



船闸闸室横支廊道布置及水流特性研究

刘本芹, 黄岳, 宣国祥

(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: 船闸闸墙长廊道闸室中部横支廊道输水系统可以较好地适应中高水头、闸室尺度大及闸室长宽比小等船闸特点, 但如何使闸室纵、横向水流分布均匀一直是此类型输水系统需要解决的关键技术难题。本文针对闸室中部横支廊道群及单根横支廊道, 分别建立了两座不同比尺的局部物理模型, 重点从横支廊道进口布置、首末端断面面积比、侧支孔尺寸特征、消能方式等方面, 研究了横支廊道布置及水流分布特性, 提出了相关布置要点及一般布置原则, 并通过整体模型船舶系缆力试验验证了闸室停泊条件。结果表明, 提出的闸室中部横支廊道布置是合适的, 充水时闸室纵横向水流分布基本均匀, 船舶系缆力满足规范要求。

关键词: 船闸; 输水系统; 横支廊道; 布置; 水流特性

中图分类号: U 641

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2014)05-0097-05

Study on layout and flow characteristics of lock bottom lateral culvert

LIU Ben-qin, HUANG Yue, XUAN Guo-xiang

(Key Laboratory of Navigation Structure Construction Technology, Ministry of Transport, PRC,

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

Abstract: Lock wall longitudinal culvert bottom lateral system can commendably adapt to shiplocks which have high lift, large chamber or small ratio of chamber length to width. But how to acquire symmetrical flow distribution in lock chamber is always a key technical problem that need to be solved. In this paper, two local physical models with different scales have been built for group of lock bottom lateral culverts and single lateral culvert. Layout and flow characteristics of lock bottom lateral culverts are studied by physical model experiment, especially including the inlet layout, area ratio between the beginning and the end cross section, dimension characteristics of side ports, energy dissipation modes, etc. Furthermore, main points and general items for layout of lateral culverts have been put forward, and mooring conditions of ship in lock chamber are also confirmed by hawser forces experiments in the whole physical model. Research results show that the layout of lock bottom lateral culverts is appropriate, flow distribution in lock chamber is symmetrical during lock filling, and the hawser forces on barge tows accord with requirements of criterion.

Key words: shiplock; filling and emptying system; lateral culvert; layout; flow characteristics

船闸闸墙长廊道闸室中部横支廊道输水系统是我国船闸输水系统设计规范中的第二类分散输水系统形式, 能够较好地适应中高水头、闸室尺度大及闸室长宽比小等船闸特点^[1]。近年来随着我国内河水运事业的迅猛发展, 船闸水头及闸室

平面尺度逐步增大, 为了满足较高的船闸设计水力指标, 闸墙长廊道闸室中部横支廊道输水系统得到了更为广泛的研究与应用, 但如何使闸室纵、横向水流分布均匀一直是此类型输水系统需要解决的关键技术难题。在实际工程中往往需要进行

收稿日期: 2013-09-25

作者简介: 刘本芹 (1977—), 女, 高级工程师, 从事通航建筑物水力学科研究工作。

详细的输水系统整体物理模型试验研究,在模型中对横支廊道布置进行反复多次修改与调整,才能使闸室内的船舶停泊条件满足要求。本文针对中高水头大尺度船闸(水头 11 ~ 25 m, 闸室宽度 34 m),通过横支廊道局部物理模型试验,研究了船闸闸室横支廊道水流特性及一般布置原则。

1 闸室横支廊道布置形式

船闸闸室长廊道闸室中部横支廊道输水系统主要有图 1 中的 2 种布置方式,分别为闸室中段横支廊道交错布置和横支廊道前后分组布置,后者由一侧主廊道与上半闸室中部的横支廊道相连接,另一侧主廊道与下半闸室中部的横支廊道相接,正常运转时在减小波浪力方面比前者好,但当二侧输水阀门未能达到同步时造成波浪力的成倍增加而容易发生事故,更不允许单侧阀门开启。我国船闸设计中采用较多的为闸室中部横支廊道交错布置方式,通常设置 1 组或 2 组横支廊道群,这样即使双侧阀门开启不同步,甚至是单侧开启阀门,也基本不会影响闸室内船舶停泊条件,相反由于阀门不同步开启,起始流量增率及最大流量减小,减小了水面坡降,减轻了局部水流作用,闸室内船舶受力反而可以有所减小。此外,为适应船闸工程布置特点及地势条件,也可为单侧闸室廊道中部连接闸室横支廊道布置,我国嘉陵江草街船闸的输水系统便采用这种布置形式^[2]。

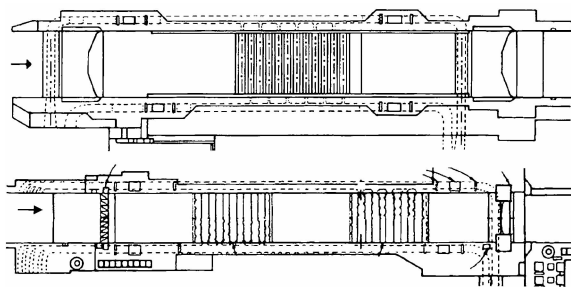


图 1 船闸闸室长廊道闸室中部横支廊道输水系统

20 世纪美国对闸室长廊道闸室中部横支廊道输水系统布置进行了大量试验研究,认为横支廊道布置在上闸首后闸室长度的 28% ~ 35% 处较为合适,设有 2 组横支廊道时,每组横支廊道中心

则分别位于闸室长度的 1/4 和 3/4 处,同时闸室中部横支廊道群占闸室长度的一半左右比较适宜,这样在具体应用中可兼顾半船队、单船及泄水涌波^[3]。我国首座采用闸室长廊道闸室中部横支廊道输水系统形式的船闸是桂林春天湖船闸,该船闸是一座微型双线旅游船闸,采用了不同的横支廊道进口面积和阶梯型变断面横支廊道体型来调整横支廊道的流量分配及出流特性^[4]。长洲 1 号船闸是采用闸室长廊道闸室中部横支廊道输水系统的已建船闸中平面尺度最大的船闸,闸室有效长度和宽度分别达 200 m 和 34 m,为了调整大尺度闸室内的纵横向水流分布,采用了单侧阶梯型变断面横支廊道、交错布置的横支廊道中间隔墙开孔、侧向出水孔外布置挡水槛等多种措施^[5]。岷江犍为船闸和老木孔船闸均在闸室中部设置了两组横支廊道,每组 8 根横支廊道交错布置,采用锥形变断面横支廊道及不同的横支廊道进口圆弧半径等方式调整水流分布^[6-7]。此外,明沟消能是闸室长廊道闸室中部横支廊道输水系统常用的效果较好的闸室水流消能方式。

研究表明,对于闸室宽度为 34.0 m 左右的大尺度船闸,当闸室有效长度大于 250.0 m 时,闸室中部设置两组横支廊道群更有利于闸室内的水流分布及船舶安全停泊;而当闸室有效长度小于 230.0 m 时,为节省工程量可在闸室中部设置一组交错布置的横支廊道群,但需研究相应地保证闸室纵横向水流分布均匀的相关布置措施。近年来,我国虽然进行了多座采用该类型输水系统布置的船闸物理模型试验研究,但调整横支廊道水流特性的布置措施多是结合单个船闸工程自身条件提出的,尚不具有普遍适用性。

2 横支廊道进口布置及流量分配特性

船闸闸室宽度为 34.0 m,长 200.0 m,每侧闸室廊道中部分别连接 4 根横支廊道延伸至闸室,并将两侧横支廊道成对组合成 4 组断面各为锥形的组合式横支廊道,每侧各布置相等面积的 10 个出水孔,出水孔外设置一道消能明沟(图 2)。

阀门处廊道断面面积、闸墙廊道断面面积、横支廊道进口面积及侧向出水孔总面积之比分别为 1:1.21:1.52:1.58。

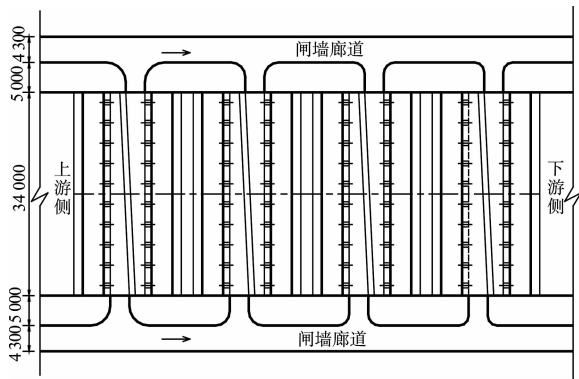


图 2 闸室横支廊道布置 (单位: mm)

调整闸室横支廊道流量分配的方法有 2 种:

- 1) 自上游向下游逐渐缩小各横支廊道过水断面面积, 这样可以沿闸室长度方向较大范围调整横支廊道的流量, 使各横支廊道出水流量基本相等;
- 2) 自上游向下游逐渐减小闸墙廊道与闸室横支廊道连接圆弧的曲率半径, 这种方法虽然调整范围相对较小, 但可保证闸室中部的每根横支廊道形状断面一致, 有利于施工维护, 更具有工程应用

价值。本文采用后一种方法, 保持各横支廊道断面形状不变, 通过调整闸墙廊道与横支廊道的连接圆弧来控制各横支廊道的流量分配, 使其能基本相等。

建立了比尺为 1:40 的横支廊道局部物理模型, 针对 11~25 m 水头, 通过试验研究了各组横支廊道流量分配与连接圆弧半径的关系 (表 1)。研究表明, 方案 1 的第 2 支横支廊道流量最大, 第 4 支横支廊道流量最小, 而第 1~3 支横支廊道的流量相差较小, 因此需提高第 4 横支廊道的流量。针对方案 1 中第 4 根横支廊道与第 2 根横支廊道流量相差 14.3% 的情况, 方案 2 将第 4 根横支廊道连接圆弧半径由 1.00 m 增大为 1.20 m, 方案 3 根据方案 2 试验结果又进一步将第 4 根横支廊道连接圆弧半径增大至 1.45 m, 同时将第 2 根横支廊道进口连接圆弧半径由 2.70 m 减小为 2.50 m。分析认为, 方案 3 各横支廊道流量分配基本均匀, 不同水头下的平均流量之比为 1.00:1.03:0.99:0.97, 最小流量与最大流量仅相差 5.8%, 此时自上游至下游 4 组横支廊道与闸墙廊道连接圆弧半径之比为 3.30:2.50:1.95:1.45。

表 1 不同连接圆弧半径方案下的各横支廊道流量比

组次	水头	方案 1				方案 2				方案 3			
		R_1/m	R_2/m	R_3/m	R_4/m	R_1/m	R_2/m	R_3/m	R_4/m	R_1/m	R_2/m	R_3/m	R_4/m
		3.30	2.70	1.95	1.00	3.30	2.70	1.95	1.20	3.30	2.50	1.95	1.45
1	11.00	1.00	1.06	0.97	0.87	1.00	1.07	0.98	0.93	1.00	1.02	0.95	0.97
2	13.50	1.00	1.05	0.97	0.87	1.00	0.97	1.05	0.94	1.00	1.05	1.03	0.99
3	16.50	1.00	1.06	0.97	0.89	1.00	1.04	0.96	0.89	1.00	1.03	0.98	0.95
4	20.00	1.00	1.07	1.04	0.98	1.00	1.05	0.98	0.92	1.00	1.04	0.98	0.97
5	25.00	1.00	1.03	0.95	0.89	1.00	1.04	0.99	0.91	1.00	1.03	0.99	0.96
平均		1.00	1.05	0.98	0.90	1.00	1.03	0.99	0.92	1.00	1.03	0.99	0.97

注: $R_1 \sim R_4$ 表示闸室中部第 1~4 组横支廊道进口连接圆弧的半径。

为了便于施工, 在实际工程中应先比较分析闸墙廊道和闸室横支廊道的高度, 在保证平面和立面转弯半径一致的前提下, 确定第一组横支廊道的最大转弯半径, 然后按上述比例依次确定各组横支廊道连接圆弧布置。

3 横支廊道及侧支孔布置

确定了合适的各组横支廊道进口连接圆弧尺

寸后, 为了进一步验证沿横支廊道长度方向 (闸室宽度方向) 的各侧支孔出流是否均匀, 建立了比尺为 1:25 的单根横支廊道局部物理模型, 通过试验观察测定横支廊道各出水孔的出流流态及流量分配, 研究输水系统中横支廊道、侧向出水孔及消能明沟的布置。

局部模型采用有机玻璃制作, 以便观察廊道内及出水孔处的水流流态。结合以往工程研究经

验^[8-9]，从横支廊道首末端断面面积比、出水孔各个方向修圆、出水孔尺寸、消能明沟布置等方面，经反复修改模型，共进行了8次局部模型试验，最终确定了科学的横支廊道、侧向出水孔及其消能布置，特征尺寸如表2所示。调整布置后的每根横支廊道侧向出水孔由10个增加为12个，相

应地减小了单个出水孔面积及宽高比，增大了出水孔长度，同时将原布置的单明沟消能改为双明沟消能，并在第一道明沟挡槛底部设置过水孔，此时出水孔总面积与横支廊道进口断面面积之比为1.03。测量及观察表明，此布置下的横支廊道各个出水孔水流分布均匀，消能效果良好。

表2 横支廊道及侧支孔布置特征尺寸

横支廊道进口面积/m ²	横支廊道末端面积/m ²	每侧支孔数量/个	支孔宽度/m	支孔高度/m	支孔长度/m	双明沟宽度/m
7.68	3.07	12	0.40	1.65	1.50	2.50

根据试验数据，分析得出闸室横支廊道及侧支孔布置的要点为：1) 为保证横支廊道首末端出流均匀，横支廊道末端宽度与进口宽度之比宜为0.3~0.4；2) 每组横支廊道的中间隔墙上设置孔口使两侧廊道内水流互通，可使阀门单边开启时横支廊道水流能两侧出流，从而分散水流；3) 为使侧向出水孔出流均匀，出水孔应为窄高形式，宽度不宜超过0.5 m；4) 侧支孔长度不足将产生水流偏斜，为保证侧支孔出水水流较平顺并减小侧支孔的形状阻力，支孔沿水流方向的长度宜为其断面宽度的3.6倍左右；5) 充水时侧支孔的水流通过消力槛在消能明沟内形成漩滚消能，具有一定的二次均匀水流作用，与单明沟布置相比，双明沟消能可增加消能效率，减小闸室水体紊动，

消能效果更好。系列试验成果显示，以上影响闸室中部横支廊道出流特性的因素中，侧支孔的布置尺寸尤为敏感，其形状及特征尺寸按上述3)和4)的原则布置将更有利于出水水流分布。

4 闸室停泊条件验证

采用前述横支廊道及消能布置措施后，在闸室为最小水深4.5 m、运行水头为15.0 m条件下，测定了船闸充水运行时闸室内停泊船舶的系缆力，从而验证船闸充水时闸室中部横支廊道出流是否均匀以及水流是否充分消能。2×2 000 t船队和1 000 t单船停在闸室内不同位置时最大纵、横向系缆力见表3，典型工况的系缆力过程线见图3。

表3 闸室内船舶最大系缆力

船舶(队)类型	开启方式	t _v /min	船舶停泊位置		最大系缆力/kN		
			闸室长度方向	闸室宽度方向	纵向	前横	后横
2×2 000 t	双边	7	中	中	14.25	11.47	12.95
			中	右	14.50	-16.60	-17.83
	左单边	7	中	中	-12.60	12.86	13.90
			中	右	12.19	-14.73	-14.66
	右单边	7	中	中	16.63	-18.04	-17.69
			中	右	16.67	-19.47	-19.85
1 000 t	双边	7	前	右	21.39	9.46	-7.08
			中	右	20.19	-8.76	-9.07
			后	右	20.89	6.69	5.50
	左单边	6	前	右	15.60	6.36	-5.31
			中	右	8.58	8.61	8.54
			后	右	10.59	-5.65	-5.78
			前	右	18.10	9.15	-8.56
			中	右	14.85	-7.92	-10.20
			后	右	16.83	-4.69	-5.00
	右单边	6	前	右	18.10	9.15	-8.56
			中	右	14.85	-7.92	-10.20
			后	右	16.83	-4.69	-5.00

注：纵向力向上游方向为“+”，横向力向右为“+”。

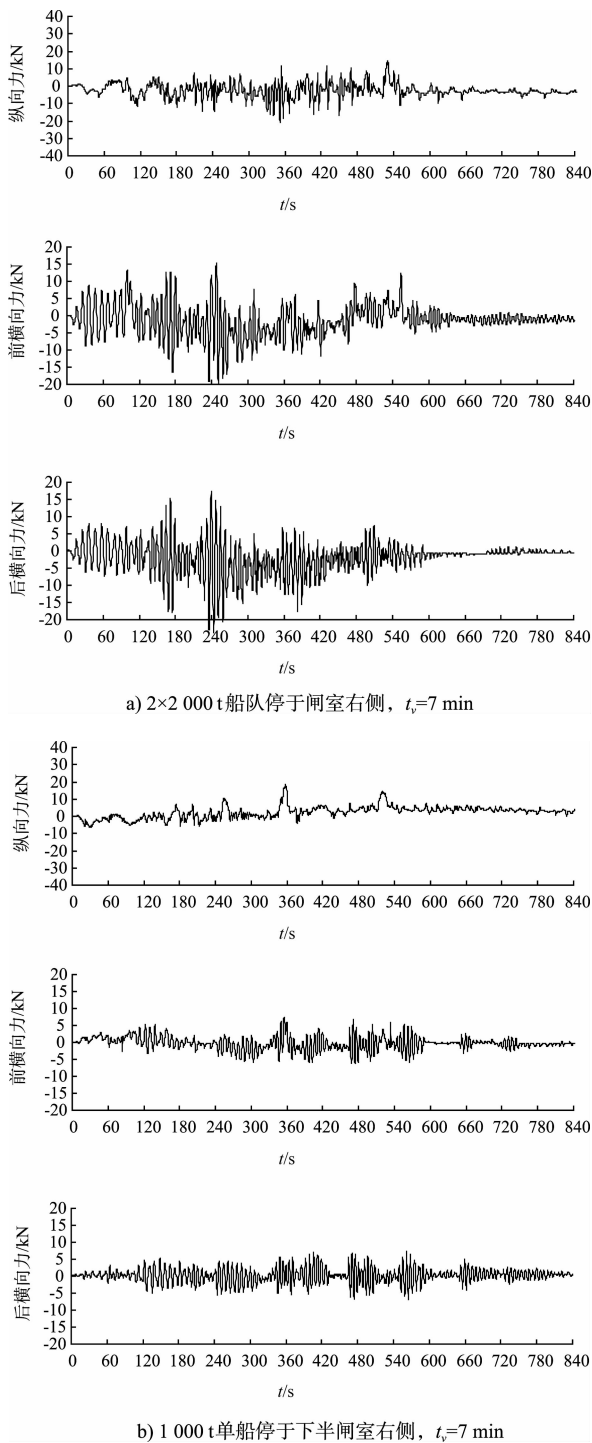


图3 典型充水工况闸室内船舶系缆力过程线

JTJ 306—2001《船闸输水系统设计规范》规定了闸室及引航道内停泊船舶的允许系缆力,其中2 000 t船舶的最大纵、横向水平分力分别为40.0 kN和20.0 kN,1 000 t船舶的最大纵、横向水平分力分别为32.0 kN和16.0 kN^[1]。由表3可见,充水阀门匀速全开时间为7 min时,2×2 000 t船队所受纵向力的绝对值在12.19~16.67 kN,远

小于规范规定的最大值,横向力的绝对值在11.47~19.85 kN,也在规范规定的最大值之内;1 000 t单船的最大纵向力为21.39 kN,最大横向力为10.20 kN,小于规范允许最大值。同时分析模型试验实测船舶系缆力资料可知,1000 t单船停在闸室中部的纵向力相对不大,而停在前、后半闸室时的纵向力相对略大,与闸室中部出水波浪传递规律一致。船舶系缆力试验数据及船舶自由漂移试验结果表明,闸室中部横支廊道及消能布置是合适的,充水时闸室水流分布基本均匀,获得了较好的闸室内船舶停泊条件。

5 结语

非岩石基础船闸的闸墙采用混凝土重力式,因此在闸墙底部布置输水廊道是经济的,在闸墙廊道中部连接闸室横支廊道也较为方便,近年来随着我国大平面尺度、中高水头船闸的建设,闸墙长廊道闸室中部横支廊道输水系统形式得到了较多应用。

针对闸室中部横支廊道群及单根横支廊道,分别建立了2座不同比尺的局部物理模型,重点从横支廊道进口布置、首末端断面面积比、侧支孔尺寸及特征、消能方式等方面,研究了横支廊道布置及水流分布特性,得到了相关布置要点及一般布置原则,并通过整体模型船舶系缆力试验验证了闸室停泊条件。结果表明,提出的闸室中部横支廊道布置是合适的,充水时闸室纵横向水流分布基本均匀,船舶系缆力满足规范要求。

参考文献:

- [1] JTJ 306—2001 船闸输水系统设计规范[S].
- [2] 刘平昌,王召兵.嘉陵江草街船闸输水系统水力学模型试验研究报告[R].重庆:重庆西南水运工程科学研究所,2006.
- [3] Willems G N. Final report of the international commission for the study of locks[R]. Brussels (Belgium): Permanent international association of navigation congresses, 1986.