综述与评论

高频空气声换能器研究现状与展望

王光球　　张淑仪
（南京大学声学所）

1990年10月27日收到

本文首先阐述高频空气声换能器的设计要点，然后介绍空气声换能器在测距、成象、材料特性无损评价等方面的初步应用，最后讨论空气声换能器进一步研究的发展方向及应用前景.

一、引　言

频率在100kHz以下的空气声换能器在测距、导盲及工业自动化方面得到了广泛应用.随着工业自动化精度要求的不断提高，以及为满足非接触式超声无损检测的需要，高频空气声换能器的研制已引起国内外同行的关注. 近几年来，频率从几百千赫至几兆赫的空气声换能器的研制在美国、日本和西欧各国相继展开[1-3]，并在空气中测距、成象、物体表面轮廓测量、机器人侍服控制甚至空气中光声检测等方面取得了较好结果[4-5]. 然而，诸方面的工作有待于进一步深入. 问题的关键依然是如何设计性能优良(高灵敏度、宽带)的空气声换能器，而目前的水平大致可以做到带宽为15%，双程插入损耗为−30dB. 本文结合作者的工作，首先介绍高频空气声换能器研制中所遇到的问题及其解决办法；然后通过几例基础应用研究工作，展示空气声换能器的应用领域，并讨论空气声换能器在机器人控制、材料无损评价及其它方面的应用前景.

二、高频空气声换能器的设计与结果

就空气声换能器的大部分应用而言，换能器的设计要求为高灵敏度、宽带. 然而，灵敏度和带宽的提高通常是矛盾的，两者之间的权衡应视具体情况而定. 影响空气声换能器灵敏度与带宽的根本原因是换能器材料（如PZT、PVDF等）与空气声阻抗的严重失配，它们的声阻抗率分别为 $Z_c \sim 1-35$MRayl 和 $Z_a = 0.0004$MRayl. 一般地，采用 $\lambda/4$ 波片匹配的办法来改善两者之间的声传输.对于单层匹配，其厚度在 $\lambda/4$（λ 为声波波长)、阻抗在 $Z_1 = \sqrt{Z_c Z_a}$ 附近选择. 考虑到电极、背衬等方面的影响，现在一般通过计算机模拟来确定匹配层的厚度与声阻抗，以达到最佳的匹配效果. 理论计算一般从换能器的等效线路（如KLM等效线路)出发，来计算换能器的脉冲响应，频率响应及输入阻抗等[6].

对于PZT，其声阻抗率 $Z_c \sim 30$ MRayl，其单匹配层阻抗率（$Z_1 = \sqrt{Z_c Z_a}$）约为0.11 MRayl，而这样的低阻抗材料很难寻觅或合成.

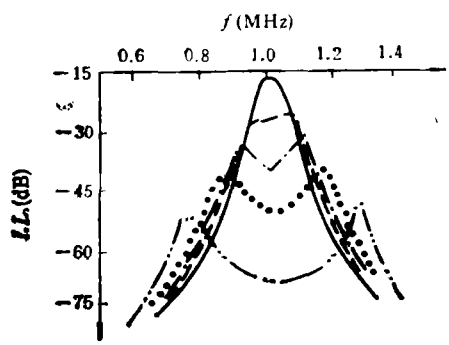

图1　双程插入损耗（I. L.: Insertion Loss）与匹配层声阻抗率的关系. 声阻抗率分别为0.11MRayl(——); 0.25 MRayl(----);1.0MRayl(—·—·); 3.0MRayl(·····); 5.0MRayl(—··—··)

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

为说明匹配层声阻抗对换能器特性的影响，图1给出了 PZT-5 换能器双程插入损耗随单匹配层声阻抗率的变化。从图中可以看出，在现有材料条件下，匹配层声阻抗率越低，匹配效果越好。然而，通常天然材料的声阻抗率极难接近 0.1MRayl。因此，空气声换能器设计的关键一步是合成低阻材料。

如上所述，换能器匹配层声阻抗率应在 0.1 MRayl 左右，而对一般轻型材料，特别是含有微小气珠的合成材料，其声衰减在兆赫频段急剧上升，这给高频空气声换能器的设计带来了新的问题。图2给出了匹配层声衰减(机械损耗)对双程插入损耗的影响。可以看出，匹配层应选用声衰减较小的材料。

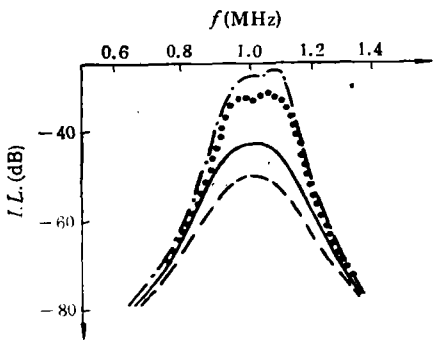

图2 匹配层机械损耗对双程插入损耗的影响. 机械损耗角 tgδ 分别为: 0(—·—·—); 0.01(……); 0.05(——);0.10(-----)

为了进一步改善换能器性能，经常采用双层或多层匹配的方法来提高灵敏度或拓宽频带。事实上，如图1所示，当单匹配层阻抗偏离理想值时，中心频率处出现一低谷，第二匹配层的作用就是恢复中心频率处的灵敏度。但是，增加另一匹配层无疑会使换能器声衰减增加，从而影响灵敏度的提高。因此，我们第一步的工作是通过寻找合适的低阻抗材料来实现换能器的声匹配。

图3给出了空气声换能器的一个实例。其中心频率为 1MHz，换能器材料为 PZT($Z_c \sim$ 31MRayl)，单匹配层声阻抗率 $Z_1=0.25$MRayl 机械损耗角 tg$\delta_1=0.01$。可以看出，换能器双程插入损耗的理论与实验结果吻合良好。同时我们发现其理论与实测脉冲响应也基本一致。理论与实验结果出现微小差别可能是由于理论计算中各参量选取不够准确所引起的。

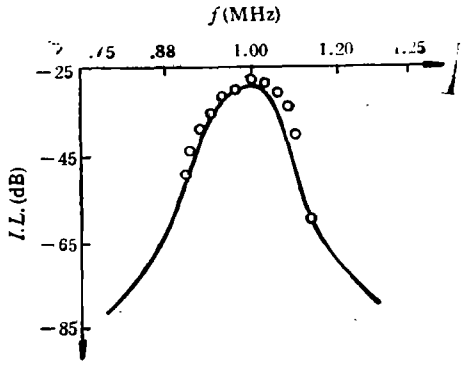

图3 1MHz 空气声换能器的插入损耗
——理论曲线; ○○○实验结果

图4是一个双层匹配的例子。首先，我们通过理论计算，选择第一匹配层声阻抗率 $Z_1=3.0$MRayl，衰减角 tg$\delta_1=0.1$，第二匹配层为 $Z_2=0.15$MRayl，tg$\delta_2=0.05$；背衬材料声阻抗率 $Z_B=2.4$ MRayl。由于两匹配层的衰减较大，其灵敏度受到一定影响，但带宽有所提高。另外，实验结果与理论计算有一定的偏差，估计是换能器加工精度不够及参数选取不准等引起的。

以上简单讨论了空气声换能器的声匹配。如果辅以合适的电匹配网络，预计换能器带宽可达30%。

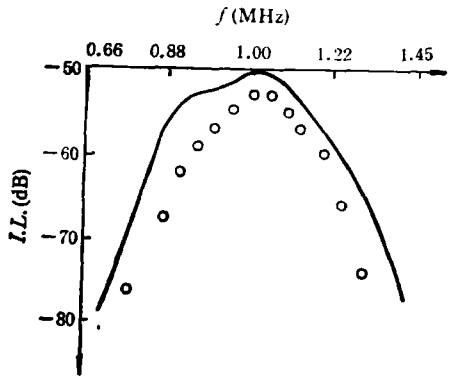

图4 双层匹配换能器的插入损耗
——理论曲线; ○○○实验结果

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

我们将性能如图 3 所示的换能器用于非接触式光声测量，用于表面形状测量、膜厚测量及半导体材料的检测均获得较好结果。由于篇幅所限，下面只简要介绍国外的和我们自己的几个应用例子。

三、高频空气声换能器应用几例

1. 在工业自动化与机器人控制上的应用

机器人控制操作，一般采用光学视觉传感器如 CCD、摄象仪等[7]。但光学传感器有成本高、体积偏大、不适用于透明工件和易受光照条件影响等的不足；而超声的位置传感器或物体识别传感器能克服上述缺点。近年来它们的研究倍受重视，旨在提供可弥补光学传感器不足之处。然而，这方面的研究还停留在探索阶段[8~9]。H. Ermert 和合作者利用 140kHz 的复合换能器作为物体识别传感器，用于工件的定位，取得了富有启发性的结果[10]。他们采用逆滤波的方法，在发射换能器上输入一信号，使得当被测工件处于正常位置时，接收换能器信号最佳。然后定义一个表征回波能量在时域上分布情况的参量 $k = S_2/S_1$，S_1 代表回波在一固定时间窗口内的能量，而 S_2 为回波在这时间间隔外的能量。如果工件偏离正常位置(平移、旋转等)或存在缺陷，则回波信号拖尾变长，从而引起 k 的变化(从 0.155 至 0.926)。这一方法可直接用于精度要求，特别是横向分辨率要求不太高的情况下的机器人“视觉”系统，用于工件组装等领域。

2. 空气中声成象

随着高频空气声换能器的研制成功，人们自然希望能在空气中进行声成象，如同医学上用相位阵来成象。日电公司在 1986 年报道了用集成电路工艺研制的 32 基元换能器阵[11]，但其灵敏度似乎没有达到成象的要求。另一类成象是空气中超声显微镜成象。Stanford 大学 Fox 等利用 2MHz 的聚焦空气声换能器进行了尝试，用于印刷线路板和林肯便士的成象，效果良好[4]。所成象主要决定于物体表面形貌而不是材料本身的特性。成象是通过检测反射波的振幅或相位来实现的。他们获得的纵向分辨率为 0.6μm，横向分辨率为 400μm。

由于空气声显微镜不需要耦合液体，因此这是一种无损无污染的技术。另外由于空气中声波波长较小，对于同样的分辨率要求，空气声显微镜的频率比普通超声显微镜低一个数量级。

3. 非接触式光声检测技术

前面介绍了 Fox 等研制的空气声反射显微镜。由于声束聚焦极限受半波长的限制，其横向分辨率为 400μm。为了提高这一分辨率，我们建立了一套光声检测系统，如图 5 所示。这与 Sterns 等人的光声系统类似[5]，但信号提取时取消了混频部分，而采用高频锁相放大器直接接收信号。

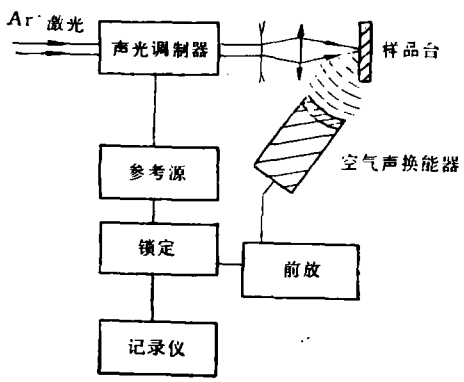

图 5 非接触式光声检测系统

如图 5 所示，一束由声光调制器调制的 Ar^+ 激光经透镜系统入射到样品上，样品表面附近因光声效应而产生声波。由于激光束直径(～1μm)相对于声波波长很小，声波可视为球面波。它由一聚焦换能器接收，经锁相放大器放大后由记录仪记录或至成象系统进行成象。光声成象系统的分辨率主要决定于激光斑直径和热扩散长度，这在其它光声技术中已为人周知。因此，相对于空气超声显微镜而言，光声系统的横向分辨率可大大提高，估计为几个微米。我们没有进行该系统分辨率的实际测量，这里仅给出用一个曲率半径为 20mm，孔径为 15mm

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

的1MHz空气声换能器对一功率晶体管扫描所提取的相位信号（图6），它反映了该晶体管的表面形状。

由于篇幅所限，该光声系统在膜厚测量、半导体离子注入浓度测量等应用这里不作介绍。

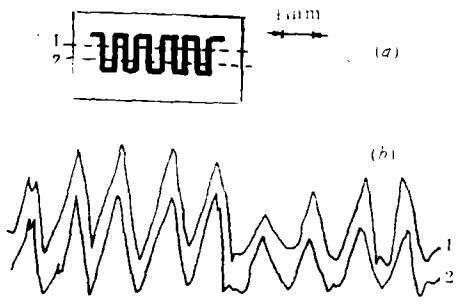

图6 光声方法研究功率晶体管表面形状
a. 功率管示意图； b. 相位信号

四、高频空气声换能器发展趋向与应用前景

高频空气声换能器的研究在国际上十分活跃。国内我们较早进行了这方面的研究。这一领域发展潜力很大，其应用前景也很广阔，这里仅讨论笔者认为较重要的几个方面。

1. 换能器阵列用于机器人"视觉"。

本文第三部分介绍了 Ermert 等人用超声回波进行物体识别的方法，这可满足一些机器手简单操作的需要。但是，对于机器人操作中的精确定位、识别，利用单个换能器就不能获得满意的结果。理想的方法是利用换能器阵列来对物体进行三维成象，然后按一般机器人视觉系统图象处理的方法来进行分析，并控制机器手的行为。

不少作者已作过这方面的尝试，如前面所述的日电公司的工作[11]。另外，文献[12]也介绍了一种用空气声换能器阵列进行机器人图象处理，但由于所研制的空气声换能器没有达到要求，而未能达到成象的目的。另外，在算法方面，Rockwell 公司也做了大量的工作[13]。

预计这两方面的工作近期会有所突破，并有机地结合起来，以适应工业自动化发展的需要，弥补光学视觉系统的不足。

2. 光声方法研究材料特性

光声热波检测技术近几年来得到了迅速发展，现已成为一种极为有效的分析检测手段，广泛应用于金属、陶瓷、特别是半导体材料的无损检测与评价。经典的光声显微镜采用接触式检测方式，即将样品与换能器粘合在一起，这通常很不方便。高频空气声换能器的研制成功，可在保持相应分辨率的情况下，使检测方式成为非接触式的，这为半导体器件与材料的无损在线检测开辟了一条新的道路。我们进行了这方面的研究，并正在进一步开发其应用领域。

3. 非接触式超声无损评价

以往，超声无损检测是由耦合剂来实现探头与试件间的声耦合的。在许多不宜用耦合剂的场合，通常采用电磁的或激光的方法来间接实现非接触式检测。但它们有各自的局限性，且成本较高。如果能够直接采用空气耦合，无疑可提供一种新型的检测手段。但由于固体样品与空气间的声传输率极低，这方面的工作过去一直无人问津。M. Deka 的工作为我们提供了一个可行性试验[14]。他利用 440kHz 的空气声换能器对金属箔间的模拟缺陷进行了检测，得到了初步的结果.随着电子技术的不断发展、电路系统灵敏度的不断提高，相信空气中超声无损检测必将有其独特的应用领域。

4. 其它方面的应用

空气声换能器频率的提高，使距离、位置传感器向更高的精度发展；超声换能器用于液体流量计的研究已进入应用阶段，但高精度的气体流量计尚未出现，预计在近几年内以空气声换能器为敏感元件、具有更高精度的气体流量计可以问世；另外，通过测量超声波在含有杂质（如煤灰等）的气体中的散射、衰减等，可以测量杂质浓度。因此，空气声换能器可用作浓度敏感元件，用于工业生产、环境保护的许多场合浓度的测量。其它方面的应用相信也会随空气声换能器性能的改善而不断增加。

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

五、结　论

空气声换能器的研究已向兆赫频段发展，其设计关键是寻找合适的低阻抗、低衰减的匹配材料。辅以适当的电路匹配，换能器的收-发相对带宽可望达到30%。高频空气声换能器的研制，必将推动超声波技术在机器人控制.材料无损评价以及其它方面的应用研究，并在科研、工业生产上发挥积极的作用。

参 考 文 献

[1] Fox J. D., Khuri-Yakub B. T. and Kino G. S., 1983 IEEE Ultrasonics Symposium Proceedings, 581—584.

[2] Tone M., Yano T. and Fukumoto A., *J. A. Phys.*, 23-6(1984), L436—438.

[3] Canali C. et al., *Sensors and Actuators.*, 2(1981/1982), 97—103.

[4] Fox J. D., Khuri-Yakub B. T. and Kino G. S., 1985 IEEE Ultrasonics Symposium Proceedings, 463—467.

[5] Stearns R. G. and Kino G. S., In Photoacoustic and Thermal Wave Phenomena in Semiconductors (ED. A. Mandelis), Esclavier Sci., Publishing Co. Inc., New York, 1987, 201—335.

[6] Wang Z. Q., Thése de Doctorat de l'Université Paris 6, n° 87/PA6/6668, 1987, Paris, France.

[7] Pugh A., Robot Vision, IFS (Publications) Ltd., Springer-Verlag, 1983.

[8] Schoenwald J. S. and Martin J. F., 1983 IEEE Ultrasonics Symposium Proceedings, 577—580.

[9] Kleinschmit P. and Mágori V., 1985 IEEE Ultrasonics Symposium Proceedings. 457—462.

[10] Ermert H., 1986 IEEE Ultrasonics Symposium Proceedings, 555—558.

[11] Higuchi K. et al., 1986 IEEE Ultrasonics Symposium Proceedings, 559—562.

[12] Ma Y. L., Intelligent Robot and Computer Vision, SPIE 726(1986), 355—362.

[13] Richardson J. M. et al., 1984 IEEEE Ultrasonics Symposium Proceedings, 831—836.

[14] Deka M., 1987 IEEE Ultrasonics Symposium Proceedings, 543—456.

由瞬态响应的测量来估算超声马达的负载特性

为测量超声马达的一些特性，如最大力矩、负载特性(即力矩-速度特性)、转子和定子接触面上的摩擦系数等，本文提出一种由瞬态响应来估算的方法，由接通电源时马达转速阶跃响应的上升曲线可算出其负载特性，而由切断电源时的下降曲线得出接触面的摩擦系数。本方法测量时间快，故不受因温升导致的共振频率漂移等一些问题的困扰。对一混合换能器型旋转马达得到的负载特性与用拉重法所得结果符合很好。对一行波直线马达则考察了摩擦材料的杨氏模量和摩擦系数等参数对马达性能的影响。

方法原理如下

1.阶跃响应和负载特性间的关系

在定子振动建立时间远小于转子速度建立时间的条件下，可以认为支配瞬态响应的仅是负载的运动方程

$$T = J\frac{d\Omega}{dt} \tag{1}$$

式中 J 是负载(包括转子)的转动惯量，T,Ω,t 分别是驱动负载的力矩、转子的角速度和时间。多数情况下负载特性可表示为一直线，即

$$\Omega = \Omega_0(1 - T/T_0) \tag{2}$$

式中 Ω_0 和 T_0 是空载转速和最大力矩。由式(1)和(2)得微分方程

$$\Omega - \Omega_0 = -J\frac{\Omega_0}{T_0}\frac{d}{dt}(\Omega - \Omega_0) \tag{3}$$

本方程的解给出瞬态响应的上升部分为

$$\Omega = \Omega_0[1 - \exp(-t/\tau_r)] \tag{4}$$

式中升起时间 τ_r 是

$$\tau_r = J\Omega_0/T_0 \tag{5}$$

算出转子速度曲线上升段上每点的 $d\Omega/dt$ 后，由(1)式可算出负载特性，同时测量输入电功率 P_{in} 的阶跃响应可确定效率 η 和负载的关系曲线。效率 η 按下式计算

$$\eta = \frac{T(N\cdot m)\times\Omega(rad/s)}{P_{in}(W)}\times 100(\%) \tag{6}$$

2.转子和定子间摩擦系数的估算

当定子断开电源后，摩擦力矩 T_f 起制动作用

$$T_f = \mu F r \tag{7}$$

式中 μ、F 和 r 分别表示摩擦系数、转子和定子间的法向静压力和其接触面的曲率半径。则转子速度曲线的下降段为

$$\Omega = \Omega_0(1 - t/\tau_f) \tag{8}$$

式中

$$\tau_f = J\Omega_0/T_f \tag{9}$$

故测量 τ_f 后可算出摩擦系数。

(严仁博　摘译自 *IEEE Trans.*, *UFFC* **38**-5(1991),481.)

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net