

T形墩消力池消能率的计算及优化设计试验

陆 杨,刘焕芳,金 瑾,刘文华,李 强

(石河子大学水利建筑工程学院,新疆 石河子 832003)

摘要:结合新疆肯斯瓦特水利枢纽工程的水工模型试验,提出一种带防挑盖板的新型消能工,即T形墩消力池。理论推导出T形墩消力池消能率的计算公式,并与实测值进行比较。结果表明误差在实际工程允许范围之内,可以用该公式来计算实际工程T形墩消力池的消能率。通过试验计算不同消力池池长、T形墩支腿及不同墩形的消能率,分析池长、支腿长度、墩形等参数对消能效果的影响,得出适合该工程的最佳池长为52.2m,最优墩形为支腿梯形、前墩弧形。

关键词:T形墩消力池;防挑盖板;最佳池长;体形优化

中图分类号:TV653⁺.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2012)06-0042-04

Study on calculation of energy dissipation ratio and optimal design test of stilling basin with T-shape baffle//LU Yang, LIU Huanfang, JIN jin, LIU Wenhua, LI Qiang (College of Water Conservancy and Architecture Engineering, Shihezi University, Shihezi 832003, China)

Abstract: Based on a model test of a hydraulic project in the Xinjiang Kensiwater district, a new type of energy dissipater with a deck for preventing the torrent from moving upward was presented, that is a stilling basin with a T-type baffle. A formula for calculating energy dissipation ratio of this new energy dissipater was derived from the energy equation. Comparison between the calculation result employing this formula and the measured result shows that the errors can be neglected for practical projects. Hence, the formula can be used to calculate energy dissipation ratio of a stilling basin with T-type baffle in practical projects. To analyze the influence of the stilling basin's length and the shape of the T-type baffle on energy dissipation effect, hydraulic tests for the stilling basin with six kinds of T-type baffle were carried out. In addition, the energy dissipation ratio for every test condition was calculated using the formula proposed in this paper. It can be concluded that the optimal length of the stilling basin is 52.2 m, the optimal shape of the baffle's leg is a trapezoid, and the optimal shape of the baffle block is an arc.

Key words: stilling basin with T-type baffle; deck for preventing torrent upward; basin's optimal length; shape optimization

1 工程概况

肯斯瓦特水利枢纽工程位于新疆玛纳斯河中游的肯斯瓦特河段,距新疆石河子市约70 km,具有防洪、灌溉及发电等综合利用功能。工程由拦河坝、右岸溢洪道、泄洪洞、发电引水系统组成,水库正常蓄水位为990 m,最大坝高为129.77 m,总库容为1.88亿m³,控制灌溉面积为21万hm²,电站装机容量为100 MW,设计年发电量为2.723亿kW·h,属大(2)型Ⅱ等工程^[1]。本工程溢洪道位于右岸坝肩处,开敞式布置,由进口段、控制段、泄槽段、消能段、尾水渠组成,采用钢筋混凝土或混凝土修建。溢洪道

的消能防冲标准为50年一遇(设计保证率 $P=2\%$),相应特征流量为532 m³/s;工程按500年一遇洪水($P=0.2\%$)进行设计,相应特征流量为1882 m³/s;按5000年一遇洪水($P=0.02\%$)校核,相应特征流量为2096 m³/s。溢洪道的消能段采用底流消能的消力池方案,其中消力池池深5.0 m,全长80.0 m,宽度从18 m扩散至32 m,扩散角为4.3°,实际工程中未采用T形消力墩。

2 试验概况

2.1 模型设计

模型按重力相似准则设计,根据试验任务及工

基金项目:石河子大学自然科学研究与技术创新项目(ZRKX2009YB15)

作者简介:陆杨(1987—),女,新疆乌鲁木齐人,硕士研究生,主要从事水工水力学研究。E-mail:01luyang@sina.com

通信作者:刘焕芳(1965—),男,河南禹县人,教授,主要从事工程水力学研究。E-mail:liuhuanfang@tom.com

程性质,结合试验设备、场地及精度,采用长度比尺 $\lambda_L=50$ 的正态模型,模型长度取溢洪道 150 m,溢洪道下游至出水渠 216.8 m。其他水流物理量比尺如下:流速比尺 $\lambda_v=\lambda_L^{0.5}=7.071$,流量比尺 $\lambda_Q=\lambda_L^{2.5}=17677.67$,糙率比尺 $\lambda_n=\lambda_L^{1/6}=1.919$ 。

按照上述比尺可进行原型和模型间的相互换算,模型糙率为

$$n_m = \frac{n_p}{\lambda_n} = \frac{0.015}{1.919} = 0.0078 \tag{1}$$

式中: n_p 为原型糙率。

2.2 原设计方案模型试验及存在的问题

对原设计方案重点进行了各典型流量 $Q=532\text{ m}^3/\text{s}, 300\text{ m}^3/\text{s}, 400\text{ m}^3/\text{s}, 800\text{ m}^3/\text{s}, 1000\text{ m}^3/\text{s}$ 下的消能防冲试验。各典型流量下溢洪道末端入池断面水深、流速分布见表 1。试验结果表明,原设计方案消力池在 $Q<300\text{ m}^3/\text{s}$ 条件下均发生淹没式水跃,获得了较好的消能效果; $Q=300\text{ m}^3/\text{s}$ 时发生远驱式水跃,但此时消能效果尚好; $Q=400\sim 532\text{ m}^3/\text{s}$ 时,消力池内发生远驱式水跃衔接,此时消力池水面脉动较大,跃首前后移动,池内流态极不稳定; $Q>800\text{ m}^3/\text{s}$ 时消力池末端及下游退水渠水面波动剧烈,主流不对称,消能效果差,消力池遭到了严重的破坏。原设计方案不能满足工程要求,为此需要对原消力池设计方案进行修改。

表 1 典型流量下溢洪道末端入池断面特征参数

流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	水深/m	断面平均流速/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	Fr
300	0.53	31.09	13.6
400	0.78	28.69	10.4
532	0.75	39.89	14.7
800	1.28	35.23	9.9
1000	1.65	33.77	8.4
1870	2.92	35.62	6.7
2083	3.07	37.74	6.9

2.3 修改设计方案模型试验

根据国内外试验研究与工程实践^[2-5],T 形墩是大流量变幅下底流消能的一种非常有效的辅助消能工,其体积小消能率却较高,可以缩短消力池长度,同时兼顾设计洪水和校核洪水下底流消能的基本要求,从而达到消能的目的,使水流与下游退水渠有较好的衔接状态。为此,在原设计方案的基础上加设 T 形墩。

前期试验发现,加设 T 形墩后,池长为 50 m 即可达到消能效果,故在 T 形墩优化试验时选取 50 m, 52.5 m,55 m 3 种池长进行对比试验。同时,还发现在较大流量时,水流受到 T 形墩的直接阻挡会出现水位飙升的现象。流量增至一定值时,T 形墩前墩位置处水流跃动很高,甚至可以溅向池外,水跃极不

稳定。为了防止上述现象,模型在 T 形墩前墩和尾坎两个位置处设置了防挑盖板。带防挑盖板的 T 形墩消力池的平面布置及纵剖面见图 1。

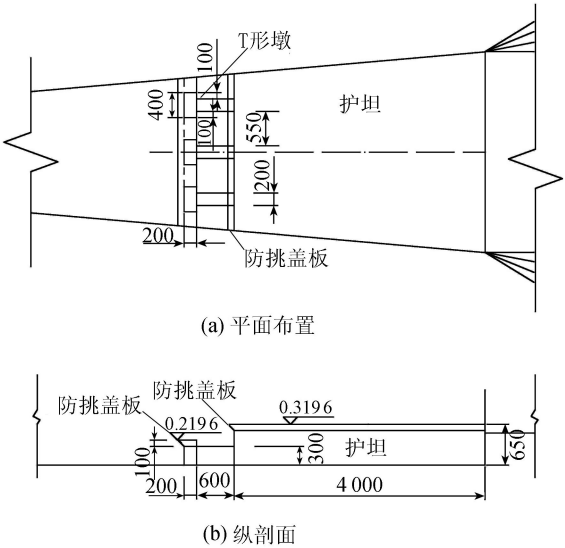


图 1 T 形墩消力池平面布置及纵剖面示意图
(高程单位:m,尺寸单位:mm)

根据原设计方案试验结果,对流量、池长、T 形墩的形式及支腿长度、防挑盖板等 5 种因素对消力池消能效果的影响进行研究,发现在消力池中加设带防挑盖板的 T 形墩后消能效果非常明显,不仅使得 $Q=532\text{ m}^3/\text{s}$ 时完全达到了工程设计要求,而且在超过消能防冲标准下消力池仍能发生淹没水跃,效果较好,可以有效缩短池长约 25%~50%。为此,对以上 5 种影响因素进行正交试验。试验正交组次安排见表 2,T 形墩各形式尺寸及阻水面积见表 3。

表 2 试验正交组次安排

T 形墩形式	池长/m	T 形墩支腿 长度/m	流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)
① 支腿矩形、前墩矩形	55.0	12	
① 支腿矩形、前墩矩形	50.0	12	300
① 支腿矩形、前墩矩形	52.5	12,14,10	400
② 支腿梯形、前墩矩形	52.5	12	500
③ 支腿矩形、前墩梯形	52.5	12	600
④ 支腿梯形、前墩梯形	52.5	12	700
⑤ 支腿矩形、前墩弧形	52.5	12	800
⑥ 支腿梯形、前墩弧形	52.5	12	1000

表 3 T 形墩各形式尺寸及阻水面积

形式 编号	墩前尺寸/cm			支腿尺寸/cm			尾坎高 度/cm	阻水 面积/%
	宽	厚	高	厚	长	高		
①	8	4	8	4	12	8	13	50.0
②	8	4	8	4	12	1.6~8	13	50.0
③	2~10	4	8	4	12	1.6~8	13	62.5
④	2~8	0.8~4	8	4	12	1.6~8	13	50.0
⑤	3~4	4	8	4	12	8	13	50.0
⑥	3~4	4	8	4	12	1.6~8	13	50.0

3 T形墩消力池消能率计算公式推导及验证

3.1 消能率计算公式的推导

衡量消能工优劣的一个很重要的指标是消能率^[6]。由于水流在尾坎处会形成二次水跃,会消除部分下泄能量^[7],所以在计算T形墩消力池的消能率时,考虑第一次水跃跃前1—1断面至跃后2—2断面之间的总能量损失^[8],如图2所示,根据能量方程得1—1断面总能量

E_1 = h_1 + \frac{\alpha_1 v_1^2}{2g} = h_1 \left(1 + \frac{\alpha_1}{2} Fr_1^2 \right) \tag{2}

2—2断面总能量

E_2 = h_1 + \frac{\alpha_2 v_1^2}{2g} + \Delta z = h_1 \left(1 + \frac{\alpha_2}{2} Fr_1^2 \right) + \Delta z \tag{3}

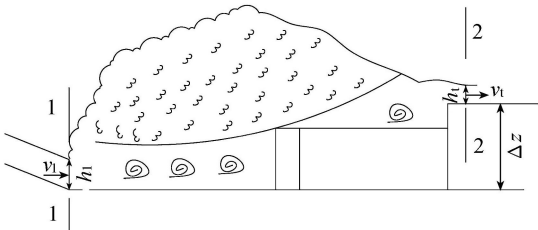


图2 T形墩消力池能量损失计算示意图

令跃前断面和跃后断面的动量修正系数均为1,即α₁=α₂=1。T形墩消力池消能率

k = \frac{E_1 - E_2}{E_1} = 1 - \frac{E_2}{E_1} \tag{4}

根据连续方程可知

B_1 v_1 h_1 = B_2 v_2 h_2 \tag{5}

令η_B = \frac{B_2}{B_1}, 则

v_2 = \frac{v_1 h_1}{h_2 \eta_B} \tag{6}

令η = \frac{h_2}{h_1}, N = \frac{h_1}{h_2}, 则 \frac{h_2}{h_1} = \frac{h_1}{h_2} = \eta \frac{h_1}{h_2} = \eta N, 即

h_2 = N \eta h_1 \tag{7}

将式(6)(7)代入式(3)得

E_2 = N \eta h_1 \left(1 + \frac{1}{2 N^3 \eta^3 \eta_B^2} \frac{v_1^2}{g h_1} \right) + \Delta z \tag{8}

令Δz=η_zh₁, 并将Fr₁² = \frac{v_1^2}{g h_1}代入式(8)得

E_2 = N \eta h_1 \left(1 + \frac{1}{N^3 \eta^3 \eta_B^2} \frac{1}{2} Fr_1^2 \right) + \eta_z h_1 \tag{9}

将式(2)(9)代入式(4)得

k = 1 - \frac{N \eta \left(1 + \frac{1}{N^3 \eta^3 \eta_B^2} \frac{1}{2} Fr_1^2 \right) + \eta_z}{1 + \frac{1}{2} Fr_1^2} \tag{10}

式(10)既适用于B₁≠B₂下的梯形消力池,同样也适用于消力池坎后高程与池底高程不等(Δz≠0)的情况。对于坎后高程与池底高程相等的矩形消力池,即B₁=B₂且Δz=0,此时T形墩消力池消能率的计算公式可简化为

k = 1 - \frac{N \eta \left(1 + \frac{1}{N^3 \eta^3} \frac{1}{2} Fr_1^2 \right)}{1 + \frac{1}{2} Fr_1^2} \tag{11}

对于一般等宽、平底、无尾坎的消力池,可近似认为跃后水深h₂与临界共轭水深h''相等,即N=1。

3.2 计算值与实测值的比较

根据式(10),池长为52.5m、流量为300~1000m³/s、加设带防挑盖板的T形墩(形式①)后的消能率计算值与实测值见图3。从图3可以看出,计算值与实测值拟合较好,说明式(10)满足实际工程T形墩消力池消能率计算的精度要求。

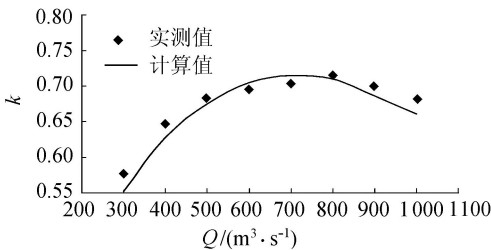


图3 T形墩消力池消能率计算值与实测值的比较

4 T形墩消力池池长的优化

T形墩消力池池长L₀是从消力池入口到尾坎的距离,由消力池入口至前墩的距离x₀及前墩至尾坎的距离所构成。图4为T形墩(形式①)在不同池长时的消力池消能率随流量的变化曲线。由图4可以看出,当池长为50.0m时消能率先随流量增大而增大,流量达到400m³/s时消能率达到峰值,而后逐渐减小;当池长为52.5m时,消能率随流量的增大而逐渐增大,直至流量增大至800m³/s时消能率趋于稳定。在其他条件不变且流量小于430m³/s条件下,池长为50.0m时的消能率较高;流量大于430m³/s条件下,池长为52.5m时的消力池消能率最高。由以上分析可

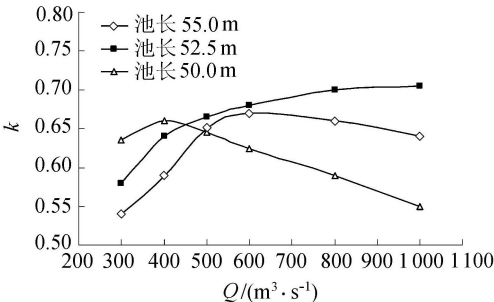


图4 不同池长时消能率随流量的变化曲线

知,流量不变时,不同池长的消能率变化规律不同;池长不变时,不同流量的消能率变化规律也不同。考虑到肯斯瓦特水利枢纽工程流量变化范围,加设 T 形墩后消力池的池长可设为 52.5 m,较原设计方案提高了消能率,减少了开挖方量,工程效益相对较高。

5 T 形墩消力池墩形的优化

5.1 T 形墩支腿长度的优化

T 形墩支腿长度直接影响 T 形墩在消力池内的相对位置,进而影响 T 形墩消力池的消能效果。图 5 为池长为 52.5 m,T 形墩支腿长度为 10 m,12 m,14 m 3 种情况下消能率随流量的变化曲线。由图 5 可以看出,当 T 形墩支腿长度为 10 m 和 14 m,流量大于 500 m³/s 时,消能率随流量的增加逐渐降低;当 T 形墩支腿长度为 12 m,流量增至 800 m³/s 时,消能率出现降低的趋势。另外发现,流量小于 500 m³/s 时,T 形墩支腿长度为 14 m 时的消能率较高;而流量大于 500 m³/s 时,T 形墩支腿长度为 12 m 时的消能率明显高于支腿长度为 10 m 和 14 m 时的消能率且更稳定。通过对以上 3 种 T 形墩支腿长度消能效果的比较分析可知,T 形墩支腿长度设计时存在一个最优支腿长度。在大流量变幅内,本次试验确定支腿长度为 12 m 时的消能率最高,且比较稳定。

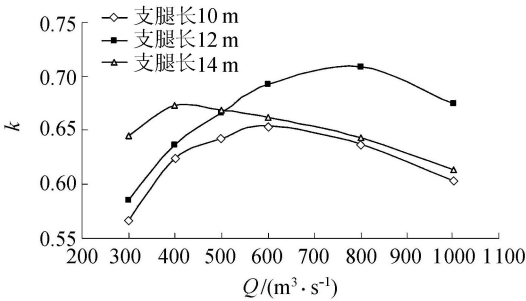


图 5 不同支腿长度时消能率随流量的变化曲线

5.2 T 形墩体形的优化

目前,国内大多数工程 T 形墩体形结构尺寸比例为 2 : 3 : 4 : 5 : 6 (前墩厚 : 墩高 : 前墩宽 : 尾坎高 : 支腿长),支腿厚度与前墩厚相同,即为传统的湖南院体形^[9-12]。有关 T 形墩的研究也基本是在此墩形基础上进行,只是将其比例进行调整。肯斯瓦特试验模型最初方案亦按上述比例设计,但试验发现消能效果并不是很好。本次模型试验设计时,改变了传统的湖南院体形,调整了结构尺寸比例,并在支腿矩形、前墩矩形的基础上对前墩和支腿的形式进行改进(表 3),并在原方案的基础上加设防挑盖板,以增强消能效果。

图 6 为池长为 52.5 m、加防挑盖板的条件下,6 种不同墩形的消能率随流量的变化曲线。由图 6

可以看出,不同墩形的消能率随流量的变化趋势基本相同:先随流量的增大而增大,当流量增至 800 m³/s 左右时消能率达到峰值,而后随流量的增大呈减小的趋势。在小流量下,不同墩形的消能率比较接近,相邻两种形式的消能率差值较小;随着流量的增大,相邻两种形式的消能率差值逐渐增大,直到流量增至 800 m³/s 时,相邻两种形式的消能率差值大小趋于稳定。

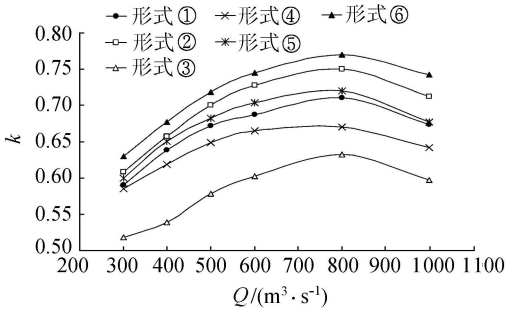


图 6 不同墩形时消能率随流量的变化曲线

比较发现:在大流量变幅范围内,本次试验设计的 6 种墩形的消能率从小到大依次为③、④、①、⑤、②、⑥,即在相同流量下,支腿梯形、前墩弧形的 T 形墩形式⑥的消能率最高;支腿梯形、前墩矩形的 T 形墩形式②的消能率次之。同传统形式(形式①)比较,形式⑥、形式②、形式⑤的消能率均较大,由此得出在基本尺寸参数不变的前提下,T 形墩前墩由矩形变为弧形(即形式①→形式⑤)或 T 形墩的支腿由矩形变为梯形(即形式①→形式②),均能使相同流量下的消能率提高,且支腿形式的变化使相同流量下消能率提高的幅度更大。究其原因:① T 形墩支腿由矩形变为梯形后,依然可以固定前墩,连接尾坎与前墩,但较矩形支腿增大了尾坎的阻水面积。当水流撞击前墩后,顺支腿斜面向下,遇到竖直的尾坎后与尾坎再次撞击,进行了二次消能,故梯形支腿 T 形墩的消能率较矩形支腿的 T 形墩消能率高。② 前墩迎水面由矩形变为弧形后,同一股水流撞击前墩的时间与空间不同,且弧面对水流的反作用方向与矩形面不同。高速水流遇到矩形面消力墩后,位移方向与受到的反力方向一致,致使高速水流骤然跃起;而高速水流撞到弧面消力墩后,在回流过程中分散相互撞击已消耗部分能量,将撞击后的水流分散两侧,增加了水流的掺混作用,故前墩为弧形的 T 形墩的消能率较前墩为矩形的 T 形墩的消能率高。

6 结 语

a. 推导得出 T 形墩消力池消能率计算公式,误差在实际工程允许范围之内,可以用该公式计算实际工程 T 形墩消力池的消能率。(下转第 55 页)

位变幅很大的条件下,夏季泄洪时溢流段成为“潜堰”,水重作用在溢流面和护坦上使坝体和基础下沉,并使坝顶向下游位移。

b. 温度对位移的影响反映在水位变化引起下游侧的温度变化。夏季高水位工况下,因下游水位升高,溢流坝段处于“浅堰”状态,坝体温度分布较均匀,上下游温差降低,进而使温度分量减小。

c. 坝踵处经过帷幕固结灌浆等处理,使上下游基础的刚度有一定差别,从而在水荷载作用下产生不均匀沉陷,基础向下游倾斜,使坝顶向下游变形。

d. 所谓“异常”的位移不能用常规大坝位移规律分析时,不应轻易否定资料,而应结合具体情况在复核数据的基础上根据大坝当时的荷载和上下游边界条件等因素对位移的影响作综合研究。大化坝顶位移变幅较小,以往人工观测资料数据密度低,精度有限,难以发现其中不同的规律,而在自动化观测条件下,数据密度、精度都大大提高,这为研究大坝变形规律,掌握大坝工作性态起到重要的作用。

参考文献:

[1] 吴中如,沈长松,阮焕祥. 水工建筑物安全监控理论及其应用[M]. 南京:河海大学出版社,1990.

(上接第 45 页)

b. 在大流量变幅范围内,通过比较加设防挑盖板时不同池长情况下的 T 形墩消力池的消能率,确定适合肯斯瓦特水利枢纽工程的消力池池长为 52.5 m。优化后的消力池提高了消能率,减少了开挖方量,工程效益相对较高。

c. 试验分析得出 T 形墩支腿长度设计时存在一个最优支腿长度。在大流量变幅范围内,支腿长度为 12 m 时的消能率最高,且比较稳定。

d. 在原设计方案的基础上对 T 形墩体形进行优化,通过消能效果分析,认为墩形设计为支腿梯形、前墩弧形时的消能效果最好。

参考文献:

[1] 刘焕芳. 新疆玛纳斯河肯斯瓦特水利枢纽工程溢洪道水力模型试验报告[R]. 石河子:石河子大学,2009.
[2] 王忠诚. T 形墩消力池的试验研究与工程应用[D]. 大连:大连理工大学,2001.
[3] 田嘉宁,李郁侠. T 形墩消力池的体型与水力设计[J]. 西安理工大学学报,1998,4(4):369-372.

[2] 彭虹. 大坝变形监测自动化中的几个问题[J]. 大坝与安全,2007(1):34-37.
[3] 彭虹. 再谈变形监测自动化中的几个问题[J]. 大坝与安全,2008(5):22-28.
[4] 彭虹. 三谈变形监测自动化中的几个问题[J]. 大坝与安全,2011(2):17-23.
[5] 王志远. 混凝土坝观测设计中的若干问题[J]. 大坝观测与土工测试,1999,23(1):45-47.
[6] 富春江大坝第三次安全定期检查大坝监测资料分析报告[R]. 南京:国电自动化研究院大坝及工程监测研究所,2005.
[7] 青铜峡水电站观测资料延长期补充分析报告:1984—1989 年[R]. 南京:能源部南京大坝观测资料分析中心,1990
[8] 韩世栋,李凤珍,章赢. 青铜峡大坝电站坝段水平位移监测资料分析[J]. 黑龙江水专学报,2007,34(2):32-34.
[9] 刘观标,王志远,罗昌. 大化大坝监测系统更新改造及自动化系统设计[J]. 水电自动化与大坝监测,1998,22(5/6):4-7.
[10] 大化水电站大坝原型观测资料分析总报告[R]. 南京:能源部南京大坝观测资料分析中心,1993.

(收稿日期:2012 - 08 - 29 编辑:熊水斌)

[4] 肖富仁. 高水头泄水建筑物泄洪消能设计思路探讨[J]. 水电站设计,2008,24(4):6-10.
[5] 李琳,葛旭峰,谭义海,等. 小石峡水电站溢洪道消能工优化试验[J]. 水利水电科技进展,2011,31(4):77-81.
[6] 尹志刚,左战军,刘春友,等. 若干拱网消能工与普通消力池工程实例的经济分析[J]. 水利经济,2008,26(2):30-32.
[7] 李中枢,杨敏. T 形墩消力池的水力特性与体型研究[J]. 水利学报,1995,26(3):28-39.
[8] 吕宏兴,裴国霞,杨玲霞. 水力学[M]. 北京:中国农业出版社,2002:233-258.
[9] 艾克明,刘昭然,宋向宁. T 型墩消力池的研究与应用[J]. 水力发电学报,1997(4):30-42.
[10] 艾克明,刘昭然,宋向宁. T 型墩消力池的水力设计[J]. 湖南水利,1997(1):8-11.
[11] 刘昭然,郭静霞,王雪莉. 三江口溢流坝 T 型墩消力池的试验研究[C]//泄水建筑物消能防冲论文集. 北京:水利水电出版社,1980.
[12] 刘文华. 大变幅流量下溢洪道水力特性试验研究[D]. 石河子:石河子大学,2010.

(收稿日期:2012 - 03 - 19 编辑:骆超)