

文章编号:0559-9350(2018)01-0081-11

河渠冰水力学、冰情观测与预报研究进展

杨开林

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

摘要: 冰情预报是进行防凌指挥、调度、决策的重要科学依据, 也是一项复杂的系统工程, 涉及冰水力学、热力学、气象及人工智能等学科。本文回顾了近几十年来冰水力学基础理论、模型实验和原型观测、冰情预报等方面的研究进展, 包括: 冰盖下流动的糙率计算, 冰盖、冰塞、冰坝形成发展的理论研究及数值模拟, 模型实验、原型观测典型成果, 探地雷达、超声波技术、摄影、摄像、遥感、无人机航拍等现代冰情观测技术的发展与应用等。在此基础上, 总结和归纳出研究现状及存在的一些急需解决的科学问题。

关键词: 冰情预报; 冰水力学; 模型实验; 原型观测

中图分类号: TV131

文献标识码: A

doi: 10.13243/j.cnki.slxb.20170671

1 目的和意义

我国高寒地区冬季河渠冰情严重, 容易发生冰凌灾害, 如我国的黄河、黑龙江、松花江和南水北调中线工程^[1]。冰坝洪水是天然河流中最严重的冰凌灾害, 洪水位短期内往往接近或超过历史上最高洪水位^[2], 可导致水位壅高漫出河堤, 淹没农田房屋, 使沿岸水工建筑物和构筑物遭到破坏, 使航运中断或造成水力发电损失。此外, 冰塞可能因堵塞引水口使水厂供水中断, 冰凌引发的冲刷可导致河岸及河床的侵蚀, 使鱼类或野生的一些种群的生态遭到破坏; 损坏埋于河床下面的设施等^[3]。

冰情预报是利用历史和现在的水文、气象资料及河渠结冰、封冻和解冻的发展规律预测未来冰情的水利科学, 是进行防凌指挥、调度、决策的重要科学依据, 是防治凌汛灾害的有效措施。它也是一项复杂的系统工程, 涉及冰水力学、热力学、气象及人工智能等学科, 需要建立一套集冰情、水情、气象信息的采集、传输、处理与冰情、水情的预报、会商及决策于一体的冰情预报系统。

过去几十年, 在国际水力学委员会冰研究和冰工程专委会的大力促进下, 冰水力学、模型实验和原型观测及冰情预报的研究和应用已经取得了很大进展, 归纳总结现有研究成果及存在的急需解决的重要科学问题, 对于进一步提高我国的冰情预报水平具有十分重要的科学意义。

2 冰水力学基础理论研究进展

冰水力学是研究水与冰运动和相互作用规律, 以及如何运用这些规律解决工程实际问题的水力学分支。冰水力学亦称寒冷地区水力学, 属二相流范畴, 是一个新兴交叉的边缘学科^[2]。

在自然界冰是水发生相变的固体产物, 其质量密度约为 917 kg/m^3 , 略小于水的质量密度。在冬季气候寒冷的地方, 随着气温的降低, 河渠中的水温将随之下降。当水温降低到冰点(大约 $0 \text{ }^\circ\text{C}$ 左

收稿日期: 2017-07-10; 网络出版日期: 2018-01-12

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.1882.TV.20180112.0943.001.html>

基金项目: 国家重点研究计划课题(2017YFC0405103, 2017YFC0405704); 公益性行业科研专项(201501025); 中国水科院科研专项(HY0145C222016, HY0145B642017, SKL2017CGS04, HY0145B912017); 国家自然科学基金(51679263, 51179209, 51209233)

作者简介: 杨开林(1955-), 男, 四川西充人, 教授级高级工程师, 主要从事水力控制研究。E-mail: ykliciwhr@sohu.com

右), 在水流中将产生具有很强黏性的冰花。冰花首先作为小晶体出现, 尺寸从 0.1 mm 到几毫米^[3]。初生冰花看起来像一个完美的圆盘, 它的外径是厚度的 10~12 倍^[3]。在水流速度缓慢的区域, 在断面平均水温降到冰点以前, 能够在水表面形成流冰层或静止冰盖。而在水流速度较大的区域, 由于水流紊动强度大, 冰花晶体将充满整个水域。影响水表面与大气热交换的主要因素包括空气的温度和湿度、风速、气压、太阳辐射和云及降雨和降雪等, 1986 年 Ashton^[4]在其专著中给出了有关的理论公式。

由于浮力和紊动力的作用, 水中部分冰花将漂浮到水面形成冰块或冰盘, 称为流凌, 随着气温的下降以及冰块下冰花的黏附, 冰块的大小和强度都会增长。当水面冰流在向下游运动的过程中遇到障碍物(桥墩、闸门、冰桥)、弯道、卡口、河道束窄、底坡变化等时, 将累积形成冰盖或者冰塞和冰坝, 并向上游发展。

冰塞主要由悬浮的冰花贴附在冰盖下面、层层冻结、逐渐加厚形成的冰花塞, 又称悬冰坝(hanging dam)^[4]。悬冰坝是一种局部的冰水力学现象, 一般发生在冰盖上游存在敞露河段, 例如河渠底坡由陡变缓的河渠段。当气候寒冷、陡坡段流速高不封冻时, 将产生大量的冰花流向下游缓坡段冰盖下形成严重的悬冰坝, 导致水位迅速上升。例如, 2016 年 1 月 27 日, 华北地区遭遇了多年罕见的寒潮袭击, 最低气温 -19℃, 南水北调中线岗头隧洞进口节制闸前出现冰塞现象, 最大厚度超过 2 m, 导致渠道水位迅速上升。

冬季, 冰盖厚度会随其能量交换而变化。这个过程可由热传导和能量交换方程分析^[5]。当冰盖形成后, 水流由明流变为暗流, 流动结构发生显著的改变, 流动阻力增加, 从而导致河道过流能力大大下降。

冰盖下流动的综合糙率系数 n_c 是确定冰期水位和流量关系的基础参数, 一直是明渠冰工程研究的重点。美国陆军工程兵团(U.S. Army Corps of Engineers)推荐采用 Belokon-Sabaneev 公式^[6]计算冰盖河道综合糙率系数 n_c , 该公式简单, 但是没有考虑河床与冰盖湿周长度不同的影响。Einstein^[7]研究了河床与冰盖湿周长度对 n_c 的影响, 假定冰盖下的流动可以划分成上部冰盖区和下部床面区, 以最大流速所在面作为划分两区的分界面, 且假定整个过流断面的平均流速和冰盖区、床面区的平均流速相等。显然, Einstein 的公式没有考虑冰盖区和床面区流速分布差异的影响。Larsen^[8]在假设明渠是宽浅的且冰盖区和床面区的流速分布符合对数分布规律条件下, 考虑了冰盖区和床面区流速分布的差异对 n_c 的影响。魏良琰和黄继忠^[9]建立了不完全封冻冰盖流综合糙率的计算公式, 当冰盖完全封冻时, 与 Einstein 公式完全相同, 并通过模型实验验证了公式的实用性。茅泽育等^[10]在 Larsen 研究的基础上, 对冰盖区与床面区的交界位置进行了分析讨论, 对由流速分布推算冰盖及河床糙率的计算方法进行了研究。杨开林^[11]根据冰盖区和床面区的边界条件和流量的连续性条件提出了通用的综合糙率系数公式:

$$n_c = \frac{\left(n_i^{3/2} + \beta a^{3/2} n^{3/2}\right)^{5/3}}{\left(1 + \beta\right)^{2/3} \left(n_i^{3/2} + \beta a^{5/2} n^{3/2}\right)} \quad (1)$$

式中: n 和 n_i 分别为床面和冰盖的糙率系数; β 为床面区湿周和冰盖区湿周的比值, 称为湿周比; a 为床面区和冰盖区的平均流速比, 它反映了两区流速分布不同对 n_c 的影响。当 $\beta=1$ 且 $a=1$ 时, 式(1)转化为 Belokon-Sabaneev 公式。当 $\beta \neq 1$ 且 $a=1$ 时, 式(1)转化为 Einstein 公式。当 $\beta=1$ 且 $a \neq 1$ 时, 式(1)转化为 Larsen 公式。

计算分析表明, 在冰盖区和床面区的流速分布符合对数分布规律条件下, 冰盖区和床面区流速分布的差异对 n_c 的影响微小, 可忽略不计, 可取平均流速比 $a=1$; Belokon-Sabaneev 公式和 Larsen 公式只适合于宽浅明渠, 但是对于宽深比 b/H 较小的矩形明渠, 采用它们将产生很大的偏差; Einstein 公式是通用综合糙率系数公式的最好近似, 并且采用 Einstein 公式计算的综合糙率系数将比实际综合糙率系数数值略大, 推荐在工程设计中采用。

形成稳定初始冰盖或冰塞的理论可以追溯到 Pariset 和 Hausser^[12]，他们建立了形成稳定初始冰塞的力平衡基本方程，得到了初始冰盖厚度的计算方法，以及不同初始冰盖发展模式的弗劳德数判据。当冰盖前沿弗劳德数 Fr 小于一个临界值 Fr_c 时，初始冰盖将以平铺上溯模式向上游发展，其厚度等于冰块厚度，冰面比较光滑。Shen 和 Chiang^[5] 根据原型观测，建议在一般情况下取 $Fr_c = 0.05 \sim 0.06$ 。通常只有当冰盖平铺发展时，拦冰栅才会起作用^[3]。当冰盖前缘 $Fr > Fr_c$ 时，由于水流紊动加剧，冰块可能翻转、下潜，上挤下插，冰盖将以水力加厚模式又称窄冰塞模式向上游发展，在这种情况下初始冰盖上下表面均比较粗糙，且冰盖较厚。水力加厚模式存在一个最大的弗劳德数 Fr_m ，当 $Fr > Fr_m$ 时，冰盖将不能向前发展，如果上游存在敞露水面产生大量冰花，则会发生冰塞现象。大部分实验室资料 Fr_m 在 0.08 至 0.13 之间^[4]；Kivisild^[13] 的现场观察 Fr_m 在 0.06 至 0.1 之间变化，平均值为 0.08。孙肇初^[2] 在黄河现场观察的 Fr_m 近似为 0.09。对于宽、陡降的河段，冰盖发展期间作用在冰盖上的水推力可能超过岸边阻力，当冰盖强度不能抵抗净水推力的增加时，冰盖将崩溃，并可能在下游处重新积累加厚直到达到一个新的平衡厚度^[12]，这种由于力作用形成的冰盖也称为宽冰塞模式 (Wide jam mode) 或者推移推挤模式 (Shoving mode)，这种现象过去在黄河万家寨水库入口经常发生，冰塞厚度达 6 m 左右。Uzuner 等^[14]、Tatinclaux^[15] 和 Beltaos 等^[16] 改进和扩展了 Pariset 和 Hausser 理论。不过，这些数学模型只研究了形成稳定冰塞的力平衡条件及初始冰盖厚度的计算方法，都属于稳态模型，考虑因素有限，不能完整地描述冰盖、冰塞形成、发展、消失的动态过程。

自 1984 年开始，河冰研究进入了冰的形成、发展、消失全过程的数值模拟新阶段。1984 年，Shen 等^[17] 首次引入了一维明渠非恒定流方程模拟河冰发展过程中水流的运动。稍后，Lal 等^[18] 提出了完整的一维数值模拟河冰过程的计算机模型 RICE，考虑了水面飘浮冰块沿河的输运，岸冰和冰盖的发展，冰盖的热增长和衰减，以及冰盖下的堆积和冲刷。接着，Shen 等^[19-21] 开始了二维河冰过程动力模型研究。Liu 等^[22] 开发了模拟河冰输送和冰坝演变的二维模型，考虑了河冰动力学与水动力学的耦合，冰堆内渗流、冰坝底部的冲刷、冰栅和其它水工结构的影响，并应用模型成功的再现了密西西比-密苏里河汇合处的冰坝演变过程。2010 年，国际著名冰工程专家沈洪道 (Hung Tao Shen) 教授的专著《河冰研究》^[23] 在我国正式出版，内容包括：河冰研究历史，河冰水力学研究，河冰过程的模拟，河冰模拟和预报模型的应用。

与国外相比，我国在河冰发展过程数值模拟方面的研究相对滞后。杨开林^[24] 应用一维非恒定流计算模拟了南水北调东线渠冰的形成、发展过程。靳国厚等^[25] 采用一维非恒定流水力学模型和一维热力学模型建立了输水渠道的冰情预报数学模型。杨开林等^[26] 根据冰塞形成发展的机理，提出了冰塞形成的发展方程，包括：非恒定流基本方程、水流的热扩散方程、冰花的扩散方程、水面浮冰的输运方程、冰盖和冰块厚度的发展方程，冰盖下冰花含量和冰塞厚度的计算、冰盖的形成发展方程等，计算结果与实测结果具有较好的一致性。茅泽育等^[27-28] 通过分析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，包括流速场、水温、水内冰浓度、面冰输移、冰盖下冰的输移、堆积和冲刷等。王军等^[29-32] 基于两相流理论建立了欧拉-拉格朗日模型，对水内冰花颗粒的运动轨迹和初始冰塞头部的推进过程进行了仿真模拟；用 $k-\varepsilon$ 两方程模型模拟水体的运动，借鉴泥沙输运理论，结合冰塞面的变形方程，对试验资料和天然河道下的冰塞堆积分别进行了数值模拟计算，计算与实测结果吻合程度较好。练继建和赵新^[33] 在深入研究不同水流条件下冰盖生长、消融机理的基础上，提出了静水、动水冰厚预测的辐射冰冻度-日法，实例表明冰厚的生消演变主要是气温、辐射和水温综合作用的结果。

随着南水北调工程的建设，我国在明渠冰过程数值模拟的研究和应用发展迅速。郭新蕾等^[34-36] 开展了南水北调中线工程冬季输水数值模拟研究，分析了冰情模型中不确定参数的影响，以及明渠系统反向输水冰情模拟，通过对典型年总干渠敞流期、冰盖形成期、稳封期、调度期以及开河全过程的模拟，给出了安全运行输水调度方案。穆祥鹏等^[37] 考虑了渠道拦冰索对流冰的控制条件及地温影响，通过加入闸门控制算法，模拟了南水北调中线渠道中闸门对水位和流量的调控作用。练继建和

罗昉昕^[38]研究渠道冰凌下潜的临界水力条件,采用VOF方法追踪自由水面,结合RNG $k-\varepsilon$ 紊流模型,对浮冰块底面水压差分布进行了数值模拟,发现冰块下潜的临界条件与冰块前缘形状和由冰块厚度、长度与冰块上游水深构成的特征几何尺寸和弗劳德数有关。杨开林^[39]以 Reynolds 平均 Navier-Stokes 方程为基础,导出河渠冰盖下水深平均流速的横向分布的准二维模型,该模型包括了河渠流动的一些关键三维紊流因素,综合阻力系数 f_d 与河床糙率系数 n_b 和冰盖糙率系数 n_i 的函数关系,以及水深平均流速的有限解析方法。

3 模型实验和原型观测研究进展

河渠冰的形成、发展、消融过程十分复杂,许多物理现象尚无法从理论上解决,需要借助于物理模型实验和原型观测手段解决。

我国在河冰的原型观测方面已做了大量的工作,自1951年以来,在黄河、黑龙江、松花江、新疆天山南北一带的河流等进行了冰情原型观测,据60多年资料统计,位于最北部的黑龙江上游的洛古水文站,67%年份的最高水位出现在解冻开河期,例如,1960年开河期形成的巨大冰塞,雍水高达14 m;1961年冬,黄河上游盐锅峡水库库区发生了特大的冰塞,冰花堆积厚度达14 m,雍高水位近10 m;其它像松花江下游、嫩江上游的凌汛也比较严重,冰期水位往往接近或超过历史上最高洪水位^[2]。

3.1 冰盖糙率系数 冰盖糙率系数是冰封河渠水力计算的基本参数,与初始冰盖发展模式和时间有关。尼兹柯夫斯基^[40]总结了前苏联的大量资料,得到的冰盖糙率系数经验公式为

$$n_i = n_{i,e} + (n_{i,i} - n_{i,e})e^{-\alpha_n t} \quad (2)$$

式中: $n_{i,i}$ 为初始冰盖糙率系数; $n_{i,e}$ 为封冻期末的冰盖糙率系数,取值范围0.008~0.012; t 为封冻后的天数; α_n 为衰减指数。

在具体应用中,尼兹柯夫斯基建议冰盖糙率系数按表1取值,数据来自于对2~3 m深的宽渠道的实测值,包括浮冰块、密实的和疏松的碎冰。尼兹柯夫斯基的 n_i 取值是我国渠道设计的重要参考依据。

表1 尼兹柯夫斯基建议 n_i 取值范围

冰盖条件	水流速度/(m/s)	n_i
光滑冰盖	0.4 ~ 0.6	0.016 ~ 0.018
	>0.6	0.017 ~ 0.020
粗糙冰盖		0.023 ~ 0.025

Beltaos^[16]通过原型观测,归纳出冰塞与冰坝糙率系数与水深和冰厚的经验公式:冰塞的糙率 $n_i = 0.0292H^{-0.23}t_i^{0.54}$, 堆积厚度超过0.46 m的冰坝 $n_i = 0.0690H^{-0.23}t_i^{0.40}$, 堆积厚度少于0.46 m的冰坝 $n_i = 0.0593H^{-0.23}t_i^{0.77}$, 其中 H 为总水深, t_i 为冰坝的厚度。

孙肇初^[2]总结了黄河上游(有水内冰堆积)以及东北的松花江、牡丹江、嫩江(无水内冰堆积)等河流观测冰盖糙率系数 n_i 随时间变化的规律,结果列于表2。从黄河中游河曲段水内冰冰塞的糙率系数变化来看,总的趋势是初封期较大,稳封期较小。根据黄河河曲段的实测资料,给出了冰塞糙率系数 n_i 与河床糙率系数 n 和弗劳德数 $Fr = V/\sqrt{gH}$ 的经验公式 $n_i/n = 0.2677Fr^{-1.1026}$ 。其中, V 为平均流速, g 为重力加速度, H 为冰塞下平均水深。隋觉义和方达宪^[41]在孙肇初研究的基础上,用石蜡模拟冰,通过模型实验得到 n_i 与 n 、 Fr 和 水流含冰率的函数关系 $n_i/n = 0.7466Fr^{-1.7543}(Q_i/Q)^{0.1862}$, 其中 Q_i 为冰的流量, Q 为过水流量。由于石蜡与冰不同,模型试验结果的实用性尚需原型观测检验。

观察表1和2,尼兹柯夫斯基和孙肇初给出的冰盖糙率系数 n_i 差别较大,其原因可能与初始冰盖的

表2 冰盖糙率系数 $n_{i,i}$ 随时间变化的规律

时段	封冻后天数/d			
	1 ~ 10	11 ~ 30	31 ~ 50	≥ 51
无水内冰堆积	0.08 ~ 0.04	0.050 ~ 0.020	0.030 ~ 0.015	0.025 ~ 0.015
有水内冰堆积	0.100 ~ 0.050	0.060 ~ 0.030	0.040 ~ 0.025	0.030 ~ 0.020

发展模式有关。初始冰盖糙率 $n_{i,i}$ 取决于初始冰盖发展模式，当 $Fr < 0.05 \sim 0.06$ 时或者水流速度 < 0.6 m/s，初始冰盖将以平铺上溯模式向上游发展，冰面比较光滑， $n_{i,i}$ 较小；当 $Fr > 0.06$ 时，初始冰盖将以水力加厚模式或者宽冰雍模式向上游发展，冰盖厚度大，冰面粗糙， $n_{i,i}$ 较大。

3.2 初冰期观测 岸冰是沿河渠岸冻结的冰带，目前人们对其形成现象的了解尚不充分。由于水面冰的集聚和堆积，岸冰将沿宽度(侧向)方向发展，其发展速度与水面流冰与已有岸冰边缘接触的稳定性有关。岸冰侧向的增长速度与表面流冰密度(冰封率)成正比，可以采用 Michel 等^[42]1982年发表的经验公式近似确定。

在流速不起作用的水面形成的冰称为静态冰，如低风速时在湖泊、池塘形成的冰，也包括在流速大约为 0.3 m/s 或更低的河流和小溪中形成的冰。静态冰的形成取决于水面温度和水面所形成的冰晶的稳定性，而这两者均依赖于水流的紊动强度。Matousek^[43]根据原型观察提出了一个经验关系式，与水面温度 $T_{w,s}$ 、水深平均水温 $T_{w,d}$ 、对应水深平均流速 U_d 、风速 V_a 及沿风向的水面宽度有关，可采用以下判据确定冰的生成：当 $T_{w,s} \geq 0^\circ\text{C}$ 时，没有结冰现象发生。当 $T_{w,d} > 0$ 时，如果 $T_{w,s}^c < T_{w,s} < 0^\circ\text{C}$ 且 $\omega_b > v'_z$ 时，薄流冰形成。当 $T_{w,d} > 0$ 时，如果 $T_{w,s} < T_{w,s}^c$ ，那么静态冰盖形成。当 $T_{w,s} \leq 0^\circ\text{C}$ 时，水内冰产生。其中： $T_{w,s}^c$ 为临界水面温度， $^\circ\text{C}$ ； ω_b 为冰花的上浮速度，m/s； v'_z 为水流的垂向脉动速度，m/s。

在很多情况下，冰塞下表面不是分界面，而是一层厚度在几厘米和 1.5 m 的运动冰花^[44]。汪德胜等^[45]根据对黄河河口段的现场资料，提出了输冰能力的概念，即在一定的水力条件和一定的冰花条件下，水流能够挟带一定数量的悬浮冰花，假如某一河段冰盖下水流所挟带的冰花数量超过了它的输冰能力，则该段冰盖下发生冰花的黏积，导致形成冰塞；反之，则该段冰盖下将发生冲刷。Shen 等^[44]通过模型试验给出了输冰能力的经验公式，不过，该式只适用于冰花的输送能力估计。

3.3 开河期观测 冬季，冰盖厚度会随与大气和水体的热量交换而变化。冬季后期开春之前，特别是雪盖消失后，冰盖从其顶面、底面及内部消融，这个消融的过程会使冰盖的强度和承载力降低，同时导致冰盖下水流的波动。冰盖下水流波动会产生压力扰动，使冰盖形成横向裂缝和碎冰。冰盖的破裂是基于冰盖强度及流量条件改变引发的现象。如果水流保持相对稳定，冰盖会保持稳定直到最终融化。然而，如果温度升高且冰凌融化前流量和水位变化明显，则可能产生武开河，冰盖迅速迸裂，导致冰凌洪水。武开河时最危险的事情是形成冰坝。冰坝是由大量的冰块在河道中局部堆积而成的^[1]，冰坝形成以后，堵塞河道，大大减少过水断面面积，增加水流阻力，一旦冰坝释放或破坏就会短时间内形成很高涌浪，可能导致严重决堤冰凌洪水事故的发生。Kowalczyk 等^[46]观测了 2002 年 Athabasca 河段开河过程，在开河时很快形成 17 km 的冰坝，当冰坝解冻时，在 15 min 内就引起 4 m 高的涌浪。冰坝易发点一般是河道变窄、弯道浅滩、跨河建筑物及水深由浅到深过渡区，当这些河段下游具有完整冰盖时，则上游来冰就可能在冰盖前堆积形成冰坝^[47]。

王庆凯等^[48]在开河期的乌梁素海人工挖潜开敞水域以模拟浮冰水道系统，连续观测冰-水侧向界面的热力学侧向融化，结果显示，冰-水侧面中部形状近似直线，下部呈圆弧状，上部受气温影响向内或向外倾斜；气温是影响融化速率的主要因素，平均气温越高，融化速率越大；风速越大融化速率越低，既表现在高风速与低气温往往同时出现，又表现在风速加速了水体蒸发而降低水温。

由于开河期冰情，特别是冰坝的观测十分困难，有关定量的系统原型观测资料有限。

3.4 人工明渠观测 进入 21 世纪，随着南水北调中线工程的建设，我国明渠冰水力学模型试验和原

型观测研究成果丰富。

王军^[49]对平衡冰塞的形成与变化机理进行了水槽试验研究,依据试验资料定性得出了平衡冰塞厚度计算的表达式。王军等^[50]对封冻期冰塞的堆积演变过程进行了试验研究,发现冰塞堆积演变存在两种不同的顺序:一是先在整个水流表面布满一层浮冰(可以是多层颗粒)后,冰粒由前缘下潜堆积并向下游发展;二是在模拟初封条件处完成挤压、增厚并堆积出一个初始头部,然后冰塞再向上游发展。冰塞的两种堆积顺序存在某一临界 Fr ,试验条件下临界 $Fr=0.12\sim 0.13$ 。汪涛和陈胖胖等^[51]研究了S型弯槽和直槽冰塞形成条件,试验表明:弯槽段冰塞形成的临界 Fr 值大于直槽临界 Fr 值,即在相同水深的条件下,更大的流速时弯槽段也能形成冰塞;弯槽段能形成冰塞的 Fr 值范围大于直槽,故弯槽段更易形成冰塞;平衡冰塞厚度大致随着初始流速的增大而减小,随着初始水深的增大而增大,随着冰流量的增加而增加。

赵新等^[52]提出一种新双缆网式拦冰索,通过真冰模型试验发现,拦冰索的作用过程可以划分为发展期、平衡期和失效期三个阶段。平衡期顺流向索力均值可以作为衡量拦冰索拦冰能力的指标,通过量纲分析获得该指标的计算公式。

付辉和杨开林等^[53]在真冰条件下研究了冰块在倒虹吸进水口前堆积演变机理以及形成稳定冰塞的条件,得出了防止冰块进入倒虹吸的临界弗劳德数 $Fr_c = V / (\sqrt{gH}) = 0.1063(H_1/H)^{0.192}$,其中 H_1 为倒虹吸进口淹没水深, H 为冰塞体前缘的水深。当 $H_1/H > 0.33$ 时,冰块下潜的临界弗劳德数在 $0.08\sim 0.09$ 左右波动。

段文刚等^[54]在2011—2016年间对南水北调中线总干渠进行了5个冬季的冰情原型观测,提出了避免形成冰塞灾害的水流控制条件:渠池上游控制断面平均流速 $V \leq 0.40\text{m/s}$, $Fr \leq 0.065$;下游控制断面平均流速 $V \leq 0.35\text{m/s}$, $Fr \leq 0.055$ 。

3.5 冰情观测技术 进入21世纪,冰情原型观测技术进步明显。

Jasek等^[55]在Peace河上使用基于超声波原理的SWIPS系统测量了水温、冰盖的生长和消融速度、河床温度等,测得水面初始冰盘厚度大约0.1 m以下,漂浮冰盘直径在1~2 h就从0.2 m增加到0.6 m左右。该系统的优点在于可以用于封河期和开河期的水内冰冰花的形成、悬浮冰盘的发展,冰盖下冰花输移等恶劣条件下的原型观测,但测量的不确定度尚需实践检验。She等^[56]使用了船用雷达观测Athabasca河段开河冰坝冰面速度,并用直升机追踪冰坝释放波前的运动。

李志军等^[57]总结了现行冰厚度变化过程监测方法的适用范围和优缺点,发展了新的冰厚度变化过程监测方法,包括直接探测冰层界面位置的接触式和利用气、冰、水电导率差异的标尺式高精度冰、雪层生消过程自动监测设备。秦建敏等^[58]提出利用空气、冰与水物理特性差异实现对冰、水情全天候自动化监测的基本原理与系统实现模型,随后在此基础上开发了R-T(电阻-温度梯度)冰情自动检测系统,实现定点冰盖和雪层厚度变化的连续测量,目前该检测系统已经在国内广泛采用。

张宝森和郜国明^[59]通过现场试验研制出了黄河河道冰、水情数据与图像远程连续自动监测系统,该系统可以对河道冰层厚度、冰下水位、气温、冰温、水温等参数同时进行连续自动监测,并可获取冰凌图像、流冰速度、流凌密度等;另外,还进行了无人机航拍应急监测和雷达探测冰厚试验。

在“十三五”期间,笔者负责的水利公益性行业科研专项“黑龙江冰情预报及灾害防治研究”课题组,针对黑龙江封冻期长,冰塞厚度大,开河过程剧烈的特点,开发出以100 MHz和1500 MHz雷达为基础的冰水情一体化双频雷达测量系统,在黑龙江漠河段的应用表明,水深测量的平均误差为3.97%,覆雪条件下冰厚测量的平均误差为4.32%。该双频雷达测量系统不仅测量精度高,而且测量效率高,利用该系统一天8 h可获得10 km以上冰厚和水深(河床)的纵向和横向分布。同时,研发了用于定点冰情测量的冰雪情自动检测成套系统,用于冰厚、雪厚、温度、风速、风向、太阳辐射等参数的测量,包括:R-T(电阻-温度梯度)冰情自动检测系统,利用空气、冰与水物理特性差异实现冰盖和雪层厚度变化的连续测量,测量数据可通过GPRS模块实时发送到远程采集系统^[60];温度梯度

式冰情自动检测系统,用于测量空气、冰盖和水体的温度梯度变化^[61];积雪深度自动检测系统,用于测量影响冰情发展的降雪过程;风速及太阳辐射自动气象观测系统,测量影响冰块运动过程和厚度变化的风速和太阳辐射;GPRS河道定点冰凌图像遥测系统,用于自动获取河道冰面的静态图像、并进行短时冰凌图像录制,采集的视频和图像数据可实时传输到采集系统^[62]。

4 冰情预报研究进展

冰情预报的目的是利用历史和现时水文、气象资料,根据河流、水库和湖泊等水体的封冰和解冻的规律,预测未来冰情,以便提前制定应对计划和防范冰凌灾害事故发生的措施。

冰情预报研究具有悠久的历史。Rodhe^[63]在假定了空气和水面的热交换同它们之间的温度差成正比关系的基础上,建立了日均气温和冰的形成之间的公式。Adams^[64]采用经验相关公式建立了圣劳伦斯河上游河段封河预报模型,该模型假定每隔半月气温为一常数。Edwad等^[65]用河冰非恒定数值方法开展了圣劳伦斯河封河日期的长期预报。Massie等^[66]研究用神经网络理论预报开河期冰坝,显著改进了冰情预报的准确性。

国内冰情预报研究主要集中在黄河流域。1989年黄委会水文局李若宏等主编《黄河流域实用水文预测方案》,在冰情预报中发挥很大的作用;1990年代,黄委会先后与芬兰和美国合作,在国外技术基础上建立了黄河冰情预报数学模型,但它们都对资料要求条件高,限制了模型的使用;1994年陈赞廷建立了黄河下游冰情预报数学模型,1998年可素娟建立了黄河上游冰情预报数学模型,这两个冰情预报数学模型采用经验和理论结合的方法,经运用证明精确度高,应用方便,在黄河防凌中发挥过重要作用^[67]。

由于天然河道断面尺寸、河势糙率系数等数据普遍存在实测资料不全或缺失,使得应用冰水力学数学模型进行冰情预报受到了极大限制。为此,Blackburn等^[68]提出一种混合洪水演算与洪水水位确定的非恒定流模型,在需要准确洪水水位的人口稠密地区,采用完整的河道几何尺寸,而在其它地区采用“有限的河道尺寸”,即概化河道断面尺寸,以便利用冰水力学数学模型进行冰情预报。

目前,我国实用冰情预报系统的开发仍然是基于人工智能算法。陈守煜等^[69]探索采用BP神经网络理论预报黄河宁蒙河段流凌、封河、开河情况。王涛等^[70-73]、郭永鑫等^[71]、杨开林等^[72]将神经网络预报模型和GIS地理信息系统相结合,结合水文实时监测、巡测信息和气温中、短期预报,建立了各观测站水文、水情和冰情的有机联系,开发了黄河宁蒙河段冰情预报专家系统,该系统自2004年投入运行以来,系统运行稳定,预报效果良好,预报期达10 d以上,为宁蒙河段的防凌工作提供了科学依据。王军等^[74]依据实验资料,分析了弯槽段冰塞壅高上游水位和佛汝得数以及冰流量之间的变化关系,采用BP网络对水位壅高及弯槽断面水位进行了模拟预测并和回归分析的结果进行了对比,结果表明:人工神经网络技术可以提高对水位的模拟预测精度。王涛和杨开林等^[75]分析了南水北调沿线气候和气温特点,用改进的神经网络算法进行气温稳定转负日期的预报,考虑了中国传统二十四节气与气候和气温的相关性,以立冬日作为气温转负日期统计的基准点,提高了预报精度^[76]。王涛和杨开林等^[77-78]把模糊理论应用到黄河冰情水温预报中,目前正应用这些研究成果开发黑龙江冰情预报系统。

5 结论和建议

综上所述,可得下述结论:

(1)冰水力学基础理论的研究已经取得长足的进步,已经从定性描述冰的物理现象发展到定量数值模拟冰的整个生命周期,包括冰盖、冰塞、冰坝及冰凌洪水的演变等。冰盖下流动的综合糙率系数 n_c 计算方法比较完善,形成稳定初始冰盖或冰塞发展模式的理论的实用性已经得到模型和原型观测的验证,河渠冰水力学的一维数学模型基本成熟并得到广泛应用,二维动力学数学模型正在不断发

展完善。不过,由于冰水力学过程的复杂性,仍然有一些基本问题需要研究,如:冰盘的形成和浮冰的发展过程;人工渠道岸冰的形成和增长与表面流凌密度、气温和水温、流速的关系;初始冰盖形成位置和流凌密度的临界条件;武开河时冰盖破裂的热力学、水力学、结构强度机制;冰坝形成和释放的数学描述等。

(2)国内外已经做了大量的冰水力学模型试验和原型观测,冰盖糙率系数与初冰期冰情观测成果丰富,已经归纳出:冰盖糙率系数与弗劳德数、来冰量和时间的经验公式,输冰能力的经验公式,形成冰塞的临界弗劳德数或者临界流速,倒虹吸冰塞的临界弗劳德数等。冰情观测技术取得重大突破,超声波、探地雷达、遥感、摄影、摄像等技术在冰情观测方面已经达到实用推广阶段,气温、风速、风向、太阳辐射、水位、水深、流速、水温、流凌密度、冰厚、雪厚等参数的测量已经可以自动化连续测量。存在的问题是:①模型试验与原型观测结果存在较大差异,例如形成冰塞的临界弗劳德数 Frc ,模型实验 Frc 在 0.12~0.14 之间,原型观测约为 0.09,需要进一步研究其原因,找到两者之间的换算关系;②不同河渠原型观测得到的初始冰盖糙率系数、形成冰塞的临界弗劳德数差异较大,通用性较差,需要找出其原因,是测量不确定度不同还是确定方法差异引起?③开河期冰情观测资料较少,特别是开河过程与冰坝形成和释放过程的,相关观测技术需要进一步发展;④冰情原型观测资料完整性不足,限制冰水力学数学模型的验证和完善。

(3)我国在冰情预报方面的研究和应用已经与国际同步,但进一步提高已经遇到发展瓶颈。存在的问题是:①现有冰情预报观测站数量偏少,观测项目也有限,对冰情预报的支持不足,需要适当建设新的观测站和观测项目;②原型观测与冰情预报研究脱节,缺乏对各项观测数据与冰情的相关性分析,比如:河道观测气象参数与中央气象台发布参数的关系,水力学、水文、气象观测数据与封河条件、冰厚变化、开河条件的相互关系,应当加强对观测数据与冰情的相关性分析,建立两者的函数关系;③如何在实际冰情预报中应用冰水力学理论?特别是河冰过程数值模拟方法,应当像常规洪水预报一样发展合理的冰情预报河道概化模型,以提高冰水力学理论的实用性;④现有人工智能算法冰情预报模型如何与冰水力学理论有机结合?只有通过运用冰水力学理论,才能把原型观测各物理量与冰情预报有机联系起来,这将是冰情预报研究今后的主要发展方向。

参 考 文 献:

- [1] 高需生,靳国厚.中国北方寒冷地区河冰灾害调查与分析[J].中国水利水电科学研究院学报,2003,1(2):159-164.
- [2] 孙肇初.中国寒冷地区水力学的近代发展[J].合肥工业大学学报(自然科学版),1990,13(4):97-105.
- [3] 汪易森,杨开林,张斌.河冰管控工程设计手册[M].北京:中国水利水电出版社,2013.
- [4] ASHTON G D. River and Lake Ice Engineering[M]. Water Resources Publications, Littleton, Colorado 80161, USA, 1986.
- [5] SHEN H T, CHIANG L A. Simulation of growth and decay of river ice cover[J]. J. Hydr. Div., ASCE, 1984, 110(7): 958-971.
- [6] SABANEV A A. On the Computation of a Uniform Flow in a Channel with Non-Uniform walls (in Russian) [R]. Transactions, Leningrad Polytechnical institute, 1948.
- [7] EINSTEIN H A. Method of calculating the hydraulic radius in a cross section with different roughness[Z]. Appen. II of the paper "Formulas for the transportation of bed load". Trans ASCE, 1942.
- [8] LARSEN P A. Head losses caused by an ice cover on open channels[J]. J. of the Boston Society of Civil Engineers, 1969, 56(1): 45-67.
- [9] 魏良琰,黄继忠.冰盖流阻力与综合 Manning 糙率[J].武汉大学学报(工学版),2002,35(4):1-8.
- [10] 茅泽育,马吉明,余云童,等.封冻河道的阻力研究[J].水利学报,2002(5):59-63.
- [11] 杨开林.明渠冰盖下流动的综合糙率系数[J].水利学报,2014,45(11):1310-1317.
- [12] PARISET R, HAUSSER H. Formation and evolution of ice covers on rivers[J]. Trans. Engrg. Inst. Canada, 1961,5(1):41-49.

- [13] KIVISILD H R . Hydrodynamic analysis of ice floods[C]//Proc . , 8th IAHR Congress, Delft, The Netherlands, 1959 .
- [14] UZUNER M S, KENNEDY J F . Theoretical model of river ice jams[J] . J . Hydr . Div . , ASCE, 1976, 102(9) : 1365-1383 .
- [15] TATINCLAUX J C . Equilibrium thickness of ice jams[J] . J . Hydr. Div. ASCE, 1977, 103(9) : 959-974 .
- [16] BELTAOS S . River ice jams: theory, case studies and applications[J] . J . Hydr . Engrg . , ASCE, 1983, 109(10) : 1338-1359 .
- [17] SHEN H T, YAPA P D . Computer Simulation of Ice Cover Formation in the Upper St . Lawrence River[C]//Proc . of 3th Workshop on Hydraulics of River Ice, Fredericton, Canada, 1984 .
- [18] LAL A M W, SHEN H T . A mathematical model for river ice processes[J] . J . Hydr . Engrg . , ASCE, 1991, 117(7) : 851-867 .
- [19] SHEN H T, CHEN Y C, et al . Lagrangian discrete parcel simulation of two-dimensional river ice dynamics[J] . Int . J . offshore and Polar Engrn, 1993, 3(4) : 328-332 .
- [20] SHEN H T, SU J, LIU L . SPH simulation of river ice dynamics[J] . J . Comput . Phys . , 2000, 165(2) : 752-771 .
- [21] SHEN H T . Development of a Comprehensive River Ice Simulation System[C]//Proc . of the 16th Int . Symp . on Ice, V . 1, IAHR, Dunedin, New Zealand, 2002 .
- [22] LIU L, SHEN H T . Dynamics of Ice Jam Release Surges[C]//Proc . , 17th Int . Symp . on Ice, IAHR, St . Petersburg, 2004 .
- [23] 沈洪道 . 河冰研究[M] . 霍世青等译, 郑州: 黄河水利出版社, 2010 .
- [24] YANG K L, et al . Simulation of Ice Processes for Open Channel Systems[C]//Pro . of 13th Intern. Symp . On Ice, IAHR, 1996 .
- [25] 靳国厚, 高需生, 吕斌秀 . 明渠冰情预报的数学模型[J] . 水利学报, 1997(10) : 1-9 .
- [26] 杨开林, 刘之平, 李桂芬, 等 . 河道冰塞的模拟[J] . 水利水电技术, 2002, 33(10) : 40-47 .
- [27] 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 .
- [28] 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(2) : 214-223 .
- [29] 王军, 倪晋, 等 . 冰盖下冰花颗粒的随机运动模拟[J] . 合肥工业大学学报, 2008, 31(2) : 191-195 .
- [30] 王军, 付辉, 等 . 冰盖下水流速度分布的二维数值模拟分析[J] . 冰川冻土, 2009, 31(4) : 705-709 .
- [31] WANG J, LI Q G, SUI J Y . Floating rate of frail ice particles in flowing water in bend channel—a three dimensional numerical analysis[J] . J . of Hydrodynamics, 2010, 22(1) : 19-28 .
- [32] 王军, 陈胖胖 . 稳封期天然河道冰塞堆积数值模拟[J] . 水利学报, 2011, 42(9) : 1117-1121 .
- [33] 练继建, 赵新 . 静动水冰厚生长消融全过程的辐射冰冻度-日法预测研究[J] . 水利学报, 2011, 42(11) : 1261-1267 .
- [34] 郭新蕾, 杨开林, 王涛, 等 . 南水北调中线工程冬季输水数值模拟[J] . 水利学报, 2011, 42(11) : 1268-1276 .
- [35] 郭新蕾, 杨开林, 付辉, 等 . 冰情模型中不确定参数的影响特性分析[J] . 水利学报, 2013, 44(8) : 909-914 .
- [36] 郭新蕾, 杨开林, 杨淑慧, 等 . 长距离明渠系统反向输水冰情模拟[J] . 水利学报, 2015, 46(7) : 877-882 .
- [37] 穆祥鹏, 陈文学, 崔巍, 等 . 南水北调中线工程冰期输水特性研究[J] . 水利学报, 2011, 42(11) : 1295-1301+1307 .
- [38] 练继建, 罗昉昕, 赵新 . 渠道冰凌下潜的数值模拟研究[J] . 水利学报, 2013, 44(6) : 673-679 .
- [39] 杨开林 . 冰盖河渠水深平均流速的横向分布[J] . 水利学报, 2015, 46(3) : 39-45 .
- [40] NEZHNIKOVSKIY R A . Coefficient of roughness of bottom surfaces of slush ice cover[J] . Soviet Hydrology, Selected Papers, 1964(2) : 127-150 .
- [41] 隋觉义, 方达宪 . 江河冰塞糙率的分析研究[J] . 水利学报, 1993(8) : 10-18 .
- [42] MICKEL B, MARCOTTE N, et al . Formation of border ice in the Ste . Anne River[C]//Proc. of the Workshop on Hydraulics of Ice-Covered River, Univ . of Alberta, Edmonton, Alberta, Canada, 1982 .
- [43] MATOUSEK V . Types of ice runs and conditions for their formation[C]//Proc . , IAHR Ice Symp . , Hamburg,

- 1984 .
- [44] SHEN H T, WANG D S . Undercover transport and accumulation of frazil granules[J] . J . Hydr . Eng . , ASCE, 1995, 120(2): 184-194 .
- [45] 汪德胜, 沈洪道, 孙肇初 . 黄河河曲段输冰水力学机理分析[J] . 泥沙研究, 1993(4): 1-10 .
- [46] KOWALCZYK T, HICKS F . Observations of Dynamic Ice Jam Release on the Athabasca River at Fort McMurray, AB[C]//12th Workshop on the Hydraulics of Ice Covered Rivers, Edmonton, AB, June 19-20: 2003 .
- [47] JASEK M . Ice jam release and break-up front propagation[C]//12th Workshop on the Hydraulics of Ice Covered Rivers, Edmonton, AB, June 19-20: 2003 .
- [48] 王庆凯, 李志军, 曹晓卫, 等 . 实测冰-水侧向界面热力学融化速率[J] . 南水北调与水利科技, 2016, 14(6): 81-86 .
- [49] 王军 . 平衡冰塞厚度与水流条件和冰流量关系的试验研究[J] . 兰州大学学报(自然科学版), 2002, 38(1): 117-121 .
- [50] 王军, 章宝平, 陈胖胖, 等 . 封冻期冰塞堆积演变的试验研究[J] . 水利学报, 2016, 47(5): 693-699 .
- [51] 汪涛, 陈胖胖, 李淑祎, 等 . 弯槽段冰塞形成临界条件的试验研究[J] . 南水北调与水利科技, 2016, 14(6): 87-90 .
- [52] 赵新, 练继建, 黄焱 . 双缆网式拦冰索模型试验[J] . 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2012, 45(11): 953-957 .
- [53] FU H, YANG K L, GUO X L, et al . Safe operation of inverted siphon during ice period[J] . J . of Hydrodynamics, 2015, 27(2): 204-209 .
- [54] 段文刚, 黄国兵, 杨金波, 等 . 长距离调水明渠冬季输水冰情分析与安全调度[J] . 南水北调与水利科技, 2016, 14(6): 96-104 .
- [55] JASEK M, PASLAWSKI K . Instrument for Detecting Freeze-up, Mid-Winter and Break-up Ice Processes in Rivers[C]//Proc . of 13th Workshop on the Hydraulics of Ice Covered Rivers, Hanover, NH, September 15-16, 2003 .
- [56] SHE Y, TANAKOU F N, HICKS F, et al . Ice Jam Formation and Release Events on the Athabasca River[C]//Proc . of 14th Workshop on the Hydraulics of Ice Covered Rivers, Quebec City, June 19-22, 2007 .
- [57] 李志军, 韩明, 秦建敏, 等 . 冰厚变化的现场监测现状和研究进展[J] . 水科学进展, 2005, 16(5): 753-757 .
- [58] 秦建敏, 程鹏, 赵凯 . 利用空气、冰与水物理特性差异实现水情全天候自动化监测[J] . 水力发电学报, 2008, 27(1): 24-27 .
- [59] 张宝森, 郜国明 . 宁蒙河段冰凌监测技术试验研究[J] . 黑龙江水专学报, 2009(4): 90-95 .
- [60] 赵秀娟, 张丽, 秦建敏 . R-T冰情检测传感器在黑龙江漠河河道冬季现场冰情连续自动观测中的应用[J] . 数学的实践与认识, 2015, 45(20): 120-127 .
- [61] 杨涛, 智静, 秦建敏, 等 . 基于介质温度数值分布规律的冰盖厚度检测分析方法[J] . 数学的实践与认识, 2016, 46(13): 118-124 .
- [62] 戎军飞, 秦建敏, 邓霄, 等 . 基于3G网络的河道冰凌图像遥测系统设计与冰凌密度分析[J] . 数学的实践与认识, 2016, 46(12): 108-115 .
- [63] RODHE B . On the Relation between air temperature and ice formation in the Balttic[J] . Geografiska Annaler, 1952(34): 175-202 .
- [64] ADAMS C E J . Estimating water temperature and time of ice formation on the St . Lawrence River[J] . Limnology and Oceanography, 1976, 21(1): 128-137 .
- [65] EDWARD P F, SHEN H T . St . Lawrence River Freeze-Up Forecast[J] . J . of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engrg, 1986(4): 467-481 .
- [66] MASSIE D D, WHITE K D, DALY S . Application of neural networks to predict ice jam occurrence[J] . Cold Regions Science and Technology, 2002, 35(2): 115-122 .
- [67] 可素娟, 王敏, 饶素秋, 等 . 黄河冰情研究[M] . 郑州: 黄河水利出版社, 2002 .
- [68] BLACKBURN J, HICKS F E . Combined flood routing and flood level forecasting[J] . Can . J . Civ . Engrg . , 2002, 29(2): 64-75 .
- [69] 陈守煜, 冀鸿兰 . 冰凌预报模糊优选神经网络BP方法[J] . 水利学报, 2004(6): 1-7 .

- [70] 王涛, 杨开林, 郭永鑫, 等. 神经网络理论在黄河宁蒙河段冰情预报中的应用[J]. 水利学报, 2005, 36(10): 1204-1208.
- [71] 郭永鑫, 王涛, 杨开林, 等. 黄河宁蒙河段冰情预报决策支持系统的设计与开发[J]. 水利水电技术, 2005, 36(10): 67-73.
- [72] YANG K L, WANG T, GUO Y X, et al. An ANN Expert System for Ice Condition Forecast of Yellow River Inner Mongolia Reach[C]//Proc. of 7th International Conference on Hydroinformatics, Nice, FRANCE, 2006.
- [73] WANG T, YANG K L, GUO Y X. Application of artificial neural networks to forecasting ice conditons of the Yellow River in the Inner Mongolia Reach[J]. J. of Hydrologic Engrg., ASCE, 2008, 13(9): 811-816.
- [74] 王军, 伊明昆, 付辉, 等. 基于神经网络预测弯道段冰塞壅水[J]. 冰川冻土, 2006(5): 782-786.
- [75] 王涛, 杨开林, 乔清松, 等. 南水北调中线冬期输水气温研究[J]. 南水北调与水利科技, 2009, 7(3): 14-17.
- [76] 王涛, 杨开林. 神经网络算法在南水北调冰期输水中的应用[J]. 水利学报, 2009, 40(11): 1403-1408.
- [77] 王涛, 杨开林, 郭新蕾, 等. 基于网络的自适应模糊推理系统在冰情预报中的应用[J]. 水利学报, 2012, 43(1): 112-117.
- [78] 王涛, 杨开林, 郭新蕾, 等. 模糊理论和神经网络预报河流冰期水温的比较研究[J]. 水利学报, 2013, 44(7): 842-847.

Advances of ice hydraulics, ice regime observation and forecasting in rivers

YANG Kailin

(State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin,
China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China)

Abstract: The ice regime forecasting is an important scientific basis for conducting prevention, dispatching and decision-making for ice flood. It is also a complicated systematic project involving the ice hydraulics, thermodynamics, meteorology and artificial intelligence. In this paper are reviewed the advances of the ice hydraulics theory, the model experiment and prototype observation, and ice regime forecasting in recent decades, including the ice roughness coefficient calculation, the numerical simulation of the formation and evolution of ice covers, ice jams and ice dams, the typical results of the model experiments and prototype observations, as well as the application of the ground penetrating radar (GPR), ultrasonic, photographing, video-taping, remote sensing and aerial drone technics et al to the ice regime observation. At last, some scientific problems needed to resolve are presented.

Keywords: ice regime forecasting; ice hydraulics; model experiment; prototype observation

(责任编辑: 李琳)