



船闸单侧闸墙主廊道输水系统 岔管水动力特性研究*

张志崇^{1,2}, 杨海滔^{1,2}, 胡亚安³, 薛淑³, 严秀俊³

(1. 中水东北勘测设计研究有限责任公司, 吉林 长春 130021;

2. 水利部寒区工程技术研究中心, 吉林 长春 130061; 3. 南京水利科学研究院, 江苏 南京 210029)

摘要: 船闸单侧闸墙主廊道输水系统具有结构简单、开挖量小、工程投资省等优点, 在河谷狭窄、边坡陡峭等地形受限地区具有明显的技术优势, 但工程应用难点之一在于如何保证廊道内断面流速的均匀性, 避免出现严重的偏流、脱流现象。依托嘉陵江草街二线船闸工程, 采用通用CFD软件FLUENT, 对船闸单侧闸墙主廊道双阀门输水系统布置中的岔管水动力特性进行较为详细的研究, 探讨岔管分岔角、墩头曲线形式以及外壁曲线形式对岔管水力特性的影响, 提出外壁采用正弦曲线, 内壁采用圆弧-直线-圆弧形曲线的单侧输水廊道阀门段岔管布置体形, 可为类似工程设计提供参考。

关键词: 单侧闸墙输水廊道; 岔管体形; 流速不均匀系数; 数值模拟; 草街二线船闸

中图分类号: U641.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2024)05-0103-07

Hydrodynamic characteristics of bifurcation pipe in main corridor water conveyance system of unilateral lock wall

ZHANG Zhichong^{1,2}, YANG Haitao^{1,2}, HU Ya'an³, XUE Shu³, YAN Xiujun³

(1. China Water Northeastern Investigation, Design & Research Co., Ltd., Changchun 130021, China;

2. Research Center on Cold Region Engineering Technology, Ministry of Water Resources, Changchun 130061, China;

3. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China)

Abstract: The main corridor water conveyance system of unilateral lock wall has the advantages such as simple structure, small amount of excavation and less investment in the project. It has obvious technical advantages in the narrow valley, steep slope and other topographic restricted areas. However, one of the difficulties in its engineering application is how to ensure the uniformity of the flow velocity in the corridor and avoid serious drift and deflow phenomena. Based on Caojie second-line ship lock project of Jialing River, this paper uses the general CFD software FLUENT to study the hydrodynamic characteristics of the bifurcation pipe in the layout of double valve water delivery system in the main corridor of the single-side lock wall in a more detailed way, and discusses the influence of the bifurcation angle of the bifurcation pipe, pier curve type and outer wall curve type on the hydraulic characteristics of the bifurcation pipe. The layout type of bifurcated pipe in the valve section of unilateral water transmission gallery with sinusoidal curve on the outer wall and arc-straight-arc curve on the inner wall is proposed, which can provide reference for similar engineering design.

Keywords: water conveyance corridor of unilateral lock wall; branch pipe type; velocity heterogeneity coefficient; numerical simulation; Caojie second-line ship lock

收稿日期: 2023-09-11

*基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFC0407303)

作者简介: 张志崇(1982—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为船闸水力学和水工结构工程。

船闸是连通不同水系、克服集中水位差的主要过船建筑物^[1-2]。工程上通常采用双侧闸墙对称式输水廊道以保证闸室内水流分配均匀^[3-4]，而单侧闸墙输水廊道布置形式的应用、研究较少^[5]。双侧、单侧闸墙输水廊道的一般布置形式见图1。

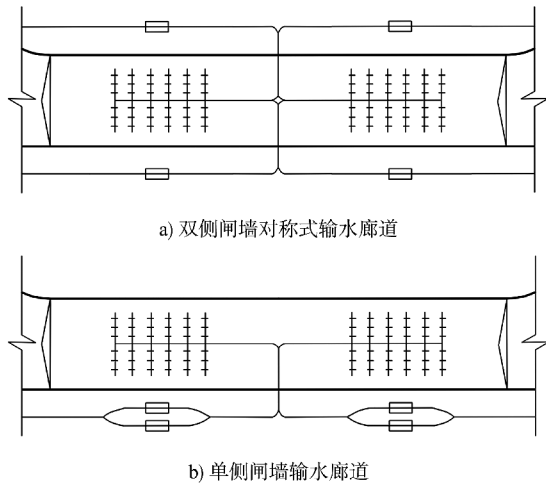


图1 双侧、单侧闸墙输水廊道布置

单侧闸墙主廊道输水系统具有结构简单、开挖量小、工程投资省等优点，在河谷狭窄、边坡陡峭等地形受限地区具有明显的技术优势^[6]，但难点之一在于如何保证廊道内断面流速的均匀性。如在三峡船闸设计阶段论证过单侧主廊道布置，由于单边输水工况岔管段空化及分隔墩水流条件恶劣，最终改为双侧主廊道布置。目前关于岔管水力学的研究大多集中于抽水蓄能电站岔管的阻力特性，旨在降低水头损失系数，提高电站运行效益。陈青生等^[7]通过数值模拟分析抽水蓄能电站同发同抽等流量运行工况下的岔管水力特性；李玲等^[8]开展了抽水蓄能电站尾水岔管水流流态及阻力特性的试验研究。代元等^[9]提出一种新型岔管体型导流板，可使岔管水头损失减小43.4%，有效改善电站运行效益。与抽水蓄能电站圆形截面岔管不同，受输水廊道形式和阀门形式限制，船闸输水廊道岔管断面多为矩形，且输水运转更为频繁，水流经过廊道岔管后易出现脱流、偏流现象，进而引起岔管自身结构振动和空化空蚀。

目前针对船闸单侧闸墙主廊道岔管段水力特性的研究较少，且无法完全套用抽水蓄能电站岔管段的相关研究成果，因此有必要开展船闸输水系统体形优化研究。

草街航电枢纽位于重庆市合川区，是目前嘉陵江上规模最大的航电枢纽，上、下游通航水位差可达26.7 m，其规划的二线船闸紧邻渝合高速和一线船闸，为避免高速改线、减少工程投资，二线船闸工程输水系统采用单侧闸墙廊道的布置形式。本文依托草街二线船闸工程，采用通用CFD软件FLUENT分析岔管分岔角、墩头曲线形式、外壁曲线形式对岔管水力特性的影响，并提出一种新型岔管布置体型，可为类似船闸输水系统工程的建设提供参考。

1 数学模型的建立与验证

1.1 控制方程

采用FLUENT内置的Standard κ - ε 双方程模型求解定常状态下紊流问题，控制方程包括连续性方程、动量方程：

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

$$\begin{cases} \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\mu}{\rho} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \\ \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\mu}{\rho} \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) \end{cases} \quad (2)$$

式中： u 、 v 分别为 x 、 y 方向的流体速度； t 为时间； p 为流体压强； ρ 为流体密度； μ 为流体动力黏滞系数。

1.2 边界条件

入流边界给定断面平均流速，出流边界给定压力。进、出口水流紊动能 k 与耗散率 ε 根据下式计算：

$$k = 0.00375 u_{\text{ref}}^2 \quad (3)$$

$$\varepsilon = C_{\mu}^{3/4} \frac{k^{3/2}}{l} \quad (4)$$

式中： u_{ref} 为进口断面平均速度； l 为进口的混合

长度, $l=0.07d$, d 为管道等效水力直径; C_μ 为经验常数, 取 0.09。壁面边界采用无滑移边界条件, 基于问题中紊流核心区 Re 较大, 壁面区采用非平衡壁面函数法处理。

1.3 模型验证

采用胡亚安等^[10]的草街二线船闸物模试验成果对本数学模型进行验证, 岔管测点布置见图 2。计算工况分为关闭一侧阀门的单支管过流工况和两侧阀门全部开启的双支管过流工况。

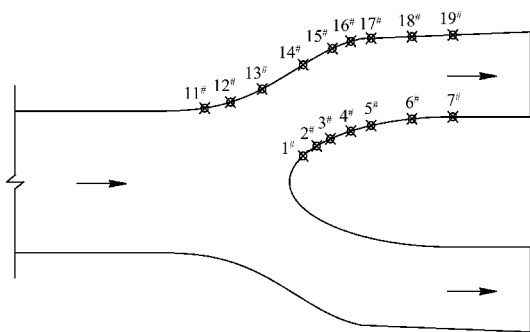


图 2 草街二线船闸物模试验岔管测点布置

数值计算与模型试验结果对比见表 1。可知, 大部分测点压力计算值与实测值误差小于 10%, 最小误差为 0.45%, 平均误差为 5.90%, 验证了本数学模型的可靠性。

表 1 过流管壁压力对比

过流形式	测点	计算值/m	试验值/m	误差/%
	1#	4.97	5.29	6.00
	2#	5.36	5.38	0.45
	3#	6.15	6.19	0.65
	4#	7.42	6.97	6.39
	5#	8.24	8.04	2.45
	6#	8.82	9.98	11.58
	7#	9.55	10.10	5.12
单支管	11#	14.18	14.53	2.41
	12#	13.15	12.49	5.29
	13#	10.50	10.30	2.00
	14#	11.71	12.32	4.98
	15#	14.50	13.90	4.01
	16#	13.00	14.51	10.39
	17#	11.08	13.42	17.46
	18#	10.48	11.55	9.24

续表 1

过流形式	测点	计算值/m	试验值/m	误差/%
	1#	8.00	7.42	7.79
	2#	7.25	6.59	9.95
	3#	7.23	6.62	9.17
	4#	7.51	6.81	10.20
	5#	7.76	7.22	7.42
	6#	7.95	8.22	3.27
	7#	8.21	8.30	1.04
双支管	11#	6.93	7.40	6.32
	12#	7.06	7.35	3.96
	13#	7.76	7.92	2.00
	14#	8.86	9.05	2.06
	15#	9.84	9.52	3.32
	16#	9.41	9.72	3.16
	17#	8.77	9.60	8.61
	18#	8.56	9.00	4.86

2 岔管优化原则及评价指标

2.1 岔管优化原则

岔管体型布置(图 3)的主要影响因素: 1) 主、支管的宽度 B_0 、 B ; 2) 两根支管内壁间距 D ; 3) 内、外壁折角 α 、 β ; 4) 内壁(ST)和外壁(MN)曲线形式及岔管段的长度。为保证船闸输水流量, B_0 和 B 为定值, 受结构安全稳定因素影响, 两根支管内壁间距 D 为定值。

因此, 单侧闸墙主廊道输水系统岔管体型优化只能从 α 、 β 值及 ST 、 MN 曲线形式进行优化研究, 以达到整个输水系统结构布置的要求, 即无论单支管过流还是双支管过流, 在分流口、汇流口等处不发生水流分离现象, 且尽量使岔管内水流分布均匀。

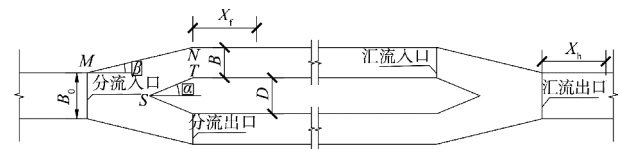


图 3 岔管体型布置

2.2 岔管水力特性评价指标

定义流速不均匀系数 η 来判断岔管内水流是否均匀, 公式为:

$$\eta = \frac{1}{\bar{u} \cdot B} \left(\int_0^B (u - \bar{u}) \cdot \Delta y dy \right) \quad (5)$$

$$\bar{u} = \frac{\int_0^B u dy}{B} \quad (6)$$

式中： B 为管道宽度， Δy 为流速 u 对应的各单元宽度， \bar{u} 为断面平均流速。

3 岔管水动力特性影响因素分析

3.1 分岔角影响

定义无量纲位置参数 X_0 、 X'_0 ，分别代表距分流出口、汇流出口的相对距离，公式为：

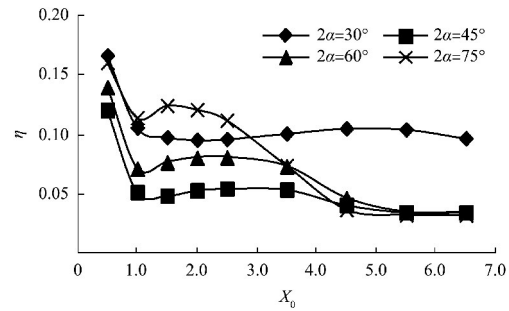
$$X_0 = X_f / R_D \quad (7)$$

$$X'_0 = X_h / R'_D \quad (8)$$

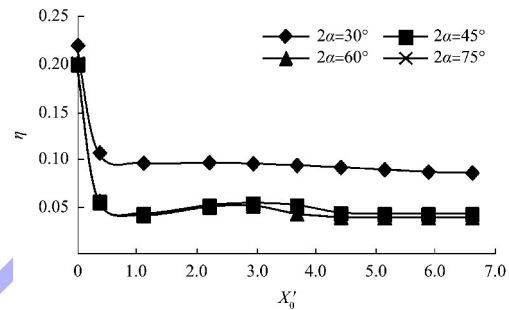
式中： X_f 为断面到分流出口的距离， R_D 为支管水力直径， X_h 为断面到汇流出口的距离， R'_D 为主管水力直径。各参数见图 3。

根据工程布置经验，本文选取外壁曲线折角 $\beta = 13.7^\circ$ ，在此基础上探讨分岔角 $2\alpha = 30^\circ$ 、 45° 、 60° 和 75° 对管内水流条件的影响。双支管过流工况的流速不均匀系数见图 4。分流时： $X_0 = 0 \sim 2.5$ 范围内随分岔角增大 η 值先减后增；在 $X_0 > 5.5$ 时，各分岔角的 η 值基本保持不变，水流基本达到稳定状态。汇流时：除 30° 分岔角的 η 值较大，其他分岔角沿程流速分布趋势基本一致， $X'_0 > 1.0$ 时流速不均匀系数 η 约为 0.05。

根据双支管过流计算结果， $2\alpha = 45^\circ$ 时管内水力学条件较好，因此对 $2\alpha = 45^\circ$ 单支管过流工况进行模拟，结果见图 5。单支管过流工况的 η 值相比双支管过流大幅增长，偏流现象严重。管内流场分布见图 6，水流经过岔管后产生强烈的剪切作用使流线发生弯转，诱发支管内漩涡的生成(诱发涡)；在分流墩墩头处，水流与边界发生分离，且形成回流(射流涡)。对高水头且运转频繁的输水系统，射流涡的存在将引起管内压力梯度较大变化，不利于工程结构稳定，因此有必要进一步优化分流墩形式。

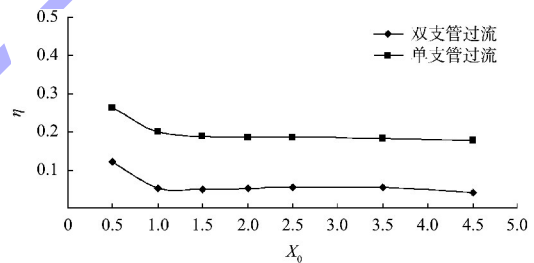


a) 分流口

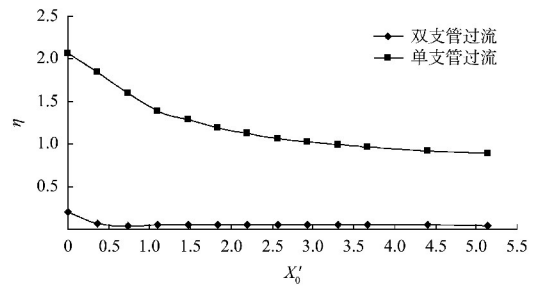


b) 汇流口

图 4 双支管过流工况下不同分岔角的 η 值沿程变化



a) 分流口



b) 汇流口

图 5 $2\alpha = 45^\circ$ 时 η 值沿程变化

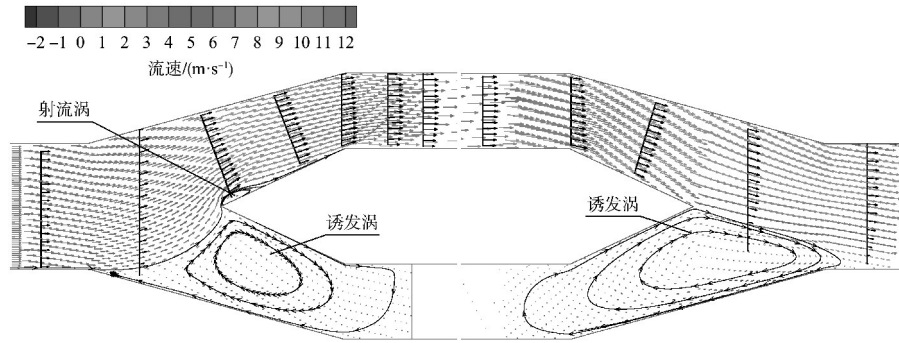


图6 2α=45°时单支管过流工况流场分布

3.2 墩头曲线影响

基于β=13.7°、2α=45°工况, 分析3种墩头曲线形式对水流特性的影响。A形墩头为锐角圆弧形(墩头起点为锐角, 墩头末端为圆弧状), B形墩头为圆弧-直线-圆弧形(墩头起点、末端均为圆弧状), C形墩头为椭圆形, 各墩头形式见图7。

不同墩头形式的流速不均匀系数沿程分布见图8、9。无论双支管过流还是单支管过流, 随着X₀与X'₀的增大, 流速不均匀系数η均逐渐减小且趋于稳定。单支管过流工况中, 分流口η值与双支管过流工况基本一致, 但汇流口η值较双支管过流工况增幅较大。

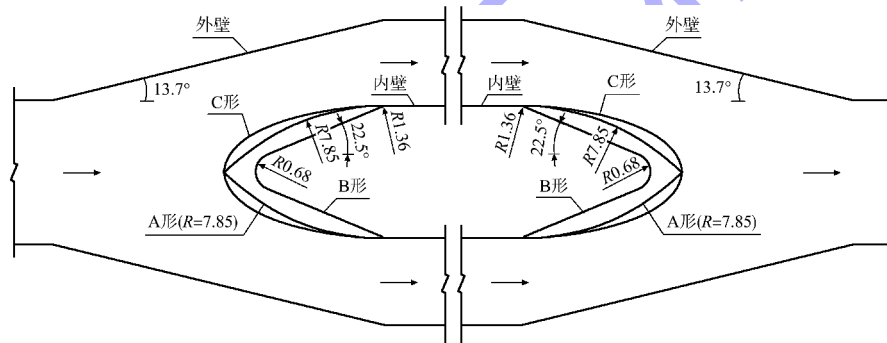
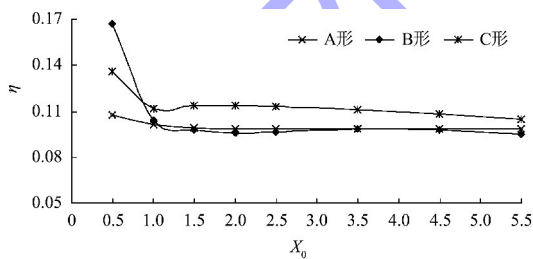
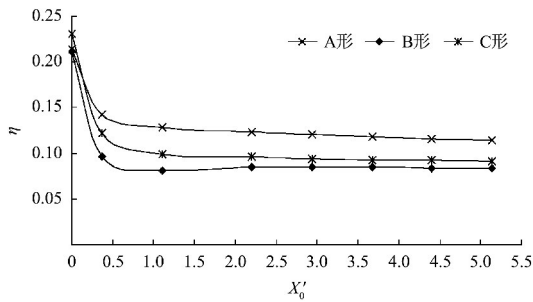


图7 墩头形式

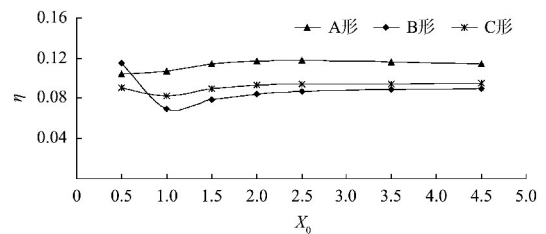


a) 分流口

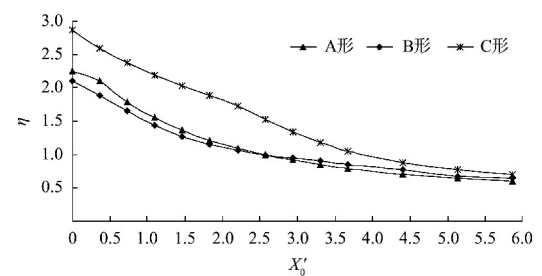


b) 汇流口

图8 双支管过流工况下不同墩头曲线的η值沿程变化



a) 分流口



b) 汇流口

图9 单支管过流工况下不同墩头曲线的η值沿程变化

单支管过流时不同墩头形式的流速场分布见图 10。分流时，A 形墩头附近仍有射流涡存在，与 45° 直线分岔角岔管相比，回旋区范围、紊动强度均减小；B、C 形墩头附近均未形成射流涡，但

诱发涡依然存在。汇流时，不过流支管内均伴有诱发涡现象，其中 B 形墩头回旋范围与回旋区内紊动强度最小(2.0 m²/s²)。

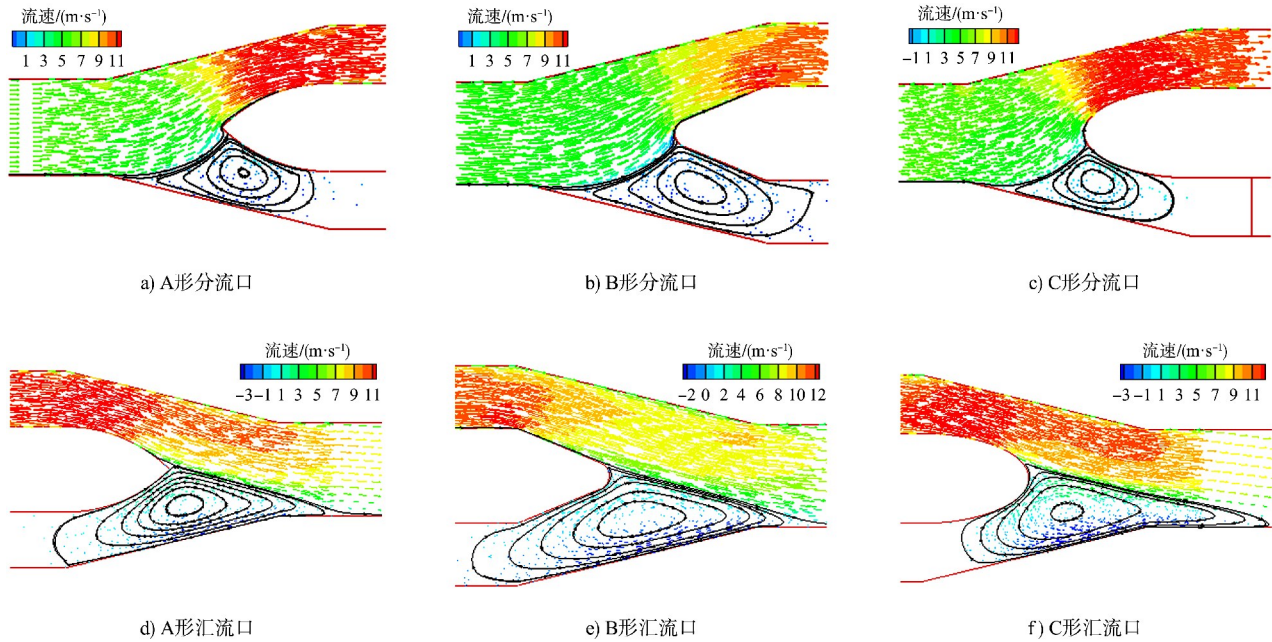


图 10 单支管过流工况下不同墩头形式的流速场分布

综上所述，B 形墩头的流速不均匀系数、回流范围、回流强度均较小，因此推荐 B 形墩头作为岔管的优选布置形式。

3.3 外壁曲线影响

基于 $\beta = 13.7^\circ$ 、 $2\alpha = 45^\circ$ 、B 形墩头工况，分析 3 种外壁曲线形式对水流特性的影响，分别为圆弧-直线-圆弧形、五次曲线形和正弦曲线形，见图 11。

图 12、13 显示了不同外壁曲线的流速不均匀系数的沿程变化。可知，无论双支管过流还是单支管过流，正弦曲线外壁的沿程流速不均匀系数均相对较小，单支管过流的汇流出口处流速不均匀系数最大，为 1.68。不同外壁曲线的管内流场分布见图 14，水流在不同体型边界条件突变处均没有发生分离，正弦曲线体型岔管所产生的水流回旋范围较小，更适用于运转频繁的输水系统。

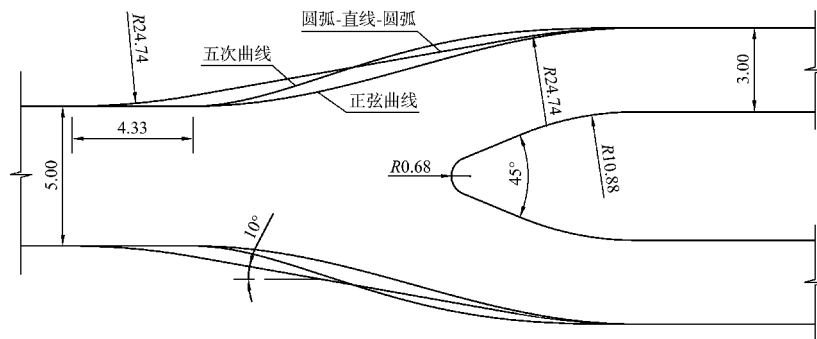
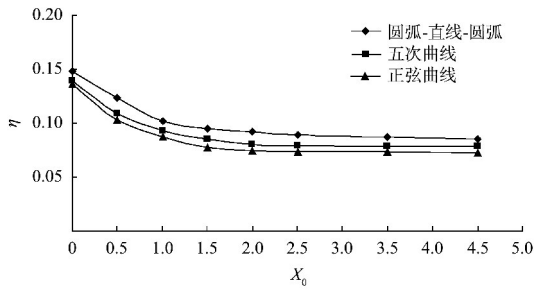
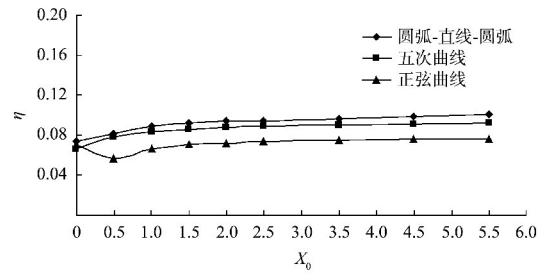


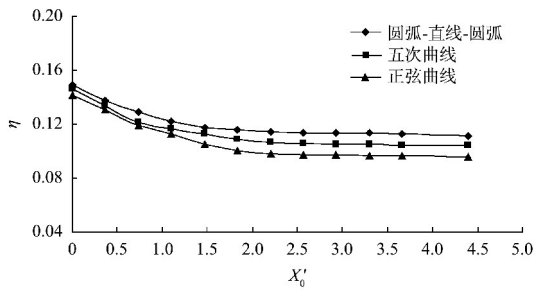
图 11 外壁曲线形式 (单位: m)



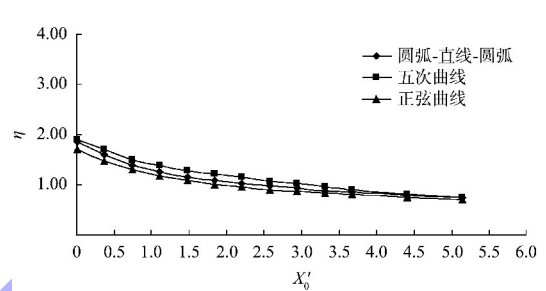
a) 分流口



a) 分流口



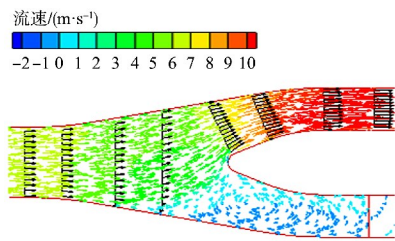
b) 汇流口



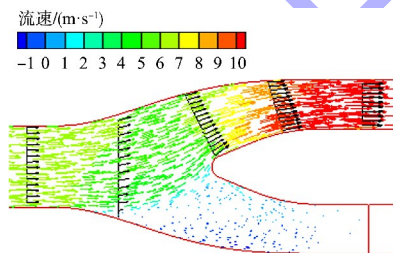
b) 汇流口

图 12 双支管过流工况下不同外壁曲线的 η 值沿程变化

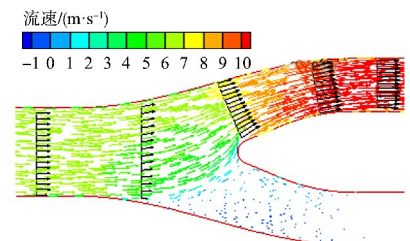
图 13 单支管过流工况下不同外壁曲线的 η 值沿程变化



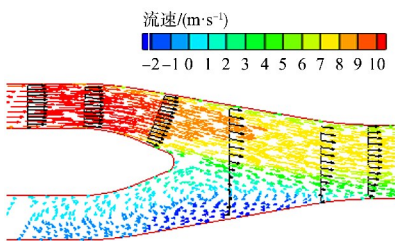
a) 圆弧-直线-圆弧形分流口



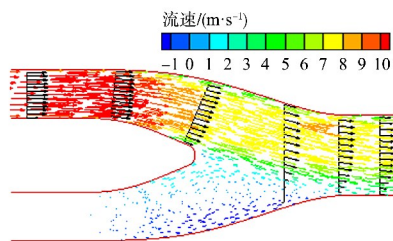
b) 五次曲线形分流口



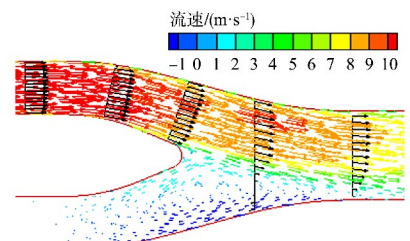
c) 正弦曲线形分流口



d) 圆弧-直线-圆弧形汇流口



e) 五次曲线形汇流口



f) 正弦曲线形汇流口

图 14 单支管过流工况下不同外壁形式的流速场分布

4 结论

1) 基于 FLUENT 建立二维紊流数学模型, 计算值与试验值误差较小, 表明本数学模型对岔管体型进行水力特性分析合理可靠。

2) 采用断面流速不均匀系数来衡量岔管体型的优劣性, 为船闸输水系统布置中阀门段岔管的

选型问题提供了依据。

3) 综合分析不同工况的流速不均匀系数、管内流场分布等水动力特性, 提出外壁采用正弦曲线, 内壁采用圆弧-直线-圆弧形曲线的单侧输水廊道阀门段岔管布置体型, 可为类似工程设计提供参考。

(下转第 150 页)