
*
* 声强测量系统的发展概况 *
*

张重超

声强测量系统的发展概况

张 重 超

声强是声学中的一个重要物理量。它的定义已在声学理论中阐明。在垂直于传播方向的单位面积上单位时间内通过的平均声能，即声强，可由下式表示：

$$I_r = \frac{1}{T} \int_0^T p(t) \cdot u_r(t) dt$$
$$= \overline{p \cdot u_r} \quad \text{瓦/米}^2 \quad (1)$$

式中 $p(t)$ 与 $u_r(t)$ 分别表示传播方向 r 上某点的声压与空气质点速度， T 为声波周期的整数倍。

声压的测量方法早已解决，并已广泛用于声学测量中。但是要测量声强，尤其是要测出一点上的空气质点速度却是一个难题。由于声源声强的测定对声学研究工作有着重要的意义，一直吸引着声学家与噪声研究人员的注意力，希望能够找到一种合适的方法直接测出声源的声强值。

根据文献记载，自三十年代起就有人不断进行过研究。主要工作有：

——美国 RCA 实验室的 H. F. Olsen (1932 年) (1)

——美国密歇根大学的 C. W. Clapp 等 (1944 年) (2)

——美国麻省理工学院的 S. Baker (1954 年) (3)

——美国哈佛大学的爱德华·舒尔茨 1955 (4)

以上工作重点在于声强仪或声瓦特计的研究。大多采用模拟电路，或者采用加法器、积分器等元件组成，能够测量出一点的声强

值，无法实现窄带声强谱分析。

六十年代电子计算机蓬勃发展，尤其是在美国的库利与杜凯提出了快速付里叶变换（FFT）之后，各种快速谱分析仪日趋完善，随机信号分析理论的逐步深化，进一步燃起了研究人员对声强测量系统的研究热情，把谱分析技术应用于声强测量，在理论上与实践上解决了许多重大问题，使声强测量系统日趋成熟，并且制成了一些可供实用的声强测量系统（Acoustic Intensity Measuring System — AIMS）。

在这一研究工作中作出重要贡献的有：

- 捷克的 G. Pavic [5]
- 法国的 J. M. Lambert [6]
- 英国的 F. J. Fahy [7]
- 美国的 J. Y. Chung [8]

其中，J. Y. Chung 提出的用双传声器测量声强的互谱方法尤其受到广泛的注意。他利用中心间距为 Δr 的二个传声器分别测出二点的声压信号，输入双通道谱分析仪求得它们的互功率谱，然后通过一定的运算获得一点（即二传声器之间的中点）的声强及声强谱。他提出的声强互谱表达式是许多测量系统的理论基础。此式为

$$I(f) = \frac{1}{2\pi\rho\Delta r} \frac{I_m(G_{II})}{f} \quad (2)$$

上式中 G_{II} 为传声器 1 与 2 的互功率谱（即互功率谱密度函数乘上有限付里叶变换相关的频率分辨率）， I_m 表示取虚部， ρ 为空气密度， Δr 为传声器 1 与 2 的中心间距， f 为频率。

声强测量系统

基本组成

声强测量系统目前有二种类型，一类是由数字滤波器构成的测量系统，它以声强仪为基本设备，一般能实现信频段或 $1/3$ 信频段分析。另一类是利用双通道谱分析仪与电子计算机(专用机或微处理器加有关程序)组成的测量系统。这类测量系统以双通道谱分析仪为基本设备，计算机作有关测量值的辅助计算工具。这二类测量系统的基本组成示于图 1 中。图中的符号表示①双传声器组成的声强探头，②显示设备，③打印机或绘图机。AI——声强仪(用滤波器)，FFT——双通道谱分析仪，MC——微处理器。

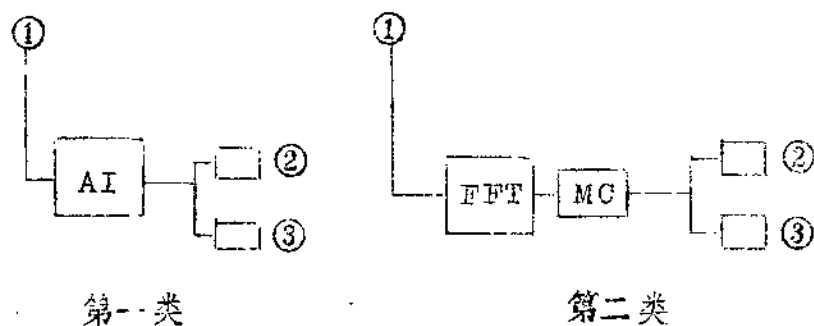


图 1

几种声强测量系统的性能简介

根据已有的资料，将几种声强测量系统的性能、主要设备及功能列于表 1 中。

图 2 所示为第一种测量系统。从表 1 中可以看出它的功能比较齐全。采用的主要设备均为美国 HP 公司的通用设备。缺点是必须

表 1

国别	美	法	丹	日
公司	Anacrol	MetraVib	B&K	GNO Sokki
制造年份	1979	1980	1981	1982
型号	AIMS		3360	
主要设备	HP3582A HP9825S	声强仪	BK2134	CF500 CF502
显示与 输出	CRT HP7225A	1. 表头读数 2. 数字显示	BK4175	1. CRT 2. 打印机
声强探头	1. 双传声器 2. 并列式 3. Δr 可按 要求改变	1. 三传声器 2. 并列式 3. Δr ① 15 mm ② 120 mm	1. 双传声器, BK3519 2. 对置式 3. Δr 可选不同的探头	1. 双传声器(1/4") 2. 顺置式 3. $\Delta r=12$ mm
频率范围		① 707- 5650 Hz ② 80-707 Hz	Δr 6 mm 12 mm 50 mm 1/4400-10k200-8k 1/2 200-3000-25	200-4k

续上表

国别	美	法	丹	日
公司	Anatrol	Metra vib	B4K	ONO Sokki
声级范围	声压级 130dB (最大)	声压级 40-128dB 声强级 30-128dB	声强级动态范围 60dB	声压级 120dB (最大) 声强级 120dB (最大)
程序	软件输入	—	—	—
功能	1. 测点位置及面积 2. 声压级 3. 声强及声强级 4. 声功率及声功率级 5. 频谱 ——窄带、1/3倍频 6. 等声强线图 7. 三维声强图	1. 声压及声压级 2. 质点速度 3. 声强及声强级 4. 1/3倍频程 频谱	1. 声压级 2. 声强级 3. 1/3倍程程频谱 4. 1/3倍程程频谱 5. 互谱	6. 测点声强的相对 值排队及显示

备有价格昂贵的专用程序。但是有了台式计算机(HP9825s)，某些程序可以自编输入。这一系统的声强测量探头没有详细资料，因而对频率范围需要考虑。

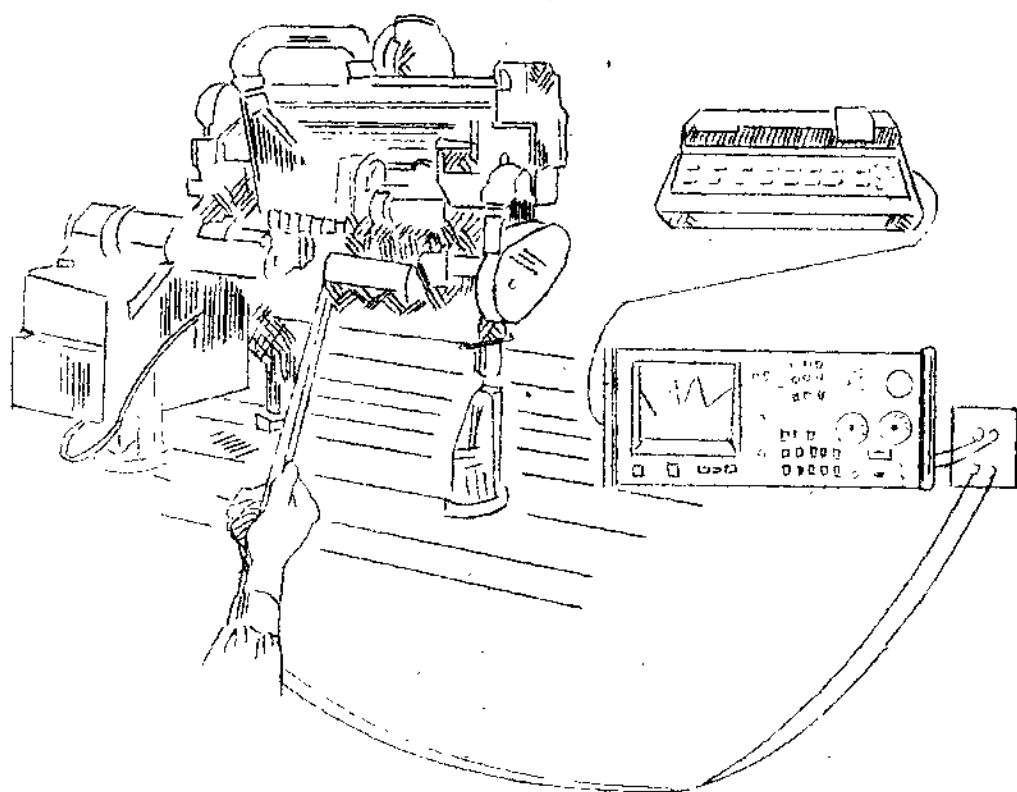


图 2

图3为法国的声强测量仪。它的声强探头采用三个传声器，分别组成二个中心间距，以适应不同的测量频率范围。它的缺点是只能进行倍频或 $1/3$ 信频的谱分析。

图4为丹麦BK公司的新产品，它是在原有的2133谱分析仪上发展而成的声强测量系统。它是采用滤波技术的，因而同法国

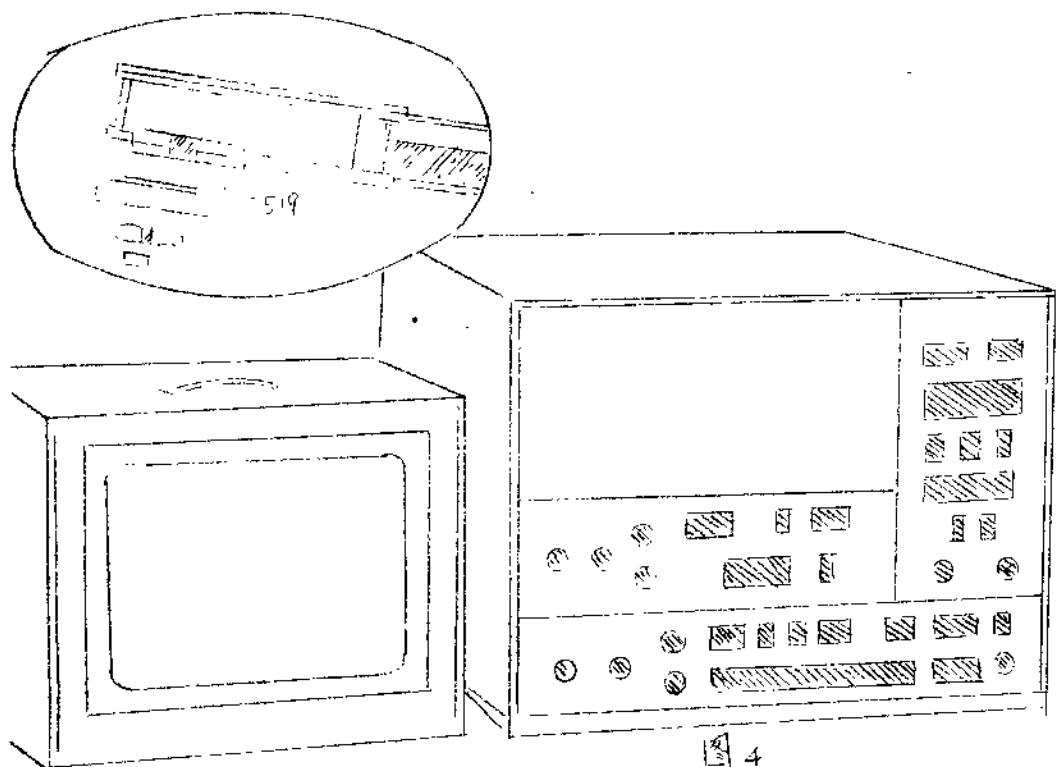


图 4

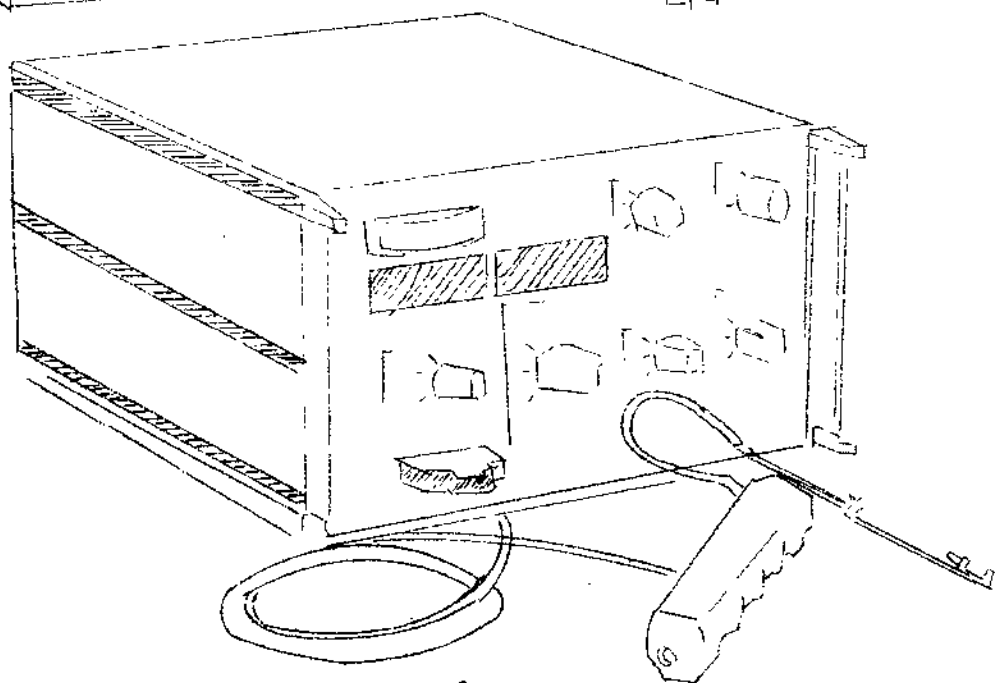
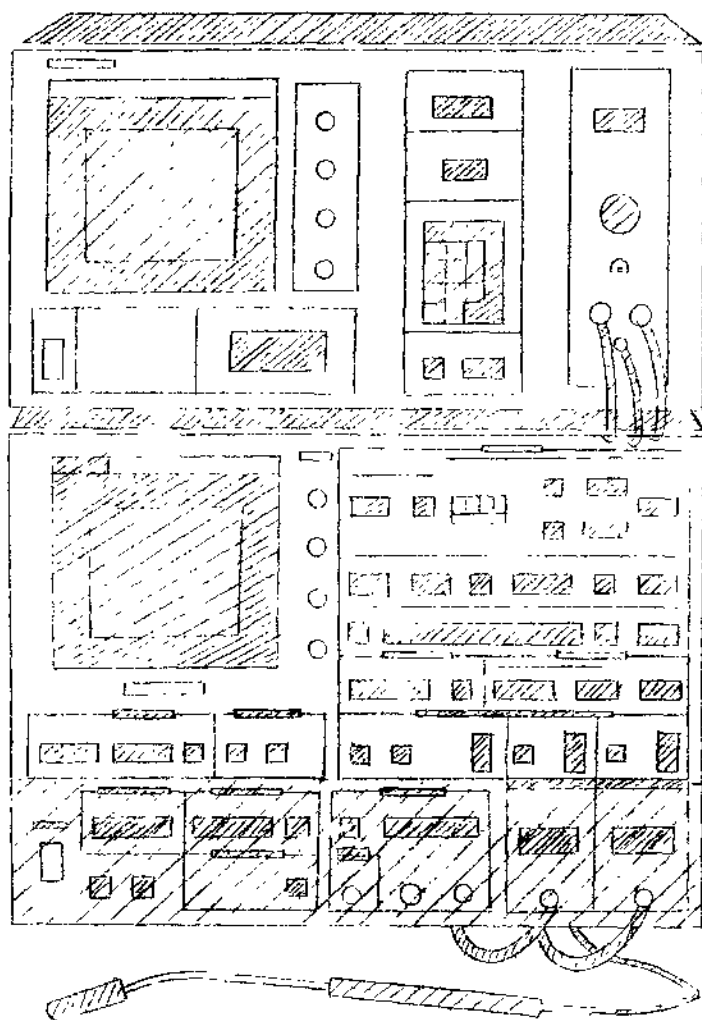


图 3

的一样，只能进行倍频或 $1/3$ 倍频的谱分析。这一系统可以采用不同 Δr 的传声器组件，以适宜不同的测量频率范围。

图 5 所示为日本小野测器今年制成的新产品，它是在 CF500 谱分析仪上加上一个 CF502（声强仪）扩展而成的。设计的功能好的，但因目前只有一种声强探头，其频率范围较窄（200 ~ 4k 赫），对研究工作较为局限。从试用情况来看，性能尚不稳定



从现有资料来看，后三种测量系统的基本功能在于测量出声强或声强谱，无法根据测量结果直接计算声功率。美国 Anatrol 公司的产品的功能比较齐全，其中的等声强线图及三维声强图无疑对噪声控制是十分有用的，但因未见实物，无法详细说明。

声强探头

型式

由二个相同型号的传声器组成的声强探头是声强测量系统的基本部件。图 2 至图 5 中示出了四种声强探头的型式，它们反映了目前在声强测量系统中采用的声强探头的概况。

图 6 所示为目前常用的三种声强探头的型式。

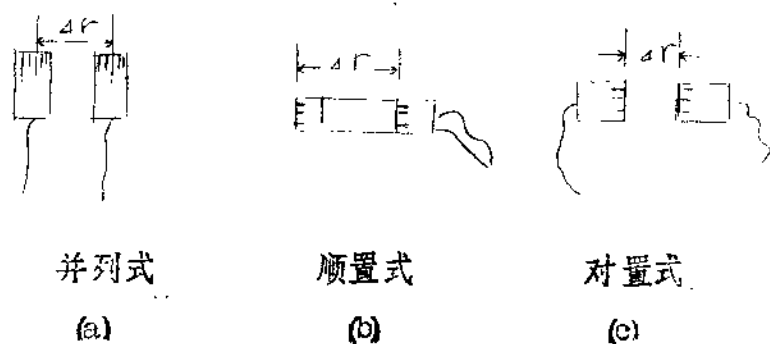


图 6

并列式声强探头的优点是易于安装标准型式的前置放大器、传声器之间的距离 Δr 的调整比较方便。为消除测量通道的相位误差，此种探头易于交换位置，同时可用一般的泡沫塑料球状风罩直接罩住二个传声器。它的主要缺点是对测量轴线不易做到完全几何对称，在高于某一频率时对相位响应与频率响应有不利的干扰，而且传声

器的现场标定有一定困难。

顺置式探头是上述型式的变形。它的优点是能够造成较大的声压梯度。可以用一个校正器同时校正二个传声器，并且可用一个风罩同时罩住二个传声器。除此之外，它没有并列式探头的主要优点。

对置式探头是丹麦 BK 公司采用的标准型式。这种探头在一定的 Δr 下可以在较宽的频率范围内获得较为平直的响应。由于传声器之间装有分隔器，声波不是直接入射到传声器膜片，而是从传声器边缘入射的，因而 0° 与 180° 的响应是一致的。但是，这种传声器必须用专用的校正器才能同时校正二个传声器，它的风罩也应专门设计。

传声器的选择

声强或声强级的测量范围一般应在 30 分贝（用于隔声研究）至 140 分贝（用于脉冲声研究），频率的测量范围应在 20 至 12 KHz，即 31.5 至 8 KHz 九个倍频程。1" 与 $\frac{1}{2}$ " 电容式传声器与适配的前置放大器可以同时满足上述二个要求。1/4" 与 1/8" 传声器与前置放大器组件由于本身信噪比的限止无法满足低频宽带的要求。更重要的是小尺寸传声器组件由于结构上微小差别使低频（<100 赫）不易做到相位匹配。1" 与 $\frac{1}{2}$ " 传声器（高灵敏度传声器），由于它们的膜片自振频率接近 12 KHz 而使测量频率的上限受到限止。

通常，声强探头的传声器以选用高频响应平直的压力场传声器为好。

为了使平面波声强误差的最大值限制在 1 分贝，探头的二个

~10~

传声器中心间距 Δr 不应超过相应于最高测量频率的波长的 $1/6$ 。例如 $f_{\max} = 12\text{KHz}$ ，则 $\Delta r = 5\text{mm}$ 。显然当直径大于 $1/2"$ 的传声器测量 4KHz 以上的频率是不实用的。

声强探头传声器的尺寸（直径 d ）及中心间距（ Δr ）的可能组合列于表 2 中。

表 2

$d"$	$\Delta r (\text{mm})$				
$1/4$	6~7	12	15		
$1/2$		12~15	17~20	50	120

传声器直径 d 与中心距 Δr 的不同组合会影响测量频率范围的上限及下限，其最佳测量频率范围应由传声器组合的试验来确定。表 1 中已列出若干这类组合。

传声器组合的误差

由二个传声器组成的声强探头以及有关测量通道（包括通道中的设备）对声强测量造成多种误差，其中有些误差是基本的，直接限制着测量频率范围和测量精确性。

声强测量系统的误差有以下几个方面：

1. 有限差分近似引起的误差

在图 7 中，二个传声器的中心间距为 Δr ，传声器 1 与 2 分别测出的声压为 p_1 与 p_2 。O 点为声强的理论测点。它的声压近似地用 $p = \frac{1}{2}(p_1 + p_2)$ 代替。而质点速度

中的声压梯度 $\frac{\partial p}{\partial r}$ 用有限差分近似，即

$$\frac{\partial p}{\partial r} \approx \frac{p_2 - p_1}{\Delta r}$$

上式表明，无论在远场、近场、自由场或混响场中，二传声器的间距范围内，声压梯度越小，其近似性越高。对于一定的传声器间距，因声压梯度反比于声波波长，故对高频的误差就更严重。事实上，各种不同的声源在自由场中的辐射与实际声场中的情况极不相同。但是，考察一个点声源的声强误差是有意义的。令 I 为双传声器测得的声强， I_a 为点声源在 r 处的声强。则误差的分贝值为

$$L_1 = \frac{|I|}{|I_a|} = 10 \lg \left(\frac{\sin(k\Delta r)}{k\Delta r} \cdot \frac{r^2}{r_1 r_2} \right)$$

式中之 k 为波数，即 $k = \frac{\omega}{c} = \frac{2\pi}{\lambda}$ 。而

$$\frac{r^2}{r_1 r_2} = \frac{r^2}{r^2 - \frac{(\Delta r)^2}{4}} = \frac{1}{1 - \frac{1}{4} \left(\frac{\Delta r}{r} \right)^2}$$

可见当 $\Delta r \ll r$ 时， $\frac{r^2}{r_1 r_2} \approx 1$ ，则误差为

$$L_1 = 10 \lg \left(\frac{\sin(k\Delta r)}{k\Delta r} \right) \quad (3)$$

不同的 Δr 下因有限差分近似引起的误差列于表 3 中。

表 3

Δr	500	1k	2k	3k	4k	5k	6k	8k
12	-0.009	-0.04	-0.14	-0.32	-0.58	-0.93	-1.37	-2.58
20	-0.02	-0.1	-0.4	-0.93	-1.72	-2.8	-4.43	-12.1

从上表所下误差值可以看出，缩短传声器间距 Δr 可以减小有限差分近似引起的误差。

2. 二传声器的相位差引起的误差

这一误差对点声源可用下式估计：

$$L_2 = 10 \lg \left(\frac{\sin(k\Delta r - \phi)}{k\Delta r} \right) \quad (4)$$

式中 ϕ 为二传声器间的相位差。表 4 给出了 $\Delta r = 12 \text{ mm}$ 的不同 ϕ 时的误差。

表 4

f	$\phi = 0.5^\circ$	$\phi = 1^\circ$	$\phi = 2^\circ$
50	-6.7	+2.4	+3.3
100	-2.2	-6.7	+2.4
200	-0.95	-2.2	-6.7
300	-0.61	-1.3	-3.2
400	-0.45	-0.95	-2.2
500	-0.36	-0.75	-1.6
1000	-0.21	-0.39	-0.77
2000	-0.2	-0.31	-0.48

从上表可知，增加 Δr 可以减小 L_2 。

根据以上二种误差显然可见二者的结论是矛盾的。因此，对于

一个传声器中心间距 Δr 固定的声强探头，不能同时满足宽频测量范围的要求。换言之，当声强探头的 Δr 值确定后，它有一个最合适的上限与下限频率范围。为了使声强的频率范围较宽，所以法国的 Metravib 采用了三个传声器组合的声强探头，丹麦 BK 公司采用了几个 Δr 不同的声强探头。

3. 互谱估计中的误差

声强测量中二声压信号的互谱，其虚部很小，很难计算得准确，不免带来互谱的估计误差。对于稳态信号，若频率分辨率为 25 赫或更小些，如采用 100 次以上的平均，则可避免互谱虚部估计值的随机误差。

4. 传声器对声场干扰引起的误差

第一个传声器放置在第二个传声器之前，它会对第二个传声器的声场产生一定的干扰。声强探头的型式试验证实了 $1/4"$ 与 $\frac{1}{2}"$ 传声器，当 $\Delta r > 16 \text{ mm}$ 并列时，这一误差不很严重。

5. 传声器膜片声学中心的不确定性引起的误差

这是由传声器结构上的原因引起的。用一个传声器时不存在这一问题。而当二个传声器布置在一起，膜片的声学中心（不是几何中心）不一定在同一轴线上。据型式试验表明，小尺寸的传声器，这一误差也不很大。

6. 传声器的二个测量通道因相位不匹配引起的误差

这一误差极为重要，如不注意必然会使得测量结果带来很大误差。传声器、滤波器、磁带记录仪、放大器等测量通道中的有关部分都造成相位不正配。在大多数场合下，它与频率成线性正比关系。

由于声强测量利用的是互谱的虚部，因此，二个测量通道的相位正配是此种测量系统的一个很重要的技术。可以预先选择一对相位正配的高质量传声器、前置放大器与放大器来消除相位不正配的影响。如结测量通道中存在相位不正配的情况，在测量时可用交换通道法〔q〕消除这一误差。此时(2)式中的互谱可表示为

$$G_{II} = \frac{\sqrt{G_{II} \cdot G_{II}^T}}{|H_1| \cdot |H_2|} \quad (5)$$

上式中根号内的 G_{II} 与 G_{II}^T 为交换通道前后的互谱， H_1 与 H_2 为通道 1 与 2 的增益因子。

声强测量法是近五年来声学测量中的新发展。由于它能在现场作各种声学测量，无疑会受到噪声研究人员的广泛重视。目前已有的声强测量系统，性能及功能并不尽善尽美，还在发展之中。选用这种系统时尤其要注意的是它的测量频率范围，当然系统的功能也是一个应予考虑的重要方面。

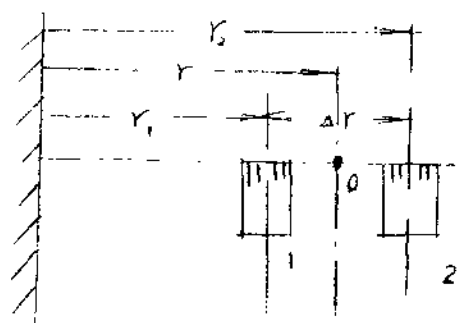


图 7

参 考 资 料

- 1 . 美国专利 1932年 №1892644
- 2 . JASA 1941, 13
- 3 . JASA 1955, 27
- 4 . JASA 1956, 28
- 5 . JS&V 1977, 4
- 6 . CETIM-Information 1977, № 53
- 7 . JASA 1977, 63
- 8 . GMR-2617, 1977
- 9 . JASA 1978, 64