

文章编号:0559-9350(2018)07-0869-08

黄河宁蒙河段冰期洪水波运动过程中的变形分析

王恺祯¹, 王 军¹, 隋觉义²

(1. 合肥工业大学 土木与水利工程学院, 安徽 合肥 230009;

2. 北英属哥伦比亚大学 环境工程系, 加拿大 乔治王子城 V2N 4Z9)

摘要:河道中冰盖的存在会影响到洪水波的演进变形。以黄河宁蒙河段为研究对象, 将马斯京根法尝试应用于冰期洪水计算, 分析了马斯京根法参数与糙率的关系, 比较了冰盖冻结增厚和融化减薄过程对洪水波变形的影响差异。研究表明, 将马斯京根法应用于冰期洪水计算是可行的; 断面的糙率越大, 洪水波传播时间越久, 变形越大; 冰盖冻结增厚过程中, 洪水波的变形存在先增加再减少而后又增加的现象; 冰盖融化减薄过程中, 洪水波随冰厚的减薄而变形增大。相同冰厚下, 两种过程的变形程度存在交点。交点之前的冰厚范围, 冰盖融化减薄时的洪水波变形更大; 交点之后的冰厚范围, 冰盖冻结增厚时的洪水波变形更大。

关键词: 马斯京根法; 冰期洪水; 洪水波变形; 冰盖冻结增厚; 冰盖融化减薄

中图分类号: TV122

文献标识码: A

doi: 10.13243/j.cnki.slxb.20180115

1 研究背景

特殊的地理位置和气候条件使黄河宁蒙河段每年凌汛期(当年11月至次年3月)发生不同程度的凌情^[1], 冰凌会危及桥梁、涵洞、河道工程和其他水工建筑物的安全^[2-3]。在封、开河时期, 如果冰凌严重堵塞河道, 造成水位大幅度地抬高而引发漫滩或决堤, 会给黄河滩区和两岸人民群众的生命财产安全带来威胁和损失, 准确及时的凌汛预报能够为防汛工作提供决策支持。

处于稳定流状态的河道水流, 由于暴雨径流、水电站运行或闸坝放水等原因, 使原来的水面受到干扰而形成不稳定波动, 即洪水波, 波流量从河道上游向下游运动, 就产生了河道里的洪水波运动。洪水波在演进过程中会发生变形^[4], 生产实际中, 洪水波的传播机制是洪水预报、防洪规划和水利工程防洪控制运用中重要的组成部分, 其研究具有重要的理论和实际意义。

目前广泛应用于洪水波的传播计算的马斯京根法由 McCarthy 于 1938 年应用于美国马斯京根河流域而得名, 后经一系列研究, 到 1978 年 Pouce 和 Yevjevich 将变动水面宽度及动力波速度的变动参数应用于 1969 年 Cunge 提出的马斯京根-康吉模型^[5]上, 马斯京根模型此时才基本完善。该方法在实际应用中的一个重要问题是模型参数的估计。在传统方法中, 利用试算法对参数 K 、 α 进行率定, 再计算出决策变量 C_0 、 C_1 、 C_2 , 但是试算法具有盲目性、不确定性等缺陷, 因此有学者选择了直接优化决策变量 C_0 、 C_1 、 C_2 , 得到较好的效果, 主要方法有最小二乘法^[6], 遗传算法^[7], 粒子群算法^[8]等。马斯京根法的参数 K 反映洪水波的传播时间, 而 α 则反映河段蓄量的大小及调蓄能力。

对于洪水演进, 可采用水力学的非恒定流法和水文学的马斯京根法来计算。当河流有冰存在时, 由于冰水存在能量、质量交换, 使得计算难度加大, 而马斯京根法可以从水量平衡方程中考虑到冰水量的相互转化问题, 本文拟应用马斯京根法对冰期冰盖下洪水波的变形进行尝试性研究计算。

收稿日期: 2018-01-13; 网络出版日期: 2018-07-18

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1882.TV.20180718.0916.001.html>

基金项目: 国家自然科学基金项目(51379054)

作者简介: 王恺祯(1993-), 女, 安徽合肥人, 硕士生, 主要从事水文学及水资源研究。E-mail: 397120749@qq.com

通讯作者: 王军(1962-), 男, 安徽天长人, 教授, 博士生导师, 主要从事河冰水力学研究。E-mail: junwanghft@126.com

2 考虑有冰存在的马斯京根法

在水文循环过程中,任一区域、任一时段内输入水量与输出水量之差等于其蓄水量的变化量,根据质量守恒定律可写出某一区域任一时段(Δt)内的水量平衡方程:

$$\frac{I_1 + I_2}{2} \Delta t - \frac{Q_1 + Q_2}{2} \Delta t = \Delta W \quad (1)$$

冰期进行水量平衡计算时,若忽略上游水流向下游传播过程中转化为冰的水量,以及上游冰盖或浮冰消融流入下游水流中的水量,而完全使用水量平衡方程的一般公式,则会增大下游断面计算流量的误差,考虑冰量存在的水量平衡方程应为:

$$\left(\frac{I_1 + I_2}{2} \Delta t + \Delta d_1 \Delta B_1 \bar{v}_{\text{冰}1} \Delta t \right) - \left(\frac{Q_1 + Q_2}{2} \Delta t + \Delta d_2 \Delta B_2 \bar{v}_{\text{冰}2} \Delta t \right) = \Delta W \quad (2)$$

式中: I_1 、 I_2 为上游断面时段始、末流量, m^3/s ; Q_1 、 Q_2 为下游断面时段始、末流量, m^3/s ; Δt 为所取的计算时长, s ; ΔW 为时段槽蓄水量的变化量, m^3 ; Δd_1 、 Δd_2 为上、下游断面冰盖厚度的变化值, m ; ΔB_1 、 ΔB_2 为上、下游断面冰盖宽度的变化值, m ; $\bar{v}_{\text{冰}1}$ 、 $\bar{v}_{\text{冰}2}$ 为上、下游断面冰盖下的平均流速, m/s 。

天然河道洪水波运动的动力方程为:

$$-\frac{\delta Z}{\delta L} = S_f + \frac{1}{g} \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{v}{g} \frac{\partial v}{\partial L} \quad (3)$$

式中: Z 为水位, m ; L 为河段长, m ; v 为断面平均流速, m/s ; g 为重力加速度, m/s^2 ; $-\frac{\delta Z}{\delta L}$ 为水面比降; S_f 为摩阻项,用曼宁公式计算; $\frac{1}{g} \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{v}{g} \frac{\partial v}{\partial L}$ 为惯性项。式(3)是以牛顿第二定律为基础建立起来的,反应了能量守恒,对于一般的天然河道水流,动力方程中惯性项较其他项要小两个数量级,通常忽略。对无旁侧入流的冰期河段,忽略惯性项,式(3)可写成:

$$-\frac{\delta Z}{\delta L} = S_f = \frac{v_c^2}{C^2 R_c} \quad (4)$$

$$C = \frac{1}{n_c} R_c^{1/6} \quad (5)$$

式中: v_c 为冰盖下过水断面的平均流速, m/s ; C 为谢才系数; R_c 为冰盖下过水断面的水力半径, m ; n_c 为冰盖下的综合糙率,其计算方法参见文献[9]。

冰盖生成时,水流的流动结构发生显著的改变,一般以最大流速线将流动沿水深方向分为冰盖区和床面区两层,对于概化的矩形断面,床面区湿周 $\chi_b = b + 2H$, 冰盖区湿周 $\chi_i = b$:

$$R_c = \frac{A_c}{\chi_b + \chi_i} = \frac{bH}{2(b + H)} \quad (6)$$

冰期河槽蓄水量 W_c 为

$$W_c = L \bar{A}_c = Lb\bar{H} \quad (7)$$

式中: H 为冰盖下流动的水深, m ; b 为断面宽, m ; A_c 为冰盖下过水断面面积, m^2 ; $\bar{A}_c$ 为冰盖下平均过水断面面积, m^2 ; $\bar{H}$ 为冰盖下平均流动的水深, m 。

对于宽浅型河槽, $R_c \approx \frac{H}{2}$, 冰期河段平均流量 $\bar{Q}_c$ 为:

$$\bar{Q}_c = v_c \bar{A}_c = C \sqrt{\frac{\bar{H}}{2}} J_c b \bar{H} \quad (8)$$

将式(8)代入到式(7)后得

$$W_c = \frac{\sqrt{2} L b}{C \sqrt{J_c}} \overline{Q_c} \quad (9)$$

可写成函数形式

$$W_c = f(\overline{Q_c}, J_c) \quad (10)$$

若河段冰期平均流量 $\overline{Q_c}$ 用入流量 I_c 和出流量 Q_c 表示, 则

$$W_c = f(I_c, Q_c) \quad (11)$$

假定冰期槽蓄水量 W_c 和入流量 I_c 、出流量 Q_c 存在线性关系, 马斯京根法在忽略惯性项下的槽蓄方程为:

$$W_c = K [x I_c + (1 - x) Q_c] \quad (12)$$

式中: J_c 为冰期断面的水力坡度; K 和 x 为马斯京根法的流量演算参数, K 值等于在相应蓄量下恒定流状态的河段传播时间, K 值越小, 洪水波传播时间越短, 反之越长; x 是反应河槽调节作用的一个指标, 即反应洪水波传播过程变形的程度, x 减小, 洪水波变形增加, 反之减少。

进一步分析 K 、 x 和糙率的关系, K 的计算公式为:

$$K = \frac{L}{c} \quad (13)$$

明流时期, 概化的矩形断面洪水波波速 c 与断面平均流速 $\bar{v}$ 的关系为^[10]:

$$c = \frac{5}{3} \bar{v} \quad (14)$$

由曼宁公式及式(13)、式(14)可以推出明流时期 K 的计算公式为:

$$K = \frac{3}{5} \times \frac{nL(2H_0 + b)^{2/3}}{(bH_0)^{2/3} J^{1/2}} \quad (15)$$

x 的计算公式为^[11]:

$$x = \frac{1}{2} - \frac{Q_0}{2JcbL} \quad (16)$$

稳定流流量 Q_0 的计算公式为^[12]

$$Q_0 = Q_b + 0.5(Q_p - Q_b) \quad (17)$$

由曼宁公式及式(13)、式(14)、式(16)可以推出明流时期 x 的计算公式为:

$$x = \frac{1}{2} - \frac{3}{10} \frac{(nQ_0)^{2/3}}{b^{3/5} J^{13/10} L} \quad (18)$$

式中: H_0 为相应的稳定流水位, m; J 为明流期时断面的水力坡度; n 为河床糙率系数; Q_b 为基流流量, m^3/s ; Q_p 为洪峰流量, m^3/s 。

由式(15)、式(18)可知, K 值与糙率成正比, x 与糙率成反比, 即糙率越大, 洪水波传播时间越长, 洪水波的变形越大。

3 宁蒙河段冰期马法计算验证

如图1所示, 宁蒙河段地处黄河流域最北端, 从宁夏的石嘴山市和内蒙古伊克昭盟的拉僧庙入境, 至伊克昭盟准格尔旗马栅的榆树湾出境, 干流全长840 km, 总落差162.5 m。河道流向从石嘴山至巴彦高勒为由西南流向东北, 巴彦高勒至包头市为自西向东, 包头市至清水河县的喇嘛湾为由西北流向东南, 喇嘛湾至出境为由北向南^[13]。

选择黄河宁蒙河段的巴彦高勒(东经 $106^\circ 02'$, 北纬 $40^\circ 19'$)、三湖河口(东经 $106^\circ 47'$, 北纬 40°)

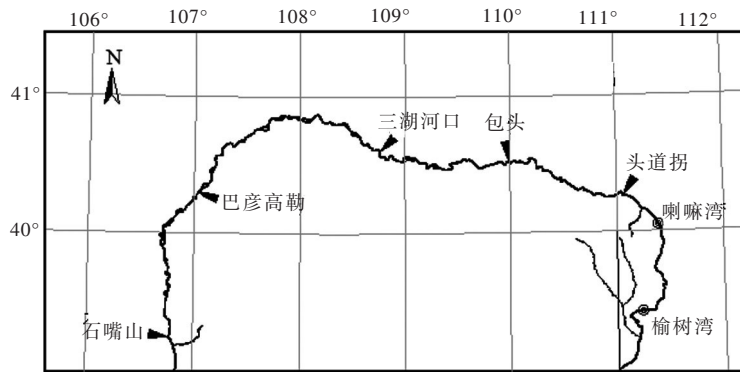


图1 宁蒙河段示意图

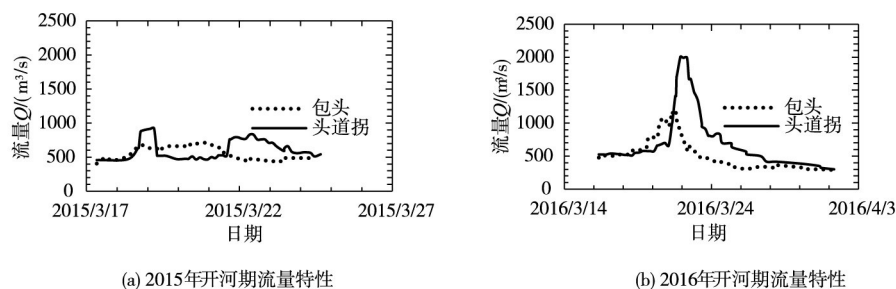


图2 开河期流量特性

36′)、包头(东经 109°55′, 北纬 40°32′)、头道拐(东经 111°04′, 北纬 40°16′)为研究的水文测站, 采用 2014—2016 年流量数据进行计算分析。

图 2(a) 为 2015 年包头和头道拐水文站开河期的流量过程线, 下游头道拐水文站比上游包头水文站提前 4 天半开河, 其流量过程出现了两场比较大的洪水, 前一场洪水由下游提前开河时槽蓄水量的释放形成, 洪水呈“尖瘦”状; 后一场洪水由上游开河, 槽蓄水量向下游传播形成, 洪水形状相对前一场较“矮胖”, 洪量更大。图 2(b) 为 2016 年包头和头道拐水文站开河期的流量过程线, 上游包头水文站先于下游头道拐水文站开河, 洪峰演进过程沿程增大, 上下游洪峰间隔时间沿程减小。

选取稳封期到开河期前夕、开河期、明流期三个计算时期, 应用最小二乘原理进行马斯京根法参数 K 、 x 的最优估计, 并对其计算值的可靠性进行验证, 对流量过程、洪峰流量及洪量进行误差计算。限于篇幅, 对于流量过程的演算仅列出三湖河口—包头河段, 如图 3 所示。

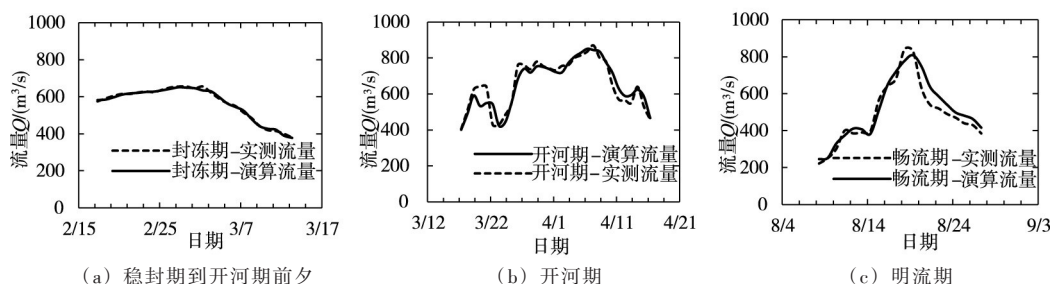


图3 包头断面演算流量与实际流量过程对比

从数值上分析流量误差, 稳封期到开河期前夕的误差小于明流期的误差小于开河期的误差, 计算值与实测值的数值和趋势皆比较接近, 流量演算拟合程度高, 洪峰流量和洪量的误差及确定性系数的计算结果如表 1 所示。

从确定性系数上看, 马斯京根法计算下的明流时期高于有冰存在的两种情况, 有冰存在的确定性系数最小为 0.793, 仍比较高, 故认为将马斯京根法应用于冰期是可行的。

表1 洪峰流量及洪量的误差分析

河段	时段	实测洪峰流量/(m ³ /s)	演算洪峰流量/(m ³ /s)	误差/%	实测洪量/m ³	演算洪量/m ³	误差/%	确定性系数
巴彦高勒	2015/2/19-3/1(冰盖)	668	660	-1.2	495158400	491388146	-0.8	0.793
一三湖河口	2015/3/1-4/10(浮冰)	900	881	-2.1	1887364800	1809724067	-4.1	0.914
口	2015/8/1-2015/9/7(无冰)	890	814	-8.5	1433160000	1427381533	-0.4	0.938
三湖河口	2015/2/16-3/13(冰盖)	668	651	-2.5	1182081600	1178926428	-0.3	0.997
一包头	2015/3/16-4/16(浮冰)	870	851	-2.2	1721822400	1694960476	-1.6	0.917
	2015/8/7-8/27(无冰)	840	808	-3.8	820670400	868684919	5.9	0.962
包头—头道拐	2015/3/18-3/25(冰盖)	830	742	-10.6	304128000	295779332	-2.7	0.810
	2015/3/17-4/20(浮冰)	830	840	1.2	1810296000	1815117898	0.3	0.848
	2015/8/9-9/6(无冰)	690	748	8.4	916660800	973493649	6.2	0.921

4 封冻期洪水波传播变形分析

将封冻期冰盖的发展过程分为两部分,以冰盖达到最厚为临界点,从初封到冰盖达到最厚视为冰盖的冻结增厚过程,冰盖从最厚到瓦解消融视为冰盖的融化减薄过程。参数 x 能够间接反映洪水波传播的变形,对任一时段,可通过马斯京根方程求出参数 x 值,以及同时段的平均冰厚值 d ,从而建立参数 x 与平均冰厚 d 的散点关系图。

根据2013—2017年封冻期的流量及冰厚数据进行计算。每隔5~6 d建立一组马斯京根法的流量方程,一组方程能够求解得到一个 x 值。计算时对流量进行内插,时间间隔取 $\Delta t=8\text{h}$,冰厚 d 取时段始末的均值。冰盖冻结增厚时期参数 x 与平均冰厚 d 的散点关系图如图4所示。

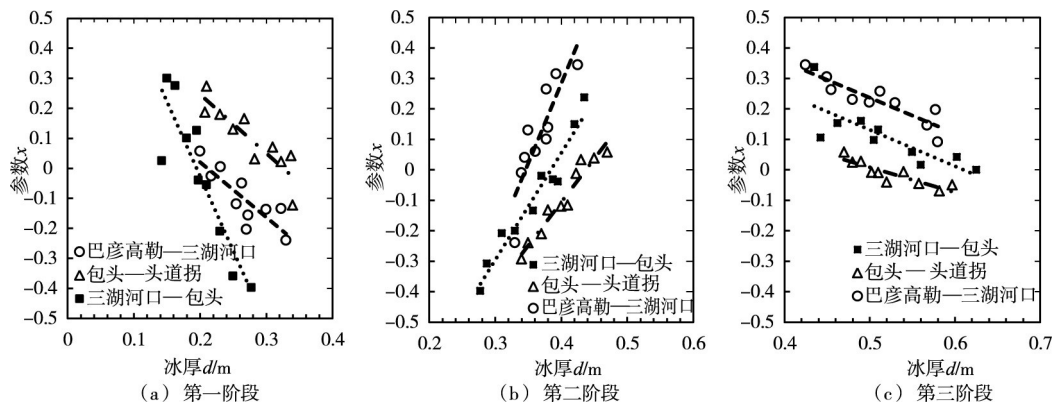


图4 冰盖冻结增厚过程参数 x 与冰厚 d 关系

冰盖的冻结增厚过程对洪水波变形的影响可分为3个阶段。图4(a)为第一个阶段,冰盖处于初封期,冰盖的增厚使洪水波变形增大,这一阶段冰盖增厚速度在0.01~0.03 m/d,巴彦高勒—三湖河口段的计算冰厚范围在0.25~0.33 m,三湖河口—包头段的计算冰厚范围在0.14~0.27 m,包头—头道拐段的计算冰厚范围在0.20~0.34 m;之后进入第二阶段,如图4(b)所示,冰盖的增厚使洪水波变形减小,这一阶段冰盖增厚的速度稳定且缓慢,增厚速度小于0.01 m/d,巴彦高勒—三湖河口段的计算冰厚范围在0.33~0.42 m,三湖河口—包头段的计算冰厚范围在0.27~0.43 m,包头—头道拐段的计算冰厚范围在0.34~0.47 m;到了第三阶段,如图4(c)所示,洪水波的变形又相对增大,这一阶段冰厚几乎没有变化,而流量持续增大,气温逐渐上升,有些天数日最高气温已达0℃以上,巴彦高勒—三湖河口段的计算冰厚范围在0.42~0.58 m,三湖河口—包头段的计算冰厚范围在0.43~0.62 m,包头—头道拐段的计算冰厚范围在0.47~0.60 m。

综上所述, 在冰厚快速增加的第一阶段, 冰盖的出现增大了过水断面的湿周和阻力^[14], 河段综合糙率增加, 洪水波变形增大; 随后在冰厚缓慢增加的第二阶段, 由于水力磨蚀作用, 冰盖底部渐趋光滑, 糙率降低, 洪水波变形减小; 最后在冰厚几乎不发生改变但流量增大的第三阶段, 由于冰厚保持最大值状态, 稳封期综合糙率没有大的改变, 由式(18)知, Q_0 与 x 成反比, 流量增大, 通过影响 Q_p , 使 Q_0 增大, x 减小, 故洪水波变形增大。

冰盖融化减薄期参数 x 与平均冰厚 d 的关系图如图5所示。

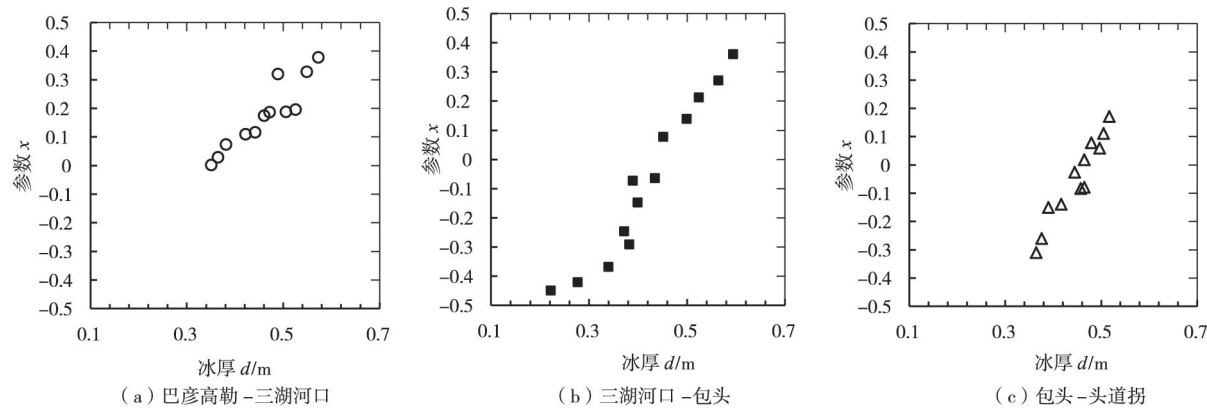


图5 冰盖融化减薄过程参数 x 与冰厚 d 关系

冰盖融化减薄的时期, 由于冰盖融化至0.35 m以下的冰厚数据极少, 故计算范围有限。计算范围内的洪水波变形随冰盖的消融而增大, 巴彦高勒—三湖河口段的计算冰厚范围为0.35~0.57 m; 三湖河口—包头段的计算冰厚范围为0.22~0.6 m; 包头—头道拐段的计算冰厚范围为0.36~0.52 m。

将冰盖冻结增厚和冰盖融化减薄过程对比分析, 巴彦高勒—三湖河口段的计算冰厚范围在0.35~0.58 m, 三湖河口—包头段的计算冰厚范围在0.22~0.60 m, 包头—头道拐段的计算冰厚范围在0.34~0.52 m。计算结果如图6所示。

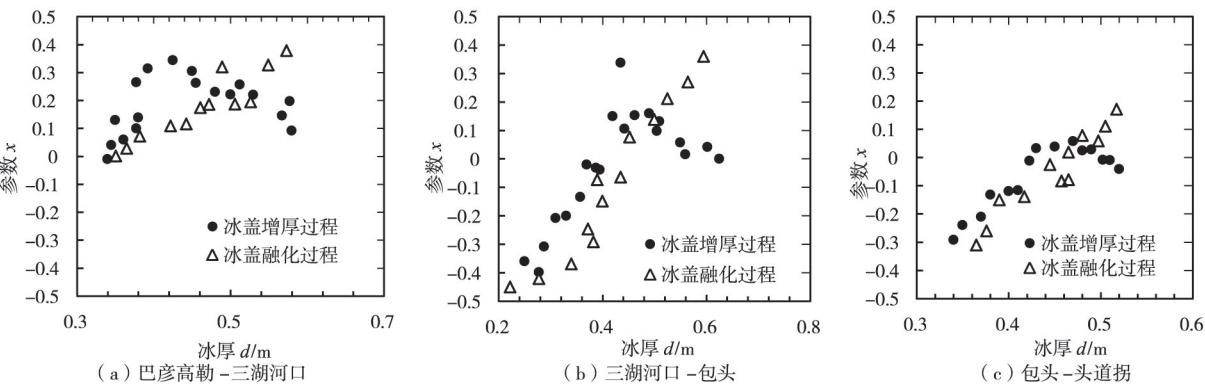


图6 冰盖冻结增厚与融化减薄过程参数 x 与冰厚 d 关系对比

冰盖冻结增厚过程和冰盖融化减薄过程下洪水波的变形程度并不一致, 且两个过程的参数 x 均会在冰盖冻结增厚对洪水波传播变形的第三阶段有交点, 交点之前的冰厚范围, 冰盖融化减薄时的洪水波变形更大, 交点之后的冰厚范围, 冰盖冻结增厚时的洪水波变形更大。冰厚的计算范围如表2所示。

由于洪水波传播过程的变形程度为水深和冰盖糙率的综合作用, 冰盖融化减薄时的洪水波变形更多, 说明该冰厚范围内, 相同冰厚下冰盖融化减薄过程的冰下过流能力更小; 冰盖冻结增厚时的洪水

表2 各河段冰厚与洪水波变形分析

河段	冰厚/m	洪水波变形
巴彦高勒—三湖河口	0.35~0.50	融化>增厚
	0.50~0.58	融化<增厚
三湖河口—包头	0.22~0.50	融化>增厚
	0.50~0.60	融化<增厚
包头—头道拐	0.34~0.46	融化>增厚
	0.46~0.52	融化<增厚

波变形更多,说明该冰厚范围内,相同冰厚下冰盖融化减薄过程的冰下过流能力更大。

5 结论

基于马斯京根法,选取黄河宁蒙河段为研究对象,经过分析,得出以下结论:

通过 K 、 x 的计算公式,分析其与糙率的关系,得出 K 值与糙率成正比, x 与糙率成反比,即糙率越大,洪水波传播时间越长,洪水波的变形越大。

对计算出的马斯京根法参数 K 、 x 的可靠性进行验证,得出计算值与实测值的数值与趋势皆比较接近,认为将马斯京根法应用于冰期是可行的。

冰盖冻结增厚过程对洪水波传播的影响可分为3个阶段:在冰厚快速增大的第1阶段,断面综合糙率增加,洪水波变形增大;随后在冰厚缓慢增加的第2阶段,断面综合糙率的降低使洪水波变形减小;最后在冰厚几乎不发生改变但流量增大的第3阶段,断面综合糙率没有大的变化,流量的持续增加使洪水波变形增大。冰盖的融化减薄过程,流量持续增加,冰厚的减小使洪水波变形增大。两个过程的参数 x 均会在冰盖冻结增厚对洪水波变形影响的第3阶段有交点,交点之前的冰厚范围,冰盖融化减薄时的洪水波变形更大,冰下过流能力更小,交点之后的冰厚范围,冰盖融化减薄时的洪水波变形更小,冰下过流能力更大。

致谢:研究工作得到黄河水利科学研究院的大力支持,谨致真挚谢意!

参 考 文 献:

- [1] 姚惠明,秦福兴,沈国昌,等.黄河宁蒙河段凌情特性分析[J].水科学进展,2007,18(6):893-899.
- [2] WANG J, SHI F Y, CHEN P P, et al. Impacts of bridge piers on the initiation of ice cover—an experimental study [J]. Journal of Hydrology and Hydromechanics, 2015, 63(4): 327-333.
- [3] WANG J, HUA J, SUI J Y, et al. The impact of bridge pier on ice jam evolution—an experimental study[J]. Journal of Hydrology and Hydromechanics, 2016, 64(1): 75-82.
- [4] 芮孝芳.水文学原理[M].北京:中国水利水电出版社,2004.
- [5] PONCE V M, YEVJEVICH V. Muskingum-Cunge Method with variable parameters[J]. Journal of the Hydraulics Division, 1978, 104(12): 1663-1667.
- [6] 何惠,张建云.马斯京根法参数的一种数学估计方法[J].水文,1998(5):14-17.
- [7] 鲁帆,蒋云钟,王浩,等.多智能体遗传算法用于马斯京根模型参数估计[J].水利学报,2007,38(3):289-294.
- [8] 李明明,李承军,张铭.改进 PSO 法在马斯京根模型参数估计中的应用[J].人民长江,2008,39(3):60-61.
- [9] 杨开林.明渠冰盖下流动的综合糙率[J].水利学报,2014,45(11):1310-1317.
- [10] 孔凡哲,王晓赞.基于河段特征的马斯京根模型参数估算方法[J].中国矿业大学学报,2008,37(4):494-497.
- [11] CUNGE J A. On the subject of a flood propagation computation method (Muskingum method)[J]. Journal of Hydraulic Researches, 1969(7): 205-230.
- [12] WILSON B N, RUFFINI J R. Comparison of physically-based Muskingum methods[J]. Transactions of the Asae, 1988, 31(1): 91-97.
- [13] 蔡琳.中国江河冰凌[M].郑州:黄河水利出版社,2008.
- [14] 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):291-297.

Deformation of flood wave during ice river period in the Ningxia–Inner Mongolian Reach of the Yellow River

WANG Kaizhen¹, WANG Jun¹, SUI Jueyi²

(1. School of Civil and Hydraulic Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China

2. Environmental Engineering Program, University of Northern British Columbia, Prince George, BC, Canada, V2N 4Z9)

Abstract: The existence of ice cover in northern river courses may affect flood routing and the deformation of flood wave propagation. Taking the Ningxia–Inner Mongolia Reach of the Yellow River as the research object, the Muskingum method is applied to calculate the flood routing during ice period, analyzing the relationship between the Muskingum parameters and the roughness, and comparing the difference of the impacts of ice cover thickening and thawing processes on the flood wave deformation. The results indicate that it is feasible to apply the Muskingum method to calculate flood during ice river period, the greater the section roughness, the longer the flood wave propagation and the greater the degree of deformation will be. During the ice cover thickening process, the deformation of flood wave increases at first, then decreases, and afterward increases again. During the ice cover thawing process, the deformation of flood wave increases. In the case of same ice thickness, there is an intersection of flood wave deformation during two processes of ice thickness development. Before the intersection point of ice thickness range, the deformation of flood wave is greater when ice cover melts and thins. After that, the deformation of flood wave is greater when ice cover freezes and thickens.

Keywords: Muskingum method; ice river flood; flood wave deformation; ice cover thickening; ice cover thawing

(责任编辑: 李福田)

(上接第 868 页)

Investigation on the clocking effect of a double-entry two-stage double suction centrifugal pump with high head

YE Changliang¹, WANG Fujun^{1, 2}, LI Huaicheng³, LI Zhentan³, SONG Qingsong³

(1. College of Water Resources & Civil Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China;

2. Beijing Engineering Research Center of Safety and Energy Saving Technology for Water Supply Network System in China Agricultural University, Beijing 100083, China; 3. Shanghai Liancheng Group Company, Shanghai 201812, China)

Abstract: The clocking effect caused by the relative position between impeller and diffuser vane has great effect on the performance of a pump. The clocking effect of a double-entry two-stage double suction centrifugal pump which is often used in the Yellow River Diversion Project is investigated. Four schemes with relative installation angle 0°, 15°, 30° and 45° between the two stage impellers which have six blades are designed. The influence of clocking effect on the unsteady pressure fluctuation in the pump and on the radial force of impeller at three typical conditions is investigated. The results show that the clocking effect has little influence on the head and efficiency whose discrepancy is less than 2%. The clocking effect has great influence on both the pressure fluctuation and the unsteady radial force imposed on the impeller. For the 30° scheme, the pressure fluctuation amplitude of inter-stage flow channel tongue is reduced by 70%, 38% and 40% respectively compared with 0°, 15° and 45° schemes at design condition, and the pressure pulsation amplitude of the volute tongue is reduced by 31%, 18% and 22%. The radial force of the impeller varies periodically at three typical conditions. The radial force of the impeller is the smallest for the 30° scheme. Thus, it is suggested that the relative position between the impellers of two-stage double suction centrifugal pump should be installed circumferential symmetric staggered to obtain better performance. The research results provide a scientific basis for the optimal design and stable operation for the high head multi-stage centrifugal pumps.

Keywords: high head; two-stage double-suction centrifugal pump; clocking effect; pressure fluctuation; radial force

(责任编辑: 杨虹)