

声 强 测 量

李 沛 滋

(中国科学院声学研究所)

声压和声强是声场的两个重要基本量, 后者的测量在最近几年来才逐步解决。声压的测量已有一百年的历史, 声强的值由测得的声压值按理论关系推算, 但是这种理论关系只在少数的简单情况中存在, 因此在大多数的情况下, 声强的值是无法求得的。

声压为标量, 声强为矢量。在声场中某点, 某一方向上的声强, 即为单位时间通过垂直于该方向的单位面积上的声能量:

$$I_l = pu_l, \quad (1)$$

式中 p 为声压, u_l 为在 l 方向上的声质点速度。线性化的动量方程为

$$\rho \frac{\partial u_l}{\partial t} = -\frac{\partial p}{\partial l}, \quad (2)$$

式中 ρ 为媒质的平衡密度, 由(2)式得

$$u_l = -\frac{1}{\rho} \int \frac{\partial p}{\partial l} dt. \quad (3)$$

将(3)式代入(1)式, 有

$$I_l = -\frac{p}{\rho} \int \frac{\partial p}{\partial l} dt. \quad (4)$$

声强的时间平均值为

$$\begin{aligned} \bar{I}_l &= -\frac{1}{\rho} \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} \left[p \int \frac{\partial p}{\partial l} dt \right] dt \\ &= -\frac{1}{\rho} E \left\{ p \int \frac{\partial p}{\partial l} dt \right\}, \quad (5) \end{aligned}$$

式中符号 $E\{ \}$ 为宗量的时间平均。测量声强, 当前主要用双传声器法, 即使用两个相距很近的传声器同时测量两点的声压。将这两个声压求平均及差分, 以近似为这两个传声器测点连线的中点的声压及声质点速度。因此, 声强的测量值为

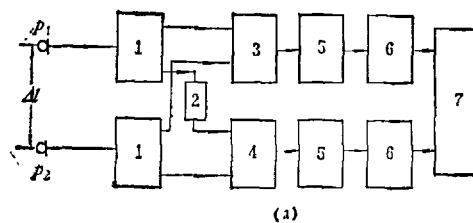
$$\hat{I}_l = \frac{1}{2\rho\Delta l} E \left\{ (p_1 + p_2) \int (p_1 - p_2) dt \right\}. \quad (6)$$

(6)式是(5)式的近似式, 式中 Δl 为两个传声器测点之间的距离, 声强的方向为由第一个传声器到第二个传声器的方向。完成(6)式的运算主要有两种方法: 和差法及互谱法。前者可以丹麦 B&K 公司 1981 年出售的声强分析系统 3360 为例; 后者由英国 F. J. Fahy 于 1977 年提出, 可使用双通道快速傅里叶分析系统计算, 无需专门分析设备。

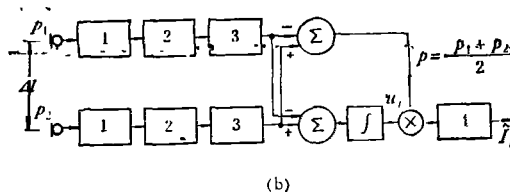
一、声强测量基础

1. 和差法

声强计算按(6)式进行, 有模拟式及数字式两种。图 1(a) 是陈继康于 1981 年研制的模拟式声强计的方框图, 图 1(b) 是 B&K 3360 数字式声强计的方框图。前者, 将信号处理后所得



(a) 模拟式: 1.前置放大, 2.倒相, 3.求和, 4.差值积分 5.计权, 6.功放, 7.瓦特表



(b) 数字式: 1.前置放大, 2.模数转换, 3.1/3倍频数字滤波, 4.时间平均

图 1 和差法求声强的方框图

到的声压和声质点速度信号送给瓦特计指示两者的乘积,即声强。后者为精密设备,价值昂贵。

2. 互谱法

声场中声压为空间位置 x 及时间 t 的函数,可表示为 $p(x, t)$ 。设

$$Z(x, t) = \int p(x, t) dt. \quad (7)$$

将(6)式展开,并加时间延迟,有

$$\begin{aligned} (\hat{I})_{x_1, x_2}(\tau) = & \frac{1}{2\rho\Delta l} E\{p(x_1, t)z(x_1, t + \tau) \\ & - p(x_1, t)z(x_2, t + \tau) \\ & + p(x_2, t)z(x_1, t + \tau) \\ & - p(x_2, t)z(x_2, t + \tau)\}. \quad (8) \end{aligned}$$

互相关函数的定义为

$$R_{x_1, x_2}(\tau) = E\{f(x_1, t)g(x_2, t + \tau)\}, \quad (9)$$

其傅里叶变换为互谱密度:

$$S_{x_1, x_2}(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} R_{x_1, x_2}(\tau) e^{-i\omega\tau} d\tau; \quad (10)$$

逆变换为互相关函数本身:

$$R_{x_1, x_2}(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} S_{x_1, x_2}(\omega) e^{i\omega\tau} d\omega.$$

若令(9)式中的 $g(x_2, t + \tau) = f(x_1, t + \tau)$, 则 $R_{x_1, x_1}(\tau)$ 为自相关函数, (10)式中的 $S_{x_1, x_1}(\omega)$ 则为自谱密度。将(8)式作傅里叶变换,考虑到(7)式,得声强谱的实部和虚部分别为

$$\hat{I}_l(\omega) = \frac{1}{\rho\omega\Delta l} I_m[S_{x_2, x_1}(\omega)] \quad (11)$$

及

$$\hat{Q}_l(\omega) = \frac{1}{2\rho\omega\Delta l} [S_{x_2, x_2}(\omega) - S_{x_1, x_1}(\omega)], \quad (12)$$

式中 $S_{x_2, x_1}(\omega)$ 为两测点声压信号的互谱, 而 $S_{x_1, x_1}(\omega)$ 和 $S_{x_2, x_2}(\omega)$ 为在 x_1 和 x_2 测点声压信号的自谱。声强的实部, 为辐射声能的部分, 而虚部为不辐射的部分。

用互谱法测量声强, 只需将两点的声压信号送入双通道快速傅里叶分析器求互谱的虚部。

二、声强测量的局限

声压测量技术和设备已发展得相当成熟, 其灵敏度、频响及动态范围等均易满足实用要求, 声强测量的局限主要在有限差的误差、扩散声场的影响及统计无规误差。这些误差在和差法及互谱法中都同样存在。

1. 有限差误差

任何声源都可看作点声源的组合, 任何时间函数(除少数极特殊的情况)都可以看作简谐函数的合成。讨论误差时以简谐点声源为例。

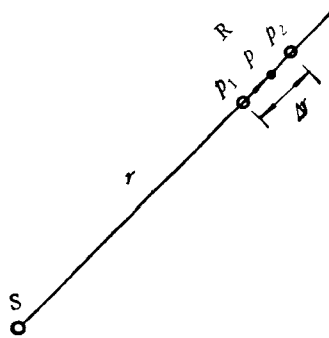


图2 点声源声强测量

S——声源 R——声强测点

如图2所示, 两声压的测点取在沿点声源的径向上, 因此所测得的声强是它们的连线中点的声强, 方向在径向, 以点声源 S 为坐标原点, 略去时间因子 $e^{-i\omega t}$, 在自由声场中, 声压的表示式为

$$p(r, t) = \frac{A}{r} e^{ikr}, \quad (13)$$

式中 k 为声波波数, kr 为空间位相; $k = \omega/c$, $\omega = 2\pi f$, f 及 c 分别为声波的频率和位相速度。

$$\begin{aligned} u_r(r, t) &= \frac{1}{i\rho\omega} \frac{\partial p}{\partial r} \\ &= \frac{1}{\rho c} \frac{A}{r} \left(1 + i \frac{1}{kr}\right) e^{ikr}, \end{aligned}$$

为在 r 方向上的声质点速度。声强的实部及虚部分别为

$$\bar{I}_r = \frac{1}{2} \operatorname{Re} \{ p u_r^* \} = \frac{1}{\rho c} p_{rms}^2 \quad (14)$$

及

$$\begin{aligned} \bar{Q}_r &= \frac{1}{2} \operatorname{Im} \{ p u_r^* \} \\ &= \frac{1}{\rho c} \frac{1}{k r} p_{rms}^2, \end{aligned}$$

式中 $p_{rms}^2 = A^2 / (2r^2)$ 。 \bar{Q}_r 为不辐射的能量，为声源的近场，随 r 的增加很快衰减。测量声强的虚部可得到声源位置的信息。将(14)式除以 I_0 ，取对数，再乘以 10，便得声强级 L_{i_r} ，在同一点上，声强级与声压级的差值为

$$L_{i_r} - L_p = 10 \log \left(\frac{P_0}{I_0 \rho c} \right) = 0, \quad (15)$$

式中 P_0 及 I_0 分别为声压及声强的参考值，为 $20 \mu\text{Pa}$ 和 10^{-12}W/m^2 ，取 $\rho c = 400$ 。因此，在自由场中，径向的声强级与声压级相等。在有扩散场存在时，这种关系不成立。常用

$$K = \frac{\left(\frac{1}{\rho c} \right) p_{rms}^2}{\bar{I}_r} \quad (16)$$

或

$$L_K = -10 \log K = L_{i_r} - L_p, \quad (17)$$

作为声场“抗性”的量度。

测量声强时，用两点声压计算声强，设这两个声压分别为

$$p(r_1) = \frac{A}{r_1} e^{i k r_1}$$

及

$$p(r_2) = \frac{A}{r_2} e^{i k r_2 \pm i \varphi}$$

(见图 2)，式中 φ 为两个信号通道（包括传声器）的位相差。将 $p(r_1)$ 及 $p(r_2)$ 代入(6)式，考虑 $r \approx \sqrt{r_1 r_2}$ 及 $\Delta r < r$ 的情况，测量得的声强级与真实的声强级的差值（即测量误差）的分贝数为

$$L_s = 10 \log \frac{\hat{I}_r}{\bar{I}_r} = 10 \log \left[\frac{\sin(k \Delta r \pm \varphi)}{k \Delta r} \right]. \quad (18)$$

B&K 公司的声强分析系统有 $\varphi < 0.3^\circ$ 。设 $\varphi = 0.3^\circ$ ，由(18)式可见，在高频测量时， $k \Delta r > \varphi$ ，有限差产生的误差是主要的；反之，在

物理

低频测量时，通道位相差产生的误差是主要的。图 3 显示在 $\varphi = 0.3^\circ$ 时，传声器在三个不同间距时的误差和频率的关系。由图可见，要在广泛的频率范围内作准确的测量，必须采用几种间距，分别在相应的频率范围内作测量。

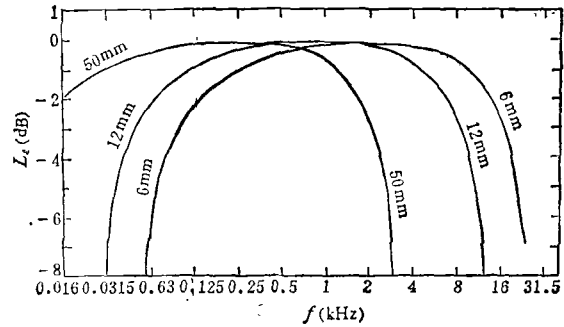


图 3 有限差及通道位相差所产生的误差和频率关系

2. 扩散声场及环境噪声的影响

设声场为点源自由场和其它声场的叠加，空间位相不再是 $k r$ ，设为更一般的形式 $\psi(\mathbf{r})$ 。不计时间因子 $e^{-i \omega t}$ 时的声压为

$$p(\mathbf{r}) = A(\mathbf{r}) e^{i \psi(\mathbf{r})}, \quad (19)$$

声强为

$$\begin{aligned} \bar{I}_r &= \operatorname{Re} \left\{ \frac{1}{2} \rho u_r^* \right\} = \frac{p_{rms}^2}{\rho c} \frac{\partial \psi(\mathbf{r})}{k \partial r} \\ &\approx \frac{p_{rms}^2}{\rho c} \frac{\psi}{k \Delta r} \end{aligned} \quad (20)$$

及

$$L_K = L_{i_r} - L_p \approx 10 \log \frac{\psi}{k \Delta r}, \quad (21)$$

式中 $\psi = \psi(\mathbf{r}_2) - \psi(\mathbf{r}_1)$ ， $\Delta r = r_2 - r_1$ 。对于点源自由场，有 $\frac{\partial \psi}{\partial r} = k$ ， $L_K = 0$ 。

声强的测量值为

$$\begin{aligned} \hat{I}_r &= \frac{p_{rms}^2}{\rho c} \frac{\sin(\psi \pm \varphi)}{k \Delta r} \\ &\approx \frac{p_{rms}^2}{\rho c} \frac{\psi \pm \varphi}{k \Delta r}. \end{aligned} \quad (22)$$

由(20)及(22)式得声强的测量误差为

$$L_s = 10 \log \frac{\hat{I}_r}{\bar{I}_r} = 10 \log \left(1 \pm \frac{\varphi}{\psi} \right). \quad (23)$$

校准声强计时，将两个传声器按间距 Δr 放在一个小腔内，由平板扬声器产生声场，如图

4 所示。腔中声场可以认为是均匀的，各处位相相同， $\phi = 0$ 。声强级及声压级的差值为

$$L_K' = L_{i_r} - L_{p_r} = 10 \log \frac{\varphi}{k\Delta r}, \quad (24)$$

由此差值及 $k = \omega/c$ ，就可以由上式计算声强计两个通道在所测频率的位相差。

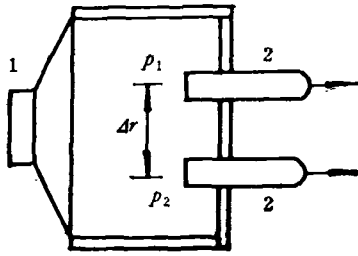


图4 声强计的校准

1. 平板扬声器； 2. 传声器

将由(21)及(24)式所得的 ϕ 及 φ 值代入(23)式得

$$L_s = 10 \log [1 \pm 10^{(L_K' - L_K)/20}]. \quad (25)$$

$|L_s| < 1$ 的条件为

$$L_K - L_K' = 10 \log \frac{\phi}{\varphi} > 7 \text{ dB}. \quad (26)$$

3. 统计无规误差

取置信度为 68%，声压测量的规一无规误差为

$$\varepsilon \approx \frac{1}{\sqrt{BT}}, \quad (27)$$

式中 B 为频带宽度， T 为平均时间。

声强测量的规一无规误差为

$$\varepsilon = \frac{1}{\sqrt{BT}} \sqrt{\frac{1}{r^2} + \frac{(1-r^2)}{2r^2} \text{ctg}^2 \phi}, \quad (28)$$

式中 r^2 表示两个声压信号的相干性， ϕ 为位相差，有

$$\begin{aligned} r^2 &= \frac{|G_{12}|^2}{G} \\ &\approx \frac{1}{K^2} \left\{ \left[\cos(k\Delta r) + (K-1) \frac{\sin(k\Delta r)}{k\Delta r} \right]^2 \right. \\ &\quad \left. + \sin^2(k\Delta r) \right\} \end{aligned} \quad (29)$$

及

$$\phi = \text{tg}^{-1} \left[\frac{\text{Im}(G_{12})}{\text{Re}(G_{12})} \right]$$

$$= \tan^{-1} \left[\frac{\sin(k\Delta r)}{\cos(k\Delta r) + (k-1) \frac{\sin(k\Delta r)}{k\Delta r}} \right], \quad (30)$$

式中 G_{12} 为两点声压的互谱， G 为自谱。图 5

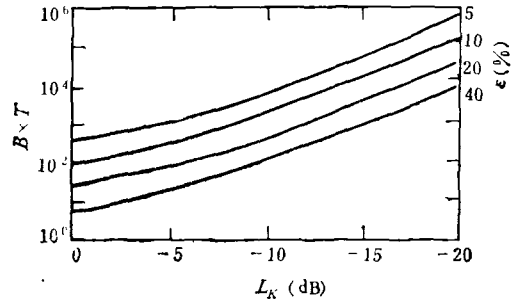


图5 置信度 68% 时声强测量的规一无规误差

($L_K = L_{i_r} - L_{p_r}$)

是按(28)式所计算的规一无规误差(置信度 68%)与声场的抗性 L_K 的关系。当 $L_K \rightarrow 0$ 时(即仅有自由场时)，声强测量的规一无规误差趋向声压测量的规一无规误差。当 $|L_K|$ 增加时，欲保持误差不变，则必须延长平均时间或放宽频带宽度。

声强测量的设备及技术较声压测量复杂，对两个传声器及两个通道的一致性要求严格，传声器要从多个精密传声器中挑选。可是，声强测量可以解决一些声压测量所不能解决的问题。

三、声强测量的应用

1. 声功率的测量

在自由场内测量声源的声功率，可在一设想的包围声源的封闭面上测多点声压，或在混响场内测多点声压，都可以计算声源的辐射声功率。在现场的情况，存在扩散场以及别的声源辐射或环境噪声的影响，声压和声强之间没有简单的关系，由声压测量折算声功率辐射就有困难。直接测量包围声源的假想封闭面上的声强，再由声强计算声功率，解决了在复杂现场测量声源声功率的困难，测量误差由(25)式

确定。

2. 结构的隔声测量

通常用声压测量决定结构的传声损失(TL)时,需要标准隔声测量室,包括一个特殊的声源室和一个接收室,被测试件装在两室隔墙的窗口上。两室中的声场均可看作是混响场,由两室多点测量的平均声压级计算试件的 TL。用声强法测量时,入射到试件上的声强 I_s 及在试件面透射的声强 I_t 都可直接用声强计测量。因此,

$$TL = 10 \log \left(\frac{I_s}{I_t} \right). \quad (33)$$

这时,声源室的作用仅为对试件产生声波的无规入射,对接收室没有任何要求,甚至可以不要接收室。由于直接测量试件面上的入射及透射声强,结果不受隔墙的窜声或其他固体声的窜入影响。声强法可以不拘条件能测量构件任何部份的隔声,如整个飞机机身各部分的传声损失,而不拆解机身。

3. 声源的鉴定

鉴定声源的一个方面实际就是测量声功率。在有若干声源同时存在时(如在一个车间内),可以用声强法测每个机器的辐射声功率。对一个机器,如汽轮发电机,可以对它的各部件作设想的封闭面,测各部件的声功率辐射。

近年来发展了测量表面声强的技术,可以测量声源,如机器的每一个面元的声辐射。用加速度计测面元的加速度,或用光纤换能器测面元的速度,用传声器在面元附近测声压,将声压及面元加速度或速度运算处理得单位面元辐射声强。

4. 开展声场特性的实验研究

(上接封三)

介). 应用物理[日], 55(1986) No. 3, 202—209. 参 55.

86-293. 量子阱结构的光学性质的电场感生变化及其在光学器件中的应用。(山西正道). 应用物理[日], 55(1986), No. 3, 210—218. 参 59.

用两点声压经双通道傅里叶分析器计算互谱和自谱,除了可得声强的辐射部分和不辐射部分外,还可得声场的位能密度和动能密度,分别为

$$\hat{v}(\omega) = \frac{1}{16\rho c^2} \{S_{x_1x_1}(\omega) + S_{x_2x_2}(\omega) + 2\text{Re}[S_{x_1x_2}(\omega)]\} \quad (34)$$

及

$$\hat{t}(\omega) = \frac{1}{4\omega^2\rho(\Delta r)^2} \{S_{x_1x_1}(\omega) + S_{x_2x_2}(\omega) - 2\text{Re}[S_{x_1x_2}(\omega)]\}. \quad (35)$$

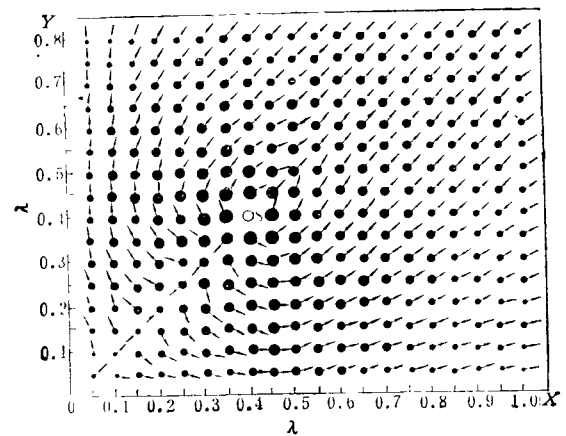


图6 四极子源在源的平面上第一象限内声强的分布
S——声源; 箭号为声强的方向; 圆点的直径表示相对声强级

图6是作者按理论绘制的一个四极子源在源的平面上第一象限内的能流。图中S为在第一象限内的点源,坐标以波长量度,箭号表示声强的方向,圆点半径表明相对声强级。这种声强分布图可以用声强计测量绘出。对复杂的源如机器的近场,则难以从理论计算,用声强计测绘的结果,对了解源的辐射特性和探讨噪声控制手段都有重要意义。

86-294. 辐照硬化的半导体器件的现状,(后川昭雄等). 应用物理[日], 55(1986), No. 3, 215—233. 参 51.

86-295. 利用金刚石砧胞产生兆巴高压及其压力的测量。(清水宏晏). 应用物理[日], 55(1986), No. 3, 234—237. 参 26. (李国栋)