

水文预报模型在防洪调度中的应用改进

乌日汉

通辽市水利规划设计研究院有限公司 内蒙古通辽 028000

摘要: 水文预报模型是防洪调度的核心支撑,其精度与效率直接影响防洪决策科学性,传统模型在复杂水文条件下存在预报偏差大、响应滞后等问题,难以满足精细化调度需求,本文分析主流水文预报模型的类型及原理,探讨其在防洪调度中的应用现状,剖析应用中的技术瓶颈,并提出针对性改进策略。研究显示,通过模型结构优化、数据融合技术应用以及与调度机制的协同改进,可显著提升预报可靠性,增强对极端洪水事件的应对能力,为防洪调度提供更精准的技术支持,对降低洪涝灾害损失具有重要实践价值。

关键词: 水文预报模型; 防洪调度; 应用改进; 模型优化; 数据融合

引言

防洪调度依赖水文预报掌握洪水规律,通过模型模拟水文过程辅助决策。极端天气使水文条件复杂化,传统模型精度不足,导致调度方案缺乏针对性。洪涝灾害是我国的主要自然灾害之一,在我国的防洪减灾体系中,中小流域是薄弱环节。洪水预报和防洪调度是防洪减灾的重要非工程措施,前者对洪水过程进行预报,后者通过对流域内的水库、闸坝等水利工程的调度,达到防洪减灾的目的。我国很早就开始了中小流域防洪重点治理工作,但目前仍然存在两个瓶颈,一是洪水预报方案不完善,二是中小水库的防洪调度不科学。研究水文预报模型的应用改进,对提升防洪调度时效性与精准性、减少洪涝灾害损失意义重大,可为构建科学高效防洪体系提供支撑,助力流域水资源安全管理。

一、水文预报模型的类型与技术原理

(一) 主流水文预报模型的类型

水文预报模型按构建原理分为概念性模型、物理分布式模型、数据驱动模型三类,概念性模型基于水文循环经验规律,通过简化水文过程建立数学关系,新安江模型以蓄满产流为核心,将流域划分为不同水源单元模拟产流与汇流过程;水箱模型把流域比作串联水箱,通过水箱蓄水与泄流模拟径流变化,物理分布式模型基于水动力学原理,考虑流域下垫面空间异质性,SWAT模型将流域划分为子流域与水文响应单元,模拟每个单元的降水截留、土壤入渗、地表径流等过程。数据驱动模型依赖历史水文数据,通过机器学习算法挖掘数据规律,如神经网络模型利用多层神经元非线性映射

能力,建立降水与径流的映射关系;支持向量机模型通过核函数处理非线性数据,实现小样本条件下的精准预测。

(二) 水文预报模型的技术原理

水文预报模型核心是模拟水文循环过程,实现洪水要素定量预测,概念性模型通过概化水文过程,选取关键参数建立降水与径流经验公式,忽略次要过程简化计算,物理分布式模型基于质量与能量守恒定律,构建水流运动方程,圣维南方程组描述河道洪水演进,结合土壤水动力学方程模拟坡面产流,通过空间离散化将流域分解为网格单元,逐单元计算水文变量。数据驱动模型无需明确物理机制,通过训练算法从历史数据中学习输入输出关联模式,利用样本优化参数,随机森林模型通过多棵决策树集成学习,降低单一模型预测偏差,实现复杂水文过程拟合。

二、水文预报模型在防洪调度中的应用现状

(一) 洪水要素预测应用

水文预报模型于洪水要素预测里,主要是对降水、洪峰流量、洪量、水位等关键指标开展预报,降水预报依靠模型对大气环流和水汽输送加以模拟,对未来时段的降水量及其空间分布作出预测,给判断洪水来源提供依据,该结果能辅助判断流域性洪水形成的可能性,洪峰流量与洪量预报借助对产流和汇流过程进行模拟,对流域出口断面的流量峰值及总量予以预测,明确洪水的规模,为确定防洪工程启用的规模提供参考,水位预报将河道地形和水流演进模型相结合,对各控制断面的水位变化过程进行预测,确定洪水的淹没范围,为低洼地区群众转移提供时间窗口^[1]。这些预测结果为防洪调度

提供基础数据,对水库泄洪调度、堤防巡查等措施的制定起到支撑作用。

(二) 调度方案生成应用

模型预测结果为调度方案生成提供量化支撑,通过模拟不同调度情景下的洪水演进过程,对方案的防洪效果展开对比分析,针对水库群调度场景,模型能够预测不同泄流组合给下游河道带来的影响,进而筛选出既可以保障水库安全,又能减轻下游防洪压力的方案,实现上下游防洪需求的平衡,就堤防系统而言,模型结合水位预报成果,对不同堤防段的防洪风险进行评估,从而生成具有针对性的加固与巡查方案,明确重点防护区域和时段,为人力物资的精准投放提供指导。模型还可对分洪、滞洪等措施的效果进行模拟,分析分洪量与淹没损失之间的关系,为应急调度决策提供参考,确保调度方案具备科学性与可行性。

(三) 实时调度动态调整应用

在实时防洪调度当中,水文预报模型借助滚动更新数据实施动态预测,为调度方案的及时调整提供支撑,实际降水和预报出现偏差时,模型能够迅速重新计算产流与汇流过程,结合最新的雨情信息对洪水预测结果进行修正,防止因初始预报误差而造成调度失当,确保调度措施与洪水实际强度相匹配。模型结合流域内水利工程的实时运行状态,对调整后的洪水演进趋势进行模拟,分析不同调度措施对洪水传播时间、峰值产生的影响,评估现有调度方案的适应性,为决策者提供诸如是否加大泄量、启用备用分洪区等调整建议,通过实时反馈与快速迭代,让调度措施更符合实际洪水态势,在保障工程安全的基础上最大程度发挥防洪效益,提升调度的灵活性和时效性。

(四) 风险评估与预警应用

模型通过耦合洪水预测与风险评估模块,实现防洪风险的量化评估及预警,基于洪水要素预报结果,结合流域内社会经济数据,人口分布、基础设施位置、经济产值密度等,模型计算不同区域的淹没概率和损失程度,划分风险等级,明确高风险区域的分布范围及影响人群。依据风险等级生成预警信息,按风险程度区分响应级别,明确预警范围和应急措施,人员转移路线、物资调配清单等,为提前转移群众、调配应急资源提供精准指引,提升应急响应的针对性和效率,风险评估结果还能用于检验调度方案的风险控制效果,对比不同方案实施后的风险降低幅度,识别方案中的薄弱环节,推动方案持续优化,形成风险防控的闭环管理。

三、水文预报模型应用中存在的关键问题

(一) 模型结构适应性不足

现有模型结构对复杂水文条件的适应能力存在局限,概念性模型由于对物理过程进行简化,在流域下垫面出现显著变化,城市化、植被破坏等情况时,预先设定的参数与实际水文规律脱节,进而造成预报偏差,无法准确反映下垫面改变后的产汇流特性。物理分布式模型虽然考虑了空间异质性,对参数的敏感性较高,参数率定过程较为复杂,在资料匮乏的流域难以进行精准设置,容易出现模拟失真的情况,尤其在地形复杂的区域误差更为突出,数据驱动模型依赖于历史数据的分布,当实际水文过程超出样本覆盖范围时,模型的外推能力不足,导致预测结果的可靠性下降,难以支撑极端洪水事件的调度决策^[2]。

(二) 数据获取与处理局限

数据质量对模型精度产生直接影响,当前数据获取存在时空覆盖不足的问题,偏远流域雨量站布设较为稀疏,难以捕捉降水的空间变异情况,山区地形引发的局部强降水容易被遗漏,进而造成面降水量计算出现偏差;部分水文站设备老化,传感器灵敏度降低,使得监测数据存在误差或缺失现象,原始数据未经系统校验就输入模型,对模型输入的准确性产生影响。数据处理环节面临融合难题,水文数据、气象数据、地理数据的格式不同、精度各异,其中水文数据主要是时序序列,气象数据包含空间网格信息,地理数据多为矢量格式,传统处理方法难以实现多源数据的有效整合,缺失数据填补方法单一,仅依靠简单插值法无法反映数据的内在关联,导致模型输入信息不完整,不能充分反映流域水文特性,进而对预测准确性造成影响。

(三) 预报时效性滞后

物理分布式模型计算过程复杂,需消耗大量算力,模拟大流域洪水演进时处理海量地形与水文参数,耗时较长,难以满足实时调度时间要求,可能错过最佳调度时机,概念性模型计算快速,对洪水陡涨陡落过程响应滞后,参数调整依赖人工经验,缺乏动态反馈机制,无法及时更新预报结果,导致突发性洪水预报滞后。数据驱动模型训练与迭代需一定时间,洪水突发时模型参数调整受数据传输延迟限制,无法同步匹配洪水演进节奏,预报更新滞后于实际洪水变化,影响调度措施及时性。

(四) 与调度机制协同不足

预报结果表达方式与调度需求不匹配,模型输出的水文要素数据未转化为直观调度建议,缺乏不同防洪场

景优先级排序, 决策者需耗费时间解读数据, 增加决策难度^[3]。模型未充分考虑水利工程调度规则, 水库泄流能力曲线、堤防警戒水位, 参数设置未关联工程实际运行阈值, 未纳入工程检修期等约束条件, 导致预测结果与实际调度场景存在偏差, 模拟的调度效果与工程实际能力不符, 模型预报周期与调度决策周期不同步, 未建立动态响应衔接机制, 难以支撑滚动式调度方案动态调整, 影响调度决策连贯性。

四、水文预报模型在防洪调度中的应用改进策略

(一) 模型结构的优化升级

复杂下垫面流域采用概念性模型与物理分布式模型耦合方式, 保留概念性模型计算效率, 融入物理模型分布式特征, 通过设置动态权重系数调节两者贡献比例, 提升对空间异质性适应能力, 更好反映下垫面变化对水文过程影响。数据驱动模型引入迁移学习算法, 构建流域特征相似度评估体系, 利用相似流域数据增强模型外推能力, 减少对本地样本依赖, 提升对罕见洪水事件预测能力, 简化高维度模型冗余参数, 通过敏感性分析筛选关键参数, 采用参数本地化率定方法, 在保证精度前提下提高计算效率, 使模型更适应实时预报需求。

(二) 数据融合技术的深度应用

构建多源数据协同采集网络, 加密偏远区域监测站点, 推广卫星遥感、雷达测雨等技术, 建立天地空一体化观测体系, 弥补地面观测不足, 实现降水、水文、地理数据全方位获取, 提升数据时空覆盖度^[4]。建立标准化数据处理平台, 统一数据格式与精度标准, 开发跨源数据转换接口, 采用数据同化技术融合不同来源数据, 将雷达降水数据与雨量站数据同化, 修正降水空间分布误差; 通过机器学习算法识别并修复缺失数据, 结合流域水文规律优化填补逻辑, 提升数据完整性, 确保模型输入可靠性, 利用云计算技术存储与处理海量数据, 搭建弹性计算资源池, 为模型提供高质量输入, 支撑模型高效运行。

(三) 预报效率与精度的提升

引入并行计算技术优化模型运行效率, 基于流域自然分区将其划分为多个计算单元并行处理, 通过负载均衡算法分配计算任务, 缩短物理分布式模型模拟时间; 对数据驱动模型进行轻量化处理, 采用模型剪枝技术简化网络结构, 减少计算资源消耗, 提升实时响应速度。采用误差修正机制提高预报精度, 建立模型预报误差数据库, 按洪水类型与季节特征分类存储误差信息, 通过

统计分析识别误差规律, 在新的预报过程中引入修正因子, 降低系统性误差; 结合实时监测数据动态调整模型参数, 利用最新水位数据更新河道糙率, 通过卡尔曼滤波算法实现参数自适应修正, 减少洪水演进预测偏差, 使预报结果更接近实际。

(四) 与调度机制的协同改进

建立模型与调度决策衔接机制, 开发调度方案生成模块, 将模型输出转化为可视化调度方案, 生成洪水风险热力图、工程调度曲线, 标注关键调度节点与阈值, 直观呈现预报结果对调度的影响, 降低决策难度^[5]。在模型中嵌入水利工程约束条件, 如水库泄流能力曲线、堤防警戒水位, 关联工程实时运行状态数据, 动态更新约束边界, 使预测结果更贴合实际调度场景, 确保模拟方案可操作性, 协调模型预报周期与调度决策周期, 采用滚动预报模式, 根据洪水演进速度动态调整预报更新间隔, 与调度决策时间节点同步, 建立预报-决策-反馈闭环, 支撑调度方案动态优化, 使调度措施始终与洪水演进态势适应。

结语

借助模型结构优化、数据融合技术运用、预报效率与精度提高以及与调度机制的协同改进, 能够突破传统模型的技术局限, 增强对复杂水文过程的模拟能力, 改进后的模型更可精确地模拟复杂水文过程, 为防洪调度提供及时可靠的决策支撑, 提升应对洪涝灾害的能力。未来需要持续深化模型与新兴技术的融合, 推动防洪调度朝着智能化、精细化方向发展, 为构建韧性防洪体系、有效应对洪涝灾害提供有力保障, 促进流域防洪安全与可持续发展。

参考文献

- [1] 张丽妍. 耦合预报信息的碧流河水库防洪调度研究[D]. 大连理工大学, 2024.
- [2] 杨晨. 中小流域防洪预报调度方法研究[D]. 大连理工大学, 2023.
- [3] 魏超群. 水库实时防洪预报调度全过程风险分析[D]. 大连理工大学, 2022.
- [4] 刘宝库. 岗南~黄壁庄水库群防洪预报调度研究[D]. 大连理工大学, 2022.
- [5] 查港. 长江上游大规模水库群联合防洪调度研究与应用[D]. 华中科技大学, 2021.