

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtj.2018.0136

穆祥鹏, 陈云飞, 吴艳, 等. 冰水二相流渠道流冰输移演变规律及其安全运行措施研究[J]. 南水北调与水利科技, 2018, 16(5): 144-151. MU X P, CHEN Y F, WU Y, et al. Research on ice transport evolution rules and safe operation measures of ice water two phase flow canal[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2018, 16(5): 144-151. (in Chinese)

冰水二相流渠道流冰输移演变规律及其安全运行措施研究

穆祥鹏¹, 陈云飞¹, 吴艳², 陈文学¹, 文镒³

(1. 中国水利水电科学研究院 流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100038;

2. 新疆水利水电科学研究院, 乌鲁木齐 830049; 3. 新疆伊犁河流域开发建设管理局, 乌鲁木齐 830000)

摘要: 针对我国新疆、青海地区为数众多且无法采用冰盖下输水的宽浅式渠道工程, 开展冰水二相流输运机理及运行调控技术研究, 对于解决这些地区冬季用水矛盾、节省工程改造投资具有重要意义。以新疆北部地区某电站引水渠为例, 通过构建一维渠道冰水力学数学模型, 研究渠道流冰输移和发展规律, 分析气温、出库水温、输水流量等关键因素对渠道冰情的影响, 并提出冰水二相流渠道的安全运行措施, 对实现冰水二相流安全水力调控、解决我国西北地区冬季缺水问题具有一定参考价值。

关键词: 冰期输水; 冰水二相流; 冰水力学; 数值模拟; 水力调控

中图分类号: TV 122 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-1683(2018)05-0144-08

Research on ice transport evolution rules and safe operation measures of ice water two phase flow canal

MU Xiangpeng¹, CHEN Yunfei¹, WU Yan², CHEN Wenxue¹, WEN Rong³

(1. State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China; 2. Xinjiang Institute of Water Resources and Hydropower Research, Urumqi 830049, China; 3. Administration of Development Construction of Xinjiang Yili River Basin, Urumqi 830000, China)

Abstract: In view of the fact that there are many wide shallow canal projects that cannot transfer water under the ice cover in winter in Xinjiang Autonomous Region and Qinghai Province, we studied the transport mechanism and operation regulation techniques of ice water two phase flow. It has important significance to solving the problem of water shortage during winter in these areas. Taking the drainage canal of a power station in northern Xinjiang Region as a case study, we constructed a one dimensional mechanical mathematical model of canal ice and water to study the characteristics of ice transport and evolution. We analyzed the influence of key thermodynamic factors on ice, including air temperature, outbound water temperature, and water transfer volume. Finally, we proposed some safe operation measures for ice water two phase flow canal. This study has some reference value for realizing the safe hydraulic control of ice water two phase flow and solving the water shortage problem in winter in the northwest of China.

Key words: water transfer in freezing period; ice water two phase flow; ice water mechanics; numerical simulation; hydraulic control

收稿日期: 2018-05-16 修回日期: 2018-08-21 网络出版时间: 2018-08-29

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20180827.1543.004.html>

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFC0405003); 国家自然科学基金(51579251); 中国水科院科研专项(HY0145B642017)

Funds: National Key R & D Program of China (2017YFC0405003); National Natural Science Foundation of China (51579251); Special Scientific Research Fund of IWHR(HY0145B642017)

作者简介: 穆祥鹏(1979-), 男(回族), 天津人, 教授级高级工程师, 主要从事冰水力学、调水工程水力学研究。E-mail: swood2002@163.com

通讯作者: 陈文学(1965-), 男, 湖北武穴人, 教授级高级工程师, 主要从事冰水力学、调水工程水力学研究。E-mail: iaehr2008@qq.com

冰盖下输水是高纬度地区渠道工程在冬季的主要运行方式,利用冰盖的隔热作用,使水体在冰盖下输运。但是在我国青海、新疆等西北地区有一类渠道工程,其设计时未考虑冬季运用,随着地区经济社会发展,冬季缺水问题日益凸显,实现这些渠道冰期安全运行成为解决区域冬季水资源短缺的关键。这些渠道工程多采用宽浅式断面,而我国西北高寒区的最大冰盖厚度又多在 1 m 以上,若采用结冰盖输水,冰盖下输水空间往往不足,甚至会面临床全部被冰体充满的风险^[1]。开展冰水二相流明渠浮冰输运机理及调控技术研究,实现这些宽浅式渠道冬季冰水二相流输水,既可解决冬季用水矛盾,又能节省工程改造投资,对解决我国西北地区冬季缺水问题具有重要意义。

国内外对冰水二相流的研究是从河冰演变机理开始的。河渠中的流冰主要由冰花团、冰盘、毯状冰层、浮冰块等组成,原型观测表明,漂浮于水面的流冰表面疏密度最大可达 90%~100%,厚度可达 20~30 cm^[2,3]。大量流冰随水流输移,当流冰量超出渠道输冰能力时,流冰就会在水面停滞堆积形成冰桥,并进一步发展为冰盖,冰水二相流的输水模式即遭到破坏。由于冰水二相流输水要求大流量、高流速,一旦渠道内某个断面形成冰盖,后续顺流而下的流冰会大量钻入下游冰盖下,很容易发生冰塞险情。因此流冰生成演变机理及其沿渠道输移规律是冰水二相流输水研究的关键点。Matousek^[4]通过对 Ohio 河的观测,提出了浮冰和水内冰形成的经验判别法则。Osterkemp^[5]与 Omstedt 等^[6]就水内冰的形成进行了初步分析与数值计算。Lal 等^[7]提出了一维数值模拟河冰过程的 RICE 模型,考虑了水内冰输移、冰盖形成与发展过程。Hammar 等^[8]应用二维紊流模型,考虑热力增长、二次结晶和絮凝,对冰晶演变进行了模拟和研究。Shen 等^[9]对河冰动态输移过程进行研究,提出了冰盖下输冰能力和水流强度之间的关系表达式。国内学者也在该领域开展了一系列重要研究工作,吴剑疆等^[10]建立了河道中水内冰形成及演变的垂向二维紊流数学模型,对敞流式河道水内冰演变过程及水温和体积分数分布规律进行了分析。茅泽育^[11]针对弯曲复杂的天然河道边界,应用水动力学和热力学等原理,建立了适体坐标下的二维河冰数值模型。王军等^[12]基于固液两相流理论,研究了水内冰运动轨迹和初始冰塞的演变过程。王晓玲等^[13]建立了三维非稳态 Euler-Euler 两相流 k-ε 紊流模型,以新疆某水电站引水渠道为例,模拟分析了

气温变化条件下流速、水温、冰温及冰体积分数的沿程分布。

从上述研究成果看,关于冰水二相流的研究主要集中在河道中水内冰的形成机理和分布规律,对于渠道水内冰输运机理、影响因素以及相关水力调控机理的研究还不多见,渠道水力安全调控和冰害防治成果很少,如蒋志勇^[14]、罗志鑫^[15]结合新疆地区发电引水渠道冬季运行实际情况,对产冰过程及冰量、排冰实践进行了分析,提出了加大流量、排冰、水体加温等工程建议。张润杰^[16]对乌鲁木齐河青年渠冰塞成因进行了分析,提出了排冰、为渠道加设盖板等工程措施。总体而言,已有渠道冰水二相流输水调控成果仍以实践经验为主,冰水二相流输水尚缺乏有效的理论指导。

本研究以新疆北部地区某电站引水渠道为例,通过构建一维渠道的冰水力学数学模型,模拟渠道工程沿线的水温、冰情发展过程,研究输水渠道沿程水温变化规律、流冰输移和发展规律,分析气温、输水流量、出库水温等关键因素对渠道冰情的影响,并提出了长距离渠道冰水二相流输水的冰情调控措施,为实现渠道工程冰水二相流安全输水提供科学依据。

1 一维冰水二相流输水数学模型

在一维渠道冰水力学模型建立时,假定渠道沿程生成的流冰在顺流而下的过程中不会在桥墩、闸墩等部位发生卡堵,这种假设能基本满足分析冰水二相流渠道沿程水温变化规律、流冰生成和输移演变规律的研究目标。相关数学模型如下。

1.1 非恒定流模型

考虑浮动冰盖影响的渠道一维非恒定流可用圣维南方程组^[16]表示:

$$B = \frac{\partial y}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{1}{gA} \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{2Q}{gA^2} \frac{\partial Q}{\partial x} + \left(1 - \frac{BQ^2}{gA^3}\right) \frac{\partial y}{\partial x} + S_f - S_0 + \frac{\rho_i}{\rho} \frac{\partial h_i}{\partial x} = 0 \quad (2)$$

式中: B 为渠道宽度; Q 为流量; A 为过水断面面积; S_f 为水力坡降; S_0 为渠道底坡; ρ_i 、 ρ 分别为冰和水的密度; h_i 为冰盖厚度; $\frac{\rho_i}{\rho} \frac{\partial h_i}{\partial x}$ 为因冰盖厚度沿程变化而产生的当量坡度。

1.2 热交换模型

水与外界之间的热交换是影响水温、冰情发展的关键因素。水与大气的热交换包括太阳短波辐射、大气长波辐射、水面蒸发凝结热和自然对流热交换,其

计算需要获得气温、风速、太阳辐射、湿度、云量、降水等气象数据。但本研究所针对的新疆北部某电站引水渠道地处偏僻,所在区域仅有气温数据观测,缺乏其他数据。这种情况下常采用简化方法,将水面与大气的单位面积热交换表示为气温和水温的线性函数^[17]:

$$S_1 = h_{wa}(T_w - T_a)^\beta \quad (3)$$

式中: T_w 为水温; T_a 为气温; h_{wa} 为大气和水面的热交换系数,同纬度地区该系数大致相同,在我国北方高纬度地区一般取 20 左右; β 为经验系数,一般取 1~2,针对新疆北部地区的气温特点,可取为 1.5。

水体表面形成浮冰或冰盖后,水与冰盖之间的热交换可采用 Ashton^[14] 提出的水和冰盖线性热交换公式计算。水与渠床之间的热交换影响很小,通常忽略不计。

1.3 水流的非恒定温度场

渠道水流的非恒定温度场可由一维对流扩散方程描述:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho C_p A T_w) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho C_p Q T_w) = \frac{\partial}{\partial x}(A E_x \rho C_p \frac{\partial T_w}{\partial x}) + B \sum S \quad (4)$$

式中: C_p 为水的比热; E_x 为水流综合扩散系数或混合系数。

1.4 流冰生成及输移扩散模型

一维水内冰扩散方程可写为:

$$\frac{\partial C_i}{\partial t} + V \frac{\partial C_i}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x}(E_i \frac{\partial C_i}{\partial x}) + \frac{B(1 - C_a)S}{\rho_i A L_i} - \frac{(\theta \omega_i C_i - \omega_i)B}{\rho_i A} \quad (5)$$

式中: C_i 为水内冰体积含量,是单位长度渠道内水内冰体积与水体和水内冰总体积之比; E_i 为水内冰的纵向扩散系数; θ 为水内冰上浮概率; ω_i 为水内冰上浮的平均速度; ω_i 为浮冰下水内冰堆积层被冲刷减少的速度; L_i 为冰的潜热; C_a 为水面冰封率,即单位长度河段上冰封面积与河面面积的比值。

水面浮冰的输运方程可写为:

$$\frac{\partial}{\partial t}\{\rho_i[h_s + (1 - e_f)h_f]BC_a\} + \frac{\partial}{\partial t}\{\rho_i[h_s + (1 - e_f)h_f]BC_aV\} = \frac{C_a B \sum S}{L_i} + \theta \omega_i C_i B - \omega_i B \quad (6)$$

式中: h_s 为浮冰块的坚冰层厚度; h_f 为浮冰块底部的水内冰堆积层厚度; e_f 为水内冰堆积层的孔隙率。

1.5 模型求解与验证

各控制方程通过差分法求解,浮动冰盖条件下的非恒定流模型采用无条件稳定的 Preismann 四点隐格式求解。非恒定温度场模型和流冰生成及输移扩散模

型均属于对流扩散方程,采用 Wendroff 隐格式求解。

由于新疆北部某电站引水渠道缺乏水情、冰情的原型观测数据,因此采用新疆同纬度地区的某发电引水渠道原型观测数据,对冰期输水数学模型进行验证。该渠道全长 15.2 km,采用冰盖下输水。根据某次原型观测成果得到的水温、冰情、水流的边界条件和初始条件以及气温数据,对其冰期输水过程进行模拟。渠首自河道取水,渠道输水流量 14.0 m³/s,入渠水温为 0.1 °C,无河道冰花入渠。图 1 为原型观测得到的 1995 年 10 月 18 日至翌年 4 月 24 日的日均气温过程。图 2 为对应时段内渠道末端断面冰厚实测数据与模拟结果的对比,该断面模拟的平均冰厚最大值为 1.22 m,而实测断面平均冰厚最大值为 1.16 m,个别部位达 1.26 m,模拟结果与实测结果吻合较好,所建立的一维冰水力学模型精度能够满足计算分析与工程应用要求。

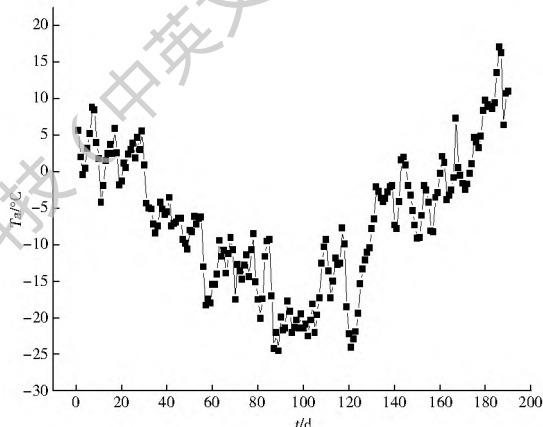


图 1 新疆北部某渠道 1995-1996 年冬季日均气温
Fig. 1 The daily average air temperature of a canal in northern Xinjiang during winter of

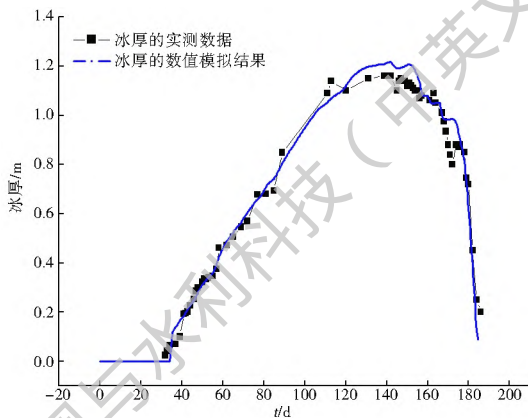


图 2 渠道末端断面冰厚实测数据与模拟结果的对比
Fig. 2 The measured data and the simulation results of the ice thickness at the end of the canal

2 冰水二相流渠道冰情特性分析

利用所建立的一维渠道冰期输水数学模型,对

新疆北部某电站引水渠道的冰水二相流输水过程进行模拟,对渠道冰情特性和冰情影响因素进行分析。

2.1 工程概况

该电站引水渠全长 58.7 km,其输水横断面为梯形,底宽 4 m,边坡系数 1:2,属宽浅式渠道。渠道纵坡 1/8000,设计糙率 0.0126。该渠道工程自上游水库引水,自流输水至下游电站,单台机组发电时输水流量为 35 m³/s,两台机组发电时输水流量为 70 m³/s。

该渠道工程所在区域冰期为 11 月至翌年 3 月,冬季历时长,历年最低日均气温达 -38℃。由于输水渠道在过水断面的形式和结构设计上未考虑冰盖阻流和冰盖荷载影响,不能采用冰盖下输水。保温、增热等工程措施均因恶劣的自然条件、投资及维护成本较大等原因无法实施,冰水二相流输水则成为唯一可行的冰期输水方案。

该渠道输水距离较一般的电站引水渠长,渠道沿线上建有 11 座交通桥、4 座节制闸(位置节点见表 1),这些桥墩、闸墩所在的束窄断面均属容易发生流冰卡堵封冻的部位,特别是随着流程延长,断面流冰量逐渐增加,位于渠道最下游的几座交通桥和渠道最末端的 4 号节制闸等过水断面均是重点防范冰害发生的关键节点。

该工程所面临的自然气候条件及工程运行条件极为恶劣,实现冰水二相流安全输水具有较大难度。工程自 2011 年冬季投入运行以来,积累了一定的运行经验,尽管近年来工程所在区域连续多年均为暖

冬,但在极端寒潮侵袭情况下也多次面临冰害险情,急需开展冰水二相流输移演变规律研究,为工程冰期安全运行提供理论依据。

2.2 数值模拟计算条件

(1) 模拟范围。冰期输水模拟时间范围为 11 月 16 日至翌年 3 月 31 日,涵盖整个冬季。在下文分析中,以 11 月 16 日作为第 1 天,以此类推。模拟渠道范围为渠首至电站前池 58.7 km 的输水渠道。(2) 气象条件。以工程所在区域某气象站比较有代表性的三个冬季的日均气温数据作为气象输入数据,见图 3。所选取的三个冬季 12 月至翌年 2 月的日均气温分别为 -12.65℃、-13.94℃、-14.83℃。按照日均气温的高低,分别作为本研究的暖冬、平冬和冷冬气象输入数据。(3) 水情、冰情控制条件。渠道末端水深 3.1 m,冬季输水时渠道沿线 4 座节制闸全开,不对渠道流量和水位加以控制。计算时假定整个冬季输水流量不变,且流冰不会在渠道某个断面卡堵封河。(4) 水温、冰情边界及初始条件。假定冬季水库入渠水温恒定,同时整个冬季无水库流冰进入渠道。假定输水工程沿线在计算初始时刻的水温等于相应时刻及对应地点的气温,计算初始时刻气温尚大于 0℃,输水工程全线不存在冰情。(5) 该输水工程在距离渠首 5.73 km 处有一段 1.7 km 长的隧洞工程,该隧洞底板是否处于恒温层尚无法确定,故暂不考虑隧洞对水体的增温影响,按照隧洞保温性能良好,隧洞内水体不失热进行考虑。

表 1 冰情分析的关键断面

Tab. 1 Critical sections of the canal for ice analysis

| | | | | | |
|------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 桩号 | 3+318 | 5+733 | 10+533 | 11+423 | 14+285 |
| 节点名称 | 2号公路桥 | 隧洞进口 | 3号交通桥 | 1号节制闸 | 红旗村交通桥 |
| 桩号 | 19+239 | 31+980 | 57+975 | 58+400 | 58+718 |
| 节点名称 | 2号节制闸 | 3号节制闸 | 16号交通桥 | 4号节制闸 | 电站前池 |

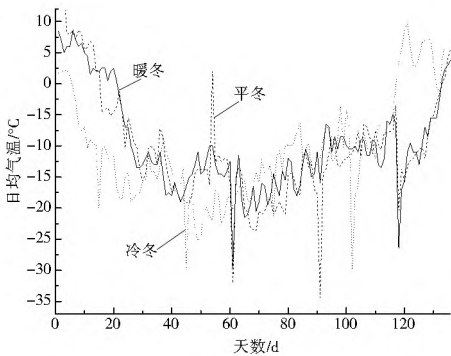


图 3 计算所用的 3 个典型年的气温-时间序列 (11 月 16 日至翌年 3 月 31 日)

Fig. 3 Air temperature in three typical years (November 16 to March 31 of the following year)

2.3 渠道沿程冰情分布的基本规律

以冷冬年,水库取水温度 0.4℃、输水流量 70 m³/s 作为输入数据,对渠道冬季输水过程进行模拟。由图 3 可知,渠道所在地区冷冬年共经历了 3 次较为突出的寒潮降温过程。图 4 为各节制闸前、最下游公路桥前以及渠道末端的冰凌流量过程。计算结果显示渠道冰凌流量有 3 次较为明显的升高,反映了这 3 次较大寒潮的影响。

渠道隧洞进口断面及其上游渠段在冬季基本不会出现水温低于 0℃的情况,没有冰情发生,渠道沿线越向下游水温降至冰点以下的时间越长,2 号节

制闸(桩号 19+ 239)下游各断面几乎在整个冬季都处于冰点,时间均在 90 d 以上。从图 4 可以看出,1 号、2 号节制闸的流冰量都不大,最大值分别为 0.37 m³/s 和 1.18 m³/s,2 号节制闸前冰流量过程时间稍长,约为 60 d 左右。从 2 号节制闸往下游,渠道的冰流量随着流程的增加而逐渐加大,3 号节制闸前(31+ 980)、最下游公路桥前(57+ 975)、4 号节制闸前(58+ 400)的最大冰凌流量分别为 2.49 m³/s、4.99 m³/s、5.03 m³/s,渠道最末端(58+ 718)的冰凌流量可达 5.06 m³/s。图 5 为断面最大冰凌流量与流程的关系。从图上可以看出随着流程的增加,顺流而下的流冰以及沿途因水体不断失热而新生成的流冰会越积越多,基本呈线性关系,平均每公里冰凌流量增加 0.1 m³/s,最大冰凌流量出现在渠道末断面。

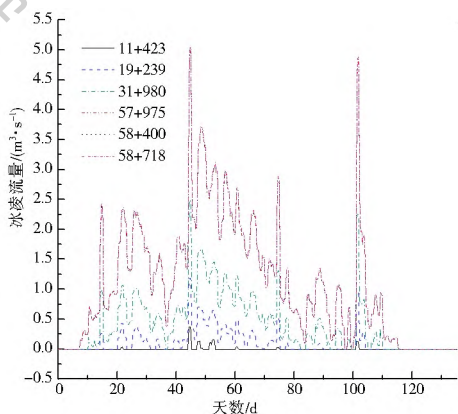


图 4 各节制闸前、最下游公路桥前以及渠道末端的冰凌流量

Fig. 4 Ice flow in front of each control gate, before the most downstream bridge, and at the end of the canal

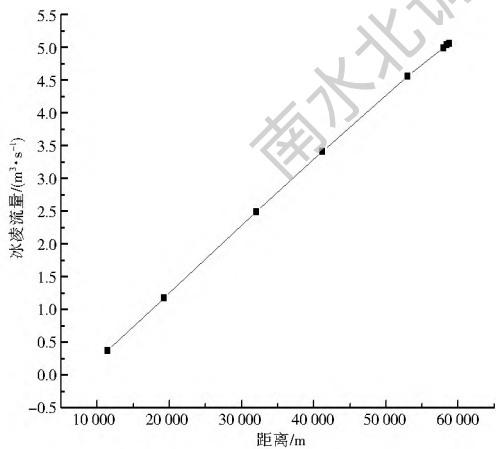


图 5 冰凌流量与流程的关系

Fig. 5 The relationship between ice flow and flow distance

2.4 气温条件对渠道冰情的影响

由渠道沿程冰情分布规律来看,渠道冰情的分布与气温条件有着显著联系。由于水库取水温度较低,当气温降至零下后,水温也很快降至冰点,此时渠道进入冰期。第一次寒潮来临的时间决定了渠道

进入冰期的时间。图 6 为不同冬季典型年条件下渠道末端冰凌流量过程(水库取水温度 0.4℃、渠道输水流量 70 m³/s)。各典型年下的渠道末端的冰凌流量变化过程与气温的起伏过程具有显著的相关性,气温降低则渠道生成的冰凌增多,顺流而下的冰凌流量加大,则渠道末断面的冰凌流量就大;气温升高则渠道生成的冰凌量小,顺流而下的冰凌流量也相应较少,则渠道末断面的冰凌流量就小。本次计算结果显示暖冬和冷冬条件下的渠道最大冰凌流量分别为 4.55 m³/s 和 5.06 m³/s,明显小于平冬年时最大冰凌流量 6.37 m³/s,这是因为平冬最大冰凌流量发生时的极端气温值达到了 -34.4℃。可见气象学上定义的冷冬、平冬、暖冬反映的是冬季最冷三个月的平均气温值,但是渠道所能达到的最大冰凌流量却与冬季气温极值紧密相关。

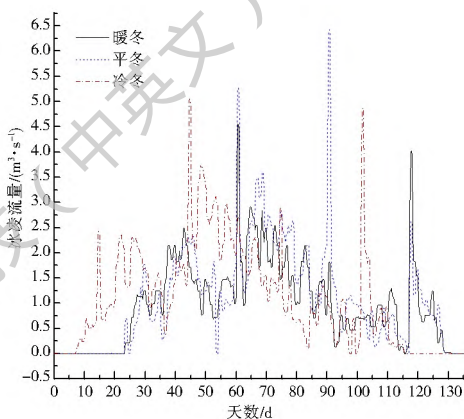


图 6 不同典型年,渠道末端冰凌流量过程

Fig. 6 Ice flow process at the end of the canal in different typical years

在渠道输水流量 70 m³/s、水库取水温度 0.4℃的工况条件下,通过数值模拟可获得的不同气温条件下的渠道最大冰凌流量。图 7 为日均气温与平均最大冰凌流量值的关系,也反映了寒潮降温对于冰凌流量的影响。根据图 7 可以拟合得到日均气温与平均最大冰凌流量值的关系,如下:

$$Q_{i\max} = -0.12789 - 0.07517x + 0.0034x^2, \quad t < -2 \quad (10)$$

式中: $Q_{i\max}$ 为平均最大冰凌流量(m³/s); t 为日均气温(℃)。

由式(10)可知, -15℃气温条件下,渠道最大冰凌流量的平均值为 1.57 m³/s,最大冰凌流量 1.80 m³/s; -20℃气温条件下,渠道最大冰凌流量的平均值增加到 3.41 m³/s,最大冰凌流量可达 4.83 m³/s。若出现连续多天气温低于 -20℃的情况,冰凌流量还将更大,因此当气温低于 -20℃,需要增加下游桥梁及闸门前的冰情、水情观测频次,做好冰灾应急准备工作。

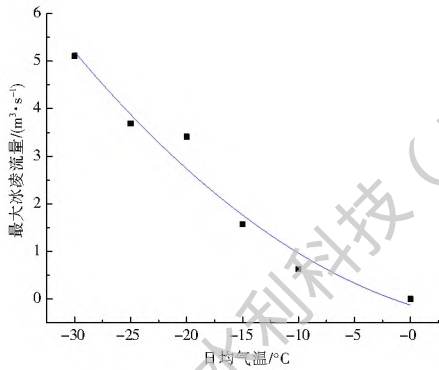


图7 日均气温与平均最大冰凌流量的关系

Fig. 7 The relationship between daily air temperature and average maximum ice flow

2.5 水库取水水温对渠道冰情的影响

由于渠道工程自上游水库引水,水库取水温度会对渠道的冰情产生一定影响。在冷冬年、输水流量为 $70 \text{ m}^3/\text{s}$ 条件下,分别给定不同出库水温,通过数值模拟分析水库取水温度对渠道沿途冰情的影响。图8为冷冬年、输水流量为 $70 \text{ m}^3/\text{s}$ 条件下,计算得到的水库取水温度与渠道最大冰凌流量的关系。结果显示水库的取水温度越高,水体本身抗冰冻影响的热量越大,同气温、水力条件下渠道产生的冰凌流量就越小。取水温度为 $0.0 \text{ }^\circ\text{C}$ 时,渠道最大冰凌流量为 $5.82 \text{ m}^3/\text{s}$,当取水温度增加至 $1.0 \text{ }^\circ\text{C}$ 时,渠道最大冰凌流量可减少 $1.48 \text{ m}^3/\text{s}$,降至 $4.34 \text{ m}^3/\text{s}$ 。而且冰凌流量大于 $1.0 \text{ m}^3/\text{s}$ 的断面可以由桩号 $13+315$ 退后至桩号 $25+590$,冰凌流量大于 $1.0 \text{ m}^3/\text{s}$ 的渠段缩短 12.275 km 。

根据图8,可以得到水库取水温度与渠道最大冰凌流量的关系,见式(11)。

$$Q_i = -5.03T^4 + 6.52T^3 - 0.58T^2 - 2.36T + 5.80 \quad (11)$$

式中: Q_i 为冰凌流量(m^3/s); T 为水库取水温度($^\circ\text{C}$)。

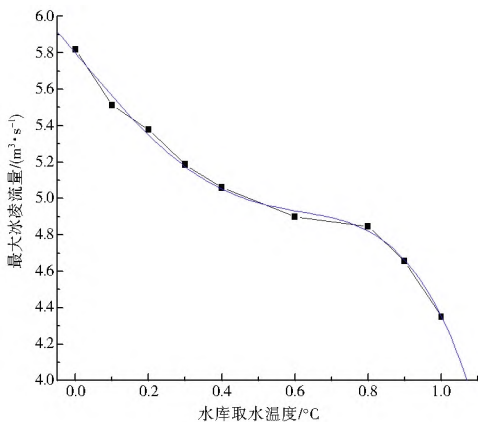


图8 水库取水温度对渠道最大冰凌流量的影响

Fig. 8 The influence of water intake temperature on the maximum ice flow rate of the canal

通过上述分析可知,如果从水库深层取水,使水库取水温度有所提升,则无论是渠道的最大冰凌流量,还是渠道重点防冰范围都会大大减小,对于渠道防冰形势能得到很大缓解。

2.6 输水流量对渠道冰情的影响

在研究中发现,水力条件也会影响热力交换和冰冻过程,其中以流量影响较为显著。以冷冬条件、水库取水温度 $0.4 \text{ }^\circ\text{C}$ 为例,分析渠道输水流量对于渠道冰情的影响。输水流量分别采用单台发电机组时的 $35 \text{ m}^3/\text{s}$ 和两台发电机组时的 $70 \text{ m}^3/\text{s}$ 。计算表明,在冬季气温低于 $0.0 \text{ }^\circ\text{C}$ 的时间段内(第9天至第118天),小流量时的水温低于大流量时的水温(均处于过冷状态);在春季气温回升至 $0.0 \text{ }^\circ\text{C}$ 以上时(如第118天至136天),小流量时的水温则高于大流量时的水温。表明输水流量越小,水温受气温的影响越显著。

图9和图10分别为两种输水流量下,渠道末断面(58+718)的冰凌流量和冰水体积比。输水流量 $35 \text{ m}^3/\text{s}$ 时,渠道末断面的最大冰凌流量为 $4.17 \text{ m}^3/\text{s}$,而输水流量 $70 \text{ m}^3/\text{s}$ 时,渠道末断面的最大冰

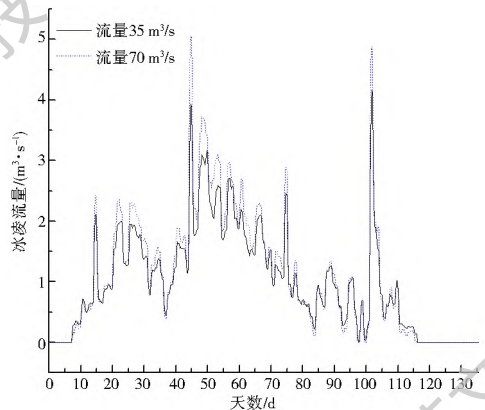


图9 不同输水流量,渠道末断面冰凌流量过程

Fig. 9 Ice flow process at the canal end section under different water flow rates

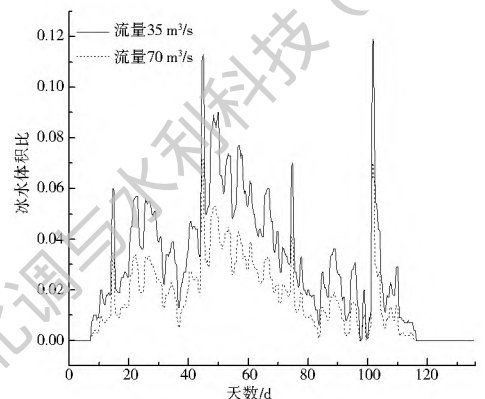


图10 不同输水流量,渠道末断面冰水体积比过程

Fig. 10 Ice water volume ratio at the canal end section under different water flow rates

凌流量较大,为 $5.06\text{ m}^3/\text{s}$ 。但是小流量时的冰水体积比为 11.9% ,大于大流量时的 7.2% 。

总体来看,输水流量的大小对于冰期输水有一定的热力影响,小流量的水温更易受气温的影响,小流量时的冰水体积比也较大,但是大流量条件下的冰凌总体积更大。尽管如此,输水流量的不同所带来的热力影响是比较有限的,其热力影响对于渠道冰期运行的影响并不大。

实际上,输水流量不同所带来的水力影响才是需要重点考虑的因素,大流量条件下,水流弗汝德数和水流流速均较大,因此渠道的输冰能力更大,更不容易结成冰盖。就这点而言,采用冰水二相流模式输水的渠道应尽可能采用大流量的输水工况,以保证冰期安全。

3 结论与建议

(1) 实现冰水二相流安全输水关键是保证渠道内生成的流冰能够沿渠道向下游顺利输移,需通过增大流量、提高流速增加渠道各断面的输冰能力,使输冰能力能始终大于渠道流冰量。由以上数值模拟结果及相关分析可知,随着流程的增加,顺流而下的流冰以及沿途因水体不断失热而新生成的流冰会越积越多,冰凌流量基本随流程呈线性关系增加。被桥墩、闸墩所束窄的过水断面是渠道中过冰能力相对较小的位置,所以位于输水工程中下游的桥墩、闸墩断面都是冰期需要重点监测的断面。对于本研究所针对的渠道工程而言,桩号 $57+975$ 的16号交通桥、桩号 $58+400$ 的4号节制闸均是冰期需要重点设防的断面。

(2) 若流冰能在渠道沿线安全通过,最大冰凌流量必然出现在渠道末端断面,这些顺流而下的冰凌需要由渠道末端设置的排冰闸排除。排冰闸的设计排冰能力需要大于渠道的输冰能力,同时还要考虑排冰所耗水量,以保证电站发电任务不受影响。

(3) 本研究所模拟的电站引水渠长度 50 km ,相较于一般的长距离调水工程而言,长度较小,因此提高水库的取水温度对于改善渠道冰情效果较为显著。如果可以从水库深层取水,使得水库取水温度有所提升,无论是渠道的最大冰凌流量,还是渠道重点防冰的范围都会大大减小,对于渠道工程的防冰形势能得到很大程度的缓解。就本工程而言,冷冬年、输水流量为 $70\text{ m}^3/\text{s}$ 条件下,当取水温度由 $0\text{ }^\circ\text{C}$ 增加至 $1.0\text{ }^\circ\text{C}$ 时,渠道最大冰凌流量可由 $5.82\text{ m}^3/\text{s}$ 降至 $4.34\text{ m}^3/\text{s}$,而且冰凌流量大于 $1.0\text{ m}^3/\text{s}$ 的渠段缩短 $12\text{ }275\text{ km}$ 。

(4) 增加输水流量对渠道所带来的热力影响很小,从热力学角度看对于渠道冰期运行的影响并不大。但是增加输水流量可增大输水流速和水流弗汝德数,能有效增加渠道输冰能力。对于本电站引水渠道而言,当气温较低或极端寒潮即将到来时,应尽可能采用两台机组发电运行。

(5) 气象学上定义的冷冬、平冬、暖冬反映的是冬季平均气温情况,但是渠道所能达到的最大冰凌流量却与冬季气温极值紧密相关。所以即使气象预报当年为暖冬,仍需要加强渠道冰情、水情监测,做好应对极端寒潮的准备工作 and 应急预案。对于本工程而言, $-20\text{ }^\circ\text{C}$ 气温条件下,渠道最大冰凌流量可达 $4\text{ }83\text{ m}^3/\text{s}$ 。若出现连续多天气温低于 $-20\text{ }^\circ\text{C}$ 的情况,冰凌流量还将更大,因此当气温低于 $-20\text{ }^\circ\text{C}$,需要增加下游桥梁及闸门前的冰情、水情观测频次,做好冰灾应急准备工作。

(6) 对于渠道工程而言,桥墩、闸墩对于流冰的拦蓄影响甚至超过弯道。冰水二相流渠道一旦发生冰凌堵塞,将会迅速发展为冰塞,造成凌汛灾害。因此,建立水力条件、浮冰条件与墩柱断面输冰能力之间的定量关系,是确定冰水二相流渠道安全输冰流量的关键,也是今后冰水二相流渠道水力控制研究的重点。

参考文献(References):

- [1] 穆祥鹏,陈文学,郭晓晨,等.高纬度地区渠道无冰盖输水的冰情控制研究[J].水利学报,2013,44(9):1071-1079.(MU X P, CHEN W X, GUO X C, et al. Study on long-distance water transfer channel with thermal insulation cover in winter[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2013, 44(9): 1071-1079. (in Chinese)) DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.2013.09.016.
- [2] MARTIN J, BERNARD T. Mitigation of elevated river freeze-up levels by revised Flow regulation[C]. CGU HS Committee on River Ice Processes and the Environment 15th Workshop on River Ice St. John's, Newfoundland and Labrador, 2009: 15-17.
- [3] 阿达来提,侯杰,喻尚生.新疆输水工程冰害防治研究与展望[J].水利与建筑工程,2010(3):46-49.(A DA L T, HOU J, YU S S. Study and prospect of ice damage prevention and control in Xinjiang's water conveyance projects[J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2010(3): 46-49. (in Chinese)). DOI: 10.3969/j.issn.1672-1144.2010.03.013.
- [4] MATOUSEK V. Types of ice run and conditions for their formation[A]. IAHR Ice Symp, 1984, 1: 315-327.
- [5] OATERKAMP T E. Frazil ice formation: a review[J]. Journal of the Hydraulics Division, 1978, (4): 1239-1255.
- [6] OMSTEDT A. Modeling frazil ice and grease ice in the upper layers of the ocean[J]. Cold Regions Science and Technology, 1985, 11(1): 87-98. DOI: 10.1016/s0165-232x(98)00011-1.
- [7] LAL A M, SHEN H T. Mathematical model for river ice

- processes[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1991, 117(7): 851-867. DOI: 10.1061/(asce)0733-9429(1991)117:7(851).
- [8] HAMMAR L, SHEN H T. Frazil evolution in channels[J]. Journal of Hydraulic Research, 1995, 33(3): 29F-306. DOI: 10.1080/00221689509498572.
- [9] SHEN H T, WANG D S. Under cover transport and accumulation of frazil granules[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1995, 120(2): 184-194. DOI: 10.1061/(asce)0733-9429(1995)121:2(184).
- [10] 吴剑疆, 茅泽育, 王爱民, 等. 河道中水内冰演变的数值计算[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2003, 43(5): 702-705. (WU J J, MAO Z Y, WANG A I M, et al. Numerical simulation of frazil ice evolution in rivers[J]. Journal of Tsinghua University(Science and Technology), 2003, 43(5): 702-705. (in Chinese)) DOI: 10.16511/j.cnki.qhdxxb.2003.05.033.
- [11] 茅泽育, 许昕, 王爱民, 等. 基于适体坐标变换的二维河冰模型[J]. 水科学进展, 2008, 19(2): 214-223. (MAO Z Y, XU X, WANG A I M, et al. 2D numerical model for river-ice processes based upon body fitted coordinate[J]. Advances in Water Science, 2008, 19(2): 214-223. (in Chinese)) DOI: 10.3321/j.issn:1001-6791.2008.02.010.
- [12] 王军, 倪晋, 张潮. 冰盖下冰花颗粒的随机运动模拟[J]. 合肥工业大学学报自然科学版, 2008, 31(2): 19F-195. (WANG J, NI J, ZHANG C. Simulation of random movement of ice particles under ice cover[J]. Journal of Hefei University of Technology(Natural Science), 2008, 31(2): 19F-195. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1003-5060.2008.02.008.
- [13] 王晓玲, 周正印, 蒋志勇, 等. 考虑气温变化影响的引水渠道水内冰演变数值模拟[J]. 天津大学学报, 2010, 43(6): 515-522. (WANG X L, ZHOU Z Y, JIANG Z Y, et al. Numerical simulation of frazil ice evolution in diversion channel considering effect of temperature variation[J]. Journal of Tianjin University. 2010, 43(6): 515-522. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.0493-2137.2010.06.009.
- [14] 蒋志勇, 洪迎东, 谢坤. 寒冷地区某长距离引水式电站防冰冻设计[J]. 水利水电技术, 2011, 42(3): 38-40. (JIANG Z Y, HONG Y D, XIE K. Anti-freezing design of long distance diversion type hydropower station in cold region[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2011, 42(3): 38-40. (in Chinese)) DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2011.03.013.
- [15] 罗志鑫. 某渠道冬季长距离输水发电运行实践[J]. 山西建筑, 2013, 39(32): 215-216. (LOU Z X. Concerning on the operation practice of long distance water delivery and power generation of the canal in winter[J]. Shanxi Architecture, 2013, 39(32): 215-216. (in Chinese)) DOI: 10.13719/j.cnki.cn14-1279/tu.2013.32.120.
- [16] 张润杰. 乌鲁木齐河青年渠冬季引水冰雪堵塞解决途径探讨[J]. 地下水, 2010, 32(4): 18F-183. (ZHANG Y J. Solution approach ice and snow and ice blocking water in Youth Drainage of Urumqi[J]. Ground Water 2010, 32(4): 18F-183. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1004-1184.2010.04.078.
- [17] SHEN H T, WANG D S, WASANTHA LAL A M. Numerical simulation of river ice processes[J]. Journal of Cold Regions Engineering, ASCE, 1995, 9(3): 107-118. DOI: 10.1061/(asce)0887-381x(1995)9:3(107).
- [18] EDWARD P. FOLTYN, HUNG TAO SHEN, et al. St. Lawrence River freeze up forecast[J]. Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, 1986, 112(4): 467-481. DOI: 10.1061/(asce)0733-950x(1986)112:4(467).
- [19] ASHTON G D. Deterioration of floating ice cover[J]. Journal of Energy Resources Technology, 1985(107): 177-182. DOI: 10.1115/1.3231173.

(上接第 143 页)

- [10] 李火坤, 练继建. 水工弧形闸门流激振动特性物模数模联合预测与安全分析[J]. 水力发电学报, 2007(3): 69-76. (LI H K, LIAN J J. Joint prediction and safety analysis of the flow-induced vibration of hydraulic radial gate using physical and numerical model[J]. Journal of Hydroelectric Engineering. 2007(3): 69-76. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1003-1243.2007.03.014.
- [11] 潘文祥, 杨敏, 陈林, 等. 考虑壅墩弹性效应的弧形闸门流激振动数模物模联合预测与安全分析[J]. 南水北调与水利科技, 2014, 12(2): 4F-45. (PAN W X, YANG M, CHEN L, et al. Joint prediction and safety analysis of the flow-induced vibration of radial gate through physical and numerical simulations considering effects of the pier[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2014, 12(02): 4F-45. (in Chinese)) DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdkq.2014.02.010.
- [12] SL 74-2013 水利水电工程钢闸门设计规范[S]. (SL 74-2013 Design code for steel gate in water resources and hydropower projects[S]. (in Chinese))
- [13] TASSO S. Spillway Gate Vibration on Arkansas River Dams[J]. Journal of the Hydraulics Division, ASCE, 1972, 98(1): 219-238.
- [14] PERTRIKAT K. Vibration tests on weirs and bottom gates[J]. Water Power, 1958: 24.
- [15] 水利水电泄水工程与高速水流信息网. 东北勘测设计研究院科学研究院. 泄水建筑物的破坏与防治[M]. 成都: 成都科技大学出版社, 1996. (Information network of water resources and hydropower discharge project and high speed flow, Institute of Northeastern investigation, design & research. Destruction and prevention of the discharge structure[M]. Chengdu: Chengdu University of Science & Technology Press, 1996. (in Chinese))