

帷墙格栅消能室在瓯江外雄船闸中的应用

黄岳¹, 朱理伟², 赖东亮¹

(1. 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; 2. 浙江丽水市港航管理局, 浙江丽水 323000)

摘要: 根据瓯江内河航道规划, 已建的外雄船闸过闸船舶由 300 t 提升到 500 t。提出采用设置帷墙格栅消能室对船闸进行改造, 在不改变船闸主体结构的前提下满足 500 t 船舶停泊安全和闸室有效长度不足的问题, 在此基础上开展了 1:20 的船闸输水系统物理模型试验。研究表明: 在船闸短廊道输水系统中设置帷墙格栅消能室的形式, 不仅能缩短镇静段长度, 而且能显著改善闸室内流态, 使输水时间、船舶停泊条件均满足设计和规范要求, 是一种适用于集中输水系统的消能工布置形式。

关键词: 船闸; 输水系统; 物理模型; 帷墙格栅消能室

中图分类号: U 641

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2016)12-0064-07

Application of grid stilling chamber for Waixiong ship lock on Oujiang river

HUANG Yue¹, ZHU Li-wei², LAI Dong-liang¹

(1. 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;
2. Zhejiang Lishui Port and Ship Administration Bureau, Lishui 323000, China)

Abstract: According to the waterway planning of Oujiang river, the capability of Waixiong ship lock is to be 500 t ships from the original 300 t ones. It is proposed to set a grid stilling chamber in the filling and emptying system to make the effective length and mooring condition of a 500 t ship meet the requirements in Waixiong ship lock, and a 1:20 overall physical model experiment is carried out. The result proves that the grid stilling chamber can not only shorten the length of mitigative section in the ship lock, but also play a very good role in improving the flow regime in ship lock, which makes the filling time and mooring condition of the ship meet the design requirements and norms. The layout of grid stilling chamber is adaptable to the centralized water conveyance system.

Keywords: ship lock; filling and emptying system; physical model; grid stilling chamber

外雄枢纽工程位于丽水市青田县境内, 处于瓯江干流丽水段。枢纽主要建筑物从左至右依次为左岸连接坝、船闸、泄洪闸、河床式发电厂房、右岸连接坝等。船闸等级为 V 级, 闸室水域面积 160 m×12 m(长×宽), 设计最大水头 10.5 m, 输水系统采用短廊道集中输水方式, 闸室采用消力槛+消力池的简单消能工形式, 布置形式见图 1,

闸门处廊道断面尺寸为 2.0 m×2.0 m。根据瓯江中下游内河航道规划, 外雄船闸过闸船舶由 300 t 提升到 500 t, 船闸有效长度及输水系统形式难以满足 500 t 船舶安全停泊要求; 此外, 外雄充水阀门底高程 22.5 m 高于下游最高通航水位 18.0 m, 充水过程阀门后水流携带大量空气进入闸室, 闸室水流条件和船舶停泊条件较差, 为解决上述问

收稿日期: 2016-09-19

作者简介: 黄岳(1957—), 男, 高级工程师, 从事船闸输水系统、枢纽及鱼道水力学研究。

题, 提出“不破坏现有结构物基础, 不改变现有结构物受力状态”对外雄闸室消能工进行局部改造, 采用帷墙格栅消能室缩短闸室镇静段长度,

优化闸室流态及阀门充水进气问题, 保障 500 吨级船舶在闸室内的停泊安全。

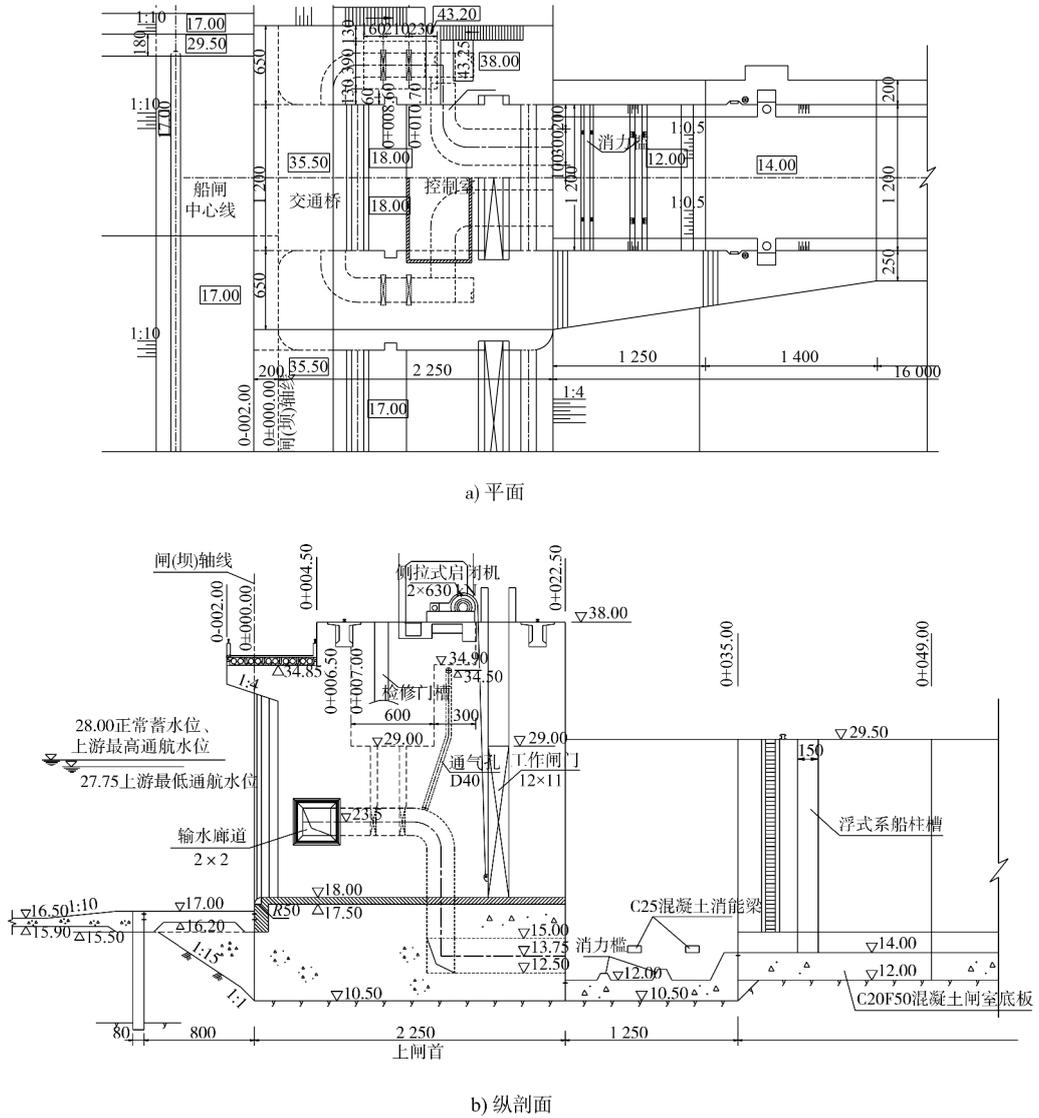


图 1 外雄船闸简单消能工布置 (单位: m)

1 输水系统方案布置

1.1 输水系统改造方案选择

根据 JTJ 306—2001《船闸输水系统设计规范》^[1], 原设计选择集中输水系统是合适的, 其中集中输水系统应在闸首及靠近闸首的闸室范围内

设置消能工, 消能工的类型可根据水头按表 1 进行选择。外雄船闸最小的设计水头也有 9.0 m, 须用复杂消能工, 而原设计充水仅采用简单消能工、泄水无消能工, 显然不能满足船闸输水的要求。

表 1 各类消能工的水力指标

部位	无消能工		简单消能工		复杂消能工	
	$\bar{v}_{\max} / (m/s)$	H/m	$\bar{v}_{\max} / (m/s)$	H/m	$\bar{v}_{\max} / (m/s)$	H/m
上闸首闸室	0.25~0.45	≤4	0.46~0.65	4~7	0.65~0.9	7~11
下闸首门后	≤0.8	≤4	0.8~1.9	4~8	1.9~2.3	8~11

此外，根据输水系统相关规范消能段后宜设镇静段，镇静段的长度可按下式进行计算：

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

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0.7~1.3；对简单消能工取0.3~0.7；对复杂消能工取0.1~0.3。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。

外雄船闸输水系统采用的简单消能工，需要设置20~50 m长的镇静段。外雄船闸过闸船舶由300 t提升到500 t后，在闸室尺度已定的条件下，只能缩短增加镇静段长度，闸室有效长度才能满足500 t过闸要求，所以需要闸室消能工进行改造，以缩短镇静段长度，增加闸室有效长度。

我国水力指标较高的集中输水系统船闸常用的复杂消能措施有3种布置方案，即封闭式帷墙消能室^[2]、帷墙格栅消能室^[3]及帷墙倒口消能^[4]。

封闭式帷墙消能室由于水流集中在正面孔口、顶部不出流，在闸室水面上升后底流将大于面流，甚至形成较大的横轴漩滚，因此采用这种消能室的船闸镇静段长度较长。此外，该消能室在阀门单边开启时也较难得到满意的流态。

格栅帷墙消能室可以充分利用消能室顶部及正面的格栅面积便于调整的优点，可以得到较好的竖向流速分布，且布置梁、槛及立柱调整余地较大，对于其顶部出流水面波动较大的缺点，可以利用高帷墙的空间，在顶部设遮板而加以改善，可以将镇静段长度控制在7~8 m。

而帷墙倒口消能由于其出口在消能室的下方，要求下挖一定深度，需增加相应的工程量，对于已建船闸显然也不可能改变原结构进行下挖。

综合以上3类复杂消能工特点，选择采用格栅消能室布置方案对外雄船闸输水进行改造。

1.2 帷墙格栅消能室布置

集中输水系统格栅消能室布置主要有2个方面：一是格栅消能室的体积，二是格栅消能室格栅分布密度。前者可应用JTJ 306—2001《船闸输水系统设计规范》相关计算公式进行估算，而后者只能根据已有经验进行初步布置后进行水力学模

型试验调整确定。

根据《船闸输水系统设计规范》，输水系统消能室的大小可按下列公式进行计算：

$$V = A_0 E_{\max} = A_0 \frac{9.3CH^2}{T\sqrt{k_v(2-k_v)}} \quad (2)$$

式中： A_0 为系数， $A_0 = 0.09 \sim 0.13$ ； C 和 H 分别为船闸水域面积和设计水头； T 为输水时间；系数 $k_v = t_v/T$ ，其中 t_v 为阀门开启时间。

上述参数中，考虑船闸过船主要为单船，系数 A_0 取较小值0.09；而阀门开启时间 t_v 按满足初始要求、波浪力要求、输水时间要求，同时考虑帷墙格栅消能室尽量少占据闸室空间，取 $t_v = 4 \text{ min}$ 。

将相关参数代入式(2)，可得到船闸帷墙格栅消能室体积分别为 379 m^3 ，按 385 m^3 进行设计和布置。根据已有的工程布置，帷墙高度为6.0 m，按5.5 m考虑，消能室可利用高度为4.7 m(帷墙顶格栅结构厚度0.8 m)，因此消能室需要的长度为6.7 m。

帷墙格栅消能室空间尺度确定后，根据已有工程经验结合水力学物理模型试验，确定外雄布置格栅分布^[5]，外雄船闸最终采用的格栅消能室布置见图2。

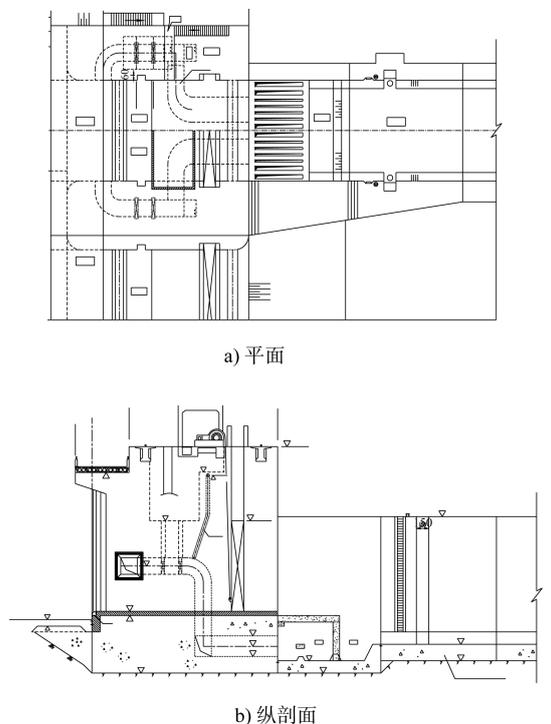


图2 外雄船闸帷墙格栅消能工布置

2 物理模型设计^[5]

按重力相似准则设计, 比尺为 1:20, 模型与原型各物理量换算关系如下, 重力及力比尺为 $(L_r)^3 = 8\ 000$, 流速及时间比尺为 $(L_r)^{1/2} = 4.472$, 流量比尺为 $(L_r)^{5/2} = 1\ 788.85$ 。

水工模型的范围包括原体上游引航道、船闸闸室、输水系统(包括进水口、上闸首, 闸室、下闸首泄水出水段)以及部分下游引航道。闸室边墙用钢板制作, 为了便于观察, 输水廊道及输水阀门段用有机玻璃制造。

对外雄船闸在设计最大水头 10.5 m 条件下, 简单消能工和帷墙格栅式消能工的水力特性和闸室停泊条件进行了试验研究和分析。

3 简单消能工集中输水系统

3.1 输水水力特性

设计最大水头 10.5 m 条件下, 设置简单消能工后, 闸室充水输水时间与阀门开启时间的关系见图 3, 最大输水流量与阀门开启时间关系见图 4。

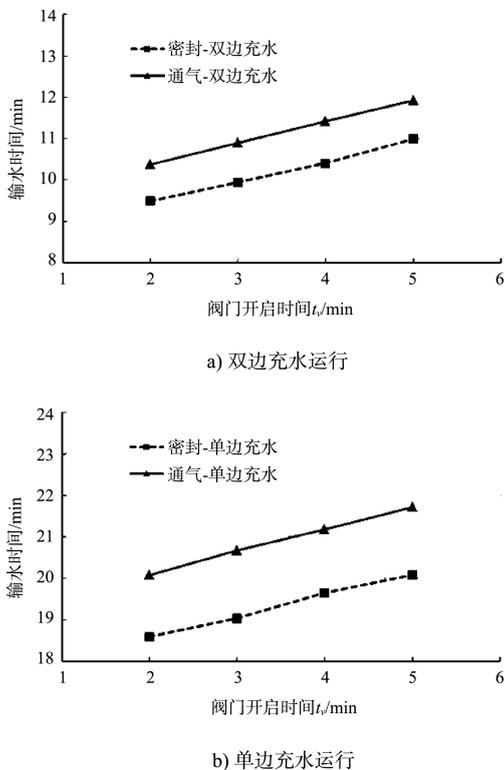


图 3 闸室充水输水时间与阀门开启时间关系

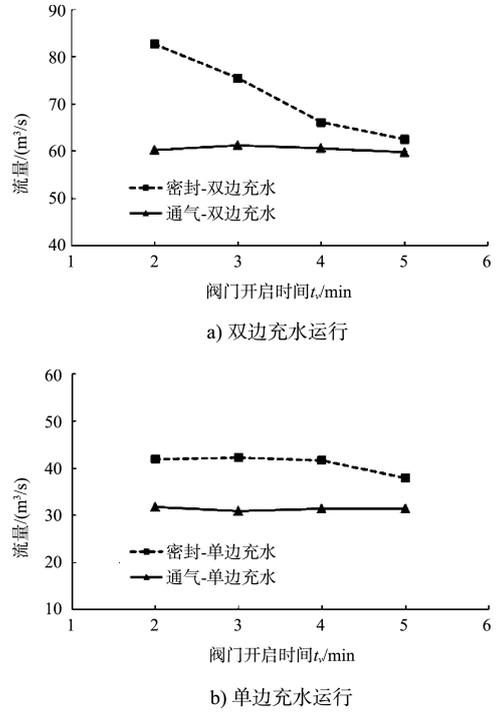


图 4 闸室充水最大流量与阀门开启时间关系

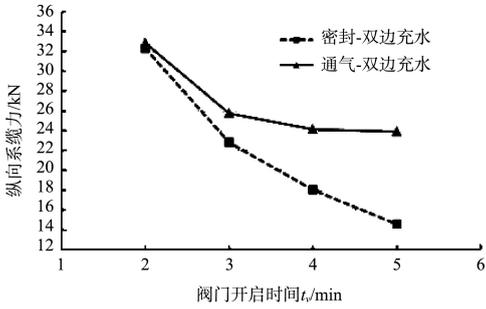
1) 充水阀门后通气管密封情况下, 阀门双边开启时间 $t_v = 4 \sim 5$ min, 可满足充水时间控制在 10~12 min 以内的设计要求, 充水最大流量在 82.8~62.5 m³/s, 闸室断面最大平均流速仍达到了 0.89~0.79 m/s, 较难满足船舶安全停泊要求。

2) 充水阀门后通气管不密封情况下, 充水过程气体持续从通气管进入充水廊道, 阀门后廊道在阀门淹没前一直处于明满交替流动状态。由图 3、4 可见: ①阀门双边开启时间 $t_v = 2 \sim 5$ min, 可满足充水时间控制在 10~12 min 以内的设计要求; ②阀门开启时间 $t_v = 2 \sim 5$ min, 双边开启输水流量最大值在 60 m³/s 左右, 单边在 31 m³/s 左右, 但双边开启时间 $t_v = 5$ min, 闸室断面最大平均流速仍达到了 0.71 m/s, 难以满足船舶安全停泊要求。

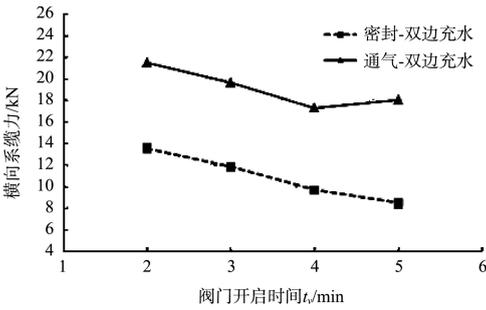
3.2 闸室停泊条件

输水系统设置简单消能工后, 不同阀门开启方式下, 各种运行条件下最大系缆力与阀门开启时间关系见图 5、6。

充水阀门后通气管密封运行时, 船闸单边或双边运行, 船闸充水阀门开启时间 $t_v \geq 4$ min 时, 闸室内 500 t 单船的系缆力基本满足规范允许值, 但横向系缆力依然偏大, 需要进一步优化。

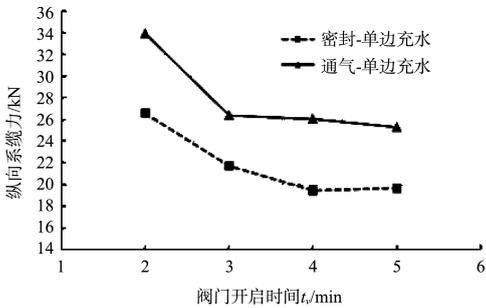


a) 纵向系缆力

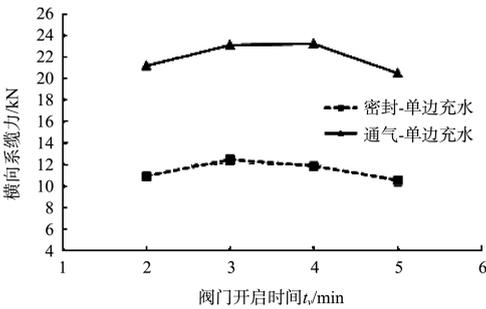


b) 横向系缆力

图5 双边开启阀门密封与通气闸室内500 t船舶最大系缆力对比



a) 纵向系缆力



b) 横向系缆力

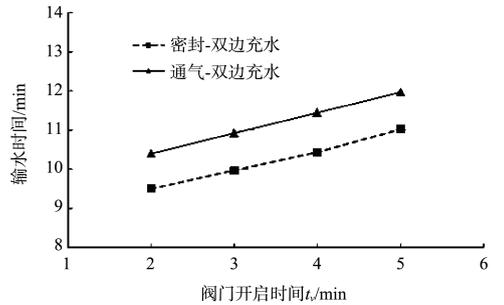
图6 单边开启阀门密封与通气闸室内500 t船舶最大系缆力对比

充水阀门通气管通气运行时，充水过程气体持续从充水廊道进入闸室，闸室内船舶停泊条件较差。阀门双边开启时间为 $t_v = 5 \text{ min}$ 时，500 t 船舶纵向系缆力为 23.9 kN，基本满足规范允许值，但富裕量不大。其他运行工况下，500 t 船舶系缆力均超过了规范允许值，需要在闸室内设置复杂消能工，才能满足船舶安全停泊要求。

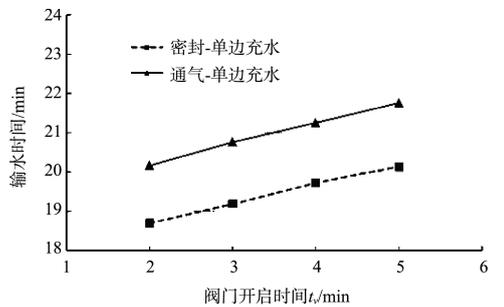
4 格栅式消能工集中输水系统

4.1 输水水力特性

船闸在设计最大水头 10.5 m 条件下，增设帷墙格栅消能室后，闸室输水时间与阀门开启时间的关系见图 7，最大输水流量与阀门开启时间关系见图 8。

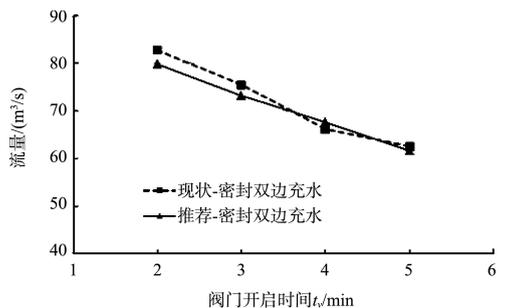


a) 双边充水运行



b) 单边充水运行

图7 闸室充水输水时间与阀门开启速度关系



a) 密封双边充水运行

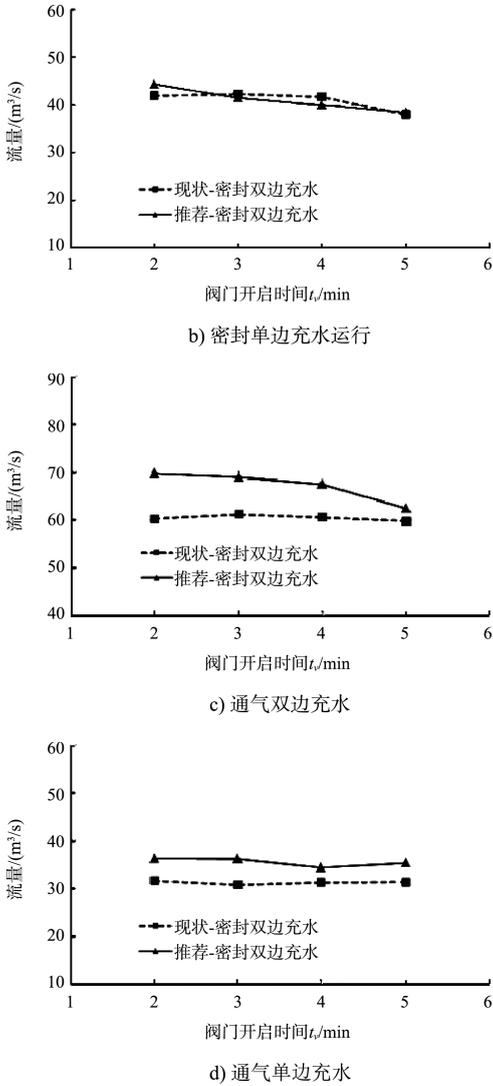


图 8 闸室输水流量与阀门开启速度关系对比

由图 7 和图 8 可见, 船闸增设帷墙格栅消能室后, 在设计最大水头 10.5 m, 充水阀门通气管密封条件下:

1) 充水阀门双边匀速开启时间 t_v 为 2~5 min 时, 相应的船闸充水时间为 9.51~11.03 min, 充水最大流量在 79.8~61.7 m³/s, 闸室断面最大平均流速在 1.22~0.81 m/s。

2) 充水阀门单边匀速开启时间 t_v 为 2~5 min 时, 相应的船闸充水时间为 18.7~20.14 min, 充水最大流量在 44.3~38.4 m³/s, 闸室断面最大平均流速在 0.82~0.56 m/s。

其他条件不变, 充水阀门改为通气管通气运行, 由图 7 和图 8 可见:

1) 充水阀门双边匀速开启时间 t_v 为 2~5 min

时, 相应的船闸充水时间为 10.41~11.97 min, 充水最大流量在 69.9~62.5 m³/s, 闸室断面最大平均流速在 1.02~0.66 m/s。

2) 充水阀门单边匀速开启时间 t_v 为 2~5 min 时, 相应的船闸充水时间为 20.16~21.76 min, 充水最大流量在 36.5~35.6 m³/s, 闸室断面最大平均流速在 0.64~0.51 m/s。

因此, 增设的帷墙格栅消能室对船闸输水时间和输水流量等水流特征影响不大, 阀门双边开启时间只要小于 5 min, 可满足充水时间控制在 10~12 min 以内的设计要求。

4.2 闸室停泊条件

船闸充水系统增设帷墙格栅消能室前后, 各种运行条件下闸室内船舶最大系缆力与阀门开启时间关系见图 9~11。

根据模型试验, 由图 9~11 可见:

1) 充水阀门后通气管密封不进气, 充水阀门单、双边运行, 阀门开启时间 t_v 只要大于等于 3 min, 500 t 船舶纵、横向系缆力均满足规范要求。阀门双边运行 $t_v = 5$ min, 船舶最大纵、横向系缆力分别为 13.5 和 5.0 kN; 阀门单边运行 $t_v = 5$ min, 船舶最大纵、横向系缆力分别为 11.1 和 7.1 kN, 均满足规范允许值, 且有一定富裕。

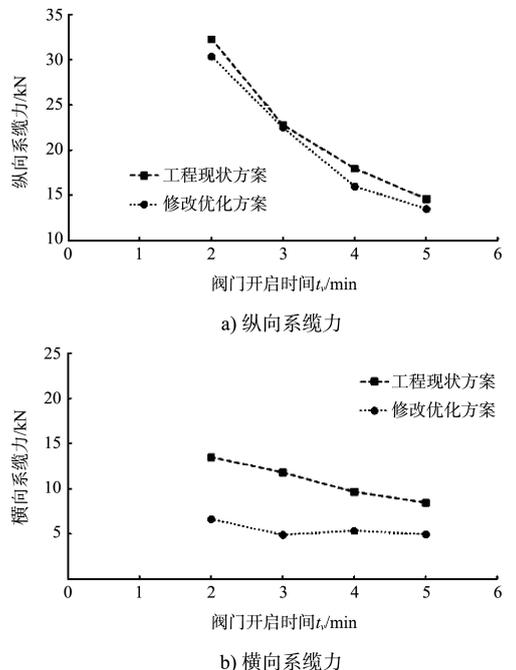


图 9 阀门双边开启船舶最大系缆力与阀门启闭关系 (密封不通气, $H = 10.5$ m)

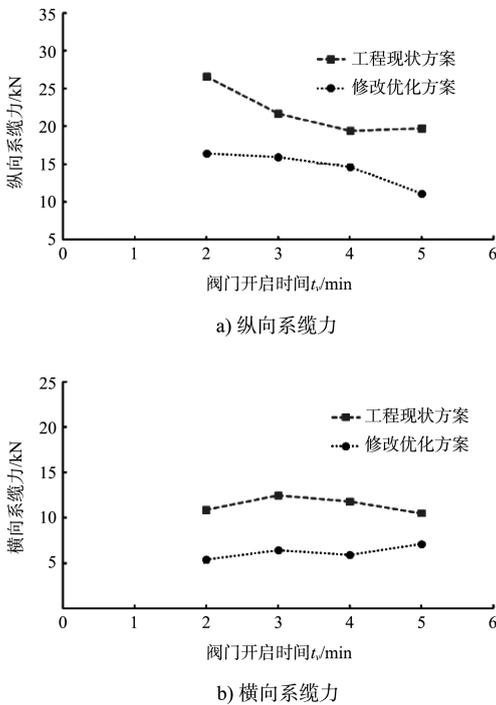


图 10 阀门单边开启船舶最大系缆力与阀门启闭关系 (密封不通气, $H=10.5\text{ m}$)

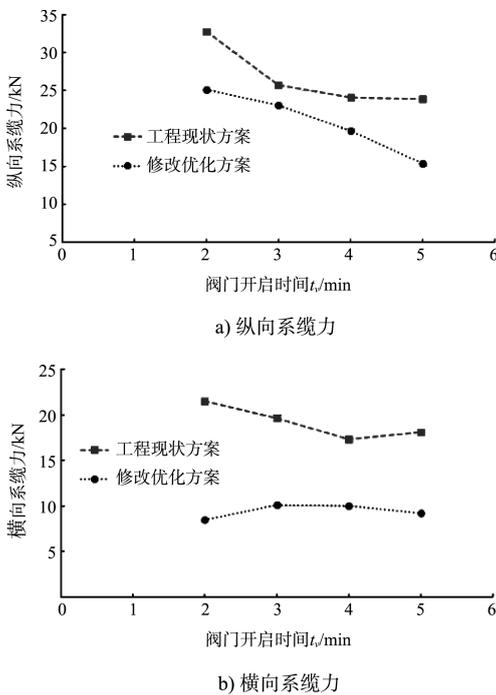


图 11 阀门双边开启船舶最大系缆力与阀门启闭关系 (通气, $H=10.5\text{ m}$)

船舶纵、横向系缆力也均满足规范要求。阀门双边运行 $t_v=5\text{ min}$, 船舶最大纵、横向系缆力分别为 15.4 和 9.2 kN; 阀门单边运行 $t_v=5\text{ min}$, 船舶最大纵、横向系缆力分别为 10.9 和 10.4 kN, 均满足规范允许值。

综上所述, 船闸设置帷墙格栅消能室对改善闸室内流态, 降低船舶系缆力方面效果显著, 只要阀门开启时间 t_v 大于等 3 min, 闸室内 500 t 船舶系缆力均满足规范要求。

5 结语

1) 由于瓯江中下游内河航道规划, 外雄船闸过闸船舶由 300 t 提升到 500 t, 船闸有效尺度及输水系统形式难以满足 500 t 船舶安全停泊要求, 因此提出在船闸内设置帷墙格栅消能室的优化方案。

2) 经比尺为 1:20 的整体模型试验研究得知: 船闸短廊道输水系统中设置帷墙格栅消能室, 不仅缩短了镇静段长度, 使船闸有效尺度满足停泊要求, 而且有效改善了闸室内流态和船舶停泊条件, 只要阀门开启时间大于 3 min, 闸室内 500 t 船舶系缆力均满足规范要求, 可应用于类似船闸集中输水系统的改扩建, 提高船闸通过能力。

参考文献:

- [1] JTJ 306—2001 船闸输水系统设计规范[S].
- [2] 刘本芹, 徐新敏, 宣国祥. 瓯江三溪口船闸输水系统布置及水力学模型试验[J]. 水运工程, 2013(8): 115-120.
- [3] 陈明, 宣国祥, 陈明栋. 船闸输水系统水动力学研究综述[J]. 重庆交通大学学报: 自然科学版, 2013(1): 157-160.
- [4] 连恒铎. 倒口出流消能技术在船闸集中输水系统设计中的应用[J]. 水运工程, 1996(4): 15-18.
- [5] 李中华, 黄岳. 瓯江开潭潭、五里亭、外雄船闸输水系统物理模型试验研究[R]. 南京: 南京水利科学研究所, 2016.

(本文编辑 郭雪珍)

2) 充水阀门后通气管不密封通气, 充水阀门单、双边运行, 阀门开启时间 $t_v \geq 3\text{ min}$, 500 t