

激光诱导单空泡溃灭噪声频谱特性研究

张婷婷 曹国翔 王彦佼 夏婷婷 蔡强 王攀达 李贝贝 刘秀梅*

中国矿业大学机电工程学院, 江苏 徐州 221116

摘要 采用压电陶瓷水听器对液体中激光诱导单空泡溃灭噪声进行了信号检测实验。描述了实验仪器实施配置方法,并编制了一款应用小波变换、快速傅里叶变换(FFT)等信号分析手段对测得的空化噪声信号进行小波降噪、功率谱分析的空化噪声分析软件。该软件试用表明,小波降噪技术应用于空化信号分析是一种有效的方法。设计的噪声分析软件能够快速直观地反映噪声信号的频谱特征,实现空化的在线检测和监测。研究结果对水轮机、螺旋桨等水利机械的空蚀预警及空化空蚀现象的研究和应用具有一定意义。

关键词 激光技术;空化噪声;信号分析;小波变换;功率谱估计

中图分类号 O434.14 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP51.031402

Spectrum Characteristics of Laser-Induced Single Bubble Collapse Noise

Zhang Tingting Cao Guoxiang Wang Yanjiao Xia Tingting Cai qiang
Wang Panda Li Beibei Liu Xiumei

School of Mechatronic Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu 221116, China

Abstract The laser-induced cavitation bubble collapse noise spectrum in the liquid are studied experimentally by using a piezoelectric transducer (PTZ) hydrophone. Experimental methods and a cavitation detection system are designed to investigate bubble collapse noise. The wavelet transformation, fast Fourier transform (FFT) and other signal analysis methods are used to monitor the cavitation noise and reduce wavelet noise, analyze power spectrum. The result shows that application of wavelet denoising in cavitation bubble collapse noise spectrum analysis is an effective method. In addition, the designed software can quickly analyze the spectral characteristics of bubble noise signal, and it can detect and monitor cavitation on-line. The results have certain significance on the warning and researching of turbine cavitation, propeller cavitation and other water conservancy machineries.

Key words laser technique; cavitation noise; signal processing; wavelet transform; power spectrum estimation

OCIS codes 140.3440; 140.3390; 140.3945; 350.5400

1 引言

空化现象是指气泡在液体中产生、膨胀、压缩和溃灭的过程^[1]。当液体内部局部压力低于该液体的饱和蒸气压或空气分离压力时,液体内部或液固交界面上气泡的形成、发展和溃灭的过程叫做空化^[2]。气泡在随液体流动过程中,遇到周围压力增大时体积将急剧缩小或溃灭,局部产生极高的瞬时压强,其反复作用会破坏固体表面,同时气泡溃灭时伴有强烈的噪声和振动,并伴随有微弱的光,对液压机械、船舶和水力机械的工作寿命和效率有极大的危害。因此,有效监测空化初生和识别空化状态是保障流体机械设备正常运行的重要手段。

目前,空化检测和状态识别的方法主要有摄像法、涂料腐蚀法、静压测量法、振动测量法等^[3]。由于空化

收稿日期: 2013-10-12; 收到修改稿日期: 2013-11-20; 网络出版日期: 2014-02-20

基金项目: 国家自然科学基金(51209203,51005231)、江苏省自然科学基金(BK2012131)、中国矿业大学大学生实践创新训练计划(X1029012066)、国家大学生创新性实验计划(201310290016)、江苏省优势学科平台资助项目

作者简介: 张婷婷(1992—),女,本科生,主要从事液粘传动及空化空蚀等方面的研究。E-mail: 1520792410@qq.com

* 通信联系人。E-mail: liuxm@cumt.edu.cn

基本上是单极子噪声源,具有很强的辐射效率和冲击特性^[4],因此根据空化噪声检测和识别空化状态受到越来越多学者的关注^[5]。Lauterborn等^[6]研究了蒸馏水中空化声波的声压计算公式与测量方法;Hakansson等^[7]采用自制的高压试验设备研究了外部环境压力变化对声波强度与频率的影响,指出声波强度与频率均随环境压力的增大而增大;Park等^[8]分析了水中空泡初始尺寸对空泡声波的影响;Brujan等^[9]研究了介质的弹塑性对激光声波的影响;李胜勇等^[10]研究了含气量对粘性液体中空泡声波频谱特性的影响。对于空化噪声,尽管广大学者开展了大量的理论和实验方面的研究工作,在声波声压特性、声波与水下环境关系等方面取得了一定的成果^[11],并对等离子体声波的频率特性采用傅里叶变换进行了分析^[12],但是由于空化噪声的影响因素比较多,研究结果与实际还有一定的差距,而且没有一款比较成熟的软件能够直观显示空化噪声的一些频谱特性^[13],后期数据处理需要花费大量的精力。

本文利用中国科学院声学研究所特制的高频响应压电陶瓷(PZT)水听器检测空泡溃灭过程中辐射的声波信号,应用小波变换及谱分析等手段对信号进行了分析,提取信号中表征空化的特征值,建立空化特征值与空化强度的对应关系,通过监测信号中各特征值的变化来判断空化的发生和发展,从而达到监测空化的目的。

2 空泡溃灭噪声实验测试

实验仪器配置如图1所示。脉冲Nd:YAG激光器产生的高强度激光(波长为1.06 μm、脉宽为10 ns)通过分光片(BS)、衰减片(ATT)和扩束装置L1后,由会聚透镜L2(焦距为150 mm)聚焦于液体中。实验触发信号由光电二极管(PIN)获取激光反射光来实现。实验中,靶面焦斑半径为50 μm。采用压电陶瓷探针式水听器检测实验中单空泡溃灭辐射的冲击波信号,并将检测到的声波信号存储到数字式存储示波器(OSC)中以便后续的信号处理和分析。实验中,在同一测量点处共进行4次声波信号的重复测量,4次激光脉冲能量的相对误差小于1%。实验时为了减小焦点附近气泡和杂质的影响,相邻两次激光脉冲的时间间隔大于10 s。

图2为实验获得的激光与水相互作用过程中辐射的声波信号典型波形图,即单空泡溃灭辐射噪声波。图中第一个峰对应等离子体膨胀产生的冲击波衰减为声波的波形,第二个峰对应空泡第一次溃灭辐射的声波,第三个峰对应空泡第二次溃灭辐射的声波。

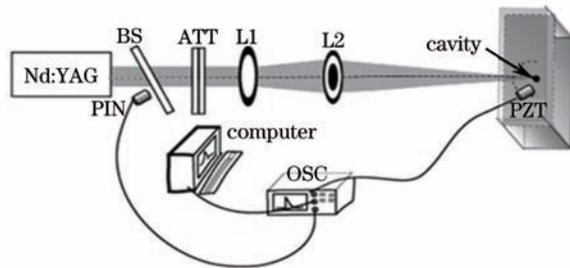


图1 实验装置

Fig.1 Experimental setup

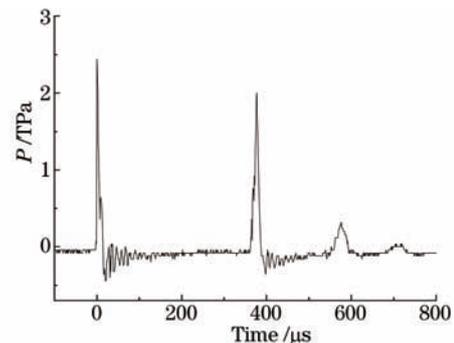


图2 典型的声信号图形

Fig.2 Typical acoustic signal

3 噪声信号声谱分析理论

3.1 小波降噪

由于小波变换在时频具有表征信号局部特征的能力,因此适合检测正常信号中夹带的反常现象并展示其成分,正是这种特性,使小波变换具有对信号的自适应性^[14]。因此本文选择将采集到的信号首先进行小波分析处理。对于任意的函数 $f(t) \in L^2(\mathbb{R})$ 的连续小波变换为

$$W_f(a, b) = \langle f, \psi_{a,b} \rangle = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \int_{\mathbb{R}} f(t) \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt. \quad (1)$$

式中 a 为伸缩因子, b 为平移因子。

由于环境背景噪声及传感器本身存在的热噪声等干扰信号,实验测得的空化噪声信号通常掺杂着随机噪声。该随机噪声是非平稳信号,杂乱无章,且在频率区间广泛分布。此外,从图2所示的典型信号可以看出信号中含有迅速变化的脉冲峰,因此采用常规的消噪处理易消除信号的细节特征。空化噪声信号是典型的突变信号,小波变换良好的时频局部化特性使其能够很好地分辨并处理空化噪声信号的突变部分和随机噪声。

含噪的一维信号模型通常可表示为

$$S(a) = f(a) + \theta e(a), \quad a = 0, 1, \dots, n-1, \quad (2)$$

式中 $f(a)$ 为有用信号, $s(a)$ 为含噪声信号, $e(a)$ 为噪声, θ 为噪声系数的标准偏差。在实际工程中,有用的信号是一些比较平稳的信号或者表现为低频信号,而噪声信号一般表现为高频信号,所以,消噪的过程可以分为如图3所示步骤,图中Ca1,Ca2,Ca3为逐层分解的低频信号,Cd1,Cd2,Cd3为逐层分解的高频信号。

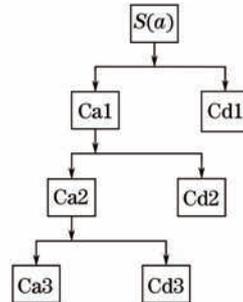


图3 信号 $S(a)$ 的小波分解过程

Fig.3 Wavelet decomposition of signal $S(a)$

3.2 功率谱分析

功率谱分析就是通过信号的相关性估计出信号的功率随频率的变化关系。对于有限长的数据,功率谱分析可以表述信号功率沿频率的分布关系,并找出被宽谱噪声掩盖的信号^[15]。功率谱分析中常用周期图法对噪声信号进行功率谱估计。周期图法就是把随机序列 $X(n)$ 的 N 个观测数据视为一能量有限的序列,直接将原始数据序列 $X(n)$ 进行离散傅里叶变换得 $X(k)$,然后再取其幅值的平方并除以 N ,作为序列 $X(k)$ 真实功率谱的估计:

$$\hat{S}_x[\exp(jw)] = \frac{1}{N} |X[\exp(jw)]|^2, \quad (3)$$

即 $X(n)$ 的功率谱估计可以直接通过 $X(k)$ 的频谱 $X[\exp(jw)]$ 得到。由于 $X[\exp(jw)]$ 是周期为 2π 的周期函数,因而功率谱估计 $\hat{S}_x[\exp(jw)]$ 也具有周期性。

4 结果分析

4.1 空泡噪声信号去噪分析

对实验中水听器检测到的空泡溃灭噪声信号进行小波去噪分析。图4(a)为原始信号,从图中可以看出原始信号较为粗糙,其中混有无用的随机噪声信号。利用Matlab工具箱中db1小波进行3层分解并提取系数,强制去噪后的信号如图4(b)所示,可以看出,经过强制去噪后信号较为光滑,但是很有可能丢失了信号中的一些有用成分。图4(c)为采用默认阈值去噪后的信号,不但光滑而且保留了原始信号中的部分特征信号。图4(d)为给定阈值处理的信号,阈值是根据经验选取的,较大程度地保留了原始信号中的特征信号。因此在工程应用中,经常利用默认值和给定阈值去噪的处理方式。

4.2 空泡溃灭信号噪声谱分析

设计编写了空泡溃灭噪声信号分析软件,显示界面分为信号读取显示功能区、设计功能区、演示分析功能区。界面中包括图表、功能按钮,如图5所示。

利用该软件分析实验中水听器测得的某一空化噪声信号,分析结果如图5(a)~(e)所示。原始信号中有三个较明显的峰值,但毛刺较多,不利于信号的分析。经过小波分析,即对信号进行分解、重构后实验信号波形毛刺较少且较平滑,并保持了原始信号中的有效信息;将小波降噪后的信号再进一步进行功率谱分析,

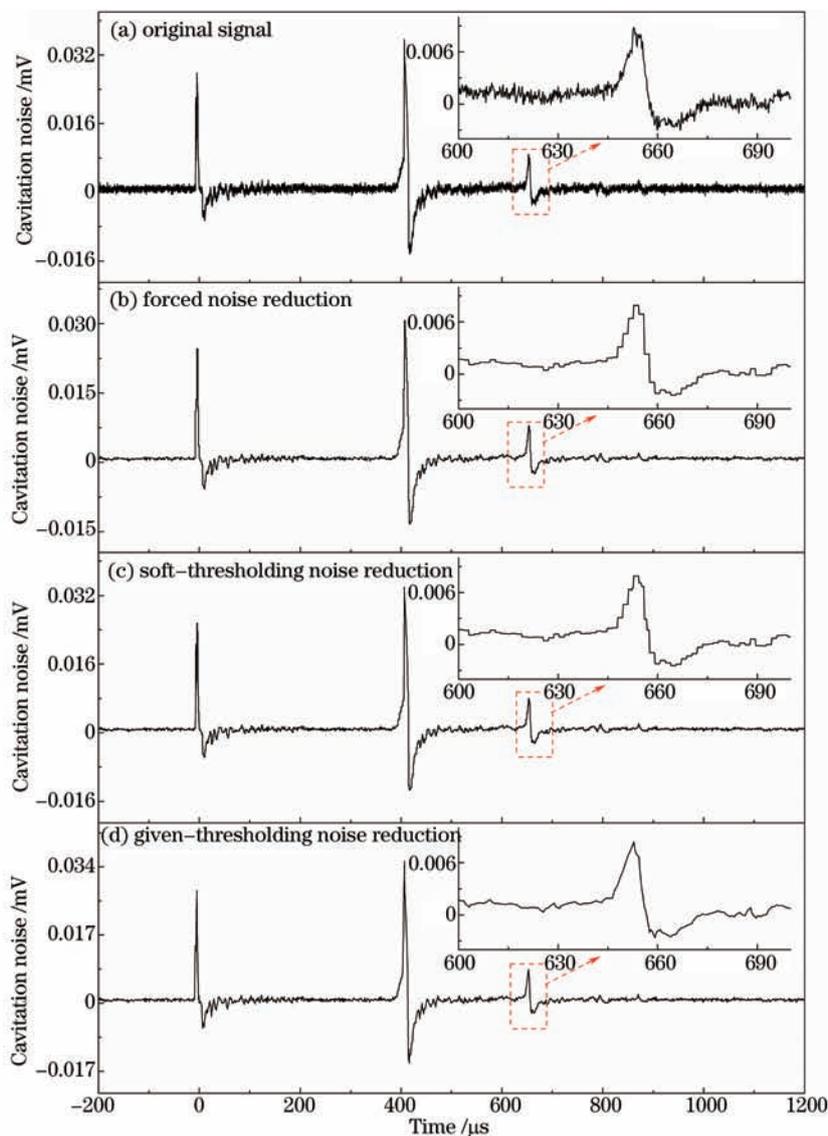


图4 不同小波降噪方式的效果对比图

Fig.4 Wavelet noise reduction effect comparison of different methods

可以发现空化噪声信号的频率在 20 kHz 左右有一个峰值,说明信号中只含有 20 kHz 一种频率成分;对功率谱估计后的信号进行进一步的峰值提取,并进行能量计算可以得到峰值能量图。从图中可以看出空化噪声能量主要集中在 0~90 kHz 频段。通过峰值能量图可以更加直观地观察噪声能量集中的频率范围,有利于对噪声频谱特征的进一步研究。

5 结 论

采用压电陶瓷水听器对液体中激光诱导单空泡溃灭噪声进行了信号检测实验,并对该声波信号进行小波降噪、功率谱分析。结果表明,将小波降噪技术应用于空化信号分析,提取有用信号、展示噪声和突变信号,是一种有效的方法。此外,还通过 Matlab 编制程序设计了一款空化噪声分析软件,通过该软件可以发现空化噪声信号的频率在 20 kHz 左右有一个峰值,且空化噪声能量主要集中在 0~90 kHz 频段。该软件能够快速直观地反映噪声信号的频谱特征,实现空化的在线检测和监测,在水轮机空蚀监测及故障诊断中具有一定的应用前景。

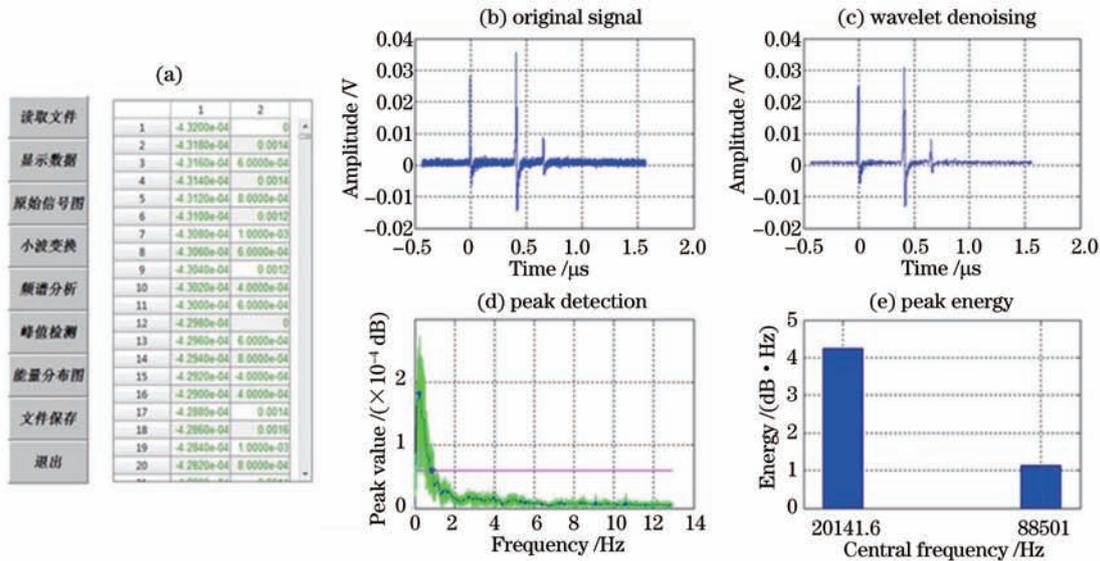


图5 分析结果

Fig.5 Analysis results

参考文献

- Li Chao, Ying Chongfu, Bai Lixin, *et al.*. The characteristic of cavitation noise and the intensity measurement of hydrodynamic cavitation[J]. *Scientia Sinica Physica, Mechanica & Astronomica*, 2012, 42(10): 987-995.
李超, 应崇福, 白立新, 等. 流体动力空化的噪声特性及空化强度的测量[J]. *中国科学: 物理学力学天文学*, 2012, 42(10): 987-995.
- Xie Zhengmao, Gao Limin, He Junhua. Design of high-speed photography optical system for air bubbles in water[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(4): 0422002.
谢正茂, 高立民, 何俊华. 水下气泡高速摄影光学系统设计[J]. *光学学报*, 2012, 32(4): 0422002.
- Ĉ dina M. Detection of cavitation phenomenon in a centrifugal pump using audible sound[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2003, 17(6): 1335-1347.
- Su Yongsheng, Wang Yongsheng, Duan Xiangyang, *et al.*. Research on designing of cavitation monitoring project in waterjet propulsion[J]. *Machinery Design & Manufacture*, 2009, (5): 261-263.
苏永生, 王永生, 段向阳, 等. 喷水推进器空化监测方案的设计研究[J]. *机械设计与制造*, 2009, (5): 261-263.
- Bajic B. Multidimensional diagnostics of turbine cavitation[J]. *J Fluids Engineering*, 2002, 124(12): 943-950.
- Lauterborn W, Kurz T, Geisler R, *et al.*. Acoustic cavitation bubble dynamics and sonoluminescence[J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2007, 14(4): 484-491.
- Andreas Hakansson, Laszlo Fuchs, Fredrik Innings, *et al.*. Visual observations and acoustic measurements of cavitation in an experimental model of a high-pressure homogenizer[J]. *J Food Engineering*, 2010, 100(3): 504-513.
- Kwangkun Park, Hanshin Seol, Wooyoung Choi, *et al.*. Numerical prediction of tip vortex cavitation behavior and noise considering nuclei size and distribution[J]. *Appl Acoust*, 2009, 70(5): 674-680.
- Brujan E A, Vogel A. Stress wave emission and cavitation bubble dynamics by nanosecond optical breakdown in a tissue phantom[J]. *J Fluid Mechanics*, 2006, 55(8): 281-308.
- Li Shengyong, Liu Xiaoran, Wang Jiang'an, *et al.*. Influence of gas content on spectrum properties of laser-induced cavitation bubble collapse sound waves in viscous liquid[J]. *J Optoelectronics·Laser*, 2012, 23(6): 1206-1210.
李胜勇, 刘晓然, 王江安, 等. 含气量对粘性液体中空泡声波频谱特性的影响[J]. *光电子·激光*, 2012, 23(6): 1206-1210.
- Liu Tao, Wang Jiang'an, Zong Siguang, *et al.*. Experimental study of laser-generated cavitation bubble motion near a free liquid surface[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(7): 0714003.
刘涛, 王江安, 宗思光, 等. 激光空泡在近自由液面运动特性的实验研究[J]. *光学学报*, 2012, 32(7): 0714003.
- Li Shengyong, Rao Dehu, Shen Zhonghua, *et al.*. Properties investigation of laser-induced plasma sound waves in liquids[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, 39(12): 2263-2267.
李胜勇, 饶德虎, 沈中华, 等. 液体中激光等离子体声波特性研究[J]. *光子学报*, 2010, 39(12): 2263-2267.

- 13 Qiao Hongchao, Zhao Jibin. Design and implementation of online laser peening detection system[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, 50(7): 071401.
乔红超, 赵吉宾. 激光冲击强化在线检测系统设计及应用[J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(7): 071401.
- 14 Lin Dongwei, Zhou Yuan, Wang Dexi. Axial force processing of foundation steel braces by using wavelet analysis[J]. Geotechnical Engineering Technique, 2013, 27(3): 154-157.
林冬伟, 周元, 汪德希. 小波分析在基坑钢支撑轴力监测数据处理中的应用[J]. 岩土工程技术, 2013, 27(3): 154-157.
- 15 Lin Liangyou. Research and Design of Measurement System for Turbine Cavitation Noise[D]. Beijing: Tsinghua University, 2007.
林良友. 水轮机空化噪声测试系统设计研究[D]. 北京: 清华大学, 2007.