复合弯曲振动换能器的相位阻抗变换穿孔板*

阎玉舜　张　串
(同济大学声学研究所　上海 · 200092)
高克成
(上海工业自动化仪表研究所　上海 · 200233)

本文介绍了一种用于多波节复合弯曲振动换能器的穿孔板,并对穿孔板的阻抗变换机理进行了理论分析。本文还对这种换能器的性能进行了测试,并将其用于超声料位仪中,获得了较满意的应用效果。

关键词　弯曲振动,换能器,穿孔板,阻抗变换

Perforated plate for impedance and phase transformation applied to compound flexural transducer

YAN Yushun　ZHANG Chuan
(Institute of Acoustics, Tongji University · 200092)
GAO Kecheng
(Institute of Process Automation Instrumentation · 200233)

In this paper, a new compound flexural transducer with perforated plate is introduced, and the impedance transforming mechanism of the perforated plate is explained theoretically. In addition, properties of the transducer are measured in this paper. The transducer is applied to ultrasonic level detector, and the result is more satisfying.

Key words: flexural vibrating, transducer, perforated plate, impedance transformation

1　前　言

超声料位仪上采用大圆盘、多波节向空气辐射的弯曲振动换能器,振动板作高次弯曲模式振动,存在着多个波节圆,节圆两侧振动相位相反,辐射声场轴向声压为零。过去,曾采用修改振动板表面厚度或粘贴聚乙烯泡沫塑料环进行相位补偿。本文将讨论加穿孔板的方法,并对其阻抗变换机理进行分析。最后本文还简述附穿孔板的复合弯曲振动换能器的测试性能及在超声料位仪上的应用。

2　阻抗变换板分析

2.1　边缘自由薄板轴对称弯曲振动辐射声场

除活塞辐射器外,一般辐射器辐射面的振幅分布往往是不均匀的,弯曲换能器的振动即属这种情况。它的辐射声场比活塞的辐射声场要复杂得多。

*　第一作者:阎玉舜,男,1936 年 10 月生,研究员
收稿日期:97-5-26;修回日期:97-7-18

不均匀振速辐射器辐射声场声压的表达式为[1]:

$$P(r,\theta,\varphi)\approx \mathrm{j}\frac{k\rho c e^{-\mathrm{j}kr}}{2\pi r}\int_0^{2\pi}\int_0^{\varphi(s)} v(\tau,\varphi_s)\, e^{\mathrm{j}k\tau\sin\theta\cos(\varphi-\varphi_s)}\tau\,\mathrm{d}\tau\,\mathrm{d}\varphi_s \quad (1)$$

式中 z 为辐射面上微分元面的径向坐标; φ_s 为辐射面上微分元面的坐标向量 $\vec{Z}$ 与 X 轴的夹角; $v(z,\varphi)$ 为振速分布函数。

若辐射面为圆面, 且法向振速是中心对称的, 即

$$v(\tau,\varphi)=v(\tau) \quad (2)$$

则(1)式可化简为:

$$P(r,\theta)=\mathrm{j}\frac{k\rho c e^{-\mathrm{j}kr}}{2\pi r}\int_0^{a} v(\tau)\int_0^{2\pi} e^{\mathrm{j}k\tau\sin\theta\cos(\varphi-\varphi_s)}\,d\varphi_s\tau d\tau$$

$$=\mathrm{j}\frac{k\rho c e^{-\mathrm{j}kr}}{r}\int_0^{a} v(\tau)\,J_0(k\tau\sin\theta)\,\tau\,\mathrm{d}\tau \quad (3)$$

沿轴向(即辐射面的法线方向), $\theta=0$, 代入上式, 则得到轴向声压为:

$$P(r,0)=\mathrm{j}\frac{k\rho c e^{-\mathrm{j}kr}}{r}\int_0^{a} v(\tau)\,\tau\,\mathrm{d}\tau \quad (4)$$

由辐射器表面位移分布[2]可求出振速分布:

$$v(\tau)=C_1J_0(\gamma\tau)+C_2I_0(\gamma\tau) \quad (5)$$

式中 C_1、C_2 为待定系数, 则

$$P(r,0)=\mathrm{j}\frac{k\rho c e^{-\mathrm{j}kr}}{r}\int_0^{a}[C_1J_0(\gamma\tau)+C_2I_0(\gamma\tau)]\,\tau\,\mathrm{d}\tau \quad (6)$$

令 $\tau=a$, 并将 $\gamma a=\mu$ 代入(6)式, 则

$$P(r,0)=\mathrm{j}\frac{k\rho c e^{-\mathrm{j}kr}}{r}\frac{a}{\gamma}[C_1J_1(\mu)+C_2I_1(\mu)] \quad (7)$$

由边界条件得[2]: $C_1J_1(\mu)+C_2I_1(\mu)=0$

则 $P(r,0)=0$, 即轴向声压恒为零。

2.2 阻抗变换板

为使多波节弯曲振动换能器辐射声场轴向声压不为零, 同时还要改善振动板与空气媒质的阻抗匹配, 我们采用穿孔板, 同时进行相位和阻抗变换, 一举两得。

在波节圆的两侧, 平板表面各振动质点的振动相位是相反的。如果在振动板上加一块穿孔板, 使穿孔板上的孔和振动板上相位相同的部分相对应, 这部分振动时向外辐射声波, 而与其相位相反的部分则对应未穿孔部位, 无法向外辐射声波, 也就不会存在声波的相消干涉。这就是相位变换, 见图 1, 箭头指出声波辐射的位置和方向(同相辐射)。穿孔处辐射声波且能起阻抗变换作用。

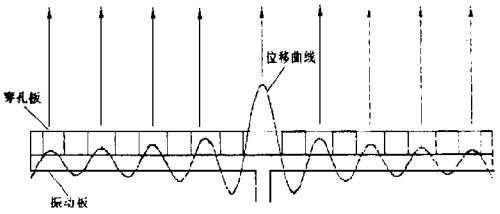


图 1 加穿孔板声波辐射示意图

(1) 力阻抗变换分析

文献[3]中叙述了一种厚度接近 $\lambda/4$ 波长的阻抗变换板, 我们则从另外角度分析薄穿孔板(小于 $\lambda/4$)的阻抗变换机理。

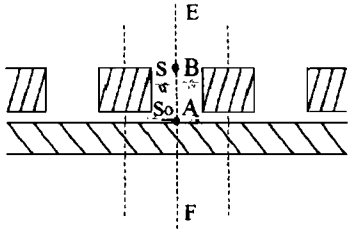


图 2 穿孔板阻抗变换分析

图 2 中, 设孔的横截面积为 S, 在相邻穿孔间作与穿孔板相垂直的中心线 E 和 F, 对于每个穿孔可得一个对应的截面, 其面积为 S_0, 因孔的深度远小于波长, 可认为穿孔内各点的声压都相同并等于 p, 设振动板表面 A 处的振速为 u_0, 力为 F_0, 力阻抗为 Z_0, 孔口 B 处的振速为 u, 力为 F, 力阻抗为 Z, 则[4]:

$$\frac{Z_0}{Z}=\frac{F_0/u_0}{F/u}=\frac{pS_0/u_0}{pS/u}=\frac{S_0u}{Su_0} \quad (8)$$

将体积流速连续条件 $Su=S_0u_0$ 代入(8)式得:

$$\frac{Z_0}{Z}=\left(\frac{S_0}{S}\right)^2 \quad (9)$$

穿孔板有 n 个孔, 相当于并联, 加穿孔板后总的力阻抗为 $Z_{总}=Z/n$, 振动板表面总的力阻抗 $Z_{0总}=nZ_0$, $\frac{Z_{0总}}{Z_{总}}=\frac{n^2Z_0}{Z}=\left(\frac{nS_0}{S}\right)^2$。由此可见, 穿孔板的力阻抗变换比 $Z_{0总}/Z_{总}$ 与面

积比S_0/S 的n 倍的平方成正比。改变S_0/S，可改变$Z_{0总}/Z_{总}$ 的值。S 越小，$Z_{总}$ 越小。

(2) 均匀圆弧基阵互辐射阻抗[1]

上节讨论了穿孔板力阻抗的变换，本节再从基阵的角度讨论穿孔板辐射阻抗的变换，即均匀圆弧基阵互辐射阻抗理论。

所谓均匀圆弧基阵，是指由 n 个声源均匀排列在同一圆弧(或圆周)上所形成的基阵。穿孔板在数个不同半径圆周上开等间距等孔径圆孔后，即形成数个均匀圆弧基阵，每个圆孔看作活塞辐射源。

根据线性声学叠加原理，媒质中任一点声压等于所有声源各自辐射声场声压代数总和。声源因受其它声源辐射声场的作用力，为保持其振源强度一定，其机械系统的推动力就必然有所变化，表明辐射器总辐射阻抗发生变化。由于其它声源作用而引起变化的部分，即总辐射阻抗中除去自辐射阻抗以外的部分就是互辐射阻抗。1 号源总辐射阻抗为：

$$Z = Z_{11} + \sum_{s=2}^{n} Z_{1s} \qquad (10)$$

Z_{11}为 1 号源的自辐射阻抗；Z_{1s}为 s 号源对 1 号源的互辐射阻抗，简称阻抗。

假设任意源对 1 号源的互辐射阻抗都相等，并记为 Z_{12}，则

$$\begin{aligned} Z_1 &= Z_{11} + (n-1)Z_{1s} \\ &= Z_{11} + (n-1)Z_{12} \end{aligned} \qquad (11)$$

因辐射抗对能量辐射无贡献，只起能量存贮作用，故我们只讨论辐射阻。上式可写为：

$$R_1 = R_{11} + (n-1)R_{12} \qquad (12)$$

式中：R_1：源 1 的总辐射阻；R_{11}：源 1 的自辐射阻；R_{12}：其他源对源 1 的互辐射阻。

两平面活塞辐射器($ka_1 \ll 1$，$ka_2 \ll 1$，a_1，a_2 为活塞辐射器半径，中心间距为 d) 的自辐射阻R_{11}、互辐射阻 R_{12}分别为[1]：

$$R_{11} = \frac{\rho c (ka_1)^2}{2}\pi a_1^2 \qquad (13)$$

$$R_{12} = \frac{\rho c (ka_2)^2}{2}\pi a_1^2 \frac{\sin kd}{kd} \qquad (14)$$

两活塞辐射器半径相等时，即 $a_1 = a_2 = a$，则

$$\begin{aligned} R_1 &= R_{11} + (n-1)R_{12} \\ &= \frac{\rho c (ka)^2}{2}\pi a^2 \left[1 + (n-1)\frac{\sin kd}{kd}\right] \end{aligned} \qquad (15)$$

其他源的总辐射阻也可用类似的式子表示。

所有 n 个小孔活塞辐射阵元都作等幅同相振动，并接在一起，则此阵的总辐射阻为：

$$R_{Ar} = nR_1 \qquad (16)$$

弯曲板未加穿孔板时，可看作活塞辐射，并且 $ka_0 \gg 1$(a_0 为板的半径)，则辐射阻表示为：

$$R_0 = \rho c S_0 [5] \qquad (17)$$

S_0 为板的面积。

基阵总辐射阻R_{Ar}与 R_0 的关系为：

$$\frac{R_{Ar}}{R_0} = \frac{n\left[1 + (n-1)\frac{\sin kd}{kd}\right]}{2}\frac{S}{S_0}(ka)^2 \qquad (18)$$

定义穿孔板穿孔率 σ_n 为：

$$\sigma_n = n\frac{S}{S_0} \qquad (19)$$

S：单个孔面积　S_0：穿孔板总面积

n：孔的个数，则

$$\frac{R_{Ar}}{R_0} = \frac{\sigma_n}{2}\left[1 + (n-1)\frac{\sin kd}{kd}\right](ka^2) \qquad (20)$$

当 $kd \ll 1$ 时。

$$\frac{R_{Ar}}{R_0} = \frac{n\sigma_n}{2}(ka)^2 \qquad (21)$$

故只要适当选择孔径及其个数，加穿孔板后的辐射阻将远大于未加穿孔板的辐射阻。

综上所述，从力阻抗变换分析，加穿孔板后孔口的力阻抗小于振动板表面的力阻抗；从基阵互阻抗变换分析，加穿孔板后媒质的辐射阻抗大于未加穿孔板的辐射阻抗。所以，加穿孔板后既降低了振源的力阻抗，又提高了媒质的辐射阻抗。结合实验可适当选择穿孔板穿孔的孔径、孔间距等参数，以使孔口的力阻抗与空气媒质的辐射阻抗达到最佳匹配。对于我们使用的振动板(频率为 13kHz，半径为 150mm)，选择了两组较佳的穿孔板(半径为 150mm，厚度为 1.5mm)，参数如下：孔半径 $a = 4.5$mm，孔间距 $d = 14$mm，孔个数 $n = 143$；孔半径 $a = 2.5$mm，孔间距 $d = 10$mm，孔个数 $n = 286$。



图 3　换能器系统的照片

3　测试及应用

整个换能器系统的照片如图 3 所示。对换能器的指向性图进行了测试,测得其指向性角为±5°;对其进行了高温老化实验(仅实验到高温 90℃);我们还对其灵敏度及盲区等进行了测量。实验证明我们研制的带穿孔板的换能器,可用于高温环境下测量料位,与采用将金属圆板加工成阶梯状进行相位补偿的换能器相比较,大大减小了金属圆板机械加工的困难;与采用泡沫塑料补偿相位的换能器比较,它的机械性能稳定、可靠,维修方便。并将其应用到超声料位仪上,已获得了令人满意的效果。

参考文献

1 何祚镛,赵玉芳. 声学理论基础. 国防工业出版社, 1981

2 张串. 多波节复合超声弯曲换能器的理论与实验研究. 同济大学硕士学位论文, 1996

3 赵松龄,袁益镛. 一种压电换能器辐射阻抗变换器,声学学报, 1985; 10(6)

4 冯秉铨. 电声学基础. 高等教育出版社

5 杜功焕等. 声学基础. 上海科技出版社

简　　讯

电子学家水声工程专家朱物华院士逝世

我国第一代电子学家、水声工程专家、上海交通大学前校长、上海市电子学会前理事长朱物华院士,因病医治无效,于 1998 年 3 月 12 日在上海逝世,享年 96 岁。

朱物华院士从事高等教育和科研事业达 70 年之久,他治学严谨诲人不倦,重视基础理论和实验研究,为我国培养了一大批科学技术人才。他的逝世是我国科技界、教育界的重大损失,他的精神和风范将永远感召一代又一代后人。

1998 年 3 月 28 日下午,国家和上海市的有关党政领导及科技界、教育界两院院士、生前友好及学生代表共千余人,怀着沉痛的心情送别了一代宗师。

本刊讯