



引江济汉通航工程高石碑船闸 输水系统布置

谢红¹, 刘本芹²

(1. 湖北省交通规划设计院, 湖北 武汉 430051;

2. 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: 根据引江济汉通航工程特点及船闸总体布置, 按照《船闸输水系统设计规范》的要求, 研究确定了高石碑船闸不设镇静段的短廊道集中输水系统形式, 计算了输水阀门处廊道断面的面积及输水系统特征尺寸, 并进行了输水水力计算。水力计算结果表明: 设计的船闸输水系统输水水力特性达到了预期的目标, 确定的输水阀门开启方式合理, 采用的双明沟消能布置适合高石碑船闸没有帷墙的工程特点。

关键词: 船闸; 输水系统; 设计

中图分类号: U 641.7

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2012)07-0135-05

Layout of filling and emptying system of Gaoshibei shiplock of water transfer project from the Yangtze River to Hanjiang river

XIE Hong¹, LIU Ben-qin²

(1. Hubei Provincial Plan Design Institute of Communications, Wuhan 430051, China; 2. Nanjing Hydraulic Research Institute, State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing 210029, China)

Abstract: According to the demands of the *Design Code for Filling and Emptying System of Shiplocks* and the layout characteristics of the shiplock of the water transfer project from the Yangtze River to Hanjiang river, this paper determines the type of filling and emptying system of Gaoshibei shiplock to be short-culvert concentrated filling and emptying system with no need of mitigative segment, calculates the area of the culvert transect at the valve and the key dimension of the filling and emptying system, and carries out hydraulic calculations of lock filling and emptying. The study results indicate that the hydraulic characteristics can fulfil the criteria and design demands and the valve opening modes are reasonable. Moreover, because there is no curtain wall at the lockhead, the double open ditch dissipation is suitable for Gaoshibei shiplock.

Key words: shiplock; filling and emptying system; design

引江济汉通航工程依托南水北调引江济汉工程同步建设, 在长江和汉江之间的江汉平原狭段构建了一条水运捷径, 能使长江、汉江中游的水运距离缩短约600 km, 也为江汉平原地区的物资对外交流提供了一条方便的通道。依据运河货运量发展需要和航运建设技术上的可行性、经济性,

以及交通部水运主通道的布局规划要求, 确定引江济汉通航工程的通航标准为限制性Ⅲ级航道, 通航1 000吨级双排单列一顶二驳船队, 通航保证率为97%, 设计船队尺度为160 m × 10.8 m × 2.0 m (长 × 宽 × 吃水), 出口高石碑船闸有效尺度为180 m × 23 m × 3.5 m (长 × 宽 × 门槛水深), 设计

收稿日期: 2012-03-02

作者简介: 谢红(1970—), 女, 高级工程师, 从事水运工程设计工作。

最大正、反向水头分别为0.5 m和-7.19 m，输水时间要求8~10 min。

该工程的最大特点是位于平原地区，船闸根据引水渠道和汉江水位的不同而具有双向水头，且闸首无可利用的帷墙构建消能室，故在进行船闸输水系统布置和研究时，必须设计布置合适的消能工来消能，使充水时闸室内水流条件满足通航安全要求，而船闸充水的水力特性除与输水系统布置有关外，还与输水阀门的开启方式和速度等密切相关。

1 输水系统形式的选择

高石碑船闸最大水头为7.19 m，属于中水头船闸，按输水时间上限10 min计算得出的输水系统选型系数大于3.5^[1]，为了节省工程量，设计采用集中输水系统形式，具体布置时采用降低初始波浪力的措施。

表1列出了国内部分已建水头较高、消能工性能较好的集中输水系统船闸的资料，本船闸的资料也列于表中。由表可见：1) 大部分船闸均利用帷墙构筑消能室，但本船闸无此条件；2) 本船闸的

表1 国内部分已建水头较高的集中输水系统船闸概况

船闸名称	闸室有效尺寸/m	设计船舶/t	设计水头/m	输水时间/s	消能形式	$m=T\sqrt{H}$	ϕ
连江	120×12×2.5	2×500	7.0	535	开敞式消能室	3.37	0.580
泗阳二线	230×23×5.0	2×2 000	7.0	650	封闭式消能室	4.09	0.380
高砂	130×12×2.5	2×300	11.5	735	复式格栅消能室	3.61	0.430
王甫洲	120×12×2.5	2×500	10.0	702	倒口消能室	3.70	0.580
凌津滩	120×12×2.5	2×500	13.2	702	倒口消能室	2.76	0.580
马回	130×16×2.5	2×500	14.2	642	封闭式消能室	2.84	0.430
濛里	140×14×2.5	2×300	9.0	550	复式格栅消能室	3.06	0.370
泗阳三线	260×23×5.0	2×2 000	7.0	480	局部分散	3.02	0.380
芒稻	230×23×4.0	2×1 000	8.5	600	格栅消能室	3.43	0.470
高石碑	180×23×3.5	2×1 000	7.16	600	待研究	3.73	0.537

注：1. 100 t船舶尺寸为26.7 m×6 m×1.08 m，2×300 t为70 m×9.2 m×1.4 m，2×500 t为90 m×10.8 m×1.6 m，2×1 000 t为135 m×10.8 m×2.0 m，2×2 000 t为135 m×15.6 m×2.8 m；2. ϕ 为闸室断面系数， $\phi=\chi/\omega$ ；3. $\phi=0.470$ 按并列2×1 000 t船队考虑。

闸室断面系数 ϕ 值较大，说明船闸充水时的初始波浪力较大，应充分研究降低初始波浪力的措施。

综合以上情况及其水力指标，结合引江济汉通航工程特点，本船闸集中输水系统形式采用短廊道输水。考虑到反向水头较大，为了达到减小初始波浪力的目的，在进行下闸首输水系统布置时，可适当在靠近闸首的闸室内布置出水段，以形成局部分散出水的效果，且可免除闸首的镇静段，船舶可直接停泊在闸首后方^[1-3]。

2 输水系统布置及各部位尺寸的确定

2.1 输水阀门处廊道断面面积的确定

根据JTJ 306—2001《船闸输水系统设计规范》^[4]，阀门处廊道断面面积可按下式进行计算：

$$\omega = \frac{2C\sqrt{H}}{\mu T\sqrt{2g}[1-(1-\alpha)k_v]} \quad (1)$$

式中： ω 为输水阀门处廊道断面面积（m²）； C 为

计算闸室水域面积（m²）； H 为设计水头（m）； μ 为阀门全开时输水系统的流量系数； T 为充水时间（s）； α 为系数（可查规范表）； k_v 为相对阀门开启时间； t_v 为阀门开启时间； g 为重力加速度（m/s²）。

对于高石碑船闸： $C=4\ 600\text{ m}^2$ ， $H=7.19\text{ m}$ ， $T=8\sim 10\text{ min}=480\sim 600\text{ s}$ ；根据已有研究成果资料取 $\mu=0.8$ ^[2]，查表得 $\alpha=0.53$ ，取 $k_v=0.8$ 。计算得 $\omega=23.23\sim 18.58\text{ m}^2$ ，故确定输水阀门处廊道断面高度为3.0 m，宽度为3.6 m，双边总断面面积为21.6 m²。

2.2 输水廊道及消能工布置

由于该船闸正向水头仅0.5 m，为节省工程开挖量，上闸首取廊道底高程为24.84 m，廊道顶高程27.84 m，最低水位时（28.54 m）淹没水深0.7 m。上闸首进水口前设高0.5 m的不对称消力槛，闸室内廊道出口前方同样布置高0.5 m的不对称消力槛。考虑到反向水头7.19 m时的运行工况要求，两

侧短廊道进口在反向水头运行时为出口, 因此由隔流墩分隔成两孔。

下闸首应按反向水头的运行工况要求进行布置, 两侧短廊道在闸室内以联接廊道相连, 联接廊道两侧设侧向出水孔, 支孔尺寸按规范及相关研究成果确定^[5], 出水口外设两道明沟消能, 下游引航道出水孔采用顶面出水, 其顶面出水孔按反向水头充水的要求设置。下闸首短廊道输水的平面布置见图1。高石碑船闸输水系统具体布置特性及尺寸见表2。

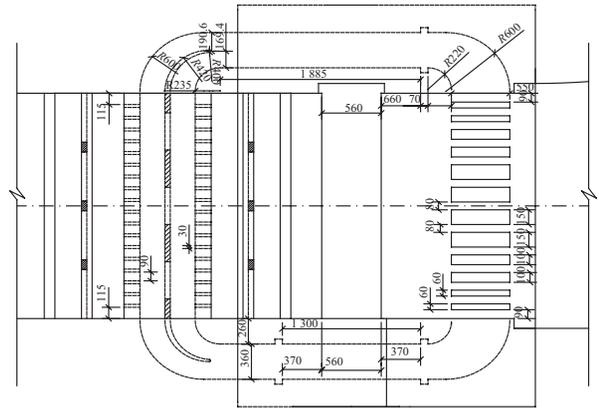


图1 下闸首输水系统平面布置

表2 高石碑船闸集中输水系统布置特征尺寸

闸首	部位	描述	面积/m ²	与输水阀门面积比
上闸首	进水口	侧面进水, 进水口廊道顶最小淹没水深3.37 m, 进水口前设高0.5 m 不对称消力槛	2 × 2 × 3.0 × 2.5 (高 × 宽) = 30	1.39
	阀门段廊道	紧接进口弯段, 廊道最小淹没水深3.37 m	2 × 3.0 × 3.6 (高 × 宽) = 21.6	1.00
	廊道出口	最小淹没水深3.37 m, 出水口前设高0.5 m的不对称消力槛	2 × 3.0 × 5.2 (高 × 宽) = 31.2	1.44
下闸首	进水口	联接廊道两侧设高2.5 m, 宽0.3 m侧向出水孔18个, 孔顶高程23.34 m, 出水孔进出口修圆, 修圆半径0.2 m, 出水孔中心间距1.2 m	2 × 18 × 2.5 × 0.3 (高 × 宽) = 27.0	1.25
	进水口明沟	采用双明沟消能, 明沟深分别为3.6 m, 3.8 m, 宽3.5 m, 闸室内纵向布置长度23.2 m		
	廊道进口及联接段	廊道进口设中间隔墩, 并与联接廊道中间隔墙相连, 中间隔墙上开孔	2 × 2 × 3.0 × 2.35 (高 × 宽) = 28.2	1.31
	阀门段廊道	紧接进口弯段, 最小淹没水深7.37 m	2 × 3.0 × 3.6 (高 × 宽) = 21.6	1.00
	出水口	采用顶面格栅出水孔出水	2 × 6.2 × 5.5 = 68.2	3.16

注: 最小淹没水深均为最大反向水头的工况。

3 输水水力特性计算分析

3.1 输水阀门开启方式和速度的确定

阀门开启方式关系到船舶纵向波浪力及闸室的输水时间, 首先由船舶初始波浪力确定允许的阀门匀速开启的全开时间, 然后再核算其输水时间能否满足要求, 若输水时间过长则应采用先慢后快的变速开启方式以满足其输水时间要求, 若输水时间过短则说明原设计的阀门段廊道面积太大应予以缩小^[6]。高石碑船闸正向水头较低 ($H=0.5$ m), 且闸室初始水深也较大 (5.66 m), 因此正向水头不是控制工况, 只需对反向最大水头进行计算。

根据《船闸输水系统设计规范》^[4], 匀速开启的允许阀门全开时间 t_v 可由下式确定:

$$t_v = \frac{k_r \omega DW \sqrt{2gH}}{P_L (\omega_c - \chi)} \quad (2)$$

其中:

$$D = \frac{1 + 2a\sqrt{\alpha} + 4b(\sqrt{\alpha} - \alpha\beta)}{1 + 2a} \quad (3)$$

$$a = l_B / l_C \quad (4)$$

$$b = l_H / l_C \quad (5)$$

$$\alpha = \frac{\omega_c - \chi}{\omega_c} \quad (6)$$

$$\beta = \frac{4\sqrt{\alpha}}{(1 + \sqrt{\alpha})^2} \quad (7)$$

式中: k_r 为系数, 对锐缘平面阀门可取值0.725; P_L 为船舶允许纵向力, 对1 000 t船舶 $P_L=32$ kN; ω 为阀门处廊道断面面积 (m^2), $\omega=21.6$ m^2 ; H 为设计水头 (m), $H=7.19$ m (反向水头); W 为船舶 (队) 排水量 (t), 取设计最大船队2 × 1 000 t, $W=2$ 700 t; ω_c 为闸室初始过水横断面面积 (m^2), $\omega_c=141.91$ m^2 ; χ 为船舶浸水横断面

积 (m²), $\chi=10.8 \times 2=21.6 \text{ m}^2$; t_v 为输水阀门开启时间

$$(\text{s}); \text{对双列船队} \alpha = \frac{141.91 \text{ m}^2 - 2 \times 21.6 \text{ m}^2}{141.91 \text{ m}^2} = 0.696,$$

$$\beta = \frac{4\sqrt{0.696}}{(1 + \sqrt{0.696})^2} = 0.99; l_c \text{为船舶(队)换}$$

算长度 (m), $l_c=125 \text{ m}$; l_B 为船首离上闸首距离, $l_B=0 \text{ m}$, 因此 $a=l_B/l_c=0$; l_H 为船尾离下闸首距离, $l_H=55 \text{ m}$; 因此 $b=l_H/l_c=0.44$ 。由此计算出双列 $2 \times 1000 \text{ t}$ 船队的波浪力系数 $D=1.26$ 。

需要说明的是, 上述波浪力系数值为对常规集中输水系统的计算结果, 即充水水流全部在船舶停泊段前进入闸室, 而高石碑船闸输水系统布置特点为充水水流在船舶停泊段内一定范围内分散进入闸室, 因此其波浪运动特性与常规的集中输水系统有所区别, 而具有局部分散输水系统的特性, 从而可降低其波浪力系数^[7]。本船闸位于闸室内的出水段长度为 18.2 m , 与闸室有效长度之比为 0.101 , 根据对局部分散输水系统的研究^[7], 可得对应于闸室内出水段的波浪力系数为集中输水系统的 0.753 倍, 因此闸室内出水段校正后的波浪力系数为 $D'=1.26 \times 0.753=0.95$, 进一步对闸首及闸室出水段按长度加权平均后的最终波浪力系数为 1.02 。

由式 (2) 计算得出满足闸室内波浪力要求所需的充水阀门全开时间 $t_v=162 \text{ s}$, 可见最大反向水头 7.19 m 时上游水位较高 (31.21 m), 闸室初始水

深较大 (6.17 m), 由此计算得出的输水阀门开启时间较短。由于输水时除了满足波浪力要求之外, 还必须满足消能要求, 经计算 $t_v=180 \text{ s}$ 时的输水最大流量、能量及平均流速均较大 ($Q_{\text{max}}=151.68 \text{ m}^3/\text{s}$, $E_{\text{max}}=7113 \text{ kW}$, $v_{\text{max}}=0.75 \text{ m/s}$), 这将会影响闸室局部水流^[1]。考虑到本船闸未设置镇静段, 且受横拉门门库影响两侧水流不对称, 从船舶停泊安全出发, 需要在满足输水时间的前提下, 通过适当调整阀门开启方式来保证闸室内水流条件满足船舶停泊要求。综合考虑波浪力、消能、闸室和引航道停泊条件及输水时间的要求, 确定高石碑船闸反向最大水头充泄水阀门开启方式分别为匀速开启 $t_v=6 \text{ min}$ 和 $t_v=4 \text{ min}$, 正向水头充泄水阀门开启方式均为匀速开启 $t_v=2 \text{ min}$ 。

3.2 水力计算分析

采用数学模型进行水力计算, 根据其基本方程和计算方法^[8], 建立船闸输水数学模型, 充泄水水力特性计算针对正、反向最大水头两种工况: 1) 反向最大水头 7.19 m , 对应上下游水位 $31.21 \sim 38.4 \text{ m}$; 2) 正向水头 0.50 m , 对应上下游水位 $31.20 \sim 30.70 \text{ m}$ 。充泄水阀门不同开启方式的闸室水位变化过程线、流量变化过程线以及闸室的充泄水时间、最大流量、最大能量及最大断面平均流速等水力特征值等计算结果见表3, 典型的水力特性曲线见图2和3。

表3 闸室输水水力特征值

水头/m	输水工况	阀门开启方式	输水时间/s	最大流量/(m ³ ·s ⁻¹)	最大能量/kW	$v_{\text{max}}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$
反向7.19	充水	匀速开启 $t_v=6 \text{ min}$	488	115.89	4 847	0.53
	泄水	匀速开启 $t_v=4 \text{ min}$	432	137.89	6 098	1.02
正向0.5	充水	匀速开启 $t_v=2 \text{ min}$	138	26.85	76.57	0.20
	泄水	匀速开启 $t_v=2 \text{ min}$	138	26.85	76.57	0.22

注: v_{max} 为充水指闸室断面最大平均流速, 泄水指低水位侧的闸首出口断面最大平均流速。

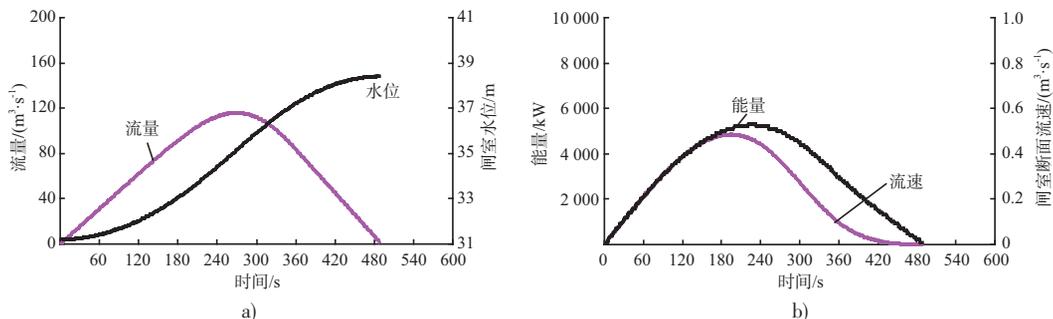


图2 船闸充水水力特性过程线 (反向水头7.19 m)

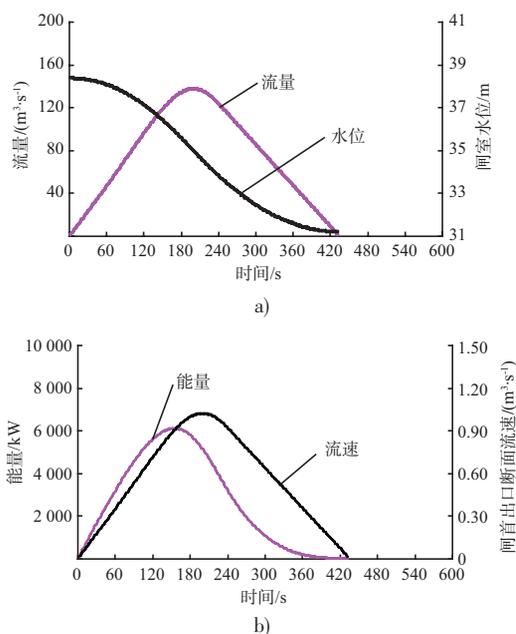


图3 船闸泄水水力特性过程线(反向水头7.19 m)

由图表可见,反向水头充水阀门开启时间 $t_v=360$ s时, $k=t_v/T=0.738$,在集中输水船闸充水阀门的合理范围(0.6~0.8)之内,输水时间488 s可满足设计要求,而 $v_{\max}=0.53$ m/s属中等充水强度,可满足此类输水系统消能形式要求,保证船舶停泊安全,此时计算得高水位侧的引航道最大平均流速为0.22 m/s,满足设计规范小于0.5~0.8 m/s的要求。 $t_v=360$ s泄水时的输水时间为432 s,较设计要求有较大的减少,闸首出口断面最大流速为1.02 m/s,泄水强度较低,可满足较简单的消能工要求,计算得低水位侧的引航道最大流速为0.59 m/s,满足设计规范小于0.8~1.0 m/s的要求^[1,4]。

正向水头阀门开启时间 $t_v=120$ s时, $k=t_v/T=0.87$,阀门开启时间小于闸室输水时间,各项水力指标均很小,若阀门开启时间更长,则计算得出闸室输水时间将小于阀门开启时间,不尽合理。

上述水力计算结果表明,研究确定的输水系统布置及阀门开启方式是合适的。

4 结语

根据交通部内河水运主通道规划,引江济汉

通航工程的通航标准为限制性Ⅲ级航道,船闸有效尺度为180 m×23 m×3.5 m(长×宽×门槛水深),出口高石碑船闸具有规模较大,要求输水时间较短,水力指标较高,双向水头运行,闸首无帷墙可供构筑消能室等特点,因此其采用集中输水系统布置的难度较大。

本文根据《船闸输水系统设计规范》和局部分散输水系统的水力特点,研究提出了高石碑船闸新型短廊道输水双明沟消能的集中输水系统布置形式,计算了输水阀门处廊道断面面积,设计和确定了输水廊道和各部位的尺寸,研究了输水阀门开启方式,并计算了输水水力特性。水力计算分析表明:设计的船闸输水系统输水水力特性达到了预期的目标,确定的输水阀门开启方式合理。提出的新型短廊道集中输水系统可不需要设置镇静段,具有减少工程费用、节省船闸运行耗水、降低充水时闸室内初始波浪力等优点,双明沟消能布置适合高石碑船闸没有帷墙的工程特点。

参考文献:

- [1] 黄岳,刘本芹.引江济汉通航工程出口高石碑船闸输水系统布置和水力计算分析[R].南京:南京水利科学研究院,2008.
- [2] 宣国祥,刘本芹.引江济汉通航工程进口龙洲垸船闸输水系统水力学模型试验研究[R].南京:南京水利科学研究院,2008.
- [3] 刘本芹,宣国祥.可不设镇静段的船闸集中输水系统研究[J].水运工程,2008(11):139-143.
- [4] JTJ 306—2001 船闸输水系统设计规范[S].
- [5] 黎贤访.船闸闸墙廊道侧支孔输水系统水力学研究[D].南京:南京水利科学研究院,2008.
- [6] 宗慕伟,凌国增,刘本芹,等.集中输水系统船闸阀门缓变速开启方式的研究[J].水道港口,2006(5):306-310.
- [7] 宗慕伟,刘本芹,徐新敏.局部分散输水系统的水力特性与应用[J].水利水运工程学报,2005(S1):64-69.
- [8] 须清华,张瑞凯.通航建筑物应用基础研究[M].北京:中国水利水电出版社,1999.

(本文编辑 武亚庆)