

雅砻江流域智能大坝建设关键技术研究

冯永祥, 李啸啸

(雅砻江流域水电开发有限公司, 四川成都 610056)

摘要: 大坝安全技术经过几十年的发展, 历经人工观测、自动化监测、在线监测、在线监控的阶段, 取得长足进步。随着大数据、物联网、云计算、人工智能等新一代信息技术的快速发展以及国家智慧城市、智慧水利等概念的提出, 水电站大坝安全技术开始朝智能方向发展, 智能大坝理念应运而生。本文论述了智能大坝理念、基本特征, 结合公司大坝安全技术现状, 探讨未来雅砻江流域智能大坝建设重点研究方向。

关键词: 在线监测, 在线监控, 智能大坝, 信息互联, 智能诊断

中图分类号:

文献标识码:

水电站大坝在控制江河、综合利用水资源方面发挥重大效益的同时, 面对复杂施工与运行条件, 也存在结构损坏或溃坝的安全风险, 必须采取措施进行控制。大坝安全管理的目的是通过大坝安全监测、巡视检查、资料分析、维护加固等技术措施, 及时发现并消除存在的缺陷和隐患, 保障大坝运行安全。自上世纪初叶现代坝工理论体系建立以来, 随着大坝安全监测、资料分析及安全监控理论的发展与技术进步, 大坝安全技术历经人工观测、自动化监测、在线监测和在线监控等阶段, 在及时掌握大坝运行性态、评价大坝安全状态方面取得长足进步, 为保障大坝运行安全发挥了巨大作用。近年来, 随着大数据、物联网、云计算、人工智能等新一代信息技术的快速发展, 以及国家智慧城市、智慧水利、智能电站等概念的提出, 使水电站大坝安全技术向智能化方向发展成为了可能^{[1][2]}。

1 大坝安全技术发展历程

(1) 人工观测阶段

20 世纪初至 50 年代是大坝安全技术起步阶段, 坝工理论体系基本形成, 一些新型结构不断出现。为了检验设计理论和计算方法, 研究物理量的变化规律, 开始在部分大坝中埋设安装相应的监测仪器, 通过人工测读的方式获取观测数据。此阶段, 监测仪器品种少, 质量不理想, 手段也不多, 资料的整理和分析水平均不高, 分析普遍滞后。

(2) 自动化监测阶段

20 世纪 60 年代至 90 年代是发展阶段, 随着马尔帕塞等一些著名大坝的失事, 各国政府和公众开始对大坝安全密切关注, 大坝安全技术得到快速发展, 特别是自动化监测技术取得了很大进展, 监测资料整理分析的效率也大大提高。此时, 监测工作的目的由验证理论变成便捷获取观测数据对结构性态进行评价, 从而发现工程中存在的安全隐患。¹

(3) 在线监测阶段

20 世纪 90 年代末至今, 计算机科学、信息网络和自动化技术开始飞速发展, 为实现大坝安全信息化建设奠定基础。2006 年, 原国家电力监管委员会发布了《水电站大坝运行安全信息报送办法》和《水电站大坝运行安全信息化建设规划》, 极大推进了电力行业大坝安全信息化工作。全国电力系统大坝运行安全信息管理系统和众多企业级大坝运行安全信息管理系统纷纷落地。各层次信息管理系统建设实现了大坝安全在线监测管理, 大坝安全信息能够在线采集、传输、存储、自动评判、报送、统计、离线分析等。

(4) 在线监控阶段

进入 21 世纪, 大坝安全管理开始重视风险管理, 风险监控和风险管理决策等成为新的研究重点。随着监测技术的发展和计算机网络技术、人工智能技术的进步, 对风险管控的新需求促使大坝安全技术从“离线分析、解释大坝安全”向“实时、在线大坝健康诊断”的方向发展。2015 年, 国家发改委发布《水电站大坝运行安全监督管理规定》(第 23 号令)(以下简称《规定》)中明确“对坝高

作者简介: 冯永祥(1967-), 男, 甘肃永昌, 教授级高级工程师, 长期从事水电站安全监测及大坝运行安全管理工作, 电子邮箱: fengyongxiang@ylhdc.com.cn。

一百米以上的大坝、库容一亿立方米以上的大坝和病险坝，电力企业应当建立大坝安全在线监控系统”。对大坝进行在线监控的要求，就是在原大坝安全在线监测的基础上，做到“及时、准确”发现大坝运行中存在的各种缺陷、隐患，“自主、高效”诊断大坝健康状态，实时反馈管理决策^[8]。《规定》的颁布，标志着大坝安全“在线监控”阶段的到来。

2 智能大坝基本概念特征

近几年，随着智慧城市、智慧水利等概念的推出以及各行业智慧化规划与建设工作的开展，智能大坝的概念也应运而生。钟登华、马洪琪院士等研究认为：“紧密围绕大坝智慧管理研究”，将“逐步实现大坝管理模式由事后故障处理到事前隐患预防的根本转变”，可“全面强化大坝风险控制能力”，“有效提升大坝建设与运行的安全性、预见性、时效性、灵活性”^{[1][2][6]}。大坝智慧管理研究的核心就是借助物联网、大数据、云计算、人工智能等信息化新技术，对大坝运行过程中存在的风险、隐患进行实时评判，并能够实现风险预警和管控的目标。智能大坝是对大坝安全在线监控理念的延伸和发展，是大坝安全在线监控技术发展的高级阶段。

2.1 智能大坝 智能大坝是以现有大坝安全管理信息化建设成果为基础，以物联网、大数据、云计算、人工智能等新一代信息技术为支撑，以信息实时感知、信息互联、智能诊断、智能决策与控制为基本运行方式，对大坝所在的物理空间、虚拟空间信息进行全面精细感知、自主诊断（包括运行状态、风险预警等）、决策和控制的大坝安全管理理念^{[1][4]}。

2.2 智能大坝基本特征 (1) 信息实时、精准、全面感知

智能大坝能实时、精准、全面感知大坝所在的物理空间、虚拟空间的信息资源。信息实时、精准、全面感知是智能大坝理念的基础，以快速获取高分辨、全序列、高时效性的大坝全生命周期工况所有要素数据为目标，综合运用传感器技术（传统安全监测仪器等）、GNSS 空间技术（空间测量等）、遥感技术（雷达、声波等）、RFID 技术（射频识别技术，如门禁、设备管理等）等常见物联网技术，建立物物联动的大坝工况、内外缺陷和潜在风险的监测体系。

(2) 信息深度互联与高效利用

智能大坝能根据各应用权限设置对感知信息进行高度的利用，各业务间相互连通，最大限度实现各类信息深度互联。通过大数据技术，实现大坝物理空间、虚拟空间信息的深度融合。各个部门、流程因资源的高度共享实现无缝连接，打破了“资源孤岛”^[2]。

(3) 自主诊断分析

智能大坝以准确诊断大坝健康状态，精确预测风险趋势为目标。利用云计算技术、人工智能技术（机器学习、模式识别、自动推理等）建立大坝施工管理、运行管理知识库，建立大坝安全实时驱动分析系统，通过信息自动挖掘，评估大坝工作性态，预测风险变化。

(4) 智能决策控制

利用现代控制理论和技术为智能大坝提供基础控制理论和技术。智能大坝在精细模拟大坝工况与风险演化精准预测的基础上，快速进行历史情境相似模式匹配、场景模拟仿真、处置措施响应，通过不断往复迭代计算，自主做出大坝安全管理综合评估最优方案，并将决策信息反馈相关应用系统和人员。

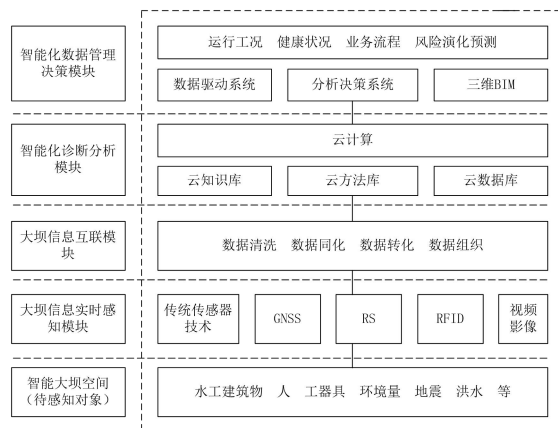


图1 智能大坝基本架构

3 智能大坝建设关键技术研究

按照公司智能水电站建设总体布局，流域大坝安全管理最终以实现流域智能大坝为目标。围绕智能大坝特征，建设流域智能大坝需在信息感知、互联、模拟分析、风险管控模式等方面进行研究。公司目前已通过建立雅砻江流域大坝安全信息管理系统，实现了雅砻江流域大坝运行安全“在线监测”目标。为实现流域智能大坝的最终目标，将分步开展智能大坝关键技术研究。

3.1 大坝运行安全在线监控技术 公司将首先开展流域大坝安全在线监控技术研究，打造公司级、流域化在线监控系统平台。雅砻江流域大坝运行安全在线监控技术研究将依托物联网、大数据、云计算、人工智能等新一代信息技术，以现有公司大坝安全管理信息化建设成果为基础，重点研究流域各大坝安全在线评判方法、综合分级评价体系，建立能及时预警大坝运行异常信息及不安全征兆、快速分析大坝运行状态，并为公司大坝安全管理人员分析会商、问题管控提供便利条件的系统平台。

2015年，公司联合国家能源局大坝安全监察中心，以锦屏一级特高拱坝为试点，开展了特高拱坝安全在线监控平台课题研究。该课题创新性构建了特高拱坝安全在线监控新理念和技术体系，研究了在线监控关键技术问题，研发了集在线监测管理、在线快速结构分析和在线安全综合评判等功能于一体的特高拱坝安全在线监控平台。平台采用“后台服务+前台浏览器/客户机”的混合架构，数据处理、建模、评判、有限元计算等均通过后台服务完成，监控成果显示和用户处理通过浏览器实现。

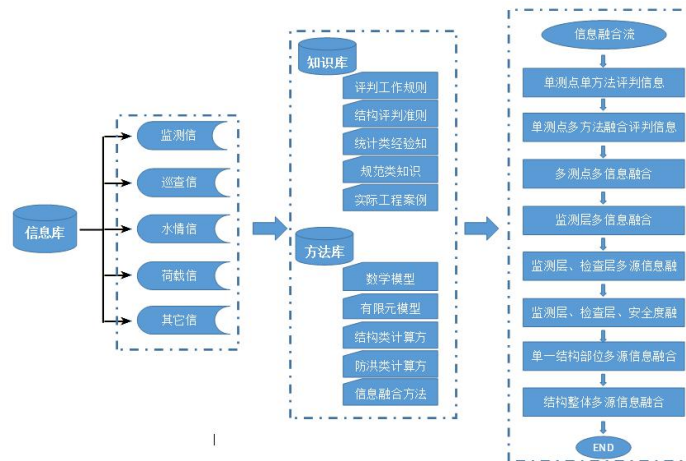


图2 大坝安全在线监控系统平台安全监控分析模型示意图

3.2 大坝信息精准感知技术 智能大坝是由包括人、物等物理空间和包括各类技术参数、体系等的虚拟空间大量信息组成的。大坝信息感知技术精准性、完整性和动态性直接影响大坝“智能化”水平。

目前，公司流域各电站普遍采用传统传感器技术（监测仪器传感器等）、大地测量技术和物探检测技术进行信息采集，此外也开展了多种信息感知新技术研究和应用，取得丰硕成果，如：水下检测及潜航器技术在锦屏二级长引水隧洞检测中研究应用、两河口施工期监测仪器物联网全生命周期管理、基于 NFC 手机近场通讯技术水工点检子系统研究应用、无人机遥感技术在锦屏一级高边坡监测中应用等。2016年起，公司大坝中心以官地大坝为主体，采用多品牌多类型 GNSS 双频多星接收机结合大地测量机器人，开展外观自动化监测试验研究，探索研发了 GNSS 高精度自适应解算软件，探究实现大坝外观实时、高精度、自动化变形观测技术可行性。信息感知新技术研究与应用提升了流域大坝安全信息动态、标准、精确感知能力。

流域智能大坝建设将应用物联网技术最新研究成果，继续深入开展大坝信息感知技术研究，构建能满足雅砻江流域智能大坝需要的多源化、动态化、标准化信息采集体系，实现增加数据维度与精度的目标。

3.3 智能模拟分析技术 雅砻江流域智能大坝各项功能实现效果与大坝信息模拟仿真程度密切相关。模拟仿真水平取决于建立的大坝物理、虚拟空间模型与实际情况的契合程度，通过开展模拟分析技术研究，对大坝所处复杂环境、大坝运行性态建立时空演变模型、数值分析理论、动态预警预报机制，最大限度模拟大坝真实行为^{[1][3]}。在模拟分析时，借助机器学习、模式识别方法，提升模拟分析过程智能化水平，进而提高缺陷劣化趋势、风险演化进程预测水平，全面提升大坝各类工况诊断准确性及

有效性^{[5][7]}。智能模拟分析技术研究事关智能大坝建设成败，是大坝“智能”的核心所在。在模拟仿真研究领域，公司进行了相关探索。

“数字雅砻江”是公司全面整合和集成管理企业数据资源，依托3S、监测、虚拟现实与交互仿真等现代技术，打造的雅砻江流域及电站三维可视化信息集成展示与会商平台。平台实现了流域发电、防洪、环保、安全等多目标数字化管理，提升了流域管理决策效率。目前，行业关于大坝模拟仿真方面研究成果丰富，但大多处于理论研究阶段，且比较零散，系统全面论述模拟仿真内容较少，其中借助机器学习的人工智能参与分析模拟的相关研究更是凤毛麟角，开展智能模拟分析技术研究仍任重道远。

3.4 基于全生命周期的智能大坝研究 大坝安全管理贯穿于大坝勘测设计、施工、运行、报废整个阶段。对大坝全生命周期进行控制管理，需采取必要的管理与技术手段。流域智能大坝建设作为流域大坝安全管理最终目标，为大坝安全全生命周期管理提供了技术手段。流域智能大坝应立足流域各电站大坝全生命周期，在做好大坝运行阶段仿真模拟、智能诊断、智能决策控制的同时，深度挖掘大坝规划、设计、施工阶段过程信息，在规划方案多目标优化、设计仿真比选优化、施工仿真模拟与质量控制等方面发挥重大作用。

两河口水电站数字大坝建设率先在流域实现了施工过程信息仿真与监控，可对大坝施工过程信息进行实时自动化采集，对施工质量和进度进行有效监控，为及时分析大坝性态和指导施工提供决策依据。两河口数字大坝探索了施工期大坝信息集成与分析方式，对施工阶段多目标优化和控制管理提供了技术手段，为智能大坝研究提供了思路。

4 结束语

近年国内水电企业按照“管控一体化”发展方向，在数字化水电站建设方面取得了长足进步。随着大数据、物联网、云计算、人工智能等新一代信息技术的快速发展，把数字化水电站建成更加清洁、可靠、高效的智能水电站成为水电行业发展的新目标。雅砻江公司高度重视流域智能水电站建设，正在开展公司智能水电站建设总体规划。

按照“流域化、集团化、科学化”发展与管理理念，公司建立了雅砻江流域大坝安全信息管理系统，大坝安全技术达到了“在线监测”水平，具备开展智能大坝建设基础条件。围绕智能大坝特征，开展大坝运行安全在线监控技术、大坝信息精准感知技术、智能模拟分析技术、全生命周期研究是建立流域智能大坝的关键。公司已开展了锦屏一级特高拱坝安全在线监控、信息感知、数字雅砻江、两河口数字大坝等系列新技术研究与应用，并取得部分成果。但对智能大坝深度挖掘信息、仿真分析与智能控制融合等方面研究仍存在不足。下一步，将结合大坝安全技术发展水平，深入开展大坝运行安全在线监控及相关关键技术研究，逐步实现流域智能大坝建设目标。

参 考 文 献：

- [1] 钟登华, 王飞, 吴斌平, 崔博, 刘玉玺.从数字大坝到智慧大坝[J].水力发电学报, 2015, 34(10): 1-13.
- [2] 马洪琪, 卢吉, 陈豪.澜沧江流域水电站大坝智慧管理实践与展望[J].中国水利, 2018, 20: 7-11.
- [3] 李庆斌, 林鹏.论智能大坝[J].水力发电学报, 2014, 33(1): 139-146.
- [4] 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.
- [5] 卢花妍.流域梯级水电站安全与应急管理信息平台构建初探[J].科技创新与应用, 2019, 7: 184-185.
- [6] 盛金保.大坝风险评估与管理关键技术研究进展[J].中国科学, 2018, 48(10): 1057-1067.
- [7] 李宗坤等.中国大坝安全管理与风险管理的战略思考[J].水科学进展, 2015, 26(4): 589-595.
- [8] 张秀丽.用新理念新技术提升监管水平[J].大坝与安全, 2015, 2: 7-9.

Research on Key Technologies of intelligent dam construction in Yalong River Basin
Feng Yong-xiang, Li Xiao-xiao
(Yalong River Hydropower Development Co., Ltd)

Abstract: After decades of development, dam safety technology has made great progress in the stages of manual observation, automatic monitoring, online monitoring and online monitoring-control. With the rapid development of new generation information technology such as big data, Internet of things, cloud computing and artificial intelligence, as well as the concept of National Smart City and smart water conservancy, the dam safety technology of hydropower station began to develop in the direction of intelligence, and the concept of intelligent dam came into being. This paper discusses the concept and basic characteristics of intelligent dam, and discusses the future research direction of intelligent dam construction in Yalong River Basin Based on the current situation of dam safety technology.

Key words: online monitoring, online monitoring-control, intelligent dam, information interconnection, intelligent diagnosis

[作者简介]

冯永祥（1967-），甘肃永昌人，硕士，教授级高级工程师，长期从事水电站安全监测及大坝运行安全管理工作，电子邮箱：fengyongxiang@ylhdc.com.cn

通讯地址：四川省成都市成华区双林路 288 号雅砻江流域水电开发有限公司；

电话：028-82907778 手机：18202899655