

汽车风洞非均匀声场偏移导致纯音幅值变化

沈哲^{1,2,3}, 杨志刚^{2,3,4}, 彭里奇³, 王勇¹

(1. 汽车噪声振动和安全技术国家重点实验室, 重庆 401122; 2. 同济大学 机械工程博士后流动站, 上海 201804; 3. 同济大学 上海地面交通工具风洞中心, 上海 201804; 4. 北京民用飞机技术研究中心, 北京 102211)

摘要: 从非均匀声场偏移角度研究汽车风洞流场外测量得到纯音信号声幅值伴随风速大幅变化的机理。以汽车表面可控声源为试验研究对象进行风洞试验, 通过传声器获得不同风速下纯音声压级波动幅度, 并使用传声器阵列观察到声场的非均匀分布。基于点声源干涉理论模拟重构了非均匀声场, 参数化分析了各个反射壁面影响。根据几何声学理论推导剪切层折射产生的声场偏移, 较为准确地预测了不同试验风速下纯音幅值变化的趋势。结果证明干涉产生非均匀声场经剪切层折射后偏移是风洞纯音幅值波动的根本原因, 使用该声场重构方法能有效减小误差。

关键词: 车辆工程; 风洞; 声幅值; 声干涉; 声场偏移

中图分类号: U467.1

文献标志码: A

Variation of Pure Tone Sound Amplitude Caused by Non-Uniform Acoustic Field Deviation in Automobile Wind Tunnel

SHEN Zhe^{1,2,3}, YANG Zhigang^{2,3,4}, PENG Liqi³, WANG Yong¹

(1. State Key Laboratory of Vehicle Noise Vibration Harshness (NVH) and Safety Technology, Chongqing 401122, China; 2. Postdoctoral Station of Mechanical Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China; 3. Shanghai Automotive Wind Tunnel Center, Tongji University, Shanghai 201804, China; 4. Beijing Aeronautical Science and Technology Research Institute, Beijing 102211, China)

Abstract: From the perspective of non-uniform sound field offset, the mechanism of pure-tone sound-amplitude large change with wind speed which measured outside flow field of automobile wind tunnel was studied. A wind tunnel test was conducted with a controllable sound source on the automobile surface as the research object. The amplitude fluctuation of pure tone sound pressure level at different wind speeds was obtained by

microphone, and the non-uniform distribution of sound field was observed by microphone array. Based on the point source interference theory, the non-uniform sound field was simulated and reconstructed, and the influence of each reflecting wall was analyzed parametrically. The acoustic field offset caused by shear layer refraction was deduced according to the geometrical acoustic theory, and the trend of pure tone amplitude variation at different test wind speed was predicted. The results show that the deviation of the non-uniform sound field caused by the interference is the fundamental reason for the amplitude fluctuation of the pure sound in the wind tunnel, and the reconstruction method of acoustic field can effectively reduce the error.

Key words: vehicle engineering; wind tunnel; sound amplitude; acoustic interference; acoustic field deviation

声学风洞试验是研究车辆气动噪声必不可少的技术手段, 流场外测量是其中一项重要内容, 可直接测量得到车辆气动噪声源^[1]。声从流场内部传播至位于流场外测点的过程中, 开口式风洞的射流结构影响远场声源测量^[2], 产生包括声源漂移^[3-4]、声幅值变化^[5]和频散^[6]等现象, 使测量数据产生偏差, 需加以修正。

按照传统理论, 射流剪切层与声幅值变化的关系最为密切, 通过折射、扩散、散射等效应对声幅值分别产生影响。折射、扩散与射流马赫数密切相关, 并由声源、剪切层、接收点之间的几何关系共同决定^[5]; 散射与湍流剪切层的速度脉动分布直接关联^[6]。根据上述原理^[5-9], 流场外声幅值的变化与射流速度呈一定的比例关系, 声源不变的情况下, 随风速变化幅值趋势应当保持不变。但笔者在长期风洞

收稿日期: 2021-06-28

基金项目: 汽车噪声振动和安全技术国家重点实验室开放基金(NVH SKL-202003), 上海市重点实验室项目(18DZ2273300)

第一作者: 沈哲(1983—), 男, 工学博士, 博士后, 主要研究方向为车辆气动噪声。E-mail: 19310010@tongji.edu.cn



论文
拓展
介绍

试验测量实践中,观察到车外产生啸叫(纯音)这一类型的异响时,外声场测量得到的声幅值对速度非常敏感,相对小幅的速度变化就能引起声压的大幅波动,此现象用现有理论^[1-2,5]无法解释,有必要进行深入研究。

本文采用声学风洞试验测量的方法,在车身表面布置可控制扬声器,通过传声器阵列同时获得大量位置点声压信号,对较大范围的声场进行观察和分析。通过实际位置关系,对多点反射声源干涉声场进行建模和重构,参数化研究不同反射面的作用程度。用几何声学理论估算射流造成的声场偏移,即风洞试验状态声场(有风)空间分布相对于原始声场(无风)空间分布的变化,及由此产生的声幅值变化,分析声幅值大幅波动的原因。以期修正风洞试验中此类误差的影响,提高测量声幅值的精度。

1 风洞声传播试验

1.1 试验介绍

(1) 试验平台

试验在同济大学上海地面交通工具风洞中心整车气动声学风洞中完成。该风洞是3/4开口回流风洞,喷口尺寸27 m²;可测量试验段长度9 m,最大风速可达250 km·h⁻¹,背景噪声水平在160 km·h⁻¹试验风速下,低于61 dBA,试验段按照半消声室设计,自由场空间的低频截止频率为50 Hz。

(2) 可控声源

为了模拟实际整车风洞试验并保证试验过程目标声源的可控,将试验车安装在风洞天平上,在其前侧窗上安装一个带导流罩的扬声器,模拟后视镜及A柱产生的啸叫(纯音噪声),如图1所示。声信号使用HEAD Artemis软件生成并播放,通过B&K 2716型功率放大器增益后在上述扬声器产生声信号。



图1 汽车表面的可控声源

Fig. 1 Controllable sound source on automobile surface

(3) 测量设备与测点位置

试验测量采用一个G. R. A. S. 40AO型1/2英寸自由场传声器,位置正对车表扬声器;数采为德国HEAD acoustics公司SQLAB III多通道数据采集系统及配套电脑、分析软件。传声器正对车前侧扬声器中心,距离车侧面扬声器4.86 m。

1.2 声幅值变化结果

试验测量了多种风速下扬声器播放纯音信号的外场声压结果。1 kHz纯音测试结果的频谱如图2所示,采用HEAD Artemis软件进行4096点快速傅里叶变换(fast Fourier transform, FFT)得到,为了聚焦纯音峰值的变化,给出600~1400 Hz部分的频谱。试验同时测量了扬声器未发声即仅有气动噪声测试结果,以30 m·s⁻¹为例,如图2实线所示。结果显示:①除扬声器所产生1 kHz部分以外,扬声器是否发声对其他部分频谱没有影响;②扬声器发出的1 kHz纯音强度足够大,与气动噪声相比有10 dB以上的差值,气动噪声对其无法叠加影响。综上两点,从声压级叠加的角度,模拟啸叫的纯音电声与宽频气动噪声是相互独立的,但在不同试验风速下可观察到纯音的幅值大小有明显的变化,说明流动对此峰值有其他原因的影响。

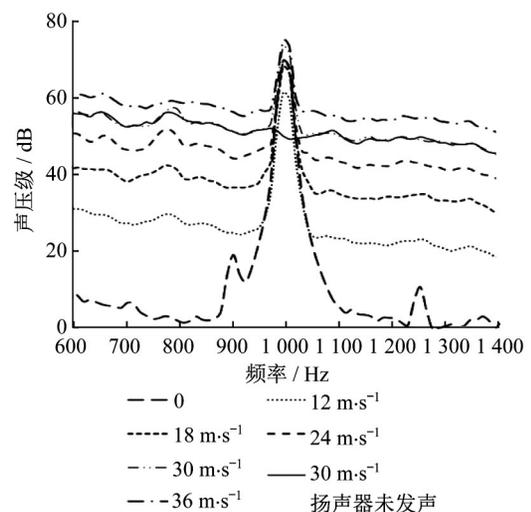


图2 不同风速下1 kHz声压频谱

Fig. 2 Spectrum of 1 kHz sound pressure at different wind speeds

为进一步观察纯音声幅值变化情况,给出上述声压级在不同风速下的变化值,如表1所示。结果显示存在风洞射流之后,纯音声压级虽然随着风速逐渐增长,但相对无风状态的变化量较大且有增有减,这显然与仅能引起声幅值下降的射流折射声扩散^[10-11]或湍流声散^[12]无关。

表1 纯音1 kHz峰值声压级随风速变化情况

Tab. 1 Variation of 1 kHz peak sound pressure level of pure tone with wind speed

	风速/(m·s ⁻¹)					
	0	12	18	24	30	36
声压级/dB	69.6	63.2	67.9	69.3	73.1	74.9
变化量/dB		-6.4	-1.6	-0.3	3.6	5.3

综上,“气动噪声叠加”、“射流传声扩散衰减”及“湍流声散射衰减”均非纯音峰值声压级大小随试验风速大幅变化的主要原因,应从其他角度研究。

2 声场不均匀性研究

2.1 声场试验测量

为确定声场空间不均匀的情况,在与第1节完全相同的试验条件下,对传声器测点周围声场进行了测量。为了高效地获得空间上声场分布,使用如图3所示的120通道传声器阵列进行测量,可同时采集所有传声器的声压信号。该阵列为德国Gfai公司用于声源定位的传声器阵列,阵列尺寸为1.8 m×1.8 m;阵列上使用120个1/4英寸压力场传声器;配套单通道采样频率96 kHz的120通道数采。传声器阵列安放平行于风洞射流方向,阵列中心正对扬声器,与1.1节中的传声器位置保持一致。

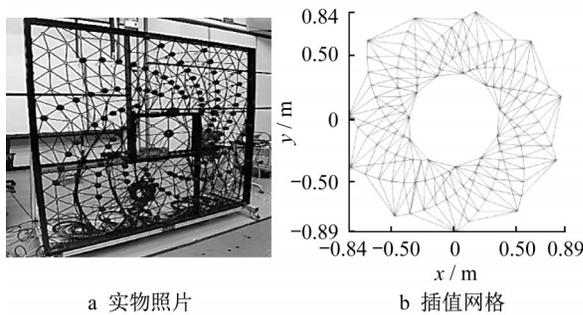


图3 用于测量声场的传声器阵列

Fig. 3 Microphone array used to measure sound field

测量完成后,将阵列上120个传声器的测试结果分别进行FFT变换得到1 kHz峰值的声压级,采用Tecplot软件进行线性插值给出声场分布。需注意螺旋形阵列中间位置无传声器,此部分插值时误差较大,因此未取值。无风状态下的声场云图如图4a所示,结果显示声场有明显的不均匀:①在高度 z 方向呈条块状的大幅起伏;②沿流动 x 方向也有呈斑块状的幅值变化,但差距较小;③测量范围内的峰谷差值达到30 dB以上。带试验风速的结果将在后

续分析时给出。

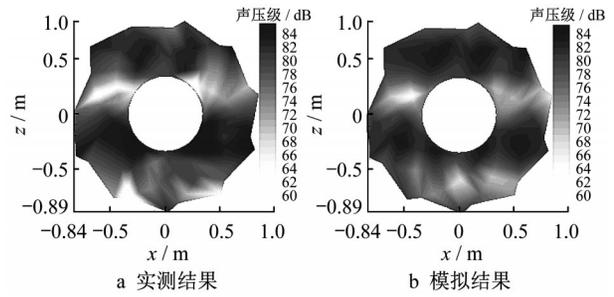


图4 无风状态声场云图

Fig. 4 Contour of sound field in static condition

2.2 声场模拟重构

本小节通过对声场模拟,分析产生非均匀声场产生的具体影响因素。虽然此风洞大部分壁面都进行了消声处理且取得了非常好的效果,但仍存在一些强反射面,反射声波与原始声波干涉后可能使空间声场呈现不均匀^[13]。其中,硬质地面是主要的反射面,试验车辆的反射也可能对声场有影响,此外还存在未进行消声处理的喷口壁面等面积较小的反射面。

本文用于模拟声场的方法是将原始声源假设为点声源,以反射面为对称轴设置系列镜像点声源,通过多点声源干涉^[14]理论式(1)计算任意位置点的声压级幅值:

$$p_r^2(\mathbf{r}) = 1/2 \left[\sum_{i=1}^n p_i^2(\mathbf{r}) + 2 \sum_{j=1}^{n-1} \sum_{k=j+1}^n p_j(\mathbf{r}) p_k(\mathbf{r}) \cos(\Delta\omega_{jk}) \right] \quad (1)$$

式中: \mathbf{r} 为接收点位置矢量; $p_r(\mathbf{r})$ 为接收点的声压场函数, $p_i(\mathbf{r}) = A_i \sin(\omega_i |\mathbf{r} - \mathbf{r}_i| + \varphi_i)$ 、 $p_j(\mathbf{r}) = A_j \sin(\omega_j |\mathbf{r} - \mathbf{r}_j| + \varphi_j)$ 和 $p_k(\mathbf{r}) = A_k \sin(\omega_k |\mathbf{r} - \mathbf{r}_k| + \varphi_k)$ 分别表示各点声源产生的声压场函数; A_i 、 A_j 与 A_k 为各个声源的幅值系数; \mathbf{r}_i 、 \mathbf{r}_j 与 \mathbf{r}_k 为各点声源位置矢量; $\Delta\omega_{jk}$ 表示两个点声源产生的声波在接收点的相位差。

在计算过程中,镜像声源的频率 ω 和初始相位 φ 均设置成与原始声源相等,镜像声源的幅值 A 则需根据壁面反射系数以及反射面占比动态调整,是需要研究的一项参数。模拟声场过程中,除了原始声源外,研究了包括地面、喷口垂直面、喷口内壁,简化为平面车侧面等反射面形成的镜像声源。分析计算的主要反射面、镜像声源、接收点之间的几何关系如图5所示。

通过设定不同镜像声源的幅值 A 大小,通过式(1)能够得到空间任意点上的声压级。为了便于和

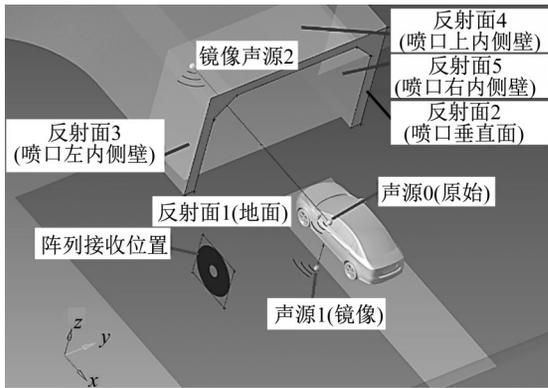


图5 计算声场空间位置关系

Fig. 5 Spatial position used to calculate sound field

试验测量结果比较,仅计算与试验测量网格(图3b)点完全相同的120个位置点的结果。以式(2)所示120点上平均模拟误差 E 得最小值为目标,保留3位有效数字,以穷举算法求各个参数的模拟最优解:

$$E = \frac{\sum_{n=1}^{120} |p_{t,n} - p_{s,n}|}{120} \quad (2)$$

式中: $p_{t,n}$ 为第 n 点声压级的试验值; $p_{s,n}$ 为第 n 点声压级的模拟计算值。

优化迭代过程中发现除了地面反射和喷口反射之外,其他反射面(车身侧面、喷口三个内侧壁、车顶面等)的幅值系数和模拟误差正相关,也就是引入此类反射面会使模拟声场偏离实测声场,因此在声场模拟中应排除这部分反射面,将其幅值系数 A_k 设为0。

经过上述优化,最优的声场模拟重构方案为:原始声源设为81 dB、地面反射声源幅值系数 A_i 设为0.80、喷口垂直面反射声源幅值系数 A_j 设为0.28、其他反射面的幅值系数 A_k 均为0。在此参数下,平均模拟误差 E 达到最优值3.01,模拟得到的声场插值云图如图4b所示,与图4a的实测声场相比,两者的相似度极高,说明此三点源模拟声场能很好还原实际声场分布。

关于各个反射面对声场的影响,主要结论如下:①地面反射是造成全局声场大幅不均匀的最重要因素,由声源与反射面直接的位置关系可知,此部分反射产生的干涉主要导致于高度方向的不均匀;②喷口垂直壁反射是声场沿流动方向不均匀的主要因素,虽此部分引起的声场不均匀程度较低,但与射流作用下固定测点声幅值变化有直接关联,因此也很重要;③车身侧面反射对此声场几乎无影响,是由于点声源处于车身表面,无法形成有效反射;④其他反射面(喷口三个内侧壁、车顶面等)因声波指向性及距离关系,对测量阵列处声场无影响。

3 声场偏移分析

本节对风洞射流剪切层声折射造成的声场偏移进行分析,进而研究声场偏移造成声幅值变化的问题。

3.1 射流声折射原理

开口式风洞中,声波在穿越射流剪切层时发生折射现象^[5],流场外静止区域的声场相对流动区产生整体偏移。图6为用经典的Amiet几何声学^[10]表示的声场偏移基本原理。忽略剪切层高度方向的速度梯度,声场偏移在不同高度平面内相等,本文只考虑声场在 x y 二维平面内的偏移。对于任意观测点,存在真实声源位置 S 以及受折射影响之后的表观声源位置 S'_0 ,用两种声源位置的坐标之差 p_x 及 p_y 表示声场偏移更为直观,且为后续计算带来较大的便利。根据Amiet理论^[10]推导后,两个方向的偏移 p_x 及 p_y 可分别用式(3)、式(4)计算:

$$p_x = (y_s + y_a) \cot \theta' - (y_s \cot \theta + y_a \cot \theta_r) \quad (3)$$

$$p_y = \frac{\sin \theta_r - \sin \theta}{\sin \theta} y_s \quad (4)$$

式中: θ' 为静止空气出射角; $\theta_r = \cos^{-1} \frac{\cos \theta'}{1 - M \cos \theta'}$ 为剪切层折射角, M 为射流马赫数; $\theta = \tan^{-1} \frac{\sin \theta'}{\cos \theta' - M}$ 为射流出射角; y_a 为测量面至剪切层的距离; y_s 为声源至剪切层的距离。

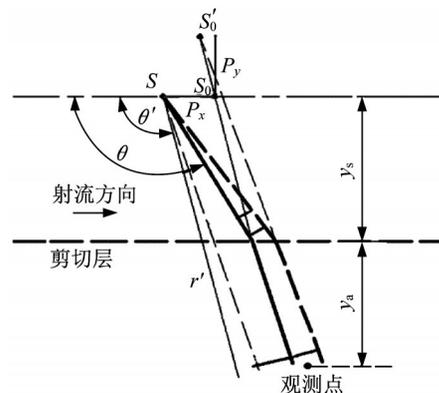


图6 声场在两个方向上偏移量

Fig. 6 Offset of sound field in two directions

经计算,由于本文测试条件马赫数 M 较低、静止空气出射角 θ' 接近 90° ,声场 y 向变化量 p_y 很小可忽略。不同风速下声场 x 向的偏移 p_x 如表2所示,可见在低速条件($M \leq 0.15$)下,偏移量与风速基本呈线性关系。

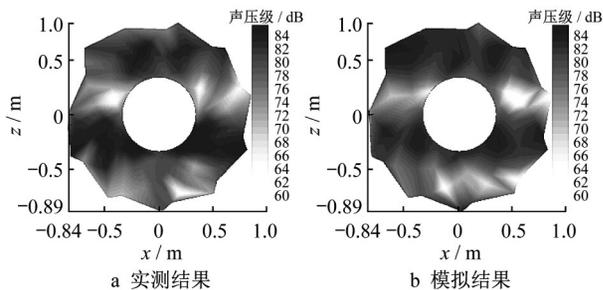
表2 不同风速下声场偏移量

Tab.2 Offset of sound field at different wind speeds

风速/(m·s ⁻¹)	12	18	24	30	36
偏移量 ρ_x/m	0.098	0.147	0.196	0.245	0.295

3.2 有流声场变化

本小节研究受流动影响后的声场变化。在2.1节的实测时包含了不同风速的结果,根据2.2节方法,将不同风速下三个点声源坐标分别从原声源位置改为折射后的表观声源位置,再对声场进行模拟。得到30 m·s⁻¹风速下声场的实测与模拟结果,如图7所示。此工况平均模拟误差 $E=4.01$,声场模拟重合度误差比静止状态下略大,但仍处于可接受的范围。与图4比较,在流动的作用下,声场相对静止状态声场主要变化为:①峰谷的分布在高度方向基本不变,在水平方向产生偏移,模拟声场能较好地捕捉到这一点;②实测声场峰谷差距变小,说明不均匀程度有所降低,原因是湍流剪切层的散射,这部分模拟并未考虑,是模拟声场与实测声场最大的差别。篇幅所限仅给出一种风速的结果,在其他风速下也能得到类似结论。

图7 风速30 m·s⁻¹声场云图Fig.7 Contour of sound field at a wind speed of 30 m·s⁻¹

以上分析表明,经过偏移修正的模拟声场云图不仅在整体上与实测结果较为相似,更重要的是捕捉到了相对于静止声场在流动方向的变化趋势。说明在射流的作用下,声场的峰谷是随试验风速不断变换的。

4 声幅值变化与修正

4.1 声幅值变化定量分析

经过3.2小节的声场分析,可定性确定固定点的纯音声压级均随风速变化,本节对此进一步的定

量分析。

结合第2、3节的方法,模拟第1节实测位置点在不同风速下声压级的变换情况,其1 kHz 峰值变化量如图8所示。结果显示,模拟结果与实验测量的结果整体吻合度较高,能够准确地给出声压级变化趋势,说明本文的“非均匀声场偏移”在研究风速范围内均有效。分析图中的具体数据,例如30 m·s⁻¹风速工况实测声压级相对静止状态上升3.6 dB,此前数据分析已排除气动噪声的叠加影响,而射流扩散与湍流散射只能使峰值声压级衰减;模拟结果上升2.4 dB,虽有一定误差,但解决了1.2节经典理论不适用于幅值上升的问题。

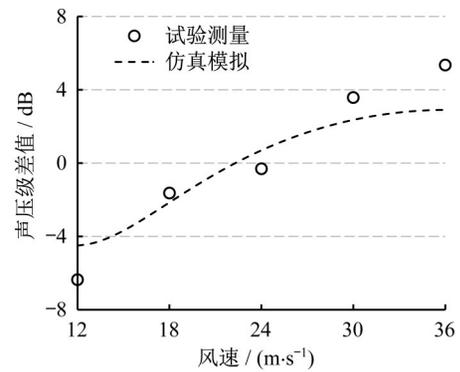


图8 风速作用下1 kHz 声压级变化

Fig.8 Variation of sound pressure level at 1 kHz at different wind speeds

以上对图8的定量分析结合不同风速下的声场云图(图4、图7),可确定试验测量得到固定测点纯音声压级变化的根本原因是声场偏移使该点在非均匀声场中所处位置的峰谷转换。一旦测点处于峰值峰谷变化的敏感区域,较小的风速变化就能引起幅值的明显变化。

4.2 修正与应用讨论

经过4.1节验证,证明本文所使用“多点声源干涉模拟重构非均匀声场”及“剪切层折射声场偏移”相结合的方法能较为准确地模拟汽车风洞纯音信号产生的非均匀声场以及带来的声幅值变化。该方法在实际风洞试验的应用主要有以下两个方面。

(1) 声幅值修正

当声源位置是确定的,可通过原始声源、反射面、剪切层(折射面)之间的几何关系以及射流马赫数,快速建立不同速度下的声场模型,用于修正纯音声幅值的测量误差。

(2) 声源定位

在实际测量中,纯音气动噪声源的位置可能并

不确定,采用上述模拟方法,在已知其他几个参数的情况下,通过测量若干位置点声幅值变化情况,也可反推声源位置,作为传声器阵列声源识别的替代或补充技术手段。

5 结论

以可控声源产生的噪声信号为目标,在汽车整车风洞流场外使用传声器测量声幅值并利用传声器阵列获得局部声场,同时结合多点声源干涉原理与几何声学剪切层折射理论对声场进行建模重构,实测与模拟对照研究了汽车风洞流场外纯音声幅值在不同风速下大幅变化的原因,得到以下结论。

(1)汽车风洞内纯音声压级随风速大幅变化是“干涉形成非均匀声场”与“剪切层折射声偏移”共同作用的结果,两者缺一不可。

(2)壁面反射与原始信号之间的干涉是声场不均匀的根本原因。喷口垂直壁面积虽小,但对声场的流向不均匀性形成起关键作用,与流动作用下声场变化更为密切。

(3)射流剪切层的折射效应是声场产生偏移产生的原因。单个测点在常用试验风速范围内,即可产生不均匀声场的峰谷转换,进而引起声压级的较大幅度改变。

(4)本文的模拟重构风洞偏移声场方法,既可以用于修正单点声幅值误差,也可辅助定位纯音声源。

作者贡献声明:

沈哲:概念提出,试验测试,数据分析及论文撰写、修改。

杨志刚:理论指导及架构讨论。

彭里奇:程序编制及数据、图片处理。

王勇:资源协调及论文审阅。

参考文献:

- [1] SCHUETZ T. Aerodynamics of road vehicles 5th edition[M]. Warrendale: SAE International, 2016.
- [2] MUELLER T J. Aeroacoustic measurements [M]. Berlin Heidelberg: Springer, 2002.
- [3] 沈哲,王毅刚,杨志刚,等.风洞中未知声源漂移误差的逼近修正[J].吉林大学学报(工学版),2020,50(5):1584.
SHEN Zhe, WANG Yigang, YANG Zhigang, *et al.* Drift error correction of unknown sound source in wind tunnel using approximation method [J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2020,50(5):1584.
- [4] 王勋年,李征初,陈正武,等.声学风洞内气动噪声源识别定位方法研究[J].空气动力学学报,2012,30(3):284.
WANG Xunnian, LI Zhengchu, CHEN Zhengwu, *et al.* Researching on aerodynamic noise sources identification technology in anechoic wind tunnel [J]. *Acta Aerodynamica Sinica*, 2012,30(3):284.
- [5] BARLOW J B, RAE W H, POPE A. Low-speed wind tunnel testing[M]. Hoboken: John Wiley & Sons, 1999.
- [6] CLAIR V, GABARD G. Spectral broadening of acoustic waves by convected vortices [J]. Journal of Fluid Mechanics, 2018,841:50.
- [7] CANDEL S M, GUEDEL A, JULIENNE A. Radiation, refraction and scattering of acoustic waves in a free shear flow [C]// AIAA 3rd Aeroacoustics Conference. Reston: AIAA, 1975: 76-544.
- [8] GUEDEL A. Scattering of an acoustic field by a free jet shear layer[J]. Journal of Sound and Vibration, 1985, 100(2): 285.
- [9] BOGEY C, GLOERFELT X, BAILLY C. Illustration of the inclusion of sound-flow interactions in Lighthill's Equation[J]. AIAA Journal, 2015, 41(8): 1604.
- [10] AMIET R K. Refraction of sound by a shear layer[J]. Journal of Sound and Vibration, 1978, 58(4): 467.
- [11] AMIET R K. Correction of open jet wind tunnel measurements for shear layer refraction [C]// AIAA 2nd Aeroacoustics Conference. Reston: AIAA, 1975: 75-532.
- [12] AHUJA K, TANNA H, TESTER B J. An experimental study of transmission, reflection and scattering of sound in a free jet flight simulation facility and comparison with theory[J]. Journal of Sound and Vibration, 1981, 75(1): 51.
- [13] SODERMAN P T, JAEGER S M, HAYES J A, *et al.* Acoustic performance of the 40- by 80- foot wind tunnel test section deep acoustic lining [C]// 6th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference. Reston: AIAA, 2000:1939-1970.
- [14] 查雪琴,周小儒, FUCHS H V. 自由声场特性的模拟计算和测量[J].电声技术, 2009,33(11):6.
ZHA Xueqin, ZHOU Xiaoru, FUCHS H V. Computer simulation and measurement of free-field characteristics [J]. Audio Engineering, 2009,33(11):6.