

· 航道及通航建筑物 ·



下游超标准低水位条件下的 船闸运行方式研究*

刘本芹^{1,2}, 李中华^{1,2}

(1. 南京水利科学研究院, 江苏 南京 210029; 2. 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: 通航枢纽受清水下泄、河道采砂、航道疏浚等因素影响, 会出现枯水期下游水位经常低于船闸设计最低通航水位的现象, 将导致船闸门槛水深和输水廊道淹没水深均小于设计值、最大水头超过设计水头等问题, 影响船闸运行。针对某已建枢纽的这一问题, 系统分析近两年坝下水位变化特性及过坝船型特征资料, 计算超设计标准低水位条件下的船舶航行下沉量和富余水深, 通过数学模型研究初始水深减小、运行水头增大后的船闸充泄水水力特性, 分析输水系统水力学条件、阀门工作条件和闸室船舶停泊条件。在此基础上, 提出基于下游水位变化的输水阀门开启方式, 可优化船闸输水水力指标, 改善闸室船舶停泊条件; 提出小淹没水深下的阀门系统工程改善措施及过闸船舶吃水控制参数, 以减小下游水位降低带来的影响, 保障船闸运行。

关键词: 船闸; 超标准低水位; 水力学; 运行方式; 改善措施

中图分类号: U641.7

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2025)07-0114-07

Ship lock operation mode under condition of downstream low water level beyond design standard

LIU Benqin^{1,2}, LI Zhonghua^{1,2}

(1. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China;

2. Key Laboratory of Navigation Structure Construction Technology, Ministry of Transport, Nanjing 210029, China)

Abstract: The downstream water level of the navigation hub is often lower than the designed lowest navigable water level during the dry season because of the factors of released clear water, sand mining and waterway dredging, etc. It will lead to problems that the water depth of the lock threshold and the submerged water depth of the water conveyance culverts are both less than the designed values and the maximum water head exceeds the designed water head. In this case, the normal operation of the ship lock may be affected. In response to the problem of a certain constructed hub, systematic analyses are conducted on the characteristics of the downstream water level changes of the dam and the characteristics of ship types crossing the dam in the past two years. The ship sinking index and surplus depth during navigation are calculated when the downstream low water level is beyond the design standard. The hydraulic characteristics of the ship lock filling and emptying process are studied under the reduced initial water depth and the increased water head conditions by mathematical model. And the corresponding hydraulic conditions of the filling and emptying system, the valve working conditions and the ship berthing conditions in the lock chamber are analyzed. On this basis, the opening modes of the valves are put forward based on the changeable downstream water level, which can optimize the hydraulic characteristic index and improve the berthing conditions of ships in the lock chamber. In addition, the engineering improvement measures of the valve system and the ship draft control parameters are given under the small submergence depth situation, so as to reduce the impact of downstream water level drop and ensure the operation of the ship lock.

Keywords: ship lock; low water level beyond design standard; hydraulics; operation mode; improvement measure

收稿日期: 2024-10-17

*基金项目: 国家重点研发计划项目(2023YFB2604700)

作者简介: 刘本芹(1977—), 女, 教授级高工, 从事通航建筑物水力学研究。

水利水电枢纽经过多年运行后,受清水下泄、河道采砂、航道疏浚等因素影响,往往会出现下游最低水位低于船闸设计最低通航水位的情况^[1-4]。这种超设计标准低水位条件不仅会引起船闸门槛水深减小、输水廊道最小淹没水深降低,还会带来船闸运行水头增加、输水水力指标增大等问题,对船闸运行安全造成不利影响,实际工程中往往只能采取慢速开启阀门输水,船舶减载通行等措施^[5]。如水位下降严重,甚至不得不在下游增建新的梯级枢纽,通过蓄水来维持一定水位,以保证上游通航建筑物正常运行^[6-7]。对于枢纽下游一定幅度内的水位下降,或者下游尚不具备新增梯级枢纽条件的情况,则需要针对下游低水位进行充分论证,研究船闸运行方式,保障船闸运行安全。

本文依托某水利枢纽一线船闸,该船闸建成运行多年后,下游水位的降低使船闸枯水期航深不足、通航保证率降低,制约了枢纽整体通过能力。虽然枢纽建有多线船闸,但随着航运干线通航水平的提升,该船闸仍需承担较大部分的货物通行。为了充分发挥该船闸作用,需要结合新的坝下低水位及过闸船型资料,从船闸输水系统水力学条件、阀门工作条件与船舶航行与停泊条件等方面进行分析,对比现状与原设计运行条件下的水力指标差异,探究相应的船闸输水运行方式及改善措施。

1 船闸输水系统布置与运行条件

1.1 船闸设计运行资料

船闸有效尺度为 200 m×34 m×4.5 m(长×宽×

门槛水深),设计通航 2 000 吨级船舶,设计船型尺度为:驳船 75.0 m×16.2 m×2.6 m(长×宽×吃水),货船 90.0 m×16.2 m×2.6 m。

枢纽上游正常蓄水位 20.60 m,上游最高通航水位 24.06 m(保证率 $P=20\%$),最低通航水位 18.60 m;下游最高通航水位 23.80 m($P=20\%$),最低通航水位 5.05 m。船闸设计最大水头为 15.55 m,对应的水位组合为上游 20.60 m-下游 5.05 m。

1.2 输水系统设计

船闸采用闸墙长廊道闸室中部横支廊道分散输水系统形式,见图 1,输水系统各部位特征尺寸及高程见表 1。输水系统上、下游采用部分旁侧取水、泄水方式,闸室中部设置 4 组横支廊道,分别与两侧闸墙廊道连接,横支廊道上设置侧面进出水孔,采用双明沟消能,下闸首设置顶部出水孔,采用隔栅消能。输水阀门处廊道断面尺寸为 4.3 m×4.7 m(宽×高),闸室横支廊道进口和末端断面尺寸分别为 3.2 m×2.4 m 和 0.95 m×2.40 m。

表 1 船闸输水系统各部位特征高程及断面面积
Tab. 1 Characteristic elevations and cross-sectional areas of filling and emptying system

廊道部位		顶高程/m	断面面积/m ²
进水口		12.7	157.92
充水阀门段		-1.95~-0.95	40.42
闸墙廊道		2.35	49.02
闸室横支廊道	进口	-0.95	61.44
	末端		30.72
泄水阀门段		-1.95	40.42
泄水口	(下闸首、旁侧)	-1.95	40.42

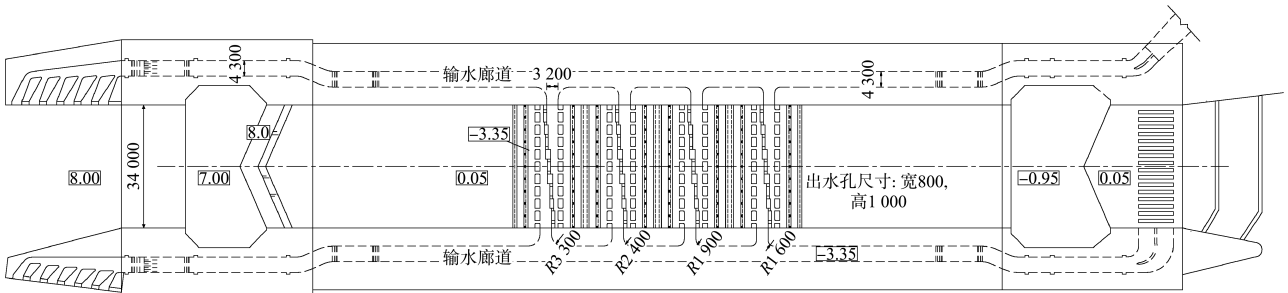


图 1 船闸输水系统平面布置 (高程: m; 尺寸: mm)

Fig. 1 Layout plan of filling and emptying system of ship lock (elevation: m; dimension: mm)

2 坝下水位与过闸船型分析

2.1 坝下水位

近两年枢纽坝下水位资料分析见表 2，结果显示：1) 全年约 50%的时间，坝下水位低于船闸下游设计最低通航水位 5.05 m；2) 低于 5.05 m 的水位数据中，多数在 3.50 m 以上，在 3.50 m 及以下的占比相对较小；3) 与前一年相比，后一年出现较低水位的次数明显增多，其中水位在 3.50 m 及以下的次数增加 2 809 次，累计约 1 404 h。此外，逐月分析结果表明，每年除 5—7 月外，其余每月均有较多时长出现水位低于 5.05 m 的情况。

表 2 近两年枢纽下游水位统计分析
Tab. 2 Analyses of downstream water levels
in recent two years

年份	下游水位/m	出现次数/次	占比/%
2021	0<·≤2.00	6	0.03
	2.00<·≤2.50	47	0.27
	2.50<·≤3.00	73	0.42
	3.00<·≤3.50	287	1.64
	3.50<·≤4.00	2 108	12.03
	4.00<·≤4.50	3 513	20.06
	4.50<·≤5.05	3 157	18.02
	≥5.05	8 325	47.53
2022	0<·≤2.00	24	0.14
	2.00<·≤2.50	648	3.70
	2.50<·≤3.00	1 190	6.79
	3.00<·≤3.50	1 360	7.77
	3.50<·≤4.00	1 739	9.93
	4.00<·≤4.50	1 755	10.02
	4.50<·≤5.05	1 221	6.97
	≥5.05	9 577	54.68

注：水位数据记录时间间隔为 0.5 h。

2.2 过坝船型

近两年过坝船型统计资料见表 3，略超过 1/3 数量的船舶实载不超过 500 t，这部分船舶绝大多数是空载船舶；除空载船舶外，实载 1 000 ~ 2 000 t 的船舶数量最多，占比接近 1/3。与前一年相比，最近一年的实载 500~1 000 t 的船舶数量减少了 13 000 多艘次，占比减少 7.77%；而实载 2 000~4 000 t 的船舶数量增加了 5 800 多艘次，占比增加 7.39%。

表 3 近两年过坝船型

Tab. 3 Ship types crossing dam in recent two years

年份	实载/t	数量/艘次	占比/%
2021	0≤·≤500	50 670	35.55
	500<·≤1 000	23 625	16.57
	1 000<·≤2 000	46 634	32.71
	2 000<·≤3 000	12 302	8.63
	3 000<·≤4 000	7 387	5.18
	4 000<·≤5 000	1 853	1.30
	>5 000	76	0.05
2022	0≤·≤500	44 317	36.74
	500<·≤1 000	10 612	8.80
	1 000<·≤2 000	36 557	30.30
	2 000<·≤3 000	14 636	12.13
	3 000<·≤4 000	10 936	9.07
	4 000<·≤5 000	3 431	2.84
	>5 000	148	0.12

过坝船舶实际吃水情况分析结果见图 2，除吃水深度不超过 1.0 m 的空载船舶外，吃水深度在 2.0~3.0 m 的船舶数量最多，占比超过 20%。对比结果显示，2022 年在过坝船舶总数量减少的情况下，吃水深度在 3.5 m 以上的大型船舶数量却增加了 5 000 多艘次，占比也从 12.90% 增加为 19.74%，说明近两年来枢纽过坝船舶大型化趋势逐年显现。

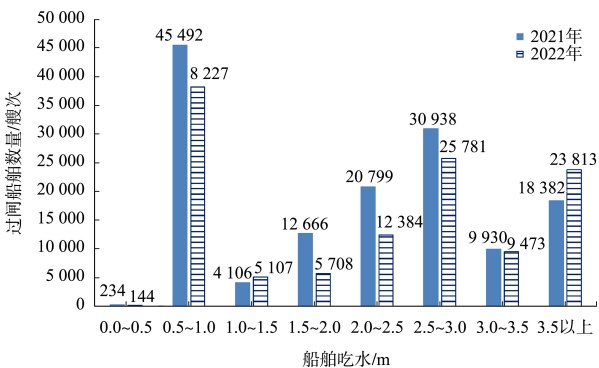


图 2 近两年过坝船舶吃水对比
Fig. 2 Comparison of ship draft crossing dam
in recent two years

3 超标准低水位下的船舶航行条件

船舶航行综合下沉量直接影响船舶进出闸时的富余水深，是关系到水位降低后船舶航行条件及航行安全的一个重要指标，由船舶航行下沉量

和推移波两部分组成,而富余水深由非恒定流引起的水面波动、水位误差、船舶纵倾和安全富余等几部分组成。通过对各项影响富余水深的因素进行分析,计算得出满足船舶进出闸航行安全的富余水深为 1.10 m。在此基础上,根据船舶航行下沉量研究结果^[8-10],采用如下封闭限制水域船舶综合航行下沉量与闸室水深、船舶航速及断面系数之间的经验公式:

$$\frac{\delta}{H} = 2.156 \times \frac{v^2}{2gH} \times \left[\left(\frac{n}{n-1} \right)^2 - 1 \right] + 0.017 \quad (1)$$

式中: δ 为船舶综合航行下沉量; H 为闸室水深; v 为船舶航速; n 为断面系数,表示闸室过水横断面面积与船舶浸水断面面积之比; g 为重力加速度。

计算得出该船闸在下游不同低水位条件下,设计 2 000 吨级船舶的过闸航行下沉量和闸室富余水深见表 4。由表得到以下结论: 1) 船舶进出闸室时,航速对下沉量存在一定影响,相同条件下航速小于 1.2 m/s 时,其下沉量随着航速的增大而缓慢增大; 2) 建议船舶进出闸室速度不超过 1.0 m/s; 3) 下游水位不低于 4.05 m 时,原设计 2 000 吨级船舶过闸航行时的富余水深能够满足要求; 4) 下游水位 3.32 m 时,原设计 2 000 吨级船舶过闸航行时的富余水深不能满足要求,需减少载重使船舶吃水不超过 1.9 m。

表 4 不同低水位条件下设计 2 000 吨级船舶过闸航行下沉量和富余水深

Tab. 4 Sinking index and surplus depth of designed 2 000-ton class ship during navigation under different low water conditions

航速/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	下游水位 4.55 m		下游水位 4.05 m		下游水位 3.32 m	
	下沉量/ m	富余 水深/m	下沉量/ m	富余 水深/m	下沉量/ m	富余 水深/m
0.4	0.090	1.810	0.084	1.316	0.078	0.592
0.6	0.107	1.793	0.104	1.296	0.107	0.563
0.8	0.130	1.770	0.133	1.267	0.147	0.523
1.0	0.161	1.739	0.169	1.231	0.199	0.471
1.2	0.198	1.702	0.214	1.186	0.262	0.408

4 超标准低水位下的输水水力条件与闸室停泊条件

4.1 输水水力特性对比

原设计最大水头输水运行时,推荐充、泄水

阀门开启时间 $t_v = 7.00$ min。在该阀门开启方式下,计算下游水位由 5.05 m 降低至不同低水位时的输水水力特性,最大水力特征值对比见表 5,最大流量、输水时间随运行水头的变化关系如图 3 所示。结果显示,下游水位由 5.05 m 降至 4.55~3.32 m 时,闸室充水时间由 10.23 min 延长至 10.33~10.62 min,充水最大流量由 329 m^3/s 增加到 337~355 m^3/s ,充水阀门后廊道顶最低压力水头由 1.5 m 降至 -0.95~0.79 m; 闸室泄水时间由 10.90 min 延长至 11.03~11.35 min,泄水最大流量由 309 m^3/s 增加到 316~332 m^3/s ,泄水阀门后廊道顶最低压力水头由 -0.87 m 降至 -3.61~-1.66 m。

与原设计条件相比,充水时间延长 1.0%~3.8%,充水最大流量增加 2.4%~7.9%; 泄水时间延长 1.2%~4.1%,泄水最大流量增加 2.1%~7.4%; 此外,由于下游水位降低及运行水头增大,使得充、泄水阀门后廊道压力明显降低,当下游水位低至 3.32 m 时,泄水阀门后廊道压力水头小于 -3.0 m,不能满足规范要求。

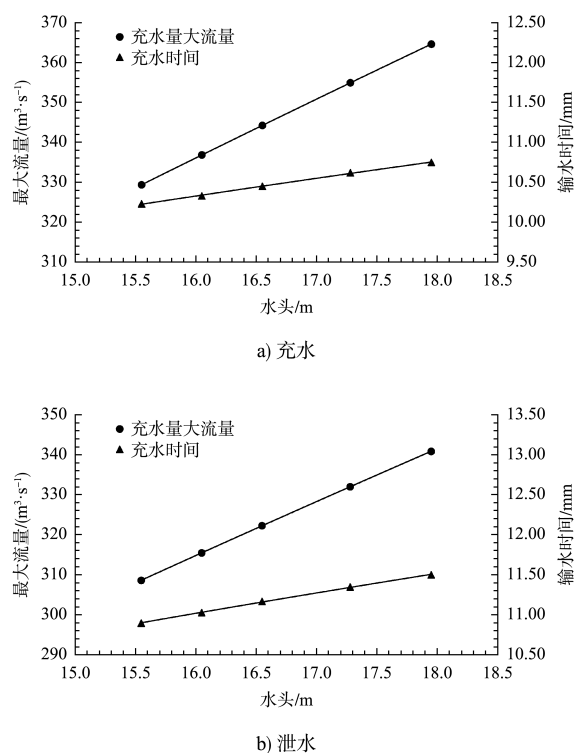


图 3 最大流量、输水时间与运行水头的关系 ($t_v = 7$ min)

Fig. 3 Relationship between maximum flow rate, filling or emptying time, and water head ($t_v = 7$ min)

表 5 下游不同低水位条件下原输水方式的水力特征值

Tab. 5 Hydraulic characteristics of original water conveyance method under different downstream water level conditions

上游 水位/m	下游 水位/m	水头/ m	运行 工况	充水或泄水 时间 T/min	时间 增幅/%	闸室充水或泄水过程的 最大流量 $Q_{\max}/(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	最大流量 增幅/%	充水或泄水阀门后廊道顶 最低压力水头/m
20.6	5.05	15.55	充水	10.23	—	329	—	1.50
20.6	4.55	16.05	充水	10.33	1.0	337	2.4	0.79
20.6	4.05	16.55	充水	10.45	2.2	344	4.6	0.09
20.6	3.32	17.28	充水	10.62	3.8	355	7.9	-0.95
20.6	5.05	15.55	泄水	10.90	—	309	—	-0.87
20.6	4.55	16.05	泄水	11.03	1.2	316	2.1	-1.66
20.6	4.05	16.55	泄水	11.17	2.4	322	4.3	-2.45
20.6	3.32	17.28	泄水	11.35	4.1	332	7.4	-3.61

4.2 闸室停泊条件分析

通过与原设计条件下船闸水力学模型试验结果进行类比分析闸室停泊条件。根据前文从船舶航行富余水深角度分析得到的过闸船舶允许最大

吃水深度, 以及保持最大流量一致时的阀门开启方式与水力特性, 分析不同下游低水位时的闸室船舶停泊条件, 见表 6。

表 6 闸室船舶停泊条件对比结果

Tab. 6 Comparison result of ship berthing conditions in lock chamber

运行水位 组合	充水阀门 开启时间/ min	最大流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	流量增率 最大值/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-2}$)	最大流量 时的闸室 水深/m	闸室水位 平均上升速度/ ($\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$)	闸室水位 最大上升速度/ ($\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$)	闸室槛上 初始水深/ m	船舶 吃水/ m	船舶吃水与 闸室初始 水深之比	最大纵向力 试验值与 允许值之比	最大横向力 试验值与 允许值之比
20.60 m-5.05 m	7.00	329	1.21	13.27	1.52	2.57	5	2.6	0.52	0.36	0.89
20.60 m-4.55 m	7.50	327	1.15	13.14	1.52	2.55	4.5	2.6	0.58	—	—
20.60 m-4.05 m	8.00	325	1.09	13.01	1.52	2.54	4	2.6	0.65	—	—
20.60 m-3.32 m	8.50	326	1.05	12.81	1.53	2.55	3.27	1.9	0.58	—	—

对比分析得出: 1) 在充水最大流量一致的条件下, 闸室水位平均上升速度、最大上升速度等指标均基本保持不变, 说明闸室内水流出流引起的动水作用力基本不变; 2) 延长阀门开启时间后, 流量增率略减小, 这在水深相同时对船舶停泊条件有利; 3) 闸室初始水深减小, 船舶吃水与闸室初始水深的比值增大, 最大流量时的闸室水深减小, 这些变化说明水体紊动能量对船舶的作用力有所增大。

根据以上分析, 考虑到原设计条件下模型试验所测的船舶横向最大受力值已接近规范允许值(两者之比为 0.89), 因此下游水位降低后, 即使保持船闸输水最大流量不变, 闸室内船舶停泊条件仍较原设计允许条件略差, 尤其下游水位降幅较大时会出现横向力超过规范允许值的情况, 需采取改善措施。

5 下游超标准低水位下的输水方式

5.1 优化输水水力条件的阀门开启方式

下游水位降低后, 为了保持充、泄水最大流量与原设计条件基本一致, 研究充、泄水阀门开启方式及对应方式下的基本水力特性, 结果见图 4。下游水位由 5.05 m 降至 4.55~3.32 m 时, 为了使船闸充、泄水最大流量与原设计运行条件一致, 计算得出船闸充、泄水阀门开启时间均需要延长至 7.50~8.50 min, 充水时间相应延长至 10.57~11.32 min, 泄水时间相应延长至 11.25~12.02 min。虽然最大流量基本一致, 但随着下游水位的降低, 充、泄水阀门后廊道顶压力仍有较大程度降低, 其中水位为 4.55、4.05 和 3.32 m 时的充水阀门后廊道顶压力水头分别为 0.98、0.48 和 -0.36 m, 泄水阀门后廊道顶压力水头分别为 -1.53、-2.19 和 -3.21 m。

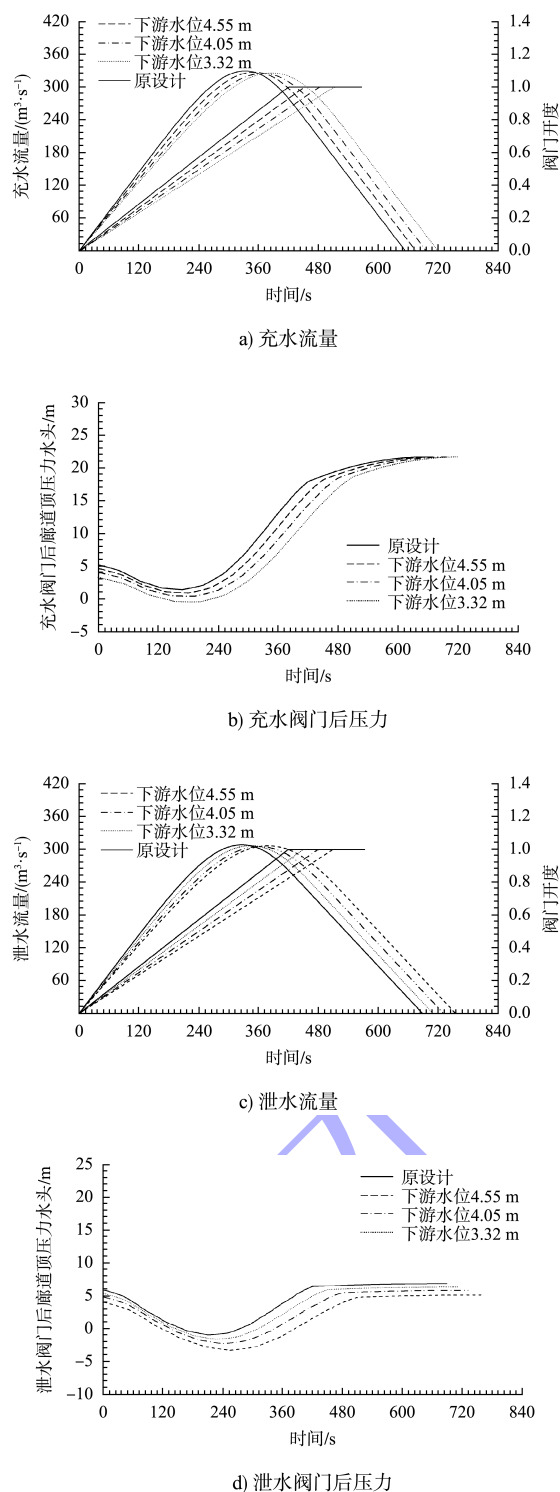


图 4 最大流量不变的阀门开启方式与水力特性曲线
Fig. 4 Valve opening modes and hydraulic characteristic curves with constant maximum flow

5.2 优化停泊条件的阀门开启方式

为了改善下游水位降低后的闸室船舶停泊条件, 针对分散输水系统, 引入 E_{pt} 表示充水过程闸室水平剖面上单位面积的比能。研究发现, 下游

水位降低后, 由于水头增大, 尽管延长阀门开启时间保持最大流量基本接近, 但其最大比能仍然大于原设计条件。当下游水位由 5.05 m 降低至 4.55~3.32 m 时, 闸室充水过程最大比能增加 1.8%~8.4%。对此, 进一步研究了阀门间歇开启方式。

为了便于船闸运行管理, 以最不利工况为控制条件, 针对不同下游低水位给出统一的满足最大比能不超过原设计条件的阀门间歇开启方式: $t_v=7.00$ min, 停机开度 $n_1=0.35$, 停机时间 $t_1=2.00$ min。间歇开启方式下的流量、比能变化特性见图 5, 采用间歇开启方式后, 充水过程闸室水平剖面比能最大值均未超过原设计运行条件下的最大比能, 分析得出其闸室船舶停泊条件与原设计最大水头及运行方式下的停泊条件差别不大, 可以保障船舶停泊安全。

充水阀门间歇开启方式下, 阀门开启速率与原设计最大水头时的推荐开启速率一致, 下游水位降低至 4.55、4.05 和 3.32 m 时, 充水阀门后廊道顶压力水头分别为 0.53、-0.17 和 -1.19 m。

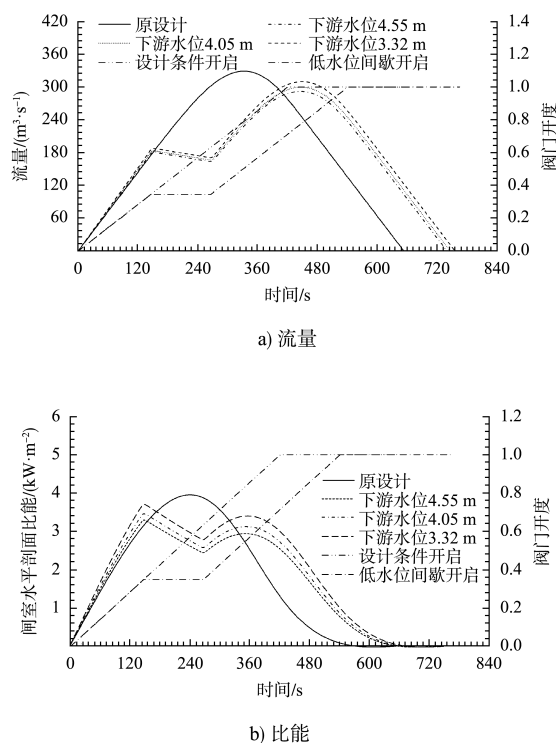


图 5 最大比能不变的充水阀门间歇开启方式及水力特性曲线
Fig. 5 Valve opening modes and hydraulic characteristic curves with constant maximum specific energy

5.3 阀门综合运行方式与改善措施

结合输水水力条件与闸室停泊条件, 提出阀门综合运行方式: 1) 当下游水位在 5.05~4.05 m 时, 船闸充水阀门采用 $t_v=7.00$ min 间歇开启, 停机开度 $n_1=0.35$, 停机时间 $t_1=2.00$ min, 泄水阀门采用 $t_v=7.50\sim 8.00$ min 连续开启; 2) 当下游水位在 4.05~3.32 m 时, 船闸充、泄水阀门后廊道顶均存在一定程度的负压, 结合本船闸阀门后平顶廊道体型与小淹没水深特点, 建议对充、泄水阀门段廊道进行维修改造, 采用门楣自然通气与廊道顶自然通气措施解决阀门底缘空化问题, 采用阀门门槽强迫通气措施解决平面阀门门槽空化问题。

6 结语

1) 研究提出该船闸下游水位比设计最低通航水位降幅不超过 1.0 m 时, 充水阀门采用 $t_v=7.00$ min 间歇开启, 停机开度 $n_1=0.35$, 停机时间 $t_1=2.00$ min; 泄水阀门采用 $t_v=7.50\sim 8.00$ min 连续开启。推荐阀门开启方式下, 原设计船型可正常通行过闸, 船舶吃水不超过 2.6 m, 船舶进出闸室的航速不大于 1.0 m/s。

2) 研究提出该船闸下游水位比设计最低通航水位降幅在 1.0~1.7 m 时, 在船闸水工结构、金属结构、闸室系船设施等运行条件满足要求的前提下, 还需对充、泄水阀门系统进行改造, 增设门楣与廊道顶通气措施, 以便解决超低水位下阀门容易出现的空化问题; 同时过闸船舶吃水需不超过 1.9 m, 船舶进出闸室的航速不大于 1.0 m/s。

参考文献:

- [1] 欧诚, 虞筱葭, 舒丹, 等. 长洲枢纽下游河床下切水位下降原因分析[J]. 水运工程, 2014(4): 138-142.
- OU C, TUO Y J, SHU D, et al. Causes analysis of undercutting water declining of Changzhou hub

downstream riverbed [J]. Port & waterway engineering, 2014(4): 138-142.

- [2] 庞雪松, 杜敬民, 假冬冬, 等. 西江长洲枢纽下游近坝段水位下降特征及调控措施[J]. 水利水运工程学报, 2014(3): 42-48.
- PANG X S, DU J M, JIA DD, et al. Water level drop characteristics and its control measures for lower near-dam reaches of Changzhou hydro-junction on the Xijiang River [J]. Hydro-science and engineering, 2014 (3): 42-48.
- [3] 马爱兴, 曹民雄, 胡颖, 等. 多重因素影响下西江长洲枢纽至界首段枯水位降落特征[J]. 中国水运(下半月), 2020(22): 97-98, 101.
- MA A X, CAO M X, HU Y, et al. Characteristics of low water level drop from Changzhou hub to Jieshou section of Xijiang River under the influence of multiple factors[J]. China water transport (the second half of the month), 2020(22): 97-98, 101.
- [4] 郑金海, 鲍仕昱, 张蔚, 等. 河床下切对珠江三角洲峰值水位演变的影响[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2022, 50(4): 1-6.
- ZHENG J H, BAO S Y, ZHANG W, et al. Effect of channel deepening on the evolution of peak water level in the Pearl River Delta [J]. Journal of Hohai University (natural sciences), 2022, 50(4): 1-6.
- [5] 尹斌勇, 文跃凌, 莫雄, 等. 长沙枢纽枯水期下游超设计低水位运行的影响及对策[J]. 水运工程, 2023(9): 158-164, 197.
- YIN B Y, WEN Y L, MO X, et al. Influence and countermeasures of lower reaches of Changsha Hub operation below design low water level in dry season[J]. Port & waterway engineering, 2023(9): 158-164, 197.
- [6] 扈晓雯, 汤暘, 芮德繁. 水口坝下水位治理工程建设必要性分析论证[J]. 大坝与安全, 2011(5): 1-2, 10.
- HU X W, TANG Y, RUI D F. Analysis on necessity of water level regulation project for Shuikou downstream hydro-junction[J]. Dam & safety, 2011(5): 1-2, 10.

(下转第 164 页)