

大数据驱动的水库调度智能决策系统应用分析

马 蕾

华电四川发电有限公司瓦屋山分公司 四川 成都 610041

摘 要：传统水库调度依赖经验判断，面对复杂工况存在响应滞后、决策偏差等问题。本文对比分析了传统调度与智能决策的优劣势，明确数据特征与关键技术，从“人机协同”视角设计决策架构，阐述高精度来水预报、动态汛限水位控制等应用场景。大数据技术可融合多源信息、提升决策科学性，实现调度从“经验驱动”向“数据驱动”转型，同时强调调度人员经验判断与系统辅助决策的有机融合，为水库智能调度提供参考。

关键词：大数据；水库调度；智能决策；数据融合；水利信息化

引言：水库调度是水资源合理配置、防洪减灾的核心环节，直接关系到流域安全与水资源利用效益。传统调度模式高度依赖调度人员的个人经验，采用固定规则和单一目标进行决策，在应对突发洪水、多目标冲突等复杂工况时，往往出现响应迟缓、方案非优等问题。本文围绕大数据驱动的水库调度智能决策展开研究，对比传统与智能模式的优劣，强调人的核心决策地位，构建人机协同的决策框架并探讨核心应用场景。

1 水库调度决策的数据特征与理论基础

1.1 水库调度决策涉及的数据类型

水库调度决策涉及水文、气象、工程、社会经济等多维数据。水文数据包括入库流量、水位、库容等，为调度提供基础支撑；气象数据涵盖降雨量、气温、降水预报，直接影响来水预判；工程数据包括大坝结构监测、闸门运行状态等，保障调度过程中的工程安全。此外，社会经济数据（下游用水需求、航运流量）和生态环境数据（生态流量、水质指标）也已纳入调度考量，同时融入卫星遥感监测数据，实现多维度数据协同，为多目标调度决策提供全面支撑，确保调度方案兼顾安全、效益与生态。

1.2 传统调度模式与智能决策理论的优劣势对比

传统水库调度以“经验规则”为核心，调度人员依据历年洪水规律、设计调度图及自身经验进行决策。其优势在于：规则简单明了、易于执行，调度人员对流域特性有深刻理解，在常规工况下能够快速响应。但劣势同样突出：面对超标准洪水、极端天气等非常规工况时，经验往往失效；多目标冲突时难以量化权衡，容易顾此失彼；调度过程依赖个人判断，决策质量因人而异，缺乏一致性。智能决策理论以“数据驱动”为核心，通过机器学习、优化算法从海量数据中挖掘规律、生成方案。其优势在于：能够处理高维非线性问题，生成多目标帕累托前沿方案供比选；决策过程可量化、可复现。其劣势

在于：算法模型的“黑箱”特性降低了决策可解释性；对数据质量和完备性高度敏感；无法完全替代调度人员对流域特性的直觉理解。因此，理想的模式是“人机协同”——算法提供多方案量化支撑，人做出最终决策^[1]。

1.3 大数据关键技术体系

大数据关键技术体系涵盖采集、存储、处理、分析全流程，其服务于“人机协同”的核心理念。数据采集依托物联网、卫星遥感、无人机巡检，构建“天空地水工”一体化感知网络，为人的决策提供全面信息基础。数据存储采用分布式架构，结合时序数据库保障实时数据快速调用，确保调度人员随时获取最新态势。数据处理聚焦多源异构数据清洗、转换与融合，通过异常值剔除提升数据质量，避免“垃圾进、垃圾出”误导决策。数据挖掘与分析集成机器学习、优化算法等技术，挖掘数据关联、实现趋势预测与方案优化，其作用不是替代人，而是将海量数据转化为易于人理解和判断的信息与备选方案，形成“数据→信息→知识→决策”的完整链条。

2 大数据驱动的水库调度智能决策系统架构设计

2.1 系统总体架构

系统采用“云-边-端”协同模式，遵循“分层设计、协同联动、按需服务”原则，整体分为数据层、计算与分析层、决策与展示层三个层次。数据层承担多源异构数据的采集、融合与存储任务，为上层提供高质量数据支撑。计算与分析层作为系统“大脑”，集成模型库与算法引擎，实现数据深度分析、趋势预测与方案优化。决策与展示层负责人机协同交互，将分析结果直观呈现，支持人工干预与指令下发，实现“数据驱动-模型计算-决策输出-执行反馈”的闭环管理。

2.2 数据层：多源异构数据融合

数据层核心功能是实现多源异构数据的采集、清洗、融合与存储，打破数据孤岛。数据采集涵盖现场监测、

遥感监测、第三方及历史数据等多渠道。针对数据异构性问题,先对原始数据进行清洗,剔除异常值与缺失值并完成标准化转换,再采用多源数据融合技术消除数据偏差,实现结构化、半结构化与非结构化数据的有机整合。构建分布式数据存储体系,结合时序数据库与关系型数据库,分别存储实时监测数据与静态数据,保障数据的安全性 with 快速调用能力。

2.3 计算与分析层:模型库与算法引擎

计算与分析层由模型库与算法引擎组成,承担数据深度分析、趋势预测、调度方案优化等核心任务。模型库整合水文预报、防洪调度、兴利调度、大坝安全评估等专业模型。算法引擎集成LSTM神经网络、遗传算法、NSGA-II算法、随机森林等多种算法,通过算法与模型的耦合联动实现数据深度挖掘。该层还具备模型自适应优化能力,可根据实时数据反馈动态调整模型参数,提升预测精度与方案适配性,实现从数据到决策的高效转化。

2.4 决策与展示层:人机协同交互

决策与展示层实现人机协同交互,将分析结果以直观形式呈现,支持调度人员干预与决策下达。展示模块采用GIS地图、数字孪生界面、仪表盘等可视化形式,全面呈现水库实时运行状态、调度方案推演及预警信息,实现“一屏全览”。决策模块支持自动决策与人工决策双重模式,自动决策生成最优方案并推送,人工决策允许调度人员对方案进行调整修改,下达闸门启闭等指令。该层还具备权限管理、操作记录追溯等功能^[2]。

3 人机协同的水库调度智能决策应用分析

3.1 应用场景一:高精度来水预报

传统来水预报高度依赖预报员的个人经验和流域特性认知,预报员根据降雨预报、前期土壤饱和度等因素进行主观判断,这种方法在常规天气条件下具有一定准确性,但在极端暴雨、台风等复杂天气系统下,预报偏差较大,且预见期较短。智能预报将预报范式从“站点推演”升级为“网格计算”:将流域划分为数万个精细化网格,每个网格独立计算降雨径流过程,再通过LSTM神经网络自动提取时空特征,生成未来1-7天逐小时入库流量预报。但算法的预报结果并非直接采纳,而是由经验丰富的预报员进行研判修正——预报员结合当前天气实况、雷达回波趋势等算法难以量化的信息,对预报结果进行人工校正,实现“机器算、人判断”的协同模式。该方案使洪水预报合格率稳定超过85%,最关键的是将洪水预见期从传统的3天延长至7天。这一突破意味着调度人员可以提前一周预判来水形势,为防洪预泄争取了充足的决策窗口期。

3.2 应用场景二:动态汛限水位智能控制

静态汛限水位是长期以来的行业惯例,其代价是汛期闲置大量库容。传统模式下,调度人员依据调度图进行操作,“汛期一律限水位、非汛期一律蓄水位”,规则简单但资源利用效率低下。动态汛限水位智能控制的核心命题在于如何在风险可控的前提下“活用”闲置库容,这需要算法计算与人的风险判断相结合。具体路径为:系统整合气象卫星、雷达回波、地面站网三类数据,利用随机森林算法将未来72小时降雨风险划分为高、中、低三级;根据风险等级和当前库水位,调用多目标优化模型计算建议水位调整值;利用数字孪生模型推演调整后的洪水演进过程。但最终是否执行水位调整、调整幅度多少,由调度人员结合当前流域态势、上级防汛要求等因素综合判断^[3]。系统提供的是“风险-效益量化分析”,调度人员做的是“风险可接受度判断”。非汛期则根据中长期预报适当抬升水位,累计增蓄水资源超亿立方米。这套机制将静态的“限值管控”转变为动态的“风险-效益统筹”。

3.3 应用场景三:多目标实时调度决策

水库调度的最大难点在于多目标冲突:防洪要求低水位,发电要求高水位,生态要求稳定下泄。传统做法是凭经验设定固定权重,通过加权求和转化为单目标问题,这种方法虽然简单,但权重设定主观性强,且无法呈现不同目标之间的权衡关系。人机协同的解决思路是:不替决策者做选择,而是将帕累托最优理论与NSGA-II算法相结合,把所有“非劣”方案都计算出来,让决策者根据实时需求从中挑选。以大型流域梯级水库为例,系统实时采集电网负荷、下游用水计划、生态流量三类数据,以削峰率、发电量、供水保证率、生态基流满足度为四个优化目标,每6小时滚动生成一组候选方案——方案A偏重防洪(削峰率35%但发电量下降8%),方案B偏重发电(发电量增加5%但削峰率仅20%),方案C为均衡方案(削峰率28%且发电量持平)。调度人员根据实时汛情和调度指令选择执行,决策过程透明、可追溯。全年完成十余次优化调度,累计增发电量超2亿千瓦时,实现了多目标调度的“人机协同”。

3.4 应用场景四:异常事件预警与应急调度

水库工程的安全隐患往往有一个从量变到质变的过程,传统固定阈值法只能在临界点才发出警报,错失了最佳处置窗口。传统模式下,调度人员依靠人工巡检和定期报表发现异常,时效性差且容易遗漏。异常事件预警的核心价值在于通过机器学习算法识别异常趋势,将发现窗口提前数小时,但仍需人的专业判断确认。完整流程为“识别-分级-推送-确认-处置”:利用孤立森林、

自编码器等算法对坝体位移、渗流量、水位突变、设备运行参数进行实时监测,提取异常时序特征;根据异常严重程度划分为蓝、黄、橙、红四级,通过多渠道推送给相关责任人;但系统推送的是“疑似异常”,需要专业技术人员现场核实确认后方可启动应急响应。在重点水库的实践中,系统连续监测闸门液压系统压力数据,发现其在3小时内呈缓慢爬升趋势,虽未触及报警阈值,但基于异常趋势识别提前发出预警。经排查确认是液压管路微渗漏所致,及时修复后避免了汛期闸门操作失效风险。

3.5 应用场景五:水库群联合调度优化

单库调度优化做得再好,也只能实现局部最优。水库群联合调度的核心命题是协调上下游水库的泄蓄关系,使全流域综合效益最大化。传统模式下,上下游水库各有调度主体,信息沟通不畅,容易形成“各自为政”的局面。人机协同的解决思路是通过大数据平台实现全流域水情统一感知,由算法生成协同调度建议,由流域调度机构统筹决策。在具体实施中,系统整合梯级水库群各水库及区间流域的雨量、水位、流量数据,构建统一水情数据平台,消除信息孤岛;基于上游来水预报和下游库容状态,调用梯级水库群联合调度模型,采用动态规划和强化学习算法生成协同调度方案^[4]。某流域梯级水库群的实践表明,系统提前48小时预测上游将出现较大入库洪峰,同时测算下游库容充足,联合调度模型生成“上游错峰、下游补偿”的方案建议,经流域调度机构会商确认后执行:上游先期按削峰50%控制泄流,下游同步加大出库腾库。洪水到达后,上游削峰率达42%,下游削峰率达35%,下游城镇未出现超警戒水位。

3.6 重要的应用场景:数字孪生驱动的全生命周期调度模拟

传统调度依赖历史数据和离线推演,难以实时反映工程状态变化。数字孪生技术通过构建与物理水库同步映射的虚拟实体,实现调度决策从“离线计算”向“在线推演”的根本转变,核心价值在于方案执行前即可预判

结果、规避风险。具体路径为:基于实时采集的水位、流量、闸门开度及大坝变形监测数据,结合三维建模与数据驱动模型,搭建水库数字孪生体。调度人员下达指令前先在孪生环境中“预演”,系统自动调用水文预报、洪水演进等模型,快速推演不同方案在未来时段的洪水位变化、下游淹没范围及工程应力响应,实现从“定性分析”到“定量预演”的跨越。大型水库应对强降雨时,系统对三套预泄方案进行数字孪生推演:方案一下泄流量加大,下游水位逼近警戒线;方案二逐步加大下泄,水位可控但库区淹没略大;方案三采用分级预泄,防洪与库区安全均可兼顾。调度人员据此选择最优方案执行,显著降低了下游洪峰水位,避免了人员转移。该场景将决策验证环节前移至方案生成阶段,实现了“先预演、后决策、再执行”的闭环优化,是当前智能调度体系中综合性最强、最具推广价值的应用方向。

结束语

传统水库调度依赖经验判断,智能决策理论可补足其不足但存在“黑箱”隐忧。本文以“人机协同”为核心理念,明确了“算法辅助计算、人做最终判断”的分工原则,构建了分层架构,并通过应用场景验证了其可行性。研究表明,最好的方式是将机器的计算能力与人的经验判断深度融合。未来应进一步探索人机交互优化、决策可解释性增强等方向,推动水库调度向“人机协同、数据驱动”转型。

参考文献

- [1]李磊,冯钧,直伟,等.基于人工智能技术的水库防洪调度决策模式研究[J].水利信息化,2025(6):1-5.
- [2]毛迪.大数据分析技术在水库智能调度优化中的应用研究[J].水上安全,2026(1):46-48.
- [3]魏永强,黄草,张移郁,等.中小流域水库群智能调度与决策支持系统设计与开发[J].中国防汛抗旱,2021,31(10):61-66.
- [4]刘晓东,陈虎,郭园,等.董铺-大房郢水库智能调度管理系统构建及应用[J].水利水电快报,2026,47(3):21-27,38.