

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2018.0135

胡 玮,冯晓波,朱 锐,等.南水北调中线某节制闸弧形门小开度振动观测与安全评价[J].南水北调与水利科技,2018,16(5):139-143,151. HU W, FENG X B, ZHU R, et al. Field tests and safety evaluation of radial gate vibration under small opening condition in the Middle Route of South to North Water Diversion Project[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2018, 16(5): 139-143, 151. (in Chinese)

南水北调中线某节制闸弧形门小开度振动观测与安全评价

胡 玮¹,冯晓波¹,朱 锐¹,陈 清¹,郭永鑫²,郭新蕾²

(1.南水北调工程建设监管中心,北京 100038;2.中国水利水电科学研究院,北京 100038)

摘要:南水北调中线工程冬季闸门小开度运行,闸后淹没水跃紊动剧烈,为验证小开度下闸门运行的安全性,选取蒲阳河典型节制闸开展闸门振动原型观测。通过测量不同开度下的闸门振动特性,分别采用动应力、振动位移(振幅)和频率作为标准进行振动安全评价,结果表明:闸门最大动应力为1.33 MPa,远小于材料允许应力的20%(约32 MPa);最大振动位移15.97 μm,小于闸门振动危害程度可忽略不计的上限位移50.8 μm;所有测试工况的安全临界振幅 A 与频率 f 满足 $\lg A < (3.14 - 1.16 \lg f)$ 。上述三种评价准则的判定结果一致,因此,中线闸门小开度淹没出流条件下,闸后水跃紊动引起的闸门振动危害可忽略,闸门结构安全稳定。

关键词:弧形闸门;小开度;动应力;振动位移;安全评价;原型观测

中图分类号:TV 32 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-1683(2018)05-0139-05

Field tests and safety evaluation of radial gate vibration under small opening condition in the Middle Route of South to North Water Diversion Project

HU Wei¹, FENG Xiaobo¹, ZHU Rui¹, CHEN Qing¹, GUO Yongxin², GUO Xinlei²

(1. Supervision Center of South to North Water Diversion Project, Beijing 100038, China;

2. China Institute of Water Resources & Hydropower Research, Beijing 100038, China)

Abstract: In winter, the controlling gates of the Middle Route of South to North Water Diversion Project are operated under small opening condition. The submerged hydraulic jump is accompanied by severe turbulence behind the sluice gates. To evaluate the safety of gate operation under small opening condition, we conducted field tests on the Puyang River Gates and measured the parameters of gate vibration under the conditions of different gate openings. The test results indicated that the maximum dynamic stress of the gates is 1.33 MPa, smaller than 20% of the allowable stress, i. e. about 32 MPa. The maximum vibration displacement 15.97 μm is less than the upper limit displacement 50.8 μm, below which the hazard of gate vibration can be negligible. The relation between amplitude A and frequency f follows $\lg A < (3.14 - 1.16 \lg f)$. The evaluation results of the above 3 kinds of criteria are consistent; therefore, the hazard of gate vibration induced by submerged hydraulic jump is negligible, and the gate structure is safe and stable when the sluice gates are operated in small opening condition.

Key words: radial gate; small opening; dynamic stress; vibrational displacement; safety evaluation; field test

收稿日期:2018-04-02 修回日期:2018-05-28 网络出版时间:2018-06-14

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20180613.1110.004.html>

基金项目:国家重点研发计划课题(2017YFC0405103);国家自然科学基金(51679262)

Funds: National Key R & D Program of China (2017YFC0405103); National Natural Science Foundation of China (51679262)

作者简介:胡 玮(1966),女,浙江宁波人,教授级高级工程师,主要从事调水工程运行管理方面研究。E-mail: h w@nsbd.cn

通讯作者:郭永鑫(1978),男,山西阳泉人,高级工程师,主要从事调水工程水力控制方面研究。E-mail: guoyx_1123@163.com

南水北调中线工程是实现南北水资源合理配置,缓解京、津、华北平原水资源供需矛盾,支撑该地区国民经济和社会可持续发展的重大战略性基础设施。中线工程运行初期取水流量较小,尤其是冬季受冰情影响,行程 6~7 m 的闸门开度仅为几十厘米或 1 m 左右,闸门长期在小开度淹没出流条件下运行^[1,2],闸后淹没水跃紊动剧烈,形成向上游剧烈反转的漩涡和往复水流,对闸门产生周期性的冲击,见图 1。



图 1 蒲阳河节制闸小开度下游流态

Fig. 1 Flow pattern down the Puyang River sluice gate in winter

闸门与动水接触时,总会出现不同程度的振动,一般情况下,闸门振动主要表现为水动力荷载作用下的低频振动,振动比较微弱,不致影响闸门的安全运行^[3-5]。但在某些特定运行条件下,如果水流的脉动频率接近闸门的自振频率,不管这种激励频率是外力固有的,还是由于闸门结构与水流发生耦合而次生的,都将导致闸门发生共振,如果振幅达到很大值,还将使闸门整体或局部发生强烈振动,在闸门结构内出现不平常的应力和应变,使闸门受到损害,甚至影响建筑物安全稳定^[6,7]。

鉴于此,选取南水北调中线典型闸门——蒲阳河倒虹吸出口节制闸开展闸门振动响应原型观测,测量不同小开度运行条件下闸门的振动应力、振动加速度和振动位移等动态特性^[8,9],选取合理的评价准则进行闸门振动安全评价,为制定科学合理的调度运行规程,保证闸门安全运行提供依据。

1 闸门振动观测内容和方法

1.1 观测内容

河北段蒲阳河倒虹吸出口节制闸建筑物设有 3 孔闸门,闸孔单宽 $b = 6.0$ m,下游渠道宽度 $B = 20.4$ m,门轴高度 $P = 8.8$ m,弧门半径 $R = 10.0$ m,闸前渠底高程 64.266 m,闸后渠底高程 64.14 m,设计输水流量 135.0 m³/s。冬季观测期间运行流量 47.3 m³/s,占设计流量的 35%,闸门处于小开度运行状态。为避免闸门不对称开启产生的折冲水流、偏流、回流等不利流态对渠道运行的影响,选取中间 2 号闸门进行振动响应观测,主要观测的内容

包括:振动应力、振动加速度和振动位移。

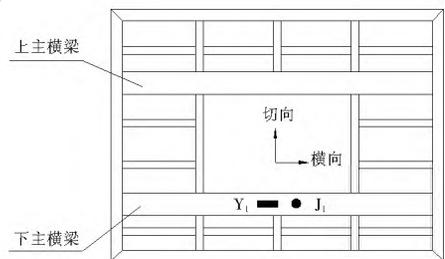
1.2 观测方法

振动响应测点布置主要考察结构受力最大和变形较大的区域,以及闸门面板和支臂刚度薄弱区^[10-11],具体见表 1 和图 2。具体观测方法如下。

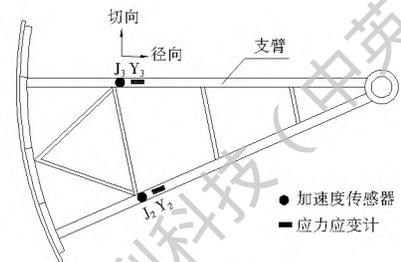
(1) 振动应力。振动应力的观测采用高性能贴片式电阻应变计(灵敏系数为 2.14),二次仪表采用日本 TML 的 SDA-810 型高分辨率动态应变仪(分辨率为 0.1 $\mu\epsilon$)。测得应变之后根据胡克定律 $\sigma = E \epsilon$ (其中: σ 为应力; E 为弹性模量,钢材的弹性模量 $E = 2.06 \times 10^5$ MPa; ϵ 为应变)来推算其动应力。

表 1 振动响应观测内容、仪器和测点位置
Tab. 1 Measuring content, instruments, and positions for the gate vibration field test

观测变量	观测仪器	测点编号	测点位置
振动应力	贴片式电阻应变计	Y ₁	下主横梁中部
		Y ₂	下支臂靠近主横梁部位
		Y ₃	上支臂靠近主横梁部位
振动加速度和振动位移	三轴振动加速度传感器	J ₁	下主横梁中部
		J ₂	下支臂靠近主横梁部位
		J ₃	上支臂靠近主横梁部位



(a) 面板测点布置



(b) 支臂测点布置

图 2 闸门振动响应测点布置

Fig. 2 Layout of the measuring points

(2) 振动加速度和振动位移。振动加速度和振动位移的测试采用耐压防水的三轴振动加速度传感器,分别测量径向(沿弧门支臂方向)、切向(沿弧形面板切线方向)及横向(垂直于径向和切向平面)的振动加速度,振动位移通过对加速度信号经电荷放大器二次积分所得。测试传感器采用测量信号质量

好、噪声小、抗外界干扰能力强和传输距离远的 CA-YD-132 型高灵敏度压电式加速度传感器(灵敏度为 200 PC/ms^2), 二次仪表采用丹麦 B & K 的 2692 型双积分电荷放大器进行信号放大。

传感器信号处理采用东方振动与噪声技术所的 INV306D(M)E 智能信号采集系统, 试验采样频率为 200 Hz 。闸门振动信号采集系统结构见图 3, 传感器现场安装照片见图 4, 所有传感器均须进行防水、防潮处理, 信号电缆采用水下专用的多芯屏蔽电缆, 防止意外因素导致传感器损毁和失效, 确保试验顺利进行。

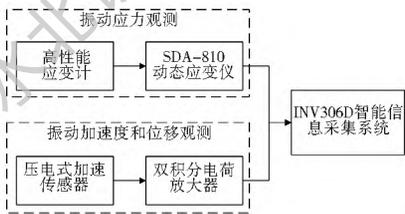


图 3 闸门振动信号采集系统结构

Fig. 3 Sketch of the data acquisition system for gate vibration



图 4 传感器现场安装照片(上支臂)

Fig. 4 Photos of field installation of instruments (upper arm)

2 安全评价依据

弧形闸门流激振动是一个复杂的流固耦合问题, 研究弧形闸门的流激振动最终目的是为了保证闸门的安全运行, 制定闸门适宜的安全开度运行范围和操作规程。闸门振动特性测量出来后, 如何判断结构的危害程度, 即关于闸门振动的安全性评价问题, 目前还没有统一的标准。

2.1 以振动应力作为标准

我国《水利水电工程钢闸门设计规范 SL 74-2013》^[2] 建议, 对于经常局部开启的工作闸门, 设计时应考虑动力荷载, 其动力荷载设计的动力系数上限一般不超过 1.2, 另外, 金属构件的局部振动应力也要求不大于允许应力的 20%。因此, 可以认为钢闸门的动应力应小于材料允许应力的 20%, 钢材的允许应

力通常在 160 MPa 左右, 则其动应力应小于 32 MPa 。

2.2 以振动位移作为标准

美国陆军工程师团在阿肯色河(Arkansas River)弧形闸门振动测试中以振动位移的均方根值来划分闸门振动的危害程度^[13], 见表 2。

表 2 美国阿肯色河(Arkansas River)闸门振动标准
Tab. 2 Gate vibration standard for Arkansas River in U.S.

均方根位移 / μm	振动危害程度
0~ 50.8	忽略不计
50.8~ 254.0	微小
254.0~ 508.0	中等
> 508.0	严重

2.3 以振动位移(振幅)和频率的综合效应作为标准。

德国的 K. Petrikat^[14, 15] 认为振动的危害程度取决于振幅和频率的综合效应, 以横坐标为频率、纵坐标为振幅在对数坐标轴上将危害程度划分为稳定、尚稳定、可以允许的、稍不稳定的、不稳定和很不稳定 6 个区间, 并给出安全临界振幅 A 和频率 f 的函数表达式:

$$\lg A < (3.14 - 1.16 \lg f) \quad (1)$$

式中: A 为安全临界振幅(μm); f 为频率(Hz)。振动频率越高, 相应的安全临界振幅越小。

以上允许振动位移(振幅)和应力是振动安全度的下限, 超过允许值并不意味着闸门结构的破坏, 而是意味着振动可能带来不安全, 必须对闸门结构进行动力计算校核, 并采取相应的预防措施。

3 小开度运行振动响应特性及安全评价

3.1 观测工况

观测过程中调节中间 2 号闸门开度 e 分别为 199 mm 、 398 mm 、 606 mm 、 799 mm 、 1000 mm , 开度间隔约 200 mm , 测量不同开度下的振动应力、振动加速度和振动位移, 同步记录各工况的上下游水位和闸门开度, 计算相应的过闸流量, 具体工况见表 3。

表 3 闸门振动观测工况

Tab. 3 Test cases for the gate vibration

工况	开度/m	闸前水深/m	闸后水深/m	流量/($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)
1号	0.199	4.284	2.334	6.364
2号	0.398	4.284	2.344	12.696
3号	0.606	4.264	2.334	19.565
4号	0.799	4.244	2.344	25.940
5号	1.000	4.224	2.324	32.868

3.2 振动特性及安全评价

分别采用上述 3 种评价标准对蒲阳河节制闸结构振动进行安全评价。

(1) 以振动应力进行评判。图 5 为各测点的动应力随闸门开度的变化规律。动应力均方根值范围为 0.18~0.38 MPa, 最大幅值范围为 0.71~1.33

MPa, 最大动应力 1.33 MPa 发生在闸门开度 $e=1.0\text{ m}$ 的 Y_3 测点(上支臂); 开度大于 800 mm 振动应力增幅明显。以动应力作为安全评判标准, 小开度条件下各测点的动应力均较小, 最大动应力 1.33 MPa 不足允许动应力 32 MPa 的 5%, 闸门结构在水动力荷载作用下是安全的。

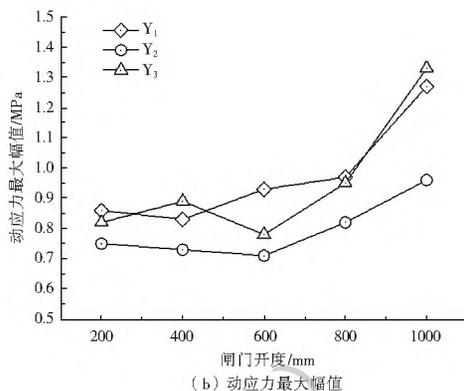
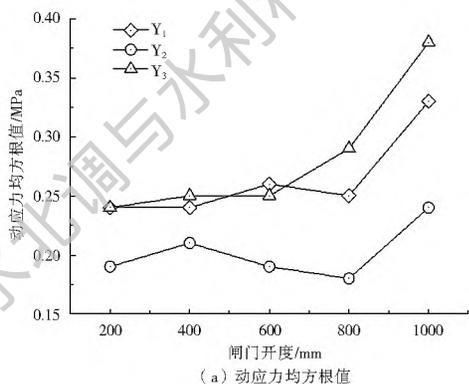


图 5 闸门动应力

Fig. 5 Dynamic stress of gate vibration

(2) 以振动位移进行评判。图 6 为各测点的振动位移随闸门开度的变化规律。闸门振动的横向位移最大, 切向次之, 径向最小; 开度 $e=400\text{ mm}$ 横向位移最小, 此后横向位移随着闸门开度的增大而增大; 横向位移均方根的最大值为 $15.97\text{ }\mu\text{m}$, 发生在闸门开度 $e=1.0\text{ m}$ 的 J_1 测点(主横梁中部)。以振动位移作为安全评判标准, 试验小开度条件下, 振动位移最大值 $15.97\text{ }\mu\text{m} < 50.8\text{ }\mu\text{m}$, 依据美国陆军工程师团的评判准则, 闸门振动危害程度可忽略不计。

相应频率 f 的综合效应关系, 所有测试工况均满足 $\lg A < (3.14 - 1.16 \lg f)$, 闸门结构稳定。

(3) 以振动位移(振幅)和频率的综合效应进行评判。试验小开度条件下, 闸门振动位移的频率范围为 0~4 Hz, 峰值频率集中在 0.7 Hz 附近, 为低频强迫振动, 图 7 为闸门开度 1.0 m 各测点横向位移的时域和频域响应特性。表 4 为横向振幅 A 与

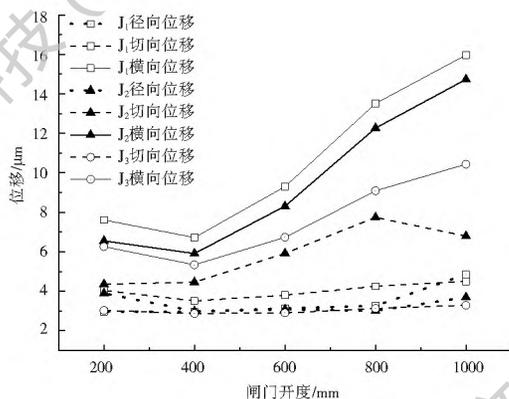


图 6 闸门振动位移

Fig. 6 Gate vibration displacement

表 4 横向振幅 A 与频率 f 综合效应的安全评价

Tab. 4 Relation between transverse amplitude A and frequency f

工况	J_1			J_2			J_3		
	$A/\mu\text{m}$	f/Hz	式(1)	$A/\mu\text{m}$	f/Hz	式(1)	$A/\mu\text{m}$	f/Hz	式(1)
1号	7.61	2.87	$0.88 < 2.61$	6.55	2.87	$0.82 < 2.61$	6.26	0.67	$0.80 < 3.34$
2号	6.72	2.99	$0.83 < 2.59$	5.91	2.99	$0.77 < 2.59$	5.34	0.73	$0.73 < 3.30$
3号	9.30	0.73	$0.97 < 3.30$	8.31	0.73	$0.92 < 3.30$	6.73	0.73	$0.83 < 3.30$
4号	13.51	0.67	$1.13 < 3.34$	12.27	0.67	$1.09 < 3.34$	9.09	0.79	$0.96 < 3.26$
5号	15.97	0.79	$1.20 < 3.26$	14.73	0.79	$1.17 < 3.26$	10.44	0.85	$1.02 < 3.22$

4 结论

南水北调中线小开度运行条件下闸门振动的安全性是南水北调专家委和工程运行管理人员所关注

的问题之一。通过对中线蒲阳河典型节制闸开展小开度条件下闸门振动原型观测, 分别采用动应力、振动位移和频率等标准进行安全评价, 结果表明: (1) 以动应力作为安全评判标准, 闸门最大动应力为

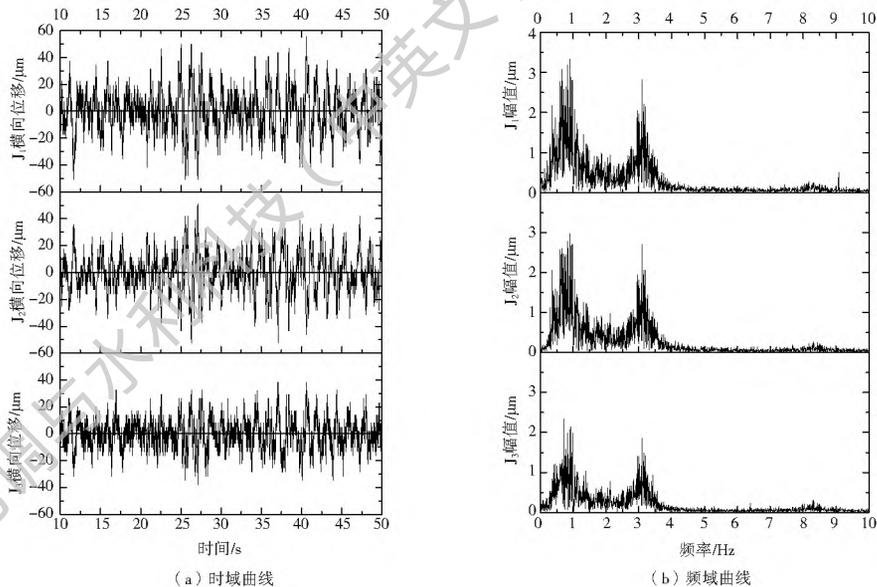
图7 弧门开度 $e=1.0\text{ m}$ 各测点横向位移响应特性

Fig. 7 Response characteristic of lateral displacement at gate opening of 1.0 m

1.33 MPa, 远小于材料允许应力的 20% (约 32 MPa), 闸门结构安全; (2) 以振动位移作为安全评判标准, 最大振动位移 15.97 μm , 小于美国陆军工程师团闸门振动危害程度可忽略不计的上限 50.8 μm ; (3) 以振幅和频率的综合效应作为安全评判标准, 所有测试工况的安全临界振幅与频率均满足 $\lg A < (3.14 - 1.16 \lg f)$, 闸门结构稳定。上述三种评价准则的判定结果一致, 因此, 南水北调中线闸门小开度淹没出流条件下, 闸后淹没水跃引起的闸门振动危害可忽略, 闸门结构安全稳定。

考虑到闸门振动原因的复杂性 (例如, 闸门在相当一段时间内运行正常, 以后由于零件的磨损、材料腐蚀、安装时遗留的缺陷、水头和流量的变化等原因, 闸门振动才严重起来), 建议南水北调中线工程运行中继续加强闸门振动的安全监测。

参考文献 (References):

- [1] 杨开林, 王涛, 郭新蕾, 等. 南水北调中线冰期输水安全调度分析[J]. 南水北调与水利科技, 2011, 9(2): 1-4, 8. (YANG K L, WANG T, GUO X L, et al. Safety regulations of water conveyance in the Middle Route of South to North Water Diversion Project in ice period[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2011, 9(2): 1-4, 8. (in Chinese)) DOI: 10.3724/SP. J. 1201. 2011. 02001.
- [2] 穆祥鹏, 陈文学, 崔巍, 等. 南水北调中线干渠冰期输水能力研究[J]. 南水北调与水利科技, 2009, 7(6): 118-122. (MU X P, CHEN W X, CUI W, et al. Study on water diversion capacity in the Middle Route of South to North Water Transfer Project in ice period[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2009, 7(6): 118-122. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j. issn. 1672-1683. 2009. 06. 028.
- [3] 章继光. 我国闸门振动研究情况综述[J]. 水力发电, 1985(1): 36-42. (ZHANG J G. Review of research on gate vibration in china[J]. Water Power, 1985(1): 36-42. (in Chinese))
- [4] 林敦志. 闸门振动现象及振动特性分析[J]. 科技资讯, 2010, (16): 116. (LIN D H. Vibration phenomenon and vibration characteristics of gate[J]. Science & Technology Information, 2010, (16): 116. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j. issn. 1672-3791. 2010. 16. 092.
- [5] 潘锦江. 闸门振动问题探讨[J]. 水利水电科技进展, 2001(6): 36-39. (PAN J J. About gate vibration[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2001(6): 36-39. (in Chinese)) DOI: 10.3880/j. issn. 1006-7647. 2001. 06. 011.
- [6] 宋贺男, 侍克斌, 周峰. 三个泉倒虹吸出口闸门的振动机理研究[J]. 人民黄河, 2010(1): 116-117. (SONG H N, SHI K B, ZHOU F. Study on the vibration mechanism of the outlet sluice gate in Sangeqian Invert Siphon[J]. Yellow River, 2010(1): 116-117. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j. issn. 1000-1379. 2010. 01. 055.
- [7] 韩璞, 薛惠芳, 何青. 北疆大型水工平面闸门的振动测试[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2011(3): 332-337. (HAN P, XUE H F, HE Q. Vibration tests on large scale hydraulic gate of northern Xinjiang Uygur Autonomous Region[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2011(3): 332-337. (in Chinese)) DOI: 10.3876/j. issn. 1000-1980. 2011. 03. 018.
- [8] 姬锐敏, 蒋昌波, 许尚农, 等. 弧形闸门流激振动原型观测方法探讨[J]. 交通科学与工程, 2013(2): 71-78. (JI R M, JIANG C B, XU S N, et al. Prototype observation methods of radial gate flow induced vibration[J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2013(2): 71-78. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j. issn. 1674-599X. 2013. 02. 013.
- [9] 陈友青. 大源渡泄水闸工作弧门动水原型观测分析[J]. 湖南交通科技, 2002(4): 90-91, 96. (CHEN Y Q. Analysis of dynamic water prototype observation of working radial gate of Dayuan du Sluice Gate[J]. Hunan Communication Science and Technology, 2002(4): 90-91, 96 (in Chinese)) DOI: 10.3969/j. issn. 1008-844X. 2002. 04. 035.

(下转第 151 页)

- 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: 2-4.
- [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))