Journal of Applied Acoustics

◇ 研究报告 ◇

# 基于波束形成的多类型多声源定位研究\*

肖 栋<sup>1,2</sup> 向 阳<sup>1,2†</sup> 卓瑞岩<sup>1,2</sup> 王 磊<sup>1,2</sup>

(1 武汉理工大学能源与动力工程学院 武汉 430063)(2 武汉理工大学船舶动力系统运用技术交通行业重点实验室 武汉 430063)

**摘要**为实现空压机多噪声源的准确定位,仿真对比了多种近场球面波多声源定位算法。基于时域波束形成,研究了相同声源平面、不同声源频率、不同声源纵向距离、不同声源强度下多声源定位以及声源频率、声源纵向距离和声源强度多因素联合的多声源定位仿真方法,模拟了更接近实际的噪声源类型。基于频域波束形成, 仿真研究了1400 Hz,2400 Hz,3400 Hz,4400 Hz 的多声源。分别利用互功率谱波束形成和除自谱的互功率谱 波束形成,仿真研究了相干声源和不相干声源。开发了阵列声成像测试平台,运用频域波束形成和功率谱波束 形成对空压机进行了定位试验研究。结果表明,1400 Hz 下空压机的主要噪声源是气缸盖、空气滤清器和曲轴 附近的机体,这可为空压机减振降噪改进设计提供依据。

关键词 多声源定位,波束形成,传声器阵列,空压机

中图分类号: TB53 文献标识码: A 文章编号: 1000-310X(2017)03-0220-08 DOI: 10.11684/j.issn.1000-310X.2017.03.005

## Localization of multiple sound source with multi-type based on beamforming

XIAO Dong<sup>1,2</sup> XIANG Yang<sup>1,2</sup> ZHUO Ruiyan<sup>1,2</sup> WANG Lei<sup>1,2</sup>

(1 School of Energy and Power Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China)

(2 Key Laboratory of Marine Power Engineering & Technology, Ministry of Communications, Wuhan 430063, China)

**Abstract** To realize multiple sound source localization accurately, simulation of multiple spherical wave sound source localization with multiple algorithms were compared. Based on time-domain beamforming, the simulation results of multiple sound sources on a same sound source plane, multiple sound source with different frequency, sound source longitudinal distance, intensity of sound source and multiple factors variation at the same time were obtained with more types of multiple sound sources than before. Based on frequency-domain beamforming, the simulation results of multiple sound sources at the frequency of 1400 Hz, 2400 Hz, 3400 Hz, 4400 Hz were obtained. Based on power spectrum beamforming, simulation results of coherent and incoherent sound source localization with cross-spectrum and cross-spectrum without auto-spectrum, were conducted, respectively. An array sound source imaging test platform was developed, and the experiment of air compressor sound source was conducted with frequency-domain beamforming and power spectrum beamforming. The main noise source of air compressor was identified, and it can offer reference for vibration and noise reduction.

<sup>2016-07-02</sup> 收稿; 2016-11-13 定稿

<sup>\*</sup>国家自然科学基金项目(51279148)

作者简介:肖栋 (1990-),男,湖北武汉人,硕士研究生,研究方向:噪声与振动控制。

<sup>†</sup>通讯作者 E-mail: yxiang@whut.edu.cn

# 1 引言

空压机作为船舶机舱的主要噪声源之一,其噪 声源定位识别研究能为空压机进一步的减振降噪 改进设计指明方向。目前,在机械设备噪声源定位 识别中,应用较多的方法主要包括:声强扫描法、近 场声全息技术以及波束形成技术。其中,声强扫描 法用声级计等装置在靠近机器的表面进行扫描,根 据扫描结果来判断声源的位置,此方法原理简单,但 工作量大且对运行中机械进行近距离测量较危险: 近场声全息技术充分利用了声的强度和相位信息, 抗干扰能力较强,识别精度较高,但其要求全息面与 被测物体表面距离小于声波波长的1/2,且尽量与 被测物体保持共形,这在一定程度上限制了近场声 全息的实际工程应用;波束形成技术克服了声强扫 描法和近场声全息技术的上述缺陷,通过声阵列在 一定范围内的远距离测量,可以达到噪声源定位识 别的目的,此外,波束形成技术还具有中高频分辨率 高、能测量运动声源等特性[1-2],因此,波束形成技 术具有较高的研究及工程应用价值<sup>[3-5]</sup>。

随着波束形成技术实际工程应用范围的不断 扩展<sup>[6-9]</sup>,其噪声源分布特性也愈发复杂,对同时 确定多个目标方位的需求越来越迫切<sup>[10]</sup>。为了对 空压机多个噪声源进行定位识别,本文以近场球面 波多声源为对象,基于时域波束形成算法进行了相 同声源平面、不同声源频率、不同声源纵向距离下 的多声源定位,还进行了以往研究中未涉及的不同 声源强度和多因素联合的多声源定位仿真,模拟了 更接近实际的噪声源类型。同时分别利用了频域波 束形成和功率谱波束形成算法来进行声源定位仿 真,对比了各类算法的优劣。在此基础上,针对船用 CZ60/30型空压机,根据其声场环境及分析频率等 条件,设计了相应的二维网格阵列与声压采集系统, 提出了经济可行的空压机噪声源成像方案。应用上 述研究成果,对空压机多声源进行了试验研究,找出 了空压机的主要噪声源。

# 2 波束形成理论

针对近场球面波声源,常规波束形成算法是一 种经典有效的声源定位方法。球面波阵列波束形成 示意图见图1。 基于波束形成进行球面波声源定位仿真时,首 先需要建立声源模型,以空间中某位置处的球体来 模拟球面波声源模型,其辐射声压为

$$p = \frac{\rho_0 c_0 k r_0^2 u_a}{r \sqrt{1 + (kr_0)^2}} e^{\mathbf{j}(\omega t - kr + \theta)},$$
$$\theta = \arctan\left(\frac{1}{kr_0}\right), \tag{1}$$

式(1)中, $\rho_0$ 为空气密度, $c_0$ 为声速,k为波数, $r_0$ 为 球体半径, $u_a$ 为球面振速幅值, $\omega$ 为圆频率,r为空 间某处质点到脉动球源中心的距离,本文仿真计算 中以 $u_a$ 度量噪声源强度。



图1 球面波阵列波束形成示意图

Fig. 1 Diagram for spherical wave array beamforming

由如图1所示阵列模型可推导出,第m号阵元 相对于参考阵元接收同一位置处声源发出信号的 时间延迟或提前可以表示为

$$\tau_m(\mathbf{r}) = \frac{|\mathbf{r}| - |\mathbf{r} - \mathbf{r}_m|}{c_0}, \quad m = 1, 2, \cdots, M, \quad (2)$$

式(2)中,r是扫描点的位置向量,而 $r_m$ 是第m号传 声器阵元的位置向量。基于 $\tau_m(r)$ 将所有通道信号 时域波形经过"相位对齐"后再进行"加权求和"处 理,得到该扫描点处输出:

$$B(\mathbf{r},t) = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^{M} w_m p_m (t - \tau_m),$$
  

$$m = 1, 2, \cdots, M,$$
(3)

频域内各传声器阵元接收的球面波声压信号为

j

$$P_m(\omega) = \sum_i P_i \frac{\mathrm{e}^{-\mathrm{j}k|\boldsymbol{r}_i - \boldsymbol{r}_m|}}{|\boldsymbol{r}_i - \boldsymbol{r}_m|}, \qquad (4)$$

式(4)中, $P_i$ 为距离声源中心1m的球面上的声压 水平; $r_i$ 为第i号真实声源的位置向量,则频域波束 形成输出为

$$B(\boldsymbol{r},\omega) = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^{M} P_m(\omega) \mathrm{e}^{-\mathrm{j}\omega\tau_m(\boldsymbol{r})},$$
$$m = 1, 2, \cdots, M.$$
(5)

在频域波束形成的基础上,进一步在能量的角度上来分析研究,得到互功率谱波束形成输出为

$$V(\boldsymbol{r},\omega) = |B(\boldsymbol{r},\omega)|^{2}$$

$$= \frac{1}{M^{2}} \sum_{m,n=1}^{M} \boldsymbol{C}_{nm} e^{j\omega[\tau_{n}(\boldsymbol{r})-\tau_{m}(\boldsymbol{r})]}$$

$$= \frac{1}{M^{2}} \bigg\{ \sum_{m=1}^{M} \boldsymbol{C}_{mm} + \sum_{m\neq n}^{M} \boldsymbol{C}_{nm} e^{j\omega[\tau_{n}(\boldsymbol{r})-\tau_{m}(\boldsymbol{r})]} \bigg\}.$$
(6)

消除自谱元素后,除自谱的互功率谱波束形成 输出为

$$V'(\boldsymbol{r},\omega) = \frac{1}{M^2 - M} \sum_{m \neq n}^{M} \boldsymbol{C}_{nm} \mathrm{e}^{\mathrm{j}\omega[\tau_n(\boldsymbol{r}) - \tau_m(\boldsymbol{r})]},$$
(7)

式(7)中,  $C_{nm} = \overline{P_m(\omega)P_n^*(\omega)}$ 表示阵列各阵元输 出的互功率谱矩阵, 当m = n时为各阵元对应通道 的自功率谱元素, 当 $m \neq n$ 时为不同两阵元各自通 道对应的互功率谱元素。

# 3 多声源定位仿真

#### 3.1 时域波束形成多声源定位

目前许多学者对多声源定位开展了广泛的研 究,如Ric Porteous等针对偶极子气动声源进行 了声场重建<sup>[11]</sup>,Moriot J等对圆柱管道内的多声 源进行了侦测<sup>[12]</sup>。这些学者在多声源定位仿真和 试验研究中只是单一地考虑了声源频率或声源距 离,这显然不能准确地还原实际中复杂的声源转 性,因此,为更加真实地模拟实际工程应用中声源 特性,本文进行了声源强度、声源频率、声源纵向 距离以及上述因素联合的多声源定位仿真,结果如 图2所示。

图 2(a) 为相同声源平面上的多声源识别结果, 仿真中假设两声源频率同为f = 4000 Hz, 声源纵 向距离同为z = 1 m, 源强同为 $u_a = 2.5$  m/s, 分 别设置声源位置为坐标 (0,0,1) 处和坐标 (0.4,0.4,1), 识别结果显示有两个声源成像中心,表明空间存 在两个声源,与实际声源数目相符,且两个声源成 像中心对应的xy坐标分别为 (0,0) 和 (0.4,0.4), 与 两个声源的实际坐标一致;图2(b)不同频率多声源 识别结果,仿真中假设在同一平面两处存在两个不 同频率的声源,坐标(0.0.1)处声源频率为4000 Hz, 坐标(0.4,0.4,1)处声源频率为3000 Hz,识别结果 准确显示出2个声源,且对应xy坐标与实际一致; 图2(c)为不同纵向距离多声源识别结果, 仿真中 假设两声源分别在不同纵向距离(即多个声源位 于离阵列平面不同距离处),坐标分别为(0,0,1)和 (0.4,0.4,1.01), 识别结果准确显示出2个声源, 且对 应xy坐标与实际一致,但声源纵向距离较远处的声 源成像中心峰值较低,这与声源纵向距离设置有关, 经过计算发现,随着两声源纵向距离差逐渐增大,纵 向距离较远处对应的声源成像中心峰值降低,逐渐 消失;图2(d)为不同强度多声源识别结果,仿真中 可通过设置不同球源表面振速幅值 ua, 来模拟不同 强度声源,将坐标(0,0,1)处声源 ua 设置为2.5 m/s, 坐标 (0.4,0.4,1) 处声源 ua 设置为 3.5 m/s, 识别结果 准确显示出2个声源,所识别出的xy坐标与实际一 致,且表面振速较大的声源对应的声源成像中心峰 值相比表面振速较小的声源对应的峰值更大,这符 合表面振速与辐射声压成正比关系的规律。

由以上结果可知,波束形成声源定位识别结果 与声源频率、声源纵向距离和声源强度有关,为此 研究基于声源频率、声源纵向距离和声源强度的联 合声源定位仿真,以更加真实地模拟实际声源。针 对复杂多类型多声源,其声源基本参数包括声源频 率、声源纵向距离和声源强度等。由式(1)可知,声 源频率、声源纵向距离可分别通过波数*k*和空间某 处质点到脉动球源中心的距离*r*来进行设置,而声 源强度可由球面振速幅值*u<sub>a</sub>*来进行设置,通过对以 上参数的任意设置可进行多因素联合仿真定位。处 理方法简单有效,但球面振速幅值*u<sub>a</sub>*只能在一定程 度上反映声源强度,不能反映真实声强。假设两声 源频率分为3000 Hz和4000 Hz,空间坐标为(0,0,1) 和(0.4,0.4,1.01),声源表面振速分别为2.5 m/s和 3.5 m/s,仿真结果如图3所示。

图3中显示有两个声源成像中心,表明扫描 空间存在两个声源,与实际的声源数目相符。且 两个声源成像中心对应的xy坐标分别为(0,0)和 (0.4,0.4),与两个声源的实际坐标一致,声源成像中 心对应的峰值则是由声源频率、声源纵向距离和表 面振速相互作用得到的结果。





Fig. 2 Simulation results of multiple sound sources based on time-domain beamforming





Fig. 3 Simulation result of multiple sound sources with multiple factors variation

#### 3.2 频域波束形成多声源定位

声源频率分别设置为1400 Hz, 2400 Hz, 3400 Hz, 4400 Hz, 声源强度设为100 dB (即距 离声源1 m处的声压强度),设置多声源位置分别在 坐标(0,0,1.5)和(0.4,0.4,1.5)处,阵列采用11×11二 维网格阵,根据频域波束形成算法进行仿真。

由图4可知,声源成像中心峰值对应的坐标与 两个声源的实际坐标一致。表明采用频域波束形成 算法,能够准确获得多声源的声源数目和声源位置 信息。声源频率越高,则声源成像中心越窄,空间分 辨率越高,声源定位效果越好。

## 3.3 功率谱波束形成多声源定位

分别考虑相干声源和不相干声源,针对不相干 多声源,整个阵列接收多个声源辐射声压的互谱为 各声源在传声器阵列各阵元处产生声压信号的互 谱之和。而针对相干多声源,整个阵列接收多个声 源辐射声压的互谱由各声源在传声器阵列各阵元 处产生声压信号经过叠加后再求互谱得到。声源参 数与频域波束形成仿真中设置的参数一致。

#### 3.3.1 互功率谱波束形成

经过计算,得到互功率谱波束形成声源定位仿 真结果如图5所示。

82

80

0.4

0.2

0

x/m

(d) 4400 Hz

用声 3 左 9898 0.496 96 0.494 940.20.29292 90 90 y/my/m0 0 88 88 86 86 -0.2-0.284 84 82 82 -0.4-0.480 80 -0.4-0.20 0.20.4 -0.4-0.20 0.20.4x/mx/m(a) 1400 Hz (b) 2400 Hz 98 98 96 0.496 0.494 940.20.292 9290 90 y/my/m0 0 88 88 86 86 -0.2-0.284 84



-0.4

-0.2

-0.4

Fig. 4 Simulation results of multiple sound sources with frequency-domain beamforming

82

80

0.2

0

x/m

(c) 3400 Hz

0.4





Fig. 5 Simulation results of incoherent and incoherent sound sources with cross-spectrum beamforming

由图5可知,互功率谱不相干声源定位和相干 声源定位结果中声学中心与设置声源的坐标一致。 表明采用互功率谱波束形成算法,能够准确获得不 相干声源和相干声源的声源数目和声源位置。

#### 3.3.2 除自谱的互功率谱波束形成

-0.4

-0.4

-0.2

经过计算,得到除自谱的互功率谱波束形成声 源定位仿真结果如图6所示。

由图6可知,除自谱的互功率谱不相干声源定

位和相干声源定位结果中声学中心与设置声源的 坐标一致。表明采用除自谱的互功率谱波束形成算 法,能够准确获得不相干声源和相干声源的声源数 目和声源位置。

## 3.4 多声源定位算法结果对比

由3.1节、3.2节和3.3节中基于四种波束形成 算法的声源定位仿真结果可知,时域波束形成、频 域波束形成、互功率谱波束形成和除自谱的互功率



图6 除自谱的互功率谱不相干声源、相干声源定位仿真结果

Fig. 6 Simulation results of incoherent and coherent sound sources with cross-spectrum without auto-spectrum beamforming

谱波束形成能够准确识别声源的数目和声源的位置。但各算法之间存在差异,具有不同的特性,如 表1所示。

表1 波束形成算法特性

 Table 1 Performance of beamforming algorithm

算法	各通道 数据量	计算难度	算法特性
时域波束形成	单个	较简单	不能抑制噪声干扰
频域波束形成	所有	较简单	不能抑制噪声干扰
互功率谱波束形成	所有	较复杂	不能抑制噪声干扰
除自谱的互功率谱 波束形成	所有	较复杂	能抑制噪声干扰

本文对比了四种波束形成算法下多声源定位 结果,主要创新之处在于研究了相比以往研究中更 为丰富的多声源类型,基于声源频率、声源纵向距离 和声源强度进行了多种因素联合的仿真定位研究。

# 4 空压机多声源定位试验

## 4.1 阵列声成像测试平台

采用 PCB130E20 型传声器组建二维网格阵列, 考虑空压机的主要噪声频率和空间采样定理,同时 为了满足经济性需求,选用 4×3二维网格阵,其*x* 和*y*方向上的阵元间距分别为0.1 m和0.15 m。基 于该阵列搭建阵列声成像测试平台,该平台由声源、 传声器阵列、NI数据采集设备和计算机组成,由3 个 NI9234数据采集卡组建12通道,阵列声成像测 试平台示意图如图7所示。该平台是根据具体测试 方案专门定制而成,经济性好,可靠性高,定制方案 可推广于其它诸多工程实践中。



图 7 阵列声成像测试平台 Fig. 7 Array sound source imaging test platform

### 4.2 空压机多声源定位结果

空压机存在多个运动部件,各运动部件通过介 质辐射声场成为声源。第2节中对多声源定位的仿 真研究为空压机多声源定位奠定了研究基础。以船 用CZ60/30型空气压缩机为对象,利用自行搭建阵 列声成像测试平台对额定工况下运行的空压机进 行声场测量。采用4×3二维网格阵进行数据采集, 采样频率设置为51200 Hz,采样时间为4s。本文选 择空压机侧面作为测量面,这是因为空压机侧面无 障碍物,便于阵列的布置;空气压缩机侧面积比端面 积更大,能反映更丰富的空压机噪声分布结果。

利用4.1节中阵列声成像测试平台,在Lab-VIEW中利用数据采集程序模块对空压机声压信 号进行采集。将采集数据导入MATLAB中,得到各 通道时域信号,获得时域波形。同时,对其时域信号 进行多通道快速傅里叶变换得到各通道对应的频 谱图。某通道时域波形及其信号频谱如图8所示。



图 8 某通道时域波形及其信号频谱 Fig. 8 Time domain waveform and its spectrum in a certain channel

根据对该空压机的有限元模态分析结果<sup>[13]</sup>,选 取计算1400 Hz下空压机多声源分布情况,利用第 2节中各算法公式在MATLAB中进行数据处理,最 终得到空气压缩机的声源位置分布及各不同位置 的声辐射强度量化结果,见图9-图11。由于时域算 法仅利用各通道的某个采样点数据,对实际空压机 阵列声压数据进行处理时误差较大,故仅给出频域 波束形成、互功率谱波束形成和除自谱的互功率谱 波束形成算法下的声源定位结果。

由图9-图11可知,这三种算法得到的结果趋于 一致,在1400 Hz频率下,空压机声学成像中心位于 气缸盖、空气滤清器和曲轴附近,由此可以推断空压 机主要噪声源为气缸盖、空气滤清器和曲轴附近机 体,其产生的是空气动力噪声和机械噪声组成的混 合噪声;图9对应的幅值是声压级,而图10和图11 对应的幅值是声压互谱值。噪声信息存在于各通道 信号中,各通道的自噪声信号一般不相关,除去自 谱元素能够消除自通道中的噪声信息。除自谱的互 功率谱波束形成算法相比频域波束形成算法和互 功率谱波束形成算法对应的等高线的最内圈半径 更小,声源成像中心更窄,能够有效去除噪声干扰,



图 9 频域波束形成 1400 Hz 空压机声源定位结果 Fig. 9 Simulation result of air compressor sound sources with frequency-domain beamforming at 1400 Hz



图 10 互功率谱波束形成 1400 Hz 空压机声源定位 结果

Fig. 10 Simulation result of air compressor sound sources with cross-spectrum beamforming at 1400 Hz



图 11 除自谱的互功率谱波束形成 1400 Hz 空压机 声源定位结果

Fig. 11 Simulation result of air compressor sound sources with cross-spectrum without autospectrum beamforming at 1400 Hz 具有更加优良的声源定位性能。空气压缩机结构复杂,声传递路径同样复杂,而且其外表面形状不规则,对空气压缩机复杂外表面进行声源重建时,会引起误差。由于算法和阵列本身的限制,空气压缩机 声源定位结果可能会受到来自环境噪声干扰的影响、阵列性能的影响和能量泄露的影响等。

## 5 结论

(1)提出了基于声源频率、声源纵向距离和声源强度的多种因素联合的时域波束形成算法,能够 对相同声源平面、不同声源频率、不同声源纵向距离、不同声源强度下多声源定位以及声源频率、声源纵向距离和声源强度多因素联合的多声源进行 准确定位。

(2)提出并实现了一种经济可行、可广泛推广 的阵列声成像方案,开发了阵列声成像测试平台,对 空压机噪声源进行定位。结果表明,空压机主要噪 声源位于气缸盖、空气滤清器和曲轴附近机体处。

(3)由空压机声源定位结果可知,除自谱的互功 率谱波束形成算法声源成像中心更窄,能够抑制噪 声和干扰,相比其它时延求和算法性能更加优良。

## 参考文献

[1] 杨洋, 褚志刚. 反卷积波束形成识别电机冷却系噪声辐射路 径[J]. 应用声学, 2014, 33(5): 439-445.

YANG Yang, CHU Zhigang. Noise radiation path identification of motor cooling system utilizing deconvolution beamforming[J]. Journal of Applied Acoustics, 2014, 33(5): 439–445.

- [2] 杨秀庭, 孙贵青, 陈新华, 等. 矢量水听器阵列 MVDR 波束形成器的性能研究 [J]. 应用声学, 2007, 26(1): 8–15. YANG Xiuting, SUN Guiqing, CHEN Xinhua, et al. Performance of MVDR in vector hydrophone array[J]. Journal of Applied Acoustics, 2007, 26(1): 8–15.
- [3] 韩闯, 于树华, 时胜国, 等. 基于水平阵的柱面声源高分辨时 反聚焦定位方法 [J]. 振动与冲击, 2015, 34(22): 92–97. HAN Chuang, YU Shuhua, SHI Shengguo, et al. Highresolution time reversal focused localization method of cylindrical noise source with horizontal array[J]. Journal of Vibration and Shock, 2015, 34(22): 92–97.
- [4] 褚志刚,周亚男,王光建,等.基于声压球谐函数分解的球面波束形成噪声源识别[J].农业工程学报,2012,28(S1):

146 - 151.

CHU Zhigang, ZHOU Yanan, WANG Guangjian, et al. Noise source identification by spherical beamforming based on sound pressure spherical harmonics decomposition[J].Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2012, 28(25): 146–151.

- [5] WAN X, WU Z. Sound source localization based on discrimination of cross-correlation functions[J]. Applied Acoustics, 2013, 74(1): 28–37.
- [6] 郑恩明, 黎远松,陈新华,等.改进的最小方差无畸变响应波 束形成方法 [J].上海交通大学学报, 2016, 50(2): 188–193. ZHENG Enming, LI Yuansong, CHEN Xinhua, et al. Improved bearing resolution approach for MVDR beamforming[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2016, 50(2): 188–193.
- [7] 金光明,谢植,张传义. 基于麦克风阵列多声源定位的新方法[J]. 东北大学学报:自然科学版, 2012, 33(6): 769-773. JIN Guangming, XIE Zhi, ZHANG Chuanyi. A new localization method of multiple sound sources based on microphone array[J]. Journal of Northeastern University: Natural Science, 2012, 33(6): 769-773.
- [8] 伍岳,杨兵,贾少红,等.基于波束形成方法的风力机叶 片气动噪声定位研究[J].工程热物理学报,2013,34(12): 2262-2265.

WU Yue, YANG Bing, JIA Shaohong, et al. Locating of acoustic sources on wind turbine blades based on beamforming[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2013, 34(12): 2262–2265.

- [9] 陈欢,何良,杨德森,等. 基于幅度补偿的 MVDR 水下噪声源 近场定位识别方法研究 [J]. 振动与冲击, 2012, 31(2): 51–54. CHEN Huan, HE Liang, YANG Desen, et al. The research for the method of near-field localization and identification for underwater noise source with MVDR based on amplitude compensation[J]. Journal of Vibration and Shock, 2012, 31(2): 51–54.
- [10] PAVLIDI D, GRIFFIN A, PUIGT M, et al. Real-time multiple sound source localization and counting using a circular microphone array[J]. IEEE Transactions on Audio, Speech, and Language Procession, 2013, 21(10): 2193–2206.
- [11] PORTEOUS R, PRIME Z, DOOLAN C J, et al. Three-dimensional beamforming of dipolar aeroacousticsources[J]. Journal of Sound and Vibration, 2015, 355: 117–134.
- [12] MORIOT J, MAXIT L, GUYADER J L, et al. Use of beamforming for detecting an acoustic source inside a cylindrical shell filled with a heavy fluid[J]. Mechanical Systems & Signal Processing, 2015, 52–53: 645–662.
- [13] 夏雪宝,向阳. 往复式空气压缩机振动分析方法研究 [C].南 京:第四届中国船舶及海洋工程用钢发展论坛,2012.