

活塞聚焦换能器的二次谐波声场

张波, 章东, 龚秀芬

(南京大学近代声学国家重点实验室, 南京大学声学研究所, 南京 210093)

中图分类号: T B552 文献标识码: A

Second harmonic sound field of a spherical focused source

ZHANG Bo, ZHANG Dong, GONG Xiu-fen

(State Key Laboratory of Modern Acoustics, Institute of Acoustics, Nanjing University, Nanjing 210093, China)

1 引言

研究聚焦换能器的非线性声场是非线性声学中受到关注的问题。这是由于聚焦活塞换能器在焦点附近能产生很强的非线性且圆型活塞聚焦换能器由于能有效地提高分辨率而被广泛应用于超声医学诊断及超声显微镜。对于有限振幅的活塞聚焦声场, 分析时必须同时考虑衍射效应和非线性波型畸变效应, 因此在数学分析上相当复杂, Lucas 等人^[1]在 Parabolic 近似下, 导出了活塞聚焦换能器的基波、二次谐波积分型式的解, 尽管这种解的形式是解析的, 但由于解的形式是多重积分, 对于实际的声场分析计算不够方便。由于高斯函数的积分具有相对简单形式, 本文利用高斯函数叠加起来近似表示活塞聚焦声源的分布函数, 结合 Parabolic 近似下 LightHill 方程, 对圆形活塞聚焦换能器在损耗媒质中产生的基波、二次谐波声场进行了理论计算, 建立了相应的实验测量系统, 测量了一圆形活塞聚焦换能器的基波及二次谐波声场, 并对理论及实验结果进行了分析和讨论。

2 理论计算

2.1 原理与方法

设一半径为 a , 焦距为 D 的圆形聚焦换能器, 换能器的表面作均匀径向振动, 振动的幅度为 $u_0 \exp(j\omega t)$, 声传输媒质声速为 c , 密度为 ρ , 线性吸收系数为 α , 非线性参量为 β 。如图 1 所示, 在柱坐标系 (r, z)

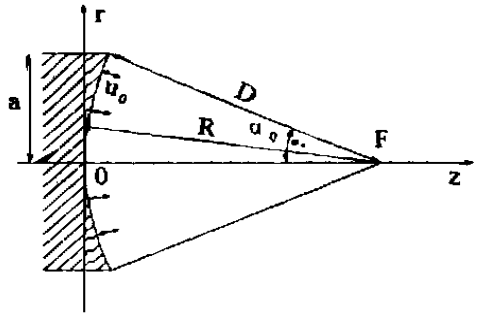


图 1 换能器的几何示意图

$z)$ 中, 设基波声压幅度的复数表示形式为 $q_1(r, z)$ 。在 $ka \gg 1$ 情况下, 应用 parabolic 近似, 若令 $\xi = r/a, \eta = z/R, R = ka^2/2$ 为瑞利距离, LightHill 非线性方程归一化后得:

$$\frac{1}{\xi} \frac{\partial}{\partial \xi} \left\{ \xi \frac{\partial q_1}{\partial \xi} \right\} + 4j \frac{\partial q_1}{\partial \eta} + 4j\alpha R q_1 = 0 \quad (1)$$

应用 Hankel 变换和 Bessel 积分公式可得

$$q_1(\xi, \eta) = -j \frac{2}{\eta} \exp \left\{ j \frac{k\xi^2}{\eta} - \alpha\eta \right\} \int_0^\eta q_1(\xi', 0) J_0 \left(\frac{2\xi\xi'}{\eta} \right) \exp \left\{ j \frac{\xi'^2}{\eta} \right\} \xi' d\xi' \quad (2)$$

其中 ξ' 为积分变量, $q_1(\xi', 0)$ 为 $\eta = 0$ 处即声源表面的声压分布函数。

对于活塞聚焦声源, 其表面的声压复振幅为:

$$q_1(\xi, 0) = \begin{cases} \left\{ \frac{u_0}{jk} \right\} \exp(-j\xi^2/\delta) & \xi < 1 \\ 0 & \xi > 1 \end{cases}$$

J. J. wen 等发现可以用一系列高斯声源叠加起来近似

表示任意轴对称声源, 若令 $q_1(\xi, 0) = \sum_{n=1}^N A_n \exp(-B_n \xi^2)$ ^[2], 其中 A_n, B_n 为复系数, 可由最优化算法得到。即用高斯声源近似活塞聚焦换能器。利用 Bessel 积分公式简化可得到基波声压的归一化分布为:

收稿日期: 2000-01-21; 修订日期: 2000-05-15

本文得到国家自然科学基金(N019834040)和江苏自然科学基金资助(BK99024)。

作者简介: 张波(1970-), 男, 硕士研究生, 从事聚焦声场的研究。

$$q_1(\xi, \eta) = \sum_{n=1}^N \frac{A_n}{B_n} \frac{\exp(-\alpha\eta)}{g_n(\eta)} \exp\left[-\frac{\xi^2}{g_n(\eta)}\right] \quad (3)$$

$$g_n[z] = \frac{1}{B_n} + j\eta$$

设有损媒质中圆形活塞聚焦换能器的二次谐波声压幅度的复数表示形式为 $q_2(r, z)$, 在 $ka \gg 1$ 情况下, 应用 parabolic 近似, LightHill 非线性方程归一化后为:

$$\frac{1}{\xi} \frac{\partial}{\partial \xi} \left[\xi \frac{\partial q_2}{\partial \xi} \right] + 8j \frac{\partial q_2}{\partial \eta} + 32j\alpha R q_2 = \left(j \frac{\beta \omega^3 \alpha^2}{c^4} \right) q_1^2 \quad (4)$$

其中二次谐波的衰减系数近似表示为 $2\alpha\beta$ 为衰减媒质的非线性参数。对上式应用 Hankel 变换和 Bessel 积分公式可得:

$$q_2(\xi, \eta) = \sum_{m=1}^N \frac{\beta \omega^3 \alpha^2}{8c^4} \frac{A_m^2}{B_m^2} \frac{\exp(-R\alpha\eta)}{g_m(\eta)} \exp\left[-\frac{2\xi^2}{g_m(\eta)}\right] \int_0^\eta \frac{\exp(2R\alpha\eta')}{g_m(\eta') g_m(\eta) + g_n(\eta') g_m(\eta)} d\eta' + \frac{2\beta \omega^3 \alpha^2}{8c^4} \sum_{n=1}^N \sum_{m=N}^N \frac{A_n A_m}{B_n B_m} \int_0^\eta \exp\left[-\frac{2(g_n(\eta') |1| + g_m(\eta') |1|)}{g_n(\eta') g_m(\eta') + g_n(\eta') g_m(\eta')} \xi^2\right] d\eta' \quad (5)$$

2.2 理论计算

本文利用高斯叠加法数值上计算了一圆形活塞聚焦换能器(半径 $a = 0.7\text{cm}$, 焦距 $D = 6\text{cm}$)的轴向基波及二次谐波声场。用 10 项高斯函数之和来近似聚焦活塞声源, 基波及二次谐波的轴向声场理论计算曲线见图 2。

图 3 为测量圆形活塞聚焦换能器声场的实验系统框图。所测得圆形活塞聚焦换能器在水中的基波

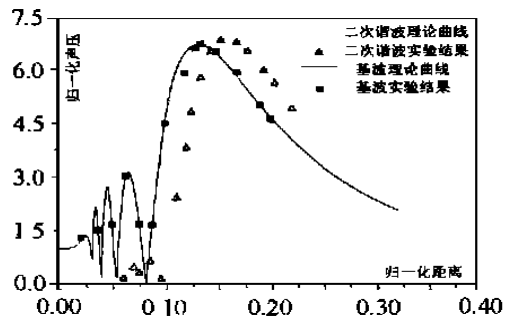


图 2 轴向基波及二次谐波归一化声压图

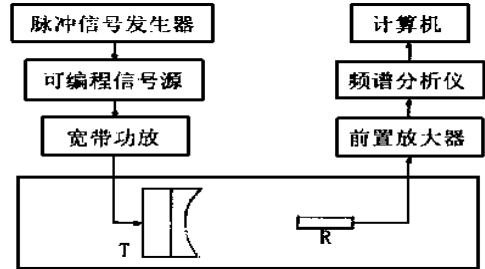


图 3 实验装置图

及二次谐波轴向声场归一化声压分布也表示在图 2 上。由图 2 可见除了距声源较近区域外, 实验曲线与理论曲线符合得较好, 并且基波轴向声压最大值出现在焦点之前, 二次谐波在焦点附近。

参考文献:

- [1] B. G. Lucas and T. G. Muir. The field of a focusing source[J]. J. Acoust. Soc. Am, 1982, 72(4): 1289-1296.
- [2] J. J. Wen and M. A. Breazeale. Diffraction beam field expressed as the superposition of Gaussian beams[J]. J. Acoust. Soc. Am., 1988, 83(5): 1752-1756.

SHX—DFL 型大风量片式消声器系列通过产品鉴定

2000 年 4 月 25 日经上海市经委批准, 由上海市轻工控股(集团)公司主持, 对上海申华声学装备有限公司研制的 SHX—DFL 型大风量片式消声器系列通过了产品鉴定。

大风量片式消声器广泛应用于地铁、隧道、地下车库、发电站等大中型通风工程中。上海申华声学装备有限公司结合上海地铁 1# 线、2# 线通风工程的需要, 经过数年的试生产已形成一定的生产能力。目前可提供风量由 $1.5\text{万 m}^3/\text{h}$ — $40\text{万 m}^3/\text{h}$ 7 大系列共 91 种规格的片式消声器。消声片长度为 2000mm, 消声片单元高度分别为 1000mm、1250mm、1500mm、1750mm、2000mm, 消声片厚为 250mm, 片间距为 250mm。消声器声学和气动性能经同济大学测试, 单位长度消声量为 8dB(A) , 压力损失为 $1\text{mmH}_2\text{O}$ 。产品质量经上海市环保产品质量监督检验总站检测, 产品质量优良。专家鉴定认为, 该系列消声器生产工艺合理, 工装设备先进, 检测手段完善, 产品加工质量符合设计要求和标准规定, 产品质量达到国内领先水平, 一致同意通过产品鉴定, 投入批量生产。

中国船舶工业第九设计研究院 吕玉恒