

基于洪水预报的不确定性水库调度优化研究

钱晓娟

大唐甘肃发电有限公司碧口水力发电厂（陇东南分公司），甘肃 陇南 746412

[摘要]洪水是全球面临的主要自然灾害之一，其频发性和不确定性给水库调度带来了巨大挑战。近年来，洪水预报技术的进步为优化调度提供了科学依据，但预报结果不可避免地存在不确定性，这直接影响调度方案的有效性与安全性。研究洪水预报的不确定性及其对调度优化的影响，有助于提升水库调度的综合效能。本篇文章旨在系统分析洪水预报中的不确定性，探讨水库调度优化的理论与方法，并构建适应不确定性的调度优化模型，为实现洪水防控和水资源高效利用提供创新思路。

[关键词]洪水预报；不确定性；水库调度优化；多目标优化；灵活性与鲁棒性

DOI: 10.33142/ucp.v1i6.15202

中图分类号: P456.7

文献标识码: A

Research on Optimization of Reservoir Scheduling with Uncertainty Based on Flood Forecasting

QIAN Xiaojuan

Longdongnan Branch, Bikou Hydropower Plant of Datang Gansu Power Generation Co., Ltd., Longnan, Gansu, 746412, China

Abstract: Floods are one of the major natural disasters facing the world, and their frequent occurrence and uncertainty pose great challenges to reservoir operation. In recent years, the advancement of flood forecasting technology has provided scientific basis for optimizing scheduling, but the forecast results inevitably have uncertainty, which directly affects the effectiveness and safety of scheduling schemes. Studying the uncertainty of flood forecasting and its impact on scheduling optimization can help improve the comprehensive efficiency of reservoir scheduling. This article aims to systematically analyze the uncertainty in flood forecasting, explore the theory and methods of reservoir scheduling optimization, and construct a scheduling optimization model that adapts to uncertainty, providing innovative ideas for achieving flood prevention and control and efficient utilization of water resources.

Keywords: flood forecasting; uncertainty; reservoir scheduling optimization; multi objective optimization; flexibility and robustness

引言

气候变化已经对全球降水模式产生深远影响，降水量的极端波动性及其预测不确定性，成为水资源管理领域亟待解决的问题。水库调度管理，作为保障水资源合理分配、确保生态安全及防灾减灾的重要手段，其效果受降水预报精度与流域变化的显著影响。传统调度方法通常依赖历史数据与经验规则，但在面对复杂气候条件与不确定性因素时，缺乏足够的灵活性与适应性。尽管气象预报技术不断进步，降水预报仍存在很大不确定性，特别是在短期与局部地区的预测中。极端天气事件的频发使得传统水库调度方法在准确性与可靠性上难以满足现代需求。为此，基于不确定性分析的调度优化方法应运而生，这些方法通过量化分析各类不确定性因素，能够为水库调度决策提供更加科学与全面的依据。

1 洪水预报与不确定性分析

1.1 洪水预报概述

洪水预报技术作为水资源管理和洪水防控的重要工具，核心在于模拟降雨、径流等水文要素的变化规律，揭示洪水的演变轨迹，从而为防洪决策提供支持。现代洪水预报方法包括物理模型、统计模型与人工智能模型三种类型。物理模型基于流域的地理特征和水文过程，能够较为准确地反映洪水的生成机制；统计模型则通过历史数据的

分析，寻找变量之间的相关性，进而进行预报；人工智能模型，借助机器学习技术，能够在大数据分析中识别出复杂的模式，并做出高效预测。尽管技术不断革新，现有模型仍受到自然系统复杂性及数据精度的限制，预报结果仍难以实现完全的准确性。

1.2 洪水预报中的不确定性来源

洪水预报中存在多种不确定性，这些不确定性源自于模型结构、参数估计、输入数据的精度以及外部环境的变化。由于模型结构往往依赖于简化假设，它难以完整地模拟水文系统的复杂行为，导致了系统性误差的出现。同时，参数估计的不确定性则与流域特性数据的不足或不准确的假设分布相关^[2]。例如，土壤湿度、植被覆盖、降雨强度等参数的空间差异，可能对预报精度产生重要影响。输入数据的不确定性，特别是在降雨预报中，由于气象模型的局限性，降雨的时空分布误差会导致预报结果的偏差。气候变化、土地利用变化等外部因素，可能对水文过程产生深刻影响，进一步加大了预测的不确定性。

1.3 不确定性分类与量化方法

洪水预报中的不确定性可以从三个层面进行分类：输入数据的不确定性、模型结构与参数的不确定性以及后处理阶段的不确定性。输入数据的不确定性，主要表现为降雨与径流数据的观测误差，尤其是降雨强度与分布的偏差，

对预报结果的准确性影响较大。模型结构的不确定性通常源于对复杂水文过程的简化或关键参数估计的不足,这些简化可能导致模拟结果与实际情况之间存在较大差异。后处理阶段的不确定性,通常指的是对模型输出结果的校正或调整过程中引入的误差,不同的后处理方法可能带来不同的精度。

针对这些不确定性,蒙特卡洛模拟通过随机采样生成大量的预报结果,从而评估系统的不确定性。贝叶斯推断方法通过结合先验信息与观测数据,能够动态调整模型参数,进而减少误差。区间分析则通过设定输入变量的波动范围,推导预报结果的上下限,为不确定性分析提供了直观的量化手段。此外,模糊集合理论及随机有限元分析等方法,近年来在水文领域也得到了广泛应用,为复杂系统中的不确定性建模提供了新的视角。

2 水库调度优化的理论基础

2.1 水库调度的基本原理

水库调度的核心任务是调节库容与出流量,以实现防洪、供水、发电及生态保护等多个目标。优化调度时,必须在满足各项约束条件的基础上,利用洪水预报与水文数据来制定最优策略,从而提升水库的综合效益。调度的关键在于精准控制水量的时空分布,确保各项目标之间的协调与平衡。面对不断变化的水文条件,调度策略需要根据实际情况灵活调整,保障水库的最优运行效率。

2.2 调度优化的目标与约束条件

水库调度优化涉及多个目标,包括防洪、经济效益与生态保护。在防洪方面,调度目标是确保水库具备足够的泄洪能力,以应对极端天气及洪水事件,减少下游风险;经济效益目标侧重于提升水库的发电能力,同时保证调度过程中的安全性;生态保护目标则关注水质与生态流量的保持,避免环境损害。不同目标之间往往存在冲突,因此如何在多重目标中找到平衡是调度优化的关键。库容限制是指水库的最大存水量与最小水位,调度必须确保水位不会超出这一范围;泄洪能力限制要求水库能及时有效排水,防止对下游造成不良影响;下游安全则确保水库调度不引起剧烈的水位波动或流量变化;环境约束要求调度保持一定的生态流量,不破坏水域生态环境。

2.3 经典调度优化方法综述

传统的调度优化方法,如线性规划、动态规划与遗传算法,已在水库调度中得到广泛应用。线性规划适用于约束与目标呈线性关系的情况,能够高效求解简单调度问题,但在面对非线性约束时效果较差。动态规划则擅长处理多阶段决策问题,通过将大问题拆解为子问题逐步求解,适合于一定规模的调度问题。然而,计算量庞大时,动态规划的效率降低,难以应对大规模调度场景。遗传算法通过模拟自然选择过程,可以全局搜索解空间,适应多目标、多约束的调度问题。尽管遗传算法具有较强的适应性,但由于可能陷入局部最优解以及收敛速度较慢,限制了其在

实际应用中的效果。随着多目标优化需求的增加,多目标粒子群优化(MOPSO)算法逐渐成为调度优化的研究重点。MOPSO通过模拟粒子群体的协作与竞争,能够快速找到适应多目标的最优解,尤其在面对复杂约束条件时表现优异。

3 研究方法与技术路线

3.1 洪水预报模型的构建

模型通过降雨径流的模拟,结合气象预报数据与流域特征参数,以准确反映水文过程。反演与校验机制的引入有效改善了模型的预测能力,减少了与实测数据的偏差,从而显著提高了预报精度。为了增强模型对不同地理区域的适应性,采用了分布式建模技术,细化了空间分辨率。该技术提高了模型对区域变化的响应能力,使其在动态水文变化中具备更好的稳定性。为更好地评估不确定性对预报结果的影响,研究采用了蒙特卡洛模拟与贝叶斯推断等统计后处理方法,从而确保了预报结果在不确定环境下的可靠性。

3.2 调度优化模型的设计

模型采用了多目标优化方法,通过平衡不同目标之间的冲突,使得最终结果能有效兼顾各方需求。在防洪与发电目标之外,生态保护目标也被纳入优化过程中,确保了各目标的合理协调^[2]。为了提高模型应对复杂水文条件的能力,采用了多源数据输入与动态参数更新的方式。这一方法使得模型能够迅速响应不同洪水情境下的变化,从而调整调度策略。粒子群优化与非支配排序遗传算法等技术被结合使用,显著提升了模型的计算效率,并有效处理了多目标、多约束的优化问题。动态参数调整机制保证了模型在多变的水文条件下保持灵活性与鲁棒性。该机制使得调度方案具有较强的可操作性,在实际应用中能够保持较高的稳定性与适应性。

3.3 综合研究的技术路线

在数据采集与处理环节,气象与水文数据被整理并进行清洗,以确保数据的准确性与可靠性。模型构建与验证环节中,研究结合理论分析与实际观测数据,验证了模型的精确度。在各种水文条件下,优化后的物理与统计模型展现出较高的适应性及可靠性,证明了其在调度优化中的应用潜力。在不确定性分析与优化阶段,蒙特卡洛方法被用于评估模型的输入与输出不确定性。通过灵敏度分析,揭示了不确定性因素对调度结果的影响,并基于此提出了相应的优化策略,从而提升了模型的适应能力和稳定性。在方案模拟与评估阶段,通过多场景模拟与历史水文数据对调度方案的效果进行全面评估。利用定量评价指标,对各方案的可行性与表现进行了分析,确保了优化方案在实际洪水情况下能够稳定实施。

4 不确定性分析与洪水预报结果评价

4.1 不确定性分析方法

为了量化洪水预报中的不确定性,本研究采用了蒙特卡洛模拟与区间分析相结合的方法。通过引入随机变量,蒙特卡洛模拟生成大量样本,评估不确定性对预报结果的

影响。该方法通过随机抽样产生不同输入数据,计算每次模拟的预报结果,从而揭示输入变化对模型输出的影响,进而为模型优化提供依据。区间分析方法则通过定义输入数据的变化范围来量化模型输出的偏差。该方法特别适用于数据缺失或误差较大的情况,能有效识别预报中的不确定性因素,增强模型的鲁棒性。通过设定输入数据的边界,区间分析为预报提供了可靠的精度范围。结合灵敏度分析,通过计算输入参数对模型输出的影响程度,帮助确定最为关键的输入变量,为优化模型输入提供依据。

4.2 洪水预报结果的偏差与评估

为全面反映模型的预测准确性,本研究采用了平均绝对误差(MAE)、均方误差(RMSE)及纳什效率系数(NSE)等评估指标。平均绝对误差(MAE)衡量预报值与实际值之间的平均差异,值越小,表示模型预报精度越高;均方误差(RMSE)则更加敏感于较大的误差,能够在误差较为显著时提供更加精准的评估;纳什效率系数(NSE)则反映了预测值与实际值的拟合度,值接近1表明模型预测较为准确。在此基础上进行偏差归因分析,有助于调整模型参数,进一步提升预报准确性。

4.3 不确定性对调度结果的敏感性分析

不确定性对水库调度结果的影响是不可忽视的,特别是在复杂的水库调度过程中。为此,本研究模拟了多种情景,评估了输入数据偏差与参数不确定性对调度结果的影响。降水预报的偏差、流域特征变化等不确定性因素,显著影响了调度方案的效果。

假设调度模型的输出 y 受输入参数 x 影响,可以通过以下公式量化不确定性对结果的影响:

$$S_i = \frac{\text{Var}(y_i)}{\sum_{j=1}^n \text{Var}(y_j)}$$

其中, S_i 表示输入参数 x_i 对模型输出 y 的敏感度, $\text{Var}(y_i)$ 是在不同输入条件下输出的方差,表明该输入对模型输出的影响程度。通过比较各个输入参数的敏感度,能够识别出对调度结果影响最大的因素。为了进一步了解不确定性因素的综合影响,还采用了全局敏感性分析方法。该方法能够考虑多个输入变量同时变化时对输出结果的共同作用,提供更加全面的敏感性评估。这一分析不仅帮助识别不同输入数据变化对水库调度效果的影响,还为调度决策提供了重要参考。通过量化不确定性对防洪效果和资源利用效率的影响,研究者能够在面对不同情境时,灵活调整调度策略,确保优化结果的稳定性与可靠性。

5 基于不确定性的水库调度优化

5.1 优化目标与约束条件设定

设定防洪安全最大化、经济效益最大化及生态影响最小化为优化的主要目标。为了平衡这些目标之间的相互冲突,通过加权函数进行表征。防洪安全目标旨在保障水库在极端气候条件下的调节能力,防止洪水泛滥,确保下游

区域的安全;经济效益目标着重于提高水库的发电效率以及资源利用率;而生态影响最小化目标则关注水库操作中的水位波动对生态环境的影响,要求调度方案在保障安全的同时,尽可能减少生态损害。在约束条件方面,考虑到库容变化范围、泄洪流量上限以及下游水位限制等因素,确保水库运行中的安全性与稳定性。

5.2 不确定性条件下的调度模型构建

为有效处理洪水预报结果中的不确定性,本研究构建了基于情景分析的方法的调度模型。模型通过引入随机变量与模糊集合,描述了不确定性对目标函数及约束条件的影响^[3]。随机变量模拟了降水、流域特征等参数的变动,而模糊集合则用于处理那些无法准确量化的环境因素。这种方法显著增强了模型的适应性,使其能够在不同情境下做出灵活调整。在降水预报较为准确时,调度模型能够提供较为精确的决策;而当预报存在较大误差时,模型则倾向于采用更加保守的策略,以减少潜在风险。

5.3 多目标优化算法设计

在多目标优化过程中,结合遗传算法与粒子群优化算法,以提高优化效率与结果质量。遗传算法主要用于全局搜索,粒子群优化则在局部搜索中起到重要作用,二者的结合有效提升了整体性能。通过多次迭代计算,该优化算法能够找到多个目标之间的帕累托最优解集,从而实现各目标间的动态平衡。在优化过程中,启发式搜索技术进一步提升了计算效率,避免了局部最优解的出现。此种优化策略使得在实现防洪安全、经济效益与生态平衡之间的权衡时,能够灵活调整调度方案,保证各目标的综合优化。

5.4 调度方案的灵活性与鲁棒性分析

灵活性分析侧重于评估方案应对不确定性变化的能力,而鲁棒性分析则关注方案在极端条件下的稳定性^[4]。为全面验证调度方案的适应性与稳定性,本研究采用了灵活性与鲁棒性评估方法。通过模拟不同不确定性因素,本研究验证了调度方案在各种环境变化下的表现。灵活性评估表明,调度方案能够快速响应不同情景中的变化;而鲁棒性评估则揭示了方案在极端气候条件下的稳定性,确保了方案在风险防控与资源利用方面的综合表现,保证水库运行的高效与安全。

6 结语

本文提出的基于不确定性分析的水库调度优化方法,通过引入蒙特卡洛模拟与区间分析等技术,结合多目标优化与情景分析,本研究能够有效评估不同不确定性条件下的调度方案,帮助决策者在防洪安全、经济效益与生态影响之间实现优化。尽管如此,仍然存在一些值得进一步探讨的问题,如优化计算效率、增强模型预测精度以及提升数据质量等。未来的研究可以通过结合实时数据与先进的机器学习技术,进一步提升模型的实时性与准确性。随着不确定性分析技术与优化算法的不断完善,基于不确定性

的水库调度方法必将在实际应用中发挥更大的作用,帮助实现更高效、更可持续的水资源管理。

[参考文献]

[1] 李晓英,朱克节,陈端.考虑入库径流和负荷需求不确定性的水库优化调度研究[J].哈尔滨工程大学学报,2024,45(9):1709-1716.

[2] 赵紫谷.径流不确定性下黄河上游梯级水库联合调度研究[D].陕西:西安理工大学,2024.

[3] 许月萍,陆豪楠,于欣廷,等.基于深度学习集合预报的水库闸门防洪优化调度[J].水科学进展,2024,12(18):1-13.

[4] 包蒙香.考虑径流预报不确定性的澄碧河水库发电优化调度研究[D].广西:广西大学,2024.

作者简介:钱晓娟(1993.9—),女,兰州理工大学;电气工程及其自动化,大唐甘肃发电有限公司碧口水力发电厂(陇东南分公司),水库调度,水动助理工程师。