

基于流量预测的水利水电工程调度优化技术研究

龚小虎

江西省吉安建设开发有限公司 江西南昌 330000

【摘要】 水利水电工程调度优化是确保水资源高效利用的关键环节。研究采用机器学习方法对流量进行预测，结合多目标优化算法构建调度模型。通过对某流域内大型水电站的实际运行数据进行分析，建立了基于长短期记忆网络（LSTM）的流量预测模型。实验结果表明，该模型在短期和中期预测方面均具有较高精度。基于预测结果，采用改进粒子群算法对水库群联合调度进行优化，在发电效益、防洪安全和生态需水三个目标上取得了显著效果。研究显示，相比传统调度方案，该方法能够有效提升发电效益，同时确保防洪安全和下游生态用水需求。

【关键词】 流量预测；水电工程；调度优化；机器学习；多目标优化

引言：

水利水电工程调度是一项复杂的系统工程，涉及防洪、发电、供水等多个目标。随着气候变化加剧，水文情势日趋复杂，传统的调度方法已难以满足现代水利水电工程的需求。流量预测作为调度决策的重要依据，其准确性直接影响调度方案的可行性和经济性。近年来，人工智能技术的快速发展为流量预测提供了新的技术手段，深度学习算法在时间序列预测方面表现出显著优势。同时，多目标优化理论的发展为解决水利水电工程调度中的矛盾提供了有效工具。如何将流量预测与调度优化有机结合，实现水利水电工程的智能化调度，是当前研究的重点方向。

1 流量预测模型构建

1.1 水文数据预处理技术

水文数据预处理对提升预测精度具有重要意义。针对原始水文数据中存在的噪声、缺失值和异常值问题，采用小波变换方法对数据进行降噪处理，有效消除随机波动对预测的影响。对于缺失数据，结合时间序列插值和空间相关性分析进行数据修复，保证了数据的连续性和可靠性。

异常值识别采用基于统计和机器学习的混合方法，通过构建置信区间和密度聚类算法实现异常数据的自动检测与剔除。数据标准化处理采用Z-score方法，将不同量纲的水文指标统一到相同尺度，为后续建模奠定基础^[1]。

1.2 LSTM神经网络模型设计

LSTM神经网络模型通过引入记忆单元和门控机制，能够有效捕捉水文时间序列的长期依赖关系。模型结构包含输入层、LSTM层、全连接层和输出层，如图1所示。输入层接收经过预处理的水文数据，包括流量、降雨量和气温等特征；LSTM层由多个记忆单元组成，每个单元包含输入门、遗忘门和输出门，控制信息的存储和传递；全连接层对LSTM层输出进行非线性变换；输出层生成预测结果。（见图1）

1.3 模型参数优化与性能评价

参数优化过程采用改进的Adam优化算法，通过动态调整学习率提高模型收敛速度。网络结构优化包括LSTM层数、神经元数量和dropout比例的确定，通过网格搜索方法寻找最优参数组合。损失函数选用均方误差和平均绝对百分比误差的加权组合，既考虑预测值与真实值的绝对误

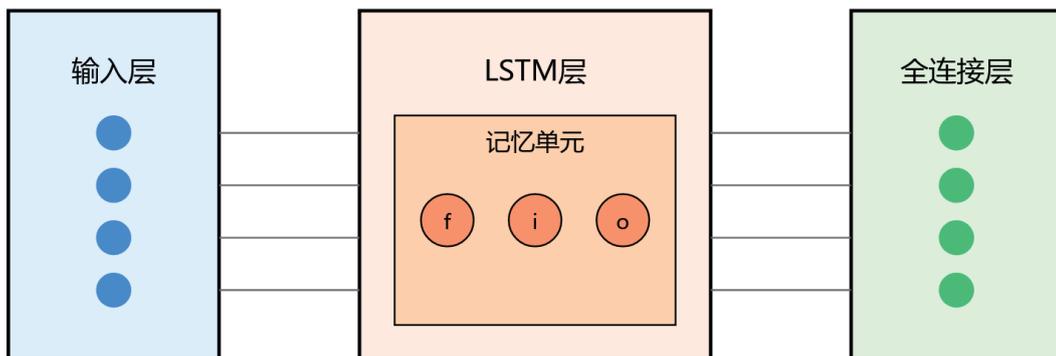


图1 LSTM神经网络模型结构图

差,又关注相对误差的影响。模型性能评价指标包括决定系数、Nash-Sutcliffe效率系数和均方根误差,从多个角度对预测效果进行量化评估。参数敏感性分析采用正交试验方法,识别对模型性能影响显著的关键参数,并建立参数间的交互作用关系图。模型稳定性评价通过蒙特卡洛模拟方法,对模型在不同初始条件下的预测能力进行统计分析,确保模型具有良好的泛化性能^[2]。

1.4 多时间尺度预测方法研究

多时间尺度预测方法基于滑动时间窗口技术,实现对不同预测时长的自适应建模。短期预测采用固定时间步长的递归策略,中长期预测引入时间分解技术,将预测序列分解为趋势项、周期项和随机项。预测过程中融入气象数值模式预报信息,提高预测的前瞻性。针对不同时间尺度预测结果的一致性问题,设计了基于动态规划的预测结果协调方法,确保各时间尺度预测结果的连贯性和物理合理性。时间尺度转换过程中引入小波变换技术,实现多尺度特征的提取与重构,增强预测模型对水文过程多尺度变化特征的刻画能力。预测结果的不确定性分析采用集合预报方法,通过构建多个预测模型的组合,提供概率化的预测信息,为调度决策提供更全面的支持。

2 调度优化模型设计

2.1 多目标优化问题描述

水利水电工程调度优化涉及发电效益最大化、防洪安全保障和生态环境保护三个主要目标。发电效益最大化目标考虑水库水头、机组出力特性和电网负荷需求,追求年发电量最大值。防洪安全保障目标要求水库水位在汛期满足防洪限制水位要求,并预留足够的防洪库容应对洪水过程。生态环境保护目标包括下游河道生态基流量保障、水质维持和水生生态系统保护。三个目标之间存在冲突关系:提高发电效益往往需要较高水位运行,而防洪要求水位降低;生态基流量的持续供给可能影响发电效益。多目标优化问题通过建立综合评价指标体系,实现各目标的量化与权衡。

2.2 约束条件分析

水利水电工程调度优化的约束条件包含物理约束、运行约束和管理约束三类。物理约束涉及水量平衡方程、水力联系方程和水库特性曲线,反映系统运行的基本规律。运行约束包括机组出力限制、水轮机流量限制、水库水位限制和泄流能力限制,确保水电站安全稳定运行。管理约束包括防洪控制水位要求、生态基流量要求和电网调峰要求,体现工程管理规程和社会责任。约束条件的数学描述采用等式约束和不等式约束相结合的形式,构建完整的约

束方程组,保证优化结果的可行性^[3]。

2.3 目标函数构建

目标函数构建采用分层加权法,将发电效益、防洪效益和生态效益统一到经济效益评价体系中。发电效益函数基于机组出力特性和电价体系,考虑峰谷电价差异,计算年度发电收益。防洪效益函数基于风险分析方法,将防洪库容与洪水风险损失建立映射关系,量化防洪调度效益。生态效益函数通过生态服务价值评估方法,将下游用水需求满足程度、水质改善效果和生态系统服务功能转化为经济价值。目标函数权重系数通过层次分析法确定,反映决策者对不同目标的重视程度,实现多目标的有效权衡。

2.4 改进粒子群算法设计

针对水利水电工程调度优化问题的特点,对标准粒子群算法进行改进。算法采用自适应惯性权重策略,根据种群多样性动态调整惯性权重,增强算法的全局搜索能力。学习因子采用非线性变化策略,在优化初期侧重全局探索,后期加强局部开发。位置更新过程引入变异算子,通过随机扰动避免陷入局部最优。约束处理采用可行解修复机制,将不可行解映射到可行域边界。种群初始化采用混合策略,结合经验调度规则和随机采样,提高初始解的质量。算法收敛准则综合考虑迭代次数和改善幅度,确保优化结果的可靠性。

3 联合调度策略研究

3.1 水库群协同运行机制

水库群协同运行机制基于梯级水库群系统特性,构建了水量、水位和发电量的协同关系模型。上游水库承担防洪调控和水量调节功能,通过控制下泄流量影响下游水库运行状态。中游水库发挥调峰补枯作用,平衡上下游水量差异,保障发电效益。下游水库侧重防洪和供水任务,通过合理调控水位满足下游用水需求。水库间的水力联系通过水流传播时间和汇流关系建立,实现流域尺度的水量平衡。协同运行过程中,各水库根据自身特性和任务定位,采用差异化调控策略,形成优势互补的运行格局。水库群联合调度考虑各水库调节性能和任务差异,建立分级分类的协同机制,实现水资源的优化配置和流域整体效益的最大化^[4]。

3.2 分层递进式调度方法

分层递进式调度方法将水库群联合调度问题分解为年、月、日三个时间尺度的子问题。年调度层面重点解决水库群年内水量分配问题,基于长期流量预测成果,制定年度控制水位过程和水量调度计划。月调度层面围绕发电任务分配和防洪库容预留展开,通过滚动预报方式动态调整月

度运行方案。日调度层面针对机组启停方案和泄流流量进行优化,实现电网调峰需求和水量平衡要求。各层级调度方案通过约束衔接和目标协调实现一致性,上层调度结果为下层提供边界条件,下层调度结果反作用于上层方案修正,形成完整的分层递进调度体系。

3.3 调度规则制定

调度规则制定过程中综合考虑水库群运行特性、任务需求和管理要求,形成标准化的调度规则体系。汛期调度规则以防洪安全为核心,规定了防洪限制水位、汛限水位控制原则和泄洪规则,明确各水库防洪任务分工。非汛期调度规则围绕发电效益和供水安全展开,确定了水库水位控制范围、机组出力分配方案和生态基流泄放要求。特殊时期调度规则针对枯水期、冰期和水质突发事件制定专门的应对措施,保障水库群安全稳定运行。调度规则体系通过定性要求和定量指标相结合的方式,实现对水库群运行过程的全面约束和指导。

3.4 应急调度响应机制

应急调度响应机制围绕突发性水文事件、设备故障和供水危机等紧急情况建立,形成快速响应和科学处置的调度体系。针对特大洪水过程,制定了分级预警指标和响应预案,明确超标准洪水情况下的水库群联合调度策略。设备故障应急处置方案规定了机组故障、泄水建筑物损坏等情况下的备用方案,确保系统可靠运行。供水危机应对措施包括水质污染、供水管网故障等突发事件的处置流程,保障供水安全。应急响应过程设置了分级决策机制,建立了信息报送、方案制定和指令下达的标准流程,实现对突发事件的及时有效处置^[5]。

4 实验验证与分析

4.1 实验场景设计

基于某流域内三座梯级水电站的实际运行数据进行验证分析,选取2020-2023年连续四年的水文、气象和运行数据作为基础数据集。水电站装机容量分别为80万千瓦、120万千瓦和150万千瓦,具有年调节性能。验证场景包含丰水年、平水年和枯水年三种典型水文情势,重点关注汛期防洪调度、枯期发电调度和过渡期多目标协调运行等关键时段。模拟场景设置考虑了来水特征、电网负荷特性和生态需水规律的季节性变化,并针对极端水文事件设置了专门的验证场景。

4.2 预测精度分析

流量预测精度评价采用均方根误差、平均绝对百分比误差和Nash-Sutcliffe效率系数三个指标。预测时段分为24小时、7天和15天三个尺度,分别代表短期、中期和长期预测。模型在不同时间尺度上表现出差异化的预测性能,短期预测结果更为精准,中长期预测受累积误差影响呈现精度递减趋势。模型对

丰水期流量变化的捕捉能力强于枯水期,对突发性涨落水过程的预测效果需要通过引入额外的气象信息加以改善。

4.3 调度方案对比

将优化调度方案与传统经验调度方案进行对比分析,从水资源利用效率、发电效益和防洪安全三个维度评估方案优劣。优化方案在水量分配上更为合理,充分发挥了梯级水库的调节能力,提高了水能利用率。发电方面,通过精确控制水位过程和优化机组运行方式,实现了更高的发电效益。防洪调度过程中,优化方案能够提前预留防洪库容,并通过水库群联合调控降低防洪压力。生态环境保护方面,持续稳定地满足了下游最小生态流量要求。

4.4 经济效益评估

经济效益评估采用综合效益评价方法,将发电效益、防洪效益和生态效益统一到经济价值评估体系中。发电效益计算考虑了电价时段差异和机组效率变化,精确核算年度发电收益。防洪效益评估基于防洪风险分析,将洪水灾害损失降低程度转化为经济价值。生态效益评价采用生态系统服务价值法,量化水质改善、生态用水保障和生态系统维护的经济价值。通过货币化指标对比分析方案实施前后的综合效益变化,验证优化调度方案的经济可行性。

结语

通过对流量预测和调度优化技术的深入研究,成功构建了一套完整的水利水电工程智能调度系统。研究成果表明,基于深度学习的流量预测模型能够有效捕捉水文变化特征,为调度决策提供可靠依据。多目标优化算法在平衡各项调度目标方面展现出良好性能,实现了防洪、发电和生态效益的协调统一。该研究对提升水利水电工程调度水平具有重要的理论意义和实用价值,研究成果可推广应用于类似工程实践。未来研究将进一步探索极端天气条件下的调度策略优化,提高系统应对突发事件的能力。

参考文献:

- [1] 张丽娜. 禹门口水利工程北干线优化调度方式研究[D]. 太原理工大学, 2023.
- [2] 林化莲. 复杂河网联合优化调度在水利工程中的应用[J]. 珠江水运, 2022, (01): 66-67.
- [3] 马合木提·阿木提. 安全监测系统在水利工程运行中的应用[J]. 河南水利与南水北调, 2022, 51(06): 100-102.
- [4] 谭文斌. 水利工程中的联合优化调度复杂河网[J]. 科技风, 2017, (25): 158.
- [5] 芮钧, 华涛, 刘帅. 大规模水电站群短期发电优化调度算法改进[J]. 水电能源科学, 2017, 35(11): 55-58+54.