

船闸闸底长廊道输水系统水力特性模拟研究

张庆亮¹, 吴星²

(1. 中设科欣设计集团有限公司, 浙江 杭州 310000; 2. 绍兴市公路与运输管理中心, 浙江 绍兴 312000)

摘要: 船闸输水过程闸室水流条件与船舶通航安全紧密相关。本文针对某闸底长廊道输水系统船闸建立三维数学模型, 采用 RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型, 结合 VOF 自由水面技术, 对船闸灌水非恒定变化过程进行模拟, 分析闸室流速、流态分布规律。研究表明: 灌水初期侧支孔自上游向下游依次出流, 闸底廊道内的流速均呈自上游向下游递减趋势, 在闸底廊道、明沟、闸室内均出现了不同程度的漩涡。

关键词: 三维数值模拟; 闸底廊道; 侧支孔; 水力特性; 船闸

中图分类号: U641 文献标识码: A 文章编号: 1006—7973 (2022) 07—0119—03

1 引言

船闸是帮助船舶克服水利枢纽集中水位落差的通航建筑物, 闸室水流条件直接影响船舶停泊安全。随着高坝工程的修建和通航需求的提高, 船闸水头越来越高, 平面尺度增大, 输水流量随之增大, 使得闸室水流紊动加剧, 不利于船闸通航安全^[1]。闸室水力特性与输水时间、输水系统及闸室消能型式等紧密相关。闸底长廊道侧支孔输水系统是广泛应用于中水头船闸的分散输水系统, 我国的桂平二线^[2]、那吉^[3]等船闸均采用该输水系统型式。此类输水系统在闸室的底部布置输水廊道, 输水廊道两侧连接短支孔与闸室相连。

数值模拟是研究船闸水流条件的有效手段, 它具有修改方便、数据信息丰富、高效、节约成本等优点, 是原型观测及物理模型实验的有效补充。王智娟等^[4]对船闸阀门段水流条件模拟, 并对体型进行优化。黎贤访等^[5]对闸墙长廊道输水系统船闸灌水过程支孔出流特性进行了分析。陈明等^[6]对集中输水系统船闸闸室流态进行分析, 并基于 CFD 软件二次开发计算出船舶系缆力。上述研究加深了对船闸输水过程水力特性的认识, 可为船闸输水系统设计提供科学依据。

本研究建立闸底长廊道侧支孔输水系统三维数学模型, 对船闸灌水非恒定变化过程进行模拟, 重点分析输水廊道、侧支孔及闸室内水流流速、流态的时空演化特性。

2 数学模型

数学模型以某闸底长廊道侧支孔输水系统为原型, 支孔出流后采用双明沟消能。闸室的有效尺度为 220m × 34m × 4.5m (长 × 宽 × 门槛水深); 闸底主廊

道断面宽 5.5m、高 5.5m, 内设分流墩; 主廊道两侧各设 24 个出水支孔, 两侧支孔对称布置; 支孔外设双明沟进行消能; 设计上下游通航水位差最大值为 14.4m。数学模型以上闸首下边缘为起点指向下游为 x 轴正方向, 以闸室中轴线为起点指向左岸为 y 轴正方向, 以高程方向向上为 z 轴正方向。

2.1 控制方程

本研究采用 CFD 软件模拟船闸的非恒定灌水过程, 数值模拟采用 RNG $k-\varepsilon$ 紊流模型, 采用有限容积法对偏微分方程进行离散, 压力与速度的耦合求解采用 PISO 算法, 运用 VOF 技术对闸室自由水面进行追踪。假设流体为不可压缩的粘性流体, 连续方程和动量方程如下:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial (\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \mu_t) \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] + \rho g_i \quad (2)$$

其中, $x_i (i=1,2,3)$ 是坐标系中 i 方向的分量, ρ 是分子平均密度, u_i 是 i 方向速度分量, p 是平均压力, μ 是粘性系数, $\rho \overline{u_i' u_j'}$ 是雷诺应力。

紊动能 k 及紊动耗散率 ε 方程:

$$\frac{\partial (\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\alpha_k \mu_{eff} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k - \rho \varepsilon \quad (3)$$

$$\frac{\partial (\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho \varepsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\alpha_\varepsilon \mu_{eff} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + \frac{C_{1\varepsilon}^* \varepsilon}{k} G_k - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (4)$$

其中, G_k 代表因流速梯度产生的紊动能, μ_t 是紊动粘度, 表达式如下:

$$G_k = u_i \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \quad \mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (5)$$

方程中其他的表达式及常数如下:

$$C_{1e}^* = C_{1e} - \frac{\eta(1-\eta/\eta_0)}{1+\beta\eta^3}, \quad \eta = \frac{k}{\varepsilon} \sqrt{(2E_y \cdot E_y)}, \quad E_y = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (6)$$

$$C_\mu = 0.0845, \alpha_k = \alpha_\varepsilon = 1.39, C_{1e} = 1.42, C_{2e} = 1.68, \eta_0 = 4.377, \beta = 0.012$$

2.2 网格剖分及边界条件

数值计算区域包括闸室、输水廊道、侧支孔、双明沟在内长约 244m 的区域。计算区域采用六面体结构网格和楔形网格进行剖分,同时对侧支孔、明沟及其附近区域进行局部加密,剖分的网格单元总数约为 130 万个,节点总数约为 136 万个。计算区域及网格划分如图 1 所示。

为了简化计算,该模型未设置廊道输水阀门,将上游两侧廊道作为流量进口,其流量变化是根据船闸整体输水系统模型实验确定的,闸室流量过程线如图 2 所示。本研究认为两侧廊道的进水流量相等,则各侧廊道进口流量为闸室流量的一半。计算域顶部高于闸室最高水位,与大气相通,设置为空气压力出口。闸室水位随输水过程变化,存在自由表面,运用 VOF 技术进行捕捉。

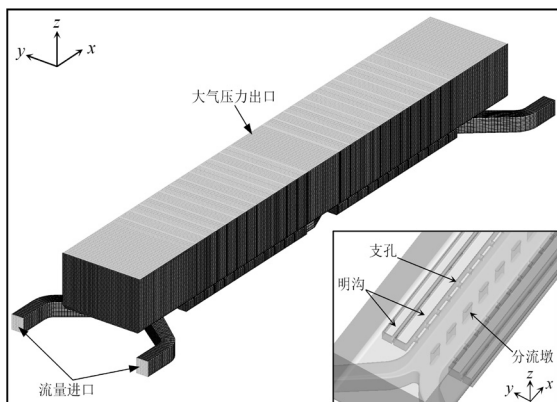


图 1 计算网格及边界条件

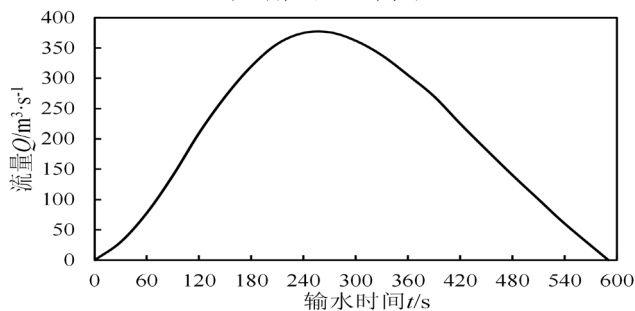


图 2 闸室流量过程线

2.3 数学模型验证

本文建立了几何比尺为 1:30 的船闸整体水工物理模型,基于实测灌水过程下闸室中部水位过程线,对数学模型进行验证。图 3 为数值计算的闸室中心点水位与物模实测值的对比。从图中可以看出,数值计算的闸室水位与物模实测曲线趋势一致,均随灌水过程的进行而

升高,变化速率先增大后减小。各时刻下,模拟值较实测值偏小,这可能是由于数值模拟依赖于网格的解析度所致,但二者之间的差异不超过 2%,表明该数学模型能较好地模拟船闸输水水力动态变化过程。

3 计算结果与分析

限于篇幅,本文仅分析最不利水位组合(水头差 14.44m)、双边阀门 5 分钟匀速开启、灌水过程下闸室内的水力动态变化过程,并重点围绕三个典型时刻进行分析:上游阀门开度 $n=0.2$ ($t=60s$, $Q=78.1m^3 \cdot s^{-1}$)、最大比能时刻 ($t=140s$, $Q=256.2m^3 \cdot s^{-1}$)、最大流量时刻 ($t=270s$, $Q=396.4m^3 \cdot s^{-1}$)。

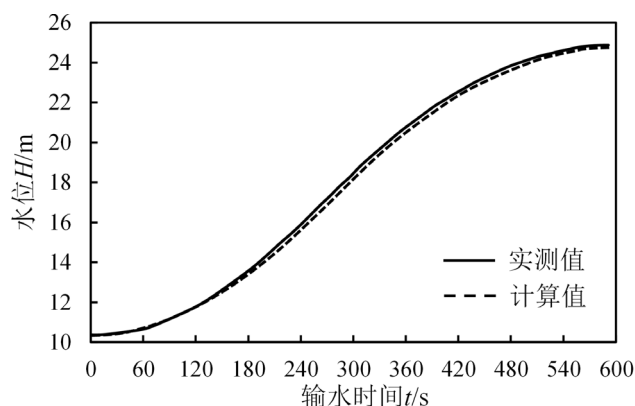


图 3 闸室水位计算值与实测值对比

3.1 支孔出流及纵向流速变化

图 4 为不同时刻下,侧支孔水平中剖面的流速分布图。数值计算结果表明,水流自闸首两侧的廊道进入后,经汇流口汇流进入闸室底部的输水主廊道,之后经侧支孔进入消能明沟,明沟内的水流向闸室内扩散。从图 4a 中可以看出,在灌水初期,闸底廊道的水流由静止状态转换为运动状态,水流自上游向下游流动,从而使得侧支孔自上游向下游依次出流。从初始时刻 ($t=0s$) 至流量最大时刻 ($t=270s$),由于流量的增大,整体流速呈增大的趋势,在最大流量时刻,支孔流速最大约为 $7m \cdot s^{-1}$ 。在不同时刻下,闸底廊道内的流速均呈自上游向下游递减的趋势。

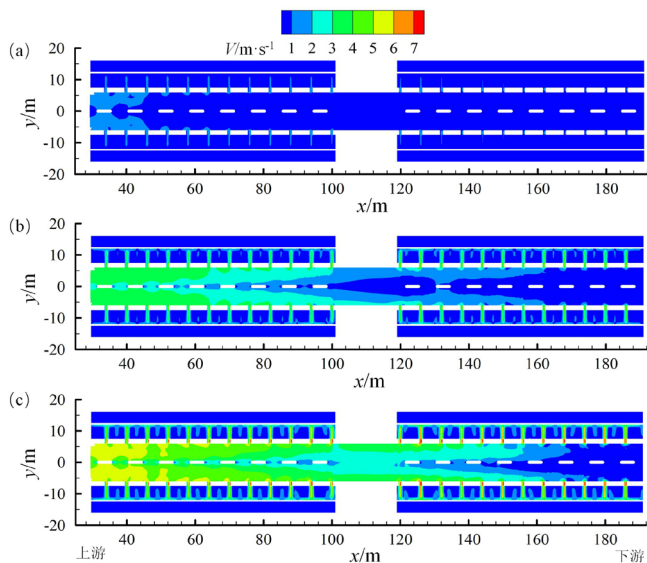


图4 闸室特征断面流速分布云图: (a) $t=60s$, (b) $t=140s$, (c) $t=270s$

图5为侧支孔中剖面局部出流流速分布图。从图中可知,水历经支孔出流后,在第一道明沟内形成射流,在高速射流的卷吸作用下两支孔间形成两方向相反的消能漩涡;通过透水孔进入第二道明沟内的水流在边壁的作用下同样形成漩涡,水流较为紊乱;由于支孔过水面积较小,因此在支孔处的流速最大。

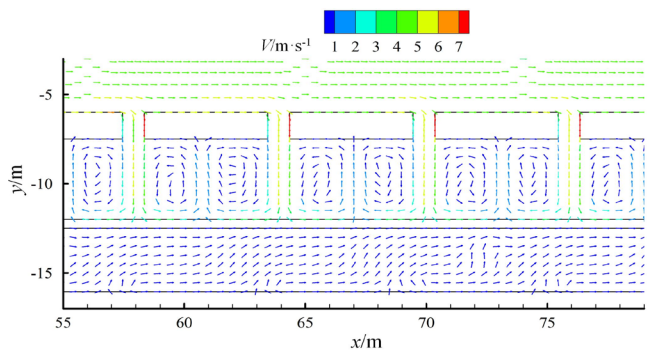


图5 支孔出流局部流速分布 ($t=270s$)

3.2 闸室横向流速分布

图6为闸室特征横断面上的流速及流线分布,其中 $x=69.9m$ 位于闸底廊道的分流墩处, $x=155.9m$ 位于分流墩外。从图中可知,在 $x=69.9m$ 处,闸底廊道被分为左右两部分,漩涡存在于分流墩附近;在 $x=155.9m$ 处,由于水流从廊道左右两侧分流,在廊道中部形成漩涡。水流出支孔后射入第一道明沟,第一道明沟内的水流部分向水面运动,部分经消力梁上的透水孔进入第二道明沟并受闸墙的阻挡向水面运动,同时闸室两侧的水流向闸室中部流动。在第二道明沟内,在透水孔出流的卷吸作用下,使得透水孔上下两侧出现两个方向相反的漩涡。闸室内在不同位置存在不同大小、范围的漩涡。

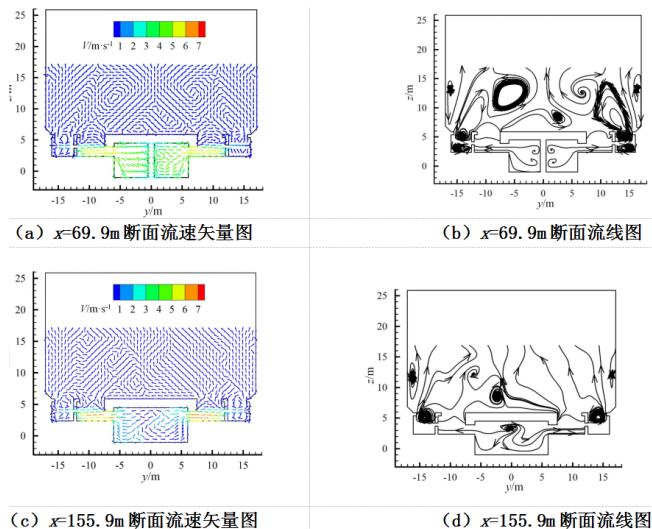


图6 闸室特征横断面流速及流线分布图 ($t=270s$)

4 结论

本文针对闸底长廊道侧支孔输水系统,通过建立船闸整体输水系统三维数学模型,对船闸灌水的动态变化过程进行模拟,分析闸室三维水力特性,主要结论如下:

- (1) 在船闸灌水初期,侧支孔自上游向下游依次出流;由于支孔过水面积较小,因此在支孔处的流速最大;闸底廊道内的流速均呈自上游向下游递减的趋势。
- (2) 在第一道明沟内,由于高速射流的卷吸作用,两支孔间形成两方向相反的漩涡;在第二道明沟内,则在透水孔上下两侧形成两方向相反的漩涡。
- (3) 在闸室内,两侧明沟内的水流向上、向闸室中部流动,存在不同大小、范围的漩涡,使得闸室停泊条件更加复杂。

参考文献:

- [1] 严秀俊,陈林,王敬鹏等. 捷为船闸输水反弧门廊道非恒定流水力特性研究[J]. 水运工程, 2021(12): 21-27.
- [2] 宣国祥,黄岳,李君. 桂平二线船闸闸底长廊道输水系统布置研究[J]. 水运工程, 2009(3): 109-115.
- [3] 赖子机,宁子秋,宣国祥等. 右江那吉航运枢纽船闸闸底长廊道侧支孔输水系统方案水力学模型试验研究[J]. 水运工程, 2007(2): 68-73.
- [4] 王智娟,江耀祖,吴英卓等. 银盘船闸闸室段体型优化三维数值模拟研究[J]. 人民长江, 2008, 39(4): 91-93.
- [5] 黎贤访,李云,邓润兴. 船闸闸室长廊道侧支孔水力特性[J]. 水运工程, 2015(4): 177-179, 193.
- [6] 陈明,梁应辰,宣国祥等. 船闸输水过程闸室船舶系缆力数值模拟[J]. 船舶力学, 2015, 19(1-2): 78-85.