

胶东调水工程冰期运行风险分析及防控措施

王国涛, 李 婷, 王义锐

(山东省水网运行调度中心烟威分中心, 山东 烟台 264000)

【摘要】以胶东调水工程为研究对象,对历年来冰期运行时间进行了回溯统计,并分析了调水期与冰期的关系,提出加强工程冰期风险辨识和防控的重要性。同时对工程范围内的输水明渠、渡槽工程、提水泵站及压力管涵进行冰期风险分析,重点对输水明渠和渡槽工程结冰的过程、原理、趋势和危害进行阐述,对提水泵站和压力管涵此类受冰期影响较小的工程进行简略性冰期潜在危害阐述,并针对性地提出了渠道、渡槽、泵站及管涵在冰期运行时的各类有效防控措施。

【关键词】胶东调水;冰期运行;风险分析;防控措施

【中图分类号】TV68

【文献标志码】A

【文章编号】1009-6159(2026)-02-0038-04

Risk Analysis and Prevention-Control Measures for Ice Period Operation of Water Diversion Project to Jiaodong Area

WANG Guotao, LI Ting, WANG Yirui

(Yanwei Branch, Water Grid Operation and Dispatching Center of Shandong Province, Yantai, Shandong 264000, China)

Abstract: Taking the Water Diversion Project to Jiaodong Area as the research object, this paper retrospectively statistics the operation duration in ice periods over the years, analyzes the relationship between water diversion periods and ice periods, and puts forward the importance of strengthening risk identification, prevention and control during the ice period of the project. Meanwhile, ice period risk analysis is carried out on open channels, aqueducts, pumping stations and pressure culverts within the project scope. The formation process, mechanism, trend and hazards of icing in open channels and aqueducts are emphatically expounded, while the potential ice-induced hazards of pumping stations and pressure culverts are briefly described, which are less affected by ice periods. Correspondingly, effective prevention and control measures for channels, aqueducts, pumping stations and culverts during ice period operation are proposed.

Key words: Water Diversion Project to Jiaodong Area; Ice period operation; Risk analysis; Prevention and control measures

山东省胶东地区引黄调水工程(以下简称“胶东调水工程”)是山东省“T”字形调水大动脉的重要组成部分,是实现全省水资源优化配置、缓解胶东地区水资源供需矛盾、改善沿线地区生态环境的战略性水利基础设施。在冬季极寒天气状况下,胶东调水工程在运行时会出现不同程度的冰情,该工况对输水效率和运行安全影响极为严重。为此对胶东调水工程历年来冰期运行时间进行了回溯统计,分析了调水期与冰期的关系,提出加强工程冰期风险辨识和防控的重要性,并提出了渠道、渡槽、泵站及管涵在冰期运行时的

各类有效防控措施。

1 冰期时间分析

1.1 冰期统计

1)冰期统计原则。因历年冰期运行时初冰、封冻、解冻及终冰观测记录不完善,所以本文无法使用胶东调水工程冰期运行实际观测记录来列举历年冰期时长。本文依靠向前追溯的原则,通过分析历年运行年度涵盖冬季月份历史气温

收稿日期:2025-08-14

作者简介:王国涛(1991—),男,工程师

的方法进行冰期重新认定。此方法虽然缺乏一定准确性,但在此时间点进行冰期时长追溯是十分必要的。

2)冰期统计方法。渠道冰情有其自身的发展规律,与气温、过水断面、流量、流速等因素相关。从初冰形成至渠道形成大面积封冻需要一定时长的负气温持续积累,根据南水北调东线二期工程冰期输水时间分析结论,以北陈屯站多年不连续实测冰期观测资料统计,从初冰到封冻的平均时间为 20 d,从解冻到终冰的平均时间为 5 d。胶东调水工程明渠范围气温相比北陈屯站略高,因此本文为方便研究,胶东调水工程此数值分别取值 20 d 和 5 d。

3)历年冰期统计。以 2015—2016 运行年度为例,该运行年度调水任务开始于 2015 年 12 月 10 日,正值严寒开始时期,终止于 2016 年 7 月 5 日。经查询可得 2015 年 12 月 10 日至 2016 年 2 月 29 日的历史气温,将选定范围的历史天气整理后可得选定范围气温图,如图 1 所示。由图 1 可知,2015—2016 运行年度胶东调水工程输水明渠封冻期可回溯认定为 2016 年 1 月 2 日至 2016 年 3 月 5 日,共计 63 d。

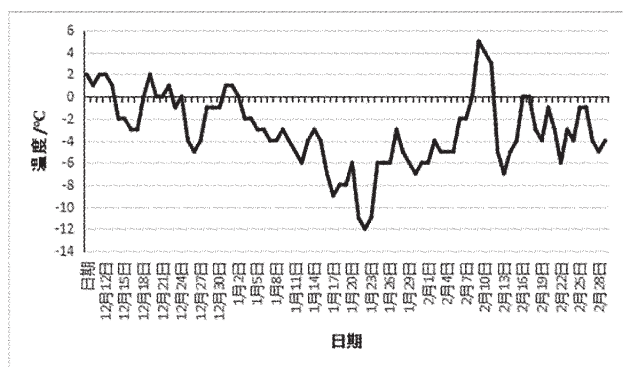


图 1 2015 年 12 月至 2016 年 3 月气温图

运用相同的原则和方法回溯可得,其它运行年度胶东调水工程输水明渠封冻期详见表 1。

1.2 调水期与冰期的关系

胶东调水工程规定运行年度为每年的 10 月 1 日至次年的 9 月 30 日。根据烟威地区对调引客水的需求程度,历年运行年度所持续的调水期时长不一致,存在调水任务提前启动或延后结束的情况。自 2015 年 12 月工程全线贯通以来,除 2022—2023 运行年度未实施调水外,其他运行年度均参与了向烟威地区调水任务。以 2016—2017

运行年度为例,该运行年度共计实施调水任务 361 d,调水期大幅度超过 3 个月的设计指标,且完整涵盖整个冰期。表 1 回溯认定的历年冰期运行时间统计了历年调水期和所涵盖冰期的数据及关系。

表 1 调水期与冰期时长表

年份	调水期/d	冰期/d	冰期占比/%
2015—2016	208	63	30.3
2016—2017	361	55	15.2
2017—2018	276	91	33.0
2018—2019	231	91	39.4
2019—2020	309	50	16.2
2020—2021	212	73	34.4
2021—2022	91	0	0
2022—2023	0	0	0
2023—2024	58	0	0

1.3 冰期风险辨识和防控的重要性

通过上述分析,胶东调水工程自全线贯通通水以来,共计 9 轮调水任务中有 6 轮调水任务有冰期运行工况发生,冰期最长时间 91 d,冰期占调水期比例为 39.4%;冰期最短时间 50 d,冰期占调水期比例为 16.2%。由此可以得出结论,胶东调水工程若启动于 12 月份之前,则该运行年度大概率要经历冰期运行(暖冬气候除外),因此在历年冰期运行的经验之上开展冰期风险辨识和提出相应防控措施十分必要。

2 冰期运行风险

2.1 输水渠道冰封

输水渠道冰封是胶东调水工程冰期运行中最显著的现象。输水渠道整个冰封过程可大致分为初冰、封冻、解冻、终冰四个阶段,阶段更替基本反应从冬季到春季的气温变化趋势。输水渠道的冰盖首先从拦冰索或者节制闸前——渠道尾部生成,尾部冰盖又继续承接上游顺水而下的流冰,冰盖逐渐向输水渠道延伸最终形成整个渠道的冰封。

输水渠道的冰封危害主要体现在封冻和解冻两个时期。在输水渠道完全冰封的运行工况下,渠道断面过水能力明显降低,水体流速显著下降,日常调度运行难度相对提高,向各分水口门分水量减少;在冰盖融化破裂时期,融化破裂的冰块会漂浮在水体表面,冰块极易在节制闸前

堆积拥堵导致渠道水位雍高。

2.2 渡槽冰封溢水

与渠道冰封过程类似,当发生极寒气温天气时,渡槽中水体首先产生大量冰花,冰花随水流而下,导致渡槽下游渠道发生严重冰塞灾害,甚至发生冰封溢水事故。

渡槽冰封溢水虽然不及渠道冰封发生普遍,一旦发生破坏力更强、危害更巨大,特别是当渡槽长度较大时,情况更为严重。冰层覆盖会显著增加渡槽结构的自重,超出设计承载能力,可能导致支撑结构变形、开裂甚至坍塌;冰的反复冻结和融化会引发材料膨胀收缩,导致混凝土剥落、钢筋锈蚀,加速结构老化;春季融冰时,流动的冰块可能撞击渡槽壁、闸门或支撑柱,造成局部破损或结构失稳;冰层占据渡槽内部空间,减少有效过水面积,导致输水流量降低,甚至完全断流溢水。

2.3 泵站冰期运行

胶东调水工程提水泵站管理设施相对完善,机电设备均在各类厂房中,故在冬季冰期运行时受影响较小,本文尝试列出极端环境造成的危害。泵站前池存在结冰情况,但因其日均水位变化幅度很大,一般不易形成冰盖,只是存在块状冰的情况;泵站设备存在冻损的可能性,低温可能造成进水口水温过低,结冰以致轴承卡死;电动蝶阀密封圈在低温下硬度增加,启闭扭矩超限率上升;低温润滑油黏度升高,电机启动电流增加,容易造成过载;低温同样影响泵站运行水利特性,冰絮聚集使泵效率下降,实测扬程损失,造成流量波动;低温水体溶解氧含量升高,泵壳汽蚀速率加快。

2.4 管涵冰期运行

胶东调水工程输水管涵全部埋设于地下1.5~2.5 m范围内,保温效果较好,冬季冰期时发生内部水体结冰、管涵主体冻裂的概率相对较小。但管涵工程段阀门井内的调流调压阀、排气阀、排水阀等在地面以上的机械设备仍存在冻裂风险,管涵工程段中高位水池、无压水池、隧洞出口竖井等露天无压点存在表面结冰的风险。主要危害表现在极寒天气气温将各类地上阀门冻裂或冻住活动件导致无法调节,露天水池水面结冰导致无法正常调节水位以及破碎冰随水流进入

压力管道造成堵塞等风险。

3 防控措施

3.1 渠道防控措施

1)合理控制水位。合理控制水位是输水渠道冰期运行最基本的控制手段。在预报寒潮来临时,加大上游来水量,沿胶东调水工程输水渠道自下而上逐级降落节制闸,分别抬高每个渠段的水位,促进渠道内水体形成冰盖,实现冰盖下输水。但应注意,蓄水位不宜高出渠道设计水位太多,以免冰盖形成位置过高,后期有塌落风险。稳定冰盖形成后,水流于冰盖下运行,此时的控制重点是维持水位波动幅度、保障冰盖强度、防止冰盖破裂。胶东调水工程一般采用控制闸前水位的方式来控制各渠段水位波动,将输水渠道内水位变化幅度控制在15 cm/h和30 cm/d以内。

2)增设拦冰索。在长距离调水工程中,拦冰索是应对冬季冰凌问题的重要设施,主要发挥拦截冰凌、减缓冰凌冲击、辅助排冰调控、改善冰情分布的作用。拦冰索的选用和布置遵循一定原则,工程所在区域的冬季气温、冰期时长、冰层厚度等参数确定拦冰索的密度和强度,输水渠道的流速、流量、断面形状等参数确定拦冰索的间距和结构。胶东调水工程输水渠道段在节制闸前设置有拦冰索,下一步应根据布置原则进行各渠段的拦冰索增设工作。

3)定点清冰。清冰也是胶东调水工程处理冬季冰封时一种重要的手段。常见的清冰措施有机械排冰、人工除冰2种方式。机械排冰指使用专用的清冰机械对渠道中的冰块进行破碎和清理。人工除冰指对于小型冰块或难以机械清理的区域所采用的人力方式。

4)设置排冰设施。远期考虑在胶东调水工程渠道中设置排冰闸、滞冰池等设施,此类设施一般布置于倒虹吸、渡槽前节制闸之前,能够有效地对冰块进行拦截和储存,再辅助布设刚性直线型水力导冰浮排,可将流冰导向指定的位置。

5)避免“武开河”。“武开河”是指河道在封冻期间,由于上下河段气温差异较大,导致冰厚、冰量、冰塞存在差异。在气温升高之际,如果水量较大,上段河道会先行解冻,而下段河道冰凌仍然固封。这时,冰水齐下,形成水鼓冰开的现象。武

开河时,大量冰块在弯曲的窄河道内容易堵塞,形成冰坝,使水位急剧上升,可能引发严重的凌汛灾害。要避免武开河,可以采取科学调度、加强凌情监测和预警、破冰除险等措施。

3.2 渡槽防控措施

1)覆盖保温材料。既然渡槽内部水体散失热量的主要方式为热辐射与热传导,那么针对性地在胶东调水工程既有渡槽覆盖保温材料能够有效的实施冬季保温。胶东调水工程既有渡槽工程部分无顶板,考虑在今后大修改造工作中加装顶板,形成封闭式渡槽以强化保温效果。同时,考虑在所有既有渡槽外壁包裹保温层(如聚氨酯泡沫、岩棉等),减少热量散失,内壁则可采用低导热材料(如复合涂层)进行涂刷降低结冰风险。

2)优化运行管理。冰期运行时渡槽内部水体的流速直接关系结冰率。输水渠道与渡槽联合调度,通过两者间起连接作用的节制闸来控制进入渡槽的水体流速是目前最常规的调度措施。具体手段为渡槽前一级的输水渠道保持相对高水位,使该节制闸前后形成水位差以增加闸后流速,但应同步注意输水渠道冰盖高度与水位相匹配以保证渠道冰盖稳定。参照输水渠道冰下输水措施,极寒天气下渡槽内部也可能形成冰盖,应保持好渡槽内部水位,保障渡槽内部冰盖稳定的同时利用冰盖及空气厚度来作为天然保温层。

3)物理防冰技术。远期考虑引入科技手段来增强渡槽冬季保温效果。比如建设渡槽电加热(伴热)系统,在渡槽腹板或底板安装电加热电缆或电伴热带,通过电能转化为热能防止结冰。亦或在渡槽底板布设曝气装置,利用气泡扰动破坏冰层形成,同时促进水体上下混合,抑制表层结冰。还可以在渡槽上布置热力循环系统,设备从渡槽抽取客水进行加热后再定点注入渡槽,形成局部升温区,也可以有效抑制冰晶生成堆积。

3.3 泵站防控措施

胶东调水工程既有泵站均建设有完善的主副厂房等建筑物,其布设的水泵、管道、线路等环境温度相对稳定,不易发生结冰事故。针对前文提及泵站冰期可能发生的风险,应加强值班值守,及时关注前池冰情及机电设备运行状况;定期检查水泵机组的润滑系统,并根据需要更换润滑油,确保选用适合低温环境的润滑油;定期检

查水泵的密封情况,确保密封件不会因收缩或膨胀导致泄漏;检查阀门是否能正常工作,特别是放气阀和排水阀,以保证它们能在需要时迅速反应。

3.4 管涵防控措施

地下管涵在冬季运行时内部水体结冰概率很小,但胶东调水工程发生过地上布置的排气阀冻裂造成漏水事故的情况。针对排气阀冻裂问题,应重点关注其厂房的保温性能是否达标,对厂房门窗进行密闭性处理;选择导热系数小、吸水率低、耐腐蚀性好的保温材料,如聚氨酯泡沫、玻璃棉、岩棉、硅酸盐等对阀体进行包裹保温措施;对厂房内明处设置的管道和设备进行均匀涂抹保温材料。密切关注管涵段水池无压点的表面结冰情况,如若碎冰过多应进行人工清冰,但考虑到各水池进出水管道均设置在水池底部,故浮冰造成的危害不显著。另外须注意一点,若某运行年度冬季不运行,还应在冰期前及时将管涵内的积水通过排水阀放空,杜绝结冰情况的发生。

4 结语

随着社会经济不断发展,胶东地区客水需求量正逐年增加,胶东调水工程未来将承担的调水任务愈加繁重。解决好冰期输水问题是管理好胶东调水工程调度运行工作的一环。因此,应进一步加大科技投入,切实解决好工程冰期运行面临的各类风险,保证工程稳定运行。

参考文献

- [1] 孙天青,梁学玉.南水北调东线二期工程冰期输水时间分析[J].海河水利,2022(S1).001:52-55,69.
- [2] 穆祥鹏,陈文学,崔巍,等.长距离输水渠道冰期运行控制研究[J].南水北调与水利科技,2010,8(1):8-13.
- [3] 何亮,河冰形成演变的二维河冰模型研究[J].水利水电工程,2011(4):56.
- [4] 王国涛.胶东调水工程管道段运行方法及应急策略.水电站机电技术[J].2022,45(5):92-95.
- [5] 白萍萍,曲希明,吴奇,等.基于胶东调水工程的新时代山东调水事业高质量发展的分析与建议[J].水利水电技术(中英文),2024,55(S2):1-7.
- [6] 吕东立,孙熙,张京,等.胶东地区引黄调水骨干工程将全面开工[J].山东水利,2004(10):4-5.
- [7] 张建国,跨流域调水工程环境保护设计研究[J].治淮,2018(8):52-53.

(责任编辑 赵其芬)