

长距离输水渠道的水力学特性研究

刘 宁

新疆兵团勘测设计院集团股份有限公司 新疆 乌鲁木齐 830002

摘 要: 本文旨在深入探讨长距离输水渠道的水力学特性,通过分析其流动规律、压力分布、能量损失及稳定性等方面,为长距离输水工程的设计、运行与管理提供理论依据。研究结合了国内外相关领域的最新研究成果,从理论分析与数值模拟两个维度出发,全面阐述了长距离输水渠道的水力学特性。

关键词: 长距离; 输水渠道; 水力学特性

引言

随着社会经济的快速发展和城市化进程的加速,水资源短缺问题日益凸显,长距离输水工程成为解决水资源供需矛盾的重要手段。然而,长距离输水渠道在运行过程中面临着复杂的水力学问题,如水流非恒定流特性、能量损失、明满交替流现象等,这些问题直接关系到输水工程的安全性及经济性。因此,对长距离输水渠道的水力学特性进行深入研究具有重要的理论意义和实践价值。

1 长距离输水渠道的基本特性

1.1 渠道类型与结构

长距离输水渠道主要分为无压流渠道和承压流渠道。无压流渠道的水流自由表面暴露于大气中,如明渠;承压流渠道则通过管道输送水流,如暗涵。渠道结构通常包括渠道底部、边坡、衬砌等部分,其设计需综合考虑地形、水流条件、材料性能等因素。

1.2 水流动力特性

长距离输水渠道的水流动力特性受多种因素影响,包括流量、流速、水深、底坡等。水流在渠道中流动时,会产生摩擦阻力和局部阻力,导致能量损失,进而影响水流速度和压力分布。此外,特殊地形条件如弯道、变坡段等,会产生复杂的水流现象,进一步影响水流稳定性。

2 水流非恒定流特性分析

2.1 非恒定流的基本概念

非恒定流,顾名思义,是指流体的运动要素(包括但不限于流速、水深、流向等)随时间发生变化的水流现象。在长距离输水渠道的实际运行中,由于地形地貌的自然变化、闸门的开闭操作、泵站的间歇运行以及可能的水流摩阻和能量损失等多种因素的综合作用,水流往往呈现出非恒定的状态^[1]。这种状态的水流特性对于输水渠道的设计、运行和管理都提出了更高的挑战,因为

非恒定流的水流特性更加复杂多变,需要更加精细化的分析和控制。

2.2 非恒定流的控制方程

为了深入理解和准确描述非恒定流的水流特性,需要借助流体力学的基本原理,建立非恒定流的控制方程。这些方程主要包括连续性方程和运动方程。

连续性方程是基于流体质量守恒的原理而建立的。在长距离输水渠道中,尽管水流处于非恒定状态,但在任何给定的时间和空间内,流体的质量都是保持不变的。连续性方程通过数学语言精确地表达了这一物理原理,其一般形式为:

$$\partial t / \partial \rho + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0$$

其中, ρ 是流体密度, \mathbf{u} 是流速向量, t 是时间, ∇ 是梯度算子。对于不可压缩流体,密度 ρ 为常数,方程可简化为:

$$\partial x / \partial u + \partial y / \partial v + \partial z / \partial w = 0$$

其中, u 、 v 、 w 分别是流速向量在 x 、 y 、 z 方向上的分量。

运动方程则反映了流体动量变化与外力作用之间的关系。在长距离输水渠道中,水流受到多种外力的作用,包括重力、摩阻力、压力等。这些外力作用导致水流的动量发生变化,进而影响其流速、水深等运动要素。对于不可压缩流体的非恒定流,运动方程(即纳维-斯托克斯方程)可表示为:

$$\rho(\partial t / \partial \mathbf{u} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u}) = -\nabla p + \rho \mathbf{g} + \mu \nabla^2 \mathbf{u}$$

其中, p 是流体压力, \mathbf{g} 是重力加速度向量, μ 是流体动力粘度。方程左边表示流体动量的变化率,右边第一项表示压力梯度力,第二项表示重力,第三项表示粘性力。

通过联立求解连续性方程和运动方程,可以得到非恒定流的水流特性随时间和空间的变化规律。这些规律对于长距离输水渠道的设计、运行和管理具有重要的

指导意义,可以帮助我们更好地理解和控制非恒定流的水流特性,确保输水渠道的安全稳定运行。在实际应用中,这些方程通常需要通过数值方法进行求解,以获得具体的流速、水深等水流特性参数。

3 压力分布与能量损失

3.1 压力分布规律

在长距离输水渠道中,压力分布是影响水流稳定性和安全性的关键因素。对于有压流管道,压力分布主要受到多种因素的影响:(1)管道材质:管道的材质直接影响其承受内压的能力。不同材质的管道,如钢铁、混凝土、塑料等,其抗压强度和耐腐蚀性各不相同,从而对管道内的压力分布产生显著影响。(2)管径大小:管径决定了水流的通过能力。在相同的水流速度下,管径越大,水流对管道壁面的冲击越小,压力分布越均匀;反之,管径越小,水流对管道壁面的冲击越大,压力分布越不均匀。(3)水流速度:水流速度的变化会直接导致动压的变化。根据伯努利方程,动压与水流速度的平方成正比。因此,水流速度的变化会显著影响管道内的总压力分布。(4)地形坡度:地形坡度会影响水流的重力分量。在有坡度的管道中,水流会受到重力分量的作用,从而影响压力分布。特别是在上坡段,水流需要克服重力做功,压力会降低;而在下坡段,重力对水流做功,压力会增加。对于无压流渠道,压力则主要表现为动水压力和静水压力的组合:动水压力是由于水流运动而产生的压力。在无压流渠道中,水流速度的变化会导致动水压力的变化,从而影响总压力分布。静水压力是由于水体重量而产生的压力^[2]。在无压流渠道中,水深的变化会直接导致静水压力的变化。特别是在渠道底部和边坡,由于水深的不同,静水压力分布也会有所不同。这两种压力在无压流渠道中共同作用,形成了复杂的压力分布规律。为了确保渠道的安全稳定运行,需要对这些压力分布进行准确的计算和预测。

3.2 能量损失分析

能量损失是长距离输水过程中不可避免的现象。它主要包括沿程损失和局部损失两类:沿程损失是由于水流与渠道壁面摩擦产生的能量消耗。这种摩擦会导致水流能量的逐渐损失,表现为水温的升高和水流速度的降低。沿程损失的大小与水流速度、渠道壁面的粗糙度、输水距离以及水流状态(层流或紊流)等因素有关。为了减小沿程损失,可以采取降低水流速度、优化渠道壁面粗糙度、缩短输水距离以及采用减阻技术等措施。局部损失则发生在渠道断面变化、弯道、闸门等部位。当水流经过这些部位时,由于水流方向或速度的改变,会

产生涡流、撞击等现象,从而导致能量的局部损失。局部损失的大小与渠道的设计合理性、施工质量以及运行管理等因素有关。为了减小局部损失,可以采取优化渠道设计(如采用渐变段、圆滑的弯道等)、提高施工质量(如确保渠道壁面的平整光滑)以及加强运行管理(如合理调度水流、定期维护渠道等)等措施。

4 明满交替流现象研究

4.1 明满交替流的定义与成因

明满交替流是指在长距离输水渠道中,由于地形变化、水流速度调整或闸门操作等原因,导致渠道内部分区域出现明流与满流交替出现的现象。明流是指渠道内水流未充满整个渠道断面,水面与渠道顶部之间存在自由表面的流动状态;而满流则是指渠道内水流充满整个渠道断面,水面与渠道顶部相接触的流动状态。明满交替流的出现对渠道结构稳定性和水流稳定性均构成挑战,可能导致渠道壁面的冲刷、淤积以及水流速度的急剧变化等问题。

明满交替流的成因主要包括以下几个方面:(1)地形变化:长距离输水渠道往往穿越不同的地形区域,地形的高低起伏会导致渠道内水流状态的变化,从而引发明满交替流。(2)水流速度调整:为了适应不同的输水需求和渠道条件,水流速度可能需要进行调整。当水流速度发生变化时,渠道内的水流状态也可能随之改变,导致明满交替流的出现。(3)闸门操作:在长距离输水渠道中,闸门是常用的水流控制设施^[3]。闸门的开启和关闭会改变渠道内的水流条件,从而引发明满交替流。特别是在闸门附近,由于水流速度的急剧变化和流向的改变,更容易出现明满交替流现象。

4.2 明满交替流的计算方法

针对明满交替流现象,国内外学者提出了多种计算方法,这些方法通过数值模拟手段,对明满交替流过程中的水流特性进行定量分析,为工程实践提供了重要的指导。以下是几种主要的计算方法及其介绍:

4.2.1 Preissmann假设法

Preissmann假设法是一种简化的计算方法,它基于Preissmann槽蓄曲线方程,通过引入一些假设来简化明满交替流的计算过程。该方法的基本思想是将明渠和有压管道中的水流视为具有某种槽蓄特性的单一水流,从而避免了直接处理复杂的明满交替界面。然而,这种方法在精度上可能存在一定的局限性,特别是在明满交替界面变化剧烈的情况下。

4.2.2 特征线法

特征线法是一种基于特征理论的数值计算方法,它

通过将偏微分方程转化为特征线上的常微分方程，并利用数值积分进行求解。在明满交替流的计算中，特征线法能够较好地处理水流状态的变化和明满交替界面的移动。该方法具有较高的计算精度，但计算过程相对复杂，需要较高的计算资源和时间。特征线法的具体步骤如下：（1）建立控制方程：首先，根据明渠流动和有压管道流动的物理规律，建立相应的连续方程和运动方程。（2）特征线方程推导：将偏微分方程转化为特征线方程，即沿特征线方向的常微分方程。（3）初始条件和边界条件设定：根据具体工程情况，设定初始条件和边界条件。（4）数值积分求解：利用数值积分方法（如龙格-库塔法）求解特征线方程，得到沿特征线的水流参数。（5）结果后处理：对计算结果进行后处理，提取出明满交替流过程中的关键水流特性参数，如流量、水深、流速等。

5 输水渠道稳定性分析

5.1 稳定性影响因素

输水渠道的稳定性是一个复杂的问题，它受到多种因素的共同影响。以下是对这些影响因素的详细分析：一是渠道结构强度：渠道的结构设计、材料选择以及施工质量都直接影响其稳定性。结构强度不足可能导致渠道在承受水流压力、地质变动或外部荷载时出现破坏。二是水流特性：水流的速度、流量、流态等特性对渠道稳定性具有重要影响。例如，水流速度过快可能导致渠道冲刷破坏，降低渠道的使用寿命；而水流速度过慢则可能引发淤积问题，影响渠道的输水能力。三是地质条件：渠道所处的地质环境也是影响其稳定性的重要因素。地质构造、土壤类型、地下水位等都会对渠道的稳定性产生影响^[4]。例如，在地质构造复杂、土壤类型松散或地下水位较高的地区，渠道更容易发生滑坡、坍塌等破坏。四是外部环境：外部环境的变化也可能对渠道稳定性造成影响。例如，气候变化可能导致渠道水文条件的变化，进而影响渠道的稳定性；人类活动也可能对渠道造成破坏，如施工、采矿等。

5.2 稳定性评估方法

5.2.1 数值模拟方法

数值模拟方法是一种基于计算机技术的分析方法，通过建立渠道水流模型，利用数值模拟技术对水流特性进行定量分析。具体步骤如下：（1）建立水流模型：根据渠道的实际尺寸、形状和边界条件，建立三维水流模型。（2）设定水流条件：根据渠道的设计流量、水位等参数，设定模拟的水流条件。（3）进行数值模拟：利用

专业的数值模拟软件，对水流在渠道内的流动情况进行模拟。（4）结果分析：对模拟结果进行分析，预测渠道在不同工况下可能发生的冲刷、淤积等问题，为稳定性评估提供科学依据。数值模拟方法的优点在于可以模拟不同工况下的水流条件，预测渠道可能发生的各种问题，且成本相对较低，计算速度快。但需要注意的是，数值模拟结果的准确性受到模型建立、参数设定等多种因素的影响，因此需要进行严格的验证和校核。

5.2.2 物理模型试验

物理模型试验是一种通过缩比模型模拟实际水流条件的方法，可以直观展示渠道水流特性。具体步骤如下：（1）建立缩比模型：根据渠道的实际尺寸和形状，按照一定比例缩小，建立缩比模型。（2）模拟水流条件：在实验室条件下，利用水泵、水箱等设备模拟实际的水流条件。（3）观察水流特性：通过观察缩比模型中水流的流动情况，直观展示渠道水流特性。（4）结果分析：对观察结果进行分析，评估渠道的稳定性，并提出改进建议。物理模型试验的优点在于可以直观地观察水流在渠道内的流动情况，评估渠道的稳定性，并可以为数值模拟方法提供验证和校核的依据。但需要注意的是，物理模型试验的成本相对较高，且受到实验室条件的限制。

结语

本文通过对长距离输水渠道的水力学特性进行深入研究，分析了其流动规律、压力分布、能量损失及稳定性等方面的特点。研究表明，长距离输水渠道在运行过程中面临着复杂的水力学问题，需要综合运用理论分析、数值模拟及现场监测等手段进行深入研究。未来研究应进一步关注明满交替流现象、水流与渠道结构的相互作用以及新型输水材料与技术等方面的探索与应用，以推动长距离输水工程技术的不断进步与发展。

参考文献

- [1]高仁祖,马晓泉,李向东,等.退水渠道水力特性模拟的SPH方法及工程应用[J].水利规划与设计,2023,(08):127-131.
- [2]张强.微生物分布对某输水渠道水力特性影响分析[J].水利技术监督,2022,(01):160-163+181.
- [3]刘吉强.灌区U型输水渠道水力特性分析研究[J].水利科学与寒区工程,2020,3(04):30-35.
- [4]吴艳.长距离输水渠道冰凌演变输移机理及水力调控技术研究.新疆维吾尔自治区,新疆水利水电科学研究院,2018-06-25.