



高水头省水船闸输水系统研究*

夏小迪¹, 罗琳¹, 汤建宏¹, 冯伟², 吴澎¹, 陈祥³, 王二朋³, 郝岭⁴

(1. 中交水运规划设计院有限公司, 北京 100007; 2. 重庆交通大学, 重庆 400000;

3. 中国长江三峡集团有限公司, 湖北 武汉 430010;

4. 四川省交通勘察设计研究院有限公司, 四川 成都 610017)

摘要: 针对目前国内外高水头省水船闸输水系统最高只能满足峰值输水流量近 $600 \text{ m}^3/\text{s}$ (依托平陆运河马道船闸) 时船舶安全过闸的问题, 研究如何进一步提高输水系统峰值流量约达 $1\,100 \text{ m}^3/\text{s}$ (依托金沙江向家坝船闸), 结合德国相关经验, 采取压力室输水系统的型式, 相较于平陆马道船闸的闸墙长廊道单侧进水闸底纵支廊道四区段盖板消能型式, 压力室输水系统克服了等惯性输水系统“布置复杂、沿程和局部水头损失较大、牺牲输水效率”的缺点, 并用数值模拟进行验证。初步研究成果表明, 该输水系统能够满足船舶安全过闸的要求。随着我国西部大开发战略的持续推进, 崇山峻岭间的通航建筑物水头差将超过 60 m , 甚至达到 100 m 以上, 压力室输水系统将实现船舶顺利过坝的目标, 下阶段还需结合物理模型试验进一步验证其可行性。

关键词: 平陆运河; 金沙江; 高水头; 省水船闸; 输水系统

中图分类号: U641

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2026)04-0023-08

Water conveyance system of high head water-saving ship lock

XIA Xiaodi¹, LUO Lin¹, TANG Jianhong¹, FENG Wei², WU Peng¹, CHEN Xiang³, WANG Erpeng³, HAO Ling⁴

(1. CCC Water Transportation Consultants Co., Ltd., Beijing 100007, China;

2. Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400000, China; 3. China Three Gorges Corporation, Wuhan 430010, China;

4. Sichuan Communication Surveying & Design Institute, Chengdu 610017, China)

Abstract: To address the current issue where the highest peak water flow rate of ship lock water conveyance systems domestically and internationally can only support nearly $600 \text{ m}^3/\text{s}$ (based on the Madao Ship Lock of the Pinglu Canal) for safe passage of ships, this study explores how to further improve the peak flow rate of the water conveyance system to about $1,100 \text{ m}^3/\text{s}$ (based on the Xiangjiaba Ship lock of the Jinsha River). Combining relevant German experience, a pressure chamber water conveyance system is adopted. Compared with the four-section cover plate energy dissipation type of the single-sided inlet longitudinal branch corridor of the Madao Ship Lock of the Pinglu Canal, the pressure chamber water conveyance system overcomes the disadvantages of the constant-inertia water conveyance system, such as “complex layout, significant head losses along the way and locally, and compromised conveyance efficiency.” Numerical simulations are used for verification. Preliminary results indicate that the water conveyance system can meet the requirements for safe passage of ships. With the continuous promotion of China’s Western Development Strategy, the water head difference of navigational structures in mountainous areas will exceed 60 m , and even surpass 100 m . The pressure chamber water conveyance system will achieve the goal of smooth passage of ships through dams. Further validation through physical model tests is planned for the next phase.

Keywords: Pinglu Canal; Jinsha River; high water head; water-saving ship lock; water conveyance system

收稿日期: 2025-08-08 录用日期: 2025-09-23

*基金项目: 金沙江下游航运发展策略研究项目(202403188)

作者简介: 夏小迪(1991—), 女, 高级工程师, 从事水运专业相关工作。

船闸依据克服的水头差大小可分为：1) 水头差 10 m 以内为低水头船闸；2) 水头差 10~30 m 为中水头船闸；3) 水头差 30 m 以上为高水头船闸。在水资源匮乏地区或者因高水头差而带来阀门空化空蚀问题的情况下，设计会采取省水船闸的形式，其工作原理是建设省水池，用于储存船闸泄放的部分水体作为下一闸次灌水之用，可分为互灌互泄船闸和带省水池船闸两种形式。

输水系统设计是为了确保船舶迅速、安全过闸，而省水船闸输水系统则更为复杂。因为闸室水体除了与上下游引航道进行交换，还存在与省水池(或者互灌互泄另一线闸室)水体进行交换的工况。我国对省水船闸输水系统的研究始于上个世纪七八十年代，但真正进入蓬勃发展期也只是近十年的时间。大部分省水船闸输水系统仅限于中低水头的集中输水系统^[1-3]或简单分散输水系统^[4-6]，由于水头差较小，省水船闸输水系统可采取简单形式即可满足船舶安全过闸的需求，但无法适应水头差进一步增大的情况。陈明等^[7]、刘本芹等^[8]、安晓峰等^[9]通过开展物理模型、数值模拟等多项研究，提出较为复杂的闸底长廊道侧支孔分散输水系统型式，可进一步将省水船闸水头差提升至 20~30 m 的中高水头。张丽媛等^[10]针对三峡新通道省水船闸方案提出了复杂的分散输水系统构想，即垂直分流闸底纵支廊道四区段出水的输水系统，未来可应用于 30~60 m 水头差的省水船闸上，但并未对此输水系统进行模型验证，仅限于理论研究层面。另外，崔诗豪等^[11]提出利用充气后的气囊在竖井内上下运动来调节井内水体体积，实现竖井与闸室之间互相灌泄水，并采用数值模拟技术进行验证，但是该项技术目前仅适用于小型省水船闸，而且存在着一系列技术瓶颈，如出水不均匀问题、气囊材质问题以及空压机耗能问题等，因此总体尚在试验攻关阶段。

另外，随着我国西部大开发战略的持续推进，崇山峻岭间的通航建筑物水头差将超过 60 m，甚至达到 100 m 以上，省水船闸的输水系统需要更高效更安全的形式加以支撑，才能实现船舶顺利过

坝的目标。为达到输水系统峰值流量约 11 00 m³/s 的安全消能，本文将在平陆运河马道船闸、金沙江向家坝船闸等依托工程基础上，结合国外的相关经验，对高水头省水船闸输水系统提出相应新型布置方案——压力室输水系统，并采取数值模拟、物理模型等手段对其输水效果加以验证。

1 工程概况

1.1 平陆运河马道船闸

平陆运河始于西江干流西津库区南宁横州市平塘江口，跨沙坪河与钦江支流旧州江分水岭，经钦州市灵山县陆屋镇，沿钦江干流南下进入北部湾钦州港海域，全长 135 km，是一条通江达海的水运通道。

平陆运河总体线路划分为沙坪河段、分水岭段、钦江干流段和入海口段 4 个区段，按内河 I 级航道标准建设，可通航 5 000 吨级船舶。平陆运河从上游至下游建设马道、企石、青年 3 个梯级枢纽，各枢纽一次性建成双线 5 000 吨级船闸。工程主要建设内容包括航道工程、航运枢纽工程、沿线跨河设施工程以及配套工程。

马道枢纽由双线船闸、泄水闸和连接坝组成，见图 1。双线船闸上闸首为枢纽挡水线的组成部分，枢纽坝轴线长约 452 m。马道船闸是世界上最大的内河省水船闸，水头差近 30 m，船闸由上下闸首及闸室、上下游引航道、上下游待闸锚地组成。船闸有效尺度为 300 m×34 m×8 m(长度×宽度×门槛水深)。



图 1 平陆运河马道船闸效果图

Fig. 1 Rendering of Madao Ship Lock of Pinglu Canal

1.2 金沙江向家坝船闸

金沙江地处长江干流上游, 全长 2 326 km, 其中下游攀枝花—宜宾段约 800 km。随着金沙江下游向家坝、溪洛渡、白鹤滩、乌东德 4 座巨型水电枢纽相继蓄水, 库区回水区可常年通行 3 000~8 000 吨级船舶, 金沙江下游建设高标准航道迎来了千载难逢的机遇。

向家坝枢纽是金沙江干流下游最下游梯级, 坝址距下游水富县城 1.5 km, 距宜宾市区 33 km, 水库正常蓄水位 380.0 m。枢纽现状主要包括混凝

土重力坝(高 162 m)、垂直升船机、左岸坝后式厂房、右岸地下厂房和两岸灌溉取水口。

拟建省水船闸布置在现有升船机的左侧, 船闸中心线与坝轴线夹角 84°, 坝轴线处与升船机中心线距离为 340 m, 见图 2。双线船闸按 I 级船闸建设, 船闸有效尺度为 280 m×34 m×8 m (长×宽×门槛水深)。该省水船闸克服水头差达 114 m, 设置 8 级省水池, 单次输水时间控制在 33 min 以内, 双线船闸年单向通过能力达到 0.85 亿 t。

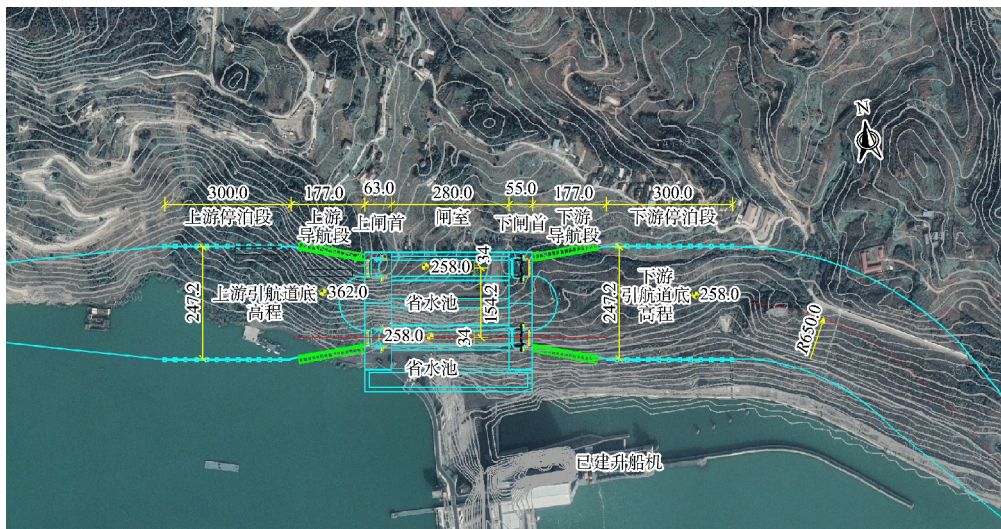


图 2 向家坝省水船闸布置(单位:m)

Fig. 2 Layout of Xiangjiaba water-saving ship lock (unit: m)

2 等惯性输水系统

2.1 输水系统布置

等惯性输水系统的廊道设计为关于船闸横纵轴线对称, 使得水流在动态运输的过程中保持对称, 所以也称动态平衡系统, 见图 3。初步估算, 马道船闸峰值输水流量达到近 600 m³/s。在全闸室范围内, 简单的等惯性输水系统难以实现均匀出流的目标。经物理模型、数值模拟等多角度研究, 最终提出输水系统采用闸墙长廊道单侧进水闸底纵支廊道四区段盖板消能形式, 该输水系统是等惯性输水系统里最为复杂的形式之一。试验结果表明, 输水系统的整体布置设计合理, 基本达到了预期的目标和要求。

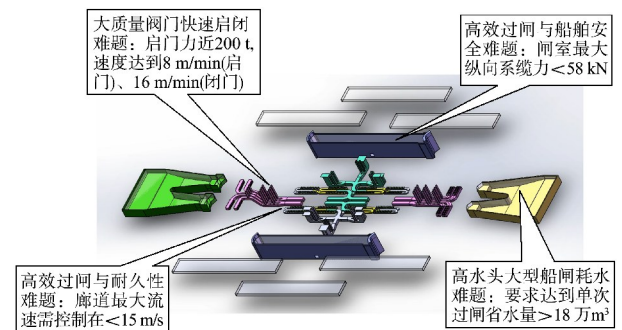


图 3 马道省水船闸输水系统

Fig. 3 Water conveyance system of the Madao water-saving ship lock

马道船闸水头差近 30 m, 满足 5 000 吨级船舶安全过闸的等惯性输水系统特征尺寸见表 1。

表 1 马道船闸输水系统特征尺寸

Tab. 1 Characteristic dimensions of water conveyance system of the Madao Ship Lock

序号	部位	描述	面积/m ²	与阀门面积比
1	进水口	横支廊道(两支,间距 12 m)侧向进水,进水口断面尺寸分为 3 组,分别为 1.6 m×6.0 m、1.2 m×6.0 m、0.8 m×6.0 m,底高程 39.00 m,顶高程 45.00 m	259.2	3.99
2	进水廊道	2 根横支廊道,断面尺度均为 8.0 m×8.0 m,底高程 39.00 m,顶高程 47.00 m	128	1.97
3	充水阀门段廊道	阀门底高程 12.50 m,顶高程 19.00 m,最大水头时淹没水深 15.0 m	65.0	1.00
4	输水主廊道	单侧布置,1 根,底高程 13.00 m,顶高程 22.50 m,最小淹没水深 11.50 m	85.5	1.32
5	分流口	垂直分流口布置形式,分流舌位于闸室底部,分流口断面面积为 2×(10.0 m×4.25 m),底高程为 13.0m	85.0	1.31
6	闸底纵支廊道	四区段布置,各区段分别由闸底纵支廊道分为 2 根分支廊道,纵支廊道断面尺度 6.0 m×9.5 m	114	1.75
7	闸室出水段廊道	4 个出水区段,每个出水区域 2 根分支廊道,布置在闸室宽度方向 1/4 和 3/4 位置,每根出水分支廊道断面尺度为 5.0 m×5.5 m	220	3.38
8	闸室出水支孔	每根分支廊道顶部设置 12 个出水支孔,出水支孔长度均为 5.0 m,宽度 0.22 m,出水支孔中心间距 4.5 m	105.6	1.62
9	消能盖板	消能盖板顶高出闸室底板 1.0 m,消能盖板带有“裙梁”,裙梁底到闸室底板净高 0.45 m	-	-
10	泄水阀门段廊道	阀门底高程 12.50 m,顶高程 19.00 m,最大水头时淹没水深 15.0 m	65.0	1.00
11	出水口	4 根横支廊道“顶出水”格栅式消能室布置形式,消能室底高程 12.5 m,顶高程 22.5 m	334.4	5.14
12	省水池进/出水口	每级省水池设置 2 个进/出水口,分别与 2 根输水廊道相连,呈喇叭形扩大。相连接输水廊道断面尺度 5.0 m×13.5 m,进/出水口尺度 19.0 m×19.5 m	559.0(进) 135.0(出)	8.60 2.08
13	连通廊道阀门段	每级省水池均通过 2 根输水廊道与闸底输水廊道相连,阀门段廊道尺寸为 5.0 m×6.5 m(宽×高)	65.0	1.00

2.2 输水效果验证

数值模拟结果表明,三级省水池采用相同阀门启闭运行方式,其向闸室充水的最大流量基本一致。省水池输水阀门开启时间 0.5~1.5 min 时,对应的最大充水流量为 545.12~611.04 m³/s,相应闸室水面最大上升速度为 2.83~3.18 m/min,最大流量时阀门处廊道断面流速约为 8.39~9.40 m/s;闸首充水阀门开启时间为 0.5~1.5 min 时,对应的最大充水流量为 540.04~578.20 m³/s,最大流量时阀门处廊道断面流速约为 8.31~8.90 m/s,进水口平均最大流速约 2.23 m/s,整个输水流量过程见图 4。

在该输水流量过程中,数值模拟给出了典型时刻闸室纵剖面(Y=8.5 m)的流速分布云图见图 5。从中可以看出,在船闸充水过程中,各流量时刻水流经由盖板后,水流消能紊动区域能较好地控制在闸室底部较小范围,保障水流能够较为平稳地进入闸室,不会直接冲击闸室内的停靠船舶,

表明输水系统采用的盖板消能型式起到了预期的效果。

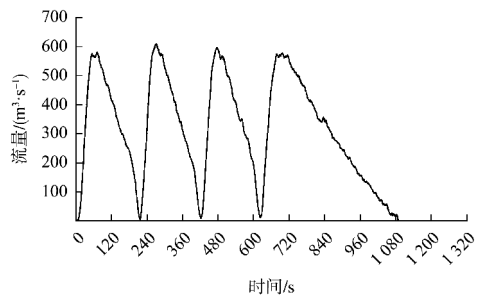
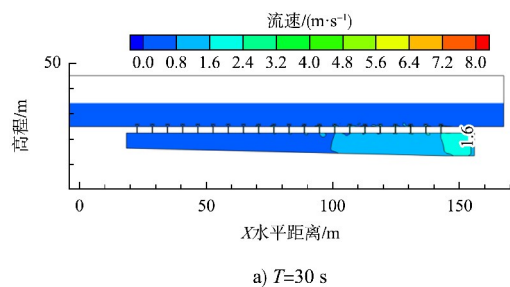


图 4 马道省水船闸输水流量过程线
Fig. 4 Process line of water flow for Madao water-saving ship lock



a) T=30 s

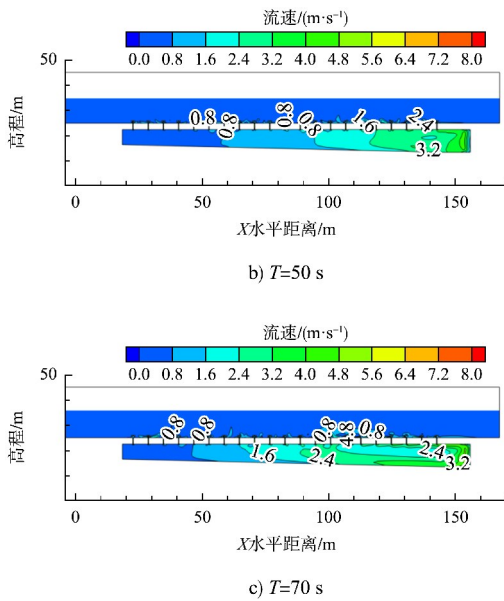


图 5 纵向剖面流速分布 (Y=8.5 m)
Fig. 5 Flow velocity distribution of longitudinal profile (Y=8.5 m)

研究船闸输水达到最大流量前不同时刻沿程支孔流量分配规律可知: 1) 各支孔出流量随着时间的增加而增加, 总体相对较为均匀; 2) 在充水初期, 分支廊道上的支孔出水流量沿水流方向逐渐递减; 随着阀门逐渐全开, 流量加大, 分支廊道中部与端部出流量明显增加, 而靠近第二分流口一侧出流量则有所减小。

在船闸充水过程中, 闸室内水面线整体对称分布, 全闸室长度纵向水面坡降相对较小, 最大仅 0.035‰, 以单根分支廊道出水段为典型计算区

段, 则其纵向水面坡降最大约为 0.669‰ (s^{9#} ~ s^{15#} 区间), 见表 2。另一方面, 闸室内横向水流也较为均匀, 水面波动不大, 典型断面最大横向坡降约为 0.115‰, 见表 3。

表 2 闸室典型区段最大水面纵向坡降
Tab. 2 Maximum longitudinal slope of water surface in typical sections of the sluice chamber

区段测点范围	最大坡降计算值/‰		说明
	正向	负向	
s ^{1#} ~ s ^{7#}	0.546	-0.614	上半闸室廊道出水段
s ^{9#} ~ s ^{15#}	0.669	-0.546	下半闸室廊道出水段
s ^{1#} ~ s ^{15#}	0.035	-0.030	全闸室长度

表 3 典型断面最大水面横向坡降
Tab. 3 Maximum lateral slope of water surface in a typical cross-section

区段测点范围	最大坡降计算值/‰		说明
	正向	负向	
2 [#] ~ 1-3	0.045	-0.037	2 [#] 断面左侧一半闸室
2 [#] ~ 3-5	0.063	-0.026	2 [#] 断面右侧一半闸室
2 [#] ~ 1-5	0.053	-0.021	2 [#] 断面全闸室宽度
11 [#] ~ 1-3	0.102	-0.079	11 [#] 断面左侧一半闸室
11 [#] ~ 3-5	0.115	-0.091	11 [#] 断面右侧一半闸室
11 [#] ~ 1-5	0.096	-0.083	11 [#] 断面全闸室宽度

物理模型试验表明, 船舶在闸室内的停泊条件相对较好, 纵、横向系缆力指标均满足“纵向系缆力 58 kN, 横向系缆力 29 kN”的暂定控制指标要求, 见表 4。该数据也表明研究提出的输水系统布置达到了预期的效果。

表 4 最大水头船闸省水运行时 5 000 吨级船舶最大系缆力试验值
Tab. 4 Maximum mooring force test value for 5,000-ton class ships during water-saving operation of the maximum water head ship lock

船舶类型	停泊位置	t _v /min	t _{v1} /min	t _{v2} /min	纵向力/kN	船首横向力/kN	船尾横向力/kN
5 000 t 单船	上闸室	1.0	1.0	0.5	48.96	19.60	20.91
	中闸室	1.0	1.0	0.5	46.25	21.29	20.61
	下闸室	1.0	1.0	0.5	46.86	16.32	16.72

注: t_v 为进水阀门启闭时间; t_{v1} 为出水阀门启闭时间; t_{v2} 为连通廊道阀门启闭时间。

3 压力室输水系统

3.1 输水系统布置

上述等惯性输水系统虽能满足平陆运河马道船闸的使用要求, 但在面临更大水头差工况时, 其适应性则显不足, 例如金沙江向家坝船闸(初步

估算峰值输水流量达到约 1 100 m³/s), 这是因为等惯性输水系统设置了较多的分流口和廊道, 布置非常复杂, 并且沿程和局部水头损失较大, 牺牲了输水效率。

德国提出了一种结合省水池的新输水形式, 与

传统的等惯性廊道系统不同,该系统通过闸室下面的压力室取缔廊道,通过支孔将压力室与闸室水力连接,对闸室进行灌水。研究表明,此输水系统不仅结构简单,且拥有很高的输水效率以及非常好的水流均匀性,可应用于金沙江100 m级省水船闸。

向家坝船闸下部为省水池主廊道(8.5 m×11.3 m,高×宽),上部为进水口主廊道(8.5 m×11.3 m)。省水池廊道平滑连接省水池,进水口主廊道连接上游进水口,可在灌水时,从上游引航道取水,该系统见图6。

压力室和支孔布置方案见图7,一级省水池灌水时,水流从两侧的省水池廊道(6.5 m×5 m)汇入主廊道,然后经主廊道进入压力室(9.5 m×28 m),最后从支孔灌入闸室。系统一共有4个支孔组,每个支孔组有24个支孔。支孔形状为矩形,长度为5 m,宽度为0.22 m。支孔总面积为105.6 m²,与主廊道面积之比为1.1。该比值大于1会使得进入闸室的能量不均匀,因此,为了保证闸室中船舶的安全,在支孔上方设置了矩形的消能盖板,盖板下方为4个矩形支柱。

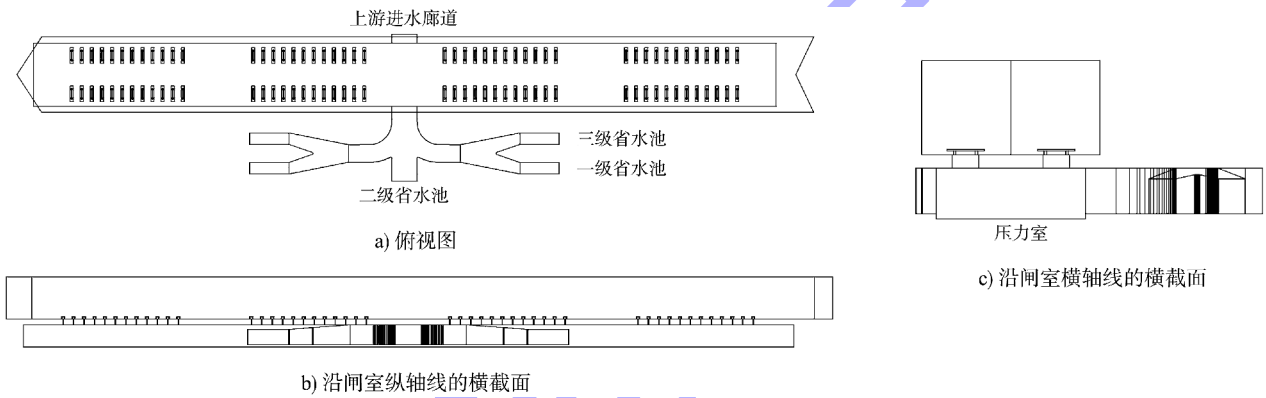


图6 压力室输水系统
Fig. 6 Water conveyance system of pressure chamber

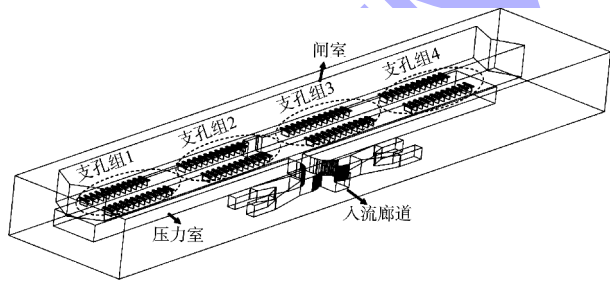


图7 压力室和支孔布置方案
Fig. 7 Layout plan for pressure chamber and branch holes

3.2 输水效果验证

该输水系统使用 flowRateFaceZone 函数,基于断面平均流速对流量进行监测,监测断面布置见图8。每个支孔群组总流量监测断面分别为 a2、b2、e2 和 f2。选择了支孔组中最具代表性的几个支孔流量过程进行监测,即图中斜线填充的单个支孔。

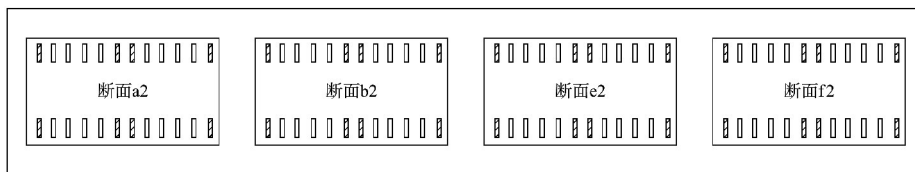


图8 流量监测布置
Fig. 8 Flow monitoring layout

压力室系统各支孔组的流量见图 9。从图中可以看出, 压力室系统的最大峰值流量出现在远离进口廊道的 a2 和 f2 两个支孔组, 而靠近两组支孔 b2 和 e2 的峰值流量被消减, 并且相较于靠近廊道的两组支孔的流量对称性, 远离廊道的两组支孔的均匀性好。

纵向水面比降的数值模拟结果见图 10。

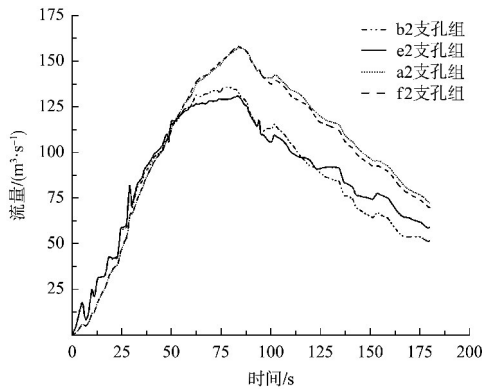
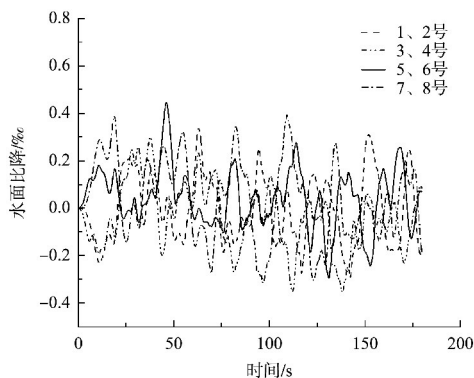
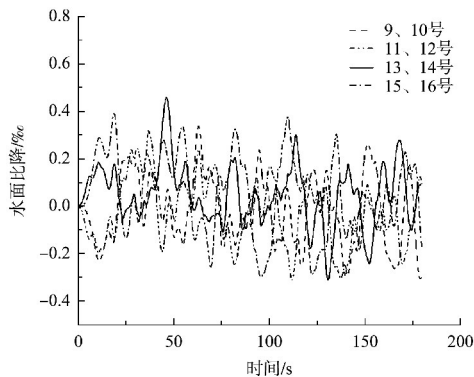


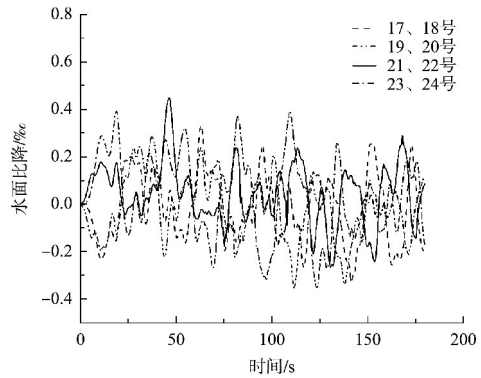
图 9 压力室输水系统各支孔流量过程线
Fig. 9 Flow process lines of each branch hole in the pressure chamber water conveyance system



a) 1~8号测点水面比降



b) 9~16号测点水面比降



c) 17~24号测点水面比降

图 10 压力室输水系统纵向水面比降过程线
Fig. 10 Longitudinal water surface gradient process line of pressure chamber water conveyance system

由图 10 可知, 压力室输水系统的纵向水面比降控制在 0.4‰ 以内, 相比等惯性输水系统改善了 40% 以上。但该输水系统目前仅限于数值模拟, 下阶段还需结合物理模型试验进一步验证其可行性。

4 结语

1) 随着我国西部大开发战略的持续推进, 崇山峻岭间的通航建筑物水头差将超过 60 m, 甚至达到 100 m 以上, 省水船闸的输水系统需要更有高效安全的形式加以支撑, 才能实现船舶顺利过坝的目标。

2) 依托平陆运河马道船闸, 采用闸墙长廊道单侧进水闸底纵支廊道四区段盖板消能形式, 能满足峰值输水流量近 600 m³/s 时船舶安全过闸的要求, 经数值模拟、物理模型等的验证, 该输水系统可靠。

3) 依托金沙江向家坝船闸, 本文采取压力室输水系统的形式, 通过数值模拟进行验证。初步研究成果表明, 该输水系统能满足船舶安全过闸的要求, 下阶段还需结合物理模型试验进一步验证其可行性。

参考文献:

- [1] 陈莹颖, 李中华, 许铎. 小清河水牛韩省水船闸输水系统布置及水力计算[J]. 水运工程, 2020(1): 63-69, 102.
CHEN Y Y, LI Z H, XU D. Layout and hydraulic calculation of filling and emptying system for Shuiniuhan water-saving ship lock of Xiaoqing River [J]. Port & waterway engineering, 2020(1): 63-69, 102.
- [2] 何良德, 戈国庆, 杨晓松, 等. 金家堰省水船闸互通式短廊道输水系统计算[J]. 水运工程, 2021(2): 64-70, 88.
HE L D, GE G Q, YANG X S, et al. Calculation of filling and emptying system with interconnected short culvert for Jinjiayan water-saving lock [J]. Port & waterway engineering, 2021(2): 64-70, 88.
- [3] 韩莹莹, 刘海民, 张丽媛, 等. 某枢纽省水船闸输水系统水力学模型试验[J]. 水运工程, 2023(3): 121-126.
HAN Y Y, LIU H M, ZHANG L Y, et al. Hydraulic model test of filling and emptying system for a water-saving ship lock [J]. Port & waterway engineering, 2023(3): 121-126.
- [4] 黎运菜, 石桂萍. 桂林市春天湖双线省水船闸及其输水系统特性分析[J]. 中国水运(下半月), 2011, 11(18): 76-78.
LI Y F, SHI G P. Characteristics analysis of double-line water-saving ship lock and its water conveyance system in Chuntianhu, Guilin [J]. China water transport (the second half of the month), 2011, 11(18): 76-78.
- [5] 卿云. 小尺度省水船闸布置及输水系统型式研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2016.
QING Y. Study on the layout of small scale water-saving ship lock and types of water conveyance systems [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2016.
- [6] 李召辉, 熊东. 平陆运河青年枢纽双线省水船闸输水系统设计[J]. 珠江水运, 2024(22): 58-61.
LI Z H, XIONG D. Design of water conveyance system of double-line water-saving ship lock of Pinglu Canal Youth Hub [J]. Pearl River water transport, 2024 (22): 58-61.
- [7] 陈明, 吕森鹏, 刘原, 等. 省水船闸输水系统水力学研究综述[J]. 水运工程, 2021(9): 106-112, 119.
CHEN M, LYU S P, LIU Y, et al. Review of hydraulics investigations of filling and emptying system in ship locks with water-saving basins [J]. Port & waterway engineering, 2021(9): 106-112, 119.
- [8] 刘本芹, 杨锦, 黄岳, 等. 山区省水船闸输水系统水力学研究[J]. 水运工程, 2023(6): 114-119.
LIU B Q, YANG J, HUANG Y, et al. Hydraulics of filling and emptying system of water-saving ship lock in mountainous rivers [J]. Port & waterway engineering, 2023(6): 114-119.
- [9] 安晓峰, 王华, 王勤振, 等. 省水船闸水池及输水系统布置研究[J]. 水运工程, 2024(9): 153-160.
AN X F, WANG H, WANG Q Z, et al. Layout of water-saving pool and water conveyance system for water-saving ship lock [J]. Port & waterway engineering, 2024(9): 153-160.
- [10] 张丽媛, 汤建宏. 高水头省水船闸水工结构及输水系统研究[J]. 水运工程, 2016(10): 146-151.
ZHANG L Y, TANG J H. Research on structure and water-conveyance system in high water head water-saving ship lock [J]. Port & waterway engineering, 2016(10): 146-151.
- [11] 崔诗豪, 薛宏程, 陈明, 等. 一种新型竖井式省水船闸输水系统三维数值模拟研究[J]. 水动力学研究与进展(A辑), 2024, 39(4): 522-530.
CUI S H, XUE H C, CHEN M, et al. Three-dimensional numerical simulation of water conveyance system of new vertical shaft-type water-saving lock [J]. Chinese journal of hydrodynamics, 2024, 39(4): 522-530.

(本文编辑 赵娟)