

泄洪洞有压出口渐变段及工作闸门室体型优化

傅宗甫¹, 陈青生², 严忠民¹

(1. 河海大学水利水电工程学院, 江苏 南京 210098; 2. 河海大学研究生院, 江苏 南京 210098)

摘要 针对黄金坪水电站 1 号泄洪洞原设计方案有压出口渐变段顶板存在负压, 在工作闸门小开度运行时工作闸门室底板出现大范围负压, 容易引起空蚀等问题, 根据水力学模型试验, 提出通过增加有压渐变段长度、改变工作闸门室底板连接形式, 对有压出口渐变段及闸门室体型进行优化。试验实测结果表明, 优化后的有压段出口顶板及闸门室底板在各种运行工况下均没有出现负压, 闸门室底板水流空化数显著增加, 提高了泄洪洞安全运行的可靠性。

关键词 泄洪洞; 有压渐变段; 工作闸门; 体型优化; 水流空化数; 空蚀

中图分类号 TV651.3 **文献标识码** A **文章编号** 1006-764X(2007)06-0077-03

Shape optimization for pressure outlet transition section and working gate chamber of spillway tunnel/FU Zong-fu¹, CHEN Qing-sheng², YAN Zhong-min¹ (1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Graduate School of Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: According to the original design scheme of No. 1 spillway tunnel of Huangjinping Hydropower Station, there were negative pressure on the roof of pressure outlet transition section and large region of negative pressure on the bottom plates of working gate chamber operating at small aperture, which might cause cavitation erosion. Based on hydraulic model tests, the shape of pressure outlet transition and working gate chamber was optimized by increasing the length of pressure transition and adjusting the connecting form of the bottom plates of working gate chamber. After the optimization, the negative pressure did not occur in any operation case, and the cavitation number of the water flow at the bottom plates of gate chamber increased obviously. The optimization scheme enhanced the reliability of safety operation of the spillway tunnel.

Key words: spillway tunnel; pressure transition section; working gate; shape optimization; cavitation number of water flow; cavitation erosion

泄洪洞是水利枢纽中常见的泄水建筑物, 随着我国西部水利建设的快速推进, 将会出现大量高坝水利枢纽, 高水头、大流量泄洪洞的水力学问题也会更加突出, 国内外有许多学者致力于泄洪洞水力学问题的研究。郭军等^[1]以龙抬头和龙落尾布置方式为主, 总结并分析了国内外大型泄洪洞的运行实践, 提出了泄洪洞布置的特点及研究进展。文献[2-4]通过数值模拟或物理模型试验研究了泄洪洞反弧段防空化空蚀的体型。刘超等^[5]通过水工常压模型试验, 对采用人工强迫通气减免反弧段下游边墙空蚀的可行性进行了研究。目前对泄洪洞洞身研究的重点主要集中在反弧段、龙抬头及龙落尾连接段的空化及空蚀特性等方面, 而很少有针对有压洞出口渐变段及工作闸门室体型优化的研究。

本文针对黄金坪水电站 1 号泄洪洞原设计方案有压出口渐变段顶板存在负压, 尤其在工作闸门小开度运行时闸门室底板出现大范围负压区, 导致空

化数过低, 容易引起空蚀等问题, 根据几何比尺为 1:40 的水力学模型试验, 提出通过增加有压渐变段长度, 将工作闸门室平底板改为抛物线连接形式等方法, 对有压出口渐变段及闸门室体型进行优化。试验结果表明, 优化后的有压出口渐变段顶板及闸门室底板在各种运行工况下均没有出现负压, 闸门室底板水流空化数显著增加, 提高了泄洪洞安全运行的可靠性。

1 工程概况

黄金坪水电站 1 号泄洪洞为有压接无压泄洪洞, 中后期兼作导流洞, 同时起水库放空与排沙作用, 是一条多功能的泄洪洞(图 1), 最大下泄流量为 2679.98 m³/s。进口采用岸塔式, 底板高程为 1425.00 m, 进水口设平板检修闸门, 后接圆形有压隧洞。有压洞洞长 392.438 m, 由直段和弯段组成, 洞径 14 m, 出口段为渐变段, 后接弧形工作闸室段,

闸门室长 25 m,底高程 1421.847 m,工作闸门尺寸为 12 m×10 m(宽×高)。工作闸门后为城门洞型的无压隧洞,隧洞坡比为 $i = 0.0338$ 。隧洞出口底板高程为 1405.00 m,采用底流式消能方式。

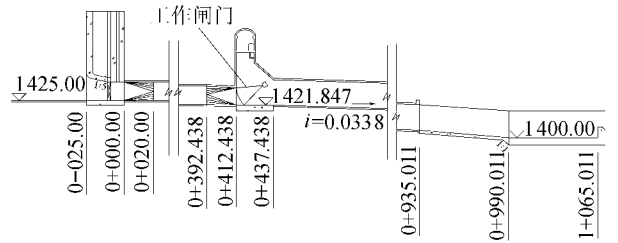


图 1 泄洪洞立面布置(单位:m)

2 有压出口渐变段体型优化

2.1 原方案

原方案有压渐变段由直径为 14 m 的圆形断面渐变至 12 m×10 m(宽×高)的矩形断面,渐变段长度为 20 m,出口断面积收缩为洞身断面积的 78%,比规范^[6]规定的 80%~85%的范围略小。试验中分别对校核洪水位(库水位 1478.57 m)、设计洪水位(库水位 1476.00 m)和防洪汛限水位(库水位 1472.00 m)工况下渐变段顶板的时均压强进行了观测,试验中观测到渐变段出口顶板在 3 种库水位条件下均出现了负压,最大负压出现在防洪汛限水位,可达 -23.13 kPa(-2.36 m 水柱),从渐变段顶板压坡线(图 2)可以看出,3 种库水位下压强变化趋势基本一致,沿程压强梯度较大。

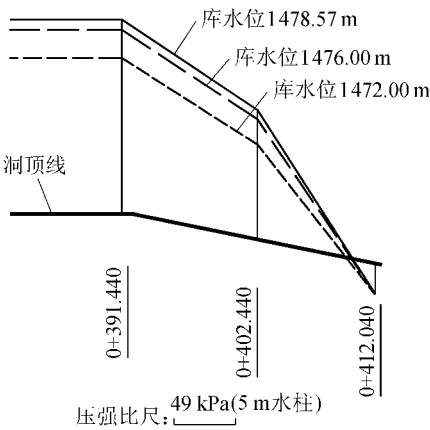


图 2 原方案有压渐变段顶板压坡线

2.2 修改方案

a. 方案修改思路。渐变段出口顶板出现负压,理论上可以通过减小出口断面积收缩比来减小顶板负压,但受隧洞泄流能力的限制,隧洞渐变段出口断面积收缩比不能进一步减小。从原方案渐变段顶板的时均动水压强分布可以看出,渐变段顶板压强梯度较大,如汛限水位 1472.00 m 下压强梯度达到 7.45 kPa/m(0.76 m 水柱/m)。因此方案修改的基本

思路是保持收缩比不变,尝试增加渐变段长度,减小压强梯度,提高渐变段出口顶板压强。

b. 修改方案试验。经过不同渐变段长度的比较试验,得到渐变段长度由 20 m 增加至 35 m 的优化方案,该方案在 3 种库水位条件下渐变段顶板均未观测到负压,而且沿程压强梯度较小。图 3 为该优化方案在 3 种库水位条件下的渐变段顶板压坡线。

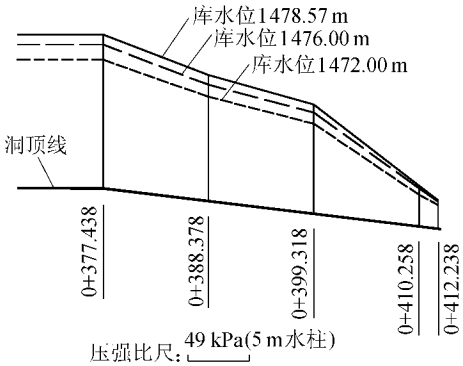


图 3 优化方案有压渐变段顶板压坡线

3 闸门室体型优化

3.1 原方案

经原方案试验发现,3 种库水位工况下闸门全开时工作闸门室底板及陡槽起始处动水压强值较低,沿程水流空化数约为 0.33,可见只要控制表面平整度,泄洪洞不至于发生空蚀破坏。但在闸门局部开启时,出闸水流呈射流状态,工作闸门室底板以及与陡槽连接段下游出现负压,尤其在最不利水位(库水位 1476.00 m)时的小开度运行工况,低压区范围较大,各测点水流空化数明显偏低,计算得到最小水流空化数仅为 0.13,极易形成空化,导致空蚀破坏。工作闸门不同开度时闸门室及其下游连接段底板的时均动水压强分布见图 4。

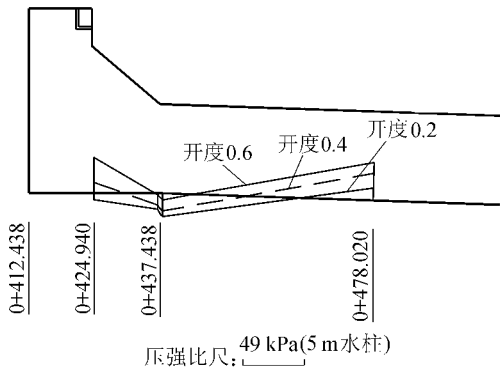


图 4 原方案闸门室及下游连接段底板压强分布

3.2 修改方案

通过分析认为原方案在闸门局部开启时,工作闸门室底板以及与陡槽连接段下游出现负压是弧形闸门在局部开启条件下,出闸水流呈一定的角度冲

击闸室底板后反弹抛射形成脱流造成的。通常可以采取在闸室底板上设置掺气槽、将闸室改为突扩突跌形式或将闸室底板与陡槽底板的折线连接改为抛物线连接(减小水流与底板的入射角)等方法来减小负压^[7]。由于本工程结构及地质条件等的限制,不宜在闸室底板设置掺气槽以及将闸室改为突扩突跌形式,因此拟将闸室段底板与其后的陡坡改为抛物线连接形式,考虑了两种修改方案。

3.2.1 修改方案一

考虑到闸门完全关闭时底缘宜落在水平底板上,根据黄金坪1号泄洪洞闸门的布置情况以及底板抛物线起点需位于负压区上游等原则,为了尽量不改变下游陡坡坡度,通过试验拟定的底板连接抛物线起点位于桩号0+421.438 m,即原方案变坡点(桩号0+437.438 m)上游16 m处,抛物线水平投影长度32 m,抛物线的方程为

$$y = 0.000528x^2 \tag{1}$$

式中: y 为纵坐标,m; x 为横坐标,m。

根据原方案的试验结果可知,设计洪水(库水位1476.00 m)时闸门局部开启的工况为工程运行的最不利工况,因此修改方案试验针对设计洪水进行,修改方案一的闸室室底板及下游连接段底板压强分布见图5。从图5中可以看出,与原方案相比,修改方案一闸室底板压强有了明显的改善,仅在0.2开度条件下抛物线起点及桩号0+453.438 m附近存在负压,而且负值明显减小,低压区范围也大幅度缩小。

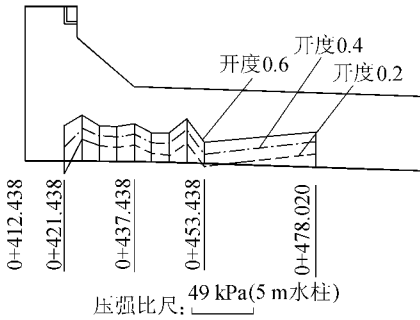


图5 修改方案一闸室及下游连接段底板压强分布

3.2.2 修改方案二

从修改方案一的试验结果可以看出,底板改为抛物线连接形式对减小闸门小开度运行工况下的底板负压是有效的,但由于修改方案一抛物线起点偏于下游,使得抛物线起点处仍存在负压,而且沿程压强波动也较大。因此需要将抛物线起点进一步向上游移动,考虑到修改方案一抛物线起点与有压段出口断面的距离已不大(9.0 m),修改方案二将抛物线起点移至有压段出口断面处(桩号0+412.438 m),抛物线水平投影长度50 m,抛物线下游切点桩号为0+462.438 m,抛物线的方程为

$$y = 0.000338x^2 \tag{2}$$

式中: y 为纵坐标,m; x 为横坐标,m。

图6为修改方案二的体型布置图。图7为修改方案二工作闸门室底板及其下游连接段的压强分布,从图7中可以看出,该方案闸门室底板及其下游连接段底板压强分布有很大的改善,即使在0.1开度条件下也能维持正压,而且沿程压强波动较小。

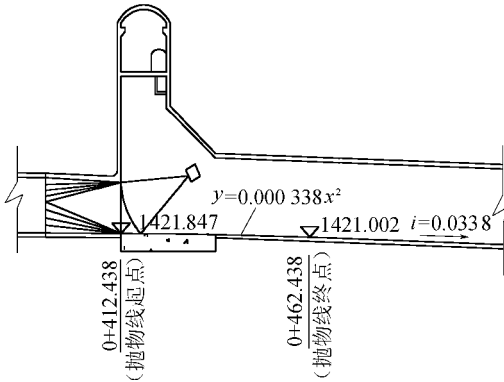


图6 修改方案二体型布置

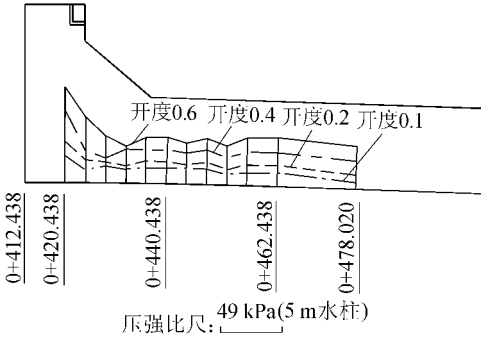


图7 修改方案二闸室及下游连接段底板压强分布

3.3 水流空化数沿程分布

为了进一步比较各种方案闸门室的抗空化特性,计算了小开度运行条件下(开度0.2)闸门室及其连接段底板的水流空化数^[8],水流空化数按式(3)~(4)计算:

$$\sigma = \frac{h_0 + h_a - h_v}{u_0^2 / (2g)} \tag{3}$$

$$\text{其中} \quad h_a = 10.33 - \frac{\nabla z}{900} - 0.39 \tag{4}$$

式中: h_0 为计算断面底板时均动水压强水头; h_a 为大气压强水头; h_v 为水的汽化压强水头,在气温25℃时为0.323 m; $u_0^2 / (2g)$ 为计算断面平均流速水头; z 为计算点的海拔高程。上述物理量的单位均为m。

各方案0.2开度条件下闸室及其连接段底板水流空化数沿程分布见图8。从图8可以看出,3种方案水流空化数的变化规律与时均压强的变化规律基本一致。与原方案相比,修改方案一总体上空化数有较大提高,但仍有两处比较小,(下转第98页)

噪声。

c. 本文方法通过对恒定状态下带噪声压力信号阈值自学习使得重构信号与期望输出均方误差最小来获得单一工况下的最佳去噪阈值,学习之后的阈值再用于同一工况下整个时间段的去噪,这样根据不同工况下的最佳阈值能够获得最优输出。通过各种滤波方法的比较及与数值模拟结果的对比,证明本文方法去噪效果良好。

参考文献：

[1] 王占山,张化光,冯健,等.长距离流体输送管道泄漏检测与定位技术的现状与展望[J].化工自动化及仪表,2003,30(5):5-10.

[2] 杨开林.热力管网瞬变泄漏检测数学模型研究[J].水利学报,1996(5):50-56.

[3] 夏海波,张来斌,王朝晖.管道泄漏检测方法[J].传感器技术,2002,21(11):36-38.

[4] 陈仁文.小波变换在输油管道漏油实时监测中的应用[J].仪器仪表学报,2005,26(3):242-245.

[5] YE Hao,WANG Gui-zeng,FANG Chong-zhi. Application of wavelet transform to leak detection and location in transport pipelines[J].Engineering Simulation,1996,13:1025-1032.

[6] 伦淑娴,张化光,冯健.基于神经网络的多传感器自适应

滤波及其应用[J].东北大学学报,2003,24(8):727-730.

[7] 马野,王孝通,戴耀.基于模糊神经网络的自适应滤波方法仿真研究[J].系统仿真学报,2005,17(10):2447-2449.

[8] 陈华立,叶昊.基于图像处理的管道泄漏检测与定位[J].清华大学学报:自然科学版,2005,45(1):119-122.

[9] MALLAT S,HWANG W L. Singularity detection and processing with wavelet[J]. IEEE Trans on Information Theory,1992,38(2):617-643.

[10] DONOHO D L,JOHNSTONE I. Ideal spatial adaption via wavelet shrinkage[J]. Biometrika,1994,81(3):425-455.

[11] 石立华,陈彬,周璧华,等.测量系统小波与神经网络联合去噪研究[J].计量学报,2002,23(1):52-56.

[12] BRUNONE B,KARNEY B W,MECARELLI,et al. Velocity profiles and unsteady pipe friction in transient flow[J]. Journal of Water Resources Planning and Management,2000,126(4):236-244.

[13] WYLIE E B. Frictional effects in unsteady turbulent pipe flows[J]. Applied Mechanics Reviews,1997,50(11):241-244.

[14] 王守觉,李兆洲,王柏南,等.用前馈神经网络进行带噪声信号的去噪声建模[J].电路与系统学报,2000,5(4):21-26.

[15] 苏高利,邓芳萍.论基于 MATLAB 语言的 BP 神经网络的改进算法[J].科技通报,2003,19(2):130-135.

(收稿日期 2007-09-05 编辑 骆超)

(上接第 79 页)

而且水流空化数沿程变化比较大,而修改方案二水流空化数沿程均维持在一个比较大的数值,而且沿程变化不大。

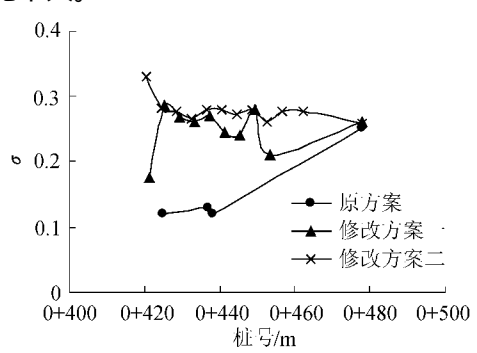


图 8 各方案 0.2 开度条件下闸室及其连接段底板水流空化数

4 结 论

a. 有压洞出口渐变段的长度对其顶板压强影响显著,在相同的断面积收缩比情况下,适当增加渐变段长度,有利于改善有压洞出口渐变段顶板压强分布。

b. 有压洞出口的水平底板闸室容易在闸门小开度运行时出现负压,导致水流空化数偏小,容易发生空蚀破坏。

c. 抛物线底板对减小闸门小开度运行工况下

的底板负压是有效的,并且将抛物线起点尽量上移至有压洞出口对改善闸室底板压强分布效果最好。

d. 抛物线底板体型简单,施工方便,可以显著提高闸门小开度运行时的水流空化数,是一种优良的防空蚀体型,可应用于有长时间小开度运行要求的隧洞中。

参考文献：

[1] 郭军,张东,刘之平,等.大型泄洪洞高速水流的研究进展及风险分析[J].水利学报,2006,37(10):1193-1198.

[2] 李玲,陈永灿,李旭东.泄洪隧洞防空蚀体型的数值研究[J].水利学报,2003(7):12-16.

[3] 纪伟.龙抬头泄洪洞反弧段空化空蚀研究综述[J].水科学与工程技术,2006(1):51-53.

[4] 王海云,戴光清,杨庆,等.V型掺气坎在龙抬头式泄洪洞中的应用[J].水利学报,2005,36(11):1371-1378.

[5] 刘超,张光碧,王海云,等.泄洪洞侧墙的人工强迫掺气减蚀研究[J].水力发电,2006,32(8):81-84.

[6] DL/T 5195—2004,水工隧洞设计规范[S].

[7] 李振连,刘继广,吴一红.小浪底 2 号孔板洞中闸室突扩突跌式掺气设施原型观测研究[J].水利水电技术,2006,37(8):111-114.

[8] 夏毓常.泄水建筑物若干体型初生空化数的合理取值[J].长江科学院院报,2000,17(4):6-9.

(收稿日期 2007-08-15 编辑 骆超)