

# 银盘船闸阀门开启过程水力特性动态仿真

李洪奇<sup>1</sup>, 杨忠超<sup>2</sup>

(1. 长江泸州航道局, 四川 泸州 646000; 2. 重庆交通大学, 重庆 400074)

**摘要:** 乌江银盘船闸为目前国内单级最高水头船闸。分析设计方案的初步计算成果和物理模型试验资料表明, 设计水头下其充水阀门段存在较大的负压, 尤其是在突扩体升坎处压力很低, 有可能造成边壁的空蚀破坏。采用动网格技术和VOF方法对银盘船闸充水阀门段阀门开启过程进行非恒定流三维紊流数值模拟, 采用6 min开阀方式, 分析阀门段水流急变分离的流态、流速、压力等水力特性参数的时空演化规律, 分析出现空化空蚀的危险区域和时刻, 为乌江银盘船闸因高速水流而引起的输水系统阀门段廊道内空化空蚀问题提供了解决途径。

**关 键 词:** 高水头船闸; 紊流数值模拟; 动网格; 阀门; 空蚀

**中图分类号:** TV135.4      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1009-640X(2010)03-00101-06

船闸工作水头高, 可以减少船闸级数, 缩短船只过闸时间, 但高水头船闸必须解决诸多技术上的难题。对输水系统而言, 水头高、流速大, 控流阀门承受的压力和启门力大增, 高速水流引发空化空蚀、压力脉动等已成为高水头船闸应用的关键性技术难题, 是现在船闸设计必须面对的重要课题之一<sup>[1-3]</sup>。采用数值模拟手段研究船闸输水廊道中的流场特性具有优化体型方便, 省时、省钱、省力, 不存在比尺效应等优点。陈文学等<sup>[4]</sup>利用分块耦合技术和标准  $k-\varepsilon$  模式模拟了三峡永久船闸反向弧形阀周围的紊流场; 王玲玲、戴会超<sup>[5-6]</sup>和马峥<sup>[7]</sup>等人采用  $k-\varepsilon$  双方程模型对三峡船闸充水系统阀门段进行二维数值模拟; 王智娟等<sup>[8]</sup>采用三维数学模型在阀门开度0.4时对银盘船闸阀门段体型进行优化; 杨忠超等<sup>[9]</sup>利用动网格技术和VOF方法对高水头船闸阀门开启过程进行非恒定流三维紊流数值模拟等。这些研究成果加深了读者对阀门水力学的理解, 为高水头船闸阀门设计提供了科学依据。

乌江银盘水电站船闸设计最高通航水位达36.46 m, 为目前国内已建和在建船闸中水头最高、世界第三的单级船闸。本文采用典型的6 min开阀方案, 利用动网格技术对阀门段进行非恒定流三维数值模拟, 分析阀门开启过程中阀门段水流急变分离的流态、流速和压力的时空变化规律, 找出空化空蚀的危险区域。

## 1 数学模型

### 1.1 控制方程

本文以乌江银盘船闸充水阀门段内的复杂紊流为研究对象, 控制方程如下:

$$\text{连续方程: } \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\text{动量方程: } \frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i u_j) = - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ (\nu + \nu_t) \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] \quad (2)$$

$$k \text{ 方程: } \frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i k)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \frac{\nu + \nu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + G_k - \rho \varepsilon \quad (3)$$

收稿日期: 2009-10-30

作者简介: 李洪奇(1982-), 男, 湖北仙桃人, 助理工程师, 主要从事航道工程和船闸水力学研究。

E-mail: lhqcn699@qq.com

$$\varepsilon \text{ 方程: } \frac{\partial(\rho\varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i \varepsilon)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \frac{v + v_t}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right] + C_{\varepsilon 1} \rho \frac{\varepsilon}{k} G_k - C_{\varepsilon 2} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (4)$$

式中:  $\rho$  和  $\mu$  分别为体积分数平均的密度和分子黏性系数;  $p$  为修正压力;  $v_t$  为紊流黏性系数, 它可由紊动能  $k$  和紊动耗散率  $\varepsilon$  求出:

$$v_t = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}, \quad C_{\varepsilon 1} = 1.42 - \frac{\eta(1 - \eta/\eta_0)}{1 + \beta\eta^3}, \quad \eta = Sk/\varepsilon, \quad S = \sqrt{2\bar{S}_{ij}\bar{S}_{ij}}$$

以上各张量表达式中:  $i=1, 2, 3$ , 即  $\{x_i=x, y, z\}$ ,  $\{u_i=u, v, w\}$ ;  $j$  为求和下标;  $S$  为切应力. 方程中通用模型常数  $\eta_0=4.28$ ,  $\beta=0.015$ ,  $C_\mu=0.085$ ,  $C_{\varepsilon 2}=1.68$ ,  $\sigma_k=\sigma_\varepsilon=0.7179$ . 采用有限体积法对上述偏微分方程组进行离散, 压力-速度耦合求解使用 SIMPLER 法. 对固壁边界采用壁面函数法. 代数方程采用多重网格技术加速求解.

## 1.2 计算网格剖分及边界条件

计算区域为阀门井上游进水口, 长约 40 m, 下游至廊道水平分流口, 长约 52 m. 采用四面体和六面体混合网格进行剖分, 对阀门区和突扩段进行网格加密, 全计算域的单元体个数约 5 万个. 船闸阀门廊道及网格剖分见图 1.

采用三维的 VOF 模型<sup>[10]</sup>计算阀门井的自由表面. VOF 法是一种处理复杂自由表面的有效方法. 在控制体内对第  $q$  相流体的体积分数规定为:  $\alpha_q=0$ , 控制体内无  $q$  相流体;  $\alpha_q=1$ , 控制体内充满  $q$  相流体;  $0<\alpha_q<1$ , 控制体内未充满  $q$  相流体; 对所有流体相的体积分数总和为 1, 即:  $\sum \alpha_q = 1$ . 水的体积分数  $\alpha_w$  的控制微分方程为:

$$\frac{\partial \alpha_w}{\partial t} + u_i \frac{\partial \alpha_w}{\partial x_i} = 0 \quad (5)$$

式中:  $t$  为时间;  $u_i$  和  $x_i$  分别为速度分量和坐标分量 ( $i=1, 2, 3$ ). 水气界面的跟踪即通过求解该连续方程来完成.

进、出口均为压力边界条件. 进口采用进口廊道底至水库水面静水压力分布. 随着阀门的开启, 出口压力随闸室水深的增加而增大, 但为了模拟最不利工况, 本计算保持出口压力不变, 为下游河道水面至出口廊道底的静水压力分布<sup>[11]</sup>. 阀门开启速度采用 UDF 文件(本文采用速度随时间变化规律)使阀门连续开启. 阀门开启过程中采用动网格技术调整和更新阀门运动后的网格, 确保计算网格质量<sup>[12-14]</sup>. 固体壁面上的边界条件由壁函数方法给定.

## 2 数值模拟及结果分析

### 2.1 流态时空演化

不同阀门开度时廊道中剖面流线见图 2. 从阀门开启全过程来看, 初期阀门开度较小, 在突扩体跌坎未形成漩涡. 由于上游水压力作用, 阀门后小缝隙有附壁射流, 故在阀门后上方形成逆时针洄旋. 随着阀门开度增加, 阀门下缘射流厚度增加, 强度增大, 主流直冲下突扩体底板, 沿突扩体底部进入下游廊道. 在跌坎壁下、主流下方诱导生成顺时针洄旋, 在上突扩体、主流上方诱导生成逆时针洄旋, 原阀门后附壁流形成的漩涡消失. 当阀门开度  $n=0.45$  时, 阀门前形成逆时针洄旋, 并逐渐增大; 当阀门开度  $n>0.6$  时, 主流逐渐上移至突扩体中部, 主流上方洄旋区减小, 下部洄旋由跌坎向升坎方向移动, 范围纵横增大.

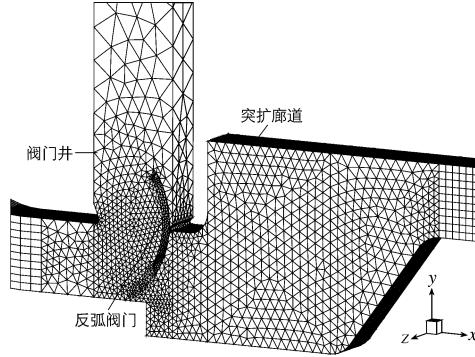


图 1 阀门段廊道及网格剖分  
Fig. 1 Valve & tunnel in grid map

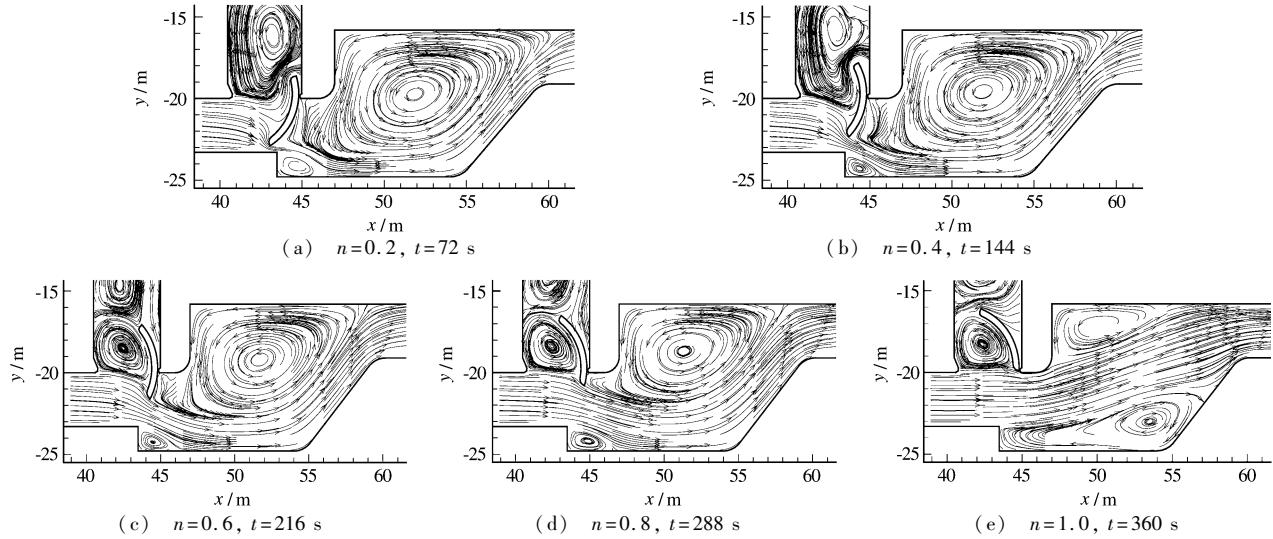


图2 不同阀门开度时廊道中剖面流线

Fig. 2 The streamline in middle section of the tunnel with different valve opening

## 2.2 流速时空演化

不同阀门开度时廊道中剖面速度矢量见图3。可见,随着阀门开启,在上游高水压作用下,阀门下底缘与廊道底板之间形成高速射流,射流斜冲下突扩体底板后,主流附底板而下冲击升坎,在升坎末端由于断面减小,流速显著增加,且由于流向改变,形成脱壁。随开度的增加,过流断面增加,流速略有减小;阀门全开时,流速基本均匀(约为20 m/s)。升坎反弧末端脱壁流在开度约0.8时达到最大(为25 m/s),阀门全开时为22.98 m/s。其原因是小开度时,流量较小,故流速不大;n=0.8时,射流仍偏向底板,在脱壁处偏转角较大,且水流相对较集中;阀门开度n=1.0时,尽管流量增大,但偏转角减小,水流分散,所以流速减小。当阀门在0.4~0.6开度时,流速出现最大值(约为26 m/s)。

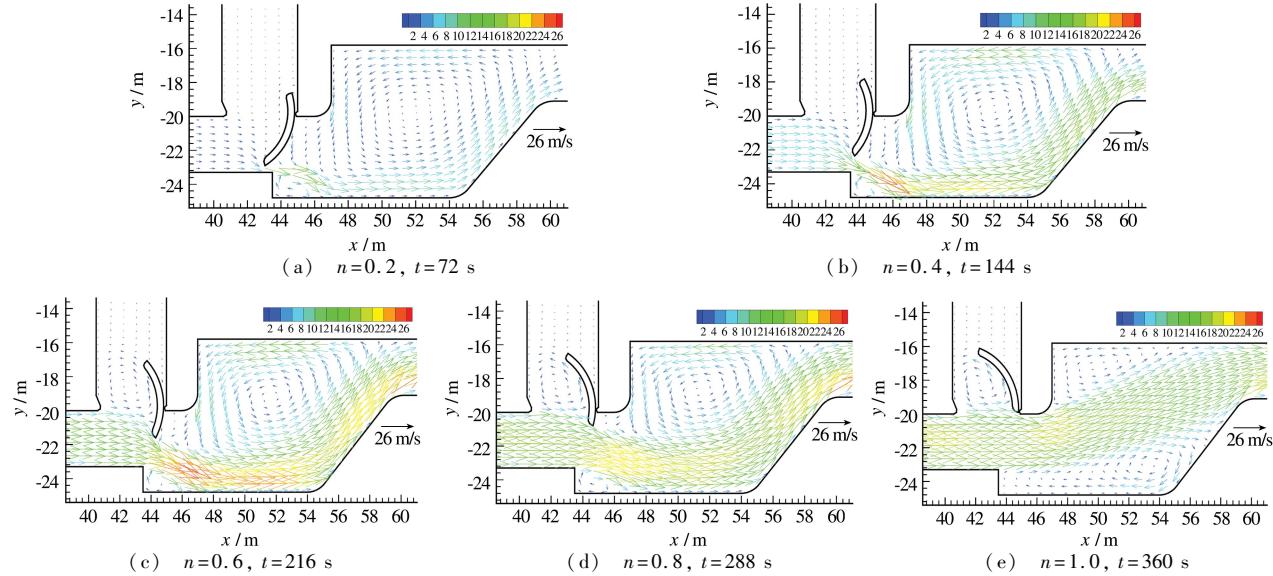


图3 不同阀门开度时廊道中剖面速度矢量

Fig. 3 The velocity vector in middle section of the tunnel with different valve opening

## 2.3 压力时空演化

不同阀门开度时廊道中剖面的压力分布见图4。在开度n<0.2时,突扩体内没有形成明显的洄流,基本

为静水压分布。随着射流增大,冲击底板,在底板上形成 1 个压力增大区,由于下突扩形成水垫,减小了射流对底板的冲击作用。射流又冲击升坎,在升坎底端形成 1 个压力增大区。当阀门全开时,射流不再冲击底板,仅在升坎底部形成高压区。在升坎末端,高速脱壁流后形成 1 个负压区,跌坎壁后,由于主流下方诱导洞旋有一低压力区。主流上方、上突扩体同样由于洞旋,在顶板壁形成压力减小区,不同时刻该区域范围和压力大小不同。

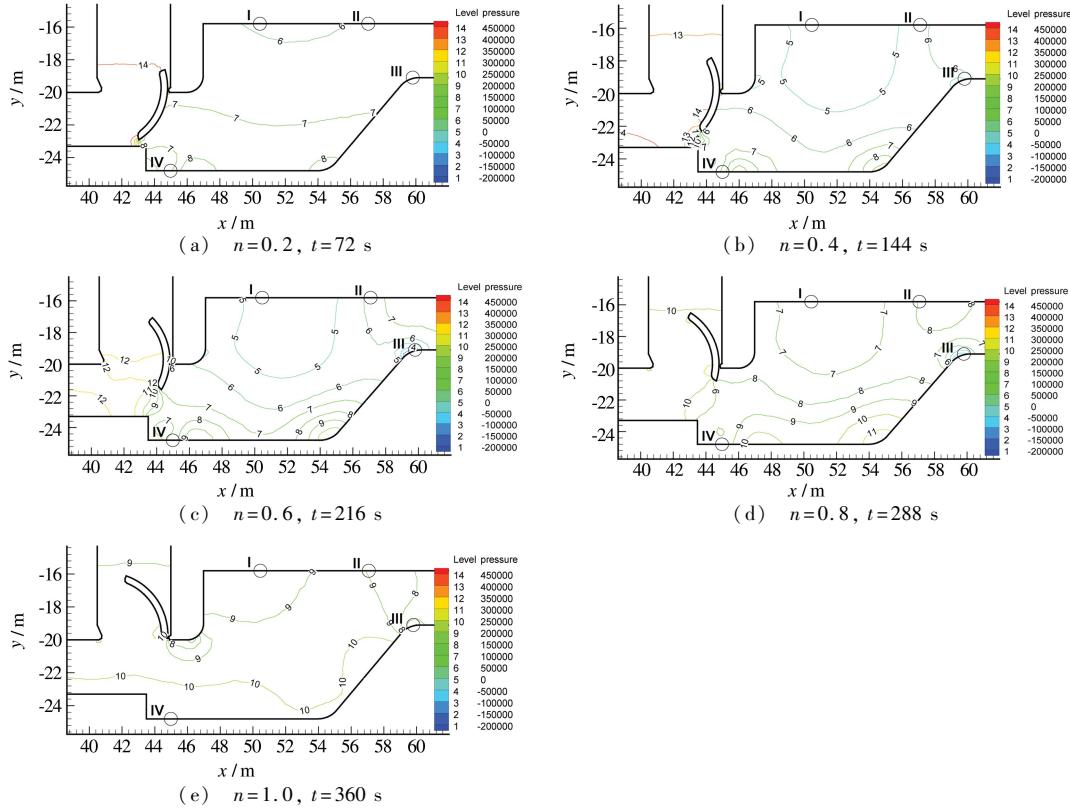


图 4 不同阀门开度时廊道中剖面压力分布(单位: kPa)

Fig. 4 Pressure distribution in middle section of the tunnel with different valve opening

4 个关键测点随不同开度的压力变化见图 5。测点 I 位于突扩体顶板上游侧,其压力先减小后增大,因为随着阀门开度的增大,突扩体内主漩涡因受主流厚度的增加而被迫向上运动,强度减小,在 121.9~236.8 s 内持续负压,并在第 176.9 s 即阀门开度为 0.49 时,负压达到最低值-49.053 kPa。在阀门开启全过程中,测点 II 和 IV 皆不产生负压,其中,测点 II 最小和最大压力分别为 32.924 和 207.233 kPa。测点 IV 最小和最大压力分别为 85.608 和 277.268 kPa。测点 III 位于升坎突弧处,该处由于水流偏转角的增大而发生高速脱壁,压强变化最大,阀门开度为 0.37 至全开时,几乎全为负压,开度为 0.63 时,负压出现最低值-135.203 kPa,持续时间 217 s,在第 360 s 压力才变为正值,为 64.523 kPa。

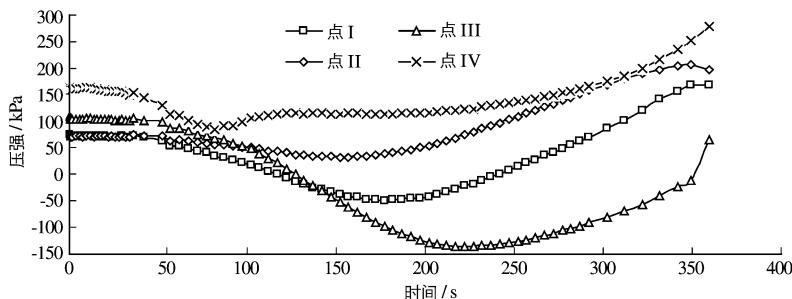


图 5 突扩体关键点压强随时间变化曲线

Fig. 5 Observation point pressure change along with time in middle section of the tunnel

计算结果表明,廊道最易发生空蚀破坏的开度为 0.6。如果考虑实际灌水过程,采用 6 min 开阀后,闸室水位上升约 11 m,则升坎末端负压为 -2.8 m 水柱,该区域为空蚀高危区。此外,由于阀门开启时间较长,闸室水位升高速度变慢,增加了船舶过闸时间。故建议进一步进行优化阀门后突扩体体型;采用快速开阀方式,在提高突扩体压力的同时也能减少船舶过闸所用时间,提高过闸效率;采取一定的工程措施加强防护。

### 3 结语

采用动网格技术和 VOF 方法对乌江银盘船闸阀门开启过程进行非恒定流三维紊流数值模拟,分析阀门段水流急变分离的流态、流速、压力等水力特性参数的时空演化规律,分析出现空化空蚀的危险区域和时刻。阀门后狭缝、阀门下底缘及跌坎角处是流噪声源,也是发生空化空蚀风险区;突扩体顶板上游侧区域出现负压,有空蚀风险,最不利开度为 0.49;空蚀最危险区域在突扩体升坎反弧末端,开度为 0.63 时负压高达 -135.203 kPa。建议进一步优化突扩体型,并采取工程措施加强空蚀区的防护。

### 参考文献:

- [1] 左卫广. 船闸平面阀门底缘空化及改善措施[D]. 南京: 南京水利科学研究院, 2005. (ZUO Wei-guang. Study on hemlin cavitating and reforming measure of the plane gate for navigation lock [D]. Nanjing: Nanjing Hydraulic Research Institute, 2005. (in Chinese))
- [2] 周华兴. 高水头船闸阀门空化问题的研究[J]. 水运工程, 1993(11): 28-33. (ZHOU Hua-xing. Study of the gas-etching problem of valve in high-lift ship lock [J]. Port & Waterway Engineering, 1993(11): 28-33. (in Chinese))
- [3] 李云, 胡亚安, 宣国祥. 通航船闸水力学研究进展[J]. 水动力学研究与进展: A辑, 1996, 14(2): 232-239. (LI Yun, HU Ya-an, XUAN Guo-xiang. Advances in study on hydraulics of navigation lock [J]. Journal of Hydrodynamics (Ser A), 1996, 14(2): 232-239. (in Chinese))
- [4] 陈文学, 谢省宗, 戴光清, 等. 用分块耦合技术模拟三峡永久船闸反向弧形阀周围的湍流场[J]. 水动力学研究与进展: A辑, 2000(2): 82-88. (CHEN Wen-xue, XIE Sheng-zhong, DAI Guang-qing, et al. Numerical simulation of the turbulent flow field around valve of Three Gorges ship lock by means of multi-block and matching method [J]. Journal of Hydrodynamics (Ser A), 2000(2): 82-88. (in Chinese))
- [5] 王玲玲, 戴会超, 王琼. 三峡船闸水力学数值实验室的研制及应用[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2004, 32(1): 100-103. (WANG Ling-ling, DAI Hui-chao, WANG Qiong. Development of hydraulics numerical laboratory and its application to Three Gorges Project [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2004, 32(1): 100-103. (in Chinese))
- [6] 戴会超, 王玲玲. 三峡永久船闸阀门段廊道水力学数值模拟[J]. 水力发电学报, 2005, 24(3): 88-92. (DAI Hui-chao, WANG Ling-ling. Flow field numerical simulation of conveyance system of permanent ship lock in Three Gorges Project [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2005, 24(3): 88-92. (in Chinese))
- [7] 马峥, 张计光, 陈红勋, 等. 三峡永久船闸水力学特性研究[J]. 水动力学研究与进展: A辑, 2007, 22(2): 175-181. (MA Zheng, ZHANG Ji-guang, CHEN Hong-xun, et al. Hydrodynamic study on water-filling tunnel of the Three Gorges Lock [J]. Journal of Hydrodynamics: Ser A, 2007, 22(2): 175-181. (in Chinese))
- [8] 王智娟, 江耀祖, 吴英卓, 等. 银盘船闸阀门段体型优化三维数值模拟研究[J]. 人民长江, 2008, 39(4): 91-93. (WANG Zhi-juan, JIANG Yao-zu, WU Ying-zhuo, et al. The 3D numerical simulation study on the pattern optimization to the lock of Yinpan [J]. Yangtze River, 2008, 39(4): 91-93. (in Chinese))
- [9] 杨忠超, 杨斌, 陈明栋, 等. 基于动网格技术的对高水头船闸阀门开启过程水力特性动态仿真研究[R]. 重庆: 重庆交通大学, 2009. (YANG Zhong-chao, YANG Bin, CHEN Ming-dong, et al. Dynamic simulation study on hydraulics characteristic of high head lock during valve opening process based on dynamic mesh technology [J]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2009. (in Chinese))
- [10] HIRTCW, NICHOLSB. Volume of fluid method for the dynamics of free boundaries[J]. Journal of Computation Physics, 1981 (39): 201-225.
- [11] NIELSEN E J, ANDERSON W K. Recent improvement in aerodynamic design optimization on unstructured meshes[R]. USA:

- AIAA, 2001.
- [12] STEIN K, TEZDUYAR T, BENNEY R. Mesh moving techniques for fluid structure interactions with large displacements[J]. J Appl Mech, 2008, 70: 58-63.
- [13] 阎诗武. 船闸廊道输水阀门振动研究进展[J]. 水利水运工程学报, 1998(2): 109-118. (YAN Shi-wu. Advances in the culvert valve vibration study of navigation locks[J]. Hydro-Science and Engineering, 1998(2): 109-118. (in Chinese))
- [14] 许唯临, 廖华胜, 杨永全, 等. 水垫塘三维紊流数值模拟及消能分析[J]. 水动力学研究与进展, 1996, 11(5): 561-569. (XU Wei-lin, LIAO Hua-sheng, YANG Yong-quan, et al. Numerical simulation of 3-D turbulent flows of plunge pool and energy dissipation analysis[J]. Journal of Hydrodynamics, 1996, 11(5): 561-569. (in Chinese))

## Dynamic simulation of hydraulic characteristic of the Yinpan lock during valve opening

LI Hong-qi<sup>1</sup>, YANG Zhong-chao<sup>2</sup>

(1. Changjiang Luzhou Waterway Bureau, Luzhou 646000, China; 2. Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

**Abstract:** The Yinpan lock in the Wujiang River is currently the highest single-step lock in China. By analyzing the initial designing results and test data of its physical model, we find there is a high vacuum pressure along the section of water-filling valve under the design head, especially in the rising ridge of the sudden-expansion body. It is likely to result in the cavitation erosion, which has become one of the key issues to be solved urgently. With dynamic mesh technology and VOF method, valve opening process has been simulated successfully by means of  $k-\varepsilon$  turbulence model, adopting the six-minute way to open the valve. We analyze the evolution law of flow pattern, flow velocity and pressure change along with time and space, and the dangerous region and moment when cavitation erosion appears. As a result, we provide a solution to the cavitation erosion problem caused by high-speed flow in the valve corridor of the distribution system for the Yinpan lock in the Wujiang River.

**Key words:** high-head lock; turbulent numerical simulation; dynamic mesh; valve; cavitation erosion

### 南京水利科学研究院荣获第一届水运工程建设标准突出贡献奖

为调动广大工程技术人员参加标准编制工作的积极性和创造性,鼓励在水运工程建设标准化工作中做出突出贡献的单位和个人,促进水运工程技术进步,交通运输部今年组织开展了第一届水运工程建设标准突出贡献奖评选活动。经过单位申报,专家评审,交通运输部审查,第一届水运工程建设标准突出贡献奖评出单位奖5个、个人奖11名。南京水利科学研究院荣获第一届水运工程建设标准突出贡献奖单位奖。南京水科院长期以来积极推动并参加水运工程建设标准化工作,鼓励技术业务骨干参加水运工程建设标准编制工作,所主编或参编的各项标准均按期高质量完成。由南京水科院主编并已发布的水运工程建设标准有《内河航道与港口水文规范》JTJ214-2000、《船闸输水系统设计规范》JTJ306-2001、《波浪模型试验规程》JTJ/T234-2001、《内河航道维护技术规范》JTJ287-2005、《水运工程波浪观测和分析规范》JTJ/T277-2006等;由南京水科院参编并已发布的水运工程建设标准有《内河航道标准》修订GBJ139-90、《通航建筑物水力学模拟技术规程》JTJ/T235-2003、《海港工程钢结构防腐蚀技术规范》JTS153-3-2007、《三峡船闸设施安全检测技术规程》JTS196-5-2009等;由南京水科院承担、为水运工程建设行业标准规范编制进行的研究项目均通过交通运输部的验收。目前,南京水科院正在主编的水运工程建设行业标准有五项。

在水运工程建设标准工作中,南京水科院还给予政策和经费的支持,无论是主编或参编的标准和规范均给予五万元人民币的资助。

摘自《南京水利科学研究院网站》