



## 高水头船闸输水阀门无动力应急关阀试验研究\*

郑航, 邓月

(长江三峡通航管理局, 湖北宜昌 443002)

**摘要:** 高水头船闸应急关阀时, 输水阀门在自重作用下关阀速度缓慢, 可能造成多级船闸的超灌超泄或单级船闸的反向水头过高; 关阀速度过快, 在关阀终点附近仍保持较大速度, 可能导致底止水损坏, 甚至水工结构的损伤。针对高水头船闸输水阀门在无动力状态下应急关阀速度难以控制的问题, 分析 UPS 供电操作和完全无供电手动操作情况下应急关阀的可行性, 设计了无动力关闭输水阀门的应急系统, 并进行现场试验验证。该系统在船闸阀门液压系统中加装截止式电磁换向阀组, 连通阀门油缸的上下腔, 形成差动回路, 并采用 UPS 电源为阀组供电, 通过开启不同数量的电磁换向阀, 实现阀门自重下滑速度的调节, 解决了现有阀门液压系统在全闸断电的情况下无法进行快速关阀操作的问题。经过船闸现场原型试验证明, 该方案具有关阀可靠性高、速度可调等特点。

**关键词:** 高水头船闸; 输水阀门; 应急关阀; 无动力关阀

中图分类号: U641.7+2

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2026)05-0093-06

### Experimental study on unpowered emergency closing of water delivery valves in high-head ship locks

ZHENG Hang, DENG Yue

(Three Gorges Navigation Authority, Yichang 443002, China)

**Abstract:** Under the emergency valve closing condition of high-head ship locks, the water delivery valves close slowly under self-weight, which may result in over-filling or over-discharging in multi-stage ship locks or excessive reverse water head in single-stage ship locks. Excessively fast closing, with a high velocity maintained near the fully closed position, may damage the bottom water seal and even cause failure of the hydraulic structure. To address the difficulty in controlling the emergency closing speed of water delivery valves in high-head ship locks under unpowered conditions, this paper analyzes the feasibility of emergency closing under UPS-powered operation and fully unpowered manual operation, designs an emergency system for the unpowered closing of water delivery valves, and verifies its effectiveness through field tests. This system adds a set of poppet-type solenoid directional valves to the hydraulic system of the ship lock valve, connecting the rod and rodless chambers of the valve cylinder to form a differential circuit. A UPS power supply is used to power the valve group. By actuating different numbers of solenoid directional valves, the lowering speed of the valve under self-weight can be adjusted, solving the problem that the existing hydraulic system cannot realize rapid valve closing when the ship lock is completely powered off. Field prototype tests on the ship lock demonstrate that the proposed scheme features high closing reliability and adjustable closing speed.

**Keywords:** high-head ship lock; water delivery valve; emergency valve closing; unpowered valve closing

在国家政策支持下, 水运基础设施建设呈现加速推进态势。一批水运重大项目建设正在稳步

推进, 如大藤峡水利枢纽、平陆运河、三峡水运新通道等工程, 未来国内大型高水头船闸的建设

收稿日期: 2025-09-19 录用日期: 2025-11-19

\*基金项目: 交通运输行业重点科技项目(2021-MS1-039)

作者简介: 郑航(1991—), 男, 高级工程师, 从事船闸机械设备检修、改造及技术研究工作。

数量也将逐步增多<sup>[1-2]</sup>。针对大型高水头船闸输水阀门开展应急关闭的相关研究,是船闸安全运行保障中的关键环节。船闸作为水利枢纽工程的重要组成部分,对于保障河流通航具有重要意义,特别是国内航运繁忙的干流及主要支流上的大型高水头船闸,其输水阀门的正常运行不仅直接关系到船舶过闸安全,还深刻影响其社会效益和经济效益的充分发挥。

在实际运行过程中,船闸输水阀门可能会遇到各种紧急情况,如电气系统故障、液压系统故障、全闸断电等故障,故障发生时阀门处于无动力状态,需要应急关闭以防止水流失控或超灌,这对大型高水头船闸的安全管理构成了重大考验<sup>[3-4]</sup>。大型高水头船闸通常采用反向弧形门作为输水阀门,使用液压系统作为输水阀门的启、闭控制系统。反弧门为单吊点输水阀门,是典型的重力负载,在启闭过程中,由于受到水流压力及负载力矩变化等因素的影响,在运行过程中为变负载运行,运行中受动水阻力矩及推力影响,工况较复杂,因此在设计液压系统时要求能够在运行过程中根据负载特性对负载变化进行补偿,满足阀门运行的稳定性要求。阀门动水关闭过程中,阀门井水位快速上升,输水阀门支臂会受到水流上托力的作用,阀门底缘区在大开度时为相对高压区,而顶缘为相对低压区。随上下游水头差的减小,门井水位上升速度减缓,阀门底缘从相对高压区转为相对低压区,所以输水阀门的动水闭门力呈现先降、后升、再下降的变化规律,由于阀门关闭过程中的实际工作水头已较开门阶段降低,动水闭门力峰值一般不超过动水启门力峰值<sup>[5]</sup>。因此在理论研究中,输水阀门应急关闭时,只要阀门能够执行关门动作,即可关闭至最终位置。

对于高水头船闸尤其是多级高水头船闸,在事故状态实现输水阀门的快速关闭能够有效避免闸室超泄、漫水等危险现象,因此,研究一种不依赖外部动力的应急关闭方案显得尤为重要<sup>[6]</sup>。

一般反弧门液压系统除应急关闭功能以外,还设计有在事故状态下通过手动方式操作输水阀门的功能。部分大型船闸(如三峡船闸、葛洲坝船闸、大藤峡船闸等)采用手动球阀作为输水阀门事故状态下的应急操作元件,该球阀一般布置在输水阀门有杆腔和无杆腔之间。输水阀门正常工作时,球阀处于关闭状态;在事故状态时,能够手动打开,在输水阀门下腔电磁球阀得电或平衡阀打开时,连通阀门油缸有杆腔和无杆腔,有杆腔的液压油无需经过系统阀件流回油箱,而是直接进入油缸无杆腔,最终实现输水阀门的快速关闭。

本文针对高水头船闸输水阀门无动力应急关闭速度难控制的难题,首先分析UPS供电与完全无供电手动操作两种场景下应急关闭的可行性;进而设计无动力应急关闭系统,通过在阀门液压系统中加装截止式电磁换向阀组,连通油缸上下腔形成差动回路,依托UPS电源为阀组供电,通过调节电磁阀开启数量实现阀门自重下滑速度的调节;最终通过船闸现场原型试验验证方案有效性,旨在为高水头船闸输水阀门无动力应急关闭提供安全、可靠的技术方案,填补极端无动力场景下的操作空白。

## 1 问题的提出

大型单级或多级船闸输水过程中若发生异常情况,需将输水阀门应急关闭,常见的输水阀门控制系统故障有以下几个方面。

故障1:在执行关闭输水阀门动作的过程中,电控系统接触器发生故障,导致相关电磁阀的电磁铁未及时动作。因油路未接通,压力油无法进入输水阀门油缸无杆腔并通过安全阀溢流回油箱,系统无法执行关闭动作,因此输水阀门无法及时关闭,此时需对船闸输水阀门液压系统进行应急操作。

故障2:在输水阀门动作过程中,突然断电。大型船闸电气系统除回路供电外,还设置有备用电源,其仅能驱动电磁铁动作,无法驱动电动机

作,即失电时,输水阀门液压系统处于无动力状态,此时需进行应急操作,实现输水阀门的关闭。备用电源可提供应急操作时各电磁阀动作的电源,无法提供电机动作的电源,因此输水阀门在当前工况下仅能依靠油缸及阀门自重关闭。

故障3:应急操作过程中阀门关闭速度太慢。输水阀门在自重作用下关闭时,除了受到阀门及油缸向下的自重外,还受到输水阀门导轨的止水摩阻力、支撑摩阻力、上托力等,若关门速度太慢,输水阀门可能达到受力平衡状态,导致输水阀门关门较慢,甚至无法关闭,不能够满足应急操作的“应急”要求,可能造成多级船闸的超灌超泄或单级船闸的反向水头过高,进而损坏输水阀门的液压系统及其他机械设备。

故障4:应急操作过程中关闭速度过快。输水阀门在自重作用下关闭时,若止水摩阻力、支撑摩阻力等阻力较小,阀门可能快速关闭,在关终附近时仍保持有较大的速度,造成输水阀门关终时,阀门底止水受到较大冲击,可能导致底止水损坏,严重的还可能导致水工结构的损伤。

以某大型双线V级船闸为例,总设计水头为113 m,上下级之间最大水头为45.2 m。当上游水位处于156~165.75 m时,船闸采用五级补水运行方式,五级补水运行时一~三闸首输水示意图见图1<sup>[7]</sup>。

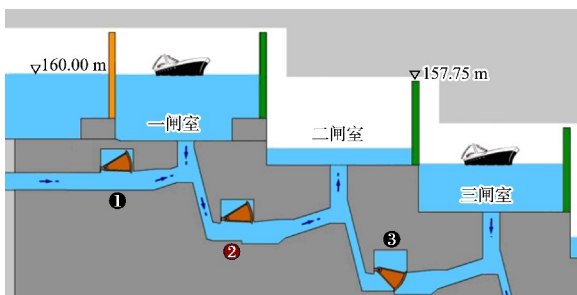


图1 五级补水时一~三闸首输水示意图

Fig. 1 Schematic diagram of water delivery for the 1st to 3rd lock heads during five-stage water replenishment

该双线五级船闸虽然是三回路供电,但也出现了多次运行中全闸断电的情况,在五级补水运行时,如图示状态,上游水位160 m、三闸首人字

门顶高程157.75 m,低于上游水位,一闸首阀门、二闸首阀门开启向二闸室充水,此时如果全闸断电,将导致二闸室严重超灌甚至三闸首闸门漫水,必须尽快完成二闸首阀门关闭,而现有系统在全闸断电的情况下无法进行快速关闭操作<sup>[8]</sup>。

## 2 高水头船闸无动力应急关闭试验研究

### 2.1 无动力关闭可行性分析

在长江干流上的高水头大型船闸开展无动力应急关闭相关试验研究。该船闸属于“两线三闸”,上、下游水位高差约27 m,2#船闸闸室有效尺度为280 m×34 m×5 m(有效长度×有效宽度×有效水深),3#船闸闸室有效尺度为120 m×18 m×3.5 m。2#船闸阀门启闭机液压系统原理见图2。

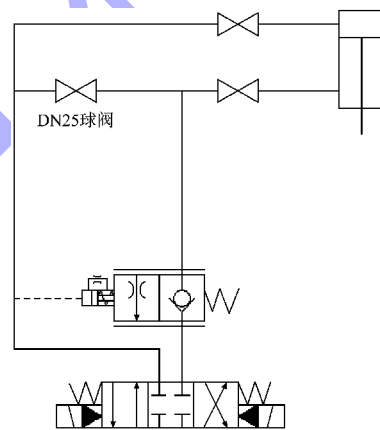


图2 阀门启闭机液压系统原理

Fig. 2 Schematic diagram of the hydraulic system for valve hoists

为了验证该船闸阀门依靠动水自重而下滑闭门的可行性,开展了船闸阀门运行过程的油缸受力状态检测<sup>[9]</sup>。对1#、2#船闸阀门运行过程中油缸上下腔压力进行检测,将压力传感器直接安装到阀门油缸的上下腔测压接头,连续记录上下腔压力数据,再计算出活塞杆受力<sup>[10]</sup>。其中1#船闸左上阀门运行过程中油缸受力情况见表1。通过检测记录发现,无论动水还是静水,阀门油缸活塞杆一直受到向下的拉力,有效关闭时长8~9 min,闭门速度0.01 m/s,拉力351~508 kN,说明阀门可以依靠自重而下滑关闭。

表 1 1#船闸左上阀门运行过程中油缸受力情况  
Tab. 1 Cylinder force during operation of the upper left valve of Lock No. 1

时刻	开度/ %	上腔压力/ MPa	下腔压力/ MPa	活塞杆 受力/kN	备注
16:23:17	100.91	1.83	5.50	449.86	
16:23:39	95.13	2.13	5.75	429.92	
16:23:59	90.02	2.07	5.92	465.85	
16:24:19	85.16	2.11	6.17	494.35	动水 关阀
16:24:39	80.07	2.09	6.23	508.65	
16:24:59	74.96	2.11	6.10	483.36	
16:25:19	70.15	2.11	6.14	488.86	
16:25:49	67.96	0.31	3.72	488.13	等待位
16:28:30	67.96	0.30	3.59	468.14	
16:29:49	67.75	5.36	10.13	439.92	
16:30:19	60.47	2.11	5.71	425.85	
16:30:49	53.16	2.17	5.70	414.48	
16:31:19	45.85	2.18	5.67	405.99	
16:31:49	38.78	2.20	5.63	396.95	水平后 关阀
16:32:19	31.49	2.21	5.56	385.80	
16:32:49	24.24	2.22	5.49	373.20	
16:33:19	16.96	2.20	5.41	365.14	
16:33:49	9.67	2.21	5.37	356.50	
16:34:19	2.38	2.19	5.31	351.05	
16:34:39	-1.11	0.29	0.82	63.90	关终

注：活塞杆受力=下腔压力×下腔面积-上腔压力×上腔面积。

## 2.2 无动力应急关阀系统设计

高水头船闸阀门启闭采用竖直油缸，通过吊杆链接启闭阀门，因此，可采用连通阀门油缸上下腔的方式来实现无动力应急关阀。应急关阀液压系统设计的原则是尽量采用原系统设备，对原系统改动小，且新系统可完全实现原系统的功能。因此，仅需对手动球阀部分进行选型及改造。

同手动换向阀相比，截止式电磁换向阀密封性能好，能够实现工作状态下的零泄漏。它通过电磁铁驱动阀芯压紧或离开阀座实现油路通断与换向。断电时，阀芯在弹簧力的作用下压紧阀座实现截止；通电后，电磁铁产生磁力推动阀芯位移，切换油路通断状态。截止式电磁换向阀因其密封性好，能够有效避免船闸液压系统因泄漏而造成的悬停不稳、阀门中间位无法持住的问题。

### 2.2.1 电磁阀组规格选型计算

额定压力计算：依据表 1，实测油缸最大工作压力为 10.13 MPa，取 1.5 倍安全系数，应选用阀

组额定压力应大于 15.2 MPa 的电磁阀，以满足压力冗余。大型船闸的输水阀门液压系统一般为中压系统，工作压力一般不大于 25 MPa。

额定流量计算：根据 2#船闸阀门启闭机油缸内径 500 mm，活塞杆直径 250 mm，以及 0.01 m/s 关阀速度要求，对单阀流量进行估算。基于流体力学公式：

$$v = \frac{Qn}{A} \quad (1)$$

其中：

$$A = \frac{\pi}{4}(D^2 - d^2) \quad (2)$$

式中： $v$  为关阀速度； $Q$  为单阀额定流量； $n$  为开启阀数量； $A$  为油缸有杆腔有效面积； $D$  为油缸内径； $d$  为活塞杆直径。

当  $n=1$ ，单阀所需流量  $Q=88.32$  L/min，基于速度可调性和冗余可靠性的双重需求，至少 3 台阀对应 3 档调速（慢速、中速、快速），同时考虑一定的冗余量，取  $n=4$ ，则  $Q=22.08$  L/min，故选用额定流量大于 22.08 L/min 的电磁阀即可。最终选型为 LSV6-08-2 NCSP，最大流量为 40 L/min。

当 1 台阀开启（慢速），适用于关终前 5%~10% 开度，避免底止水冲击；2 台阀开启（中速），适用于 50%~10% 开度，平衡关阀效率与稳定性；4 台阀开启（快速），适用于 50%~100% 开度，快速阻断水流，避免超灌超泄。以 3#船闸为例，油缸内径 400 mm，活塞杆直径 200 mm，油缸工作行程 3.264 m，理想情况下采用单阀最大流量 40 L/min 进行估算，得单阀开启时关阀速度为 0.007 m/s，双阀开启为 0.014 m/s，四阀开启为 0.028 m/s。当 2 台电磁换向阀得电时，关阀速率约为 4 min，4 台电磁换向阀得电时，关阀速率约为 2 min。

### 2.2.2 无动力应急关阀系统组成

考虑在 3#船闸进行现场试验，采用并联 4 个双向止回型二位二通电磁阀，通过 UPS 供电，每个电磁阀可以单独启闭也可以一键全开全关。冗余配置进一步提高可靠性；通过不同的开启组合调节垮阀速度，保护门体结构和埋件。

电磁阀组的截止式电磁换向阀由 UPS 电源供

电, 电缆从电磁阀组敷设至独立于现有系统的供电电源; 同时设置各阀门油缸现有的连通球阀, 可以在完全无电情况下实现手动操作。

依据上述方案, 设计制作了无动力关闭输水阀门的应急系统, 见图 3。该系统包括油泵电机组、电磁换向阀、溢流阀、输水阀门油缸、油箱及连通各元器件的液压管路。电磁换向阀包括 P 口、T 口、A 口和 B 口, 油泵电机组的输出端连通电磁换向阀的 P 口, A 口连通输水阀门油缸的无杆腔、B 口连通输水阀门油缸的有杆腔, T 口连通油箱。

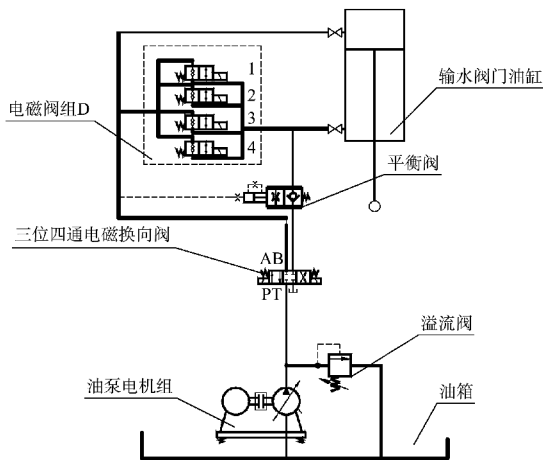


图 3 无动力关闭输水阀门应急系统  
Fig. 3 Emergency system for unpowered closing of water delivery valves

### 3 无动力应急关闭原型试验

#### 3.1 试验方案

在 3<sup>#</sup>船闸开展原型试验, 无动力关闭应急系统相关电磁阀组及其配套电控箱见图 4。

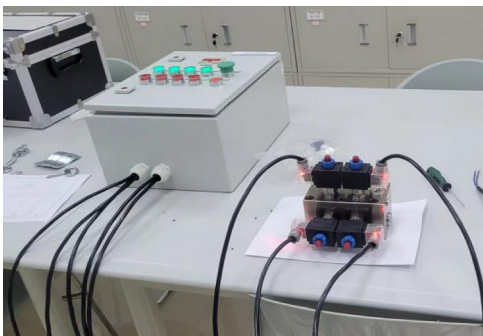


图 4 垮阀阀组及其配套电控箱  
Fig. 4 Collapse valve group and its supporting electric control box

无动力应急关闭试验方案内容主要包括如下几个方面。1) 将原阀门启闭机液压系统上、下腔联通球阀更换为电磁阀组。2) 使用配套的垮阀电控箱进行关闭操作, 关闭电控箱和电磁阀组均由现地机房 UPS 电源供电。3) 使用液压系统多通道运行状态检测仪对垮阀试验的阀门油缸的上下腔压力进行监测和记录。4) 阀门两侧无水头差的情况下, 开展静水关闭 8 组试验, 试验内容见表 2。5) 在阀门两侧有水头差的情况下, 开展动水关闭 2 组试验, 分别是: ①连续垮阀, 阀门开度 100%、闸室水位 58 m 开启垮阀, 至阀门开度 10% 时停止; ②分段垮阀, 阀门开度 100%、闸室水位 58 m 开启垮阀, 阀门开度 50%→30%→10%→3%, 逐级分段关闭至目标开度。

表 2 静水关闭试验内容

Tab. 2 Static water valve closing test items

关闭起止开度	单电磁阀	双电磁阀	四电磁阀
10%起, 3%止	✓	✓	-
50%起, 10%止	✓	✓	✓
100%起, 10%止	✓	✓	✓

注: “✓”表示有此项试验内容。

#### 3.2 试验结果

在 3<sup>#</sup>船闸右充阀门进行关闭试验, 试验当天气温为 14 ℃, 上游水位为 65.2 m, 下游水位为 40.25 m, 初始状态为闸室水位与上游水平。完成无动力关闭输水阀门应急系统及液压系统运行状态检测仪安装等准备工作后, 进行静水关闭试验。采用右充阀门单阀动作, 完成 8 组静水关闭试验, 部分试验记录见表 3。

静水关闭试验完成后, 船闸双边运行, 泄水后开下游人字门, 然后关下游人字门, 全开右充阀门单边充水, 待闸室水位 58 m 时开始关闭, 完成 1 组动水关闭试验。重复以上过程, 完成第 2 组动水关闭试验。

现场静水关闭和动水关闭原型试验记录结果表明: 1) 无动力关闭应急系统能够实现输水阀门无动力应急关闭操作; 2) 无动力应急关闭的关闭速度与开启的电磁阀数量正相关, 与理论计算基本一致; 3) 在本次试验中, 开度 10% ~ 100%、

4 电磁阀连续垮阀，静水关阀耗时 280.51 s，动水关阀耗时 284.29 s，静水与动水关阀速度差别很小；4)对于本次试验对象而言，4 个电磁阀同时得电进行关阀时，关阀速度接近正常关阀速度，而估算基于理想状态，未计入油液黏性阻力、摩擦阻力等影响，因此实际关阀速度较理论值更慢。

表 3 静水关阀试验记录

Tab. 3 Record of static water valve closing test

阶段	阀门开度/%	上腔压力/MPa	下腔压力/MPa	启动的电磁阀编号	计时/s
初始状态	10.0	0.291	1.841	-	-
	10.0	3.994	1.930	-	-
	49.9	4.268	1.979	-	-
	50.4	4.234	1.946	-	-
	100.3	3.019	0.691	-	-
	100.3	2.975	0.649	-	-
垮阀过程	-	-0.087~-0.079	1.211~1.249	2	-
	-	-0.089~-0.044	1.169~1.278	2,3	-
	-	-0.073~-0.035	1.225~1.467	1,2	-
	-	-0.087~-0.056	1.214~1.496	1,2,3,4	-
	-	-0.084~-0.056	1.197~2.010	3,4	-
终了状态	-	-0.085~-0.056	1.202~2.083	1,2,3,4	-
	3.0	-0.079	1.277	-	52.31
	2.9	-0.088	1.260	-	36.40
	10.0	-0.076	1.331	-	156.49
	9.8	-0.078	1.346	-	141.66
	10.1	-0.078	1.306	-	450.74
	9.7	-0.078	1.326	-	280.51

### 4 结语

1) 研究提出了适用于大型高水头船闸的无动力应急关阀方案，可通过自带的 UPS 电源实现无动力应急垮阀，实现不依赖任何电源的纯手动应急垮阀。通过现场试验验证，无动力应急关阀系统在 10%~100%开度区间，静水、动水关阀耗时速度差异不足 1%，且关阀速度接近正常操作速度（误差≤5%），该套应急系统能够在无动力状态下实现阀门的快速、安全关闭，同时其采用了冗余设计，具有关阀可靠性高、速度可调等特点。

2) 后续可针对高水头船闸开展补充试验，建立“油缸工作行程-电磁阀数量-关阀速度”的定量关系模型，提升方案的普适性；同时开展循环耐

久性试验测试，优化阀组密封结构与电源适配方案，进一步延长系统使用寿命；此外，该系统还适用于各种类似水利工程设备的应急操作，为相关研究提供参考。

### 参考文献:

[1] 刘涛, 彭书华, 胡方, 等. 流域空间视域下长江航运沟通工程战略谋划[J]. 水运工程, 2025(5): 23-31.  
LIU T, PENG S H, HU F, et al. Strategic planning of Yangtze River shipping communication project based on perspective of watershed space [J]. Port & waterway engineering, 2025(5): 23-31.

[2] 黄镇东. 成渝地区双城经济圈水运高质量发展若干问题思考[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2021, 40(10): 1-6.  
HUANG Z D. Some thoughts on the high-quality development of water transport in Chengdu-Chongqing area twin city economic circle [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (natural sciences), 2021, 40(10): 1-6.

[3] 孙倩, 陈亮, 王召兵, 等. 船闸单侧闸墙廊道输水系统布置及试验研究[J]. 人民长江, 2019, 50(12): 182-186, 191.  
SUN Q, CHEN L, WANG Z B, et al. Arrangement and experimental study for filling and emptying system with a unilateral culvert in lock wall for high head ship lock [J]. Yangtze River, 2019, 50(12): 182-186, 191.

[4] 胡亚安, 严秀俊, 薛淑. 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.  
HU Y A, YAN X J, XUE S. Field-observation on filling and emptying valve of the Three Gorges ship lock in emergency case of closing valve under hydrodynamic load [J]. Port & waterway engineering, 2021(1): 1-5.

[5] 徐勤勤, 刘敦煌, 岳汉生. 船闸反向弧形阀门底缘体形优化试验[J]. 长江科学院院报, 1997, 14(3): 1-4, 14.  
XU Q Q, LIU D H, YUE H S. Experimental study on optimization of bottom shape of reverse tainter valve in lock culvert [J]. Journal of Changjiang River Scientific Research Institute, 1997, 14(3): 1-4, 14.