

大型输水隧洞出口扩散段非稳流态研究

刘明潇¹, 王泽众¹, 朱勇杰¹, 胡昊^{2*}, 王鹏涛¹, 孙东坡¹

(1. 华北水利水电大学 港口、航道与海洋发展研究中心, 郑州 450046;

2. 黄河水利职业技术学院, 河南 开封 475004)

摘要:【目的】研究水流从有压隧洞到无压明渠扩散段过渡时非稳流态产生机理与改善措施。【方法】本文依据流动相似原理与边界层控制理论, 以某大型输水倒虹吸出口过渡段为例, 通过水力模型试验分析了扩散段边界层分离及衍生的回流干扰、主流不稳、水流波动特性, 研究了不良流态引发的三类附加紊动效应。【结果】①扩散段边界层分离使大量漩涡被主流卷吸, 产生附加能耗、衍生波叠加, 干扰扩散段平稳过流。②在扩散段增设导流墩抑制了边界层分离, 消除合流区涡旋脱落与旁侧回流, 消波率达45%~70%, 扩散段末端波动强度由1.11 m降为0.20 m; 理顺了扩散段流路。【结论】在扩散段设置导流墩的消涡降波作用明显, B型导流墩具有更好的流态改善与能耗降低效果, 流速分布沿程调整均衡。

关键词: 扩散段; 边界层分离; 脱落涡; 衍生波; 流线型; 导流墩

中图分类号: TV672⁺.1

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.ggps.2023284

OSID:



刘明潇, 王泽众, 朱勇杰, 等. 大型输水隧洞出口扩散段非稳流态研究[J]. 灌溉排水学报, 2023, 42(12): 107-116.

LIU Mingxiao, WANG Zezhong, ZHU Yongjie, et al. Unsteady Flow in Diffusion Section at the Outlet of Large Water Conveyance Tunnel[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2023, 42(12): 107-116.

0 引言

【研究意义】长距离输水渠道一般都会面临与河流交叉的问题, 通常采用渡槽或倒虹吸工程形式穿越河流。这些交叉建筑物的进出口都存在平面收缩与扩散的过渡段。扩散段边界变化相对急剧时, 边界层分离导致水流结构发生重大调整, 造成回流与涡旋发生, 水流波动强烈、流态紊乱复杂, 直接影响过流能力。在一些大型调水工程中已经发现此类带有共性的问题。因此, 了解扩散段水流波动的原因并设法维持水流流态稳定已经成为近年来水利工作者关注的重要问题。

【研究进展】影响水流流态的因素众多且复杂, 除了水流强度, 边界条件的变化是影响水流流态的主要原因之一。实际水流受周围环境条件制约而运动变化, 边界平面形态、断面形状、糙率、底坡等因素都会影响其水流结构; 边界条件的变化特别是各种涉水建筑物都会对流态产生重要影响。如明渠中桥墩或闸墩绕流急剧改变了原有流向, 使局部水

流产生挤压与扩散, 王开等^[1]、陆倩等^[2]研究发现, 这种绕流会在墩前会产生局部壅水, 墩后出现卡门涡街并冲刷桥墩处河床。薛小华等^[3]通过动床模型试验指出, 尾涡会产生对水流的侧向干扰与局部阻力损失, 会引发主流左右摆动与水面周期性波动; 严建科等^[4]、张林等^[5]通过桥墩绕流模型试验得出, 随着流量增加、绕流尾涡明显增强, 水流紊动与横向扰动明显, 给出了旋涡脱落形态的变化规律; Sarker^[6]研究发现, 桥墩绕流引起的大量涡街脱落, 进而形成回流与折冲涌浪, 严重干扰流场流态的稳定性。

输水明渠扩散段与桥(闸)墩绕流类似, 也会产生边界层分离并产生大量漩涡与回流区, 形成十分复杂的水流结构与不稳定流态^[7-9]。张亚莉等^[10]基于大涡模拟研究了高雷诺数下的扩散段流场, 发现边界层分离导致两侧产生强烈回流, 回流区范围与强度十分不稳。宁利中^[11]探讨了扩散段水流边界层方程, 指出扩散段脱落漩涡的横向输运和挤压会产生涌浪和主流的扭曲摆动。在改善扩散段流态方面, 马永军等^[12]采用“吸、喷”方法改变扩散段流态, 有效抑制了回流强度。孙东坡等^[13]通过在扩散段设置潜没式三角翼抑制边界层分离, 使扩散段流态得到有效改善; 杨小帆等^[14]利用 Fluent 的 SST $k-\omega$ 湍流模型研究发现, 在扩散段设置导流墩可以显著改善流态; 罗灿等^[15]、王二平等^[16]通过模型试验研究

收稿日期: 2023-06-25

修回日期: 2023-08-07

基金项目: 河南省高等学校重点科研项目(21A570002); 开封市重大(重点)科技专项(22ZDYF007)

作者简介: 刘明潇(1986-), 女, 河南周口人。讲师, 博士, 主要从事河流环境与生态水力学研究。E-mail: liumingxiao@ncwu.edu.cn

通信作者: 胡昊(1979-), 男, 河南南阳人。教授, 主要从事智慧水利研究。E-mail: hh@ncwu.edu.cn

©《灌溉排水学报》编辑部, 开放获取 CC BY-NC-ND 协议

认为, 加设流线型导流墩会使回流区范围减少, 有效均化流速分布; 赵苗苗^[17]模拟研究发现, 加设翼型隔墩也可以达到整流目的。【切入点】上述研究表明, 闸墩绕流涡旋与扩散段侧壁大尺度回流都是边界层分离引发的非恒定水流现象, 大大增加了扩散段水流能量消耗与流态紊乱程度, 虽然也提出了一些流态改善措施; 但对于非恒定衍生波的产生机理尚未有深入研究, 扩散段复杂水流结构与波动特征的主控因素尚不清晰, 如何消除扩散段不同尺度的强烈涡旋与折冲涌浪, 还是当前输水工程设计的技术难题。【拟解决的关键问题】为此, 本文从抑制边界层分离这一关键点入手, 选择某大型输水隧洞出口扩散过渡段为典型研究对象, 设计了水力模型试验, 通过模拟试验研究扩散段非稳流态及壅波产生机理, 同时根据边界层控制理论, 开发消涡降波的扩散段边界层调控技术, 为南水北调等大型输水工程的安全运行与扩容增流设计提供技术支撑。

1 材料与方法

1.1 工程概况

某大型调水工程穿河倒虹吸工程出口过渡段平面布置如图 1 (a) 所示, 左侧双管倒虹吸出口与右侧下游梯形断面明渠之间采用过渡段衔接, 自倒虹吸竖井转弯后, 过渡段主要由 5 个部分组成: 体型渐变段、侧堰溢流段、弧形门闸室段、闸后消能段、出口反坡扩散段, 然后与下游渠道衔接, 如图 1 (b) 所示。水流入竖井后由 2 道中墩隔离成 2 条平行明槽流, 单槽宽度为 6.0 m; 2 个槽间距离 28.0 m, 为静水区。在消能段出口 2 槽水流汇合, 过流总宽度突增为 34.0 m, 为上游过流宽度的 2.83 倍。扩散段上部以 6.0° 扩散角沿程渐扩展宽, 底部以 9.2° 收缩角沿程渐缩收窄进行体型调整; 扩散段长 80 m, 逆坡 $i=-0.036$, 至出口完成由矩形断面向梯形断面的过渡。下游为梯形断面明渠, 底宽 12.0 m, 顶宽 49.36

m, 边坡系数 2.25, 底坡为 1/10 000。输水明渠设计流量 $265 \text{ m}^3/\text{s}$, 校核流量 $320 \text{ m}^3/\text{s}$ 。

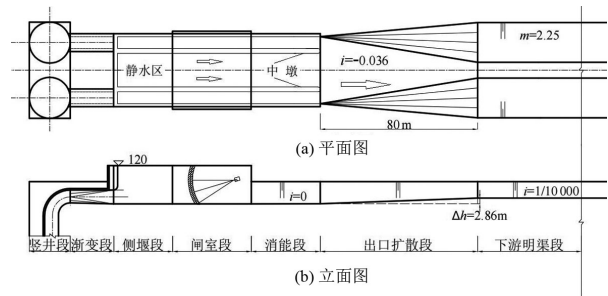


图 1 倒虹吸工程过渡段布置

Fig.1 Transition section layout of the inverted siphon project

1.2 水流现状

设置过渡段的目的是通过扩散段空间调整水流结构, 实现从圆形有压管流向梯形无压明渠流的平顺过渡出流。由于进入扩散段前水流强度较高 (流速在 2 m/s 以上, $Fr=0.4\sim 0.5$), 中小尺度旋涡较多, 强紊动来流本身虽有低强度水面波动 (波高 $<0.3 \text{ m}$), 但没有大尺度涡流。在进入扩散段后, 特殊的边界条件使分居两侧的水流一方面迅速向中部静水区横向扩散, 摩擦卷吸形成大尺度旋涡; 一方面在扩散段两侧翼墙及 2 个中墩后产生边界层分离, 也形成各种尺度的旋涡与边壁回流; 它们相互影响、叠加, 又导致非恒定衍生波即阵发性涌浪。在大流量 ($Q>250 \text{ m}^3/\text{s}$) 输水期间, 实际观察到扩散段内波高浪大、涡旋翻滚, 边岸波浪爬高接近 1.0 m , 回流流速高达 1.2 m/s , 流态十分紊乱, 即使扩散段出口水流依然波动比较强烈 (图 2)。可见高强度来流在扩散段边界影响下, 产生的局部非恒定波动非常强烈。这种水流现象一方面形成对建筑物的周期性震荡荷载, 另一方面也增加了局部能量损耗、降低了过流能力; 表明与来流本身的旋涡不同, 扩散段边界层分离导致的回流和涌浪比较剧烈; 现状条件下, 扩散段的空间布局与调度运用对理顺水流、平抑波动的调控作用不足。



(a) 合流区复杂流态



(b) 扩散段边岸涌浪

图 2 倒虹吸出口过渡段水面波动状况 ($Q=282 \text{ m}^3/\text{s}$, $e/H=0.55$)

Fig.2 Water surface fluctuation in the transition section of the inverted siphon outlet ($Q=282 \text{ m}^3/\text{s}$, $e/H=0.55$)

1.3 研究方法

基于相似理论建立典型隧洞出口过渡段的水力模型, 通过开展多种水流边界状况的模拟试验, 研究扩散段特殊水流结构与边界的依存关系, 揭示流

态紊乱的产生机理。随后基于水力学原理, 提出抑制非恒定衍生波、平顺水流的方法, 通过模拟试验研究, 揭示扩散段消涡稳流的水动力调控机制, 提出扩散段体型优化方案。

1.4 水动力特性研究的水力模型

1.4.1 相似准则与模型比尺设计

研究对象为实际输水工程过渡段的明渠无压流，水流 Fr 一般在 0.15~0.56，水流紊动强烈，重力是水流运动的主导力。因此水力模型设计应遵循重力相似准则即 Fr 相似准则，同时满足紊动阻力相似^[12]。水力模型设计应遵循的主要相似控制条件如下：

水流重力相似条件：

$$\lambda_V = \lambda_L^{1/2} \quad (1)$$

水流紊动阻力相似条件：

$$\lambda_n = \lambda_V^{-1} \lambda_H^{2/3} \lambda_J^{1/2} = \lambda_H^{2/3} \lambda_L^{-1/2} = \lambda_L^{1/6} \quad (2)$$

式中：变量为模型比尺一般表达式， λ 的下角标为比尺的物理量种类：其中 V 表示流速（m/s）； L 表示几何量； H 表示水深（m）； J 表示水力坡度（比降）； n 表示糙率。

扩散段水流的水动力特性与边界条件密切相关，同时水流结构的三维性十分强，因此水力模型按正态模型设计；同时尽可能全面反映上下游边界影响，采用包括全部过渡段的整体模型，同时按正态模型

设计。综合考虑研究任务、试验场地、供水能力、材料规格及相似理论要求，模型采用几何比尺为 23.0；经分析确定的模型主要控制性比尺见表 1（ p 为压强， γ 为水体积质量）。

表 1 水力模型主要控制比尺

Table 1 Hydraulic model main control scale

比尺名称	几何	流速	流量	压强	时间	糙率
比尺关系	λ_L	$\lambda_V = \lambda_L^{1/2}$	$\lambda_Q = \lambda_L^{2.5}$	$\lambda_p / \gamma = \lambda_L$	$\lambda_t = \lambda_L^{1/2}$	$\lambda_n = \lambda_L^{1/6}$
比尺值	23.0	4.80	2537	23.0	4.80	1.69

1.4.2 模拟范围与模型布置

为了研究出口扩散段的水流特性，根据过渡段建筑物特点，考虑模型试验区水流的上游、下游必须留有足够长度，满足相似的衔接过渡水力条件。水力模型模拟的范围包括：出口竖井段、弯管段、渐变段、侧堰段、闸室段、消能段，出口扩散段和下游部分明渠段，总长度约 500 m。为了保持试验水流的恒定性，水力模型采用平水塔稳流的自循环供水模式，模型平面布置及循环供水系统见图 3。

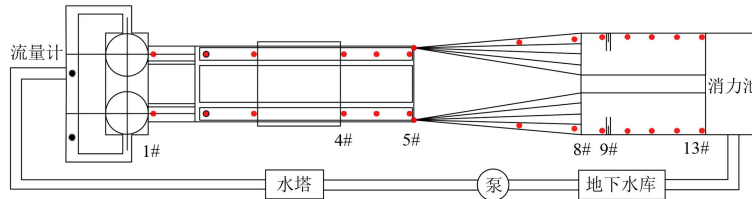


图 3 试验模型平面布置示意

Fig.3 Schematic layout of the test model

1.5 试验测量仪器与测点布设

流场点流速测量采用 ADV 多普勒流速仪和红外旋桨流速仪，模拟区流场的表面流速分布采用 VDMS 实时监测系统。根据控制范围，本模型采用 4 个图像采集摄像头的 VDMS 系统，布置在水力模型主要试验量测区的正上方（图 4）。沿程水位采用超声波水位计测量，流态观测采用高锰酸钾示踪剂的图像采集分析。模型上游采用并行双电磁流量计（E-mag meter）控制 2 个竖井的来流流量，下游采用自动水位跟踪仪按明渠水位-流量关系控制模型尾水位。



图 4 VDMS 观测系统的水力模型照片

Fig.4 Photograph of the hydraulic model with VDMS bservation system

为了全面采集模拟试验区的水位、流速等水力要素与观测流态，水力模型每侧布置 14 个基本测点，测点布置及位置如图 3 中的红圆点所示；扭面扩散段从 5#测点开始至 8#测点结束。

1.6 模型制作与验证

模型外边界采用宽 3 m 的高架玻璃水槽，全部过渡段建筑物及明渠安装在高架水槽里，2 条模型倒虹吸竖井自左侧进入水槽。过流建筑物根据糙率相似，采用 PEC 管、有机玻璃管、PVC 板和水泥砂浆制作，闸门按钢结构相似要求制作并设计了闸门开度控制装置，所有建筑物安装精度按模型试验规程^[18]要求控制。模型建成后采用原型实测水力资料进行了模型水流运动相似性的验证，测量了水位、流速并记录了流场流态特征；经对比，模型水位、流速、波动、回流区特征（范围、强度）与原型实测数据基本相同（图 5 与表 2），误差均在试验允许范围内，这表明模型水流的运动相似与阻力相似是可靠的。

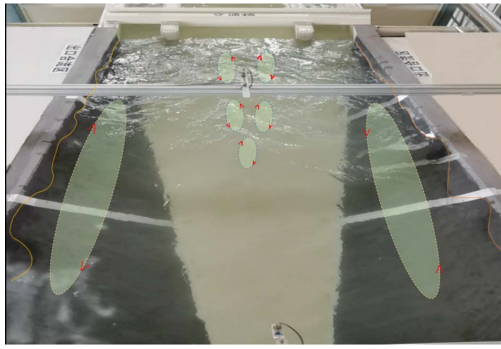


图5 模型扩散段平面流态示意

Fig.5 Model diffusion section planar flow schematic

表2 模型验证因子对比

Table 2 Comparison of model validation factors

对比因子	原型值	模型值	误差	相对误差/%
主流表面流速/(m·s ⁻¹)	2.02	2.14	0.12	5.6
回流区流速/(m·s ⁻¹)	1.06	1.14	0.08	7.0
明渠水位/m	109.48	109.44	0.04	0.6
边岸浪高/m	0.67	0.62	0.05	8.0
回流区长/m	57	54	3.0	5.5

1.7 抑制边界层分离的导流墩消涡研究方法

根据圆柱绕流的边界层理论研究,抑制边界层分离的方法就是消除绕流尾涡,而消除尾涡的主要技术手段就是墩柱尾部增设填补尾涡发源地的“流线型尾翼”。根据边界与流态特征,提出在消能段出口的扩散段中轴处设置流线型导流墩,来破除合流区不稳定的绕流涡旋。导流墩是一种结构简单、水头损失小的扩散段整流建筑物,改善流态原理就是设置流线型尾翼,抑制边界层分离与涡旋的产生,使水流保持横向均衡性。由于消涡能够有效减少扩散段能量损耗,在理顺流态的同时也提高了渠道过流能力。在扩散段设置流线型导流墩可以有效减弱边界层分离,压缩甚至消除尾涡区,达到改善流态、稳定水流的目的^[19]。

参考已有圆柱绕流尾涡区的研究成果,一般尾涡区长度约为圆柱直径的 5~6 倍时,湍动能消耗占全部能耗的 80%以上^[20]。本研究针对圆柱绕流尾涡区主区基本形态,给出了具有流线型曲线形态的边界拟合曲线函数:

$$y/D=f(x/D)=\pm 0.015 6(x/D)^3-0.140 7(x/D)^2+0.127 3(x/D)+0.496 5, \quad (3)$$

式中: x/D 和 y/D 分别为尾涡流线型边界的无量纲纵、横坐标; x 和 y 分别为以圆柱截面圆心为零点的纵、横坐标; D 为圆柱直径。

根据研究对象的水流边界特点,经研究提出了在 2 个中墩之间的合流区设置导流墩消涡减浪的流态改善方案。导流墩为两侧对称的流线型导流体,流线型边界曲线可以减少湍流的生成并提高流动的稳定性,前段侧边界为参考式(3)的流线型曲线,

后段侧边界为直线;前端设出流孔,满足侧堰泄流的出流通道需求;导流墩顶高与扩散段两侧边岸齐平。通过填补尾涡区,导顺流向,来消除合流区高强度横向回流与大涡旋;根据对水流控导程度、出流条件、环境影响等多方面考虑,研究提出了 A、B 共 2 种体型导流墩方案进行比对试验:A 型为 60 m 长、前段尖角型方案,B 型为 45 m 长、前段圆角型方案,如图 6 所示。

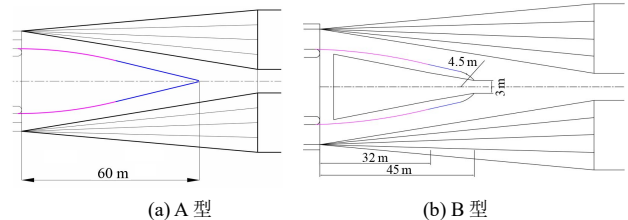


图6 2种体型导流墩(单位:m)

Fig.6 Two body types of the diversion pier (unit: m)

2 结果与分析

2.1 出口扩散段现状水流特性分析

2.1.1 试验研究工况组合

原型观测表明,两侧扩散、中间静水区的边界条件、来流流量与闸门开启度等是影响扩散段流态紊乱与波动强烈的重要因素。采用表 3 所设置的水力边界试验参数,研究大流量期的水流流态变化。

表3 试验水力边界条件

Table 3 Test hydraulic boundary conditions

泄流等级	流量/(m ³ ·s ⁻¹)	闸门进口 Fr	闸门相对开度
设计	265	0.41	0.55
超泄	282	0.43	0.66
加大	320	0.48	1.00

2.1.2 扩散段的水流结构与波动性分析

在进入扩散段前,水流从隧洞竖井进入过渡段矩形断面水槽,从有压流转为无压流;又经过闸室段闸孔出流和消能段,流速空间分布急剧改变,进入扩散段时 $v=2.4\sim 2.6$ m/s, $Fr=0.4\sim 0.5$,水流强度高且不稳定。在进入扭面扩散段后,过流断面底宽沿程收缩而顶宽沿程扩大,同时底部高程沿程增加形成倒坡;横向与垂向边界的剧烈变化促使进入扩散段的水流沿程响应性调整。首先是两侧上部边界扩展引起边岸水流分离,近岸侧形成狭长回流运动,流速一般在 0.8~1.8 m/s;回流逆向上游流动与来流挟带的下行波相遇,交汇撞击形成更强烈的推进波,波高可达 0.5~1.0 m。其次就是底宽收缩与纵向逆坡造成对出槽高速水流的壅阻作用,导致扩散段内动势能的剧烈转换,形成震荡不息的涌波(波状水跃),它们与侧向边界层分离造成的回流、涡旋纠缠在一起,形成扩散段特有的非恒定衍生波(图 2 与图 7)。

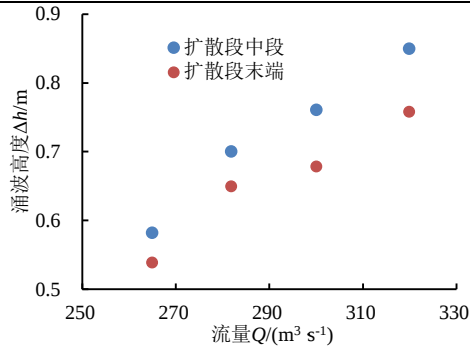

 图 7 涌波高度与流量关系 ($e/H=0.60$)

 Fig.7 Relationship between surge height and flow rate($e/H=0.60$)

除了两侧扩散边界影响外，2 槽中隔墩及之间的静水区也对扩散段流场产生重要影响。2 槽水流在经过中隔墩末端时，局部绕流分离产生大量的脱落涡，

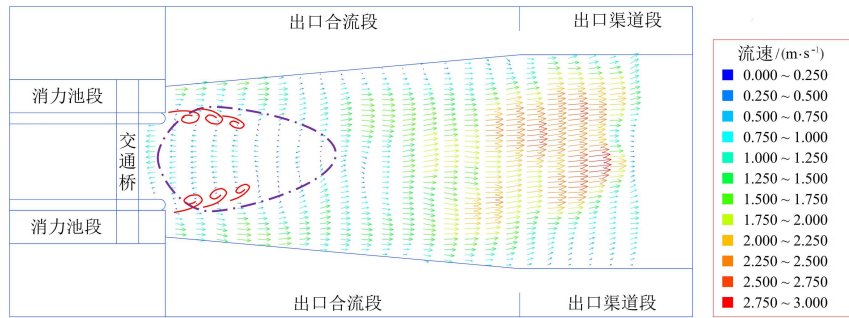


图 8 VDMS 系统采集的扩散段流场平面流速分布及流态

Fig.8 Plane velocity distribution and flow pattern of diffusion section flow field collected by VDMS system

为了反映波流的时均特性，引入波动强度 σ ，它是某处水面波动值的均方根：表征持续波动的平均值，但不反映瞬时大波。图 9 为加大流量工况下模拟试验区水流波动强度。由于水流的非对称与不稳定性，左岸右岸水位与波动有所不同；从衍生波的纵向传播看：矩形明槽段末端（4#）即扩散段进口前波动最强烈（ $\sigma=0.6$ ），在扩散段（5#~8#）依然保持强烈波动（ $\sigma=0.3\sim 0.4$ ）；进入明渠后波动沿程衰减，在很长一段距离依然具有一定波动强度（ $\sigma=0.18\sim 0.3$ ）。

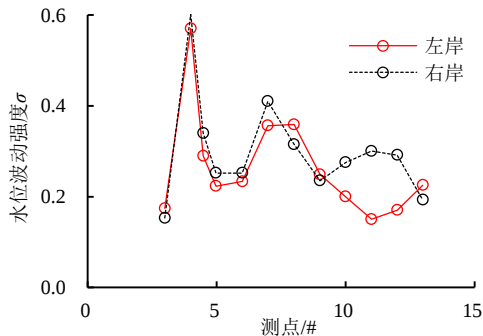

 图 9 现状水位沿程波动强度 ($Q=282 \text{ m}^3/\text{s}$, $e/H=0.66$)

 Fig.9 Intensity of fluctuation of the current water level along the range($Q=282 \text{ m}^3/\text{s}$, $e/H=0.66$)

2.1.3 扩散段水流对上游水流边界控制的响应特征

从波动特征值统计中，可以看到扩散段涌波强

进入 2 槽中间 28 m 宽的合流区内，形成各种尺度的涡流，合成分解、震荡扭曲，局部回流流速 1.5 m/s，这些涡流相互影响，进一步加剧合流区波动，形成 3 类紊动效应。一是附加能耗效应：在合流区水流机械能产生大量的波动能与紊动能耗散；二是衍生波叠加效应：横向回流与涌波反馈叠加，助长了扩散区的涌浪并逆流传递到消能段；三是流场调整效应：通过横向与垂向混掺扩散，调整水流结构，使进入扩散段的双峰型出流逐渐向一般明流的单峰主流过渡；刚进入扩散段的主流流速为 1.9~2.4 m/s，出扩散段进入明渠后主流流速降为 1.5~2.0 m/s（图 2 和图 8）。

度、流态紊乱程度均与流量正相关（图 7）；而与工作闸门的开度负相关（表 4）。当进行大流量（ $Q=320 \text{ m}^3/\text{s}$ ）敞泄（闸门全开）试验时，水流从两槽出流相对比较顺畅，沿程波动较小；扩散段虽然有各种尺度的涡旋与扭曲回流存在，但强度较低；边岸壅波一般 0.4~0.5 m；扩散段末端最大水位波动 <0.55 m。当闸门部分关闭控泄时，过闸为淹没出流，形成周期性震荡的涌浪；不稳定的翻滚涌浪经消能段进入扩散段时，被当地涡旋回流进一步壅阻放大，甚至有逆向衍生波传播。

表 4 闸门开度与流量对下游水力要素的影响

Table 4 Effect of gate opening and flow on

指标	downstream hydraulic elements					
	流量/($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)					
	322		283		266	
	原型	模型	原型	模型	原型	模型
4#测点浪高/m	1.20	1.12	1.60	1.65	1.52	1.44
6#测点浪高/m	1.05	1.15	1.35	1.25	1.25	1.17
8#测点浪高/m	0.95	1.05	1.25	1.17	1.15	1.07
明渠段水深/m	7.31	7.40	7.07	7.10	6.62	6.60
明渠段流速/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	1.82	1.80	1.75	1.72	1.72	1.73

注 4#点在消能段出口，6#、8#点在扩散段中部与出口，明渠点距 8#点下游 300 m。流量 322 m^3/s 对应闸门开度 0.85，流量 283 m^3/s 对应闸门开度 0.66，流量 266 m^3/s 对应闸门开度 0.50。

扩散段边界的多向变化引起边界层分离、涡旋脱落,大量局部折冲环流产生,来自消能段两槽出流的自身波动顺流传播,在合流区被当地涡旋、回流进一步推举放大,形成水流横向扭曲摆动强烈、波涛汹涌的复杂流态。两侧边壁附近还有正弦曲线型大推进波阵发性出现,涌浪在边岸的爬高甚至接近坡顶,并沿明渠传播 200~300 m 才逐渐衰减(图 10)。总体看,在扩散段两侧与中墩末端都因边界层分离形成大量卡门涡街,受主流卷吸影响,形成大规模高强度的立轴环流与涌浪;逆向回流与上游来流对冲又加剧了原有的水流波动,形成合流区涡旋遍布、回转震荡,阵发性横向挤压主流摇摆。因此必须根据扩散段水动力特性,选择消涡减浪的流态改善措施。

2.2 抑制边界层分离的扩散段降涡消浪研究

对导流墩的 2 种体型方案分别进行了放水试验与测试,每种方案均对消波导流起到明显作用。从试验效果看,导流墩的体型与长度对扩散段流场流态有重要改善,主要体现在以下 3 个方面。

1) 对流场消涡减浪的影响:增设导流墩后,与无导流墩相比,破除了消能段下游的尾涡脱离区和横向回流,理顺了流路,出流明显平顺。从试验效

果看,2 种体型的导流墩都对扩散段消波导流起到明显作用,控导效果略有差异。试验中采用超声波水位计采集沿程不同断面水位波动值,图 11 和图 12 分别显示了现状与设置 B 型导流墩(45 m)的各断面波动曲线,设置导流墩后波动明显减弱。表 5 为现状与设置 A 型导流墩(60 m)的水位波动峰值。由表 5 可知,增设导流墩后,波动峰值降低为无导流墩波动的 31%~41%。

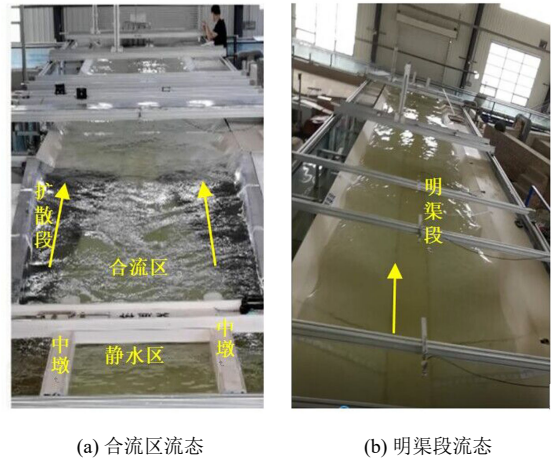


图 10 扩散段及下游明渠流态 ($Q=282 \text{ m}^3/\text{s}$, $e/H=0.66$)

Fig.10 Flow pattern of diffusion section and downstream open channel ($Q=282 \text{ m}^3/\text{s}$, $e/H=0.66$)

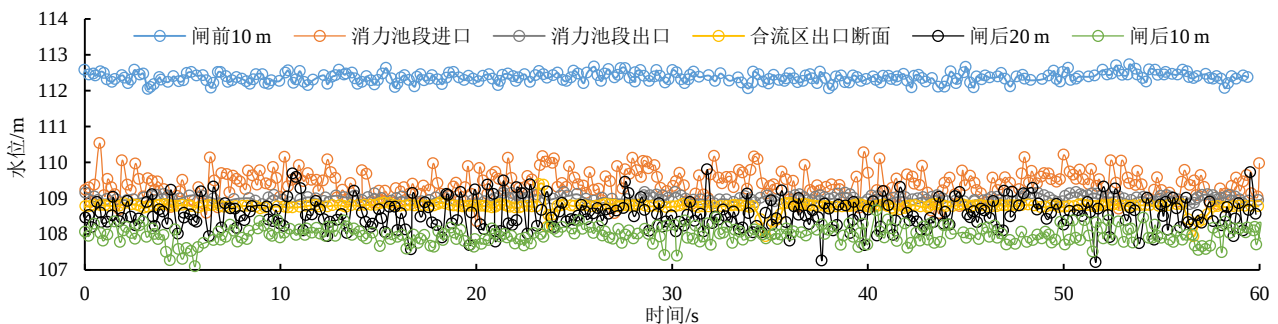


图 11 无导流墩时出口扩散段各断面水位波动曲线

Fig.11 Water level fluctuation curve of each section of outlet diffusion section without diversion pier

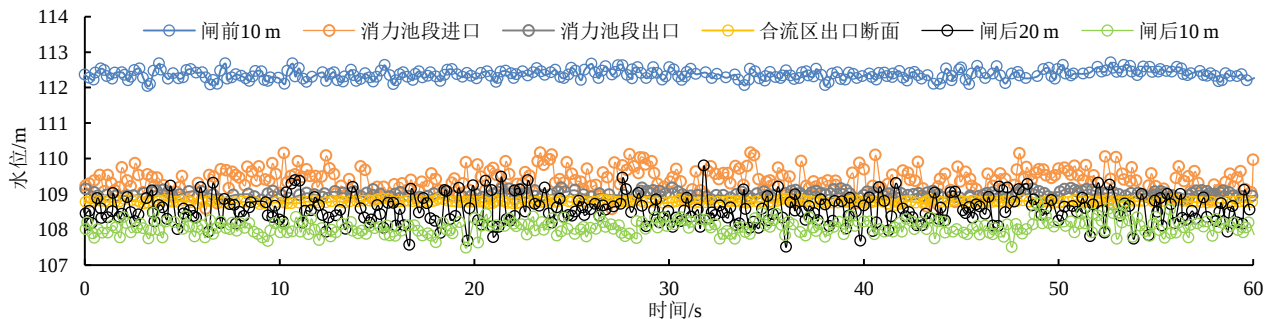


图 12 设导流墩时出口扩散段各断面水位波动曲线

Fig.12 Water level fluctuation curves at each section of the outlet diffusion section when the diversion pier is set up

图 13、图 14 为设置 A、B 型导流墩后,扩散段实测水位波动强度 σ 及其沿程变化特征。对比图 9 可知,设置导流墩后的衍生波纵向传播特征与无导流墩(现状)时基本一致,扩散段进口前波动最强烈,在合流区(5#~6#)依然有波动,而后沿程衰减。取

σ_w 、 σ_A 、 σ_B 分别为现状、导流墩 A、导流墩 B 的波动强度,由图 13 可知,设置 A 型导流墩后,沿程各测点的消波率 ($\beta_A=(\sigma_w-\sigma_A)/\sigma_w$) 一般在 45%~58%,合流区波动 0.2 m 左右,消波作用十分明显,在进入明渠(10#以下)后,水流波动幅度已经从原来的 0.3

m 左右减弱到 0.1 m；由图 14 可以看出，设置 B 型导流墩后，沿程各测点的消波率一般在 50%~71%，消波效果更为显著，即使在合流区（5#~6#），水流波动幅度也均已降至 0.1 m 左右。

表 5 有无导流墩的波动特征值比较（A 型， $e=4.26\text{ m}$ ）

Table 5 Comparison of fluctuation characteristic values with and without diversion piers (Type A, $e=4.26\text{ m}$)

导流墩设置		流量/($\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$)					
		320		282		265	
		有	无	有	无	有	无
消能段末端/m	最大波幅	0.50	1.6	0.52	1.3	0.45	1.2
	平均波幅	0.25	0.65	0.20	0.60	0.16	0.55
	最高水位	110.8	111.8	109.8	110.6	109.2	109.7
合流区末端/m	最大波幅	0.40	1.40	0.35	1.20	0.30	1.10
	平均波幅	0.15	0.60	0.14	0.55	0.11	0.52
	最高水位	110.3	111.0	109.8	110.2	108.9	109.8

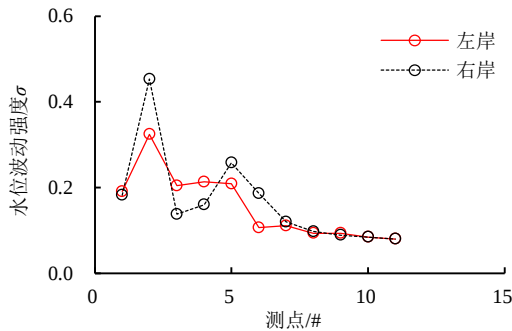


图 13 A 型导流墩的沿程波动强度 ($Q=282\text{ m}^3/\text{s}$, $e=4.26\text{ m}$)

Fig.13 Along-range fluctuation intensity of A-type diversion pier ($Q=282\text{ m}^3/\text{s}$, $e=4.26\text{ m}$)

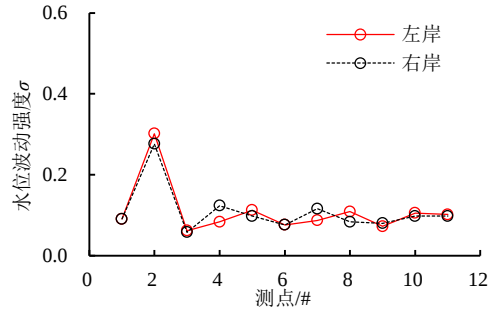


图 14 B 型导流墩的沿程波动强度 ($Q=282\text{ m}^3/\text{s}$, $e=4.26\text{ m}$)

Fig.14 Along-range fluctuation intensity of B-type diversion pier ($Q=282\text{ m}^3/\text{s}$, $e=4.26\text{ m}$)

2) 对流场流速分布的影响：使用 4 个摄像头的 VDMS 流场测速系统对扩散段流场进行了表面流速的实时采集，经分析整理得到扩散段流速场（图 15）。与图 8 相比，增加导流墩后两侧水槽出流受导流墩的导送，流路归顺、流速较现状工况略有增加，一般在 1.5~2.0 m/s；经导流墩控导后水流稳定扩散，沿程逐渐减速。在合流区末端流向平顺，流速一般降至 1.5 m/s 左右；进入下游渠道后，最大流速趋于渠道中心，流速一般为 1.5~1.8 m/s。由于合流区的涡旋不存在，边岸回流挤压基本消失，水流结构沿程调整变化相对平缓；在合流区由导流墩隔开的双峰型流速分布逐渐平顺地向下游单峰型流速分布过渡，整体流场流速分布比较均衡。

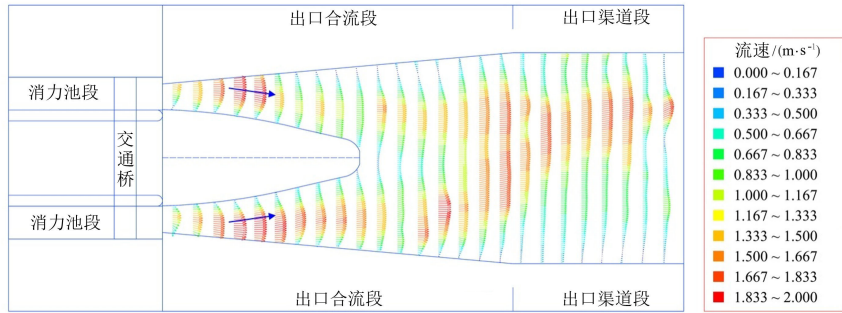


图 15 导流墩方案（B 型）时出口扩散段的流速分布 ($Q=282\text{ m}^3/\text{s}$, $e=4.26\text{ m}$)

Fig.15 Flow velocity distribution of the outlet diffusion section at the diversion pier scheme (type B) ($Q=282\text{ m}^3/\text{s}$, $e=4.26\text{ m}$)

3) 对扩散段流态与水面线的影响：设置导流墩消除了扩散段进口不断产生的大尺度涡节，在合流段阻隔了主流与原涡旋回流区的联系，抑制了尾涡产生及横向涡流的扰动，理顺了合流段流路，平抑了涌浪，大大降低扩散段的能耗；原先浪花翻卷、波涛汹涌的现象基本消失，回流与涡旋强烈混掺的恶劣流态得到了明显改善。与未加导流墩时相比，水流平稳，水面波动降低，流态较为平顺，基本达到流态改善的效果（图 16）。

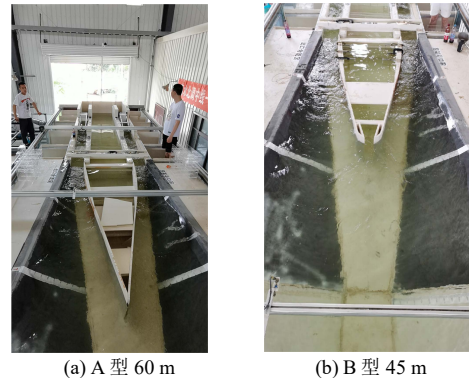


图 16 设置导流墩后扩散段流态 ($Q=282\text{ m}^3/\text{s}$, $e=4.26\text{ m}$)

Fig.16 Set the diffusion section flow pattern after the diversion pier ($Q=282\text{ m}^3/\text{s}$, $e=4.26\text{ m}$)

A 型和 B 型导流墩左岸、右岸水面线（沿程水位）均略有差异，2 种方案的对比见图 17。A 型和 B 型导流墩都使流态得到了改善，对消波导流都起到一定的作用；但是 B 型导流墩比 A 型导流墩的消波效果更好一些。B 型导流墩在不同闸门开度时的

波动特征值见表 6。由表 6 可知，不同流量下波动强度与闸门开度有关，同时 B 型导流墩对应的波动幅度均比 A 型导流墩略小。因此在满足导流效果的前提下，采用较短的 B 型导流墩较为适宜，这种墩体边界摩擦产生的能量损失亦较小。

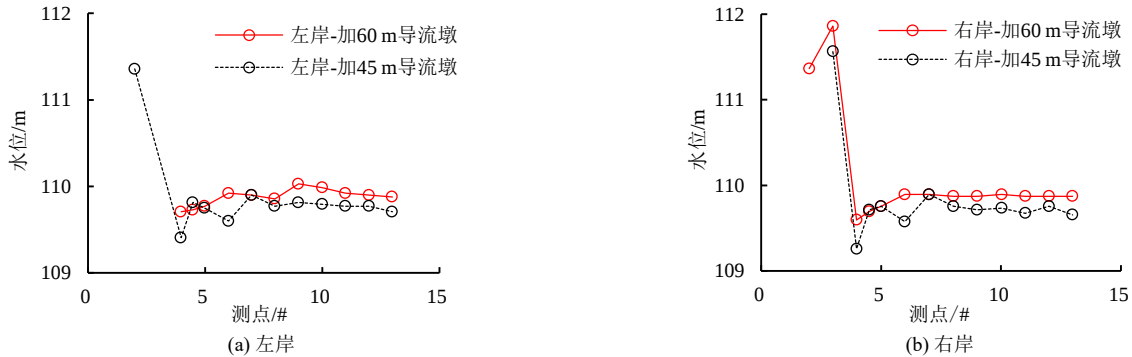


图 17 2 种导流墩的沿程水位波动 ($Q=282 \text{ m}^3/\text{s}$, $e=4.26 \text{ m}$)

Fig.17 Along-range water level fluctuations of two types of diversion piers ($Q=282 \text{ m}^3/\text{s}$, $e=4.26 \text{ m}$)

表 6 采用导流墩前后扩散段波动特征值对比

Table 6 Comparison of the characteristic values of diffusion section fluctuations before and after adopting the diversion pier

闸门开度/m	流量/($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)											
	320				282				265			
	3.6	4.26	4.26	4.26	3.6	4.26	4.26	4.26	3.6	4.26	4.26	4.26
方案	A 型	B 型	A 型	B 型	A 型	B 型	A 型	B 型	A 型	B 型	A 型	B 型
最大波幅	0.43	0.41	0.41	0.39	0.40	0.39	0.36	0.35	0.35	0.33	0.32	0.30
平均波幅	0.20	0.18	0.16	0.15	0.16	0.14	0.14	0.12	0.13	0.12	0.12	0.11

3 讨论

本文通过设计不同类型的导流墩，对比分析了在大型明渠扩散段增设导流墩前后对该段水流流态及过流能力的影响。试验表明，输水隧洞出口扩散段的中墩绕流与侧向边界层分离引发高强度涡旋、大尺度回流纠缠在一起，在超设计流量时会形成扩散段特有的涌波与水流剧烈震荡；这与原型观测和相关研究^[3-6]是一致的。这是隧洞-明渠过渡段水流衔接、能量转换的结果。出槽高速水流一方面因绕流分离产生大量的脱落涡，在合流区空间充分混掺、合成，形成三类紊动效应：一方面进入回流区形成波状水跃，实现动势能的急剧变换。因此采用波动强度 σ 体现非恒定衍生波的运动与耗能特性，表明没有控制的扩散段进口附近波动强烈，且会逆向传播，在合流区波动进一步发展，并会影响到下游明渠很长一段距离；因此必须抓住边界层分离这个要害，采取抑制分离的流动控制方法，才能改善扩散段的紊乱流态。

本研究发现扩散段流场能耗特性与尾涡区体型、长度有响应关系；创新提出了 A、B 共 2 种流线型导流墩，对消波导流均起到明显作用，合流区流态稳定、出流平顺；经对比，B 型导流墩消波效果更优，合流区流场流速分布更均衡。这与罗灿等^[15]、王二平等^[16]研究结果基本一致，贾君德等^[21]通过调

整导流墩不同角度，有效控制了扩散段回流区的大小，墩后次生回流问题得以缓解，整流效果达到预期目标。为满足通航条件，选择导流墩最优开孔方案，回流区范围明显缩小，墩头前斜流与水流流态得到较好改善^[22]。但本文提出的导流墩形式更为简洁，适应合流区过流宽突增近 3 倍的特殊边界条件，有效抑制了边界层分离与合流区的 3 类紊动。

本文中只研究了在大型明渠扩散段增设导流墩对该段流态及过流能力的影响，并未考虑增设导流墩后，明渠扩散段的过流面积相对减小是否影响大型输水明渠的输水效率，在后续的研究过程中，仍需对导流墩的体型、角度等各项参数进一步优化研究，为提升大型水网的输水能力提供研究基础。

4 结论

1) 在隧洞进入下游明渠的过渡段，出流从有压流转换为无压流，流动边界在纵横向沿程变化较大，导致水流结构急剧调整。在扩散段的边界层分离使得大量漩涡被主流卷吸，产生附加能耗、衍生波叠加、流速场调整三类附加紊动效应；形成的高强度的横向环流与较大涌浪会干扰扩散段平稳过流，形成流场非稳流态。

2) 通过导流墩填补尾涡区，抑制绕流分离，消涡降波，扩散段末端水流最大波动幅度由 1.11 m 降为 0.2 m；消波率达到 45%~70%；设置导流墩消除

了扩散段大尺度无序涡流,理顺了扩散段流路与流速分布,起到了消涡减浪、改善流态的明显效果。

3) B型导流墩(45 m长、前段圆角型)改善流态的效果更优,可为解决大流量下明渠扩散段复杂流态问题提供参考。

(作者声明本文无实际或潜在利益冲突)

参考文献:

- [1] 王开,傅旭东,王光谦.桥墩壅水的计算方法比较[J].南水北调与水利科技,2006,4(6):53-55.
WANG Kai, FU Xudong, WANG Guangqian. Comparison of existing backwater models for bridge piers in subcritical flows[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2006, 4(6): 53-55.
- [2] 陆倩,韩非非.跨河桥梁桥墩不同平面布局的防洪影响分析[J].上海水务,2017,33(3):11-15.
LU Qian, HAN Feifei. Analysis on flood control impact of different layouts of piers of river-crossing bridges[J]. Shanghai Water, 2017, 33(3): 11-15.
- [3] 薛小华,刘怀汉,茆长胜.桥墩扰流对通航净宽尺度影响的试验研究[J].水运工程,2011(1):187-191.
XUE Xiaohua, LIU Huaihan, MAO Changsheng. Experimental research on influence of disturbed flow at bridge pier on navigation clearance[J]. Port & Waterway Engineering, 2011(1): 187-191.
- [4] 严建科,焦臣,龙涛,等.单圆柱桥墩绕流流场试验研究[J].西安建筑科技大学学报(自然科学版),2012,44(6):779-785.
YAN Jianke, JIAO Chen, LONG Tao, et al. Single-cylindrical pier experimental study on vertex flow field[J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology (Natural Science Edition), 2012, 44(6): 779-785.
- [5] 张林,程琳,孙东坡,等.铁路斜交桥对河道行洪的影响及对策[J].水利水运工程学报,2012(1):36-42.
ZHANG Lin, CHENG Lin, SUN Dongpo, et al. Impact of the skew bridge on the river flood and countermeasures[J]. Hydro-Science and Engineering, 2012(1): 36-42.
- [6] SARKER M A. Flow measurement around scoured bridge piers using Acoustic-Doppler Velocimeter (ADV)[J]. Flow Measurement and Instrumentation, 1998, 9(4): 217-227.
- [7] 武玉涛,任华堂,夏建新.圆柱绕流研究进展及展望[J].水运工程,2017(2):19-26,56.
WU Yutao, REN Huatang, XIA Jianxin. Research progress and prospects on flow across cylinder[J]. Port & Waterway Engineering, 2017(2): 19-26, 56.
- [8] 林娜,陈明栋,陈明.桥墩紊流宽度研究综述[J].水利水运工程学报,2011(2):105-110.
LIN Shan, CHEN Mingdong, CHEN Ming. Review of studies on turbulence width at piers[J]. Hydro-Science and Engineering, 2011(2): 105-110.
- [9] 王晓升,陈毓陵,孙靖康.分水闸站枢纽分水池流态改善措施研究[J].灌溉排水学报,2018,37(12):107-113.
WANG Xiaosheng, CHEN Yuling, SUN Jinggang. Study on improvement measures of flow pattern in diversion basin of diversion sluice station hub[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2018, 37(12): 107-113.
- [10] 张亚莉,宋世露,陈勇,等.泵站侧向进水前池整流措施数值模拟[J].中国农村水利水电,2016(5):117-120.
ZHANG Yali, SONG Shilu, CHEN Yong, et al. Numerical simulation of rectification measures for side-direction forebay in pump station[J]. China Rural Water and Hydropower, 2016(5): 117-120.
- [11] 宁利中.急流扩散段冲击波的水力计算问题[J].西北水力发电,2004,20(3):1-4.
- NING Lizhong. Hydraulic computation of the shock wave of supercritical flow in divergence zone[J]. Power System and Clean Energy, 2004, 20(3): 1-4.
- [12] 马永军,陈稚聪,丁翔.控制和减小丁坝下游回流影响的实验[J].清华大学学报(自然科学版),2003,43(8):1 096-1 099.
MA Yongjun, CHEN Zhicong, DING Xiang. Controlling recirculating regions downstream of spur dikes[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2003, 43(8): 1 096-1 099.
- [13] 孙东坡,罗秋实,严军,等.控导浅层急流的潜没式三角翼体特性研究[J].水科学进展,2007,18(4):509-515.
SUN Dongpo, LUO Qiushi, YAN Jun, et al. Analyze of the properties of the submerged triangle wing for adjusting shallow supercritical flow[J]. Advances in Water Science, 2007, 18(4): 509-515.
- [14] 杨小帆,于永海,刘东,等.基于SST k- ω 湍流模型的泵站侧向进水流态改善研究[J].三峡大学学报(自然科学版),2018,40(3):1-4.
YANG Xiaofan, YU Yonghai, LIU Dong, et al. Study of improvement of flow pattern in side-inlet pumping station based on SST k- ω turbulence model[J]. Journal of China Three Gorges University (Natural Sciences), 2018, 40(3): 1-4.
- [15] 罗灿,钱均,刘超,等.非对称式闸站结合式泵站前池导流墩整流模拟及试验验证[J].农业工程学报,2015,31(7):100-108.
LUO Can, QIAN Jun, LIU Chao, et al. Numerical simulation and test verification on diversion pier rectifying flow in forebay of pumping station for asymmetric combined sluice-pump station project[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(7): 100-108.
- [16] 王二平,方进,金辉.导流墩在电厂循环水道中的应用研究[J].中国农村水利水电,2011(5):141-144.
WANG Erping, FANG Jin, JIN Hui. Research on the circulating water channel shape optimization of a 1000MW power plant[J]. China Rural Water and Hydropower, 2011(5): 141-144.
- [17] 赵苗苗.导流墩对侧向进水前池流态改善规律研究[D].扬州:扬州大学,2019.
ZHAO Miaomiao. Study on improvements laws of flow conditions to side-direction forebay in pump station of diversion pier[D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2019.
- [18] 中华人民共和国水利部.水工(常规)模型试验规程:SL 155—2012[S].北京:中国水利水电出版社,2012.
- [19] 张金明,王海锋,王建平.减少涉水桥梁桥墩阻水影响的体型优化研究[J].人民珠江,2016,37(6):62-65.
ZHANG Jiming, WANG Haifeng, WANG Jianping. Study on shape optimization to reduce influence of bridge pier wading water resistance[J]. Pearl River, 2016, 37(6): 62-65.
- [20] 梁健,刘成文,李兆敏.带整流罩隔水管流场特性的大涡模拟研究[J].力学季刊,2020,41(1):197-205.
LIANG Jian, LIU Chengwen, LI Zhaomin. Large eddy simulation study on flow field characteristics of risers with fairings[J]. Chinese Quarterly of Mechanics, 2020, 41(1): 197-205.
- [21] 贾君德,周济人,赵苗苗,等.楔形导流墩对泵站大扩散角前池整流效果的影响[J].水电能源科学,2019,37(8):88-91.
JIA Junde, ZHOU Jiren, ZHAO Miaomiao, et al. Impact of wedge-shaped guide piers on rectification effect of large diffusion angle fore bay for pumping station[J]. Water Resources and Power, 2019, 37(8): 88-91.
- [22] 徐波,张从从,李占超,等.基于CFD的导流墩几何参数对闸站建枢纽通航水流条件的影响研究[J].灌溉排水学报,2019,38(2):115-122.
XU Bo, ZHANG Congcong, LI Zhanchao, et al. Study on the influence of geometric parameters of diversion pier based on CFD on navigation flow conditions of gate station joint construction hub[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2019, 38(2): 115-122.

Unsteady Flow in Diffusion Section at the Outlet of Large Water Conveyance Tunnel

LIU Mingxiao¹, WANG Zezhong¹, ZHU Yongjie¹, HU Hao^{2*}, WANG Pengtao¹, SUN Dongpo¹

(1. Research Center for Port, Channel and Ocean Development, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450046, China; 2. Yellow River Conservancy Technical Institute, Kaifeng 475004, China)

Abstract: **【Objective】** The inverted siphon tunnel in big long-distance open channel spanning across a river is a critical hydraulic infrastructure. Investigating the mechanisms and strategies for addressing the unsteady flow during transition from the pressurized tunnel to the non-pressurized diffusion section of the open channel is essential to safeguarding water delivery and optimizing flow capacity. **【Method】** Using the principles of flow similarity and boundary layer control theory, this study focuses on the transition section at a large water transfer siphon outlet. Through hydraulic model testing, it examines the boundary layer separation, derived backflow interference, mainstream instability, and flow fluctuations in the diffusion section. We also investigate three additional turbulent effects resulting from unfavorable flow patterns. **【Result】** ① The boundary layer separation in the diffusion section leads to the entrainment of a significant number of vortices by the main flow, resulting in an increased energy consumption and the superposition of derived waves. These phenomena disrupt the smooth flow in the diffusion section. ② Introducing diversion piers in the diffusion section effectively suppresses boundary layer separation, eliminates vortex shedding, and mitigates side backflow in the confluence area. This leads to a substantial improvement in wave dissipation, reducing wave intensity at the end of the diffusion section from 1.11 meters to 0.2 meters. Furthermore, it straightens the flow path within the diffusion section. **【Conclusion】** Installing diversion piers in the diffusion section is highly effective in eliminating vorticity and reducing wave interference. Specifically, B-type diversion piers prove to be superior in optimizing flow patterns and reducing energy consumption while ensuring a well-balanced flow velocity distribution. These research findings hold significant practical value for design and renovation of large-scale water transfer projects.

Key words: diffusion region; boundary layer separation; shedding vortex; derived wave; streamliner; diversion pier

责任编辑: 白芳芳