

水利枢纽泄洪布置与消能方式选择

苏文亮

中水东北勘测设计研究有限责任公司

DOI:10.32629/hwr.v10i8.7101

[摘要] 本文结合国内大中型水利工程实践经验,详细阐述泄洪布置的核心设计要点,针对性分析底流消能、挑流消能、面流消能及混合消能等主流方式的适用场景、技术优势与局限性。研究表明,泄洪布置需贴合枢纽整体布局、地形地质条件与泄洪流量特性,消能方式选择需匹配工程水头、单宽流量、下游河道条件等核心参数,通过科学组合布置形式与消能工艺,可有效提升泄洪效率、降低水流冲刷破坏风险,为同类水利枢纽泄洪消能设计提供理论参考与实践依据。

[关键词] 水利枢纽; 泄洪布置; 消能方式; 工程设计; 防洪安全

中图分类号: TV61 文献标识码: A

Layout of flood discharge and selection of energy dissipation methods for water conservancy hubs

Wenliang Su

Zhongshui Northeast Survey, Design and Research Co., Ltd

[Abstract] Based on the practical experience of large and medium-sized water conservancy projects in China, this article elaborates on the core design points of flood discharge layout, and analyzes the applicable scenarios, technical advantages, and limitations of mainstream methods such as bottom flow energy dissipation, jet flow energy dissipation, surface flow energy dissipation, and mixed energy dissipation. Research has shown that the layout of flood discharge should be in line with the overall layout of the hub, terrain and geological conditions, and the characteristics of flood discharge flow. The selection of energy dissipation methods should match core parameters such as engineering head, single width flow rate, and downstream river conditions. By scientifically combining the layout form and energy dissipation technology, the flood discharge efficiency can be effectively improved, and the risk of water flow erosion and damage can be reduced. This provides theoretical reference and practical basis for the design of flood discharge and energy dissipation in similar water conservancy hubs.

[Key words] water conservancy hub; Flood discharge arrangement; Energy dissipation method; Engineering design; Flood control safety

水利枢纽是水资源调配、防洪减灾的核心水利设施,其安全稳定运行直接关乎区域水安全。水库汛期超额洪水无法及时下泄,易造成库水位超限,诱发坝体破损甚至溃坝等重大安全事故,而泄洪消能系统正是保障枢纽运行安全的关键屏障。高速泄洪水流蕴含巨大能量,易冲刷河床、淘刷岸坡、损毁下游水工设施,衍生雾化、结构振动等病害。为适配高坝大库复杂工况,本文系统梳理泄洪消能工程现状,探究泄洪布置设计逻辑与消能选型核心要点,为同类工程设计提供参考。

1 水利枢纽泄洪消能工程发展现状

1.1 工程应用整体发展态势

历经数十年工程实践与技术攻关,我国水利枢纽泄洪消能

体系已形成适配多坝型、多工况的成熟技术框架。早期水利工程以中低坝为主,泄洪水头低、洪峰流量小,设计方案多采用筒单一溢洪道搭配基础消能结构,仅能满足基础防洪运行需求。伴随西南山区水利开发进程加快,大量高坝大库落地建设,狭窄河谷、大落差水文条件让泄洪水流能量密度大幅激增,倒逼泄洪布局形式与消能技术持续革新升级^[1]。

现阶段大中型水利枢纽彻底打破了传统单一泄洪结构的设计局限,全面推广多通道、立体化的组合泄洪布置形式。通过表孔、中孔、深孔与泄洪洞的分层分流协同工作,有效分散集中水流能量,实现洪水均衡、高效下泄。消能技术层面传统单一消能方式逐步被复合型消能工艺替代,掺气消能、水流碰撞消能等新

技术大幅提升能量消散效率。白鹤滩水电站依托不对称多层水舌碰撞消能设计,极大削弱了下游河道冲刷强度,为高能量泄洪消能工程提供了优秀范本。

1.2 现有泄洪消能设计核心优势

现代水利泄洪消能工程的核心优势,集中体现在一体化布局设计与标准化技术体系两大维度。在整体布局层面,当代枢纽设计摒弃了泄洪建筑物独立布设的传统思路,将泄洪结构与坝体、发电厂房、通航设施统筹规划,最大化利用河谷有限空间,在保障泄洪安全的基础上,有效压缩工程占地、控制建设投资。多数工程结合河床地形特征,将核心泄洪坝段布设于河床中部,规避两岸边坡薄弱地带,从空间布局上提升泄洪系统的整体稳定性。

经过长期工程打磨与技术迭代,各类主流消能工艺已形成清晰的适配体系与成熟的施工标准^[2]。不同消能方式凭借独特的技术特性,精准适配差异化工程工况,其中底流消能稳定性突出,可适配中低水头、大流量运行场景;挑流消能结构简约、性价比高,广泛应用于高水头窄河谷枢纽;复合型消能技术则专门解决复杂工况下的消能难题。同时水工模型试验、数值模拟等前沿技术的普及应用,实现了泄洪流态、冲刷深度等关键参数的精准预判,为设计优化提供了科学的数据支撑。

1.3 工程运行现存突出问题

在水利工程高速发展的背景下,泄洪消能技术虽日趋成熟,但实际工程运行中仍存在诸多亟待解决的短板问题。国内大量早期建成的中小型水利枢纽,受限于当时的设计理念、技术水平与建设条件,普遍存在泄洪孔口偏少、过流断面不足、布局形式单一等问题,面对极端暴雨引发的超标洪水,泄洪冗余能力不足,极易造成库水位壅高,威胁坝体结构安全。此外,单一消能模式能量消散不彻底,长期运行会引发消力池破损、鼻坎磨损、河床淘刷等病害,大幅缩短工程服役年限。

高坝大库工程的泄洪消能矛盾更为突出,高水头高速水流衍生的各类工程问题始终是设计与运行的重难点。高速水流极易引发空化、空蚀破坏,同时产生剧烈水体雾化与结构振动,长期往复作用会加剧泄洪建筑物的疲劳损伤,影响机电设备运行精度。部分工程因泄洪布局与下游河道形态适配性较差,水舌落点过度集中,造成局部河床严重冲刷、河道流态紊乱,既破坏下游水生态,也制约河道行洪与通航安全。窄河谷枢纽受空间限制,多通道泄洪水流相互干扰,进一步增加了消能防控的难度。

2 水利枢纽泄洪布置设计要点

2.1 主流泄洪布置基本形式

不同坝型、不同工况的水利枢纽,对应适配的泄洪布置形式存在明显差异,现阶段工程主流布置模式可分为坝身泄洪、岸边泄洪、组合式泄洪三类。混凝土坝枢纽优先采用坝身泄洪模式,依托坝体布设表孔、中孔、深孔等泄洪通道,整体结构紧凑、调度灵活,可根据洪水量级分层调控下泄流量。坝顶表孔过流能力强、流态平稳,适用于表层洪水宣泄;坝体中深孔可调控深层水

体,兼顾汛期泄洪与枯水期水位调节,适配高水头、大流量复杂工况^[3]。

针对土石坝、堆石坝等不宜在坝体开孔的枢纽工程,岸边泄洪成为核心泄洪方案,主要包含岸边溢洪道与山体泄洪洞两种结构。岸边溢洪道依托岸边天然垭口或人工开挖渠道修建,施工难度低、后期检修便捷,具备较强的洪水超载适应能力,是中小型土石坝枢纽的核心泄洪设施。泄洪洞采用封闭式山体隧洞结构,受外界环境干扰小、运行稳定性高,可适配高水头、大落差泄洪场景,多用于高坝大库的辅助泄洪与水库放空调度。

2.2 泄洪布置的核心影响因素

地形地貌是制约泄洪布置方案设计的首要条件,直接决定泄洪建筑物的选址、结构尺寸与空间排布方式。开阔河谷区域地形条件优越,可采用坝身多孔均匀布设方案,充分利用坝面空间布置泄洪通道,保障整体泄洪流态均匀稳定。狭窄高山峡谷河谷空间局促,需采用紧凑化、立体化的分层布置形式,结合山体布设泄洪洞减少河谷占用,同时通过差异化孔口高程设计,规避多股水流相互干扰。岸边地形平缓区域适宜建设敞开式溢洪道,陡峭边坡区域则优先选用封闭式泄洪洞,有效防范边坡坍塌、滑坡风险。地质条件的优劣直接决定泄洪建筑物的结构稳定性与服役寿命,是泄洪布局设计的关键控制性因素。泄洪坝段、溢洪道等核心泄洪设施的基础选址,需优先选取岩体完整、承载力高、渗透性弱的优质地质区域,避开破碎带、软弱夹层、岩溶发育等不良地质地段,杜绝基础沉降、渗漏变形等安全隐患。针对地质条件较差的施工区域,需优化结构布局、缩小基础尺寸,并配套地基加固、防渗堵漏等工程措施。同时,下游河床的抗冲性能与承载能力,也直接约束泄洪孔口落点布局,需主动规避软弱河床区域。

2.3 泄洪布置的优化设计原则

保障工程整体安全是泄洪布置优化设计的第一准则,所有布局方案均需围绕坝体、泄洪结构及下游设施安全展开。设计工作需充分预判极端洪水、地震荷载、结构老化等不利工况,预留充足的泄洪冗余储备,从根源上杜绝泄洪能力不足引发的工程险情。同时通过优化孔口排布与水流走向,规避泄洪水流直接冲击坝体、岸坡及下游配套建筑物,从空间布局层面降低冲刷、空蚀、结构振动等安全风险^[4]。在满足安全运行标准的前提下,泄洪布置设计需兼顾经济适配性,最大限度压缩工程建设与运维成本。方案设计应充分依托天然地形地质优势,减少土石方开挖、混凝土浇筑及地基加固工程量,简化结构体系。同时兼顾施工便捷性与后期运维便利性,采用标准化孔口尺寸、统一化设备选型,降低施工难度与设备检修成本,实现工程安全效益与经济效益的双向平衡。

3 水利枢纽消能方式选择研究

3.1 主流消能方式的技术特性与适用场景

作为应用历史最久、技术体系最完善的消能方式,底流消能凭借极强的工况适应性稳居中小型工程主流选型之列。该技术通过下游消力池蓄水壅水,促使高速下泄水流在池内形成稳定

水跃,依托水流紊动摩擦、水体掺气作用消耗多余动能,实现上下游水流平稳衔接。其结构稳定性优异,受水头、流量波动影响较小,泄洪流态平稳、雾化范围极小,对周边建筑物与生态环境扰动微弱,适配中低水头、大单宽流量且下游河床抗冲能力薄弱的水利工程。针对高水头、窄河谷的复杂工程工况,挑流消能凭借结构简约、空间适配性强的优势得到广泛应用。该方式借助坝体下游鼻坎结构,将高速水流抛射至空中,通过水流扩散、空中掺气、落差撞击等多重作用耗散能量,最终落入下游深水区域完成水流衔接。其无需大规模开挖消力池,施工便捷、造价低廉,水舌远距离抛射可有效避开坝脚与近岸区域,大幅降低基础冲刷风险。

3.2 消能方式选择的核心控制指标

水力参数是消能方式选型的核心判定依据,其中工程水头与单宽流量直接决定消能技术的适配效果。低水头、大单宽流量工况下,水流落差小、动能集中,挑流抛射效果差、能量消散不充分,选用底流消能可塑造稳定水跃,保障流态平稳;高水头、小单宽流量工况下,水流流速快、势能占比大,挑流或碰撞混合消能可通过空中充分掺气耗散能量,有效规避底流消能的空蚀缺陷。针对水头、流量动态波动的复杂工况,必须采用混合消能模式适配多变的水力条件,保障消能效果稳定^[5]。下游地形地质条件与河道形态,是消能方式选型不可忽视的基础约束条件。若下游河床岩体完整、抗冲强度高、河道开阔通畅,可直接选用挑流消能,依托天然河床承接水舌冲刷,无需增设大规模防护工程;若下游河床土质松软、抗冲能力弱、河道狭窄局促,必须采用底流消能,通过人工消力池缓冲高速水流,避免河床过度淘刷。

3.3 不同工况下消能方式的选型策略

常规中低水头水利枢纽工况条件温和,消能选型可优先兼顾安全性与经济性。此类工程水头普遍低于30m,单宽流量分布均匀、下游河道平缓,水流能量密度较低,底流消能可形成稳定水跃,充分消散水流能量,有效控制下游冲刷破坏。同时该模式运行稳定、检修便捷,完全适配中小型枢纽常态化泄洪的运行需求。针对多泥沙河道的同类工程,可针对性选用面流消能,依托表层水流消能特性,保护河床基底结构,减少泥沙淤积对工程运行的不利影响。高水头窄河谷枢纽工况复杂、泄洪风险高,消能选型需重点破解空间受限、能量集中的难题。这类工程水头多高于50m,河谷狭窄、单宽流量大,可利用布设空间有限,无法搭建大规模消力池,适配性极强的挑流消能成为基础选型。针对超高水头、超大流量的大型枢纽,单一挑流消能易出现冲刷集中、雾化剧烈等问题,需采用多层水舌碰撞+挑流联合消能模式,通

过空间分层散能、落点错峰布置,彻底化解高能量水流的消能难题。

3.4 消能方式优化的发展趋势

纵观水利工程技术发展趋势,消能工艺正朝着复合化、精细化、生态化的方向持续升级。传统单一消能方式的工况局限性愈发凸显,难以适配复杂高难度工程,多技术融合的复合型消能模式,将成为高坝大库工程的主流选型。依托数值模拟、水工模型试验等技术手段,消能设计可实现参数精细化调控,精准优化水舌轨迹、掺气效率与冲刷范围,针对性解决空蚀、振动、雾化等工程痛点。生态友好型消能设计是未来水利工程优化升级的核心方向之一。传统消能设计以工程安全为唯一核心,忽视泄洪对水生态环境的扰动,而新时期的消能优化设计,需兼顾工程安全与生态保护双重目标。通过优化水流流态、调控泄洪扰动强度、改善下游水体溶氧与水温条件,可有效降低泄洪过程对水生生态系统的破坏。

4 结语

泄洪布置与消能方式选型是水利枢纽工程设计的核心内容,两项技术相辅相成、互为支撑,直接决定枢纽防洪安全与长期运行稳定性。科学的泄洪布置需要紧密结合工程地形地质、水文工况与功能定位,通过合理的空间排布与通道设计,构建安全高效、统筹有序的泄洪体系。消能方式选型则需精准匹配水头、流量、下游河道等核心条件,打破单一技术局限,通过组合优化适配复杂工况。在水利工程建设标准不断升级的背景下,持续优化泄洪布局、创新复合型消能技术,兼顾安全、经济与生态效益,是保障水利枢纽长效安全运行的关键。

[参考文献]

- [1]高尚,朱万荣.某水利枢纽泄洪冲沙洞水工模型试验研究[J].云南水力发电,2026,42(5):42-47.
- [2]祁涛.水利水电工程泄洪建筑物设计的水利特性与优化策略研究[J].治淮,2025,(10):31-32+35.
- [3]赵一品.某水利枢纽工程泄洪消能优化研究[D].大连理工大学,2025.
- [4]褚丽,杨张辉,刘松华,等.多沙河流水利枢纽动床模型设计研究[J].人民黄河,2025,47(3):37-41.
- [5]罗昌辉.某水利枢纽工程泄洪冲沙洞动床冲刷试验研究[J].吉林水利,2025,(1):22-26.

作者简介:

苏文亮(1990--),男,汉族,黑龙江北安人,硕士研究生,工程师,研究方向:水力学及河流动力学。