

高坝泄洪消能结构的水力特性与优化设计研究

张先勇 孙树仙

长江勘测规划设计研究有限责任公司 湖北 武汉 430010

摘要: 为提升高坝泄洪消能结构的性能与安全性,本文围绕其水力特性与优化设计展开研究。明确了泄洪消能结构的类型划分及设计核心参数,进而系统分析泄洪水流基本特性、不同结构水力特性差异,借助数值模拟实现水力特性精细化分析。在此基础上,确立优化设计原则与目标,提出参数优化、结构创新及复杂工况适配等优化方案。研究成果为高坝泄洪消能结构的科学设计与优化提供理论支撑,可有效提升消能效率与结构稳定性。

关键词: 高坝;泄洪消能结构;水力特性;优化设计

引言: 随着高坝工程建设的增多,泄洪消能系统的可靠性直接关乎工程安全与运行效能。高水头、大流量工况下,泄洪水流能量集中,易引发冲刷、空化等问题,对消能结构设计提出更高要求。当前现有消能结构在复杂工况适应性、消能效率等方面仍存在优化空间。为此,本文聚焦高坝泄洪消能结构的水力特性与优化设计,通过类型梳理、特性分析、数值模拟等手段,探索科学的优化设计方法与方案,旨在为解决高坝泄洪消能工程难题提供技术支持,保障工程安全稳定运行。

1 高坝泄洪消能结构的类型与设计基础

1.1 高坝泄洪消能结构的类型划分

高坝泄洪消能结构的类型划分以消能机理为核心依据,可分为以动能传递扩散为主要方式的挑流消能结构、以水流紊动耗能为核心的底流消能结构,以及依托水流表层扩散消能的面流消能结构。此外,基于单一消能方式的不足,形成了融合多种消能机理的联合消能结构。不同类型的划分本质上是对泄洪水流能量转化路径的差异化设计,其核心差异体现在能量消散的空间分布与传递过程上,构成了高坝泄洪消能系统设计的基础分类框架。

1.2 泄洪消能设计的核心参数与约束条件

泄洪消能设计的核心参数涵盖泄洪流量、作用水头、消能段长度与断面尺寸等关键指标,这些参数直接决定消能结构的水力响应特性与工作效能。设计过程要严格遵循相关规范要求,重点关注参数间的匹配性与合理性,确保结构在设计洪水工况下的稳定运行。规范约束不仅对参数取值范围进行界定,更对设计计算方法、安全储备系数等提出明确要求,形成了泄洪消能设计的刚性准则,为设计方案的可行性与安全性提供保障^[1]。

2 高坝泄洪消能水力特性分析

2.1 高坝泄洪水流的基本水力特性分析

高坝泄洪水流的基本水力特性是消能结构设计与优化的核心依据,其特性演变与泄洪系统参数、水流运动状态密切相关,主要体现在以下三个核心维度:(1)泄洪流量与水头的关系特性。泄洪流量与作用水头的匹配关系直接决定泄洪系统的工作效能,二者遵循特定的水力函数关系。在堰流或孔流状态下,流量随水头的升高呈非线性增长趋势,增长速率受泄洪建筑物的断面形态、边界条件影响。当水头达到临界值时,水流状态可能发生转型,导致流量增长规律出现阶段性变化。这种关系特性是确定泄洪能力、划分泄洪工况的关键基础,其精准量化需基于水动力学基本方程,结合泄洪结构的几何参数进行推导与修正。(2)泄流过程中的流速分布特性。泄洪水流的流速分布具有显著的空间差异性与沿程变化规律。在泄洪建筑物进口段,流速受收缩效应影响逐渐增大,分布趋于均匀;在中部泄流段,流速达到峰值,且沿断面高度呈现特定梯度分布,近壁区受边界摩擦作用流速偏低,核心区流速较高;在出口泄放段,流速分布受扩散效应或挑射作用影响发生重构。(3)泄洪水流的压力分布规律。泄洪水流的压力分布是评估泄洪结构安全性的重要指标,其分布状态随水流运动形态动态变化。在缓流区域,压力分布近似遵循静水压规律;在急流区域,动水压力占比显著提升,压力值随流速的增大而降低。

2.2 不同泄洪消能结构的水力特性对比分析

不同泄洪消能结构基于差异化的消能机理,形成了各具特色的水力特性,其核心差异体现在以下方面:(1)挑流消能结构的水力特性。挑流消能结构通过将水流挑射至空中,借助空气阻力与重力作用消散能量,其核心水力特性表现为强紊动、大流速的射流运动。射流的挑距、扩散角及入水速度是关键水力参数,挑距随出口流速与挑角的增大而增加,扩散角则受水流紊动强度

与出口断面形态影响。射流过程中水流与空气的强烈掺混的水流与空气的强烈掺混,使得能量消散效率较高,但射流对下游河床的冲击作用显著,冲击区域的流速梯度与压力脉动较大。(2)底流消能结构的水力特性。底流消能结构通过在消力池内形成淹没水跃实现能量消散,其水力特性以缓流为主,水流紊动剧烈且能量消散集中。消力池内的水流状态可分为收缩段、水跃段与扩散段,各段的流速与压力分布差异显著。水跃段是能量消散的核心区域,流速急剧减小,压力快速回升,紊动耗散作用最强。底流消能的水力特性受消力池尺寸、尾水深度等参数的调控,尾水深度不足易导致水跃不稳定,影响消能效果。(3)面流消能及联合消能结构的水力特性。面流消能结构通过引导水流沿水面扩散滑行实现能量消散,其水力特性表现为表层水流的强紊动扩散与底层水流的缓流运动,水流整体稳定性较好,对下游河床的冲击较小。联合消能结构则融合了两种及以上消能机理,其水力特性具有复合性,通过各消能单元的协同作用,实现能量的分级消散。

2.3 基于数值模拟的泄洪消能水力特性精细化分析

数值模拟技术能够精准捕捉水流运动的细微特征与能量传递的微观过程,具体分析路径与核心内容如下:

(1)数值模拟模型的构建与验证。基于计算流体力学理论,结合泄洪消能结构的几何特征,构建三维水流数学模型。模型采用合适的紊流数学模型描述水流紊动特性,通过结构化或非结构化网格划分对计算区域进行离散,网格精度需满足水力特性细节捕捉的要求。边界条件设置需贴合实际工程工况,包括进口流量边界、出口水位边界及固壁无滑移边界等。模型建立后,需通过与物理模型试验数据的对比,对流速、压力等关键水力参数进行验证,确保模型的可靠性与精度。(2)水力特性的精细化捕捉与分析。借助验证后的数值模拟模型,可实现对泄洪消能过程水力特性的全流程、精细化捕捉。在时间维度上,能够动态追踪水流运动的瞬时变化,分析流速、压力等参数的时程演变规律,揭示水流脉动的特性与频率分布;在空间维度上,可精准获取不同断面、不同位置的水力参数分布云图,明确能量消散的核心区域与传递路径。通过精细化分析,能够识别出传统试验难以捕捉的局部水力现象,如微小负压区、局部紊动漩涡等,为结构优化提供精准的数据支撑。(3)影响因素的敏感性分析。基于数值模拟模型,可系统开展泄洪消能水力特性影响因素的敏感性分析。选取泄洪流量、水头、结构几何参数等关键影响因子,采用控制变量法,逐一分析各因子变化对消能效率、流速分布、压

力分布等核心水力特性的影响程度^[2]。

3 高坝泄洪消能结构的优化设计原则与目标

3.1 优化设计的核心原则

高坝泄洪消能结构优化设计要遵循以下原则:(1)水力适配性原则,确保设计方案与泄洪水流特性精准匹配,保障消能过程稳定可控;(2)安全优先原则,兼顾结构自身抗冲刷、抗空化能力及下游岸坡与河床防护安全;(3)协同优化原则,统筹水力性能、结构受力、工程造价与环境影响的平衡。

3.2 优化设计核心目标

优化设计核心目标包括:(1)提升消能效率,最大限度削减泄洪水流能量,降低水流对下游的冲击强度;(2)保障结构安全,避免出现空化空蚀、冲刷破坏等问题,延长结构使用寿命;(3)实现经济合理,在满足功能要求前提下优化结构尺寸与施工方案,控制工程投资;(4)减轻环境影响,减少泄洪噪声、水雾及水流扰动对周边生态的不利作用^[3]。

4 高坝泄洪消能结构的优化设计方法与方案

4.1 基于水力特性的参数优化设计

基于水力特性的参数优化设计是通过精准调控结构关键参数实现水力特性的优化匹配,其核心方法与实施路径如下:(1)参数优化指标体系构建。结合泄洪消能水力特性核心需求,构建涵盖消能效率、流速分布均匀性、压力稳定性及抗空化性能的多维度优化指标体系。采用层次分析法明确各指标权重,量化不同指标对消能结构整体性能的影响程度,为参数优化提供量化评价依据,确保优化方向与设计目标精准契合。(2)关键参数筛选与敏感性分析。通过数值模拟与理论推导相结合的方式,筛选出对水力特性影响显著的关键结构参数,包括泄洪孔口尺寸、挑角角度、消力池深度与长度、消能工布置间距等。基于控制变量法开展参数敏感性分析,明确各参数变化对优化指标的影响规律,确定参数的合理调控范围,为优化计算划定边界条件。(3)多目标优化算法应用与求解。采用多目标优化算法,建立以关键结构参数为设计变量、多维度优化指标为目标函数的优化模型。通过算法迭代求解,获得满足消能效率提升、结构安全保障等多重目标的最优参数组合。

4.2 新型泄洪消能结构形式的创新设计

新型泄洪消能结构形式的创新设计以强化能量消散效率、提升结构适配性为核心导向,依托水力特性研究成果探索结构形态的创新突破,其核心设计思路与技术路径如下:(1)消能机理的协同创新。基于单一消能机理的局限性,探索多消能机理协同作用的结构创新

方向。通过融合挑流、底流、紊动消能等不同机理的优势,设计具有分级消能功能的复合式消能结构,实现能量的分段梯度消散,提升整体消能效率。创新过程中需通过数值模拟验证不同消能机理的协同效应,明确结构各单元的功能定位与协同工作机制。(2)结构形态的精细化创新。结合水流运动轨迹与紊动耗能规律,开展结构形态的精细化创新设计。通过优化结构曲面形态、增设扰流构件、调整流道断面渐变形式等方式,引导水流形成稳定的紊动漩涡或射流扩散形态,强化水流内部能量传递与耗散过程。结构形态设计需充分考虑水流边界层特性,减少水流与结构间的不良相互作用,降低空化空蚀风险。(3)材料与结构的协同优化。结合新型工程材料特性开展结构创新设计,利用高强度、抗冲刷、抗空蚀材料的性能优势,优化结构截面形式与受力体系。通过材料性能与结构形态的协同优化,在提升结构水力性能的同时,增强结构的耐久性与承载能力,拓展消能结构在高水头、大流量工况下的应用范围。

4.3 复杂工况下的消能结构优化方案

复杂工况下的消能结构优化方案要针对极端洪水、变水头运行、下游水位波动等复杂工况的水力特性差异,构建适应性强、稳定性高的优化设计体系,具体优化策略如下:(1)工况识别与水力特性差异化分析。系统梳理高坝泄洪可能面临的复杂工况类型,通过数值模拟与物理模型试验相结合的方式,分析不同复杂工况下的水流运动特性,明确各工况下消能结构面临的核心问题,如极端流量下的消能不充分、变水头工况下的水流不稳定、下游水位波动导致的消能效果波动等,为针对性优化提供基础数据。(2)自适应调节型消能结构设计。针对变工况运行需求,设计具有自适应调节功能的消能结构。通过设置可调节式挑角装置、活动式消能构件、分级泄洪通道等方式,使消能结构能够根据实际工

况变化自动调整工作状态,实现不同工况下的水力特性优化匹配。需通过动态模拟验证自适应调节机制的可靠性与响应速度,确保结构在工况转换过程中保持稳定运行。(3)多工况兼容的优化方案整合。基于不同复杂工况的水力特性分析结果,开展多工况兼容的优化方案整合设计。采用加权平均法综合考虑各工况的发生概率与影响程度,优化结构参数与形态,使设计方案在各类复杂工况下均能满足基本消能要求与安全标准。制定工况应急调控预案,明确不同工况下的运行控制参数,提升消能结构应对复杂工况的综合能力^[4]。

结束语:本文系统完成了高坝泄洪消能结构水力特性与优化设计的系列研究,明确了不同类型结构的水力响应规律,构建了多维度优化设计体系,提出的优化方案可有效提升消能性能与结构安全性。研究分析了水力特性与结构参数的关联机制,为工程设计提供了关键技术依据。后续可进一步结合实际工程案例开展验证研究,深化复杂极端工况下的优化设计理论,推动高坝泄洪消能技术的持续创新与发展。

参考文献

- [1]陈永灿,王皓冉,李永龙,等.高坝枢纽泄洪消能建筑物智能巡检与安全评价理论方法和技术研究展望[J].工程科学与技术,2023,55(3):1-13.
- [2]陈柏雨,钟振宇,聂文豪,蒋勤,郝婕.泄洪消力池消力墩消能特性数值模拟研究[J].水电能源科学,2024,42(5):144-148.
- [3]吴新友.水闸泄洪能力与水力结构优化设计[J].中国水运,2025(10):82-84.
- [4]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.