性大。针对既有库坝的改造问题,要理解数智化改造的本质要求,应遵循差异化技术路径。

数智化改造不仅是技术更新,更是系统性转变。一是理念转变,这是根本;二是手段更新,特别是对大数据、人工智能等现代数字技术的应用;三是模式转换,即从原有发展模式转向新的运维管理模式;四是效益提升,最终实现工程安全与综合效益的协同提升。因此,数智化改造不能仅仅停留在购买传感器或构建模型的层面,而应从底层逻辑出发,进行系统化、体系化的重构。

对于已建水库的数智化改造,必须坚持从实际出发,分级分类、因地制宜实施。我国水库数量众多,坝型、建设年代、技术标准及既有数字化程度各不相同,不能“一刀切”。需要首先按坝型与建设年代进行分类,再依据库容与工程重要性进行分级。在此基础上,可选取具有代表性的库坝开展数智化改造试点,针对不同风险等级和基础条件,制定相应的改造方案。

要充分发挥现代信息技术特别是“天空地水工”一体化感知、智能监测等先进手段的作用,对缺失环节进行补充,对薄弱部分进行增强,对落后系统进行更新。数智化改造应聚焦关键领域,例如城市上游重要水库(“头顶库”),以及涉及公共安全、风险突出的库坝工程;应注重代表性、可推广性和实效性,确保改造工作落到实处、发挥实效。需要指出的是,数智化改造升级需要大量数据,新一代人工智能的典型特征是大数据驱动,这要求打破部门壁垒,整合设计、施工、业主、行业主管部门等多方数据,开展有组织的科研,挖掘两大核心数据资产的价值:一是国内积累的大量岩土工程室内外实验数据;二是高坝大库长期运行中产生的变形、渗流等安全监测数据。

3. “模型-数据”双驱动的研究范式

智能库坝的发展应坚持机理模型与数据模型双驱动的分析范式。一方面,需发展融合物理机制的智能分析模型,如力学参数智能反演模型、变形渗流演化预测模型与安全评价模型等;另一方面,应充分利用真实数据训练人工智能模型,弥补纯机理模型在应对复杂非线性问题时的不足。通过构建数据空间,实现对历

史规律的深度分析和对未来态势的精准预测,最终推动库坝安全管理从传统经验模式向智能化、精细化方向转变。

以白鹤滩工程为例,该工程曾明确提出需研究降雨入渗及库水位周期性变化条件下库坝渗流稳定状态。面对该实际需求,若纯粹采用传统数值模拟方法,则就现场岩体而言,全球尚无成功测试和分析其非饱和和特征参数的方法。然而,工程积累了大量岩体地下水监测数据,可探索利用这些数据开展“模型-数据”双驱动研究,以期获得所需的特征参数。为此,我们构建了与实体模型对应的虚拟数字模型,通过物理机理模型与大量监测数据的融合反演,有效模拟暴雨入渗过程及其对地下渗流场的长期影响。这里假定上层非饱和区与下部饱和地下水之间存在水力联系,显然这是成立的,从而可以联合推演所需的特征参数。我国类似工程积累了大量未被充分利用的监测数据,均可通过此类“模型-数据”双驱动手段,构建高保真模型,并用于预测未来工况下的演变趋势。

采用“模型-数据”双驱动的研究范式,首先应明确建模思路。物理模型提供机理约束下的预测值,其与真实系统观测值之间的偏差是由各种不确定因素引起的。当前许多研究过于追求物理模型的复杂性,反而脱离了工程实际。实践表明,物理模型应尽量简洁,重在揭示核心机理,而复杂的非线性偏差部分则交由数据驱动模型刻画。这样既能保持物理可解释性,又能充分利用监测数据,避免陷入过度复杂的唯象建模,丧失数据驱动方法的灵活性等优势。

4. 库坝工程全生命周期数智赋能

智能技术应赋能库坝安全的全生命周期。首先应从勘测阶段开始转型,融合勘测数据、原位试验数据与传感器数据,构建未来可支撑透明化地质与智能分析的基础数据环境。库坝安全约60%~70%的风险源于不良地质体,如断层、破碎带、溶洞等。通过智能勘测,旨在构建尽可能“透明化”的地质模型,刻画地质结构的时空变异特征。

在设计阶段,人工智能可从三方面赋能。通过“AI+CAD”,实现快速自动化方案设计与优化;采用“AI+CAE”,提升科学计算(如流固耦合分析)的效率与精度,覆盖开挖、填筑、锚固、渗控等全流程数值仿真;研发“AI+BIM”,推动数据共享与多专业智能协同。施工阶段则重在解决极端环境下的施工难题,如高温、高海拔、危险环境下的施工作业。可通过智能凿

岩台车、机器人等装备,实现施工机械化与智能化,并在统一平台进行施工组织与调度。

运行阶段是数智赋能的重点。需通过大模型理解坝体性状演化,识别工作状态,诊断潜在隐患,并实现预测预警。例如,高坝坝基系统是一个整体,需在统一数字空间中耦合模拟坝体、地基及库水的相互作用,构建真正反映演化机制的数字孪生系统。针对我国大量库坝坝龄较长的现状,延寿与韧性提升成为迫切需求。应通过AI模型准确判别坝体的服役性状与演化趋势,识别关键薄弱部位,并采取针对性加固与提升技术,实现工程的长寿安全服役。

对于流域梯级水库群,协同综合调度成为新课题。相对于单体工程,流域尺度上的智能库坝建设更为复杂,也更体现水利系统的大尺度特征。它超越了个体工程范畴,涉及梯级库坝群系统的安全、生态与智能化协同。首先,需要在全流域范围内,对气象、地震及极端事件等进行系统监测与感知。目前水利部门在此方面已开展不少工作,例如雨情、水情、工情监测网络的建设。这是“第一道防线”,关键是要在流域层面实现风险早识别、形势早研判。其次,应系统研究区域尺度上灾害链的演化过程及其对库坝安全与生态的累积性影响,从而建立从灾变识别到防控的一体化体系。再者,是多目标协同调度。流域系统的最终目标,是要在防洪、发电、航运、生态等多目标之间实现动态平衡与协同,在保障防洪安全的前提下,统筹发挥发电、航运及水生态等综合效益。智能大坝应在流域调度中成为关键智慧节点,推动安全、生态等效益的多维协同。

5. 若干关键技术

未来需聚焦以下几个方向的技术创新:

①透彻感知与全域监测技术:推进监测设备国产化与高端化,研发适用于深水、隐蔽部位的非接触式、广域监测技术与装备,如深水探测机器人等。

②新材料与韧性提升技术:研发自感知、自修复的智能材料(如微胶囊自修复混凝土),以及高抗震性能的材料与结构体系。

③数据分析与库坝大模型:研发机理与数据驱动融合的库坝渗流、变形分析与安全评价专用大模型,破解数据丰富而模型匮乏的困境。

④高保真数字孪生技术:构建实时同步、机理清晰的高保真数字孪生体,真正实现典型库坝工程预报、预警、预演、预案的智能化功能。

⑤智能建造新技术:针对深埋大型隧洞、超大型地下洞室、特高坝枢纽工程等,研发智能钻爆机器人、智能压实、智能温控等新一代智能建造技术。

⑥多目标协同调度与平台标准体系:建立统筹防洪、发电、供水、生态等多目标的智慧调度系统,并形成统一的标准与平台体系。

六、展望

安全大坝、生态大坝与智能大坝,三者相互关联、彼此促进,定义了未来库坝工程高质量发展的战略理念,擘画了全球坝工领域建设与运行的战略目标。为实现该目标,应当深入学习贯彻习近平总书记“节水优先、空间均衡、系统治理、两手发力”治水思路和关于治水重要论述精神,强化顶层战略谋划,推进科技自立自强,提升库坝治理体系和能力现代化水平。

1. 把握战略定位

首先,库坝工程安全稳定运行涉及水资源配置、防洪减灾、能源供给与生态保障等各方面,是保障国家水安全乃至流域整体安全不可或缺的基石。因此,安全大坝、生态大坝、智能大坝建设应当跳出库坝工程自身,立足流域防洪减灾、国家水网体系、河湖生命健康等方面,从保障国家水安全的战略高度整体谋划、一体推进。

其次,中国式现代化强调人与自然和谐共生,水利现代化是中国式现代化的重要组成部分。安全、生态、智能的库坝建设,正是水利现代化不可或缺的战略支柱与实体支撑,是诸多水利功能得以实现的物质基础。因此,库坝工程建设必须满足并引领水利治理体系和治理能力现代化的发展方向。

第三,国家水网是一个与自然和社会系统深度耦合互馈的开放巨系统,其复杂性与开放性远超交通网、物流网和能源网等封闭或半封闭系统。在此复杂体系中,库坝作为“结”,发挥着承上启下、调蓄结点的关键作用,具有重要战略价值。因此,库坝工程建设需融入国家水网“纲、目、结”的总体布局。

第四,应当将安全、生态、智能的库坝建设置于“未来水利”的发展格局中。“未来水利”不仅是一个时间概念,更是一种发展观,要求我们始终秉持面向未来、持续演进的理念,不断更新理论方法、技术装备与管理体系。纵观我国几千年的治水史,中国水利走过了古代水利、近代水利、现代水利阶段,正在向未来水利发展,体现了从古代顺应自然,到近代主动利用自

然,再到现代高强度调控自然,进而迈向与自然智慧化共生的演进规律。

未来水利首先将深刻回应当代中国社会发展的绿色低碳化、信息化、数字智能化、系统综合化四大转型趋势,其次要强化科技创新驱动发展的战略定力。库坝工程正朝着“安全韧性强化、绿色低碳转型、数智赋能升级、新质高效发展”方向跃升,安全韧性是底线要求,绿色低碳是刚性约束,数智赋能是实现路径,新质高效是工程目标,这四者构成一个有机整体。

2. 深化科技创新

鉴于库坝在国家基础设施体系中的重要地位,有必要组织实施国家级重大科技研发专项,强化基础理论研究、应用基础研究、高新技术研发等方面全链条部署、全领域布局、体系化推进,尤其要弥补水利领域在高端装备产业化方面的短板。同时,要更好地发挥水利领域全国重点实验室的创新平台作用,围绕安全大坝、生态大坝、智能大坝的关键技术开展联合攻关。此外,要强化高素质专业化人才队伍建设,推进水利工程教育、科技创新、产业需求的深度融合,为行业高质量发展提供持续的人才与智力支持。

安全、生态、智能库坝建设应当坚持“本质安全+韧性提升+数字赋能+灾变防控”的研究策略,建立系统化的库坝安全风险防控研究体系,在空间域上实现整体建模与多尺度分析,在时间域上把握动态演化与全过程反馈,在多场域上实施耦合互馈与协同控制。

3. 完善管理体系

库坝安全不仅是技术问题,更是复杂的社会公共管理问题,必须同步推进库坝管理体系的现代化。建议重点推动两方面工作:

第一,推动《水库大坝安全管理条例》从行政法规升级为国家法律,提升库坝安全管理的法律效力和权威性,为国家水网关键结点安全提供坚实法律保障。

第二,加快构建涵盖安全、生态、智能三个维度的库坝技术标准体系。该体系需具有前瞻性和系统性,能引导和规范新建工程的规划设计,并为既有工程的升级改造提供依据。

回顾发展历程,中国库坝工程建设已经取得了历史性成就,实现了历史性突破,建立了两座具有世界意义的丰碑。第一座丰碑以三峡工程为代表,谱写了我国从库坝大国向库坝强国迈进的新篇章;第二座丰碑以白鹤滩工程为代表,引领了世界300 m级特高坝勘测设计、建造与运维的新征程。面向未来,依托国家水

网工程建设,通过战略层面的高位推动、科技创新的持续驱动、管理体系的协同优化,安全、生态、智能库坝建设必将建立第三座丰碑。

参考文献:

- [1] 李国英.推进安全大坝、生态大坝、智能大坝建设[J].中国水利,2025(16):1-3.
- [2] 李国英.加快建设现代化水网[J].求是,2025(22):24-27.
- [3] 李国英.推动水利高质量发展 保障我国水安全 为确保基本实现社会主义现代化取得决定性进展作出水利贡献[J].中国水利,2026(1):1-9.
- [4] 盛金保,李宏恩.智能大坝技术标准体系构建[J].中国水利,2025(16):58-65.
- [5] 向衍,戴波,王亚坤.水库大坝智慧运维技术创新与实践[J].中国水利,2025(16):81-90.
- [6] 向衍,王亚坤,陈哲,等.高坝水下缺陷检测与诊断评估:现状与挑战[J].水科学进展,2025,36(4):537-552.
- [7] 周创兵,姚池,杨建华,等.数智技术赋能库坝系统安全管控探讨[J].中国水利,2025(1):7-14.
- [8] 盛金保,李宏恩,王芳.智能大坝建设与韧性提升发展路径研究[J].中国水利,2024(24):68-77.
- [9] 刘六宴,李宏恩,高长胜,等.智能大坝研究进展与发展路径思考[J].岩土工程学报,2025,47(10):2003-2014.
- [10] 李敏讷,王妍,王新源,等.鱼类行为生态水力学模型研究现状与发展趋势[J].湖泊科学,2024,36(5):1323-1335.
- [11] 陈求稳,陈宇琛,林育青,等.水电梯级开发真的破坏下游河段营养盐情势吗? [J].Science Bulletin, 2024, 69(5):661-670.
- [12] 邓刚,李维朝,张茵琪,等.堤坝白蚁巢穴探测技术的现状和展望[J].中国水利,2023(15):13-18.
- [13] 曾文慧,吴文静,李志强.二十一世纪以来中国白蚁研究进展[J].应用昆虫学报,2025,62(5):1272-1298.
- [14] 冯树荣,潘江洋,彭忠献,等.一种幕坝型温度异重流拦挡装置:CN108203962B[P].2023-07-25.
- [15] 周创兵,姚池,毛辰良,等.一种具有共轭性质的人造土及其制备方法:202311299382.8[P].2025-10-31.
- [16] 陈生水.高土石坝变形破坏过程预测理论和防控技术创新[J].岩土工程学报,2022,44(7):1211-1219.
- [17] 盛金保,向衍,杨德玮,等.水库大坝安全诊断与智慧管理关键技术与应用[J].岩土工程学报,2022,44(7):1351-1366.
- [18] 邓安军,陈建国,胡海华,等.我国水库淤损情势分析[J].水利学报,2022,53(3):325-332.
- [19] 冯树荣,潘江洋,何雷辉,等.一种柔性阻水结构:201911370796.9[P].2021-10-01.
- [20] 杨家修,杜帅群,湛正刚,等.基于多级闸门联合挡水的高坝大库快速深度放空技术研究[J].水利学报,2020,51(8):906-914.
- [21] 向衍,盛金保,刘成栋.水库大坝安全智慧管理的内涵与应用前景[J].中国水利,2018(20):34-38.
- [22] 黄宇峰,卢文波,王高辉,等.水下爆炸下高拱坝坝面冲击荷载特性研究[J].水利学报,2024,55(5):607-618.
- [23] 张文传,王翔,翁永红,等.乌东德水电站集运鱼系统试运行效果及其影响因素研究[J].水生态学杂志,2025,46(6):231-240.
- [24] 吴俊东,王翔,翁永红,等.乌东德水电站集运鱼系统方案设计[J].人民长江,2022,53(2):88-94.
- [25] MAAVARA T, CHEN Q, VAN METER K, et al.River dam impacts on biogeochemical cycling[J].Nature Reviews Earth & Environment, 2020, 1(2):103-116.
- [26] CHEN Q W, LI Q Y, LIN Y Q, et al.River Damming Impacts on Fish Habitat and Associated Conservation Measures[J].Reviews of Geophysics, 2023, 61(4):e2023RG000819.
- [27] CHEN Y F, YU H, MA H Z, et al.Inverse modeling of saturated-unsaturated flow in site-scale fractured rocks using the continuum approach: A case study at Baihetan dam site, Southwest China[J].Journal of Hydrology, 2020, 584:124693.
- [28] WANG G H, LU W B, YANG G D, et al.A state-of-the-art review on blast resistance and protection of high dams to blast loads[J].International Journal of Impact Engineering, 2020, 139:103529.
- [29] MORENO-RODENAS A, MANTILLA-JONES J D, VALERO D.Age, climate and economic disparities drive the current state of global dam safety[J].Nature Water, 2025, 3:284-295.

责任编辑 王慧