

# 水射流空化噪声的自适应滤波处理

王超<sup>1,2</sup>, 张凤华<sup>1</sup>, 张伟<sup>2</sup>, 唐川林<sup>1</sup>

(1. 湖南工业大学 机械工程学院, 湖南 株洲 412008;  
2. 清华大学 机械工程系, 先进成形教育部重点实验室, 北京 100084)

**摘要:** 空化水射流中空泡溃灭会产生空化噪声。空化噪声是一种微弱的随机信号, 采集系统自身的噪声对空化噪声有着较强的干扰。采用自适应噪声抵消方法对空化信号进行滤波处理, 结果表明该方法具有良好的滤除系统噪声干扰能力, 得到了真实的水射流空化噪声信号。

**关键词:** 空化水射流; 空化噪声; 空化喷嘴; 自适应滤波; LMS 算法

中图分类号: O358

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2009)03-0083-03

## Self-Adaptive Filtering Processing of Cavitation Noise Generated by Cavitating Water Jet

Wang Chao<sup>1,2</sup>, Zhang Fenghua<sup>1</sup>, Zhang Wei<sup>2</sup>, Tang Chuanlin<sup>1</sup>

(1. Mechanical Engineering Institute, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412008, China;  
2. Key Laboratory for Advanced Manufacturing By Material Processing Technology, Department of Mechanical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** Cavitation noise is a faint random signal, which is generated by the cavitation bubbles collapse in cavitating water jet. The noise of acquisition system itself strongly interferes with cavitation noise. The results with self-adaptive filtering processing for cavitation noise indicate that it has the better ability of filtering system noise. The real cavitation noise signals of cavitating water jet have been achieved.

**Keywords:** cavitating water jet; cavitation noise; cavitating nozzle; self-adaptive filtering; LMS algorithm

## 0 引言

空化水射流是一项可应用于众多工业领域的新技术, 已经应用于煤炭开采、石油钻井、清洗、水处理等领域。从20世纪60年代末期, 由R. E. Kohl<sup>[1]</sup>将空化作用引入到水射流中以来, 许多研究者从不同角度对空化水射流进行了研究<sup>[2-4]</sup>。采集和处理水射流空化噪声信号<sup>[5]</sup>, 是研究空化喷嘴和空化水射流相关特性的有效途径。

空化噪声信号与采集系统噪声均是随机信号, 如何选择合适的滤波器滤除系统噪声的干扰十分重要。传统的数字滤波建立在对信号和噪声的先验知识基础上, 如低通、高通和带通滤波对采集信号进行滤波处

理, 这些滤波方法只能滤除截止频率和带通频带范围内的噪声信号。由于随机信号的频率是广泛分散的, 系统噪声频率分布范围内, 包含着空化噪声信号。如果采用传统滤波方法, 则会出现滤去噪声信号的同时也除去了空化噪声信号。选用自适应滤波能克服传统数字滤波的缺点, 它无需知道系统噪声信号的先验知识。输入信号的统计特征未知或者变化时, 自适应滤波器能够在某种准则的要求下, 自动迭代调节自身滤波器参数, 从而实现自适应滤波。

## 1 淹没水射流空化噪声

实验根据空化产生的机理与淹没射流理论等知识

收稿日期: 2009-04-21

作者简介: 王超(1982-), 男, 湖南邵东人, 湖南工业大学硕士研究生, 主要研究方向为高效射流技术及应用,

E-mail: supguy8731@yahoo.com.cn

基础,设计了水射流空化产生系统,如图1。其工作原理:水泵将水压入到水射流系统,并将自身动能转化为水的压能。具有压能的水流流经喷嘴并形成射流射出,射流的淹没深度为0.5 m。水射流空化的关键技术在于空化喷嘴,喷嘴内部以及淹没射流行进中诱发生成大量的空泡,空泡在撞击靶盘时溃灭,产生空化效应,并产生空化噪声。实验采用水听器与高频采集系统采集空化噪声进行研究。

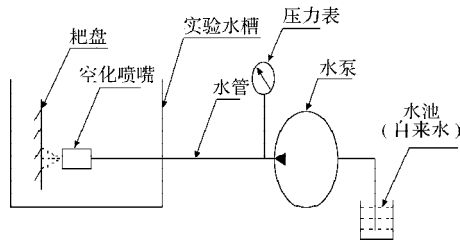


图1 空化水射流产生系统

Fig. 1 The cavitating water jet system

## 2 自适应滤波原理

自适应噪声抵消的原理如图2。静水条件下采集到的信号经过参数可调整的数字滤波后,再送到抵消器,与空化产生条件下采集到的信号相减。插入滤波器的目的就是要补偿噪声源在不同时刻传输特性的差异,均衡两个时刻传输特性的一致性,使滤波的输出尽量逼近真实的空化噪声。理论上,FIR(finite impulse response)和IIR(infinite impulse response)滤波方式都可应用于自适应滤波,FIR滤波方式只有可调的零点,IIR因兼有可调零点和极点造成不稳定,使得FIR滤波方式应用比较广泛。由于LMS(least mean square)算法具有算法简单、运算量小、易于实现的优点,本文所设计的自适应滤波,是在FIR的基础上构建的自适应滤波。

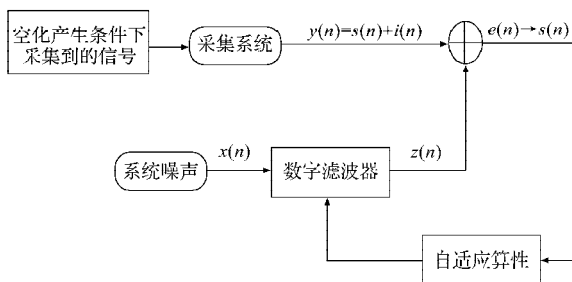


图2 自适应噪声抵消原理图

Fig. 2 The principle diagram of self-adaptive filtering

自适应噪声抵消的核心部分是自适应滤波器,自适应滤波算法的过程是用自适应算法调整数字滤波器的参数,以使滤波器的输出 $z(n)$ 逼近空化产生条件下

采集到的信号 $i(n)$ ,这样就可以使抵消器的输出 $e(n)$ 逼近被测信号 $s(n)$ 。

## 3 LMS 算法自适应滤波与其参数选择

LMS算法<sup>[6]</sup>是最小均方误差法,它是根据最小均方误差准则(MMSE)和最陡下降算法为基础提出的。在最陡下降法中,需要根据可用数据对梯度向量进行估计,使用估计梯度向量 $\hat{\nabla}J(n)$ 的最陡下降法为:

$$w(n+1) = w(n) - \mu \hat{\nabla}J(n), \quad (1)$$

LMS算法直接利用单次采样数据获得的 $e^2(n)$ 代替均方误差进行梯度估计。在自适应过程的每次迭代时,其梯度估计:

$$\hat{\nabla}J(n) = \frac{\partial e^2(n)}{\partial w(n)} = 2y(n)y^T(n) - 2d(n)y(n) = -2e(n)y(n), \quad (2)$$

将式(2)代入式(1),可得利用瞬时梯度估计的最陡下降法的迭代公式为:

$$w(n+1) = w(n) + 2\mu e(n)u(n), \quad (3)$$

式中 $\mu$ 是步长,选择适当的步长与权系数 $w$ 个数能保证自适应滤波的收敛性,取得较优的滤波效果。

1) 最优权向量的估计。步长 $\mu$ 决定自适应过程的收敛性,如果 $\mu$ 值选取得越大,自适应滤波器的收敛速度越快,但自适应滤波器的误调节值与 $\mu$ 值成反比,因此选取一个适中的 $\mu$ 值既能加快自适应的收敛速度又能减小滤波器的误调节值。通常 $\mu$ 在如下范围内选取: $0 < \mu < 1/\lambda_{\max}$  ( $\lambda_{\max}$ 为最大特征值)。

2) 权系数个数 $N$ 的选取。自适应滤波器的误调节 $M$ 为权系数的个数 $N$ 除以滤波暂态过程的结束时间,即: $M = N/4\tau_{\text{MSE}}$ 。在自适应速率不变的条件下(即 $\tau_{\text{MSE}}$ 不变),误调节随着权的个数增加而增加;另一方面,如果权的个数太少,滤波器输出 $e(n)$ 的质量会很差,最小均方误差也会随之增加,从而会降低自适应滤波器的性能。这里既希望通过合理选取权的个数使均方误差较小,又能尽量减小误调节值。通常权的个数在10~50之间取值,通过实践证明,权个数在10~20之间,滤波效果差别不大。

## 4 仿真实例

为验证自适应滤波对信号中所叠加噪声的滤波能力,仿真实验设计了一组叠加白噪声的正弦信号进行自适应滤波处理。通过选用不同的步长 $\mu$ 与权系数个数,分析其滤波效果。通过调整参数得到的自适应滤波效果如图3所示。由自适应滤波仿真实验我们可以看出,选择合适的滤波参数能有效滤除正弦信号中所叠加的白噪声。

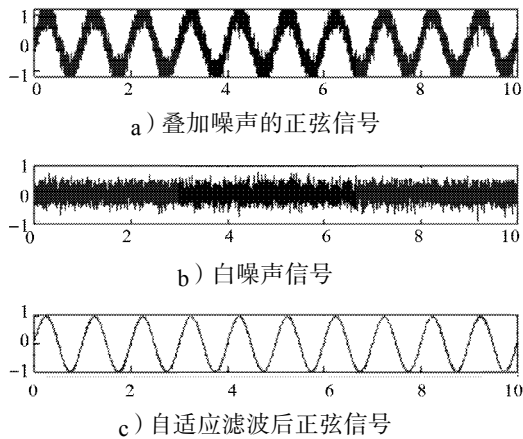


图3 仿真实验滤波效果

Fig. 3 The self-adaptive filtering effect of simulation experiment

## 5 空化噪声信号的自适应滤波

空化水射流实验中所采集到的空化噪声是一种比较微弱的随机信号, 由于采集系统噪声的干扰因素, 空化噪声信号中叠加了系统噪声。实验数据分析处理过程中对空化噪声进行自适应滤波处理, 通过给定合适的滤波参数, 取得了较佳的滤波效果, 如图4所示。自适应滤波有效地滤除了系统噪声的干扰, 得到了真实的水射流空化噪声信号。

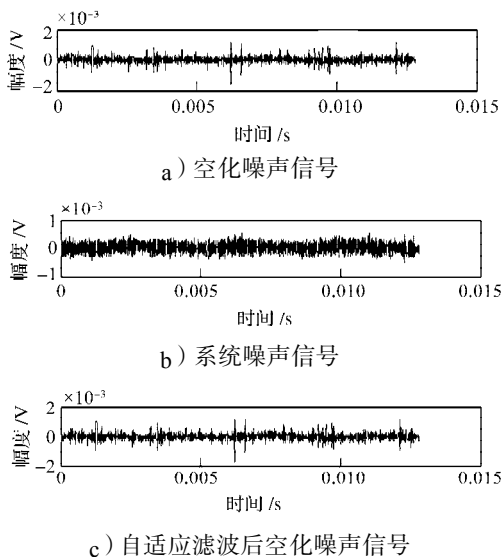


图4 空化噪声信号自适应滤波

Fig. 4 The self-adaptive filtering effect of cavitation noise signals

## 6 结语

自适应滤波是一种根据算法自动调节迭代, 调节自身滤波器参数, 从而达到最优滤波。通过仿真实验验证了自适应滤波滤除信号所叠加的白噪声的能力。空化噪声的自适应滤波效果表明基于LMS算法的自适应滤波器的滤波效果比较好, 对于不能使用传统滤波技术的空化噪声信号, 采用自适应滤波方法, 可以得到理想的滤波效果。

### 参考文献:

- [1] 付胜, 李海涛, 刘丽丽, 等. 空化水射流形成方法及应用研究[J]. 机械科学与技术, 2006, 25(3): 491-495.  
Fu Sheng, Li Haitao, Liu Lili, et al. Cavitating Water Jet Formation Techniques and Their Application[J]. Mechanical Science & Technology, 2006, 25(3): 491-495.
- [2] Soyama H. Marked Peening Effects by High Speed Sub Merged Water Jets Residual Stress Change on SUS304[J]. Journal of Jet Flow Engineering, 1996, 1 (13): 25-32.
- [3] Odhiambo D, Soyama H. Cavitation Shotless Peening for Improvement of Fatigue Strength of Carbonized Steel[J]. Int. J. Fatigue, 2003(25): 1217-1222.
- [4] Kalumuck K M, Chahine G L. The Use of Cavitating Jets to Oxidize Organic Compounds in Water[J]. ASME Journal of Fluids Engineering, 2000, 122(9): 465-470.
- [5] 刘江辉, 张风华, 唐川林, 等. 水射流空化噪声的混沌辨识[J]. 新技术新工艺, 2007(10): 37-39.  
Liu Jianghui, Zhang Fenghua, Tang Chuanlin, et al. The Chaos Identification of the Cavitation Noise Produced by Water Jet[J]. New Technology & New Process, 2007(10): 37-39.
- [6] 曹亚莉. 自适应滤波器中LMS算法的应用[J]. 仪器仪表学报, 2006, 26(8): 452-453.  
Cao Yali. The Application of LMS Algorithms in Self-Adaptive Filter[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2006, 26(8): 452-453.

(责任编辑: 罗立宇)