

用于超声清洗复合振动换能器的研究

林书玉

(陕西师范大学应用声学研究所 西安·710062)

本文研究了一种由纵向振动夹心式压电超声换能器与弯曲圆盘组成的用于液体中超声处理的复合振动辐射器。推出了该复合振动系统的共振频率设计方程,分析了各个振动模式的机电转换特性及其声波辐射特性,测量了振动系统的共振频率及其有效机电耦合系数。从实验及理论结果可以看出,振动系统的频率测试值与设计值基本符合。在一定的共振频率上,该振动系统具有最大的有效机电耦合系数,是一种很有前途的功率超声辐射器。

关键词:夹心式换能器,弯曲振动圆盘,有效机电耦合系数,共振频率。

High power flexural transducers for ultrasonic cleaning

LIN Shuyu

(Applied Acoustics Institute, Shanxi Teachers University, Xian·710062)

In this paper, a new type of ultrasonic transducers consisting of the longitudinal sandwich vibrator and the flexural circular thin plate was studied. The resonance frequency equations were derived, the effective electromechanical coupling coefficient was measured and the radiating characteristics of the compound transducer were analyzed. Experiments show that the compound transducer has many resonance frequencies, when the frequency of the longitudinal vibrator is equal to that of the flexural circular thin plate, the vibration of the compound transducer is ideal and the effective electromechanical coupling coefficient is high, therefore, it proves a promising ultrasonic radiator in liquid.

Key words, sandwich transducer, flexural circular thin plate, effective electromechanical coupling coefficient, resonance frequency

1 引言

超声清洗是功率超声的主要应用之一,它已广泛地应用于机械、电子、国防、医疗器械等领域。在传统的超声清洗设备中,夹

心式压电超声换能器通过清洗槽底向清洗液中直接辐射超声^[1],对于此类清洗槽结构,存在以下一些需要进一步克服的问题:(1)夹心式换能器的辐射面尺寸比较小(一般要

收稿日期:94-3-7;修回日期:94-5-30

求小于1/4波长),因此,声匹配程度差;(2)由于换能器的辐射面积较小,因此,单位面积上的辐射声功率较大,易于产生局部空化腐蚀以及换能器脱落问题;(3)为了减小辐射器的局部空化腐蚀,应控制单个换能器的输入电功率,为此需要增加换能器的个数,此时,换能器的频率一致性调节比较困难;(4)换能器的工作频率只有一个,为了提高清洗效果,避免清洗死角的存在,应采用多频清洗,然而,传统的夹心式换能器结构难以实现,尽管可以利用扫频清洗技术,但必须设计具有宽带的压电陶瓷夹心式振子;(5)清洗声场的均匀程度差。针对上述问题,为了改善传统清洗机的性能。本文研究了一种由夹心式换能器与弯曲圆盘组成的超声振动辐射器,即在纵向振动夹心换能器与清洗槽之间增加一个弯曲振动圆盘,夹心式换能器的振动能量不是通过槽底直接向槽内辐射,而是通过激发圆盘的弯曲振动然后由弯曲振动圆盘向槽内辐射,由于弯曲圆盘的几何尺寸可以很大,因此,增大了声波辐射面积,改善了声匹配,并且可以提高槽内声场的均匀性,另外,由于弯曲圆盘的几何尺寸比较大,所以,可以减少夹心式换能器的数目,从而,可以提高单个换能器的输入电功率。在以下的分析中,将对复合振子的振动特性、频率方程等进行研究,以便为此类振子的理论计算及实际设计提供理论依据。

2 复合振动系统的设计理论

本文研究的振动系统包括纵向振动的夹心式压电换能器及弯曲振动圆盘,为了保证复合系统的高效工作,振动系统必须处于共振状态,因此首先必须研究系统的共振频率方程。

2.1 纵向振动夹心式压电超声换能器

如果夹心式振子的前后金属盖板为圆柱

形,且振子的节面位于压电陶瓷内部,则振子可看成是两个1/4波长振子的组合,其共振频率方程为:

$$\operatorname{tg}k_0 l_{01} \cdot \operatorname{tg}k_1 l_1 = \frac{\rho_0 c_0 S_0}{\rho_1 c_1 S_1} \quad (1)$$

$$\operatorname{tg}k_0 l_{02} \cdot \operatorname{tg}k_2 l_2 = \frac{\rho_0 c_0 S_0}{\rho_2 c_2 S_2} \quad (2)$$

(1)、(2)两式分别为半波长换能器节面前后两部分的共振频率方程,式中 l_1, l_2, l_{01} 及 l_{02} 分别为前盖板、后盖板以及节面前后部分压电陶瓷片的长度, $\rho_0, \rho_1, \rho_2, c_0, c_1, c_2$ 以及 S_0, S_1, S_2 分别为压电陶瓷、前、后盖板材料的密度、纵向声速及横截面积, $k_0 = \omega/c_0, k_1 = \omega/c_1, k_2 = \omega/c_2$ 分别为各部分的波数, $\omega = 2\pi f, f$ 为振子的共振频率。如果设计时需要考虑预应力螺栓、前后盖板的形状以及横向振动的影响,振子的频率方程比较复杂,具体内容可参见文献^[2-5]。

2.2 弯曲振动圆盘

令圆盘的厚度及半径分别为 h 及 a ,当圆盘的边界自由时,可得其轴对称自由振动的共振频率方程为:

$$ka[J_0(ka)I_1(ka) + I_0(ka)J_1(ka)] \\ = 2(1-\sigma)J_1(ka)I_1(ka) \quad (3)$$

式中 σ 为圆盘材料的泊松系数, $J_0(ka), J_1(ka)$ 及 $I_0(ka), I_1(ka)$ 为柱贝塞尔函数, k 由下式决定,

$$k^4 = \frac{12\rho\omega^2(1-\sigma^2)}{Eh^2} \quad (4)$$

式中 E 为杨氏模量。由(3)式可见,当弯曲圆盘的泊松系数给定后,可得一系列解,分别对应圆盘弯曲振动的不同振动模式。令方程(3)的根为 R_n, n 为正整数分别对应圆盘的不同振动模式,当圆盘的材料及几何尺寸给定后,其各个振动模式的共振频率 f_n 为,

$$f_n = \frac{R_n^2 h}{2\sqrt{12}\pi a^2} \sqrt{\frac{E}{\rho(1-\sigma^2)}} \quad (5)$$

当 $n=1$ 时,对应于弯曲振动圆盘轴对称自由振动的基频模式,此时圆盘上具有一个节

圆, 不同的 n 对应于不同的弯曲振动分布。

3 实验

为了研究由纵向振子与弯曲圆盘组成的复合振动系统的频率及振动特性, 我们加工了一些夹心式振子及圆盘, 并对其频率及有效机电耦合系数进行了测量。

3.1 振动系统共振频率的测量

为了验证振子的设计理论即共振频率方程, 对振子的共振频率进行了测量。测量结果见表1, 其中 f_{Td} 及 f_{Tm} 为夹心式振子共振频率的设计及测量值, f_{bd} 及 f_{bm} 为圆盘共振频率的设计及测试值, f_c 为复合振动系统共振频率的测试值, n 为弯曲圆盘的振动节圆数即振动模式。

表1 复合振动系统共振频率的设计及测试值

振子	h(mm)	a(mm)	n	f_{Td} (kHz)	f_{Tm} (kHz)	f_{bd} (kHz)	f_{bm} (kHz)	f_c (kHz)
1	10.0	48.0	2	36.0	36.5	37.0	35.1	35.4
2	10.0	63.3	2	22.0	23.1	23.0	21.8	22.2
3	10.0	87.5	3	25.0	26.7	27.0	25.2	25.5

从表1可以看出, 组成复合振动系统的各部分的共振频率的测试值与设计值基本符合, 在此基础上, 复合系统的共振频率与各个振动部分的共振频率基本一致。

3.2 复合振动系统不同振动模式有效机电耦合系数的测量

通过测量由纵向振子与弯曲圆盘组成的复合振动系统的共振频率, 我们发现, 除了设计频率以外, 复合系统还存在其它一些共振频率, 即存在许多不同的振动模式, 为了研究这些振动模式的振动性能, 我们测量了在不同振动模式时复合振动系统的有效机电耦合系数 K_{eff} , 根据 K_{eff} 的定义, 它可由下式近似表示,

$$K_{eff}^2 = 1 - \frac{f_m^2}{f_n^2} \quad (6)$$

式中 f_m 及 f_n 为振子某一振动模式的最小阻抗频率及最大阻抗频率, 当振子的损耗很小时, f_m 与 f_n 近似等于振子动生端的串联及并联共振频率。由 K_{eff} 的定义可知, K_{eff} 越大, 振子的机电转换效率越高, 因此, 振子的有效机电耦合系数 K_{eff} 可以用来定性表示振子的机电能量转换的大小, 也反映了某一振动模式的振动强与弱。在此基础上, 我们测量了复合振子在不同振动模式时的最小及最大阻抗频率, 并计算了其有效机电耦合系数, 具体结果见表2。

表2 复合振子不同振动模式的有效机电耦合系数

振子	模式一			模式二			模式三		
	f_m (kHz)	f_n (kHz)	K_{eff}	f_m (kHz)	f_n (kHz)	K_{eff}	f_m (kHz)	f_n (kHz)	K_{eff}
1	5.75	5.77	0.08	18.12	18.35	0.16	35.40	37.12	0.30
2	3.27	3.29	0.11	10.53	10.78	0.21	22.20	22.93	0.25
3	7.05	7.08	0.09	15.50	15.72	0.17	25.45	26.27	0.25

从表中结果可见,当纵向振子的共振频率不等于弯曲圆盘的共振频率时,复合振子的有效机电耦合系数较小;而当纵向振子的共振频率等于弯曲圆盘的共振频率时,复合振子的有效机电耦合系数较高,因此,当复合振子工作于这一振动模式时,振动系统具有较高的机电转换效率,且声波辐射能力较强,这一点与大功率状态下复合振子的振动是一致的,此时,振子的振动较强,且节圆的形状很规则,水中辐射情况很好。

4 讨论

从上面的分析我们可以看出,复合振动系统具有多个振动模式,当纵向振子的共振频率等于圆盘弯曲振动某一模式的共振频率时,系统的性能稳定,辐射能力强,有效机电耦合系数高。然而为了保证复合振子的设计频率与测试频率一致,必须使振子各部分的几何尺寸满足一定的要求,下面将逐一加以讨论。

(1)为了保证夹心式纵向振子的振动不影响圆盘的弯曲振动状态,必须使二者的接触面积足够小,即要求纵向振子输出端(驱动弯曲盘)的几何尺寸很小,一般应小于圆盘中弯曲波长 λ_F 的1/4,即

$$D < \frac{1}{4} \lambda_F \quad (7)$$

$$\lambda_F = \sqrt[4]{\frac{\pi^2 h^2 E}{3f^2(1-\sigma^2)\rho}}$$

式中D为纵向振子输出端的直径, λ_F 为圆盘中弯曲波波长。由(7)式可以看出,圆盘中弯曲波的波长不仅与振子的材料及几何尺寸有关,还与共振频率有关,当振子的共振频率变化时,弯曲波长也发生变化,此时,必须适当选择纵向振子的输出端几何尺寸。

(2)本文得出的圆盘弯曲振动的共振频率方程是采用了薄板的近似条件,因此,在设计时必须保证圆盘的厚度远小于其横向尺

寸即 $h \ll a$,然而,为了保证弯曲振动辐射圆盘的抗负载变化能力,其厚度又不能太小,根据我们的实验情况,当其厚度满足(8)式条件时,弯曲圆盘具有较强的负载变化适应能力,且其振动又是比较纯的弯曲振动,即可以忽略剪切及扭转形变。

$$0.15a \leq h \leq 0.35a \quad (8)$$

另外,由于夹心式纵向振子的设计理论是一维的,因此,纵向振子的横向尺寸必须小于1/4纵波波长。当复合振子各部分的几何尺寸满足上述条件时,复合振子各振动部分的设计频率与测试频率基本一致,而且复合振子的共振频率也与理论设计值相差不大,这样就可以保证系统的高效工作。

5 结论

本文研究了由纵向夹心式振子与弯曲圆盘组成的复合振动系统,推出了系统中各部分的共振频率方程,分析了振动系统中各个振动模式的振动情况及其机电转换能力,给出了复合振动系统中各部分的设计准则,总结上述内容可得以下结论:

(1)由纵向振子与弯曲圆盘组成的复合振动系统有许多振动模式,其共振频率很多,然而,只有当纵向振子的共振频率与弯曲圆盘的某一振动模式的共振频率一致时,复合振动系统的机电转换效率才能达到最大,此时,系统的声辐射能力较强。

(2)为了保证弯曲圆盘的振动状态不受纵向激发振子的影响,必须使纵向振子的输出端直径远小于弯曲圆盘中的弯曲波波长,一般情况下应小于1/4弯曲波波长。

(3)为了满足薄板弯曲振动理论的近似条件,圆盘的厚度必须远小于其直径,然而为了保证弯曲圆盘的抗负载变化适应能力,其厚度又不能太薄,因此,必须适当选择弯曲圆盘的直径及厚度。

(4)弯曲圆盘振动系统声波辐射面大,

利于声匹配,而且可以避免局部空化腐蚀问题,因此该振动系统在超声清洗等技术领域中将获得广泛的应用。

参考文献

1 T. J. Bulat. Macrosonics in industry, 3. Ultrasonic Cleaning. Ultrasonics, 1974, (3): 59~68

2 陈桂生. 超声换能器设计. 北京: 海洋出版社, 1984.

3 任树初. 压电振子的多维耦合振动(II)——复合压电振子. 声学学报, 1983; 8(5): 271~279.

4 凌鸿烈. 半波长夹心式换能器的理论分析和计算(II). 声学技术, 1992; 11(4): 35~38.

5 俞宏沛. 超声换能器. 变幅杆及其组合的一种计算方法. 应用声学, 1988; 7(4): 30~36.

(人物介绍)

W.C.赛宾小传

赛宾(W.C. Sabine) 1868年生于美国俄亥俄州, 18岁在该州州立大学毕业后入哈佛大学当物理学研究生。1890为该系助教, 27岁时当讲师, 年薪2000美金。赛宾事先并无搞声学的计划, 不过是因为哈佛新建Fogg艺术馆(现已拆除)中的主要报告厅音质很差无法使用, 校长依理奥向物理系求助而由系主任交此任务给赛宾。当时被物理系同事们认为不足取的玩意儿却引起赛宾的兴趣。在1895年之前, 西方世界文献中对建筑声学还没有明确的设计指南可循。赛宾用心地把长期来不知为何有些房间音质好而另一些则很坏的谜从科学角度给出了正确答案。他化了三年时间孜孜于此, 除了教学工作以外全心钻研。为了避免街道噪声干扰实验, 每周通宵工作三夜, 有两个实验室助手相帮, 但第二天一早照常上班。

Fogg报告厅由于难办的声学问题而在1898年之前无法使用。赛宾认识到厅内混响太甚会使语言交谈困难, 并注意到地毯和帷幕会降低混响。

学校同意他每天早上正常上班授课, 而让他与助手们在半夜向附近Sanders剧场搬来数百个座垫

做实验, 第二天早晨以前又送回去。他用风琴管作声源激发房间512赫的中频声音, 根据突然中断声源后量测到声音衰变至听不出所需时间。他的量测工具就是自己的耳朵和一只停表。

鉴于他有改进Fogg报告厅音质的成功经验, 在新建波士顿音乐厅时就邀请他为音质设计顾问。赛宾对这项工程的贡献是改正了设计好但看来音质会有严重缺陷的问题, 促使建筑师决定主要模仿老厅的方式, 唯一的改变是加了一个舞台空间, 使乐队不再坐在目前正厅前排位置处的舞台上。他的想法证实这样做对了, 历史证明这是世界上最佳音乐厅之一。以后赛宾又担任了多座重要大厅的音质设计顾问工作, 成为当时美国无以伦比的声学顾问, 但他却一直未得博士学位。当有人问起为何原因时, 他答道: “在我认为恰当时刻, 我将是自己学位的主考人”。1919年1月, 他在华盛顿和国外连续两年为第一次世界大战努力工作后, 不幸死于癌症, 享年51岁。但是他的杰出成就屹立至今, 成为一代宗师。

(卿)