

大功率低频超声场测量研究进展

梁召峰^{1,2}, 周光平², 林书玉¹

(1. 陕西师范大学应用声学研究所, 西安 710062; 2. 深圳职业技术学院电子通信工程系, 深圳 518055)

摘要: 大功率低频超声场的主要特点是有空化产生, 这给声场定量测量带来困难, 而该类声场的测定是超声清洗、声化学等超声液体处理技术中的基本问题, 掌握声场分布和空化强度的信息对于衡量超声系统的性能及其处理效果至关重要。文章综述了迄今用于测量大功率低频超声场的各种方法, 将其分为直接测量方法和间接测量方法两大类进行阐述, 介绍了每种测量方法的基本原理, 并对各自的优缺点进行了对比分析。最后介绍了一些国内外的相关测量设备, 结合大功率低频超声场测量领域目前的研究现状, 探讨了今后该领域急需解决的问题及其发展方向。

关键词: 超声场; 大功率超声; 空化; 超声清洗

中图分类号: TB559 文献标识码: A 文章编号: 1000-3630(2004)01-0061-06

Review of the high-power low-frequency ultrasonic fields measurement

LIANG Zhao-feng^{1,2}, ZHOU Guang-ping², LIN Shu-yu¹

(1. Applied Acoustics Institute, Shaanxi Normal University, Xi'an 710062, China;

2. Department of Electronic and Communications Engineering, Shenzhen Polytechnic, Shenzhen 518055, China)

Abstract: Cavitation is a main characteristic of high-power low-frequency ultrasonic fields. It makes the quantitative measurement of the ultrasonic fields difficult, which is essential in ultrasonic liquid processing techniques such as ultrasonic cleaning, sonochemistry, etc. In order to evaluate the performance and treatment results of ultrasonic devices, it is important to acquire information of ultrasonic field distributions and cavitation intensity. This paper reviews various measurement methods for high-power low-frequency ultrasonic fields. These methods are divided into two classes in terms of their operating principles, and their advantages and disadvantages are compared. Finally, the paper introduces some related measurement equipment and raises problems for further studied.

Key words: ultrasonic fields; power ultrasound; cavitation; ultrasonic cleaning

1 引言

大功率超声已被广泛运用于不同的领域, 如超声清洗、声化学及医学治疗等。对于大功率声场的测量出于安全及处理效果等原因而显得非常重要。由于超声处理是利用超声振动的能量与物质相互作用, 从而产生各种物理、化学和生物等效应^[1], 所以超声处理的效果和声场的性质密切相关。比如在超声清洗中, 声场强度太弱不能有效地将污染物除去,

太强不仅会损坏被洗零件, 还会引起声能分布不均, 形成清洗盲区, 导致清洗效果差。又如在声化学反应器的优化设计中, 除了基本的设计方法外, 空化声场的测量也是一个急需解决的课题。可见掌握声场分布的信息对于衡量超声系统的性能及其处理效果至关重要。然而, 大功率、低频(20kHz~100kHz)条件下液体中声场的测量是一个较复杂的难题, 由于空化的产生, 不仅易损坏使用的测量传感器, 而且产生的空化气泡会散射由声源发出的超声波, 振荡的气泡会产生自己的信号, 要把它们和声源产生的信号分离开来也是一个复杂的过程, 所以迄今还没有完全成熟的测量方法。自从上世纪中期以来, 就有越来越多的人采用了不同的方法尝试对大功率超声场进行测量, 而大功率超声场也是目前国际上的一

收稿日期: 2003-07-23; 修回日期: 2003-09-28

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, 陕西凤翔人, 硕士研究生, 研究方向: 超声工程。

个研究热点,它的测定是工程应用中的一个基本问题,也是一个重要问题。

2 大功率低频超声场特点

在大功率低频超声液体处理的各种应用中,主要的特点是会在液体中产生空化,且在空化过程中伴随着诸多效应,主要包括以下四种:(1)机械效应(声冲流、冲击波、微射流);(2)热效应(局部高温高压、整体升温);(3)光效应(声致发光);(4)活化效应(水溶液中产生羟基自由基)^[2]。这四种效应并非彼此独立,而是经常同时出现,比如热效应对光效应有作用。此外,超声空化现象还涉及诸如液体、声场及外界环境等多方面的条件因素,它们具体包括液体的粘滞系数、表面张力系数、蒸汽压、含气量、温度、超声频率、声压及外界环境压力等^[3],所以超声空化场的理论分析就颇为复杂,而实验也多是以上的一些效应出发,定性的对高强超声场进行了研究。本文拟对大功率低频超声场,且主要围绕超声清洗领域的测量技术进展进行综述。

3 测量方法

大功率低频超声常被应用于装有液体的有限容器中,例如超声清洗槽和声化学反应器,这时容器中会形成复杂的声场,声学物理量一般为时间和空间的函数,定量测量低频高强声场比较困难。前人对声场的测量方法也进行过总结^[4-6],在此将能够用于测量大功率低频声场的方法粗略的分为两大类进行阐述:(一)直接测量声场物理量的方法,这些物理量包括声压、声强等;(二)通过观察空化的效果间接测量低频高强超声场。

3.1 直接测量方法

3.1.1 水听器法

水听器是把水下声压信号转换为电信号的换能器。按其作用原理可分为压电水听器、磁致伸缩水听器及光纤水听器等。目前最常用的是压电式声压水听器,这类水听器依据压电效应工作。在实际工作时,产生的电荷通过压电元件表面上的电极提取,经电压放大器或电荷放大器放大后,由信号处理示波器呈现出能反映声波波形的图像。另外,理论分析要求,测量声压的接受器的尺寸应小于被测声波波长的四分之一,这样,才能保证接受到的信号的相

位和幅值的变化,对测量不确定度不产生明显的影响。

由于针形压电陶瓷水听器^[7]相当坚固耐用,且有高的灵敏度,所以适合于测量高强超声场。但是由于压电元件的径向振动、声吸收等影响给水听器的结构设计带来困难,使得实测的频率及指向性和理论设计值有一定的偏差。此外,压电元件高的特性阻抗(和水比较)也意味着它会干扰被测的超声场。现在用的较多的压电元件还有高分子聚合物偏氟乙烯(PVDF)^[8-10],它的特性声阻抗和水的很接近,与水介质接触时有很好的声学匹配。PVDF质地柔软,化学稳定性高,频响宽,使得用压电陶瓷元件所产生的不平坦的频响曲线当改用PVDF时得到很好的改善。但使用时间长了,压电元件和连线的接触易出现问题使得水听器不稳定。而且用PVDF材料制作的水听器还有温度限制的问题,因为PVDF在60℃时就会出现退极现象。

一般的水听器由于它们频带的限制(截止频率的下限一般为数百千赫兹)而不能用于低频高强空化场的测量。L. Gaete-Gareton等人设计了两种微型压电陶瓷水听器,称其可以测量低频、强空化情况下的声压^[11]。它们分别用于测量低温(小于45℃)和高温(大于45℃)时的声压。这两种水听器尺寸小,灵敏度高,内置的放大器提高了信噪比,并在整个频带上提供了20dB的电压增益,其低的输出阻抗允许用长导线(至少2m)将电压信号传给其他设备。S. R. Soudagar和S. D. Samant利用正压电原理,设计出一种可以半定量测量超声清洗场声压分布的探针^[12]。这种探针由压电陶瓷片加一变幅杆组成,并用其对底部分别布有一个和三个换能器的清洗场进行了测量。近来贾志富提出了一种可用于测量声场声强的新型组合式水听器的设计方案^[13],这种水听器由声压型水听器与振速水听器在结构上组合为一体而成,通过测量某点的声压和振速矢量进而计算出该点声能流的大小和方向。

3.1.2 热敏探头法^[14-17]

若在吸收材料中,如蓖麻油、硅橡胶和聚乙烯中埋有热电转换元件,如热电偶和热敏元件,并置于声场中,声能在吸收材料中转换成热,测定热电偶的输出电压或热敏电阻的电阻值变化量,从而得知测量点处的相对声强值,且不受空化影响,电干扰也不灵敏。可以通过测量起始升温变化率或平衡温度与起始温度之差来测定声强,文献[16]给出了它们之间

的关系。在一个已知声场中对热敏探头加以校准, 则可以用来测量声场的绝对声强值。如果探头体积做得比波长小许多, 则对声场影响小, 可以测量声强的空间分布。使用热敏探头的缺点是它无法给出声场的频率信息, 而且在大功率低频情况下, 探头有可能受到空化腐蚀, 这就要求在选择吸收材料时需特别考虑。

3.1.3 光纤探测法

光纤传感由于具有体积小、抗电磁干扰等优点而在很多领域得到了广泛的应用。超声场的光纤探测就是通过分析光纤中被声场所调制的光信号而得到声信号的方法。1996年, Christian Koch 提出并设计了多层镀膜的光纤探测器, 他认为该类光纤探测器可用于高能量的冲击波以及低强度的诊断超声^[18]。后来他又设计了一种类似于 Mach-Zehnder 干涉计的光路系统, 将一端镀钛的单模光纤作为干涉仪的一条臂, 在声场的作用下, 光纤的端面会发生微小的位移, 这个微小的位移能被干涉仪所探测, 并且采用外差方法直接得到了声压值。因为槽壁的反射、水面的波动及其温度的变化等因素的影响, 使得要得到声压与探头位置间的关系很困难, 最终 Christian Koch 用此系统对超声清洗场中的分谐波进行了测量, 作者对测得的声压进行了快速傅立叶变换而得到功率谱, 给出了共振及其非共振情况下的功率谱密度图^[19]。从图中可以看到谐波和分谐波, 而分谐波反映了声场中的空化活动^[20]。由于空化场的复杂性, 用光纤探测空化场的具体分布至今鲜有报道。

此外, 利用量热法可以测量液体中的总声功率和平均声强^[21], 但由于它无法对声场分布进行描述, 所以在此不再赘述。

3.2 间接测量方法

3.2.1 薄膜腐蚀法

将厚度为 20 μm ~ 30 μm 的铝箔置于声场中受空化腐蚀, 在一定时间内取出, 测出由于腐蚀而损失的质量。以损失量的大小来衡量空化强度。这种方法要求铝箔表面的平整、光洁度一致, 而且置于声场的时间不能过长。薄膜腐蚀法使用简单方便, 可用来测量由液体表面到不同深度的空化强度分布, 但是测量误差较大, 因为有时铝箔会整块脱落。改进的办法是缩短腐蚀时间, 使其不穿孔而只产生麻点变形, 然后用光在一定角度照射铝箔表面, 测量其反射光强度来衡量铝箔变形程度以判断空化强弱^[3]。

A. E. Crawford 还专门设计了测量铝箔被腐蚀的面积装置^[22]。

3.2.2 影像法

3.2.2.1 淀粉碘化钾反应法^[23]

将淀粉经过处理后充当“感光乳剂”, 涂于一面为玻璃的圆幻灯片上, 置于盛有稀碘溶液的容器中, 在空化声场的作用下, 碘与淀粉反应而变蓝, 从而使幻灯片变色, 作用适当时间后取出, 冲去残留的碘和淀粉, 便可得到空化声场分布的图像。

3.2.2.2 染色法^[24-26]

该方法是将纸板放入一定浓度的染料水溶液中, 在声场作用下, 染料将优先附着在声能较强处。这样, 经过声场短时间辐射后, 在纸上就可以得到代表声场空间分布的染料图案。

染色法简单易行, 能方便快速地记录液体中大功率超声场的分布, 可以在纸上得到代表声场分布的稳定、完整的染料图案, 克服了铝箔腐蚀法中薄膜易破裂脱落, 淀粉碘化钾试纸显色法中易褪色。

3.2.2.3 液晶显色法^[27]

胆甾型液晶在光的照射下, 具有温度不同时呈现不同颜色的性质, 利用这一性质可以对超声场成像。将一面喷有胆甾型液晶的黑色聚乙烯薄膜置于液体表面, 在超声波的作用下, 薄膜吸收声能温度随着变化, 相应地胆甾型液晶温度也跟着变化, 在光的照射下, 会呈现出反应声场声强分布的彩色图案。这个方法的优点是可以直观地看到间接反应声场信息的图像, 但操作复杂, 且易受多种因素的干扰, 所以误差比较大。与此方法相似的还有磷光剂成像法, 其机理是磷光剂受超声波作用发光而呈现出声场的图像。

3.2.2.4 声致发光成像法

液体中产生空化时伴随着一种光的弱发射现象, 此即声致发光。通过直接用肉眼观察或照相底板感光的方法可以了解空化场的分布情况, 也可用光电倍增管接受的方法来测量空化场的声致发光强度。李化茂提出了声致化学发光增强原理, 即在碱性溶液中, 使化学冷光剂鲁米诺经过大功率超声产生的空化场的氧化获得了它的增强光谱, 它的发射波长主要落在可见光的 400nm~ 700nm 之间, 且呈浅蓝色, 利用彩色胶卷便可感光成像^[28-29]。此方法既可直接用肉眼观看到超声空化场的整体分布, 又可照相记录下来。

3.2.3 谱分析法

3.2.3.1 频谱和功率谱分析法

空化噪声谱是反映超声空化的一个很重要的信息^[29]。郑进鸿和邱永德根据液体中空化形成的物理过程,提出了基波谱级、谐波总声级、相对谐波总声级、内爆波谱级、总线谱声级和非线性转移效率几个表征空化声场特征的参数^[30]。认为实际的空化声场中,直接测量到的是连续噪声谱叠加上许多线谱,这些线谱的结构,描绘出声能量按频率的精细分布,因此,对所得的谱图进行频谱分析就能反映精确和完整的空化特征。由于空化气泡产生及运动的随机性,且影响的因素又非常多,所以对声空化进行实时谱分析时也进行了统计处理。最终提出内爆谱级越高,相对非线性谱级各参量也跟着增大,空化越强。此方法对于比较两台清洗机的空化清洗性能是可行的。若要用此方法对空化声场作定量测量,则需统一规定测量环境以及对接受换能器的性能、位置等的测试设备性能加以规范化。

3.2.3.2 声发射谱法^[32]

Vijayanand S. Moholkar 等人认为超声清洗场中任一位置的能量强度由两部分组成,一部分是超声自身的能量强度,另一部分是由局部的空化活动所产生的空化强度。并依此提出了一种新方法对清洗场的空化强度进行分析。这种方法使用了两种液体作为传声媒质,在相同声场条件下其中一种可以产生空化,而另一种则不能。分别测量两种液体中某点的声发射谱,用能产生空化液体的声发射谱的傅立叶系数减去不能产生空化液体的声发射谱的傅立叶系数,就得到频域从中反映该点空化强度变化的频谱图,再对其进行逆傅立叶变换并取其其实部可得时域中该点空化强度的变化情况。利用该原理对槽中声场进行多点测量就可得到清洗槽中声场空化强度的空间分布。

此外,通过检测声空化致化学产额可以测量空化强度,例如碘释放法、电子自旋共振技术、荧光光谱技术及电学方法等^[3],但它们均不能得到详细的声场分布信息。F. Faid 等人利用电化学探头,测量了不同声化学反应器中由于空化的机械效应引起的质量迁移率^[33]。这种方法可以粗略地估计反应器中空化强度的大体分布,但是不适于定量测量,因为很难找到质量迁移率和空化强度之间的关系。

4 声学测试设备

随着各种测量方法的出现,专门用来测量声场

信息的测试设备也层出不穷。1941年, C. W. Clapp 和 F. A. Firestone 制作了一个声瓦特计,用来测量声能量流。1955年, S. Baker 设计了测量空间一点声波声强的仪器^[34]。丹麦的 B&K 公司生产了 8101、8103、8104 及 8105 四种型号的水听器,工作频率覆盖次声频至超声频(0.1Hz~100kHz),而其中的 8103 能用来测量冲击波及超声清洗槽中的声场。后来,日本研制出专门的超声波测量仪(UTK-30),它能方便地测定声场的声压和频率,但该仪器体积大,耗电较多。1995年底,我国也研制了用于对较强超声场测量的仪器,且体积小、重量轻、耗电少^[35]。美国超声清洗槽的生产商们也制作了一种用来半定量测量他们设备特性的装置,该装置为一个装有液体的管子,但管中悬浮着很多微小粒子,将管子置于清洗槽中,悬浮的粒子就会向驻波的波节处迁移,从而使清洗槽中的声场可视化^[36]。美国 ppb 公司更是率先研制了能测量超声空化场的数字超声能量计,它不但可以测量声场的频率,也能对空化强度进行测量,一些行业已经用它来评估超声设备的性能及处理效果。

5 讨论及展望

比较各种测量方法可以看出,薄膜腐蚀法、染色法及声致发光成像法简单易行,且能直观地得到超声空化场的分布情况,所以被很多研究人员所采用去定性的描述空化场^[37-43]。而淀粉碘化钾反应法和液晶显色法操作复杂,不易得到长久稳定的反映空化场信息的图像而很少被采用^[44]。总之间接测量法多是对空化场的定性测量,利用频谱和功率谱分析法也许能对空化场进行定量测量,但还未见有相关详细的报道,而近来研究人员越来越多的把目光投向了空化噪声谱^[45-47],因为空化噪声很好的反映了声场中的空化活动,可见通过谱分析来描述大功率空化声场将是今后该领域的一个研究热点。水听器和热敏探头经过事先校准可以对空化场进行定量测量,但是大功率低频声场由于产生空化给探头的设计带来了困难,而要找到测量结果与声压或声强之间的关系也并非易事,所以要想准确测量声场还有大量工作要做。

综上所述,由于大功率低频空化声场很复杂,现有的方法不能全面、准确地反映声场特征,至今还没有完全成熟的测量方法。与之相关的超声应用如超

声清洗和声化学反应器也均无国际标准以至行业标准, 当务之急是提出更量化、实用化的大功率声场的测量方法, 建立用于对大功率声场进行量化测量的标准, 以期能够对相关领域超声设备的性能及其处理效果进行科学的评价。

参 考 文 献

- [1] 应崇福. 超声学[M]. 北京: 科学出版社, 1990. 456.
- [2] 秦炜, 原永辉, 戴猷元. 超声场对化工分离过程的强化[J]. 化工进展, 1995, 15(1): 1-5.
- [3] 冯若. 超声手册[M]. 南京: 南京大学出版社, 1999. 656-717.
- [4] Neppiras E A. Measurements in liquids at medium and high ultrasonic intensities[J]. Ultrasonics, 1965, 3(1): 9-17.
- [5] Saksena T K. Methods of reliable measurement of ultrasonic power and cavitation in liquids: a review [J]. Journal of the Acoustical Society of India, 1980, 8(1): 12-19.
- [6] Mark Hodnett, Bajram Zeqiri. A strategy for the development and standardization of measurement methods for high power/cavitating ultrasonic fields: review of high power field measurement techniques [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 1997, 4(4): 273-288.
- [7] Lewin P A, Chivers R C. Two miniature ceramic ultrasonic probes [J]. Journal of Physics E: Scientific Instruments, 1981, 14(12): 1420-1424.
- [8] Lewin P A. Miniature piezoelectric polymer ultrasonic hydrophone probes[J]. Ultrasonics, 1981, 19(5): 213-216.
- [9] DeReggi A S, Roth S C, and Kenney J M, et al. Piezoelectric polymer probe for ultrasonic applications [J]. J. Acoust. Soc. Am, 1981, 69(3): 853-859.
- [10] Platte M. A polyvinylidene fluoride needle hydrophone for ultrasonic applications [J]. Ultrasonics, 1985, 23(3): 113-118.
- [11] Gaete-Garretón L, Vargas-Hernández Y, and Pino-Dubreuil S, et al. Ultrasonic detectors for high intensity acoustic fields [J]. Sensors and Actuators A, 1993, 37-38: 410-414.
- [12] Soudagar S R, Samant S D. Semi-quantitative characterization of ultrasonic cleaner using a novel piezoelectric pressure intensity measurement probe[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 1995, 2(1): 49-53.
- [13] 贾志富. 测量超声场声强用组合式水听器的设计方案 [J]. 声学技术, 2001, 20(2): 92-94.
- [14] Martin C J, Law A N R. The use of thermistor probes to measure energy distribution in ultrasound fields[J]. Ultrasonics, 1980, 18(3): 127-133.
- [15] Martin C J, Law A N R. Design of thermistor probes for measurement of ultrasound intensity distributions [J]. Ultrasonics, 1983, 21(2): 85-90.
- [16] Romdhane M, Gourdon C, Casamatta G. Development of a thermoelectric sensor for ultrasonic intensity measurement [J]. Ultrasonics, 1995, 33(2): 139-146.
- [17] Romdhane M, Gourdon C, Casamatta G. Local investigation of some ultrasonic devices by means of a thermal sensor [J]. Ultrasonics, 1995, 33(3): 221-227.
- [18] Ch Koch. Coated fiber-optic hydrophone for ultrasonic measurement [J]. Ultrasonics, 1996, 34(6): 687-689.
- [19] Christian Koch. Measurement of ultrasonic pressure by heterodyne interferometry with a fiber-tip sensor [J]. Applied Optics, 1999, 38(13): 2812-2819.
- [20] Phelps A D, Leighton T G. The subharmonic oscillations and combination-frequency subharmonic emissions from a resonant bubble: their properties and generation mechanisms [J]. Acustica-Acta Acustica, 1997, 83(1): 59-66.
- [21] 董彦武, 赵恒元. 功率换能器电声效率测量的初步研究 [J]. 应用声学, 1982, 1(1): 24-26.
- [22] Crawford A E. The measurement of cavitation [J]. Ultrasonics, 1964, 2(3): 120-123.
- [23] Bennett G S. A new method for the visualization and measurement of ultrasonic fields [J]. Journal of the Acoustical Society of America, 1952, 24(5): 470-474.
- [24] Sarvazyan A P, Pashovkin T N, Shilnikov G V. An extremely simple and rapid method of registration of ultrasonic field patterns [A]. Proceedings of Ultrasonics International [C]. London: Butterworths, 1985. 324-328.
- [25] Shiran M B, Quan K M, and Watmough D J, et al. Some of the factors involved in the Sarvazyan method for recording ultrasound field distributions with special reference to the application of ultrasound in physiotherapy [J]. Ultrasonics, 1990, 28(6): 411-414.
- [26] 方启平, 颜忠余, 黄金兰, 等. 用染色法记录液体中大功率超声场的分布 [J]. 声学技术, 1996, 15(4): 177-179.
- [27] Cook B D, Werchan R E. Mapping ultrasonic fields with cholesteric liquid crystals [J]. Ultrasonics, 1971, 9(2): 101-102.
- [28] 李化茂, 谢安东, 钟凡, 等. 超声空化场的影像研究 [J]. 声学技术, 1997, 16(3): 117-118.
- [29] 李化茂, 贺梅英, 李萍, 等. LUMINOL 及其 NaOH 水溶液的吸收光谱 [J]. 声学技术, 2000, 19(1): 23-25.
- [30] Neppiras E A. Acoustic cavitation series: part one: Acoustic cavitation: an introduction [J]. Ultrasonics, 1984, 22(1): 25-28.
- [31] 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, 1989, 10(1): 18-23.
- [32] Vijayanand S Moholkar, Shishir P Sable, Aniruddha B Pardi. Mapping the cavitation intensity in an ultrasonic bath using the acoustic emission [J]. AIChE Journal, 2000, 46(4): 684-693.
- [33] Faid F, Contamine F, Wilhelm A M, et al. Comparison of ultrasound effects in different reactors at 20kHz [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 1998, 5(3): 119-124.

- [34] 刘勋,相敬林,周越. 声强度的测量及其应用[J]. 声学技术, 2000, **19**(2): 95-97.
- [35] 陈元平. 混响场中强声场的测定及应用[J]. 声学技术, 1996, **15**(4): 179-181.
- [36] Edward A Pedziwiatr. Ultrasonic wave energy detection and identification[P]. US Patent: 54433102, 1995.
- [37] Pugin B. Qualitative characterization of ultrasound reactors for heterogeneous sonochemistry [J]. Ultrasonics, 1987, **25**(1): 49-55.
- [38] Marangopoulos I P, Martin C J, Hutchison J M S. Measurement of field distributions in ultrasonic cleaning baths: Implications for cleaning efficiency [J]. Physics in Medicine and Biology, 1995, **40** (11) :1897-1908.
- [39] Laborde J L, Hita A, Caltagirone J. P. , et al. Visualization and modeling of acoustic cavitation fields[J]. PVP (Am. Soc. Mech. Eng.), 1998, 377(Computational Technologies for Fluid/ Thermal/ Structural/ Chemical Systems with Industrial Applications, Vol. 2) :227-234.
- [40] 沈壮志,尚志远. 用声波扩散改善清洗场中(小功率)声场的均匀性[J]. 应用声学, 1999, **18**(5): 41-43.
- [41] Servant G, Laborde J L., Hita A, et al. Spatio-temporal dynamics of cavitation bubble clouds in a low frequency reactor: comparison between theoretical and experimental results[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2001, **8**(3) :163-174.
- [42] 任金莲,张明铎,牛勇. 复合频率超声波清洗声场均匀性研究[J]. 声学学报, 2003, **28**(2): 127-129.
- [43] 刘岩,王志刚. 用声致发光记录脉冲声场中的空化峰[J]. 声学技术, 2003, **19**(3): 144-145.
- [44] 沈壮志,尚志远. 超声换能器位置对碘化钾溶液碘释放影响的研究[J]. 声学技术, 1999, **18**(1): 35-38.
- [45] 刘金春,彭逸华. 超声雾化对声压谱和声化学反应的影响[J]. 声学技术, 2003, **16**(3): 118-120.
- [46] 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.
- [47] Alekseev V N, Andreev V G, Romanenko G A, et al. Study of the cavitation region and the evolution of the acoustic spectrum[J]. Acoustical Physics, 2001, **47**(4) :376-383.

(上接第 56 页)

辨,并且幅值也相差较多。而图 4 说明过多利用噪声过大的倏逝波成分,也将造成重建结果失真太多,无法用于声场分析。

表 1 重建声源幅值比较

真实大小	条件			
	$\beta=1.3$	$\beta=0.8$	$\beta=1.7$	
幅值 (Pa)	8.5	3.15	2	4.5

3 结 论

本文在分析了平面近场声全息方法随测量距离增大而出现的不适定性问题的基础上,详细分析了倏逝波的空间频域特性和衰减特性,总结出了倏逝波随测量距离变化的可利用规律,并设计了相应的空间频域滤波器。同时通过模拟计算对本方法进行了论证,得到如下结论:

(1) 全息面为有限大小,即使不存在任何测量噪声,当测量距离增大时也会因空间频域能量分布失真而引起不适定性问题;

(2) 利用本文提出的倏逝波可利用规律而生成的空间频域滤波器对全息面信息进行处理,不仅可以解决平面近场声全息随距离变化的不适定性问题,还可

最大限度地保证了高空间分辨率和重建精度。

参 考 文 献

- [1] Veronesi W A, Maynard J D. Nearfield acoustic holography (NAH) II. Holographic reconstruction algorithms and computer implementation [J]. J. Acoust. Soc. Am, 1987, **81**(5): 1307-1322.
- [2] Daren L Hallman, Stuart Bolton J. Experimental acoustic testing identifying noise sources with Near-field Acoustical Holography [J]. TEST Engineering & Management, 1994, June/July: 24-32.
- [3] ZHANG Dejun, CHENG Jianzheng, and WEI Jihong. Simulating Research of Chinese Chime Stones Using Near-field Acoustical Holography [A]. Forth International Congress on Sound and Vibration[C]. 1996: 669-675.
- [4] 魏继红,张德俊,程建政. 近场声全息重模的动态三维显示[J]. 声学技术, 1996, **15**(2): 49-53.
- [5] 张德俊. 近场声全息对振动体及其辐射场的成像[J]. 物理学进展, 1996, **16**(3-4): 613-622.
- [6] Earl G Williams. Supersonic acoustic intensity on planar sources [J]. J. Acoust. Soc. Am., 1998, **104**(5): 2845-2850.
- [7] Earl G Williams. Fourier acoustics: sound radiation and nearfield acoustical holography [M]. San Diego, Calif.: Academic Press, 1999.