

水利工程防洪调度优化与风险管控

赵志浩

突泉县水利事业发展中心

DOI:10.32629/hwr.v10i1.6792

[摘要] 水库、堤防等水利工程的防洪调度属于流域防洪体系的重要组成部分,防洪调度决策是否科学,风险管控是否到位,直接影响人民生命财产安全以及社会经济的稳定发展。本文以防洪调度优化与风险管控为系统工程,从调度理论方法、风险评估技术、综合管控策略三个方面进行系统的分析。关于调度优化重点论述了多目标协同调度模型以及实时决策支持系统;在风险评估方面,对风险识别诊断、动态评估技术体系做了分析;在综合管控上提出了自适应调度机制设计和智慧化管控平台的建设。经过研究发现,借助现代优化算法、智能决策技术以及风险量化方法的综合应用,创建起“精准预报-智能优化-动态评价-协同控制”一体化的技术体系之后,可以明显提升防洪调度决策的科学性、及时性和可靠性,从而给应对日趋复杂的防洪状况赋予系统的技术解决办法。

[关键词] 防洪调度; 多目标优化; 风险评估; 智能决策

中图分类号: TV87 **文献标识码:** A

Optimization of flood control scheduling and risk management in water conservancy projects

Zhihao Zhao

Tuquan County Water Conservancy Development Center

[Abstract] The flood control scheduling of water conservancy projects such as reservoirs and embankments is an important component of the watershed flood control system. Whether the flood control scheduling decisions are scientific and whether the risk control is in place directly affects the safety of people's lives and property as well as the stable development of the social economy. This article takes flood control dispatch optimization and risk control as a systematic engineering, and conducts a systematic analysis from three aspects: dispatch theory and methods, risk assessment techniques, and comprehensive control strategies. The multi-objective collaborative scheduling model and real-time decision support system were discussed in detail regarding scheduling optimization; In terms of risk assessment, an analysis was conducted on the technical system of risk identification, diagnosis, and dynamic evaluation; We have proposed the design of an adaptive scheduling mechanism and the construction of an intelligent control platform for comprehensive management and control. After research, it has been found that the comprehensive application of modern optimization algorithms, intelligent decision-making techniques, and risk quantification methods can significantly improve the scientific, timely, and reliable nature of flood control dispatch decisions by creating an integrated technical system of "accurate forecasting intelligent optimization dynamic evaluation collaborative control". This provides a systematic technical solution for dealing with increasingly complex flood control situations.

[Key words] flood control dispatch; Multi objective optimization; Risk assessment; intelligent decision-making

目前防洪安全是国家安全体系的基础。“十四五”规划提出建设智慧水利体系、提高防洪减灾能力,用科技创新推动调度现代化。全球气候变暖使极端水文事件增多,传统的经验型调度不能应对预报的不确定性、多目标的冲突等问题。本文从系统工程的角度出发,把现代优化算法和智能决策技术融合起来,探寻防洪调度优化与风险控制的协同途径,希望给创建科学、有韧性的

防洪体系赋予理论支撑,助力水利高质量发展。

1 防洪调度多目标协同优化理论与方法

1.1 多目标协同优化模型构建

建立科学的调度优化模型是进行方案寻优的前提。要考虑防洪安全(控制关键断面水位、削减洪峰)、水资源利用(供水、发电)、生态环境要求(生态流量下泄)、工程安全等各方面因素。

这些目标之间常常会存在互相竞争的关系。根据数学规划理论,可以建立含有各种目标函数以及水库容量、泄流能力、河道安全泄量、法规政策等各种约束条件的优化模型^[1]。对于模型的高维、非线性、多阶段等复杂特性,可以采用动态规划、逐步优化算法、遗传算法、粒子群算法等智能化算法或者混合策略来求解,从而得到调度决策变量的最优或者满意解集,即帕累托前沿。由于水文气象预报存在不确定性,所以应该采取滚动优化、反馈校正等措施,使调度方案可以依据实时水雨情以及预报信息做出动态调整,从而提高方案的鲁棒性和适应性。

1.2 实时调度智能决策支持系统

为了使优化模型能够有效地应用于实际调度决策中,需要建立功能强大的智能决策支持系统。该系统一般采用分层结构,即数据感知与同化层、模型计算与分析层、方案仿真与比选层、人机交互与可视化层。核心就是把高精度的水文气象预报产品,即同化雷达、卫星等多源数据的数值天气预报和水文预报模型,作为优化计算的输入边界。该系统利用高性能并行计算技术来生成多种调度方案并对其进行模拟。采用案例推理、知识图谱等人工智能技术之后,系统可以对历史调度案例中出现的成功与失败的经验进行分析,为当前的决策提供智能化的辅助。一个高效的决策支持系统可以大幅缩短方案的制定周期,加快决策的响应速度,使调度人员从复杂的计算中解放出来,更多地投入到战略层面的判断上。

2 防洪调度全过程风险识别与评估技术

2.1 基于全链条的风险源诊断与辨识

风险识别是防洪调度风险管理的关键步骤,要建立一个包含预报预测、方案拟定、指令下达、工程响应、效果反馈的全过程风险识别体系,应运用系统工程分析方法,包括故障树分析、事件树分析等,从结果逆向推导或从初始事件正向推演,系统梳理可能导致调度目标落空或产生负面影响的各类潜在风险因子及其相互关联。重点应该包含水文气象输入的不确定性、工程设备和通讯系统的可靠性、调度模型和决策过程的局限性、地震、地质灾害等极端外部事件。通过建立风险矩阵,可以直观地反映出各个风险事件发生的概率以及后果的严重程度,给确定风险管理优先级提供清晰的依据。

2.2 动态量化风险评估模型构建

为了适应洪水过程动态变化的特点,必须冲破传统静态评价的束缚,创建起可以及时融合新信息的动态量化风险评估办法。贝叶斯网络模型在这方面有独到之处,它的概率图结构可以很好地把先验知识和实时观测数据融合起来,不断对各种风险事件发生的概率作出修正。蒙特卡洛模拟技术采用大量的随机抽样,对预报误差、参数扰动等不确定性因素进行传播模拟,进而求出关键调度结果(如下游控制站最高水位、工程失事概率)的概率分布。这些方法给风险评估提供了一个动态、量化的分析框架。

2.3 风险决策支持与方案比选

风险评估的最终目的是为科学的风险决策提供支持。根据

动态风险评估得出的风险概率、风险价值、条件风险价值等量化结果,为不同的调度方案风险收益特性赋予客观可比的度量。决策者可以按照具体的风险容忍度(风险偏好),在“期望效益”和“风险水平”组成的二维空间里对各个备选方案进行综合权衡和比选。可靠度理论可以进一步用来评价在一定的风险接受标准下,调度方案对应的系统安全裕度或者可靠指标^[2]。该套方法体系促使防洪调度决策由依靠定性经验判断,转向依靠定量风险分析的精细化、科学化。

3 面向风险防控的自适应调度机制

3.1 分级预警与弹性响应机制

为了有效控制风险,需要建立和风险等级相适应的自适应调度、应急响应机制。首先要建立科学的分级预警指标和触发阈值,把综合风险评估结果变成不同颜色(蓝、黄、橙、红)的预警信号。不同的预警级别会触发不同的应急响应流程、会商决策层级、工程调度权限、抢险预备状态。其次,调度规则本身要具有弹性。防洪库容的预留和动用不是一成不变的,而是根据中长期气象预报反映出来的早涝趋势来调整的,从而达到风险防范与兴利效益平衡的目的。另外应该建立针对超标准洪水或者重大工程险情的非常规调度预案,明确在极端情况下为保证大坝安全而必须采取的、可能会牺牲部分下游防护目标的泄洪措施及其决策程序。

3.2 多部门协同演练与预案优化

再好的预案也需要通过演练来检验和优化。应定期组织由防汛指挥机构、气象水文部门、工程管理单位、地方政府、应急力量等多方参加的联合演练。演练要依靠数字孪生技术创建的流域虚拟场景,或者选取历史典型洪水开展复盘推演,主要检验信息沟通机制、调度指令执行效率、部门协同配合、应急措施可行性等。演练结束后要进行系统的评价,发现预案漏洞、协调梗阻、技术短板,然后根据发现的漏洞、梗阻、短板对调度规程、应急预案、协同机制进行迭代更新。该种“演练、评估、优化”的循环,能不断加强防洪调度系统对于真实风险,尤其是小概率高损失极端事件的处理能力。

4 智慧防洪调度管控平台建设

4.1 物联感知与数据融合技术架构

智慧防洪调度管控平台的建设,是从建立完整的感知网络和数据处理系统开始的。在水库、堤防、水文站等关键位置上布置各种智能传感器,利用物联网技术实现了对水位、流量、雨量、工程安全状况等要素的实时、自动化采集。大数据技术是处理大数据量、多源异构数据流的大数据技术,它会对数据进行清洗、集成、存储、挖掘,从中得到体现流域状况和变化规律的信息。这一层是平台运行的感官系统,也是数据燃料,保证了后面分析决策的时候数据全面、准确、及时。

4.2 数字孪生驱动的模拟推演平台

数字孪生技术是形成平台虚拟仿真和决策推演核心能力的上层架构。它利用地理信息系统、建筑信息模型和水动力模型,在数字空间中对地形地貌、水利工程、水流运动、承载体等全

部流域系统进行高精度的重建。虚拟映射体和物理世界的数据保持同步,形成一个动态的虚拟沙盘。核心价值就是可以支持对不同的调度预案、极端天气情景、工程险情进行毫秒级的模拟运算和后果预评估,使决策者能够在实际采取措施之前,在虚拟环境中反复测试、比较、优化方案,大大降低决策风险,提高预案的科学性、可靠性。

4.3 云端智能协同与决策支持系统

平台最终会以云服务的形式提供智能化协同决策支持。根据云计算架构,平台集成了智能预报、方案优化、风险评估、协同会商、应急指挥等主要功能模块,对模型和服务进行集中管理、弹性调用^[3]。它冲破了部门之间信息壁垒,保证所有的参与者依照同一个实时数据和预估情景展开协同工作。人工智能技术深度嵌入各个环节,从提高预报的准确度、智能生成并推荐调度方案、自动识别风险、辅助生成调度指令等各个方面为决策者提供全方位的智能辅助。平台要由原来的信息化展示向智能化分析、辅助和协同决策迈进,实现防洪调度模式的根本性改变。

5 气候变化下的新型风险与调度策略应对

5.1 气候变化引发的防洪调度新挑战

全球气候变化正在对水文气象格局产生重大改变,给传统的防洪调度体系带来了许多新的问题。降水的时空变化增大,短历时极端降雨事件的频率变大,洪峰更尖瘦,有效预见期被压缩。历史水文序列稳定性被打破,使用长期资料推求的设计洪水标准和典型过程线代表性下降。长期趋势如海平面上升,直接对河口区的防潮排涝安全造成威胁。另外,由于气候变暖,“旱涝急转”等复合型灾害风险增大,给水库防洪与蓄水之间精细调度提出更高的要求。这些变化共同指向一个核心问题,即传统的基于平稳性假设的调度理论和方法体系已经不能适应了。

5.2 增强系统韧性的适应性调度策略

为了应对气候变化的不确定性,就要转向具有韧性的适应性调度策略。第一,前瞻性规划,根据气候预估成果重新确定重要工程的设计洪水、防洪标准,给不确定性留有管理余地。其次,发展预见性调度,将季节性气候预测信息融合进来,在汛前动态优化汛限水位控制策略,达到风险前置主动管理的目的。再就是建立动态调整机制,根据最新的观测水文序列来对模型参数进行率定、对调度规则进行评估和修订,使调度体系具有持续学习和进化的能力。最后注重灰色和绿色基础设施的协同,把流域内湿地、蓄滞洪区等自然系统的调蓄功能智能化纳入统一调度。

5.3 构建气候适应型综合防洪体系

应对气候变化风险的最终目的就是建立更具弹性的综合防

洪体系。这就需要对工程规划、调度运行和管理机制等各个方面进行系统的调整。在规划设计阶段,需要把未来气候情景纳入风险评估中,提高关键设施的设防标准及冗余度^[4]。调度运行中要发展可以处理非平稳水文输入、多重不确定性的鲁棒优化模型。在管理机制上要增强跨部门、跨区域的协调联动,健全应对新型极端天气的应急预案,推动把气候变化适应性指标加入防洪绩效的常态化评估体系中,从而系统地提升流域整体的气候韧性。

6 结论与展望

6.1 结论

防洪调度效能的提高关键就是多目标决策理论与风险评估技术的结合。通过建立智能优化模型和决策支持系统,得出防洪和兴利综合方案。覆盖全过程的动态量化评估给决策提供了一个明确风险坐标。创建起同风险联动的自适应调度机制以及协同演练,从而提升系统的韧性。智慧管控平台是实现技术集成的载体。最终形成的是一个感知、模拟、决策、评估的闭环管理流程,全面提高调度管理的科学性、预见性、主动性。

6.2 展望

面向未来发展,需要从理论创新、技术攻关、体系完善三个方面协同推进。理论上要突破非平稳水文情势下的优化决策理论、复杂系统风险评估模型和人机混合智能协同机理。技术攻关要以延长预见期的高精度预报、支持实时推演的高性能计算、兼顾精度和效率的数字孪生体构建为方向。应用体系建设重点在于制定跨行业数据共享、业务协同标准,推进智慧平台实用化普及,把气候适应研究成果制度化地纳入调度规程的动态修订。依靠不断的理论、技术、机制创新,使防洪调度体系由现在的智能驱动、韧性增强的现代化范式根本转变。

[参考文献]

- [1]吕磊.智慧水利在洪水预报和防洪调度中的应用研究[J].水上安全,2025,(13):115-117.
- [2]刘伟宏.数字孪生技术在水库防洪调度过程中的应用[J].山西水利科技,2025,(02):79-80.
- [3]何健,肖尧轩,刘国庆,等.流域防洪“四预”关键技术研究与应用[J].中国水利,2025,(07):14-29.
- [4]宁亚伟,任明磊,张俊彬,等.优化求解器在水库防洪调度中的应用研究[J].中国防汛抗旱,2025,35(03):15-20.

作者简介:

赵志浩(1987--),男,蒙古族,内蒙古人,本科,中级职称,研究方向:水利水电专业。