空化噪声谱的分离

梁召峰，周光平，张亦慧，张博夫，杨宏丽

（深圳职业技术学院电子工程系，深圳 518055）

摘要：提出了一种用于分析超声空化声场的分离法，应用该方法研究了低频超声清洗声场，并和常用的谱级分析法进行比较。结果表明该分离法能直观地反映出空化的强弱，可以较细致地对瞬态空化和稳态空化进行比较分析，而且便于对空化声场的非线性过程进行更深入地了解，这对于研究声能量对物质的作用机制具有一定意义，此外也表明 Frohly 等人在研究了高频超声空化声场后所得出的表征空化活动强弱的指标同样适用于评判低频超声场。

关键词：功率超声；空化；噪声谱；谱分析

中图分类号：TB551 **文献标识码**：A **文章编号**：1000-3630(2005)02-0113-04

Decomposition of cavitation noise spectrum

LIANG Zhao-feng, ZHOU Guang-ping, ZHANG Yi-hui, ZHANG Bo-fu, YANG Hong-li

(*Department of Electronic Engineering, Shenzhen Polytechnic, Shenzhen* 518055, *China*)

Abstract: A separation method used to analyze ultrasonic cavitation fields is described. The method is applied to investigate low-frequency ultrasonic fields for cleaning, and compared with the spectral level analysis method. The results show that the described method can provide cavitation intensity more straightforwardly, allow more detailed analysis to both transient and stable cavitation, and provide insight into the non-linear process of cavitation. The method is useful in understanding the mechanism of ultrasonic effects on substances. Moreover, it is suggested that the criterion for characterization of cavitation intensity presented by Frohly based on his study on high-frequency ultrasonic fields is also applicable to low-frequency ultrasonic fields.

Key words: power ultrasound ; cavitation ; noise spectrum ; spectral analysis

1 引 言

超声空化会产生包括谐波、分谐波及连续噪声在内的空化噪声谱，通过对空化噪声的分析可以判别超声空化的相对强度。前人围绕空化噪声作了很多研究工作，Esche 是最早进行超声空化实验的研究者之一，他广泛研究了宽频率范围内(3kHz~3.3MHz)声波引起的空化噪声[1]。近年来，随着计算机和数字信号处理技术的发展，频谱分析技术更是受到了广泛的重视。郑进鸿和邱永德提出了几个表征空化声场特征的参数，认为用连续噪声谱的高低来表征清洗效果的强弱是最可信的，并用内爆声谱级峰值来表示连续噪声谱的高低[2]。由于不同清洗声场其空化噪声谱的变化趋势不尽相同，当用这种方法评价不同清洗系统的清洗效果时会带来较大偏差。Vijayanand 等人将超声空化场中任一位置的能量分为声波能量和由空化活动所产生的空化能量两部分，其中超声自身的能量表示声场中不存在空化时的声能量，从声发射谱中分离出代表空化能量的部分达到对空化强度的测量[3]。这种方法使用了两种液体作为传声媒质，在相同声场条件下仅一种可以产生空化。分别测量两种液体中的声发射谱，从能产生空化的液体的声发射谱中分离出反映空化强度的频谱图，达到对空化强度的测量。从工程应用角度看，该

收稿日期：2004-06-03；修回日期：2004-08-10
基金项目：国家自然科学基金资助项目(10274053)
作者简介：梁召峰(1979-)，男，陕西人，硕士，研究方向：超声工程。

方法操作复杂，不适合在实际工作状况下使用。Frohly 等人使用宽带水听器及谱分析仪对高频(1.075MHz)超声场进行了测量，通过对实验结果的分析认为稳态空化可用诸如二次谐波或 1/2 次分谐波谱级这样的参数来表征，而瞬态空化可通过在对数尺度上对空化噪声谱的积分来表征[4]。但是 Frohly 等人在输入声能量不同的情况下，设定同一门限来分离线谱和连续噪声谱，这种处理方法是比较粗略的，另外也未能对空化较强的低频超声场进行研究。

本文改进了前人的处理方法对低频空化噪声谱进行研究，提出了一种空化噪声谱的分离方法，并和常用于研究空化的谱级分析法作了比较，结果表明该方法适合于分析低频超声空化声场。

2 空化噪声谱的分离原理

超声空化是强超声在液体媒质中引起的一种十分复杂的非线性物理过程，超声空化噪声是由于超声波的声强足够大时，在液体中引起空化而产生的噪声。60 年代，Flynn 将声空化分为稳态空化和瞬态空化来描述[5]。液体空化时伴随有空泡的非线性振动以及空泡的溃灭，前者对应稳态空化，会产生各次谐波和分谐波线谱；后者则对应瞬态空化，会辐射连续噪声谱，所以直接测量超声空化场得到的是连续噪声谱叠加上许多线谱。Vijayanand 等人将超声空化场中任一位置的能量分为声波能量和空化能量两部分。

此外，当声强较大时，声波在媒质的传播过程中会产生非线性效应，导致波形的畸变，而波形畸变标志着谐波的滋生，这些高次谐波的能量均来自于基波。

依据以上的理论，可用图 1 将超声空化场的能量进行分解，并按不同的方式进行归纳。

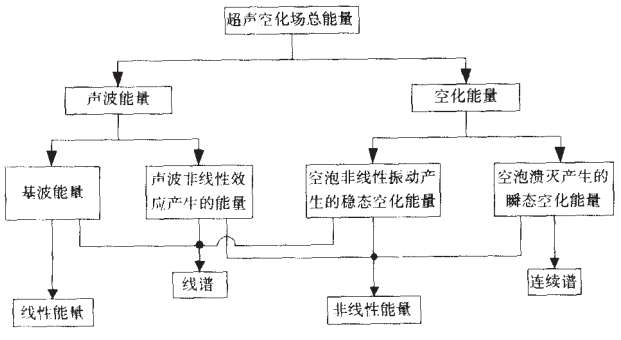


图 1 超声空化场能量分解示意图

Fig.1 Decomposition of ultrasonic cavitation energy

3 噪声谱分离的实现

空化噪声具有随机性，对于随机信号更有意义的是进行谱分析。首先得到空化声场的功率谱，由功率谱求出声场的总能量，然后分别提取连续谱和线谱。线谱叠加于连续谱之上，连续谱轮廓的起伏会影响到线谱的提取，因此应对连续谱的轮廓进行最优拟合，拟合得到连续谱后即可通过积分求得空泡溃灭所产生的瞬态空化能量。线谱的提取比较复杂，本文仅提取基波谱，首先从整个谱中减去拟合的连续谱，再从剩下的谱中得到基波谱，由基波谱可以计算出基波能量。最后从总能量中减去基波能量就得到声场的非线性能量，而从非线性能量中减去瞬态空化能量就得到由声波非线性效应产生的能量以及由空泡非线性振动所产生的稳态空化能量之和，对于含气液体而言，谐波主要是由气泡振荡所致，所以如果忽略因高频率或高强度产生的声波非线性效应，那么从非线性能量中减去瞬态空化能量就近似为由空泡非线性振动所产生的稳态空化能量。

功率谱不同频率处的谱级代表该频率分量的能量，以前很多学者对空化噪声谱的谱级也进行过分析，为了研究谱级和声场中各部分能量的关系，利用 MATLAB 语言编制了谱分析程序，程序大致分为两部分，即线谱谱级提取以及各部分能量的分离。采集信号时长为 40ms，分析频带限制在 500kHz 内，频率分辨率为 76.3Hz，程序使用 Welch 法进行功率谱估计，其中谱级提取部分分别提取了 1~4 次谐波和 1/2~7/2 次分谐波，而能量分离部分中连续谱通过中值滤波函数拟合。对于基波的提取，程序首先在输入的基频附近寻找频率极大值作为实际测得的基频 f_0，再用功率谱减去拟合的连续谱，在剩下的谱中将 $f_0\pm\triangle f$ 作为基波的频带，然后求得基波能量。使用 $f_0\pm\triangle f$ 频带内的能量作为基波能量是因为在用 Welch 法求功率谱的过程中，使用了窗函数对数据进行处理，而加窗使原来的信号在窄频带内的能量分散到无限的频带范围，出现了频率泄露或能量泄露，同时考虑到发生器的输出频率会在 f_0 左右稍微起伏，所以近似认为 $f_0\pm\triangle f$ 内的能量为基波能量，$\triangle f$ 的选择主要取决于数据长度和采样频率。

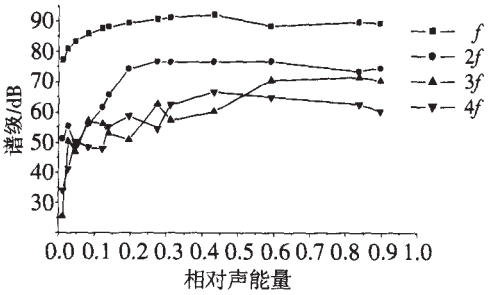


图 2　谐波谱级随声能量的变化曲线

Fig.2　Spectral level of hamonics plotted against acoustic energy

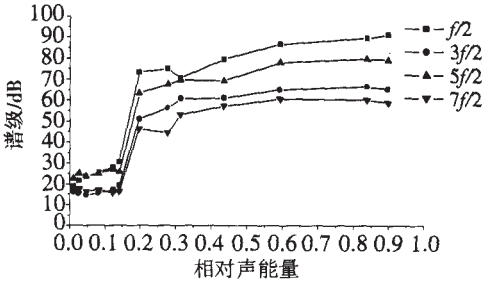


图 3　分谐波谱级随声能量的变化曲线

Fig.3　Spectral level of sub-harmonics plotted against acoustic energy

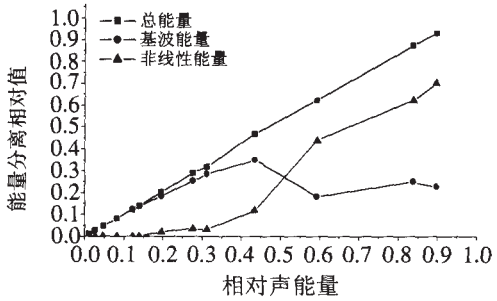


图 4　基波能量及非线性能量随声能量的变化曲线

Fig.4　Energy of the fundamental component and non-linear energy plotted against acoustic energy

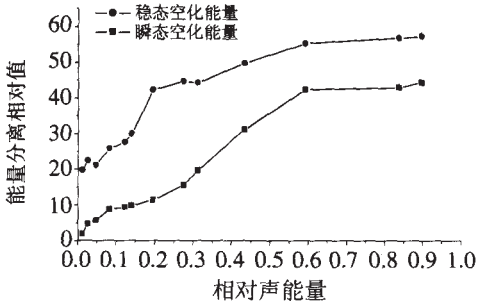


图 5　稳态空化能量及瞬态空化能量随声能量的变化曲线

Fig.5　Energy of stationary and transient cavitation plotted against acoustic energy

4　实验结果与分析

利用宽频带水听器对 26.32kHz 清洗系统进行测量,测量信号送数字示波器存储,然后用 MATLAB 编程处理。图 2~图 5 为测量结果,横坐标均为水听器输出电压有效值平方的归一化值，由于水听器电压有效值表示声压的幅度，而其平方反映了声能量的大小,所以图 2~图 5 显示了低频空化声场中各部分能量以及谱级随声场中声能量的变化情况。

图 2、图 3 分别表示前 4 次谐波谱级及前 4 次分谐波谱级随声能量的变化趋势。图 4 为基波及非线性能量随声能量的变化曲线，图 5 为稳态空化及瞬态空化能量随声能量的变化曲线，由于瞬态空化能量占总声能量的比例较小，为了比较清楚的观察其变化趋势采用了对数坐标(0dB=$10^{-4}V^2$)。

如用 p^2 表示水听器输出电压有效值平方的归一化值，图 2 表明基波谱级在 p^2<0.45 的范围内逐渐增大,而且增大的幅度逐渐减小,p^2 >0.45 后基波谱级开始减小,直到 0.6 时趋于饱和。二次谐波在 p^2<0.2 的范围内迅速增大,而且增大的速率要比基波更快,在 0.2 时趋于饱和。而在整个范围内 3、4 次谐波交替增长,这也许正反映了能量的转移。由图 3 可看出在 p^2<0.15 时各次分谐波的幅度都很小,但在 0.15<p^2<0.2 时前 5 次分谐波迅速增大，p^2>0.2 以后增长速度明显减小。Kitsu 等人用光学的方法对 1MHz 的高频换能器声场测量时也得到了类似的谱级图[6]。同时与分谐波的突然增大相对应，图 2 中在 p^2=0.2 附近 3 次谐波的幅度有明显的降低,Takahashi 等人使用氦氖激光测量 16.5kHz 声场的空化噪声谱级时也出现了这一现象[7]。

由图 4 可以看出,从 p^2=0.15 开始,基波能量曲线逐渐偏离总能量直线,并且在 0.45 左右达到最大值,随后开始下降直到 p^2=0.6 时趋于饱和,此后不随总能量的增大而变化。相应的非线性能量从 0.15 开始逐渐增大,在 0.15<p^2<0.3 范围内增幅较小,而在 0.3<p^2<0.6 范围内迅速增大，在 0.6 以后非线性能量随总能量同比增长。同时也可看出在 p^2>0.5 后非线性能量超过了基波能量而占主导地位。图 5 表明,稳态空化能量和瞬态空化能量都随总能量的增大而增大,其中瞬态空化能量在 p^2<0.6 的范围内一直增大，而在 0.3<p^2<0.6 范围内增长速度最快,p^2>0.6 时趋于饱和;稳态空化能量的增长不同于瞬态空化,其具有阶段性,p^2<0.2 为增长的第一阶段,0.2<p^2<0.3 趋于饱和,0.3<p^2<0.6 为增长的第二阶段,p^2>0.6 又趋于饱和。稳态空化能量的增长具有阶段性是因为 0.3<p^2<0.6 时瞬态空化急剧增长,而气泡的瞬态空化又会产生更多的微气

泡,从而使稳态空化也随之增强,出现第二次增长。图5也说明了稳态空化比瞬态空化更早出现饱和现象,稳态空化第二阶段的增长完全是由于瞬态空化增长所致,如果除去瞬态空化的影响,稳态空化将和2次谐波及1/2次分谐波有相似的变化规律。

5 结 论

由上面的分析可以看出,稳态空化和瞬态空化具有不同的变化规律,2次谐波及1/2次分谐波适合于表征稳态空化活动,瞬态空化则需要通过连续噪声谱的积分来反映,这也表明Frohly等人在研究了高频超声空化声场后所得出的表征空化活动强弱的指标同样适用于评价低频超声场。

Frohly等人在输入声能量不同的情况下,通过设定同一门限来分离线谱和连续噪声谱,本文则通过中值滤波达到对连续噪声谱的最优拟合,从而较好的分离了线谱和连续谱,故能更准确地分析超声空化声场。同时和常用的谱级分析方法相比,本文的分离方法能直观地反映出空化的强弱,并且能更细致地对于瞬态空化和稳态空化进行比较分析,便于对空化声场的非线性过程进行更深入的了解,这对于研究声能量对物质的作用机制具有一定的指导意义。

参 考 文 献

[1] Esche R. Untersuchung der schwingungskavitation in flüssigukeiten [J]. Acustica, 1952, Beih2 (Heft 4): 208-218.

[2] 郑进鸿, 邱永德. 液体中空化声场的统计测量及其在评价空化设备性能中的应用 [J]. 应用声学, 1991, **10**(1): 18-23.
ZHENG Jinhong, QIU Yongde. The statistical measurement of cavitation fields in liquids and its application in evaluating the performances of the cavitation equipments [J]. Applied Acoustics, 1991, **10**(1): 18-23.

[3] Vijayanand S M, Shishir P S, Aniruddha B P. Mapping the cavitation intensity in an ultrasonic bath using the acoustic emission [J]. AICHE Journal, 2000, **46**(4): 684-693.

[4] Frohly J, Labouret S, Bruneel C, et al. Ultrasonic cavitation monitoring by acoustic noise power measurement [J]. J Acoust Soc Am, 2000, **108**(5): 2012-2020.

[5] Flynn H G. Physics of acoustic cavitation in liquids. Physical Acoustics [M]. New York: Academic Press, 1964. 57-172.

[6] Katsuo Kitsu, Yasunori Ikeno, Takenobu Tsuchiya, et al. Optical measurement system of sound pressure with refracted laser light propagated through an acoustic field [J]. Jpn J Appl Phys, 1997, **36**(5B): 3167-3170.

[7] Sumio Takahashi, Nobuaki Takahashi. Measurement of cavitation noise and bubble oscillation using acoustooptic detection scheme [J]. Jpn J Appl Phys, 1996, **35**(5B): 2958-2962.

(上接第100页)

噪比-6dB。

常规波束形成(H=1)对三个目标的检测结果如图4(a)所示。利用最佳空间滤波器后置联合检测系统检测90°方位的目标,取θ_S=90°,检测结果如图4(b)所示。

可以看出当信号干扰比为-6dB时,最佳空间滤波器可以检测弱目标。而常规波束形成已无法检测弱目标。

5 结 论

本文所给出的最佳空间滤波器后置联合检测系统能够有效完成指定弱信号的检测,能够有效提高目标方位分辨率。设计的最佳空间滤波器实现方法可以方便地在圆柱型基阵上实现。

参 考 文 献

[1] Griffiths L J, Jim C W. An alternative approach to linearly constrained adaptive beamforming [J]. IEEE Trans on AP, 1982, **30**(1): 27-34.

[2] Shan T, Kailath T. Adaptive beamforming for coherent signals and interference [J]. IEEE Trans on ASSP, 1985, **33**(3): 527-536.

[3] Griffiths L, J. A new approach to partially adaptive arrays [C]. Proc ICASSP-87, 1987, 1999-2002.

[4] Simaan M. Optimum array filters for array data signal processing [J]. IEEE Trans Acoust, Speech, Signal Processing, 1983, **31**(4): 1006-1015.

[5] Hanna M.T. Simaan M. Absolutely optimum array filter for sensor arrays [J]. IEEE Trans Aconst, Speech, Signal Processing, 1985, **33**(6): 1380-1386.

[6] LUAN Jingde. Experimental study of optimum spatial array filter [A]. Proc. Of UDTeur2001-Conf. PⅡ-12 [C]. Hamburg, Germany: 2001.

[7] 栾经德,李启虎,刘文化. 一种最佳空间滤波器的实现 [J].声学学报, 2004, **29**(2): 143-148.
LUAN Jingde, LI Qihu, LIU Wenhua. Realization of one type of optimun spatial filter [J]. ACTA ACUSTICA, 2004, **29**(2): 143-148.

[8] Li Qihu. A new architecture of spatial filter for suppressing strong directional interference [C]. Proc. of IMDEX ASIA, Singapore: 1999. 87-96.