

水电站汛期水位精准调控与风险规避路径探索

芦金鑫

(中国水利水电第十一工程局安装分局, 河南 郑州 450001)

摘要 随着极端气候事件的频繁发生, 水电站汛期水位调控正面临着洪峰剧烈涨落, 调度复杂化和运行风险加大的考验。本文以水电站汛期水位准确调控技术为研究对象, 从大数据洪水预报、人工智能智能调度、数字化风险预警以及“云-边-端”协同控制技术等方面系统地论述其应用优化路径; 从历史水文数据、实时监测数据及洪峰预测模型等方面进行综合分析可知, 智能预测与调度技术对于提高水位预测精度、减少调度响应时间、降低下游洪峰风险等表现出了显著成效。有关研究及典型工程应用结果表明, 上述技术能够在一定程度上提高防洪安全性及发电效率。研究结果旨在为水电站汛期智慧化管理和风险规避提供技术借鉴。

关键词 汛期水位调控; 大数据洪水预报; 人工智能调度; 数字化风险预警

中图分类号: TV697.1+3

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.26.041

0 引言

随着全球气候变化的加剧, 我国水电站流域极端暴雨和洪峰频繁发生等问题越来越突出, 对水库调度、防洪安全和发电运行造成了极大的压力。传统的调度模式以历史经验为主, 人工操作为辅, 具有预测精度不高、调度响应落后、风险联动性较差的特点, 易诱发水位超限、设备负荷过大、下游洪涝风险等一系列问题。近年来, 信息化和智能化技术不断发展, 为水电站汛期水位的准确调节和控制提供了一种全新的解决路径^[1]。通过运用大数据、人工智能、数字孪生以及“云-边-端”协同控制技术等, 可以实现来水过程实时监控, 洪峰动态预报和多目标调度优化。同时, 数字化的风险预警平台能够快速识别并应对水位异常, 设备故障以及下游洪水风险等风险, 从而为调度决策的制定提供科学依据。本文着重探讨汛期水位精准调控过程中关键技术的运用与优化策略, 以期水电站的高效、安全和智慧化发展提供借鉴。

1 汛期水位精准调控关键技术体系

1.1 水文监测与实时数据采集技术

汛期水位的精准调控, 首先有赖于高精度的水文监测和实时数据采集技术。当前大型水电站普遍运用“雨量站加雷达测雨加卫星遥感等”的联合监测模式, 以实现流域内降雨、水位和流量的实时感知^[2]。以三峡工程为例, 它已经建成了涵盖长江上游流域雨水

情自动测报系统并连接了 600 多个各种水文和雨量监测站点, 能够实现流域水情信息的实时获取和远程传输。据公开信息显示, 三峡工程已经形成了以北斗高精度定位, 物联网通信以及智能感知技术为核心, 能够毫米级动态监测坝体、边坡以及库区运行状况的安全监控系统。在数字化调度平台的支持下, 调度中心可实时接收流域内洪峰、水位以及来水过程等信息, 从而为汛期防洪调度以及水位精准控制等工作提供可靠数据支持。

1.2 数字孪生与洪水动态预测技术

数字孪生技术是通过建立虚拟水库和真实流域之间的同步映射模型来动态模拟洪水的演进过程。目前一些大型水电站已经搭建了三维数字孪生平台来滚动预报未来 6 h ~ 24 h 内的洪水过程。研究表明, 结合 LSTM 神经网络算法后, 洪水预测模型在部分流域中的预报精度相比传统模型有所提高, 洪峰到达时间误差也得到一定程度缩小^[3]。以白鹤滩水电站为例, 其在汛期调度中应用数字孪生与智能预报技术, 对库水位进行动态优化控制, 从而降低了超汛限运行风险, 提高了防洪调度的安全性与精细化水平。

1.3 多目标联合调度智能决策技术

多目标联合调度技术解决了防洪、发电与生态泄流三者间的配合。传统的人工调度通常会出现响应滞后等问题, 基于遗传算法和动态规划相结合的智能调度系统能够实现秒级计算和自动决策。以金沙江梯级

作者简介: 芦金鑫 (1988-), 男, 专科, 助理工程师, 研究方向: 水电站运行。

水电站群为研究对象,发现联合调度平台能够同时处理超过10万组的运行参数,从而使调度效率提高了超过35%,同时弃水率也减少了大约12%^[4]。此外,该智能决策系统能够依据实时的来水数据自动调整泄洪策略,从而在汛期将发电的小时数增加大约8%,并能将下游的洪峰流量减少15%~20%,这大大增强了水库的整体运营效果。

2 水电站汛期运行风险识别与影响分析

2.1 极端暴雨条件下超标准洪水风险

在全球气候变化的大环境下,流域内极端暴雨事件有增加的趋势,这给水电站的防洪调度工作带来了更大的挑战。据《中国气候变化蓝皮书(2024)》资料显示,1961—2023年间中国极端强降水事件整体呈上升态势,长江流域局部地区短时强降雨发生频率显著增加。在2020年长江流域遭遇了大规模的流域性洪水灾害,其中三峡水库的最大入库洪峰达到了75 000 m³/s,这是自水库建成以来的最大洪峰流量^[5]。当入库流量大于水库最大泄洪能力时,易出现超汛限水位现象,其关系式为:

$$Q_{in} > Q_{max} \quad (1)$$

以三峡工程为例,其防洪标准按“千年一遇洪水设计、万年一遇洪水校核”建设。在2020年汛期,三峡水库通过拦洪削峰,累计拦蓄洪水超过180亿m³,最大削峰率约34%,有效减轻了长江中下游防洪压力,但也表明在极端洪水条件下,水库调度和坝体安全运行面临较大挑战。

2.2 调度偏差引发的水位失控风险

在汛期调度过程中,若洪水预测误差较大或调度响应滞后,容易造成水位失控风险。水库水位变化可表示为:

$$\Delta V = (Q_{in} - Q_{out}) \times t \quad (2)$$

式(2)中, ΔV 为库容变化量, Q_{in} 为入库流量, Q_{out} 为下泄流量。当预测偏差超过10%时,可能导致泄洪不足或弃水增加。研究表明,部分水电站传统人工调度响应时间约为30 min,而洪峰演进速度可达每小时上涨0.5 m~1.2 m,容易造成短时超限运行,增加大坝结构受力风险。

2.3 设备故障与通信异常风险

洪水期高负荷工作时闸门、电源和通信系统发生故障的可能性显著增大。根据相关数据分析,大约有35%的汛期调控异常与设备出现故障有直接关联,其中超过20%的情况是由于闸门的启闭功能失效导致的。

闸门泄流能力计算公式为:

$$Q = \mu b h \sqrt{2gh} \quad (3)$$

式(3)中, Q 为泄流量, μ 为流量系数, b 为闸门宽度, h 为水头高度。当通信延迟超过5 s时,远程控制系统可能无法及时执行泄洪指令,导致水位调节滞后。有的水电站极端天气情况下通信中断时间一度超过15 min,极大地影响了汛期的安全运行。

2.4 下游区域泄洪安全风险

水电站在泄洪时,如果下泄流量过大或者调度不均,易给下游河道和城镇带来洪涝威胁。河道安全流量通常满足:

$$Q = AV \quad (4)$$

式(4)中, Q 为过流量, A 为过水断面面积, V 为流速。当泄洪流量超过河道安全承载能力时,下游低洼区域易发生漫堤风险。研究显示,部分中小河流安全行洪能力不足5 000 m³/s,而大型水电站单次泄洪流量可达到8 000 m³/s~12 000 m³/s,洪峰叠加后可能使下游水位上涨2 m~3 m,对居民区、桥梁及生态系统造成较大影响。

3 汛期水位精准调控技术优化路径

3.1 大数据驱动的洪水预报模型优化

汛期水位调控期间,大数据技术可显著提升洪水预报精准性和时效性。当前大型水电站一般都与雨量站、水文站、遥感卫星以及气象雷达多源数据进行连接,单日数据处理的规模可达5 TB~8 TB之间。通过构建历史洪水数据库,结合深度学习算法可以实现洪峰流量,洪峰到时和洪水演进过程等信息的动态预报。研究数据显示,采用大数据洪水模型后,洪峰预测准确率由传统方法的78%提高至92%以上,预测提前时间由6 h提升至24 h,洪峰流量误差控制在5%以内。同时,大数据分析也可实现对流域来水趋势的自动识别,从而为水库提前泄洪、库容调节等提供可靠的依据,并有效减少了汛期超标运行的风险。

3.2 人工智能算法在调度中的应用

人工智能算法可以对汛期水位进行快速分析和智能决策,明显提高调度效率。目前,一些大型流域已经运用了强化学习、遗传算法和神经网络等先进技术来构建智能调度平台,该平台能够同步分析超过10万组的运行参数,并根据实时的来水数据来自动优化泄洪方案。与传统的人工调度方式相比,AI系统在20 min~30 min内完成一轮调度分析,并能在1 min内完成洪水模拟和调度决策,从而使效率提高了超过40%。实践

证明,经过智能调度水库的弃水率减少了大约 10%,汛期的发电量增加了大约 8%,而下游的洪峰减少了 15%~20%。另外, AI 系统可根据天气变化对调度策略进行实时订正,增强极端暴雨情况下运行的稳定性。表 1 重点比较了传统调度和 AI 智能调度响应速度,预测精度

表 1 汛期智能调度技术应用效果对比

调度方式	调度响应时间	洪峰预测准确率	弃水率变化	发电效率提升
传统人工调度	20 min ~ 30 min	78%	较高	基础水平
AI 智能调度	≤ 1 min	92% 以上	下降约 10%	提高约 8%

了风险隐患实时辨识。目前,部分智慧水电站已部署超过 2 000 个在线传感器,监测数据刷新频率达到 1 min 以内。该系统能够利用智能识别技术自动处理异常数据,并能在 30 s 之内发布预警信息,与传统的人工巡查相比,其效率提升了大约 60%。同时,数字化平台对超汛限水位、设备异常及坝体渗流等风险的识别准确率可达到 95% 以上,有效降低了突发事故发生概率,调度人员能更准确、更直观地进行风险决策。

3.4 云平台与边缘计算协同控制技术

云平台和边缘计算协同技术可以增强汛期调控系统数据处理能力和现场响应速度。云平台承担着洪水模型运算,海量数据存储与远程调度分析等功能,边

和发电效益等指标,反映智能化技术优化效果。

3.3 数字化风险预警平台建设

数字化风险预警平台对提高汛期运行安全具有重要的技术支撑作用。该平台通过整合坝体变形监测、水位监测、渗流压力监测和视频感知系统等技术实现

缘计算终端承担着对现场设备的快速反应与实时控制功能。利用“云-边-端”的合作框架,系统的总体响应时间从传统模式的 10 s 减少到不超过 1 s,同时通信的稳定性也增加了大约 35%。现在一些智慧水电站已经达到了超过 90% 的自动化控制水平,能够实时监控闸门的开启和关闭、水位的调整以及设备的运行状态。另外,当网络出现异常时,边缘终端仍然能够维持本地独立工作,从而有效地保证了调控系统在极端天气情况下的连续性和安全性,增强了汛期工作的可靠程度。表 2 重点反映了数字化预警、云平台和边缘计算在汛期精准调控过程中的操作指标和实际使用效果,能够直观地反映出智慧水电站的建设程度。

表 2 数字化调控与风险预警系统运行指标

技术系统	核心功能	关键指标	应用效果
数字化预警平台	风险实时识别	预警准确率 95% 以上	险情识别效率提高 60%
云平台调控系统	数据分析与远程调度	数据处理量 5 TB/ 日~ 8 TB/ 日	提高调度协同能力
边缘计算终端	现场实时控制	响应时间 ≤ 1 s	提升运行稳定性
智慧监测系统	水位与坝体监测	数据刷新 ≤ 1 min	实现全天候监测

4 结束语

水电站汛期水位精准调控对确保防洪安全,提高发电效益具有重要意义。研究结果表明:采用大数据驱动洪水预报,人工智能智能调度,数字化风险预警和“云-边-端”协同控制技术可以显著提升水位预测精度与调度效率,减少响应时间、减少超汛限运行及下游洪峰的风险。例如:洪峰预测的准确性可以超过 92%,调度响应时间可以缩短到 1 min 以内,下游洪峰流量可以减少 15%~20%,弃水率可以降低 10%,发电效率可以提高大约 8%。在未来的工作中要进一步加强多源数据整合, AI 算法优化和智慧水电站系统建设等工作,促进水电站汛期运行朝着数字化和智能化方向发展、自动化与高可靠性的发展全面提高了汛期防洪安全与综合运行效益。

参考文献:

- [1] 舒卫民,杨卫星,严方家,等.径流变化下的溪洛渡梯级-三峡梯级水库群适应性调控[J].武汉大学学报(理学版),2025,71(01):134-142.
- [2] 胡昊,马鑫,徐杨,等.基于权重修正和DRSN-LSTM模型的向家坝下游水位多时间尺度预测[J].水利水电技术(中英文),2022,53(07):46-57.
- [3] 杨欣怡,邱录章,肖杨.基于气象预报的水电站汛期运行水位控制应用[J].湖南水利水电,2022(06):113-115.
- [4] 张验科,武文龙,王远坤,等.汛期水风光多能互补动态调度模型研究[J].人民长江,2024,55(09):35-43.
- [5] 曹扬.中小型水电站汛期水位动态控制效益探究[J].山西水利,2025,41(04):13-15,27.