



船闸人字闸门水动力特性研究进展*

陈琼, 李云, 刘本芹, 徐新敏

(南京水利科学研究院, 江苏 南京 210029)

摘要: 对比分析国内外传统船闸门类型及其水动力特性, 从物理模型、原型观测、数值模拟 3 方面总结国内外人字闸门水动力特性研究进展, 指出研究过程中的关键技术难题——闸门动水阻力矩的变化规律, 建议进一步关注闸门启闭过程中水流流态及流场变化、动水压力变化规律, 整合并综合分析不同闸门阻力矩原型观测成果, 改善闸门启闭数值模拟过程中边界条件处理方式及自由水面捕捉精度, 尝试在定性分析的基础上对水阻力矩产生机理有定量的认识。

关键词: 船闸; 闸门; 人字闸门; 水动力特性; 阻力矩

中图分类号: U 641.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2015)10-0118-07

Research progress in hydrodynamic characteristics of miter gate

CHEN Qiong, LI Yun, LIU Ben-qin, XU Xin-min

(Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China)

Abstract: This paper compares the types and hydrodynamic characteristics of navigation lock gate, summarizes the research progress in hydrodynamic characteristics of miter gate at home and abroad from aspects of physical model, prototype observation and numerical simulation, and illustrates the variation characteristics of miter gate's operating torque. It is suggested to pay more attention to the variation law of flow pattern & flow field, and the hydrodynamic pressure during the movement of miter gates. The rich results from prototype observation of different kinds of miter gates should be integrated and analyzed synthetically. The processing of boundary condition and free surface should be handled correctly to improve the simulation precision. It is of great significance to get the quantitative understanding on the generation mechanism of resistant torque caused by water based on the qualitative analysis.

Keywords: navigation lock; lock gate; miter gate; hydrodynamic characteristic; operating torque

船闸^[1] 闸门是船闸的咽喉, 随着国内外船闸建设不断发展, 不同门型的适用条件、运行方式、结构受力等越来越受到人们的重视, 这些均与闸门的水动力特性有密切的关系。近年来我国在西南地区一系列超高水头船闸的兴建, 使闸门水动力学问题变得尤为复杂, 对船闸的安全稳定运行有着至关重要的影响, 因此有必要对该方面研究进展进行总结与展望。

1 船闸闸门门型

船闸闸门门型选择, 既要满足船闸运行要求,

综合孔口尺寸、上下游水位、操作水头等各项因素; 同时还需考虑结构是否简单, 是否便于制造、运输及维修等^[2]。了解水流与闸门相互作用情况对认识闸门水力荷载性质与量值的大小变化、合理设计启闭机容量、保证闸门正常运行有着极为重要的作用^[3]。闸门启闭运动引起流场变化, 流场变化继而对闸门水力荷载产生影响, 因此将闸门按运动方式分类介绍并分析其水动力特性。

1.1 垂直旋转轴闸门

主要包括人字闸门、一字闸门与三角闸门。

收稿日期: 2015-03-02

*基金项目: 交通运输部应用基础研究项目 (2013329746280)

作者简介: 陈琼 (1990—), 女, 硕士研究生, 从事通航水力学方面研究。

虽闸门在门叶体型、个数及边界条件上存在差别, 但存在共性——闸门的旋转特性使阻力矩成为关注重点。启闭过程中所受动水阻力矩, 主要由门叶对称中心线(图 1)两侧水体作用力不平衡产生。运行方式及淹没水深对动水阻力矩峰值影响很大, 水体及门叶的惯性阻力在此发挥重要作用。门叶体型影响闸门运动过程中被推动水体量及绕流情况, 影响绕流阻力。边界条件主要约束水体流动, 影响门叶两侧水体波动及壅高过程。由于闸门门头处尖角存在, 旋转运动中门头处表面的流线会中断生成涡流, 消耗能量形成低压区^[4]。

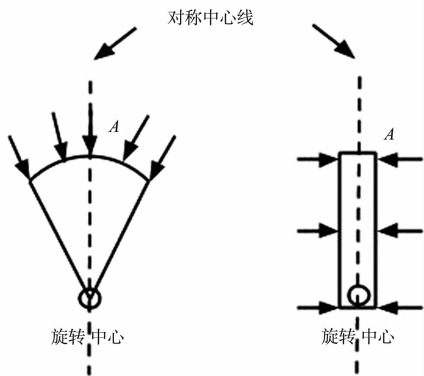


图 1 垂直旋转轴闸门对称中心线

1.2 水平旋转轴闸门

主要包括弧形闸门与卧倒闸门。门叶绕水平轴旋转, 门体重力及启闭过程中闸门运行引起的水体变化是决定启闭力的关键因素。卧倒门旋转运动方向与面板垂直, 启闭中扰动水体明显, 承受动水阻力矩较大; 弧形门面板上的动水压力合力通过旋转中心, 其静水启闭所受水阻力较小, 重点需关注动水启闭时门底缘所受下吸力、上托力等动水垂直力。

1.3 平面运动闸门

主要包括升降式平面闸门与横拉式平面闸门, 运动方向与闸室中心线垂直。有行走支承与轨道约束, 需克服摩擦阻力。作为工作闸门时静水启闭, 需考虑残余水位差、波浪、风等侧向力作用的影响, 关注其产生的闸门稳定性问题。主要差异有: 重力影响方式不同, 横拉门的自重使其主滚轮受垂直荷载, 间接影响摩擦阻力大小, 对启闭力起关键作用; 升降式平面闸门的自重, 直接影响启闭力大小。升降式平面闸门兼做输水、冲沙等动水作用时, 需考虑全水头作用下的影响, 水动力特性较为复杂。闸门水动力特性见表 1。

表 1 船闸闸门水动力特性

闸门分类	闸门形式	水头	运行条件	运行阻力			
				水体阻力	摩擦阻力		其他
垂直旋转轴闸门	人字闸门	单向水头	静水启闭	门叶对称中心线两侧水体作用力不平衡	◎水流惯性阻力、壅水阻力	顶枢、底枢摩擦阻力	门体惯性阻力；泥沙、冰、漂浮物、冰等阻力
	一字闸门	单向水头	静水启闭		◎边缝、中缝、羊角处水压力不平衡		
	三角闸门	双向水头	静水、动水启闭				
水平旋转轴闸门	卧倒闸门	单向水头	静水启闭	水流惯性阻力、壅水阻力	支铰摩擦阻力	止水摩擦阻力	
	弧形闸门	双向水头	静水、动水启闭		动水启闭门底缘所受下吸力、上托力等		
平面运动闸门	升降式平面闸门	双向水头	静水、动水启闭	运动方向上水体作用力不平衡		支承摩擦阻力	
	横拉式平面闸门	双向水头	静水启闭		水流惯性阻力、壅水阻力	◎支承摩擦阻力（受重力、侧向力影响）	

注: “◎”代表该力在此类门型启闭过程所受阻力中占主导作用。

2 船闸人字闸门水动力特性研究现状

由上文可知, 船闸各门型水动力特性存在共性: 闸门运行方式的突变(如启动、停止、有级变速等)、边界条件、淹没水深等均会改变水流运动状态而对门体产生直接影响, 继而影响其他间接因素(如摩擦)。人字门是船闸中应用最为广泛

的形式, 大型船闸中 90% 以上的闸门都采用此门型, 研究较深入, 对其水动力特性的研究能为其他门型提供借鉴, 故本文以介绍人字闸门水动力特性相关研究为主。

2.1 初期理论研究

由于早期研究技术以及测试手段的制约, 对

闸门的研究主要从简单的理论分析出发,尝试得出能够应用于实际人字门设计工作的经验公式,主要学者及其研究成果见表 2。

表 2 主要研究成果

研究者	年份	主要贡献
Franzius Otto ^[5]	1927	最早给出计算人字门运动受力公式,提出实用的计算方法——将闸门所受阻力矩简化为一经验力矩,数值等价于闸门运行过程中克服一定水头差
Josephus Jitta J P ^[6]	1947	将水阻力矩计算根据闸门位置分阶段讨论,给出了闸门启动初期惯性力占主导、闸门运动靠近门库且水惯性力不占主导、运动至关闭位置 3 个阶段闸门两侧水位差的计算方法,由此计算壅水阻力矩
Dehnert Hans ^[7]	1954	提及闸门运动过程中所受阻力分类,指出闸门启闭过程中阻力矩无法精确计算、需要通过原型观测和模型试验寻求合理的船闸闸门启闭机等相关设计
Leliavsky S ^[8]	1965	人字闸门旋转启闭过程与矩形平板垂直水流拖动过程做类比,引入了拖曳力系数计算闸门运动过程的水体阻力
Ries J De ^[9]	1962	认为动水阻力矩由闸门两侧水位差产生的阻力矩和水的惯性阻力矩组成,其中惯性阻力矩是由一部分水体伴随闸门旋转产生的惯性并作用于闸门引起的力矩,可由一特殊的转动惯量乘以闸门运行角加速度获得

上述学者的研究均对船闸人字闸门启闭这一复杂过程进行了大量简化,未考虑速度变化及门底间隙的影响,给出的计算公式适用范围小且精确不高,只能作为早期工程设计的参考。

2.2 物理模型试验研究

鉴于船闸闸门水动力特性研究的复杂性,物理模型试验是此研究的重要手段^[10]。

国外对于人字门水动力研究开展较早,1964 年美国陆军工程兵团对巴拿马型、俄亥俄型、修改俄亥俄型 3 种四连杆启闭机形式做了大量试验研究^[11],讨论了不同启闭机形式、淹没水深、运行时间、闸室长度、闸门底部间隙、闸室驳船、门

叶同步性等对船闸人字闸门受力及水动力特性的影响,为船闸闸门启闭机设计手册提供了许多计算资料;1971 年列日大学的 Lejeune^[12]通过物模试验,着重讨论动水阻力矩的计算方法;随着葛洲坝及三峡等大型船闸的修建,国内相关研究逐步开展并且深入。

1982 年杨孟藩^[13-14]对葛洲坝 2[#]船闸展开研究,通过 1:20 模型试验测得下闸首人字门启闭过程,选取初始角速度及动水阻力矩峰值均不大的曲柄连杆构件,提出采用变速方式启闭闸门的建议。1990 年起南京水利科学研究院(简称南科院)^[15-16]开始对三峡船闸人字门进行系统研究,针对四连杆及直联式启闭机两种方案,对不同淹没水深、启闭时间、各种边界条件下阻力矩变化规律、顶枢锚杆作用力、水体波动及门体动水压力变化特性进行研究。1995 年,南科院李云^[17]对三峡人字门液压启闭机运行方式进行模型试验优化,在国内首次通过伺服式液压控制实现系统启闭机无级变速。试验发现,启闭机的设计能力取决于上游或闸室水位超高时活塞杆的受力情况,阻力矩峰值与闸门角加(减)速度基本呈线性关系,给出了采用不对称一级无级变速运行方式的建议。随后,魏文伟在此基础上,着重研究油缸稳定性这一技术问题。2001 年李云^[18-19]研制出三峡船闸 1:20 钢结构的水弹性模型材料,为综合考虑闸门水动力及结构问题、定量计算水流荷载变化规律对船闸闸门作用影响、确保闸门安全运行、优化结构设计提供了更为准确的研究方法。

2.3 原型观测试验研究

在船闸正式投入运行前或运行初期开展原型试验,是对物模试验的补充,对深入了解闸门水动力特性有极其重要的作用。

早在 20 世纪 40 年代初,美国陆军工程兵团就对内河船闸进行了大量原型观测,为船闸闸门启闭机设计提供数据基础,将对 Claiborne 船闸人字闸门的原型观测数据用于相似尺度的人字门直联式启闭机设计,通过绘制人字门随启闭角度变

化的运行阻力矩曲线, 推算不同淹没水深及运行时间下人字闸门的运行阻力矩^[20]。

1992 年南科院^[13]对葛洲坝 1[#]、2[#]船闸的原型进行观测及研究, 指出大型水利枢纽原型人字门动水阻力影响因素的复杂性, 结合模型试验验证结果, 提出相应的建议供三峡船闸人字门启闭机设计参考。2001 年, 李云^[21]对三峡船闸临时通航过程进行了 98 组原型试验, 临时船闸人字门实现了 1 级、2 级及多级无级变速运行, 根据临时船闸原型观测和永久船闸模型试验资料, 求得了预测原型阻力矩的计算公式。

2.4 数值模拟研究

人字闸门运行动水阻力矩的数学模型计算是一个难度很大的三维非恒定流数值计算问题, 它涉及复杂的动边界条件的特殊处理、自由液面捕捉问题, 要求有较高精度的数值计算方法。

Lejeune^[22]开展的研究中, 从极坐标下的 $N-S$ 方程出发, 采用旋度-流函数法研究人字门启闭时流场变化, 但因其研究的是单位厚度水层的二维情况, 无法给出闸门前后的水位变化。1989 年南科院^[23]采用基于 MAC 方法原理的隐式差分法, 从斜动坐标系下的 $N-S$ 方程出发, 建立计算人字门动水力矩的二维和三维数学模型, 收敛性和稳定性良好, 但对闸门门头的边界条件没有很好处理, 随着人字门开度增大, 将引起 x 、 y 方向网格实际长度的比值差异过大, 无法计算完整的开度过程。1990 年南科院郑培喜^[24]提出了一种基于 SIMPLE 法求解沿水深积分的二维 $N-S$ 方程的算法, 引入猜测水位值, 使得水流基本方程组得以解耦, 并由动量方程求得近似流速场, 然后通过强迫近似流速场满足连续方程对水位的猜测值不断校正, 最终得到正确的速度和水位。同时基于人字门动边界采用连续动边界处理技术, 对人字门门头边界采用“三点法”进行处理。实际算法能够较好模拟闸门转动引起的不稳定流流态和水位变化, 从而取得动水阻力矩的变化规律。但此方法仅适用于人字门门底无间隙的二维情况, 定性上较为

一致, 定量仍存在差距。1991 年郑培喜^[25]在原有基础上做出改进, 考虑到门底间隙影响, 从静压假定的三维 $N-S$ 方程出发, 沿垂向用有限差分法离散, 沿平面用有限单元法离散, 提出一种有限元和有限差分法相结合的解法, 此方法能较为成功地模拟带门隙的人字门转动引起的复杂三维不稳定流态和水位变化, 得到的动水阻力矩变化规律与模型试验较为一致, 但数值上仍存在差距。

3 人字闸门动水阻力矩变化特性

3.1 理论计算公式

了解人字闸门开启过程中动水力矩的变化规律, 首先可以从已经得到的理论计算开始。

1) Lejeune^[12]计算公式。

Lejeune 提出匀速运动闸门动水阻力矩 M_h 的计算公式:

$$M_h = M_\eta + M_e \quad (1)$$

$$M_\eta = \rho L^4 D \quad (2)$$

$$M_e = \rho h \omega^2 L^4 R / (8g) \quad (3)$$

式中: M_η 为闸门旋转时两侧水位差产生的阻力矩; M_e 为除 M_η 外闸门所受的水体阻力矩; D 为壅水阻力系数, $D = \Phi_1 (Fr, Re, H/L, E/L, \theta, K', K'', K''')$, R 为旋转阻力系数, 且 $R = \Phi_2 (Re, E/L, \theta, K', K'', K''')$, 其中 Fr 为弗劳德数, Re 为雷诺数, L 、 H 、 E 分别为闸门的宽、高、厚, K' 、 K'' 、 K''' 为与门库尺寸有关的长度; θ 为闸门与闸墙的夹角; h 为淹没水深; L 为闸门宽度; ω 为闸门旋转角速度; ρ 为水密度; g 为重力加速度。

2) 美国陆军工程兵团设计手册公式。

美国陆军工程兵团的设计手册^[26-27]指出, 船闸闸门开启过程中受力的复杂性决定了闸门启闭设计需要依靠物模试验和原型观测; 并指出不同启闭机构、杆件尺寸、淹没水深、启闭速度对阻力矩峰值均有影响, 且闸门底部间隙越大启闭力越小。手册给出了一系列启闭力矩随闸门启闭变化的曲线, 基本均为两头大中间小的形式, 在门

叶靠近闸门全关位置和门库位置达到峰值。

对于巴拿马型、俄亥俄型启闭形式的船闸人字闸门设计动水阻力矩, 可以按下式计算:

$$M_p = M_m (L_p/L_m)^4 (S_p/S_2)^x (T_2/T_p)^y \quad (4)$$

$$S_2 = S_m (L_p/L_m) \quad (5)$$

$$T_2 = T_m \sqrt{L_p/L_m} \quad (6)$$

式中: M 为动水力矩; L 为人字闸门门扇宽度; S 和 T 分别为淹没水深和启闭时间, S_2 和 T_2 为校正后的模型淹没水深和启闭时间; 下标 p 、 m 表示原型和模型; x 、 y 分别为特殊类型杆件淹没水深及启闭时间下应有的次数。

对于直联式启闭形式, 手册建议通过控制启闭机变速运行的方式, 降低闸门靠近全开位及全关位时的角速度, 尽量使直联式人字闸门的动水阻力矩过程与巴拿马型的过程一致, 此时即可采用同样的方法计算全过程的动水阻力矩。

3.2 淹没水深、启闭时间及启闭机形式的影响

淹没水深增加, 启闭时间缩短阻力矩峰值亦增加。但淹没水深对阻力矩峰值的影响要比启闭时间影响大, 特定水深范围下, 应采用不同启闭时间控制阻力矩峰值的增长。

闸门不同角加速度与开门初的动水阻力矩峰值基本呈线性关系, 角加速度增大, 阻力矩峰值也增大, 且淹没水深越大, 角加速度变化对动水阻力矩峰值影响更敏感, 因此可通过尽量减小闸门角加速度降低动水阻力矩峰值。

不同启闭机形式对阻力矩峰值产生的影响不同, 在驱动力一定情况下, 闸门角加速度取决于角速度及有效力臂值的大小, 这与启闭机的布置有关, 而启闭机的能力又与有效力臂有关, 又会反过来决定闸门角加速度, 从而影响动水阻力矩峰值^[28]。启动过程中, 闸门的启动角加速度越大, 阻力矩峰值越大。这就要求启闭机布置既要满足启动角速度及有效力臂较小, 又要保证启闭机的能力, 随着控制启闭机设计的峰值阻力矩调整而逐步优化。

3.3 边界条件的影响

人字门边界条件主要包括门库形状、门库有无补水、门底间隙等, 这些边界条件影响到闸门前后水体的流动情况, 若有利于闸门前后水体流动顺畅, 在闸门启闭过程中形成的前后水位差也小, 门体受到的阻力也小。门底间隙对闸门启闭全过程均有影响, 而门库形状及门库有无补水对闸门在全开位置附近水体流动影响较大, 即闸门关门开始及开门末了阶段。试验表明, 增大门库补水涵洞面积及门底间隙会在一定程度上降低动水阻力矩, 但继续增大则影响不显著。

3.4 水位超高的影响

水位超高主要包括上游水位超高以及闸室水位超高两类。上游水位超高主要是由于引航道中波浪以及设计中的假定的开门时正向剩余水位等因素的影响, 此时水位超高会大大增大闸门开启时阻力矩峰值, 淹没水深及水位超高越大, 阻力矩峰值增大越多, 但水位超高产生的动水阻力矩峰值随着闸门开启衰减较快, 至开度 30% 时影响基本消除。闸室水位超高情况下, 人字门开门初期进入下闸室的流量会大于从人字门开启缝隙中流出的流量, 人字门的下游水位会高于上游, 因而人字门会承受反向水头, 产生负动水阻力矩, 若惯性水位超高逐渐增加, 负动水阻力矩也会急剧增加, 从而对启闭机产生不利影响。

3.5 运行方式优化

对于既定布置的启闭机, 需通过改变运行方式以达到改变阻力矩峰值的目的, 因此需要进行运行方式优化。

早期试验, 主要探究驱动电机或者液压活塞杆匀速运行时 2 种启闭机动水阻力矩曲线以及峰值和启闭时间的关系, 合理选取启闭时间, 使阻力矩峰值小于启闭机能力曲线, 并有一定富余。对于四连杆启闭机, 开门开始动水阻力矩峰值不但较大, 且第 2 峰值位于启闭机能力曲线较低处, 因此第 2 峰值是四连杆启闭机设计的控制条件之一。对于直联式启闭机, 关门开始峰值最明显,

为控制条件。

对于液压直联式启闭机, 采取变速运行, 较匀速运行能够极大地改善动水阻力矩峰值, 变速运行主要有几种: 1) 有级变速: 油缸活塞杆分几档速度运行, 可以减小制动时阻力矩峰值, 但变速处会出现另一峰值。2) 1 级无级变速: 活塞杆相对油缸运动速度随时间变化有 1 对匀加速和匀减速过程, 加减速过程变得平缓, 门体两面波动水位差减小, 门头旋涡强度减弱, 水面较平稳, 闸门与水体的惯性阻力矩降低, 峰值阻力矩也随之降低。3) 2 级无级变速: 活塞杆相对油缸运动速度随时间变化有 2 对匀加速和匀减速过程, 此时阻力矩峰值取决于每级加速度大小, 第 1 级加速度较小而第 2 级加速度较大时, 在第 2 级加速度时所处的门位产生起控制作用的阻力矩峰值, 减小每级加速度可以使阻力矩曲线平坦, 从而降低动水阻力矩峰值。

启闭机 1 级和 2 级无级变速相比匀速运行和有级变速, 均能够较大幅度地削减阻力矩峰值。良好的门库边界条件下, 无级变速时闸门在全开位阻力峰值较小(关门初期和开门初期), 因此可以采用不对称无级变速, 即在全开位时可以稍稍增大运行角加速度, 在全关位采用较小的运行角加速度, 可以确保闸门启闭时间一定的情况下, 进一步减小闸门全关位时阻力矩峰值, 优化人字门启闭运行方式。

4 结语

相比其他类型的水工闸门, 虽然船闸人字闸门正常工作条件为静水启闭, 水流对结构物的冲击作用远远小于高水头泄洪闸门, 但闸门频繁工作的特性以及受损就需停航的重大影响, 均对其高效、安全、长期运行提出了很高要求。随着船闸闸门各形式的应用逐步突破传统适用范围^[29-30], 一系列高水头单级船闸不断涌现^[31], 该问题研究亟需更为深入, 然而人字闸门水动力特性研究还存在以下问题:

1) 模型试验中闸门阻力矩主要通过测定启闭力乘以有效力臂获得, 探究其与水流、边界条件、运行方式等各影响因素的相互关系, 此过程会忽略摩阻力矩、启闭机瞬时冲击等机械方面的影响, 模型与原型启闭机及闸门结构特性不相似, 也会导致两者运行情况不同。水工动态模型的测试精度, 仍较难达到使水位波动计算阻力矩与总阻力矩在量值上可区分比较的程度。

2) 人字闸门运行阻力矩原型观测结果与模型试验相比, 和泥沙淤积、波浪、风、闸门安装精度、驱动电机及闸门弹性系统特性、船闸输水水力特性、引航道非恒定流及枢纽运行等影响因素有关, 具有随机性, 难以定量分析, 更为复杂。因此原型观测研究主要针对特定工程实际, 缺少不同工程间的影响因素分析及差异对比。

3) 对于人字闸门启闭过程数值模拟研究仍较为缺乏, 模拟闸门的运行方式较为单一, 闸门两侧水位差模拟也不够精确, 且对于门底间隙及复杂边界条件引起三维水流特性的模拟仍不深入。

综上, 在以下方面有待进一步展开研究:

1) 随着测试水平和量测技术的提升, 通过人字闸门水动力特性物理模型试验, 应重点关注闸门启闭过程中水流流态与各阻力流场变化规律、门体动水压力等变化规律, 尝试在定性分析的基础上对产生机理有定量的认识。

2) 船闸人字闸门启闭原型观测, 是提供丰富资料的源泉。规范化观测内容、综合统计各类型闸门启闭形式的观测数据, 对于船闸闸门水动力共性、本质方面内容的挖掘极为有益。

3) 各边界条件约束影响下, 人字闸门运动产生波动水位差对启闭过程受力影响明显。正确处理边界条件、准确捕捉自由液面^[32]对深入认识水阻力产生过程、掌握人字闸门所受水阻力量值有重要的作用。选取合适紊流模型及自由表面追踪方法进行人字闸门水动力学数值模拟^[33], 值得深入开展。

参考文献:

- [1] JTJ 305—2001 船闸总体设计规范[S].
- [2] JTJ 308—2003 船闸闸阀门设计规范[S].
- [3] JTJ 309—2005 船闸启闭机设计规范[S].
- [4] 吴望一. 流体力学[M]. 北京: 北京大学出版社, 1982.
- [5] Franzius O. Der verkehrswasserbau [M]. Berlin: Springer Verlag, 1927.
- [6] Jitta J P J. Sluizen (Locks) [M]. Haarlem: De Erven F. Bohn. N. V. , 1947.
- [7] Dehnert H. Schleusen und hebewerke (Locks and ship lifts) [M]. Berlin: Springer Verlag, 1954.
- [8] Leliavsky S. Design textbooks in civil engineering, Vol II [M]. London: Chapman and Hall, Ltd. , 1965.
- [9] De Ries J. Computing maneuvering stresses of miter gate[R]. Belgium : University of Liege, 1967.
- [10] JTJ/T 235—2003 通航建筑物水力学模拟技术规程[S].
- [11] Grace Jr J L, Murphy T E, Brown F R. Operating forces on miter-type lock gates[R]. USA: U S Army Engineer Waterways Experiment Station, 1964.
- [12] Lejeune A. Etude des efforts de manoeuvres portes burquées dècluges [R]. Belgique: Université de Liège, 1971.
- [13] 杨孟藩, 郑楚佩, 须清华. 葛洲坝水利枢纽工程二号船闸水力学问题研究[J]. 水利水电科学研究, 1982(2): 1-18.
- [14] 宗慕伟, 杨裔轩. 葛洲坝 2 号船闸下闸首人字门动水阻力矩的模型试验研究[J]. 水利水电科学研究, 1989(4): 27-40.
- [15] 南京水利科学研究院. 三峡船闸人字闸门运行阻力矩试验研究报告(一)(四连杆启闭机方案)[R]. 南京: 南京水利科学研究院, 1990.
- [16] 南京水利科学研究院. 三峡船闸人字闸门运行阻力矩试验研究报告(二)(直联式启闭机方案)[R]. 南京: 南京水利科学研究院, 1991.
- [17] 李云, 徐新敏. 三峡永久船闸人字门液压启闭机运行方式优化试验研究[J]. 水利水电科学研究, 2000(1): 1-7.
- [18] 骆少泽, 李云, 徐新敏. 三峡船闸人字门水弹性模型材料研究[C]. 华东五省振动工程学会第五届学术交流会论文集. 2001: 22-23.
- [19] 南京水利科学研究院. 三峡永久船闸人字门水弹性试验研究[R]. 南京: 南京水利科学研究院, 2001.
- [20] U S Army Corps of Engineers. EM 1110-2-2610 Mechanical and electrical design for lock and dam operating equipment[S]. 2013.
- [21] 李云, 徐新敏, 魏文伟. 三峡临时船闸人字门运行方式原型观测[J]. 水利水电工程学报, 2003(2): 29-35.
- [22] Lejeune A. Non-steady two-dimensional flow about a uniformly rotating plate[J]. Journal of Hydraulic Research, 1974, 12(1): 65-81.
- [23] 南京水利科学研究院. 三峡船闸人字门动水阻力矩的计算研究[R]. 南京: 南京水利科学研究院, 1989.
- [24] 郑培喜. 船闸人字门动水阻力矩的数值计算研究[J]. 水利学报, 1992(12): 81-85.
- [25] 郑培喜. 带门底间隙人字门的动水阻力矩计算研究[J]. 力学与实践, 1992(2): 22-25.
- [26] U S Army Corps of Engineers. EM 1110-2-2703 Lock gates and operating equipment[S]. 1994.
- [27] U S Army Corps of Engineers. EM 1110-2-1604 Hydraulic design of navigation gate[S]. 2006.
- [28] 曾又林. 人字闸门启闭机启闭力计算与优化布置[J]. 水利学报, 1996(3): 64-69.
- [29] Daniel R A. Mitre gates in some recent lock projects in the Netherlands (Stemmtore in einigen neuen Schleusenanlagen in den Niederlanden) [J]. Stahlbau, 2000, 69(12): 952-964.
- [30] Commission, Inland Navigation Secretariat, PIANC General Association, International Navigation. Innovations in navigation lock design[R]. Belgium: PIANC, 2009.
- [31] 覃业传, 宣国祥, 麦建清, 等. 大藤峡水利枢纽单级船闸输水系统初步分析[J]. 水利水电工程学报, 2012(4): 71-76.
- [32] Hirt C W, Nichols B D. Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries [J]. Journal of Computational Physics, 1981, 39(1): 201-225.
- [33] 金忠青. N-S 方程数值解及紊流模型[M]. 南京: 河海大学出版社, 1989.

(本文编辑 武亚庆)