



万安枢纽二线船闸输水系统阀门后廊道选型

杜军, 罗少桢

(中交水运规划设计院有限公司, 北京 100007)

摘要: 万安枢纽二线船闸设计最大水头为 32.5 m, 针对该高水头船闸输水系统阀门后廊道体型问题, 比选研究顶部渐扩+平底和顶部突扩+底部突扩两种方案。采用水工整体模型试验和阀门廊道非恒定流常压试验的方法, 从闸室充泄水水力特性、水流流态及均匀性、压力特性影响等方面比选。结果显示顶部突扩+底部突扩廊道在缩短输水时间、改善主廊道和进水口流态、减小下检修门槽压力脉动及空化等方面均优于顶部渐扩+平底廊道。

关键词: 船闸; 输水系统; 廊道

中图分类号: U 641.3

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2021)10-0276-05

Selection of valve rear corridor of the Wan'an junction second-line ship lock

DU Jun, LUO Shao-zhen

(CCCC Water Transport Consultants Co., Ltd., Beijing 100007, China)

Abstract: The maximum design head of the second line ship lock of the Wan'an project is 32.5 m. In view of the shape of the back corridor of the valve in the water conveyance system of the high head lock, two schemes of gradual expansion at the top + flat bottom and sudden expansion at the top + sudden expansion at the bottom are compared and studied. The hydraulic model test and the unsteady flow atmospheric pressure test of valve corridor are used to compare and select the hydraulic characteristics, flow state and uniformity of flow, and the influence of pressure characteristics of sluice chamber. The results show that the top sudden expansion + bottom sudden expansion corridor is better than the top gradual expansion+flat bottom corridor in shortening water delivery time, improving the flow pattern of main gallery and inlet, reducing the pressure fluctuation, and cavitation of lower maintenance gate slot.

Keywords: ship lock; filling and emptying system; corridor

万安枢纽二线船闸为已建万安枢纽的船闸扩能工程, 船闸等级为Ⅲ级, 有效尺度为 180 m × 23 m × 4.5 m(有效长度×闸室净宽×槛上水深)。上游最高通航水位 100.0 m, 最低通航水位 85.0 m; 下游最高通航水位 79.1 m, 最低通航水位 69.0 m, 工作水头考虑采用万安已建船闸下游最低通航水位 67.5 m, 对应的设计最大水头高达 32.5 m, 仅次于大藤峡船闸、安谷船闸和银盘船闸。刘平昌等^[1]认为高水头船闸输水系统阀门后廊道体型的

布置会影响到整个输水系统的性能、影响阀门后压力场和阀门抗空化特性, 并通过试验研究得出突扩型廊道较顶扩型廊道提高门后压力更加显著的结论。李云等^[2]认为选择合适的廊道体型可以更好地改善阀门后水流流态和阀门的工作条件, 并满足船闸的安全运行要求, 在同样的扩大比条件下底部突扩比顶部突扩更能提高廊道压力。严俊秀等^[3]通过研究旁海船闸, 认为突扩廊道可显著改善流态。本文结合万安枢纽二线船闸输水系

统及阀门水力学模型试验及《船闸输水系统设计规范》^[4]的有关规定和要求, 对“顶部渐扩+平底”和“顶部突扩+底部突扩”两种形式进行了比选研究。

1 廊道体型概况

万安二线船闸采用闸墙长廊道、闸室中心垂直分流、闸底两区段分散输水系统, 闸墙主廊道尺度为 $2\sim4.0\text{ m}\times6.0\text{ m}$ (宽×高), 阀门段输水廊道尺度为 $2\sim4\text{ m}\times4.5\text{ m}$ (宽×高), 输水阀门采用反弧门, 阀门顶高程 54.50 m, 淹没水深 13.0 m。采用比尺 1:30 的二线船闸输水系统水工整体模型试验和比尺为 1:20 的阀门廊道非恒定流常压试验^[5], 对“顶部渐扩+平底”和“顶部突扩+底部突扩”两种阀门后廊道体型进行了分析研究。

图 1a) 为顶部渐扩+平底形式, 为避免廊道顶部集气并增大廊道顶部压力, 廊道顶部采用渐扩, 从阀门门楣出口后起坡, 坡比为 1:10, 止坡于阀门井后 15.0 m, 廊道最大高度比阀门段增加 1.5 m, 下检修门井布置在阀门井下游 24.5 m 处。

图 1b) 为顶部突扩+底部突扩形式, 顶部突扩 2.0 m、底部突扩 3.0 m、最大高度 9.81 m, 为避免顶突扩廊道顶部集气, 廊道顶部采用渐扩, 从阀门井后 3.72 m 起坡, 坡比为 1:50, 止坡于下检修门前 5.28 m, 阀门下检修门井布置在阀门井下游 34.0 m 处。为便于维护和检修, 底扩段的跌坎采用台阶形式, 跌坎垂直段距离阀门底缘 0.1 m、跌坎总高度为 3.0 m, 每一级台阶高 0.3 m、宽 0.15 m。升坎采用高次曲线形式, 升坎长度为 9.72 m、高度为 4.0 m, 升坎末端距下检修门井的水平距离为 5.0 m, 底扩平底长度为 21.21 m。

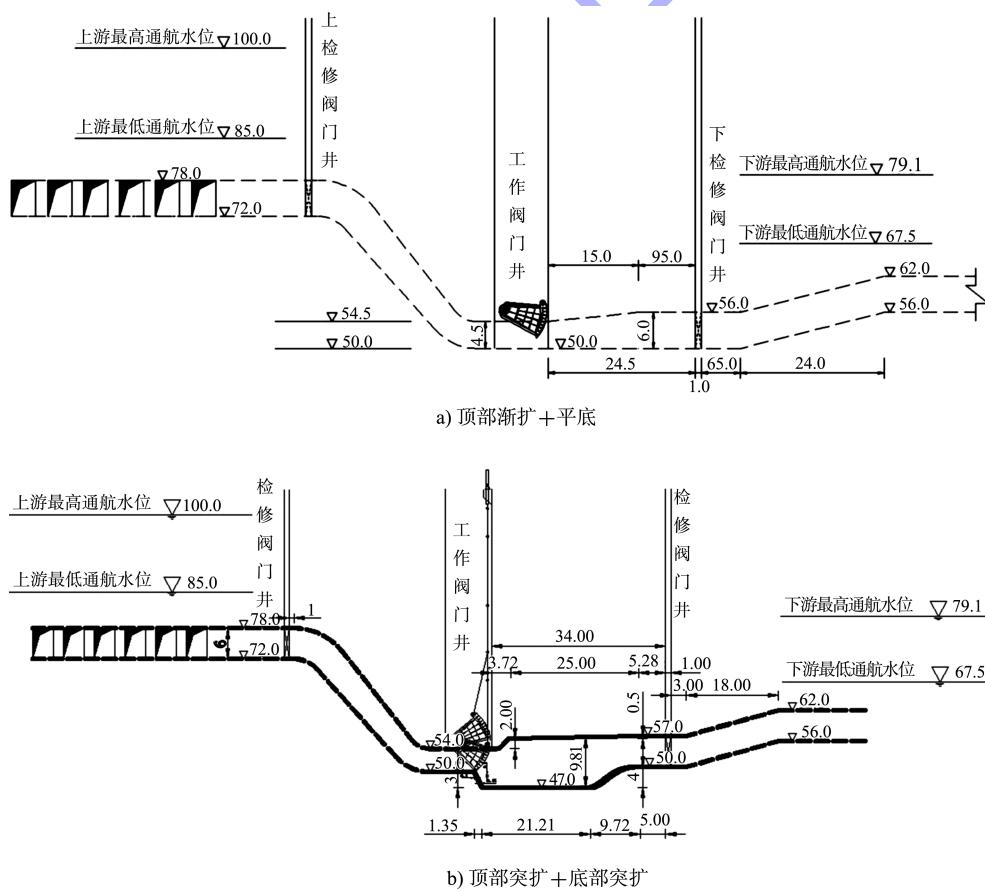


图 1 廊道体型 (单位: m)

2 试验研究及方案比选

模型试验主要针对最大工作水头 32.5 m 工况, 阀门开门速率为 $t_v=7$ 、8 min, 阀门关门速率为 $t'_v=2\sim5$ min。

2.1 阀室充泄水水力特性

两种廊道形式在最大工作水头、双边充泄水工况下, 阀室充、泄水水力特性试验成果见表 1。由表 1 可知: 突扩方案在 8 min 开门速率条件下充水时间为 11.12 min, 7 min 开门速率条件下泄水时间为 11.23 min; 而相同的平底廊道充水时间为

11.44 min, 泄水时间为 11.45 min。突扩方案的充水时间减小了 19.2 s, 泄水时间减小了 13.2 s。相比较平底廊道方案, 采用突扩体型后, 最大流量由 489 m³/s 下降到 427 m³/s, 阀门段及主廊道流速由 10.19 m/s 下降到 8.90 m/s, 与此同时上游进水口及上游引航道流态也有改善, 充水的最大流速由 1.70 m/s 下降到 1.48 m/s。两种廊道形式虽然都满足阀室充水 12 min 的设计要求, 但是突扩方案有利于进一步缩短输水时间、改善主廊道和进水口流态。

表 1 阀室充、泄水水力特性

廊道形式	输水方式	t_v /min	T /min	Q_{\max} /(m ³ ·s ⁻¹)	v_{\max} /(m·s ⁻¹)	v_{\max} /(m·s ⁻¹)
顶部渐扩+平底	充水	7	10.88	489	10.19	1.70
		8	11.44	457	9.52	1.59
	泄水	7	11.45	433	9.02	—
		8	11.98	409	8.52	—
顶部突扩+底部突扩	充水	7	10.63	427	8.90	1.48
		8	11.12	403	8.40	1.40
	泄水	7	11.23	402	8.38	—
		8	11.71	385	8.02	—

注: t_v 为阀门开启时间, T 为阀室输水时间, Q_{\max} 为最大流量, v_{\max} 为闸墙输水主廊道最大断面平均流速, v_{\max} 为进水口最大断面平均流速。

2.2 水流流态及均匀性

两个方案根据模型试验得到的水流流态见图 2。平底方案阀门后水流流动形态在立面上主要可分为以下区域: 1) 主流区; 2) 门后底缘水流收缩和扩大形成的主旋滚区; 3) 主流上边界次回旋区。底部突扩方案阀门后水流流动形态在立面上主要可分为以下区域: 1) 主流区; 2) 门后底缘水流收缩和扩大形成的主旋滚区; 3) 主流上边界次回旋区; 4) 跌坎射流引起的次回旋区。收缩升坎采用高次曲线形式, 主流在升坎处没有明显分离。两个方案由于门后廊道在平面上的面积没有变化, 水流在平面上无分离。

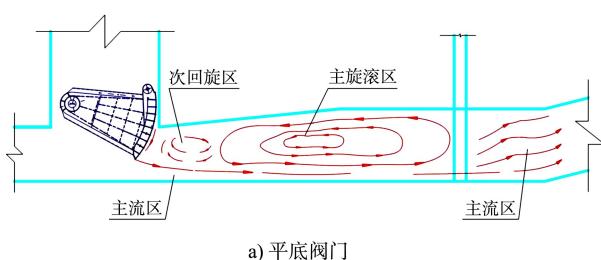


图 2 阀门段廊道水流流态

突扩廊道推荐充水阀门下检修门井布置在阀门井下游 34.0 m 处, 平底廊道推荐充水阀门下检修门井布置在阀门井下游 24.5 m 处。廊道顶、底脉动压力互相关系数见图 3, 该系数越大表示二者相关性越好、流态越均匀。平底廊道阀门开启过程中距阀门井最近的廊道顶测点主要受门后主流上边界次回旋区影响, 廊道底测点主要受孔口射流及小尺度次回旋区的控制, 二者互相关系数为 $C_0=0.990$, 相关性一般。与上述断面相比, 检修门井前阀门段平底廊道其它断面顶底主要受主流影响, 压力变化趋势基本相同。下检修门井后不

可避免地受下检修门槽流态及平直段与斜坡上升段流态的双重干扰, 相关性比检修门井前断面稍差。距离阀门井 40 m 以后的主廊道斜坡段及其后的平直段同断面廊道顶、底测点的脉动压力的互相关系数都在 $C_0 = 0.998$ 以上, 相关性良好, 说明此时主廊道流态才变得较为均匀。

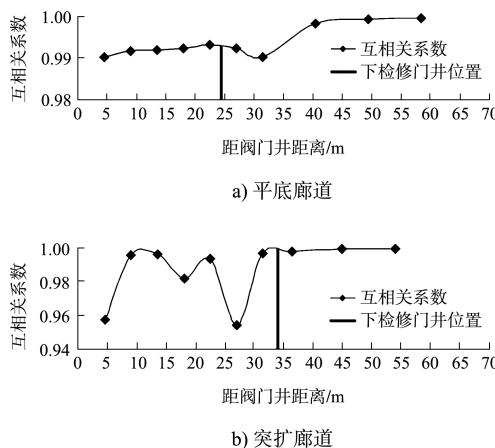


图 3 廊道顶、廊道底压力互相关系数

突扩廊道阀门开启过程中距阀门井最近的廊道顶测点主要受门后主流上边界次回旋区影响, 廊道底测点主要受跌坎孔口射流及跌坎小尺度次回旋区的控制, 二者互相关系数为 $C_0 = 0.957$, 相关性一般。距离阀门井 27 m 处的廊道顶测点位于升坎主流上方, 受升坎出口水力顶托作用, 廊道底测点位于升坎水流相对分离区, 二者互相关系数为 $C_0 = 0.954$, 相关性一般。阀门井后的主廊道斜坡段同断面廊道顶、底测点的脉动压力的互相关系数都在 $C_0 = 0.999$ 以上, 相关性良好, 说明此时主廊道流态较为均匀。

因此, 由于突扩体出口廊道高于阀门处进口廊道 1.0 m, 突扩廊道收缩升坎的约束, 提高了主流在突扩空腔以及下游廊道内走向的稳定性和旋涡空间排列结构的稳定性, 进一步稳定了门后旋滚区、增加了消能效果。主回旋区被限制在检修门前, 检修门后流态更均匀, 有利于减小下检修门槽压力脉动及空化。

2.3 廊道体型对压力特性影响

阀门后收缩断面廊道顶部压力大小是表征该输水阀门工作条件优劣的一项重要指标, 其变化

规律也是设计人员十分关心的问题, 它与阀门的开启速度及方式、阀门后输水廊道的连接形式有关, 最重要的它也与门后廊道的体型密切相关。试验对两种廊道体型在不同阀门开度 ($n = 0.1 \sim 1.0$) 情况下廊道顶时均压力分布进行了研究, 图 4 给出了 $n = 0.3, 0.4, 0.6, 1.0$ 时的对比结果。由于突扩廊道体型阀门后廊道顶部突扩和底部突扩使门后廊道垂向空间增大, 门后主旋滚区回旋充分, 与平底廊道相比, 虽然在 $n \leq 0.3$ 时廊道顶压力有所降低, 但此开度范围内廊道顶压力降低, 门楣自然通气量会有所增大, 通气更加顺畅, 底缘空化能够被门楣自然通气充分抑制。而对于 $n \geq 0.4$ 的情况, 突扩廊道体型主流能够较快地沿程扩散, 降低了主流流速, 增压效果明显。两种廊道体型检修门前廊道顶 $n = 0.4 \sim 1.0$ 开度的最低压力对比见表 2。

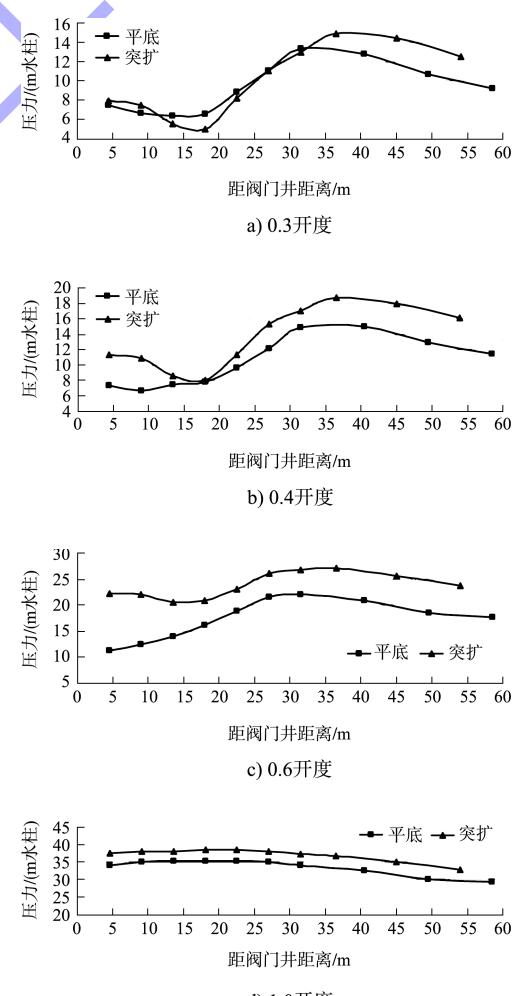
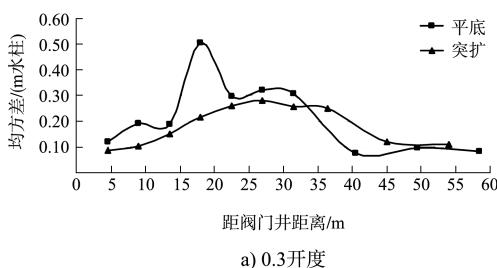


图 4 不同廊道体型各开度廊道顶时均压力分布

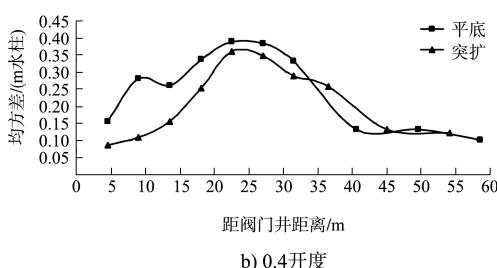
表 2 不同廊道体型各开度检修门前廊道顶的最低压力

阀门开度	最低压力/(m水柱)	
	平底廊道	突扩廊道
0.4	6.66	7.97
0.5	8.60	14.45
0.6	11.17	20.57
0.7	15.82	26.18
0.8	21.92	31.29
0.9	29.73	35.35
1.0	34.16	37.61

试验对两种廊道体型在不同开度($n=0.1 \sim 1.0$)情况下廊道顶压力脉动均方差分布也进行了相应统计研究, 图 5 给出了 $n=0.3$ 、 0.4 、 0.6 、 1.0 时的对比结果, 表 3 给出了两种廊道体型检修门前廊道顶压力脉动均方差 $n=0.1 \sim 1.0$ 开度的最大值。在小开度情况($n \leq 0.4$), 突扩廊道检修门前廊道顶压力脉动均方差明显小于平底廊道; 而在距门井 45 m 往后的位置, 两种体型流动都较稳定, 顶压力脉动均方差基本相同。随着阀门开度的增大, 突扩廊道顶压力脉动均方差明显小于平底廊道。由于突扩廊道采用底部突然扩大的体型, 阀门孔口出流主流向下倾斜, 流动较为顺畅, 阀门底缘的绕流流态也相应得到改善。底扩不但减弱了阀门底缘空化, 还可减小底缘处水流压力脉动, 对抑制门体振动也较为有利。



a) 0.3开度



b) 0.4开度

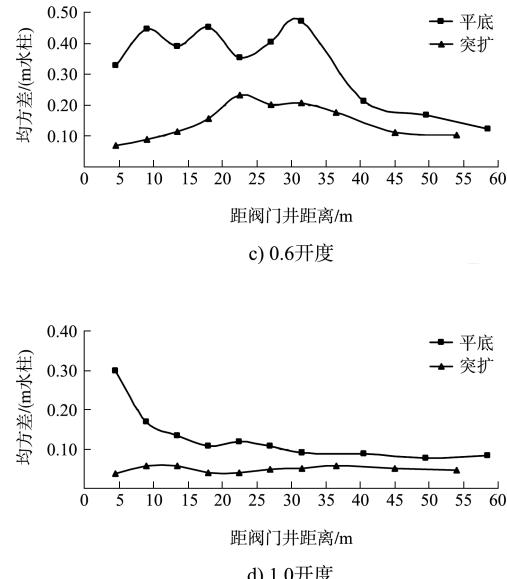


图 5 不同廊道体型各开度廊道顶压力脉动均方差值分布

表 3 不同廊道体型各开度检修门前廊道顶压力脉动均方差最大值

阀门开度	压力脉动均方差最大值/(m水柱)	
	平底廊道	突扩廊道
0.1	0.22	0.13
0.2	0.20	0.24
0.3	0.51	0.28
0.4	0.39	0.36
0.5	0.41	0.26
0.6	0.45	0.23
0.7	0.47	0.16
0.8	0.48	0.14
0.9	0.55	0.07
1.0	0.30	0.06

3 结论

1) 在最大工作水头、双边充泄水工况下, 突扩方案在 8 min 开门速率条件下较平底方案充水时间减小了 19.2 s , 7 min 开门速率条件下泄水时间减小了 13.2 s , 最大流量由 $489\text{ m}^3/\text{s}$ 下降到 $427\text{ m}^3/\text{s}$, 阀门段及主廊道流速由 10.19 m/s 下降到 8.90 m/s , 上游进水口最大断面平均流速由 1.70 m/s 下降到 1.48 m/s 。说明突扩方案有利于进一步缩短输水时间、改善主廊道和进水口流态。