

引用格式: 徐世文, 王毅刚, 杨小禹, 等. 汽车车门密封结构的传声实验研究[J]. 声学技术, 2021, 40(3): 385-392. [XU Shiwen, WANG Yigang, YANG Xiaoyu, et al. Experimental research on sound transmission of car door sealing structure[J]. Technical Acoustics, 2021, 40(3): 385-392.] DOI: 10.16300/j.cnki.1000-3630.2021.03.015

# 汽车车门密封结构的传声实验研究

徐世文<sup>1</sup>, 王毅刚<sup>2</sup>, 杨小禹<sup>1</sup>, 魏程<sup>2</sup>, 刘伟东<sup>1</sup>

(1. 中信戴卡股份有限公司, 河北秦皇岛 066011; 2. 同济大学上海地面交通工具风洞中心, 上海 201804)

**摘要:** 汽车高速行驶时气流导致的车身内外压差和密封件局部压力变化, 会使车门密封传声加剧, 目前针对车门密封传声的相关研究较少。通过小型气动-声学风洞实验测试手段, 参考汽车实车门结构密封和气动力作用特点, 建立门单道密封和门板四周密封结构实验研究环境和试验件, 研究其密封结构的传声特性。研究表明: 竖向和横向密封对门板中高频传声影响较大, 后者中高频范围向低频扩展, 对更高频影响不大, 进一步分析给出了流体环境下门板结构全频段的传声、声辐射和透射特征; 密封条压紧力和密封结构传声有正相关关系, 但其受门结构四边支撑、内外压差和变形及密封条受力影响而变化。该研究对门隔声和密封设计具有重要的参考价值。

**关键词:** 车门密封; 传声特性; 风洞实验; 气动噪声

中图分类号: O492

文献标志码: A

文章编号: 1000-3630(2021)-03-0385-08

## Experimental research on sound transmission of car door sealing structure

XU Shiwen<sup>1</sup>, WANG Yigang<sup>2</sup>, YANG Xiaoyu<sup>1</sup>, WEI Cheng<sup>2</sup>, LIU Weidong<sup>1</sup>

(1. CITIC Dicastal CO., LTD, Qinhuangdao 066011, Hebei, China;

2. Shanghai Automotive Wind Tunnel Center, Tongji University, Shanghai 201804, China)

**Abstract:** The pressure difference inside and outside car body and the local pressure changes of seals cause the sound transmission increase of the sealed door, when the car is running at high speed. However, there are few related researches on this problem at present. In the current research, by using the small-scale aero-acoustic wind tunnel test methods and referring to the interactive characteristics of the seals and the aerodynamic forces of an actual car door structure, the experimental conditions and the test pieces of the door sealed at a single side and the door sealed around are prepared for the study of the sound transmission characteristics of the seal structures. It is found that the vertical and horizontal seals have a greater impact on the sound transmission of the door at middle and high frequencies, the frequency range extends to low frequencies for the horizontal seal, but there is little effect at high frequency. Acoustic radiation and transmission characteristics in airflow are further analyzed. The sealing strip compression force has a positive correlation with the sound transmission of the sealing structure, but it is affected by the four sides supports, internal and external pressure difference, deformation of the door structure, and the force on the sealing strip. The research has an important reference value for the design of door sound insulation and sealing.

**Key words:** door seal; sound transmission; wind tunnel experiment; aerodynamic noise

## 0 引言

汽车车门密封是汽车保证气密、防尘等功能的重要指标, 近些年来随着车内噪声的降低, 其传声性能成为重要的关注对象, 在汽车研发发达的欧美日韩等汽车公司以及我国的各大汽车厂商都对汽车密封结构开展了大量的研究开发工作<sup>[1-5]</sup>。多年来,

由于车辆动态条件下的密封结构传声性能研究较为困难, 大多数研究都针对密封件开展静态(仅声激励)下的隔声研究, 包括密封件的隔声实验、仿真以及密封条二维、三维的压缩变形和传声研究等<sup>[6-9]</sup>。静态下的密封件声学现象和动态差异较大, 车辆在高速行驶下的车内外压差及密封条局部的气动作用导致的门结构位移和变形、密封条变形等都直接影响密封结构的传声。近年来, 随着风洞测量技术的普遍应用, 动态下的车结构密封传声研究日益引起重视, 利用风洞测试寻找问题和改善性能尤为增多<sup>[10-12]</sup>。由于风洞实验费用昂贵, 该试验几乎都基于车辆开发的目的, 对密封的声现象及机理等研究

收稿日期: 2020-11-10; 修回日期: 2020-12-16

作者简介: 徐世文(1968—), 男, 山东即墨人, 副研究员, 研究方向为汽车工程。

通信作者: 王毅刚, E-mail: yigang.wang@sawtc.com

较少, 因为其复杂性, 相关仿真研究也不多。

基于上述气动条件下的车门密封传声研究现状, 本研究利用小型气动-声学风洞, 参考汽车实车车门的高速运动外部流场条件, 设计试验件, 重点研究在气动和声场环境下密封结构传声的声现象特征, 实验研究数据为车门的隔声和密封设计提供参考。

## 1 实验平台及测量方法

### 1.1 实验平台

为了模拟气流流过车门时的流场状态, 本研究利用了如图 1 所示的一座小型的气动-声学风洞。该风洞为开口直流式风洞, 喷口的尺寸为  $520\text{ mm} \times 200\text{ mm}$ , 最大风速为  $40\text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。风洞流道和试验段壁面均进行一定的吸声处理, 具备了一定的流场和声场试验条件。



图 1 小型气动-声学风洞  
Fig.1 The small aero-acoustic wind tunnel

测试段及试件、测点等分布示意图如图 2 所示, 试验段由一间矩形的消声房间组成, 其壁面进行了消声处理。该消声试验段被试验件及其安装结构分成两部分, 一侧为气流侧, 试件表面和喷口平齐, 使气流掠过试件表面; 另一侧为声接收侧。分别在两侧布放一个传声器, 用于测量两侧的声压特征。气流侧传声器放置于流场外。如需要在气流侧增加声场输入, 在流场外附加一扬声器。

本文主要研究含有密封结构的试件传声损失的特性, 另外由于试验段空间较小, 在试件两侧仅各安装一个传声器, 接收测距离试验件垂直距离

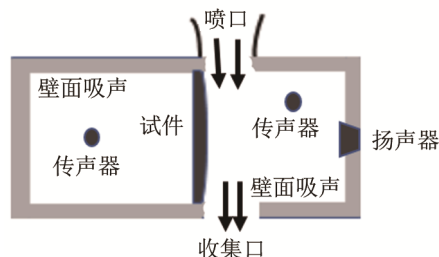


图 2 测试段及试件、测点等分布示意图  
Fig.2 Layout of test sections, test piece, and measurement points

$15\text{ cm}$ , 位于所在面中点位置。气流侧距离试验件垂直距离  $15\text{ cm}$ , 位于流场外。安装位置在各试验状态下保持不变, 以保证实验结果的可比性。在该实验中, 气流流过试验段, 与周围结构相互作用会产生噪声, 同时试验段内还有喷流噪声, 这些噪声作为试验段的声信号输入。两传声器的声压差代表试件的传声损失, 通过不同密封结构的变化, 比较其传声损失差异来分析密封结构的传声特性。

### 1.2 试验件确定

汽车车门的全尺寸结构难以在上述试验条件下使用, 为实现对门密封结构的模拟, 提取了荣威 350 前车门密封结构剖面尺寸, 使设计的试验件在密封条、门和门框的剖面结构和原车相同, 形状为一缩小矩形门板, 其大小试验可用。

为了模拟作用在试验件上的流体压力和实车门板表面压力相当, 本文先开展了荣威 350 整车的气动仿真计算, 获取其前车门表面的压力分布(详细计算不在此赘述), 如图 3 所示。当车速为  $35\text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  时, 其表面压力分布范围为  $-602 \sim 350\text{ Pa}$ , 最大负压值出现在门前侧上方边沿位置, 也是门密封位置。不考虑局部正压如门把手等位置, 大部分压力分布范围为负压  $-602 \sim -30\text{ Pa}$ , 密封结构位置负压范围为  $-602 \sim -200\text{ Pa}$ 。为了和实车流场相近, 使试验件内外产生压差, 试验件设计成来流前端有一定弧度的曲面, 如图 4 所示。并经过仿真计算优化, 使其和实车上的表面压力在数量级上相当, 尤其与最大负压值相近, 压力分布如图 5 所示。计算选取的风速为  $35\text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , 加速段后的平板区域负压最大, 平板中后方负压最小, 负压分布范围为  $-650 \sim -260\text{ Pa}$ , 基本和实车相当, 能够强化负压的作用。

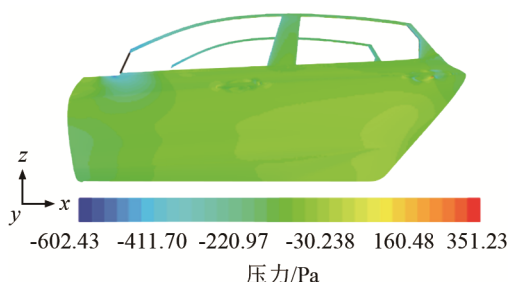


图 3 实车车门压差分布  
Fig.3 Air pressure distribution on a car door

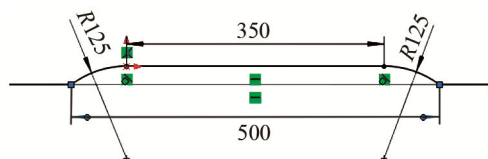


图 4 选定试验件外形结构尺寸  
Fig.4 The external structure size of the test piece

由此确定了试验件的外形，再结合实车密封结构，设计试验件门结构模型，试验件由全钢板制作。

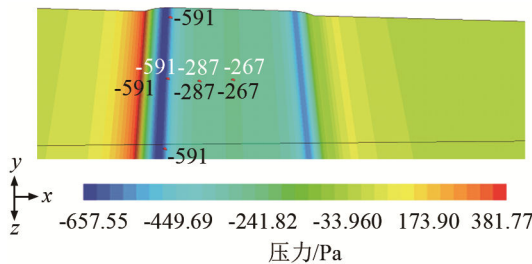


图 5 试件气动压力仿真计算结果  
Fig.5 Simulation results of aerodynamic pressure on the test piece

1.3 试验件表面的压力测量

为了验证试验件表面流场压力与设计一致，对所设计试验件在气流流过时表面所形成的负压进行测定。使用皮托管测量方法测量试验件的内外压差，试验件上分布 6 个测点，如图 6 所示。在  $35\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  风速下，各测点的压力分布如表 1 所示。测量点压力分布范围为  $-582\sim-168\text{ Pa}$ ，略低于实车，但相差较小，可以认为和实车相当，满足测试要求。

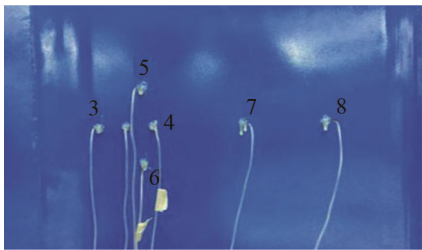


图 6 试验件及压力测点位置  
Fig.6 The test piece and the positions of pressure measurement points

表 1 试验件上不同测点的表面压力(Pa)  
Table 1 Surface pressures at different measuring points of test piece (Pa)

| 测点 | 压力测量值 | 测点 | 压力测量值 | 测点 | 压力测量值 |
|----|-------|----|-------|----|-------|
| 3  | -582  | 5  | -339  | 7  | -152  |
| 4  | -191  | 6  | -264  | 8  | -168  |

1.4 试验件密封结构设计

由流动引起的车门密封结构传声可以看成由两部分组成，一是密封结构在流体流经时密封条存在密封缺陷(如缝隙)引起的传声及由门板、门框及密封条形成的条缝(空腔)引发的传声加剧；二是高速行驶时车门内外压差导致的门板被外推和变形引起门缝隙增加使传声加强。为了研究上述两种情况下密封结构的传声特征，设计了两种门结构，一种结构为仅研究单道密封条垂直于来流方向(简称竖向密封条)和单道密封条平行于来流方向(简称横

向密封条)的传声情况，如图 7(a)所示。实验时开启其中一条密封条时，另一条用油泥封堵并抹平。另一种结构为模拟实际门密封的门模型，其密封结构和荣威 350 车前门横截面尺寸相同，四边安装密封条，有安装铰链，门锁位置为可压紧又能调整门缝隙的螺杆件。该结构可以研究四边密封门传声和模拟门板在内外压差作用下门缝隙增加时传声，如图 7(b)所示。密封条选用车门常用的 D 型结构，其剖面结构和安装方式如图 7(c)所示。

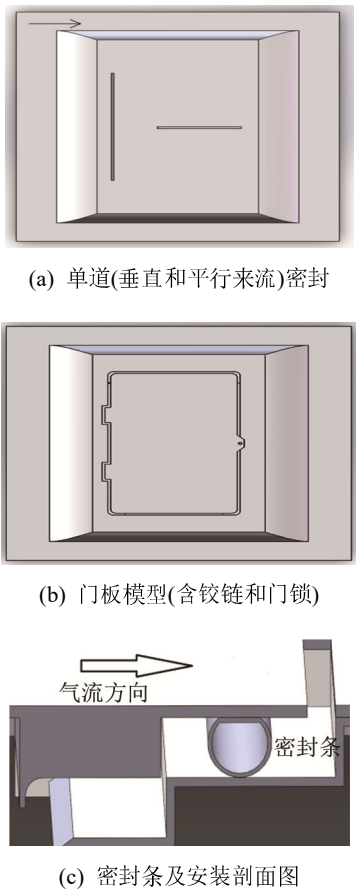


图 7 两种门板密封方式  
Fig.7 Two sealing methods of the door

2 实验结果及分析

2.1 单道密封结构的传声特性

该实验选取的风速为  $30\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ，同时气流侧有风洞系统产生的噪声在该区域的叠加，作为实验的噪声场。实验分别对无密封结构的试件(除密封结构外，其他和带有密封结构的试件相同)和有密封结构的试件进行气流侧(流场外)和接收侧的声压测量，对比分析密封结构传声的频谱特征。

2.1.1 竖向密封条传声特征

图 8 为无密封结构的试件和有竖向密封结构试

件气流侧(流场外)和接收侧的 A 计权声压频谱测量结果,图中钢门板数据为无密封结构的试件数据,下同。从气流侧的结果可看出,密封条的安装对外侧辐射的噪声在高频有一定的增加,尤其在 4~6 kHz 频段增加较为明显,但量级不大,其他频段几乎不变。从接收侧看,由于密封结构的存在,频率大于 1.5 kHz 的中高频区域噪声明显增加(即使密封条在气流侧附加的噪声会增加内部传声,但其贡献量也应是少量),最大增加量超过 10 dB(A),其频段较宽。所以仅密封条的存在对中高频传声的影响应给予关注。

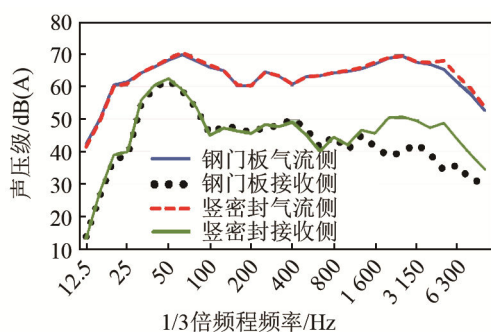


图 8 竖密封与无密封频谱图  
Fig.8 Sound pressure spectrums for the door vertically sealed and unsealed

### 2.1.2 横向密封条传声特征

图 9 为无密封结构的试件和有横向密封结构试件气流侧(流场外)和接收侧的 A 计权声压频谱测量结果。从气流侧的结果可看出密封条的安装对外侧辐射的噪声几乎无影响。从接收侧看,由于密封结构的存在,在 500~8 kHz 较宽频区域噪声增加明显,最大增加量超过 10 dB(A),尤其在 700~5 kHz 频段增加量较大。与竖向密封结构相比,传声损失向低频移动,频率大于 6 kHz 以后传声变弱,两者表现出较大的差异。因此,在密封结构设计时对横竖密封结构应区别对待。

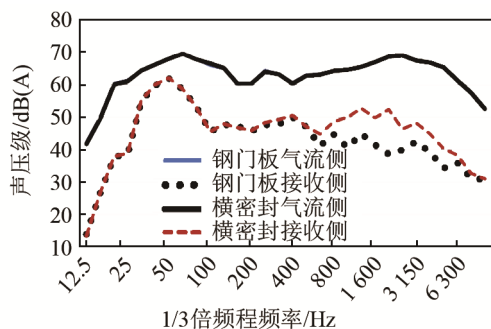


图 9 横密封与无密封频谱图  
Fig.9 Sound pressure spectrums for the door horizontally sealed and unsealed

## 2.2 门板模型密封结构的传声特性

同单道密封结构实验相同,实验时风速为  $30 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,存在风洞系统的噪声场。分别对无密封结构的试件和门板模型有密封结构的试件进行气流侧(流场外)和接收侧的声压测量,对比分析密封结构传声的频谱特征。但研究发现门板模型在气流作用下由于存在密封结构,辐射噪声增加较多,不能保证外部在试件上的输入噪声相同。所以,实验增加了 10~20 kHz 频带内白噪声的静态噪声源,保证了整个频段在不同试件下的输入声场基本相同。

### 2.2.1 门板模型密封结构的传声特性

图 10 为无密封结构的试件和门板模型密封结构试件气流侧和接收侧的 A 计权声压频谱测量结果。实验中门板处于完全关闭状态,由于门板面积小,其内外压差不能使门板产生变形和向外推产生缝隙。

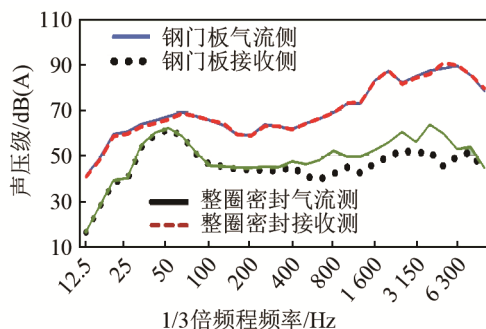


图 10 安装整圈密封条和无密封门板内外声压频谱  
Fig.10 Sound pressure spectrums for the door sealed around and unsealed

从气流侧的结果可看出,两种试件下的频谱基本相同,仅在 5 kHz 频率附近有较小差异。从接收侧看,由于密封结构的存在,400 Hz~10 kHz 较宽频域的噪声增加明显,最大增加量超过 10 dB(A),尤其在 500 Hz~6 kHz 频段内增加量较大。与上述单道密封结构实验结果相比,该结果可看作是横向和竖向单道密封结构的合成。说明了门板四周密封(两横两竖)具有单道密封合成的传声特征,因此,在门结构密封设计时对横竖密封结构针对不同的传声频率特征进行区别化设计。

### 2.2.2 门板密封缝隙对传声的影响

门结构在实际高速行驶时,内外压差会使其向外推,产生 2 mm 左右的门板缝隙。如前所述,本实验由于门板面积小,其内外压差不能外推门结构产生缝隙。因此,本实验采用门锁位置人为产生大小为 0 mm(密封条压缩量为 5 mm)、1.5 mm(密封条压缩量为 3.5 mm)和 3 mm(密封条压缩量为 2 mm)

的缝隙,以模拟在高速气流作用下,车门由于负压作用可能被向外推动的情况。在不同缝隙时密封条会受到不同大小的压紧力作用,产生不同程度的变形。风速为  $30 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  时,在  $10\sim 20 \text{ kHz}$  频段附加白噪声声源。图 11 为不同关紧状态时气流侧和接收测的 A 计权总声压级,图 12 为不同关紧状态时的声压频谱。

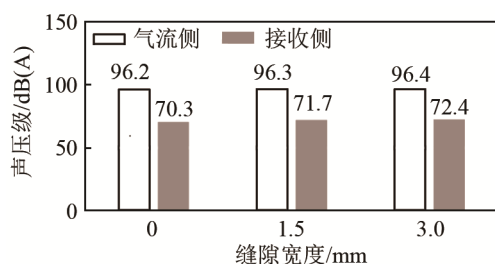


图 11 不同关紧状态下的声压级

Fig.11 Sound pressure levels in different closed states

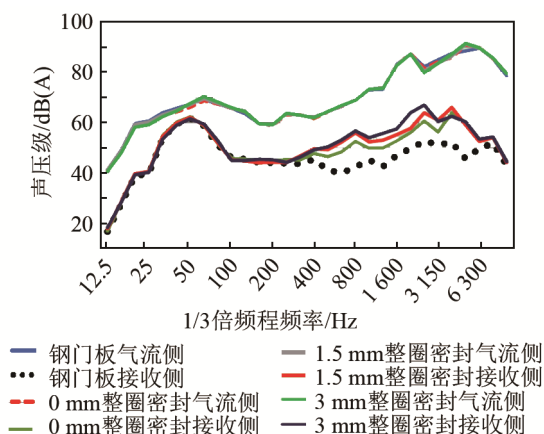


图 12 不同关紧状态下的声压频谱

Fig.12 Sound pressure spectrums in different closed states

从图 11 中的结果可以看出,气流侧的声场基本相同,随着门缝隙的增加,传声增强,缝隙宽度进一步增加时,传声的增加量会减小。由图 12 的频谱可见,缝隙增加主要的影响在  $400 \text{ Hz}\sim 3 \text{ kHz}$  频段,随着缝隙宽度的增加传声增强。但在  $3 \text{ kHz}$  之后随着门板缝隙的增加,接收侧声压级反而出现了减小的现象。分析其原因,当门板的门锁边抬起时,相对应的铰链边会下沉,使得铰链边的密封条压缩程度反而增加,导致了  $4 \text{ kHz}$  左右频段的隔声能力增强。据此可以认为,车门整圈密封的不同部位,对于不同频段的噪声的削弱能力是不同的,在设计车门密封条时,应考虑对不同部位、不同频段噪声分别做针对性设计。

### 2.3 门板模型各密封边压紧力和传声特性随风速的变化

密封结构的传声特性和密封条的挤压程度密

切相关。通过在密封条和门结构之间夹持薄膜片式压力传感器测量密封条的压紧力,同时,利用传声器放置于对应的压力测点旁测量该点的声压,近似认为该点的声压主要是由该位置密封结构的传声引起。图 13 为声压测点位置,图 14 为薄膜压力传感器安装方式和测点位置。在  $10\sim 20 \text{ kHz}$  频段附加白噪声声源,分别在风速为  $0$ 、 $10$ 、 $15$ 、 $20$ 、 $25$ 、 $30$  和  $35 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  时,测量声压级和压紧力。

门锁边密封条压力传感器的测点布置和安装方式如图 14 所示,测点 1 和测点 5 位于密封条边缘位置测点,测点 2、3、4 依次位于中间位置测点,其他三个密封边也按照类似的方式处理。在门板保持关紧状态下,图 15~17 为四个边各个测点的压紧力随不同风速变化的测量数据。

从图 15 中可以看出,在不同的风速下各密封边的压紧力分布不同,规律有一定的差异。门锁边压力分布基本呈现两侧测点压力值低、中间测点压力值高的分布规律,显然门锁位置为固定点,压力大,向两边仅为门结构支撑,压力变小。随着风速的逐渐增加,每个压力测点的压力值呈现先上升后下降的趋势,分析其原因为:当气流流过门板时(风速  $15 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  以上),门板面形成负压区,风速越大负压也越大,其结构变形增加,密封条压紧力减小。但风速较小( $15 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  以下)时由于负压小门板几乎无变形,此时内外压差作用于密封条上会导致压紧力增加。这些都会对密封条的传声产生一定的影响。



图 13 接收侧声压测点

Fig.13 Sound pressure measurement point on receiving side

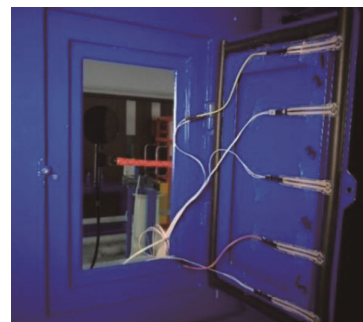


图 14 薄膜压力传感器安装及测点

Fig.14 Film pressure sensors installation and measurement points

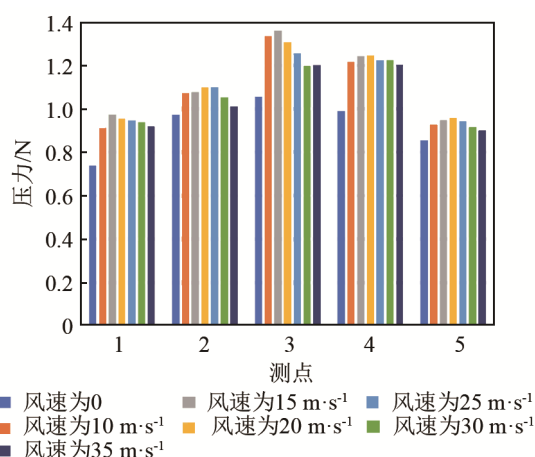


图 15 门锁边压力值随风速变化

Fig.15 Pressure changes with wind speed at the lock side

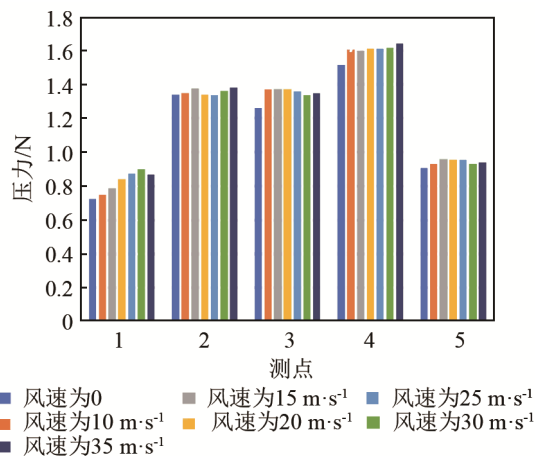


图 16 铰链边压力值随风速变化

Fig.16 Pressure changes with wind speed at the hinge side

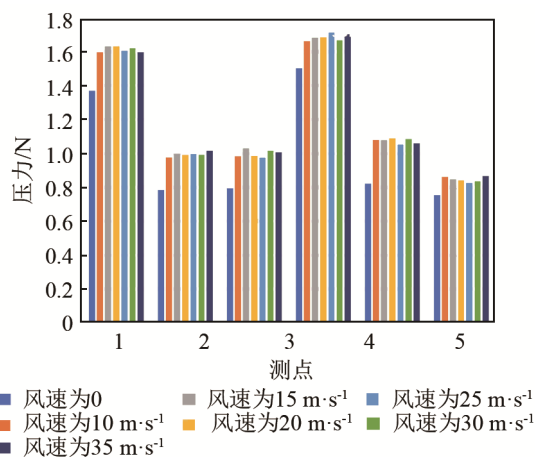


图 17 上下边测点压力值随风速变化

Fig.17 Pressure changes with wind speed at the upper and lower sides of the door

由图 16 可见, 铰链边明显靠近铰链位置, 测点压力大, 其他位置压力小, 这是结构的特点所致。随着风速的增加, 压力基本呈现逐渐上升的趋势, 也略有波动的特点。其原因在于气流通过时负

压区导致门板外推绕铰链呈转动趋势, 使该侧压力增加。其波动的原因也和密封条的受压有关。

图 17 上下门板两边(测点 1、2、3 位于一边, 测点 4、5、6 位于另一边)测点的压力。很明显压力值与结构有关, 靠近铰链边压力高, 靠近门锁边压力低。风速的变化引起压力变化的规律不明显, 但有风和无风时差异较大, 可能有风时与密封条受到的压力有关。

图 18~20 为门板密封条位置压紧力和传声能

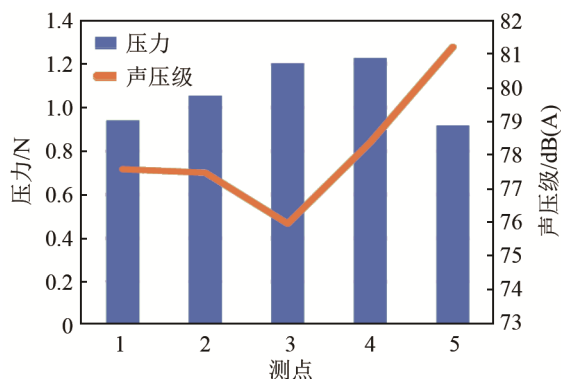


图 18 门锁边测点压力值和声压级(风速为 30 m/s)

Fig.18 Pressure and sound pressure level at the lock side (wind speed is 30 m/s)

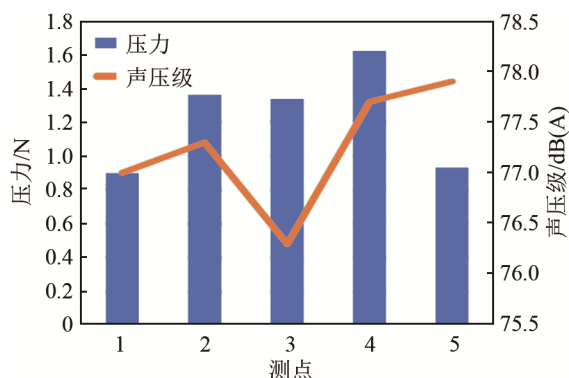


图 19 铰链边测点压力值和声压级(风速为 30 m/s)

Fig.19 Pressure and sound pressure level at the hinge side (wind speed is 30 m/s)

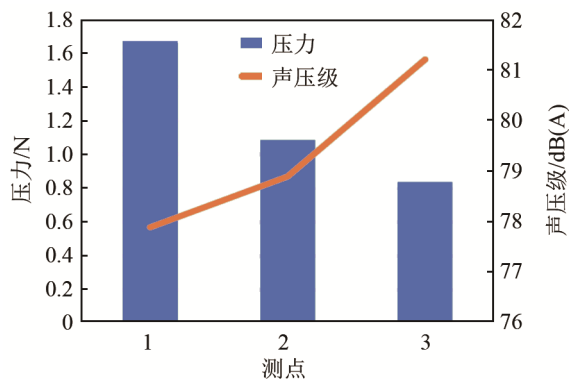


图 20 门板下边测点压力和声压级分布(风速为 30 m/s)

Fig.20 Pressure and sound pressure level at the lower side of the door (wind speed is 30 m/s)

力的对比。经实验测量,气流侧板面附近的声压分布基本均匀,和平均值最大相差 1.6 dB(A),所以,在接收侧测量的声压近似代表该位置的传声能力。从图 18~20 中可以看出,压紧力和传声能力基本呈负相关,但压紧力分布不同时,传声能力相互产生影响。如门锁边第 4 个测点压紧力大,但该点受第 5 个测点压紧力小、传声强的影响,第 4 点的传声变得较强。铰链边的第 4 点有类似的情况。由此可以看出,要降低传声能力,压紧力要增加,同时要避免压紧力不均匀出现局部传声变强而影响整体隔声效果的情况。

### 3 讨论

#### 3.1 流场及气动声场环境下的门板结构传声性能

从上述单道密封条密封结构和门板密封结构的传声综合分析可以看出,和来流方向垂直的密封边(竖向密封)对门板中高频传声影响较大,来流方向相同的密封边(横向密封)也对门板中高频传声影响较大,与竖向密封不同的是它的中高频范围向低频扩展,对更高频段的影响不大。这些密封结构对低频传声无影响。但流场及气动声场对门板声辐射和声透射有重要的影响。据文献[13]研究可知,流体脉动对汽车车身板结构而言会产生低频声辐射,气动声场会对其中高频透声产生影响。总结上述研究结论可以获得图 21 的流场及气动声场环境下门板传声的特征,这将对门的隔声和密封设计提供重要的参考。

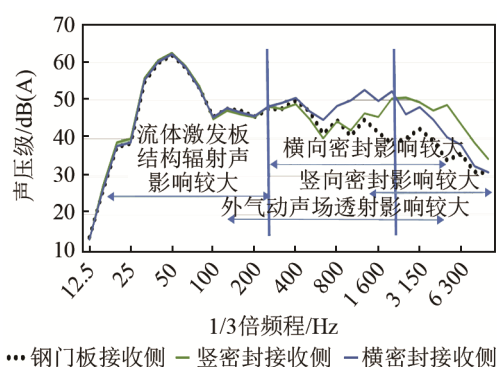


图 21 流场及气动声场环境下门板传声的特征

Fig.21 The sound transmission characteristics of door panel imposed by the airflow and aerodynamic sound

#### 3.2 密封条压紧力和传声的关系

从上述研究综合考虑,密封条压紧力增加无疑使密封结构的传声改善。压紧力的增加除设计意图外,门板在外力作用下会产生局部变形,会导致有

些点的密封性增强,有些点变弱,传声特性会发生改变。如图 12 所示,门板在锁边位置抬高 3 mm 的间隙,其密封性变差,大部分频段传声增加,但高频 4 kHz 附近传声却改善,也许和铰链边密封条被挤压有关。图 18 和图 19 出现压紧力大的位置受其周围压紧力小的位置传声的影响,传声增加;图 15~17 均出现无风速和有风速时(尽管较小)压紧力突然提高较多的情况,虽然门板受气流影响不大,但密封条受内外压差变化而变形,影响压紧力。这些现象有待进一步研究,但也说明了门结构的密封受诸多因素的影响,设计时应当综合考虑。

### 4 结论

通过小型气动-声学风洞实验测试和分析手段,参考汽车实车门板结构密封和气动力作用,建立门板单道密封结构和门板板四周密封结构实验研究环境和试验件,研究其密封结构传声特性。研究结果表明:

(1) 和来流方向垂直的密封边(竖向密封)对门板中高频段的传声影响较大,和来流方向相同的密封边(横向密封)也对门板中高频段的传声影响较大,与竖向密封不同的是它的中高频范围向低频扩展,对更高频段的影响不大。进一步分析给出了流体和气动声环境下门板结构(包括密封结构)全频段的传声、声辐射和透射特征,对门板的隔声和密封设计具有参考价值。

(2) 密封条压紧力和密封结构传声有正相关关系,但由于门结构四边支撑结构不同,受外力作用门板变形不同,压紧力会在周边有不同的分布,其传声特性也会随之变化,说明了门结构的密封受多因素的影响,设计时应当综合考虑。

#### 参考文献

- [1] KOIKE M, FUKUMITSU Y. Sound transmission loss of weather strips [C]//ISATA-Proc.90069, 1990, 22nd Int. Symp. on Automotive Tetchily and Automation, (Florenz), Proc.Ud.2: 1155-1161.
- [2] GUR Y, MORMAN K N. Sound transmission analysis of vehicle door sealing system[C]//SAE Technical Paper Series. 400 Commonwealth Drive, Warrendale, PA, United States: SAE International, 1999: 1187-1196.
- [3] JUNG W W, OH S J. The influence of vehicle elements to aspiration wind noise[C]//SAE Technical Paper Series. 400 Commonwealth Drive, Warrendale, PA, United States: SAE International, 1995: 21-29.
- [4] PENG C B, MORREY D M. An investigation into the effect of door seals on noise generated in the passenger compartment[J]. ImechE 1998 C521/1020: 335-344.
- [5] 王晓军. 汽车车内噪声与车身密封性的关系探讨[J]. 北京汽车, 2011(2): 30-32,35.

- [6] 李奇, 白长安, 王勇. 汽车车门密封条隔声性能仿真分析方法介绍[C]//2014年中国声学学会全国声学学术会议论文集. 南京, 33(S2): 281-284.  
LI Qi, BAI Changan, WANG Yong. Introduction of sound insulation performance simulation of vehicle door seals[J]. Technical Acoustics, 2014, 33(S2): 281-284.
- [7] 高云凯, 杨肇通, 冯海星, 等. 车门实际关闭工况的密封条隔声性能仿真[J]. 西安交通大学学报, 2015, 49(11): 142-148.  
GAO Yunkai, YANG Zhaotong, FENG Haixing, et al. Sound insulation property simulation of door weatherstrip considering practice working condition[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2015, 49(11): 142-148.
- [8] THOR W, BOLTON J S. A desktop procedure for measuring the transmission loss of automotive door seals[C]//SAE Technical Paper Series. 400 Commonwealth Drive, Warrendale, PA, United States: SAE International, 2017.
- [9] 李奇, 俞悟周. 直线段汽车密封条静态隔声测试方法[J]. 声学技术, 2007, 26(4): 678-682.  
LI Qi, YU Wuzhou. Methods for testing sound transmission loss of vehicle seals[J]. Technical Acoustics, 2007, 26(4): 678-682.
- [10] 贺银芝, 杨志刚, 王毅刚. 汽车车身密封对车内气动噪声影响的机理及试验研究[J]. 汽车工程, 2012, 34(8): 692-695, 744.  
HE Yinzhi, YANG Zhigang, WANG Yigang. The mechanism and experimental study of the effects of car body sealings on interior aerodynamic noise[J]. Automotive Engineering, 2012, 34(8): 692-695, 744.
- [11] 孙飞, 梁波, 刘建伟, 等. 汽车车门密封性能控制与风噪声改善[J]. 噪声与振动控制, 2015, 35(5): 82-86.  
SUN Fei, LIANG Bo, LIU Jianwei, et al. Seal performance control of automobile doors and wind noise reduction of vehicles[J]. Noise and Vibration Control, 2015, 35(5): 82-86.
- [12] 魏程, 王毅刚, 张昊, 等. 高速气流下汽车门密封条传声实验研究[C]//2019中国汽车工程学会年会论文集. 上海, 2019: 325-331.
- [13] 王毅刚, 张婕, 俞悟周, 等. 基于统计能量法的汽车风噪传播特性分析[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2018, 46(12): 1696-1704.  
WANG Yigang, ZHANG Jie, YU Wuzhou, et al. Analysis of wind noise propagation characteristics of automobile based on statistical energy analysis[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2018, 46(12): 1696-1704.