

# 低佛氏数宽尾墩水跃 消能问题试验研究\*

吴建平 吴桢祥 刘国昌

(郑州工学院水环系)

**摘 要:** 在低坝或低佛氏数水跃消能中, 宽尾墩的应用使水流结构发生了巨大变化。黄河大峡水电站溢洪道宽尾墩消能方案研究中, 这一情况非常明显。这一特有的水流形态可称之为宽尾墩水跃。本文首先对宽尾墩水跃的机理进行了定性描述, 并且对宽尾墩水跃中几个关键问题进行了论述: 通过波浪要素的量测, 分析了宽尾墩对水跃的跃后波浪的抑制作用; 通过流速和紊动强度的量测, 计算, 分析了宽尾墩水跃后紊动强度分布与消能效率; 借助压力传感器和一套分析处理系统, 揭示了宽尾墩水跃消力池底板脉动荷载的变化规律。实验证明: 与高坝宽尾墩消能相比, 宽尾墩在低坝消能中同样十分有效。在低坝上采用墩—池结合的消能型式, 可以有力地抑制下游波浪, 稳定消能水体, 调整流速分布, 减小下游紊动强度增加低佛氏数水跃消能的消能率, 减轻建筑物下游的冲刷。当然, 在具体应用这一消能型式时, 还要考虑工程涉及到的其他问题。

**关键词:** 底流消能, 低佛氏数, 宽尾墩 (消力池)

**中图分类号:** TV135

黄河大峡水电站溢洪道位于枢纽的左侧, 采用底流消能型式。溢流坝为 WES 曲线型低堰, 三孔过流, 最大流量  $6156\text{m}^3/\text{s}$ , 设计流量,  $3927\text{m}^3/\text{s}$  堰高 20.5m, 上下游最大水位落差 17m, 单宽流量 (最大) 为  $150\text{m}^3/\text{s-m}$ , 佛氏数为 3-4, 属典型的低佛氏数水跃消能问题。室内试验说明, 水跃消能不够充分, 消力池波浪汹涌, 跃后波严重且传播甚远, 下游流速分布也不理想, 冲刷严重。因此, 需要进一步研究低坝低佛氏数水跃的消能问题。

这里, 宽尾墩作为一种首选的方案进行了研究。本文基于部分水槽试验和单体水工模型试验的资料, 对低坝宽尾墩工程应用中的几个问题进行了初步的探讨, 当然尚有某些问题有待进一步研究。

\* 收稿日期: 1992-09-06

## 1 低坝宽尾墩水跃的特点

底流消能的核心是水跃。水跃凭借巨大的横轴大旋滚加强水流内部的剪切、涡动和能量耗散达到消能的目的。从紊流力学的基本原理可知, 能量耗散主要决定于尺度较小的涡体的形成和发展。因此, 要提高消能效率, 必须加强水体的紊动和混掺、减小涡体的尺度以增加粘性耗散。低堰或低佛氏数宽尾墩水跃, 可以相当圆满地完成这一任务。

人流条件的改变是形成宽尾墩水跃的先决条件。一般来说, 低堰宽尾墩的位置已接近溢流堰反弧段的末端, 水流出宽尾墩后, 由于下游水位的影响, 已没有明显的水翅、水冠、气囊、气袋, 水流通过宽尾墩闸室, 水面逐渐壅高, 表面呈凹形, 在闸孔出口形成一道窄而高的水股(随宽尾墩收缩比 $\beta$ 不同而异), 在闸墩后形成无水区(或静水区), 从而改变了底流水跃消力池的入流条件: 由通常的偏平连续片状水舌入流变为数个窄而高的孤立水股入流, 这给宽尾墩水跃的强化消能创造了有利条件:

1.1 由高速水流的激波作用, 表面卷曲的窄高水股冲入消能水体, 明显地增加了消力池中的掺气浓度。

1.2 在窄高水股淹没射流情况下, 水体中的强剪切面和剪切强度增加, 有利于小尺度涡的形成和发展。

1.3 窄高水股代替了偏平状水舌, 使二元水跃那种横轴大旋涡失去产生条件, 相反, 竖轴剪切涡和横轴小尺度涡发展并加强。

1.4 形成横向对撞流态, 沿水流方向的纵轴涡发展。窄高水股出闸室后, 在重力和惯性力作用下迅速沿扇面形向两侧扩散。当相邻两孔的扩散水流相遇后, 形成猛烈的对撞, 之后向上卷曲呈螺旋状前进, 使纵轴涡发生发展。相撞水流互相反射, 形成复杂的流势。

纵观以上几点, 可知宽尾墩水跃与通常说的二元水跃相比, 其水流结构的主要特征是非连续的窄高水股淹没射流诱发出尺度较小、相位不同的剧烈的横轴、竖轴、纵轴的三向涡体, 这些涡体的互相作用, 极大地改变了二元水跃的紊动结构, 这必然有利于宽尾墩水跃的消能作用, 提高其消能效率。

如果说下泄水流的有害能量分别蕴藏于时均动能、紊动动能、波动能之中, 那么, 研究宽尾墩水跃的消能效果及其他工程应用问题, 就必然涉及波浪、紊动和边界压力脉动等诸问题。

## 2 宽尾墩水跃的波浪特性研究

借助波高仪(KGY-5A)—磁带记录机(MR-30C)—微处理机(DPS—85)系统对跃尾(池末)和下游岸边的波浪进行了测量。试验分别对直尾墩和宽尾墩两种情况, 在各级流量下进行。宽尾墩的收缩比, 采用了 $\beta=0.72$ 、 $0.6$ 和 $0.5$ 三种。对每种情况分析了浪高的最大值、最小值、平均值和均方根值以及波浪的频率特性。下表仅只给出均方根波高的量测结果(如表1)。

表 1 均方根波高值

单位: 米

流量( $\text{m}^3/\text{s}$ )	测 点	平尾墩	$\beta=0.72$	$\beta=0.6$	$\beta=0.5$
6156	1	1.09	0.77	0.61	0.46
	2	0.49	0.32	0.25	0.30
5562	1	1.04	0.68	0.52	0.38
	2	0.42	0.29	0.21	0.23
3927	1	0.75	0.47	0.40	0.31
	2	0.37	0.21	0.23	0.23

表列数据十分明显地表明,低坝上采用宽尾墩与消力池结合的消能方案,在抑制低佛氏数水跃引起的巨大波浪方面是十分有效的。

从四组测量结果的分析可知,消力池末端断面即测点 1 的均方根浪高随宽尾墩的收缩比减小而减小,也就是说,宽尾墩收缩比越小,消力池内消波作用越大。如流量为  $6156\text{m}^3/\text{s}$  时,无宽尾墩均方根浪高为 1.09m,且水流流态不稳定,有阵发性大浪。当采用收缩比为 0.72 的宽尾墩时,均方根浪高减小到 0.77m。若收缩比减小到 0.5,则均方根浪高减小到 0.46m,比无宽尾墩时减小了 1.4 倍,可见宽尾墩的消波效果极为显著。

从消力池后下游某断面测点 2 浪高来看,流量为  $6156\text{m}^3/\text{s}$  时,无宽尾墩时均方根浪高为 0.49m,当采用收缩比为 0.6 的宽尾墩时,均方根浪高为 0.25m,减小近一倍。可见宽尾墩能大幅度的减小下游浪高。与消力池内均方根浪高规律不同,下游均方根浪高的变化,并不总是随着宽尾墩收缩比减小而减小。从实测资料可知,当收缩比为 0.5 时,下游测点 2 均方根浪高要比收缩比为 0.6 时的均方根浪高稍大或基本相同。为使下游河道的浪高较小,选取适当的收缩比是重要的。

若以式  $\text{Flux} = 1/16 \cdot \rho g \Delta^2 c$  计算波能流,则宽尾墩水跃跃后波能比二元水跃的相应值相对减小  $1 - (\Delta_k / \Delta)^2$ ,若以流量  $Q = 6156\text{m}^3/\text{s}$  的情况计算,此时  $\Delta = 1.09\text{m}$ ,  $\Delta_k = 0.46\text{m} (\beta = 0.5)$ ,则宽尾墩的跃尾波动能量比直尾墩波动能量减小百分之八十二,这是一个不小的数字。

### 3 压力脉动

在消力池底板中线上安装 5 个压力传感器,各测点距消力池前缘(收缩断面)距离分别为 3.25m, 21.00m, 35.40m, 53.00m, 75.00m。测量无宽尾墩和宽尾墩收缩比分别为 0.72、0.6 三种方案,流量分别为  $6156\text{m}^3/\text{s}$ 、 $5562\text{m}^3/\text{s}$ 、 $3927\text{m}^3/\text{s}$  三种情况下的压力脉动。通过“压力传感器—动态应变仪—磁带记录仪—计算机”测量仪器系统进行测量和计算分析,测量结果绘于图 1 和图 2。图中  $\beta$  为脉动压力系数,  $\beta = \sigma / (v^2 / 2g)$ ,  $\sigma$  为脉动压力均方根,  $L_j$  为水跃长度,  $x$  为测点到收缩断面距离。下面分别讨论宽尾墩对脉动压力系数和脉动压力均方根的影响。

### 3.1 脉动压力系数

在直尾墩情况下, 脉动压力系数是先迅速增大, 约在  $0.35L_j$  处达到最大值 0.11, 然后又迅速减小, 在  $0.5L_j$  处达到最小值 0.03。在  $(0.5 \sim 0.8)L_j$  之间, 脉动压力系数又稍有增大,  $0.8L_j$  以后, 基本在 0.04 处波动。如图 1 (a) 所示。从图中还可以看出, 流量为  $3927\text{m}^3/\text{s}$  时的脉动压力系数比最大流量  $6156\text{m}^3/\text{s}$  时要大。主要因为无宽尾墩时跃前断面佛氏数在各种流量时非常接近, 而最大流量时下游水位较高, 池内淹没度比  $3927\text{m}^3/\text{s}$  时大, 从而引起最大流量时脉动压力系数减小。另外, 消力池内水面波动较大, 也会影响脉动压力的变化。从总体趋势分析, 本文测量成果与文献介绍的一致。

在宽尾墩收缩比为 0.72 时, 脉动压力系数的沿程变化规律与直尾墩类似, 但幅值不同, 脉动压力系数的最大值为 0.135, 相应于流量为  $3927\text{m}^3/\text{s}$ 。由于加宽尾墩之后, 使过流宽度减小, 水面升高, 流速增大, 使消力池内水跃淹没度减小, 脉动压力系数增大。

在宽尾墩收缩比为 0.6 时, 脉动压力系数的变化趋势基本与前述相同, 也是先迅速增大, 后又迅速减小, 大约在  $0.35L_j$  达到最大值。

有无宽尾墩, 脉动压力系数最大幅值不同, 宽尾墩体型, 收缩比不同, 脉动压力系数幅值也不同。但最小幅值比较接近, 约为 0.03。无宽尾墩时脉动压力系数的最大值为最小。其原因就在于宽尾墩改变了水流入池条件, 形成射流, 也改变水跃的旋涡结构, 消力池内淹没度减小, 则脉动压力系数随之增大。

### 3.2 脉动压力均方根

从消力池底板脉动压力均方根分析, 其沿程变化规律大致与脉动压力系数的变化规律相同。脉动压力均方根最大值发生在测点 3 附近, 如图 2 所示。宽尾墩收缩比为 0.72 时, 最大均方根值最小。其原因是宽尾墩改变了旋滚的几何尺度, 自由剪切层发生变化, 水面波动减小, 从而使均方根的最大值减小。与直尾墩相比, 可以减小均方根最大值 25%。

不同的收缩比, 脉动压力均方根值不同。从试验结果分析, 收缩比越小, 脉动压力均方根不一定随着减小, 有时还可能增大; 各种条件下, 采用收缩比为 0.72 的宽尾墩时,

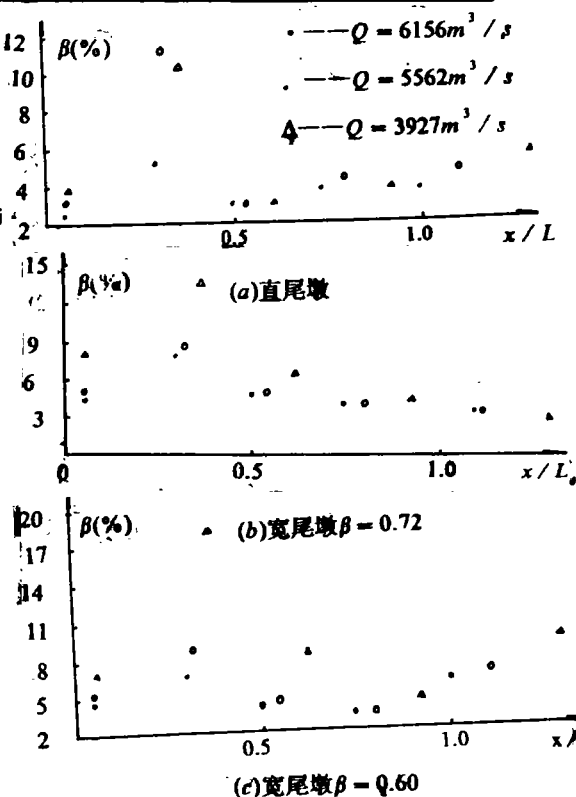


图 1 消力池底板脉动压力系数

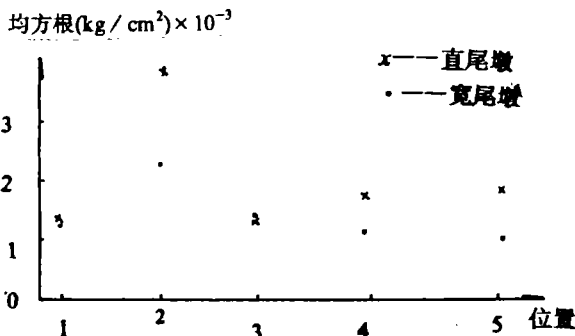


图 2 消力池脉动压力均方根

脉动压力均方根最大值为最小, 比直尾墩减小了  $1/4$ , 说明宽尾墩可以减小最大的脉动压力均方根, 但并不是任何一种宽尾墩都能做到。

脉动压力幅值受消力池体型、宽尾墩体型及收缩比、始扩点位置、水流速度、水头等因素影响, 比直尾墩更加复杂。从黄河大峡水电站溢洪道消力池底板脉动压力均方根值来看, 不管有无宽尾墩, 各流量下脉动压力均方根最大值都发生在测点 2 附近, 该点附近区域在设计消力池时应引起重视。总之, 有无宽尾墩, 消力池底板上脉动压力均方根, 脉动压力系数的沿程变化趋势接近, 但宽尾墩体型和收缩比选取适当, 就可以减小底板上的脉动压力, 从而减小冲击荷载的作用。

#### 4 紊动强度衰减规律及消能效果

应用南京水利科学研究院生产的智能光电流速仪, 对各流量下有无宽尾墩情况的下游流速进行大量测量。测量时取采样时间为 1 秒, 间隔时间为 0 秒或 1 秒, 则每次时间约为 2 秒或 3 秒, 每个测点采样 100 次左右。根据流速脉动的低频特性, 本测量方法不会造成很大偏差。文献[5]曾用激光流速仪进行连续测量, 通过计算对比, 说明测量结果接近实际。

将各组测量数据输入计算机, 计算各点紊动强度和垂线平均紊动强度, 计算用公式为:

$$\tau = \sqrt{\sum (u_i - \bar{u}_i)^2 / N} / \bar{u}_i$$

$$\tau_p = \int_0^h \tau u_i dy / (\bar{u}_p h)$$

式中  $\tau$  —— 点紊动强度  
 $\tau_p$  —— 垂线平均紊动强度  
 $u_i$  —— 瞬时流速

$\bar{u}_i$  —— 时均流速  
 $\bar{u}_p$  —— 垂线平均流速  
 $h$  —— 水深  
 $N$  —— 采样点数

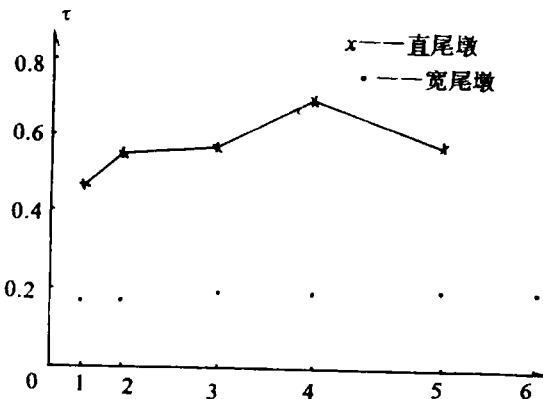


图 3 底部紊动强度  $Q = 3927 \text{ m}^3/\text{s}$

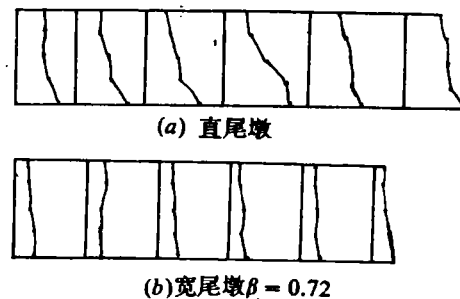


图 4 紊动强度断面分布  $Q = 3927 \text{ m}^3/\text{s}$

将测得底部紊动强度、垂线平均紊动强度、垂线上紊动强度分布等分别绘在图上。

加收缩比为 0.72 的宽尾墩后, 使底部紊动强度减小, 如测点 1, 从无宽尾墩的紊动强度 0.46 减小到有宽尾墩的 0.1667, 测点 2 从 0.55 减小到 0.1721, 测点 3 从 0.56 减小到 0.2019, 测点 4 从 0.69 减小到 0.195, 测点 5 从 0.5695 减小为 0.2104 (相应流量  $3927\text{m}^3/\text{s}$ )。从底部紊动强度的衰减过程来看, 在直尾墩情况下, 由于下游水位较高, 消力池内水跃淹没度偏大, 消能不充分, 水跃长度增加, 并使池后发生二次水跃, 使测点 4 的紊动强度达到最大值, 之后逐渐减小。测得紊动强度值过大, 有点出乎人们意料。在宽尾墩情况下, 出闸室水流形成淹没射流, 改善消力池内水跃结构, 抑制平轴大尺度旋涡的产生, 形成平轴、纵轴、竖轴三个方向的小尺度破碎旋涡, 水流掺气量剧增, 消能比较充分, 水跃跃后断面底部紊动强度及下游底部紊动强度比直尾墩大大减小, 基本在 0.2 左右。如图 3 所示。

从紊动强度的垂线分布来看, 直尾墩情况为上小下大, 与流速分布类似, 尾底流型流态, 如图 4 所示。而在宽尾墩情况下, 跃后垂线紊动强度分布比较均匀, 各断面分布相近, 且紊动强度值减小。与直尾墩相比, 宽尾墩消能充分, 流态良好, 有利于上下游水流的衔接, 特别是底部紊动强度减小, 对下游河床的消能防冲非常有利。但当流量较小时, 有无宽尾墩, 底部紊动强度减小不明显, 如图 5 所示, 紊动强度的断面分布如图 6 所示变化不大, 这可能是低堰上宽尾墩水流的特性决定的。

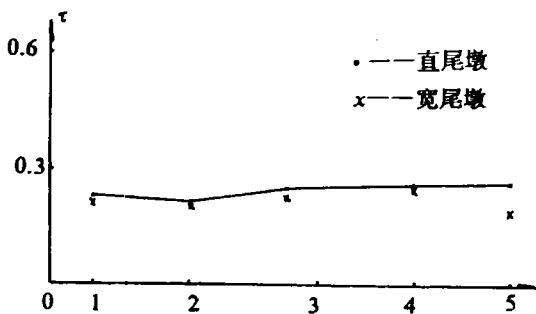


图 5 底部紊动强度  $Q=2523\text{m}^3/\text{s}$

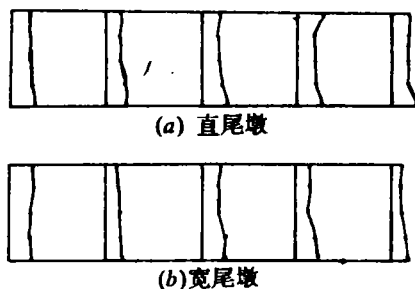
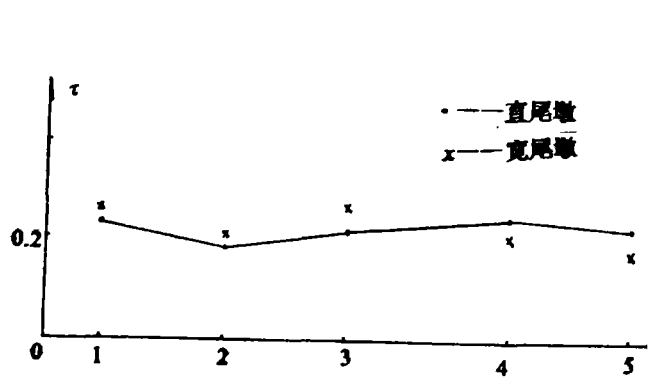
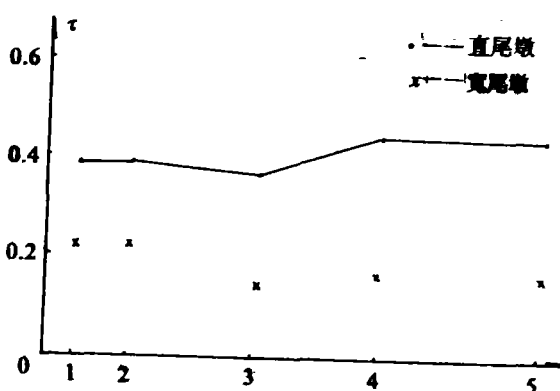


图 6 紊动强度断面分布  $Q=2523\text{m}^3/\text{s}$

从垂线平均紊动强度的沿程变化分析, 如图 8 所示, 在直尾墩情况下, 垂线平均紊动强度在跃后断面开始逐渐减小, 然后由于水流二次水跃的影响, 使垂线平均紊动强度又有所增大, 最后基本稳定在某一数值。在宽尾墩情况时, 水流出消力池之后, 垂线平均紊动强度迅速减小到 0.14, 之后基本稳定在该值。与直尾墩相比, 垂线平均紊动强度值减小很多, 说明宽尾墩水跃消能相当充分。与底部紊动强度一样, 当流量较小时, 平均紊动强度在有无宽尾墩时相差不大, 如图 7 所示。

图 7 垂线平均紊动强度  $Q=2523\text{m}^3/\text{s}$ 图 8 垂线平均紊动强度  $Q=3927\text{m}^3/\text{s}$ 

从最大流速和断面流速分布看，宽尾墩改变了水流进入消力池的条件和消力池中水流结构，使跃后流速分布由底流型流态，改变为面流型流态，断面最大流速减小，断面分布趋于均匀。如流量为  $3927\text{m}^3/\text{s}$  时，直尾墩情况下最大流速达  $8.06\text{m}/\text{s}$ ，超过抗冲流速。当采用收缩比为 0.72 宽尾墩时，最大流速降为  $7.46\text{m}/\text{s}$  当收缩比为 0.3 时，最大流速为  $6.75\text{m}/\text{s}$ ，比直尾墩减小 16%，底部流速也同样减小，流速分布的变化可以从动能修正系数的大小说明，直尾墩时某断面动能修正系数为 1.24，采用宽尾墩，同一断面同流量下的动能修正系数减小到 1.09，说明流速分布更趋均匀。另外，当上游来水不对称时，采用宽尾墩与消力池结合的消能型式，可以调整下游断面流速分布，减小甚至避免上游来流的不对称对下游水流的影响。

可见，低坝上的宽尾墩，由于宽尾墩水跃消能充分，流态良好，从而减小底部紊强，垂线平均紊动强度和底部流速，调整流速分布和紊强分布，必然减轻或避免下游河床的冲刷。

动床试验结果进一步证实以上紊强测量。选取粒径  $0.7\sim 1.0\text{cm}$  的砾石作为试验冲料，进行局部动床冲刷模拟试验。当流量为  $5562\text{m}^3/\text{s}$  时，直尾墩情况下下游河床冲刷最大深度为  $1.5\text{m}$ ，当采用收缩比为 0.72 的宽尾多时，下游最大冲刷深度减小为  $0.5\text{m}$ ，减小冲深  $1.0\text{m}$ 。当流量为  $6156\text{m}^3/\text{s}$  时，直尾墩的最大冲刷深度为  $4\text{m}$ ，采用收缩比为 0.72 宽尾墩时，最大冲刷深度仅  $1\text{m}$ ，减小了  $3.0\text{m}$ 。说明低坝上宽尾墩对提高消能效率，减小下游冲刷是行之有效的。

## 5 结束语

宽尾墩对低佛氏数水跃消能方面的明显作用是由于它大大改变了二元水跃的水流结构，从而使它在消波、消能防冲、稳定等方面改善了低佛氏数水跃所存在的一系列问题。实践证明，宽尾墩用于像大峡水电站溢洪道这种典型的低佛氏数水跃的消能问题应该说是可行的。由于篇幅所限，本文具体涉及大峡溢洪道本身的来流不对称问题对宽尾墩水跃的影响，以及对下游水流非对称扩散问题的影响，也未涉及宽尾墩对过流能力的影响以及宽

尾墩本身的体形和受力等诸多方面的问题, 这些都有待进一步研究和探讨。

### 参 考 文 献

- (1) 吴桢祥, 吴建平. 黄河大峡水电站溢洪道单体水工模型试验报告. 郑州工学院水环系. 1990年7月.
- (2) 张声鸣. 消力池护坦板上水跃脉动压力的特性分析. 长江科学院院报. 1989年第2期
- (3) F.A.罗切尔等. 水跃消力池. 人民长江. 第21卷第10期
- (4) 刘永川等. 宽尾墩在安康水电站溢流坝上的应用. 西北水利科学研究所. 1983年8月
- (5) 罗国杰. 低坝上宽尾墩水力特性研究. 郑州工学院水环系硕士论文. 1991年5月

## Laboratory Research on Jump Dissipating Energy with Wide-tail-piers Under Low Froude Numbers

Wu Jianping    Wu Zhenxiang    Liu Guochang  
(Zhengzhou Institute of Technology)

**Abstract:** In present paper, qualitative description on mechanism of hydraulic jumps with wide-tail-piers have been given firstly. Wave redution due to the wide-tail-piers has been analysed by using mearsured wave variables. Finally, both the distribution of trubulent strength and the ratio of damping have been investigated quantitatively, and the changing regularity of trubulent loads on the bottem board of stilling basins have been revealed by means of pressure sensors and a data processing system.

**Keywords:** Energy dissipation by hydraulic jump, Low Froude numbers, Wide-tail-piers (stilling basins)