

昭通市水利工程中水库调度优化模型与应用研究

唐春梅

昭通市水利局

DOI:10.12238/hwr.v9i7.6461

[摘要] 本文研究了水利工程中水库调度优化模型与应用,针对水资源短缺和时空分布不均问题,提出基于智能算法的多目标调度模型。文章概述了水库调度的功能与分类、运行特征与约束条件,以及常规调度方法的局限。进而构建了包含目标函数、决策变量和约束条件的优化模型,并探讨了不确定性建模方法。通过引入遗传算法、粒子群优化算法等智能优化算法,有效提升了调度效率与效果。研究结果表明,优化模型能显著提高水资源利用效率,增强调度方案的适应性与灵活性,为水利工程管理提供了有力的技术支撑。

[关键词] 水库调度; 优化模型; 智能算法; 多目标调度; 不确定性分析

中图分类号: TV62+3 **文献标识码:** A

Research on Reservoir Scheduling Optimization Model and Application in Water Conservancy Projects in Zhaotong City

Chunmei Tang

Zhaotong Water Resources Bureau

[Abstract] This article studies the optimization model and application of reservoir scheduling in water conservancy engineering, and proposes a multi-objective scheduling model based on intelligent algorithms to address the problems of water resource shortage and uneven spatial and temporal distribution. The article provides an overview of the functions and classifications of reservoir scheduling, operational characteristics and constraints, as well as the limitations of conventional scheduling methods. Furthermore, an optimization model was constructed that includes the objective function, decision variables, and constraints, and uncertainty modeling methods were explored. By introducing intelligent optimization algorithms such as genetic algorithm and particle swarm optimization, the scheduling efficiency and effectiveness have been effectively improved. The research results indicate that optimizing the model can significantly improve the efficiency of water resource utilization, enhance the adaptability and flexibility of scheduling schemes, and provide strong technical support for water conservancy project management.

[Key words] Reservoir operation; Optimize the model; Intelligent algorithm; Multi-objective scheduling; the uncertainty

引言

云南省昭通市位于金沙江下游,地处乌蒙山集中连片特困区,境内山高谷深,属典型干热河谷气候。区域内水资源总量丰富但时空分布不均,汛期(6-9月)径流量占全年70%以上,而干季(11-4月)缺水率达35%,加之流域内水库调蓄能力不足,导致农业灌溉缺水、城乡供水紧张与金沙江防洪压力并存。以昭通市渔洞水库、黑石罗水库为代表的水利工程,承担着昭鲁坝区80万亩农田灌溉、50万人口供水及下游防洪任务,其调度优化对区域经济社会可持续发展具有重要意义。

1 昭通市水库调度基本理论与方法

1.1 调度功能与分类

防洪调度: 针对金沙江流域汛期暴雨洪水,需在6月前将水库水位降至汛限水位(如渔洞水库汛限水位1956m),预留2.1亿 m^3 调洪库容,保障下游昭通城区及川滇交界河段安全;**兴利调度:** 重点满足昭鲁坝区高原特色农业(苹果、马铃薯种植)灌溉需求,干季需保证每秒5-8 m^3 的灌溉流量,同时兼顾昭阳、鲁甸两区县日均15万吨生活用水;**生态调度:** 针对牛栏江、横江等支流生态退化问题,需维持每秒2-3 m^3 的生态基流,保障干热河谷区河谷植被与鱼类生存。

1.2 运行特征与约束条件

来水特征：受西南季风影响，入库流量呈现“单峰型”年内分配，7-8月峰值可达每秒300-500m³，1-3月枯水期仅每秒10-20m³；工程约束：渔洞水库最大泄流能力每秒800m³，黑石罗水库发电最小流量需维持每秒15m³，且两库下游河道安全泄量分别为每秒500m³和每秒300m³；特殊限制：乌蒙山片区生态脆弱，调度需满足《牛栏江-横江流域水生态保护规划》要求，库区周边2公里范围需控制水位变幅每日不超过0.5m。

1.3 常规调度方法局限

经验调度法：依赖历史洪水频率分析（如20年一遇标准），但2024年昭通“9·07”暴雨导致超50年一遇洪水，传统方法难以应对极端气候事件；图解调度图：基于昭鲁坝区多年平均用水量需求绘制，但2023年干旱期实际用水量超设计值25%，暴露出静态调度图适应性不足问题；时序分析法：对黑石罗水库多年径流序列分析显示，受全球变暖影响，近10年汛期来水较历史均值减少12%，传统统计方法已无法准确预测。

2 水库调度优化模型构建

2.1 模型设计原则与目标

地域适配性：针对干热河谷区蒸发量（年均2300mm）大于降水量（年均850mm）的特点，在目标函数中加入蒸发损失修正项（系数0.03-0.05）；多目标协调：建立防洪与兴利调度权重动态分配机制，汛期（6-9月）防洪权重0.6，兴利0.4；非汛期兴利权重0.7，生态0.3；数据驱动：整合昭通市气象局12个雨量站、水文局8个流量站的实时监测数据，构建入库流量BP神经网络预测模型（均方误差<5%）。

2.2 数学模型建立

数学模型是水库调度优化的核心工具，通常包括目标函数、决策变量和约束条件三个基本要素。目标函数可根据实际需求设定为发电量最大、缺水率最小或综合效益最优等形式；决策变量多为各时段的出库流量或蓄水状态；约束条件涵盖水量平衡方程、水位库容关系、泄流能力限制以及生态基流要求等。常见的建模方法有线性规划、非线性规划、动态规划和随机规划等，其中动态规划适用于具有明显时间序列特征的问题，而随机规划则能更好地应对未来来水不确定性带来的挑战。数学模型的构建需结合具体工程特点，确保其逻辑清晰、结构合理。

2.3 不确定性建模方法

在水库调度过程中，来水变化、用水需求波动等因素往往具有较大的不确定性，这对模型的鲁棒性提出了更高要求。为有效处理这些不确定因素，可采用模糊集理论、区间分析、蒙特卡洛模拟或情景分析等方法进行建模。模糊集理论适用于边界不清晰的约束条件处理，区间分析可用于量化参数波动范围，蒙特卡洛模拟则通过大量随机抽样评估调度方案的风险水平。情景分析法常用于对未来可能发生的典型情况进行预判，帮助决策者制定更具前瞻性的调度策略。引入不确定性建模有助于提高模型的实用性和适应性。

2.4 数据需求与参数设定

优化模型的有效运行依赖于高质量的数据支撑。所需数据

主要包括历史入库流量、气象预报信息、用水需求数据以及水库的基本参数如库容曲线、泄流能力等。在参数设定阶段，需对关键变量进行敏感性分析，筛选出对调度结果影响显著的因素并进行重点校准。模型参数的获取可通过实测资料反演、经验公式估算或优化算法自动率定等方式完成。

3 智能优化算法在水库调度中的应用

3.1 常见智能优化算法简介

智能优化算法是一类模拟自然界生物行为或物理现象的启发式搜索方法，广泛应用于解决复杂的工程优化问题。在水库调度领域，常用的智能优化算法包括遗传算法(GA)、粒子群优化算法(PSO)、差分进化算法(DE)以及人工神经网络(ANN)等。其中，遗传算法通过模拟生物进化过程进行全局搜索，具有较强的寻优能力；粒子群优化算法借鉴鸟群觅食行为，在连续空间中快速收敛；差分进化算法则通过个体之间的差异向量更新种群，适用于多峰函数优化问题；人工神经网络主要用于预测入库流量或辅助决策支持。

3.2 算法适应性分析与改进策略

不同类型的优化问题对算法的适应性提出不同要求。在水库调度中，由于目标函数可能存在多个局部最优解，且变量维度较高，传统数学规划方法容易陷入局部最优。相比之下，智能优化算法具备更强的全局搜索能力。然而，各类算法在收敛速度、稳定性及参数调节方面存在差异。例如，标准遗传算法易出现早熟收敛现象，粒子群算法在后期可能出现“停滞”现象。为提升算法性能，研究者提出了多种改进策略，如引入自适应变异机制、采用动态惯性权重、融合局部搜索策略等。

3.3 算法与模型的耦合机制

将智能优化算法嵌入水库调度模型是实现高效求解的关键环节。通常，算法与模型的耦合方式包括外部调用型和内部集成型两种。外部调用型是指将调度模型作为独立模块，由算法不断调用并反馈结果；内部集成型则是将算法直接嵌入模型代码中，形成一体化系统。在实际应用中，算法负责生成调度方案，模型则用于评估该方案是否满足水量平衡、水位限制等约束条件，并计算目标函数值。为提高运行效率，可在算法中加入可行性判断机制，提前过滤不满足约束的解，减少无效迭代次数。

3.4 算例分析与性能评估

为了验证智能优化算法在水库调度中的实际效果，通常需要设计典型算例进行测试。常见的做法是选择一个或多个代表性水库，基于历史水文数据构建调度模型，并分别采用遗传算法、粒子群算法等进行求解比较。评估指标包括调度总效益、缺水率、最大泄流值、收敛速度及稳定性等。实验结果表明，智能优化算法在应对多目标、多约束调度问题时表现出较强的优势，尤其在极端来水条件下仍能保持较好的调度效果。相比传统经验调度方法，优化后的调度方案在经济效益和风险控制方面均有明显提升。为进一步验证算法的普适性，还可将同一算法应用于不同规模的水库系统，分析其在复杂场景下的适应能力和泛化性能。

4 模型敏感性与不确定性分析

4.1 敏感性分析方法

模型的敏感性分析旨在识别输入参数对输出结果的影响程度,从而判断哪些变量在调度过程中起关键作用。常见的分析方法包括局部敏感性分析和全局敏感性分析。局部分析通常通过固定其他参数、仅改变某一变量来观察模型输出的变化趋势,适用于变量之间相互独立且影响关系明确的情况。全局分析则考虑多个参数同时变化时的综合效应,常用的方法有Sobol法、Morris筛选法和傅里叶幅度灵敏度检验 (FAST)。这些方法能够揭示参数之间的交互作用,有助于优化模型结构并提高预测精度。在水库调度模型中,敏感性分析常用于评估入库流量、用水需求或约束条件变化对调度方案稳定性的影响,为后续参数校准和模型改进提供依据。

4.2 不确定性来源识别

在水库调度建模过程中,不确定性广泛存在于数据输入、模型结构及参数设定等多个环节。主要来源包括历史水文数据的测量误差、未来来水预测的波动性、用水需求的动态变化以及水库运行规则的模糊性等。此外,气象因素如降雨量、蒸发量的不确定性也会间接影响入库流量的估算精度。模型结构方面,不同目标函数的选择、约束条件的设定方式以及算法求解过程中的近似处理,也可能引入一定偏差。识别这些不确定性的具体来源是进行风险评估和模型改进的前提。

4.3 不确定性传播与影响

一旦不确定性被引入模型,它们会通过数学关系在系统内部传播,并最终影响调度结果的可靠性。例如,来水预测误差可能导致蓄放水决策偏离最优路径,进而影响发电效益或供水保障率。同样,用水需求估计过高或过低都会造成资源浪费或短缺风险。为了量化不确定性传播过程,研究中常采用蒙特卡洛模拟、区间分析或概率盒 (p-box) 方法进行风险评估。这些方法通过大量随机抽样或区间估计,生成调度结果的概率分布,帮助决策者理解不同情景下的可能后果。结果显示,在面对较大不确定性时,传统调度模型往往表现出较强的脆弱性,而引入鲁棒优化或模糊规划的调度模型则能有效缓解这种影响,增强系统的适应能力。

4.4 模型稳健性与适用性讨论

模型的稳健性是指其在不同输入条件下保持性能稳定的能力,而适用性则体现为模型在不同工程背景或气候条件下的推

广潜力。稳健性强的调度模型能够在面对数据波动或突发情况时仍提供合理的调度建议,减少决策失误带来的损失。提升模型稳健性的手段包括引入多情景分析框架、构建鲁棒优化模型或采用自适应调度策略。在适用性方面,可通过将模型应用于不同流域或水库类型进行验证,观察其在不同地形、气候和水资源配置条件下的表现差异。实验表明,结构合理、参数灵活的调度模型在多种环境下均能保持较好的性能,尤其在结合智能优化算法后,其适应性和计算效率进一步提升。

5 结论

本研究围绕水利工程中水库调度优化问题,系统构建了多目标调度模型,并引入智能优化算法提升求解效率与调度效果。通过理论分析、模型构建与算例验证,研究表明,优化调度模型能够有效协调防洪、供水、发电等多重目标,显著提高水资源利用效率。相比传统经验调度方法,优化模型在应对不同来水情景时展现出更强的适应性与灵活性,尤其在极端干旱或洪水条件下具有更好的风险控制能力。总体来看,基于智能优化算法的调度模型不仅提升了计算效率,还增强了调度方案的稳定性与实用性,为现代水利工程管理提供了有力的技术支撑。未来研究可结合实时数据更新与人工智能预测技术,进一步提升调度系统的智能化水平与应用广度。

[参考文献]

- [1]朱绍剑,饶庆阳,杨静.水库优化调度模型对流域内水资源的规划管理研究[J].水利科技与经济,2025,31(06):80-85.
- [2]蔡金贝.水利工程水库运行调度的智能化方法与实践[J].水上安全,2025,(05):193-195.
- [3]简治中.贵州省油哈水库防洪调度方案分析[J].陕西水利,2025,(02):178-180+184.
- [4]李勇.基于动态规划的水库优化调度模型构建与性能测试 [J].中国新技术新产品,2025,(03):89-91.
- [5]曹顺亚,李月华,裴志方,等.数字孪生技术在水利水电工程中的应用[C]//河海大学,浙江水利水电学院,河北工程大学,浙江省水利学会.2024(第三届)城市水利与洪涝防治学术研讨会论文集.黄河建工集团有限公司;黄河水文勘察测绘局,2024:12-22.

作者简介:

唐春梅(1983--),女,拉祜族,云南澜沧人,本科,工程师,研究方向:水利工程中水库调度优化模型与应用。