

水库调洪演算中生态流量约束的动态控制策略

王作涛, 黄余倩

恩施州水文水资源勘测局, 湖北 恩施 445000

DOI:10.61369/WCEST.2025040015

摘 要 : 水库调洪演算是防洪减灾的重要技术手段, 而生态流量保障则是维护河流生态系统健康的基本要求。本文分析在水库调洪演算中考虑生态流量约束的背景与意义, 深入探讨生态流量约束下水库调洪面临的主要问题与挑战, 包括生态需求与防洪目标的矛盾、生态流量时空变化的复杂性、多目标优化决策的技术难度以及监测预报系统的不完善等。在此基础上, 提出基于生态需求的分期分级调度策略、实时优化的动态调整机制、多目标协同的智能决策方法和预报 – 调度 – 反馈的闭环控制体系等动态控制策略, 为实现防洪安全与生态保护的协调发展提供技术支撑。

关 键 词 : 水库调洪; 生态流量; 动态控制; 多目标优化; 智能决策

Dynamic Control Strategies for Ecological Flow Constraints in Reservoir Flood Regulation Calculations

Wang Zuotao, Huang Yuqian

Enshi Prefecture Hydrology and Water Resources Survey Bureau, Enshi, Hubei 445000

Abstract : Reservoir flood regulation calculation is an important technical means for flood control and disaster reduction, while ecological flow guarantee is a basic requirement for maintaining the health of river ecosystems. This paper analyzes the background and significance of considering ecological flow constraints in reservoir flood control calculations, and deeply explores the main problems and challenges faced by reservoir flood control under ecological flow constraints, including the contradiction between ecological demands and flood control targets, the complexity of spatio-temporal variations of ecological flow, the technical difficulty of multi-objective optimization decision-making, and the imperfection of monitoring and forecasting systems. On this basis, dynamic control strategies such as the phased and graded dispatching strategy based on ecological demands, the dynamic adjustment mechanism of real-time optimization, the intelligent decision-making method of multi-objective collaboration, and the closed-loop control system of forecasting – dispatching – feedback are proposed, providing technical support for the coordinated development of flood control safety and ecological protection.

Keywords : reservoir flood regulation; ecological flow; dynamic control; multi-objective optimization; intelligent decision-making

引言

随着生态文明建设的深入推进, 河流生态系统保护日益受到重视, 水库作为重要的水利工程, 在发挥防洪、供水、发电等功能的同时, 也对下游河流生态系统产生显著影响。传统的水库调洪演算主要关注防洪安全, 往往忽视下游生态流量需求, 导致河流生态系统退化, 如何在保障防洪安全的前提下, 满足河流生态流量需求, 实现防洪与生态保护的协调, 已成为水库调度管理面临的重要课题。本文旨在探讨水库调洪演算中生态流量约束的动态控制策略, 通过分析现有问题, 提出科学合理的解决方案, 为水库生态调度提供理论依据和技术支撑。

一、水库调洪演算中考虑生态流量约束的背景与意义

(一) 维护河流生态系统健康的迫切需求

河流生态系统是地球生态系统的重要组成部分, 具有物质循环、能量流动、信息传递等重要功能。水库建设改变河流的自然

水文过程, 使下游河道流量减少、流速降低、水温变化, 严重影响水生生物的栖息环境, 生态流量是维持河流生态系统基本功能的最小流量需求, 保障生态流量对于维护河流生态系统的完整性和稳定性至关重要。在水库调洪演算中充分考虑生态流量约束, 能够有效缓解水库运行对下游生态环境的不利影响, 保护珍稀濒

危物种，维护生物多样性，促进河流生态系统的健康发展^[1]。

（二）实现防洪安全与生态保护的协调发展

防洪安全是水库的首要功能，而生态保护是可持续发展的必然要求，长期以来，水库调度往往将防洪安全置于绝对优先地位。在汛期大量拦蓄洪水，非汛期则尽可能蓄水以满足供水、发电等需求，导致下游生态流量严重不足，在新时期生态文明建设背景下，需要转变传统的单一目标调度模式，建立防洪安全与生态保护相协调的综合调度体系。通过在调洪演算中引入生态流量约束，可以在确保防洪安全的前提下，合理分配水资源，既满足人类社会的防洪需求，又保障河流生态系统的基本需求要求，实现人与自然的和谐共生^[2]。

（三）推动水库调度管理的科学化转型

传统的水库调度管理主要依靠经验判断和简单的调度规则，缺乏对生态需求的系统考虑。随着水资源管理理念的更新和技术手段的进步，水库调度正向着精细化、智能化、生态化的方向发展，在调洪演算中考虑生态流量约束，需要建立更加完善的监测体系、更加精准的预报模型、更加科学的决策方法。这将推动水库调度从粗放式管理向精细化管理转变，从单一目标向多目标协同转变，从静态调度向动态优化转变，通过引入先进的优化算法、智能决策技术等，可以大幅提升水库调度的科学化水平，为现代水利管理提供重要支撑^[3]。

二、生态流量约束下水库调洪面临的问题与挑战

（一）生态流量需求与防洪目标的矛盾冲突

在水库调洪过程中，防洪安全要求尽可能拦蓄洪水，降低下游洪峰流量，而生态流量保障则要求维持一定的下泄流量，两者之间存在根本性的矛盾，特别是在汛期。当上游来水量大、防洪压力高时，如何在确保大坝安全和下游防洪安全的前提下，同时满足生态流量需求，成为调度决策的难题，这种矛盾在极端洪水情况下更加突出，调度人员往往面临两难选择：过度强调生态流量可能威胁防洪安全，而完全忽视生态需求又会造成生态系统的严重破坏。此外，不同利益相关方对防洪安全和生态保护的重视程度不同，也增加协调的复杂性，防洪部门更关注洪水风险的降低，而环保部门则强调生态流量的保障，各方诉求的平衡需要建立更加完善的协调机制和决策体系，这种矛盾还体现在法律责任的双重约束上，防洪失误可能承担刑事责任，而违反生态流量规定同样面临环保问责，使调度决策承受巨大压力^[4]。

（二）生态流量时空变化的复杂性与不确定性

河流生态系统的需水量并非恒定不变，而是随季节、气候、生物生命周期等因素呈现复杂的时空变化特征。不同季节的生态流量需求差异显著，如鱼类产卵期需要特定的流量脉冲，而枯水期则需要维持基本的栖息地水深，这种时变性要求水库调度必须根据生态需求的动态变化进行相应调整，大大增加调度的复杂性。同时，生态流量需求还存在较大的不确定性，受气候变化、人类活动、生态系统演变等多重因素影响，准确预测和量化生态流量需求面临诸多技术挑战，现有的生态水文模型往往难以充分

反映生态系统的复杂响应机制，此外，不同河段的生态特征和保护目标存在差异，需要制定差异化的生态流量标准，这进一步增加调度决策的难度，在缺乏充分科学依据的情况下，如何合理确定生态流量阈值并进行动态调整，成为亟待解决的技术难题^[5]。

（三）多目标优化决策的技术难度

考虑生态流量约束的水库调洪本质上是一个多目标优化问题，需要在防洪安全、生态保护、供水保障、发电效益等多个相互制约的目标之间寻求最优平衡，这类多目标优化问题具有高维性、非线性、动态性等特点。传统的优化方法往往难以有效求解，目标函数的构建面临诸多困难，如何将定性的生态效益转化为可量化的指标，如何确定不同目标的权重系数，都需要深入研究，约束条件的处理也极为复杂，除常规的水量平衡、库容限制等约束外，还需要考虑生态流量的时变约束、水质约束等。求解算法的选择和改进是另一个技术难点，传统的线性规划、动态规划等方法在处理大规模、非线性问题时效率低下，而智能优化算法虽然具有较强的全局搜索能力，但收敛速度和解的质量仍有待提高，实时优化决策的要求进一步增加技术难度，需要在有限的时间内快速生成满意的调度方案^[6]。

（四）实时监测与预报系统的不完善

生态流量约束下的动态调控需要依托完善的监测预报系统，实时掌握水文、气象、生态等多方面信息，然而，目前大多数水库的监测系统仍以水文监测为主，生态监测能力严重不足，水质、水温、溶解氧等生态相关参数的监测站点稀少，监测频率低。难以满足生态调度的精细化需求，生物监测更是薄弱环节，缺乏对鱼类、底栖生物、浮游生物等关键物种的系统监测，无法及时掌握生态系统的动态变化，预报系统的精度和时效性也存在较大差距。现有的水文预报模型主要针对洪水预报，对中长期来水预报和生态需水预报的研究相对滞后，气象预报的不确定性直接影响水文预报的准确性，而生态预报则涉及更多复杂因素，预报难度更大，信息集成和共享机制不健全，水文、气象、生态等部门的数据标准不统一，信息孤岛现象严重，影响综合决策的效率和质量^[7]。

三、水库调洪演算中生态流量约束的动态控制策略

（一）基于生态需求的分期分级调度策略

基于生态需求的分期分级调度策略是实现生态流量动态控制的基础，该策略根据河流生态系统的季节性特征和关键生态过程，将全年划分为不同的生态调度期，并针对各期制定差异化的生态流量标准。在鱼类产卵繁殖期，需要模拟自然洪水脉冲，适当增加下泄流量，创造适宜的产卵环境，在鱼类越冬期，则需要维持稳定的基流，保障越冬栖息地的水深和水温条件，分级调度体现在根据来水情况和防洪形势，将生态流量需求划分为最小、适宜、理想等不同级别，当防洪压力较小时，尽可能满足理想生态流量。当防洪形势严峻时，至少保障最小生态流量，这种分期分级的调度模式既考虑生态系统的时变需求，又兼顾防洪安全的刚性约束，通过建立生态调度期划分标准、生态流量分级体系、

转换条件判别准则等，形成一套完整的调度规则体系，为调度人员提供明确的操作指南，同时，应建立与相邻水库的联合调度机制，实现流域尺度的生态流量协同保障^[8]。

（二）实时优化的动态调整机制

实时优化的动态调整机制是应对不确定性和突发情况的关键手段，该机制基于滚动优化的思想，根据实时监测信息和短期预报结果，不断更新调度方案，建立快速响应的决策模型。当监测到生态指标异常或预报来水发生显著变化时，立即启动优化计算，生成新的调度方案，优化模型采用多时段耦合的方式，既考虑当前时段的调度决策，又预留未来调整的灵活性，引入自适应调整策略，根据历史调度效果和生态响应情况，动态修正模型参数和约束条件，建立多情景分析框架。针对不同的来水情景和生态需求情景，预先制定应对方案，提高决策效率，实施分级响应机制，根据偏离程度的大小，采取不同强度的调整措施，完善信息反馈通道，及时收集下游生态监测数据，评估调度效果，为后续优化提供依据，通过持续的监测-预报-决策-执行-反馈循环，实现调度方案的动态优化和精准控制，此外，还应建立应急调度预案库，针对极端天气事件和生态危机情况制定快速响应方案^[9]。

（三）多目标协同的智能决策方法

多目标协同的智能决策方法是解决复杂优化问题的有效途径，采用先进的多目标进化算法，如NSGA-III、MOEA/D等，能够在高维目标空间中搜索Pareto最优解集，为决策者提供多样化的方案选择。构建综合评价指标体系，将防洪风险、生态效益、经济效益等多维目标统一到可比较的框架下，引入模糊决策理论，处理目标权重的不确定性和决策者偏好的模糊性，开发智能决策支持系统，集成专家知识库、案例推理、机器学习等技术，提高决策的智能化水平，建立人机交互的决策模式，充分发挥人的经验判断和机器的计算能力，采用并行计算和云计算技术，提高大规模优化问题的求解效率。通过深度学习方法，挖掘历史调度数据中的隐含规律，建立调度经验的智能提取和应用机制，整合多源异构数据，包括水文、气象、生态、社会经济等信

息，提供全方位的决策支撑，强化与国际先进技术的交流合作，引进和消化吸收国外成熟的生态调度决策技术和管理经验^[10]。

（四）预报-调度-反馈的闭环控制体系

预报-调度-反馈的闭环控制体系是实现精准调控的制度保障，在预报环节，建立耦合气象-水文-生态的综合预报模型，提高中长期来水预报和生态需水预报的精度。采用集合预报技术，量化预报的不确定性，为风险决策提供概率信息，在调度环节，基于预报信息和实时监测数据，运用优化决策模型生成调度方案，并通过仿真分析评估方案的可行性，建立多部门协同的调度执行机制，确保调度指令的及时准确传达和执行，在反馈环节，构建全方位的效果评估体系，不仅评估防洪效果，更要重点评估生态效果，建立生态响应的快速评估方法，及时发现问题并调整策略，完善信息管理平台，实现数据的自动采集、传输、处理和共享，建立定期会商和应急会商机制。加强各部门之间的沟通协调，通过制度化的闭环管理，不断提升调度水平，实现防洪与生态保护的动态平衡，定期开展第三方评估，客观评价生态流量保障效果，确保闭环控制体系的有效运行。

四、结语

水库调洪演算中考虑生态流量约束是生态文明建设的必然要求，也是水利工程可持续发展的重要方向。通过实施基于生态需求的分期分级调度策略、实时优化的动态调整机制、多目标协同的智能决策方法和预报-调度-反馈的闭环控制体系，可以有效解决生态流量约束下水库调洪面临的技术难题，实现防洪安全与生态保护的协调统一。未来需要进一步加强基础研究，完善技术体系，推动相关标准规范的制定，为生态文明建设和美丽中国建设作出更大贡献，同时，需要加快技术创新和成果转化，积极开展试点示范，总结推广成功经验，各级水利部门应加强能力建设，培养复合型专业人才，建立健全生态流量保障的长效机制，推动形成全社会共同参与的良好格局。

参考文献

[1] 张炳军, 张靖鸿, 来常玉. 水库调洪演算应用解析 [J]. 中国新技术新产品, 2024, (13): 103-105.
[2] 周光涛, 郭龙胜, 丁善玲. 水库调洪演算中水位流量控制泄流方式探讨 [J]. 黑龙江水利科技, 2005, 33(01): 36-37.
[3] 中国长江电力股份有限公司. 一种水文-水动力学耦合的河道型水库调洪演算方法 :CN116542021B[P/OL].2024-08-13[2025-09-12].
[4] 浙江广川工程咨询有限公司. 一种基于闸门精细化控制的调洪演算方法 :CN117314047A[P/OL].2023-12-29[2025-09-12].
[5] 山东黄河河务局山东黄河信息中心. 一种基于水量平衡迭代法的水库调洪演算方法 :CN117669921A[P/OL].2024-03-08[2025-09-12].
[6] 李凤莲. 水库调洪演算分析与标准化管理研究 [J]. 中国水运 (下半月), 2023, 23(11): 85-87.
[7] 单玉芬. 泥河水库汛期划分初步研究 [J]. 黑龙江水利科技, 2021, 49(12): 81-83.
[8] 任怡. 口泉河(朔州段)河道洪水调洪演算计算分析 [J]. 水利技术监督, 2024, (06): 232-235.
[9] 石佳. 基于挡水路基泥沙淤积预测及调洪演算探讨 [J]. 黑龙江水利科技, 2023, 51(12): 135-138.
[10] 李朋, 闫红飞, 吴朱昊. 小型水库调洪演算及日常管养工作研究 [J]. 城市道桥与防洪, 2024, (04): 151-154+10011.