



大型三角闸门门缝输水运用条件试验研究^{*}

汪 昕¹, 王 新², 孙立武¹, 曹晓军¹

(1. 安徽省港航建设投资集团有限公司, 安徽 合肥 230092; 2. 南京水利科学研究院, 江苏 南京 210029)

摘要: 裕溪一线船闸扩容改造工程首次将三角闸门的应用口门宽度提高至 34 m。为提高船闸的运行效率、充分发挥三角闸门动水启闭的优势, 开展了大型三角闸门门缝输水运用条件试验研究。以三角闸门的水动力特性和船舶停泊安全为依据, 研究提出裕溪新船闸大型三角闸门门缝输水的运用条件: 1) 三角闸门采用门缝输水应尽可能在 1 m 水头差以内开启; 2) 闸门开度应控制在 1 m 以内; 3) 随着水头差减小闸门开度可进一步增大。

关键词: 船闸; 三角闸门; 门缝输水; 模型试验

中图分类号: U 642

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2021)03-0012-05

Experimental study on the operation conditions of door water delivery of large sector gate

WANG Xin¹, WANG Xin², SUN Li-wu¹, CAO Xiao-jun¹

(1. Anhui Provincial Port & Shipping Construction Investment Group Co., Ltd., Hefei 230092, China;

2. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China)

Abstract: The expansion and reconstruction project of the Yuxi first-line ship lock increased the width of the sector gate to 34 m for the first time. To improve the operation efficiency of the ship lock and give full play to the advantages of the opening and closing of the dynamic water of the sector gate, an experimental study on the water conveyance condition of the large sector gate joint is carried out. Based on the hydrodynamic characteristics of the sector gate and the safety of ship berthing, the study puts forward the operating conditions of the large triangular gate of the Yuxi new ship lock. The conditions are as follows: 1) The water conveyance of the sector gate should be opened within 1 m head difference as far as possible. 2) The opening degree of the gate should be controlled within 1 m. 3) With the decrease of the head difference, the opening degree of the gate can be further increased.

Keywords: ship lock; sector gate; door water delivery; model test

三角闸门是船闸工作闸门的一种重要形式, 具有双向挡水和动水启闭的突出优势^[1], 在江淮沿岸的船闸中得到了广泛应用。在水头不大的情况下, 三角闸门可以动水开门进行门缝输水, 甚至开通闸运行^[2], 显著提高船闸的运行效率。也有多座采用三角闸门的船闸依靠门缝输水, 直接取消了输水阀门^[3]。三角闸门以其运行灵活的特点, 未来发展应用前景十分广阔。

目前, 三角闸门在船闸中的应用口门宽度最

大为 25 m, 在国家高等级航道网“十八线”之一的合裕线裕溪一线船闸扩容改造工程中, 将新建 290 m×34 m×5.6 m (闸室长×口门宽×槛上水深) 尺度的大型船闸, 工作闸门采用三角闸门, 首次将三角闸门的应用口门宽度提高至 34 m。面对较大的技术挑战, 在研究大型三角闸门结构布置、静动力优化设计等技术难题^[4-6]的同时, 从提高船闸的运行效率、充分发挥三角闸门的先天优势考虑, 开展大型三角闸门门缝输水运用条件研究也

收稿日期: 2020-06-10

^{*}基金项目: 国家重点研发计划项目 (2018YFB1600400); 国家自然科学基金面上项目 (51779151)

作者简介: 汪昕 (1963—), 男, 硕士, 高级经济师、高级工程师, 从事港航工程投资与建设管理工作。

具有重要的意义。本文通过裕溪新建大型船闸输水系统整体物理模型试验,以三角闸门的水动力特性和船舶停泊安全为依据,研究提出大型三角闸门门缝输水的运用条件,为工程运行管理提供参考。

1 工程概况

合裕线航道是合肥经济圈通往长江的唯一水上通道,是江淮运河的重要组成部分。裕溪一线船闸位于合裕线航道裕溪河入长江口,规模为 195 m×14.4 m×2.5 m,设计采用苏联三级标准,1969 年建成,至今已运行 50 余年,设备设施陈旧,运转件维修率高,船闸结构已不堪重负。随着江淮运河、合裕线航道整治工程的全线启动,以及腹地

经济的发展,合裕线航道作为主要入江通道,承担的货运量逐年增加,现有的裕溪复线船闸通过能力有限,已接近饱和,不能满足未来运量的增长需求。本次扩容改造工程将拆除裕溪一线老船闸,并按Ⅱ级通航建筑物改建,通航 2 000 吨级船舶,闸室尺度为 290 m×34 m×5.6 m。裕溪船闸承受双向水头,正向最大设计水头为 4.98 m,反向最大设计水头为 3.8 m,采用短廊道集中输水系统,见图 1。上、下闸首各设两扇三角闸门,闸门中心角为 70°,主弧半径 $R=18.1$ m,上闸首闸门高度为 14.92 m,下闸首闸门高度为 16.62 m。设计代表船型包括 2 000、1 500、1 000 t 货船和 100 TEU 集装箱船。

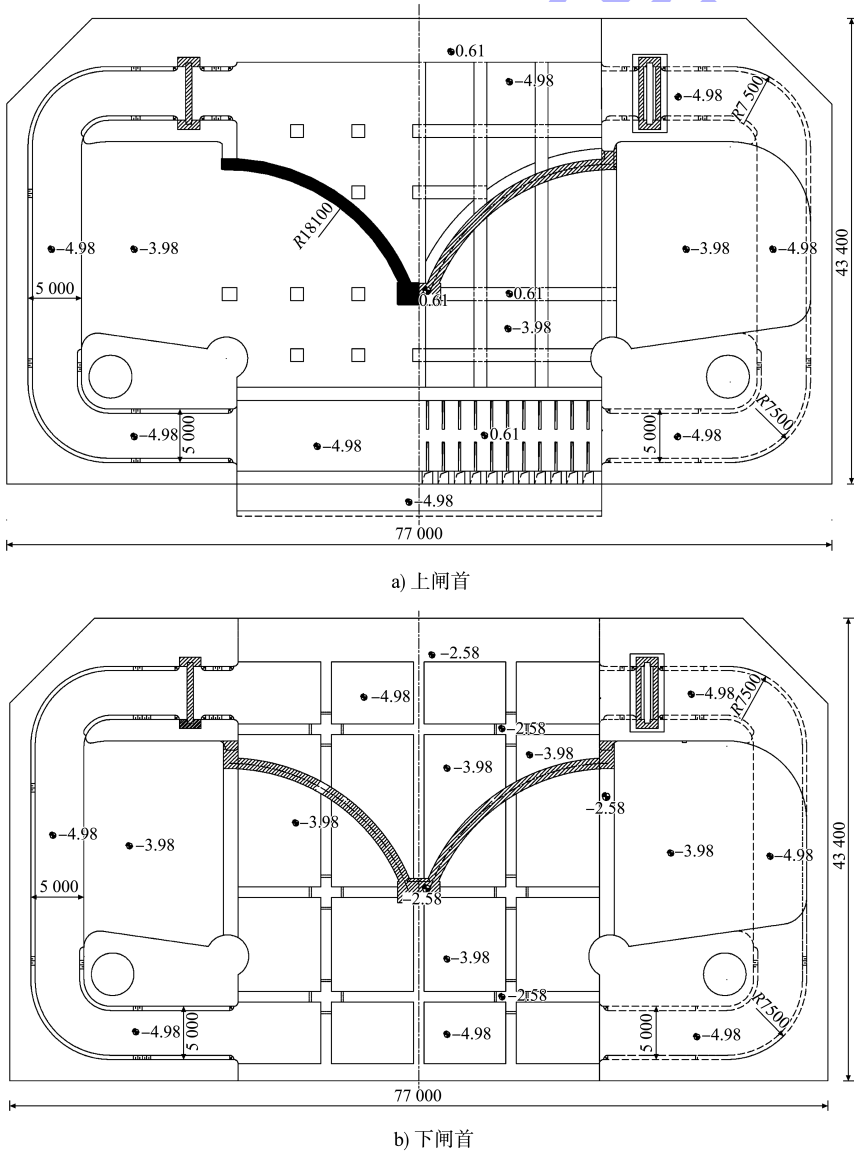


图 1 输水系统布置 (高程: m; 尺寸: mm)

2 门缝输水模型试验

2.1 模型设计

按重力相似准则，设计制作船闸输水系统 1:25 整体物理模型，开展廊道与门缝联合输水恒定流试验研究。为准确反映作用于闸门结构上的水动力荷载，模型按三角闸门结构设计图纸精确制作，三角闸门模型采用有机玻璃制作，左右共两扇，设置止水 and 闸门启闭约束结构，闸门模型见图 2。选择通航船舶中排水量最大的 2×2 000 t 船队和 1 000 t 单船制作船模，并排停泊于近闸首位置，开展联合输水工况下船舶停泊条件试验。见图 3。



图 2 三角闸门水力学模型

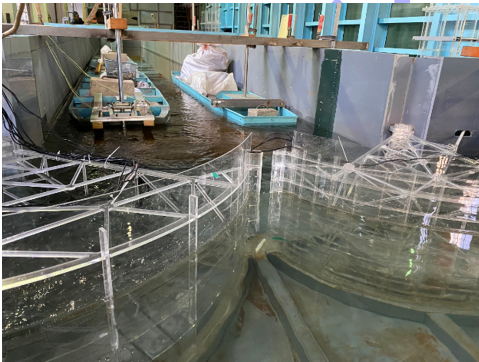


图 3 停泊条件试验

2.2 测试方法及测点布置

试验过程中对水位、开度、水压力、船舶系缆力等参数进行测控。上、下游水位采用溢流式平水槽控制，闸首输水阀门采用可无级调速的步进电机驱动启闭机控制，闸室充、泄水曲线采用水位计测定，三角闸门动水作用荷载采用微型脉动压力传感器测定，恒定流情况下的时均压力用测压管测定，船舶（队）纵向和横向系缆力用全

环电阻式测力仪测定。

三角闸门局部开启进行门缝输水，闸门两侧羊角位置的动水压力是关注的重点，因此，在一侧闸门的中羊角从下到上布置 3 个测点，编号 P1~P3，在边羊角附近从下到上也布置 3 个测点，编号 P4~P6，共 6 个测点，见图 4。

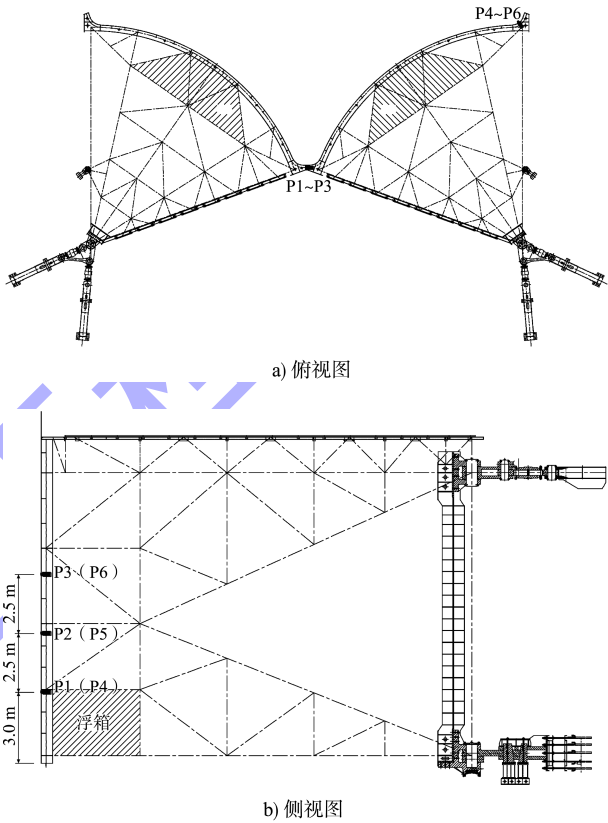


图 4 脉动压力测点布置

2.3 试验工况

以最常遇水位组合工况（上游 8 m、下游 4 m、水头 4 m）开展研究。正常情况下，在船闸输水后期才进行联合输水，因此，输水阀门按安全开考虑，三角闸门在不同水头差、并按不同开度开启参与输水，进行水动力学和停泊条件试验，试验工况见表 1，共 24 个工况。

表 1 联合输水试验工况

工况 编号	输水阀门 相对开度 n	上游 水位/m	闸室 水位/m	水头差/ m	闸门 开度/m
LM-1	1.0	8	7.75	0.25	0.2
LM-2	1.0	8	7.50	0.50	
LM-3	1.0	8	7.00	1.00	
LM-4	1.0	8	6.50	1.50	

续表1

工况 编号	输水阀门 相对开度 n	上游 水位/m	闸室 水位/m	水头差/ m	闸门 开度/m
LM-5	1.0	8	7.75	0.25	0.4
LM-6	1.0	8	7.50	0.50	
LM-7	1.0	8	7.00	1.00	
LM-8	1.0	8	6.50	1.50	
LM-9	1.0	8	7.75	0.25	0.6
LM-10	1.0	8	7.50	0.50	
LM-11	1.0	8	7.00	1.00	
LM-12	1.0	8	7.75	0.25	0.8
LM-13	1.0	8	7.50	0.50	
LM-14	1.0	8	7.00	1.00	
LM-15	1.0	8	7.75	0.25	1.0
LM-16	1.0	8	7.50	0.50	
LM-17	1.0	8	7.00	1.00	
LM-18	1.0	8	7.75	0.25	1.5
LM-19	1.0	8	7.50	0.50	
LM-20	1.0	8	7.00	1.00	
LM-21	1.0	8	7.75	0.25	2.0
LM-22	1.0	8	7.50	0.50	
LM-23	1.0	8	7.75	0.25	3.0
LM-24	1.0	8	7.50	0.50	

3 门缝输水闸门水动力特性

三角闸门门缝输水存在动水荷载与门体的相互作用，可能会引起闸门的剧烈振动。拟通过建立门体水动力荷载与运行方式的关系，给出门缝输水运用条件的建议。对 6 个测点在 24 个工况下的脉动压力数据进行时域统计，包括脉动压力均方根值、最大值和最小值。图 5 为闸门开度 0.2 m 时各测点脉动压力均方根随水头的变化关系，图 6 为 0.25 m 水头时各测点脉动压力均方根随闸门开度的变化关系。总体上看，各测点脉动压力普遍较小，最大脉动压力为 8.88 kPa，出现在 P3 测点；中羊角 P1~P3 测点脉动压力均方根相对略大，且沿门缝竖向向上逐渐增大；在闸门开度一定的情况下，脉动压力总体上随水头增大而增大；在水头一定的情况下，小开度时中羊角 P1~P3 测点脉动压力略大，后随闸门开度增大总体呈减小趋势，边羊角附近 P4~P6 测点脉动压力随闸门开度增大总体呈增大趋势。

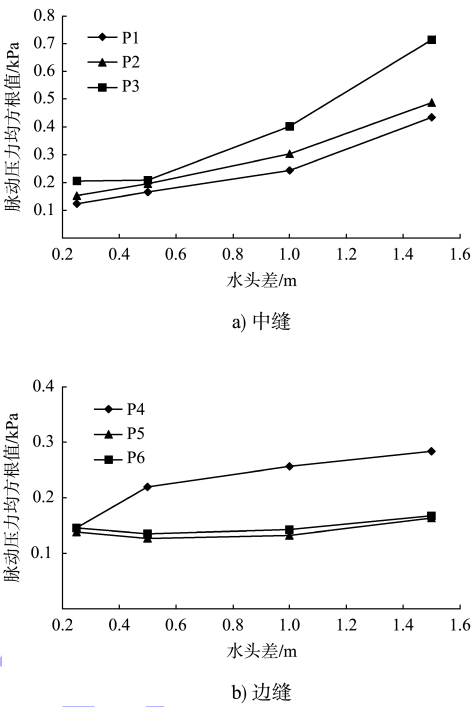


图 5 脉动压力与水头差关系

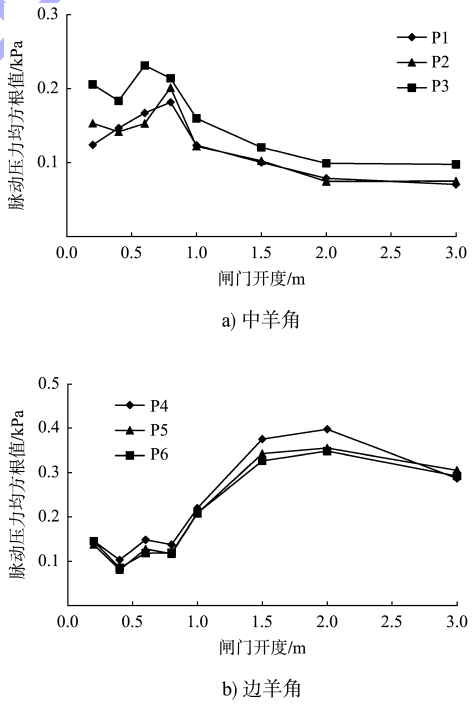


图 6 脉动压力与闸门开度关系

通过对各测点脉动压力作傅里叶变换，可以掌握脉动的能量分布特征，以工况 LM-16 为例，P3 和 P6 两个典型测点的脉动压力功率谱密度曲线见图 7，可以看出，水流脉动能量总体较弱，主要在 3 Hz 以内，主频在 1 Hz 内，而动力优化后三

角闸门的基频约 5 Hz，在本文拟定门缝输水工况下闸门发生剧烈振动的可能性不大。从脉动压力均方根的变化规律看，门缝输水运行的水头差宜控制在 1.00 m 内，闸门开度宜控制在 1.0 m 内。

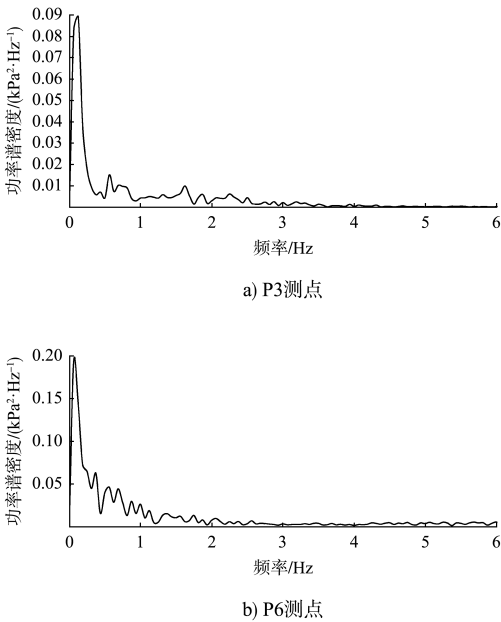


图 7 脉动压力功率谱密度曲线

4 门缝输水船舶停泊条件

当三角闸门采用门缝输水时，将有 3 部分水体分别从短廊道、门库、门缝流入闸室，尤其门缝水流直冲闸室，对闸室内船舶停泊安全产生影响。因此，当廊道与门缝联合输水时，还应考虑闸室内船舶的停泊条件能否满足规范要求，并据此提出安全合理的联合输水运行方式。

采用恒定流试验方法，测试不同闸门开度、水位组合工况下 2 000 吨级船舶的最大系缆力，阀门开度按全开考虑，水头差考虑 0.25、0.50、1.00 m 共 3 种，表 1 中 1.50 m 水头差的两个工况不作考虑，三角闸门开度考虑 0.2、0.4、0.6、0.8、1.0、1.5、2.0、3.0 m 多种工况，试验过程中开度由小逐渐增大。《船闸输水系统设计规范》规定 2 000 吨级船舶在闸室内停泊的容许纵向系缆力为 40 kN、横向系缆力为 20 kN。通过系列试验，获得了上述工况船舶最大纵向和横向系缆力，总体规律如下：船首和船尾横向系缆力基本一致，纵向系缆力大于横向系缆力；相同的闸门开度条件

下，随着水头的增大，船舶系缆力增大；相同的水头条件下，随着闸门开度的增大，系缆力总体呈增大的趋势。

船舶最大纵向系缆力和最大横向系缆力与闸门开度的关系见图 8，可以看出，在闸门开度 3.0 m 内，水头差不大于 0.50 m 时，船舶系缆力均满足要求，当水头差为 1.00 m 时，船舶的纵向和横向系缆力明显增大，且随着闸门开度的增大，系缆力增大趋势明显。在水头差 1.00 m 情况下，最大横向系缆力在闸门开度 1.0 m 时略超标，最大纵向系缆力在闸门开度 1.5 m 时略超标。以闸门开度 1.0 m 为例，最大纵向和横向系缆力随水头的变化见图 9，二者成二次多项式关系。

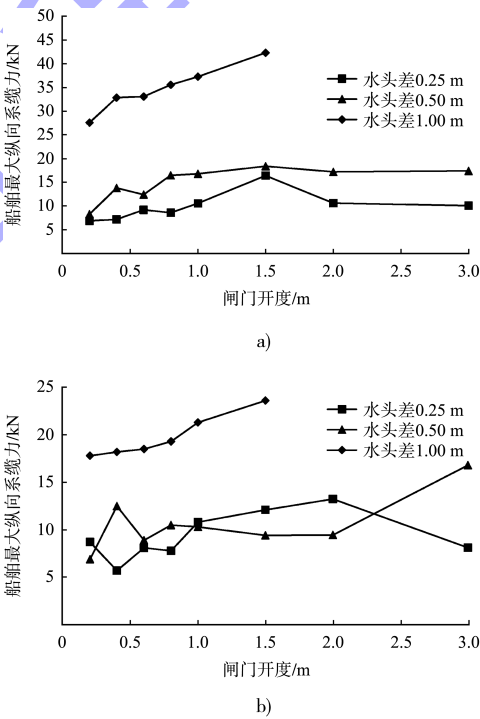


图 8 系缆力与闸门开度关系

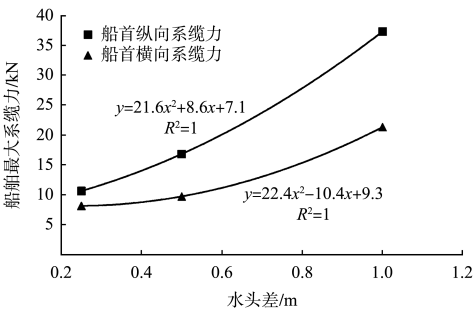


图 9 系缆力与水头差关系