

跨流域调水工程冰期输水冰情演变规律及防冰害措施优化

董倩

南水北调东线山东干线有限责任公司 山东 济南 250100

摘要: 跨流域调水工程冰期输水时,冰情演变呈现明显规律,涵盖目标水位生成、流冰、冰盖形成与稳定输水、解冻等五阶段,且时空分布不均。为有效防冰害,需优化工程措施,如智能布局拦冰索、升级局部加热系统;同时改进调度方案,采用等体积运行、分步流量调节等。此外,构建AI冰情预测与数字孪生系统,实现冰情精准预测与应急响应,保障输水安全高效。

关键词: 跨流域调水工程;冰期输水;冰情演变规律;防冰害措施优化

引言:跨流域调水工程作为缓解水资源时空分布不均的关键举措,其冰期输水安全至关重要。冰期时,低温导致水流冻结,冰情演变复杂,涵盖流冰形成、冰盖发展及解冻等多个阶段,每一阶段均对输水系统构成潜在威胁,可能引发冰塞、冰坝等灾害。因此,深入研究冰期输水冰情演变规律,并针对性地优化防冰害措施,对于保障工程安全稳定运行、提高水资源调配效率具有重大意义。

1 跨流域调水工程冰期输水冰情演变规律

1.1 冰期输水五阶段划分理论

(1)冰期目标水位生成阶段:时序集中于12月上旬至中旬,此阶段核心任务是在气温骤降、水体冻结前,通过梯级水库协同蓄水抬高渠水位,形成满足冰盖承载要求的安全空间,为后续冰期稳定输水奠定基础,避免冰盖形成后水位波动引发冰体破损。(2)流冰阶段:发生于12月中旬至下旬,气温降至 0°C 以下后,渠水表面开始冻结形成浮冰,随水流运动形成流冰。此阶段水中冰花浓度逐步攀升至30%~50%,流冰阻力导致渠道内流速显著降低,需控制流速降至 0.6m/s 以下,防止高速流冰撞击渠道衬砌或建筑物。(3)冰盖形成阶段:12月下旬至1月上旬进入冰盖形成关键期,流冰在渠道内逐步聚集、冻结,形成连续完整的冰盖。监测数据表明,此阶段冰盖厚度增长速率稳定在 $0.5\text{--}1.2\text{cm/d}$,冰盖完整性随厚度增加逐步提升,渠道输水由明流逐步转为冰盖下暗流^[1]。(4)冰盖下输水阶段:1月中旬至2月中旬为稳定输水期,冰盖厚度稳定在 $20\text{--}40\text{cm}$,形成坚实的覆盖层,其承压能力达 $5\text{--}8\text{kPa}$,可抵御常规水流冲击与外力作用。此阶段输水核心是维持冰盖完整性,通过调控流量保证冰盖下过流能力稳定,满足输水任务需求。(5)解冻期:2月下旬至3月中旬,气温回升带动冰盖消融,冰盖消融速率与气温回升速率呈指数相关,即气温回升越快,消融速率提升

越显著。此阶段需重点防控冰盖断裂形成的浮冰拥堵渠道,避免引发冰塞、冰坝等灾害。

1.2 冰情时空分布特征

(1)纵向分布:受渠道沿程水温梯度、流速变化影响,冰盖形成与解冻时序呈现明显的纵向延迟特征。从渠首至渠尾,冰盖形成时间逐步延迟 $7\text{--}15\text{天}$;进入解冻期后,渠首因受水源区水温影响,解冻时间早于渠尾,延迟时长为 $5\text{--}10\text{天}$,形成“首尾不同步”的纵向分布格局。(2)横向分布:渠道断面形态主导横向冰情差异,其中弯道段因水流离心力作用,冰水交汇界面扰动增强,冰体易在凹岸聚集冻结,导致弯道段冰盖厚度比直段增厚 $20\%\text{--}30\%$ 。冰盖厚度增加叠加水流阻力变化,使得弯道段冰塞风险较直段提升 1.5倍 ,成为冰期输水的高风险区域。(3)典型断面分析:以北拒马河渠段为典型研究断面,通过长期监测建立冰盖厚度与水温、流速的量化关系模型。模型显示,冰盖厚度与水温呈负相关,与流速呈正相关,可精准预测该断面不同水文气象条件下的冰盖厚度变化,为针对性防控提供技术支撑。

1.3 动态冰盖形成机制

(1)流冰下潜条件:流冰能否下潜是冰盖形成的前提,其临界条件与流速、冰凌尺寸密切相关。当渠道内流速达到 $0.6\text{--}0.7\text{m/s}$ 时,流冰易被水流裹挟下潜;当冰凌尺寸超过 0.5m 时,下潜概率较小型冰凌提升 40% ,下潜流冰相互堆叠为冰盖形成提供基础。(2)冰盖生长模型:基于能量守恒原理构建冰盖厚度增长方程,通过量化水体热交换、大气辐射等能量收支过程,精准描述冰盖生长规律。经工程实测数据验证,该模型预测误差小于 8% ,可有效指导冰期输水调度^[2]。(3)水力响应特性:冰盖形成后显著改变渠道水力特性,水击波速大幅降低,由明流状态下的 1200m/s 降至 170m/s ;同时,冰盖约束导致水流波动性增强,压力波动幅度较明流阶段增加 3倍 ,需在调

度中优化流量调节速率,避免水击损伤工程设施。

2 跨流域调水工程冰塞风险形成机制与评估

2.1 冰塞灾害类型学分析

(1) 动力冰塞:核心驱动因素为水流动力作用下的流冰堆积,多发生于渠道狭窄段、倒虹吸进口、闸室等过流断面收缩区域。此类区域水流流速骤变,流冰运动受阻后易相互碰撞、堆叠,逐步形成堵塞通道的冰塞体。工程实测数据显示,倒虹吸进口段因断面突然收缩,流冰堆积效应显著,冰塞厚度可达1.5m,严重缩减过流断面面积,导致上游水位抬升,引发渠道漫溢风险。(2) 热力冰塞:由热力条件主导形成,当渠道水温持续低于 0°C 且流速低于 0.3m/s 时,水体热量散失速率大于补给速率,渠底水流易冻结形成底冰。底冰持续生长并逐渐向上延伸,与水面浮冰连接后形成完整冰塞体,属于缓慢发展型灾害。其特点是形成过程隐蔽,初期不易察觉,一旦形成难以快速清除,易长期影响输水效率,且底冰对渠道衬砌的冻胀破坏具有累积效应^[3]。(3) 复合冰塞:是动力与热力因素协同作用的结果,此类冰塞形成机制复杂、发展速度快、危害程度高,多发生于闸前、渠段转弯等特殊区域。例如闸前区域,一方面低温环境(热力因素)导致水体易冻结形成底冰与浮冰;另一方面闸门调控引发的水流扰动(动力因素)促使浮冰与底冰相互缠绕、堆积,快速形成冰塞体。实测案例表明,闸前复合冰塞可在短时间内导致水位骤升2-3m,对闸门结构及渠道边坡稳定性构成严重威胁。

2.2 冰塞风险评估模型

(1) 指标体系:基于冰塞形成的核心驱动因素,构建包含气温、水温、流速、冰凌尺寸的4维评估指标体系。其中,气温与水温决定冻结环境,是冰塞形成的前提条件;流速影响流冰运动状态,主导动力型冰塞的形成;冰凌尺寸直接关联冰塞堆积效率,影响冰塞体的发展速度与厚度。各指标通过标准化处理后,采用层次分析法确定权重,全面反映不同因素对冰塞风险的贡献度。(2) 数值模拟:采用MIKE21冰模型开展冰塞演进过程数值模拟,该模型可精准刻画冰水两相流运动规律,通过耦合水动力模块与冰动力模块,实现对冰塞形成、发展、稳定全流程的动态模拟。选取3个典型跨流域调水工程冰塞案例进行模型验证,结果显示冰塞体厚度、形成时间及影响范围的预测精度达85%,可有效支撑冰塞风险的提前预判。(3) 风险等级划分:结合工程安全输水要求与冰塞灾害危害程度,以冰塞体导致的过流能力损失率 D 为核心评判指标,定义三级风险标准:低风险($D < 25\%$),此时冰塞体对输水影响较小,无需特殊调控;中风险

($25\% \leq D \leq 50\%$),过流能力显著下降,需启动常规防控措施;高风险($D > 50\%$),过流通道严重堵塞,易引发水位骤升等灾害,需立即实施应急调度方案。

3 跨流域调水工程冰期输水防冰害措施优化策略

3.1 工程措施优化

(1) 拦冰索布局优化:传统拦冰索布局多依赖经验设定间距,易出现拦冰不彻底或水流阻力过大的问题。基于流冰轨迹模拟技术,构建拦冰索间距计算模型,结合渠道流速、流冰尺寸、冰花浓度等关键参数,精准测算不同渠段的最优间距。模型验证结果表明,在平原型渠段推荐采用150-200m的拦冰索间距,可在保证拦冰效率达90%以上的同时,将水流阻力降低35%,有效避免流冰堆积形成冰塞。同时,优化拦冰索安装高度,使其低于冰期目标水位 $0.3-0.5\text{m}$,确保流冰被精准拦截的同时不影响正常输水。(2) 排冰闸启闭策略:排冰闸是疏导流冰、防控冰塞的关键设施,传统启闭方式多为固定时段操作,难以适配流冰量的动态变化。通过建立冰凌流量-闸门开度动态响应模型,实时采集拦冰索前流冰堆积量、渠道流速、水位等数据,精准计算所需的闸门开度与启闭时长。例如,当冰凌流量达到 $50\text{m}^3/\text{h}$ 时,模型自动输出开度30%的启闭指令,实现流冰的高效疏导;当流冰量骤减时,及时调整开度至10%-15%,避免因过闸流量过大引发冰盖破损。该策略实施后,排冰效率提升45%,闸前冰塞风险降低70%^[4]。(3) 局部加热系统升级:针对倒虹吸进口、闸室等冰害高发区域,对原有融冰加热系统进行技术升级,采用石墨烯电热膜替代传统电阻丝加热设备。石墨烯电热膜具有导热均匀、能量损耗低的优势,加热效率较传统设备提升40%,且升温速度快,可在2小时内将局部水体温度提升至 0°C 以上,有效防止底冰形成与流冰堆积。同时,配套安装温度感应装置,实现“低温自动启动、达标自动关停”的智能控制,降低能耗的同时保障融冰效果,避免因过度加热引发水体热污染。

3.2 调度方案优化

(1) 等体积运行方式:封冻期冰盖稳定性对水位波动极为敏感,传统水位调控方式易因波动幅度过大导致冰盖开裂、破损。采用等体积运行方式,通过梯级水库协同调度,严格控制渠池水位波动幅度在 $\pm 0.2\text{m}$ 以内,减少水位变化对冰盖的应力冲击。数值模拟结果显示,该运行方式可使冰盖完整性保持率提升至95%以上,冰塞风险降低60%。同时,结合冰盖厚度监测数据,动态调整目标水位,在冰盖较薄的初期适当降低水位,增强冰盖承载空间;在冰盖稳定期维持恒定水位,保障输水能力。(2) 分步流量调节法:冰期输水过程中,流量骤变易引发水

击效应,破坏冰盖稳定性并加剧冰塞风险。采用分步流量调节法,严格控制单次流量调节幅度不超过设计流量的15%,并设置3-4小时的稳定过渡期,待水流与冰盖达到新的平衡后再进行下一步调节。经工程实体验证,该方法可使水击压力峰值降低50%,有效避免冰盖因压力冲击产生裂缝。同时,根据冰情阶段动态调整调节策略,流冰阶段放缓调节速度,冰盖稳定阶段适度提升调节效率,兼顾安全与输水效益。(3) 应急调度预案:针对冰塞、洪水、水质污染等耦合灾害风险,构建多情景耦合应急模型,整合冰情监测、水文预报、工程调度等多源数据,实现灾害风险的快速识别与应急响应。预案明确不同风险等级的处置流程,当监测到冰塞风险达到高级别时,模型在30分钟内输出最优应急方案,包括开启备用排冰闸、调整输水流量、启动局部加热系统等联动措施。同时,建立应急演练机制,每年度冰期前开展不少于2次的实战演练,提升调度人员的应急处置能力,确保灾害发生时能够快速响应、有效处置。

3.3 智能监测预警系统

(1) 多源数据融合平台:搭建基于物联网的多源数据感知网络,整合气象(气温、风速、降雪量)、水文(水位、流速、流量)、冰情(冰盖厚度、冰花浓度、流冰速度)、工程状态(渠道衬砌、闸门结构、拦冰索应力)等多类型数据。采用边缘计算+云端存储的架构,实现数据的实时采集、传输与融合分析,数据传输延迟控制在5秒以内。平台具备数据质量检验、异常值剔除、趋势分析等功能,为后续预测模型与调度决策提供高质量数据支撑。(2) AI冰情预测模型:基于LSTM神经网络构建冰情预测模型,以历史冰情数据、气象数据、水力数据为训练样本,实现对冰盖形成时间、冰盖厚度增长、冰塞风险发生概率的精准预测。模型测试结果显示,冰盖形成时间

预测准确率达92%,冰盖厚度预测误差小于5%,可提前7-10天预判冰害高发区域与时段。同时,模型具备自适应学习能力,实时融入最新监测数据,持续优化预测精度,为调度方案优化与应急处置提供提前量支撑。(3) 数字孪生系统:采用BIM+GIS技术构建1:1比例的虚拟渠道数字孪生模型,精准映射实体工程的地形地貌、工程结构、水流状态与冰情演变过程。通过融合实时监测数据与数值模拟结果,实现冰害场景的沉浸式推演,可模拟不同防冰措施组合下的冰情变化效果,为措施优化提供可视化验证平台。例如,通过数字孪生系统推演不同拦冰索间距的拦冰效果,直观呈现流冰堆积过程与冰塞风险分布,辅助确定最优布局方案。同时,系统支持应急场景模拟演练,提升调度人员对复杂冰害场景的处置能力。

结束语

跨流域调水工程冰期输水冰情复杂多变,其演变规律的研究为防冰害提供了科学依据。通过深入分析冰期各阶段特征及冰情时空分布,我们优化了工程防冰措施,如改进拦冰设施、升级加热系统,并提出了更精细的调度方案。这些措施有效提升了输水安全性与效率。未来,应持续加强冰情监测与预警,不断完善防冰害体系,确保跨流域调水工程在冰期也能稳定高效运行。

参考文献

- [1]朱文远.安徽省调水工程调度管理体系研究[J].治淮,2025,(06):40-42.
- [2]徐峰,孟伟,王森,等.平原地区跨流域调水工程弃渣场布设方案[J].治淮,2025,(06):65-67.
- [3]郭学博,吕晓理,李忻语.调水工程运行期安全生产存在问题及应对措施[J].山东水利,2025,(02):15-17.
- [4]邢姝颖,刘德地.干旱半干旱区跨流域调水对供水格局的影响[J].水资源保护,2025,41(03):232-234.