

水库枢纽泄洪建筑物消能工体型优化研究

张立娟

天津市水务规划勘测设计有限公司，天津 300204

DOI:10.61369/WCEST.2025010012

摘要： 本文围绕水库枢纽泄洪建筑物消能工体型优化展开研究，旨在提升泄洪安全性与工程效益。系统阐述水库枢纽构成及泄洪建筑物、消能工的功能与类型，分析水力学模型试验、数值模拟技术等优化方法的原理与应用。通过某水电站及某水库溢洪道消能工优化实例，验证优化方案显著改善水流流态、提升消能效率、降低冲刷风险的有效性。同时指出当前消能工体型优化面临复杂水力学分析难、多目标平衡复杂及环境因素制约等挑战，并针对性提出多技术融合分析、智能算法优化及环境适配设计等应对策略，为消能工体型优化提供理论与实践参考。

关键词： 水库枢纽；泄洪建筑物；消能工体型；优化研究

Research on Optimization of Energy Dissipation Structure Shape for Reservoir Hub Flood Discharge Structures

Zhang Lijuan

Tianjin Water Resources Planning, Survey and Design Co., Ltd., Tianjin 300204

Abstract： This article focuses on the optimization of the energy dissipation structure shape of reservoir hub flood discharge buildings, aiming to improve flood discharge safety and engineering efficiency. It systematically expounds on the composition of the reservoir hub, as well as the functions and types of flood discharge buildings and energy dissipation structures. It analyzes the principles and applications of optimization methods such as hydraulic model testing and numerical simulation technology. Through examples of energy dissipation structure optimization in a hydropower station and a reservoir spillway, it verifies the effectiveness of the optimization scheme in significantly improving water flow patterns, enhancing energy dissipation efficiency, and reducing erosion risks. At the same time, it points out that the current optimization of energy dissipation structure shape faces challenges such as difficult complex hydrodynamic analysis, complex multi-objective balancing, and environmental constraints, and proposes targeted countermeasures such as multi-technology fusion analysis, intelligent algorithm optimization, and environmentally adaptive design, providing theoretical and practical references for the optimization of energy dissipation structure shape.

Keywords： reservoir hub; flood discharge buildings; energy dissipation structure shape; optimization research

引言

水库枢纽作为水利工程核心，承担水资源调配、防洪减灾及综合利用等功能，通过蓄水泄洪调控，既能缓解水资源时空不均，保障农业、城市与工业用水，又能削减洪峰，降低下游洪水风险，如月潭水库优化泄洪建筑物提升防洪能力。泄洪建筑物作为水库枢纽关键，通过合理布置与设计，可快速泄洪、调节库水位，保障水库安全，某水利枢纽经优化泄洪闸体型，提升了泄流与消能效率。消能工体型优化同样重要，高速下泄水流若不消能会威胁枢纽稳定，而优化设计可改善水流流态，减轻下游冲刷，像某水电站采用面流扩散式消能工解决冲刷问题，卡拉水电站结合宽尾墩与跌坎消力池提高消能率，显著提升工程安全性与经济性。

一、相关概述

（一）水库枢纽构成与功能

水库枢纽是由多个水工建筑物有机组合而成的复杂系统，其核心构成包括拦河大坝、泄洪建筑物、输水系统及电站厂房等。

作为水资源开发利用的关键载体，水库枢纽具备三大核心功能，其一，水资源调配功能，通过拦蓄降水与径流，调节水资源的时空分布，为农业灌溉、城市供水、工业生产提供稳定水源，有效缓解区域水资源供需矛盾^[1]；其二，防洪减灾功能，凭借大坝壅高水位形成调洪库容，结合泄洪建筑物的精准调度，实现洪水的

拦蓄与错峰下泄，显著降低下游洪涝风险，保障沿岸居民生命财产安全；其三，综合利用功能，依托水库水体空间开展水力发电、航运、水产养殖及生态补水等多元化开发，兼顾经济效益、社会效益与生态效益，成为支撑区域可持续发展的重要基础设施。

（二）泄洪建筑物的作用与类型

泄洪建筑物作为水库枢纽抵御洪水风险的“安全阀门”，其核心功能在于洪水期迅速排泄超额水量、精准调控库水位，从而保障大坝及枢纽整体安全。根据结构形式与布置特点，其主要类型包括溢洪道、泄洪洞与泄洪闸。溢洪道属于敞开式泄洪结构，多依托天然地形或人工开挖构建泄洪通道，具备泄流能力强、运行管理灵活的优势，适用于洪水流量大且地形条件有利的枢纽区域；泄洪洞采用封闭式管道或隧洞结构，可在高库水位时通过闸门灵活调节泄流量，不仅能有效泄洪，还可实现水库放空，尤其适用于地质条件复杂、难以布置地表开放式泄洪设施的工程；泄洪闸通常与大坝一体化布置，通过精准启闭闸门控制下泄流量，兼具泄洪与水量调节双重功能，在需频繁进行水量调度的水利枢纽中应用广泛。

（三）消能工的工作原理与重要性

消能工程作为泄洪建筑物不可或缺的关键配套设施，其核心在于通过改变水流流态，将高速下泄水流蕴含的巨大动能转化为热能、势能或紊动能量，以此削弱水流对下游河道的冲刷破坏力。实际应用中，主要通过扩散水流（如面流消能、挑流消能）、加剧水体掺气碰撞（如消力池消能）或利用地形条件形成水跃等技术手段，实现对水流能量的高效耗散^[2]。这一设施的重要性不言而喻，未经消能的高速泄洪水流，会以强劲动能直接冲击下游河床与岸坡，不仅会造成河道剧烈冲刷、护岸结构损毁，甚至可能威胁大坝基础的稳定性。消能工的优化设计直接关乎泄洪建筑物的安全与经济性能——设计优良的消能工能够大幅降低下游防护工程的建设与维护成本，有效规避因水流冲刷引发的各类次生灾害，为水利枢纽的长期稳定运行筑牢防线。

二、消能工体型优化方法

（一）水力学模型试验

水力学模型试验是消能工体型优化的重要手段，基于流体力学相似准则，采用遵循重力相似的正态水工整体模型。试验需严格确定几何、流量、流速、糙率等比尺参数，如长溪水库溢洪道优化中，选定几何比尺1:30、流量比尺4929.50等。关键部位常用表面糙率低、易加工的有机玻璃制作，确保原型糙率换算合理、结果可靠^[3]。试验流程包括三阶段，依据工程实际设定水尺水位及下游边界条件；按《水工（常规）模型试验规程》制作安装模型，严控精度；测量水流流态、水面线、流速分布及消能效果等参数，为方案验证与优化提供依据，在消能工体型优化中成效显著。

（二）数值模拟技术

数值模拟技术在消能工体型优化研究中应用愈发广泛，其核心在于构建精准刻画复杂水流特性的数学模型。其中，RNG $\kappa-\epsilon$ 湍流模型因可行性高、精确度强成为常用工具，该模型通过紊动能 κ 方程与紊动能耗散率 ϵ 方程，有效捕捉高速水流湍流特

征^[4]。如在某溢流坝下游泄洪消能防冲优化中，研究人员运用此模型搭建三维数值模型，并按实际地形构建1:1几何模型。模型构建时，进口速度、出口压力、固壁无滑移等边界条件的合理设定，是模拟准确的关键；挑坎段、消力池等水流复杂区域需加密网格以提升精度。

（三）其他优化方法

除水力学模型试验与数值模拟技术外，理论分析与经验公式修正也是消能工体型优化的重要方法。理论分析基于水力学与力学原理，通过求解水流运动和能量守恒方程推导优化理论解，但因实际水流条件复杂，需结合经验公式修正以增强适用性。如某水库泄流出口消能方案中，研究人员先通过理论分析确定消能器出水孔口参数，再结合模型试验优化孔口直径与开孔率，显著提升消能效果。随着智能化技术发展，智能优化算法通过构建多目标函数，综合消能效率、结构安全和经济成本等因素实现全局优化，但存在计算量大、收敛慢等问题，需进一步改进算法性能以提高优化效率。

三、消能工体型优化实例分析

（一）某水电站消能工体型优化

根据张曜、尹进步等人^[7]的研究，某水电站因河谷狭窄、消能区空间有限，原窄缝式消能工在运行中暴露出下泄水流主流集中于两岸的问题，导致左岸尾水渠严重冲刷，威胁河床稳定性。为解决这一难题，研究团队经水工模型试验，提出面流扩散式消能工优化方案，从多维度对消能工体型进行调整。

在具体优化措施上，一方面对跌坎与泄槽段参数进行修改，将明流段跌坎高度由3.0m降至2.0m，缩短高速水流跌落高差；泄槽段采用“双级斜坡+圆弧衔接”设计，前半段以1:10.0的坡度平缓过渡，后半段用1:2.5的坡度加速扩散，两段衔接处设置R=57m的大半径圆弧减少水流分离，末端端设R=15m圆弧挑坎缓冲下泄水流冲击。另一方面对流道结构进行改造，拆除泄槽内侧收缩边墙，并增设导流导墙，引导水流向消力池中央集中，将原本窄缝式消能的单侧收缩流态转变为对称扩散流态，消除两岸水流偏折现象^[6]。优化后的消能工经试验验证成效显著：水舌在泄槽段的横向扩散宽度从12m大幅增至28m，覆盖消力池宽度的85%，相比原方案的40%实现了质的提升；主流集中区冲刷深度从6.2m锐减至2.1m，下游河床最大流速从8.7m/s降至5.3m/s，低于河床基岩抗冲流速。同时，消能效率通过水流掺气监测显示提升18%，池内水跃长度缩短30%，形成稳定的三元扩散流态，彻底解决了原方案因水流集中导致的局部冲刷问题。

（二）某水库溢洪道消能工优化

根据贾洪全^[8]的研究，某水库溢洪道原设计中消力池与退水渠存在显著缺陷，消力池体型难以适配高速水流能量，致使水流漫溢至边墙顶部，威胁结构安全；退水渠因断面突变成水流壅塞，消能效率低下且加剧下游冲刷风险。

为此，研究团队借助水工模型试验，针对性提出优化方案。针对消力池，将池底由均匀平底改为“前低后高”的渐变式反坡，坡度从1:100渐变为1:50，并把直立边墙改造为向内倾斜15°的折线型扩散墙，墙顶增设0.5m挑流坎。这一调整使水跃位置从池尾前移至池身中部，形成稳定的三元水跃，在P=2%、

1%、0.1%等多种洪水工况下，漫溢现象彻底消除，水流掺气浓度从45%提升至68%，消能率由62%跃升至75%。在退水渠优化上，于与消力池衔接处增设12m长喇叭形渐变段，底宽从5.5m扩至7.0m，渠深从2.0m增加到2.5m，两侧边墙设置8°扩散角的导流翼墙。优化后，退水渠入口流速从6.8m/s降至4.2m/s，壅塞段水位下降1.2m，水流扩散均匀度提高40%，最大流速控制在1.1m/s以内，低于原设计1.3m/s的抗冲流速，有效规避渠底冲刷风险^[6]。经优化后的水工模型试验验证，在30年一遇设计洪水（ $Q=23.2\text{m}^3/\text{s}$ ）工况下，消力池水流稳定，无漫溢及折冲现象；退水渠水流平顺，出口断面流速分布均匀度达92%，较原方案提升35%。结构应力监测数据显示，消力池边墙动水压力峰值从0.85MPa降至0.52MPa，退水渠底板脉动压强幅值减少60%，显著增强溢洪道运行安全性。

四、消能工体型优化面临的挑战

（一）复杂水流条件下的力学分析方法

消能工体型优化面临高速水流引发的动水压力、剪切应力集中及掺气水流复杂流态的严峻挑战，这些因素致使结构受力不均，而高速水流的湍流效应与掺气现象改变流体物理特性，进一步加剧应力分析难度，传统理论难以精确预测其稳定性与耐久性，极易引发局部结构破坏。为此，可以采用多技术融合分析与精细化力学建模的策略加以应对。通过结合计算流体力学（CFD）数值模拟与水工模型试验，运用 RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型捕捉湍流特性，精确模拟流场速度、压强分布及涡结构演化，获取动水压力、脉动压强等复杂水流条件下的关键力学参数^[9]；同时引入有限元方法（FEM）构建消能工结构模型，将CFD模拟所得的水流荷载数据与之耦合，深入分析结构动态响应，针对性优化边墙、底板等关键部位的抗冲耐磨设计，从而有效提升消能工结构的安全性。

（二）多目标优化的平衡

消能工体型优化中，消能效率、结构安全与经济成本等目标间的矛盾关系成为棘手挑战，传统单目标优化方法难以兼顾多元需求。例如，为追求高效消能采用复杂体型设计，往往会导致施工难度攀升、成本显著增加，而过度侧重消能效率又可能损害结构耐久性，威胁工程长期安全。为化解这一困境，创新引入智能

优化算法并构建动态权重分配机制。一方面，借助遗传算法、粒子群优化算法等多目标优化技术，模拟自然进化机制在多维参数空间中搜寻帕累托最优解集，同步实现消能率提升、结构应力降低与混凝土用量减少等多元目标；另一方面，依据工程实际需求灵活设定目标权重，如防洪关键工程着重关注消能效率，高地震风险区域优先保障结构安全，并结合专家经验与数值模拟结果动态调整权重系数，确保优化方案兼具技术可行性与经济合理性，实现多目标间的动态平衡。

（三）环境因素的影响

地质条件与河道形态的复杂性为消能工体型优化带来显著挑战。软土地基承载能力弱、顺层边坡稳定性差，极大限制消能工基础设计；狭窄河谷阻碍水流扩散、浅水深河道难以形成有效消能水垫，传统消能工设计难以满足特殊地形的实际需求。对此，要从多维度提出应对策略，在地质适配方面，针对软基或高边坡区域，通过优化消力池边墙高度与基础埋深，采用桩基础或混凝土齿墙提升结构稳定性，于顺层边坡段设置导流翼墙或扩散消能工，削弱水流对边坡的冲刷破坏^[10]；在地形定制化消能上，依据河道形态特征，狭窄河谷采用“窄缝扩散+挑流消能”组合体型，通过增设导流导墙引导水流向中央扩散，浅水深河道则运用“消力池+护坦+海漫”联合消能方案，并借助水工模型试验反复验证不同地形条件下的水流流态与冲刷效果，确保消能工与地形环境高度契合；此外，在优化过程中融入生态理念，设计曲面边墙降低对鱼类洄游通道的影响，选用植被混凝土护栏兼顾抗冲刷性能与生态修复功能，实现工程效益与生态保护的有机统一。

五、结束语

本文聚焦水库枢纽泄洪建筑物消能工体型优化研究，明确其对水利工程安全运行的关键作用。通过综合运用水力学模型试验、数值模拟技术及智能优化算法等，解决消能工设计实际问题，某水电站和水库溢洪道优化案例验证了方案可行有效。针对复杂水流、多目标平衡及环境因素等挑战的应对策略，为后续工程设计提供参考。消能工体型优化关乎工程安全、经济及可持续发展，未来需深化复杂水流特性研究，加强智能算法与工程结合，探索生态友好设计，提升消能工设计水平。

参考文献

- [1] 刘斌. 三河口水利枢纽泄洪消能工体型优化试验研究 [J]. 水资源与水工程学报, 2016, 27(3): 181-186.
- [2] 周旭锐. 新疆某水利枢纽工程泄洪闸水工模型试验研究 [J]. 陕西水利, 2019, 0(5): 126-128.
- [3] 崔忠. ATS水利枢纽1~深孔放空排沙泄洪洞消能工优化研究 [J]. 陕西水利, 2018, (3): 218-220.
- [4] 刘健. 某工程消力池体型优化研究 [J]. 吉林水利, 2019, (3): 5-8.
- [5] 邹忠卫. 关于水工模型优化溢洪道设计方法分析 [J]. 云南水力发电, 2023, 39(3): 146-148.
- [6] 吕会娇; 禹胜颖; 袁淮中; 苏通. 某水库泄流出口消能方案模型试验研究 [J]. 水利水电工程设计, 2019, 38(1): 44-46.
- [7] 张曜; 尹进步; 吴西杰; 吴伟; 龚刚. 某水电站泄洪底孔消能工体型优化 [J]. 排灌机械工程学报, 2024, 42(4): 403-409.
- [8] 贾洪全. 基于水工模型试验的某水库溢洪道优化设计 [J]. 水利技术监督, 2024, (6): 150-154.
- [9] 吴伟伟; 李英勇; 史彬. 卡拉水电站泄洪消能型式研究 [J]. 大坝与安全, 2020, (4): 17-22.
- [10] 王继敏; 杨弘. 锦屏一级水电站泄洪消能关键技术研究 [J]. 人民长江, 2017, 48(13): 85-90.