

中低水头宽尾墩联合消能工的应用与认识

余子丹

(湖南省水利水电勘测设计研究总院,湖南 长沙 410007)

摘要 通过几个工程实例,证明宽尾墩联合消能工应用于中低水头能够得到与高坝相同的消能防冲效果。这些实例包括了消能工的常规形式,因而具有一定的代表性。分析比较表明,从选择闸墩收缩比 ϵ 入手,借助经验公式 $Fr = 6.56\epsilon^2 - 3.71\epsilon + 2.98$ 初选收缩起始断面位置的方法有助于宽尾墩的设计与应用。

关键词 中低水头水电工程 宽尾墩 联合消能工

中图分类号 :TV653.1 **文献标识码** :B **文章编号** :1006-7647(2009)02-0036-04

Application and understanding of flaring gate pier joint energy dissipater with low-middle water head//YU Zi-dan(Hunan Province Water Resource and Hydropower Consultative Company, Changsha 410007, China)

Abstract :Through several engineering examples, it is proved that a flaring gate pier joint energy dissipater can have the same energy dissipation and erosion control effect as a high dam when used in middle-to-low water head. Including the conventional forms of energy dissipaters, these examples are representative. Analysis and comparison show that, starting with the selection of the pier contraction ratio ϵ , the method of initial contracted section primary selection by the empirical formula $Fr = 6.56\epsilon^2 - 3.71\epsilon + 2.98$ is helpful to the design and application of flaring gate piers.

Key words :middle-low water head hydropower project ;flaring gate pier ;joint energy dissipater

宽尾墩消能工使中国在高坝泄洪消能方面走向了世界水平^[1]。针对这项技术能否用以解决 50 m 以下中低水头常规消能工难以解决的问题,结合几个中低水头水电工程建设的实践,分别对宽尾墩与挑流、底流和面(唇)流的组合,通过理论计算、模型试验和原型观测方法进行研究,得出了肯定的回答,具有一定的代表性。这一实践拓展和延伸了宽尾墩联合消能工技术的应用范围。

1 中低水头宽尾墩联合消能工运用实例

1.1 蟒塘溪宽尾墩挑流联合消能工

蟒塘溪水利枢纽工程位于沅水一级支流舞水河中游,混凝土重力坝最大坝高 43 m,水头 27 m。左岸 108 m 溢流坝段上布置 7 孔 12 m×14 m 泄洪闸,采用 WES 曲线实用堰,堰顶高程 270.5 m。反弧半径 13.7 m,圆心角 25°,平尾墩连续鼻坎挑流消能,挑坎顶高程 255.0 m。下游河床高程为 244.0 m,为前震旦系冷家群浅变质砂质板岩与长石石英砂岩互层,抗冲流速约 5 m/s。大坝按 100 年一遇洪水设计,下泄流量为 7530 m³/s,相应的库水位为 279.2 m 按 1000 年

一遇洪水校核,下泄流量为 10 700 m³/s,相应的库水位为 283.9 m。

水工模型试验显示,出坎水舌挑距近、冲坑深、上游坑坡陡,不满足规范要求,威胁大坝安全,因此不得不寻找改善消能效果的辅助消能方式,最后采用了宽尾墩挑流联合消能工。

消能效果最好的宽尾墩形体参数选择如下:闸墩收缩比 $\epsilon = b_0/B_0 = 0.6$,闸墩收缩率 $\zeta = (1 - \epsilon) \times 100\% = 40\%$,闸墩收缩角 $\theta = \arctan [(B_0 - b_0)/(2L)] = 21.03^\circ$, 30°挑角连续挑坎,坎顶高程为 255.0 m。模型试验结果与原型观测数据有较好的印证性(见表 1、表 2),消能效果与高水头工程(潘家口电站工程)的比较见表 3。

表 1 蟒塘溪水电枢纽工程平、宽尾墩消能效果比较

墩尾形式	水舌最高点 高程/m	最大冲坑 深度/m	冲深最大点 至鼻坎的 距离/m	冲坑上游 坡比(1:n)
平尾墩	261.83	27.17	67.00	1:2.745
宽尾墩	267.08	17.27	72.00	1:4.000

注:试验条件为 $P = 1\%$, $Q = 7530 \text{ m}^3/\text{s}$,相应的库水位为 279.20 m,下游水位为 254.50 m。

作者简介 余子丹(1957—),男,湖南长沙人,高级工程师,硕士,从事水工设计工作。E-mail :jnyzd2007@126.com

表 2 蟒塘溪水电枢纽工程模型与原型冲坑特征比较

状态	河床 高程/m	冲坑 最深处 高程/m	河床 冲坑 深度/m	冲坑上游 坡比 (1:n)	冲坑最深 处至鼻坎 距离/m	冲刷 系数 K
模型试验	243.0	229.92	13.08	1:4.63	52.70	1.36
原型观测	243.0	230.14	12.86	1:4.08	52.50	1.34

注 为使冲坑特征值具有可比性,模型试验和原型观测的测量位置均选择在溢流坝的中心线上,下泄流量 $Q = 5\,300\text{ m}^3/\text{s}$

表 3 蟒塘溪工程消能效果与高水头工程的比较

工程名称	最大坝高/ m	单宽流量/ ($\text{m}^3\cdot(\text{s}\cdot\text{m})^{-1}$)	减浅冲刷深度/ 冲深/ m	减浅率/%	冲刷起点 向下游 推移/m	冲坑最深 点向下游 推移/m
潘家口电站	103.00	80~210	6~9	14.50	6~10	8~36
蟒塘溪电站	43.00	69.72	5.0	18.50	4.0	5.00

蟒塘溪宽尾墩研究始于 1992 年。工程建成于 2000 年,2004 年即经历了下泄流量 $Q = 5\,300\text{ m}^3/\text{s}$ 的洪水检验,为国内外最早在低水头范围内采用宽尾墩挑流消能的工程案例。

1.2 张家渡宽尾墩-面(唇)流联合消能工

张家渡水电站位于澧水一级支流牯水中游。混凝土重力坝最大坝高 36 m,河床中部布置 5 孔 10 m × 10 m 溢流闸、平尾墩,采用 WES 曲线实用堰,堰顶高程 198.10 m。设计采用面流消能,鼻坎顶高程 183.0 m,连续鼻坎挑角 25°。下游河床开挖至 177.0 m 高程,基岩为中厚层紫红色瘤状泥灰岩,抗冲流速约 5 m/s。大坝设计洪水标准为 50 年一遇,下泄流量为 4650 m³/s,校核洪水标准为 200 年一遇。

设计工况时,模型试验显示水舌从面流鼻坎上以附着挑流的形式入射下游河道,产生 3.4 m 的二次落差,不能形成面流。下游 95 m 处河床冲深仍然达到 16.1 m,且直接顶冲下游公路桥,危及大坝、右岸和桥梁的安全。为消除安全隐患,改善泄洪流态,采用宽尾墩辅助消能工。

水位较平稳、顶冲水流现象消失、流态明显改善、保证大坝和下游桥梁安全的宽尾墩体形参数选择如下 闸墩收缩比 $\epsilon = 0.55$,闸墩收缩率 $\zeta = 45\%$,闸墩收缩角 $\theta = 18.9^\circ$,宣泄设计流量时,下游水面二次跌落减少至 1.6 m,河床最大冲坑深度仅 3.2 m,上游边坡 1:15。工程于 2004 年初投入运行,当年 6 月 24 日即遭遇相当于设计流量 $Q = 4\,650\text{ m}^3/\text{s}$ 的大洪水,模型试验结果与原型观测数据比较吻合(见

表 6 铜信溪电站工程消能效果与高水头工程的比较

工程名称	最大坝高/ m	堰顶流量/ ($\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$)	减小第二共轭水深或抬高池底板		缩短池长		减浅下游冲深	
			$\Delta h/\text{m}$	变化率/%	$\Delta L/\text{m}$	缩短率%	$\Delta T/\text{m}$	减浅率/%
安康电站	128.00	186.80	4.0	18.0	82.5	70.0	19.00	31.8
五强溪水电站	85.83	151.50	2.0	6.0	65.0	35.0	12.00	
铜信溪电站	28.60	92.02	3.0	17.0	30.0	46.9	5.86	24.0

注 据分析五强溪水电站工程为双重孔口泄洪,加入了附加动量水跃,减轻了下游冲刷。

表 4),消能效果与高水头工程(岩滩水电站工程)的比较见表 5。

表 4 张家渡水电站原型观测与模型试验冲坑特征对照

状态	冲坑 最深处 高程/m	冲坑最深 点至鼻坎 距离/m	河床 开挖 高程/m	河床 冲深/ m	冲坑上游 边坡 (1:n)	冲刷 系数 K
原型观测	176.83	33.0	177.0	0.17	1:19.4	0.83
模型试验	174.80	40.0	177.0	2.20	1:18.2	0.95

表 5 张家渡水电站工程消能效果与高水头工程的比较

工程名称	最大坝高/ m	设计流量/ ($\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$)	减浅临界水深 $\Delta h/\text{m}$	减浅率/%	减浅下游冲深 Δ_r/m	减浅率/%
岩滩水电站	100.00	212.00	3.30	9.20	1.60	43.20
张家渡水电站	36.20	83.00	1.80	11.00	12.90	80.00

1.3 铜信溪宽尾墩-消力池联合消能

铜信溪水电站位于沅水一级支流辰水中游。主河床 111.5 m 长的溢流坝段设 7 孔 12.0 m × 11.5 m 泄洪闸、平尾墩,混凝土重力坝最大坝高 28.6 m。水库正常蓄水位 210.0 m。50 年一遇设计洪水库水位 210.46 m,下泄流量 7 730 m³/s,相应的下游水位 200.36 m。河床平均高程 188.0 m,出露基岩为震旦系中统南沱组冰渍砂砾岩,抗冲流速约 4.5 m/s。设计采用底流消能,消力池计算池长 64 m。当下泄流量 $Q = 4476\text{ m}^3/\text{s}$ 时池内发生远驱水跃,尾坎后冲深达 10 m 多。在消力池中设置趾墩和消力墩后池长缩短为 34 m,但为临界水跃,尾坎后二次跌落,最大冲深 7.76 m,墩间流速达 16 m,存在产生气蚀破坏的可能性。

经比较,采用宽尾墩-差动式尾坎平底消力池。宽尾墩体形参数选择如下 闸墩收缩比 $\epsilon = 0.50$,闸墩收缩率 $\zeta = 50\%$,闸墩收缩角 $\theta = 18.0^\circ$ 。同样工况下,池内为稳定的淹没水跃。尾坎后底流流速减至 2.92 m/s,坎后最大冲深仅 1.90 m,7 个孔全开时的工况也满足消能防冲的要求。消能效果与高水头工程(安康电站工程、五强溪水电站工程)的比较见表 6。

2 对中低水头宽尾墩消能的几点认识

2.1 符合动量平衡原理

以张家渡宽尾墩面(唇)流消能工程为例,其水平有效动量方程的表达式如下:

连续性方程

$$Q = bh_0v_1 = B_1h_2v_2 \quad (1)$$

动量方程

$$\left(\frac{\rho g Q v_1}{g} + P_1\right) \cos \theta = \frac{\rho g Q v_2}{g} + P_B - P_2 + P_3 - P_4 \quad (2)$$

式中： Q 为溢流坝 1 个闸孔的泄流量； b 为来流计算断面处堰顶收缩射流水舌的宽度； h_0 为来流计算断面处堰顶收缩射流水舌的高度； B_1 为相邻两闸墩中心线之间的距离； h_2 为下游出流计算断面的水深； v_1 和 v_2 分别为来流与出流计算断面的平均流速； ρ 为水的密度； g 为重力加速度； P_1 为来流计算断面动水压力的合力； P_2 为水体在反弧所受的作用力合力的水平分量； P_3 为水体在鼻坎段所受作用力合力的水平分量； P_4 为水体在鼻坎下游面所受作用力合力的水平分量； θ 为坝坡与水平线的夹角； P_B 为出流计算断面动水压力的合力。代入工程相关参数求解后，其理论计算结果与模型观测数据（见表 7）吻合良好。

表 7 张家渡宽尾墩泄流产生面(唇)流衔接时
计算特征水位与试验值的比较

验证方法	在入流断面上		在出流断面上	
	上游 水位/m	上游 水深/m	下游 水位/m	下游 水深/m
动量方程求解	197.14	10.000	194.70	17.700
三元水跃方程求解	197.14	10.000	194.61	17.610
水力学试验量测值	197.14	10.000	194.55	17.550

该工程案例表明，中低水头与高水头宽尾墩一样符合动量平衡原理而具有同质性，说明中低水头采用宽尾墩消能是必然有效的。中低水头问题研究是对这项技术应用的延伸。

2.2 ϵ 是合理确定宽尾墩体型的重要参数

a. 侧向收缩是形成堰顶收缩射流的原因。宽尾墩联合消能工增大消能效果的机理，体现在过堰高速水流遇到宽尾墩的侧向收缩，产生向下游坝面的冲击波，迫使出射水流横向收缩，纵向和竖向拉开，变二元水流为三元水流，相邻水股间或水股与空气间强烈剪切、紊动而消能。因此 ϵ 的选取是很重要的。

b. ϵ 的范围。国内大型工程的经验 ϵ 取值一般在 0.33 ~ 0.67 之间。中低水头的 ϵ 在 0.50 ~ 0.60 之间，其中底流、面(唇)流消能工的 ϵ 在 0.50 ~ 0.60 之间，挑流消能的 ϵ 在 0.60 左右(见表 8)。

c. ϵ 与收缩起始断面弗劳德数 Fr 的关系。就基本型宽尾墩的体型而言， ϵ 的选择只是确定了宽尾墩墩尾的尺寸，而直接影响堰顶收缩射流形态的收缩起始断面位置尚未确定。为寻找简便、实用的确定收缩起始断面位置的方法，笔者所在的课题组根据已完成的研究项目，结合国内同类工程的资料，

表 8 中低水头宽尾墩联合消能工
实例之 溢流坝的设计参数

工程名称	溢流断面参数			堰顶设计 水头/m	堰顶单宽 流量/ ($\text{m}^3 \cdot (\text{s} \cdot \text{m})^{-1}$)
	孔数/个	宽/m	高/m		
蟒塘溪电站	9	12	10.5	10.17	69.72
龙湘电站(闽)	5	16	13.0	13.00	92.75
张家渡水电站	5	10	10.0	12.70	63.00
铜信溪电站	7	12	11.5	11.46	92.02
朗江电站	12	12	8.5	8.85	53.73

注 5 个工程的堰型均为 WES。

绘制了 $\epsilon \sim Fr$ 关系曲线如图 1 所示，据此建立的初步的经验公式为 $Fr = 6.56\epsilon^2 - 3.71\epsilon + 2.98$ 。宽尾墩初步选型时，设定 ϵ ，按该经验公式求得 Fr ，根据溢流坝面流速的分布即可初步确定收缩射流起始断面的位置。再通过模型试验进行修正，即可获得比较满意的消能效果。

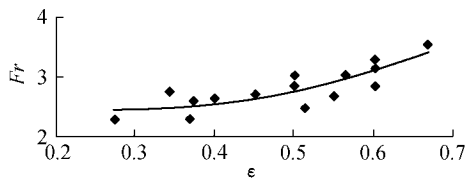


图 1 $Fr \sim \epsilon$ 关系曲线

2.3 收缩起始断面 Fr 与消能形式的对应关系

收缩起始断面 Fr 反映了堰顶收缩射流的剧烈程度。为不抬升库水位和不影响溢流坝泄流， Fr 始终必须大于 1，一般认为 Fr 必须达到 2.0 以上才能形成收缩射流。

表 9 显示，当 $Fr = 0.20 \sim 0.30$ 时，采用底流或面(唇)流消能效果较好；当 $Fr = 0.30 \sim 0.40$ 时，挑流消能的效果较好。而对于高水头窄缝式收缩消能工，有学者认为应达到 $Fr = 4.50 \sim 10.00$ [1]。

2.4 θ 的取值

θ 是宽尾墩收缩起始断面处的水平夹角，国内工程的 θ 在 $16.0^\circ \sim 25.0^\circ$ 之间，中低水头工程的 θ 也在此范围内，见表 9。

表 9 中低水头宽尾墩联合消能工
实例之 宽尾墩的设置

工程名称	消能形式	宽尾墩在溢流 断面上的位置	收缩 起始 断面 Fr	ϵ	$\theta /$ ($^\circ$)
蟒塘溪电站	挑流	宽尾平闸墩尾部	3.27	0.60	21.33
龙湘电站(闽)	挑流	宽尾平闸墩尾部	3.16	0.60	16.22
张家渡水电站	面(唇)流	宽尾平闸墩尾部	2.68	0.55	18.31
铜信溪电站	底流	宽尾上移 3 m	2.35	0.50	18.00
朗江电站	T 形墩消力池	宽尾下移 2 m	2.85	0.60	25.03

3 结 语

a. 宽尾墩联合消能工不仅适用于高坝消能，也适合中低水头工程用以解决常规方法难以解决的问题。

题,运用得当可以获得与高坝相同的消能防冲效果,且经济效益可观,如蟒塘溪电站工程减少工程量和提前发电的直接经济效益就达 4 000 多万元。

b. 笔者给出的宽尾墩参数范围、对应关系、经验公式和选择步骤,作为实用方法可用于这种辅助消能工的初选,但应通过模型试验进行校正确定。

c. 需要进一步做的工作是完善宽尾墩水力学计算理论的研究,深化其运用条件和调度管理条件的研究。

致谢 谨以此文向艾克明先生和课题组其他同志表示谢忱。

参考文献：

[1] 童显武. 高水头泄水建筑物收缩式消能工[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000 38,376-377.
[2] 欧阳福生,艾克明,林珍喜,等. 宽尾墩联合消能在中低

水头中的应用[J]. 工程实践,2007(5) 57-59.
[3] 湖南省水利水电勘测设计研究总院. 蟒塘溪水利水电枢纽工程水工整体模型试验报告(及补充报告)[R]. 长沙: 湖南省水利水电勘测设计研究总院,1992 1995.
[4] 湖南省水利水电勘测设计研究总院. 朗江水电站水力学整体模型试验报告[R]. 长沙 湖南省水利水电勘测设计研究总院,2001.
[5] 湖南省水利水电勘测设计研究总院. 张家渡电站水工模型试验报告[R]. 长沙 湖南省水利水电勘测设计研究总院,2002.
[6] 湖南省水利水电勘测设计研究总院. 龙湘水电站工程水工整体模型试验报告[R]. 长沙 湖南省水利水电勘测设计研究总院,2004.
[7] 湖南省水利水电勘测设计研究总院. 铜信溪水电站工程水工模型试验报告[R]. 长沙 湖南省水利水电勘测设计研究总院,2004.

(收稿日期 2008-07-01 编辑 高建群)

(上接第 15 页)

分类问题上的良好性能和优势。最后,值得指出的是,GPC 方法的超参数是自适应确定,巧妙地克服了 ANN 方法最优结构与超参数不易确定的困难,具有方法容易实现的优点。

4 结 论

a. 水库水温分布结构类型与其影响因素之间是复杂的非线性关系,高斯过程机器学习方法能够很好地处理这种关系,笔者将高斯过程机器学习引入该领域的研究,提出了水库水温分布结构识别的高斯过程机器学习方法。工程实例分析表明,该方法可行的,无需建立复杂的微分方程或数值计算模型,只要以多个已建水库资料作为知识源进行机器学习,就能推断出准确可靠的预测结果,为实现水库水温分布结构类型的合理识别提供了一条有效途径。

b. 在实际工程应用中,应尽可能多地收集与整理已建水库水温分布结构的实例数据,通过考虑更多的影响因素和更多的学习样本,不断地丰富学习样本的多样性,将有利于进一步提高高斯过程机器学习预测结果的可靠性和方法的适用性。

c. 高斯过程机器学习方法具有优良的分类性能,与神经网络分类方法相比,在不损失性能的前提下,具有参数自适应确定、模型容易实现和有概率意义的预测输出等优点,在水利水电工程中具有广阔的应用前景。

参考文献：

[1] 陈永灿,张宝旭,李玉梁. 密云水库垂向水温模型研究

[J]. 水利学报,1998(9) 14-20.
[2] 蒋红. 水库水温计算方法探讨[J]. 水力发电学报,1999 (2) 60-69.
[3] 蔡为武. 水库及下游河道的水温分析[J]. 水利水电科技进展,2001,21(5) 20-23.
[4] 刘金禄. 水库水温结构划分的模糊回归预测模型及其应用[J]. 水资源与水工程学报,2004,15(3) 56-58.
[5] 郝志红,吴鑫淼,郑旌辉,等. 一种基于人工神经网络的水库水温分层模式判别方法[J]. 农业工程学报,1999, 15(3) 204-207.
[6] BELHOUARI S B, BERMAK A. Gaussian process for nonstationary times series prediction [J]. Computational Statistics & Data Analysis, 2004, 47(4) 705-712.
[7] GIROLAMI M, ROGERS S. Variational Bayesian multinomial probit regression with Gaussian process priors [J]. Neural Computation, 2006, 18(8) 1790-1817.
[8] SEEGER M. Gaussian processes for machine learning [J]. International Journal of Neural System,2004,14(2) 99-106.
[9] SU Guo-shao, YAN Liu-bin, SONG Yong-chun. Gaussian process for non-linear displacement time series prediction of landslide [J]. Journal of China University of Geosciences, 2007,18 219-212.
[10] 熊志化,张继承,邵惠鹤. 基于高斯过程的软测量建模 [J]. 系统仿真学报,2005,17(4) 793-794.
[11] KUSS M, RASMUSSEN C E. Assessing approximate inference for binary Gaussian process classification [J] Journal of machine learning research,2005, 6 1679-1704.

(收稿日期 2008-09-22 编辑 高建群)