

大功率纵-弯超声振动系统的研究

林书玉 (陕西师范大学应用声学研究所 西安·710062)

本文研究了一种大功率纵-弯复合模式超声振动系统。该系统由两个纵向大功率夹心式压电超声换能器及一个均匀截面直棒组成。文中给出了该振动系统的具体结构及其共振频率设计方程。根据均匀直棒的纵向及弯曲振动理论,导出了振动系统中纵向及弯曲振动同频共振的条件。实验结果证明,该系统的测试频率与理论频率基本一致,并且系统中纵向及弯曲振动的共振频率测试值也基本一致,同时,其大功率辐射性能也较好。由于该系统由两个相同的换能器激发,且系统中纵向及弯曲振动的共振频率相同,因此,该系统的超声频激发电源只需一个。

关键词 纵向及弯曲振动模式,共振频率,同频共振,夹心换能器

Study on the high power longitudinal-flexural vibrating system

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

A new type of longitudinal-flexural vibrating system is studied. The system consists of the sandwiched transducers and the bar with uniform cross section. The concrete construction and the frequency equation are given. The simultaneous resonance of the longitudinal and flexural vibrations is achieved. Experiments show that the measured frequencies are in good agreement with the calculated results, and the measured longitudinal frequencies are also in good agreement with the measured flexural frequencies. Therefore, the longitudinal and flexural vibrations can be excited by the same generator.

Key words: longitudinal and flexural vibrations, resonance frequency, simultaneous resonance, sandwiched transducer.

1 引言

随着科学技术的发展,超声的各种应用技术在国民经济中获得了广泛的应用。一些传统的超声应用技术,如超声焊接、超声切割以及超声研磨等,也受到了人们的普遍重视。在所有这些超声应用中,超声振动系统基本上是单一模式的,例如纵向振动模式、扭转振动模式或弯曲振动模式。为了改变振动系统的性能,提高有关超声技术的实际效果,有时需要复合模式振动系统,例如纵-弯或纵-扭复合模式换能器。关于纵-弯复合模式超声振动系统的研究,国内外目前主要致力于研制用于超声马达的振动系统^[1-3],功率水平比较低,不适用于超声焊接、超声切割等大功率超声应用技术。本文从均匀截面细棒的纵向及弯曲振动理论出发,研制了一个大功率纵-弯复合模式超声振动系统。文中推出了该系统的频

率设计方程,给出了换能器的结构及工艺设计,并对一些影响振动系统性能的因素进行了分析,最后给出了一些实验结果。

2 纵-弯复合模式振动系统的理论设计

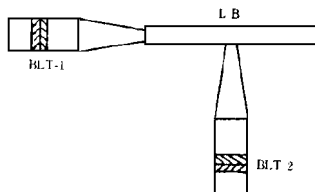


图1 大功率纵-弯复合模式超声振动系统

图1为本文研制的纵-弯复合模式超声振动系统的几何示意图。其中BLT1及BLT2为纵向振动模式的夹心式压电陶瓷超声换能器,L-B为产生纵-弯复合振动模式的均匀截面细棒。在一般情况下,由

于同一材料均匀截面细棒中纵向振动及弯曲振动的传播速度不同,而且弯曲振动的传播速度还与频率有关,因此,细棒中的纵向及弯曲振动很难在同一频率上共振。为提高系统的振动性能,BLT1及BLT2必须具有不同的共振频率,以满足棒中纵向及弯曲振动模式的频率要求,因此,必须利用两套不同频率范围及不同阻抗特性的超声频电源。这不仅使超声设备的工艺提高,而且增加了成本。为此必须研制具有相同的纵向及弯曲振动频率的振动系统,就是把均匀截面细棒的纵向及弯曲振动频率设计成相同的,此时系统的激发换能器BLT1及BLT2具有相同的共振频率,可设计成相同的换能器,这样,换能器的激发电源可以只用一套。下面将对系统的各部分设计理论分别进行分析。

2.1 纵向振动夹心式压电陶瓷超声换能器的设计

大功率夹心压电超声换能器是目前功率超声及水声设备中广泛应用的一种高效换能器,其设计理论及研制工艺已基本成熟^[4-6]。在功率超声领域,此类夹心式换能器主要有两种形式:一种是换能器本身为一个均匀截面的半波长振子,当需要放大位移振幅时,可以在换能器输出端连接半波长聚能器(一级或多级变幅杆)。另一种是换能器本身为一个带有变幅杆的半波长振子,该换能器由两部分组成,一部分截面尺寸较大,且压电陶瓷元件就位于这一部分,另一部分是截面尺寸按照一定规律变小的金属喇叭,它对振幅具有放大作用,两者连接处是位移节点,这种换能器是由一个1/4波长换能器和一个1/4波长聚能器组成。本文研制的换能器采用第2种形式,其几何示意图如图2,其中虚线是将整个半波长换能器分为两个1/4波长振子。虚线前面的B部分为1/4波长圆锥形聚能器,即位移节点在1/4波长聚能器的大端面上,其共振频率设计方程为:

$$\operatorname{tg} k l = -k l / (N - 1) \quad (1)$$

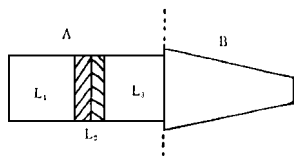


图2 具有位移放大作用的半波长夹心式换能器

其中 $k = \sqrt{\rho c / l}$, l 为圆锥聚能器长度, N 为聚能器大小端面直径之比,在不同的应用场合,换能器中的B部分可以采用不同的截面变化规律,例如指数型或阶梯型等。虚线后面的A部分为均匀截面的1/4

波长振子,它由3部分组成,其中第2部分 l_2 为压电陶瓷元件,它是换能器的核心。对于1/4波长的换能器,其共振频率设计方程为:

$$\begin{aligned} & (z_1/z_2) \operatorname{tg} k_1 l_1 - \operatorname{tg} k_2 l_2 + (z_1/z_3) \operatorname{tg} k_3 l_3 \\ & \operatorname{tg} k_3 l_3 + (z_2/z_3) \operatorname{tg} k_2 l_2 - \operatorname{tg} k_3 l_3 = 1 \end{aligned} \quad (2)$$

式中 $z_1 = \rho_1 c_1 s_1$, $z_2 = \rho_2 c_2 s_2$, $z_3 = \rho_3 c_3 s_3$, $k_1 = \omega / c_1$, $k_2 = \omega / c_2$, $k_3 = \omega / c_3$, 在上述式子中, ρ_1, c_1, s_1, k_1 及 z_i ($i = 1, 2, 3$) 分别为换能器3个组成部分的材料密度、纵振动声速、横截面积、波数及特征阻抗, l_1, l_2 及 l_3 为各部分的长度。一般情况下, $l_2 = P l_0$, 即第2部分是由 P 块厚度为 l_0 的压电陶瓷元件组成。

2.2 均匀截面细棒纵-弯同频共振的研究

对于长为 L , 横截面积为 $s = wh$ 的均匀截面细棒, 其中 w 为棒的宽度, h 为棒的厚度, 在两端自由的情况下, 其纵向振动的共振频率方程为。

$$f_L = m \cdot c / 2L \quad (3)$$

式中 m 为正整数, 表示棒的纵向振动模式数, f_L 为棒纵振动的共振频率。另一方面, 当棒产生弯曲振动时, 其共振频率 f_B 由下式给出

$$f_B = (cK / 8L^2) (2n + 1)^2 \quad (\text{当 } n \geq 3 \text{ 时}) \quad (4)$$

式中 n 也为正整数, 表示棒弯曲振动的模式数, K 为弯曲振动细棒的截面回转半径。对于厚度为 h 的矩形截面细棒 $K = h / \sqrt{12}$ 。由(3)、(4)两式可以看出, 对于长为 L 的均匀截面细棒, 纵向共振频率 f_L 及弯曲共振频率 f_B 是不容易实现一致的, 然而, 与纵向振动规律不同, 弯曲振动细棒的共振频率不仅与其长度有关, 而且与其截面尺寸有关, 这一点与细棒的纵向振动是完全不同的, 对纵向振动, 其共振频率仅与其长度有关。本文正是利用这一点来实现同一细棒中纵向及弯曲振动的同频共振的。令 $f_L = f_B$, 由(3)、(4)式可得,

$$L = (h / 4 \sqrt{12}) [(2n + 1)^2 / m] \quad (5)$$

由(5)式可见, 当细棒的长度 L 及厚度 h 满足上述关系时, 棒中第 m 次纵向振动与第 n 次弯曲振动具有相同的共振频率, 把(5)式代入(3)及(4)式可得棒的共振频率为:

$$f_L = f_B = \frac{2}{h} \frac{\sqrt{12} c}{(2n + 1)^2} = m \frac{c}{2L} \quad (6)$$

在一般情况下, 换能器振动系统的共振频率作为已知量是给定的, 因此, 由(3)~(6)式就可以很容易确定不同频率超声振动系统的几何尺寸, 即棒的长度及厚度, 至于细棒的宽度, 由于文中所用理论需要, 其宽度应远小于棒中弯曲及纵向振动的波长, 在这

种情况下,棒纵振动时可以忽略其横向振动,而当棒作弯曲振动时,又可以忽略棒的剪切及扭转变形。

3 实验

为从实验上研究,研制了两套纵-弯复合超声振动系统。矩形截面细棒的材料为 45 号钢,其密度及声速分别为 $\rho = 7.8 \times 10^3 \text{kg/m}^3$ 及 $c = 5000 \text{m/s}$, 细棒的激发换能器为具有相同振动性能的夹心式压电换能器,其理论频率分别为 10kHz 及 20kHz,两个夹心式纵向换能器分别固定于细棒的一端及中间位置。对该系统的振动性能进行了测试,测试过程分为 3 部分,分别对换能器的小信号激发、大信号激发以及纵-弯复合超声振动系统的相互作用进行测试。

3.1 纵-弯振动系统的小信号测试

利用传输线法对换能器的小信号特性进行测试,测量电路框图见图 3,其中 T 为待测换能器振动系统。测试结果见表 1,其中 f 为系统设计频率, f_0 为夹心式纵向振动换能器的测试频率, f_1 及 f_2 为两个换能器单独与细棒连接后测得的纵向及弯曲振动频率, m 及 n 分别为均匀截面细棒纵向及弯曲振动模式数。由测试结果见, f_1 和 f_2 是比较接近的,即该系统具有相同的纵向及弯曲振动频率。

表 1 换能器在小信号下参数测试结果

$L(\text{mm})$	$u(\text{mm})$	$h(\text{mm})$	$f_0(\text{Hz})$	$f_1(\text{Hz})$	$f_2(\text{Hz})$	$f(\text{Hz})$	m	n
250	25	22.5	9730	9549	9674	10000	1	3
125	20	11.25	19625	19338	19529	20000	1	3

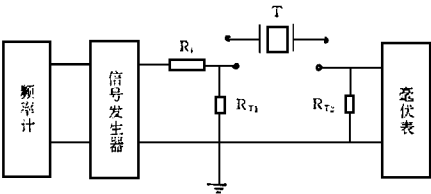


图 3 换能器的小信号测试电路

3.2 纵-弯振动系统的大信号测试结果

为了研究上述纵-弯系统在大功率下的振动特性,利用图 4 对其大功率特性进行了测试。由于大功率状态下,振动系统的阻抗较难测试,因此本实验仅测试了系统的共振频率,共振频率的测量是通过观察拾振器的输出得到的,测试结果见表 2,表中 P 为换能器的输入电功率,其余各量的物理意义同表 1。另外,为了定性地研究纵-弯振动系统的大功率辐射性能,对换能器系统在水中辐射性能进行了观察,结

果表明,在纵向及弯曲振动模式下,振动系统的辐射性能比较好,可以产生很强的水柱喷射。因此,这个实验定性地表明了该系统的大功率辐射性能。

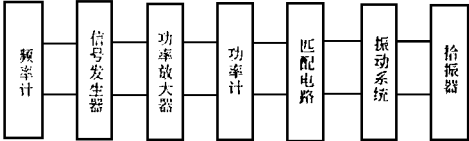


图 4 纵-弯系统的大功率测试电路框图
表 2 换能器在大功率下参数测试结果

$L(\text{mm})$	$u(\text{mm})$	$h(\text{mm})$	$f(\text{Hz})$	$f_0(\text{Hz})$	$f_1(\text{Hz})$	$f_2(\text{Hz})$	$P(\text{W})$	m	n
250	25	22.5	10000	9521	9384	9426	150	1	3
125	20	11.25	20000	19375	19117	19216	180	1	3

3.3 纵-弯系统中的纵向与弯曲振动相互作用研究

为了研究该系统中纵向振动与弯曲振动的相互作用,进行了一些初步的实验测试,测试电路同图 3。本实验主要研究了不同振动模式相互作用对其共振频率的影响,测试结果见表 3,表中 f_1 及 f_2 分别为不考虑相互作用时系统的纵向及弯曲振动频率, f_3 为纵向夹心换能器与细棒组成的纵向振动系统再加上固定于细棒中间的夹心换能器后测出的纵向振动系统的共振频率,而 f_4 则为夹心换能器与细棒组成的弯曲振动换能器系统再加上固定于细棒一端的夹心换能器后所测出的弯曲振动系统的共振频率, f_5 为纵向与弯曲振动系统同时激发所测出的系统的共振频率。由实验结果可以看出, f_1 与 f_3 比较接近,这说明固定于细棒中间的夹心换能器对振动系统的纵向振动频率影响不大,这一点是可以理解的,因为该换能器处于纵向系统的波节位置。另外 f_2 和 f_4 也比较接近,这一点也比较好理解,因为换能器与细棒连接点不但是弯曲振动的腹点而且是纵向振动的腹点,因此作用力基本上为零。至于系统的合成频率 f_5 ,当考虑到上述因素后,从理论上应该等于 f_3 或 f_4 ,但由于 f_3 与 f_4 不可能完全一致,故 f_5 是两种振动模式的合成频率,其数值偏移程度由 f_3 与 f_4 决定。

表 3 纵-弯系统中不同振动系统相互作用的实验结果

$L(\text{mm})$	$u(\text{mm})$	$h(\text{mm})$	$f_1(\text{Hz})$	$f_2(\text{Hz})$	$f_3(\text{Hz})$	$f_4(\text{Hz})$	$f_5(\text{Hz})$
250	25	22.5	9549	9674	9487	9235	9318
125	20	11.25	19338	19529	19312	19223	19336

由上述实验结果可见,纵-弯振动系统中纵向与弯曲振动共振频率基本可以达到一致,并且,在理想情况下,系统内不同振动模式的相互作用也可以忽略不计,即复合系统的共振频率与其纵向或弯曲频率基本一致。

4 结 论

本文对纵-弯振动系统进行了理论及实验研究,推出了均匀细棒中纵向与弯曲振动同频共振的条件,分析了系统中不同振动模式之间的相互作用,并且从实验上研究了换能器系统的各个共振频率,所得结果可用于大功率纵-弯振动系统的设计及计算,此类换能器可以应用于超声焊接、研磨、加工以及车削等功率超声技术中。

参考文献

1 Nakamura, K, Kurosawa, M. and Ueha, S. Design of a hybrid transducer type ultrasonic motor. IEEE Transactions on UFFC, 1993; 40: 395 ~ 401

2 Nakamura, K, Kurosawa, M. and Ueha, S. Characteristics of a hybrid transducer-type ultrasonic motor. IEEE Transactions on UFFC, 1991; 38: 188 ~ 193

3 Ohnishi, O. Myohga O. and Uenikawa, T. Piezo-electric ultrasonic motor using longitudinal-torsional composite vibration of a cylinder resonator. Ultrasonics Symposium, 1989; 739 ~ 743

4 陈桂生. 超声换能器设计. 海洋出版社, 1984

5 袁易全. 超声换能器. 南京大学出版社, 1992

6 栾桂东, 张金铎, 王仁乾. 压电换能器和换能器阵. 北京大学出版社, 1990

简讯

全国声学标准化技术委员会建声分技委换届会议在京召开

全国声学标准化技术委员会建声分技术委员会换届会议于1997年8月19~21日在北京召开,会议由建设部标准定额司及全国声学标准化技术委员会主持,会上由第三届建声分技委汇报了上届工作总结及四届建声分技委的组建工作,并由建设部标准定额司的领导宣布了第四届建声分技术委员会的委员名单,对建声分技委的工作也提出了具体的要求。

在这次建声分技委年会上重点对已在我国施行10年左右的8个国家标准(GBJ47-83混响室法吸声

系数测量规范、GBJ75-84建筑隔声测量规范、GBJ76-84厅堂混响时间测量规范、GBJ87-85工业企业噪声控制设计规范、GBJ88-85驻波管法吸声系数与声阻抗率测量规范、GBJ118-88民用建筑隔声设计规范、GBJ121-88建筑隔声评价标准、GBJ122-88工业企业噪声测量规范)逐一进行了认真的复审,经过委员会充分讨论,对每项标准都提出了具体的修改意见和修订工作的具体安排,会议开得圆满成功,对我国建声技术的标准化工作将起到促进作用。

章奎生