

高频空气, 超声换能器, 空气动力学

175kHz 高频空气超声换能器研制 及其特性测量

宋宙模 陈长乐 杨永年 张彬乾

尚志远

(西北工业大学 西安 710072)

(陕西师范大学声学所 西安 710062)

1992年12月7日收到

本文报道了一种用于复杂空气旋涡场参量测量的高频空气超声换能器。在用超声-激光方法研究流场时,它是关键的换能元件。该换能器工作频率为175kHz。由于采用了管状压电元件及特制的伞状反射器,该换能器具有优越的指向性($\pm 2.5^\circ$)

一、引言

对空气动力学流场参量的测量,目前已发展到避免检测传感器元件对气体流场的阻挡及消除测量载体惯性影响的阶段。国外近年来发展了一种利用激光对超音脉冲形成的折射率光栅产生偏转来测量流场参量的新方法^[1]。这种方法的关键元件是大功率空气脉冲超声换能器。在空气流场测量时,风洞产生的模拟流场的噪声频率在50kHz左右。为避免这种噪声,同时可获得能使激光产生偏转的空气折射率光栅,我们选择了超声频率为175kHz。流场参量的测量分辨率要求所用的空气超声换能器具有较好的指向性,为此我们对换能器进行了一些特殊设计。经过测试研究证明这种换能器的特性达到了所需的要求。

二、前人的工作及本文换能器的特点

关于高频空气超声换能器研究现状与展望,王兆球等人^[2]曾作过较全面的综述与评论,这里只对与本文有关的换能器作进一步介绍,以便进行比较。

近年来,高频空气超声换能器的研制在国外已引起重视,取得了较好的效果。这主要是

机器人或机械手的研究以及对材料的非接触式超声无损评价的研究不断深入的要求。但这方面的研究还在探索阶段。1985年德国的 P.Kleischmidt 和 V. Mogorl^[3] 研制了一种型号为 L2QZ 的新型换能器,其结构为三片相隔 t_p 距离、厚度为 t_e 的 PZT,薄片中间 (t_p) 填以塑料,最外边再加一层塑料夹住 PZT 并封死,组成一个复合整体,适当调整 t_p 和 t_e , 可得到中心频率为 140kHz,带宽为 60kHz 的换能器,该换能器已被 H. Ermert 等人^[4]用于物体轮廓的识别和物体位置的测定。1986年日本的 K. Higuchi, 等人^[5]为进行空气中的声成像,研制了一种频率可以从 100 kHz 到 200kHz 范围变化的空气声换能器列阵,该列阵有 32 个单元,排列在 20mm × 30mm 的硅片之中,振动元件为 12μm 厚的聚酯薄膜,中心频率为 140kHz,带宽为 50kHz。当中心频率为 100kHz 时,指向性为 7.5° 。1987 年美国的 W.J. Bantz^[6] 发展了一种高效空气耦合换能器,频率可达 220kHz,其结构为一片 PZT 元件及粘在其上的二层厚度为四分之一波长的聚苯乙烯泡沫塑料。M. Deka^[7] 对 Bantz 的结构进行了改进,把二层 1/4 波长厚度的薄层改为一层,结构与前相似,但频率则提高到 500kHz。1991 年德国的 R. Gerlach 等^[8]用 1/4 波长厚度的多孔无机 SiO₂ 气凝胶作压电陶瓷与空气的声阻抗

匹配层,获得了共振频率为180kHz(径向共振)和370kHz(轴向共振)的换能器。其他还有一些用于声成像及激光产生超声进行材料非接触无损评价的空气耦合超声换能器^[2,9-10],其频率在900kHz—2MHz。因频率与我们所用的相差太远,这里不再予以介绍了。至于R.H. Engler用于流场参量超声-激光方法测量的空气超声换能器,至今尚未见到其结构及特性的报道,所以未能介绍。国内目前尚未见到有60kHz至800kHz之间的空气超声换能器的研究文章。由以上关于高频空气超声换能器发展情况可见:目前研究的内容主要是集中在宽带换能器方面,带宽越宽越好。在结构上则大多为片状的PZT压电陶瓷,仅R. Gerlach等人在1991年才开始用径向共振模式。在指向性性能上并不十分讲究,大致在 $\pm 6^\circ$ 左右。

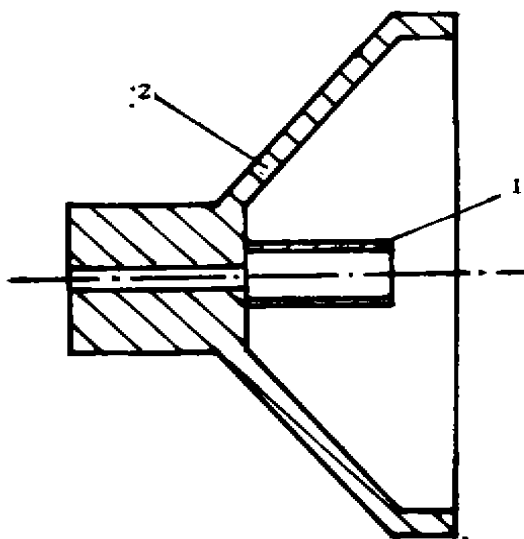


图1 换能器结构示意图
1——压电陶瓷; 2——伞状反射器。

根据我们测量流场参量的要求,我们自行设计的175kHz高频空气超声换能的主要特点是具有特制的管状PZT压电元件,在外部附加了一个伞状的反射器,其结构示于图1。压电陶瓷长约16mm,伞状反射器外口直径为60mm。这种结构没有粘结部位,因此就不存在粘结部分受振动而剥离脱落的问题。有利于加上较大的驱动信号,以获得较大的超声输出

功率。在圆管的外侧加上这个锥角为 90° 的伞状反射器以后,可以进一步提高换能器发射超声的指向性,这种结构也便于附加空气-压电陶瓷声阻抗匹配层,进一步利用超声的能量。换能器的另一个特点是使用的中心频率在压电元件谐振频率处。在流场测量中不需改变超声频率,因而不需很宽的频带,所用的带宽不超过 $\pm 5\text{kHz}$,所以这样的设计有利于提高机电效率。另外由于本换能器结构简单,成本较低,也便于推广使用。

三、特性测量

1. 谐振特性曲线的测量。

我们所采用的管状PZT压电元件是自行设计后专门加工的,为了掌握该元件的谐振特性,验证该元件的谐振频率是否符合设计要求(即是否处于 $175\text{kHz} \pm 5\text{kHz}$ 之间),我们对它的谐振特性进行了测量。根据电介质物理学关于晶体的压电性质的理论^[11],一般压电振子的谐振频率可从其等效电路求得,阻抗极小值和阻抗极大值所对应的频率分别为(机械阻尼电阻 $R_1 \approx 0$):

$$f_m = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_1 C_1}},$$

$$f_n = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_1 \frac{c_1 c_2}{c_2 + c_1}}}$$

式中 c_2 为振子在高频下的夹持等效电容, L_1 为

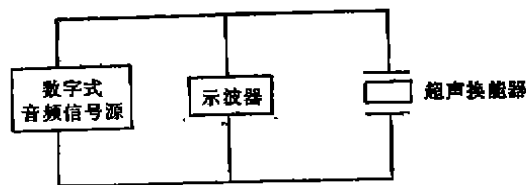


图2 谐振特性曲线测量框图

动生电感, c_1 为动生电容。测得谐振特性曲线,就可以得到 f_m 和 f_n 。从而可得到该元件的动生电容和动生电感。测量的线路如图2所示。出用的驱动信号源为XD7-5型数字式低频信

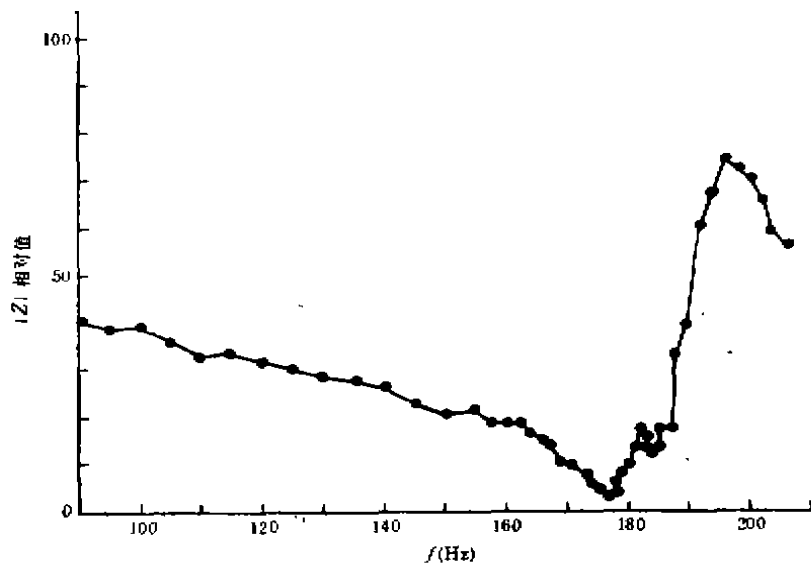


图3 谐振特性曲线

号发生器。其频率范围为 20Hz—200kHz，输出频率准确度为 $\pm 5 \times 10^{-5}$ ，频率特性在功率输出时为 $\leq \pm 2\text{dB}$ 。所得的压电元件阻抗随频率变化的谐振特性曲线示于图 3。

2 声发射信号随距离变化的测量。

把高频超声换能器置于一光具座上，固定位置不动。用数字低频信号源作驱动源，当频率调到低阻抗共振频率时，测量其所发射的声强随距离的变化。因目前国内尚无这种频率的

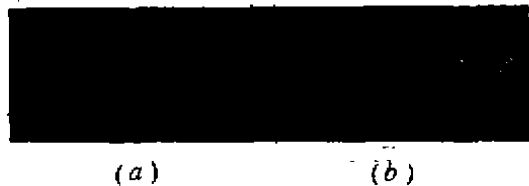


图4 声驱动信号(a)及接收信号(b)的波型

超声接收换能元件，我们自制了接收换能器。这种接收换能器具有与发射换能器相同的结构，

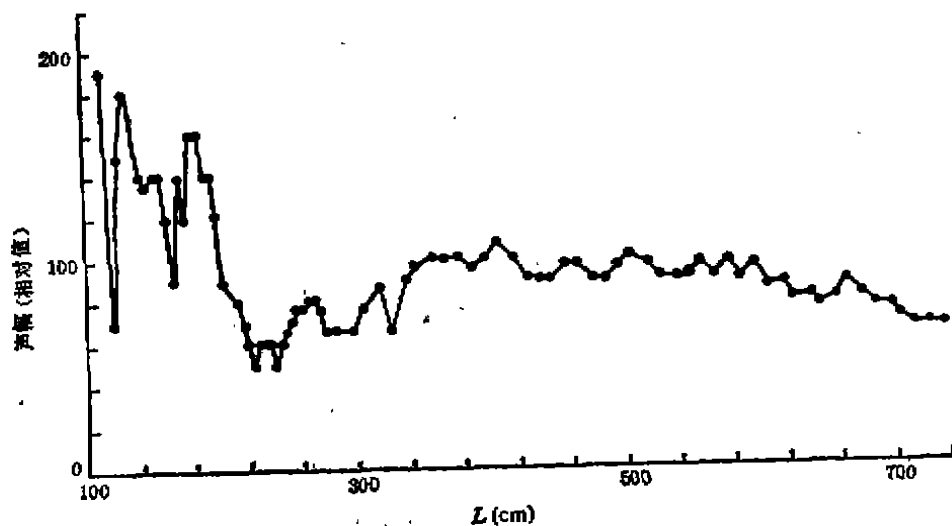


图5 声幅随距离的变化曲线

伞状外口径为 $\phi 60\text{mm}$,但压电陶瓷为接收型的PZT。由于所测量的是各距离处声强的相对值,而且接收的频率是只在共振频率处的单一频率,所以我们未对接收换能器进行校验。实际上目前尚没有这个条件。图4示出了驱动源信号的波型(a),以及由接收换能器所得的声发射信号的波型(b)的照片。图5为换能器发射的声幅随距离的变化曲线。

3. 声发射幅值的角分布测量

这个实验是在一个转台上做的。把发射换能器置于转台固定中心轴上,把声接收器置于半径为500mm的圆周上,转动平台就可以测得不同角度时的声幅。所用的接收器仍如上述,但把声接收器伞状口径遮盖到 $\phi 30\text{mm}$,以提高角度分辨率。所得的发射声信号的角度分布曲线示于图6。测量时以发射换能器正前方为零度,在零度左右两边每隔 0.5° 测一次,在角度较大时,每隔 5° 测一次。多次测量并经计算机处理后得到所示的曲线。

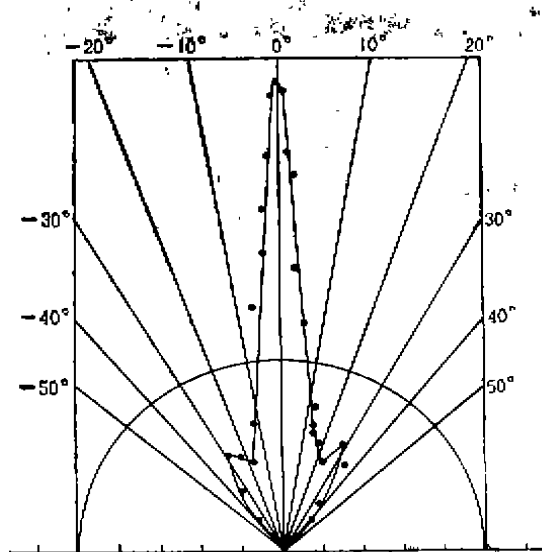


图6 声发射信号的角度分布

四、结果的讨论

1. 由测量结果图3可以看出,该换能器管状压片元件的频率特性曲线与理论所预期的定性一致。最小阻抗频率为 $f_m = 177.1\text{kHz}$,最大

阻抗频率为 $f_s = 196.1\text{kHz}$ 。在185kHz处有一个小的极小值,可能是由于机械阻尼电阻 R_1 实际上并不为零的缘故。

2. 声信号幅值随距离的变化情况是,在 $L = 310\text{mm}$ 以内,出现强弱激烈的变化。按照J. Szilard^[2],发射换能器声场可分为近场与远场。近场区按照惠更斯原理相干涉而形式具有多个极大与极小的复杂干涉图案,这个近场区域离发射器的距离由下式给出

$$L = \frac{D^2 - \lambda^2}{4\lambda} \approx \frac{D^2}{4\lambda}$$

对于我们的换能器, D 为伞状反射器的口径为 $\phi = 60\text{mm}$,波长为 $\lambda \approx 2\text{mm}$ 。所以 $L \approx 400\text{mm}$,也就是在400mm以内的区域声幅随距离的变化是很激烈的。这与我们的实验结果相一致。在远场区域声信号随距离的变化很平坦,而且衰减得比较慢。

3. 声幅随角度的变化很尖锐。当角度变化 $\pm 2.5^\circ$ 时,声幅减小到 0° 时极大声幅的一半。同样按照J. Szilard在远场区声波的主瓣以下式发散

$$\sin \theta = 1.22\lambda/D$$

根据我们的换能器结构的参数及波长,可算得 $\theta \approx 2.58^\circ$,这与我们的测量结果也是相符的。由上式可见,要得到比较好的指向性,必须加大伞状反射器的口径,或提高超声的频率。但这样又会使近场区增大,两者是相矛盾的。我们在空气流场测量参量时,一般距离发射源在500mm—1500mm,所以目前所制成的换能器正好合适。

参考文献

- [1] Engler R.H., Vortex Breakdown-Investigations Using the Ultrasonic-Laser Method and Laser-Sheet Technique, ICAS, 1988, Record, 1731.
- [2] 王兆球,张淑仪,应用声学,11-2(1991),1.
- [3] Kleinschmit P. and Magori V., 1985 IEEE Ultrasonics Symposium Proceedings, 457.
- [4] Ermert H., Schmolke J. and Werth G., 1986 IEEE Ultrasonics Symposium Proceedings, 555.
- [5] Higuchi K., Suzuki K. and Tanigawa H., 1986 IEEE Ultrasonics Symposium Proceedings, 559.
- [6] Bantz W.J., U.S. Patent No. 4, 594, 897.

- [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

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。

应用声学

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

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

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

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,