

泄漏检测信号滤波技术比较

郭新蕾 杨开林 郭永鑫

(中国水利水电科学研究院水力学所, 北京 100038)

摘要 通过泄漏检测模型试验分析测量信号中的噪声来源, 在对比研究传统小波去噪、改进神经网络去噪、最小二乘拟合去噪等方法在实测数据中去噪效果的基础上, 借鉴神经网络反向传播学习算法的思路, 提出了信号预滤波结合阈值自学习小波去噪的综合滤波方法。该方法通过对恒定状态下带噪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, 再将此阈值用于同一工况下整个时间段的去噪, 这样根据不同工况下得到的最佳阈值可以获得最优输出。数值计算结果比较表明该方法对噪声的抑制作用明显, 比传统小波去噪、改进神经网络去噪等方法效果更好。

关键词 管道泄漏检测; 输水管道; 压力信号; 滤波; 小波去噪; 神经网络

中图分类号: TN911.4

文献标识码: A

文章编号: 1006-764X(2007)06-0094-05

Comparison of filtering methods for leak detection signals//GUO Xin-lei, YANG Kai-lin, GUO Yong-xin(Department of Hydraulics, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China)

Abstract : The sources of noise in leak detection signals were analyzed based on physical model tests. Different filtering methods, such as the conventional wavelet denoising algorithm, the improved neural network denoising method, and the least-square spline fitting method were comparatively studied. Based on the thought of neural network back-propagation learning algorithm, a synthetic filtering method with the pre-filtering of signals combined with threshold self-learning wavelet algorithm was proposed. With the method, the optimal denoising threshold in the single operating case was obtained by threshold self-learning of pressure signals with noise in the steady flow state to make the mean square error between reconstruction signals and desirable outputs minimal, and then the optimal threshold was used for denoising in the whole period of time in the same operating case. Thus the optimal output could be obtained according to the optimal threshold in different cases. Numerical results and comparative studies show that the present approach has obvious effects on noise suppression, and is superior to the conventional wavelet denoising algorithm and improved neural network denoising method.

Key words : leak detection for pipeline; water conveyance pipeline; pressure signal; filtering; wavelet denoising; neural network

管道输水是一种常见的调水工程输水方式。由于管道老化、断裂、腐蚀、磨损等原因, 泄漏在所难免。随着调水工程自动化、信息化程度的提高, 调水工程管道泄漏检测越来越受到重视。管道泄漏检测方法大致有以下几种: 直接检测法、负压波法、实时模型法、瞬变检测法等^[1-2]。上述方法的检测手段无一不是通过对管道压力或流量信号的辨识来进行泄漏定位的。而实际采集到的压力信号带有很大的噪声, 要从压力信号中准确定位压力突降点或找到与正常状态下压力幅频特征的区别, 需解决的关键问题之一是要对采集的原始信号进行有效的去噪。

目前, 滤波方法越来越引起人们的重视, 夏海波等^[3]研究了线性回归的方法, 陈仁文^[4]、叶昊等^[5]研

究了小波分析方法, 伦淑娴等^[6]、马野等^[7]研究了神经网络滤波方法, 陈华立等^[8]研究了图像分析方法。这些方法的实用性需要通过试验数据的进一步比较论证。为此, 通过泄漏检测模型试验, 首先分析了实测数据中的噪声来源, 对比分析了传统小波去噪、改进神经网络去噪、最小二乘拟合去噪等方法在实测数据中的去噪效果, 并在此基础上提出了信号预滤波结合阈值自学习的小波综合滤波方法。该方法通过对恒定状态下带噪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, 再将此阈值用于同一工况下整个时间段的去噪, 这样根据不同工况下得到的最佳阈值可以获得最优输出。

基金项目: 国家自然科学基金(50679085)、国家社会公益专项基金(126301041003)、中国水利水电科学研究院专项基金(水集 05KY01)

作者简介: 郭新蕾(1980—), 男, 湖北十堰人, 博士研究生, 从事调水工程管道系统泄漏检测方法研究。E-mail: guoxinlei@163.com

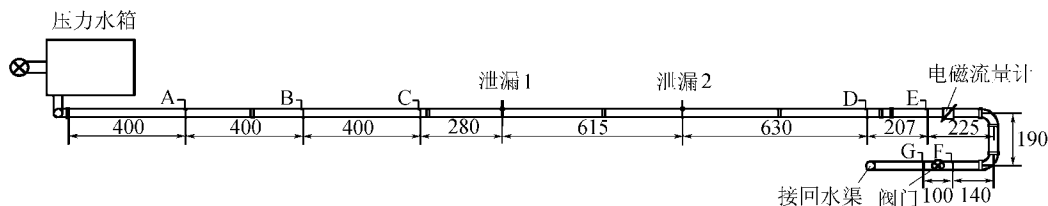


图1 管道泄漏检测系统试验布置(单位:cm)

1 问题的描述

1.1 模型试验

如图1所示,试验管道采用公称通径为300 mm的聚氨酯内衬球墨铸铁管,上游水库用一个水位可调的水箱模拟,管道通过弯头与水箱连接,管道尾部安装电磁流量计测流量,后接阀门控制流量,管道出口接回水渠。蝶阀的瞬时开度值采用与阀门同轴转动的位移传感器来测量。管道中部人为制造2个泄漏点,通过阀门和电磁流量计控制泄漏量。管道各测点布置硅压阻式差压传感器,传感器采样间隔为0.004 s,采样次数为30 000次。采用中国水利水电科学研究院研制的DJ800型多功能监测系统进行数据采集。图2为监测系统实测压力信号,从图2可以看出测量信号明显地被噪声污染了。

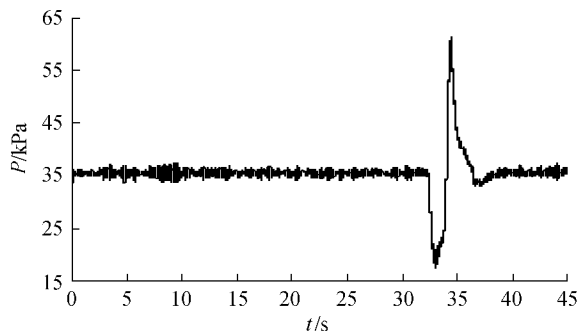


图2 某工况A断面实测压力信号

1.2 噪声的来源分析

管道泄漏检测系统测量水压信号的噪声可分为以下几种:①工频干扰:它是由电力系统引起的一种干扰,一般由50 Hz的工频及其倍频构成;②测量系统本身电极的接触噪声:主要是由电极接触不良引起的噪声或仪器内部噪声,可抽象为随机变化的阶跃信号;③环境噪声:测量过程中管道周围其他随机噪声;④紊流脉动噪声:本身并不是噪声,但对泄漏检测影响较大,尤其小泄漏量时因泄漏产生的压力幅值变化可能被脉动噪声淹没。以上几种噪声,第①种和第②种可以通过预滤波处理方法滤除;第③种可认为是白噪声,而小波去噪在白噪声尤其当噪声服从正态分布时效果比较理想;第④种也是抑制的重点。下面对紊流脉动噪声作一简单分析。

对于如图1所示的泄漏检测系统,实际测量的

为瞬时压力 P :

$$P = \bar{P} + p' \quad (1)$$

式中: $\bar{P}$ 为时均压力, $\bar{P} = \rho g H$, ρ 为密度; p' 为紊流脉动值,与雷诺数和其他水力学要素相关,它的幅值大小不定,变化频繁且无一定规律,本质上属于带随机性质的非恒定流波动。泄漏检测瞬变检测方法边界控制条件在下游阀门处,阀门扰动产生的压力比值管道自身的紊流脉动值大得多,于是压力信号滤波可将此脉动值视为噪声,加以滤除。图3给出了图2所示信号的分解,当 $0 < t < 30$ s时,系统处于恒定流状态(时间平均意义下),由伯努利方程计算时均压力为35.52 kPa,那么压力源信号与时均压力的差值主要为紊动噪声。

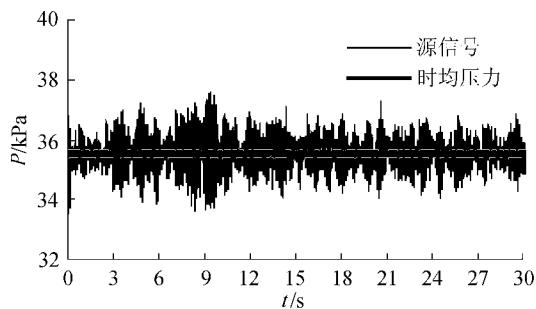


图3 信号 $P = \bar{P} + p'$ 的分解

1.3 数学描述

设上述系统的期望输出信号为 $f(t_i)$,噪声为 e_i ,采集到的污染源信号为

$$y(t_i) = f(t_i) + e_i \quad (2)$$

消噪的目的就是找到一个估计式 $y'(t_i)$, $y'(t_i)$ 是 $y(t_i)$ 的估计式,是 $f(t_i)$ 的一个最佳逼近。

2 两种去噪方法的比较

2.1 小波去噪

Mallat等^[9]认为,噪声与信号在各个尺度上的小波变换模极大值谱具有不同的规律,将噪声小波谱分量去掉,再利用小波变换重构算法重构出原信号以达到消噪目的。令 $c_0 = y(t_i)$ 表示初始信号序列,选择一个合适的小波及分解层数,利用小波变换对 c_0 进行多级分解,可得到低频信号 c_j 和细节信号 d_j ,令 d'_j 为 d_j 的估计值,则有

$$d_j' = \begin{cases} \bar{d}_j & 1 \leq j \leq j_0 \\ d_j & j_0 < j \leq J+1 \end{cases} \quad (3)$$

式中： j_0 为截断参数； $\bar{d}_j$ 由阈值门限计算，Donoho 等^[10]给出如下确定门限值的方法：

$$\theta = \delta \sqrt{2 \ln N} \quad (4)$$

式中： N 为信号数据长度； δ 为噪声方差。对小波分解不同层次设置阈值，认为 θ 以下的小波系数模极大值是由噪声引起的，通过阈值滤波实现噪声的去除。阈值处理通常分为硬阈值和软阈值两种方式，硬阈值处理为

$$\bar{d}_j = \begin{cases} d_j & |d_j| \geq \theta \\ 0 & |d_j| < \theta \end{cases} \quad (5)$$

软阈值处理为

$$\bar{d}_j = \begin{cases} \text{sgn}(d_j) (|d_j| - \theta) & |d_j| \geq \theta \\ 0 & |d_j| < \theta \end{cases} \quad (6)$$

然后对逼近信号和阈值处理后的细节信号进行信号的小波重构，得到源信号的近似逼近 $y'(t_i)$ 。

小波去噪的阈值求解法固定不变，这种阈值在噪声服从正态分布时最佳^[11]。由于噪声的复杂性，实际情况可能与假设条件有所差异，因此，阈值去噪可能不会获得最佳效果。图 4 为图 2 压力源信号预滤波后的部分信号，图 5 是小波默认阈值去噪和用水击特征线方法数值模拟计算的信号对比^[12-13]，将数值模拟结果视为期望输出，可看出小波阈值去噪方法对噪声有不同程度的抑制作用，但对工程实际需滤除的紊流脉动噪声并没有达到最佳去噪效果。

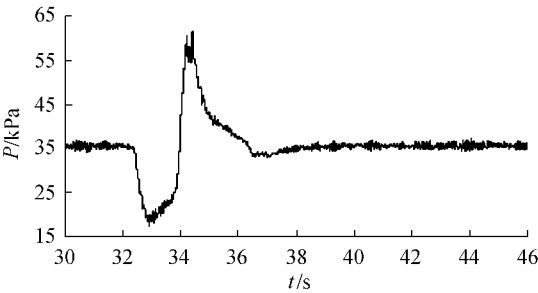


图 4 某工况 A 断面预滤波后的压力信号

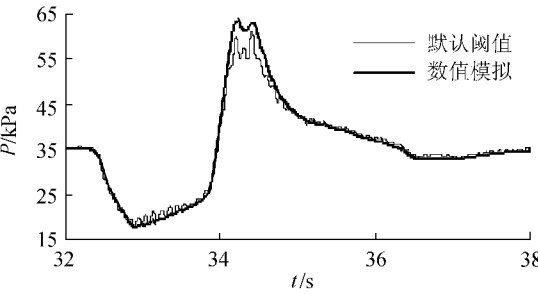


图 5 小波默认阈值去噪与数值模拟对比

2.2 神经网络去噪

基于神经网络的去噪方法也是近年来研究得较

多的一种滤波方法，它以其强大的任意非线性逼近、自适应和自学习能力在信号去噪建模中获得了良好的效果。利用前向神经网络去噪声时，随着网络隐含层神经元数目的增加，神经网络对带噪声的信号拟合误差会减小，且拟合免噪系统输入输出关系也较准确，但并不是隐含层越多越好，太多的隐层数不仅会出现过拟合，而且网络训练的时间会很慢。王守觉等^[14]通过去噪试验定性地得出了用神经网络进行拟合去噪的一般性规律，即网络的训练误差是随着隐层神经元数目的增多而单调下降，测试误差在网络达到一定规模时达到最小，但是其隐层的节点数目的确定仍然依赖于试凑。针对神经元在较大输入空间时网络训练时间长这一问题，许多学者对 BP 算法进行了改进，如共轭梯度法、正则化方法、Levenberg-Marquardt 优化算法^[15]等。图 6 给出了用神经网络 LM 改进算法和正则化方法对图 4 预滤波后信号去噪和期望输出的对比波形。从中可以看出二者过度平滑了压力信号，不能很好地表现波峰处的畸变，在 $32\text{ s} < t < 34\text{ s}$ 时间段内，正则化算法滤波在波谷处太过平滑，已部分失真。另外，其隐层的节点数目依赖于试凑，本文隐层数取 15，收敛速度比较慢（输入样本长度为 4 096，训练次数 4 000 次，耗时约 25 min）。

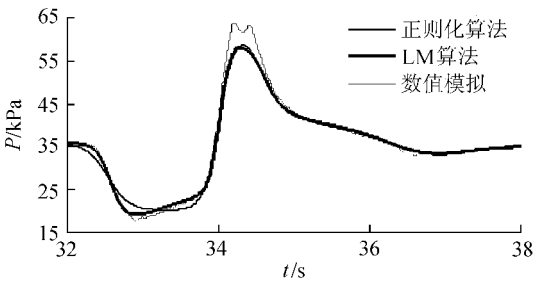


图 6 神经网络去噪与数值模拟对比

3 本文方法

因每次采集的压力信号都是从恒定流状态开始，不妨将全时间范围内的信号分为两个部分，综合滤波方法步骤如下：

- 用五点平滑法对全时间范围内的信号进行预滤波，滤去部分高频和白噪声。
- 将系统处于恒定流状态下的压力信号取出分析，由伯努利方程计算信号的期望输出 $\bar{P}(t_i)$ ，实际处理不妨取期望输出为 $(1 \pm \psi)P(t_i)$ ， ψ 为允许偏差，一般可取 $\psi \leq 1\%$ ，主要是由上游水位少许波动引起。这样，实测压力信号与期望输出信号之差即可认为是预滤波之后的噪声总和。
- 选择合适的小波函数和分解层数对恒定流状态下的压力信号进行分解，保持分解过程中的低

频信号 c_j 不变,对各层的细节信号 d_j 采用软阈值处理,处理后为 $\bar{d}_j$, $\bar{d}_j$ 与 θ_j 有关(θ_j 为默认阈值门限)。再利用小波重构公式,得到第一次滤波输出 $y_1'(t_i)$ 。

d. 定义学习目标函数为第 k 次滤波输出 $y_k'(t_i)$ 与 $(1 \pm \phi) \bar{P}(t_i)$ 的均方误差 E_k :

$$E_k = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [y_k'(t_i) - (1 \pm \phi) \bar{P}(t_i)]^2 \quad (7)$$

式中: k 表示第 k 次滤波输出。为使学习目标 E_k 最小可调整 θ 。第 $k+1$ 次滤波阈值为

$$\theta_j(k+1) = \theta_j(k) + \Delta\theta_j \quad (8)$$

可取

$$\Delta\theta_j = \alpha \frac{\partial E_k(t_i)}{\partial \theta} \quad (9)$$

式中: α 为调整系数。计算 E_k ,如果 $E_k < \epsilon$,则迭代停止,否则继续。满足 $E_k < \epsilon$ 的阈值 θ_j 即为整个测量时间范围内的最优阈值。

e. 对测量时间内全长信号进行小波分解,同步步骤 c,保持分解的低频信号 c_j 不变,对各层的细节信号 d_j 进行最优阈值处理,再进行重构。

4 试验对比

用特征线法对管道瞬变流 IAB 模型^[12-13]作数值计算,管道的相关参数为:管径 0.30 m,管长 36.27 m,水击波周期 0.248 s,摩阻系数 0.0134,密度 999.1 kg/m³,黏度 1.14×10^{-6} m²/s, g 为 9.806 m/s²。图 7 给出了 A 断面采用本文综合滤波方法的去噪结果。

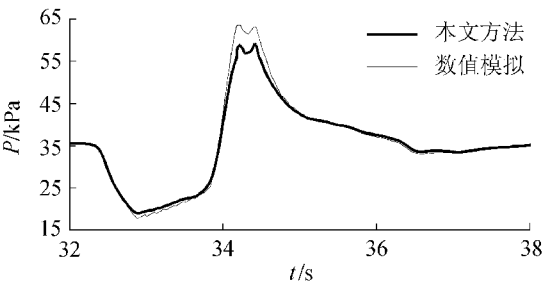


图 7 本文方法滤波后的压力信号

对比图 7 和图 4,本文方法结合了小波去噪和神经网络去噪的一些优点,去噪后波形基本能够反映由阀门扰动产生压力波波形的变化情况,波峰处的细节有较好的保留,能够有效去除紊流脉动噪声,满足实际情况和工程需要。图 8 是最小二乘 B 样条拟合去噪结果,实际运用发现拟合去噪随机误差比较大,如果改变拟合阶数或平滑次数,波形也容易失真。各种去噪方法与计算值的均方误差分别为:预滤波 0.01299、默认阈值法 0.01153、神经网络 LM 算法 0.01159、神经网络正则化算法 0.013116、最小二乘 B 样条拟合 0.01152、本文方法 0.01097,表明本

文方法有一定的优越性。分别对其他工况用本文方法进行滤波并与计算值比较,图 9 是阀门突然关闭时水力瞬变过程压力波形对比,图 10 是阀门小扰动情况下的压力波形对比,从中可看出滤波后的水压波形和计算水压波形吻合较好。

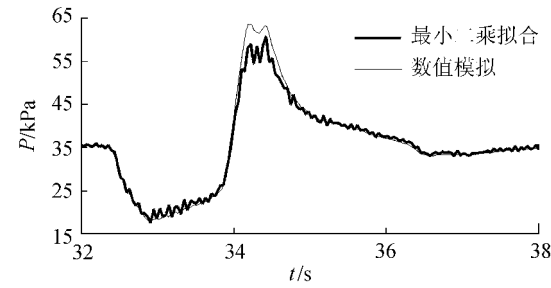


图 8 最小二乘 B 样条拟合后的压力信号

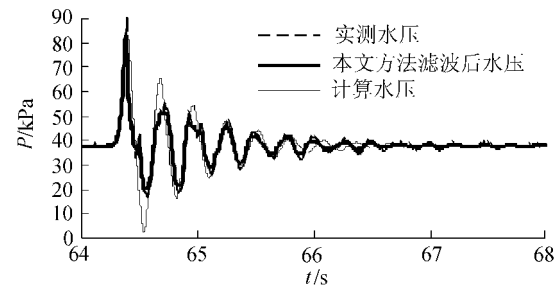


图 9 水力瞬变过程 A 断面压力波形对比

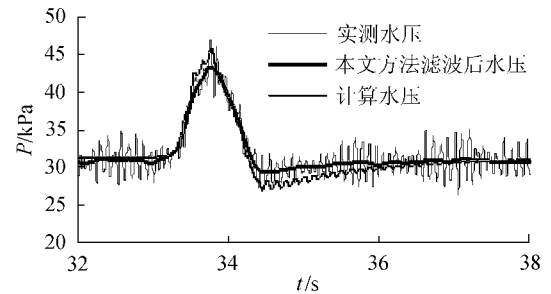


图 10 阀门小扰动下 C 断面压力波形对比

5 结论

本文从管道泄漏瞬变检测法首先需排除压力信号噪声干扰的实际出发,比较研究了小波去噪、改进神经网络去噪和最小二乘拟合去噪等方法的去噪效果,针对它们在实际运用时的一些不足,提出了信号预滤波和阈值自学习的小波综合滤波方法,得出了如下结论:

a. 传统小波去噪对白噪声的去除较好,但对泄漏检测试验中实际需去除的紊流脉动噪声抑制较差,神经网络 LM 算法、正则化算法去噪常出现过拟合,并且在较大输入空间样本的训练上比较耗时,最小二乘拟合去噪易产生随机误差,当噪声幅值和实际信号相差不大时易失真。

b. 本文方法无需了解信号和噪声的统计特性,预滤波能够去除工频干扰、系统噪声和部分环境白

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。

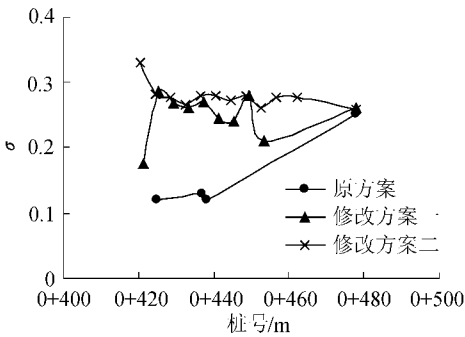


图 8 各方案 0.2 开度条件下闸室及其连接段底板水流空化数

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)