

# 智慧水利背景下水库运行调度的数字化转型路径研究

陈国勋

河南省白龟山水库运行中心 河南 平顶山 467000

**摘要:**在国家大力推进“数字中国”与“智慧水利”建设的战略背景下,传统水库管理模式正面临深刻变革。本文以淮河流域沙颍河水系上的大型综合利用水库——白龟山水库为研究对象,系统梳理其工程现状、功能定位及运行管理中面临的挑战。文章深入剖析了在智慧水利框架下,白龟山水库实现运行调度数字化转型的必要性与紧迫性,并从“感知-平台-模型-应用”四个核心维度,构建了一套完整的数字化转型路径。该路径旨在通过构建全域智能感知体系、打造一体化数字孪生平台、研发精细化智能调度模型以及深化多场景业务应用,全面提升白龟山水库在防洪保安、水资源优化配置、水生态保护及工程安全等方面的综合管理能力,为同类大型水库的现代化治理提供可借鉴的实践范式。

**关键词:**智慧水利;水库调度;数字化转型;数字孪生;白龟山水库

## 引言

水关乎生存与文明,水库作为国家水网节点和防洪关键工程,对保障水安全、支撑发展意义重大。但全球气候变化、极端天气增多,社会对水资源利用等需求提升,传统水库运行管理模式难适应新时代。水利部提出构建“四预”功能的智慧水利体系,为水库管理转型指明方向。白龟山水库是多功能大型(II型)水库,安全高效运行关乎豫皖两省600万人口及多地生产生态,还承担调节南水北调水量、保障交通大动脉安全等重任,战略地位突出。然而,2022年它被鉴定为“三类坝”,汛期限制水位下调,凸显工程老化风险与现有管理模式脆弱性。故而,借助智慧水利推动其运行调度数字化转型,是自身发展所需,也是保障区域水安全、服务国家战略的必然。本文以此为切入点,探索转型路径。

## 1 白龟山水库运行管理现状与核心挑战

要精准规划数字化转型路径,必须首先厘清白龟山水库当前的运行管理现状及其面临的核心挑战。

### 1.1 工程概况与功能复合性

白龟山水库位于河南省平顶山市,控制流域面积达2740平方公里,总库容近9.8亿立方米。其工程体系由拦河坝、顺河坝、北副坝、泄洪闸及南、北干渠渠首闸等构成,是一个结构复杂、功能多元的水利枢纽。这种复合性既是其价值所在,也为调度管理带来了巨大挑战:(1)目标冲突性:防洪要求汛期低水位运行以腾空库容,而兴利(灌溉、供水、发电)则希望维持高水位以保障效益。尤其是在被鉴定为三类坝后,汛限水位进一步降低,加剧了防洪与兴利之间的矛盾。(2)调度复杂性:调度决策需统筹考虑上游来水、下游防洪安全、灌区用水需求、城市供水计划、电站发电负荷以及生态基流等多种因素,

是一个典型的多目标、多约束、动态优化问题。

### 1.2 运行管理中的主要痛点

基于其工程特性和现实状况,白龟山水库的运行管理面临以下几方面突出痛点:一是信息感知不足:传统监测站点有覆盖不全、设备老化等问题,对水下地形变化等关键信息实时精准感知能力欠缺,难掌握工程“健康状态”。二是数据孤岛严重:不同业务系统独立建设,数据标准不一、接口不通,管理者无法获全局数据视图,制约协同与决策效率。三是预报预警有限:依赖历史经验和传统模型,对极端天气捕捉及预见期不足,预警发布渠道和精准度待提升。四是调度决策欠科学:调度方案依赖经验规程,缺乏智能辅助决策支持,面对复杂问题难快速生成比选方案,精细化、智能化水平低。五是工程安全管控压力大:“三类坝”有隐患,传统巡检分析模式难实现风险隐患早发现、早预警、早处置。

## 2 智慧水利赋能水库数字化转型的内涵与框架

智慧水利并非简单的技术堆砌,而是以业务需求为导向,以数据为核心驱动力,通过新一代信息技术与水利业务深度融合,实现水利对象全要素和管理活动全过程的数字化、网络化、智能化。对于水库运行调度而言,其数字化转型的核心内涵在于构建一个具备“四预”功能的闭环管理体系。

### 2.1 “四预”功能体系的构建

**预报:**利用气象数值预报、雷达卫星遥感、地面雨量站网等多源数据,耦合先进的分布式水文模型,延长洪水预见期,提高预报精度,特别是对中小尺度、局地性强降雨引发的山洪灾害的预报能力。

**预警:**基于精准的预报成果和预设的风险阈值(如不同频率洪水对应的库水位、泄流量),自动触发分级分

类的预警信息,并通过多种渠道(短信、APP、广播等)精准推送给相关责任人和受影响区域公众<sup>[1]</sup>。

**预演:**这是数字化转型的核心。通过构建水库及其流域的数字孪生体,在虚拟空间中对不同预报情景下的洪水演进过程、水库调度方案、工程响应状态等进行全过程、多方案的模拟推演,直观展示不同决策可能带来的后果。

**预案:**基于预演结果,智能推荐最优调度方案和应急抢险措施,并自动生成标准化的应急预案。预案不再是静态的文本,而是与预演结果动态关联、可执行、可追溯的行动指南。

## 2.2 数字化转型的总体框架:“感知-平台-模型-应用”

为实现上述“四预”功能,白龟山水库的数字化转型应遵循一个清晰的技术框架,即“感知-平台-模型-应用”四位一体。(1)智能感知层:构建天空地水工一体化的立体感知网,实现对流域水文情势、工程本体状态、库区生态环境等全要素的实时、精准、自动化采集。(2)数据与平台层:打造一个集数据汇聚、治理、存储、共享于一体的数字孪生平台,作为整个系统的“数据底座”和“中枢大脑”。(3)模型与算法层:研发和集成一系列专业模型(水文模型、水动力模型、调度模型、结构安全模型等)与智能算法(AI、大数据分析),为“四预”提供核心算力支撑。(4)业务应用层:围绕防洪调度、兴利调度、工程安全管理、库区管理等核心业务,开发一系列智能化应用场景,将技术能力转化为实际生产力。

## 3 白龟山水库运行调度数字化转型的具体路径

基于上述框架,针对白龟山水库的具体痛点,本文提出以下四条具体转型路径。

### 3.1 路径一:构建全域智能感知体系,夯实数据底座

这是数字化转型的物理基础。针对白龟山水库的特点,应着力构建一个覆盖天空地水工的全域智能感知体系。首先,在水文水资源监测方面,需要对上游流域的自动雨量站、水位站和流量站进行加密布设,尤其要强化对支流和山洪易发区的监控,并引入X波段测雨雷达以弥补地面站点的空间盲区,从而显著提升对局地强对流天气的捕捉能力。在库区内部,应部署多参数水质浮标站以实时监控水环境健康状况,并利用ADCP等先进设备动态追踪泥沙淤积和水下地形的演变<sup>[2]</sup>。同时,在下游关键河道断面增设监测点,以便实时评估泄洪对下游的影响。其次,在工程安全监测方面,必须对拦河坝、顺河坝等关键结构进行重点强化,大规模部署光纤光栅、振弦式等新型传感器,对坝体变形、渗流压力等核心指标进行全天候、高精度的自动化监控。此外,引入InSAR技术对

大坝及周边山体进行大范围、毫米级的形变监测,并辅以高清视频监控与AI图像识别技术,实现对裂缝、渗漏等异常情况的自动识别,从而有效替代部分低效的人工巡检。最后,还需拓展天空地一体化的感知维度,通过定期无人机航测获取高精度三维实景模型,并结合高分卫星遥感数据,宏观把握库区水域变化和生态状况,为综合决策提供全方位的数据支撑。

### 3.2 路径二:打造一体化数字孪生平台,实现虚实融合

数字孪生平台是连接物理世界与数字世界的桥梁,是实现“预演”功能的核心载体。白龟山水库的数字化转型必须着力打造这样一个一体化平台。该平台的首要任务是构建一个高保真的数字孪生体,即基于BIM、GIS和IoT数据,精细复刻水库工程(包括所有坝体、闸门、渠道、电站)及沙颍河上游流域的三维数字模型。这个模型绝非简单的几何外观复制,而是深度集成了工程的物理属性、运行规则和实时状态数据,成为一个能够真实反映物理世界动态的“活”的虚拟水库。在此基础上,平台需要建立一个统一的数据湖或数据中台,彻底打破防洪、供水、工程安全等各业务系统间长期存在的数据壁垒。通过将来自智能感知层的所有实时数据,以及海量的历史水文、调度档案等数据,按照统一标准进行清洗、治理和融合,形成一个权威、唯一且持续更新的数据资源池,为上层所有应用提供坚实、一致的数据服务<sup>[3]</sup>。为了使管理者能够直观、高效地与这个虚拟世界互动,平台还需配备强大的可视化交互引擎,提供沉浸式的三维操作界面,让管理者能够“身临其境”地查看任意时刻的工程状态,并能便捷地进行调度方案的设定与推演,真正实现物理世界与数字世界的深度融合与双向驱动。

### 3.3 路径三:研发精细化智能调度模型,驱动科学决策

如果说数字孪生平台是骨架,那么各类专业模型与智能算法就是赋予其灵魂的关键。白龟山水库的数字化转型,必须将研发和集成一系列精细化的智能调度模型作为核心任务。首要的是,要耦合先进的分布式水文模型与一维/二维水动力模型,构建一个能够精确模拟从降雨产汇流到洪水在河道、库区全过程演进的联合模型,这是提升洪水预报精度和开展风险分析的科学基石。在此基础上,必须针对白龟山水库防洪、供水、灌溉、发电、生态等多重且时常冲突的目标,构建一个多目标智能优化调度模型。该模型需要充分内嵌“三类坝”现状下的各项安全约束条件,例如汛期限制水位101.80米这一硬性规定。更为关键的是,应积极引入强化学习、遗传算法等前沿人工智能技术,让模型能够在处理海量历史调度案例和实时感知数据的过程中,不断自主学习和进

化,从而超越传统的规则调度模式,向能够动态生成并优选最佳方案的智能调度模式跃升。与此同时,还应集成工程安全评估模型,将大坝渗流、应力应变等实时监测数据输入有限元分析模型中,动态评估大坝在各种复杂工况下的结构安全性,为调度决策划出清晰、可靠的安全边界,确保任何调度指令都在工程可承受的风险范围之内。

#### 3.4 路径四:深化多场景业务应用,赋能闭环管理

技术和模型的最终价值,必须体现在对具体业务的赋能和闭环管理的形成上。白龟山水库的数字化转型,需要将前述能力深度融入到防洪、兴利、安全等核心业务场景中,打造一系列实用、高效的智能化应用。在防洪调度方面,应构建“四预”一体化应用,当系统预报到强降雨过程时,能自动启动预演流程:基于预报数据模拟入库洪水,智能调度模型随即生成多个泄洪方案,数字孪生平台则对各方案下的库水位变化、下游淹没风险进行直观预演,最终系统综合评估后推荐最优方案并自动生成可执行的应急预案,实现从被动响应到主动防御的根本转变<sup>[4]</sup>。在水资源管理方面,应开发水资源优化配置应用,在非汛期滚动整合气象预报、用水需求等信息,通过智能模型优化出库计划,在满足各方用水的同时最大化水库蓄水效益,巧妙平衡防洪与兴利的矛盾。针对“三类坝”的特殊状况,必须建立工程全生命周期安全管控应用,通过持续回传的监测数据和实时安全评估,一旦发现异常便自动预警、定位隐患并推送处置建议,实现风险的精准、闭环管控。此外,还应拓展库区

综合管理与公众服务应用,利用多源数据自动识别非法活动,并通过移动终端向公众开放水情、水质等信息,提升水库管理的透明度和社会服务能力,最终形成一个“监测-分析-决策-执行-反馈”的完整管理闭环。

#### 4 结语

白龟山水库作为一座功能重要但面临安全挑战的大型水库,其运行调度的数字化转型已迫在眉睫。本文提出的“感知-平台-模型-应用”四位一体转型路径,紧扣智慧水利“四预”功能的核心要求,具有很强的针对性和可操作性。通过构建全域智能感知体系、打造高保真数字孪生平台、研发多目标智能调度模型,并将其深度融入防洪、兴利、安全等核心业务场景,白龟山水库有望实现从传统经验驱动向数据智能驱动的根本性转变,全面提升其综合管理效能和风险防控能力,最终成为智慧水利时代水库现代化治理的典范。

#### 参考文献

- [1]杨才杰.水库管理发展与数字化初探[J].浙江水利科技,2022,50(04):108-111.
- [2]李梦雅,王建雪,刘洋.基于“智慧化”背景下水库运行调度信息化建设路径研究[J].珠江水运,2024,(10):40-42.
- [3]涂治.数字化技术在水库调度决策支持系统中的应用分析[C]//《中国招标》期刊有限公司.新质生产力驱动第二产业发展与招标采购创新论坛论文集(四).新疆水利水电勘测设计研究院有限责任公司,2025:192-199.
- [4]张为正,全琦.基于数字化转型背景下的水库智慧化管理应用研究[J].产业科技创新,2024,6(03):103-106.