

山区高坝泄洪建筑物的水力特性分析与优化设计研究

张晓浩

新疆兵团勘测设计院集团股份有限公司

DOI:10.12238/hwr.v9i7.6503

[摘要] 随着我国水利水电工程建设向西部山区推进,使得高坝大库逐渐增多,同时泄洪建筑物在复杂地形与高水头下的安全运行问题日益凸显。泄洪建筑物作为高坝工程防洪安全的关键,其水力特性会直接影响到工程运行效率与结构安全,故开展相关研究意义重大。基于此,本文先梳理了泄洪建筑物类型、结构特征,分析其在山区地形下的布置与功能需求;接着基于水力学理论建立水力参数计算模型,探讨关键水力问题;再用CFD方法构建三维数值模型,模拟水流运动并与物理模型试验结果对比验证;还通过物理模型试验分析典型泄洪结构在不同洪水工况下的相关情况,揭示水力响应规律。研究显示,合理优化泄洪口与消能工结构可提升泄洪效率与安全性,提出的优化设计方法实用性强,为山区高坝泄洪建筑物设计与运行提供支持。

[关键词] 山区高坝; 泄洪建筑物; 水力特性

中图分类号: TV642.1 **文献标识码:** A

Research on Hydraulic Characteristics Analysis and Optimization Design of High Dam Flood Discharge Structures in Mountainous Areas

Xiaohao Zhang

XPCC Surveying & Designing Institute Group Co., Ltd.

[Abstract] With the advancement of water conservancy and hydropower engineering construction in western mountainous areas of China, the number of high dams and large reservoirs has increased, and the safety operation of flood discharge structures under complex terrain and high water head has become prominent. As the key to flood control safety in high dam engineering, its hydraulic characteristics affect the operational efficiency and structural safety of the project, so conducting relevant research is of great significance. This article first sorts out the types and structural characteristics of flood discharge structures, and analyzes their layout and functional requirements in mountainous terrain; Then, based on hydraulic theory, a hydraulic parameter calculation model is established to explore key hydraulic issues; Construct a three-dimensional numerical model using CFD method, simulate water flow motion, and compare and verify the results with physical model experiments; Furthermore, physical model experiments were conducted to analyze the relevant situations of typical flood discharge structures under different flood conditions, revealing the hydraulic response laws. Research has shown that rational optimization of flood discharge outlets and energy dissipation structures can improve flood discharge efficiency and safety. The proposed optimization design method has strong practicality and provides support for the design and operation of high dam flood discharge structures in mountainous areas.

[Key words] high dams in mountainous areas; Flood discharge structures; hydraulic characteristics

引言

随着我国水利水电工程建设重心逐渐向西部山区转移,新疆地区的高坝大库工程在国家能源与水资源调控体系中扮演着越来越重要的角色。新疆地处内陆,地形复杂多变,包括天山、昆仑山等高大山脉以及塔里木盆地、准噶尔盆地等大型沉积盆地,地质构造复杂,地基承载力差异显著。同时,该地区常面临高

水头、大流量泄洪的挑战,对泄洪建筑物的安全性、稳定性与运行效率提出了更高要求。泄洪建筑物作为高坝工程中用于宣泄洪水、保障大坝安全的核心结构,其水力特性直接影响工程的运行效能与结构安全。因此,深入研究新疆山区高坝泄洪建筑物的水力特性,并在此基础上开展优化设计,具有重要的理论价值和现实意义。

1 山区高坝泄洪建筑物类型与结构特征

1.1 山区高坝工程概况

山区高坝工程通常建于地形陡峭、河谷狭窄的自然环境中,具有坝体高、库容大、泄洪强度高特点。新疆地区的高坝工程多服务于防洪、发电、灌溉和供水等综合目标,由于山地地质构造复杂,地基承载力差异较大,设计和施工过程中需综合考虑地形、地质、水文等多重因素。新疆工程具有“三高一深”的特点,即高海拔、高寒、高地震烈度和深切河谷,高坝工程常采用当地材料坝的结构形式,如面板堆石坝、沥青心墙坝、黏土心墙坝等,以适应山区特殊的地理和地质条件。泄洪设施作为高坝工程的重要组成部分,其设计与布置直接影响整体工程的安全性和运行效率。由于山区河流洪水来势猛、历时短,泄洪建筑物需具备快速、高效排水的能力,以确保水库在极端水情下安全运行。

1.2 泄洪建筑物主要类型

在新疆山区高坝工程中,泄洪建筑物常用的形式有泄洪深孔、泄洪隧洞及表孔泄洪等类型。泄洪深孔设置在库盘下部,用于排放水库底层含沙水流,同时在汛期协助泄洪。泄洪隧洞多用于地形限制无法在坝体上直接泄洪的情况,具有线路灵活、泄洪能力大的优势。消能工是泄洪末端的重要设施,常见形式包括挑流式、底流式和面流式,其作用是将高速水流的能量有效耗散,防止对下游河床造成冲刷破坏。不同类型的泄洪建筑物可根据工程实际需求组合使用,形成完整的泄洪体系。

1.3 新疆山区条件下泄洪结构布置特点

在新疆山区地形条件下,泄洪结构的布置受到地形、地质及水流条件的多重影响。由于河谷狭窄且地形起伏大,泄洪设施往往难以集中布置,需根据地形走势合理分布泄洪口位置。部分工程采用多泄洪口联合泄洪的方式,以提高整体泄洪能力并减小对单一结构的冲击。同时,泄洪建筑物常与发电、灌溉等设施协调布局,避免相互干扰。在复杂地质条件下,泄洪隧洞或泄洪槽常需避开软弱岩层或断层带,以确保结构稳定。此外,新疆山区河流落差大,水流速度高,泄洪末端的消能设计尤为重要,需结合地形高差和水流特征,合理选择消能形式,防止下游冲刷造成安全隐患。

1.4 泄洪建筑物结构参数与功能分析

泄洪建筑物的结构参数直接决定其功能表现和运行效率。例如,溢流堰的高度和长度影响泄流能力,泄洪深孔的位置和直径决定水流排放路径与速度,泄洪隧洞的坡度与断面尺寸则影响水流的顺畅程度。在功能上,泄洪建筑物不仅要满足设计洪水标准下的泄流要求,还需兼顾水流能量的合理分配与消散。合理的结构参数设计可有效减少水流冲击、降低局部冲刷风险,提高建筑物的运行安全性。同时,考虑到新疆山区工程的特殊性,泄洪结构还需具备一定的适应性,能够在不同水位和流量条件下保持稳定运行。因此,在设计阶段需结合水力模型试验与数值模拟,对关键参数进行反复验证与优化,以确保泄洪建筑物在复杂工况下安全、高效地运行。

2 泄洪建筑物水力特性理论分析

2.1 基本水力理论

泄洪建筑物在运行过程中涉及多种水力现象,包括水流的运动、能量转换、压力分布以及水流与结构之间的相互作用。水流在泄洪过程中遵循基本的水力学原理,如质量守恒、能量守恒和动量守恒定律。质量守恒确保水流在不同断面之间的连续性,能量守恒描述水流从高位向低位流动时势能与动能的转化关系,而动量守恒则用于分析水流对结构的冲击力。在实际工程中,这些理论为泄洪能力的估算、水流流态的判断以及结构受力分析提供了基础依据。特别是在新疆山区高坝泄洪过程中,水流速度高、能量集中,准确把握水流运动规律对于结构安全和运行效率至关重要。

2.2 水力参数计算模型

为了准确评估泄洪建筑物的水力性能,需要建立合理的水力参数计算模型。常见的计算方法包括一维、二维和三维水流模型。一维模型适用于水流方向明确、断面变化不大的情况,常用于泄洪能力的初步估算。二维模型可以考虑水流在平面内的扩散与回流现象,适用于复杂地形条件下的水流分布分析。三维模型则能更真实地反映水流的立体运动,尤其适合高流速、大落差条件下的精细模拟。此外,湍流模型如 $k-\epsilon$ 模型、 $k-\omega$ 模型等被广泛用于模拟水流内部的复杂运动。通过这些模型,可以预测泄洪过程中的流速分布、压力变化以及水流对结构的冲击力,为工程设计提供理论支持。

2.3 消能与冲刷机理分析

泄洪过程中,水流携带的大量能量如果不及时耗散,会对下游河床和结构造成严重破坏。消能工的作用是将高速水流的能量有效吸收或分散,防止形成局部冲刷坑。常见的消能方式包括挑流式、底流式和面流式。挑流式消能通过设置挑坎将水流抛向空中,使其在空中扩散并落入下游水垫中,达到消能目的;底流式则利用消力池中的水跃现象消耗水流动能;面流式主要用于低水头工况。冲刷是泄洪过程中另一个重要问题,主要由高速水流对河床的持续冲击引起。影响冲刷深度的因素包括水流速度、河床材料、水流持续时间等。通过建立冲刷预测模型,可以评估泄洪对下游环境的影响,并指导消能工的合理设计。在新疆山区,由于河床地质条件复杂,冲刷预测需特别考虑河床材料的抗冲刷性能。

2.4 新疆山区特殊地形下的水力响应

新疆山区地形复杂多变,泄洪建筑物常面临坡度大、河谷狭窄、水流路径受限等挑战。在这些条件下,水流的运动特性与平原地区存在明显差异。例如,坡度较大导致水流速度加快,容易引发空化、空蚀等破坏现象;河谷狭窄限制了水流的横向扩散,使能量更加集中,增加了对结构的冲击力;局部地形变化还可能引发回流、漩涡等复杂流态,影响泄洪效率。此外,新疆山区泄洪过程中,水流在泄洪口下游的扩散和冲击方向受地形影响较大,可能导致局部冲刷加剧。因此,在设计泄洪建筑物时,需充分考虑地形因素对水力响应的影响。

3 洪建筑物水力特性的数值模拟分析

3.1 数值模拟方法概述

随着计算机技术的发展,数值模拟已成为研究泄洪建筑物水力特性的重要手段。相比传统物理模型试验,数值模拟具有成本低、周期短、可重复性强等优势,能够对复杂水流现象进行高精度的预测与分析。计算流体力学(CFD)作为主流的数值模拟方法,广泛应用于水利工程中的流场模拟。该方法通过求解描述流体运动的控制方程,如连续性方程和动量方程,来再现水流在泄洪过程中的速度、压力和自由水面变化。常用的湍流模型包括标准 $k-\epsilon$ 模型、 $RNG\ k-\epsilon$ 模型和 $SST\ k-\omega$ 模型,它们能够较好地模拟水流中的涡旋结构和能量耗散过程。自由水面的追踪通常采用VOF (Volume of Fluid)方法,能够准确捕捉水流在泄槽、挑坎和消力池中的形态变化。通过合理选择模型参数和边界条件,数值模拟可以有效反映泄洪过程中的三维流态特征,为工程设计提供可靠的数据支持。

3.2 计算模型建立

开展数值模拟前需构建准确的几何模型并划分高质量的计算网格。几何模型依据实际工程图纸或地形数据建立,涵盖泄洪口、泄槽、挑流鼻坎、消力池及下游河床等关键部位。建模过程中需保留主要结构特征,同时简化对水流影响较小的细节,以提高计算效率。网格划分是影响模拟精度的关键步骤,通常在水流变化剧烈的区域,如泄洪口附近、挑流区和水跃发生区,采用加密网格以提高分辨率。边界条件的设定需符合新疆山区实际运行工况,进口边界一般设定为流量或水位控制,出口设为自由出流,底部和侧壁采用无滑移壁面条件。初始条件通常设为静水状态,模拟开始后逐步达到稳定流态。时间步长的选择需满足CFL稳定性条件,确保计算过程的收敛性与稳定性。模型建立完成后,还需通过典型工况的试算进行调试,确保模拟过程平稳、结果合理。

4 泄洪建筑物优化设计方法研究

4.1 优化设计目标与约束条件

泄洪建筑物的优化设计旨在提升其在复杂运行条件下的水力性能,确保在满足泄洪能力的前提下,兼顾结构安全、运行效率和经济合理性。设计目标主要包括提高泄流能力、增强消能效果、减小水流冲击力以及降低对下游河床的冲刷影响。同时,优化还需考虑地形适应性,使泄洪结构在山区复杂环境下能够稳定运行。为实现这些目标,必须明确设计过程中需遵循的约束条件。这些约束包括工程结构的几何限制、建筑材料的强度要求、施工可行性、运行维护成本以及环境保护要求等。例如,在山区布置泄洪口时,受到地形高差和地质条件的制约,泄洪结构的形状和尺寸不能随意调整;在优化消能工形式时,必须保证

其在不同洪水工况下均能有效耗散能量,防止因水流集中导致下游河床破坏。

4.2 优化设计方法

在明确优化目标与约束条件的基础上,采用科学合理的优化方法是提升泄洪建筑物性能的关键。传统的设计方法多依赖经验公式和局部调整,难以实现全局最优。近年来,随着计算机技术的发展,基于智能算法的优化方法逐渐应用于水利工程领域。其中,遗传算法和粒子群优化算法因其良好的全局搜索能力和收敛性,被广泛用于多目标优化问题。优化过程中,首先建立参数化模型,将泄洪结构的关键几何参数(如泄洪口高度、挑坎角度、消力池深度等)作为变量,通过数值模拟获取不同参数组合下的水力性能指标。随后,将泄流能力、消能效率、冲刷影响等作为目标函数,构建多目标优化模型。在算法迭代过程中,不断筛选出性能较优的解集,最终得到一系列可行的优化方案。此外,结合响应面法或代理模型技术,可进一步提高优化效率,减少计算资源消耗。

5 结论

本研究围绕新疆山区高坝泄洪建筑物的水力特性与优化设计展开,系统分析了其结构类型、水力响应规律及优化路径。通过理论分析、数值模拟与物理试验相结合的方法,揭示了高水头、大流量条件下泄洪过程中的流态特征、能量分布与冲刷机制,明确了新疆山区复杂地形对水流运动的影响。研究结果表明,合理布置泄洪口、优化消能工结构可显著提升泄洪效率,有效降低下游冲刷风险。在此基础上,构建了以泄流能力、消能效果和结构安全为核心的多目标优化模型,采用智能算法实现了泄洪结构参数的协同优化。实例应用表明,优化方案在保障安全的前提下,提升了整体水力性能,具有良好的工程适用性。研究成果为新疆山区高坝泄洪建筑物的设计提供了理论支持和技术参考,对提高大型水利水电工程的安全性及经济性具有重要意义。

[参考文献]

- [1]黄涛,胡晗,钱军,等.泄洪调度对高坝底流消能泄洪噪声的影响分析[J/OL].水利水电快报,1-8[2025-07-27].
- [2]张浩浩.高坝泄洪诱发水垫塘邻近边坡振动损伤研究[D].武汉大学,2023.
- [3]许志雯,赵兰浩,杜帅群,等.高坝泄洪诱发场地振动响应分析及传播规律[J].水利水电科技进展,2021,41(2):36-41+74.
- [4]张建民.高坝泄洪消能技术研究进展和展望[J].水力发电学报,2021,40(03):1-18.

作者简介:

张晓浩(1988--),男,汉族,山西忻州人,硕士研究生,高级职称,研究方向:水利工程规划、设计与施工。