

# 声强向量法对声源定向的理论和实验研究

刘 勋, 相敬林

(西北工业大学航海工程学院, 西安 710072)

**摘 要:** 文章应用的双传声器声强探头 CM-202 和与之配套的传声器, 自行设计了 1 个声强探头支撑架, 使之可以把声强探头转动到空间笛卡儿坐标系的 3 个互相垂直的方向, 并且它们的几何中心保持不变, 这样就可以测量平稳声场中 1 点的声强矢量的 3 个分量, 由此就能对声源进行定向。在半消声室中应用这套实验装置对声源进行了定向研究, 并探讨了各种误差因素与定向精度的关系。

**关键词:** 声强向量; 声源定向; 声场

中图分类号: TB52<sup>+</sup> 5 文献标识码: A

## Study on theory and experiment of acoustic source bearing with acoustic intensity vector

LIU Xun, XIANG Jing-lin

(Northwestern Polytechnic University, Xi'an 710072, China)

**Abstract:** In this paper the acoustic intensity probe CM-202 and a microphone pair are used, and a bracing frame is designed for the probe CM-202, so that it can be turn to three mutually perpendicular axes of spatial Cartesian coordinate system and their geometric centers are the same, in this way, three components of acoustic intensity vector of one point in stationary sound field and the bearing of sound source can be determined. The bearing experiment of sound source is done with the set of experiment device in semianechoic room, the relation between bearing precision and all kinds of error factor is discussed.

**Key words:** acoustic intensity vector; acoustic source bearing; sound field.

### 1 引 言

声强度是声场的一个重要参量, 自从双传声器声强度测量法问世以来, 由于该方法具有一些独特的优点, 如: 可进行近场测量; 不需要特定的声学环境(消声室、半消声室、混响室)而能在现场测定机器的声功率和进行声源识别等等, 从而以其巨大的实用价值而引起声学界的广泛重视。一些国家的公司更是先后研制成可供实用的声强测量仪或测量分析系统, 如丹麦 B&K 公司的 3360 系统。这些专用的声强测量分析系统功能有限, 价格昂贵。故近年来趋向于使双通道信号分析仪(如 B&K2034 双通道信号分析仪)兼具部分声强分析功能, 或将分析仪与微机联机, 利用专用软件包实现声强的测量和分析, 该方法具有通用性强, 可任意扩充功能等优点, 还可实现两通道间固有相位误差等的修正。众所周知, 声强度是一个矢量, 它的方向也就是声源所在的方向, 因此, 测量声强度的方向就能实现声源的定向。

由于一般的声强度探头只能测量声强度矢量的 1 个分量, 因此要测量声强度的 3 个分量, 从而确定声强度的方向需另想办法。虽然 B&K 公司有专用的声强矢量探头托架, 但是价格昂贵, 并难以实现 6 个声强探头间的幅值和相位匹配。因此在本文中, 我们为日本 ONO SOKKI 有限公司的双传声器声强探头设计和加工了 1 个支撑架, 使之可以转动到笛卡儿坐标系的 3 个互相垂直的方向, 且它们的几何中心保持不变, 以便测量声强矢量的 3 个分量, 然后利用实验室的 B&K2034 双通道信号分析仪通过 GPIB 接口和微机进行通信所组成的信号分析系统<sup>[1]</sup>, 来测量平稳声场中一点声强矢量的 3 个分量, 从而实现声源的定位。另外还利用日本 SONY 公司的四通道数字盒式磁带机对测量输出信号进行了长时间的录音以备将来做进一步分析。应用这套实验装置, 我们分析了声强度对声源的定向精度, 以及各种误差元素对定向精度的影响。

### 2 互谱声强度法的声源定向<sup>[2~4]</sup>

在互谱声强度测量方法中, 如图 1 所示, 任意方向  $r$  上的声强分量谱函数可以表示为:

收稿日期: 2000-03-27; 修回日期: 2000-04-28

国防预研基金和高等学校博士点专项基金资助

作者简介: 刘勋(1969), 男, 博士研究生, 研究方向: 信号检测与目标识别等。

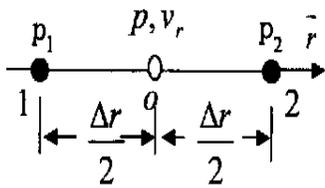


图 1 互谱声强测量方法原理图

$$I_r(f) = -\frac{1}{2f} \frac{1}{r} \text{Im}[G_{12}(f)] \quad (1)$$

其中,  $G_{12}(f)$  是电容传声器  $P_1$  和  $P_2$  处的声压  $p_1(t)$  和  $p_2(t)$  的互谱密度函数。  $\rho$  是空气的密度,  $\text{Im}[\ ]$  表示取复数的虚部运算。  $r$  是  $r$  方向上两声压水听器的间距。

要实现三维空间中的声源目标的定向, 则需要空间中某一观测点处的 3 个互相垂直的声强分量, 为此可采用如图 2 所示的声压传感器布置方案, 其中 X 轴、Y 轴和 Z 轴组成一个空间笛卡儿坐标系 OXYZ。  $P_1$  和  $P_2$ 、 $P_3$  和  $P_4$ 、 $P_5$  和  $P_6$  分别位于 X 轴、Y 轴、Z 轴上, 它们之间的间距都为  $r$ , 其中心都在观测点 O 处, 则 X 轴、Y 轴、Z 轴的声强度分量分别为:

$$I_x(f) = -\frac{1}{2f} \frac{1}{r} \text{Im}[G_{12}(f)] \quad (2)$$

$$I_y(f) = -\frac{1}{2f} \frac{1}{r} \text{Im}[G_{34}(f)] \quad (3)$$

$$I_z(f) = -\frac{1}{2f} \frac{1}{r} \text{Im}[G_{56}(f)] \quad (4)$$

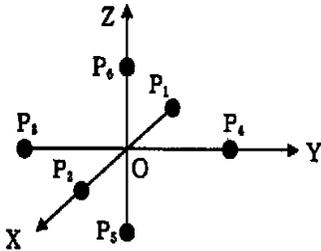


图 2 全方位定向传感器布置图

为了表示方便, 下面的矢量符号 省略掉了。 则声源的俯仰角 和方位角 分别为

$$\theta(f) = \tan^{-1} \left[ \frac{I_x(f)}{I_y(f)} \right] \quad (5)$$

$$\phi(f) = \cos^{-1} \left[ \frac{I_z(f)}{|I(f)|} \right] \quad (6)$$

其中,

$$|I(f)| = \sqrt{I_x^2(f) + I_y^2(f) + I_z^2(f)} \quad (7)$$

### 3 实验装置

#### 3.1 双传声器声强探头 CM-202 和配套的双通道前置放大器 CF-0310

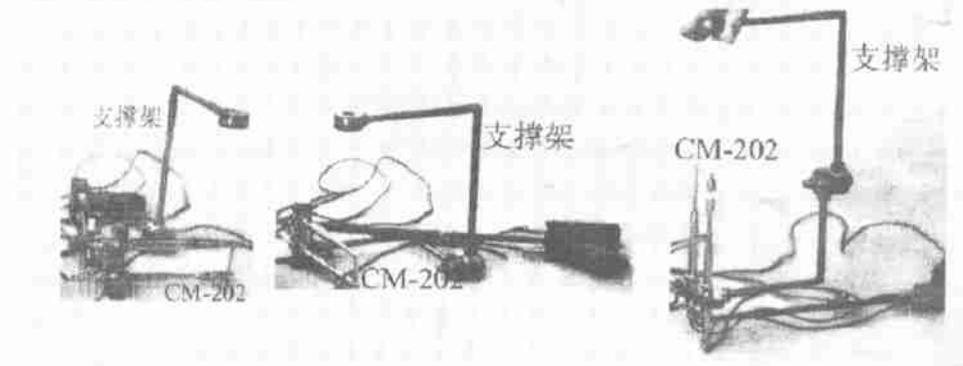
所用两个设备都是日本 ONO SOKKI 有限公司的产品, 其中的两个配对电容传声器为 B&K 公司的产品, 因此该套仪器结合了两家公司的优点, 使得仪器具有更高的测量精度, 传声器间的间距  $r$  连续可调, 便于进行研究。CM-202 和 CF-0310 用 1 条 4m 长的专用电缆相连, 后者为前者提供极化电压, CF-0310 的放大增益可调。CF-0310 的输出为标准的 TC 接头, 可方便地与一般的双通道信号分析仪(如 B&K2034 双通道信号分析仪)和盒式磁带录音机(如录音机 PC204AX)相连接, 以便对信号进行分析和录制。

#### 3.2 声强探头支撑架

此装置是我们自行设计和加工的, 用来夹持声强探头 CM-202, 使得它可以转动到笛卡儿坐标系的 3 个互相垂直的坐标轴方向, 并且其几何声中心保持不变, 即实现 2 中、 $I_x(f)$ 、 $I_y(f)$  和  $I_z(f)$  的测量。其布置如图 3 所示。

另外我们还设计和加工了两个木质的三角架, 用来把声强探头和支撑架固定在离地面 3m 左右的空中, 以便接收由地面声源所辐射的声信号。

#### 3.3 声场产生设备



(a) 测量 X 轴分量的布置 (b) 测量 Y 轴分量的布置 (c) 测量 Z 轴分量的布置

图 3 支撑架和 CM-202 的几何布置图

声源产生设备由信号发生器、功率放大器和喇叭组成,喇叭的尺寸为 170mm,定位参考点为喇叭的中心,信号发生器有 HP-33120A 多功能信号发生器和 B&K 公司的信号发生器 1013 等,它们都可以产生单频正弦信号和随机信号,由于信号发生器和功率放大器的输出信号幅度都连续可调,因此喇叭所辐射的声功率也是可以调节的。

### 3.4 数据采集和分析设备

由前置放大器所输出的信号通过屏蔽电缆输入 SONY 公司的四通道数字盒式磁带录音机 PC204AX 中来录制信号,或者输入到 B&K2034 双通道信号分析仪进行采样和分析,虽然信号分析仪也能进行声强度的分析和显示,但它对相位误差的补偿比较困难,因此,这里利用了信号分析仪的前置放大器、抗混叠滤波器以及 A/D 转换器,把信号放大器所采集的两路信号通过我们开发的 GPIB 接口输入到 PC 微型计算机进行存储和处理,在计算机中我们用 Matlab 语言编制专用程序来对接收到的信号进行各种处理和分析。

## 4 实验结果分析

实验是在半消声室中进行的,半消声室的尺寸为 5.5m 4m 3.8m,其中地面没有吸声材料,为了尽量减少地面反射引起的多途路径的影响,我们把声源置于地面上,使其由地面垂直向天花板发射,而把声强探头放在天花板附近来进行测量,真实方位角和俯仰角的求取方法为:先确定声强探头的中心投影到地面的位置点 O (利用悬挂重锤)并由此测定其垂直高度(声源的 Z 坐标值),再确定声强探头的 X 轴和 Y 轴在地面的投影(利用悬挂重锤)X 轴和 Y 轴,由此,在地面上我们得到一个直角坐标系 O X Y,然后根据地面上的喇叭中心位置到 X 轴和 Y 轴的距离,就可得到声源的 x 坐标值和 y 坐标值,最后由声源的 x、y 和 z 坐标值,就可确定声源的真实方位角和俯仰角。

### 4.1 1 个声源的情况

此时声源是频率为 1000 Hz 的单频正弦信号,保持声强度探头的位置不变,改变声源的位置,使得声源的方位角从 0 转到 90,步长为 10,而俯仰角从 0 转到 45,步长为 5。每次移动都用互谱方法作 30 次谱平均来测量声强度矢量的  $I_x$ 、 $I_y$  和  $I_z$  分量,在频域 1000 Hz 处由式(5)和式(6)可求得声源的方位角和俯仰角,由此可以得到预设角度值与实际测量值的关系图,如图 4 和图 5 所示。

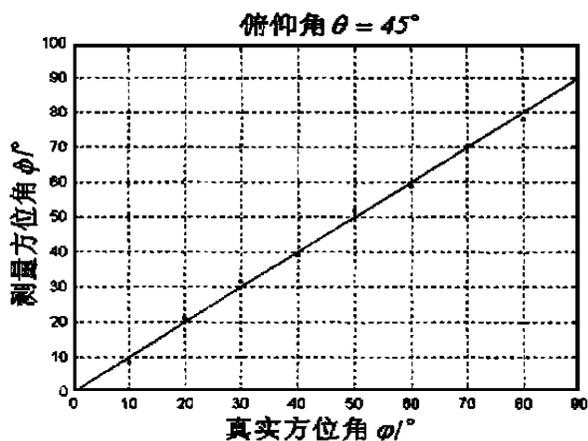


图 4 方位角测量结果

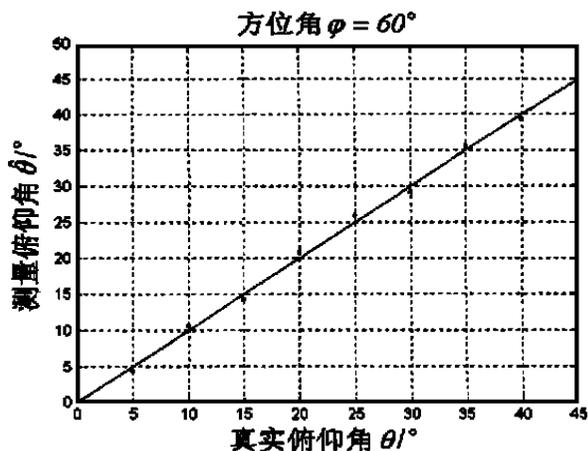


图 5 俯仰角测量结果

从图中可以看出其一致性是比较好的。角度误差一般在 2 左右。引起方向测量误差的主要因素有传声器和分析仪测量通道之间的相位和灵敏度的不一致,以及支架的安装误差等等。为了减少以至消除传声器和测量通道之间的相位和灵敏度不一致引起的误差,我们在这里应用交换通道的方法研究了其精度的改善程度。

### 4.2 1 个声源加 1 个噪声源的情况

为了考察随机噪声干扰对测量精度的影响,在实验中又增加 1 个声源,此时利用 HP-33120A 多功能信号发生器来产生频率为 1000 Hz 的单频正弦信号,用 B&K 公司的信号发生器 1402 来产生高斯分布随机噪声,并通过调节它们的输出幅值大小来调节信噪比的大小。实验所得结果如表 1 所示。

表 1 声强矢量法对声源的定向误差结果(其中  $\theta = 60^\circ$ ,  $\phi = 45^\circ$ )

信噪比/ dB	方位角误差/	俯仰角误差/
0	8.1	7.2
5	4.5	3.6
10	2.6	2.4

### 4.3 交换通道法对定向测量精度的改进<sup>[3,5]</sup>

#### 4.3.1 原理简介

由于测量系统两通道间的等效电参数不可能完全匹配,两通道存在着固有相位差和敏感度误差,因此,信号分析仪测得的互谱  $G_{AB}$  不等于信号  $p_1$  和  $p_2$  的互谱  $G_{12}$ 。如果交换通道前,信号分析仪得到的互谱为:

$$G_{AB} = [P_1 H_A]^* [P_2 H_B] = G_{12} H_A^* H_B \quad (8)$$

式中,  $P_1$  和  $P_2$  分别为  $p_1$  和  $p_2$  的频谱函数,  $H_A$  和  $H_B$  则分别为两个通道中从传声器到信号分析仪的传递函数, \* 表示复数共轭运算。A、B 两点响应之间的传递函数为:

$$H_{AB} = \frac{G_{AB}}{G_{AA}} = \frac{G_{12}}{G_{11}} \frac{H_A^* H_B}{|H_A|^2} \quad (9)$$

交换通道后,信号分析仪上得到的互谱为:

$$G_{AB} = [P_1 H_B]^* [P_2 H_A] = G_{12} H_B^* H_A \quad (10)$$

$$\text{而 } H_{AB} = \frac{G_{AB}}{G_{AA}} = \frac{G_{12}}{G_{11}} \frac{H_B^* H_A}{|H_B|^2} \quad (11)$$

经整理得到:

$$\begin{aligned} G_{12} &= G_{11} \sqrt{H_{AB} H_{AB}^*} = \frac{G_{AA}}{|H_A|^2} \sqrt{H_{AB} H_{AB}^*} \\ &= \frac{G_{AB}}{H_{AB}} \frac{1}{|H_A|^2} \sqrt{H_{AB} H_{AB}^*} \\ &= \frac{G_{AB}}{|H_A|^2 \sqrt{H_{AB}/H_{AB}^*}} \quad (12) \end{aligned}$$

只要测得交换通道前后的传递函数  $H_{AB}$  和  $H_{AB}^*$ , 并测出 A 通道的增益因子  $|H_A|$ , 即可由  $G_{AB}$  得到所要求的  $G_{12}$ , 在本实验中, 交换通道是靠支撑架把声强度探头转动 180 来实现的。

另外一种交换通道的方法为:

交换通道前

$$G_{AB} = G_{12}(H_A H_B^*) \quad (13)$$

交换通道后

$$G_{AB} = G_{12}(H_B H_A^*) \quad (14)$$

则

$$\begin{aligned} G_{12} &= [G_{AB} \quad G_{AB}]^{1/2} / [(H_A \quad H_A^*)] \\ & \quad [(H_B \quad H_B^*)]^{1/2} = [G_{AB} \quad G_{AB}]^{1/2} / |H_A| |H_B| \quad (15) \end{aligned}$$

从上式可以看出, 仪器的相位响应已从互谱表达式中消失了, 只剩下仪器的增益因子  $|H_A|$  和  $H_B$  对互谱表达式有影响, 而这两项也很容易通过校正测量系统来得到。

#### 4.3.2 实验结果

为了考察利用交换通道方法来消除了通道间的

相位失配对定向精度的改善情况, 对 4.2 中的实验进行了再处理, 所得结果如表 2 所示。

表 2 声强矢量法对声源的定向误差结果(其中  $\theta = 60^\circ$ ,  $\phi = 45^\circ$ , 利用了交换通道技术, 以消除相位误差)

信噪比/dB	方位角误差/°	俯仰角误差/°
0	6.2	5.3
5	2.3	1.7
10	0.6	0.5

在表 3 中给出了声源为其它频率, 而实验条件与表 2 相同情况下的实验结果。

表 3 不同频率声源的定向误差结果( $\theta = 60^\circ$ ,  $\phi = 45^\circ$ , 信噪比为 10dB, 利用了交换通道技术, 以消除相位误差)

频率/Hz	方位角误差/°	俯仰角误差/°
600	0.82	0.75
700	0.78	0.69
800	0.65	0.57
2000	0.53	0.42
4000	0.31	0.25

从实验结果我们可以看到, 由相位失配误差引起的声强向量法对声源的定向误差是比较大的, 因此要实现声强向量法的高精度定向, 必须设法减小相位失配误差的影响。

## 5 结 论

(1) 利用互谱声强矢量方法可以实现三维空间声源的定向, 并且具有对测量环境要求低、可现场测量、体积小和精度较高的优点。

(2) 对定向精度的影响因素有传声器的相位失配误差和随机噪声干扰误差, 对于前者可以通过采用交换通道的方法来加以消除, 对于后者, 则可以通过多次测量平均的方法来提高信噪比以达到提高定向精度的目的。

参考文献:

- [1] 罗建, 刘勋等. B&K2034 双通道信号分析仪和 PC 微机的通讯及应用[J]. 数据采集与处理, 1999, 14(3): 370-373.
- [2] F. J. Fahy. Measurement of acoustic intensity using the cross-spectral density of two microphone signals[J]. J. Acoust. Soc. Am, 1977, 62(4): 1057-1059.
- [3] J. Y. Chung. Cross-spectral method of measuring acoustic intensity without error caused by instrument phase mismatch[J]. J. Acoust. Soc. Am, 1978, 64(6): 1613-1616.
- [4] J. C. Pascal, C. Carles. Systematic measurement errors with two microphone sound intensity meters[J]. Sound Vib, 1982, 83(1): 53-65.
- [5] 甘常胜. FFT 分析仪-微机声强测量系统及其应用[J]. 应用声学, 1989, 8(5): 4-15.