大朝山水电站台阶溢流坝掺气减蚀问题的研究

尹进步,刘韩生,梁宗祥

(西北农林科技大学 水利与建筑工程学院,陕西 杨凌 712100)

[摘 要] 根据大朝山水电站表孔减压模型试验资料,结合原型观测有关资料,对台阶溢流坝掺气减蚀的有 关问题进行了分析研究。结果表明,利用堰面带小挑坎的宽尾墩过流形式,可以解决台阶面大单宽过流掺气减蚀问 题;同时也发现,由于缩尺效应问题的影响,现有减压试验方法和理论已不适应小比尺掺气水流的减蚀问题研究。

[关键词]	台阶溢流坝; 掺气浓	R度; 掺气减蚀; 空化; 频谱		
「中图分类·	号] TV 131. 3 ⁺ 2	[文献标识码] A	[文章编号]	1671-9387 (2005) 02-0137-06

台阶过水面上水流单宽泄量不超过 15 $m^{3}/(s \cdot m)$ 时,水舌沿台阶逐级下泄,在台阶面上形 成一个强烈的旋涡,促使水体剧烈紊动,表面大量掺 气,具有一定的消能作用,下游消能工规模和工程量 因此也得到减小。20世纪80年代美国修建柳溪坝 (Willow Creek Dam)时推出一种碾压混凝土新工 艺(RCC),结合碾压混凝土的施工过程,可以方便地 修建台阶,台阶式溢流坝也因此产生[1]。资料统计发 现,早期台阶溢流坝坝高均不足100m,台阶的单宽 过流量最大只有 $30 \text{ m}^3/(s \cdot m)$ 。如果坝高上升至百 米以上,单宽泄量超过100 $m^{3}/(s \cdot m)$,台阶坝面将 出现空蚀破坏,如我国丹江口水库利用施工预留台 阶泄洪超过 $100 \text{ m}^{3}/(s \cdot m)$, 汛后检查发现, 台阶出 现多处空蚀破坏[2]。如何解决台阶溢流坝大单宽泄 洪空蚀破坏问题, 是一个值得探索的问题。水东、大 朝山、索风营等国内一批建成或相继在建工程、采用 宽尾墩+ 台阶坝面+ 消力池的泄洪消能方案成功解 决了这一问题,其中水东和大朝山经过原型验证,取 得了许多宝贵资料。本研究在大朝山表孔台阶溢流 坝减压模型试验的基础上,对比原型有关资料,对台 阶溢流坝大单宽过流掺气减蚀问题进行了分析,以 期为台阶溢流坝掺气减蚀问题的解决提供参考。

1 工程概况^[3]

2

大朝山水电站位于澜沧江中下游,是澜沧江规 划开发中的梯级电站之一。工程以发电为主,电站装 机总容量为1350MW,坝高111.0m,总库容9.4亿 m³。工程枢纽由碾压混凝土重力坝、右岸地下厂房 主变室、尾水调压室和尾水隧洞等组成。泄洪系统采 用坝顶5个泄水表孔、左右岸3个排沙底孔的联合泄 洪方式。其中5个表孔均采用宽尾墩+台阶坝面+ 消力池的联合消能形式,台阶溢流坝纵剖面如图1 所示。



图1 台阶溢流坝剖面图

Fig. 1 Sectional drawing on stepped spillway

宽尾墩底部堰面上设一小挑坎, 宽尾墩后接44 个台阶, 其中第一个台阶高度为2m, 第二、三个台 阶高度为1m, 前3 个台阶的宽度均为0 78m, 第四 个台阶以下共40 个高宽为1 0m ×0 7m 的标准台 阶, 最后一个台阶为1 0m ×0 35m。正常蓄水位为 899 0m, 对应的堰面单宽泄量为 142 7 m³/(s·m), 校核水位为905 89m, 对应的堰面单宽 泄量为 237.8m³/(s·m), 无论其坝高还是单宽泄 量, 在已建台阶溢流坝工程中均属第一。



2 减压模型试验及分析

减压模型试验的目的是通过掺气浓度、空化噪 声等测试结果分析,对台阶坝面过水可能产生的空 化问题进行研究。取5个表孔中1孔在减压箱中进行 试验,模型比尺为1 40。

2.1 模型设计

模型按重力相似准则设计,同时必须满足减压 试验模型与原型水流空化数相等的要求^[4]。根据水 流空化数计算式,减压箱内真空度表达式及减压试 验相似要求,推导出试验相似真空度计算式为

$$\eta_n = 1 - rac{h_{ap} - h_{vp}}{L_r \bullet h_a} - rac{h_{vm}}{h_a} \circ$$

式中, *ŋ*, 为相似真空度; *hap*为原型大气压强, 与当地 海拔高度有关, 计算式为 *hap* = 9.8(10.33-原型高 程/900) (kPa); *hvp*, *hvm* 分别为原型、模型的水气化 压强(kPa); *ha* 为试验室大气压强; *L*, 为模型长度比 尺。

2 2 测试及结果分析

试验对台阶面掺气浓度、空化噪声等相关内容 分别进行测试。

2 2 1 掺气浓度 掺气浓度用目前国内试验中比 较常用的 848 型电阻式掺气浓度仪进行测试,为了 便于近底掺气浓度的准确测量,在不改变其测试参 数的前提下,对其探头的支撑结构进行改装。分别在 15#,20#,25#,31# 台阶的孔轴线方向布置了4 个掺气浓度测点,模型上每个测点测试位置均在距 离台阶面 0 2~ 0 6 cm 处,以保证所测结果基本为 近底掺气浓度。测试是在常压条件下进行,表1 为其 中两个工况的测试结果。

	表1 掺气浓度分布表		
Table 1	Distribution of air concentration		

Table T Distribution of an concentration				
开度 Opening	工况 Item	台阶 Step	高程/m A ltitude	掺气浓度/% A ir concentration
		15	843 75	5.2
全开	H = 889.0 m	20	838 75	9. 9
Full	h= 827. 0 m	25	832 75	9. 6
		31	826 75	6 4
		15	843 75	15. 9
全开	H = 889.0 m	20	838 75	23.0
Full	h= 833 0 m	25	832 75	23.2
		31	826 75	19.0

由于小挑坎的作用,在台阶初始段形成 7~10 个台阶不触水的空腔。宽尾墩水舌空中横向收缩,又 产生水舌纵向临空面。与空气的充分接触使水舌的 掺气量大幅度提高。低水位小流量时,最小掺气浓度 超过 5%;中高水头大泄量的掺气浓度比较大,基本 都在10%以上。校核水位时,尾水位以上掺气浓度更 大,最大到30%以上。尾水位以下,受尾水影响,掺气 浓度较小,但最小也超过5.5%。完全满足掺气减蚀 的要求。

2 2 2 空化测试 (1)测试原理^[5]。水流发生空化 时,空化泡的形成、发展和溃灭过程中均产生与一般 水流流动噪声不同的噪声辐射,辐射出的噪声即空 化噪声。根据水声学原理可知,该噪声是一种典型的 体积声源,而且基本是单极子声源,其声辐射能量主 要集中在空泡溃灭阶段,约为空泡总势能的30%~ 50%。因此,在高频范围内,排除背景噪声后,对水流 空化噪声的声强,频谱等特性进行测试分析,可判断 水流是否有空化产生,以及产生空化的强度。

(2)测试仪器。噪声测试仪器采用丹麦B&K 公

司生产的频谱分析系统,包括8103型水听器 2010 型外差式频谱分析仪和2308型X-Y 绘图仪,系统工 作流程如图2所示。8103型水听器将接受到的水流 空化噪声信号转化为电压信号,输入2010型频谱分 析仪进行分析处理,最后通过2308型绘图仪在确定 的频段范围内输出噪声频谱图。



(3)分析方法。对噪声频谱图,分别采用以下两种方法进行分析。方法一,通过噪声频谱图的谱峰、

谱差、频域等特性,分析水流是否有空化产生。以往
试验结果表明^[6,7],不同过流条件下水流空化噪声谱
有如下特征: 声压级会突然增加,有明显的峰值产
生,高频部分声压级上升幅值一般是 10~ 20 dB;
存在优势频率,范围较宽。

方法二, 空化噪声谱是由一系列随机脉冲产生 的连续谱构成的, 对连续谱进行能量积分, 其高频段 声压能迅速增加是空化产生的显著特点^[8]。具体方 法为: 根据不同真空度下的噪声谱进行积分计算, 得 到相应噪声强度*I*, 绘制*I* 与相对真空度*\\/\\/\\/\\/*, 的关系 曲线, 其中**, 为相似真空度, **为测试真空度。依据 曲线中噪声强度开始大幅度上升的拐点处 *\\/*, 值 与1 的关系, 判断原型水流是否发生空化。 (4)测试结果分析。为了对尾水位上、下水流都进行空化测试,分别在1#测点(28~32#台阶、 ∇832 7~827.7m)和2#测点(38~42#台阶、 ∇822 7~817.7m)处安装水听器测试盛水盒,对应水听器分别为1#,2#。由于水盒盛满水后,悬挂其中的水听器能捕捉与水盒相接的5个台阶上出现的噪声,因而保证了尾水位以上噪声一般能被1#水听器接收,尾水位以下噪声一般能被2#水听器接收。

图3 是工况4 两个测点相似真空度频谱声压级 图,图4 分别为相应*I~ 叭叭* 关系曲线。图3 与图4 清 楚地表明,1# 测点有空化发生,而2# 测点未发生空 化。









对所有测试进行汇总,结果见表2。由表2可以 看出,尾水位以下,由于尾水的水垫消能减速作用, 水流一般不发生空化。尾水位及其以上,在中高水位 大泄量时无空化发生,只有中低水位,流量不大时,

7

可能发生空化。根据试验实测压强与流速计算可得 水流空化数,将空化数与噪声分析结果进行对比,可 得到水流初生空化数约为0 291。

		Table 2 Summary	of testing cavitation	n	
工况 Item	闸门开度 Gate opening	上游水位/m Head water level	下游尾水/m Downstream water level	空化数 <i>σ</i> Cavitation coefficient	噪声分析结果 The result of spectrum analysis
1	全开 Full	886 0	825 0	0 191	空化 Cavitation
2	全开 Full	889. 0	827. 0	0 182	空化 Cavitation
3	6 0 m	894.0	828 0	0 265	空化 Cavitation
4	6 0 m	899. 0	833 0	0 291	初生空化 Initial avitation
5	全开 Full	894 0	828 0	0 223	空化 Cavitation
6	全开 Full	899. 0	833 0	0 395	未空化 No cavitation
7	全开 Full	905.9	844 4	6 601	未空化 No cavitation

表2 空化测试结果汇总

223 试验小结 模型掺气浓度测试结果表明.台 阶溢流坝掺气方法设计合理,通气顺畅,台阶面水流 紊动剧烈,近底部掺气浓度较高,不会发生空化。但 空化测试的噪声分析结果表明. 一些工况有空化产 生,即原型有可能出现空蚀破坏。掺气浓度与空化测 试结果出现矛盾,台阶能否发生空蚀破坏,只能依据 工程实际运行结果进行分析。

建筑物先后进行过多种工况的运行, 2002-06 又进 行了水力学原型观测试验,取得了一些有价值的资 料。通过对该资料及实际运行工况的统计发现, 与上 述空化测试结果汇总表中工况1~6相近的运行工 况,在原型中均出现过,如表3所示。2003年汛前进 行了抽水检查,发现台阶坝面未发生空蚀破坏。表4 是原型观测掺气浓度测试结果汇总,测试工况为 3# 孔全开, 库水位为899.0m, 即表2 中的工况6。从 表 4 可以看出, 原型台阶面的掺气浓度在 30%~ 50%,比较大。

原型试验及运行^[9] 3

大朝山水电站自2001年底蓄水开始,表孔泄洪

表3 原型泄水统计

Table 3 Summary of discharge on prototype

时间 Date	库水位/m Reservoir level	泄水统计 Discharge summary	
8月August	885.5	1~ 5# 表孔开,全月运行。1- 5# gate opened for a month	
7 月中旬M iddle in July	889.69	1~ 5# 表孔开。1- 5# gate opened for about ten days	
9月下旬Late in September	895. 0	1~ 4# 表孔全开。1- 4# gate opened for about ten days	
6月20日 20th in June	899. 0	3# 表孔全开。3# gate opened for two hours	
6月20日 20th in June	899. 0	3# 表孔开6 0m。3# gate opening 6 0m for two hours	

表4 原型掺气浓度分布表

Table 4D istribution of air concentration on prototype				
台阶编号 No. of step	掺气浓度/% A ir concen- tration	台阶编号 Na of step	掺气浓度/% A ir concen- tration	
15#	32 0	26#	49. 5	
21#	39. 1	31#	37. 5	

模型与原型资料的对比分析 4

首先进行掺气浓度对比。表1中模型掺气浓度 约为表4原型掺气浓度的30%。从掺气减蚀机理分 析^[10],模型底流速大约4~5m/s,由于存在掺气比 尺效应问题,模型掺气浓度总比原型小,试验所测掺 气浓度比较合理。从数值上分析、模型掺气浓度基本 都在 5% 以上,完全可以满足消除空蚀破坏的要

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

求^[11], 即模型与原型掺气浓度的测试均可达到减蚀 的目的, 也比较客观的反映了原型与模型之间的关 系。

从空化角度对比分析。模型试验的所有结果必 须反映原型的实际情况,原型是对模型试验结果的 最直接、最真实验证。此处减压模型试验虽然测试发 现台阶面有空化发生,而原型没有空蚀破坏出现,即 模型所测空化并未真实反映原型。为了对这一问题 进行深入探讨,首先对空化发生过程中气泡内外压 强的发展进行分析。

根据热力学定律和空泡动力学原理可计算出空 泡溃灭时释放出的冲击压强*P* 与初始压强*P*。的关 系^[12], 如图5 所示。



图 5 空泡初试压强与溃灭冲击压强曲线

Fig 5 The curve of initial pressure & collap se pressure 图5 曲线说明, 当空泡初始压强P₀ 增加时, 空泡 的溃灭冲击压强P 快速下降。而提高空泡初始压强 的方法就是向水流掺气。水流掺气至空泡内, 使空泡 初始内压强增加, 延缓了局部压强降低至水汽化压 强的过程, 减小了空泡溃灭的冲击压强; 若掺气至空 泡外, 可对空泡溃灭产生的冲击波有减缓作用^[4]。 上述作用均可减小或消除水流对固体边壁产生的空 蚀破坏。 文献[13]总结了莫森、沃斯科维斯、拉斯马 森等通过不同试验方法得到的结果, 与上述规律基 本相同, 即水流掺气后, 水的含气量大于饱和含气量 时, 无论是空泡内含气还是空泡外含气, 水流的空蚀 破坏开始减轻, 掺气到一定程度时, 可消除空蚀破 坏。

原型水流流速超过20 m/s, 在台阶面上紊动度 大, 补气畅通, 促使台阶面形成强掺气水流, 水流掺 气浓度高, 具有消除空蚀破坏的作用。而模型试验 中, 水流流速约4~5 m/s, 不足7 m/s, 掺气能力在常 压条件下比原型小^[14]。减压条件下, 相似真空度高 达 95%, 无法正常通入空气, 水流挟带空气能力减 小, 致使水流掺气量难以达到大于饱和含气量的要 求, 发生空化成为必然。在试验中, 如果将模型比尺 不断放大, 则试验相似真空度随之下降, 水流挟气能 力逐渐提高, 达到某一比尺后, 水流挟气量开始大于 饱和含气量, 空化也就因此而减小或消除。这就是减 压试验的缩尺效应问题。本试验中, 缩尺效应使试验 结果与原型出现了质的差异, 因此本试验小比尺掺 气水流空化测试结果并未反映原型的真实情况。

5 结 语

模型试验与原型资料的对比分析表明,大朝山 水电站表孔堰面末端带小挑坎的宽尾墩掺气方式, 可以满足台阶面大单宽过流掺气要求,台阶面水流 掺气浓度随泄量增加而不断增加,解决了台阶溢流 坝大单宽过流掺气减蚀问题,分析结果同时表明,由 于缩尺效应的影响,如何利用现有减压试验方法和 理论,进行小比尺掺气水流的空化问题研究,有待进 一步探讨确定。

致谢:试验工作得到国电公司北京勘测设计研究院林可冀设计大师、韩立教授级高级工程师等人的支持与帮助,在此深 表感谢。

[参考文献]

- [1] 艾克明 台阶式泄槽溢洪道的应用状况浅析[A] 尹洪昌 泄水工程与高速水流2000 年版[C] 长春: 吉林科学技术出版社, 2000 1-9
- [2] 杨 敏, 膝显华, 任红亮, 等 阶梯溢流面的几个水力学问题[A]. 尹洪昌 泄水工程与高速水流 1998 年版[C]. 长春: 吉林科学技术出版 社, 1998 29-32
- [3] 林可冀,韩 立,邓毅国 大朝山水电站RCC 溢流坝宽尾墩——台阶式坝面联合消能工的研究及应用[J].水利水电勘测设计,2003,(1):
 1-14.
- [4] 陈椿庭,姜国干,李桂芬,等 水工模型试验M] 第2版北京:水利电力出版社, 1985. 371-377.
- [5] 尹洪昌,张志恒,陈忠儒,等. 泄水工程水力学M],长春:吉林科学技术出版社,2002 111- 154.
- [6] 卢泰山 龙羊峡水电站底孔泄水道减压模型试验报告[R] 陕西杨凌:水利部西北水利科学研究所实验中心, 1999.
 - © 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

- [7] 周宪政 用声学原理测空化噪声的有关方法及探讨[A] 刘清朝 水科学青年学术论文集[C] 北京:水利电力出版社, 1990 173- 178
- [8] 顾金海, 叶学迁 水声学基础[M]. 北京: 国防工业出版社, 1981. 4-19.
- [9] 林可冀,韩 立,邓毅国,等.大朝山水电站泄水建筑物初期运行情况[J].水利水电勘测设计,2003,(1):15-35.
- [10] 时启燧, 潘水波, 邵媖媖, 等 通气减蚀挑坎水力学问题的试验研究[J], 水利学报, 1983, (3): 1-12
- [11] 卡维什立柯夫 A T, 林加耶夫 萨扬舒申斯克水电站溢流坝水流掺气研究[A]. 长江水利水电科学研究院 高速水流译文集[C]. 北京:水利电力出版社, 1979. 138-140
- [12] 陈椿庭 高坝大流量泄洪建筑物[M] 北京:水利电力出版社, 1988 132-135.
- [13] 哈米特 F G 含气量对空穴初生、空穴性能和空穴蚀损的影响[A] 长江水利水电科学研究院 高速水流译文集[C] 北京:水利电力出版 社, 1979. 192-209.
- [14] 梁在潮,王道增 紊流挟气能力的研究[J]. 水利学报, 1982, (2): 24-31.

Study on the flow aeration to prevent caviation of stepped spillway for Dachaoshan Hydroelectric Station

Y IN Jin-bu, L IU Han-sheng, L IANG Zong-xiang

(College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A & FUniversity, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract Based on the data of the spillway depression model and the prototype for Daochao shan Hydroelectric Station, this paper analyses the problem of flow aeration to prevent cavitation on stepped spillway. The results show that large flow aeration to prevent cavitation on stepped spillway can be solved by flaring gate pier with a small deflector. In the meantime, the present theory and method are not applicable for the study of small scale spillway depression model on account of scale effect

Key words: stepped spillway; air concentration; flow aeration to prevent cavitation; cavitation; spectrum