

文章编号:1006-1355(2019)01-0024-05

# 高速汽车驾驶员耳侧噪声贡献量分析

李文武, 刘宁宁, 王岩松, 郭 辉

(上海工程技术大学 汽车工程学院, 上海 201620)

**摘要:**汽车高速行驶过程中,车外气动噪声和轮胎辐射噪声对人耳侧的影响难以定量分析。利用高速公路试验结合传递路径分析的方法,研究汽车高速工况下车外相关位置气动噪声和轮胎辐射噪声的传递特性;对驾驶员耳侧的气动噪声和轮胎辐射噪声进行定量分析,计算出车外不同位置、类型噪声对驾驶员耳侧的噪声贡献量;分析车外不同类型噪声源的贡献量随车速的变化特性;将高速工况驾驶员耳侧拟合噪声信号与实测信号进行对比分析,确定了车外不同位置噪声贡献量在频域上的分布规律。

**关键词:**声学;高速汽车;气动噪声;传递特性;贡献量分析

中图分类号:O422.6

文献标志码:A

DOI编码:10.3969/j.issn.1006-1355.2019.01.005

## Contribution Analysis of Noise on Driver's Ear Side of High Speed Vehicles

LI Wenwu, LIU Ningning, WANG Yansong, GUO Hui

(School of Automobile Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China)

**Abstract:** It is difficult to quantitatively analyze the contributions of aerodynamic noise and tire noise to the driver's ears side noise when the car is traveling at high speed. In this paper, based on the method of highway test combined with transfer path analysis, the transfer characteristics of aerodynamic noise and tire radiated noise at the relevant positions outside the vehicle are studied. The aerodynamic noise and tire radiated noise on the driver's ear are quantitatively analyzed. In addition, the noise contribution of different positions and noise types outside the vehicle to the driver's ear is calculated. Then, the variation characteristics of the contributions from the different noise sources are analyzed under different speeds. Finally, the fitted noise signal on the side of driver's ears under high speed condition is compared with the measured signal, and the distribution rule of noise contribution from different locations outside the vehicle is determined in frequency domain.

**Keywords:** acoustics; high-speed car; aerodynamic noise; transfer characteristics; contribution analysis

相关研究表明<sup>[1,2]</sup>:当车辆高速行驶时,车外气动噪声与轮胎辐射噪声对车内乘员耳侧噪声的影响比重逐渐上升,当车速达到100 km/h时气动噪声为车内噪声的主要影响因素。对于高速行驶的轿车,车外气流经过后视镜、A柱等突起位置产生偶极子噪声源。该类噪声源通过车身结构传递到驾驶员耳侧,影响驾驶和乘坐舒适性。由于20世纪90年代初才兴起对汽车气动噪声的研究,所以对汽车行驶过程中气动噪声的研究还不够深入,许多基础问题并未得到解决,难以对汽车行驶过程中产生气动噪声

进行定量分析<sup>[3-6]</sup>。因此,在没有声学风洞等试验条件的情况下,通过实车高速公路试验探究高速汽车车外相关位置的气动噪声、轮胎辐射噪声对驾驶员右耳侧噪声的影响。利用传递路径分析方法探究高速工况下,不同类型、位置的车外噪声源的频谱特性,对驾驶员耳侧空气噪声进行定量分析。为相关的高速车辆车内噪声的研究提供参考依据。

### 1 传递路径分析(TPA)的基本原理

从噪声传播的“源-路径-接受者”模型角度考虑,想要研究高速汽车产生的噪声对驾驶员耳侧噪声的贡献量,需要知道高速工况下车外气动噪声信号和相应的到驾驶员耳侧路径的噪声传递特性。因此采用传递路径分析方法(Transfer Path Analysis)对驾驶员耳侧的气动噪声和轮胎辐射噪声进行贡献量分析,该分析方法有利于直观地分析不同类型、位置

收稿日期:2018-04-10

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51675324)

作者简介:李文武(1992-),男,江苏省盐城市人,硕士研究生,研究方向为汽车NVH。

通信作者:刘宁宁,男,硕士生导师。

E-mail: liuningn@163.com

的噪声源对驾驶员耳侧噪声的影响。传递路径分析方法(TPA)的假设前提是系统为线性时不变,则车内的噪声声压或振动水平等于各激励源以工作载荷激励时沿不同路径传播到车内的能量的叠加。即各位置的工作载荷乘以对应路径的传递函数等于响应点的噪声信号。本文研究侧重于高速工况下车外空气噪声源对驾驶员耳侧噪声的影响。图1为采用的空气声TPA基本模型。

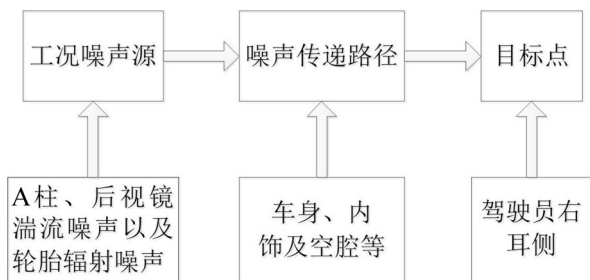


图1 空气声TPA模型示意图

对于研究空气传播噪声而言,由于路径上不存在耦合点,所以如果有 $n$ 个辐射声源,则有 $n$ 条到达目标点的传递路径,而目标点的总声压就等于各个路径贡献量的总和。空气声TPA的传递函数测量方法有直接法与互易法两种。由于一般情况下汽车的噪声源处空间有限,不易布置体积声源,所以在测量时可以采取互易法,即将体积声源放置在车内目标点的位置,而将声传感器放在各个噪声源处,以此便能测得各条路径的传递函数,文中采用互易法测量各噪声源测点位置到驾驶员右耳路径的传递函数,并用对应噪声源附近的参考声压等效成输入声压信号。

## 2 空气声TPA模型的建立

空气声传播的TPA模型采用直接法建立。如式1所示。

$$P^{MN} = \sum_{i=1}^k P_{i=1}^{MN} = \sum_{i=1}^k T_i^{AB} \times Q_i^{MN} \quad (1)$$

式中: $P^{MN}$ 为车内目标点的总声压; $P_{i=1}^{MN}$ 为传递路径 $i$ 上的声压贡献量; $T_i^{AB}$ 为路径 $i$ 上的传递函数; $Q_i^{MN}$ 为传递路径 $i$ 上的工作输入。

通过测得各测点位置到驾驶员右耳位置路径的传递函数,并在实际工况下测得各测点位置附近的近场参考声压向量,由公式(1)即可求得各传递路径和对应工作输入对目标点的声压贡献量,通过对多个测点信号及其传递路径的贡献量进行拟合,即可得车内目标响应点总声压<sup>[7-11]</sup>。

## 3 试验测量

试验主要分为传递函数测试和工况载荷测量两

个部分。根据国标《GBT18697-2002 声学汽车车内噪声测量方法》、《ISO 5128-2014 声学 汽车内的噪声测量》等标准和研究内容需要制定实验方案<sup>[13-14]</sup>。

### 3.1 路试

使用风速计和温度仪测量试验路段风速和温度,试验车辆为某款中级轿车。试验设备为西门子的LMS数采设备。根据上述汽车噪声采集标准确定一次数据采集时长15 s。研究对象为驾驶员耳侧噪声信号,综合考虑人耳听阈范围(20 Hz~200 00 Hz)及奈奎斯特采样定律,确定信号采样频率为51 200 Hz,分辨率为1 Hz。传声器测点选取最为典型的A柱、后视镜等风噪声较大的位置。具体位置如表1所示。

表1 传声器测点位置

| 编号 | 传感器类型  | 位置     |
|----|--------|--------|
| 1  | PCB传声器 | 左前轮胎   |
| 2  | PCB传声器 | 右前轮胎   |
| 3  | PCB传声器 | 左后轮胎   |
| 4  | PCB传声器 | 排气管处   |
| 5  | PCB传声器 | 进气管处   |
| 6  | PCB传声器 | 左后视镜   |
| 7  | PCB传声器 | 右后视镜   |
| 8  | PCB传声器 | 左侧A柱底端 |
| 9  | PCB传声器 | 左侧A柱顶端 |
| 10 | PCB传声器 | 右侧A柱底端 |
| 11 | PCB传声器 | 右侧A柱顶端 |
| 12 | PCB传声器 | 驾驶员右耳  |

试验在某高速路段上进行,以80 km/h、100 km/h、120 km/h 3种匀速工况行驶。

### 3.2 传递函数测试

为减小外部环境噪声的影响,传递函数测试在半消声室内进行。测试主要使用LMS数据采集系统、体积声源、声学传感器等设备。在半消声室进行传递函数测试时,传感器测点位置和路试时保持一致。传递函数采用互易法测量,将传感器测点布置好后,将体积声源固定在驾驶员右耳传感器附近,采用Random触发信号,即可测出各传递路径的声-声传递函数。图2为传递函数测试部分测点示意图。

## 4 试验结果与分析

### 4.1 传递函数分析

图3为左、右A柱顶端到驾驶员右耳路径的噪声传递函数,图中可以看出两者的整体分布趋势一致,曲线分布较为平缓,主要峰值集中于2 000 Hz之前。其它如左后视镜、右后视镜等对称位置到驾驶



图2 相关测点示意图

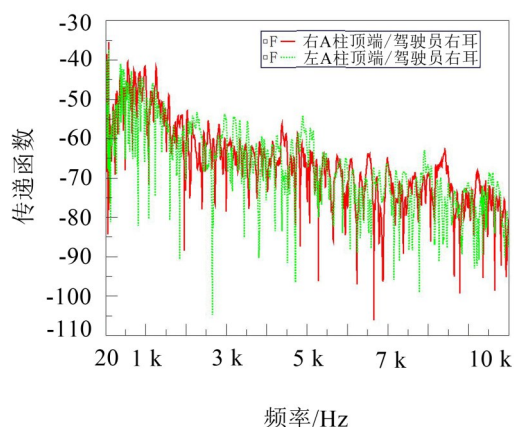


图3 左、右A柱顶端到驾驶员右耳传递函数  
员右耳的传递函数都有相似的对称特性,后续不再一一赘述。

图4为左A柱的顶端和底端到驾驶员右耳路径的传递函数。

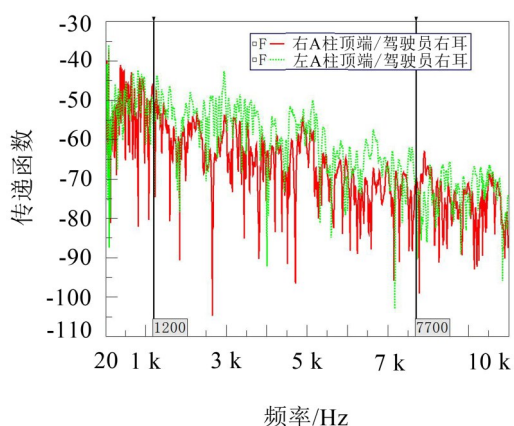


图4 左A柱测点到驾驶员右耳

中高频段范围内,A柱底端测点位置到驾驶员右耳侧路径传递函数大于A柱顶端测点到驾驶员右耳侧路径传递函数,即A柱顶端测点位置到驾驶员耳侧路径隔声效果更好。

图5为车身左侧相关测点到驾驶员右耳侧路径的传递函数。图中传递函数幅值差异较大,左A柱

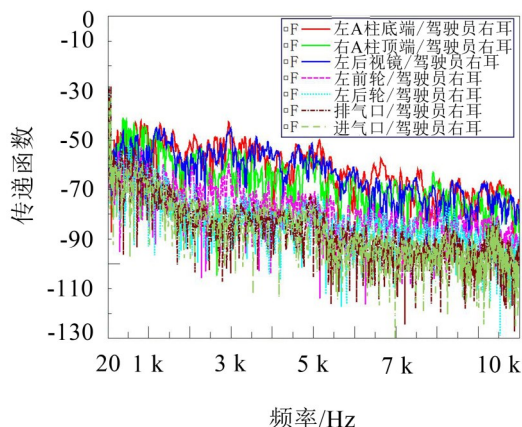


图5 车身左侧及进、排气口测点到驾驶员右耳侧路径传递函数  
顶端及底端、左后视镜到驾驶员右耳侧路径传递函数在20 Hz~10 000 Hz范围内要明显大于左前轮、左后轮和进、排气口到驾驶员右耳侧路径,即隔声效果较差。

#### 4.2 工况信号分析

图6、图7为路试时各测点工况信号。图中看出,工况信号的能量主要集中在2 000 Hz之前的频段范围。车速越高,驾驶员右耳侧的A计权声压级信号也越高。各测点工况信号主要有两个峰值凸起,驾驶员右耳信号的第一个峰值频段为50 Hz~500 Hz,第二个峰值频率在1 000 Hz附近,其余测点信号两个能量峰值主要在120 Hz与1 000 Hz附近。

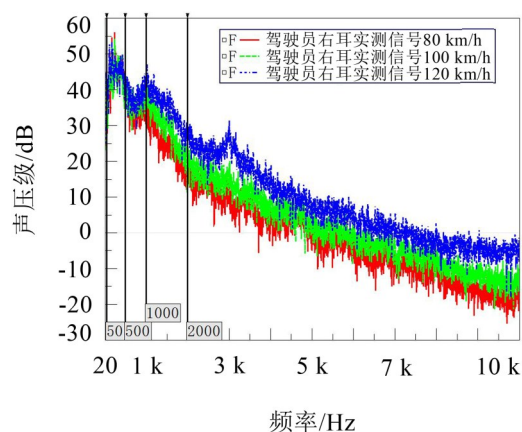


图6 3种车速下驾驶员耳侧实测A计权声压级信号

#### 4.3 TPA分析

由上述分析可知,驾驶员右耳侧噪声信号能量主要集中在20 Hz~2 000 Hz的频段范围内,因此贡献量分析的频率范围主要针对20 Hz~2 000 Hz。

综合考虑噪声路径传递函数和车外测点工况载荷信号计算得到贡献量曲线。图8为120 km/h车速时部分测点信号贡献量曲线。可以发现,车轮、A柱



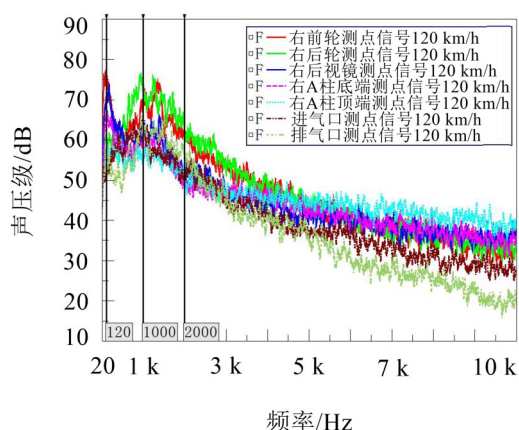


图7 120 km/h车外测点工况信号

等测点信号对驾驶员右耳噪声贡献量主要集中在200 Hz以下的低频范围。计算该频段范围内贡献量的均方根值,得到不同位置贡献量由大到小依次为右前轮、右后轮、排气口、右后视镜、进气口、右A柱底端、右A柱顶端,对应声压级数值如图8所示。

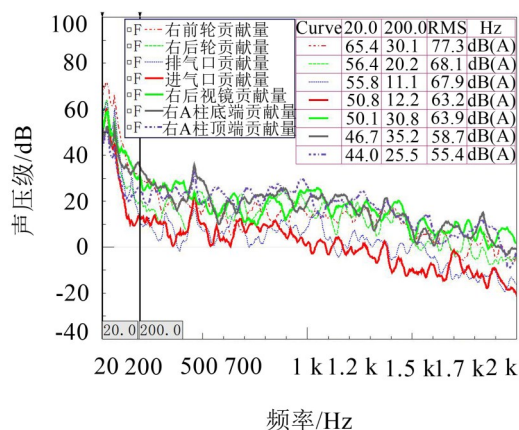


图8 120 km/h部分测点信号贡献量

图9为选取20 Hz~2 000 Hz频率范围各测点信号对驾驶员右耳噪声贡献量的均方根值(RMS)。随着车速的提升,各测点贡献量均有不同幅度增加。三种车速状态下,车轮辐射噪声贡献量在整体贡献量中占据较大比重。随着车速从80 km/h上升到120 km/h的过程中,车轮辐射噪声贡献量的增幅明显小于后视镜及A柱等测点位置风噪声贡献量增幅;在试验选取位置的噪声信号中,后视镜位置风噪声逐渐成为驾驶员右耳侧噪声的主要影响因素。

图10为120 km/h车速时各测点信号在驾驶员耳侧传递路径贡献量与实测信号对比图,图中可以看出在20 Hz~10 000 Hz频率范围内合成信号和实测信号两者趋势一致,幅值之间存在一定的误差。误差产生的原因主要可以归结于如下几个方面:

(1) 实测驾驶员耳侧的噪声包括空气声和结构声两部分的贡献量,而本次研究中只考虑了空气声

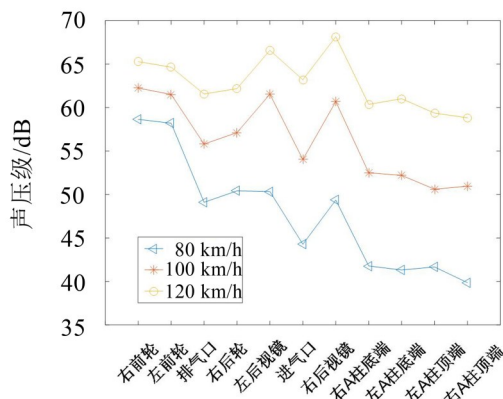


图9 20 Hz~2 000 Hz各测点信号贡献量均方根值

的贡献量,没有考虑车身结构辐射噪声、动力总成噪声、路面不平度等结构噪声贡献量。

(2) 车辆高速运行时,车外风噪声中的泄露噪声无法通过传递路径方法进行分析,贡献量计算中没有考虑泄露噪声。

(3) 试验限制,传声器测点的数量较少,无法包含车外全部的气动噪声源。

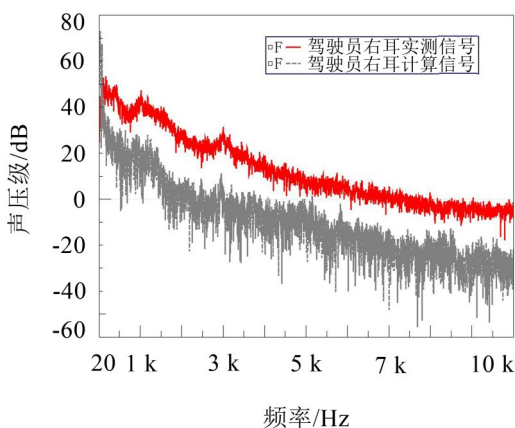


图10 120 km/h驾驶员右耳实测及TPA拟合信号

图11为120 km/h车速下各测点信号的贡献量谱图。图中可以看出,汽车前轮辐射声贡献量和后视镜湍流噪声贡献量在20 Hz~400 Hz频率范围较为集中。A柱顶端和底端测点的贡献量在20 Hz~2 100 Hz范围内分布较为平均。右A柱顶端、右A柱底端和左后视镜在900 Hz有一个能量集中频率点;右A柱顶端和底端、左A柱顶端和底端、后视镜位置贡献量在2 100 Hz有一个能量集中频率点。

## 5 结语

本文将传递路径分析方法(TPA)应用于高速汽车气动噪声和轮胎辐射噪声的研究上。分析了不同测点位置到驾驶员右耳的噪声传递特性。对高速汽车驾驶员耳侧主要影响噪声源进行了定量分析。确

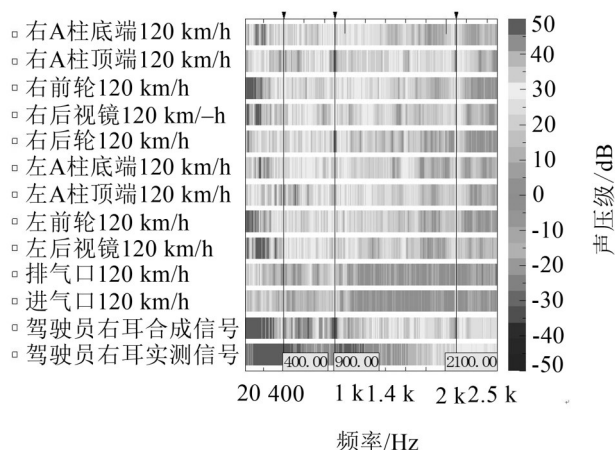


图 11 120 km/h 贡献量谱图

定了不同车身位置气动噪声和轮胎辐射噪声对驾驶员耳侧噪声贡献能量的主要分布范围。

研究表明:

(1) 在 20 Hz~10 000 Hz 范围内, A 柱顶端、底端及后视镜测点到人耳侧传递路径相比于车轮和进、排气口到驾驶员右耳侧路径更易传递噪声; 中高频段范围内的噪声, 相比于 A 柱顶端测点位置而言, 从 A 柱底端位置更容易传递到驾驶员耳侧;

(2) 对比 3 种车速下驾驶员右耳实测信号可以看出, 汽车高速行驶过程中, 驾驶员耳侧噪声能量主要集中在 20 Hz~2 000 Hz 的频段范围内。

(3) 随着车速的提升, 后视镜及 A 柱等位置的风噪声贡献量增幅大于轮胎辐射噪声和进、排气口的贡献量增幅, 逐渐成为驾驶员耳侧噪声主要影响因素。

(4) 汽车前轮辐射声和后视镜湍流噪声对驾驶员右耳噪声的贡献量主要集中在 20 Hz~400 Hz 范围内, A 柱顶端、底端测点风噪声贡献量主要均匀分布在 20 Hz~2 100 Hz 频段范围内。

#### 参考文献:

- [1] DOBRIYNSKI W. The effect of fluctuation pressures on the body surface of passenger cars on interior noise[D]. Berlin: Technical University of Berlin, 1983.
- [2] GEORGE A R. Automobile aerodynamic noise[R]. SAE Technical Paper, 1990.
- [3] 庞剑, 湛刚, 何华. 汽车噪声与振动[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2006.
- [4] 贺银芝, 杨志刚, 王毅刚. 某轿车车内气动噪声特性的试验研究[J]. 汽车工程, 2016, 38(1): 72-77.
- [5] 俞悟周, 王佐民. 轿车风噪声及其测量[J]. 声学技术, 2000, 19(1): 30-33.
- [6] 王毅刚, 杨超, 杨志刚, 等. 汽车外表面气动噪声特性分析[J]. 声学技术, 2014, 33(1): 50-55.
- [7] 谭晶晶, 杜建科, 李洪亮, 等. 基于传递路径分析的乘用车路面噪声优化控制[J]. 汽车技术, 2017(3): 19-23.
- [8] 郭荣, 万钢, 左曙光. 燃料电池轿车车内噪声传递路径分析研究[J]. 汽车工程, 2007, 29(8): 635-641.
- [9] GAJDASTY P, JANSSENS K, DESMET W, et al. Application of the transmissibility concept in transfer path analysis[J]. Mechanical Systems & Signal Processing, 2010, 24(7): 1963-1973.
- [10] GAJDÁTSY P Á. Advanced transfer path analysis methods (Geavanceerde transfer pad analysemethoden) [D]. 2011, Lirias.
- [11] 余琪, 周铨. 传递路径分析用于车内噪声贡献量的研究[J]. 汽车技术, 2010(3): 16-19.
- [12] 李文武. 某MPV车内轰鸣噪声试验分析与降噪[D]. 镇江: 江苏大学, 2016.
- [13] 肖朕毅. 高速车辆气动噪声研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2007.
- [14] CONEY W B, HER J Y, et al. Experimental evaluation of wind noise sources: a case study[C] Noise & Vibration Conference & Exposition. 1999.