

# 线阵波束形成声强缩放方法估算声源的辐射声功率<sup>\*</sup>

岳 舒<sup>1</sup> 侯 宏<sup>1†</sup> 王 谦<sup>2</sup>

(1 西北工业大学 航海学院 海洋声学信息感知工业和信息化部重点实验室 西安 710072)

(2 中国船舶重工集团公司第七〇五研究所 水下信息与控制重点实验室 西安 710075)

2019 年 1 月 21 日收到

2019 年 5 月 7 日定稿

**摘要** 为了解决波束形成声源识别过程中声源辐射声功率定量计算的问题,给出了阵型简洁、便于组合的线阵声强缩放模型。通过推导线阵的声强缩放系数,建立起线阵波束输出结果与声源辐射声功率之间的换算关系。无论是线阵还是平面阵的声强缩放方法,对于偏离阵列中心位置较远处的声源进行辐射声功率估算时都存在较为明显的误差。通过理论推导和仿真模拟计算,研究了同一单极子点声源在不同位置处的声功率估算偏差随频率、幅度的变化规律,发现该估算偏差只与声源偏离位置有关,而与声源自身的强度信息无关的结论,据此给出了相应的声功率估算修正方法。半消声室实验结果和声压法测量结果对比表明:修正后的线阵声强缩放方法用于中高频声源的辐射声功率计算时,单频声源的估算误差不超过 1.0 dB,宽带声源的估算误差不超过 1.8 dB。

PACS 数: 43.60, 43.58, 43.50

## Estimation of the radiated sound power by linear array beamforming sound intensity scaling method

YUE Shu<sup>1</sup> HOU Hong<sup>1</sup> WANG Qian<sup>2</sup>

(1 Key Laboratory of Ocean Acoustics and Sensing, Ministry of Industry and Information Technology,  
School of Marine Science and Technology, Northwestern Polytechnical University Xi'an 710072)

(2 Key Laboratory of Underwater Information and Control, Institute of 705 Research,  
China Ship Scientific Research Center Xi'an 710075)

Received Jan. 21, 2019

Revised May 7, 2019

**Abstract** A sound intensity model was proposed which is constructed by concise linear array. The quantitatively calculation for radiated sound power can be implemented by the proposed model in the process of sound source identification by using beamforming technology. The sound intensity scaling factor in the linear array was deduced, and the conversion relation between the outcomes of the linear array beamforming and the radiated sound power was further established. For both linear array and planar array, it exists obvious error in estimation of radiated sound power by using sound intensity scaling method when sound sources are located far distance from the center of the array. By using theoretical derivation and simulation calculation, the variation of sound power estimated error for the single monopole point source at different positions was investigated with various frequency and amplitude. It can be concluded that the estimated deviation is only related to the position of the sound source rather than the intensity information of the sound source. The corresponding correction method was proposed accordingly. By comparison between the experimental results of semi-anechoic chamber and the measurement results of sound pressure method, it shows that the developed sound intensity scaling method based on the linear array can be used to calculate the radiated sound source power in

<sup>\*</sup> 国家重点研发计划项目 (2016YFF0200902) 和重点实验室基金计划项目 (705JCH2017-1.2) 资助

<sup>†</sup> 通讯作者: 侯宏, houhong@nwpu.edu.cn

medium and high frequency range. The estimated error is limited in 1.0 dB for single frequency sound source, and 1.8 dB for wideband sound source.

## 引言

声功率作为对噪声源辐射强度与特性的定量描述是评价降噪效果的重要参量,也是声源识别的主要内容<sup>[1-8]</sup>。波束形成方法以其计算量小、中高频分辨率高、复杂测试环境下稳健性好等诸多优点,广泛应用于航空、航海、汽车等各领域的噪声源识别<sup>[8-26]</sup>。然而,波束输出结果仅能反映目标声源在传声器阵列平面的相对声压贡献量,而并非声源自身绝对的辐射强度信息<sup>[8,23]</sup>。如何在运用波束形成方法进行噪声源方位识别的同时,能有效地估算出目标声源辐射声功率?这一问题引起了广泛的关注与研究。

Hald<sup>[23-24]</sup>提出了声强缩放方法,通过引入声强缩放系数,将声源在传声器阵列平面的声压量转化为声源表面的等效声强量,然后通过该等效声强量在主瓣区域内的面积分来获得目标声源的辐射声功率估算结果,从而建立起波束输出结果与声源辐射声功率之间的关系。褚志刚<sup>[8]</sup>等指出了Hald在理论建模时忽略了声压幅值与实际测试时所采集到的声压有效值之间的差异以及在与声强法进行结果对比时存在着“半球遗漏”的问题,给出了修正后的声强缩放方法,并将该方法应用于柴油机噪声源识别与局部辐射声功率的计算,取得了良好的效果。

无论是Hald的原始理论还是褚志刚修正后的声强缩放方法都是基于二维平面阵列进行理论建模,并未涉及到一维线阵的声强缩放模型的理论推导。线阵作为阵列测试中一类常用的阵列型式,具有阵型简洁、组合方便、便于携带等诸多优点<sup>[25]</sup>,在实际应用中非常重要。因此,将声强缩放方法进行一维建模是很有必要的。另外,Hald和褚志刚的声强缩放方法都是以声源正对阵列中心位置进行理论推导建模,没有考虑声源偏离阵列中心的情况。在实际中,通常涉及到多个声源(或分布声源)的方位识别与强度估计。由于测试距离的限制,并不能保证每个声源都近似位于阵列中心附近。若声源偏离阵列中心位置较远,仍然用传统的声强缩放方法进行声源辐射声功率估算会出现较大的误差。该误差的分析与修正,对于声强缩放方法的实际应用具有重要意义。

本文通过对线阵波束输出结果与声源辐射声功率之间的换算关系进行了理论推导,给出了声强缩放方法的一维线阵模型。通过对单极子点声源的仿真模拟计算,分析了声源频率、测试距离等因素对声

源辐射声功率估算精度的影响。针对声源偏离阵列中心位置时,利用声强缩放方法来估算声源辐射声功率会出现明显误差的情况,通过理论推导和仿真计算,研究同一单极子点声源在不同位置处辐射声功率的估算误差随声源频率、幅值的变化规律,并分析该条件下声强缩放方法估算误差的来源,从而给出相应的修正方法。在半消声室中,分别用线阵声强缩放方法对单频以及宽带声源进行识别和辐射声功率的计算,并与声压法的测量结果进行对比分析,验证了线阵声强缩放模型的正确性和估算误差修正方法的有效性。修正后的线阵声强缩放方法为线阵波束形成声源识别过程中辐射声功率的计算提供了有效的解决途径。

## 1 线阵波束形成声强缩放理论

声强缩放方法建立起阵列波束形成输出结果与声源局部辐射声功率之间的关系,其本质是通过构造声强缩放系数对传声器阵列的常规波束形成输出结果进行缩放,将由阵列获得的声压量转化为声源对应的辐射声强量,以满足该声强量在其空间谱的主瓣圆区域的面积分结果与声源在传声器阵列侧的半球辐射声功率的相等关系。

为了推导线阵对应的声强缩放系数,构造如图1所示的波束形成声源识别模型。图1中所示线阵的阵元数为 $M$ 、间距为 $d$ 。以传声器阵列所在直线作为坐标系的 $x$ 轴,以阵列的中心位置为原点,声源平面与阵列平面之间的距离为 $L$ , $L$ 足够大以保证线阵各传声器处所接收到的声波为平面波。

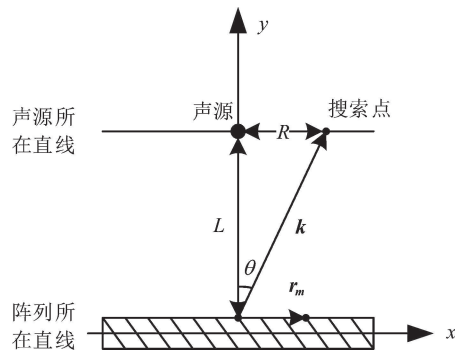


图1 线阵波束形成声源识别模型

假设原点参考位置处的声压为 $P_e$ ,则有效幅值为 $|P_e|$ , $\theta$ 为聚焦方向与法线方向的夹角, $\omega$ 为声源的角频率, $\lambda$ 为入射源的波长, $c$ 为声速, $r_m$ 为第 $m$ 号传声器的位置向量( $m=0,1,\dots,M-1$ ), $k$ 为

聚焦方向的波数向量,  $\mathbf{k}_0$  为声源入射方向的波数向量,  $k=\omega/c$  为波数, 定义  $W(\mathbf{K})$  为阵列模式, 用来表达阵列在声源计算平面上各搜索点处的波束输出结果, 它体现了阵列中各传声器的布置情况以及相应的加权情况。其中  $\mathbf{K}$  为聚焦方向的波数向量与声源入射方向的波数向量之差, 则常规波束形成输出结果为:

$$B^2(\theta, \omega) = |P_e|^2 |W(\mathbf{K})|^2, \quad (1)$$

$$|W(\mathbf{K})| \equiv \frac{1}{M} \sum_{m=0}^{M-1} e^{j\mathbf{K} \cdot \mathbf{r}_m} = \frac{1}{M} \sum_{m=0}^{M-1} e^{j(\mathbf{k}-\mathbf{k}_0) \cdot \mathbf{r}_m}, \quad (2)$$

其中:

$$\mathbf{r}_m = (x_m, 0), \quad x_m = \left(m - \frac{M-1}{2}\right) d. \quad (3)$$

联立式 (1) 和式 (2) 以及式 (3) 可得:

$$|B(\theta, \omega)| = \frac{1}{M} |P_e| \sum_{m=0}^{M-1} e^{j x_m \sin \theta (\omega/c)} = \frac{1}{M} |P_e| \left| \frac{\sin(Mkd \sin \theta / 2)}{\sin(kd \sin \theta / 2)} \right|. \quad (4)$$

阵列模式的第一个零点位置为:

$$\theta_1 = \arcsin \frac{\lambda}{Md}. \quad (5)$$

当  $\theta$  非常小时,  $\sin \theta \approx \tan \theta = R/L$ , 则阵列的波束输出可近似为:

$$B(R, \omega) = |P_e| \frac{1}{M} \left| \frac{\sin(Mkd \sin \theta / 2)}{\sin(kd \sin \theta / 2)} \right|, \quad (6)$$

则等效主瓣圆半径:

$$R_1 \approx L \sin \theta_1 = \frac{\lambda L}{Md}. \quad (7)$$

将线阵的波束形成空间谱绕中轴旋转立体化, 这样可以利用波束输出结果 (具有声强意义的参量) 在等效主瓣圆内做面积分, 得到的结果是具有声功率意义的参量, 物理意义明确, 从而建立线阵波束输出结果与声源局部辐射声功率之间的关系。假设线阵的声强缩放系数为  $\alpha$ , 则缩放声强量可以表示为:

$$I_{\text{scaled}}(\omega, R) = \alpha B^2(\omega, R). \quad (8)$$

将转换后的空间谱在等效主瓣圆内进行面积分:

$$W_h = \int_0^{R_1} \int_0^{2\pi} \alpha B^2(\omega, R, \varphi) R dR d\varphi = 2\pi \alpha |P_e|^2 \int_0^{R_1} \left| \frac{\sin(Mkd \sin \theta / 2)}{M \sin(kd \sin \theta / 2)} \right|^2 R dR. \quad (9)$$

声源在阵列侧的半球辐射功率可以表示为:

$$W_h = 2\pi L^2 I = 2\pi L^2 \frac{|P_e|^2}{\rho_0 c_0}. \quad (10)$$

由式 (9) 和式 (10) 可得出线阵所对应的缩放系数  $\alpha$  的表达式为:

$$\alpha = \frac{L^2}{\rho_0 c_0 \int_0^{R_1} \left| \frac{\sin(Mkd \sin \theta / 2)}{M \sin(kd \sin \theta / 2)} \right|^2 R dR}. \quad (11)$$

虽然式 (11) 中涉及到的积分没有解析解, 但通常在进行声源识别实验之前, 往往是先通过所获得的声源频率等参数信息来设计阵列, 然后进行实验, 也即阵列参数  $M$  和  $d$ 、测试距离  $L$ 、波数  $k$  等这些量是确定的。那么由式 (7) 可知, 等效主瓣圆半径  $R_1$  也随之确定。这些参量都确定后, 可利用数值计算方法获得式 (11) 的解, 从而求得阵列所对应的缩放系数  $\alpha$ 。

下面给出线阵声强缩放方法估算声源局部辐射声功率的具体实现过程: 首先, 将阵列接收到的信号用除自谱的互谱波束形成算法进行处理<sup>[26]</sup>, 获取相应的空间谱; 其次, 根据式 (7) 来确定等效主瓣圆半径, 根据阵列参数、声源参数、测试距离等信息, 通过 MATLAB 计算式 (11) 中所涉及积分的数值解, 进而求出相应的声强缩放系数  $\alpha$ ; 然后, 利用声强缩放系数  $\alpha$  将波束输出结果缩放为等效声强量, 并将缩放后的空间谱旋转一周得到等效立体空间谱, 并在等效主瓣圆区域内进行面积分 (可以利用各搜索点处旋转划分成的小圆环面积与相应的等效声强量的乘积的数值求和), 得出目标声源在阵列侧的辐射声功率的估算值。

## 2 误差分析与修正

无论是 Hald 所提出的声强缩放方法, 还是褚志刚对其进行“半球修正”后的声强缩放方法, 都是基于远场条件、声源正对阵列中心位置的情况下进行理论推导来获得声强缩放系数。在实际应用中, 通常涉及到多个声源的识别。由于实际测试距离的限制, 不能保证每个声源都位于阵列中心附近。若声源偏离阵列中心位置较远 (相对于一定的测试距离  $L$ ), 下面分析此情况下声源局部辐射强度估算的误差。

图 1 中, 假设有效幅值为  $|P_e|$  的平面波的方位角为  $\theta_0$  (与线阵法线方向的夹角), 以最左边的阵元 (0 号阵元) 作为参考阵元, 用  $\theta$  表示阵列聚焦方向, 那么第  $m$  号阵元的时延为:

$$\tau_m = \frac{md \sin \theta_0}{c}, \quad m = 0, 1, 2, \dots, M-1, \quad (12)$$

则阵列的波束输出结果为:

$$|B_1(\theta, \omega)|^2 = \left| \frac{1}{M} \sum_{i=0}^{M-1} w_m |P_e| e^{-j\omega\tau_m} \right|^2 = |P_e|^2 \left| \frac{\sin[Mkd(\sin\theta - \sin\theta_0)]}{M \sin[kd(\sin\theta - \sin\theta_0)]} \right|^2. \quad (13)$$

当声波垂直入射时, 此时阵列的波束输出结果为:

$$|B_0(\theta, \omega)|^2 = \left| \frac{1}{M} \sum_{i=0}^{M-1} w_m |P_e| e^{-j\omega\tau_m} \right|^2 = |P_e|^2 \left| \frac{\sin(Mkd \sin\theta/2)}{M \sin(kd \sin\theta/2)} \right|^2. \quad (14)$$

在近场条件下, 也即测试距离  $L$  确定的情况下, 将角度搜索换算为按网格点搜索, 则:

$$|B(R, \omega)|^2 = |B(R, \omega)|^2 \Big|_{\theta=\arctan R} = |P_e|^2 f(R, \omega), \quad (15)$$

其中:

$$f(R, \omega) = \left| \frac{\sin[Mkd(\sin(\arctan R) - \sin\theta_0)]}{M \sin[kd(\sin(\arctan R) - \sin\theta_0)]} \right|^2. \quad (16)$$

基于声强缩放理论的局部声功率估算结果是通过缩放后的波束输出结果在等效主瓣圆区域内的积分可表示为:

$$W = \sum \alpha B(R, \omega)^2 \Delta S, \quad (17)$$

其中,  $\Delta S$  是搜索点处所对应网格点面积, 仅与搜索步长的设置有关。那么同一声源在偏离阵列中心位置较远处估算结果与正对阵列中心位置的估算结果差值用分贝表示:

$$\Delta L_W = L_{W_1} - L_{W_0} = 10 \lg \frac{W_1}{W_0} = 10 \lg \frac{\sum f_1(R, \omega) \Delta S}{\sum f_2(R, \omega) \Delta S}. \quad (18)$$

而声强缩放系数  $\alpha$  是基于声源正对阵列中心位置进行理论推导获得, 因此  $L_{W_0}$  可以近似看作是声源局部辐射声功率的准确值。那么当声源偏离阵列中心较远处, 仍用  $\alpha$  来缩放声源的波束输出结果, 所造成的偏差  $\Delta L_W$  仅与声源具体偏离的位置有关, 而与声源的强度无关。

下面给出在实际实验中该误差的具体修正方法: (1) 通过波束形成定出目标声源位置, 并用基于声强缩放理论的源强估算方法得到该声源局部声功率的初始估算结果  $L_W$ ; (2) 通过对相同条件下, 相同位置单位强度的单极子点源进行仿真模拟计算, 得

到该位置处声源局部声功率的计算偏差  $\Delta L_W$ ; (3) 用得到的估算误差  $\Delta L_W$  来修正步骤 (1) 中的初始估算结果, 即可得到目标声源修正后的局部辐射声功率估算结果  $L'_W$ 。

### 3 仿真分析

前面给出了线阵声强缩放方法的理论推导, 针对该方法在声源偏离阵列中心较远的情况下进行了误差分析并提出了相应的修正方法。下面通过对单极子点源的仿真模拟计算进行进一步的验证与分析。如图 1 所示以阵元间距为 0.04 m 的 20 阵元的线性传声器阵列为例假设阵列平面到声源计算平面的距离为  $L$  声源频率为  $f$ 、信噪比为 10 dB、声速取 340 m/s、空气密度  $\rho$  取 1.293 kg/m<sup>3</sup>、声源半径  $r_0$  取 0.001 m、振速  $u_a$  取 100 m/s。具体仿真流程如下: 首先根据球面波传播原理计算各阵元接收到的声压信号; 其次对阵列接收到的声信号进行波束输出得到相应的空间谱, 并根据式 (7) 和式 (11) 分别确定等效主瓣圆半径  $R_1$  与声强缩放系数  $\alpha$ ; 然后, 将缩放后的空间谱旋转后在等效主瓣圆内进行面积分所得的结果即为声源在阵列侧的局部辐射声功率估算值; 最后, 通过式 (10) 得到的单极子点源理论半球辐射声功率结果作为参考值, 以二者的分贝差值作为估算偏差的评价量, 绘制不同频率条件下, 估算偏差随测试距离  $L$  的变化曲线, 如图 2 所示。可以看出, 在测试距离一定的条件下, 声源频率越高, 估算偏差越低, 这是波束形成算法在中高频分辨率较好而在低频分辨率较差的固有特性所决定的。声强缩放方法是基于窄主瓣条件, 声源频率越低, 波束形成空间谱的主瓣宽度越大, 从而导致估算偏差就随之增大, 而在实际阵列测试中, 波束形成方法通常多用于中高频声源的识别。另一方面, 随着测试距离的逐渐增大, 估算偏差随之降低并逐渐趋于平缓, 这是因为测试距离越远, 阵列接收到的声信号就越接近平面波, 而声强缩

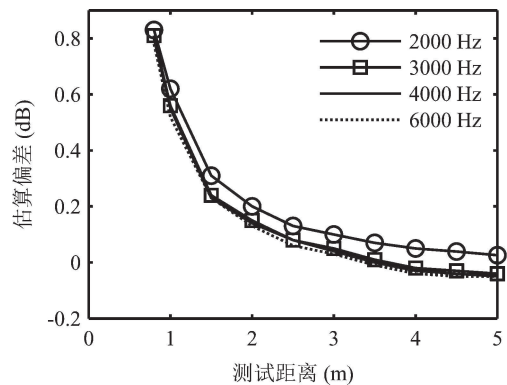


图 2 点声源辐射声功率估算误差曲线

放方法就是基于平面波假设进行理论推导。在实际情况中, 尽可能保证在远场条件下进行测试, 同时也要根据测量环境条件以及声源识别算法的分辨率等因素进行综合考虑, 从而选择合适的测试距离。结果表明, 在 0.8 m 到 5 m 整个测试距离范围内, 最大估算偏差仅在 0.8 dB 左右, 而当测试距离大于 2 m 时, 估算偏差不超过 0.1 dB。因此, 线阵声强缩放方法可以比较准确地估算出目标声源的局部辐射声功率。

上述声源局部辐射功率的计算是基于单个声源正对阵列中心位置的条件下进行。实际情况中往往涉及到多个声源的识别, 由于测量环境条件的限制, 并不能保证每个声源都近似位于正对阵列中心附近, 从而导致估算结果出现较为明显的误差。为解决这一问题, 第 2 节给出了误差分析与修正方法。为了验证该方法的有效性, 仍以图 1 为例, 以阵列方向为  $x$  轴, 阵列中心位置为原点, 在保持其它条件不变的情况下, 仅改变声源的位置, 仍然用声强缩放法理论推导的缩放系数进行波束形成空间谱与声源辐射声功率之间的换算, 得到声源在不同位置处对阵列侧的半球辐射声功率估算值, 具体仿真计算流程与之前类似。图 3 为不同的频率、幅度条件下, 声源局部辐射功率的估算误差随声源位置的变化曲线, 其中单

位幅度  $A_0$  为基准幅度。可以看出, 在声源频率 (幅度) 一定时, 局部声功率的计算误差随声源位置的改变而变化, 并且该变化关于中心位置是对称的, 这是因为阵列对称的缘故, 即声源向  $x$  轴正、负方向偏离是等效的。而对于同一位置, 改变声源频率 (幅度), 其计算误差基本保持不变。综上所述, 当声源偏离阵列中心位置的情况下, 仍然用声强缩放方法进行声源局部辐射声功率的估算时, 其估算误差仅与声源所偏离的位置有关, 而与声源自身的辐射强度信息无关。这与第 2 节误差分析得到的结论是一致的。因此, 在实际的声源识别过程中, 首先通过波束形成识别出各声源的位置; 然后通过在不同条件下, 对单位强度的单极子点声源的仿真模拟计算得到该位置处对应的修正量; 最后利用声强缩放法进行局部辐射功率的估算并进行修正, 最终得到的结果即为目标声源局部辐射功率的估算值。

## 4 实验验证

在半消声室进行了线阵声强缩放方法估算声源辐射声功率的实验, 并将估算结果与声压法测量结果进行对比。如图 4 所示, 实验所选用阵列参数与第 3 节仿真中相同, 采用蓝牙音响 BV210 作为模拟声源, 用 B&K 公司的 3560B 采集系统配合 Pulse 软件进行数据的采集。绿色声源置于正对阵列中心位置, 红色声源偏离约 0.6 m, 声源到阵列的测试距离约为 1.8 m。两声源同时发射不同频率的单频信号, 通过各阵元接收的声信号数据分别计算出两声源在阵列侧的辐射声功率, 具体计算流程与之前仿真模拟计算相同。另外, 利用声压法测量声功率, 分别获得两声源单独发声时的辐射声功率, 并作为对比参考值。图 5 为两声源在各频率处的计算结果, 可以看出, 声强缩放法对声源局部辐射声功率的估算结果和声压法测量结果在中高频条件下吻合较好, 低频处略有偏差。这是因为“高频好分辨率, 低频差分辨率”的固有特性, 波束形成对于低频声源所获得的空间谱主瓣宽度较大、分辨率较低, 导致在主瓣圆内相应的数值积分偏差也随之增大, 与之前的仿真结果有着类似的结论。中高频段两者基本保持一致, 偏差是由于实验过程中不可避免的测量误差所引起的。对于偏离阵列中心位置的红色声源, 如果仍然按照传统的声强缩放方法, 直接用缩放后的波束输出结果进行数值积分求和的结果作为声源辐射声功率的估算值, 而不对其进行修正, 可以看出, 得到的声源辐射声功率估算结果与声压法测量结果相比, 有着较为明显的偏差, 低频甚至超出 3.5 dB, 而经过本文

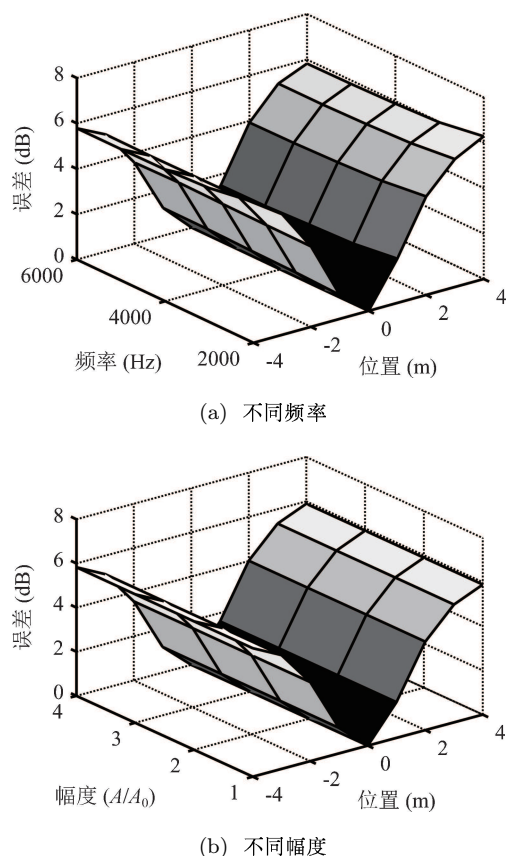


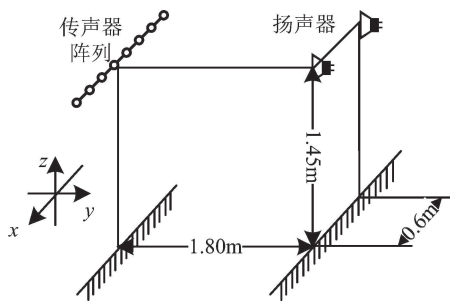
图 3 不同声源条件下, 估算误差随声源位置变化曲线



所提出的修正方法进行修正后的估算结果则更加接近声压法测量结果。因此,在利用波束形成对偏离阵列中心较远处的声源进行识别时,声强缩放方法的合理修正对于声源辐射声功率的准确计算是非常有必要的。总体来讲,半消声室实验中双声源的局部辐射声功率估算结果的最大误差不超过 2.3 dB,在中高频条件下,该误差仅在 1.0 dB 以内。实验证明,修正后的线阵声强缩放方法能够准确地估算出偏离中心位置的声源局部辐射声功率。

为了探究线阵声强缩放方法对于宽带源的适用

性,用绿色蓝牙音箱分别发射 3 个不同频带范围的随机宽带噪声信号 A(3000 ~ 4000 Hz), B(3000 ~ 5000 Hz), C(4000 ~ 5000 Hz)。以随机宽带声源 A 为例,具体的实验数据处理流程如下:首先,将传声器采集到的声压数据进行处理获得相应的频谱,如图 6 所示;其次,在频谱中的每一个频点处进行波束形成,并计算对应的缩放系数以及确定相应的积分范围并等效旋转积分;然后,将各频点处的积分结果进行求和,得到目标声源局部声功率的估算结果。图 7 给出了 3 种情况下的声源辐射功率的估算结果。

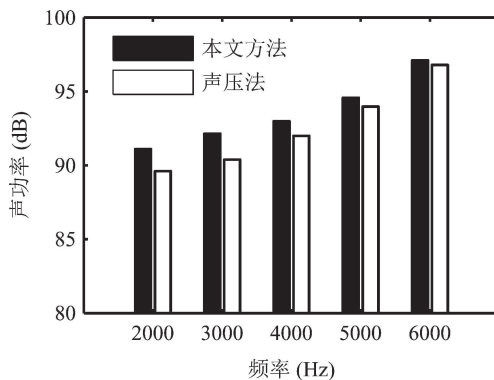


(a) 几何示意图

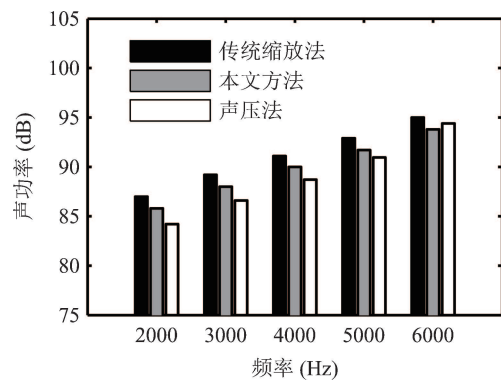


(b) 实验照片

图 4 消声室源强估算实验



(a) 绿色声源



(b) 红色声源

图 5 声源局部辐射功率估算结果

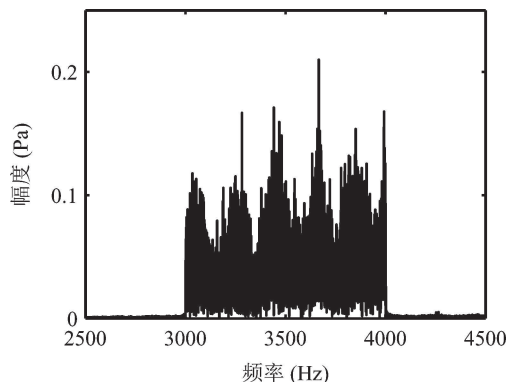


图 6 A 声源频谱图

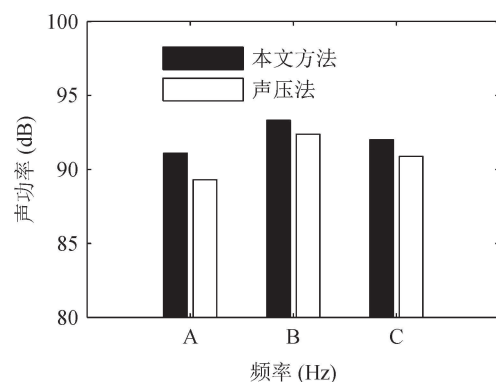


图 7 宽带源辐射功率估算结果

可以看出, 对于 3 个不同频带范围的声源 A, B, C, 声强缩放方法估算结果与声压法测量结果基本保持一致, 最大偏差不超过 1.8 dB。实验验证了线阵声强缩放方法同样适用于宽带声源辐射功率的估算。

## 5 结论

本文给出了声强缩放方法的一维线阵模型, 并针对声强缩放方法用于偏离阵列中心较远的声源辐射声功率估算时存在较大误差的问题, 提出了相应的修正方法, 拓宽了声强缩放方法的应用范围。所取得的结论如下: (1) 单极子点源的仿真模拟计算结果显示, 线阵声强缩放方法用于声源辐射声功率的估算时, 误差随测试距离的增大而减小最终趋于平缓, 最大误差不超过 0.8 dB, 当远场条件测试时, 该误差不超过 0.1 dB。表明线阵声强缩放方法可以有效地估算声源的辐射声功率。(2) 不同位置处的单极子点源仿真计算结果显示, 测试距离一定时, 偏离阵列中心位置的声源辐射声功率估算误差随着声源偏离位置增大而增大, 而与声源自身的辐射强度无关, 证明了通过理论推导所提出修正方法的合理性和可行性。(3) 半消声室实验估算结果与声压法测量结果对比显示, 修正后的声强缩放方法的估算结果与传统声强缩放法相比, 更加接近声压法测量结果, 验证了线阵声强缩放模型的正确性和修正方法的有效性。表明修正后的线阵声强缩放方法可以准确地估算单频、宽带声源的辐射声功率, 在中高频条件下, 单频声源估算误差不超过 1.0 dB, 宽带声源估算偏差不超过 1.8 dB。

修正后的线阵声强缩放方法不受传统声强缩放方法对于被估算声源位置的限制和平面阵型的限制, 可以利用阵型更为简洁的线阵进行波束形成声源部位识别的同时, 准确地计算出任意可识别位置处声源的辐射声功率, 拓宽了声强缩放方法的应用范围, 测量简单、便于实现、结果可靠, 有一定的实用价值。

## 参 考 文 献

- 钱正莲, 杨亦春, 余立志. 传声器阵列对高频弱声源的声成像识别方法. 声学学报, 2015; **40**(1): 90—96
- 赖少将, 舜韶. 基于近场声阵列的旋转机械噪声源识别. 噪声与振动控制, 2016; **36**(3): 122—126
- 柯炜, 张铭, 张铁成. 一种利用分布式传声器阵列的声源三维定位方法. 声学学报, 2017; **42**(3): 361—369
- 黄朝慧, 刘伟, 张晋源. 一种有效抑制阵列后方声源的心形指向性传声器阵列. 声学技术, 2017; **36**(1): 81—87
- Gauthier P A, Camier C, Pasco Y *et al.* Beamforming regularization matrix and inverse problems applied to sound field measurement and extrapolation using microphone array. *J. Sound Vib.*, 2011; **330**(24): 5852—5877
- Sarradj E. A fast signal subspace approach for the determination of absolute levels from phased microphone array measurements. *J. Sound Vib.*, 2010; **329**(9): 1553—1569
- Malgoezar A M, Snellen M, Merinomartinez R *et al.* On the use of global optimization methods for acoustic source mapping. *J. Acoust. Soc. Am.*, 2017; **141**(1): 453—465
- 褚志刚, 杨洋. 基于波束形成缩放声强的声源局部声功率计算. 声学学报, 2013; **38**(3): 265—271
- 谢雨轩, 车驰东. 改进的波束形成算法及其在声源定位中的应用. 噪声与振动控制, 2018; **38**(4): 68—72
- 鄢社锋, 马远良, 孙超. 任意几何形状和阵元指向性的传感器阵列优化波束形成方法. 声学学报, 2005; **30**(3): 264—270
- Xenaki A, Gerstoft P, Mosegaard K. Compressive beamforming. *J. Acoust. Soc. Am.*, 2014; **136**(1): 260—271
- 王昊, 马启明. 协方差矩阵重构的稳健自适应波束形成算法. 声学学报, 2019; **44**(2): 170—176
- 李文兴, 毛晓军, 翟助群. 一种导向矢量双层估计的稳健波束形成算法. 哈尔滨工程大学学报, 2018; **39**(3): 594—600
- 郭拓, 王英民, 任笑莹. 采用空间谱加权稀疏约束的稳健 Capon 波束形成方法. 声学学报, 2018; **43**(4): 612—619
- 翟春平, 张明伟, 刘雨东. 近场浅海舰船目标定位精度实验研究. 声学学报, 2013; **38**(3): 281—286
- 肖栋, 向阳, 卓瑞岩. 基于波束形成的多类型声源定位研究. 应用声学, 2017; **36**(3): 220—227
- Padois T, Gauthier P A, Berry A. Inverse problem with beamforming regularization matrix applied to sound source localization in closed wind-tunnel using microphone array. *J. Sound Vib.*, 2014; **333**(25): 6858—6868
- 朱少豪, 汪勇, 杨益新. 圆柱阵子阵分级处理的稳健超指向性波束形成方法. 声学学报, 2018; **43**(4): 600—611
- 谢建平, 王瑞, 何熊熊. 利用导向向量旋转和联合迭代优化的自适应波束形成算法研究. 声学学报, 2016; **41**(3): 343—352
- Pavlidis D, Griffin A, Puigt M *et al.* Real-time multiple sound source localization and counting using a circular microphone array. *IEEE Trans. Audio Speech Lang. Process.*, 2013; **21**(10): 2193—2206
- 张志飞, 陈思, 徐中明. 双面声阵列波束形成的正则化改进算法. 声学学报, 2017; **42**(2): 178—185
- 黄聪, 李迪. 基于相干抑制的时域恒定束宽波束形成. 哈尔滨工程大学学报, 2017; **38**(1): 25—30
- Hald J. Estimation of partial area sound power data with beamforming. Proceedings of the Internoise 2005, Rio de Janeiro, Brazil, 2005
- Hald J. Combined NAH and Beamforming using the same microphone array. *Sound Vib.*, 2004; **38**(12): 18—27
- Hu Y, Zhou H, Lu J *et al.* Effects of a near-field rigid sphere scatterer on the performance of linear microphone array beamformers. *J. Acoust. Soc. Am.*, 2016; **140**(2): 924—935
- Christen J J, Hald J. Improvement of cross spectral beamforming. Proceedings of Internoise 2003, Jeju, South Korea, 2003