

流域超标准洪水智能调控架构设计 与关键技术研究

吴 蕾,段雅楠,刘 萍,齐非凡,赵永超

(江苏省水利工程科技咨询股份有限公司,江苏 南京 210029)

摘要:流域超标准洪水因其灾变机理的复杂性、高致灾风险及广泛影响区域,对社会经济的平稳发展构成了严峻威胁,在这一背景下现有的流域防洪工程体系急需融入前沿技术,构建一套与之匹配的洪水智能调控技术支撑系统。文章通过分析流域超标准洪水的特性,提出了扩展洪水数据库、研发多工程联合调度规则库及注重智能调控反馈性等新需求,结合我国洪水灾害频发且严重的现状,提出基于Agent系统(MAS)理论的智能调控架构设计,包括接口层、应用层和支持层三层结构,旨在通过高精度预警预报、多工程联合调度及效果评估,实现流域超标准洪水的全面智能调控。同时以精细化预报模型、多工程联合调度技术及智能决策支持系统的研究,为提高流域超标准洪水智能调控水平提供了理论支持和技术指导。

关键词:流域超标准洪水;智能调控;架构设计;技术

中图分类号:P338

文献标识码:B

文章编号:1007-7839(2024)12-0056-0005

Research on the design and key technologies of intelligent flood control architecture for watershed over-standard flood

WU Lei, DUAN Yannan, LIU Ping, QI Feifan, ZHAO Yongchao

(Jiangsu Water Conservancy Engineering Technology Consulting Co., Ltd., Nanjing 210029, China)

Abstract: Due to the complexity of the catastrophe mechanism, high disaster risk and extensive impact area, the over-standard flood in the basin poses a severe threat to the stable development of social economy. Against this background, the existing basin flood control engineering system urgently needs to incorporate cutting-edge technologies to build a matching intelligent flood regulation and control technical support system. The article analyzes the characteristics of basin over-standard floods and proposes new requirements such as expanding the flood database, developing a joint scheduling rule base for multiple projects, and emphasizing the feedback of intelligent regulation and control. Combined with the frequent and serious situation of flood disasters in China, this paper proposes an intelligent control architecture design based on the Agent System (MAS) theory, including a three-layer structure of interface layer, application layer and support layer, aiming to realize the comprehensive intelligent regulation and control of over-standard flood in the basin through high-precision early warning and forecasting, multi-project joint scheduling and effect evaluation. At the same time, the research of refined forecasting model, multi-engineering joint scheduling technology and intelligent decision support system provides theoretical support and technical guidance for improving the level of intelligent regulation and control of watershed over-standard floods.

Key words: watershed over-standard flood; intelligent control; architecture design; technology

收稿日期: 2024-07-29

基金项目: 江苏省水利科技项目(2021027)

作者简介: 吴蕾(1998—),女,硕士,主要从事水文物理规律模拟及水利规划设计工作。E-mail:wulei_shuili@foxmail.com

1 概 述

近年来,受全球气候变化影响,我国暴雨洪涝突发性、极端性、反常性越来越明显,突破历史记录、颠覆传统认知的洪涝灾害频繁发生。防洪安全问题已经成为制约社会经济可持续发展的重要因素之一。特别是当流域遭遇超标准洪水时,会造成较为严重的经济损失与不良的社会影响。而受气候变化等因素的影响,流域超标准洪水已经成为防御工作的重点和难点。科学有效的防洪调度决策要考虑众多因素,涉及范围大、时效强,任何微小的失误都可能导致重大的人员伤亡和财产损失。传统的防洪调度方法多以“经验型+分析型”为主,这类调度决策难以满足新时代社会经济发展和人民生命财产安全的新要求,智能调控架构设计与关键技术的应用便成为全国防汛抗旱指挥系统建设的主要目标之一,信息化技术的应用为防洪调度的智能化提供了有力的技术支撑,可以实现对洪水演变、工程运行、灾情状态趋势的准确预判,以及对发展过程的全面掌控。通过智能调控架构的设计与关键技术的研发,有望提高大尺度极端洪水灾害的智能调控水平,从而更好地保障人民生命财产安全和社会经济的可持续发展。

2 流域超标准洪水特性分析

中国东部作为季风灾害大区,涵盖全国陆地45%的面积,聚居了95%的人口,贡献了97%以上的工农业总产值,是中国洪涝灾害最为频发的区域^[1]。从防洪角度分析可知,暴雨洪水主要集中在大江大河的中下游,这些区域仅占国土面积的8%,却承载着全国40%的人口,拥有35%的耕地和60%的工农业产值,历史上一直是中国的财富聚集地。但这些地区的地面高程普遍低于江河洪水位,主要依靠堤防来束水,一旦遭遇流域超标准洪水,会造成严重灾情。历史上,1860年和1870年的超标准洪水曾给该地区带来毁灭性灾害。洪水特性主要体现在以下几点。

2.1 暴雨覆盖面广,雨区稳定

流域超标准洪水通常由大范围、长时间的暴雨引发,且雨区相对稳定。以长江流域1870年造成空前水灾的超标准洪水为例,主要受灾地区包括四川、湖北、湖南三省,受灾范围从四川盆地延伸到长江中游平原湖区。上游地区的受灾范围主要是干、支流沿江城镇,中游宜昌至汉口间的平原地区受灾

范围达到3万余平方公里,数百里的洞庭湖与辽阔的荆北平原一片汪洋。除此之外,1560年洪灾也遍及四川、湖南、湖北等省,并殃及下游的江西、安徽、江苏等省;1788年全江性大洪水涉四川、湖北、湖南、江西等省;1957年殃及临沂、济宁、菏泽3个地区34个县(市)受灾的超标准洪水都造成了较大的损失。

2.2 洪峰高量大,持续时间长

流域超标准洪水的另一个显著特点是洪峰高、量大、高水位持续时间长,这一情况主要发生在干流和支流、上游和下游同时遭遇恶劣天气或水文条件时,如连续的暴雨、上游水库的突然放水、冰川融化等,都可能导致洪水峰高量大且持续时间长^[2]。以长江为例,1998年长江发生全流域的超标准洪水,洪峰流量大,且高水位持续了数月之久,对防洪调度形成了极高的挑战。

2.3 致灾范围广,损失大

超标准洪水易对中下游平原地区造成毁灭性的灾害,以长江流域1870年的洪水为例,嘉陵江各河沿岸、重庆到汉口长江沿岸的城镇与农田普遍被淹没。合川、涪陵、丰都、忠县、万县、奉节、巫山、宜昌等沿江城市也受到严重影响。洞庭湖区堤垸溃决,洪水泛滥,枝江、公安等州县的水位超过了城垣数尺,庙宇、民舍淹没殆尽。除此之外,1788年的超标准洪水也造成了四川省南溪、合江、丰都、忠县、万县、云阳等沿江城市的大水入城,淹没了众多民舍,湖北省境内超过36个县被淹,这些历史灾害都体现了超标准洪水致灾范围广、损失大的特点。

3 流域超标准洪水智能调控新需求

在全球信息化技术迅猛发展的背景下,信息化技术的应用已成为当前各领域业务工作的迫切需求^[3]。防洪调度决策涉及监测预报、洪水调控调度、风险评估、应急抢险技术支撑等,面向流域超标准洪水的智能调控更是其中的重中之重,在实际工作的开展过程中需要重点关注以下几方面的新需求。

一是扩展流域超标准洪水数据库,实现洪水数据样本的多样化和系统化。流域超标准洪水灾害是多种因素共同作用的结果,其属性已从自然单一属性发展为耦合自然、社会和工程的复杂属性,但目前有关流域超标准洪水的相关研究相对较少,数据样本量也难以满足研究的信息要求,样本数据本

身与流域水工程调度影响、流域受灾淹没分布等信息间的关联性有待加强,以解决新时期防汛业务综合需求面对的问题。

二是研发多工程联合调度规则库,实现多类别工程的联合调度和有机集成。因为流域覆盖地域广、水系组成复杂,经过多年建设,已基本构建了水库、蓄滞洪区、堤防和涵闸泵站等流域防洪工程体系。但现如今尚无法对多类别工程的联合调度规则进行有机集成,动态协调防洪工程体系的拦、分、蓄、排能力,缺乏工程体系调度联动性,所以要研发多工程联合调度规则库,实现多类别工程的联合调度和有机集成。

三是注重智能调控的反馈性,研发反馈调控及智能优选一体化决策技术。虽然工程调控为流域超标准洪水灾害提供了缓冲区,但洪水风险依然存在。超标准洪水风险调控方案影响范围大、影响因素多,需从流域层面构建综合评价指标体系,形成科学的调控与效果互馈关系,以此提升调度决策的科学性和有效性。

4 流域超标准洪水智能调控架构设计

4.1 总体目标

流域超标准洪水智能调控的总体目标旨在全面应对流域超标准洪水的发生、发展、致灾及消退全过程。通过研发先进的数据结构分析技术、构建多工程联合调度规则库以及反馈调控与智能优选一体化决策技术,实现对流域超标准洪水演变轨迹的精准捕捉,提取洪水过程中的突变特征。在智能化水平上显著提升风险预警、灾害评估及工程调控的能力,确保在复杂多变的洪水环境下,能够做出快速、准确的决策,有效减轻洪水灾害对社会经济及人民生命财产安全的威胁,为防洪减灾提供强有力的技术支撑^[4]。

4.2 总体框架

流域超标准洪水智能调控架构的设计是以 Agent 系统(MAS)理论为核心,构建分层、分布式的智能调控体系,整个体系包括接口层、应用层和支持层3层结构,每一层都由多个相互独立又并行处理的 Agent 组成,各个 Agent 相互通信、协作完成系统任务,实现对流域超标准洪水的智能调控。

4.2.1 接口层

接口层作为系统最外层联系用户与系统的桥梁,主要作用是将用户提出的任务转化为系统命令,并提供人机交互界面及实时信息分析、处理和

发布功能。接口层包括界面 Agent 和实时信息 Agent 两部分,前者是用户与系统交互的窗口,负责接收用户的输入,提供直观易用的操作界面,使用户能够方便地输入任务、查询结果和进行系统设置;后者负责收集外界环境的实时变化信息,如水库水位、河道水位、降水量等,并进行初步的分析和处理。接口层的信息内容是后续预警预报和调度决策的重要依据。

4.2.2 应用层

作为智能调控的核心层,应用层负责实现洪水预警预报、调度决策、效果评估等主要功能,它主要包括预警预报 Agent、调度决策 Agent 和效果评估 Agent 3个部分。

预警预报 Agent 基于精细化预报模型,利用实时信息 Agent 收集的洪水规模、水库蓄水量、河道水位、受影响区域的人口和经济价值等数据,通过模型计算和数据分析,预测洪水的发生时间、规模、影响范围等对洪水进行预警预报;调度决策 Agent 会结合预警预报结果,通过优化算法和决策模型,生成最优的调度方案,以最大程度地减少洪水造成的损失;效果评估 Agent 会对实际洪水过程进行监测,收集受灾情况、工程运行状态等信息,与预警预报和调度决策的结果进行对比分析,对调度决策效果进行评估,反馈优化建议,以改进预警预报和调度决策的准确性和有效性。

4.2.3 支持层

支持层是为应用层提供数据支持和技术保障的基础,主要包括数据库 Agent、模型库 Agent 和方法库 Agent 3个部分。在这3个组成部分当中,数据库 Agent 负责存储超标准洪水、洪涝灾害及调度决策相关信息。通过数据采集、存储、处理、共享等环节建立数据管理体系,以此为应用层提供全面的数据支持,同时要定期更新库内数据,确保数据的准确性和时效性;模型库 Agent 则是通过水文、水力以及优化等模型成为预警预报和调度决策的基础,在模型选择的过程中要按照不同的需求和场景选择合适的模型进行计算和预测;方法库 Agent 通过机器学习算法、遗传算法、粒子群优化等算法和优化方法等技术支持为应用层的计算和决策提供支持,以此实现为不同的问题和需求选择合适的求解和优化方法。

4.3 关键 Agent 设计

4.3.1 预警预报 Agent

预警预报 Agent 是流域超标准洪水智能调控架

构中的核心组件之一,其设计重点在于实现高精度的洪水预警预报,耦合气象-水文-水动力-工程调度的精细化预报模型的应用,充分考虑了流域气候、地形、水文特征以及工程调度对洪水过程的影响,进而实现长-中-短期相结合的多层次分级预警。通过实时数据驱动,预警预报 Agent 能够不断接收并处理来自接口层的实时水库水位、河道水位、降水量等洪水信息,预警预报 Agent 也可以根据历史洪水数据和实时监测数据逐步调整和优化预报模型,提高预报的准确性和可靠性。

4.3.2 调度决策 Agent

调度决策 Agent 是以知识图谱构建工程调度效果与风险互馈调控模型为基础,挖掘分析历史洪水调度数据、工程运行数据以及实时洪水信息,以此构成知识库和规则库打造多场景协同、全业务流程敏捷响应的调度决策方案。在实际操作过程中,能根据实际情况和调度需求,灵活调整防洪工程体系的拦、分、蓄、排能力,确保调度决策方案的最优化。

4.3.3 效果评估 Agent

效果评估 Agent 充分考虑洪水规模、影响范围、受灾程度以及工程运行状态等多个因素,进而建立多尺度融合的超标准洪水灾害实时动态评估模型,找出调度决策中存在的问题和不足,进而提出针对性的预警预报和调度决策过程优化建议,进一步提升流域超标准洪水智能调控的科学性和有效性。

5 流域超标准洪水智能调控关键技术研究

5.1 精细化预报模型研究

5.1.1 天空地水一体化应急监测技术

为实现超标准洪水的立体监测,可以结合卫星遥感、无人机、地面观测站等多种监测手段。卫星遥感技术能够提供大范围的洪水监测数据,无人机能够灵活地进行低空飞行,获取高分辨率的洪水影像,地面观测站则能够实时监测水位、雨量等关键数据,多种数据融合和智能识别技术的应用,可以有效提高监测数据的精度和时效性,为后续的预警预报和调度决策提供准确的数据支持。

5.1.2 耦合气象-水文-水动力-工程调度模型

耦合多源数据的预报模型的构建是实现超标准洪水精准预报的关键,要将气象、水文、水动力及工程调度信息融合成一体化的预报系统,不断优化

模型和参数,进一步提高预报模型的准确性和可靠性,使其能够更好地反映流域超标准洪水的实际演变过程,为后续调度决策提供科学依据,减少洪水造成的损失。

5.2 多工程联合调度技术研究

5.2.1 多工程联合调度耦合模型

可以尝试引入多工程联合调度耦合模型构建理论,实现水库群、蓄滞洪区、堤防和涵闸泵站等多类别工程的有机集成,强化动态协调防洪工程体系的拦、分、蓄、排能力,提升流域整体防洪能力,以此实现多类别工程的联合调度和有机集成,提高防洪工程的整体效益。

5.2.2 工程调度效果与风险互馈调控模型

挖掘分析历史洪水调度数据、工程运行数据以及实时洪水信息,构建工程调度效果与风险互馈调控模型,通过实时动态评估调度决策效果优化调控方案,降低洪水风险,以此形成科学的调控与效果互馈关系,降低洪水风险。

5.3 智能决策支持系统研究

5.3.1 全链条一体化决策支持系统

研发全链条一体化流域超标准洪水决策支持系统,涵盖数据采集、预警预报、调度决策、效果评估等全业务流程。通过模块化设计,快速构建适应不同业务需求的决策支持系统。

为实现流域超标准洪水的智能调控要研发全链条一体化决策支持系统,系统应涵盖数据采集、预警预报、调度决策、效果评估等全业务流程,通过模块化设计快速构建适应不同业务需求的决策支持系统,为流域超标准洪水的应对提供有力的技术支撑。

5.3.2 基于位置服务技术的人群避险转移辅助平台

在超标准洪水发生时,要以保障人民群众生命财产安全为第一要义,所以通过实时分析洪水风险分布和人群分布情况,结合位置服务技术研发人群避险转移辅助平台,以此为参考制定科学合理的避险转移方案,为人民群众提供及时的避险转移指导,减少洪水灾害对人民群众生命财产安全的威胁。

6 结 论

流域超标准洪水智能调控架构的设计与关键技术的研发,对提升我国防灾减灾能力具有重要意义,文章结合 MAS 理论的智能调控架构的设计,通过接口层、应用层和支持层的协同工作实现对流域超标准洪水发生、发展、致灾及消退全过程的精准

调控。通过精细化预报模型、多工程联合调度技术及智能决策支持系统的综合运用,提高洪水预警预报的准确性、调度决策的科学性及效果评估的及时性,为保障人民生命财产安全和促进社会经济可持续发展提供更加坚实的支撑。

参考文献:

[1] 吴绍洪,潘韬,杨勤业,等. 中国重大气象水文灾害风险

格局与防范[M]. 北京:科学出版社,2014.

[2] 尹志杰,王容,李磊,等. 长江流域“2017·07”暴雨洪水分析[J]. 水文,2019,39(2):86-91.

[3] 王浩,雷晓辉,尚毅梓. 南水北调中线工程智能调控与应急调度关键技术[J]. 南水北调与水利科技,2017,15(2):1-8.

[4] 贺恒伟. 人工智能与人类智能的博弈——由《最强大脑》引发的思考[J]. 科技资讯,2017,15(35):230-231.

(上接第44页)

[11] 梁同好,严正春,刘超,等. 新型排水体麦秸秆辊真空预压排水室内实验[J]. 岩石力学与工程学报,2016,35(增刊1):3432-3440.

[12] XU G, YIN J, FENG X, et al. An improved method for dewatering sewage sludge using intermittent vacuum loading with wheat straw as vertical drains [J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2020, 24(7): 1-9.

[13] 冯哲源,陶小玉,徐桂中,等. 稻秸秆绳排水体真空固结处理高含水率疏浚淤泥可行性研究[J]. 江苏水利,2020(7):56-59,63.

[14] 李长辉,武航,程国勇,等. 不同排水板真空预压软土加固对比试验研究[J]. 岩土力学,2022,43(10):2819-2827.

[15] 袁威,邓永锋,陈小兵,等. 秸秆排水板室内降解试验及现场应用[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2023, 53

(3):402-409.

[16] 王山,徐桂中,罗凤华,等. 秸秆排水体联合真空预压处理对疏浚淤泥有机质和养分影响研究[J]. 中国农村水利水电,2023(4):33-39.

[17] 韩启元. 秸秆排水体联合间歇式真空处理高含水率疏浚泥固结机理研究[D]. 南昌:东华理工大学,2023.

[18] 李伸鑫. 秸秆排水体真空预压处理高含水率疏浚淤泥固结特性研究[D]. 合肥:安徽理工大学,2021.

[19] 王山,梁广雪,陈先勇,等. 真空预压处理高含水率疏浚泥室内足尺大模型试验研究[J]. 江苏水利,2022(12):1-6,12.

[20] 李波,程文亮,项存平,等. 大面积堆载预压处理深厚软基工后沉降预测研究[J]. 岩土工程学报,2021,43(增刊2):162-165.