

红水河乐滩船闸输水系统水力特性原型调试研究

胡亚安, 李 君, 宗慕伟

(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, 江苏 南京 210029)

摘要: 红水河乐滩船闸是国内实际运行水头最高的单级船闸. 本文介绍了该船闸双边输水工况水力特性, 提出了控制闸室超灌(泄)的措施, 并通过输水方式优化, 改善了闸室水流流态, 保证了船闸安全通航.

关 键 词: 水力特性; 输水方式; 原型调试; 乐滩船闸

中图分类号: TV135.4

文献标识码: A

文章编号: 1009-640X(2008)01-0006-08

Study by prototype debug on hydraulic characteristics of the filling and emptying system of Letan ship lock on Hongshui River

HU Ya-an, LI Jun, ZONG Mu-wei

(State Key Laboratory of Hydrology, Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China)

Abstract: Letan ship lock is a single-lift ship lock which has the highest factual working head in China. This paper presents the hydraulic characteristics under operating conditions with double-valve operation, and puts forward the measures for controlling the inertia over travel. By optimizing the pattern of water conveyance, the flow regime in the chamber has been ameliorated, and the safety of the navigation has thus been guaranteed.

Key words: hydraulic characteristics; pattern of water conveyance; prototype debug; Letan ship lock

1 船闸输水系统布置

乐滩水电站是红水河10个梯级电站中的第8级. 枢纽由溢流坝、河床式厂房、船闸、冲砂闸、左右岸重力坝、左岸接头土坝及开关站等主要建筑物组成.

船闸上游最高和最低通航水位分别为 $\nabla 112.0$ m和 $\nabla 110.0$ m, 下游最高和最低通航水位分别为 $\nabla 93.6$ m和 $\nabla 82.9$ m, 设计最大水头为29.1 m, 其下游通航水位变幅为10.7 m. 船闸有效尺度为120 m $\times$ 12.0 m $\times$ 3.0 m(长 $\times$ 宽 $\times$ 门槛水深), 船闸主体段和上游引航道按IV级航道标准的500 t级顶推船队尺度设

收稿日期: 2007-07-20

作者简介: 胡亚安(1965-), 男, 湖北云梦人, 教授级高级工程师, 主要从事通航水力学及水工水力学研究.

E-mail: yahu@nhri.cn

计;下游引航道按 V 级航道标准的 250 t(300 t)级拖带船队尺度设计,并考虑将来扩建成 IV 级航道通航标准. 设计通过能力为年货运量 180 万 t(其中下行 140 万 t).

船闸输水系统采用闸墙主廊道闸室中心进口水平分流、闸底纵向支廊道二区段顶部支孔出水、盖板消能的布置型式,其总体布置见图 1.

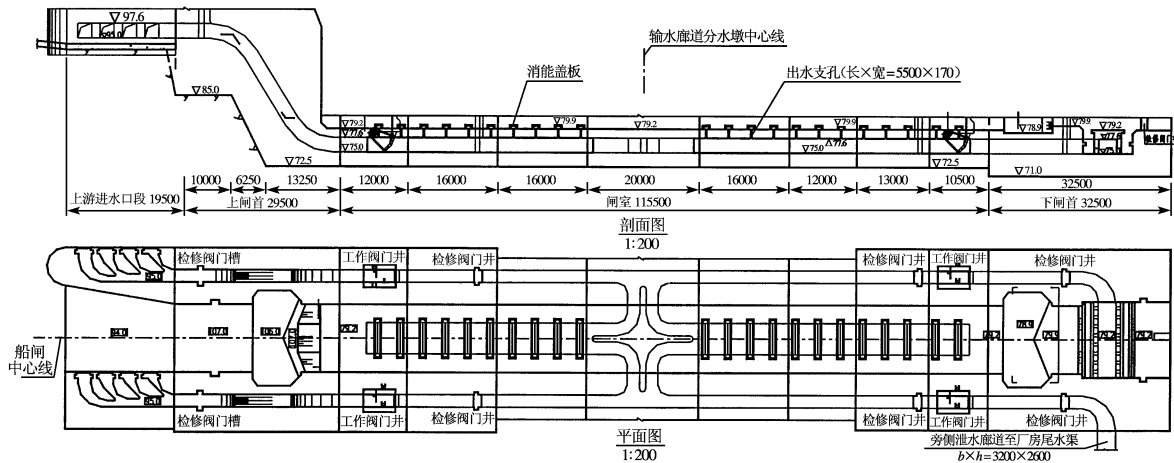


图 1 乐滩船闸输水系统总体布置(长度单位:mm,高程单位:m)

Fig. 1 Overall layout of filling and emptying system of Letan ship lock(length unit: mm; height unit: m)

输水廊道进水口采用上闸首导墙垂直多支孔进口型式,左侧进水口设置在冲砂闸一侧,为旁侧取水形式,右侧进水口则由引航道直接取水. 在船闸上下闸首两侧主输水廊道分别设有灌泄水阀门,阀门为反向弧形门,阀门前后主廊道的高程与尺寸不变,均为 2.2 m×2.6 m(宽×高). 闸室前、后纵支廊道顶部分别设置 10 和 12 个宽度为 0.17 m 的出水孔. 出水孔上方设有消能盖板,出水孔间距为 4.0 m. 闸室支廊道出水孔段长度为 80.0 m,占闸室有效长度的 66.7%. 输水廊道泄水口采用部分旁侧泄水方式,即右侧主廊道在下闸首反弧阀门井下游侧检修门槽后经旁侧泄水廊道泄水至电站厂房尾水渠;左侧主廊道的泄水口则布置在下闸首人字门外的引航道中,采用明沟消能.

输水系统布置特性见表 1.

表 1 输水系统布置特性

Tab. 1 Layout characteristics of filling and emptying system

	名 称	尺 寸	数 量	总面(体)积	与阀门段廊道 断面面积比
进 水 口	进口断面(宽×高)	4 m×(2.5 m×2.6 m)	2	52 m ²	4.55
	喉口断面(宽×高)	(1.05 m+0.85 m+0.65 m+ 0.45 m)×2.6 m	2	15.6 m ²	1.36
	闸墙主廊道断面(宽×高)	2.2 m×2.6 m	2	11.44 m ²	1.0
	灌水阀门段主廊道断面(宽×高)	2.2 m×2.6 m	2	11.44 m ²	
	泄水阀门段主廊道断面(宽×高)	2.2 m×2.6 m	2	11.44 m ²	
	分流口断面(宽×高)	2.2 m×2.6 m	4	22.88 m ²	2.0
	闸底纵向廊道断面(宽×高)	5.5 m×2.6 m	2	28.60 m ²	2.5
	出水支孔断面(宽×长)	0.17 m×5.5 m	22	20.57 m ²	1.80
	出水支孔盖板(宽×长)	1.2 m×7.0 m	22		
	出水孔段长度	80 m			
	主廊道出口断面(宽×高)	3.2 m×2.6 m	2	16.64 m ²	1.45
	左支出水口消能室(宽×高×长)	3.2 m×2.6 m×12.0 m	1	99.84 m ³	
	消能室出水孔口(宽×高)	0.5 m×1.0 m	16	8.0 m ²	0.70
	出水口消能明沟(宽×高×长)	2.0 m×4.2 m×12.0 m	2	201.6 m ³	

乐滩水电站船闸设计最大水头 29.1 m,在国内已建的单级船闸中仅次于江西万安船闸(32.5 m)位居第二,实际运行水头则为国内最高,同时也是采用水平分流这类输水系统型式水头最高的船闸.此外,乐滩船闸在国内外首次完全采用门楣通气联合门后廊道顶通气的措施解决输水阀门空化难题,且输水阀门的最小淹没水深仅为 5.3 m,远较与其水头接近的葛洲坝 3 号船闸及万安船闸要小.为此,在 2006 年 8~9 月,配合船闸无水及有水调试,对该船闸进行了较全面的水力学监测,本文阐述了输水系统水力特性观测成果^[1].

2 双边阀门连续开启输水系统水力特性

该船闸曾进行了比尺为 1:25 的水工整体模型试验^[2],经过多种方案比较,确定输水阀门开启时间为 4 min,可满足闸室输水时间不超过 10 min 的设计要求和闸室以及引航道内船舶的停泊条件要求.

2.1 输水系统水力特性

观测的各种水头下输水特征值见表 2.

表 2 输水水力特征值(阀门连续开启)

Tab. 2 Statistics of the hydraulic characteristics of water conveyance(valve continuously opening)

工 况	水 头 / m	阀门开启 时间/ s	输水时间 / min	最大流量 / (m ³ ·s ⁻¹)	超灌(泄)值 / m	最大水面 升(降)速度 / (m·min ⁻¹)	平均水面 升(降)速度 / (m·min ⁻¹)	关阀时机
双边灌水	28.21	260	9.00	160	0.02	6.00	3.14	提前关阀
双边灌水	25.63	265	8.33	145	0.03	5.44	3.08	提前关阀
双边灌水	22.31	251	7.96	135	0.03	5.06	2.80	提前关阀
双边灌水	17.18	255	7.36	115	0.51	4.31	2.33	
双边泄水	28.70	255	9.35	150	0.02	5.62	3.07	提前关阀
双边泄水	25.31	250	8.94	140	0.02	5.25	2.83	提前关阀
双边泄水	22.63	261	8.50	125	0.40	4.69	2.66	
双边泄水	15.76	255	7.58	100	/	3.75	2.08	

观测结果表明:

(1)设计的灌泄水阀门开启速率均为 $t_v=4$ min. 实际运行中,双边灌水和泄水,左侧阀门 $t_v=250\sim 265$ s,右侧阀门 $t_v=250\sim 260$ s,阀门开至廊道顶的时间分别为 242~257 s 和 242~252 s,阀门开启速率与设计值接近.

(2)双边阀门连续开启灌水工况:在▽111.56 m~▽83.35 m 水位组合、阀门工作水头 28.21 m(接近设计水头)条件下,灌水时间 9 min,满足设计要求.灌水过程最大流量 $Q=160$ m³/s,闸室最大水面上升速度为 6 m/min,平均上升速度为 3.14 m/min,输水系统水力指标较高.

(3)双边阀门连续开启泄水工况:在▽111.50 m~▽82.80 m 水位组合、阀门工作水头 28.70 m(接近设计水头)条件下,泄水时间 9.35 min,满足设计要求.泄水过程最大流量 $Q=150$ m³/s,闸室最大水面下降速度为 5.62 m/min,平均下降速度为 3.07 m/min.

(4)双边灌水和泄水:输水末期,采取提前关阀的措施,闸室惯性超灌(泄)值不超过 0.05 m,满足规范要求.

(5)人字门合拢位时间:在闸室灌水前,下游人字门全关位留有 10~15 mm 间隙,当船闸灌水 30~50 s、人字门前水位差 0.1~0.2 m 时,人字门合拢.

计算的灌泄水工况输水系统各区段阻力系数及船闸整体模型试验结果见表 3.

由表 3 可见,原型双边灌水和泄水工况输水系统流量系数比模型分别增大 11.3% 和 16.7%. 其输水时间缩短 8%~10%.

表3 原型及模型各区段阻力系数

Tab.3 Resistance coefficients of each section in prototype and model

工 况	分 段 阻 力 系 数						总阻力系数		流 量 系 数	
	阀 门 前		阀门井~下游检修门井		检修门井后		原型	模型	原型	模型
	原型	模型	原型	模型	原型	模型				
双边灌水	0.608	0.590	0.324	0.310	0.604	1.000	1.536	1.900	0.807	0.725
双边泄水	/	/	/	/	/	/	1.724	2.360	0.762	0.653

2.2 解决闸室超灌(泄)的措施及效果

在船闸输水过程中,由于水流的惯性作用,导致输水末期存在惯性超高(降)现象.较大的惯性超高(降)将对船闸运行产生诸多不利影响,如形成作用在人字门上的较大反向作用水头,危及人字门启闭设备的运行安全;在人字门开启时,反向水头促使水流经人字门孔口流出,在闸室产生较强的纵向水流,导致船舶停泊条件恶化.

根据惯性超高(降) d 的计算公式^[3]:

$$d = \frac{\mu^2 \omega L_{np}}{\Omega}$$

式中: μ 为阀门全开后的输水系统流量系数; L_{np} 为输水廊道的换算长度; ω 为阀门处廊道断面面积; Ω 为闸室水域面积.

计算得双边灌水惯性超灌值为0.54 m,双边泄水惯性超泄值为0.44 m,均超过规范允许的0.25 m.在不采取任何措施时,实测的乐滩船闸最大超灌值为0.57 m,与计算值基本一致.

根据已建船闸运行经验,有两种途径解决超灌(泄)问题:其一是较为简单的控制措施,即在水位齐平时开启人字门,借助于人字门孔缝过流减弱超灌(泄)值.在船闸超灌(泄)值不大的情况下经常采用这种方式.另一种是采取在一定剩余水位差条件下提前关闭输水阀门,以减小惯性水流流量和在闸室水位齐平时即打开人字门以避免反向水头进一步加大的联合措施,可以达到控制惯性超高(降)的要求.

有水调试阶段对以上两种方式都进行了试验.对于第一种方式,无论双边灌水还是泄水工况,在水位差还有0.10 m条件下开启人字门,闸室超灌(泄)值超过0.30 m,不能满足规范要求.第二种方式的关键,在于关阀速率固定的前提下,选择合适的关阀水头和停机开度.关阀太早,导致输水时间延长;而关阀太晚,又不能满足控制超灌(泄)的要求.同样,停机开度过大,也达不到控制超灌(泄)的要求;而停机开度过小,又导致末期输水时间较长.因此,通过数学模型对多种控制方式进行了计算.最终确定灌水工况,在上游人字门前后水位差为3 m时关闭阀门至50%开度,泄水工况,在下游人字门前后水位差为2 m时关闭阀门至60%开度;无论灌泄水,在水位差0.10 m时开启人字门.调试结果表明,在各种水头下,灌(泄)水工况,开始关阀时实际的上下游水位差分别为3.0 m和2.2 m,阀门关至50%和60%开度时水位差分别为0.25 m和0.20 m,约30 s后人字门开启,观测的人字门孔缝流动不明显,闸室流态非常平稳,实测的最大超灌和超泄值不超过0.05 m,满足规范要求.

2.3 上游进水口流态

上游引航道底部的高程在口门处及其后的400 m范围为▽107.0 m,然后逐渐降低至进水口处的▽94.0 m高程,从而保证了进水口处廊道具有足够的淹没水深;此外进水口采用了导墙垂直多支孔型式,分别从引航道和冲砂闸一侧的水域取水,多支孔的喉口宽度又采用了顺水流方向依次缩小的布置(见图1),从而保证了各支孔进流量的均匀,这些都使得在闸室灌水过程,船闸进水口区域的水面十分平稳,无任何漩涡或旋转水流产生.

由于上游引航道较长(773.8 m),闸室灌水水量全部取自引航道,闸室灌水时有一定的非恒定波动水流,初步观察上游引航道的波动水流对上闸首人字门的运行和引航道内船舶的航行及系泊不致产生有害影响.

2.4 闸室水面流态

2.4.1 闸室灌水流态 闸室灌水过程,水流从前后纵支廊道顶部出水支孔经盖板消能后进入闸室. 水工模型试验中曾对分流口布置进行了优化,即分隔墩端部位置退缩了 0.13 m(由原设计的 0.52 m 增大至 0.65 m),并在后纵支廊道末端增加了 2 个出水支孔(下半闸室 12 孔,上半闸室 10 孔),其目的是调整前后纵支廊道的流量分配,同时使闸室内出水段的中心与闸室水体中心相重合,以改善船舶在闸室中的停泊条件. 模型试验表明,闸室内水流十分平稳,紊动很小. 2×500 t 船队及 500 t 单船的系缆力均满足要求.

在接近设计值的 28.76 m 水头下,闸室起始水深 3.24 m,双边灌水过程,阀门开启过程闸室流态见图 2.

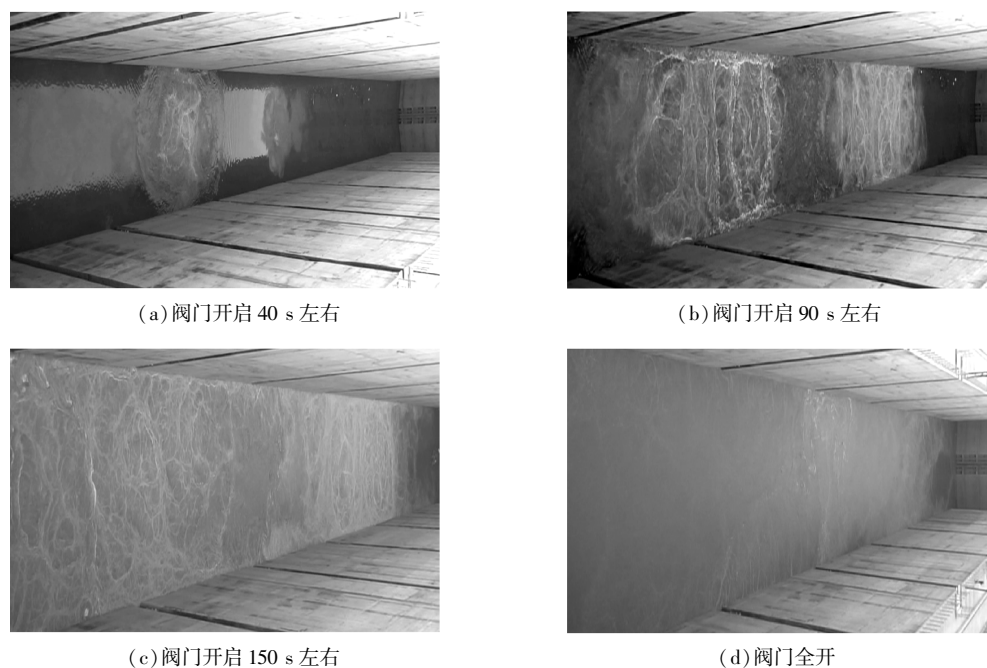


图 2 双边连续开启灌水流态

Fig. 2 Flow regime of water filling with double valves continuously opening

由图 2 可见,在阀门开启之初即有空气逸出,空气在各区段前部出水孔集中(1~2 孔)逸出,导致闸室局部水流紊动较大, $t=90\sim 150$ s 时,闸室水面紊动强度最大. 观测表明,空气集中逸出恶化闸室水流流态的时间将一直延续至 $t=240$ s,基本与通气的持续时段一致,而稍有延迟. 阀门全开后,闸室流态趋向平稳. 同时由照片可见,前半闸室出水段前部出水孔出流及空气量明显大于后半闸室.

高水头下双边阀门连续开启时因空气集中逸出导致闸室流态相对恶化,可能影响船舶安全停泊.

2.4.2 闸室泄水流态 与绝大多数船闸类似,在各种工作水头下,泄水阀门以 $t_v=4$ min 连续开启,泄水过程中闸室内水流流态十分平稳,无漩涡水流,亦未见明显的纵向流动. 试通航表明,闸室内停泊船舶在泄水全过程中漂移很小,系缆绳索基本松弛,说明水流作用力很小.

2.5 下游引航道及出口流态

乐滩船闸输水系统下闸首采用了左侧廊道泄水至下游引航道,右侧廊道泄水至下游河道的部分旁侧泄流的布置. 左侧廊道泄水口为横支廊道侧支孔明沟消能布置,右侧廊道为单孔,出口设有消能室. 闸室泄水时,下游引航道除出水口处水流较为汹涌外,至副导墙末端水流已十分平顺. 下游引航道由于长度较短(560.2 m),且仅一侧廊道泄水至引航道,因此其非恒定波动水流较弱,在下游靠船墩处水面十分平稳,无明显波动. 河道侧出水口水流流态良好,出口水流与河道水流顺直. 无论是左侧出水口,还是右侧出水口,在阀门开启过程中,都能显见大量气泡逸出.

3 双边灌水工况闸室流态改善措施初步研究

模型试验结果表明,双边阀门连续开启工况,乐滩船闸输水系统水力指标较高,阀门启闭平稳,无空化和振动现象.存在的主要问题是灌水过程中闸室流态相对较差.

乐滩船闸在闸室内采用了平面分流二区段等惯性布置、顶部出水孔盖板消能的输水系统.这是一种适合高水头船闸的较好的输水系统型式,优点是结构简单,可以大大减弱灌水时闸室内的波浪运动,从而减小船舶所受的波浪力;同时,较短的出水段长度亦有利于出水孔水流的均匀分配,从而减小水面的紊动.其缺点是水平分流的分流墩位置对水流分配较为敏感,且难以保持稳定,仅适用于闸室平面尺寸不大的船闸.

乐滩船闸由于水头较高,在国内外首次采用了门楣及廊道顶联合通气措施以改善阀门的工作条件^[4,5].国内外船闸运行经验表明,采用通气措施尤其是廊道顶通气措施的船闸必须通过原型调试,严格控制通气量,以防通气量过大,空气在闸室内集中逸出,增大水流紊动从而影响船舶停泊安全.由于廊道顶通气措施在我国尚属首次使用,通气量的调整尚缺乏经验,加之受时间限制,目前通气量尚嫌稍大,在阀门开启过程,通气量占主流量的2.4%,加之门楣通气量,通气量达主流量的3.6%,大于国外船闸通常控制的3%.为防止分流口墩头的空化,该船闸采用了较大的分流口面积(为阀门面积的2倍)以减小水流流速.因此,掺气水流在到达分流口后流速骤降,空气在各区段前部出水孔集中(1~2孔)逸出,导致闸室局部水流紊动较大,影响船舶安全停泊.

综合闸室流态及门楣和廊道顶通气量,在中低水头(小于24 m)下,廊道顶不通气,单侧门楣通气量仅为 $0.1 \text{ m}^3/\text{s}$,除开门初期会出现集中空气逸出外,开门过程及全开后闸室流态比较平稳.由于闸室起始水深也相对较大,因此,集中空气逸出造成的水面紊动程度不大,可以认为采用双边连续开启方式是可行的.在高水头下,闸室流态尚不能完全保证闸室船舶停泊安全,必须采取有效措施加以解决.

为了解决高水头下双边灌水工况闸室内水流流态较差的问题,尽快实施试通航,在时间紧迫、调试次数有限的条件下,通过初步分析,确定采取较为可靠的阀门间歇开启方式.即将阀门先按行程开启至某一开度以控制流量及通气量,减少闸室内水体紊动强度,停留一定时间待闸室水位上升后,再开启至阀门全开,这时由于闸室水位上升,阀门后压力提高而达到减少廊道通气量或基本不通气的目的,同时水深的增加也可大大减弱水体紊动强度.

3.1 双边阀门间歇开启方式的确定

乐滩船闸模型试验成果表明,在设计水头下,双边灌水工况,在开至孔口开度 $n=0.2$ 时,门后廊道出现0.4 m左右的负压,廊道顶处于临界通气状态.因此,选择的停机开度应在孔口开度0.2以下.调试中比较了两种间歇开启方式,其一是停机时的行程开度为25%(对应孔口开度 $n=0.2$),停机时间4 min;其二是停机时的行程开度为17%(对应孔口开度 $n=0.13$),停机时间7 min.

两组开启方式下初始水头相当,实测的门楣通气量变化曲线见图3.可见,在停机开度为25%的间歇开启方式下,停机后由于门后廊道顶存在负压,门楣通气量增大,最大值为 $0.25 \sim 0.30 \text{ m}^3/\text{s}$,占主流量的1%左右;停机后20 s门楣通气量逐渐减小,最后达到门楣通气量的稳定值,约 $0.1 \text{ m}^3/\text{s}$.停机4 min后,阀门再次开启时,相应的闸室水深约9 m,开启过程门楣通气量又逐渐增大,至40%出现峰值,最大通气量为 $0.2 \text{ m}^3/\text{s}$,占主流量的0.3%,在开至80%门楣通气结束.当停机开度减小到17%时,门楣通气量明显减小,在阀门开至17%停机时,门楣通气量最大,其值约为 $0.17 \text{ m}^3/\text{s}$,占主流量的0.9%;在停机7 min时段,门楣通气量逐渐减小,总体在 $0.17 \sim 0.11 \text{ m}^3/\text{s}$ 范围变化,阀门再次开启时,相应的闸室水深约11 m,门楣通气量逐渐减小,在开至50%开度门楣通气量迅速降低,直至80%开度通气结束.

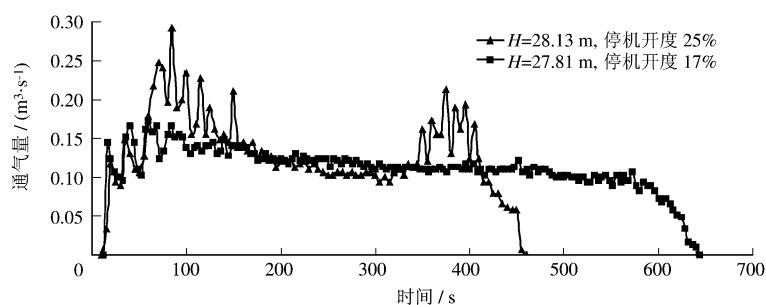


图3 双边间歇开启灌水工况门楣通气量

Fig.3 Aeration discharge through top sealing sill with double valves intermittently opening

现场观察表明,阀门开至 17% 开度停机灌水全过程,廊道顶不通气;而阀门开至 25% 开度停机过程及再次开启时,廊道顶间歇通气,通气量不大.从控制通气量的角度出发,选择停机开度 17% 是合理的.闸室流态观测表明,17% 开度停机工况略优于 25% 停机开度.因而确定在通航初期(航运压力不大)以 17% 开度作为间歇开度运行.采用间歇开启方式运行下不同时刻灌水时闸室流态见图 4.

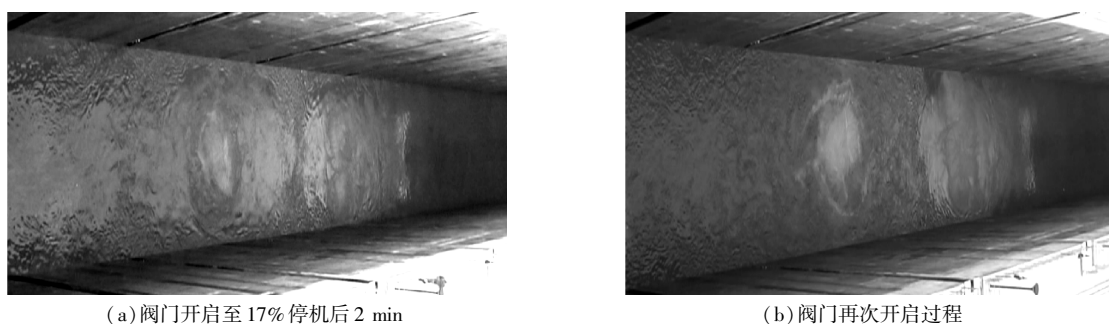


图4 双边间歇开启灌水工况闸室流态

Fig.4 Flow regime of water filling with double valves intermittently opening

可见,两次的水面紊动强度基本相近.经对水面流态的仔细观察,虽然在前后半闸室的前部仍受空气逸出及出流量稍多的影响,但紊动强度已大为减弱,对闸室内停泊船舶已无危害.试通航表明,3 条单人小渔船在上行过闸时,灌水全过程中,船舶十分平稳,无明显的漂移及摇晃.因此,控制单侧通气量在 $0.17 \text{ m}^3/\text{s}$ 以下,闸室流态就可以满足船舶安全停泊要求.

3.2 双边阀门间歇开启方式灌水水力特性

在推荐的阀门间歇开启运行方式下,闸室灌水的水位过程线和流量过程线见图 5.工作水头为 27.81 m,阀门开至 17% 停机 7 min 过程中,输水系统流量约为 $25 \text{ m}^3/\text{s}$,停机 7 min 再次开启阀门时,闸室水位 $\nabla 90.8 \text{ m}$,船闸工作水头 20.37 m,阀门开至全开后输水系统最大流量为 $140 \text{ m}^3/\text{s}$,输水时间约 15 min,超灌值为 0.02 m.监测的空化噪声强度过程线见图 6.

除阀门开启之初顶止水有 10 s 左右的短暂空化外,在阀门开至 17% 停机以及再次开启过程,监测的噪声强度较低,脉冲较少,系掺气水流噪声,表明门楣通气充分抑制了阀门底缘空化.振动监测结果亦表明,阀门停机及开启过程,吊杆及门体振动较小.

上述观测成果表明,在现阶段采取间歇开启方式,间歇开度为阀门行程 17%,间歇时间 7 min,在接近设计水头下,阀门及启闭系统运行平稳,门楣通气能充分抑制阀门底缘空化,阀门工作条件较好.闸室流态尽管在前后半闸室出水段的前端各存在一定的紊动区,但能量较弱,船舶可以安全待闸,采用间歇开启方式可以解决目前通航要求.建议上行船舶进闸时大船宜停泊在前半闸室,小船宜停泊在后半闸室.下一阶段还将对闸室空气集中逸出的问题进行工程措施研究.

尽管中低水头下采用双边连续开启方式灌水,闸室流态可以满足船舶安全停泊要求,为了运行操作方便,建议各种水头均采用上述间歇开启方式。

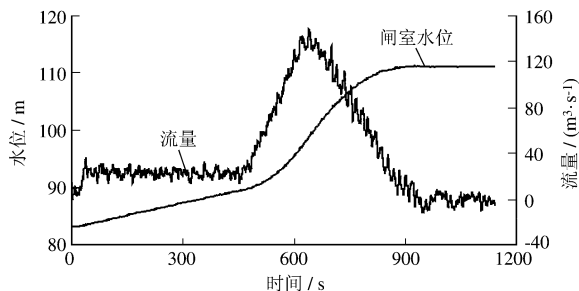


图5 闸室水位和输水系统流量过程线($H=27.81\text{m}$)

Fig. 5 Water filling level and discharge curves of the lock chamber ($H=27.81\text{m}$)

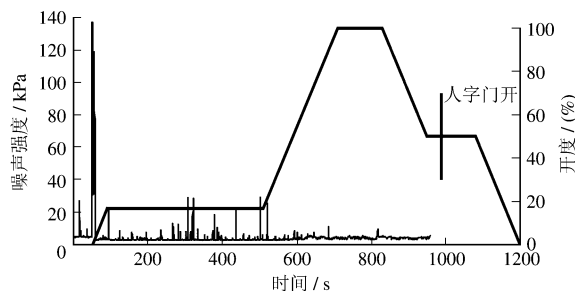


图6 空化噪声强度过程线

Fig. 6 Intensity curve of cavitation noises

4 结 语

(1)按设计的 $t_v=4\text{ min}$ 连续开启方式,在接近设计水头下,双边灌水和泄水工况,输水时间分别为9和9.35 min,输水水力指标较高.通过采取剩余水头分别为3.0和2.2 m时关阀至50%和60%开度,水位差0.10 m开启人字门的措施,闸室超灌(泄)值小于0.10 m,满足规范要求.

(2)双边连续开启灌水工况,闸室内水流受通气量及分流口体型尺寸和出水孔型式的影响,流态稍差.在高水头条件(水头大于24 m)下,受通气量过大的影响,在前后半闸室出水段的前端各存在一个强度稍大的紊动区,且前半闸室强度大于后半闸室,可能影响小型船舶停泊安全.中低水头下,通气量不大,闸室流态可以满足船舶停泊条件.通过采取间歇开启的运行方式(间歇开启开度17%、间歇时间7 min、动水关阀方式不变),可减弱闸室水流紊动强度,确保闸室船舶安全,满足现阶段通航要求.

(3)阀门全开后,灌水和泄水工况的输水系统流量系数分别为0.807和0.762,比模型值分别增大11.3%和16.7%.

参 考 文 献:

- [1] 胡亚安,李 君,宗慕伟,等.红水河乐滩船闸原型调试研究[R].南京:南京水利科学研究院,2006.
- [2] 须清华,黄 岳.广西红水河恶滩水电站船闸水工模型试验报告[R].南京:南京水利科学研究院,2001.
- [3] JTJ306-2001,船闸输水系统设计规范[S].
- [4] 胡亚安,凌国增,严秀俊.广西红水河恶滩水电站船闸输水阀门减压模型试验研究[R].南京:南京水利科学研究院,2001.
- [5] 胡亚安,凌国增,李伟忠,等.大化船闸输水阀门减压模型试验研究[J].水利水运工程学报,2001,(增刊):112-117.