

运动汽车噪声的可视化测量方法比较研究^{*}

王子腾, 杨殿阁, 李兵, 连小珉

(清华大学汽车安全与节能国家重点实验室, 北京 100084)

摘要: 运动汽车噪声源的快速定位和精确测量是进行汽车噪声控制的重要基础, 通过可视化的方法将噪声源及声场分布实时显示出来使这一过程更为高效直观。目前在运动汽车噪声测量领域有3种噪声可视化测量方法: 远场声全息法、短时波束形成法和动态波叠加法。通过理论分析和仿真模拟对3种方法进行比较研究, 并搭建了基于3种方法的仿真和实验系统, 通过实验验证研究结果, 得出研究结论。

关键词: 运动汽车噪声; 声场测量; 声场可视化

中图分类号: TB52 **文献标识码:** A **文章编号:** 1004-4523(2011)05-0578-07

引言

随着中国城市化进程的发展, 噪声污染已成为大气污染、水污染以外的城市第三大污染^[1]。城市中, 最主要的噪声污染源就是汽车等交通工具, 调查表明, 机动车辆噪声占城市交通噪音的85%。因此汽车噪声的控制对于提高城市居民的生活质量具有重要意义。近些年随着声学研究的不断发展, 利用声场可视化测量方法对运动汽车进行声源定位和声场测量越来越受到重视。

声场可视化是当前声学研究领域一个重要的分支, 是进行声场模拟、声源识别以及噪声控制等研究的重要基础, 运动声源的声场可视化是这一研究领域中的一个重点和难点。从20世纪80年代开始, 人们提出了利用声全息法、波束形成法等进行运动声源的声场测量^[2,3], 并将声场重建结果与图片或者照片等进行手工合成实现声场的可视化。近年来, 随着摄像技术的快速发展, 实现声场的动态视频可视化成为一个发展趋势, 丹麦的 Büel & Kjaer, 荷兰的 Microflow n 和德国的 GfA I 等研究单位相继提出了“声学照相机”的概念^[4,5]。另外, 针对以往的方法存在的旁瓣效应和虚假声源的问题, 动态波叠加的方法被用于进行运动声场的可视化测量, 达到了有效抑制旁瓣和虚假声源的效果, 提高了声场重建的精度^[6,7]。

本文介绍了远场声全息法、短时波束形成法和动态波叠加法这3种适用于运动汽车声场重建的算法, 通过仿真模拟和实验对比验证了三者的特性和差异。

1 运动汽车的声场可视化重建算法

1.1 短时波束形成法

短时波束形成方法是基于“延时-累加”波束形成原理对信号进行叠加^[8]。对于重建面上某点 s , 重建其在时段 $[t_1, t_2]$ 内的声压信号原理如图1所示。

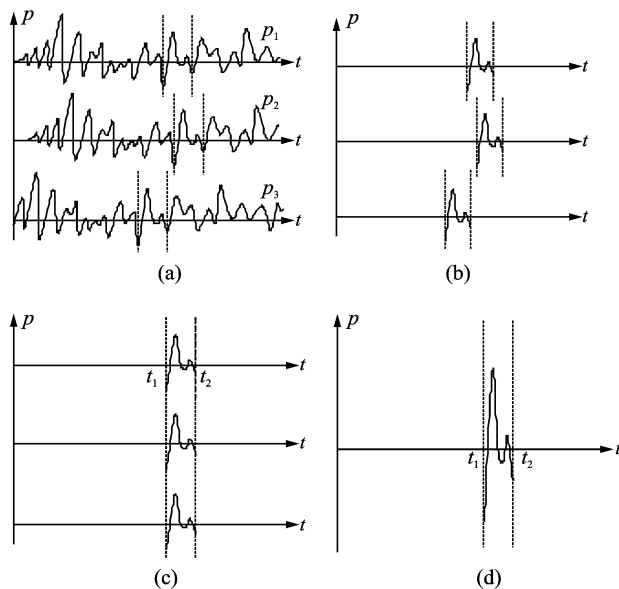


图1 波束形成法声场重建原理示意图

首先, 根据要分析的时段计算各个传声器接收到该段信号的时段, 如图1(a)所示; 其次提取出所需的各个声压信号段, 如图1(b)所示; 然后, 根据声波传播

^{*} 收稿日期: 2011-05-30; 修订日期: 2011-07-15

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (50605038)

时间进行延时处理,如对于信号 $p(t)$,设其在 t 时刻点 $s(X,Z)$ 发出声波到传声器 i 的传播时间为 $r_i(t,X,Z)/c$,则如图 1(c)中所示的延时处理后的信号为

$$\tilde{p}_i = p_i \left[t + \frac{r_i(t,X,Z)}{c} \right] \tag{1}$$

最后,将各延时处理后的信号叠加,得到该分析时间段的重建结果,如图 1(d)。

按照上述原理,重建面 R 上任意点 $s(X,Z)$ 处的声场特征函数重建公式如下

$$W_s(X,Z) = \int_{t_1}^{t_2} P^2(t,X,Z) dt \tag{2}$$

$$P(t,X,Z) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N p_i \left[t + \frac{r_i(t,X,Z)}{c} \right] \tag{3}$$

式中 $W_s(X,Z)$ 为声源面上任意点 $s(X,Z)$ 处在 $t_1 \sim t_2$ 时间内的声场特征函数, $P(t,X,Z)$ 为应用波束形成法对声源特征函数的估计, $p_i(t)$ 为 t 时刻第 i 个传声器接收到的信号声压, c 为声速, N 为传声器数目, $r_i(t,X,Z)$ 为 t 时刻声源面上点 $s(X,Z)$ 与第 i 个传声器之间的物理距离

据此原理遍历整个声源面,可获得在时段 $[t_1, t_2]$ 内整个声源面上的声场特征函数分布。

1.2 远场声全息法

近场声全息方法是由美国学者 Williams 等人于 20 世纪 80 年代提出的^[9~11],后他又将近场声全息理论的应用扩展到远场条件下,使得该方法的应用范围拓宽。本世纪初,清华大学的杨殿阁等从声波的衍射原理出发建立了一套衍射声全息理论^[12~14],其基本原理如图 2 所示。

图 2(a)中 \boldsymbol{n} 为全息面外法线的方向, \boldsymbol{r} 为矢径, θ 为 \boldsymbol{r} 与全息面外法线方向 \boldsymbol{n} 的夹角, E 为在测量面位置的无限大空间平面,测量面 A 为 E 的一部分, R 为假定的点声源点 s 所在的平面,称作声源面。

U 可以看作图 2(a)所示所假定的点声源所发出的球面波在 E 处的空间声场分布, $H(x,y,f)$ 为 U 在 E 平面上的分量。在 U 已知的情况下,利用基尔霍夫衍射积分计算在波的传播方向上无源的空间中任意一点 P 的声场公式

$$U(P) = \frac{1}{4\pi} \iint_H \left[\left(\frac{e^{jkr}}{r} \right) \frac{\partial U}{\partial \boldsymbol{n}} - U \frac{\partial}{\partial \boldsymbol{n}} \left(\frac{e^{jkr}}{r} \right) \right] d\boldsymbol{e} \tag{4}$$

图 2(b)可以看作是一虚拟声源 s_1 在 E 处的空间声场分布, s_1 所发出为声波汇聚于 s ,与 s 点实际发出的球面波互为共扼波。按此原理得到基于共扼波会聚原理的声全息重建公式

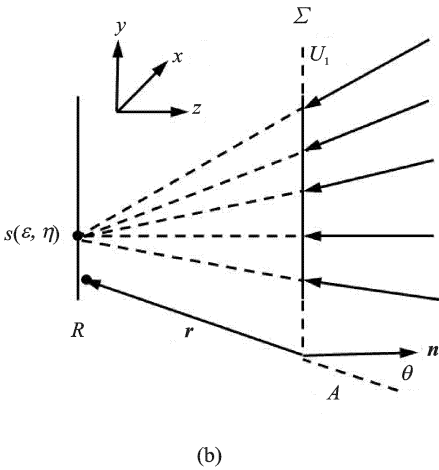
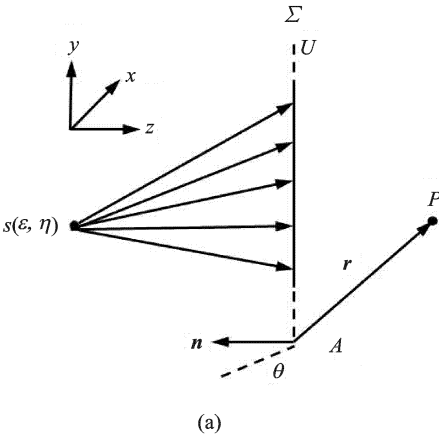


图 2 衍射声全息原理示意图

$$U(X,Z,f) = \frac{Ck}{j} \iint_H H^*(x,y,f) \cdot \left[1 + \left[1 - \frac{1}{jkr} \right] \frac{z_0}{r} \right] \frac{e^{-jkr}}{r} dx dy \tag{5}$$

式中 $k=f/c$ 为波数, c 为声速, C 为全息常数, r 为重建面上点 $Q(X,Z)$ 与全息面上点 (x,y) 的距离。上式为按单一频率 f 计算的结果,连续取若干频率点计算,并按能量叠加,即可求得某一频率范围内的声压幅值计算式

$$P(X,Z) = \sqrt{\int_{f_1}^{f_2} |U(X,Z,f)|^2 df} \tag{6}$$

通过上述方法即重建出假定声源点 Q 的声压值,将假定点遍历重建平面,重复此计算过程,即可求得整个平面上的声压分布。

在实际测量中无法测得全息面上的连续声压分布,因而需将式(5)进行离散化,对于如图 3 所示的规则阵列可以直接进行离散化得到重建公式

$$U(X,Z,f) = \frac{Ck}{j} \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N H^*(m,n,f) \cdot$$

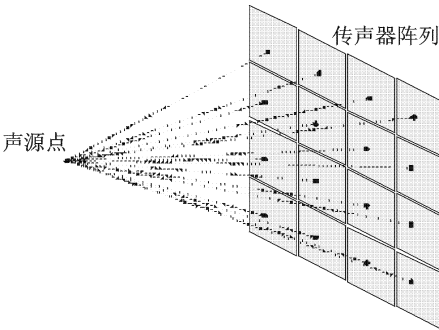


图 3 全息面构造示意图

$$\left[1 + \left(1 - \frac{1}{jkr} \right) \frac{z_0}{r} \right] \frac{e^{-jkr}}{r} \Delta x \Delta y \tag{7}$$

式中 M, N 分别为传声器的行数和列数, $H^*(m, n, f)$ 为第 m 行第 n 列的传声器的全息信息, r 为重建面上点 $s(X, Z)$ 与第 m 行第 n 列传声器的距离, Δx 和 Δy 分别为传声器的行距和列距

1.3 动态波叠加法

Koopmann 等人提出了波叠加方法^[15, 16], 该方法通过直接确定分布在声源内部的等效源的源强计算出整个空间声场, 避开了边界元法中存在的奇异积分与特征波数求解的非唯一性处理等问题, 能够较好地解决虚假声源和旁瓣等问题, 但该研究只能用于静态声源的声场。对于静止声源可以直接通过下式用波叠加法得到接受点的声压

$$P(f) = \sum_n Q_n(f) \cdot g_n(f) \tag{8}$$

在多个声源的情况下, 同样可以将各个声源产生的声压进行矢量叠加, 如下式

$$P(\bar{f}) = \int \sum_n Q_n(f) \cdot g_n^*(f) \cdot T_n(f, \bar{f}) df \tag{9}$$

式 (8) 中各频率间是独立的, 而式 (9) 中除了需要进行多普勒频移外, 由于不同声源的角度 $\bar{\theta}_n$ 值不同, 其频移量也不同, 不同频率成分间发生了耦合。式 (9) 得到了对于连续频谱的波叠加关系, 为了实际应用, 将其改写为离散形式

$$P = H \cdot Q \tag{10}$$

式中 P 为各传声器各频率的短时声压值向量, 长度为 $M \times K$; Q 为各点声源各频率的短时源强值向量, 长度为 $N \times K$; H 为有 $N \times K$ 行 $M \times K$ 列的传递函数矩阵, 如下式

$$H = \begin{bmatrix} G_{11}T_{11} & G_{12}T_{12} & \cdots \\ G_{21}T_{21} & G_{22}T_{22} & \\ & \ddots & \\ & & G_{NM}T_{NM} \end{bmatrix} \tag{11}$$

式中 G_{nm} 为各频率下从点声源 Γ_n 到传声器 m_i 的静态格林函数矩阵; T_{nm} 为各频率下从点声源 Γ_n 到传声器 m_i 的短时多普勒频移矩阵, T_{nm} 为频移函数 $T_b(f, \bar{f})$ 的离散化近似, 其第 k_1 行 k_2 列的元素取值为

$$T_{nm}(k_1, k_2) = \begin{cases} 1 & \Delta f/2 < f_{k_2} - f_{k_1} (1 - M_a \cos \theta_{nm}) \leq \Delta f/2 \\ 0 & \text{其他} \end{cases}$$

(12)

根据式 (10) 建立的离散频谱的短时波叠加关系, 在已知声源位置和强度时, 就可以计算出任意位置的频域声压; 若已知声源位置和接受点声压时, 则在 $M \gg N$ 的情况下就可以通过解方程组反求声源的强度, 这就是利用短时波叠加关系进行运动声源声场分析的基本原理

通过声源场中各点声源的位置和强度计算重建场中各点的声压, 由于声源场与重建场保持相对静止关系, 则通过正则化求解得到各声源点的强度后, 就可以按式 (8) 进行简单的静态声场的波叠加得到重建场内任意一点的声压值如下

$$\mathcal{P}(f) = \sum_n \frac{\exp(-jkr_n)}{4\pi r_n} \tilde{Q}_n(f) \tag{13}$$

式中 $\tilde{Q}_n(f)$ 为 Γ_n 的频域源强, $k_f = 2\pi f/c$ 为频率 f 对应的波数, j 为虚数单位。得到声压频谱, 就可以进一步得到有效声压值如下

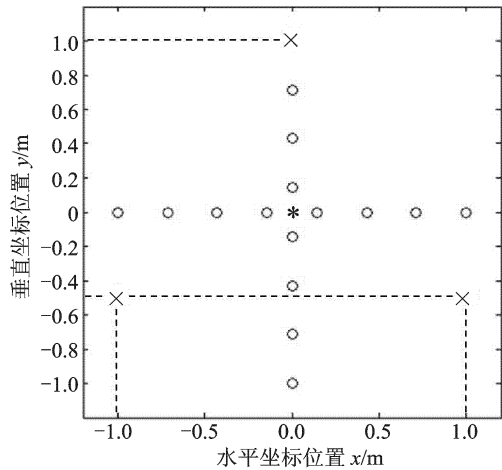
$$p_e = \sqrt{\int_{f_L}^{f_H} |\mathcal{P}(f)|^2 df} \tag{14}$$

对于重建场内各点重复上述计算过程, 就得到了重建场的声压分布。

2 仿真实验比较研究

通过仿真计算对上述 3 种方法的重建效果进行验证, 计算中声源为 3 个频率同为 1 000 Hz 的相干声源, 其在声源面上的位置坐标分别为 (0, 1 m), (1 m, - 0.5 m) 与 (- 1 m, - 0.5 m), 测量传声器阵列共包括 17 个传声器, 其在测量面内的位置如图 4 所示, 其中, “×”表示 3 个声源的位置, 中心处“*”表示的为验证用传声器, “o”表示的为计算用传声器。声源面与测量面的距离为 2 m, 声源以 30 m/s 的速度沿 x 轴正方向移动。计算时长取 0.01 s, 分析频率取 900~ 1 100 Hz

计算结果如图 5 所示, 图中白色斑点区域表示声压分布, 计算重建面与声源面相距 0.1 m 图 5(a), (b) 和 (c) 分别为利用声全息法、波束形成法和波叠加法得到的重建面计算结果, 图中横坐标为水平位置坐标, 纵坐标为垂直位置坐标, 单位均为 m



× — 声源位置; * — 验证传声器; o — 传声器)
图 4 仿真计算条件 (声源、传声器位置)

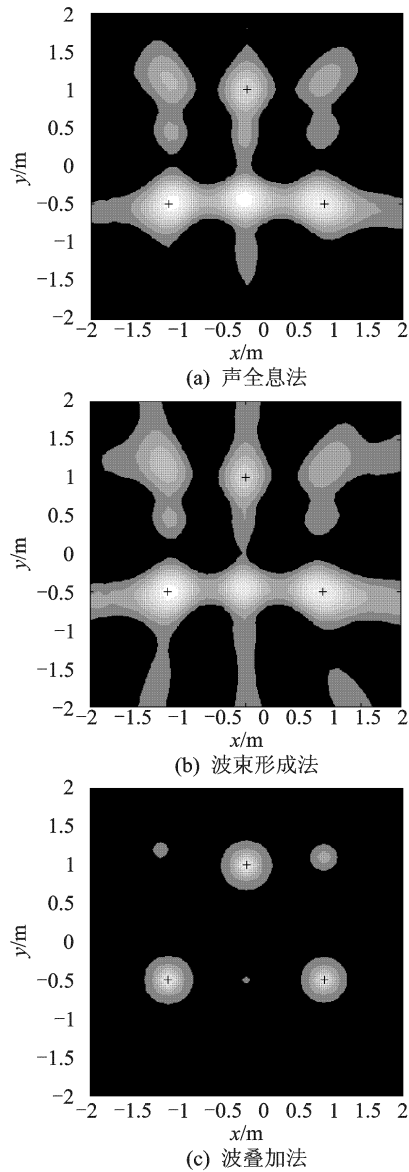


图 5 重建面声压计算结果

到 3 个声压峰值点,但声全息法和波束形成法结果中在声源对称位置出现 3 个较高的旁瓣,即虚假声源,仅通过声全息和波束形成算法是无法区分其是否为真实声源的,短时波叠加法计算结果中两处虚假声源已基本被消除了。

计算 3 种方法的主瓣面积 $A(\text{m}^2)$ 和主旁瓣比 λ (主瓣能量/旁瓣能量)如表 1 所示

	声全息法	波束形成法	波叠加法
主瓣面积 A	0.242 5	0.277 9	0.041 4
主旁瓣比 λ	1.679	1.821	3.082

由表 1 计算动态波叠加法与其他两种方法的主瓣面积比

$$\frac{A_{\text{波叠加法}}}{A_{\text{声全息法}}} = \frac{0.041\,4}{0.242\,5} \times 100\% = 17.07\%$$

$$\frac{A_{\text{波叠加法}}}{A_{\text{波束形成法}}} = \frac{0.041\,4}{0.277\,9} \times 100\% = 14.90\%$$

由表 1 计算动态波叠加法与其他两种方法相比的主旁瓣比增长率

$$\frac{\lambda_{\text{波叠加法}} - \lambda_{\text{声全息法}}}{\lambda_{\text{声全息法}}} = \frac{3.082 - 1.679}{1.679} \times 100\% = 83.56\%$$

$$\frac{\lambda_{\text{波叠加法}} - \lambda_{\text{波束形成法}}}{\lambda_{\text{波束形成法}}} = \frac{3.082 - 1.821}{1.821} \times 100\% = 69.25\%$$

可见波叠加法相对其他两种方法主瓣面积明显减小,主旁瓣比大幅提高,使声源识别的分辨率提高,对旁瓣效应有明显抑制作用,有效避免了虚假声源现象的产生。

3 运动汽车噪声测量对比实验

在室外环境下进行运动汽车携带两个有源音箱的声场测量对比实验,如图 6 所示。两个有源音箱固定于车窗处,均发出频率为 800 Hz 的简谐声波。运动汽车噪声可视化测量系统如图 7 所示,摄像机分辨率选择 640× 512,外触发帧率为 24 fps;传声器阵列采用 17 通道的十字形对称阵列,传声器阵列孔径约 2 m,传声器间距为 0.08 m。

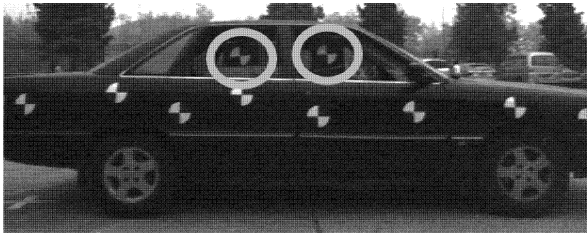


图 6 试验车辆及音箱固定位置

从图 5 中可以看到 3 个真实声源处确实分别得

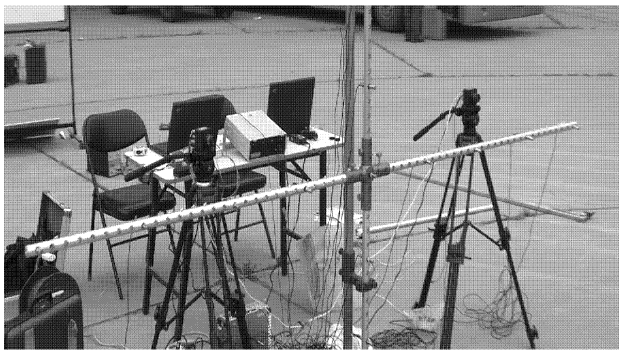


图 7 运动汽车噪声可视化测量系统

通过运动汽车声场可视化系统测量的动态声场计算结果对比图如 8 所示,其中的分析目标频率取 900~ 1 100 Hz 图 8(a), (b), (c)和 (d)分别为原始视

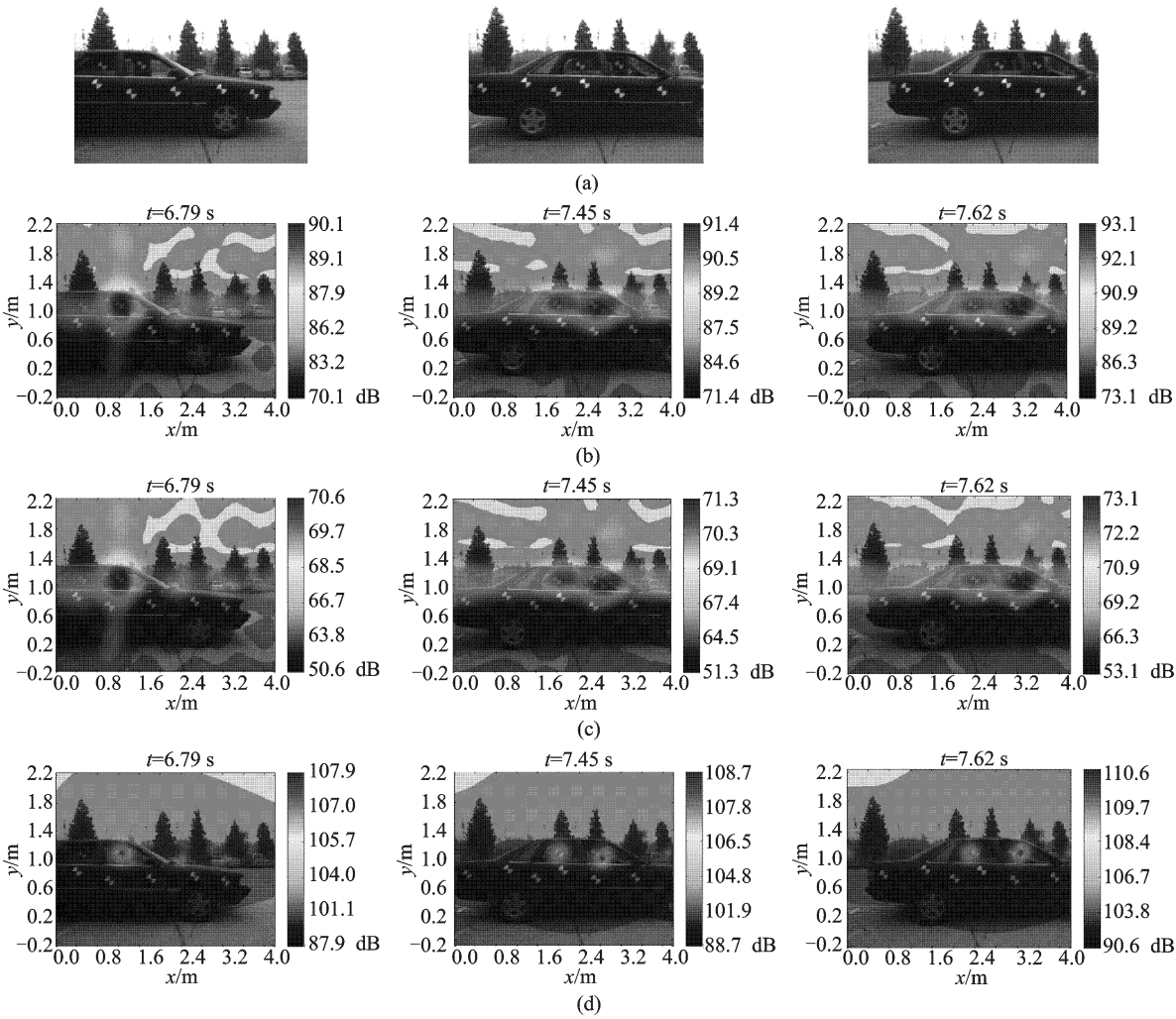


图 8 运动音箱可视化测量结果对比图

频图像,远场声全息法测量结果,短时波束形成法测量结果和动态波叠加法测量结果,图中横坐标为水平位置坐标,纵坐标为垂直位置坐标,单位均为 m。从图 8 可见,3 种方法都可以捕捉到声源,并在运动过程中能够准确地跟踪其位置。分别计算 3 个时刻的主瓣面积 $A(\text{m}^2)$ 和主旁瓣比 λ (主瓣能量/旁瓣能量),并按照与仿真对比相同的计算方法计算主瓣面积比和主旁瓣比增长率,计算结果如表 2 和 3 所示。

从实验结果图及表中对比结果可以看出,声全息法和短时波束形成方法均可以准确定位运动声源,其声源识别结果的旁瓣效应较大,主瓣宽度也较大,二者的旁瓣效应及主瓣宽度相差不大。动态波叠加法与以上两种方法相比,可以看到其旁瓣效应和主瓣宽度得到了明显的改善,声源的分辨率更高。

表 2 3种方法在不同时刻主瓣面积 A 计算结果 (单位: m^2)

计算时刻 t	远场声全息法	短时波束形成法	动态波叠加法	$A_{\text{动态波叠加法}}$	$A_{\text{动态波叠加法}}$
				$A_{\text{远场声全息法}}$	$A_{\text{短时波束形成法}}$
6.79 s	0.372 3	0.402 1	0.048 7	13.08%	12.11%
7.45 s	0.328 5	0.355 7	0.039 7	12.09%	11.16%
7.62 s	0.353 5	0.317 3	0.038 7	10.95%	12.20%

表 3 3种方法在不同时刻主旁瓣比 λ (主瓣能量 /旁瓣能量) 计算结果

计算时刻 t	远场声全息法	短时波束形成法	动态波叠加法	$\lambda_{\text{动态波叠加法}} - \lambda_{\text{远场声全息法}}$	$\lambda_{\text{动态波叠加法}} - \lambda_{\text{短时波束形成法}}$
				$\lambda_{\text{远场声全息法}}$	$\lambda_{\text{短时波束形成法}}$
6.79 s	2.725	2.537	3.556	30.50%	40.17%
7.45 s	1.963	1.744	3.460	76.26%	98.39%
7.62 s	1.870	1.407	2.746	46.84%	95.17%

根据上述理论分析、仿真验证及实验结果可见,对于运动汽车噪声测量的 3 种方法各有优劣,可以用在对定量分析、计算效率、识别准确性要求不同的场合:短时波束形成法的优点是计算效率高、适用性强,缺点是旁瓣高,不能进行定量分析;远场声全息法的优点是可以定量分析,缺点是仍有旁瓣效应;动态波叠加法的优点是可以有效抑制旁瓣效应,可以提高识别分辨率,但该方法也存在缺点,其识别结果的稳定性依赖于波束形成方法的预识别结果,所识别声源的位置有时会出现稳定性差,声源位置出现跳动的情况,还需要进一步研究提高其声源识别的稳定性。

4 小 结

本文介绍和比较了动态汽车声场测量中 3 种方法的测量效果,声全息和波束形成法发展较为成熟,尤其是波束形成法由于较高的重建效率得到广泛应用。但是虚假声源和旁瓣效应的问题使动态波叠加这种新的方法进入声场测量的领域。经本文验证该方法在抑制旁瓣效应有明显效果。但是波叠加方法的应用也存在一些问题,如在初始阶段需要进行声源位置预估,如果预识别结果误差较大,本方法就难以改善其识别效果等。另外,本系统目前应用范围较为单一,今后应针对不同测量需求,考虑应用其他形式的传声器阵列,或者将所用的摄像机普通镜头改为广角镜头,扩大测量范围等。

参考文献:

[1] 陈国新. 环境科学基础 [M]. 上海: 复旦大学出版社, 1992 206- 210.

[2] 于飞,陈心昭,李卫兵,等. 空间声场全息重建的波叠加方法 [J]. 物理学报, 2004, 53(8): 2 607- 2 613.

[3] Barsikow B, King W F, Pfizenmaier F. Wheel /rail noise generated by a high-speed train investigated with a line array of microphones [J]. Journal of Sound and Vibration, 1987, 118(1): 99- 122.

[4] Scott Brandes T, Robert H Benson. Sound source imaging of low-flying airborne targets with an acoustic camera array [J]. Applied Acoustics, 2007, 68: 752- 765.

[5] Vecchio A, Valent L, Berthe A, et al. The microflown, a novel approach to helicopters interior noise testing [A]. IM TC2006 [C], Sorrento, Italy, 2006.

[6] 李兵,杨殿阁,郑四发,等. 基于遗传算法的动态优化波叠加噪声源识别方法 [J]. 机械工程学报, 2010, 46 (12): 99- 105.

[7] 徐亮,毕传兴,陈剑,等. 基于波叠加法的 patch 近场声全息及其实验研究 [J]. 物理学报, 2007, 56(05): 2 776- 2 783.

[8] 毛晓群,罗禹贡,杨殿阁,等. 使用阵列技术识别高速行驶轿车的辐射声源 [J]. 汽车技术, 2003, (9): 6- 9.

[9] Williams E G, Maynard J D. Holographic imaging without the wavelength resolution limit [J]. Phys Rev Lett., 1980, 45: 554- 557.

[10] Maynard J D, Williams E G. Nearfield holography a new technique for noise radiation measurement [A]. Proc. Noise Con. 81 [C]. New York, USA, 1981, 19- 24 213- 221.

[11] Maynard J D, Williams E G, Lee Y. Nearfield acoustic holography: I. Theory of generalized holography and the development of NAH [J]. J. Acoust. Soc. Am., 1985, 78: 1 395- 1 413.

[12] 杨殿阁,郑四发,李愈康,等. 利用声全息方法识别汽车噪声源 [J]. 汽车工程, 2000, 22(2): 90- 92.

[13] 杨殿阁,郑四发,李愈康,等. 用于声源识别的声全息重建方法的研究 [J]. 声学学报, 2001, 26(2): 156- 160.

[14] 杨殿阁,郑四发,郑凯,等. 利用声全息方法研究汽车

噪声空间传播 [J]. 中国机械工程, 2001, 12(10): 1 148— 1 150.

[15] Koopmann G H, Song L, Fahnlne J. A method for computing acoustic fields based on the principle of wave superposition[J]. J. Acoust. Soc. Am., 1989, 86(5): 2 433— 2 438.

[16] Song L, Koopmann G H, Fahnlne J. Numerical errors associated with the method of superposition for computing acoustic fields [J]. J. Acoust. Soc. Am., 1991, 89(6): 2 625— 2 633.

Comparative study of methods for moving vehicles noise measurement and visualization

WANG Zi-teng, YANG Dian-ge, LI Bing, LIAN Xiao-min

(State Key Laboratory of Automotive Safety and Energy, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract It is important to identify and locate the sound sources correctly and quickly in controlling vehicle noise. Visualization method makes it more efficient and intuitive in locating noise sources and displaying sound field in real time. Currently, there are three noise visualization methods widely used in measuring moving vehicle noise the far-field acoustic holography method, short-time beamforming method and dynamic wave superposition method. In this paper, the theoretical analysis and simulation of the comparative study of the three methods were taken, and simulation and experiment system were built based on these three methods. By comparing the experiment results, the research conclusions were drawn.

Key words moving vehicles noise; sound field measurement; sound source visualization

作者简介: 王子腾 (1987—),男,博士研究生. 电话: 13466387866; E-mail wangzt05@ 126.com