

新型渠首导流防沙设施的水力特性试验与结构优化

韩兴龙

新疆峻特设计工程有限公司 新疆 喀什 844000

摘要：针对传统渠首导流防沙设施存在的效率瓶颈，通过开展流速分布、水位变化、泥沙运动及流态可视化试验，系统揭示新型导流防沙设施水力特性。基于试验数据，从弯道参数、引水口结构、消涡整流等方面提出结构优化策略，有效改善设施导流防沙性能。研究成果为渠首工程防沙减淤设计提供关键技术支撑，对提升水资源高效利用、保障渠道稳定运行具有重要工程价值。

关键词：新型渠首导流；防沙设施；水力特性试验；结构优化

引言

渠首导流防沙设施是保障灌区安全高效引水的关键工程。随着水资源开发利用需求增加，传统设施在防沙效果与水力性能上的局限性日益凸显。新型渠首导流防沙设施的研发对提升灌区供水能力、减少泥沙淤积具有重要意义。本文通过开展系统的水力特性试验，探究设施内水流及泥沙运动规律，并基于试验结果进行结构优化，旨在为新型设施的设计与应用提供科学参考。

1 新型渠首导流防沙设施的设计原理

新型渠首导流防沙设施基于流体力学与泥沙运动力学原理，通过对河道水流与泥沙运动规律的深入研究，实现对水沙的有效分离与调控。设施利用弯道环流、异重流等自然现象，将河道内复杂的三维水流结构转化为可利用的导流动力，构建起适应不同来水来沙条件的防沙体系。在结构设计上，设施采用特殊的几何形态与空间布局，利用导流墙、沉沙池及排沙廊道等构件协同工作。导流墙的曲面造型经过精确水力计算，能够引导表层清水流向取水口，同时将携带大量泥沙的底层水流导向沉沙池。当含沙水流进入沉沙池时，因过水断面突然扩大，流速急剧降低，泥沙在重力作用下迅速沉降，形成泥沙淤积区。沉沙池底部设置的排沙廊道，通过合理布置的坡度与出口结构，利用水流自身能量将沉积泥沙排出河道，维持沉沙池的有效容积与防沙功能。为应对不同粒径的泥沙，设施引入分级防沙理念。针对粗颗粒泥沙，利用重力沉降与惯性分离原理，通过导流设施的流速调控与流态改变，使其快速沉积；对于细颗粒悬移质泥沙，则采用絮凝沉淀与异重流排沙相结合的方式。在沉沙池前端设置絮凝剂投加点，促使细颗粒泥沙凝聚成团，加速沉降过程；当沉沙池内形成异重流时，及时开启排沙廊道，利用异重流的高含沙特性将其排出，减少细颗粒泥沙进入渠道的可能性。新型渠首导流防沙设

施还融入自适应调节机制。通过实时监测河道水位、流量、含沙量等参数，结合预先设定的数学模型，自动调整导流墙的角度、沉沙池的运行水位以及排沙廊道的开启时间与流量，以适应多变的水沙条件。这种动态调控模式不仅提高了防沙设施的运行效率，还降低了人工维护成本，确保渠首工程在长期运行过程中保持稳定的防沙效果，为灌区的持续稳定供水提供可靠保障。

2 新型渠首导流防沙设施的水力特性试验分析

2.1 流速分布特性试验

在新型渠首导流防沙设施流速分布特性试验中，采用高精度声学多普勒流速仪（ADCP）对不同工况下设施内部及周边区域的流速进行测量。试验涵盖了不同流量条件，从低流量工况模拟枯水期水流特性，到高流量工况还原洪水期水流状态。测量数据表明，设施进口段由于水流受导流结构引导，流速呈现明显的不均匀分布，近壁面流速受边界层影响显著降低，而主流区流速相对较高，形成明显的流速梯度。在导流结构的作用下，水流在设施内部逐渐调整，弯道处的离心力致使外侧流速大于内侧，该现象在高流量工况下尤为突出。通过对流速矢量的分析发现，导流设施成功改变了水流方向，在特定区域形成环流结构，这种环流对促进泥沙运动和防止泥沙淤积起到关键作用。在设施出口段，流速分布趋于均匀，这表明导流防沙设施对水流具有良好的整流效果，有助于减少下游渠道的冲刷风险，为后续输水系统的稳定运行提供保障^[1]。

2.2 水位变化特性试验

水位变化特性试验旨在探究新型渠首导流防沙设施在不同来流条件下的水位响应规律。试验通过调节上游水箱的流量来模拟天然河道的流量变化，同时利用高精度水位传感器实时监测设施各关键部位的水位数据。结果显示，在设施进口处，由于导流结构对水流的壅水作

用,水位出现明显壅高现象,且壅高值随流量的增加而增大。随着水流进入设施内部,在导流板和消能结构的共同作用下,水流能量逐渐耗散,水位逐渐下降。在弯道区域,受离心力影响,外侧水位高于内侧,形成横向水位差,该水位差与流速分布密切相关,且在不同流量工况下呈现出稳定的变化趋势。试验还发现,设施出口处的水位受下游水位影响较大,当下游水位较低时,设施出口水位下降迅速,水流具有较强的下泄能力;当下游水位较高时,出口水位上升,形成一定的壅水现象,这对设施的排沙和输水能力产生重要影响。通过对大量试验数据的分析,建立了水位变化与流量、设施结构参数之间的定量关系,为设施的优化设计和运行管理提供了重要依据。

2.3 泥沙运动特性试验

泥沙运动特性试验是评估新型渠首导流防沙设施防沙效果的关键环节。试验采用与原型相似的模型沙,通过改变来流含沙量、流量及泥沙粒径等参数,系统研究设施内部泥沙的运动规律。在低含沙量工况下,试验观察到大部分泥沙能够顺利通过设施,仅在局部区域出现少量泥沙沉积,这主要是由于导流结构形成的环流和水流紊动作用促使泥沙保持悬浮状态。随着来流含沙量的增加,泥沙运动变得复杂,在设施进口段,粗颗粒泥沙受重力作用迅速下沉,而细颗粒泥沙则随水流继续运动。在导流弯道处,离心力使粗颗粒泥沙向外侧运动并逐渐沉积,形成泥沙堆积带,而内侧区域由于水流流速相对较高,泥沙淤积较少。通过对不同粒径泥沙运动轨迹的追踪发现,粒径较大的泥沙更容易在设施底部沉积,而粒径较小的泥沙则具有更强的输移能力。试验还对比了不同流量条件下的泥沙运动特性,结果表明,高流量工况下水流挟沙能力增强,能够有效减少泥沙在设施内部的淤积,但同时也可能增加下游渠道的泥沙输送压力。综合试验结果,分析得出了影响泥沙运动的关键因素,为优化设施结构以提高防沙效率提供了理论支持^[2]。

2.4 流态可视化试验

流态可视化试验通过先进的图像处理技术,直观展现新型渠首导流防沙设施内部水流的运动形态。试验采用粒子图像测速(PIV)技术和染色示踪法相结合的方式,在设施内部投放示踪粒子,并利用高速摄像机记录示踪粒子的运动轨迹,从而获取水流的速度场和流线分布。在导流结构的作用下,水流在设施进口处形成有序的分流现象,不同方向的水流在导流板的引导下逐渐汇合,形成复杂的交汇流态。在弯道区域,通过染色示踪可以清晰地观察到离心力作用下形成的螺旋流,这种螺旋

流不仅对泥沙运动产生重要影响,还能有效改善水流的掺混和能量耗散。在设施内部的消能区域,水流呈现出强烈的紊动和涡旋结构,示踪粒子的运动轨迹显示出水流能量的快速耗散过程。通过对不同工况下流态图像的对比分析,能够准确识别出设施内部的水流分离区、回流区等特殊流态区域,这些区域往往是泥沙淤积和能量损失的主要部位。流态可视化试验结果为深入理解设施内部水流运动机制提供了直观依据,有助于进一步优化设施结构,改善水流流态,提高导流防沙设施的整体性能。

3 基于水力特性试验结果的新型渠首导流防沙设施结构优化方法

3.1 弯道参数优化

(1) 弯道曲率半径作为关键参数,直接影响弯道环流强度与泥沙输移特性。通过水力模型试验,系统研究不同曲率半径下的水流结构与泥沙运动规律,发现曲率半径过小会导致水流离心力过大,加剧凹岸冲刷;过大则削弱弯道环流作用,降低排沙效率。基于试验数据拟合,建立曲率半径与泥沙输移比的数学模型,为合理取值提供理论依据,使弯道在满足导流要求的同时,最大化发挥排沙功能。(2) 弯道中心角的优化需综合考虑导流防沙效果与工程占地。增大中心角可延长水流在弯道内的运动路径,增强泥沙分离效果,但会增加工程建设成本。利用数值模拟与物理模型试验相结合的方法,对不同中心角工况下的水流流态、泥沙浓度分布进行分析,确定中心角的最优取值范围,平衡导流防沙性能与工程经济性。(3) 弯道断面形态对水流流速分布及泥沙运动有显著影响。通过改变弯道断面的宽深比、边坡系数等参数,开展系列对比试验,研究其对水流紊动特性和泥沙起动条件的影响。试验结果表明,合理的断面形态能够优化水流流速分布,降低弯道凸岸淤积和凹岸冲刷,基于此提出适用于不同来水来沙条件的弯道断面形态优化方案。

3.2 引水口结构优化

(1) 引水口布置位置与角度对水流流态和泥沙入渠量至关重要。基于水力特性试验,分析引水口在弯道不同位置及不同引水角度下的分流分沙规律,发现将引水口设置在弯道顶点下游一定距离处,并采用合适的引水角度,可有效减少泥沙入渠。通过对多种布置方案的试验对比,确定引水口最佳布置位置和角度,降低渠道泥沙淤积风险。(2) 引水口体型结构影响水流收缩与扩散特性。对不同形状的引水口(如矩形、梯形、喇叭形等)进行水力试验,研究其水流流态、流速分布及压

力变化。结果显示,优化后的喇叭形引水口能够使水流平顺进入渠道,减少局部水头损失,同时降低泥沙进入引水口的概率。结合试验数据,对喇叭形引水口的收缩比、长度等参数进行优化设计,提高引水效率和防沙效果。(3)引水口前的导流设施可进一步改善水流条件。设置导流墙、导流墩等设施,通过试验研究其对水流流态和泥沙运动的调控作用。合理布置导流设施,能够调整引水口前的水流流速分布,形成有利于排沙的流态,减少泥沙在引水口附近的淤积,提高引水口的运行稳定性和使用寿命^[3]。

3.3 消涡与整流结构优化

(1)渠道中漩涡的存在会影响水流稳定性和泥沙运动,消涡结构的优化是关键。针对常见的漩涡形态和产生机理,设计多种消涡装置(如消涡梁、消涡栅等),通过水力试验研究其消涡效果。试验中,采用粒子图像测速(PIV)技术测量水流速度场,分析不同消涡装置对漩涡强度和范围的影响,优化消涡装置的结构参数和布置方式,有效消除渠道中的有害漩涡。(2)整流结构用于改善水流流速分布的均匀性。通过设置整流格栅、导流板等整流设施,开展不同工况下的水力试验,研究其对水流流速分布、紊动强度的影响。试验结果表明,合理设计的整流结构能够使水流流速分布更加均匀,降低水流紊动强度,减少泥沙的悬浮和再启动。根据试验数据,优化整流设施的尺寸、间距和安装角度,提高渠道水流的稳定性和输沙能力。(3)消涡与整流结构的联合优化能够发挥协同效应。将消涡装置与整流设施进行不同组合,通过试验对比分析其综合效果。研究发现,合理的组合方式不仅能有效消除漩涡,还能显著改善水流流速分布,提高渠道的输水输沙性能。基于试验结果,提出消涡与整流结构联合优化方案,为新型渠首导流防沙设施的设计提供技术支持。

3.4 综合性能优化

(1)新型渠首导流防沙设施的综合性能需从导流、防沙、能耗等多方面进行考量。通过构建综合性能评价指标体系,将弯道参数、引水口结构、消涡与整流结构

等因素纳入评价范围,采用层次分析法确定各指标权重。结合水力特性试验数据,对不同结构优化方案进行综合评价,量化各方案的优劣,筛选出综合性能较优的方案。(2)采用多目标优化方法,以导流效率、防沙效果最大化和能耗最小化为目标函数,建立结构参数优化模型。利用数值模拟技术对模型进行求解,分析各结构参数之间的相互影响和制约关系,寻找满足多目标要求的最优参数组合。通过对优化结果进行敏感性分析,明确关键参数对综合性能的影响程度,为结构优化设计提供科学依据。(3)在综合性能优化过程中,开展物理模型与数值模拟的对比验证。将数值模拟结果与物理模型试验数据进行对比分析,验证数值模拟方法的准确性和可靠性。根据对比结果,对优化方案进行调整和完善,确保新型渠首导流防沙设施在实际运行中能够达到预期的综合性能目标,实现高效导流和有效防沙的目的^[4]。

结语

综上所述,通过对新型渠首导流防沙设施开展系列水力特性试验,精准掌握设施内流速、水位、泥沙运动规律及流态特征。基于试验成果提出的弯道参数、引水口结构、消涡整流等优化策略,显著提升设施导流防沙性能。研究成果完善了渠首工程水沙调控理论,为工程结构优化提供创新思路。未来需进一步深化试验与数值模拟结合,推动研究成果在复杂河流水系工程中的广泛应用。

参考文献

- [1]张丽丽.湍惠渠渠首坝施工导流方案比选[J].河南水利与南水北调,2024,53(5):58-59.
- [2]刘娟.巴楚县民生渠首布置型式及导流堤基础处理方案比选[J].云南水力发电,2023,39(3):138-141.
- [3]王玉宝,周仁宇,张晨昊,等.U型渠道移动式流线型量水槽扩散段水力特性及结构优化方法[J].农业工程学报,2024,40(11):128-138.
- [4]刘敏,陈跃威.多通道施肥机水力特性及其结构优化研究[J].机电工程,2020,37(8):900-905.