

三峡电站排沙孔工作门区及通气管道空化特性研究

姜伯乐,张 晖,杨江宁

(长江科学院 水力学研究所,武汉 430010)

摘要:针对三峡电站排沙孔工作门区及通气管道设计体型,通过减压模型试验研究了通气孔分流对高流速有压泄水段空化特性的影响。结果表明:在通气孔节制阀全开时,通气孔底部出口区会产生强烈的蒸汽型空化,而节制阀区无蒸汽型空化发生;在通气孔节制阀半开或全关时,上述两部位的空化强度大大降低,基本上无空蚀破坏的危险性。为保证高流速有压泄水建筑物安全可靠的运行,工程上要避免该部位出现分流设计。

关键词:水力学;三峡电站;排沙孔;分流;蒸汽型空化;气体型空化

中图分类号:TV131.32

文献标志码:A

文章编号:1001-5485(2013)08-0046-04

1 研究背景

三峡电站左、右厂房共设7个排沙底孔,工作闸门均设在出口段。由于排沙孔工作门水头高(最大工作水头超过80 m),门后有压段呈淹没射流流态,存在强烈的水流剪切区和大体积水流漩滚现象,空化及声振问题比较突出。为此,长江科学院曾开展了一系列的科学试验研究,研究成果表明:当闸门全开后,整个闸门段是免空化的;在闸门启、闭过程中,通气孔的通气效果明显,可满足门后需气量要求,在135 m水位条件下可使闸门区空化处于较弱状态,在150 m水位闸门区空化仍比较明显。因此,建议提升启、闭门速度并在门槽及其下游区域边壁表面采用抗蚀性较强的材料。

2003年6—7月间,三峡工程库水位蓄至135 m,对1[#]排沙底孔的水力学安全监测表明:在开门过程中($n=0\sim 0.8$),闸门后通气孔运行正常,风速小于60 m;在闸门开度 $n=0\sim 0.8$ 范围,闸门区有一定强度空化产生,但启闭机房未感觉到明显声振;在闸门开度 $n\approx 0.9$ 至闸门全开后,通气停止,通气孔口区域空化明显,空化强度较高,启闭机房感觉到明显声振,噪声级达116 dB。初步分析认为:排沙孔闸门全开后,因通气孔未按设计要求关闭,形成分流,而通气孔进口曲率过大,发生了空化和剧烈声振。

鉴于此,开展了减压模型试验,分析验证排沙孔全开条件下通气孔分流是否会引起强烈空化,并判

断通气孔分流条件下节制阀门关闭过程中是否引起空化问题,为制定详细的运行调度方案提供科学依据,也可为类似工程的设计提供依据。

2 模型设计

三峡电站左、右厂房共设7个排沙底孔,排沙孔进口底板高程90.00 m,出口底板高程60.50 m,出口段由闸门断面 $5\times 3.2\text{ m}^2$ 收缩至出口断面 $4\times 2.8\text{ m}^2$,8.2 m长的有压收缩段向离岸边方偏转0.79 m,整个排沙孔水平长度190 m;在工作门后的顶部设有2个直径80 cm的通气孔,通气孔进口轴线高程80.00 m,其中出口工作门区及通气孔布置体型见图1。

模型选取左厂房1[#]排沙孔,采用长度比尺 $L_r=28$ 的减压模型对排沙孔工作门区及通气管道体型的空化特性进行试验研究。模型全采用有机玻璃精制而成。排沙孔工作门区及通气管道各部位水听器布置见图1。

目前,关于空化发生、发展的判断,主要有2种方法:目测法和声学测量法^[1]。目测法在空化研究中被广泛地使用,可用于粗略判断空化形态和发展阶段。而声学测量法是空化研究的主要方法^[2],这种方法被广泛应用于工程研究中^[3-6]。

本模型试验采用噪声功率谱级差法来进行空化特性的判断分析,声谱级差值 $\Delta SPL = SPL_r - SPL_o$,其中 SPL_r 为所需相似气压下水流中总噪声谱级(谱形图中实线所示)。而 SPL_o 则为经检测确无空化发生

收稿日期:2013-05-06;修回日期:2013-06-21

基金项目:中央级公益性科研院所基本科研业务费专项项目(CKSF2012027/SL)

作者简介:姜伯乐(1973-),男,山东海阳人,高级工程师,主要从事水工水力学研究,(电话)027-82829902(电子信箱)jiangbl@mail.crsri.cn。

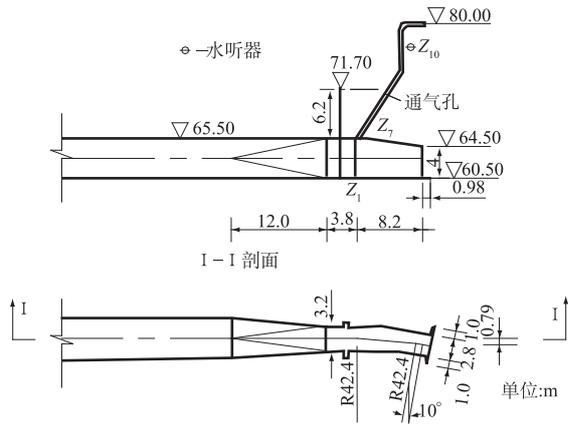


图 1 排沙孔工作门区及通气管道体型布置示意图
 Fig. 1 Layout of sediment-release orifices and aeration conduit

时的背景噪声谱级(谱形图中虚线所示),具体为试验过程中的环境噪声,具有低频率(一般 20 kHz 以下)特性。根据大量模型试验和原型观测资料,文献[7]建议将 ΔSPL 值达到 5 dB 作为空化初生的判别指标。当明显地出现某一类型空化时,相应频段上 ΔSPL 值将达到 10 dB 以上;当空化较弱,谱级差值 ΔSPL 介于 5 ~ 10 dB 之间,则视为空化初生阶段。

根据排沙孔运用水位条件,选取上游水位 150.0, 135.0 m, 下游水位 73.8, 67.5 m, 两两组合共 4 种水位组合,每种水位组合下进行 3 个试验工况:工况 1 为工作闸门全开,通气孔节制阀全开;工况 2 为工作闸门全开,通气孔节制阀半开;工况 3 为工作闸门全开,通气孔节制阀全关。具体试验工况见表 1。

表 1 试验工况表

Table 1 Working conditions in the test

水位组合	试验工况	上游水位/m	下游水位/m	工作闸门开度 n	节制阀开度 n
组合一	1	150.0	73.8	1.0	1.0
	2	150.0	73.8	1.0	0.5
	3	150.0	73.8	1.0	0.0
组合二	1	150.0	67.5	1.0	1.0
	2	150.0	67.5	1.0	0.5
	3	150.0	67.5	1.0	0.0
组合三	1	135.0	73.8	1.0	1.0
	2	135.0	73.8	1.0	0.5
	3	135.0	73.8	1.0	0.0
组合四	1	135.0	67.5	1.0	1.0
	2	135.0	67.5	1.0	0.5
	3	135.0	67.5	1.0	0.0

3 试验成果

3.1 流态

在淹没流工况下,当通气孔节制阀为全开时,两条通气管出口的水流在空中交汇,水流的落点距排

沙孔出口约 30 m。

在减压试验中,当通气孔节制阀为全开时,都可明显观测到通气孔底部出口区因发生强烈空化而产生的空化云,空化云长度的原型换算值可达 1 ~ 2 m。当通气孔节制阀半开和全关时,该处的空化云消失。

3.2 水下噪声及空化特性

模型共布置 3 个水听器,其中 Z_7 位于通气孔底部出口区域; Z_1 位于门槽区; Z_{10} 位于通气孔节制阀区域。各部位的水下噪声成果如下。

3.2.1 通气孔底部出口区

通气孔底部出口区的减压试验成果表明:在 4 种水位组合下,工况 1 条件下该处接收到的表征空化噪声信息的相对噪声谱级 ΔSPL 都超过 20 dB, $\Delta SPL_{max} \approx 40$ dB,表明该处附近产生了强烈的空化,这与原型水力学安全监测过程中观测到的该处发生了严重空化的结果一致;工况 2 条件下,该处接收到的相对噪声谱级 ΔSPL 明显降低, $\Delta SPL_{max} \approx 7$ dB,为空化初生阶段;工况 3 条件下,该处接收到的相对噪声谱级 ΔSPL 进一步降低, $\Delta SPL_{max} \approx 5$ dB,为空化初生。以上试验成果表明,当通气孔开始进水时,通气孔节制阀若能关至一半,通气孔底部出口区就不会发生较强的空化。

其中上游水位为 150.0 m、下游水位为 67.5 m 时,3 种不同工况下水听器 Z_7 在通气孔底部出口区所测水下噪声资料经处理如图 2 所示。

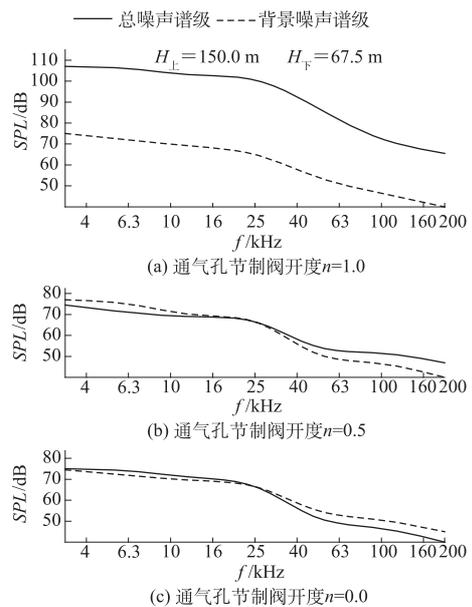


图 2 通气孔底部出口区水下噪声谱级
 Fig. 2 Spectrum level of underwater noise at the bottom of aeration conduit outlet

3.2.2 门槽区

门槽区的减压试验结果表明:在 4 种水位组合下,工况 1 条件下门槽区接收到的表征空化噪声信息的相对噪声谱级 ΔSPL 最大, $\Delta SPL_{\max} \approx 10 \sim 25$ dB,空化强度达发展阶段;工况 2 条件下,该处接收到的相对噪声谱级 ΔSPL 明显降低, $\Delta SPL_{\max} \approx 7$ dB,空化强度为初生阶段;工况 3 条件下,该处接收到的相对噪声谱级 ΔSPL 进一步降低, $\Delta SPL_{\max} \approx 5$ dB,为空化初生,即门槽区未发生较强的空化。

其中上游水位为 150.0 m、下游水位为 67.5 m 时,3 种不同工况下水听器 Z_7 在门槽区所测水下噪声资料经处理如图 3 所示。

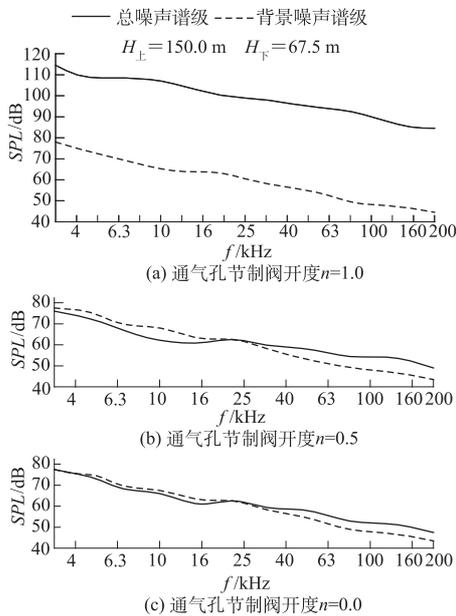


图 3 门槽区水下噪声谱级
Fig. 3 Spectrum level of underwater noise at the gate slot

通过分析门槽区与通气孔底部出口区的水下噪声谱级可知,二者噪声谱级的形状基本一致,且通气孔节制阀开度变化而变化的趋势也基本一致,但谱级差的量级要小,故门槽区的空化源可能来自通气孔底部出口区。

3.2.3 通气孔节制阀区

通气孔节制阀区的减压试验成果表明:在 4 种水位组合下,工况 1 条件下该处接收到的噪声谱级在低频段高于背景 20 ~ 40 dB,气体型空化达发展阶段,但随频率升高,相对谱级差衰减很快,在 80 kHz 以上高频段,相对谱级差衰减至 0 ~ 8 dB,蒸汽型空化的强度为初生阶段;在工况 2、工况 3 条件下,噪声谱级的背景高于或重合于相似真空度条件。可见,通气孔节制阀在过流条件下不会出现明显空蚀现象,但会引起剧烈声振。

其中上游水位为 150.0 m、下游水位为 67.5 m 时,3 种不同工况下水听器 Z_{10} 所测水下噪声资料经处理如图 4 所示。

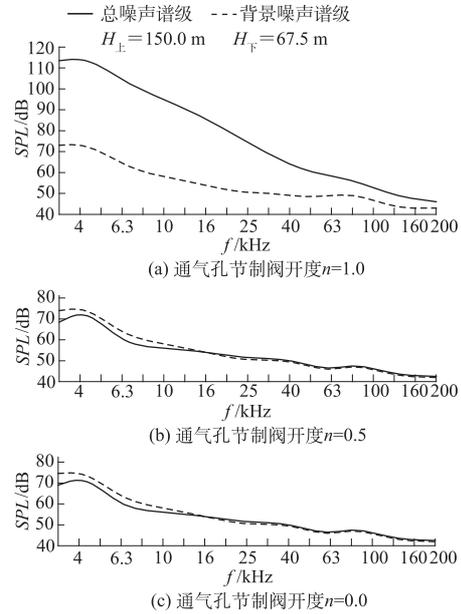


图 4 通气孔节制阀区水下噪声谱级
Fig. 4 Spectrum level of underwater noise at the control valve of aeration conduit

4 结论及建议

本文通过三峡电站厂房排沙孔工作门区及通气管道体型空化特性的研究,探讨了通气孔分流量的大小对工作门区及通气孔节制阀自身发生空化可能性的关系。通气孔节制阀全开时,通气孔底部出口存在强度为发展阶段的蒸汽型空化,节制阀区存在发展阶段的气体型空化;当通气孔节制阀半开或全关时,通气孔底部出口处的空化强度大大降低,为初生阶段或空化初生,而节制阀区无空化发生。上述试验成果表明,为保证高流速有压泄水建筑物安全可靠运行,工程上要避免出现高流速有压泄水建筑物段的分流。

针对本工程,结合水力学原型监测的结果,为避免分流产生的空化而引起的剧烈声振和空蚀,保证排沙孔运行的安全可靠,特作如下建议:

(1) 各排沙孔工作闸门的启闭速度(时间)均须调整到设计值,并确保通气孔节制阀的正常启闭。

(2) 为了减免工作闸门在 $n = 0.9 \sim 1.0$ 时的剧烈声振,在工作闸门开启的过程中,须在 $n = 0.9$ 时将通气孔节制阀关闭至零;在工作闸门关闭的过程中,也须在 $n = 0.9$ 时再开启通气孔节制阀。为此,

须适时实施通气孔阀门的关闭或开启操作。

(3) 通气孔节制阀具体的启闭时间则须根据工作闸门及通气孔节制阀的启闭速度和实际水力条件确定,可通过实际调试和水力学监测予以验证。

参考文献:

- [1] 吴建华. 水利水电工程中的空化与空蚀问题及其研究 [C]//第十八届全国水动力学研讨会文集. 乌鲁木齐:中国力学学会,2004:1-18. (WU Jian-hua. Cavitation and Its Damage in Hydro-electric Engineering Projects [C]//Proceedings of the 18th National Hydrodynamics Symposium. Urumqi: The Chinese Society of Theoretical and Applied Mechanics, 2004: 1-18. (in Chinese))
- [2] UKON Y. Cavitation Characteristics of a Finite Swept Wing and Cavitation Noise Reduction due to Air Injection [C]//Proceedings of International Symposium on Propeller and Cavitation, Wuxi, China, April 8-12, 1986: 383-390.
- [3] 洪 镒,牛争鸣,吴小丽,等. 公伯峡水电站旋流泄洪洞空化特性的原型观测与反演模型试验的对比分析 [J]. 西安理工大学学报,2010,26(2):129-135. (HONG Di, NIU Zheng-ming, WU Xiao-li, *et al.* Contrastive Analysis through Prototype Observation and Inversion Model Experiment of Rotary Flow Dissipation Tunnel Cavitation Characteristic in Gongboxia Hydropower Station [J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2010, 26(2): 129-135. (in Chinese))
- [4] SMITH N Q, JOHNSON M C, BARFUSS S L. Vapor Cavity Collapse Downstream from Orifice Plates [J]. Journal of Hydraulic Research, 2008,46(6): 830-834.
- [5] WON IN-HO, GAO R, TSOUKALAS L H, *et al.* Incipient Cavitation Detection Methodology using Current Sensor Based on a Neural Wavelet Approach [C]//Proceedings of the American Nuclear Society - International Congress on Advances in Nuclear Power Plants 2005, ICAPP, Seoul, Korea, May 15-19, 2005: 3243-3249.
- [6] RICHARD P P, ANTHONY V M, ERNEST K S. Cavitation and Erosion Damages of Sluices and Stilling Basins at Two High-head Dams [C]//Proceedings of the 13th Congress of the International Commission on Large Dams (ICOLD) Q50, R11, Vol. III, New Delhi, India, Oct. 29-Nov. 2, 1979:177-198.
- [7] 郭均立,芦俊英. 三峡工程表孔体型空化试验研究 [J]. 长江科学院院报,2000,17(4):12-14. (GUO Jun-li, LU Jun-ying. Cavitation Study on Surface Spillway of Three Gorges Project [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2000, 17(4): 12-14. (in Chinese))

(编辑:王 慰)

Characteristics of Cavitation in Sediment-Release Orifices and Aeration Conduits of Three Gorges Hydropower Station

JIANG Bo-le, ZHANG Hui, YANG Jiang-ning

(Hydraulics Department, Yangtze River Scientific Research Institute, Wuhan 430010, China)

Abstract: The characteristics of cavitation caused by high-speed flow in the pressure tunnel of Three Gorges Project (TGP) hydropower station were investigated through vacuum tank experiment to ascertain the design of the sediment-release orifices and aeration conduit of TGP. The results showed that obvious steam cavitation was found at the bottom of aeration conduit's outlet, but no steam cavitation occurred at the valves when they were fully opened. However, when the valves were half-opened or fully closed, the cavitation intensity decreased remarkably and also there was little cavitation erosion risk around both the above-mentioned components. It's concluded that the design of diverting flow should be avoided for the safe operation of pressure tunnel with high-speed flow in hydropower station.

Key words: hydraulics; TGP hydropower station; sediment-release orifice; diverting flow; steam cavitation; gas cavitation