



中水头巨型船闸闸墙长廊道侧支孔 输水系统水动力学研究*

宣国祥, 李君, 黄岳, 刘本芹, 祝龙

(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,
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: 闸墙长廊道侧支孔输水系统, 因其相对于集中输水系统更优的水流条件以及相对其他分散输水系统更简单的结构和更低的建设维护成本, 而广泛应用于中水头大型船闸中。近年来, 湘江航运干线设计和建设了4座中水头巨型船闸, 该输水系统能否满足巨型船闸高输水能量下的船闸自身与过闸船舶安全要求需要加以研究论证。本文以大源渡二线船闸为例, 通过1:30物理模型试验, 对其闸室船舶停泊条件、输水水力特性及引航道水流条件进行研究。结果表明: 在推荐的消能布置和阀门开启方式下, 各项指标均能满足规范和设计要求。

关键词: 船闸; 闸墙长廊道侧支孔输水系统; 水动力学; 船舶停泊条件; 模型试验

中图分类号: U 641

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2016)12-0036-06

Hydrodynamic study of wall-culvert side-port filling and emptying system in medium-head huge lock

XUAN Guo-xiang, LI Jun, HUANG Yue, LIU Ben-qin, ZHU Long

(Nanjing Hydraulic Research Institute, State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering,
Key Laboratory of Navigation Structure Construction Technology, Ministry of Transport, PRC, Nanjing 210029, China)

Abstract: Due to the better flow condition compared with through-the-head filling and emptying system, and the simpler structure and lower construction and maintenance cost compared with other dispersed filling and emptying system, the wall-culvert side-port filling and emptying system is widely used in medium-head large ship locks. In recent years, four huge locks have been designed or constructed on the Xiangjiang river, and it should be studied and verified that whether the above system can satisfy the safety needs of lock and ship under such huge flow energy. Based on Dayuandu 2nd lane lock, the ship berthing condition in lock chamber, the hydrodynamic characteristics and flow conditions in approach channels are all studied by a 1:30 scaled physical model. The results indicate that, all key parameters can satisfy the needs of codes and design under the recommended energy dissipation layout and valve opening patterns.

Keywords: ship lock; wall-culvert side-port filling and emptying system; hydrodynamics; ship berthing condition; model test

1 闸墙长廊道侧支孔输水系统发展现状

闸墙长廊道侧支孔输水系统属于船闸第一类分散输水系统, 由布置在闸墙中贯通上下游并设

置了一系列侧向出水支孔的输水廊道组成, 充、泄水时水流经闸墙廊道上的侧向出水支孔分散进入闸室, 其输水水力性能较水流集中在闸首附近

收稿日期: 2016-09-19

*基金项目: 国家重点研发计划 (2016YFC0402001); 交通运输部科技项目 (2013328746550)

作者简介: 宣国祥 (1962—), 男, 教授级高级工程师, 从事船闸输水系统、枢纽及鱼道水力学研究。

进出闸室的集中输水系统有较大的提高, 而其结构由于在闸室底部没有廊道因而比其他分散输水系统更简单, 与集中输水系统相比虽然闸墙工程量因有廊道有所增大, 但因其可以不设镇静段而缩短了闸室长度, 所以工程量并未显著增加, 尤其当船闸水头达 10 m 左右时, 其性价比将明显优于集中输水系统。因此, 它是一种适合中等水头、重力式闸墙的较优的船闸输水系统形式。但该输水系统形式对阀门单边运行的适应性较差, 阀门单边运行时一侧完全无水出流, 另一侧即进出水侧出水支孔的水流经消力槛消去部分能量后继续冲至对面闸墙, 在闸室内形成横向水面坡降, 从而使船舶所受的横向力较大。

闸墙长廊道侧支孔输水系统在 20 世纪初首先在美国纽约州驳船运河船闸上得以应用, 尤其在 30 年代开始得到广泛应用, 目前美国 50% 以上的船闸均采用此种输水系统。该输水系统形式在美国应用最广泛的水头范围为 3~12 m, 占该类型总数的 80% 以上, 美国陆军工程兵团船闸设计手册^[1]中规定水头大于 12 m 的船闸不推荐使用闸墙长廊道侧支孔输水系统, 对巨型船闸(闸室尺度达 366 m×34 m)仅推荐应用于水头小于 9.2 m, 从 20 世纪 70 年代开始美国已没有水头大于 12 m 的船闸采用这种形式。

我国对闸墙长廊道侧支孔输水系统的研究及应用始于 20 世纪 70 年代。第 1 座通过试验研究采用该输水系统的为 1989 年建成的广西西江桂平一线船闸^[2], 这也是我国第 1 座在干流航道上采用该形式的大型船闸。该船闸的建成及其良好的运行水力特性开始引起我国水运界的注意。随后陆续建成了西江贵港一线和长洲 2[#]、右江那吉、金鸡滩和鱼梁、郁江老口、乌江彭水、汉江崔家营、湘江大源渡一线、株洲一线、土谷塘和长沙双线、嘉陵江红岩子和桐子壕、沙颖河沈丘、北江白石窑和清远和松花江大顶子山等船闸, 并有郁江邕宁、闽江水口坝下、岷江东风岩和龙溪口、赣江新干、湘江大源渡二线、株洲二线和引江济淮蜀山等多座船闸正在设计和施工中。国内部分

已建和在建采用闸墙长廊道侧支孔输水系统的大型船闸见表 1。

表 1 国内采用闸墙长廊道侧支孔输水系统大型船闸

船闸名称	闸室尺寸 (长×宽)/(m×m)	最大 水头/m	一次输水 体积/m ³	一次输水平 均能量/kW
桂平一线	190×23	11.69	51 085	5 424
贵港一线	190×23	13.1	57 247	6 420
大源渡一线	180×23	11.2	46 368	4 880
长洲 2 [#]	190×23	15.55	67 954	8 887
那吉	190×12	13.91	31 715	4 043
金鸡滩	190×12	13.80	31 464	4 142
老口	190×23	14.44	63 103	9 311
大顶子山	180×28	8.0	40 320	3 296
依兰	180×28	9.5	47 880	4 648
崔家营	180×23	8.82	36 515	3 291
清远	180×23	9.3	38 502	3 252
东风岩*	200×34	16.0	108 800	14 231
龙溪口*	200×34	10.0	68 000	5 559
新干*	230×23	10.05	53 165	5 460
土谷塘	180×23	10.1	41 814	3 836
长沙双线	280×34	9.3	88 536	8 414
株洲二线*	280×34	10.7	101 864	8 910
大源渡二线*	280×34	11.3	107 576	9 938

注: * 船闸在建。

由表 1 可知, 目前国内采用闸墙长廊道侧支孔输水系统船闸中规模最大为湘江长沙双线船闸、株洲二线船闸和大源渡二线船闸, 其规模与三峡船闸规模一致, 属于巨型船闸范畴; 有 6 座船闸水头已突破美国船闸设计手册规定, 已建最高水头船闸为长洲 2[#]船闸达 15.55 m^[3]; 一次性输水体积和平均能量最大的船闸为岷江东风岩^[4], 但要说明的是, 该船闸由于特殊的地质条件, 其闸室初始水深达 10 m, 与其他船闸相比在消能方面有较大优势, 因此可采用较为简单的闸墙长廊道侧支孔输水系统形式, 因而该船闸不具备代表性。其次为湘江大源渡二线和株洲二线船闸, 两者一次输水体积达到 10 万 m³级, 一次输水平均能量则达到 1 万 kW 级, 输水过程闸室水流消能与船舶停泊安全问题十分突出。如何在采用简单分散输水系统的同时确保船闸及过闸船舶安全是需要深入研究的内容。

以水力指标最高的大源渡二线船闸为例, 研

究中水头巨型船闸闸墙长廊道侧支孔输水系统水动力特性与船舶停泊条件。

2 中水头巨型船闸闸墙长廊道侧支孔输水系统布置

闸墙长廊道侧支孔输水系统布置除遵守规范^[5]要求外还宜遵循以下原则：1) 闸墙主廊道面积宜为阀门段廊道面积的1.25~1.30倍；2) 侧支孔总面积宜为闸墙主廊道面积的0.95左右；3) 若侧支孔采用不同面积分组布置，顺水流方向首末

出水支孔面积比宜在1.2左右；4) 闸室内消力槛高度宜在0.5倍侧支孔高度左右，距闸墙距离宜在2~3倍侧支孔高度左右^[6]；5) 闸墙主廊道淹没水深与最大水头比宜大于0.02；6) 充泄水阀门段廊道淹没水深与最大水头比宜大于0.20。

根据大源渡二线船闸基本资料，按照规范要求 and 上述原则，对该船闸输水系统进行设计。典型断面布置及尺寸见表2，输水系统整体布置见图1，闸室断面消能布置见图2。

表2 大源渡二线船闸输水系统特征尺寸

部位	特征	面积/m ²	与输水阀门面积比
进水口	导墙垂直6支孔进口，孔宽2.5 m，孔高5.0 m，进口顶高程42.50 m，喉部高度不变、宽度分级收缩	150.0	3.33
鹅颈管	廊道宽4.5 m，廊道高5.0 m，平均转弯半径7.5 m	45.0	1.00
充水阀门段廊道	廊道宽4.5 m，廊道高5.0 m，阀门顶高程35.30 m，淹没水深3.5 m	45.0	1.00
闸墙主廊道	通过水平和垂直转弯，上与充水主廊道、下与泄水主廊道相连接，廊道宽5.5 m，廊道高5.0 m	55.0	1.22
闸室出水支孔	自上游向下游分3组，每组8孔，孔口高度均为1.25 m，宽度分别为1.0 m、0.9 m、0.8 m，间隔8.5 m，总长204.0 m，占闸室有效长度73.0%	54.0	1.20
消力槛	闸室内距离闸墙边3.0 m处各设1道消力槛，槛高及宽均为0.5 m		
泄水阀门段廊道	廊道宽4.5 m，廊道高5.0 m，阀门顶高程33.30 m，淹没水深5.5 m	45.0	1.00
出水口	将出水口面积放大2.4倍，并设中间导墙；消能室内设3道挑流坎，顶部设置40个等面积出水孔，孔宽0.7 m，孔长5.4 m	151.2	3.36

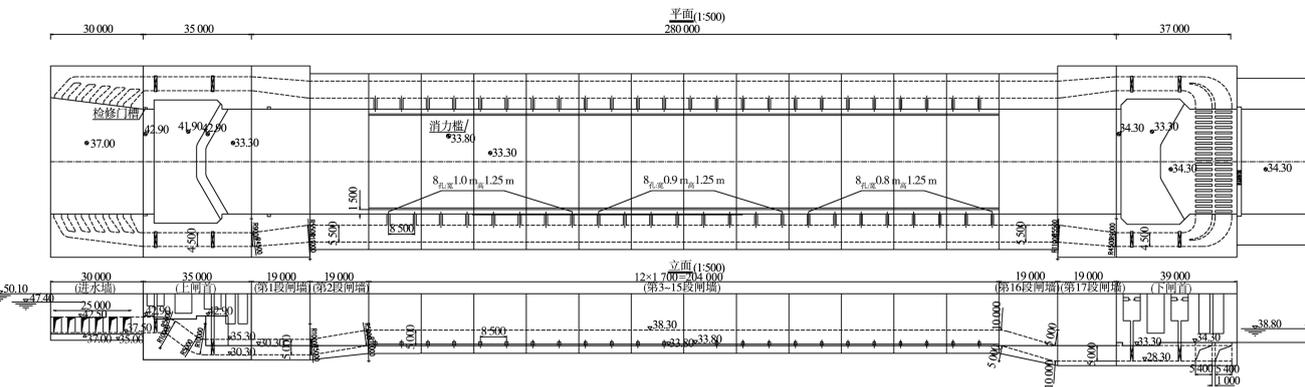


图1 大源渡二线船闸闸墙长廊道侧支孔输水系统布置 (尺寸: mm; 高程: m。下同)

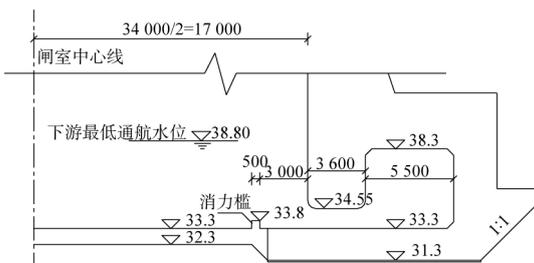


图2 大源渡二线船闸闸室断面消能初始布置

3 闸室输水过程水动力学模型试验

为研究中水头巨型船闸闸墙长廊道侧支孔输水系统输水过程中水动力特性及船舶停泊条件，建立了大源渡二线船闸1:30整体物理模型，分别针对该船闸以下3种主要水位组合工况开展研究：1) 常水头工况：上游正常蓄水位(50.10 m)至下一梯级正常蓄水位(40.50 m)，水头9.6 m；2) 最大

设计水头工况: 上游正常蓄水位(50.10 m)至下游最低通航水位(38.80 m), 水头 11.3 m; 3) 上游引航道水流条件控制工况: 上游最低通航水位(47.40 m)至下游最低通航水位(38.80 m), 水头为 8.6 m。其中水位组合 1 为正常运行工况, 输水时间按 9~10 min 控制, 水位组合 2 和水位组合 3 为较少发生工况, 输水时间按 10~12 min 控制。

3.1 闸室船舶停泊条件

船闸输水过程中闸室内船舶(队)停泊条件主要受充水工况控制, 对大源渡二线船闸而言, 由于不同水位组合工况要求的输水时间不同, 船舶

停泊条件控制工况应为常水头工况及最大水头设计工况。对于闸室内水流分配, 在输水系统布置时已进行了考虑(侧支孔分组布置及消力槛设置), 以改善船舶在闸室中的停泊条件。通过观测闸室水流条件及船舶系缆力初步试验, 发现上述布置取得了较好效果, 闸室内未见明显纵向水流, 但仍存在一定的横向水面坡降, 因而对闸室内消力槛位置进行优化调整, 最终推荐布置在出水孔外 1.5 m 处。在此布置条件下, 又分别针对上述两种充水工况, 进行了设计 2×2 000 t 顶推船队及 1 000 t 单船的系缆力测试, 实测船舶最大纵向力和横向力见表 3。

表 3 双边开启方式闸室内船舶(队)最大系缆力

输水工况	船舶(队)类型	t_v/min	船舶(队)停泊位置	纵向力/kN	前横向力/kN	后横向力/kN
常水头	2×2 000t 船队	6	闸室前段	26.5	11.6	20.2
			闸室中间	24.1	20.9	21.4
			闸室后段	28.3	22.7	21.2
		7	闸室前段	19.2	12.1	17.9
			闸室中间	22.8	18.2	17.1
			闸室后段	24.9	19.3	16.3
	1 000 t 单船	6	闸室前段	8.3	8.1	14.3
			闸室中间	10.0	10.0	7.5
			闸室后段	8.7	9.4	4.3
		7	闸室前段	6.4	7.3	12.4
			闸室中间	9.8	8.8	8.1
			闸室后段	6.7	6.2	6.1
最大设计 水头	2×2 000 t 船队	$t_v = 7 \text{ min}$	闸室前段	26.0	15.0	18.2
		$n = 0.15$	闸室中间	35.2	16.3	19.7
		$t_j = 4 \text{ min}$	闸室后段	33.3	20.0	15.0
		11	闸室前段	13.8	14.1	19.2
			闸室中间	19.9	20.0	19.8
			闸室后段	20.5	19.8	17.4
	1 000 t 单船	$t_v = 7 \text{ min}$	闸室前段	5.8	7.4	17.9
		$n = 0.15$	闸室中间	10.7	11.3	13.7
		$t_j = 4 \text{ min}$	闸室后段	8.3	11.4	5.9
		11	闸室前段	5.6	5.5	12.7
			闸室中间	6.6	8.4	8.0
			闸室后段	5.3	7.5	5.2

注: 2 000 t 船舶的纵向力允许值为 40 kN, 横向力允许值为 20 kN; 1 000 t 船舶的纵向力允许值为 32 kN, 横向力允许值为 16 kN。

由表 3 可知: 1) 常水头双边阀门充水工况下, 推荐布置下各阀门开启方式下 1 000 t 单船系缆力均能够满足规范要求, 但在阀门 6 min 开启时 2×2 000 t 船队横向系缆力则超过了规范允许值,

其余工况下 2×2 000 t 船队系缆力均能满足规范要求。当充水阀门开启时间不慢于 7 min 时, 设计船队及单船的纵向及横向系缆力均小于规范规定的允许值。2) 最大设计水头工况下, 由于其水头较

常水头工况增加 1.7 m, 一次输水体积则增大了 17 000 m³左右, 因而进入闸室内的水流能量将大幅增加, 这将给闸室消能提出了更高要求, 若仍采取常水头工况下的阀门开启方式, 其闸室内船舶停泊条件可能难以满足规范要求, 为此开展了阀门慢速开启方式下及阀门间歇开启方式($t_v=7$ min, 停机开度 $n=0.15$, 停机时间 $t_j=4$ min) 的船舶停泊条件试验。结果表明: 推荐布置下上述阀门开启方式下 2×2 000 t 船队系缆力均能够基本满足规范要求, 但在阀门间歇开启充水工况下 1 000 t 单船横向系缆力则超过了规范允许值, 其余工况下 1 000 t 单船系缆力均能满足规范要求。当充水阀门匀速开启时间不快于 11 min 时, 设计船队及单船的纵向及横向系缆力均小于规范规定的允许值。

试验中对单边阀门充水工况(检修工况或非正常运行工况)亦开展了研究, 与前面介绍的闸墙长廊道侧支孔输水系统缺点一致, 试验测得单边阀门 7 min 匀速开启时设计 2×2 000 t 船队的横向系缆力已超过了 100 kN, 远超过了规范允许值, 即使阀门开启速度继续降低也无法使船舶横

向系缆力大幅降低, 因而, 单边充水工况下采用匀速开启方式无法满足要求。为此, 还进行了阀门间歇开启方式的研究, 最终发现在采用 $t_v=7$ min, $n=0.35$, $t_j=30$ min 的阀门开启方式后, 设计船舶的横向系缆力才能基本满足规范要求。由于大源渡二线船闸阀门采用平板门形式, 若平板阀门在小开度情况下停机 30 min 甚至更长时间, 将对阀门工作条件以及阀门启闭系统运行造成极为不利的影 响。考虑到大源渡二线船闸建成后, 大源渡枢纽有两座船闸投入运行, 两座船闸输水阀门同时出现故障或同时处于检修状态的几率较小, 因而建议, 当一线船闸一侧输水阀门需要检修时, 不要使该线船闸处于单边输水工况, 可令船舶暂时通过另一线船闸过坝, 以确保过闸船舶安全以及输水阀门及其启闭系统的运行安全。如有特殊情况, 则建议通过现场调试来确定实际运行方案。

3.2 闸室输水水力特性

常水头工况和最大设计水头下闸室输水主要水力特征值见表 4。

表 4 闸室输水水力特征值

输水工况	输水方式	t_v /min	T /min	Q_{\max} /(m ³ /s)	v_{\max} /(m/s)	U_{\max} /(m/min)	d /m
常水头工况	充水	7	8.94	306	1.75	1.07	+0.31
		8	9.41	278	1.59	1.02	+0.32
	泄水	5	9.72	291	1.66	0.99	-0.24
		6	10.10	270	1.54	0.95	-0.22
最大设计水头工况	充水	11	11.54	265	1.51	0.98	+0.24
		12	11.97	250	1.43	0.94	+0.25
	泄水	5	10.06	319	1.82	1.12	-0.26
		6	10.54	299	1.71	1.07	-0.28

注: t_v 为阀门开启时间, T 为闸室输水时间, Q_{\max} 为最大流量, U_{\max} 为闸室水面最大上升(下降)速度, d 为惯性超高(降)。

由表 4 可知: 1) 常水头工况下, 输水阀门开启时间只要小于 9 min, 输水时间即可满足设计要求的 9~10 min, 说明所设计的输水系统各部分尺寸基本合理。若充水阀门采用 7 min 匀速开启、泄水阀门采用 5 min 匀速开启时, 平均输水时间为 9.33 min, 且输水系统各项水力指标及闸室内船舶停泊条件均满足规范要求。2) 最大设计水头工况

下, 输水阀门开启时间只要小于 13 min, 输水时间即可满足设计要求的 10~12 min, 说明所设计的输水系统各部分尺寸基本合理。若充水阀门采用 11 min 匀速开启、泄水阀门采用 5 min 匀速开启时, 平均输水时间为 10.80 min, 且输水系统各项水力指标及闸室内船舶停泊条件均满足规范要求。3) 常水头工况充水时闸室的惯性超灌值及

最大水头工况泄水时惯性超泄值均超过了规范要求, 实际运行中可根据实际情况采用提前关闭充、泄水阀门并在水位齐平时打开人字门的措施加以解决。

综合闸室内船舶停泊条件试验成果及闸室输水水力特性试验成果, 初步推荐常水头工况阀门运行方式为: 充水阀门采用 7 min 的匀速开启方式、泄水阀门采用 5 min 的匀速开启方式; 推荐最

大设计水头工况(以及上游引航道水流条件控制工况)阀门运行方式为: 充水阀门采用 11 min 的匀速开启方式、泄水阀门采用 5 min 的匀速开启方式。

3.3 引航道水流条件

常水头工况、最大设计水头工况及上游引航道水流条件控制工况下推荐阀门开启方式下上、下游引航道最大断面平均流速值见表 5。

表 5 引航道最大断面平均流速

阀门开启方式	开启时间	m/s					
		常水头工况		最大设计水头工况		上游引航道水流条件控制工况	
		上游引航道	下游引航道	上游引航道	下游引航道	上游引航道	下游引航道
充水	7 min/11 min	0.30		0.26		0.30	
泄水	5 min		0.38		0.59		0.55

由表 5 可知, 大源渡二线船闸与已建一线船闸共用引航道, 常水头工况与最大设计水头工况上游引航道过水横断面面积为 1 035 m², 上游引航道水流条件控制工况上游引航道过水横断面面积为 705 m², 常水头工况下游引航道过水横断面面积为 758.15 m², 最大设计水头工况和上游引航道水流条件控制工况下游引航道过水横断面面积为 539.7 m²。由于过水断面面积均较大, 所以在推荐的阀门开启方式下, 各种水位组合工况的上下游引航道水流条件均能满足规范要求。

4 结语

1) 与其他分散输水系统相比, 闸墙长廊道侧支孔输水系统具有结构简单、建设难度小、维护成本低等优势, 在采用合适的消能方式和阀门开启方式条件下, 该输水系统中水头巨型船闸中的应用是切实可行的。

2) 对于大源渡二线船闸: 常水头工况, 推荐充、泄水阀门开启时间分别为 7 min 和 5 min; 最大设计水头工况和上游引航道水流条件控制工况, 推荐充、泄水阀门开启时间分别为 11 min 和 5 min; 无论何种工况, 不建议使用单边阀门进行闸室充泄水。

3) 推荐阀门开启方式下, 输水系统各项水力特征值和船舶停泊条件均满足规范和设计要求。

4) 鉴于大源渡二线船闸为中水头巨型船闸, 而船闸输水系统水力学模型又存在一定的缩尺影响, 原型水力指标更高。因而建议: ①输水阀门启闭时间留有余地(充、泄水阀门启闭时间在 4~12 min 内可调), 以便根据原型水流条件调整运行方式; ②进行水力学原型调试, 为船闸的运行和管理规程提供必要的技术资料 and 依据。

参考文献:

- [1] US Army Corps of Engineers. 2001 Hydraulic Design of Navigation Locks[S].
- [2] 宗慕伟, 徐新敏. 广西西江桂平船闸输水系统方案选择水工模型试验报告[R]. 南京: 南京水利科学研究所, 1983.
- [3] 宣国祥, 李中华. 广西长洲水利枢纽船闸输水系统模型试验研究[R]. 南京: 南京水利科学研究所, 2003.
- [4] 徐新敏, 宣国祥. 岷江东风岩船闸输水系统水力学模型试验研究[R]. 南京: 南京水利科学研究所, 2011.
- [5] JTJ 306—2001 船闸输水系统设计规范[S].
- [6] 李凯. 闸墙长廊道侧支孔输水系统布置形式及消能效果研究[D]. 南京: 重庆交通大学, 2008.