



柳江红花二线船闸阀门段廊道 压力特性三维数值模拟^{*}

原国智¹, 陈明², 张萌², 黄海津²

(1. 广西西江集团红花二线船闸有限公司, 广西柳州 545025; 2. 重庆交通大学, 重庆 400074)

摘要: 工作阀门是船闸输水系统的咽喉, 其性能直接影响船闸的安全高效运行。依托柳江红花二线船闸工程, 建立了输水系统整体和阀门段廊道局部三维数学模型, 通过对比闸室水位、输水流量及阀门段廊道非恒定压力过程线得出, 相比局部三维模型, 构建的整体三维模型能较好地模拟阀门后廊道压力变化过程。针对充水过程双边阀门连续开启和单边阀门连续开启进行计算发现, 在满足设计输水时间的最不利工况下, 阀门后廊道顶部未出现负压现象。计算方法可为船闸阀门水力学数值模拟借鉴参考, 模拟成果可对类似工程的安全运行提供技术支撑。

关键词: 船闸; 输水系统; 廊道压力; 三维数值模拟

中图分类号: U641.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2024)02-0079-07

Three-dimensional numerical simulation of culvert pressure characteristics of valve section of Liujiang Honghua second-line ship lock

YUAN Guozhi¹, CHEN Ming², ZHANG Meng², HUANG Haijin²

(1. Guangxi Xijiang Group Honghua Second Line Locks Co., Ltd., Liuzhou 545025, China;

2. Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

Abstract: The working valve is the throat of the filling and emptying system of the ship lock, and its performance directly affects the safe and efficient operation of the ship lock. In this paper, a whole three-dimensional mathematical model of the filling and emptying system and a partial three-dimensional mathematical model near the valve are established based on the Liujiang Honghua second line ship lock project. By comparing the water level within the lock chamber, the filling flow rate and unsteady pressure process after the valve, it is shown that the whole three-dimensional model can better simulate the culvert pressure change process after the valve compared with the results of the partial three-dimensional model calculation. The calculation is carried out for the continuous opening of the bilateral valves and the continuous opening of the unilateral valve in the water filling process. It is found that there is no negative pressure at the top of the culvert after the valve under the most unfavourable working conditions to meet the design filling time. The calculation method can be used as a reference for numerical simulation of ship lock valve hydraulics, and the simulation results can provide technical support for safe operation of the similar projects.

Keywords: ship lock; filling and emptying system; culvert pressure; three-dimensional numerical simulation

输水阀门是船闸充泄水的控制设备, 是输水系统的咽喉, 其性能直接影响船闸的安全高效运行^[1]。高水头船闸充泄时, 在频繁非恒定高速水

流作用下, 阀门段廊道极易发生空化, 主要包括阀门底缘、门楣缝隙、跌坎和升坎空化^[2], 通常采取优化廊道体形、降低阀门段廊道埋深及门楣

收稿日期: 2023-06-05

*基金项目: 国家重点研发计划项目 (2016YFC0402001)

作者简介: 原国智 (1984—), 男, 工程师, 从事船闸枢纽建设管理。

通气等措施^[3]。王召兵等^[4]、严秀俊等^[5]、郭超等^[6]通过恒定流减压模型试验发现廊道顶部掺气、突扩廊道体形、门楣自然通气、跌坎强迫通气等措施可以增加阀门段廊道压力。随着计算流体力学(computation fluid dynamics, CFD)技术的快速发展,为达到降低设计成本的目的,数值仿真技术常用于辅助船闸输水系统阀门段廊道设计。Hammack 等^[7]通过建立约翰德船闸(John Day)输水阀门廊道的局部三维数学模型,采用网格自适应方法得到了不同开度下的阀门段压力和流场分布特性。戴会超等^[8]采用二维数学模型计算三峡船闸阀门启闭过程中门井段流场动态变化过程,并研究了阀门井顶扩及底扩方案的抗空蚀性能。马峥等^[9]采用二维和三维数学模型分别对三峡永久船闸末级闸首阀门段输水廊道进行模拟,将二维与三维的计算及试验结果进行对比,并研究了阀门后廊道顶部的压力特性等。杨忠超等^[10]、王智娟等^[11]利用三维数学模型对银盘船闸输水阀门段廊道体形进行一系列优化,取得了较好的结果。但前述数学模型或者只进行水力特性验证而未进行非恒定压力过程验证,或者压力特性验证效果不佳。

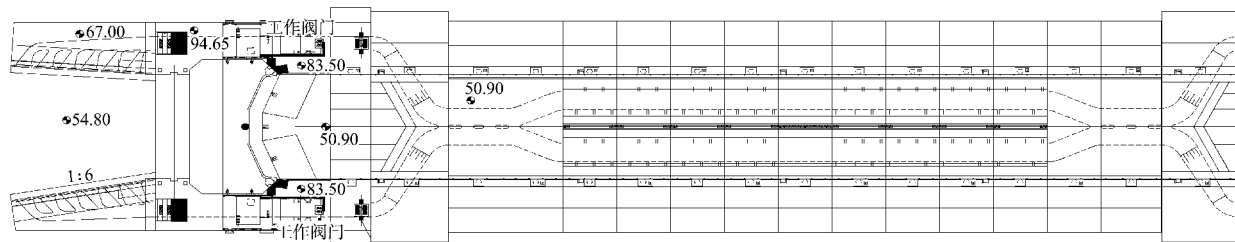
鉴于此,本文依托红花二线船闸工程,借助商用 CFD 软件 FLOW 3D 建立了船闸整体三维数学模型(以下简称“整体三维模型”)和船闸阀门段廊道局部三维数学模型(以下简称“局部三维模型”),对阀门后廊道压力进行了数值仿真,同时应用船闸整体水工物理模型试验结果对数模结果的合理性和可靠性进行验证,以便为船闸阀门水力学数值模拟借鉴参考。最后,以满足工程设计

要求的输水时间为前提,对不同水位组合和不同阀门开启方式下的廊道压力特性进行模拟,旨在为船闸输水阀门防空化运行提供技术参考。

1 工程概况

红花水利枢纽是柳江干流规划中最下游一个梯级,是一个以发电、航运、改善水环境为主,兼顾灌溉、旅游、养殖等综合利用的工程,2009 年红花水利枢纽二线船闸工程列入首批西江黄金水道建设项目。柳江红花水利枢纽二线船闸工程布置于枢纽左岸,采用单级船闸。根据通航规模要求,二线船闸有效尺度为 $280\text{ m} \times 34\text{ m} \times 5.8\text{ m}$ (长 \times 宽 \times 门槛最小水深),最大设计工作水头 H 为 20.81 m (水位组合 $77.5\text{ m}-56.69\text{ m}$)。

根据船闸总体布置与《船闸输水系统设计规范》^[12]有关规定,采用闸底长廊道输水系统。输水系统布置尺寸见文献[13-14],输水阀门尺寸 ω 为 $2 \times 4.5\text{ m} \times 6.0\text{ m}$ (个数 \times 宽 \times 高)即 54.0 m^2 。红花二线船闸闸底主廊道断面面积 66.0 m^2 ,考虑闸室较宽,闸底廊道采用双纵支廊道布置,廊道尺度均为 $6.0\text{ m} \times 5.5\text{ m}$ (宽 \times 高)。为减小闸室底板厚度,出水支孔采用侧向布置,每支廊道均为两区段出水布置,共布置 48 个出水支孔,每区段两侧各布置 12 个出水支孔,其中靠近闸室纵向中心线的两边侧支孔交错布置,每支廊道自上游至下游两区段出水支孔断面尺寸(宽 \times 高)分别为 $0.54\text{ m} \times 1.35\text{ m}$ (12 孔)和 $0.45\text{ m} \times 1.35\text{ m}$ (12 孔),长 1.5 m ,总断面面积 64.152 m^2 。出水支孔采用等间距布置,支孔中心距 5.30 m ,出水段总长 123.48 m 。红花二线船闸布置见图 1。



a) 平面

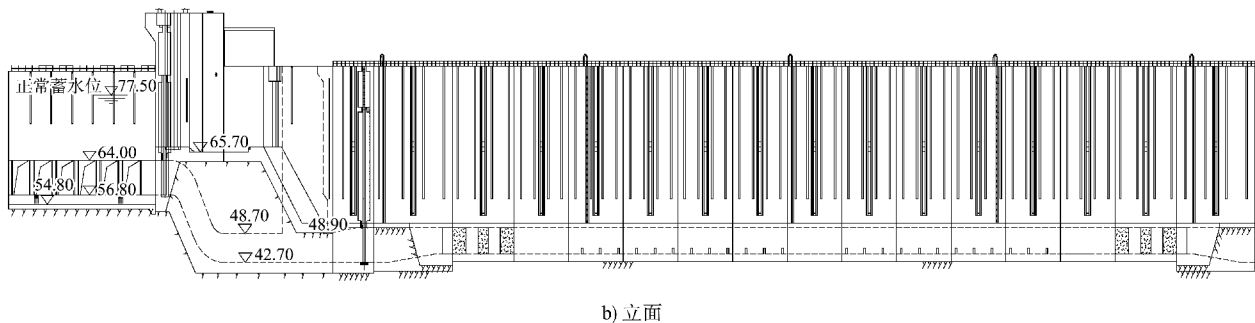


图 1 船闸布置 (单位: m)

2 数学模型建立及验证

2.1 数学模型建立

采用商用 CFD 软件 FLOW 3D 建立整体和局部三维数学模型, 其中整体三维数学模型包括上游引航道、阀门段、闸室、明沟及支孔部分, 局部三维数学模型由船闸输水廊道鹅颈段、阀门段及部分主廊道段组成。使用软件自带 FAVOR 技术对模型进行描绘, 见图 2。

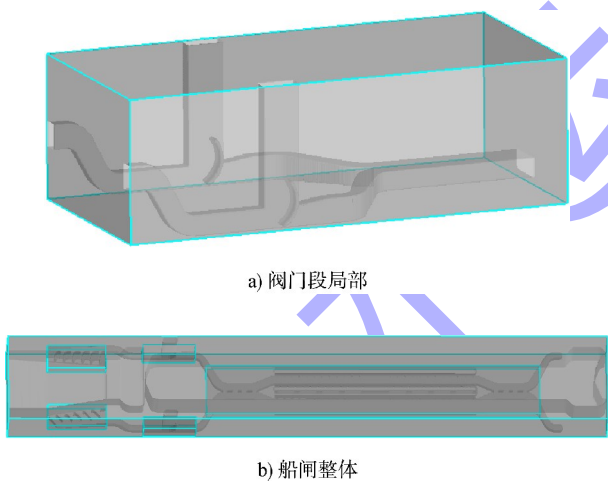


图 2 船闸三维数学模型

2.2 数值模拟原理

采用 RNG $k-\varepsilon$ 紊流模型对输水系统三维水力特性进行数值模拟, 阀门井等水面位置采用 VOF 模型, 其连续方程、动量方程和 k, ε 方程可参考文献[15-16]。

2.3 网格剖分及边界条件处理

整体三维模型的计算区域选取远离上游进水口处的上游引航道段至闸室段, 模型整体采用的网格密度为 1.2 m, 水深方向设置 0.6 m, 并对

船闸进水口段、阀门段、明沟段进行加密处理, 采用 0.3 m 网格密度, 网格总数 720 万个。上游引航道采用恒定压力进口, 使得船闸上游与闸室保持一个初始水位差, 闸室水面以上给定大气压强 0 (相对压强)。局部三维模型的计算区域选取鹅颈段至主廊道交叉段部分, 模型整体采用 0.35 m 网格密度, 网格总数 460 万个, 进口给定廊道中心到上游水库的恒定静水压力边界条件, 出口由整体三维模型获得的闸室水面上升过程所换算的非恒定压力过程给定边界条件, 网格划分见图 3。

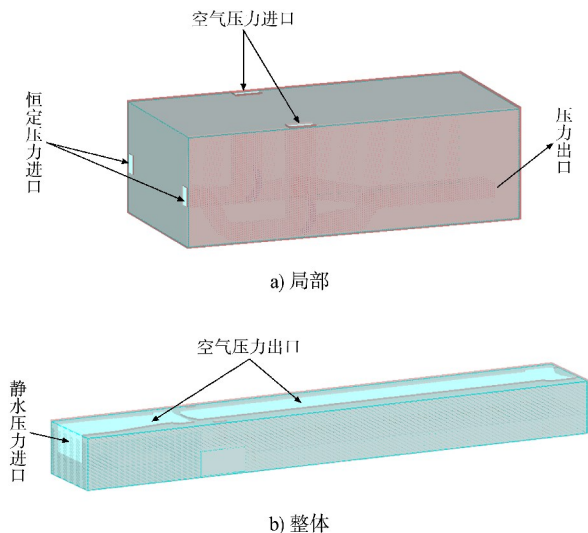


图 3 模型边界条件及网格划分

2.4 数学模型验证

2.4.1 闸室水位和输水流量验证

验证工况选取最大工作水头 20.81 m、双边阀门 6 min 匀速开启过程。一维数模、整体三维数模及物理模型的最大输水流量分别为 581.72、

572.49、675.00 m^3/s ；输水时间分别为 11.37、11.93、12.07 min。一维和三维数学模型计算的最大输水流量和船闸输水时间误差分别为 1.58%、4.75%，整体三维数学模型与物理模型实测的最大输水流量及输水时间误差分别为 15.19%、1.13%。由图 4 可见，两种数学模型计算的闸室水位变化曲线吻合较好，流量变化曲线仅在最大流量出现前略有偏差。整体三维数学模型与物理模型的闸室水位变化曲线基本吻合，流量变化曲线在输水至 312 s（即阀门开度为 1.0）期间实测流量较模拟流量偏大，其原因是物理模型流量系数与数学模型流量系数存在一定的差异^[17]。同时，考虑到一维数模的阻力系数取自物理模型实测值，一维数模和整体三维数模吻合较好。因此，本文构建的整体三维数学模型能较好地模拟船闸的整个输水过程。

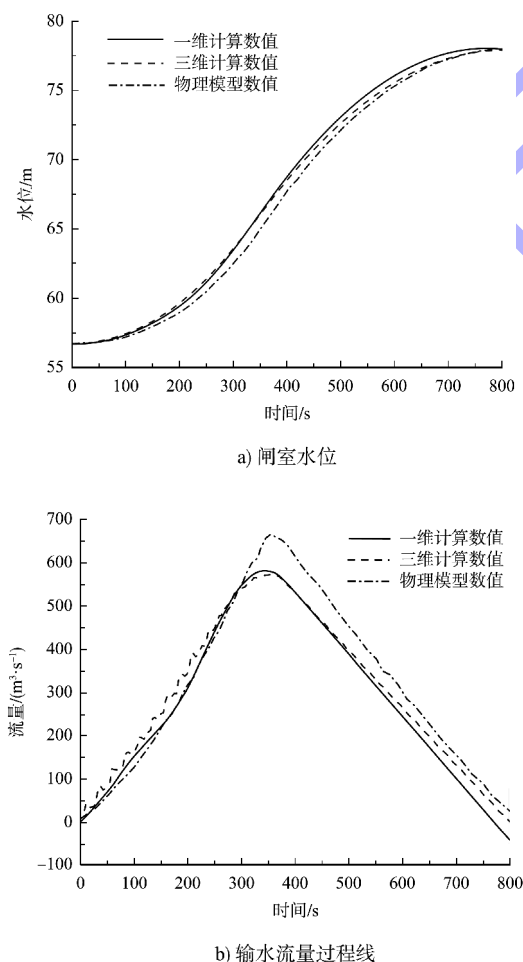


图 4 两种数学模型和物理模型的数值对比

2.4.2 充水阀门后廊道顶部压力验证

为对比整体和局部三维模型阀门后廊道顶部压力过程曲线以常遇水位组合 77.5 m-59.6 m ($H=17.9$ m)、阀门双边 6 min 匀速开启工况为例进行数值分析，所选测点与物理模型所选测点保持一致(图 5)，其中 1#测点高程 48.90 m，2#测点高程 49.45 m，3#测点高程 49.80 m。结果如图 6 所示，两种数模结果与物理模型数据的前 260 s 压力过程曲线变化趋势基本一致，但局部三维模型 3 个测点的压力高程数据明显大于整体三维模型数据及实测数据；三者数据在压力高程上升阶段(260~360 s)存在一定差异，而整体模型与实测数据在压力高程平缓段(360~800 s)吻合度较好，但在 360 s 阀门完全开启后，局部三维模型模拟的压力高程偏离物理模型试验及整体三维模拟的压力高程。此外，由最低压力高程数值(表 1)可知，物理模型 1#~3# 测点的最低压力高程分别为 57.33、57.07、57.26 m，整体三维模型与物理模型误差分别为 0.54%、0.75%、0.10%，而局部三维模型与物理模型误差分别为 0.69%、0.68%、0.42%。由上述分析可知，虽然压力最低点处误差差异不明显，但整体而言，局部三维模型与物理模型间的结果差异较为明显，产生差异的原因是局部三维模型的出口边界难以与实际完全一致。因此，采用局部三维模型研究输水廊道阀门段压力特性的可靠性相对较差，后续采用整体三维数学模型进行研究。

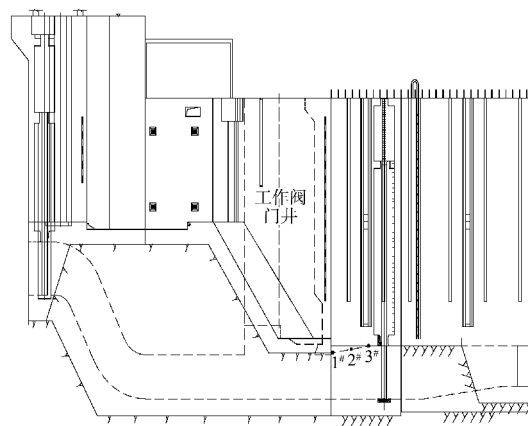


图 5 充水阀门后输水廊道压力测点布置

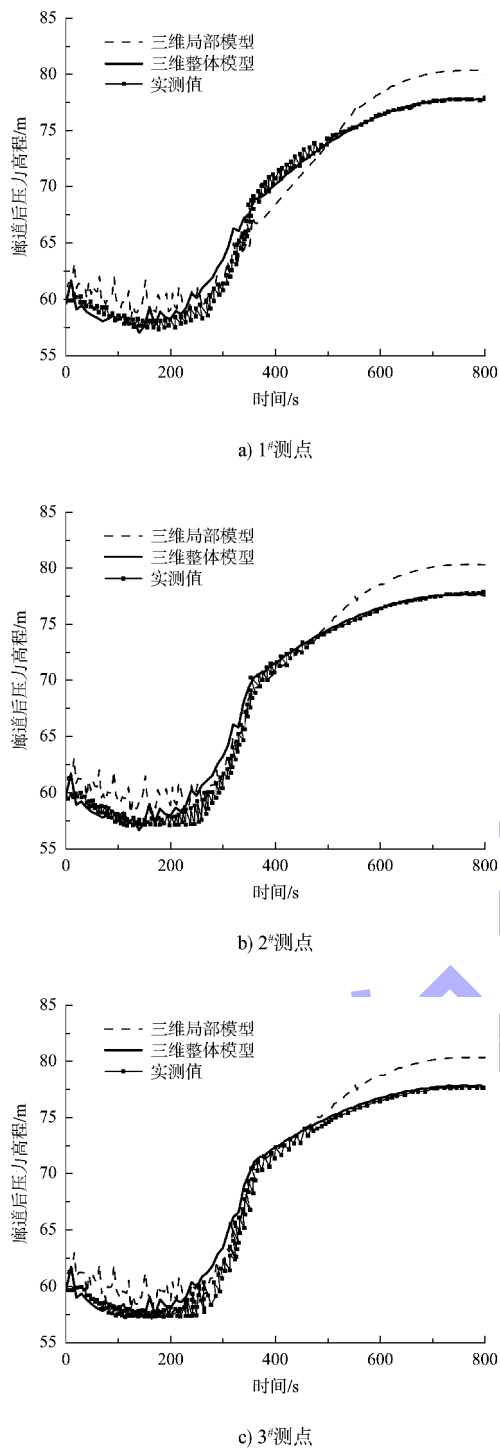


图6 各测点充水阀门后廊道顶压力过程线

表1 充水阀门后廊道顶部最低压力高程

测点 编号	物理模型 压力高程/ m	整体三维 模型压力 高程/m	误差/ %	局部三维 模型压力 高程/m	误差/ %
1 [#]	57.33	57.02	0.54	57.73	0.69
2 [#]	57.07	56.64	0.75	57.46	0.68
3 [#]	57.26	57.32	0.10	57.02	0.42

2.5 计算工况

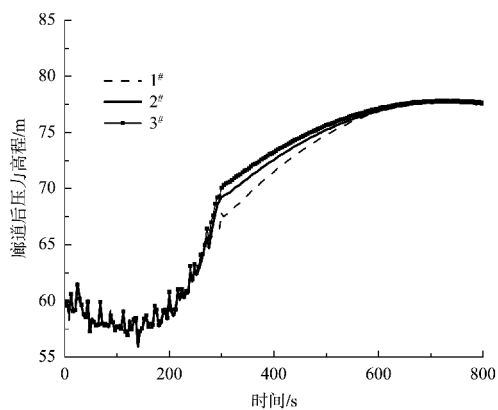
采用整体三维模型计算各工况充水阀门后廊道顶部压力特性,研究船闸运行中阀门段廊道负压产生情况,以此指导船闸运行。根据《船闸输水系统设计规范》的计算公式:

$$k_v = t_v / T \quad (1)$$

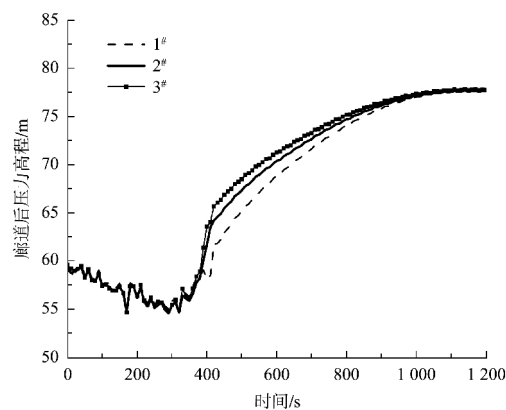
式中: t_v 为阀门启闭时间, T 为输水时间, k_v 为比值。为满足 T 在设计规定的 12 min 之内,取 k_v 值为 0.4~0.6, 计算最大设计水位组合 77.5 m-56.69 m 及常遇水位组合 77.5 m-59.60 m 下, 阀门 5、6、7、8 min 双边匀速运行及 7 min 单边匀速运行总计 10 种工况的充水阀门后廊道顶部压力过程线。

3 计算成果分析

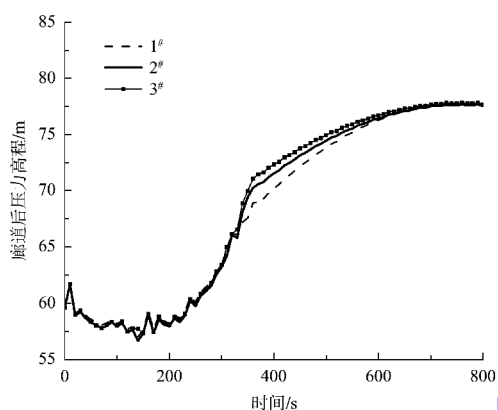
由图 7、8 可知, 各测点压力变化过程总体相似。当阀门逐渐开启到 0.5 开度时段, 阀门后压力逐渐降低至最低值; 而后在阀门 0.5 开度至全开时, 压力迅速提升; 阀门全开至船闸输水过程结束, 压力缓慢增加至上游水位对应的静水压力。统计各工况下最低压力高程(表 2)可知, 最大工作水头及常遇水头工况下, 双边阀门连续开启时, 廊道顶部压力值均满足设计规范即压力换算水柱不小于 -3 m。最大工作水头下, 廊道顶部最低压力高程 52.01 m(3[#]测点, 水柱高 2.21 m); 常遇水头下, 廊道顶部最低压力高程 55.95 m(2[#]测点, 水柱高 6.50 m)。最大工作水头及常遇水头工况下, 单边阀门连续开启时充水过程廊道顶部最低压力高程分别为 50.38 m(3[#]测点, 水柱高 0.58 m)和 54.54 m(2[#]测点, 水柱高 5.09 m), 亦满足规范要求。综合上述分析, 在满足设计输水时间的最不利工况下, 阀门后廊道顶部未出现负压现象。考虑到对船闸输水系统进行整体三维建模时对细部结构进行了简化, 数值结果并未反映阀门底缘、门楣缝隙及门槽等易空化区的空化特性, 因此, 在原型调试过程中还需重点观测阀门底缘、门楣缝隙及门槽等易空化区的空化特性。



a) 双边充水, $t_v=5\text{ min}$

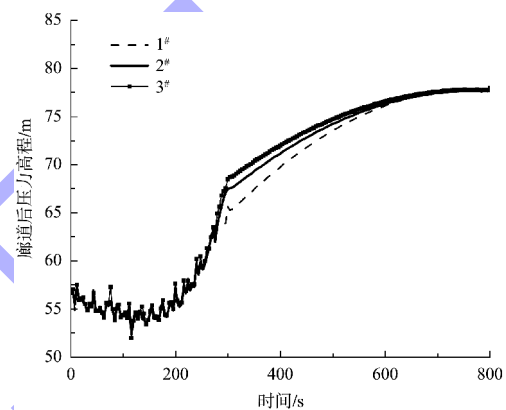


e) 单边充水, $t_v=7\text{ min}$

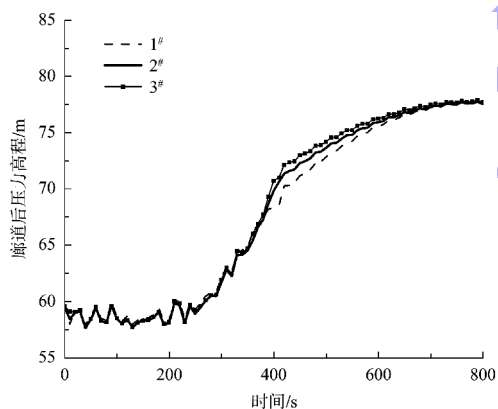


b) 双边充水, $t_v=6\text{ min}$

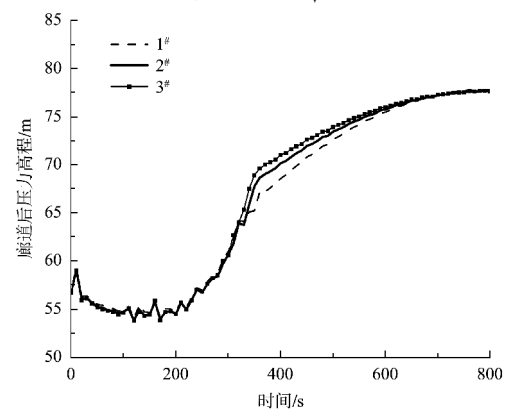
图 7 常遇水位组合船闸充水阀门后廊道顶部压力过程线



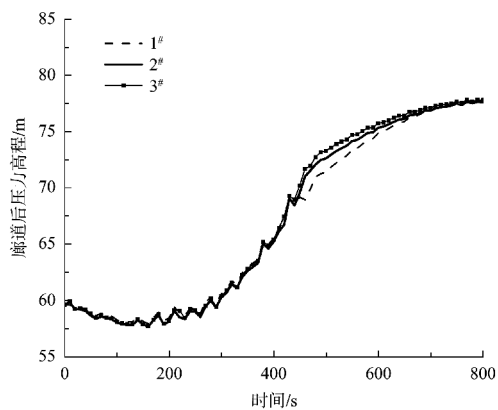
a) 双边充水, $t_v=5\text{ min}$



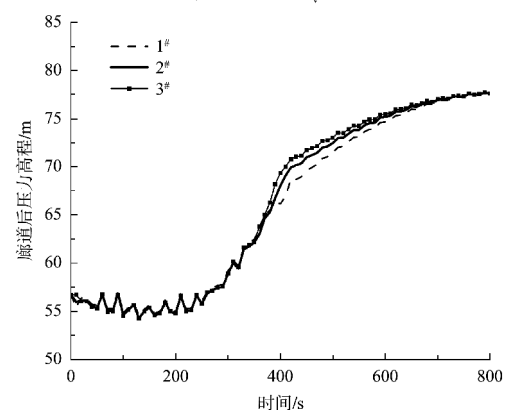
c) 双边充水, $t_v=7\text{ min}$



b) 双边充水, $t_v=6\text{ min}$



d) 双边充水, $t_v=8\text{ min}$



c) 双边充水, $t_v=7\text{ min}$

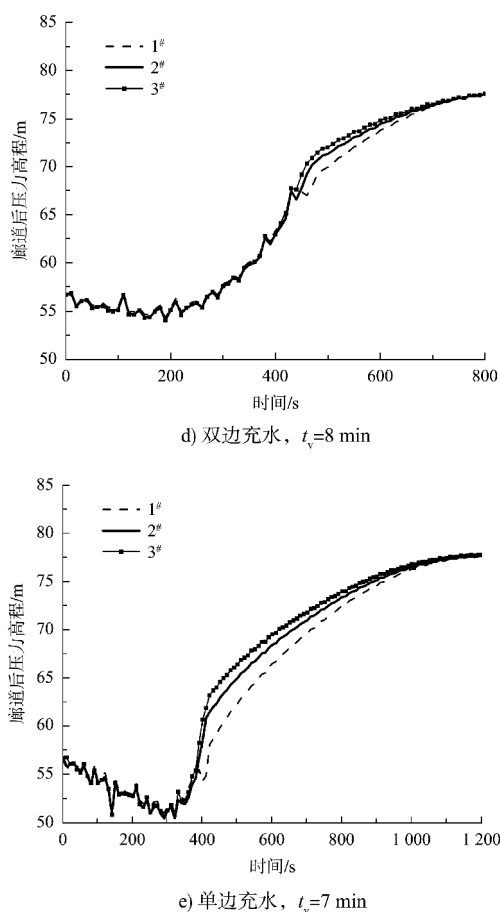


图8 最大设计水位组合船闸充水阀门后廊道顶部压力过程线

表2 阀门后顶部最低压力高程/m

水位 组合	双边充水				单边充水
	$t_v=5\text{ min}$	$t_v=6\text{ min}$	$t_v=7\text{ min}$	$t_v=8\text{ min}$	$t_v=7\text{ min}$
77.5 m-59.6 m ($H=17.9\text{ m}$)	55.95 (2#)	56.64 (2#)	57.67 (2#)	57.65 (2#)	54.54 (2#)
77.5 m-56.69 m ($H=20.81\text{ m}$)	52.01 (3#)	53.81 (3#)	54.22 (3#)	54.25 (2#)	50.38 (3#)

阀门段廊道压力特性可辅以指导红花二线船闸工作阀门启闭。实际上,阀门的启闭方式不仅受阀门段廊道压力特性控制,还受闸室船舶停泊条件、引航道通航水力条件等控制。因此,在原型调试过程中还应考虑闸室船舶停泊条件、引航道通航水力条件等限制因素,以获得更为合理的阀门启闭方式。

4 结论

1) 通过闸室水位、输水流量及阀门段廊道非恒定压力过程线验证得出,相比局部三维模型,整体三维模型能较好地模拟船闸的整个输水过程和阀门后廊道压力变化过程,可为船闸阀门廊道

段压力特性数值模拟借鉴参考。

2) 在满足设计输水时间的最不利工况下,充水过程双边阀门连续开启时,廊道顶部最低压力水柱 2.21 m;充水过程单边阀门连续开启时,廊道顶部最低压力水柱 0.58 m。阀门后廊道顶部均未出现负压现象。

3) 阀门段廊道压力特性分析成果可为红花二线船闸输水系统阀门启闭方式提供技术参考,但阀门运行方式还涉及闸室船舶停泊条件、引航道水力条件等因素。因此,后续还需进行全面研究分析,以获得更为合理的阀门启闭方式。

参考文献:

- [1] 胡亚安,严秀俊,薛淑,等.三峡船闸紧急关阀工况输水阀门工作条件原型观测[J].水运工程,2021(1):1-5.
- [2] 付文周,陈和东.安谷水电站船闸阀门水力学研究[J].水运工程,2009(12):165-167,173.
- [3] 蒋筱民,宋志忠.高水头船闸阀门段廊道防空化设计[J].人民长江,2009,40(23):51-53.
- [4] 王召兵,周家俞,缪吉伦,等.草街船闸廊道顶掺气对提高廊道压力研究[J].中国水运(学术版),2007,7(7):70-71.
- [5] 严秀俊,胡亚安,王蛟,等.旁海船闸阀门水力特性与防空化技术研究[J].水运工程,2016(12):31-35.
- [6] 郭超,严秀俊,胡宝瑶,等.万安二线船闸输水阀门段防空化特性及优化措施[J].水运工程,2020(10):12-17.
- [7] HAMMACK E A, STOCKSTILL R L. 3D numerical modeling of John Day Lock tainter valves [C]// World environmental and water resources congress, Kansas City: ASCE, 2009: 2727-2736.
- [8] 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.
- [9] 马峥,张计光,陈红勋,等.三峡永久船闸输水廊道水动力学特性研究[J].水动力学研究与进展(A辑),2007,22(2):175-181.
- [10] 杨忠超,杨斌,陈明栋,等.高水头船闸阀门段体型优化三维数值模拟[J].水利水电科技进步,2010,30(2):10-13,57.
- [11] 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.

(下转第138页)