维普资讯 http://www.cqvip.com

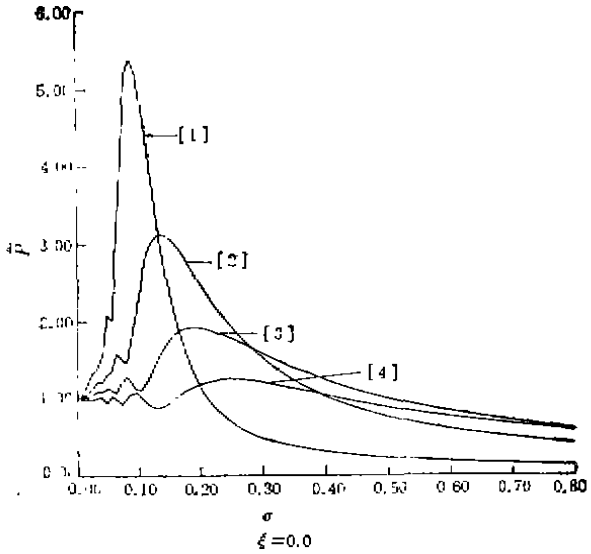


图 7　不同几何焦距时声场的轴向分布
曲线[1] $\sigma_R = 0.1$；　[2] $\sigma_R = 0.2$；
[3] $\sigma_R = 0.5$；　[4] $\sigma_R = \infty$.

四、结　论

上述研究表明，对于聚焦活塞声场的描述应用高斯型声场叠加的方法得到的结果与用数值积分直接计算的结果符合得很好，尤其是在近轴的情况下，而在偏轴较远时有一定误差。也就是说，在能量较集中的区域内，误差是很小的。由于聚焦换能器及其声场在超声应用技术中正在广泛应用着，因而用一种解析方法提供对此类聚焦声场的描述，有利于更简捷地提供关于聚焦声场的信息，应该是极有意义的。

参　考　文　献

[1] Aanonsen S. I., Barkve T., Tjøtta J. N. and Tjøtta S., *J. Acoust. Soc. Am.*, **75**(1984), 749—768.

[2] Du G. and Breazeale M.A., *J. Acoust. Soc. Am.*, **78**(1985), 2083—2086.

[3] Du G. and Breazeale M.A., *J. Acoust. Soc. Am.*, **81**(1987), 51—57.

[4] Lucas B. G. and Muir T. G., *J. Acoust. Soc. Am.*, **74**(1982), 1289—1296.

[5] 杜功焕，应用声学，7-3(1988)，1—5.

[6] Wen J. J. and Beazeale M. A., *J. Acoust. Soc. Am.*, **83-5**(1988), 1752—1756.

[7] Greenspan M., *J. Acoust. Soc. Am.*, **65**(1979), 608—621.

[8] Wu J. and Du G., *J. Acoust. Soc. Am.*, **87-3**(1990), 997—1003.

用声强技术测量结构的声辐射效率

任明章　唐振茹　顾崇衍

（西安交通大学机械系）

1990 年 2 月 17 日收到

声辐射率是反映结构声辐射能力的一个重要指标，本文介绍了用声强技术测量声辐射率的方法，该方法与传统方法相比，不但可以得到局部结构的声辐射率，而且具有省时、省力、省设备等优点。

一、前　言

在噪声控制工程中，为了衡量结构的声辐射能力，往往需要知道其声辐射率。声辐射率的定义为[1]：

$$\sigma_{rad} = \frac{W_{rad}}{\rho c S \langle V^2(\omega) \rangle} \qquad (1)$$

其中 W_{rad}：结构辐射的声功率；ρc：空气的特性阻抗；S：结构振动表面积；$\langle V^2(\omega) \rangle$：结构表面振速方值的时空平均。

对于简单结构，σ_{rad} 可从理论计算得到，但对较复杂的结构，计算很困难，一般要通过测量得到。传统的测量方法是用声压法测量的，它有两个缺点：一是用声压法测量声功率，要在声源的远场进行，这样测得的声功率是整个机器辐射的声功率，求得的声辐射率是整个结构的平均值。如果想得到局部结构（如某侧壁）的声

维普资讯 http://www.cqvip.com

辐射率，就要用铅包法覆盖住其余部分，很繁复且不可靠。二是对一般的实验条件来说，都是先测完声功率，再测振动速度，工作量大，且声源状态在两次测量中稍有变化就会影响实验结果。

本文把声强技术引入到声辐射率的测量中，从而克服了上述的两个缺点。首先，用声强法测量声功率能排除相邻声源的干扰而测量出结构某一表面的声功率，即可得到该表面的声辐射率。此外，利用声强仪测得两通道声压的自谱和互谱，作后处理，可以得到表面的振动速度[2]，这样，在测声的同时，也测得了振速，使效率大为提高。

二、声强法近场测量声功率

声强技术是以测量声功率为直接目的而出现的。它最主要的优点是声强具有方向性，用声强法测量声功率可以有效地抑制其它稳态声源或背景声的干扰，可在现场测量。其次，声强测量可在近场进行[3]，这不仅为鉴别噪声源提供了方便，而且为测量局部结构的辐射声功率开辟了道路。

用声强法在近场测量声功率应注意下面两个问题：

① 近声场极不规则，波阵面不像在自由场下那么简单，某些点上测得的声强可能为负值（往往在低频）。这是由于在低频某些特定的振动模态下，振动表面近场上有些点表现为向外辐射声的“源”，有些点表现为吸收声能的“汇”[4]。这就要求测点要均布，且要足够的多，以使负声强被平均掉而得到的声功率为正值。

② 在近场测量声强，一般具有较高的信噪比，来自其它振动表面或相邻声源的非相关或弱相关噪声对测量的影响不会很大[3]。但是，如果干扰声太强，则对测量会造成较大影响，尤其是在低频。为了衡量干扰程度，可测量声场“反应因子”L_K，其定义为[5]：

$$L_K = L_P - L_I \ (\mathrm{dB}) \qquad (2)$$

式中：L_P——声压级；L_I——声强级。

一般认为，当 $L_K > 10\mathrm{dB}$ 时，表明干扰较大，就应怀疑测量的可靠性。

三、双传声器测振技术

在固体与流体的界面上，法向速度是连续的。对于振动结构而言，其上空气质点的速度等于表面的振动速度。当靠近结构表面测量时，可用质点振动速度来近似结构的振动速度。这就是双传声器测振技术的基本思想。

声波在理想介质中传播时，有运动方程：

$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} = -\frac{\partial p}{\partial r} \qquad (3)$$

引入双传声器技术，在频域内测量的质点速度功率谱的表达式为[6]

$$G_{uu}(\omega) = \frac{1}{(\omega\rho\Delta r)^2} \times [G_{22}(\omega) + G_{11}(\omega) - 2R_e(G_{12}(\omega))] \qquad (4)$$

其中：G_{uu}：质点速度自功率谱；G_{11}、G_{22}：两传声器各自的声压自功率谱；G_{12}：两传声器声压信号之间的互功率谱；Δr：两传声器间间隔体的长度；ρ：空气密度；R_e：表示取实部。根据（4）式，只要测得两个传声器的自谱及互谱，就可求出质点的振动速度，进而用于估测结构表面的振动速度。

这种测振方法是非接触的，适用于一些不便或不能用加速度计进行接触测量的场合，并且避免了加速度计测振的附加质量问题和频响范围随安装条件而变的问题。更重要的是，一次测量可同时得到声音和振动信息，使工作效率大为提高。

四、测量声辐射效率的实验

本文利用 BK2032 双通道信号分析仪与 HP9826 微机的联机测量系统做了声强法测量声辐射效率的实验，实验对象是一焊接箱体。图 1 所示为实验装置。从箱内激振矩形箱盖（尺寸 440mm × 340mm × 10mm），激振信号

维普资讯 http://www.cqvip.com

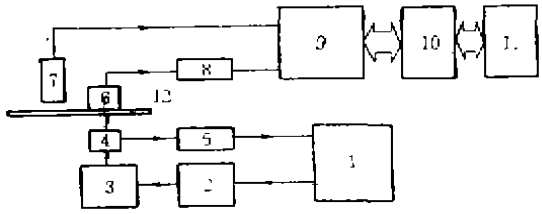


图.1 实验装置简图

1.信号发生器 BK1027 2.功放 BK2706, 3.激振器 BK4809 4.力传感器 5.电荷放大器 BK2626, .6.加速度计 7.声强探头 BK3519 8.电荷放大器 BK2635 9.分析仪 BK2032 10.微机 HP9826 11.打印机 HP2671 12.箱盖

为 2Hz—20kHz 的白噪声。把箱盖划分为 5 行 7 列共 35 个单元，每个单元对应一个测点。测点离开表面约 35 mm。用声强探头逐点测量，得到每个点上的声强 I_i 和振速功率谱 G^i_{uu}，代入(1)式可求得声辐射率为：

$$\sigma_{rad}=\frac{\sum_{i=1}^{35} I_i}{\rho c\sum_{i=1}^{35} G^i_{uu}} \qquad (5)$$

如果声强值和振速值均以 1/3 倍频程表示，则得到以 1/3 倍频程表示的声辐射效率。

为了检验双传声器测振技术的可靠性，首先作了用声强探头测振和用加速度计拾振的对比实验。图 2 为用两种方法测量箱盖中央一点振动的实验结果。图中标 2MM 的曲线是减去 20dB 后画上的。可见，两条曲线有良好的一致

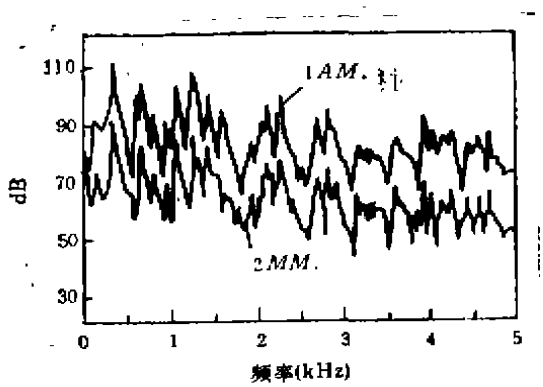


图 2 两种测振方法的比较

1AM——用加速度计测量 2MM——用声强探头测量

性。但在低频(<100Hz)，声强探头测得的结果变大，这是由于此时结构的声辐射很弱，而仪器的噪声响应(直流干扰)较大的原故。

为了对比，测量声辐射效率也用两种方法。一种是用声强探头测声测振一次完成；一种是先用声强探头测声，再用加速度计逐点拾振。同时，还根据[1]中第 295 页介绍的方法，给出了声辐射效率的理论计算值。

图 3 为用声强探头测振而得到的声辐射效率曲线；图 4 为用加速度计测振而得到的声辐射效率曲线。

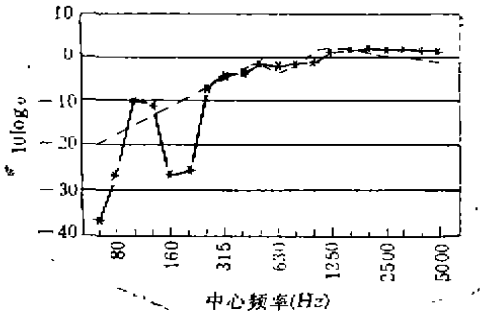


图 3 用声强探头测振得到的声辐射效率

*—*测量值 ---理论值

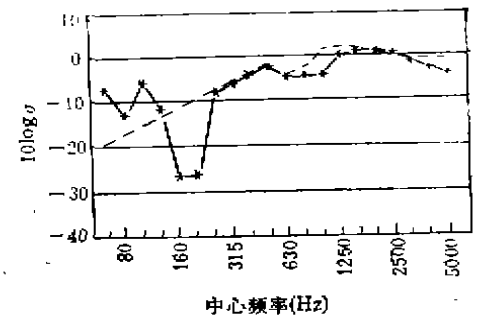


图 4 用加速度计测振得到的声辐射效率

*—*测量值 ---理论值

由图可见，两种测量方法及理论计算值均有较好的一致性。在 160Hz 与 200Hz 两个频段上，测量值出现两个不正常的低谷。由于两种测量方法都出现这种情况，估计是由于声功率测量不可靠。为此，测量声场反应因子 L_K，绘于图 5 中。可见在 160Hz 和 200Hz 两个频段上，$L_K > 10$dB。说明测量结果受到强烈干

维普资讯 http://www.cqvip.com

扰．由于实验在半消声室中进行，再无别的声源，干扰声只能来自箱体四个侧壁的声辐射。图6为用三维图表示的箱盖辐射的声强分布(中心频率为200Hz的1/3倍频程段)．图6(*a*)表示正声强分布(向外)，图6(*b*)表示负声强分布(指向箱盖)．可见，四个侧壁的辐射声通过绕射作用使得箱盖四边上的声强为负，使测到的声功率变小，从而在声辐射曲线上出现两个低谷。

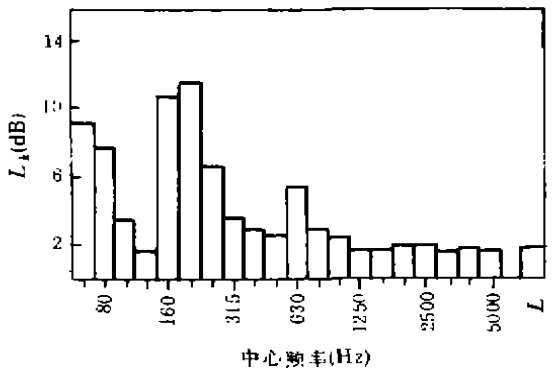
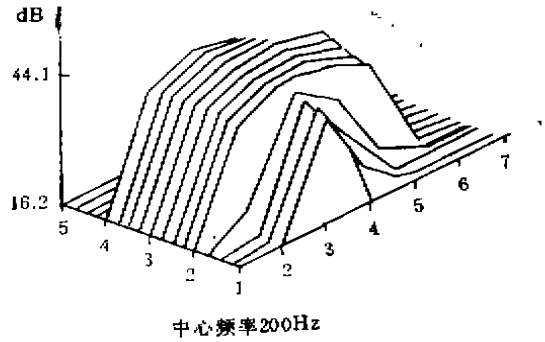
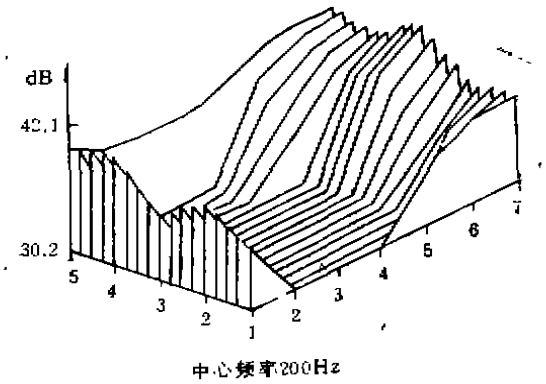


图5　声场反应因子 L_K



(a) 正声强分布



(b) 负声强分布

图6　200Hz 频段上箱盖辐射声强分布

综上所述，用声强探头同时测振与声从而求得声辐射率的方法是可行的。但在低频，一由于声强测量抗干扰能力变差，二由于振速测量失真(偏大)，从而导致较大的误差，这应引起注意。

结　束　语

基于声强近场测量和双传声器测振技术，本文介绍的测量声辐射效率的方法是可行的。该方法有两大优点：一是可以得到局部结构的声辐射率；二是声音和振动信号同时测量，不但节省了振动测量设备和时间，而且不受机器状态改变的影响，有利于测量精度的提高。

需要说明的是在低频，由于声强测量受到的干扰可能较大及双传声器测振技术的失真，使得结果不理想。这在实际测量中要注意加以分析。通过测量声场反应因子，可以帮助作出正确的判断。

参　考　文　献

[1] Beranek L. L., Noise and Vibration Control, McGraw-Hill Book Co., 1971.
[2] Forssen B., Crocker M. J., *J. Acoust. Soc. Am.*, 73-3(1983), 1047—1053.
[3] 任明章等，强度与环境，5，1989，12—16。
[4] Skudrzyk E., The Foundations of Acoustics, Springer-Verlag, 1971, 319—325.
[5] Gade S., Proceedings of Inter-Noise'84, 1077—1082.
[6] Fahy F. J., "Measurement of acoustic intensity using the cross-spectral density of two microphone signals". *J. Acoust. Soc. Am.*, 62(5), 1977, 1057—1059.