

基于波束形成的声源识别方法及其风洞内应用

贺银芝^{1,2,3}, 杨现晖^{1,2,3}, 王斌^{1,2,3}, 张毅伟^{1,2,3}

(1. 同济大学汽车学院, 上海 201804; 2. 同济大学上海地面交通工具风洞中心, 上海 201804;

3. 上海市地面交通工具空气动力学与热环境模拟重点实验室, 上海 201804)

摘要: 基于波束形成的声源识别方法是风洞内研究汽车气动噪声问题重要的实验手段。为了更好地研究及应用这一测试技术, 首先通过仿真计算, 考察麦克风阵型、声源频率、测试距离、声波入射角等因素对阵列性能的影响, 并通过系统设计完成了实验验证。结果表明: 随着测试距离和入射角增大, 系统空间分辨率变差; 随着声源频率增大, 系统空间分辨率更好, 但动态范围变差; 随着测试距离偏差的增大, 识别的声源强度不断降低; 不同声源频率、测试距离与阵列阵型对测试距离偏差引起的声源幅值误差的敏感度不同, 声源频率越高, 测试距离越小则敏感度越高; 多声源的相互影响使阵列的有效动态范围降低, 同时声源强度增大。然后, 基于 DrivAer 整车油泥模型, 在整车气动声学风洞内应用波束形成技术进行车外声源识别, 分析车外气动噪声源的分布。最后, 应用声源相减方法, 分析了不同造型后视镜声源识别结果的差异。

关键词: 汽车风洞; 波束形成; 声源识别; 声源相减法

中图分类号: U467

文献标志码: A

Sound Source Identification Based on Conventional Beamforming and Its Application in the Wind Tunnel

HE Yinzhi^{1,2,3}, YANG Xianhui^{1,2,3}, WANG Bin^{1,2,3}, ZHANG Yiwei^{1,2,3}

(1. School of Automotive Studies, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. Shanghai Automotive Wind Tunnel Center, Tongji University, Shanghai 201804, China; 3. Shanghai Key Lab of Vehicle Aerodynamics and Vehicle Thermal Management Systems, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: Sound source identification based on beamforming is an important experimental method for the study of vehicle aerodynamic noise in wind tunnel. In order to better understand and apply this test technique, a series of simulation were conducted. The influence of factors such as array shape, source frequency, distance

between array and testing object, and incidence angle of sound wave on the performance of the array was studied and validated with designed corresponding experiments. The results show that the increases of test distance and incidence angle will worsen the spatial resolution. As source frequency increases, the system spatial resolution becomes better, but the dynamic range worsens. As deviation of the distance between array and testing object increases, the identified source intensity decreases. Furthermore, the sensitivity of different source frequencies, testing distances, and array shapes to sound source amplitude errors caused by testing distance deviations varies. As the source frequency goes higher, testing distance becomes shorter, the sensitivity becomes higher accordingly. The mutual influence of multiple sound sources reduces the effective dynamic range of the array, while increasing the intensity of the sound sources. Afterwards, based on the full-scale DrivAer clay model, the sound sources distribution of the vehicle exterior was identified with beamforming array. Finally, the difference in sound source recognition results of rearview mirrors with different shapes was analyzed using the sound source subtraction method, which demonstrates that this technique can provide a powerful support for the development of vehicle wind noise.

Key words: vehicle wind tunnel; beamforming; sound source identification; sound source subtraction

随着生活品质的提高, 人们更加注重车内的声振舒适性和安静度, 所以汽车整车噪声的控制尤为重要。空气动力噪声是汽车高速行驶时车内噪声的主要来源。为有效控制该类噪声, 首先应准确识别车外气动噪声源。波束形成作为一种空间声场可视化技术, 在风洞试验中得到了广泛应用^[1]。由于车

收稿日期: 2022-08-15

基金项目: 国家重点研发计划(2022YFE0208000); 国家自然科学基金(51575394); 中央高校基本科研业务费专项资金资助

第一作者: 贺银芝(1972—), 女, 副教授, 工学博士, 主要研究方向为气动声学。E-mail: heyinzi@tongji.edu.cn

外气动噪声具有以下特点,声源分散、声音辐射模式未知、声源的相关性未知^[2],所以声源识别较为复杂。

近年来,各种改进算法如 DAMAS^[3]、DAMAS2^[4]、CLEAN^[5]、CLEAN-SC^[6]等算法相继被开发出来,大幅提高了传统波束形成算法的空间分辨率和动态范围。例如,功能性波束形成可提供30倍的动态范围和6倍的空间分辨率^[7],广义逆波束形成在相干源和其他复杂问题上表现出高精度^[8],但这些算法输出结果的质量仍很大程度上取决于原始声源识别的结果,并且可能在迭代过程中存在误判,删除有效信息^[6],因此有必要对传统波束形成算法进行声源识别的影响因素进行系统研究。针对汽车而言,外后视镜对车内噪声的贡献度很高^[7],因此后视镜造型改进是车辆气动噪声开发过程中的重点之一。在车辆油泥造型设计阶段,本文通过波束形成声源相减方法,直观地对比分析了不同后视镜造型对车外气动噪声的影响,对汽车后视镜造型设计具有重要意义。

本文主要研究工作分为3个部分:仿真分析、实验验证及整车油泥模型风洞试验。首先在仿真分析中,考察了阵型、声源频率、测试距离、声波入射角等因素对阵列性能的影响,然后在同济大学整车气动声学风洞内进行试验验证。试验布置3种不同的麦克风阵列,对单声源进行信号采集分析,并与仿真结果进行比较。最后将波束形成算法应用于 DrivAer 整车油泥模型上,结合波束形成声源相减法对车辆后视镜部位的气动噪声特性进行分析。

1 仿真分析

通过风洞试验可以发现,汽车的气动噪声能量主要来自于4 000 Hz以下频段的贡献,声源特征尺寸通常小于波长,复杂声源可以近似分解成多个点声源的组合,点声源的声场可以用球面波声传播模型来表述。在球面波假设中,同一波阵面距离声源的距离相等,归一化处理后的延时求和公式为^[9]

$$B(\mathbf{r}, \omega) = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M \omega_m P_m(\mathbf{r}, \omega) e^{-j\omega \Delta_m(\mathbf{r})} \quad (1)$$

式中: \mathbf{r} 表示声源点到麦克风的距离; M 是麦克风数量; ω_m 是麦克风信号的加权系数。基于球面波的传播性质,第 m 个麦克风测得的压力为

$$P_m(\mathbf{r}, \omega) = \frac{1}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}_m|} P_0 e^{-jk|\mathbf{r} - \mathbf{r}_m|} \quad (2)$$

式中: $k = \omega/c$ 是波数; P_0 是声源声压。时延可以用

下式计算:

$$\Delta_m(\mathbf{r}) = \frac{|\mathbf{r}| - |\mathbf{r} - \mathbf{r}_m|}{c} \quad (3)$$

上述公式中各物理量如图1所示。最后,延时求和波束形成的输出结果可以写成如下声源声压与阵列响应函数的乘积形式:

$$B(\mathbf{r}, \omega) = P_0 W(\mathbf{r}, \omega) \quad (4)$$

式中: $W(\mathbf{r}, \omega)$ 代表阵列响应函数。声压只影响输出结果中的幅值,阵列响应函数直接决定输出结果的特性。

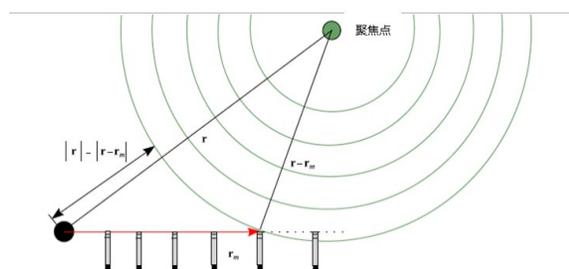


图1 基于球面波的波束形成原理

Fig.1 Principle of beamforming based on spherical waves

经过归一化的阵列响应函数在空间的分布就是阵列响应图,如图2(a)所示,其中主瓣为识别到的声源。空间分辨率和动态范围是评价波束形成算法好坏的重要指标,如图2(b)所示,其中空间分辨率为主瓣-3 dB对应的瓣宽^[10],表示阵列所能区分的两声源之间最小距离的能力;动态范围即最大旁瓣水平(MSL)的绝对值,表示阵列所能识别出的能量第二大的声源的声压级与主声源之差。后文中声阵列的空间分辨率和动态范围均是通过阵列响应图得到。

1.1 单声源

通过仿真分析单声源在不同工况下的空间分辨率和动态范围,以考察阵型、声源频率、测试距离、声波入射角等因素对阵列性能的影响,以及测试距离偏差对声源声压级的影响。

1.1.1 阵型

阵列响应函数与阵列中麦克风的几何分布直接相关,在阵列设计中,受限于成本、数据采集能力等因素,我们期望用尽可能少的麦克风数量,实现尽可能好的阵列性能,因此有必要研究阵列的几何特征参数对空间分辨率和动态范围的影响。本文对4种不同的麦克风阵列,即环形72通道(Ring 72)、随机型72通道(Random 72)、螺旋形72通道(Spiral 72)和螺旋形120通道(Spiral 120)进行仿真建模,并对这4种麦克风阵列进行分析,如图3所示。

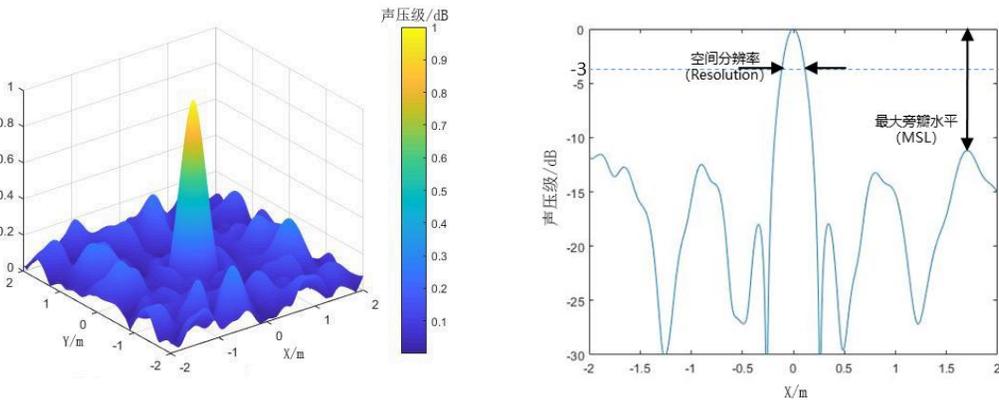


图 2 阵列响应图

Fig.2 Array response pattern

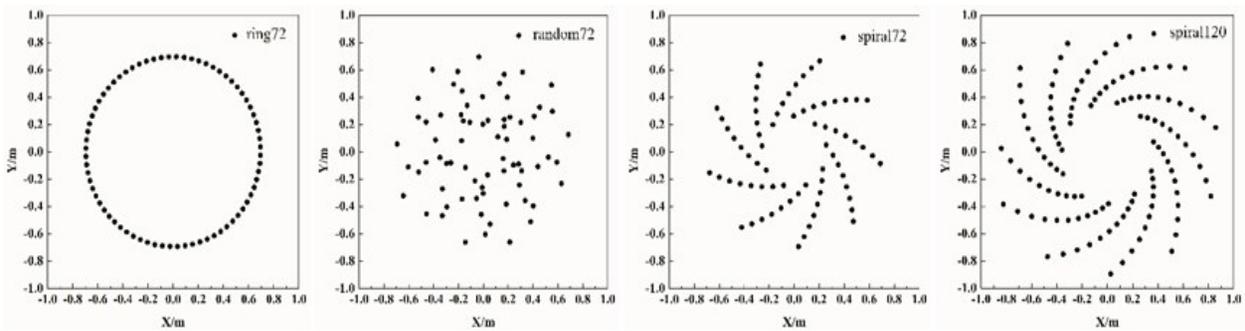


图 3 四种不同的麦克风阵列阵列

Fig.3 Four microphone arrays with different shape

设定声源点到阵列中心的距离为 4 m,从图 4 可以看出,4 种阵型中,Ring 72 空间分辨率最优,其次为 Spiral 120、Spiral 72 和 Random 72。与此相反,从图 5 可以看出,Ring 72 的动态范围最差,Random 72

在 1 000 Hz 有着最大动态范围,达到 17.5 dB,但从 2 000 Hz 起动态范围逐渐缩减,而 Spiral 72 动态范围总体表现最优。综合来看,Spiral 120 在空间分辨率和动态范围两方面都有较好水准,综合性能最优。

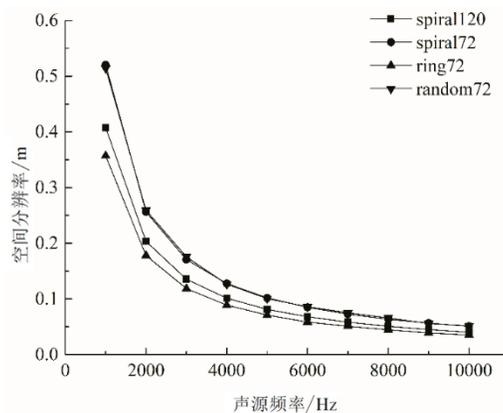


图 4 不同阵型的空间分辨率

Fig.4 Spatial resolution of arrays with different shape

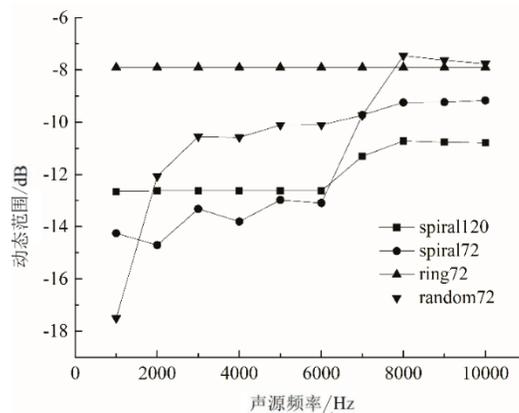


图 5 不同阵型的动态范围

Fig.5 Dynamic range of arrays with different shape

1.1.2 测试距离

选择阵列 Spiral 72,声源频率 5 000 Hz,考察不同测试距离对阵列性能的影响,结果如图 6 所示。

由图可以看出:随着测试距离增加,空间分辨率呈线性变差,而动态范围则几乎不变,因此测试距离应保持尽可能小,以获得更好的空间分辨率;另一方面,

阵列必须布置在流场外,以避免流动产生的干扰噪声,所以风洞试验时测试距离通常设为距离车身表面 4 m 左右。

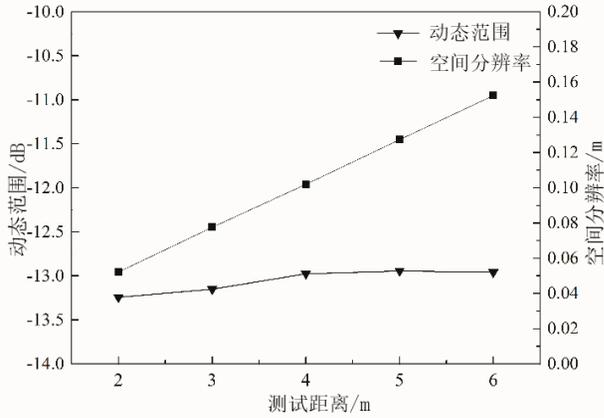


图 6 不同测试距离下的阵列空间分辨率和动态范围变化
Fig.6 Variation of spatial resolution and dynamic range of an array at different test distances

1.1.3 声源频率

式(2)计算阵列响应函数时用到波数,波数与声速和声源频率有关。由于风洞内常规测试环境下,声速变化可以忽略,因此波数仅取决于声源频率,所以声源频率对声源识别结果影响很大,因此分别计算 1 000~10 000 Hz 范围内单频声源对应的阵列响应函数,如图 7 所示。从图 7 中可以发现,随着声源频率升高,对于声传播模型假设是球面波或平面波,空间分辨率都逐渐变好,而动态范围则变差。

1.1.4 入射角

在汽车风洞测试中,气动噪声源可能位于整个车身范围内的任意空间位置,不一定正对阵列中心,因此有必要研究声波入射角对声源识别结果的影响。计算 1 000~10 000 Hz 单频声源分别位于(0,

0)、(0, 0.2)、(0, 0.4)、(0, 0.6)、(0, 0.8)、(0, 1)坐标点的阵列响应函数,进一步求得不同频率、不同声源位置下的空间分辨率和动态范围,得到结果如图 8 所示。其中,声源离心度表示声源位置到声源平面中心的距离,声源离心度越大,入射角越大,由此可以发现阵列的空间分辨率随入射角的增大而变差。

1.1.5 测试距离偏差

在工程实践中,被测对象表面通常是复杂曲面,不同声源到阵列平面的距离往往各不相同。但二维层面的波束形成技术只能假设所有声源都位于同一平面内,计算时只能定义唯一的测试距离。如果计算用测试距离与实际距离不同,在计算阵列响应函数时各麦克风通道对应的时延会产生偏差,导致阵列响应函数的幅值偏小^[11]。定义测试距离偏差为声源到阵列平面的实际距离与计算用测试距离的差值,以下将从声源频率、测试距离以及不同阵型 3 个方面,探究此偏差对声源识别结果声源中心声压级幅值的影响。

(1) 声源频率。以 Spiral 120 阵列为例,设定测试距离为 4 m,声源距离从 3.5~5 m、以 0.1 m 步长变化,考察不同声源频率 1 000~10 000 Hz 对测试距离偏差的敏感性,结果如图 9 所示。由图可以看出,输出结果中的声源声压级幅值随距离偏差绝对值的增大而衰减,且偏差为负(即实际声源距离小于计算距离)时,衰减速度更快;相反,偏差为正时,衰减相对较缓。对特定的阵型和计算距离,声源频率越高,识别结果对测试距离偏差越敏感。但频率低至 1000Hz 时,测试距离偏差的影响则可以忽略。

(2) 测试距离。仍以 Spiral 120 阵列为例,声源频率 5 000 Hz,考察不同测试距离时(1、2、3、4 m)测试距离偏差对声源识别结果的影响,如图 10 所示。

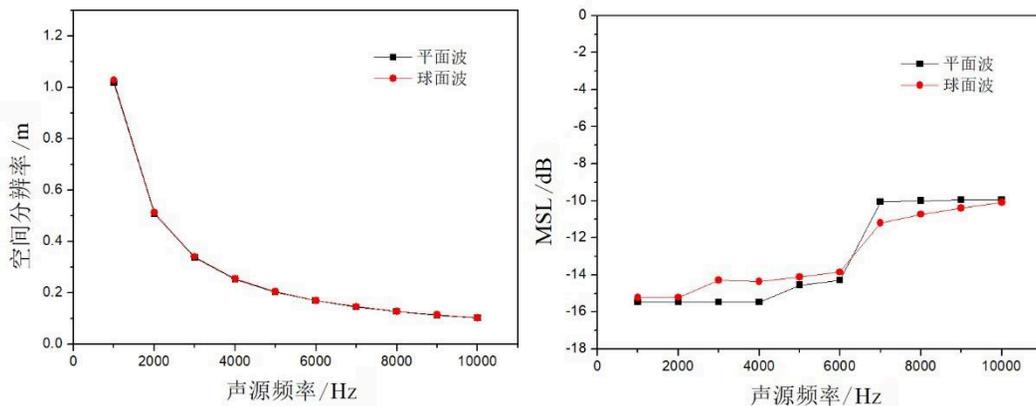


图 7 不同声源频率下的阵列空间分辨率和动态范围变化

Fig.7 Variation of spatial resolution and dynamic range of an array at different source frequencies

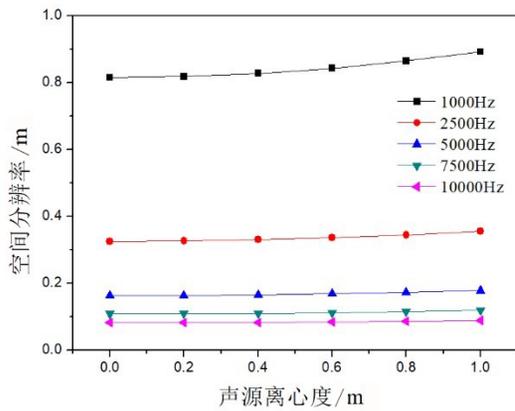


图 8 不同频率下空间分辨率随声源离心度的变化

Fig.8 Variation of spatial resolution with source eccentricity at different frequencies

由图可以看出,测试距离越远,相同的测试距离偏差量对声源识别结果的影响越小。因此,在风洞测试中,将阵列远离被测对象布置时,客观上改善了因距离偏差而导致测得声源声压级偏小的现象,一定程度上保证了实验结果的幅值精度。

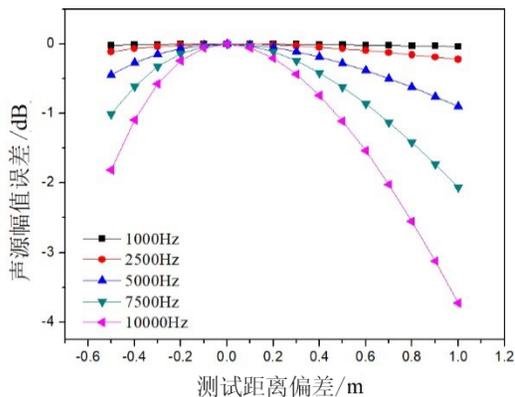


图 9 不同频率下测试距离偏差对声源幅值的影响

Fig.9 Influence of test distance deviation on sound source amplitude at different frequencies

(3) 阵型。不同阵列阵型对距离偏差的敏感性也不尽相同。图 11 展示了 Spiral 72、Random 72、Ring 72、Spiral 120 这 4 种阵列阵型在 4 m 测试距离下的声压级误差分析,声源频率为 5 000 Hz。Ring 72 阵列表现出良好的稳定性,声源幅值误差可以忽略不计;Spiral 72 次之;Random 72 再次之;倒是空间分辨率和动态范围两方面综合表现最为出色的 Spiral 120 阵列对测试距离偏差最为敏感。但总体而言,4 m 测试距离下对 5 000 Hz 声源,测试距离偏差在 $-0.5\sim 1.0$ m 范围内时,4 种阵型的识别结果中,声源幅值误差均在 -1 dB 以内。由于汽车气动

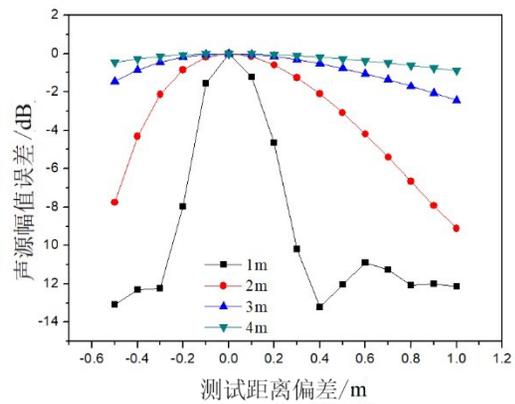


图 10 不同测试距离下其偏差对声源幅值误差的影响

Fig.10 Influence of different test distances with deviation on sound source amplitude

噪声能量主要集中在 4 000 Hz 以下频段,因此由测试距离偏差导致的声源识别声压级误差也在 -1 dB 以内,甚至更小。

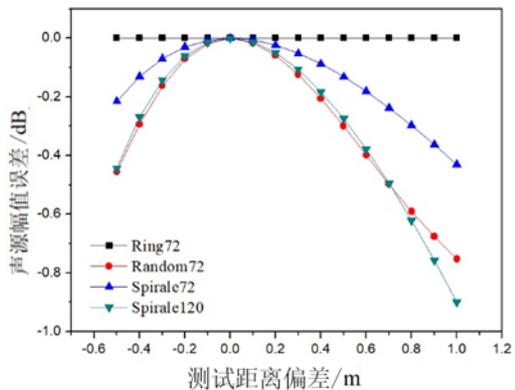


图 11 不同阵列阵型下声源幅值对测试距离偏差的敏感性

Fig.11 Sensitivity of sound source amplitude to test distance deviation under different array shape

1.2 多声源

假设被测对象同时存在多个声源,在波束形成声源识别结果中,各声源间的主瓣和旁瓣会互相影响。汽车气动噪声是典型的多声源问题,因此对声源间相互影响的研究具有重要的实际意义。这里选取测试距离为 4.5 m,应用 Spiral 72 阵列进行仿真分析。

假设声源平面存在两个频率相同的声源,其中 $(0,0)$ 点为主声源,以其声压级为参考值设为 0 dB, $(0,-0.3)$ 点为第二声源,其声压级分别设为 -5 dB 和 -10 dB,通过两组仿真,计算声源频率为 1 000~10 000 Hz 的波束形成输出结果。多声源情况下动态范围是指最大声源强度和最大旁瓣强度的差值,如图 12 所示。当两声源声压级差 5 dB,声源频率为

10 000 Hz时,输出结果中出现明显的“鬼影”,此时有效动态范围小于10 dB。在图13中,当第二声源为-10 dB时,没有出现“鬼影”,此时有效动态范围大于10 dB,说明第二声源比主声源的声压级越低,动态范围越大。原因是在多声源情况下,多个声源

的旁瓣会互相叠加,最大旁瓣强度增加,使得动态范围比单声源的变小;当第二声源比主声源的声压级越低,此时第二声源对最大旁瓣强度的贡献度降低,使得多声源对动态范围变小的影响越低。

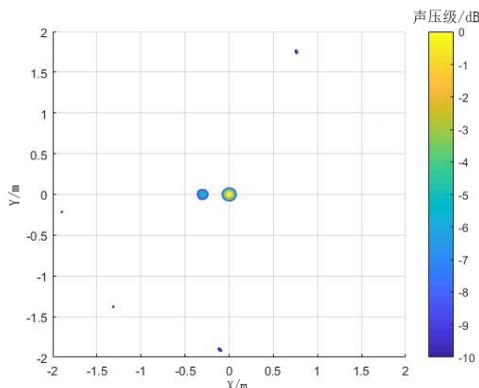


图12 两声源声压级差5dB时声源识别结果
(声源频率10 000 Hz)

Fig. 12 Sound source identification result of sound pressure level difference between two sources 5 dB (source frequency 10 000 Hz)

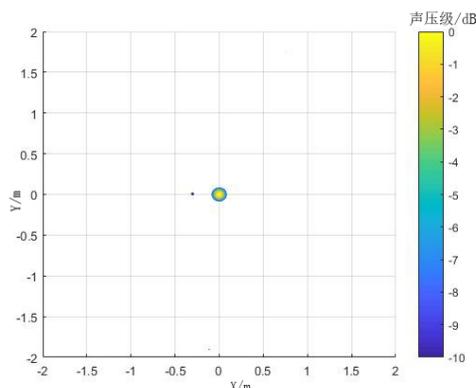


图13 两声源声压级差10dB时的声源识别结果(声源频率10 000 Hz)

Fig. 13 Sound source identification result of sound pressure level difference between two sources 10 dB (source frequency 10 000 Hz)

除了能否准确识别出多个声源,实际应用中另一个关注的重点是识别出的声源声压级的精确度。将两组仿真计算结果中声源位置所求得的声压级(S1、S2)进行统计,同时记录下两组仿真声压级的幅值 P_{\max} ,得到图14及图15。由图可以看出,输出结果中多声源间的声压级会互相影响,导致声源位置的声压级偏大,而且主声源对第二声源的影响要明

显强于第二声源对主声源的影响,即更强声源对更弱声源的声压级影响更大。

P_{\max} 值在低频略高于主声源,此时其对应坐标与声源实际位置稍有偏差;随着声源频率提高,空间分辨率变好,两声源主瓣逐渐分离,相互间影响减小;完全分离后, P_{\max} 与S1的数值和空间位置几乎一致。

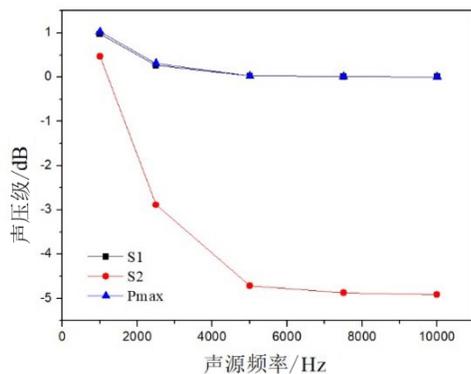


图14 仿真识别两声源的声压级(两声源强度差5 dB)

Fig. 14 Identified sound pressure level of two sources through simulation (5 dB difference of sound intensity between two sources)

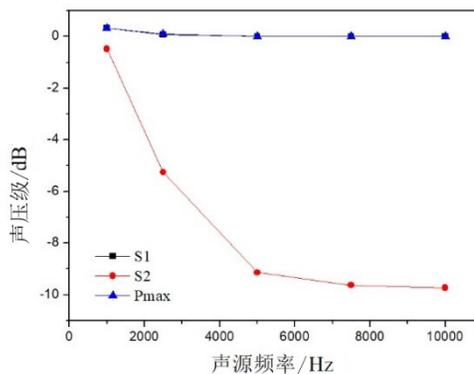


图15 仿真识别两声源的声压级(两声源强度差10 dB)

Fig. 15 Identified sound pressure level of two sources through simulation (10 dB difference of sound intensity between two sources)

2 实验验证

为了对仿真分析结论进行可靠性验证,设计了一系列验证实验,实验在同济大学整车气动声学风洞驻室试验段(近半消声室)进行。阵列所用的麦克风型号为 GRAS 40 PL,其具有良好的频响特性和相位精度;数采系统为德国 Gfai tech 公司的 MCDRec_721 系统;实验中采样频率设置为 96 kHz;声源为丹麦 B&K 公司生产的型号为 4295 的体积声源,如图 16 所示。

2.1 阵型对比

选择 3 种阵列 Ring 72、Random 72 及 Spiral 72 作为实验对象,使用同一支撑支架,阵型变换通过麦克风重新拔插布置。体积声源布置在距离阵列平面 4.5 m 处,选择 0.1~20.0 kHz 频段的白噪声,分别用 3 种阵列进行采样。

在波束形成输出结果中,先设置显示的动态范围为一个较小值,保证此时声压级云图中只有真实声源存在,逐渐扩大显示的动态范围直到“鬼影”出现,此时的动态范围显示即为有效动态范围。3 种阵型的识别结果如图 17 所示,图中展示的都是鬼影刚刚出现时的输出结果,Ring 72 的有效动态范围仅为

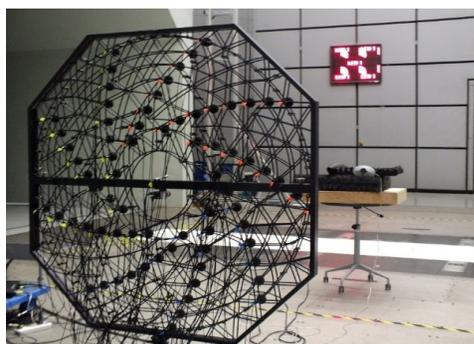


图 16 风洞驻室试验段(半消声室)内声源识别实验

Fig.16 Experiment of sound source identification in the test section of wind tunnel plenum (semi-anechoic chamber)

6.3 dB,Random 72 为 15.6 dB,Spiral 72 为 11.1 dB,三者动态范围的大小关系与仿真计算结论一致。

值得注意的是,实验中各阵列相同频段下动态范围值均小于仿真值(见图 5)。这是由于风洞地面为刚性壁面,而声源又是全方位的体积声源,因此存在强烈的地面反射效应,相当于空间中还存在一个与实际声源关于地面对称的声源。多声源的存在使识别结果中的最大旁瓣水平提高,因此实验中的有效动态范围较仿真值更小。

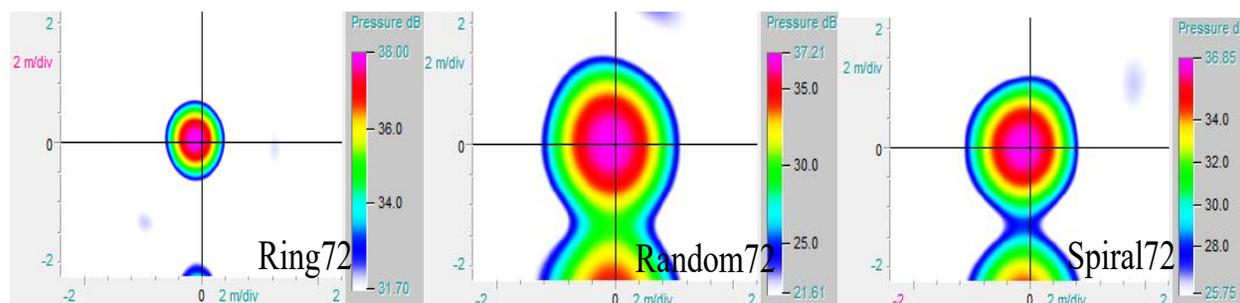


图 17 1 000 Hz 声源 3 种阵列的动态范围识别结果

Fig.17 Identified dynamic range of 3 arrays for sound source of 1 000 Hz

阵列的空间分辨率可通过动态范围显示为 3 dB 时的声源直径大小判断,如图 18 所示。由图可见,Spiral 72 与 Random 72 的声源直径大小相近,Ring

2.2 测试距离

声源选用 2 500 Hz 单频声,用 Spiral 72 阵列进行采样,分别将声源放置在距离阵列平面 3.0、4.0、4.5、5、6 m 之处,用来考察测试距离对阵列性能的影响。

图 19 显示了不同测试距离下动态范围显示为 3 dB 时的声源直径。图中横纵坐标的标尺随测试距离的增大而增大,在 3 m 时,轴的范围仅为 -1.603~1.603 m,而到 6 m 时则扩大到 -3.000~

72 的明显小于前两者,这表明 Ring 72 的空间分辨率最好,Spiral 72 与 Random 72 较差且两者较为接近,这与仿真结论相吻合。

3.000 m。因此,图 19 声源识别结果中不同测试距离下相近的声源尺寸,即代表着逐渐增大的声源直径值同动态范围下声源直径越大,空间分辨率越差。也就表明,随着测试距离的增大,空间分辨率变差,此结论与仿真分析一致。

3 DrivAer 模型车外声源识别

在汽车油泥模型阶段,声源识别对于汽车外形,

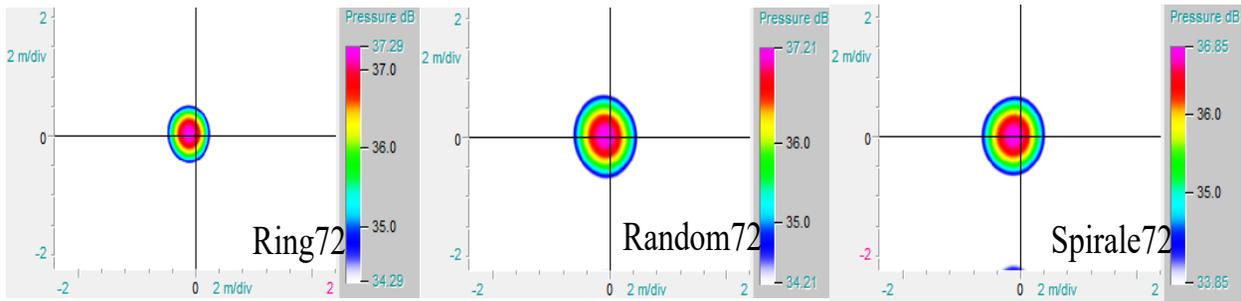


图 18 1 000 Hz 声源 3 种阵列的空间分辨率识别结果

Fig.18 Identified spatial resolution of 3 arrays for sound source of 1 000 Hz

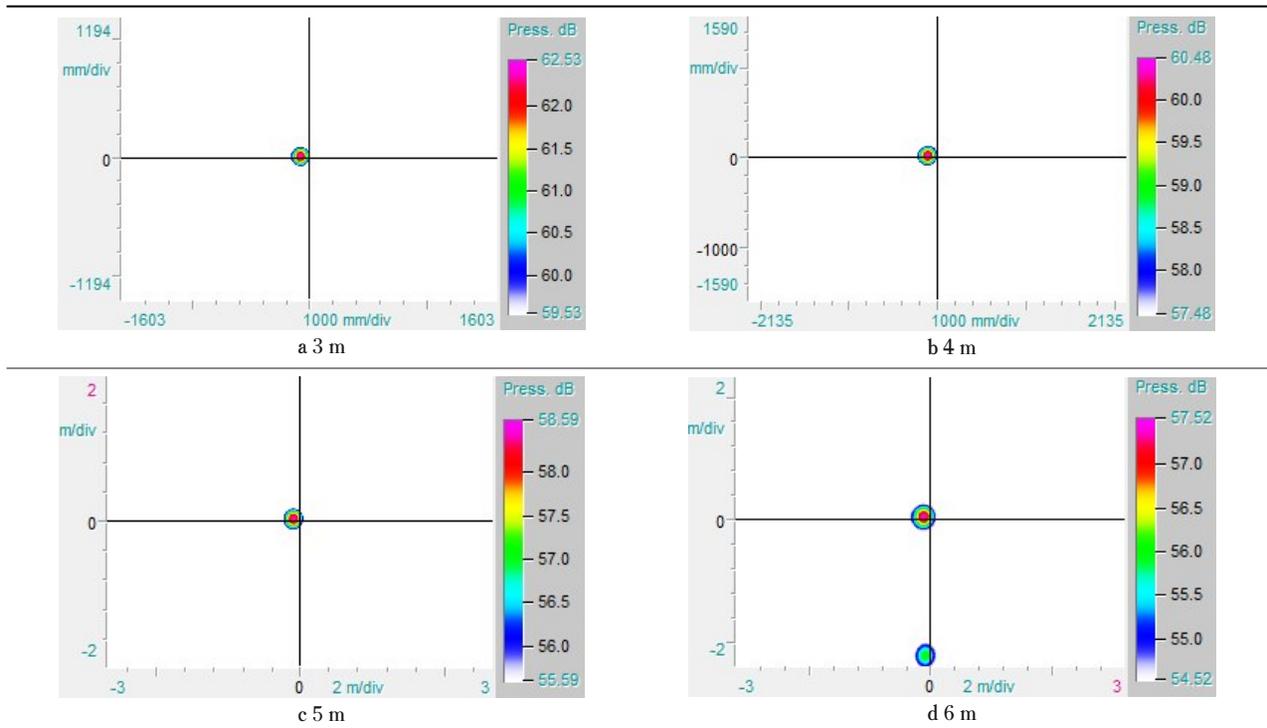


图 19 不同测试距离下的声源识别结果 (Spiral 72、2 500 Hz 单频声)

Fig.19 Sound source identification results at different test distances (Spiral 72, 2500 Hz pure tone)

尤其是后视镜的造型设计起着非常重要的作用。现以国际上通用的类车体 DrivAer 模型为例,考察传统波束形成技术在汽车车外气动噪声源识别中的应用。如图 20 所示,试验前将整车油泥模型固定在风洞驻室试验段天平转盘的中心位置,试验过程中关闭风洞五带移动系统。实验用麦克风阵列为 Spirale 120,放置在距离测试车辆后视镜 4.85 m 处,阵列中心指向后视镜位置。

分别将 DrivAer 原装后视镜和奥迪 A4 后视镜分别安装在整车油泥模型上,其中 DrivAer 原装后视镜融合了宝马 3 系和奥迪 A4 的后视镜特征,如图 21、图 22 所示。左图为 DrivAer 原装后视镜(工况一),右图为奥迪 A4 的后视镜(工况二)。

车外声源识别结果如图 23、图 24 所示。可以发



图 20 整车气动声学风洞内 DrivAer 油泥模型测试

Fig.20 Test with DrivAer clay model at full scale aeroacoustic wind tunnel



图 21 DrivAer 原装后视镜(工况一)



图 22 奥迪 A4 后视镜(工况二)

Fig.21 DrivAer model with original rearview mirror (Working Condition 1)

Fig.22 DrivAer model with Audi A4 rearview mirror (Working condition 2)

现,两工况中轮腔噪声均为主声源,而工况一的后视镜噪声小于工况二的后视镜噪声,这是由于后视镜

外形不同造成侧窗区域流场和声场分布不同而引起的。

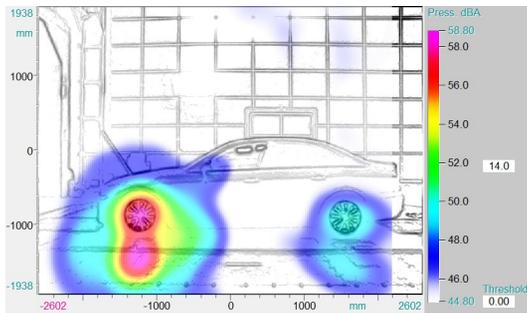


图 23 工况一的声源识别结果

Fig.23 The result of sound source identification at condition 1

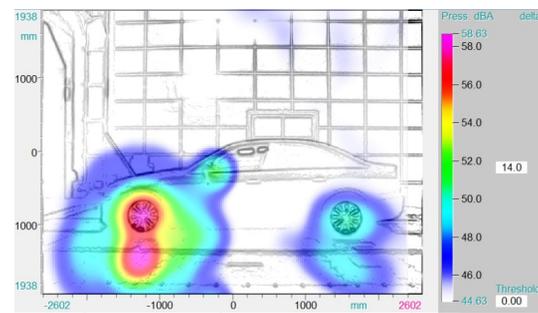


图 24 工况二的声源识别结果

Fig.24 The result of sound source identification at condition 2

4 波束形成声源相减

通过对 DrivAer 模型不同后视镜外形的车外声源识别结果进行对比,后视镜处噪声较小的后视镜外形对于指导设计后视镜外形有重要的参考意义。在设计后视镜外形时,会不断优化外形,使后视镜产生的噪声尽可能小。然而在工程实践中,对汽车的某外饰件或外形进行细节优化前后,车外声源识别结果相差甚微,原因通常有:其一可能是优化本身引起的声源声压级变化较小,导致优化前后的声压级云图较为相似;其二较强的声源可能掩盖了细节优化所带来的变化。如在图 23 和图 24 中,后视镜处声源强度仅仅差了 2 dB 左右,若图中纵坐标的分辨率较低,则很难看出后视镜外形优化前后的差异。因此,为了直观地表征两相似工况声源识别结果的差异,本文提出应用波束形成声源相减的解决思路。

其基本思想是将两相似工况的声压级云图相同坐标像素点的声压级相减,将差值再赋予对应坐标像素点重新生成云图,得到波束形成声源相减的差图。为保证结果的可靠性,严格要求测试对象在相同的设置下进行实验,如相同的阵列、测试环境、测试距离和采样频率等。

将此方法用于工况一和工况二来后视镜造型修改前后声源特征频谱的变化,如图 25 所示。图中曲线表示的是后视镜区域的声源频谱,红色曲线是 DrivAer 原装后视镜噪声的平均频谱,而绿色曲线是奥迪 A4 后视镜噪声的平均频谱。由图 25 可以看出,在 2 240~2 820 Hz 和 3 550~4 470 Hz 这两个频段内两工况有较为明显的差异,故选择这两个频段做具体的分析,即用工况一的声源识别频谱减去工况二的结果,如图 26 所示。在这两个频段内,DrivAer 原装后视镜的造型都比奥迪 A4 的后视镜造

型引起的气动噪声小。

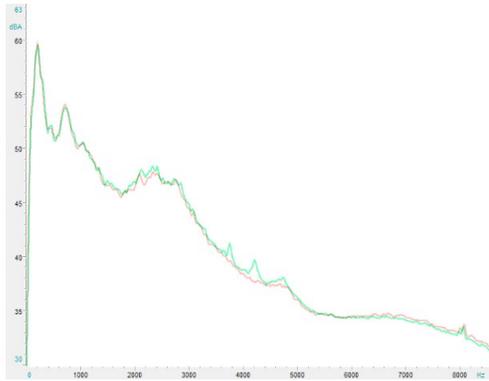


图 25 DrivAer 原装后视镜和奥迪 A4 后视镜噪声频谱

Fig.25 Frequency spectra of original rearview mirror and Audi A4 rearview mirror as noise source of DrivAer model

5 结论

本文对基于 Beamforming 技术的平面声阵列性能的一系列影响因素进行了研究,主要结论如下:

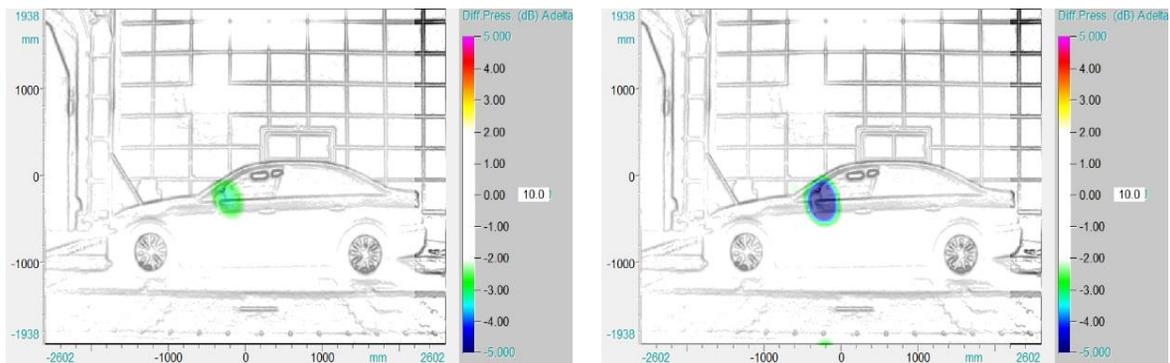
(1) 随着测试距离、入射角增大,系统空间分辨率变差;随着声源频率增大,系统空间分辨率更好,但动态范围变差。随着测试距离偏差的增大,识别结果中的声源强度不断降低。且不同声源频率、测试距离与阵列阵型对测试距离偏差引起的声源幅值误差的敏感度不同。声源频率越高、测试距离越小则敏感度越高。

(2) 多声源的相互影响使阵列的有效动态范围降低,同时声源强度增大。

(3) 运用波束形成声源相减方法,可以更直观地对比不同汽车部件造型方案引起的车外声源特征差异,便于工程师对不同设计方案做出评价。

参考文献:

- [1] LI L, LI J, LU B, *et al.* Application of beamforming to side mirror aeroacoustic noise optimization [C]// SAE 2016 World Congress and Exhibition. 2016. <https://doi.org/10.4271/2016-01-0475>.
- [2] SUZUKI T. L_1 generalized inverse beam-forming algorithm resolving coherent/incoherent, distributed and multipole sources [J]. *Journal of Sound & Vibration*, 2011, 330 (24): 5835.
- [3] BROOKS T F, HUMPHREYS JR W M. A deconvolution approach for the mapping of acoustic sources (DAMAS) determined from phases microphone arrays [C]// 10th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference. Manchester UK: AIAA, 2004: 2954.
- [4] DOUGHERTY R. Extensions of DAMAS and benefits and limitations of deconvolution in beamforming [J]// 11th AIAA/CEAS aeroacoustics conference. Monterey: 2005: 2961.
- [5] SCHWARZ U J. Mathematical-statistical description of the iterative beam removing technique [J]. *Astronomy and Astrophysics*, 1978, 65: 345.
- [6] SIJTSMA P. CLEAN based on spatial source coherence [J]. *International Journal Of Aeroacoustics*, 2007, 6(4): 357.
- [7] DOUGHERTY R P. Functional Beamforming [C]// Proceedings on CD of the Berlin Beamforming Conference. Berlin: [s.n.], 2014.
- [8] SUZUKI T. Generalized inverse beam-forming algorithm resolving coherent/incoherent, distributed and multipole sources [J]. *Journal of Sound & Vibration*, 2013, 330 (24): 5835.
- [9] CHRISTENSEN J J, HALD J. Technical review beamforming [M]. *Bruel&Kjaer, Denmark*: [s.n.], 2004.
- [10] ROIG E T. Eigenbeamforming array systems for sound source [D] localization, Denmark: Technical University of Denmark, 2014.
- [11] DÖBLER D, HEILMANN G, SCHRÖDER R. Investigation of the depth of field in acoustic maps and its relation between focal distance and array design [C]// Proceedings of INTER-NOISE. Shanghai: I-INCE, 2008: 654.



a 2240~2820 Hz b 3550~4470 Hz

图 26 不同频段下两不同后视镜声源相减结果

Fig.26 Sound source subtraction results for 2 different rear view mirrors at different frequency bands