



集中输水系统镇静段长度数值计算*

赖东亮, 李中华, 赵宇航, 陈莹颖

(南京水利科学研究院, 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室,
通航建筑物建设技术交通行业重点实验室, 江苏 南京 210029)

摘要: 结合国内某船闸工程, 针对集中输水系统中简单消能工和格栅消能室两种布置形式, 采用 RNG $\kappa-\varepsilon$ 紊流模型和自由水面处理技术的 VOF 法对输水过程闸室流态进行计算, 在此基础上分析了集中输水系统镇静段长度的选择方法, 给出合理的量化方法。两种典型集中输水系统计算表明, 以闸室沿程平均紊动能小于 $0.02 \text{ m}^2/\text{s}^2$ 作为镇静段长度控制条件, 确定的镇静段长度与规范相符且更明确, 可以作为集中输水系统镇静段长度量化判别指标。

关键词: 船闸; 输水系统; 镇静段; 格栅消能室

中图分类号: U 642.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2016)12-0076-06

Numerical caculation for the length of mitigative section in filling system through the head

LAI Dong-liang, LI Zhong-hua, ZHAO Yu-hang, CHEN Ying-ying

(Nanjing Hydraulic Research Institute, State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering,
Key Laboratory of Navigation Structure Construction Technology, Ministry of Transport, PRC, Nanjing 210029, China)

Abstract: Combining with a domestic ship lock project, flow regime in chambers of two types of filling system through the head, in which setted simple energy dissipater and grid stilling chamber, was simulated by RNG $\kappa-\varepsilon$ turbulence model and VOF method. Based on analysis of the simulation, a reasonable quantitative method was given. This simulation turned out that taking turbulence flow energy less than $0.02 \text{ m}^2/\text{s}^2$ as a quantitative indicator to determine the length of mitigative section during filling process meet the norms.

Keywords: ship lock; filling system; mitigative section; grid stilling chamber

集中输水系统是我国应用最广泛的输水系统形式, 其消能形式较多, 常用的有消能室、消力槛、消力池等。根据输水系统相关规范^[1], 消能段后宜设置镇静段, 镇静段长度是影响闸室长度和闸室船舶停泊安全的重要参数之一, 如何选择合理的镇静段长度, 一直是困扰工程人员的难题。《船闸输水系统设计规范》^[1]中给出了集中输水系统镇静段长度的计算公式:

$$L = BE_p \quad (1)$$

式中: L 为镇静段长度(m); B 为经验系数, 与船闸输水消能形式有关, 对无消能工取 $0.7 \sim 1.3$; 对简单消能工取 $0.3 \sim 0.7$; 对复杂消能工取 $0.1 \sim 0.3$ 。在各类内消能效果好的取小值; E_p 为理论最大比能(kW/m^2), 可通过计算得到。

但是该计算公式取值范围太过宽泛, 往往难以保证安全性与经济性兼顾。近年来, 国内

收稿日期: 2016-09-16

*基金项目: 国家重点研发计划 (2016YFC0402001)

作者简介: 赖东亮 (1992—), 男, 硕士研究生, 从事通航水力学方面的研究。

外运用三维流体力学数值模型开展船闸水力特性研究取得了较大进展^[2-6]。本文结合国内某船闸工程, 对简单消能工和复杂消能工的典型代表“消力槛+消力池”、“格栅式消能室”的输水过程, 采用三维 RNG $\kappa-\varepsilon$ 模型进行数值模拟, 研究了两种消能形式的水力特性和镇静段长度的确定方法。

1 数学模型

1.1 控制方程

为了详细分析格栅消能设置前后闸室内流速分布情况, 采用 RNG $\kappa-\varepsilon$ 紊流模型, 非定常流的控制方程如下:

连续方程:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (2)$$

动量方程:

$$\rho \frac{\partial u_i}{\partial t} + \rho \frac{\partial}{\partial x_j} (u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \rho \overline{u'_i u'_j} \right) + S_i \quad (3)$$

RNG $\kappa-\varepsilon$ 紊流模型方程:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\alpha_k \mu_{eff} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k + \rho \varepsilon \quad (4)$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \varepsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\alpha_\varepsilon \mu_{eff} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + \frac{C_{1\varepsilon}^* \varepsilon}{k} G_k - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (5)$$

式中: p 为压强; ρ 为流体密度; μ 为流体分子黏性系数, 有效黏性系数 $\mu_{eff} = \mu + \mu_t$, 紊流黏性系数 $\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$; G_k 表示由于平均速度梯度引起的紊动能产生项;

$$C_{1\varepsilon}^* = C_{1\varepsilon} - \frac{\eta(1-\eta/\eta_0)}{1+\beta\eta^3} \quad (6)$$

$$\eta = (2E_{ij}E_{ij})^{1/2} \frac{k}{\varepsilon} \quad (7)$$

$$E_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (8)$$

上述各张量表达式中: u_i 为 x_i 方向的速度分量, $i, j=1, 2, 3$; 方程中通用模型常数取值分

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

1.2 数值计算方法

将式(2)~(5)写成如下的通用形式:

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \nabla \cdot (u_j \phi) = \nabla \cdot (\Gamma_\phi \text{grad} \phi) + S_\phi \quad (9)$$

式中: t 和 u_j 分别为时间和速度矢量; ϕ 为通用变量, 如速度、紊动能等; Γ_ϕ 为变量 ϕ 的扩散系数; S_ϕ 为方程的源项。

计算时, 首先对方程(9)在任意控制体积 CV (其边界为 A) 作体积分, 利用高斯定理将体积分化成面积分。记 $F(\phi) = \rho \phi u - \Gamma_\phi \text{grad} \phi$, 可得到有限体积法(FVM)的基本方程, 写成:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho \phi dV = - \int_A F(\phi) \cdot n dA + \int_V S_\phi dV \quad (10)$$

式中: $F(\phi) \cdot n$ 为法向数值通量。

对控制体积单元取平均后, 可离散得到 FVM 基本方程的最终形式为:

$$\frac{\Delta(\rho \phi)}{\Delta t} = - \frac{1}{\Delta V} \sum_{j=1}^m F_j^n(\phi) A_j + \bar{S}_\phi \quad (11)$$

式中: ΔV 为单元体积; m 为单元面总数; A_j 为单元面 j 的面积; \bar{S}_ϕ 为单元的源项平均值, 单元面 j 的法向通量为 $F_j = F_j(\phi) \cdot n$, 包括对流通量和扩散通量。

1.3 计算区域

计算模型选取带简单消能工和带格栅消能室的两种集中输水系统, 闸室尺度为 160 m × 12 m (长 × 宽), 消能段的长度分别为 11.5 m (简单消能工) 和 7.5 m (格栅消能室), 设计水头 10.5 m, 模拟范围包括船闸闸室、输水系统(包括进水口、上闸首)。进行数值计算时, 充水阀门按 $t_v = 2$ min 和 $t_v = 5$ min 双边开启, 输水廊道进口采用物理模型实测的流量过程为进口边界条件, 出口采用压力边界。两种集中输水系统三维数学模型计算区域见图 1。

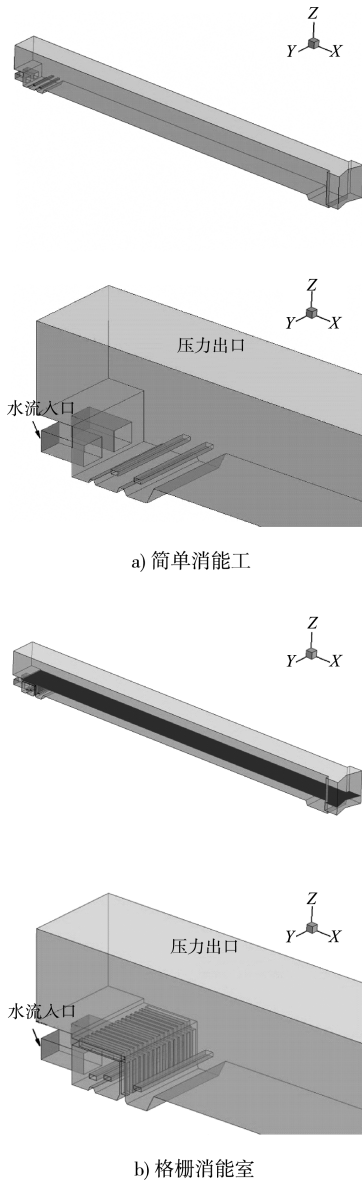


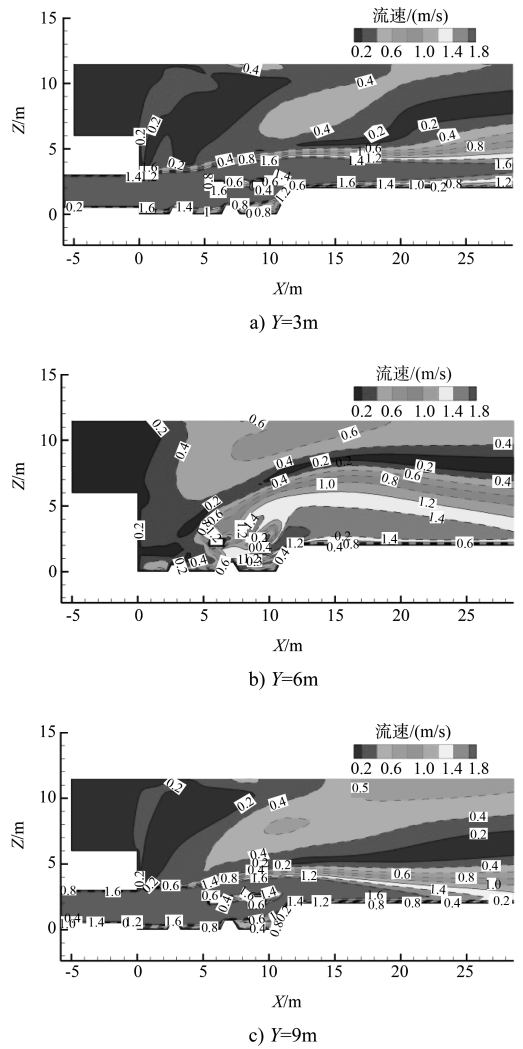
图1 三维数学模型计算区域

2 计算结果分析

2.1 简单消能工输水系统流态分布

2.1.1 闸室纵断面流速分布

根据模型试验结果，阀门开始时间 $t_v = 5$ min 时，闸室充水最大流量发生在输水时间 $t = 300$ s，此时闸室 $Y = 3$ m、 $Y = 6$ m 和 $Y = 9$ m 纵断面流速分布见图 2(取闸室左岸为 $Y = 0.0$ m 断面，向右岸方向 Y 为正)。从图 2 可以看出，水流流经消能段后，在闸室底部仍然保持高速状态流向下游，流速分层现象明显，说明简单消能工消能效果并不好，消能段后需设置较长的镇静段。



注: $t_v = 5$ min, $t = 300$ s。

图2 闸室纵断面流速分布

2.1.2 闸室横断面流速分布

闸室横断面流速分布情况是判断闸室内流态好坏的关键因素，本文着重分析 $X = 30$ m 横断面处(定义主廊道与闸室交接面为 $X = 0.0$ m 断面，向下游方向 X 为正)流速分布。图 3 为该横断面处的流速变化过程线，由图 3 可知，阀门开启时间 $t_v = 2$ min 时，充水过程断面上 $6^\# \sim 10^\#$ 观测点(断面观测点距离闸室底 2.5 m，沿闸室横向从左向右均匀分布，以下同)最大流速差达到了 1.41 m/s，输水过程 $t = 90 \sim 230$ s 范围内流速差超过了 0.6 m/s。阀门开启时间 $t_v = 5$ min 时，充水过程闸室 $X = 30$ m 横断面流速差异仍较为明显，最大为 0.96 m/s，输水过程 $t = 150 \sim 310$ s 范围内流速差超过 0.6 m/s，说明简单消能工调整闸室内横向水流分

布能力较差, 需设置较长的镇静段方能满足要求。

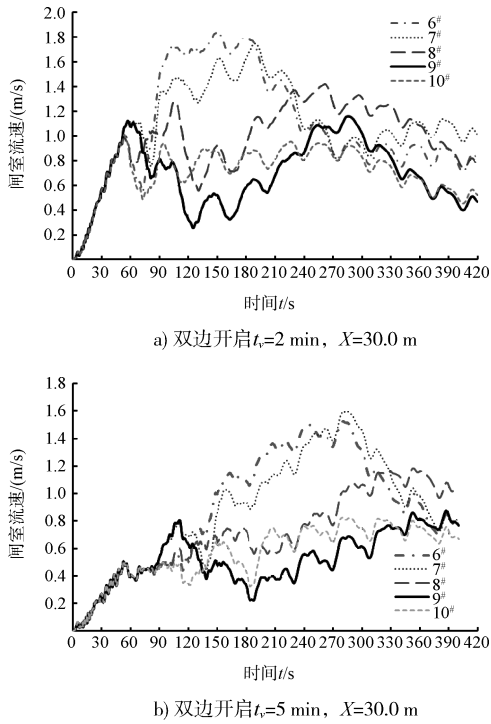


图 3 闸室横断面流速变化过程线

2.1.3 闸室紊动能沿程分布

紊动能是反映消能结构中水流能量传递特性的重要参数, 若紊动能的值越大, 则能量传递越快, 闸室内的流态也就越差。图 4 为输水系统采用简单消能工布置形式时, 不同时刻闸室紊动能沿程分布情况, 可见, 11.5 m 长消能段不能充分消杀水流能量。当阀门按 $t_v=2$ min 开启时,

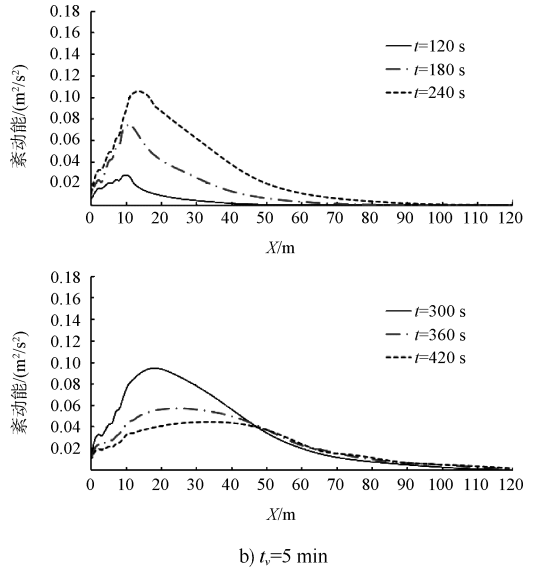


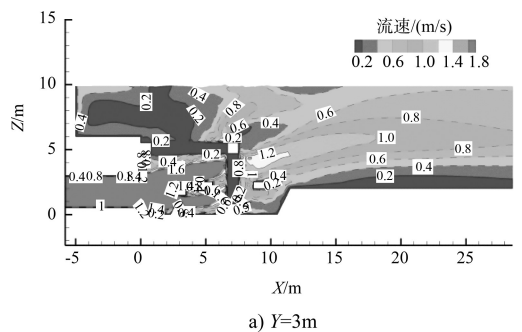
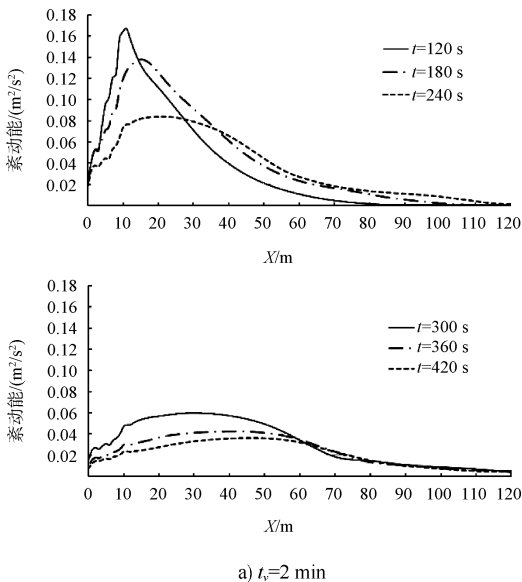
图 4 闸室紊动能沿程分布

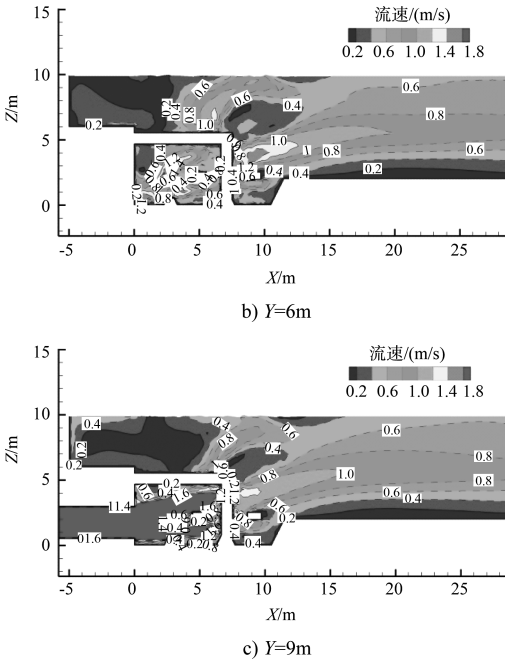
$X>70.0$ m 后, 闸室断面的平均紊动能才小于 $0.02 \text{ m}^2/\text{s}^2$; 当阀门按 $t_v=5$ min 开启时, 消能效果有所提高, 但仍需要 $X>50.0$ m 后, 紊动能才小于 $0.02 \text{ m}^2/\text{s}^2$ 。因此, 采用了简单的消能工, 闸室内水流紊动较为强烈。阀门开启时间 $t_v=5$ min 工况下, 按平均紊动能小于 $0.02 \text{ m}^2/\text{s}^2$ 控制, 镇静段长度要达到 38.5 m, 才能满足要求, 与根据规范计算的需要镇静段长度 20~50 m 基本一致。

2.2 格栅式消能工输水系统流态分布

2.2.1 闸室纵断面流速分布

根据模型试验结果, 设置了格栅式消能工的集中输水系统, 阀门开始时间 $t_v=5$ min 时, 闸室充水最大流量发生在输水时间 $t=240$ s, 此时闸室 $Y=3$ m、 $Y=6$ m 和 $Y=9$ m 纵断面流速分布见图 5。从图 5 可以看出, 水流流经消能段后, 流速下降非常明显, 流态分布均匀, 只需设置较短的镇静段, 即可满足要求。



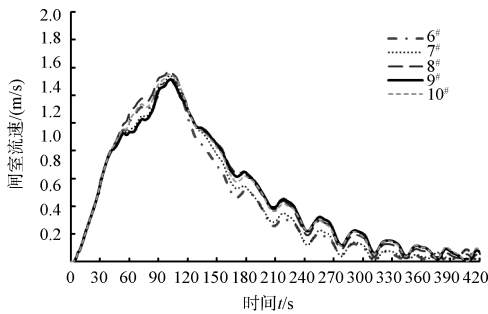


注: $t_v = 5 \text{ min}$, $t = 240 \text{ s}$ 。

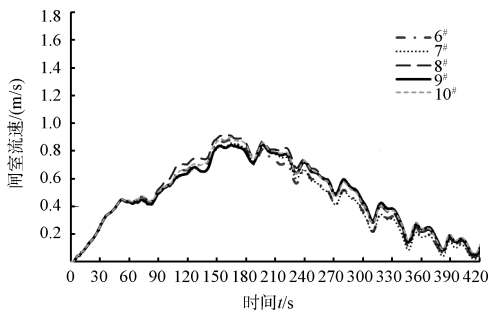
图5 闸室纵断面流速分布

2.2.2 闸室横断面流速分布

图6为船闸输水系统增设格栅消能室后, $X = 30 \text{ m}$ 横断面处的流速变化过程线。由图6可知, 当阀门开启时间 $t_v = 2 \text{ min}$ 时, 充水过程断面上 $6^\# \sim 10^\#$ 观测点最大流速差均小于 0.15 m/s 。阀门开启时间 $t_v = 5 \text{ min}$ 时, 充水过程闸室 $X = 30 \text{ m}$ 横



a) 双边开启 $t_v = 2 \text{ min}$, $X = 30.0 \text{ m}$



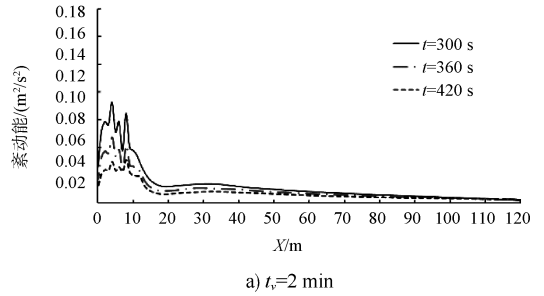
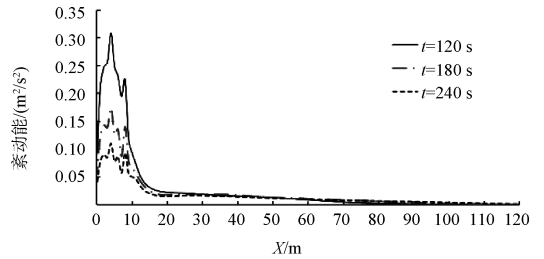
b) 双边开启 $t_v = 5 \text{ min}$, $X = 30.0 \text{ m}$

图6 闸室横断面流速变化过程线

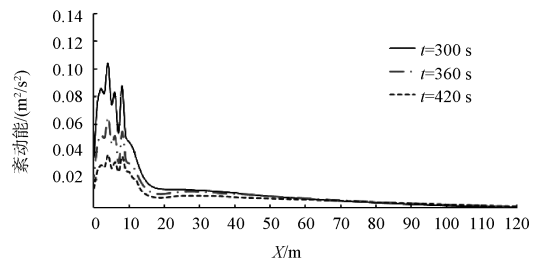
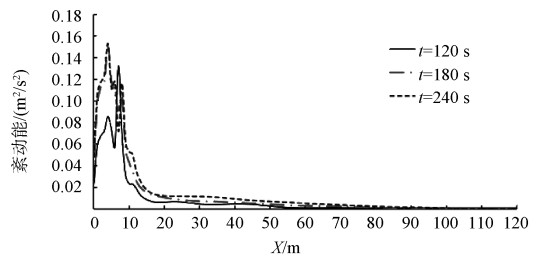
断面最大流速差也仅为 0.1 m/s , 因此设置格栅消能室后, 闸室横断面流速分布较为均匀, 闸室流态改善效果明显, 所需镇静段长度较短。

2.2.3 闸室紊动能沿程分布情况

图7为输水系统设置格栅消能室后不同时刻闸室紊动能沿程分布情况, 可见该布置形式下, 消能段(长 7.5 m) 的消能效果显著提高, 紊动能主要集中在格栅室内部。阀门开启时间 $t_v = 2 \text{ min}$ 时, $X > 15.0 \sim 30.0 \text{ m}$ 后, 闸室断面的平均紊动能便已小于 $0.02 \text{ m}^2/\text{s}^2$; 阀门开启时间 $t_v = 5 \text{ min}$ 时, $X > 15.0 \text{ m}$ 后, 紊动能就小于 $0.02 \text{ m}^2/\text{s}^2$ 。因此, 按平均紊动能小于 $0.02 \text{ m}^2/\text{s}^2$ 控制, 阀门开启时间 $t_v = 5 \text{ min}$ 时, 镇静段所需长度为 7.5 m , 与根据规范计算的所需镇静段长度 $7 \sim 21 \text{ m}$ 基本一致。



a) $t_v = 2 \text{ min}$



b) $t_v = 5 \text{ min}$

图7 闸室紊动能沿程分布

3 结论

1) 集中输水系统采用格栅消能室的布置形式是合适的, 该布置形式下闸室流速分布较均匀, 闸室内流态改善效果明显;

2) 分析了集中输水系统镇静段长度的选择方法, 提出以闸室沿程紊动能小于 $0.02 \text{ m}^2/\text{s}^2$ 作为确定集中输水镇静段长度的量化指标, 以此确定的两类集中输水系统镇静段长度均在规范推荐的取值范围内, 可用于类似船闸量化确定集中输水系统镇静段长度。

参考文献:

- [1] JTJ 306—2001 船闸输水系统设计规范[S].
 [2] 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(1): 100-103.

- [3] 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(4): 91-93.
 [4] 张利鹏. 高水头船闸水流三维数值模拟研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2008.
 [5] Hammack E A, Stockstill R L. 3d numerical modeling of john day lock tainter valves[C]//ASCE. USA: World Environmental and Water Resources Congress, 2009: 2 727-2 736.
 [6] Stockstill R L, Berger R L. A three-dimensional numerical model for flow in a lock filling system [C]//ASCE. USA: World Environmental and Water Resources Congress, 2009: 2 737-2 746.

(本文编辑 武亚庆)

(上接第 63 页)

4 结语

对于水头大于 30.0 m、闸首口门宽度为 12.0 m 的西部高水头船闸, 工作闸门采用一字闸门具有显著优势^[6]。由于目前国内外对于船闸大型一字闸门的研究几乎为空白, 而大淹没水深下一字闸门启闭运行过程产生的动水阻力矩占总阻力矩的主要部分, 为了探究淹没水深对船闸一字闸门运行动水阻力矩的影响, 本文通过物理模型试验开展了一系列基础研究, 得到以下结论:

1) 在分析大型一字闸门启闭运行动水阻力矩特性的基础上, 研究得到了动水阻力矩峰值与淹没水深、角速度和角加速度的关系式(匀速 $M = k_y \omega + b_y$, 变速 $M = k_d \varepsilon + b_d$), 可据此估算动水阻力矩峰值, 设计启闭机能力。

2) 根据动水阻力矩峰值对角加速度的敏感性随淹没水深增大而增大的变化规律, 提出了高水头大型一字闸门大淹没水深下采用无级变速运行

的科学启闭方式, 以降低动水阻力矩峰值, 减小启闭机设计难度。

参考文献:

- [1] JTJ/T 235—2003 通航建筑物水力学模拟技术规程[S].
 [2] SL 161.2—2013 船闸水力模拟技术规程[S].
 [3] 德乌斯 N M. 通航船闸[M]. 陈士荫, 金煜, 译. 大连: 大连工学院出版社, 1988.
 [4] 徐新敏. 三峡船闸人字闸门运行阻力矩试验研究报告(直联式启闭机方案)[R]. 南京: 南京水利科学研究院, 1992.
 [5] 李云, 徐新敏, 魏文炜. 三峡临时船闸人字门运行方式原型观测研究[R]. 南京: 南京水利科学研究院, 2001.
 [6] 李云, 刘本芹, 陈琼. 山区通航枢纽大型船闸新型闸门动力特性研究报告[R]. 南京: 南京水利科学研究院, 2016.

(本文编辑 武亚庆)