Sound. 哈船院出版社，1990，2 99—301.
[2] Kay S. M. & Marple, S. L. *PROC. OF THE IEEE*, **69**-11 (1981), 1380—1417.
[3] 郑兆宁，向大威，水声信号被动检测与参数估计理论，科学出版社，1983，560—584.
[4] 惠伦著 A. D.，刘其培等译，噪声中信号的检测，科学出版社，1977，118—130.
[5] Panos P, et al., *TEXAS INST. CO.*, **1** (1990), 91—92, **3**(1990), 207.

傅氏声强测量中的声压算法

连小珉　刘起元　蒋孝煜
（清华大学汽车工程系　北京　100084）

（1993 年 10 月18日收到）

本文介绍傅氏声强测量中，用几何平均声压代替算术平均声压，可以减少计算工作量．并从理论上证明了两者之间的差异可以忽略，因此可以保证声压测量的精度．

Abstract

In the method of Fourier sound intensity measurement, the advantage of using geometric mean sound pressure instead of arithmetic mean, i.e., reduction in the amount of computation, is illustrated. The difference between them is proven theoretically to be negligible, and therefore the accuracy of measurement can be ensured.

一、双传声器上声信号的谱分析

当采用双传声器法进行声强测量时，需要使用如图 1 所示的声强探头．

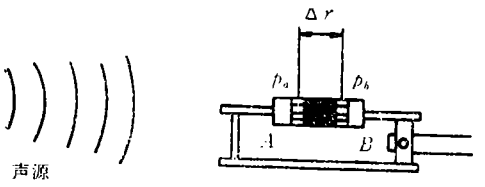

图 1　双传声器声强探头

利用 FFT（快速傅利叶变换）算法，可求得声强探头上双传声器（见图 1）接受到的两个声压信号的互谱和两个自谱，如式（1）、（2）、（3）．

$$G_{ab}(f) = P_a(f)P_b(f)e^{-j\Delta\theta(f)} \quad (1)$$

$$G_a(f) = P_a^2(f) \quad (2)$$

$$G_b(f) = P_b^2(f) \quad (3)$$

其中

$G_{ab}(f)$：声压 $p_a(t)$、$p_b(t)$ 间的互谱，$G_a(f)$：声压 $p_a(t)$ 的自谱，$G_b(f)$：声压 $p_b(t)$ 的自谱，$P_a(f)$：A 通道声压傅氏变换的模（N/m²），$P_b(f)$：B 通道声压傅氏变换的模（N/m²），

$$\Delta\theta(f) = \theta_a(f) - \theta_b(f)$$

$\theta_a(f)$：A 通道声压的相位角，$\theta_b(f)$：B 通道声压的相位角．

二、富氏声强

声强即通过空间某单位面积的声功率，当采用双传声器法进行声强测量时，可由双传声器声压互谱的虚部算出声强（见式(4)）．

$$L_I(f) = 10\log\frac{-\mathrm{Im}[G_{ab}(f)]}{2\pi f\rho(\Delta r)I_0} \quad (4)$$

其中：

$L_I(f)$：声强级谱（dB），Im[ ]：取复数

?1994-2017 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

的虚部，f:频率（Hz），ρ:空气密度（kg/m³），Δr：双传声器间距（m），I_0：基准声强（10^{-12} w/m²）

将式(1)代入式(4)有:

$$L_I(f) = 10\log\frac{P_a(f)P_b(f)\sin[\Delta\theta(f)]}{2\pi f\rho(\Delta r)I_0} \tag{5}$$

由于声压 $p_a(t)$、$p_b(t)$ 间的互谱 $G_{ab}(f)$ 采用 FFT（快速傅利叶变换）求得，我们称由式(4)或式(5)计算得到的声强为傅氏声强，而基于式(4)或式(5)计算的声强测量为傅氏声强测量.

三、算术平均声压及其存在的问题

在进行声强测量的同时，需进行声压的计算，通常，由两自谱的算术平均值得到平均声压(见式(6)).

$$\bar{P}_a(f) = \frac{P_a(f) + P_b(f)}{2} \tag{6}$$

$$L_P(f) = 10\log\frac{[P_a(f) + P_b(f)]^2}{4P_0^2} \tag{7}$$

其中:

$\bar{P}_a(f)$：算术平均声压（N/m²），$L_P(f)$:声压级谱（dB），P_0：基准声压(2×10^{-12}N/m²)

据此，进一步算出衡量声强测量误差的一个重要量——声场反应指数(见式(8)).

$$L_k(f) = L_I(f) - L_P(f) \tag{8}$$

其中，$L_k(f)$ 为声场反应指数谱（dB）. 将式(5)、(7)代入式(8)得到:

$$L_k = 10\log\frac{P_aP_b}{(P_a + P_b)^2}\frac{800\sin(\Delta\theta)}{\pi f\rho\Delta r} \tag{9}$$

上式中省略了频率符号“(f)”. 可以看出，声场反应指数 L_k 是一个与声压有关的量，这给声强测量误差的估计带来了困难.

另外，整个测量除了要计算互谱外，还要计算两个自谱，大大增加了计算工作量.

四、几何平均声压及其优点

下面我们用声压的几何平均值来代替通常使用的算术平均值，即平均声压由式(10)算出.

$$\bar{P}_g(f) = \sqrt{P_a(f)P_b(f)} \tag{10}$$

其中，$\bar{P}_g(f)$ 为几何平均声压（N/m²）. 相应的声压级则为:

$$L_P(f) = 10\log\frac{P_a(f)P_b(f)}{P_0^2} \tag{11}$$

根据式（1），它可由双传声器声压互谱的模得到，即:

$$L_P(f) = 10\log\frac{|G_{ab}(f)|}{P_0^2} \tag{12}$$

将式(5)、(11)代入式(8)得到:

$$L_k = 10\log\frac{200\sin(\Delta\theta)}{\pi f\rho\Delta r} \tag{13}$$

式(13)就是采用几何平均声压后，傅氏声强测量中声场反应指数的理论公式，可以看出，它只与被测声频率有关，而与被测声声压无关. 当被测声频率已知后，相位差 $\Delta\theta$ 可通过双传声器间距和声速算出. 即为声强测量误差分析和监控提供了方便的理论依据.

由于声强测量中的两个主要量均由双传声器声压互谱算出，省去了两个自谱的计算，大大地节省了声强测量中的计算工作量.

表 1 显示了两种算法的计算量差异.

表 1　计算量统计(不包括 FFT 计算量)

	浮点乘法次数	加法次数	开方次数
几何平均法	3072	1536	0
算术平均法	9216	5120	512

五、两种算法间的精度差异

下面分析两种算法的计算精度. 设:

$$\frac{P_a}{P_b} = K \tag{14}$$

将式(6)除以式(10)并将上式代入后得到:

$$\frac{\bar{P}_g}{\bar{P}_a} = \frac{2\sqrt{K}}{1+K} \tag{15}$$

式(15)是算术平均声压与几何平均声压比值随双传声器声压比值变化的关系式，图 2 显示了

?1994-2017 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

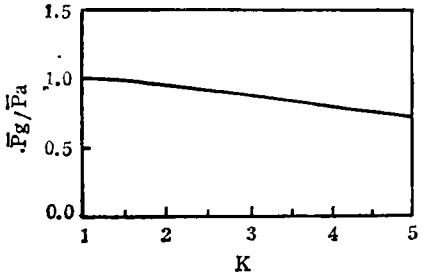

图 2　两个比值的关系曲线

它的变化曲线。

可以看出，当 $K=1$，即 $P_a=P_b$，也就是在平面波的情况下：

$$\bar{P}_a=\bar{P}_g \tag{16}$$

对于其他声源，由于声强测量为了避免近场误差，必须满足近场限制，即：

$$r>(2\sim3)\Delta r \tag{17}$$

r 为声强探头中心到声源中心的距离，以点声源为例，参照图 3。根据声学原理：

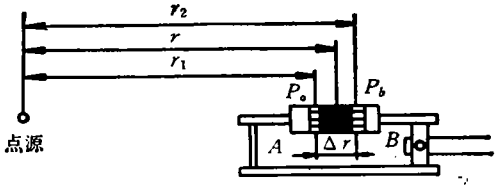

图 3　点声源与探头的位置关系

$$K=\frac{P_a}{P_b}=\frac{r_2}{r_1}=\frac{2r+\Delta r}{2r-\Delta r} \tag{18}$$

取 $r=2.5\Delta r$ 代入上式，有：

$$K=\frac{5\Delta r+\Delta r}{5\Delta r-\Delta r}=1.5$$

将 K 值代入式(15)，得到：

$$\frac{\bar{P}_g}{\bar{P}_a}=0.9798$$

进一步可得到由两种算法求出的声压级之差：

$$\Delta L_P=20\log\frac{\bar{P}_g}{\bar{P}_a}=-0.18\quad(\mathrm{dB})$$

这点误差，在声压测量中是完全可以忽略不计的。

由于一般声源都介于点声源和平面声源之间，而且，声学中心距离总大于发声表面距离，实际上的测量距离 r 远大于 $2.5\Delta r$，这就使得测量时的实际误差，远小于上述结果。

六、结　论

通过用几何平均声压代替算术平均声压进行声强测量中的声压计算，可保证：

1. 两种算法对声强测量中的声压计算产生的差异可忽略不计。

2. 傅氏声强测量中得到的声场反应指数只与频率有关，而与实际声压大小无关，为声强测量的误差分析提供了方便的理论依据。

3. 使得声强测量中省去了两个自谱的计算，大大减少了测量时的计算工作量。

本算法已经用到我们自己开发的一套以微机为基础的声强测量系统中，取得了显著的效果。

参 考 文 献

[1] GADE S., In: Technical Review No. 3, No. 4, 1982, Brüel & Kjaer.

?1994-2017 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net