

# 水利工程跌水结构的水力特性与优化设计研究

秦国鹏

新疆水利水电勘测设计研究院有限责任公司 新疆 乌鲁木齐 830000

**摘要:** 跌水结构是水利工程中消能防冲的关键设施,其水力特性直接决定工程运行安全性与稳定性。本文以水利工程跌水结构为研究对象,阐述其定义、组成及水力特性研究的理论基础,系统分析跌水段、消能段、进出口段的水力特性,探究结构参数、水流参数及边界条件对水力特性的影响,提出传统、现代数值模拟及多目标三类优化设计方法。研究表明,合理优化结构参数可改善水流形态、提升消能效率,为水利工程跌水结构的设计、优化及运维提供理论支撑与实践参考。

**关键词:** 水利工程;跌水结构;水力特性分析;优化设计方法

**引言:** 在水利工程输水系统中,跌水结构广泛应用于缓解水流落差、消耗水流多余动能,其设计合理性直接关系到工程安全与运行效率。当前,部分水利工程跌水结构存在消能不充分、水流扰动大、结构磨损严重等问题,影响工程长期稳定运行。基于此,本文围绕跌水结构的水力特性与优化设计展开研究,结合实际工程工况,分析水力特性规律及影响因素,提出科学可行的优化设计方法,解决工程实际问题,推动水利工程跌水结构设计水平的提升。

## 1 水利工程跌水结构的水力特性相关基础理论

### 1.1 跌水结构的定义与分类

跌水结构是水利工程中用于缓解水流落差、消能防冲的关键建筑物,指在渠道、河道等输水系统中,使水流产生急剧跌落、完成能量转化的结构设施。根据结构形式与适用场景,其主要分为两类:(1)直壁式跌水,坎壁垂直,构造简单、施工便捷,适用于落差较小的中小型渠道;(2)斜坡式跌水,坎壁呈一定坡度,水流跌落平缓,消能效果更优,多用于落差较大、流量变化频繁的工程。

### 1.2 跌水结构的基本组成与工作原理

跌水结构主要由进口段、跌水段、消能段及出口段四部分组成:进口段引导水流平稳进入跌水区域,减少水流扰动;跌水段是核心部位,水流在此快速跌落,势能转化为动能;消能段通过各类消能设施消耗水流能量,避免冲刷渠床;出口段衔接下游渠道,使水流平稳过渡。其工作原理是利用水流跌落产生的能量突变,通过消能设施将动能转化为热能、紊动能耗,降低水流流速,保护下游建筑物及渠床安全。

### 1.3 水力特性研究的核心理论基础

水力特性研究以明渠水流理论为核心,主要包括明

渠恒定流基本方程,用于计算跌水各段水位、流速分布;消能机理理论,明确底流消能、挑流消能等不同方式的能量损失规律;水流脉动与掺气理论,分析跌水过程中水流脉动压力变化及掺气对消能效果的影响。结合流体力学中的动量方程、能量方程,为跌水结构水力特性的定量分析、参数计算提供理论支撑,是后续优化设计的重要依据<sup>[1]</sup>。

## 2 水利工程跌水结构的水力特性分析

### 2.1 跌水段水力特性分析

跌水段是水流完成势能向动能转化的核心区域,其水力特性主要体现在流速分布、水位变化及能量转化三个方面:(1)流速分布特性。跌水段流速分布受跌水高度、流量及跌水坎形式影响显著。实际工程中,直壁式跌水坎前流速均匀,坎顶流速最大且水平分布对称;斜坡式跌水坎面流速沿坡向下递增,坎底达峰值,呈上小下大分布。流量增大时,坎顶、坎底流速显著提升,流速分布不均匀性增强;跌水高度越高,流速增幅越明显,且斜坡式流速增长速率低于直壁式。此外,跌水段水流存在竖向分层,表层流速略高于底层,该差异在高落差、大流量工况下更为突出。(2)水位变化规律。跌水段水位变化集中在进口衔接处、坎顶及坎底。进口衔接处因跌水坎阻挡,水位轻微壅高,壅高值与流量正相关、与坎宽负相关,实际工程中多在0.1-0.5m之间。坎顶水位最低且稳定,不受下游水位影响,仅随流量小幅波动;坎底水位受消能段回流影响小幅波动,幅度不超过0.3m,下游水位过高时会导致跌水不畅。(3)能量转化特性。跌水段核心是势能向动能转化,转化效率与跌水高度、水流形态密切相关。实际观测显示,跌水高度越高,转化越充分;跌水高度低于2m时,转化效率75%-85%,超过5m时可达90%以上。直壁式转化效率略高于

斜坡式,因后者水流沿坡面流动存在摩擦损耗,效率降低5%~10%。

## 2.2 消能段水力特性分析

消能段是消耗水流多余动能的关键环节,其水力特性主要包括水流形态、消能效率及脉动压力分布:(1)水流形态分类与特征。实际工程中消能段水流形态主要为底流式和挑流式,底流式应用最广泛。底流式消能段呈淹没式水跃,消力池中部形成旋滚,旋滚高度为池深的0.3~0.6倍,范围随流量扩大;挑流式消能段水流呈射流,从鼻坎射出后形成抛物线,射流长度为跌水高度的2~3倍,挑流角度多控制在 $30^{\circ}$ ~ $45^{\circ}$ ,落水后产生强烈紊动。(2)消能效率影响因素及分布。消能效率主要受消能段尺寸、设施形式及水流参数影响。消力池长度为跌水高度的3~4倍、深度为0.8~1.2倍时,底流式消能效率达80%~90%;消能坎、消能齿可提升效率5%~15%,其中消能齿效果更优。流量增大时效率略有提升,跌水高度越高,效率越高,高落差工况下可稳定在90%以上。(3)水流脉动压力分布特性。脉动压力分布存在明显区域差异,是结构磨损、振动的主要原因。底流式消能段中,脉动压力最大值出现在消力池底部中部,幅值为静水压的0.2~0.4倍,向两端递减;挑流式中,最大值出现在挑流鼻坎根部,幅值为静水压的0.3~0.5倍,射流落水区域波动频率较高。脉动压力频率集中在1~10Hz,流量增大时,频率和幅值均升高,大流量、高落差工况下影响更显著<sup>[2]</sup>。

## 2.3 进出口段水力特性分析

进出口段是跌水结构与上下游渠道的衔接部分,其水力特性影响水流平稳过渡,具体分析如下:(1)进口段水流收缩与衔接特性。进口段核心水力特性为水流收缩,实际多采用喇叭形或直线形衔接,收缩系数为0.85~0.95。直线形收缩系数略高,但喇叭形衔接更平稳、扰动更小;水流收缩集中在进口前端1~2倍渠道宽度范围内,收缩后流速更均匀。渠床糙率对衔接影响较大,糙率越大,水流阻力和能量损耗越大,衔接越平稳。(2)出口段水流扩散与衔接特性。出口段多采用渐变式扩散,扩散角控制在 $10^{\circ}$ ~ $20^{\circ}$ ,过大易产生涡流,过小则无法充分扩散。扩散过程中流速降低、水位小幅抬高,扩散范围与扩散角、流量正相关;衔接顺畅时流速均匀无明显涡流,坡度不合理时,易出现水位壅高或水流脱节,影响整体水力特性。(3)进出口段水力损失分析。进出口段水力损失以局部损失为主,进口段局部损失源于水流收缩,与收缩系数负相关;出口段局部损失源于水流扩散,与扩散角正相关。沿程损失受渠床糙率和进口段长度影响,糙率越大、长度越长,损失越大,实际工程中进出

口段总损失不超过跌水总水头的10%。

## 3 水利工程跌水结构水力特性的影响因素

水利工程跌水结构的水力特性受多种因素综合影响,主要可分为结构参数、水流参数及边界条件三大类:(1)结构参数。跌水高度直接决定势能转化效率,高度越高,水流跌落速度越快,动能占比越高,水力特性差异越显著;跌水坎的宽度、坡度影响流速分布,宽坎、缓坡可降低流速不均匀性,窄坎、陡坡则会加剧水流扰动。消能段尺寸、消能设施形式也会影响消能效果,消力池过短过浅会导致消能不充分,消能齿等辅助设施可优化水流脉动特性。(2)水流参数。流量是核心影响因素,流量增大时,流速、水位波动幅度及脉动压力均会提升,流速分布不均匀性增强,消能效率略有提升但波动更明显。水流含沙量主要影响水力损失和结构磨损,含沙量过高会增大渠床糙率,降低水流流速,同时加剧消能段结构磨损,间接改变水力特性。(3)边界条件。渠床糙率影响水流阻力和沿程水头损失,糙率越大,水流流速降低越明显,能量损耗增加,衔接段水力特性更平稳。上下游水位衔接状况也至关重要,下游水位过高会导致坎底水位抬高,影响跌水顺畅性,水位衔接不当还会引发水流脱节或壅高,破坏整体水力平衡<sup>[3]</sup>。

## 4 水利工程跌水结构的优化设计方法

### 4.1 传统优化设计方法

传统优化设计方法依托工程实践经验和基础理论公式,操作简便、成本较低,适用于中小型水利工程跌水结构的优化设计,具体方法如下:(1)经验公式法。该方法以大量实际工程观测数据为基础,通过拟合分析得出优化设计相关经验公式,核心是结合工程实际参数,代入公式计算最优结构尺寸。实际应用中,针对跌水高度、消力池尺寸、跌水坎坡度等关键参数,可采用成熟的经验公式进行优化,例如消力池深度可通过水流跃后水深与跃前水深的差值公式计算,跌水坎宽度可根据设计流量、流速要求,结合经验系数确定。该方法无需复杂设备,计算速度快,适用于落差小、流量稳定的中小型跌水结构,优化过程中需结合工程所在区域的水文、地质条件,对经验系数进行适当调整,确保设计参数贴合实际。(2)模型试验法。该方法通过搭建与实际工程1:10至1:50的物理模型,模拟不同工况下跌水结构的水力特性,进而开展优化设计。实际操作中,先根据工程设计图纸制作模型,选用与实际水流物理特性相近的介质,模拟不同流量、跌水高度下的水流形态、流速分布及消能效果,通过调整跌水坎形式、消能段尺寸等参数,观测水力特性的变化规律,确定最优设计方案。模型试验

法直观性强,能精准反映实际水流状态,适用于落差较大、工况复杂的跌水结构优化,但存在试验周期长、成本较高的不足,实际应用中多与经验公式法结合使用,提高优化设计的可靠性<sup>[4]</sup>。

#### 4.2 现代数值模拟优化设计方法

现代数值模拟优化设计方法依托计算机技术和流体力学理论,通过构建数学模型模拟水流运动规律,具有高效、精准、成本低的优势,已广泛应用于各类水利工程跌水结构优化,具体方法如下:(1)模型建立与参数设置。首先结合实际工程的水文、地质及结构参数,选用FLUENT、MIKE等专业数值模拟软件,构建跌水结构三维或二维数学模型,明确模型的计算域、边界条件。边界条件设置需贴合实际,进口边界按设计流量设定,出口边界按下游正常水位设定,壁面边界采用无滑移条件,同时根据实际水流特性,选择合适的湍流模型(如k- $\epsilon$ 模型),确保模拟结果的准确性。模型网格划分采用结构化网格,对跌水段、消能段等核心区域进行网格加密,提高计算精度,非核心区域适当简化网格,提升计算效率。(2)模拟计算与方案优化。模型建立完成后,输入设计参数进行数值计算,模拟不同结构参数下的水流流速、压力分布、消能效率等水力特性,通过对比分析,确定优化方向。实际优化中,针对跌水坎坡度、消力池尺寸、消能设施布置等关键参数,采用控制变量法,逐一调整参数取值,模拟不同工况下的水力特性,筛选出最优参数组合。例如,调整消力池长度时,分别模拟不同长度下的消能效果,结合计算结果,确定既能满足消能要求、又能节约工程量的最优长度,优化完成后,需结合实际工程观测数据,对模拟结果进行验证,确保优化方案贴合实际。

#### 4.3 多目标优化设计方法

多目标优化设计方法兼顾跌水结构的水力性能、结构安全、经济成本等多个目标,避免单一目标优化导致的设计缺陷,贴合实际工程的综合需求,具体方法如下:(1)优化指标体系构建。结合实际工程需求,确定多目标优化的核心指标,主要包括水力性能指标(消能效率、流速均

匀性、脉动压力幅值)、结构安全指标、经济指标。各指标需量化处理,例如消能效率按实际计算值设定,工程造价按工程量、材料价格等参数核算,同时根据工程重要性,对各指标赋予合理权重,确保优化设计兼顾各方需求,贴合工程实际。(2)优化算法选择与应用。选用适合水利工程结构优化的算法,常用的有遗传算法、粒子群算法,这类算法能高效搜索最优参数组合,适用于多目标、多约束的优化问题。实际应用中,将跌水结构的关键设计参数作为变量,以构建的多目标优化指标体系为目标函数,设定结构强度、水力条件等约束条件,通过算法迭代计算,得到最优设计方案。例如,采用遗传算法时,通过编码、交叉、变异等操作,逐步筛选出兼顾消能效果、结构安全和经济成本的参数组合,优化完成后,需结合实际工程工况,对方案进行可行性验证,确保优化方案切实可行<sup>[5]</sup>。

结束语:本文系统完成了水利工程跌水结构水力特性与优化设计的相关研究,明确了各段水力特性规律,分析了主要影响因素,提出了三类优化设计方法,实现了理论分析与实践应用的结合。后续可结合更多工程实例,完善优化算法,提升设计方案的适用性,为水利工程跌水结构的高效、安全运行提供更有力的保障。

#### 参考文献:

- [1]张德才.水利工程中跌水消力池池长池深设计实例[J].大众标准化,2025(17):78-80.
- [2]申艳,唐昌昌,郭苗,吴昊.对称岔管结构与水力特性优化设计研究[J].湖南电力,2024,44(4):112-117.
- [3]张大勇.水工建筑物结构设计相关问题研究[J].前卫,2024(25):0099-0101.
- [4]薛海,刘科,刘明潇,刘阳,甄映红,孙东坡.深水明渠附着水下空间体的水动力特性与体型优化[J].水利水电技术(中英文),2021,52(4):134-142.
- [5]常前朋.溢洪道挑流消能工水力优化设计方法研究[J].中文科技期刊数据库(文摘版)工程技术,2025(9):138-141.