



高水头船闸双层输水系统数值计算

张文传^{1,2,3}, 蒋筱民¹, 童迪¹, 王亚洲⁴

(1. 长江勘测规划设计研究有限责任公司, 湖北 武汉 430010;

2. 水利部长江治理与保护重点实验室, 湖北 武汉 430010;

3. 流域水安全保障湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430010; 4. 武汉大学水利水电学院, 湖北 武汉 430072)

摘要: 高水头船闸由于水头高、输水时间短等因素常存在流速大、结构空化以及闸室出流不均匀等问题, 对过闸船舶及船闸结构的安全产生不利影响。结合三峡船闸实际运行情况, 提出一种新型双层等惯性输水系统, 将部分廊道和分流口布置高程降低, 形成底层输水廊道, 增大闸底板出水孔布置区域, 在输水量增加、输水时间不变的条件下, 能够保证输水系统结构的安全以及闸室水流条件的均匀性。采用 RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型进行中间级船闸的充泄水过程模拟计算, 分析输水过程流量、闸室水位变化情况、输水系统流速及压强分布等水力特性, 验证了双层等惯性输水系统的可行性。研究成果可为高水头船闸输水系统设计提供技术参考。

关键词: 高水头; 输水系统; 水力特性; 数值计算

中图分类号: U64

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2024)01-0090-07

Numerical calculation on double layer filling-emptying system of high-head ship lock

ZHANG Wenchuan^{1,2,3}, JIANG Xiaomin¹, TONG Di¹, WANG Yazhou⁴

(1. Changjiang Survey, Planning, Design and Research Co., Ltd., Wuhan 430010, China;

2. Key Laboratory of Changjiang Regulation and Protection of Ministry of Water Resources, Wuhan 430010, China;

3. Hubei Key Laboratory of Basin Water Security, Wuhan 430010, China;

4. School of Water and Resources and Hydropower Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: There are some problems such as high flow velocity, structural cavitation and uneven discharge of lock chamber, because of the high-head and short delivery time, which have adverse effects on the safety of ships passing through the shiplock and the structure of the shiplock. The paper combines with the actual operation of the Three Gorges Shiplock, a new type of double-layer inertia-equilibrium filling-emptying system is proposed, which reduces the elevation of some galleries and diversion openings, forms the bottom filling-emptying gallery, and increases the layout area of shiplock floor outlet. Under the condition of increasing water delivery volume and maintaining water delivery time, it is possible to ensure the safety of the filling-emptying system structure and the uniformity of water flow conditions in the lock chamber. The RNG $k-\varepsilon$ turbulence model is used to simulate the filling and discharging process of intermediate shiplock. The hydraulic characteristics such as flow rate, water level change of lock chamber, velocity and pressure distribution of filling-emptying system are analyzed. The research results prove the feasibility of double-layer inertia-equilibrium filling-emptying system which can provide technical reference for the design of filling-emptying system of high-head and abyssolith shiplock.

Keywords: high-head; filling-emptying system; hydraulic characteristics; numerical calculation

收稿日期: 2023-04-23

作者简介: 张文传 (1992—), 男, 博士, 工程师, 从事通航与过鱼建筑物研究。

1 高水头船闸输水系统研究概况

船闸输水系统随水利工程的发展已有上百年的历史, 初期的输水系统结构简单, 仅适用于闸室尺寸小、水头低的工程。随着建筑材料的进步和施工技术的发展, 形成了集中输水系统和分散输水系统两大类。集中输水系统闸室中不设输水廊道, 结构简单、工程造价低, 适用于水头较低的船闸。分散输水系统水流在闸室各部位均匀地进入闸室, 充、泄水时间与闸室停泊条件矛盾相对较小, 适用于高水头船闸^[1-2]。

20 世纪以来, 工程施工技术及材料研究应用发展迅猛, 高水头船闸在实际工程中应用较多。早期的高水头船闸多采用闸底长廊道输水系统, 如前苏联的乌斯基-卡米诺阿尔斯基单级船闸, 闸室尺寸为 $100\text{ m}\times 15.0\text{ m}$ (长 \times 宽), 水头 $H=42.00\text{ m}$ ^[3], 以及我国的万安单级船闸, 闸室尺寸为 $175\text{ m}\times 14.0\text{ m}$, $H=32.50\text{ m}$ ^[4]。美国的冰港^[5]、约翰德^[6]、下纪念碑^[7]及小鹅船闸^[8]均采用了闸底前后横支廊道输水系统, 闸室尺寸为 $206\text{ m}\times 26.2\text{ m}$, $H=34.50\sim 30.80\text{ m}$; 我国葛洲坝 2 号船闸则采用了更加复杂的闸底纵横支廊道输水系统^[9], 闸室尺寸为 $280\text{ m}\times 34.0\text{ m}$, $H=27.00\text{ m}$ 。20 世纪 50 年代, 法国提出了等惯性输水原理, 并将其应用于圣-皮尔船闸 ($H=26.00\text{ m}$) 中, 大大提升了闸室水面平均上升速度 (3.65 m/min), 美国在下花岗岩船闸中设计采用了更实用的闸墙廊道 4 区段出水立体分流等惯性输水系统^[10-11]。

随着船闸闸室尺寸增大和水头增加, 输水系统的结构及布置形式越来越复杂, 等惯性输水系统在高水头船闸中的应用也越来越多, 逐渐形成 2、4 和 8 区段等布置形式。表 1 中统计了等惯性

输水系统在高水头船闸中的应用情况, 由表可知, 随着闸室尺寸或水头的增大, 输水系统的复杂程度也随之增大; 闸室长度大于 200 m 的船闸, 多采用 4 区段等惯性输水系统, 8 区段等惯性输水系统由于布置形式更加复杂, 目前仍停留在理论研究阶段, 尚未有实际工程应用。

表 1 高水头船闸等惯性输水系统应用情况

船闸名称	形式	闸室尺寸 (长 \times 宽)/ (m \times m)	最大水头/ m	输水系统 形式
葛洲坝 1 号	单级	280 \times 34.0	27.00	4 区段等惯性
葛洲坝 3 号	单级	120 \times 18.0	27.00	2 区段等惯性
大化	单级	120 \times 12.0	29.00	2 区段等惯性
普鲁米	单级	142 \times 12.0	30.30	2 区段等惯性
下花岗岩	单级	206 \times 26.2	31.60	4 区段等惯性
白马	单级	150 \times 23.0	32.94	2 区段等惯性
瓦莱伊拉	单级	86 \times 12.1	33.00	2 区段等惯性
索伯雷丁莎	单级	200 \times 17.0	33.00	4 区段等惯性
银盘	单级	120 \times 12.0	35.12	2 区段等惯性
图库鲁伊	带中间渠道	210 \times 33.0	72.80(36.50)	4 区段等惯性
安谷	单级	120 \times 12.0	37.65	2 区段等惯性
水口	单线 3 级	130 \times 12.0	57.50(41.70)	2 区段等惯性
五强溪	单线 3 级	130 \times 12.0	60.90(42.50)	2 区段等惯性
三峡	双线 5 级	280 \times 34.0	113.00(45.20)	4 区段等惯性

目前, 高水头船闸等惯性输水系统的应用使水流较为均匀地进入闸室, 但受限于廊道的布置, 部分区域不能布置出水孔, 闸室水流存在一定的波动起伏。如图 1 所示, 三峡船闸第一、二分流口与分支廊道在同一高程, 难以布置出水孔, 该区域水流流速小, 出水孔区域高流速水流的湍动扩散, 不利于闸室内水流平稳。本文在三峡船闸输水系统基础上进行分析总结, 提出了一种高水头双层等惯性输水系统, 以减弱充泄水过程中闸室流场紊乱、消能不充分等对船闸结构的影响。

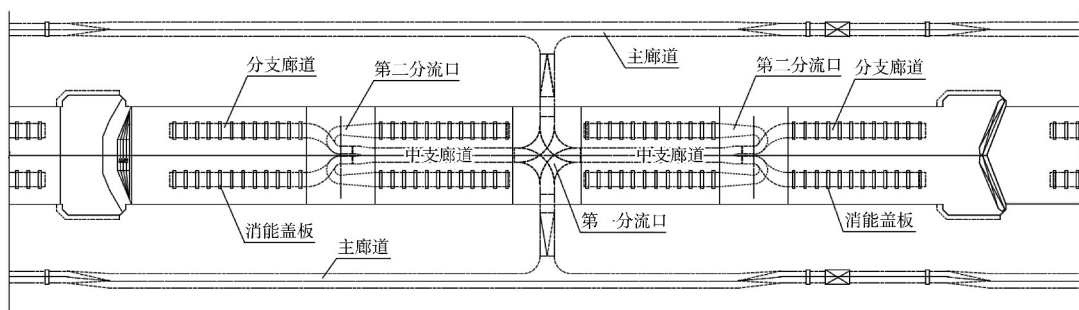


图 1 三峡现有船闸中间级船闸平面布置

2 高水头船闸双层输水系统

结合高水头船闸闸室出水不均匀、消能不充

分等问题,在现有三峡船闸的基础上对输水系统进行改进研究,具体布置见图 2。

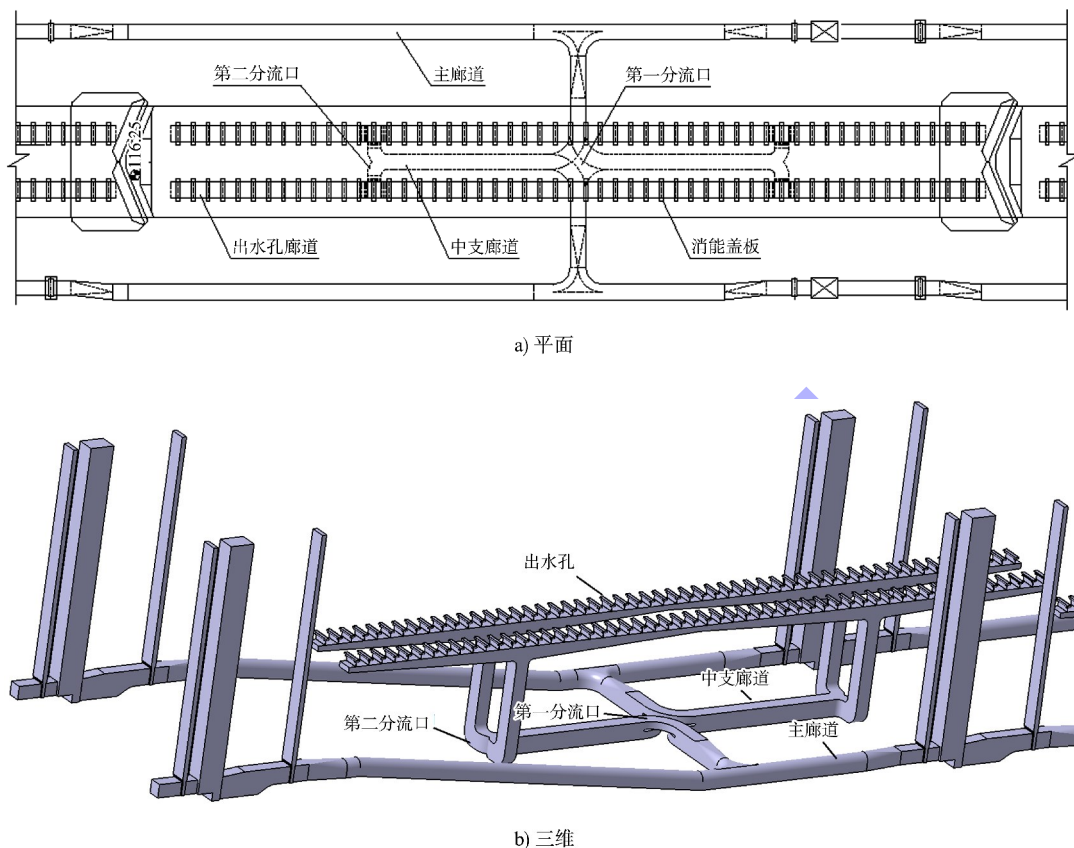


图 2 双层输水系统布置

考虑长江航运量增大,将设计最大过闸船舶由 3 000 吨级提升至 10 000 吨级,闸室宽度由 34 m 加宽至 40 m。为避免充泄水过程中高速水流对阀门段、分流口的空蚀破坏及对闸室船舶停泊条件的影响,参照已建三峡船闸及其他规模、水头相似的船闸输水系统形式,提出了一种新型双层等惯性输水系统布置形式。将主廊道、中支廊道、第一及第二分流口布置高程降低,形成底层输水廊道,因第一、二分流口不再占用闸底面积,闸底 99% 的区域布置出水孔廊道,充分分散出流消减输水能量,以优化闸室内船舶停泊条件;第二分流口采用 T 形空腔自分流形式,之后水流通过垂直竖井进入出水孔廊道,竖井具有调整水流及消能作用;闸底板出水孔廊道横截面高度自竖井向两侧逐渐减小,使得闸室出流均匀。同时,由于分层布置输水廊道,主廊道得以逐级向下简洁

布置,避免了三峡既有船闸主廊道的上下起伏布置及大底坡,检修条件更好。

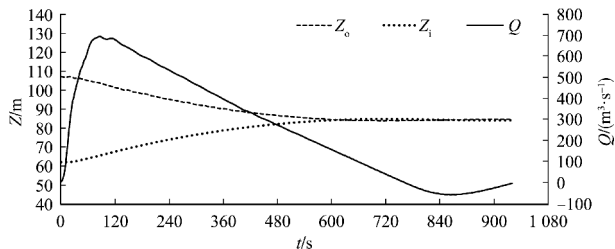
3 输水系统水力特性

同三峡既有船闸相比,本设计船闸尺寸更大,单次输水水体增加。由于输水系统水流空化特性及闸室内船舶停泊条件等水力学问题是体型设计的关键,为保障船闸运行及船舶停泊安全,采用 RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型对船闸充泄水过程进行数值模拟计算研究。

3.1 输水过程水力特性

针对船闸“四泄五充”运行过程进行计算模拟,双阀匀速同步开启,选择与现有船闸一致的开阀速度,即 2 min 开闸。整个充泄水过程见图 3,随阀门开度增加,输水流量逐渐增大,至阀门全开后又逐渐减小,输水过程中最大流量 Q_{\max} =

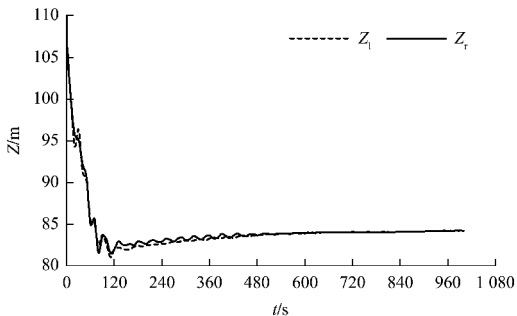
696 m³/s。由两闸室水位变化可知输水时间约为 10 min, 但由于水流惯性, 在两闸室水位齐平后, 水流仍进入充水闸室, 并形成轻微的回流震荡。



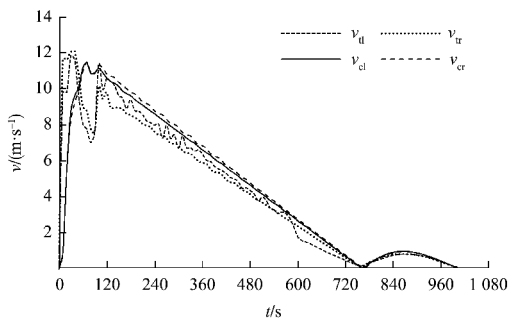
注: Z_o 和 Z_i 分别表示泄水闸室和充水闸室水位。

图 3 闸室水位-流量关系曲线

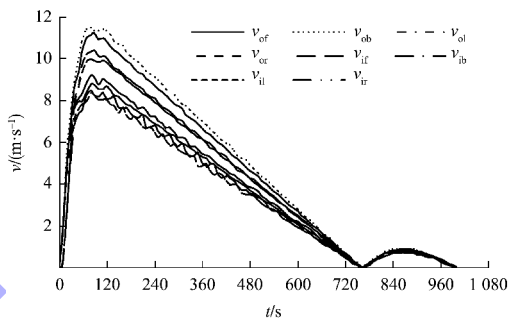
计算过程中监测了关键部位的流速、压强等水力特性的过程变化情况, 见图 4。阀门匀速开启过程中, 输水阀门井内水位急剧下降, 并伴有一定程度的波动, 阀门全开后呈现小幅度波动。各关键部位的流速和压强变化与输水过程中流量的变化相关, 流速均随着输水流量呈先增加后减小的变化趋势, 由于水流流动的滞后性及沿程阻力损失, 充水闸室关键部位的流速略低于泄水闸室。其中, 反弧门跌坎处最大流速约为 12.0 m/s, 阀门开启过程中存在较大的流速波动, 主廊道断面平均流速最大值为 11.5 m/s, 泄水闸室第一分流口隔板处最大流速达 11.5 m/s, 充水闸室则为 9.0 m/s, 第二分流口分隔墩处流速相对较小, 均在 2.0 m/s 以下。充泄闸室压强随输水过程表现为中和平衡的变化, 即泄水闸室压强减小, 充水闸室压强增大, 输水完成后达到平衡稳定状态。



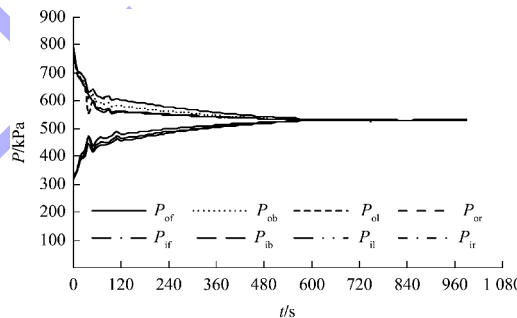
a) 输水阀门井水位变化



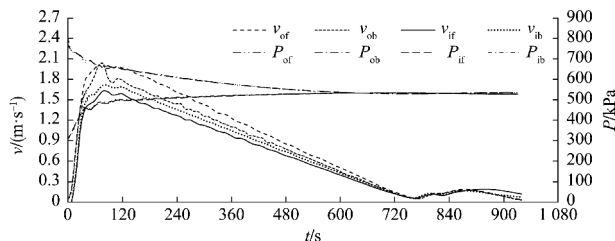
b) 反弧门跌坎处流速及主廊道断面平均流速



c) 第一分流口分隔板处流速



d) 第一分流口分隔板处压强



e) 第二分流口导流脊处流速和压强

注: 图中下标 o、i、l、r、f、b、t、c 分别为泄水闸室、充水闸室、左侧、右侧、上游侧、下游侧、闸门处、主廊道。

图 4 水力特性的过程变化

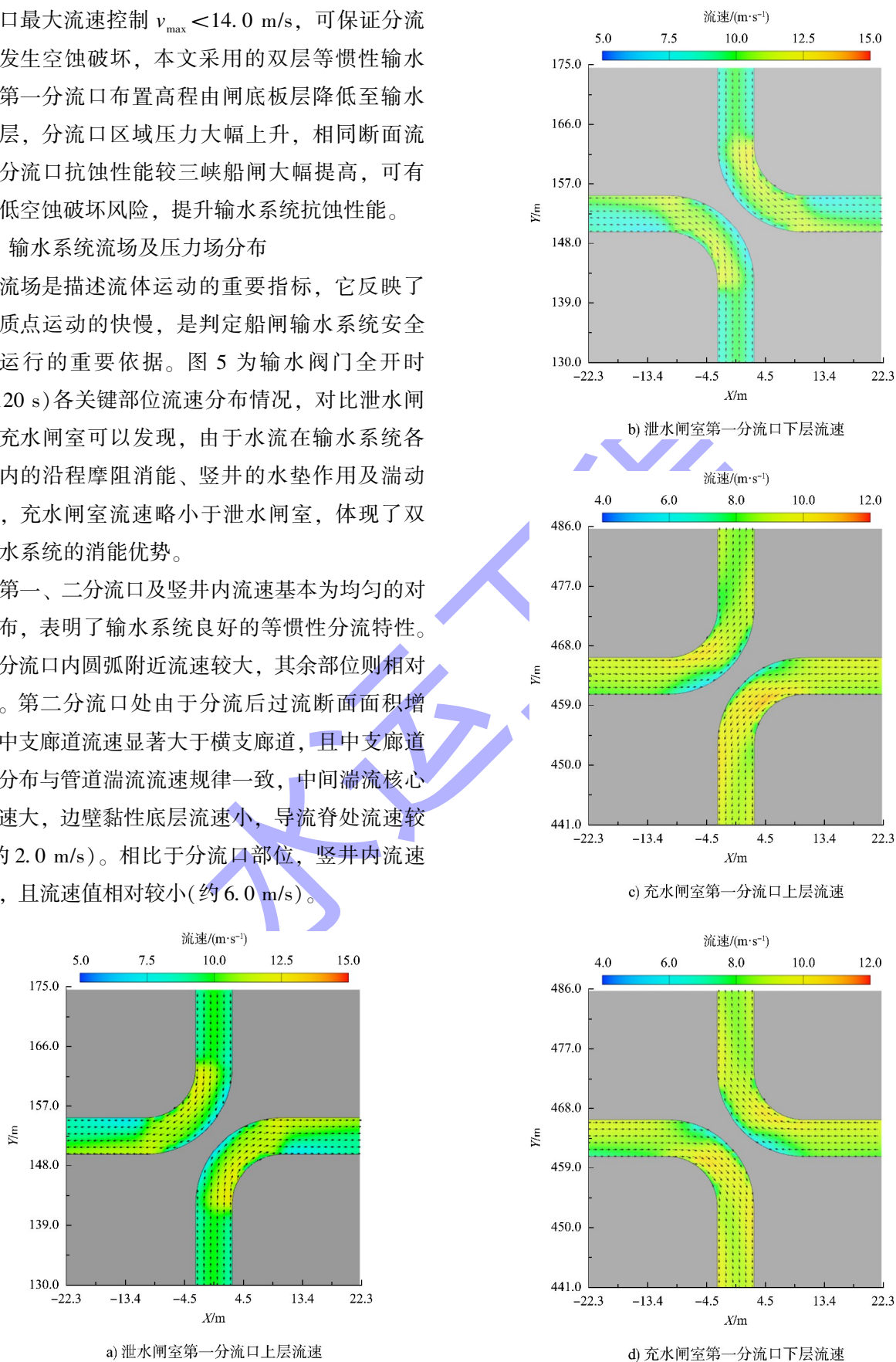
船闸设计规范中要求输水廊道最大流速 $v_{\max} < 15.0$ m/s, 计算表明各部位流速均小于 15.0 m/s, 满足规范要求; 易发生水流分离的分流口区域对流速和压强的控制要求更高, 三峡现有船闸第一

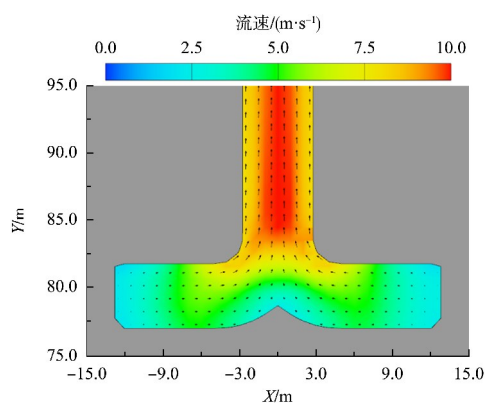
分流口最大流速控制 $v_{\max} < 14.0 \text{ m/s}$, 可保证分流口不发生空蚀破坏, 本文采用的双层等惯性输水系统第一分流口布置高程由闸底板层降低至输水阀门层, 分流口区域压力大幅上升, 相同断面流速下分流口抗蚀性能较三峡船闸大幅提高, 可有效降低空蚀破坏风险, 提升输水系统抗蚀性能。

3.2 输水系统流场及压力场分布

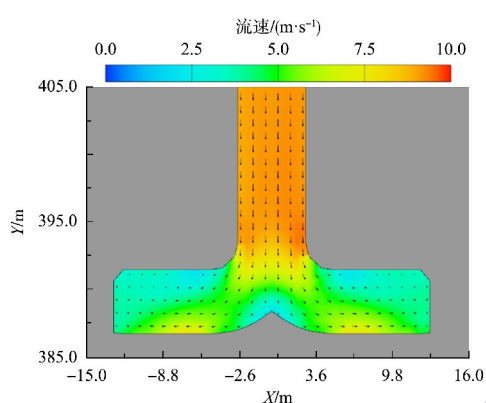
流场是描述流体运动的重要指标, 它反映了流体质点运动的快慢, 是判定船闸输水系统安全稳定运行的重要依据。图 5 为输水阀门全开时 ($t=120 \text{ s}$) 各关键部位流速分布情况, 对比泄水闸室和充水闸室可以发现, 由于水流在输水系统各廊道内的沿程摩阻消能、竖井的水垫作用及湍动耗能, 充水闸室流速略小于泄水闸室, 体现了双层输水系统的消能优势。

第一、二分流口及竖井内流速基本为均匀的对称分布, 表明了输水系统良好的等惯性分流特性。第一分流口内圆弧附近流速较大, 其余部位则相对均匀。第二分流口处由于分流后过流断面面积增大, 中支廊道流速显著大于横支廊道, 且中支廊道流速分布与管道湍流流速规律一致, 中间湍流核心区流速大, 边壁黏性底层流速小, 导流脊处流速较小 (约 2.0 m/s)。相比于分流口部位, 竖井内流速均匀, 且流速值相对较小 (约 6.0 m/s)。

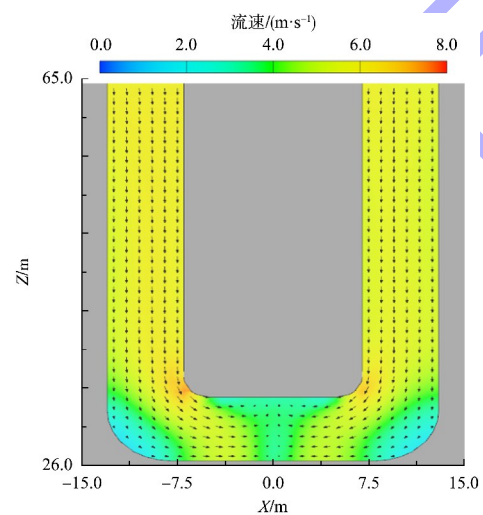




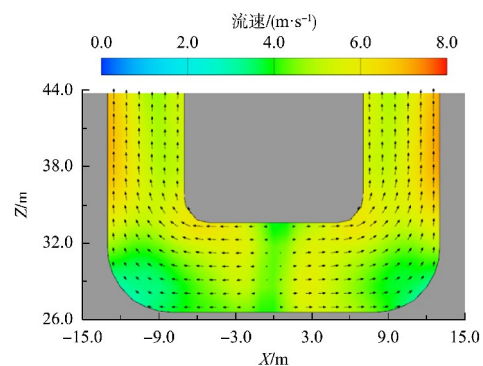
e) 泄水闸室第二分流口流速分布



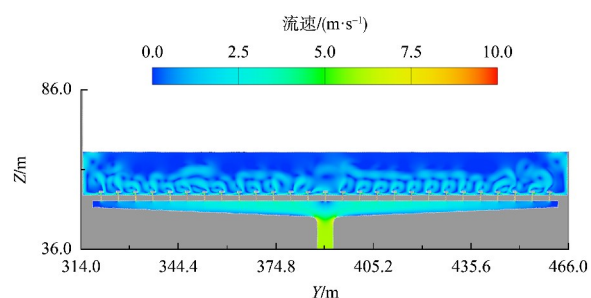
f) 充水闸室第二分流口流速分布



g) 泄水闸室竖井流速分布



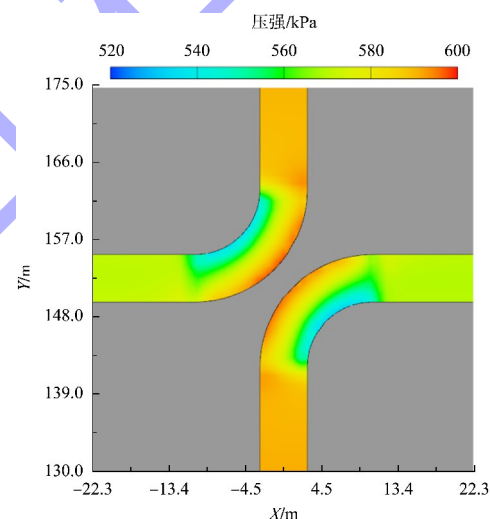
h) 充水闸室竖井流速分布



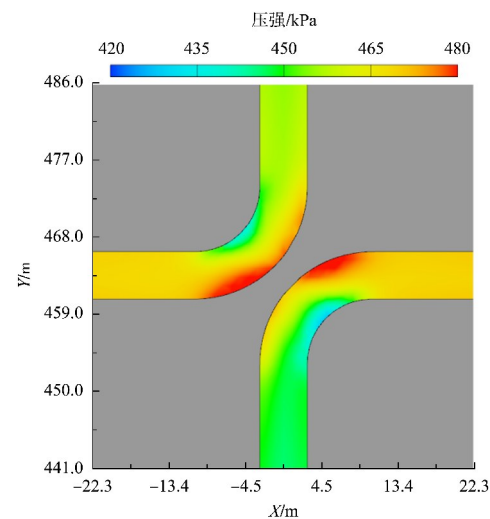
i) 充水闸室出水孔流速分布

图 5 $t = 120$ s 时, 输水系统关键部位流速分布

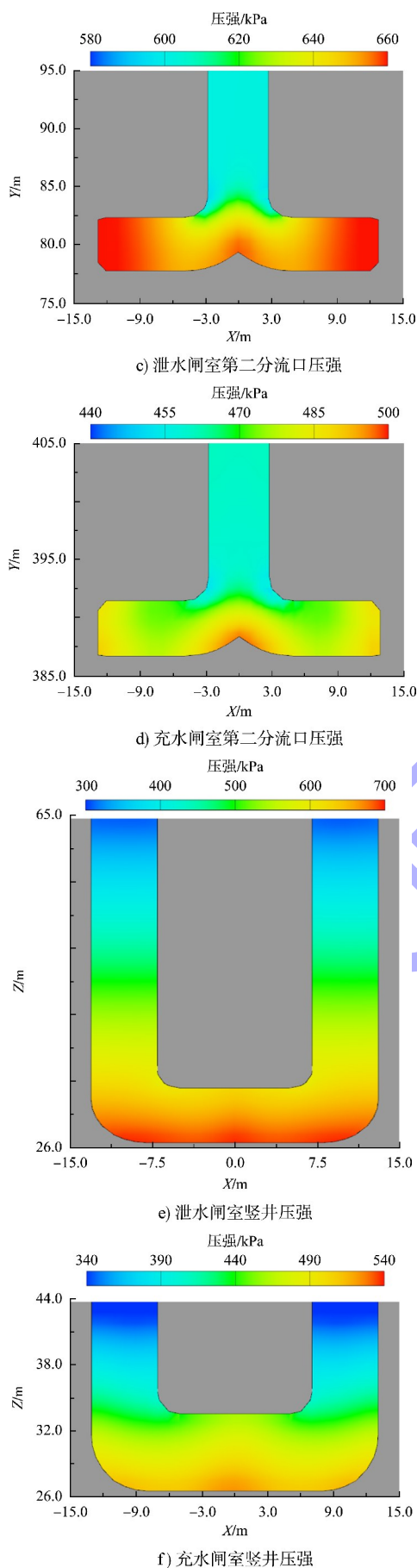
各关键部位压强分布见图 6, 可知各分流口及竖井段未出现负压, 且表现为较大压强。输水系统中流速和压强符合伯努利方程的分布, 各部位压强变化规律与流速变化规律相反, 流速大的位置压强相对较小。



a) 泄水闸室第一分流口上层压强



b) 充水闸室第一分流口上层压强

图6 $t = 120\text{ s}$ 时, 输水系统关键部位压强分布

结合压强与流速的变化来看, 关键部位最低压强均在 300 kPa 以上, 远大于水流的汽化压强, 且流速均在 15.0 m/s 以内, 发生空蚀破坏的可能性较小。

4 结论

1) 在三峡现有船闸的基础上, 增大了闸室宽度、增加充泄水量, 保持阀门启闭方式及 12 min 输水时间不变的前提下, 双层等惯性输水系统水流条件较好。

2) 双阀匀速开启条件下, 开阀速度为 2 min 时, 双层等惯性输水系统输水过程中最大流量 $Q_{\max} = 696\text{ m}^3/\text{s}$, 输水系统消能效果较好, 最大流速为 12.0 m/s, 低于现有船闸的控制流速。

3) 输水系统内流场分布均匀, 各分出口及竖井流速和压强基本对称分布, 体型设计分流均匀、水力条件好、出水孔出流均匀、闸室船舶停泊条件良好。

4) 双层等惯性输水系统布置结构形式复杂, 需在岩层中开挖大量洞室结构, 在实际工程中可应用于水头较高、基岩条件好的船闸中。

参考文献:

- [1] 钮新强, 宋维邦. 船闸与升船机设计[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2007.
- [2] 吴英卓, 陈建, 王智娟, 等. 高水头船闸输水系统布置及应用[J]. 长江科学院院报, 2015, 32(2): 58-63.
- [3] 交通部科学技术情报研究所. 国外过船建筑物(第一辑)[R]. 北京: 交通部科学技术情报研究所, 1972.
- [4] 杨本新. 万安船闸设计与运行实践[J]. 人民长江, 1996(11): 21-23, 46.
- [5] CHANDA A J, PERKINS L Z. Filling and Emptying System, John Day Lock Columbia River, Oregon and Washington; Hydraulic Model Investigation [R]. Washington: United States Army Corps of Engineers, 1974.

(下转第 104 页)