中国科学: 技术科学 2026 年 第 56 卷 第 7 期: 1634 ~ 1641
SCIENTIA SINICA Technologica techcn.scichina.com
《中国科学》杂志社 SCIENCE CHINA PRESS

评 述 复杂恶劣条件下水电开发基础科学问题专刊

复杂恶劣条件下水电开发基础科学问题——第353期双清论坛学术综述

钟登华[1], 张建云[2], 张建民[3], 王进廷[3*], 霍守亮[4], 潘坚文[3], 王睿[3], 任炳昱[5], 姚志峰[1]

1. 中国农业大学水利与智能工程学院, 北京 100083
2. 水利部交通运输部国家能源局南京水利科学研究院, 南京 210024
3. 清华大学水利水电工程系, 北京 100084
4. 中国环境科学研究院环境基准与风险评估国家重点实验室, 北京 100012
5. 天津大学水利工程智能建设与运维全国重点实验室, 天津 300072
* E-mail: wangjt@tsinghua.edu.cn

收稿日期: 2025-12-17; 接受日期: 2026-04-16; 网络版发表日期: 2026-07-10

摘要 我国西南地区水电开发逐步向高海拔地带推进, 面临高寒高海拔、高峰深切河谷、高地震烈度、高地质灾害风险、超深厚覆盖层、敏感生态环境等复杂恶劣条件, 巨型水电工程系统的设计、建设和运维存在诸多新的难题与挑战. 基于第353期双清论坛的研讨成果, 本文总结了复杂恶劣条件水电工程的分析与设计理论、智能建设理论与技术、灾害风险与防控、巨型冲击式水轮机理论与技术、生态环境效应与调控等5个研究领域的主要科技挑战, 凝练了重大关键科学问题, 聚焦了基础研究的重要研究方向.

关键词 水电开发, 复杂恶劣条件, 分析与设计, 智能建设, 工程安全, 巨型冲击式水轮机, 生态环境效应

1 引言

我国西南地区水能资源丰富, 待开发量超过2.3亿千瓦. 未来我国水电开发的重心仍在西南, 《中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和2035年远景目标纲要》要求加快西南水电基地建设. 西南地区水电开发逐步进入高海拔地带, 工程场址地质地形复杂, 气候条件恶劣, 巨型工程系统建设超出现有经验, 面临地质构造活跃地震危险性高、高峰深切河谷地质灾害风险高、高寒高海拔人机施工作业功效降低、超深厚覆盖层变形大、超高水头差装机容量大、敏感生态环境约束条件强等新的难题和挑战. 复杂恶劣条件水电开发迫切需要从分析与设计理论、施工技术与装备、灾害风险与防控、水轮机理论与技术、生态环境评估与调控等领域进行基础研究突破创新.

2023年10月25~26日, 国家自然科学基金委员会在北京召开第353期双清论坛“复杂恶劣条件下水电开发基础科学问题”. 论坛由国家自然科学基金委员会工程与材料科学部、地球科学部、计划与政策局联合主办. 来自高校、科研院所、行业部门与企业等25家单位的40余位相关领域的专家学者参加了本次论坛. 围

引用格式: 钟登华, 张建云, 张建民, 等. 复杂恶劣条件下水电开发基础科学问题——第353期双清论坛学术综述. 中国科学: 技术科学, 2026, 56: 1634–1641
Zhong D H, Zhang J Y, Zhang J M, et al. Fundamental scientific issues of hydropower development under complex and harsh conditions——Academic review of the 353rd Shuangqing Forum (in Chinese). Sci Sin Tech, 2026, 56: 1634–1641, doi: 10.1360/SST-2025-0417

© 2026 《中国科学》杂志社

绕“复杂恶劣条件下水电开发基础科学问题”，与会专家系统研讨了复杂恶劣条件下水电开发建设和发展新科技需求, 总结了面临的难题和挑战, 提出了亟需解决的关键科学问题.

2 复杂恶劣条件下水电开发研究现状与挑战

2.1 复杂条件水电工程分析与设计理论

西南高海拔地区水电开发，存在地质构造活动性强、覆盖层深厚等复杂工程场址条件. 这给场址地震荷载确定、筑坝材料与坝基深厚覆盖层物理力学特性确定、深厚覆盖层渗流与变形协同控制、高坝系统安全分析与评价、巨型地下洞室设计等研究提出了新挑战.

场址地震动荷载的合理评估是强震区水电工程分析与设计的先决条件. 基于经验地震动预测方程(GMPEs)的地震危险性分析方法，如概率地震危险性分析或确定性地震危险性分析，已被广泛用于重大工程设计. 然而，经验地震动预测方程依赖于历史地震动记录，而且只能给出地震动强度参数和反应谱. 近断层大地震记录普遍匮乏，经验地震动预测方程难以考虑复杂的发震断层破裂过程和特定的场址地质地形条件影响，对于最大可信地震的危险性估计可能会产生较大偏差. 基于物理机制的地震动直接模拟方法能够综合考虑震源断层，传播路径和局部条件等关键因素影响，成为重大工程抗震安全评价的新趋势[1,2]. Wang等[3]提出了一种基于宽频带地震动数值模拟的最大可信地震危险性分析方法，不仅给出场址地震加速度谱，而且还可利用地震场景可生成场址的空间地震动场，为确定场址最大可信地震动提供了新思路. 同时，现有场址地震动评估主要关注基岩地震动参数, 亟待加强深厚覆盖层坝址的地震动参数研究，加深对深厚覆盖层坝址地震波传播机理与输入机制的认识.

筑坝材料本构模型与物理力学参数是高坝工程静动力安全分析的关键问题. 目前国内外针对高土石坝筑坝堆石料力学特性及本构模型已开展了大量研究, 但主要基于缩尺方法开展堆石料的室内大型试验，集中于中小应力幅值范围，所建立的本构模型难以合理反映缩尺效应、颗粒破碎、劣化和流变等影响，造成高土石坝变形计算结果与原型观测产生较大差别[4]. 超大型三轴试验与离散介质数值模拟方法在解决这个问题上展现出了一定的前景.

西南地区河谷深切和上覆深厚覆盖层现象显著. 土工试验是目前准确获取覆盖层物理力学特性最主要的技术手段, 但室内试验难以获得未扰动土样, 重塑试样无法反映土体结构性，原位测试数据和土性参数间缺乏明确物理意义，结果经验性较强. 为解决原位测试的局限性，研究人员不断探索新的土体原位力学特性测试设备与方法，并利用机器学习等技术实现三维场地重构[5].

深厚覆盖层地基渗透性强，持力层抗变形能力差, 渗流-变形耦合作用强烈, 导致坝基渗透控制与变形控制难度大[6]. 当前广泛采用非线性本构模型和简单的弹塑性模型开展土石坝变形计算分析，同时考虑剪胀性和滞回性对模型进行改进以增强其工程适用性和计算准确性[7]. 然而，静力分析往往忽略渗流场的影响, 复杂渗流变形耦合作用下深厚覆盖层土石坝安全性分析与评价, 亟待加强深厚覆盖层渗流-变形耦合机理与时效耦合模型，渗流-变形耦合参数辨识与反馈分析, 渗流与变形协同控制效应与坝基处理方案优化等研究.

西南地区水电开发的高坝安全评价，抗震安全是重点. 高坝动力响应分析方法已由弱非线性，各种相互作用因素的孤立分析向材料强非线性，大坝-地基-库水动力相互作用，精细化模拟发展. 混凝土坝抗震分析方面，全面考虑了库水-坝体系统、坝体-地基系统、结构缝开合非线性效应、无限地基辐射阻尼效应、坝体混凝土开裂等因素的综合影响[8]. 混凝土面板堆石坝分析方面，面板与坝体的接触特性，混凝土面板塑性损伤，非一致性地震输入，库水与大坝耦合等开始在统一的模型中得到模拟[9,10]. 部分新建高坝坝址距离活动断层近，近场强地震动具有宽频带、大脉冲、方向性、差动性等特征，与远场地震效应存在显著差异，基于远场地震的高混凝土坝强震安全评估方法不再适用，需研究近断层高混凝土坝强震灾变机制与安全评估理论. 此外，高坝建设安全还面临高地震烈度与超深厚覆盖层等复杂条件的联合效应, 坝体-地基-防渗体系静动力变形破坏机制不清，需重点研究深厚覆盖层高土石坝安全保障理论与技术，大坝全生命期安全建设与运行监测监控理论与技术等.

西南水电开发的高山峡谷区，大型洞室群具有洞室数量多、规模大、结构物与岩体相互关联，相互依

存，作用荷载和材料时变特性强，设计建造挑战巨大. 目前的设计方法和技术主要关注强化支护衬砌性能, 增强抵抗作用, 难以直接用于深埋巨型洞室群, 亟待研究洞室围岩应力迁移机理，发掘围岩的承载和防渗潜能.

2.2 复杂恶劣条件水电工程智能建设理论与技术

我国水电工程建设正在由数字化向智能化建设推进，坝址复杂恶劣条件给水电工程智能建设带来更多挑战，亟需深度融合人工智能、区块链、虚拟与增强现实、机器人等前沿科技，实现工程智能建设基础理论与核心技术的新突破.

钟登华等人[11]将智慧大坝定义为在数字大坝的基础上，通过引入物联网、智能技术、云计算、大数据等先进的技术，全面感知、实时传送和智能处理大坝建设信息的管理模式. 许多学者针对大坝建设中的施工仿真、坝料碾压、灌浆控制、交通运输、混凝土振捣、混凝土温度控制和建设信息集成管理平台等环节进行了智能化管理与控制研究，自主研发了复杂条件高坝工程建设全过程智能监控，大规模智能无人碾压机群协同作业等一系列核心技术，并在我国多座大型水利水电工程中进行了成功应用[12,13]. 在高海拔、复杂气候、复杂地形、复杂地质、复杂工艺和复杂分区等多重复杂因素下兴建高坝工程，面临质量与进度极难控制，人机降效十分显著等艰巨挑战，亟需突破全过程智能感知与实时监控，少人化/无人化绿色智能施工装备，全天候人-机协同作业等难题，发展高坝智能建设理论与技术.

地下洞室群是水电工程主体建筑物，一般采用钻爆法或隧道掘进机(TBM)施工，目前在复杂地下洞室群智能建设理论和技术上均取得了重要进展，通过综合运用智能仿真技术、超前地质预报技术、智能感知与动态监测技术、智能通风技术、数字孪生技术等, 实现了复杂地下洞室群工程高效、安全建设[14]. 但在复杂地质条件应对，施工技术智能化以及安全评价体系完善等方面仍面临诸多挑战，亟待实现复杂地下洞室群工程建设智能化理论与技术研究的新突破；尤其是在施工机械装备方面，现有机械设备水平及管控手段难以满足复杂地下洞室群工期和安全质量要求，亟需朝着机械装备的集成无人化、多功能的智能化的方向发展.

深厚覆盖层通常具有高渗透性、非均质性和复杂应力状态等特点，对水电工程复杂基础处理质量要求高，常采用振冲碎石桩、混凝土防渗墙等工艺用于深厚覆盖软弱地基的加固，从而起到提高地基承载力和抗剪强度, 消除地震液化, 控制地基沉降等作用. 目前的复杂基础处理工艺难以满足超深厚覆盖层处理要求, 亟待研究智能振冲、智能防渗墙等先进技术, 实现超深厚覆盖层条件下基础处理施工过程的智能控制和施工参数的实时优化.

2.3 复杂恶劣地质条件水电工程灾害风险与防控

西南地区地质构造复杂, 地震危险性高, 地质灾害风险高. 高峰深谷、超深厚覆盖层等复杂地质地形条件使巨型水电工程系统建设与运行安全面临更为严峻的灾害风险问题.

强震区超深厚覆盖层存在液化弱化的震害风险. 为了描述循环荷载作用下饱和砂土的应力应变响应, 已经建立了多种动力本构模型，如多屈服面模型、边界面模型等[15]. 基于试验结果，研究人员在液化后大变形物理机制及剪胀规律新认识的基础上，建立了三维应力空间的砂土液化大变形本构模型，通过引入可逆性与不可逆性剪胀，以及零有效应力状态下的体积相容性条件，能够对液化状态下剪应变的产生与累积进行基于物理机制的模拟，实现砂土液化前和液化后的统一描述[16]. 为实现深厚覆盖层高土石坝及复杂加固方案的地震响应模拟分析，Yu等人[17]利用高性能计算框架开发了大规模流固耦合仿真方法，实现了超千万自由度的岩土工程弹塑性流固耦合动力仿真. 深厚覆盖层地震防灾需进一步针对性地发展高性能弹塑性动力流固耦合分析方法，研究饱和砂土地震液化变形本构理论及参数标定方法，建立深厚覆盖层地震液化变形预测和评价体系，发展深厚覆盖层抗震加固优化技术.

水电开发涉及的地下厂房、导流隧洞、引水隧洞、输水隧洞等大规模、深埋地下工程，面临岩爆、突水突泥和坍塌等灾害问题. 关键难题是如何揭示工程区三维地应力场及其开挖演化规律、工程开挖围岩力学特性、深部工程灾害孕育过程机制、发展区域水文地质条件下地下水渗流场跨尺度模拟方法、深埋超长隧洞群施工期涌水量预测方法、复杂地质环境地下工程水灾变防控方法. 需重点研究构造结区域地应力

场规律, 形成机制及其开挖效应, 建立全过程智能监测预警与控制体系, 研发复杂地质环境地下工程柔性防水与韧性支护技术. 此外, 西南水电工程隧洞跨越山岭, 向着埋深更深、洞径更大、距离更长发展, 地处强烈地震区, 甚至穿过活动断层带. 跨断层隧洞的抗震安全已有一些基于室内物理试验与数值模拟分析的研究工作[18]. 越岭深长大输水隧洞的动力灾变的研究不足, 其发生机制缺乏深入的认识, 防控措施与技术也欠缺.

西南地区高峰深切河谷高位远程地质灾害和复合链生灾害风险高. 准确监测、及时预警是减少灾害损失的重要前提, 通过多源数据信息融合可以获取更多数据, 减少单一来源数据的离散性和随机性. Xu等人[19]基于星载光学遥感和雷达干涉测量, 无人机摄影测量和面和地下多源传感器的“天-空-地-内”立体协同观测方法, 建立了重大滑坡隐患“普查-详查-核查”三查体系. 亟待进一步开展高位远程地质灾害机理, 高位灾源区精准识别, 监测预警及风险评价方法等研究[20]. 考虑物理试验难度和成本, 数值模拟是研究复合链生演化的重要手段, 传统有限元法和有限差分法在模拟大变形问题存在局限性, 研究人员提出了多种可行的大变形数值模拟方法. 亟待系统开展梯级水电站群复合链生灾害风险管理研究, 重点突破灾害作用辨识与量化表征方法, 探明灾害孕育机制与时空演化规律, 发展全过程、多场景三维动态推演技术, 构建机理-数据驱动的智能预测预警模型, 建立梯级水电站群复合链生灾害风险评估方法, 完善巨灾风险防控体系, 提升梯级水电工程应对极端灾害的综合能力.

2.4　超高水头巨型冲击式水轮机理论与技术

对于超高水头水电开发, 相比其他类型水轮机, 冲击式水轮机具有适用水头高、流量范围广、高效区宽等优势. 但目前国内外尚未研制出超高水头的巨型冲击式水轮机, 在性能预测、水力设计、空蚀磨蚀防护、振动控制与损伤检测等方面存在技术瓶颈, 亟待相关基础理论研究研发突破.

为了揭示冲击式水轮机内部高速非定常多相流动特征, 需要解析带自由界面高速射流的气液干涉与演变规律. 通过射流与转轮水斗相互作用和旋转水斗内流动的理论分析, 发现水轮机效率受水斗内相对流动和压力分布影响[21]. 旋转水斗中复杂流动须采用瞬态模拟方法, 计算难度大[22]. 目前的数值模拟基本假设射流是理想轴对称射流, 全流道的多喷嘴冲击式水轮机内部流动特性模拟较少. 射流与水斗、射流与射流之间的干涉机理需要更加深入研究, 如何预测全工况范围内冲击式水轮机的水力性能是面临的关键技术难题. 另外, 在实验方面, 也亟需发展高速多界面流动量测技术.

冲击式水轮机的优化设计涉及水斗外形的参数化、流动的数学建模及其优化, 目前尚缺少水斗高效优化设计技术, 难点在于如何辨析不同射流结构与水斗间性能匹配机理. 传统基于分析法的水斗优化设计存在忽略水斗表面与水射流间的相互作用的问题, 并且很难求解NURBS表面水斗的几何必要约束问题. 近十年来的实践表明, 通过引入随机响应表面优化法、随机优化方法等, 水轮机效率最大可提高6.8%, 具有极大的应用价值[23].

空化和泥沙对喷嘴和水斗的侵蚀作用备受关注, 特别是高速含沙水流“空蚀-磨蚀”耦合损伤机理异常复杂, 研究“水-气-沙”多相高速流动机理对构建磨蚀模型至关重要. 冲击式水轮机内部流动的复杂性, 加剧了气液固多相流的流动特性可视化实验难度. 已有研究发现, 颗粒会聚集在水斗中间区域, 对水轮机扭矩和效率产生影响, 而流动特性又会受到颗粒分布的影响[24]. 利用数值模拟已经实现了初生空化的预测, 但无法预测转轮上空泡的演化[25]. 控制冲击式水轮机泥沙磨蚀的主要参数包括泥沙颗粒的尺寸、形状、硬度、浓度, 以及颗粒撞击的平均命中率、速度和角度. 工程上通常采用高速火焰喷涂、激光熔覆等表面处理技术来防护空蚀和磨蚀破坏, 但在已建工程中依然频繁出现泥沙磨蚀现象. 如何减轻甚至根除空蚀磨蚀是高水头巨型冲击式水轮机所面临的重大挑战. 空蚀磨蚀防护是高水头巨型冲击水轮机研发的又一项关键技术难题.

此外, 还需要关注冲击式水轮机水斗结构的振动模态和激励特性[26]. 这涉及“流场-结构场”耦合机制. 高速持续射流使转轮承受周期性高幅值强冲击载荷作用, 导致转轮水斗等部位产生大变形和高应力. 动应力是影响水斗疲劳失效的关键参数, 值得注意的是, 满足一定条件下, 水斗在圆周方向上的振动最为危险, 其共振放大系数可能达到1000倍. Schmied等人[27]提出了一种水斗动态柔性测量方法和结合多质量模型识别的

方法, 以平衡转轮. Mack和Probst[28]通过测量应变, 分析了冲击式水轮机模型的固有频率与水膜和模态振型改变的关系. Egusquiza等人[29]通过实验和数值模拟确定了四种原型冲击式水轮机水斗模态振型, 研究了各个部件模态特性, 并以变形方向和横向节点个数为依据, 给出了水斗经典振动模式分类.

近年来, 基于数据驱动的人工智能技术在冲击式水轮机结构损伤检测方面发挥了重要作用. Zhao等人[30]利用因子分析和神经网络算法对冲击式水轮机的运行状态数据进行训练, 成功实现了对结构损伤的精准检测. Vashishtha和Kumar[31]开发了改进的灰狼优化算法和莱维飞行变异遗传算法, 用于识别水斗上的缺陷和故障. 然而, 实际装配状态下转轮模态性能综合分析方面的研究较少, 尚未考虑水斗与圆盘、转轮与轴连接等对水斗模态的影响. 因此, 需要攻克冲击式水轮机结构振动控制与损伤探测关键技术难题.

2.5 西南水电开发生态环境效应与调控

我国西南地区极具环境特异性、生态脆弱性和敏感性. 随着世界级高坝大库工程的建设运行和向高寒高海拔地带推进, 梯级开发引起的生态环境问题备受关注, 如水文与水动力过程剧变、自然流态丧失和下游水文情势改变, 影响水生生物的关键生命过程; 河流生态系统结构与功能退化、生境破碎化、物种多样性下降等. 目前, 梯级开发河流生态环境保护与调控修复是制约水电可持续发展的关键难题, 亟需科学突破和技术创新.

国际上对水电开发的生态环境影响研究一直高度重视, 是大河流域前沿研究的重点问题. 我国学者针对建坝对河流生物地球化学循环、温室气体排放、珍稀鱼类保护等开展了一系列研究, 也提出了一些新的观点, 提示应从新的角度研究大型水坝的影响, 从更微观、更精细的视角来揭示水电工程生态环境影响机制[32]. 梯级开发下物质流能量流过程演变动力学理论, 高坝大库工程对西南河流生态系统的扰动机制, 梯级开发对河流多要素影响精准预测和定量评估是当前研究热点和难点.

梯级水电开发将天然连续河流变为蓄水河流, 显著改变了天然径流年内分配过程, 影响河流泥沙输运、生源物质迁移转化、水库与河流水温分布, 进而影响水生态环境与功能[33]. 需要加强水电工程投入运行后流域中长期生态环境演化及其生态效应研究, 从流域角度系统评估水电开发的短期、中期和长期生态环境影响. 水电开发对流域生态系统影响机理的认知方面仍然薄弱, 亟需突破水电开发的生态环境影响的诊断、归因、多过程耦合模拟及评估等理论方法, 构建水电开发下流域生态系统感知和智慧调控理论方法, 建立水电开发生态环境影响“评价-诊断-模拟-调控”综合理论方法体系.

未来具有潜力的综合调控措施, 需要超越传统的“减缓与补偿”思路, 转向“适应性管理”与“生态协同”的系统性调控. 例如, 采用生态友好型工程规划与设计、生态调度与智慧化运行、损生态系统主动修复与适应性管理等调控措施.

3 复杂恶劣条件下水电开发关键科学问题

围绕复杂恶劣条件下水电开发的难点和挑战, 第353期双清论坛与会专家经过深入研讨, 凝练了五个主要研究领域及其关键科学问题.

研究领域1: 复杂条件下水电工程分析与设计. 关键科学问题包括: (1) 川滇藏东坝址区域地震波传播机理与输入机制; (2) 深厚覆盖层地质结构表征与静动力参数识别方法; (3) 超深厚覆盖层高土石坝变形破坏机制与调控方法; (4) 近断层高混凝土坝地震安全风险评估理论; (5) 厂区巨型洞室群“围岩-结构”趋稳效应与设计理论.

研究领域2: 复杂恶劣条件水电工程智能建设. 关键科学问题包括: (1) 水电工程智能建设巨量多源跨模态信息感知、表征与融合; (2) 水电枢纽群建设全过程质量-进度-安全智能分析理论; (3) 恶劣条件下水电工程绿色智能建设装备人机协同机制; (4) 极复杂条件下水电工程数字孪生及AI模型构建方法.

研究领域3: 复杂恶劣地质条件水电工程灾害风险与防控. 关键科学问题包括: (1) 深厚覆盖层地震液化弱化孕育机制与演化规律; (2) 复杂构造变质岩区深部工程开挖扰动与灾变机理; (3) 越岭深长大隧洞动力灾变机制与防控方法; (4) 高位远程地质灾害形成与复合链生灾害演化机制.

研究领域4: 超高水头巨型冲击式水轮机. 关键科学问题包括: (1) 带自由界面水射流气液干涉与演变机理; (2) 水-气-沙三相高速非定常流动机理; (3) 不同射

流结构与转轮水斗间性能匹配机理; (4) 高速水流喷嘴, 水斗空蚀-磨蚀耦合损伤机理; (5) 巨型机组及系统多场耦合机制.

研究领域5: 西南水电开发生态环境效应与调控. 关键科学问题包括: (1) 西南高原河流梯级开发下水动力变异对物质输移影响机制; (2) 西南河流梯级水电开发下多要素响应规律与调控机制; (3) 西南高山峡谷流域水电开发河流生态保护与修复方法; (4) 西南高原流域水电开发生态环境影响机制与智能监测理论.

4 结论与展望

复杂恶劣条件下水电开发面临严峻挑战, 现有水电工程设计、建设、运维的相关理论与方法, 技术与装备已无法满足实践需求. 需要进行多学科交叉研究, 尽快获得一批重大突破性成果, 推动我国水电开发基础理论突破和科技自立自强, 形成新质生产力, 实现水电开发的高质量发展, 支撑国家重大工程实施.

(1) 创建新一代的水电工程设计与灾害风险防控理论体系. 突破坝址地震动空间作用, 深厚覆盖层-坝体-防渗体系静动力变形形协同控制, 洞室群围岩应力迁移, 近断层高坝与跨断层越岭隧洞地震灾变, 高位远程地质灾害和复合链生灾害判别预测等问题, 创新水电工程设计与灾害风险防控理论方法, 加快西南地区水电基地建设.

(2) 构建质量-进度-安全-环保协同控制的水电工程智能建设理论体系. 突破水利水电工程建设智能感知、智能分析与智能调控的基础理论与技术瓶颈, 研制具备复杂环境深度理解、自主决策与持续进化等功能的少人化/无人化绿色智能施工装备, 攻克具身智能赋能水利水电工程建设关键技术难题, 实现人-机-坝/隧洞/地下洞室协同作业、质量-进度-安全-环保协同控制的水电工程建设, 保障水电工程高质量建设.

(3) 攻克超高水头巨型冲击式水轮机研制理论与技术瓶颈. 突破冲击式水轮机水斗设计优化、空化和泥沙对喷嘴和水斗的侵蚀作用, 高速水流对转轮的空蚀-磨蚀耦合损伤、冲击式水轮机结构损伤检测等难题, 助力巨型冲击式水轮机研制.

致谢 本文源于第353期双清论坛的研讨成果. 衷心感谢论坛全体专家的智慧启迪, 并特别感谢国家自然科学基金委员会工程与材料科学部李大鹏、卫望汝, 以及计划与政策局姚玉鹏、李铭禄对文稿的审阅与指正.

参考文献

1 He C H, Wang J T, Zhang C H, et al. Simulation of broadband seismic ground motions at dam canyons by using a deterministic numerical approach. Soil Dyn Earthq Eng, 2015, 76: 136–144
2 Rodgers A J, Pitarka A, Petersson N A, et al. Broadband (0–4 Hz) ground motions for a magnitude 7.0 Hayward fault earthquake with three-dimensional structure and topography. Geophys Res Lett, 2018, 45: 739–747
3 Wang X C, Wang J T, Zhang C H. Deterministic full-scenario analysis for maximum credible earthquake hazards. Nat Commun, 2023, 14: 6600
4 Chen S S. Key technological issues in construction and safety assurance of super-high earth and rockfill dams (in Chinese). Yangtze River, 2018, 49: 74–78 [陈生水. 特高土石坝建设与安全保障的关键问题及对策. 人民长江, 2018, 49: 74–78]
5 Wu S, Zhang J M, Wang R. Machine learning method for CPTu based 3D stratification of New Zealand geotechnical database sites. Adv Eng Inf, 2021, 50: 101397
6 Zhou C B, Yao C. Advances and prospects in research on hydraulic rock mechanics (in Chinese). Yangtze River, 2025, 56: 1–9 [周创兵, 姚池. 水工岩石力学研究进展和展望. 人民长江, 2025, 56: 1–9]
7 Wang K, Tang H, Wang R, et al. Development and evaluation of a practical nonlinear elastic constitutive model for rockfill dam deformation simulation based on monitoring results. Acta Geotechnica, 2024, 19: 3467–3485
8 Zhang C H, Jin F, Wang J T, et al. Key issues and developments on seismic safety evaluation of high concrete dams (in Chinese). J Hydraul Eng, 2016, 47: 253–264 [张楚汉, 金峰, 王进廷, 等. 高混凝土坝抗震安全评价的关键问题与研究进展. 水利学报, 2016, 47: 253–264]
9 Kong X J, Chen J Y, Zou D G. Study on development trend of seismic safety theory for high dams (in Chinese). J Hydroelectric Eng, 2020, 39: 1–11 [孔宪京, 陈健云, 邹德高. 高坝抗震安全理论发展趋势研究. 水力发电学报, 2020, 39: 1–11]

10 Zhang Z L, Zhang B Y, Zhou M Z, et al. Numerical analysis of thermal stress induced by solar radiation inconcrete-faced rockfill dams (in Chinese). Chin J Geotech Eng, 2021, 43: 1957–1966 [张宗亮, 张丙印, 周墨臻, 等. 混凝土面板堆石坝面板太阳热辐射温度应力计算析. 岩土工程学报, 2021, 43: 1957–1966]

11 Zhong D H, Wang F, WU B P, et al. From digital dam toward smart dam (in Chinese). J Hydroelectric Eng, 2015, 34: 1–13 [钟登华, 王飞, 吴斌平, 等. 从数字大坝到智慧大坝. 水力发电学报, 2015, 34: 1–13]

12 Wang J, Zhong D, Wu B, et al. Evaluation of compaction quality based on SVR with CFA: Case study on compaction quality of earth-rock dam. J Comput Civ Eng, 2018, 32: 05018001

13 Zhong D H, Shi M N, Cui B, et al. Research progress of the intelligent construction of dams (in Chinese). J Hydraul Eng, 2019, 50: 38–52,61 [钟登华, 时梦楠, 崔博, 等. 大坝智能建设研究进展. 水利学报, 2019, 50: 38–52,61]

14 Yu J, Zhong D, Ren B, et al. Probabilistic risk analysis of diversion tunnel construction simulation. Comput-Aided Civ Infrastruct Eng, 2017, 32: 748–771

15 Huang M S, Bian X C, Chen Y M, et al. Soil dynamics and geotechnical earthquake engineering (in Chinese). China Civ Eng J, 2020, 53: 64–86 [黄茂松, 边学成, 陈育民, 等. 土动力学与岩土地震工程. 土木工程学报, 2020, 53: 64–86]

16 He B, Zhang J M, Li W, et al. Numerical analysis of LEAP centrifuge tests on sloping liquefiable ground: Influence of dilatancy and post-liquefaction shear deformation. Soil Dyn Earthq Eng, 2020, 137: 106288

17 Yu J K, Wang R X, Wang R, et al. High-performance elastoplastic fluid-solid coupled analysis of very large underground structural system in liquefiable site (in Chinese). China Civ Eng J, 2024, 57: 190–199 [余嘉轲, 王荣鑫, 王睿, 等. 超大型地下结构系统地震响应高性能弹塑性流固耦合分析. 土木工程学报, 2024, 57: 190–199]

18 Wang Z, Zhao M, Huang J, et al. Numerical modeling of reverse fault rupture and its impact on mountain tunnels. J Earthq Eng, 2023, 27: 2481–2505

19 Xu Q, Dong X J, Zhu X, et al. Landslide collaborative observation technology based on real scene 3D view from space-air-ground-interior perspective (in Chinese). J Eng Geol, 2023, 31: 706–717 [许强, 董秀军, 朱星, 等. 基于实景三维的天-空-地-内滑坡协同观测. 工程地质学报, 2023, 31: 706–717]

20 Yin Y P, Liu X J, Zhao C Y, et al. Multi-dimensional and long-term time series monitoring and early warning of landslide hazard with improved cross-platform SAR offset tracking method. Sci China Technol Sci, 2022, 65: 1891–1912

21 Zhang Z. Pelton Turbines. Switzerland: Springer International Publishing Switzerland, 2016

22 Zeng C, Xiao Y, Luo Y, et al. Hydraulic performance prediction of a prototype four-nozzle Pelton turbine by entire flow path simulation. Renew Energy, 2018, 125: 270–282

23 Židonis A, Aggidis G A. State of the art in numerical modelling of Pelton turbines. Renew Sustain Energy Rev, 2015, 45: 135–144

24 Han L, Wang Y, Zhang G F, et al. The particle induced energy loss mechanism of Pelton turbine. Renew Energy, 2021, 173: 237–248

25 Pavesi G, Rossetti A, Santolin A, et al. Numerical analyses of a cavitating Pelton Turbine. In: Proceedings of European Conference on Turbomachinery Fluid Dynamics and Thermodynamics. Lappeenranta, 2014: 103–114

26 Egusquiza M, Egusquiza E, Valero C, et al. Advanced condition monitoring of Pelton turbines. Measurement, 2018, 119: 46–55

27 Schmied J, Weiss T, Angehrn R. Detuning of pelton runners. In: Proceedings of IFToMM Conference on Rotor Dynamics. Vienna, 2006

28 Mack R, Probst C. Evaluation of the dynamic behavior of a Pelton runner based on strain gauge measurements. In: Proceedings of IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. Prague, 2016, 49: 022001

29 Egusquiza M, Valero C, Valentín D, et al. Dynamic response of Pelton runners: Numerical and experimental analysis in prototypes. Renew Energy, 2020, 157: 116–129

30 Zhao W, Egusquiza M, Estevez A, et al. Improved damage detection in Pelton turbines using optimized condition indicators and data-driven techniques. Struct Health Monit, 2021, 20: 3239–3251

31 Vashishtha G, Kumar R. An amended grey wolf optimization with mutation strategy to diagnose bucket defects in Pelton wheel. Measurement, 2022, 187: 110272

32 Chen Q, Shi W, Huisman J, et al. Hydropower reservoirs on the upper Mekong River modify nutrient bioavailability downstream. Natl Sci Rev, 2020, 7: 1449–1457

33 Maavara T, Lauerwald R, Regnier P, et al. Global perturbation of organic carbon cycling by river damming. Nat Commun, 2017, 8: 15347

Fundamental scientific issues of hydropower development under complex and harsh conditions——Academic review of the 353rd Shuangqing Forum

ZHONG DengHua[1], ZHANG JianYun[2], ZHANG JianMin[3], WANG JinTing[3], HUO ShouLiang[4], PAN JianWen[3], WANG Rui[3], REN BingYu[5] & Yao ZhiFeng[1]

[1] *College of Water Resources and Civil Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China*
[2] *Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210024, China*
[3] *Department of Hydraulic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China*
[4] *State Key Laboratory of Environmental Criteria and Risk Assessment, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China*
[5] *State Key Laboratory of Intelligent Construction and Operation of Hydraulic Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China*

The hydropower development in southwestern China is gradually advancing towards the high-altitude areas of the Qinghai-Tibet Plateau, facing complex and harsh conditions such as high altitude and cold temperature, high mountain and deep valley, high seismic intensity, high geological disaster risk, ultra-deep cover layer, and sensitive ecological environment. There are many new significant challenges in the design, construction, and operation of giant hydropower projects. Based on the 353rd “Shuangqing Forum”, this paper summarizes the main challenges of science and technology in five research fields: analysis and design theory, intelligent construction theory and technology, disaster risk and prevention, giant impulse turbine theory and technology, and eco-environmental effects and regulation of hydropower projects under complex and harsh conditions. Moreover, it condenses key scientific issues and focuses on important research directions.

hydropower development, complex and harsh conditions, analysis and design, intelligent construction, disaster risk reduction, giant impulse turbine, eco-environmental effects

doi: 10.1360/SST-2025-0417