引用格式：张智，邓建交，刘英杰，等. 交叉层波束形成方法的发动机噪声源识别[J]. 声学技术, 2021, **40**(5): 680-687. [ZHANG Zhi, DENG Jianjiao, LIU Yingjie, et al. Identification of engine noise source by beamforming based cross-layer method[J]. Technical Acoustics, 2021, **40**(5): 680-687.] **DOI**: 10.16300/j.cnki.1000-3630.2021.05.014

交叉层波束形成方法的发动机噪声源识别

张 智[1,2]，邓建交[1,2]，刘英杰[1,2]，李凌志[1,3]，安孝文[1,2]，胡宇宁[1,2]
(1. 汽车振动噪声与安全控制综合技术国家重点实验室，吉林长春 130011；2. 中国第一汽车股份有限公司研发总院 NVH 研究所，吉林长春 130011；3. 中国第一汽车股份有限公司解放事业部商用车开发院，吉林长春 130011)

摘要：发动机噪声源分布复杂，来源多，用人耳很难分辨，利用传声器阵列的噪声源识别技术可以为发动机噪声控制提供客观依据和指导。使用波束形成声源识别方法，对位于不同平面的多个声源进行了仿真识别，并研究了多维声源识别方法，使用交叉层法得到了声源定位的立体结果。结果显示，交叉层法可以有效消减或去除来自识别表面之外的声源在识别表面的虚假投影。最后，针对某发动机产品，使用平面传声器阵列对其上、前、左、右四个面分别进行一次变转速工况时域声压信号采集，使用互谱矩阵波束形成算法，得到各转速下发动机各表面的声源分布图像，并通过交叉层法得到了发动机表面声源的立体分布，准确将声源定位至发动机表面各部件。

关键词：波束形成；声源识别；延迟求和；交叉层
中图分类号：U467.4+93 **文献标识码：**A **文章编号：**1000-3630(2021)-05-0680-08

Identification of engine noise source by beamforming based cross-layer method

ZHANG Zhi[1,2], DENG Jianjiao[1,2], LIU Yingjie[1,2], LI Lingzhi[1,3], AN Xiaowen[1,2], HU Yuning[1,2]
(1. *State Key Laboratory of Integrated Technology for Vehicle Vibration, Noise and Safety Control, Changchun* 130011, *Jilin*, *China*;
2. *NVH Department of General R&D Institute of China FAW Group Co., Ltd., Changchun* 130011, *Jilin*, *China*;
3. *Commercial Vehicle Development Institute of Jiefang Business Dept., China FAW Group Co., Ltd., Changchun* 130011, *Jilin*, *China*)

Abstract: The noise sources of engine are very complex and difficult to be identified by ear. The noise source identification technique using microphone array can provide an objective basis and guidance for engine noise control. Based on beamforming technique, the multi-dimensional source recognition method is studied and the recognition of multiple sources in different planes is simulated. The cross-layer method can get the stereo results of source positioning, and it can effectively reduce or remove the false projections on the recognition surface from the sources outside the recognition surface. Finally, for a certain engine product, the plane microphone array is used to collect the sound pressure signals from the top, front, left and right sides of the engine at different speeds, and the cross-spectrum matrix beamforming algorithm is used to obtain the sound source distribution image on each engine surface and at each speed. By the cross-layer method, the stereo distribution of the sound sources on the engine surface is obtained, and the sound sources are accurately located to the corresponding parts of the engine surface.

Key words: beamforming; source recognition; delay and sum; cross-layer

0 引 言

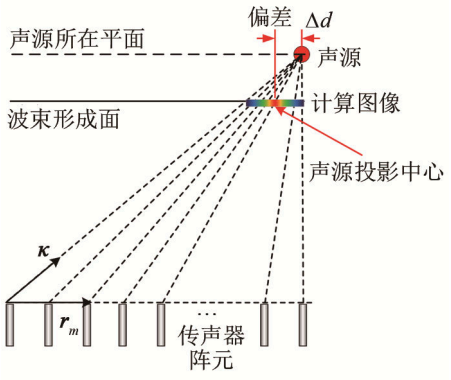
发动机是车辆最主要的噪声源之一，尤其在汽车怠速、加速工况下，发动机噪声成为整车噪声最大的来源，因此设法降低发动机噪声，是优化整车噪声水平的重要途径。由于发动机具有体积大、附件多等特点，且噪声源通常分布在发动机的各个表面上，常规的测试方法不易准确判断，为发动机噪声控制带来了一定的难度。对于整车状态的发动机噪声源定位测试，由于发动机舱内环境复杂，反射面多，且发动机侧面被遮挡，仅从发动机上表面或下表面进行识别分析往往得不到理想的结果。因此需要利用发动机台架，结合噪声源识别手段测试分析，准确识别发动机表面的声源分布及特征，从而为进一步的发动机噪声控制优化提供可靠的依据和有针对性的指导。

对发动机进行声源识别的常用方法是声强法、近场声全息与波束形成方法[1-3]。声强法可以准确地测量平面上的声源分布及声功率辐射，但一般只适用于稳态工况且测试耗时极长，测试成本高，多用于特定工况的异响声源排查[4-7]；近场声全息利用阵

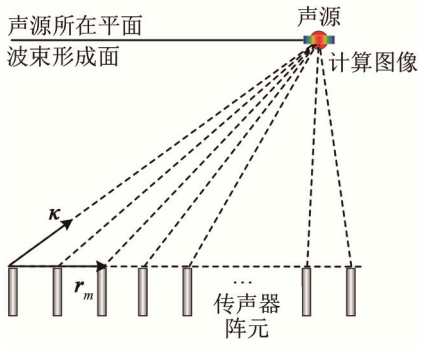
收稿日期：2020-07-08；**修回日期：**2020-09-20
作者简介：张智(1987－)，男，吉林长春人，硕士，研究方向为汽车振动噪声控制。
通信作者：张智，E-mail: zhangzhi2@faw.com.cn

列接收的声场数据，基于赫姆霍兹积分方程和三维空间傅里叶变换，可准确重构三维声场的声压、质点速度和声强，从而得到发动机表面的声源分布，但其测试距离一般要求小于 0.1 m，对于发动机的试验室台架测试，由于发动机表面附件、管路、线束及进排气管路支架布置的影响，阵列不易靠近发动机表面，使用近场声全息方法测试较为困难，对于普通的阵列尺寸，通常不能完整覆盖发动机单侧表面，需要多次测试后进行拼接，测试效率低，成本高，且近场声全息主要应用于低频噪声源识别[8]。波束形成方法通过对阵列传声器接收到的声压信号的处理，即根据声源计算平面的聚焦网格点与阵列传声器测点的空间矢量关系，将各通道信号进行相位对齐并求和，从而得到被测平面的声源分布，可对超出阵列尺寸外的位置进行声源识别，即发动机的每个面，仅需一次测量就可得到完整的识别结果，具有测量速度快，中高频分辨率好，可中远距离测量的优势[9-15]，对于本文所测试的发动机尺寸，使用波束形成方法的测试时间仅为声全息方法的四分之一，为声强法的数十分之一，且对 3 kHz 以上的高频噪声具有更高的识别精度。

本文使用波束形成方法对发动机的上、前、左、右四个面进行声源识别测试，避免主要声源出现在波束形成面之外，并通过交叉层法计算得到声源的三维分布结果。以往的波束形成法进行噪声源识别，通常只对较大的平面或声源可能分布的平面进行测试。对于声源分布复杂的被测对象，往往得不到理想的识别结果[16]，主要原因一是有较主要的声源未处于波束形成面，识别结果虽然显示出了该声源在波束形成面上的投影，但该投影并非垂直于波束形成面，而是沿波束方向在波束形成面上的投影，如图 1 所示；原因二是位于非被测表面的声源由于被测对象的遮挡，存在明显的衍射，破坏了直达声场条件，导致其到某些阵元的声程发生改变，即相位发生偏移而无法在真实位置形成声源图像；



(a) 声源不在波束形成面上



(b) 声源在波束形成面上

图1　声源与波束形成面相对位置对计算结果影响

Fig.1　The influence of the relative position between sound source and beamforming surface on the calculation results

原因三是远离波束形成面的声源在计算时，由于其能量在波束形成面不聚焦，会明显低于其真实值，导致其被其他主要声源的旁瓣掩盖，或未达到识别动态范围而导致遗漏[17]。

1　波束形成理论及算法

1.1　波束形成理论

采用一组在空间固定位置上分布的传声器组成的阵列对空间声场进行测量，通过对每个固定位置上的传声器测得的声压信号进行特殊的处理，就可以获得有关声场的声源信息，在信号处理领域，这种对阵列信号的处理算法被称为“波束形成(Beamforming)”，而传声器阵列的聚焦方向称为“波束”(或主波瓣)。该技术同样广泛应用于雷达、声呐、通信等领域[18]。

根据声源计算平面的聚焦网格点与阵列传声器测点的空间矢量关系，对传声器阵列中各通道信号进行延时，即根据各测点的声程差来调整相位差，补偿各阵元测点的传播延时，从而使某一期望方向上的信号到达阵列所有测点都是同相位的，这样，在聚焦方向上产生一个空间响应极大值，达到空间滤波作用[19]。

平面波波束形成示意图如图 2 所示。在空间 x-y 平面内的平面阵列的 M 个传声器，传声器位置为 $\boldsymbol{r}_m$ (m=1, 2, ⋯, M),接收来自 $-\boldsymbol{\kappa}$ 方向的一列平面波。波束形成的过程是将每个传声器接收的信号相对于参考传声器进行延时，从而使所有传声器对于同一聚焦方向，接收的是同一瞬间波前，然后求和，这样该聚焦方向的信号由于是同相位相加，相当于增强了 M 倍，而其他方向的信号由于相位差，则会减弱，传声器数量越多，这种增强和减弱的效果也

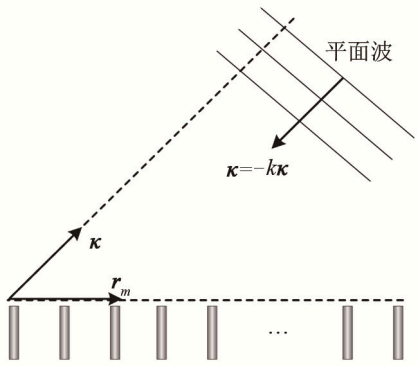


图 2 平面波波束形成示意图

Fig.2 Schematic diagram of plane wave beamforming

就越明显。

波束形成的输出为

$$b(\boldsymbol{\kappa},t)=\sum_{m=1}^{M} w_m p_m[t-\Delta_m(\boldsymbol{\kappa})] \tag{1}$$

式中，M 是传声器的个数，w_m 是第 m 个传声器的加权系数，$p_m(t)$ 是第 m 个传声器测得的声压信号。$\Delta_m(\boldsymbol{\kappa})$ 是波束聚焦方向为 $\boldsymbol{\kappa}$ 时，第 m 个传声器相对于参考点的时延。由图 2 中几何关系有：

$$\Delta_m(\boldsymbol{\kappa})=\frac{\boldsymbol{\kappa}\cdot\boldsymbol{r}_m}{c} \tag{2}$$

式中，$\boldsymbol{\kappa}$ 为聚焦方向矢量，$\boldsymbol{r}_m$ 是第 m 个传声器到参考点的相对位置矢量，$\boldsymbol{\kappa}\cdot\boldsymbol{r}_m$ 即为 $\boldsymbol{r}_m$ 在 $\boldsymbol{\kappa}$ 方向的投影，c 为传播介质中的声速。

以上即为延时求和的理论依据。由于时域信号数据量非常大，影响计算效率，实际计算中，采用频域法可显著提升计算速度和节省数据占用空间。使用频域计算波束形成的输出功率为：

$$V(\boldsymbol{k},\omega)=\overline{|B(\boldsymbol{k},\omega)^2|}=\sum_{m,n=1}^{M}\overline{P_m(\omega)P_n^*(\omega)}\mathrm{e}^{\mathrm{j}\boldsymbol{k}\cdot(\boldsymbol{r}_m-\boldsymbol{r}_n)} \tag{3}$$

式(3)中，ω 表示声源振动的圆频率，$\boldsymbol{k}=-k\boldsymbol{\kappa}$ 是聚焦方向 $\boldsymbol{\kappa}$ 的声辐射波矢量，其中波数 $k=\omega/c$，$\overline{P_m(\omega)P_n^*(\omega)}$ 是第 m 个传声器与第 n 个传声器的声压互谱。

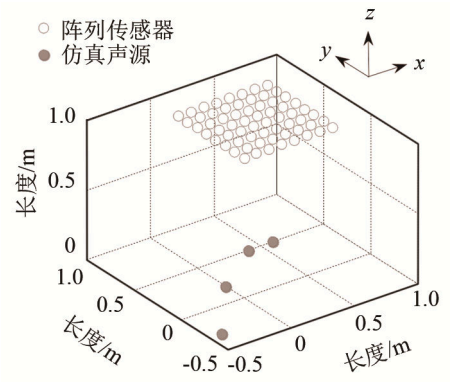
1.2 位于同一平面声源的波束形成仿真验证

使用 Matlab 软件建立波束形成仿真模型。设置若干仿真声源，声源所在平面平行于阵列所在平面，使用间距 0.1 m 的 8×8 通道矩形阵列对声源信号进行接收，如图 3(a)所示。假设声源发出稳态单频信号，则阵列阵元接收信号为

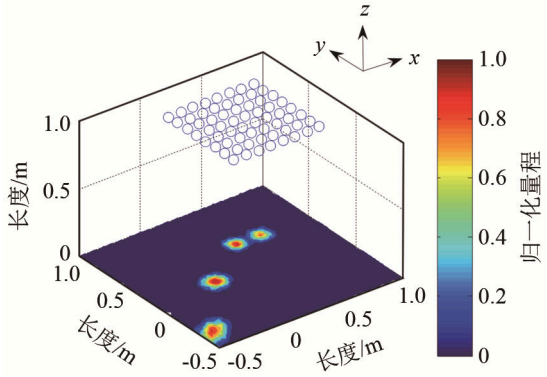
$$p(m,t)=\sum_{n=1}^{N} A_n\mathrm{e}^{2\pi\mathrm{i}(\omega_n t-k_n d_{n_m})} \tag{4}$$

式中，m 为阵元序号，t 为时间序列，N 为仿真声源数量，n 为仿真声源序号，ω_n 为第 n 个仿真声源的频率，A 为声源幅值，k 为波数，d_{n_m} 为第 n 个声源与第 m 个阵元的距离。

根据全部阵元接收到的仿真信号，计算声源所在平面的声源分布，用 4 个声源作示例，结果如图 3(b)所示，全部声源均准确识别。



(a) 建立仿真模型



(b) 仿真计算结果

图 3 位于同一平面的声源识别仿真计算结果

Fig.3 Simulation results of source identification in the same plane

1.3 位于不同平面声源的波束形成仿真验证

对于发动机等被测对象，轮系及各种附件布置复杂，其主要声源往往在各个面上都有分布，而对处于波束形成面之外的声源，往往无法得到有效的判断。尤其是识别图像显示在棱上的结果，在仅测试一个面的情况下，由于无法得到其纵深信息，不能判断真实声源是在棱上，还是在与波束形成面垂直的面上。

设置 4 个声源分布在一个假想的长方体上，进行仿真，其坐标分别为：

声源 1 位置 p_{s1}=[0.4 0.4 0.32]；

声源 2 位置 p_{s2}=[0.4 0.2 0.32]；

声源 3 位置 p_{s3}=[0 0.2 0.32]；

声源 4 位置 p_{s4}=[0 0.2 0.12]。

如图 4 所示，声源 1 位于上面，声源 2 及声源 4 位于棱上，声源 3 位于顶点。

分别从三个方向对上述位于不同平面的四个声源进行识别，得到的图像结果都只显示出了三个声源，如图 5 所示。如果仅从一幅图像进行识别，

必然导致对声源的位置误判或遗漏。

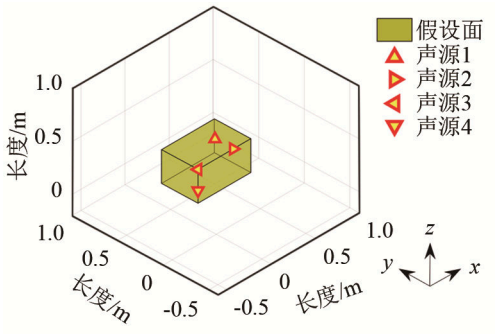
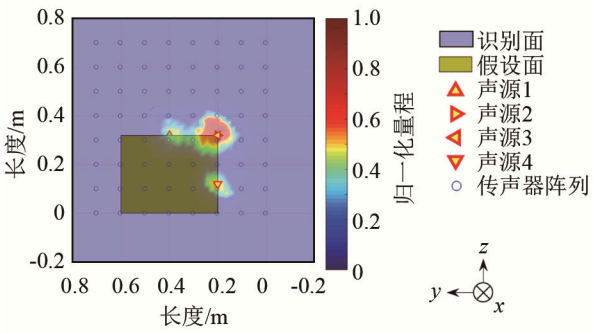
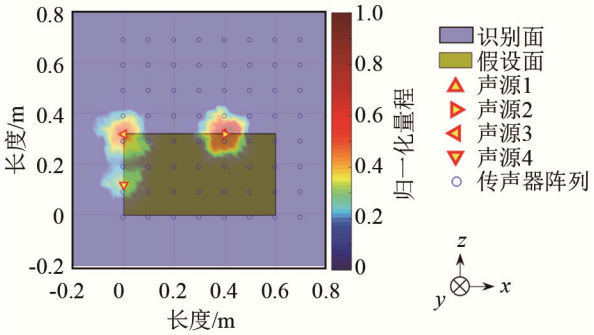


图 4　位于不同平面的声源

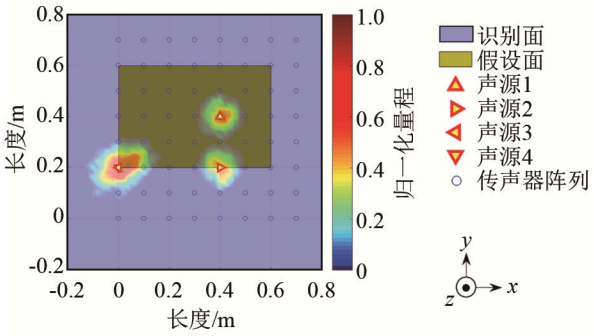
Fig.4　Sound sources in different planes



(a) *y*-*z* 平面识别结果



(b) *x*-*z* 平面识别结果

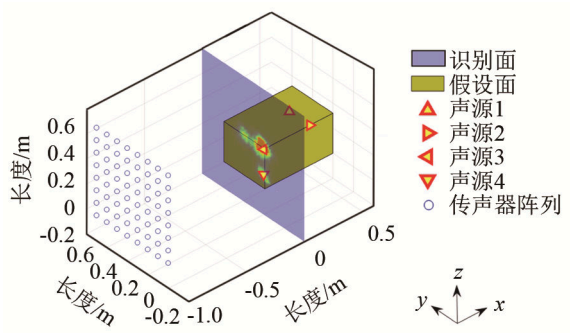


(c) *x*-*y* 平面识别结果

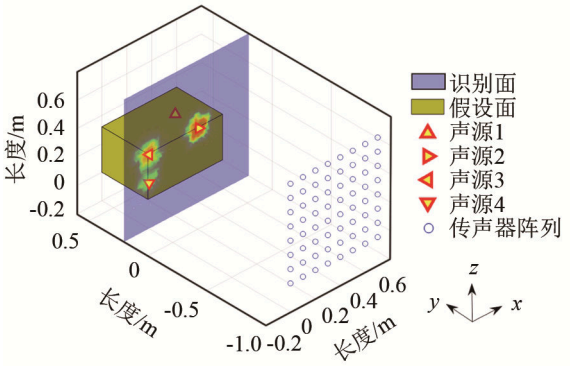
图 5　位于不同平面的声源识别仿真(三向投影)

Fig.5　Simulation of sound source identification in different planes (axonometric projection)

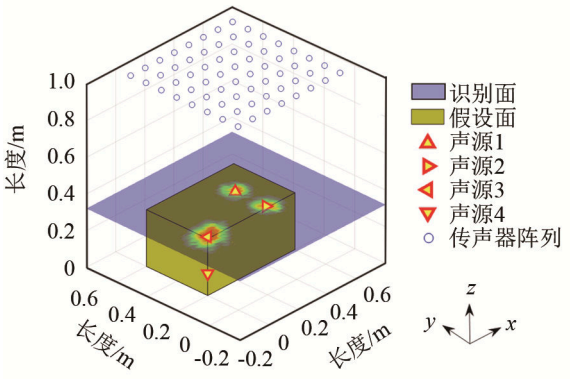
位于不同平面的声源识别仿真(三维图)如图 6 所示。可见，对于不处于波束形成面上的声源，可能得到其真实声源在波束形成面上的投影，如图 6(a)中的声源 1。而如果在其投影位置恰好有另外一个声源，两者的识别图像将会重合，从而无法分辨出是一个还是多个声源，如图 6(a)中的声源 2、图 6(b)中的声源 1 及图 6(c)中的声源 4 所示。



(a) *y*-*z* 平面识别结果(三维图)



(b) *x*-*z* 平面识别结果(三维图)



(c) *x*-*y* 平面识别结果(三维图)

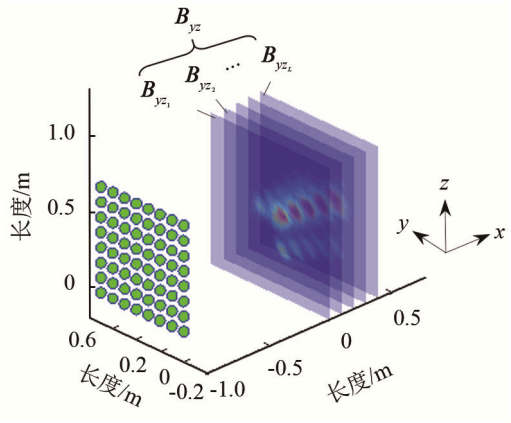
图 6　位于不同平面的声源识别仿真(三维图)

Fig.6　Simulation of sound source identification in different planes (stereograph)

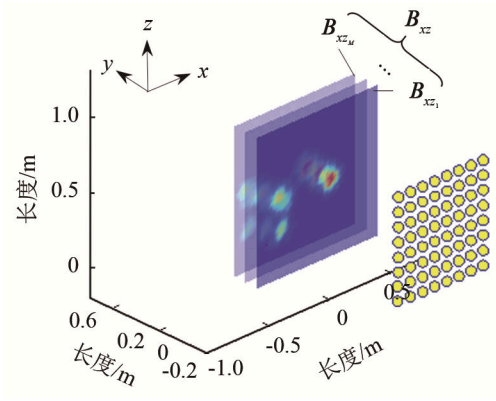
1.4　多维交叉层法波束形成声源识别仿真

将波束形成平面与阵列平面距离以一定步长改变，计算多个形成面的分布结果，覆盖被识别对象的纵向深度，则可得到一系列平行的形成面，如图 7 所示。

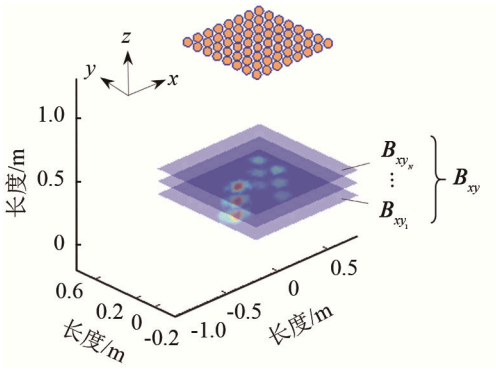
对 *y*-*z* 平面、*z*-*x* 平面、*x*-*y* 平面的计算层数分别为 L 、M 、N 层，则 *y*-*z* 平面的第 l 层的波束形成面结果为



(a) *y-z* 平面



(b) *x-z* 平面



(c) *x-y* 平面

图 7 波束形成分层计算

Fig.7 Layered computation of beamforming

$$\boldsymbol{B}_{yz}(l,:,:)=\begin{bmatrix} B_{yz}(l,y_1,z_1) & \cdots & B_{yz}(l,y_1,z_N) \\ \vdots & B_{yz}(l,y_m,z_n) & \vdots \\ B_{yz}(l,y_M,z_1) & \cdots & B_{yz}(l,y_M,z_N) \end{bmatrix} \tag{5}$$

式中，M 和 N 分别为该形成面上 y 方向和 z 方向计算点的个数；$B_{yz}(l,y_m,z_n)$ 为 *y-z* 平面的第 l 层上，y 方向的第 m 个和 z 方向的第 n 个聚焦点的数值结果。*y-z* 平面平行的一系列形成层构成三维矩阵：

$$\boldsymbol{B}_{yz}=B_{yz}(1{:}L,1{:}M,1{:}N) \tag{6}$$

同理：

$$\boldsymbol{B}_{zx}=B_{zx}(1{:}L,1{:}M,1{:}N) \tag{7}$$

$$\boldsymbol{B}_{xy}=B_{xy}(1{:}L,1{:}M,1{:}N) \tag{8}$$

可对数据进行适当截取，使 $\boldsymbol{B}_{yz}$ 、 $\boldsymbol{B}_{zx}$ 、 $\boldsymbol{B}_{xy}$ 的 x、y、z 坐标对齐。

被测对象所处的几何空间，被正交的三个方向的平面分层切割，该空间内的每个聚焦点皆为三个方向平面的交叉点，即每个聚焦点被三个方向各计算了一次，如图 8 所示。

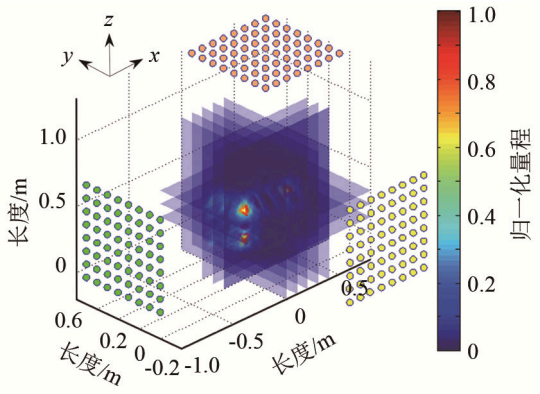


图 8 多维交叉层计算过程

Fig.8 Calculation process of multi-dimensional cross-layer method

对于虚假的声源投影，仅在其中一或两个方向的识别面上显示，即在其中一或两个三维矩阵中出现大值，在另外的矩阵里则会呈现小值，故将三个三维矩阵的对应点相乘，再开立方恢复幅值，即得到交叉层结果：

$$\boldsymbol{B}_{\text{cross}}(x_i,y_i,z_i)= \left[\boldsymbol{B}_{yz}(x_i,y_i,z_i)\cdot\boldsymbol{B}_{zx}(x_i,y_i,z_i)\cdot\boldsymbol{B}_{xy}(x_i,y_i,z_i)\right]^{1/3} \tag{9}$$

则在结果 $\boldsymbol{B}_{\text{cross}}$ 中，虚假声源所对应的点受其中的小值因数影响而减小，真实声源所对应的点为三个大因数相乘而不受影响。

由于仅考虑位于物体表面的声源，可去除位于物体内部的点，仅保留构成被测物表面的点进行计算，结果如图 9 所示。可见，对于分布在不同表面

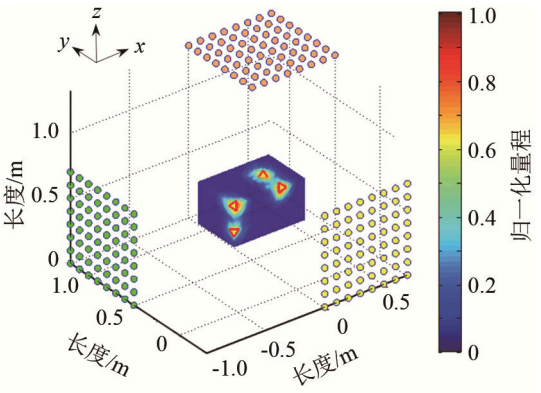


图 9 多维交叉层计算结果

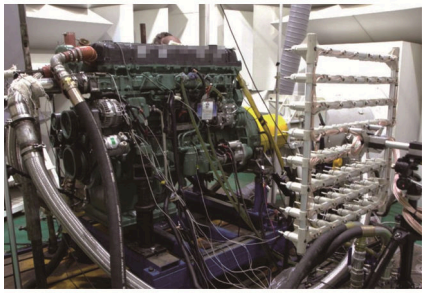
Fig.9 Calculation result of multi-dimensional cross-layer method

上的各个声源，均得到准确识别。图 5(a)及图 6(a)中的虚假声源投影在图 9 中已消除，且可同时显示出各个面的声源分布。

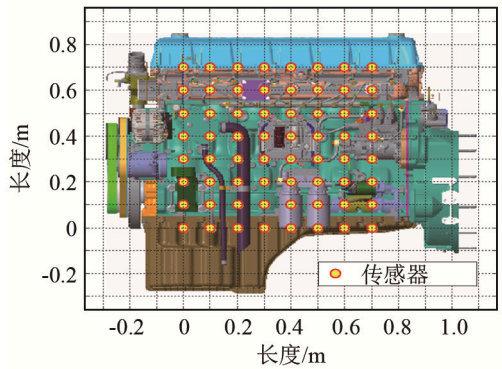
2　发动机声源识别

2.1　阵列布置及现场测试

使用间距为 0.1 m 的 8×8 通道矩形阵列对柴油发动机的上、前、左、右四个面分别进行测试。阵列平面平行于发动机被测面，发动机左面的测量现场布置如图 10(a)所示。依据发动机尺寸、阵列尺寸以及两者位置对应关系，计算出阵元在发动机表面的投影位置，如图 10(b)所示。声源识别的结果即在此基础上进行显示。



(a) 测试现场布置



(b) 阵元投影位置

图 10　发动机左面测试阵列布置

Fig.10　Layout of the test array at the left side of engine

2.2　发动机声源频率特征

通过对发动机进行变转速工况测试，得到发动机噪声声压级的时频结果，如图 11 所示。通过观察，可得知发动机的各主要噪声频率及其对应转速。在实际应用中，可选择需要关注的噪声成分进行分析。

2.3　声源平面识别结果

以图 11 中所标示的噪声为例，其对应发动机转速为：1 600～1 800 r·min^{-1}，频率范围为：2 800～3 300 Hz。发动机各个面的识别结果如图 12 所示。

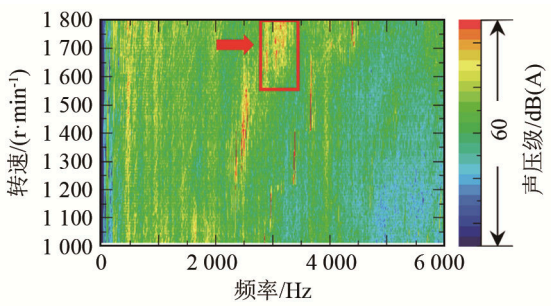
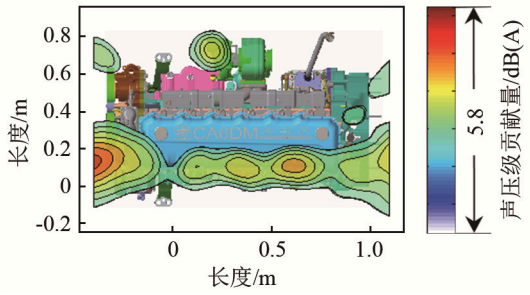


图 11　满负荷情况下发动机噪声声压级的转速-频率图(阵列中心测点)

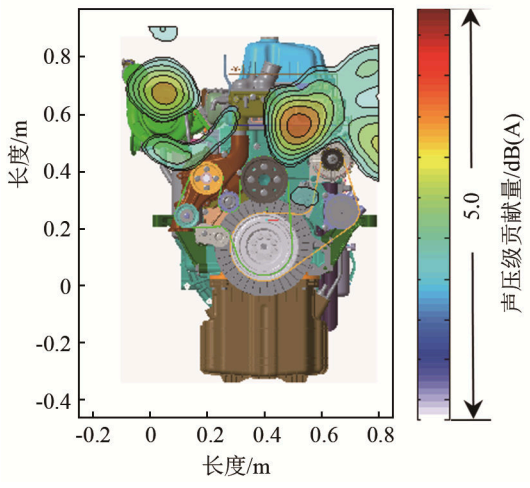
Fig.11　Speed-frequency diagram of full-loaded engine noise level measured at the central point of the array

2.4　多维交叉层法计算结果

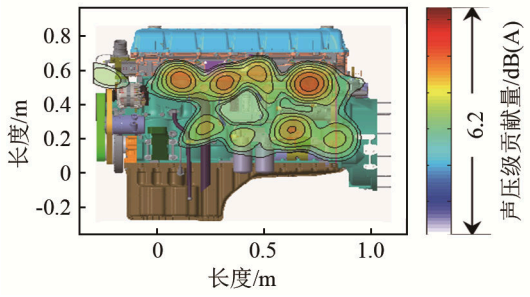
使用从不同方向的测试数据，通过多维交叉层法进行计算，得到声源在发动机表面的立体分布结果，如图 13 所示。



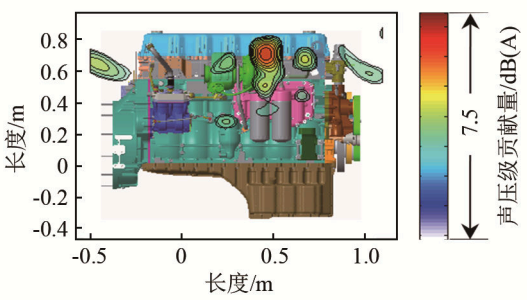
(a) 上面



(b) 前面



(c) 左面



(d) 右面

图 12 发动机噪声(2 800～3 300 Hz, 1 600～1 800 r·min^{-1})识别结果

Fig.12 Identification results of engine noise source at the frequencies of 2 800～3 300 Hz and the speeds of 1 600～1 800 r·min^{-1}

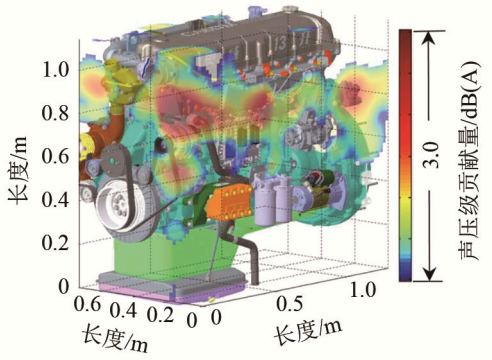


图 13 多维交叉层法声源识别结果

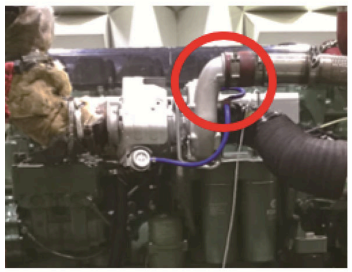
Fig.13 Identification results of engine noise source by cross-layer method

对于这种声源分布复杂的情况，利用任何一个平面的识别结果，都无法准确进行识别。如图 12(a)中的下方显示的多个声源，在图 12(c)中，发现这些声源并非位于发动机的棱上，即不在发动机上表面，而是分布在发动机的左面，在对发动机上面进行识别计算时，这些声源投影在了平行于发动机上面的波束形成面上。而利用交叉层法计算得到的立体结果，则直观显示出声源的位置，去除了声源投影的干扰。

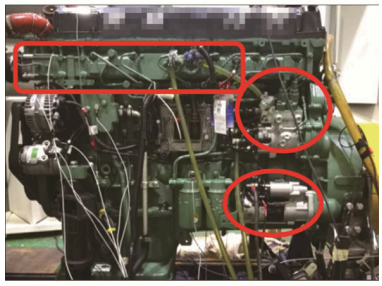
对于上述噪声，定位结果分别为前面的进气管口转折处，如图 14(a)所示；右面的涡轮增压器管口位置，如图 14(b)所示；左面的油泵位置、油轨及起动机附近，如图 14(c)所示。



(a) 进气管口



(b) 涡轮增压器管口



(c) 油泵、油轨及起动机

图 14 噪声源识别结果与实物对应关系

Fig.14 Corresponding relation between the identified engine noise sources and the actual engine parts

3 结 论

本文利用平面传声器阵列对某发动机的各表面进行测试，使用波束形成法对发动机的主要噪声源进行计算，并通过多维交叉层法进行声源的识别定位，可得到该发动机在各工况下的声源立体分布。经多维交叉层法识别计算的结果增加了声源定位的准确性，并去除了声源投影带来的干扰，可对各种分布复杂的噪声源进行有效识别。

该技术仅需在各面进行一次台架变转速工况测试，即可对发动机各转速下、500～5 000 Hz 频率范围内任意频率的声源进行识别定位，具有测试周期短、覆盖工况全面、识别精度高、结果直观、实用性高的优点，可广泛应用于各动力总成产品的噪声水平控制。

在波束形成识别结果的优化处理中，国内外学者通过反卷积理论建立波束形成输出、阵列点传播函数和声源真实分布之间的非齐次线性方程组，并通过迭代求解声源分布，该理论及其衍生求解方法可大幅降低传统波束形成直接输出结果的旁瓣影响。对于交叉层方法的识别结果，如结合反卷积方法进行优化，预计可达到更精细的识别效果，但由于交叉层法聚焦点数量较多，在反卷积处理过程中将生成大规模的点传播函数及方程组。对交叉层法结合反卷积的优化方法将在后续的研究中继续探索改进。

参 考 文 献

[1] MARROQUIN M. A comparison of seven different noise identification techniques[C]//SAE Technical Paper Series. 400 Commonwealth Drive, Warrendale, PA, United States: SAE International, 2003.

[2] 杨洋, 倪计民, 褚志刚, 等. 基于波束形成的发动机噪声源识别及声功率计算[J]. 内燃机工程, 2013, **34**(3): 39-43, 49.
YANG Yang, NI Jimin, CHU Zhigang, et al. Noise source identification and sound power calculation for an engine based on beamforming[J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2013, **34**(3): 39-43, 49.

[3] 褚志刚, 杨洋. 基于非负最小二乘反卷积波束形成的发动机噪声源识别[J]. 振动与冲击, 2013, **32**(23): 75-81.
CHU Zhigang, YANG Yang. Noise source identification for an engine based on FFT-non-negative least square(NNLS) deconvolution beamforming[J]. Journal of Vibration and Shock, 2013, **32**(23): 75-81.

[4] 曾国军, 李小昱, 王为, 等. 基于虚拟仪器技术的声强法识别拖拉机噪声源[J]. 农业工程学报, 2006, **22**(10): 117-121.
ZENG Guojun, LI Xiaoyu, WANG Wei, et al. Detection and recognition of the main noise source of tractors using sound intensity based on virtual instrument[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2006, **22**(10): 117-121.

[5] 褚志刚, 王卫东, 肖新标. 货车怠速工况下噪声源识别及其控制[J]. 农业工程学报, 2010, **26**(5): 153-158.
CHU Zhigang, WANG Weidong, XIAO Xinbiao. Noise source identification and noise abatement of truck under idle speed condition[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2010, **26**(5): 153-158.

[6] 罗虹, 余文国, 褚志刚. 声强测量法在发动机表面声源识别中的运用[J]. 重庆大学学报(自然科学版), 2005, **28**(6): 9-11, 14.
LUO Hong, YU Wenguo, CHU Zhigang. Application of sound intensity measurement method in spotting the noise source of engine surface[J]. Journal of Chongqing University (Natural Science Edition), 2005, **28**(6): 9-11, 14.

[7] 金岩, 郝志勇. 车用汽油机噪声源的声强测量识别[J]. 农业机械学报, 2006, **37**(2): 14-16, 8.
JIN Yan, HAO Zhiyong. Investigation on main noise sources of vehicle gasoline engine by sound intensity measurement[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2006, **37**(2): 14-16, 8.

[8] LI L Z, YANG Y M, ZHAO F J, et al. Application of near-field acoustic holography to low temperature engine start-up noise issue resolution[C]//SAE Technical Paper Series. 400 Commonwealth Drive, Warrendale, PA, United States: SAE International, 2015.

[9] LI L Z, LI J, LU B W, et al. Application of beamforming to side mirror aeroacoustic noise optimization[C]//SAE Technical Paper Series. 400 Commonwealth Drive, Warrendale, PA, United States: SAE International, 2016.

[10] CHEN J C, YAO K, HUDSON R E. Source localization and beamforming[J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2002, **19**(2): 30-39.

[11] WALL A T, GEE K L, NEILSEN T B. Modified statistically optimized near-field acoustical holography for jet noise characterization[C]//Montreal, Canada. ASA, 2013.

[12] GADE S, HALD J, MØRKHOLT J. Sound intensity measurements in vehicle interiors[J]. Sound & Vibration, 2011, **132**(3): 1984.

[13] DONAVAN P R, RYMER B, BLAKE W. Localization of truck noise sources under passby conditions using acoustic beamforming methods[J]. SAE International Journal of Commercial Vehicles, 2009, **2**(1): 128-137.

[14] 褚志刚, 蔡鹏飞, 蒋忠翰, 等. 基于声阵列技术的柴油机噪声源识别[J]. 农业工程学报, 2014, **30**(2): 23-30.
CHU Zhigang, CAI Pengfei, JIANG Zhonghan, et al. Identification of noise source for diesel engine based on microphone array technology[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014, **30**(2): 23-30.

[15] 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[J]. 声学学报, 2013, **38**(3): 265-271.
CHU Zhigang, YANG Yang. Calculation of the partial area sound power based on the scaled beamforming sound intensity[J]. Acta Acustica, 2013, **38**(3): 265-271.

[16] 居太亮. 基于麦克风阵列的声源定位算法研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2006.

[17] 褚志刚, 段云炀, 沈林邦, 等. 奇异值分解波束形成声源识别方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2014, **28**(11): 1177-1184.
CHU Zhigang, DUAN Yunyang, SHEN Linbang, et al. Singular value decomposition beamforming method for sound source identification[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2014, **28**(11): 1177-1184.

[18] 赵芳芳. 波束形成方法在噪声源识别应用中的仿真和实验研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2007.

[19] Van VEEN B D, BUCKLEY K M. Beamforming: a versatile approach to spatial filtering[J]. IEEE ASSP Magazine, 1988, **5**(2): 4-24.