

# 功率超声换能器辐射声功率的激光干涉测量 \*

钱梦骅 胡文祥 高文

(同济大学声学研究所 上海 200092)

1999年6月14日收到

**摘要** 利用激光干涉仪,绝对测定超声换能器表面的振动位移(振速)并由此而确定超声换能器的辐射声功率。对一增幅杆型的超声换能器辐射声功率测量的实验结果表明,在本文的声功率测量范围内,空化对换能器表面的振动位移测量影响不大,而且该换能器的电声功率转换效率经实验测定可达到0.40。

**关键词** 激光干涉,位移振幅,辐射声功率

## Measurement of ultrasonic power radiated by a high power transducer with a laser interferometer

Qian Menglu Hu Wenxiang Gao Wen

(Institute of Acoustics, Tongji University, Shanghai 200092)

**Abstract** The ultrasonic power radiated by a high power transducer can be determined when the vibration displacement (velocity) on its surface is measured by a laser interferometer. The experimental results for a ultrasonic power transducer show that its nominal electroacoustic power transformation efficiency can be higher than 0.40, when the cavitation exists in water.

**Key words** Laser interference, Displacement amplitude, Radiated acoustic power

### 1 引言

超声换能器辐射声功率的测定,对于换能器的研制以及功率超声的应用研究,如超声清洗、加工以及声化学的研究都非常重要。由于大量的功率超声换能器都工作数十kHz的频率范围内,而且工作时在液体中又存在空化现象,因而使熟知的浮子法(辐射压力法)、用标准换能器检测声场的声压法等直接在声场中测量辐

射声功率的技术难以应用。因此,通过直接测量辐射声源的力学参量而来确定辐射声功率,将是一条值得探索的新途径。

利用激光干涉仪,不仅可以绝对地测定辐射声源的表面位移振幅(或振速振幅),而且对整个辐射声场没有任何干扰。这样,根据声源的辐射阻,就可以由测得的声源表面位移(振速)来确定辐射声功率。下面将对该方法的原理、方法及实验系统作简要介绍。

\* 国家自然科学基金资助项目 (No.59738150)

## 2 原理

激光干涉测量功率超声换能器的原理及实验系统如图 1 所示。被测的超声换能器与盛有液体的容器放在迈克尔逊干涉仪的一个光臂中。一束功率为 20mw 的 He-Ne 激光 ( $\lambda = 0.6358\mu\text{m}$ ) 经分光镜 PBS 分为两束, 一束经参考镜 M 反射后透过 PBS 和扩束镜 L 而到达光电检测器 D, 另一束经过容器上的透光窗口入射到换能器振动表面, 而后反射回 PBS, 再由 PBS 反射经透镜 L 到检测器 D。这两支光束在检测平面上形成一组宽度为  $h$  的干涉条纹。位于干涉条纹 X 处的光电检测器的输出光电流 I 为 [1]

$$I = I_0 + I_i \cos\left(\frac{2\pi X}{h}\right) \quad (1)$$

如果换能器表面产生一位移  $\xi$ , 使干涉仪中的两支光束之间的光程差改变了一个真空中的光波波长  $\lambda$ , 即  $2n\xi = \lambda$  ( $n$  是液体的折射率), 干涉条纹在检测器 X 处就移过一条条纹, 即条纹的位移  $R=h$ , 于是,

$$\frac{R}{h} = \frac{2\xi n}{\lambda} \quad (2)$$

所以, 当换能器表面的位移  $\xi=A\cos(2\pi ft)$  时, 在 X 处检测器 D 的输出光电流 I 为

$$I = I_0 + I_i \cos\left\{\frac{2\pi}{h}[X - R \cos(2\pi ft)]\right\}$$

式中,  $f$  为超声换能器工作频率。利用式 (2) 可以得到

$$I = I_0 + I_i \cos\left[\frac{2\pi X}{h} - \frac{4\pi An}{\lambda} \cos(2\pi ft)\right] \quad (3)$$

式 (3) 清楚地表明, 光电检测器 D 输出的光电流信号 I 是一个调频信号, 它的瞬时频率直接正比于换能器表面的瞬时振速, 而且当换能器表面位移变化一个  $\lambda/2n$  时, 光电检测器 D 的输出信号就改变一个周期, 相应于在检测器 D 处移过一条条纹。于是, 用存贮示波器 (Gould 4072) 记录下光电流信号 I, 直接测出换能器在半个振动周期中检测器 D 上移过的

应用声学

干涉条纹数  $N$ , 就可以得到超声换能器的表面位移振幅  $A$  :

$$A = N \cdot \frac{\lambda}{4n} \quad (4)$$

而表面的振速振幅  $v_0$  为:

$$v_0 = \omega A = \pi f N \lambda / 2n \quad (5)$$

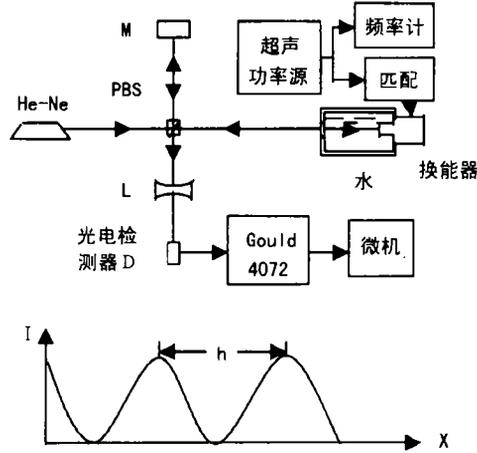


图 1 激光干涉测量辐射声功率原理及实验系统

对于插入式增幅杆超声换能器, 相当于一个半径为  $a$ , 表面振速  $v = v_0 \cos 2\pi ft$  的无幕活塞, 它的辐射声阻  $R_s$  在低频下可近似为 [2]

$$R_s = \rho c (\pi a^2) \frac{(ka)^2}{4} \quad (6)$$

式中,  $\rho$  和  $c$  分别为液体的密度和声速, 而  $k = 2\pi f/c$ 。

于是, 已知液体的  $\rho$ 、 $c$ 、 $n$ 、换能器的半径  $a$  及工作频率  $f$  和激光波长  $\lambda$ 、由实验测定的条纹数  $N$ , 就可以从式 (5) 和 (6) 直接确定超声换能器在液体中的辐射声功率  $W_a$  :

$$W_a = \frac{1}{2} R_s v_0^2 = \pi^5 \rho a^4 f^4 N^2 \lambda^2 / 8cn^2 \quad (7)$$

## 3 实验结果

利用激光干涉测振技术, 对中国科学院声学研究所研制的功率超声换能器在水中的辐射声功率进行了测定, 用图 1 所示实验系统。

在测试前, 必须仔细调整换能器与功放之间的匹配和换能器的工作频率, 使换能器尽可能工作在谐振状态, 有大的声输出。而后使换能器在频率跟踪状态下工作。在不同的标称激励电功率  $W_e = iV$  ( $i$  是电流) 下, 用存贮示波器 Gould 4072 记录下光电检测器的输出波形, 然后再输入微机以便进一步处理。

图 2 是在不同电功率激励下超声换能器表面振动而产生的光电输出信号  $I$  的波形。由这些波形所得到的干涉条纹数  $N$ 、相应的实验参

数、按式 (7) 计算得到的辐射声功率  $W_a$ 、以及标称电声功率转换系数  $\eta = W_a/W_e$  等均已列于表 1。在计算  $W_a$  时, 相应的参量分别为:

$$\begin{aligned} \rho &= 10^3 \text{ kg/m}^3, \\ a &= 12.1 \times 10^{-3} \text{ m}, \\ \lambda &= 0.6328 \mu\text{m}, \\ c &= 1.481 \times 10^3 \text{ m/s}, \\ n &= 1.33 \end{aligned}$$

表 1 激光干涉测量超声换能器的辐射声功率的实验结果

No.	I(A)	V(v)	f(kHz)	N	$W_e$ (W)	$W_a$ (W)	$\eta = W_a/W_e$
1	0.30	30	17.780	18.1	9.0	4.10	0.46
2	0.40	38	17.815	22.2	15.2	6.22	0.41
3	0.50	45	17.841	27.0	22.5	9.25	0.41
4	0.60	50	17.847	31.5	30.0	12.61	0.42
5	0.70	52	17.840	34.5	36.4	15.11	0.42
6	0.80	60	17.852	38.7	48.0	19.06	0.40

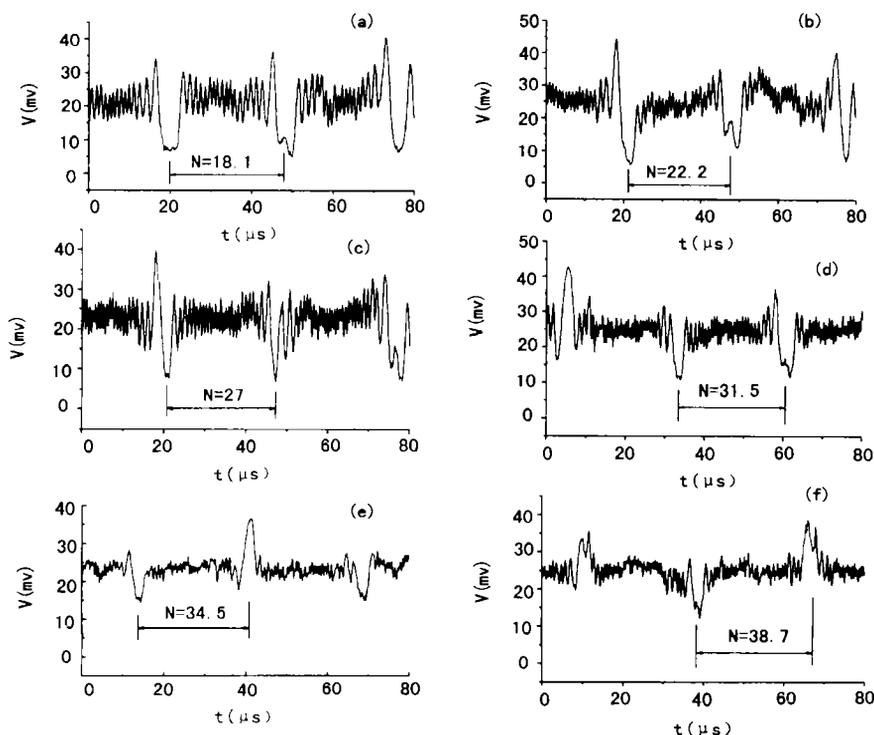


图 2 不同电功率激励下超声换能器位移的对应光电输出

激励电功率 (a) 9W (b) 15.2W (c) 22.5W (d) 30W (e) 36.4W (f) 48.0W

(下转第 34 页)

表 1 数字电感的动态匹配效果

静态电容 (nF)	理论匹配值 (mH)	实际匹配值 (mH)	P1 口输出 ( $N_H$ )	机械臂电流 (A)
10.45	3.67	3.65	49H	0.893
12.03	3.19	3.20	40H	0.895
13.598	2.825	2.80	38H	0.899
15.16	2.534	2.55	33H	0.910
16.741	2.295	2.30	2EH	0.912

下降, 振动系统的振幅减小。

(3) 采用数字电感匹配, 可以根据电容的变化, 实时调节电感大小, 使振动系统处于较佳工作状态。

参 考 文 献

1 Seiji H. *Appl. Phys.* 1994. **33**: 2945-2948.  
 2 Seiji H, Manabu A, Yoshiro T. *Appl. Phys.* 1993.

32:2418-2421.

3 罗淑云. 应用声学, 1993. **13**(6): 25-27.  
 4 鲍善惠. 声学技术, 1996. **15**(4): 175-177.  
 5 林书玉, 张福成. 压电与声光, 1993. **14**(4): 29-32.  
 6 Coates R, Mathams R F. *Ultrasonics*. 1988. **26**(3): 59-64.  
 7 陈桂生. 超声换能器. 海洋出版社, 1984.

(上接第 8 页)

4 讨论

利用激光测振技术, 直接测量低频大功率超声换能器表面的振速, 实现超声换能器辐射声功率的测量, 研究表明在本文的测量声功率范围内, 这是一条行之有效的途径. 对于所测量的增幅杆型超声换能器, 当激励标称电功率大于 15W 时, 水中已出现空化, 然而从图 2 所记录的光电信号可以看到, 大量的空化气泡对换能器表面位移的测量影响不大, 即使在激励电功率 48W 时仍然清楚地读出移动的条纹数. 同时由实验可知, 该换能器的标称电声功率转

换系数至少为 0.40。

在激光干涉测定换能器辐射声功率中的另一关键问题是确定换能器的辐射声阻. 对本文中被测的插入式增幅杆超声换能器, 可以近似为无幕的活塞辐射. 但对于其它形式的超声换能器, 则还需从理论上进一步做相应的研究, 以获得它的辐射声阻抗表达式. 所以, 进一步探索更简便而有效的激光干涉技术来检测超声换能器在液体中所辐射的声功率, 是我们下一步的研究目标。

参 考 文 献

1 Gilheary J J. *Am.J.Phys*, 1991. **39**(3): 507.  
 2 何祚镛, 赵玉芳编. 声学原理基础. 北京: 国防工业出版社, 1981. 247.

敬告读者:

本刊尚有少量 1999 年《应用声学》合订本, 价格 45 元/本 (已含挂号邮费). 另有部分历年过刊, 有需要者, 请与本刊联系.

地址: 北京海淀中关村路 17 号《应用声学》编辑部 邮编: 100080 电话: 010-62567348 (本刊启)