

抽水蓄能电站中台阶式消能与底流消能组合的效能优化研究

陈奎玉

山东电力工程咨询院有限公司，山东济南，250000；

摘要：对抽水蓄能电站泄洪消能过程中的局部冲刷严重、消能不足等问题，本文展开台阶式消能和底流消能组合的效能改善分析。利用数值模拟模型和物理模型试验来分析组合消能结构的流场特性、消能率、冲刷深度，来改进台阶高度、护坦长度等主要参数。从试验结果可以看出，组合消能系统的消能率提高 12%-15%，冲刷深度减少 20%-25%，可以为抽水蓄能电站泄洪建筑物设计提供理论依据和工程参考。

关键词：抽水蓄能电站；台阶式消能；底流消能；组合效能优化

DOI：10.69979/3060-8767.25.11.028

引言

抽水蓄能电站是新型电力系统中重要的调节手段，泄洪建筑物要经受双向水流的冲刷，消能要求高。传统的单一消能方式中，台阶式消能是利用台阶扰乱水流来削减能量，在高水头情况下，容易由于水流分离导致空化破坏，危及结构安全；底流消能依靠水跃消能，具有较好的稳定性和可靠性，但是消能区长，增加工程占地和投资成本。本文提出了台阶式与底流消能组合方案，在改善台阶高程、坡度以及消力池的尺度等结构参数的基础上，以提高消能效果和工程经济性为目标，有利于电站的安全稳定运行。

1 消能方式原理与组合方案设计

1.1 单一消能方式工作原理

台阶式消能依靠泄洪建筑物下游的台阶构造，使水流顺着台阶面发生旋滚和撞击，从而把动能转变为热能和势能，适合于中低水头情形。这种方式通过水流同台阶的猛烈碰撞，在台阶表面上产生一系列小旋滚，凭借水体内部摩擦和紊动来达到高效的消能目的，同时结构简单、施工方便，可以缩减工程造价。

底流消能是设置消力池，使水流发生淹没水跃，靠水跃内部的紊动扩散来消能，它在高水头电站里应用广泛。这种方式靠增长消能路程，提升水体的紊动程度，可以稳妥地消除大量能量，保证下游河床稳定。然而单一种类的消能方式有着明显的不足之处，台阶式消能到水头超出 80m 时，台阶壁面空化数值降到 0.3 以下，空化破坏的风险较大，底流消能要设较长的护坦，工程投资要多出 30%-40%，而且消力池后期养护费用比较高。

1.2 组合消能方案设计

本论文针对抽水蓄能电站溢洪道高速水流的特点，

所设计的组合消能系统，具有新的两段式构造。上游段采用台阶式消能结构，经过大量的工程模拟和试验，将台阶高度 h 精确到 0.8-1.2m 的范围内，这个高度既保证了水流在跌落时的紊动，又不会因为台阶过高而产生水流飞溅；台阶坡度与泄槽坡度相同（1:3），使水流平稳过渡，减小坡度突变造成的能量损失。下游段使用底流消能池，长度 L 根据弗劳德数理论计算水跃长度确定，初始设计范围为 15~20m，池深 d 控制在 2.5~3.0m 之间，通过合适的池体尺寸设计，可以形成稳定的水跃，使剩余水流能量得以充分耗散。两段结构之间设渐变过渡段，采用抛物线型衔接形式，经过流体力学计算来调节曲线的参数，使水流流速、压力分布平缓过渡，防止局部压力过大对结构产生破坏。通过数值模拟证实，该组合消能方案可以依靠台阶式消能提前消耗掉约 30%~40% 的水流能量，降低底流消能池的负荷，从而削减护坦长度约 20%~30%，削减混凝土用量和基础处理工程量，降低工程建设成本与后期维护费用。

2 数值模拟模型建立与验证

2.1 控制方程与计算参数

合理的计算域是研究的关键部分，计算域的范围包括泄槽、组合消能段和下游河道，要完全展现出水流从泄放到消能再到平稳过渡的全过程。在网格划分上，选择结构化的网格以保证计算的速度以及精度，并且对于像台阶、消力池这些重点位置进行加密，并且最小的网格大小达到 0.05m。这样可以保证对于局部流场细节的准确把握。

边界条件的设置根据实际工程工况来合理设计：进口边界取速度进口，按照抽水蓄能电站最大泄流量 300 m³/s，利用流量和断面面积的关系，确定进口流速；出口边界设为自由出流，模拟水流汇入下游河道的实际状

况;壁面边界取无滑移条件,符合流体在固体边界上基本物理性质。利用以上设置,给予数值模拟有效的初始条件及边界条件,保证数值模拟的结果是准确有效的。

2.2 物理模型试验验证

为了验证数值模拟的正确性,建立 1:50 的物理模型试验台,模型材料用有机玻璃,水流介质用清水。试验测量的参数有消能区流速分布、水面线、冲刷深度,使用多普勒流速仪(ADV)测量流速,精度 $\pm 0.01\text{m/s}$;使用测压管测量水面线,精度 $\pm 0.001\text{m}$ 。在试验过程中,为了保证数据的准确,每组工况重复测量 3 次,取平均值,同时严格控制上游来流的流量、水位稳定。在冲刷深度的测量上使用高精度的地形扫描仪做三维扫描,误差控制在 $\pm 0.005\text{m}$ 之内。

通过对数值模拟的结果与物理试验数据作系统对比可知,各个流量工况下数值模拟和物理试验的流速误差都小于 5%,水面线误差小于 3%,冲刷深度误差小于 8%。特别是高流量工况下的组合消能系统,复杂流态模拟结果与试验现象完全一致,说明建立的数值模型可以准确地反映组合消能系统的水流特性,为以后的优化设计及工程应用提供可靠的理论依据。

3 组合消能效能影响因素分析

3.1 台阶高度对消能效果的影响研究

对研究抽水蓄能电站中台阶式消能和底流消能组合的效果时,将固定消力池长度设为 20m,池深为 3.0m,调整台阶高度 h (0.8m, 1.0m, 1.2m), 系统分析消能率和流场特性的变化规律。当台阶高度 $h=0.8\text{m}$ 时,水流在台阶面上流动相对较为平顺,台阶对水流的扰动较小,旋滚强度弱,因此整体消能效果差,消能率只有 42%。随着 h 增加至 1.0m 时,台阶对水流的扰动非常大,在水流中形成很明显的纵向旋滚,这样旋滚结构大大增加了水流中的能量耗散,消能率上升到 58%,达到比较好的消能效果。但是当 h 继续增大到 1.2m 时,情况发生了变化,在台阶的顶部出现了水流的分离,局部流速急剧上升,达到了 15m/s 以上,同时空化数降到了 0.28,说明了空化破坏的风险大大增加了。消能率有所增加,达到了 60%,但是结构的安全性威胁也不能小视。考虑消能效率和结构安全性的平衡,选取台阶高度 1.0m 作为最优台阶高度,在此高度下消能率和结构安全均能满足要求,达到电站消能的目的,又能有效地降低工程安全隐患。

3.2 消力池长度对消能效果的影响研究

固定台阶高度为 1.0m,池宽 0m、池深 3.0m,改变消力池长度 L (15m、18m、20m、22m),对水跃形态和冲刷深度变化规律做系统的研究。实验数据表明:当消力池长度 L 为 15m 时,因为池体长度不够,水跃不能全部形成在消力池中,因此出现了下游河床的远驱水跃,即水流能量没有完全耗散,所以造成冲刷深度达到了 3.2m,对下游河床造成了侵蚀。当 L 增加到 18m 时,水跃基本可以被控制在消力池内,但是池尾仍然有局部的高流速区,导致冲刷深度虽然有所下降,但是仍然达到了 2.5m,不利于下游河床的稳定。 $L=20\text{m}$ 时,水跃形态趋于稳定,消力池内流速分布均匀,水流紊动充分,消能效果最好,冲刷深度明显减小到 1.8m。再将消力池长度加长至 22m,消能率的提高十分有限,而工程费用比 20m 方案增加了 12%。从消能效果和经济性的角度综合考虑,确定最佳消力池长度为 20m,这样在保证消能效果良好的情况下,可以很好的控制工程成本。

3.3 流量变化对消能效果的影响研究

考虑到抽水蓄能电站的运行特点,本文对 150m³/s, 225m³/s, 300m³/s 三种典型的泄流量工况下,台阶式消能和底流消能组合系统的水力特性展开研究。研究结果表明:在设计流量 225m³/s 工况时,组合消能系统的消能率为 62%,下游河床冲刷深度为 1.8m,这时消能效果和冲刷控制基本达到平衡的状态。当泄流量增大到 300m³/s 校核流量时,高速水流更加充分地发挥消能结构的作用,消能率可以提高到 65%,但是流速的增大也使得水流对河床的冲刷能力大大加强,实测最大冲刷深度为 2.3m。为保证消能工长久的安全运行,建议采用混凝土加厚层加钢筋网加固护坦下防护层。当泄流量为 150m³/s 最小流量时,消能系统的消能率降为 55%,但是因为水流能量小,所以流态很平缓均匀,经监测没有空化、空蚀等现象,减小了水工结构的运行风险。以上研究为不同工况下组合消能系统优化调控以及安全运行给予理论支撑。

4 效能优化方案与工程应用

4.1 优化方案确定

根据以上分析,确定组合消能系统的最佳参数为台阶高度 $h=1.0\text{m}$ 、台阶数量随泄槽长度调整;消力池长 $L=20\text{m}$ 、池深 $d=3.0\text{m}$ 、池底铺设 0.5m 厚钢筋混凝土防护层;在台阶与消力池交界处设半径 $r=1.0\text{m}$ 的圆弧段,减小水流冲击。优化后的组合消能系统相比于单一底流消能,护坦长度减少 8m,工程成本减少 18%;相比于单一台阶式消能,消能率提高 10%,空化风险大大降低。

4.2 工程应用实例

以某抽水蓄能电站（最大水头 120m，最大泄流量 3

00m³/s）为例，原设计采用单一底流消能（消力池 28m），投资大，消能效率低。采用优化方案改造，经过 1 年现场监测获得主要数据，改造前后的效能指标如下表所示：

表 1 监测指标对比表

监测指标	改造前（单一底流消能）	改造后（组合消能优化方案）	变化幅度
设计流量消能率（%）	55	63	+8 个百分点
校核流量消能率（%）	58	66	+8 个百分点
消能区平均流速（m/s）	10.2	7.8	-2.4m/s（-23.5%）
下游最大冲刷深度（m）	2.5	1.9	-0.6m（-24%）
消力池长度（m）	28	20	-8m（-28.6%）
工程总投资（万元）	1260	1030	-230 万元（-18.3%）
年维护成本（万元）	75	42	-33 万元（-44%）
结构完好率（运行 1 年后）	88%（局部护坦裂缝）	100%（无裂缝、空化）	+12 个百分点

从表中可以发现改造之后消能率大幅提高，流速以及冲刷深度都大大减小，同时，护坦长度也减小了，节约了工程占地，投资与维护成本明显下降。运行 1 年后结构无损坏，进一步证明组合消能优化方案在实际工程中的可行性和经济性，可为类似抽水蓄能电站消能系统设计提供借鉴。

5 结论

台阶式和底流消能组合方案利用台阶提前消耗水流能量，减小底流消能池负担，实现消能效果和工程经济性之间的平衡。其最优参数为：台阶高度为 1.0m，消力池长 20m，深 3.0m，衔接处设圆弧段，此时的消能率可达到 62%~65%，冲刷深度控制在 2.3m 之内。流量变化对组合消能效果影响较大，设计流量下效果最佳，校核流量时要加强护坦防护，最小流量时虽然消能率较低但流态较好。未来研究可聚焦于：分析水流含沙量影响和组合消能系统的泥沙淤积问题；用高分子抗冲磨类的新型消能材料；采用如遗传算法等人工智能算法对优化参数进行优化。

参考文献

[1] 张伟. 人工智能在抽水蓄能电站优化调度中的应用研究[J]. 低碳世界, 2025, 15(08): 64-66.

[2] 高学平, 朱洪涛, 刘殷竹, 等. 抽水蓄能电站侧式进/出水口水力学研究进展及展望[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2025, 58(08): 775-789.

[3] 王辉, 王政伟, 陈衡, 等. 抽水蓄能电站与下游水电站协同调峰调度优化[J]. 湖南电力, 2025, 45(03): 27-34.

[4] 何亮. 抽水蓄能电站输水系统水力学特性及优化措施探讨[C]//《中国招标》期刊有限公司. 新质生产力驱动第二产业发展与招标采购创新论坛论文集(五). 国网新源集团有限公司湖北分公司, 2025: 68-73.

[5] 刘洁玉, 尚渝钧, 刘合睿, 等. 抽水蓄能电站无压泄洪洞台阶消能型式研究[J]. 西北水电, 2024, (03): 74-80.

[6] 张若羽, 诸亮, 李鹏峰, 等. 抽水蓄能电站下游水体调控设施优化研究[C]//中国水利学会. 2023 中国水利学术大会论文集(第四分册). 中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司, 2023: 311-319.