

# 数字化声学测量技术

## II. 数字式声强及声功率测量系统

李毅民

(中国科学院声学研究所 北京 100080)

1995年1月9日收到

**摘要** 本文介绍在数字声学测量分析系统中,通过双传声器信号互谱密度的计算进行声强及声功率测量的基本原理。该数字分析系统由微计算机,数字信号处理卡和A/D变换卡组成。在一个数字系统中,通过快速傅里叶变换(FFT)进行互谱计算是十分有效的。本文着重介绍了,在声强的测量分析中对声强探头两传声器的固有相位差进行补偿的重要性和补偿方法。这是声强测量的重要环节。

**关键词** 声强,声功率

### Digital Acoustic Intensity and Sound Power Measuring system

Li Yimin

(Institute of Acoustics Academia Sinica, Beijing 100080)

**Abstract** This paper presents the measurement methods of acoustic intensity and sound power using the cross-spectral density of two microphones, in a digital acoustic signal analysis system. The system consists of a microcomputer, a digital signal processing card and an A/D converter card. It is very efficient to get the cross-spectral density by the Fast Fourier Transform in this digital system. Compensation can be made to the phase difference between the two microphones of the intensity probe which is the key point to the sound intensity measurement.

**Key words** Acoustic Intensity, Sound power

### 1 声强及声功率测量的意义

在一般情况下,声波的强弱用声压(单位:帕)或声压级(单位:分贝)来表示。该量为—标量,它只有大小,没有方向。在许多情况下,我们不但要知道声波的强弱,还要知道声波能量的传播方向,从而确定声场中声源及声能流的分布。这就需要作声强测量。声强是一个矢量。它的方向为声能传播的方向,它的大小等于在单位时间中通过垂直于传播方向的单位面积的声能。根据上述定义,可以测量包围声源的任一封闭面上各点的声强法向分量,用来计算出声源辐射的声功率  $W$ 。

$$W = \int_s \vec{I} \cdot \vec{ds} = \int_s I_n \cdot ds \quad (1)$$

$\vec{I}$  为声强,  $I_n$  为声强在面元  $ds$  上的法向分量。

积分是在包围声源的任一封闭面上进行的。

1993年国际标准化组织发布了 ISO9614-1, 和 ISO9614-2<sup>[1]</sup> 两个通过测量声强来确定声源声功率的标准。我国也正在制定相应的测量标准。噪声功率是检验机电产品性能的一个重要标准。以前是通过在消声室或半消声室中测量声压级来近似推算声源的声功率。用声强法测量噪声功率,可以在现场(非消声室环境)进行。在测量的封闭面以外,还允许其它声源存在,而不影响声功率的测量结果。这就使得声功率的测量更准确,并且方便易行。

### 2 声强测量的原理

对于一个稳态声场,声场某点对时间进行平均的声强,可用下面的式子来表达:

$$\vec{I} = \overline{p\vec{v}} \quad (2)$$

$$I_r = \overline{pv_r} \quad (3)$$

式中  $I_r$  为声强  $\vec{I}$  在  $\vec{r}$  方向的分量;  $p$  为该点的瞬时声压;  $\vec{u}$  为质点速度  $\vec{u}$  在  $\vec{r}$  方向的分量。要测量声强,除了测量声压以外,还要测量该点的质点速度。有一种声强测量探头是利用多普勒效应的原理直接测量质点速度  $v_r$ , 然后与声压  $p$  相乘并求平均。这种声强探头目前用得不多。最常用的是具有两个传声器的声强探头。它通过测量声压的梯度来计算质点速度。流体的动量方程为

$$\partial p / \partial r = -\rho_0 (\partial v / \partial t) \quad (4)$$

两个相距  $\Delta r$  的传声器测到的声压分别为  $p_A$  和  $p_B$ 。根据上式,质点速度在  $\vec{r}$  方向的分量  $v_r$  可表示为

$$v_r = -\frac{1}{\rho_0} \int \frac{p_B - p_A}{\Delta r} dt \quad (5)$$

将(5)式代入(3)式,并作傅里叶变换,可得到<sup>[2]</sup>

$$I_r \simeq \frac{-1}{2\pi\rho_0\Delta r} \int_0^\infty \frac{I_m[\overline{G_{AB}}(f)]}{f} df \quad (6)$$

式中  $\rho_0$  为空气的密度,  $\Delta r$  为两传声器之间的等效声学距离,  $G_{AB}$  为两传声器测得的声压信号  $p_B$  和  $p_A$  的互谱密度,  $I_m$  表示取虚部。

在一个数字化的测量分析系统中,可以用快速傅里叶变换(FFT)算法,快速而且有效地计算两个信号的互谱密度。FFT的结果在频域中并不连续分布。频率的间隔与采样速率和FFT的点数有关。在一个数字系统中,(6)式可表示为:

$$I(k) = \frac{-1}{\omega\rho_0\Delta r} I_m[\overline{G_{AB}}(k)] \quad (7)$$

式中  $\omega$  为角频率,  $k$  为声强谱在频域中的序数,  $I(k)$  是不同频率分量的声强值。用(7)式可以组合出不同 1/3 倍频程的声强分量。

### 3 数字声强测量系统的优点

从上面介绍的声强计算表达式可以看出,用模拟系统测量声强是很困难的。关键问题在于空气质点振动速度很难用模拟系统直接测

到。在一般使用情况下,需要得到声强的每一个 1/3 倍频带的谱分量。从 20Hz 到 8000Hz 共有 27 个 1/3 倍频带。如用模拟系统实现这些功能,设备将非常复杂。

(7) 式表明,声强的计算可归结为两个传声器输出信号的互谱的计算。互谱的计算是一个数字系统很基本的分析计算功能。通过快速傅里叶变换(FFT),可以快速而且有效地得到两个信号的互谱密度。通过(7)式可求得声强的每一频率分量,并可以很方便地组合出各 1/3 倍频带的声强分量,而无需对每个 1/3 倍频带进行滤波。

数字系统本身的各种优点亦充分地体现在声强的测量中。这些优点包括:精确度高,动态范围大,稳定性好。请参看本系列介绍的第一篇:数字化声学测量技术(I)——概论。

应着重指出的是,数字声强测量系统的一个突出的优点是,可以对两个传声器的固有相位差进行补偿。

### 4 声强探头两个传声器相位差的补偿

从物理意义上讲,声强是通过两个传声器得到的声压信号及它们之间的相位差来获得的。在声强的表达式(7)中,这一相位差信息反映在互谱密度中。如果两个灵敏度一样并且很靠近的传声器得到的声压信号相位差为 0,其互谱密度  $G_{AB} = 0$ ,也就是声强分量等于 0。这表明声音的传播方向与两传声器的轴线方向垂直,两传声器在同一波阵面上。如果转动该轴线方向,使它不与声波传播方向垂直,即两传声器不在同一波阵面上,此时两传声器信号的相位差必然不为 0。其互谱密度也就不等于 0,从而该声强分量也不为 0。

从理论上讲,用作声强探头的一对传声器应该完全匹配,即其灵敏度相同,在不同频率上的固有相位差为 0。尽管严格地挑选,偏差总是存在的。下面让我们来看看满足声强测量的要求所允许的相位偏差。设声波的频率为 80 Hz,则声波的波长为 4.3m 左右 ( $\lambda = c/f$ )。设两个传声器之间的距离为 12mm。当两传声器

相连的轴线与声波传播方向一致时(测得相位差最大的方向),两传声器信号的相位差为1度。如果该轴线与声波方向垂直,则此相位差为0度。转动该轴线时,相位差在0至1度之间变化。因此在这一频率上两传声器之间的固有相位差至少要低于0.1度。如此类推,频率越高,允许的固有相位偏差越大。这一要求使得传声器的配对非常困难,其中还要求灵敏度一样。这也正是一付进口的声强探头价格高达一万多美元的原因。

数字的声强测量系统可以很好地解决这一难题。首先在该数字声学测量系统中,通过一个双通道频域分析程序,测出声强探头两个传声器固有相位差随频率变化的曲线,即在分析频段中各频率上的相位差  $\Delta\varphi$ 。在计算两个传

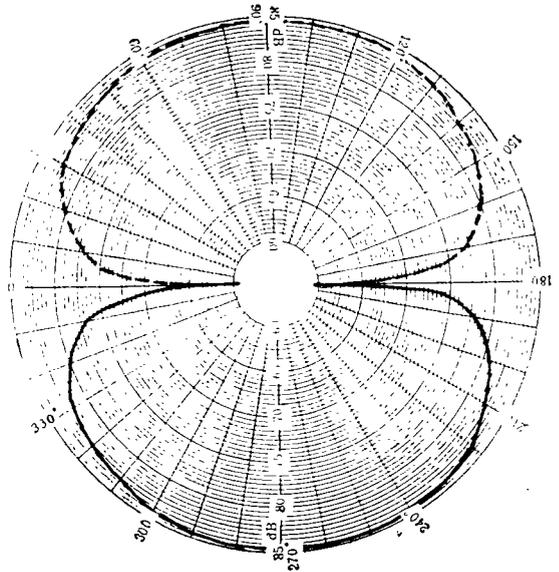


图2 在消声室测得频率为1000Hz时声强探头的指向性

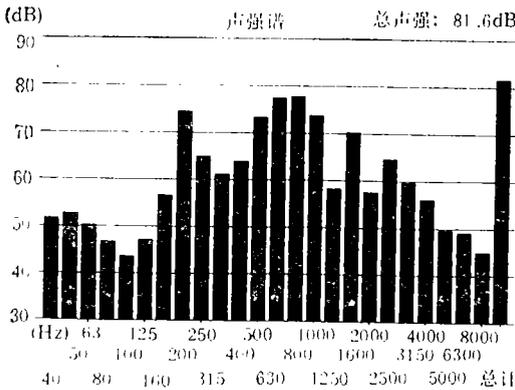


图1 普通房间中一个随意语音的声强谱(例子)  
▣为反向声强分量, ▮正向声强分量

声器信号互谱的虚部时,用这一相位差进行补偿。设  $R_c$  和  $I_m$  分别为未经补偿的互谱实部和虚部,  $\varphi = \arctan(I_m, R_c)$  为其对应的幅角。则补偿后的互谱虚部  $I'_m$  为

$$I'_m = \sqrt{R_c^2 + I_m^2} \sin(\varphi - \Delta\varphi) \quad (8)$$

注意这里  $I_m, I'_m, R_c, \varphi, \Delta\varphi$  均为频率的函数,补偿时需对每一个离散频率值进行计算。声强测量的精确度取决于这一补偿的程度。而补偿的精确度又与  $\Delta\varphi$  测量的物理条件密切相关。测量时必须保证两个传声器所接收的声压的大小与相位完全一致。此外,系统测量分析的精确度与 A/D 转换的有效位数以及处理器

是定点还是浮点有关。浮点处理器的精确度和动态范围大大地优于定点的处理器。

“数字化声学测量技术(I)”中提到了一个基于浮点数字信号处理器 TMS320C30 的数字声学测量系统。声强测量是其中的一个分析程序。图1和图2是所测得的两例结果。

## 5 结论

声强与声功率测量是声学测量中十分重要的测量项目。采用双传声器声强探头以及互谱虚部的计算方法,在一个数字的声信号分析系统中实现声强测量,是十分有效的。测量的精确度高,动态范围大,稳定可靠。特别是可以对两传声器固有相位差修正补偿,从而降低了对两传声匹配的苛刻要求,使整个系统具有极优异的性能价格比。为声强和声功率测量的推广应用创造了广阔的前景。

## 参 考 文 献

- [1] ISO9614-1, ISO96142 通过测量声强来确定声源声功率的标准。
- [2] Frank J. Fahy, *J. Acoust. Soc. Am.*, 1977, 62 (4): 1057—1059.