维普资讯 http://www.cqvip.com

[7] Deka M., 1987 IEEE Ultrasonics Symposium Proceedings, 543.
[8] Gerlach R., Kraus O. and Friche J., Ultrasonics International 91 Conference Proceedings, 323.
[9] Hutchins D. A. and Hayward G., Ultrasonics International 91 Conference Proceedings, 359.
[10] Teshigawara M., Shibata F., and Teramoto H., 1989 Ultrasonics Symposium Proceedings, 639.
[11] 张良莹，姚熹，电介质物理，西安交通大学出版社，1991,355.
[12] Ultrasonic Testing——non-conventional testing techniques, Edited by S. Szilard, John Wiley & Sons 1982, 12.

超声波 声换能器，纵弯模式

模式转换弯曲振动超声换能器的研究

林书玉 张福成
（陕西师范大学应用声学研究所 西安 710062）

1992 年 9 月 28 日收到

37-39 TB552

本文研制了一种由纵向振动夹心式压电换能器和弯曲振动细棒组成的纵-弯模式转换弯曲振动超声换能器，从理论上分析了此类换能器的两种振动模式，并推出了其共振条件．实验表明，换能器共振频率的测量值与理论值符合很好，弯曲振动换能器的能量转换效率较高，性能稳定，在实际生产中具有广泛的应用．

一、引　言

目前，在功率超声的各种应用中，纵向振动模式换能器的应用最广泛，原因在于此类换能器的设计简单，激发容易且具有较高的效率．随着超声技术应用范围的扩大，纵向振动换能器往往不能满足一些特殊应用的需要，例如在超声焊接，超声手术刀以及超声振动切削等技术中，弯曲振动换能器具有更好的效果及适应性．弯曲振动的产生主要有两种途径，一是利用换能器本身，通过合理选择压电元件的极化方向，在电端采取正确的连接方式，便可使换能器产生弯曲振动[1-3]．另一种产生弯曲振动的方式是利用纵-弯振动模式的转换，在纵向振动换能器的输出端连接一个与其振动方向垂直的振动体，通过合理选择振动体的形状及尺寸，振动体便产生弯曲振动．在这种方式中，纵向振动换能器与弯曲振动体可以作为一个整体进行设计，也可以分成两个系统单独进行设计，但无论采用那种方式，二者必须在同一频率上共振，以便获得高的能量转换效率和稳定的工作性能．本文对模式转换换能器的振动模式，连接条件，以及频率方程进行研究，为弯曲振动换能器的系统分析及研究提供一定的理论基础．

二、纵-弯模式转换弯曲换能器的设计

图 1 是本文研究的弯曲振动换能器的几何示意图，I 表示半波长纵向振动换能器，II 表示纵向振动变幅杆，III 表示弯曲振动系统．纵向换能器及变幅杆激发弯曲振动细棒，细棒便按照一定的模式产生弯曲振动．图 2 是变幅杆及细棒的等效模型，根据振动理论[4-5]，纵向振动变幅杆及细棒的振动方程分别为

$$\frac{\partial^2\xi}{\partial t^2}=c^2\left(\frac{\partial^2\xi}{\partial y^2}+\frac{1}{S(y)}\cdot\frac{\partial S(y)}{\partial y}\cdot\frac{\partial\xi}{\partial y}\right) \quad (1)$$

$$\frac{\partial^2\eta}{\partial t^2}=-K^2c^2\frac{\partial^4\eta}{\partial x^4} \quad (2)$$

式中 $\xi=\xi(y)$ 表示变幅杆的位移分布，$S(y)$ 为其截面变化函数，$c^2=E/\rho$，c 为细棒中的纵波速度，$\eta=\eta(x)$ 表示弯曲振动细棒的横向位移分布，

维普资讯 http://www.cqvip.com

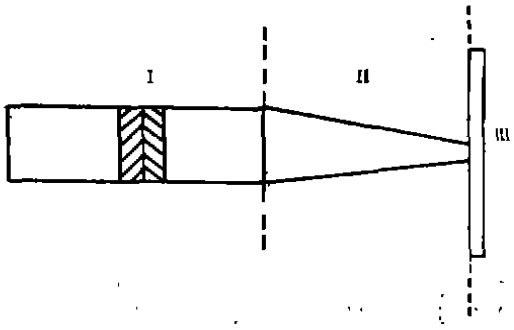


图 1　弯曲振动换能器

$$K^2 = \frac{1}{S}\iint_S r^2 dS,$$

K 为细棒的截面回转半径，S 为棒的截面积。厚度为 h，矩形截面均匀细棒的回转半径 $K = h/\sqrt{12}$。E 和 ρ 为材料的杨氏模量及密度。对于圆锥形变幅杆，$S(y) = S_1(1-\alpha y)^2$，$\alpha = (N-1)/NL$，$N = (S_1/S_2)^{1/2}$，S_1 及 S_2 为变幅杆两端面积，L 为其高度。解方程 (1) 和 (2) 得，

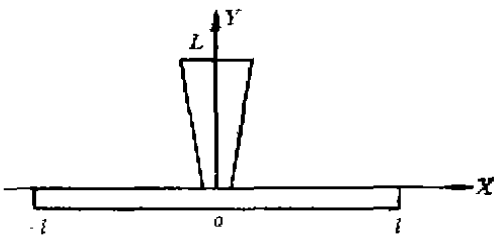


图 2　变幅杆及细棒的等效模型

$$\xi(y) = \frac{1}{y - \frac{1}{\alpha}}(A\cos ky + B\sin ky) \qquad (3)$$

$$\eta(x) = c\,\mathrm{ch}\frac{\omega}{v}x + D\,\mathrm{sh}\frac{\omega}{v}x + E\cos\frac{\omega}{v}x + F\sin\frac{\omega}{v}x \qquad (4)$$

其中 $\xi(y)$ 及 $\eta(x)$ 为位移分布函数，A，B，C，D，E，F 为待定常数，$k = \omega/c$，$\omega = 2\pi f$，$v = \sqrt{\omega c K}$。当变幅杆与细棒的连接方式不同时，其边界条件不同，振动模式也不同，以下对两种边界条件加以研究。

1. 变幅杆与细棒在振动的腹点连接

此时，振动系统的边界条件为

$$\left.\frac{\partial\xi}{\partial y}\right|_{y=0} = \left.\frac{\partial\xi}{\partial y}\right|_{y=L} = 0$$

$$\xi|_{y=0} = \eta|_{x=0}$$

$$\left.\frac{\partial\eta}{\partial x}\right|_{x=0} = 0 \qquad (5)$$

$$\left.\frac{\partial^2\eta}{\partial x^2}\right|_{x=-l} = \left.\frac{\partial^2\eta}{\partial x^2}\right|_{x=l} = 0$$

$$\left.\frac{\partial^3\eta}{\partial x^3}\right|_{x=-l} = \left.\frac{\partial^3\eta}{\partial x^3}\right|_{x=l} = 0$$

把 (3)、(4) 二式代入 (5) 式，整理可得

$$\left[\lg kL - \frac{kL}{1 + \frac{N}{(N-1)^2}\cdot(kL)^2}\right] \cdot \left[\mathrm{th}\frac{\omega}{v}l + \mathrm{tg}\frac{\omega}{v}l\right] = 0 \qquad (6)$$

很显然，(6) 式是由半波长圆锥形变幅杆的频率方程与两端自由弯曲振动细棒对称模式振动的频率方程组合而成。当振动系统的参数满足上述的频率方程时，变幅杆与细棒的连接点为波腹。

2. 变幅杆与细棒在振动节点连接

此时，振动系统的边界条件为

$$\left.\frac{\partial\xi}{\partial y}\right|_{y=L} = 0$$

$$\xi|_{y=0} = \eta|_{x=0} = 0$$

$$\left.\frac{\partial^2\eta}{\partial x^2}\right|_{x=-l} = \left.\frac{\partial^2\eta}{\partial x^2}\right|_{x=l} = 0 \qquad (7)$$

$$\left.\frac{\partial^3\eta}{\partial x^3}\right|_{x=-l} = \left.\frac{\partial^3\eta}{\partial x^3}\right|_{x=l} = 0$$

同理可得振动系统的频率方程

$$\left[\frac{\mathrm{tg}kL}{kL} + \frac{1}{N-1}\right]\left[\mathrm{th}\frac{\omega}{v}l - \mathrm{tg}\frac{\omega}{v}l\right] = 0 \qquad (8)$$

由(8)式可得两个独立的方程，一个是 1/4 波长节点在小端的圆锥形变幅杆的频率方程，另一个是两端自由弯曲振动细棒反对称振动模式的频率方程，当系统的参数满足上述条件时，变幅

维普资讯 http://www.cqvip.com

杆与细棒的连接点为节点。

从上述的理论分析可见，在本文的两种边界条件下，变幅杆与弯曲振动细棒可以单独设计，但是为了保证系统的谐振状态，二者必须在同一频率上达到共振。另外，在上面的分析中，变幅杆为圆锥形，为了改善系统的性能，变幅杆也可采用其它形状，例如指数形，悬链线形以及直棒，其分析是类似的，在此不再赘述。

表 1　弯曲振动换能器的测量结果

振型	L[mm]	$2l$[mm]	R_1[mm]	R_2[mm]	W[mm]	h[mm]	n	f[Hz]	f_m[Hz]	$\frac{\lvert f-f_m\rvert}{f_m}$[%]
对称	146	51	5	20	10	10	2	20000	19578	2.16
	126	118	5	5	10	10	4	20000	19215	4.09
反对称	63	85	5	5	10	10	3	20000	20617	2.99
	63	152	5	5	10	10	5	20000	20985	4.69

三、实验及结论

按照上述理论，我们加工了一些纵向变幅杆及细棒，其材料为 45 号钢，其几何尺寸及共振频率的测量结果见表1，其中 R_1 和 R_2 为纵向变幅杆两端的半径，W 为弯曲振动细棒的宽度，n 为细棒的振动节线数目，f 为理论设计频率，f_m 为测量频率，实验时，纵向激发换能器的共振频率为 20kHz。另外，为了比较振动系统在两种边界条件下的振动性能，在大功率下对弯曲换能器进行了定性的研究，观察了细棒的位移分布及其喷水情况。实验发现，在波腹连接的情况下，细棒的弯曲振动容易激发，系统的位移振幅大，且性能稳定。当变幅杆与细棒在波节连接时，系统的振动较差，且系统的振动性能不稳定。

总结上述研究，可得以下结论

1. 利用纵向换能器与细棒组成的弯曲振动换能器，当二者在腹点连接时，弯曲振动容易激发，换能器性能稳定。

2. 纵向换能器与细棒的连接可有两种方式，即波腹或波节连接，连接方式不同，系统具有不同的振动模式。

3. 纵-弯模式转换弯曲换能器是一种新型的振动能量产生装置，为了提高其振动性能，必须对其进行全面的探讨，例如频率、阻抗特性以及能量转换效率等。

参 考 文 献

[1] 渡辺裕二，日本音響学会講演論文集，平成3年3月，643—644.

[2] 渡辺裕二，津田米雄，日本音響学会講演論文集，平成元年10月，875—876.

[3] 栾桂冬，张金铎，压电换能器和换能器阵，上册，北京大学出版社，1990，231—248.

[4] 林仲茂，超声变幅杆的原理和设计，科学出版社，1987，40—52.

[5] 杜功焕，朱哲民，龚秀芬，声学基础，上册，上海科学技术出版社，1987，78—82.

（上接第 48 页）

大会评选出 13 篇优秀论文，对作者颁发了证书。

本次会议始终在紧张、热烈的气氛中进行。与会代表以饱满的精神参加会议，同时充分显示了理工医相结合的特点。

若干个国内外超声诊断仪器厂家参加了会议，进行仪器展出与新技术交流。

会议期间两个学会还分别召开了工作会议。

会议对东道主中国医科大学第一医院领导和全体同志，特别是蔡至道教授，表示诚挚的谢意。

（南京大学声学所　冯若）