

大型输水渠道冰凌灾害预警及防护对策研究

陈庆

新疆塔里木河流域开都孔雀河水利管理中心库塔干渠管理站

DOI:10.32629/hwr.v9i11.6658

[摘要] 冰凌灾害是寒区大型输水渠道冬季安全运行面临的重大威胁,极易引发冰塞、冰坝、结构破坏乃至溃决事故,造成严重的经济损失与社会影响。本文立足于大型输水渠道冰凌灾害防治的核心需求,系统梳理了冰凌形成演变机制及其灾害形式,深入剖析了当前监测预警体系存在的瓶颈。在此基础上,重点提出了涵盖多维立体监测网络构建、多源信息融合预警模型开发、动态风险阈值体系构建、递进式分级预警响应流程设计以及精准化工程与非工程协同防护措施的综合性灾害防控框架体系。该体系强调从“监”到“警”再到“防”的无缝衔接与迭代优化,旨在显著提升对渠道冰凌灾害的预测精度、预警时效性与应急处突能力。

[关键词] 大型输水渠道; 冰凌灾害; 灾害预警; 防护对策

中图分类号: TV146+.2 **文献标识码:** A

Research on early warning and protective measures against ice slush disasters in large-scale water conveyance channels

Qing Chen

Kutagan Canal Management Station of Kaidu Kongque River Water Conservancy Management Center in the Tarim River Basin, Xinjiang

[Abstract] Icing disasters pose a significant threat to the safe operation of large-scale water conveyance channels in cold regions during winter, easily leading to ice jams, ice dams, structural damage, and even breach accidents, causing severe economic losses and social impacts. Based on the core needs of preventing and controlling icing disasters in large-scale water conveyance channels, this paper systematically reviews the formation and evolution mechanisms of ice formation and its disaster forms, and deeply analyzes the bottlenecks existing in the current monitoring and early warning system. On this basis, it focuses on proposing a comprehensive disaster prevention and control framework system that encompasses the construction of a multi-dimensional and three-dimensional monitoring network, the development of a multi-source information fusion early warning model, the construction of a dynamic risk threshold system, the design of a progressive and hierarchical early warning response process, and precise engineering and non-engineering collaborative protective measures. This system emphasizes seamless connection and iterative optimization from "monitoring" to "warning" to "prevention", aiming to significantly enhance the prediction accuracy, early warning timeliness, and emergency response capabilities for channel icing disasters.

[Key words] large-scale water conveyance canal; ice flood disaster; disaster warning; protective measures

引言

随着国家水资源配置发展战略的逐步推进,大型输水工程在维持区域水资源供应,支撑经济社会发展中起到了举足轻重的作用。但在广大的北方寒冷和严寒地区,输水渠道多年冰期运行经常受到冰凌灾害的威胁。冰凌在输水渠道形成、移动、淤积直至冰塞、冰坝的演变过程,呈现出较强的时间和空间相关性、累积性及突变性等动态特性,引发的流冰壅水、壅水位、流速陡增和结构冰压力突增等一系列作用和后果将直接影响渠道

岸坡衬砌结构安全、闸门闸墩等重点水工建筑物安全及整个输水系统的安全,在历史上也造成了一定的损失。如何规避或降低冰凌灾害风险,成为保障大型输水渠道“冰期稳定输水、供水安全可靠”的战略目标实现的根本和关键。因此,本文针对大型输水渠道这一特定载体的冰凌灾害链,建立有效、严谨、易操作的一体化预警防护体系,进而提高我国寒区重大调水工程的本质安全成为本次研究的目的。

1 大型输水渠道冰凌灾害的形成机理与灾害模式

大中型输水渠道冰害产生的原因是在低温环境下,复杂的固-液转化及水流的耦合作用过程,过程包含很多非线性特点。首先,处于寒冷持续时间较长的情况下,水流不断失能减小能量,在达到一定的过冷度后,在水体的表面出现初生冰晶,这个过程中温度骤降的程度、风速扰动的程度、水体的初始温度、渠道轴向流速剖面等情况是初期初生冰晶形成的重要控制参数。随着冷幅不断叠加,在一定时间和气温的过冷过程中,初生冰晶逐渐发展,相互汇集蔓延生长,并厚积形成覆盖整个过水面的连续冻结冰层,此时既有庞大的体积膨胀力直接作用在刚性渠道护坡上,冰盖本身的强度和附着锚固程度更直接影响后期演化形态的冰害安全稳定程度。当气温周期波动升温或者在上游闸门影响下输水快速起止引起急剧流量水位变化时,固定冰盖极易出现破坏并迅速破碎分散成许多具有冲击力的流动碎冰块,进入较为复杂的发展演化的冰花碎冰输移阶段。

冰塞冰坝的发生是大型输水渠道冰害连发效应的致命点,其冰塞壅水程度和壅水高度决定了灾害等级的严重性;冰塞壅水产生的巨大冰压力荷载对刚性衬砌板发生水平推挤破坏作用,不均匀冻胀作用下致使护坡接缝构造发生脆性断裂破坏,冰体反复摩擦刮削作用造成混凝土外表面的物理侵蚀磨损以及风化破坏,显著降低渠道结构役用水泥龄期安全性;流冰冲击也同样是一种极严重的灾害,且在流速越高的情况下,搭载着巨大动能的移动冰体快速撞击闸门闸墩操作门槽、液压启闭机连杆装置以及水位流量计等关键附属设备的传感器,将使其发生瞬时损伤或误动失准现象,致使控制指令发生差错紊乱;而冰盖膨胀顶托则将破坏渠道伸缩缝构造的闭气性能以及变形适应性,造成渠道渗漏水程度加剧,长期运行后将对密封防水性能产生严重的影响;而在极端恶劣的天气条件下,渠道表层还将形成悬吊冰凌锥,而渠道侧墙将形成附着冰柱,这些悬冰如果发生脱落将对道路上方的巡检作业人员以及下方的机电设备设施造成直面安全危害^[1]。

2 大型输水渠道冰凌灾害预警现状与核心挑战

2.1 现有预警技术方法及其局限性

目前渠道冰凌监测预警主要依赖常规环境气象站、人工现场巡查记录和水文站点的定点观测手段,存在着覆盖密度稀疏、空间连续性严重不足与信息获取频率低下等结构性瓶颈问题。传统人工巡检不仅成本高昂周期长,其主观识别差异也会带来冰情信息描述的不一致偏差。常用的水文水动力学模型在冰凌模拟方面面临诸多关键参数难以准确量化与边界条件高度耦合作用的挑战难点,诸如冰盖内部热力传导系数随厚度与密度变化的复杂规律、冰盖与水体界面湍流交换强度、冰花碎冰流动条件下水流的等效糙率随冰密度的剧烈变动特性等基础物理机制尚缺乏精确化表达刻画能力。以简单统计经验为主的单因素阈值预警方式,在适应复杂多变自然环境和运行调度场景方面表现出极差的鲁棒性特征,难以形成有效且稳定的预警输出支撑决策层分析判断^[2]。

2.2 防护技术单一且适应性差

针对冰情危机工程被动破冰手段如爆破破冰船及机械破冰机等耗费成本大、作业人员安全隐患大等明显不足,一些手段只是治标不治本即不能有效防止冰塞出现的问题;上游闸门紧急下泄闸操作可瞬时降低下游危险断面高水位流量,遏制冰塞快速生成,但也会引发上游库区水位摆动突变,产生其他安全隐患,如护岸溃决淹没等,同时防护措施多为单一单点局部处置及通用型粗放操作等,缺乏在推导式冰情动态辨识评估基础上的精准化危险空间分布辨识定位能力,尚未形成科学有效的冰情危机分级分类动态应急响应规则体系,未能实现根据冰情的监测预警结果科学地精准对应联系不同级别的应急资源的前置预案执行,冰情危机事件发生的指挥调度存在随意性强、资源调度失衡问题较为普遍。

3 大型输水渠道冰凌灾害预警防护体系构建

3.1 构建天空地一体化多维立体监测感知网络

第一,针对灾害性凌汛过程实施精准预测需要在全空间、立体化、多尺度、多方式、全天时、全方位建立实时空间异质感知神经网络神经末梢系统,包括卫星、航摄等多源信息空间结合光学热红外高光谱遥感信息获取大尺度流域冰层冻结状态变化趋势信息及冰面温度异常点识别应用,重点险段部署智能自主气象微站联动集成运行获取水面以上温度、湿度、风速、风向、太阳辐射变化以及实时面状表面地表温度场变化信息,水体阵列部署热敏电阻链传感器精确测量垂向各层水温梯度变化信息,垂向安装声学流速剖面仪测量水体垂向三维流速剖面,岸边重点节制闸区域部署360°回转高清激光测冰雷达准实时扫描获取冰面高程时空变化信息特征,水下定点埋设侧扫声呐持续获得输移碎冰厚度密度空间分布信息特征及冰块实时位置变化特征,重要险工重点枢纽险工节制闸等部位安装高清微光智能鱼眼摄像头实现冰情全天候可视连续记录存查^[3],以上空间异质感知信息汇聚到基于分布式云边协同计算节点物联平台,进行统一的数据汇集收存预处理清洗,形成全天候不间断立体冰情数据连续感知体系,构建冰凌灾害实时预测预警系统坚实的基础支撑。

3.2 开发多源数据融合驱动的智能动态预警预测模型

基于汇聚的多源异构信息流数据源,搭建面向冰凌灾害的智能预警算法模型内核层子模块,融合基于物理机制模型和数据驱动方法两者的优点。在冰凌灾害智能预警算法模型构建中,以考虑水、沙、冰协同机理的水沙冰动力学耦合模型作为冰凌灾害发生机理模型的核心框架,并进一步引入遥感影像信息数据自动识别分类模型算法提取的冰盖冻结界限区域形态变化边界与破裂处空间位置识别精度等识别算法,借助计算机流式分析技术开展动态识别冰体上浮动碎冰块体输移方向、流速矢量与密集度分析计算。在基于时序模型时间自回归预测引擎中综合气象台站数值天气预报产品数据和感知节点实时环境输入数据参数开展实时未来趋势热力变化指标趋势推断与热力趋势特征随时间演化,基于长短期记忆网络模型整合历史冰凌灾害案例库特征数据和冰凌灾害演化过程规律学习数据实现冰凌灾害

发生机理过程的模拟预报,模型能够以概率化数值呈现未来不同渠段和时间时段的冰塞风险等级预报图谱和可能壅水增量的危险性分布概率估计特征,以及危险性产生影响因子贡献份额的归因分析结果辅助支撑冰凌灾害风险溯源与冰凌灾害发生危险溯源追踪决策机制。

3.3 建立时空动态冰凌风险阈值指标体系

摒弃简单固定的单点阈值规则,构建多因子动态联动的分级分区量化风险阈值计算规则库体系。该体系针对不同区域水文地貌类型如陡弯道渠段、节制闸上游扩宽段和缓流过渡段设定差异化的核心评判基准值集合。设定核心触发指标包括但不限于累计等效负温指数历史演变曲线趋势、冰盖厚度增量变化斜率预测、流速持续降低状态判断百分比、碎冰输移观测密度统计特征与特定计算单元内的冰体通量预估等多个维度评价指标。综合风险指数值通过考虑当前实时值向量逼近历史危险模式的程度以及趋势预测演变的恶化可能性区间两个维度,加权组合确定得分标度。风险等级划分为关注、预警、行动和紧急四级层次,对应不同的监测上报频率和调度干预规则响应强度要求,通过知识规则引擎进行动态匹配和自动生成建议处置操作路径组合,形成智能化辅助决策支持^[4]。

3.4 设计递进式分级预警响应与应急协同指挥流程

确立环环相扣的清晰四级应急响应指挥层级与协同分工流程结构。当风险处于较低关注等级时主要触发加密自动监测信息上传反馈频次操作,同时调度监控中心启动目标跟踪模式加大特定目标区域的视频扫描轮询密度处理强度。当风险上升至蓝色预警状态时则需启动冰情加密会商制度机制,同时调度运行单位加强相应危险渠段的人员现场巡查防护强度。黄色风险预警等级阶段需要调度指挥中心启动预调库方案操作,执行预降运行水位、减少下泄流量等水力调节措施,同时部署备用破冰设备进入指定待命位置区域以便快速动员应对。当风险指数进入最高的红色警戒阈值范围阶段,立即启动整个体系应急响应程序,一方面在确保安全前提下操作闸门实施流量紧急截断或加大过闸水流扰动措施,扰乱冰塞体的稳定结构使其松动瓦解;另一方面指令上游水库执行错峰调度减少出流冲击力对下游灾害形成点的负荷累积效应;同时指挥现场破冰船或无人机群携带破冰弹迅速精准抵达指定位置,实施定点清除作业;启动渠道沿线受威胁社区人员应急疏散预警信息发布通道,实现全链条快速响应闭环处置^[5]。

3.5 实施精准工程与非工程协同防护对策

在精准工程防护方面,一是尽快完善适冰性渠道结构设计规范。对易产生冰压力集中段、闸门槽等部位覆盖设置柔性的防冰缓冲防护垫层(复合高分子摩擦减阻材料贴覆层);优化弯曲段护坡结构形式,采用大曲率柔性接头组串构造释放部分累积形成的冻胀变形效应;在可能形成冰塞的部位上方预留空间

布置引导轨架构置,以布置固定式破冰网兜阻拦气囊等被动触发机制的物理阻塞手段。二是水力控制防冰策略,在充分利用渠道内部系统结构与上游水源水库的联合操作的灵活机动可调配空间优势,采用精细化的分时段分段次调控手段创造易于冰塞打破稳定状态的有利水工情势;推进热能扰动辅助化消融手段,如布置固定式水流内电加热棒、下渗式水下声能空化碎冰装置,在冰情萌芽阶段提前干预消解碎冰块体间的粘结结晶;采用生物材料助防冰策略,研究环境友好的冰点抑制剂缓释复合物制备工艺路线,延后冰晶形成阈值时间。非工程保障体系建设同样重要,包括完善细化冰期运行调度运行规范细则,强化一线运行人员培训考试;建立数虚仿真模拟训练的冰情推演应急演练训练平台,提高冰灾应急指挥实践能力;强化渠道险工防守责任,明确渠段片网格责任细分等。

4 结语

大规模输水明渠的冰凌灾害防治是一项综合性很强的复杂工程科技难题,必须依托对水、冰、气、结构等多物理场相互作用关系的充分认识及受控能力。本文先后提出“软硬件相结合”的多维立体感知监测网络化建设、“人工+物理模型”的多源数据信息融合的智能预警算法创新构建、“多尺度空间”“多频度时间”的风险分时分级指标体系建立、响应协同分级联动处置的响应策略设计、“软”“硬”措施相耦合的组合防护技术体系构架,并具备多维感知监控—空间灾害风险识别—灾害威胁实时预警—响应协同联动—精准防护处置的协同功能。下一步研究聚焦在人工智能与物理模型的深度融合优化,提升边缘计算终端在极端天气环境下的破坏能力和防护,新型环保抑冰材料的工程产品化应用模式探究,以实现冰凌灾害防护的成本效益最优,最终实现冰凌灾害防治能力由被动保障向主动防御的根本性转型升级,满足国家水资源战略安全永续发展的需要。

[参考文献]

- [1]周中元.黄河宁蒙段冰情变化趋势与冰凌输移过程影响机理研究[D].中国水利水电科学研究院,2024.
- [2]王伟伟.北方地区冬季冰凌期水工建筑物损伤试验研究[J].水利技术监督,2022,(02):85-87.
- [3]胡胜博.基于无人机低空遥感的流凌反演识别及运移过程研究[D].东北农业大学,2022.
- [4]管光华,熊发京.基于机器学习的寒区渠道冰情的遥感监测方法[J].农业工程学报,2024,40(04):194-203.
- [5]赵金宏.输水渠道运行管理措施探讨[J].农业科技与信息,2022,(04):71-74.

作者简介:

陈庆(1974—),男,汉族,重庆市人,大专,高级技师,研究方向冬季水利工程运行与防渗运用。