



基于波数分析的扰流板风噪声仿真与优化

杜敏韬 宋俊 叶斌 陈耀钦 周万田 江财茂 龙良活

Simulation and optimization of spoiler wind noise based on wavenumber-frequency analysis

DU Mintao, SONG Jun, YE Bin, CHEN Yaoqin, ZHOU Wantian, JIANG Caimao, LONG Lianghuo

引用本文:

杜敏韬, 宋俊, 叶斌, 等. 基于波数分析的扰流板风噪声仿真与优化[J]. 空气动力学学报, 2024, 42(7): 69–76. DOI: 10.7638/kqdlxxb-2023.0169

DU Mintao, SONG Jun, YE Bin, et al. Simulation and optimization of spoiler wind noise based on wavenumber-frequency analysis[J]. *Acta Aerodynamica Sinica*, 2024, 42(7): 69–76. DOI: 10.7638/kqdlxxb-2023.0169

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7638/kqdlxxb-2023.0169>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

不可压缩流动的高精度非标准格子玻尔兹曼方法

A high-order off-lattice Boltzmann method for incompressible flows

空气动力学学报. 2022, 40(3): 65–74 <https://doi.org/10.7638/kqdlxxb-2021.0243>

高速可压反应流的二维简化离散玻尔兹曼模型

Simplified two-dimensional discrete Boltzmann model of high-speed compressible reactive flows

空气动力学学报. 2022, 40(3): 98–108 <https://doi.org/10.7638/kqdlxxb-2021.0285>

基于线阵列的湍流边界层壁面脉动压力波数-频率谱模型实验研究

Experimental study of the turbulent-boundary-layer wall pressure fluctuation wavenumber-frequency spectrum models using linear array

空气动力学学报. 2024, 42(6): 15–34 <https://doi.org/10.7638/kqdlxxb-2023.0111>

格子玻尔兹曼正则化碰撞模型的理论进展

Theoretical progress on regularized lattice Boltzmann collision models

空气动力学学报. 2022, 40(3): 46–64 <https://doi.org/10.7638/kqdlxxb-2020.0426>

输电塔钢管涡激振动控制措施的风洞试验研究

Wind tunnel test on suppressing vortex-induced vibrations of steel tubes in power transmission towers

空气动力学学报. 2023, 41(2): 90–97 <https://doi.org/10.7638/kqdlxxb-2021.0377>

多相流系统的离散玻尔兹曼研究进展

Progress of discrete Boltzmann study on multiphase complex flows

空气动力学学报. 2021, 39(3): 138–169 <https://doi.org/10.7638/kqdlxxb-2021.0021>

地址: 四川省绵阳市二环路南段8号11信箱9分箱

电话: 0816-2463375

Email: kqdlxxb@163.com



关注微信公众号

获得更多资讯信息

文章编号: 0258-1825(2024)07-0069-08

基于波数分析的扰流板风噪声仿真与优化

杜敏韬*, 宋俊, 叶斌, 陈耀钦, 周万田, 江财茂, 龙良活

(广州汽车集团股份有限公司 汽车工程研究院, 广州 511434)

摘要:近年来,后扰流板风噪声成为汽车研究的热点,然而,其产生机理尚未完全清楚,同时,工程上的降噪也是亟待解决的难点。为了研究汽车后扰流板风噪声的产生机理并降低其对车内噪声的影响,首先,基于格子玻尔兹曼算法进行了可压缩非定常整车外流场仿真,通过统计能量分析法计算车内噪声响应,并利用风洞试验验证了计算结果的准确性。然后,采用可直观显示噪声源位置的波数分析方法,对玻璃面压力进行分解,得到湍流压力载荷和声压载荷,同时结合噪声频谱的分析结果,发现:后扰流板的低频噪声峰值主要由周期性脱落涡带来的声压以及涡旋和玻璃面作用带来的湍流脉动压力共同导致,而高频噪声峰值主要由高速气流引起的辐射声压导致。最后,提出了一个优化后的扰流板设计,使得车内噪声频谱低频段声压级降低了 5.5 dB(A),高频段声压级降低了 14 dB(A)。

关键词:可压缩; 格子玻尔兹曼算法; 波数分析; 扰流板; 风噪声

中图分类号:U463.835 文献标识码:A doi: 10.7638/kqdlxxb-2023.0169

Simulation and optimization of spoiler wind noise based on wavenumber-frequency analysis

DU Mintao*, SONG Jun, YE Bin, CHEN Yaoqin, ZHOU Wantian, JIANG Caimao, LONG Lianghuo

(GAC Automotive Research & Development Center, Guangzhou 511434, China)

Abstract: In recent times, rear spoiler wind noise has garnered significant attention. However, the lack of understanding of its mechanism has prevented the development of effective noise reduction methods. To address this issue, we conducted a study on its mechanism with the aim to reduce its influence on the interior noise. Using the lattice Boltzmann method (LBM), we simulated the compressible and unsteady flow fields around a vehicle. Statistical energy analysis was then used to obtain the interior noise, which was validated by wind tunnel tests. Next, to locate the noise source, we employed the wave number analysis method to decompose the pressure at the glass surface into the turbulent and acoustic parts. The results indicate that the low-frequency spectrum peak of the interior noise is primarily attributed to the sound pressure induced by periodic vortex shedding and the fluctuating turbulent pressure by the interaction between vortices and glass surface. The high-frequency spectrum peak is mainly due to the radiated acoustic pressure generated by high-speed air flows. Finally, we proposed an optimized rear spoiler which can reduce the low- and high-frequency spectrum peaks of the interior noise by 5.5 dB(A) and 14 dB(A), respectively. This optimized design offers a promising solution to reduce wind noise and enhance driving comfort.

Keywords: compressible; lattice Boltzmann method; wavenumber-frequency analysis; spoiler; wind noise

0 引言

随着更加安静的纯电动汽车和混合动力汽车的

发展,对于汽车性能设计来说,风噪声成为一个比以往任何时候都更重要的课题。而降低车外风噪声源是做好汽车风噪性能设计的前提和基础。

收稿日期:2023-09-25; 修订日期:2024-01-14; 录用日期:2024-01-22; 网络出版时间:2024-06-17

作者简介:杜敏韬*(1990—),男,广西玉林人,汽车 NVH 风噪工程师,研究方向:汽车气动噪声. E-mail: dumintao@hotmail.com

引用格式:杜敏韬,宋俊,叶斌,等.基于波数分析的扰流板风噪声仿真与优化[J].空气动力学学报,2024,42(7):69–76.

DU M T, SONG J, YE B, et al. Simulation and optimization of spoiler wind noise based on wavenumber-frequency analysis[J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2024, 42(7): 69–76(in Chinese). doi: 10.7638/kqdlxxb-2023.0169

在车身密封良好的前提下,对车内风噪声最重要的路径贡献之一来自车辆的玻璃系统。玻璃上的压力载荷有两种不同类型^[1]。第一种是湍流脉动压力,由气流直接作用于玻璃表面而产生,这部分载荷引起玻璃的振动进而向车内辐射噪声;第二种是声压,包含玻璃表面附近和其他部位的偶极子声源,以及空间四极子声源向玻璃面的辐射^[2]。在汽车行驶速度为120 km/h左右的低马赫数条件下,虽然声压在能量上远小于湍流压力^[3-4],但还需要考虑频率的差异。受弯曲波的影响,玻璃在吻合频率段,声压的透射效率远大于湍流压力^[5],而其吻合频率通常在3000~4000 Hz的高频段。因此,对于车内风噪声而言,这两种类型压力载荷的贡献都不可忽视。

在研究时需要两类载荷加以区分,然而依靠试验方法往往很难将这两种成分完全分离。在流场的任意一处,实际压力是这两部分载荷的总和,考虑到二者之间的相干特性,除了需要测量的时间信息之外,还需要一些关于压力场空间结构的信息。为此,Gabriel等^[3]以及Arguillat等^[6]在他们各自的试验中均使用了空间分辨率达到2 mm的麦克风阵列,他们的试验也成功地将这两种压力成分进行了分离。值得指出的是,相对于Arguillat等,Gabriel等所使用的麦克风阵列布置面积大大减小,而且无需旋转,是一个重大改进。沈哲等^[7]则使用滤网降低湍流压力脉动,通过纯物理方式分离两种压力脉动并取得了较为显著的效果。考虑到麦克风的数量和布置,这些试验方法在实际工程应用中依然存在不少操作难度。

近年来,随着计算流体力学(Computational Fluid Dynamics, CFD)的不断发展,尤其是计算机算力的提升,气动噪声的数值模拟正展现强大的应用前景。湍流压力和声压目前主要有两种CFD计算方法。一种是混合算法,基于流场计算结果直接得到玻璃面湍流压力,再结合计算气动声学(Computational Aeroacoustics, CAA)计算,如FW-H(Ffowcs Williams-Hawkings)方程^[8]、LEE(linearized Euler equation)方程^[9]和APE(acoustic perturbation equation)方程^[10-11],对流场相关信息进行声源的转换计算进而得到声压。这种方法的优点在于流场的计算不需要非常精细的网格,但CAA更考验计算的精度。另一种是直接算法,在可压缩流计算结果中直接包含两种压力成分,再结合压力分解计算,分别得到玻璃面上的湍流压力和声压^[12]。这种方法的难度在于流场的计算需要非常精细的网格来减少数值耗散。

镂空型扰流板的使用日益广泛,随之而来的风噪

声问题也变得愈加突出^[13-15]。本文针对某款运动型多用途汽车(sport utility vehicle, SUV)的镂空式后扰流板,使用直接算法中计算效率更高的格子玻尔兹曼算法(lattice Boltzmann method, LBM)对整车外流场进行非稳态可压缩计算,以期获得玻璃面上同时包含湍流和声学两部分压力的计算结果。针对车内的声学计算结果,采用风洞试验进行验证以校准计算精度。然后采用波数分析方法对玻璃面上的压力进行分解并进行针对性分析,在此基础上提出降低扰流板风噪声的优化方案。

1 计算方法与计算模型

1.1 波数-频率分析方法

在国外,波数分析方法早已被用于对汽车后视镜所带来的压力脉动进行分解^[16-17]。实际上,声波是以声速进行传播,而湍流压力波是以对流速度进行传播。对于汽车而言,对流速度 U_c 近似等于来流速度,即车速,而空气中的声速 c_0 则达到340 m/s,这就导致湍流压力的波数要远大于声压的波数。因此,可以利用波数分析方法对两种压力成分进行分离。对于压力波而言,其波数、频率和速度有如下关系:

$$\begin{aligned} k_c &= \omega / U_c, \\ k_0 &= \omega / c_0 \end{aligned} \quad (1)$$

式中, k_c 为湍流压力的波数, k_0 为声压的波数, ω 为频率。

为在波数域上对两种压力进行分离,首先基于可压缩流场计算得到的玻璃面上的压力,可以构建某位置点 x 的相关函数^[19]:

$$R(\xi, \tau) = [p'(x, t) \cdot p'(x + \xi, t + \tau)] \quad (2)$$

式中, ξ 为距离向量, τ 为时延, p' 为压力脉动。再依据维纳-辛钦定理,对相关函数进行傅里叶变换,即可得到频域上的功率谱密度^[19]:

$$S(k, \omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} R(\xi, \tau) e^{-i(k\xi + \omega\tau)} d\xi_1 d\xi_2 d\tau \quad (3)$$

在此, $\xi = (\xi_1, \xi_2)$ 表示二维上的距离向量,其中 ξ_1 为气流方向。基于此功率谱密度,即可进一步计算得到不同波数、频率下的压力成分。

在以往的研究中^[18],进行波数分解后,常采用 $k-\omega$ 或 k_x-k_z 功率谱密度图来对湍流压力和声压进行分析,但其缺点在于不能直观地展现噪声源的位置。本文在滤波得到波数域的湍流压力和声压功率谱密度后,再进行逆变换^[19], $S(k, \omega) \rightarrow S(x, \omega)$,使其在原几

何空间中可视化，从而更好地展现噪声源的位置。另外，云图也以倍频程形式显示。

1.2 计算模型

本文计算所用整车模型如图 1 所示，该车型为溜背式 SUV，镂空型扰流板安装于后风挡玻璃上部区域。为简化计算，非重点的底盘区域和轮毂做了平整化处理。采用常规长方体式计算域，120 m(长)×74 m(宽)×49 m(高)。计算域设置速度入口、大气压力出口，底面为滑移壁面。计算模拟工况为车速 120 km/h、横摆角 0°。

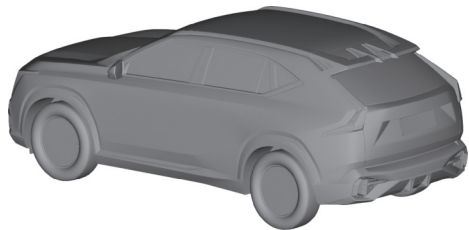


图 1 整车计算模型
Fig. 1 Simulation model

图 2 为车身及扰流板周围网格加密情况。首先对重点关注的扰流板本体采用随型加密区进行加密，网格尺寸达到 0.5 mm。其次用方形加密区对扰流板及后风挡玻璃区域进行加密，网格尺寸为 1 mm。车身周围则设置 2 个随型加密区，网格尺寸为 8 mm 和 16 mm，而在更大的区域则采用方形加密区进行网格加密。计算域最大网格尺寸为 1 m。最终，整个外流场计算域网格总数约 9 亿。

流场的计算基于 LBM，湍流模型采用超大涡模拟(very large eddy simulation, VLES)。流场直接采用

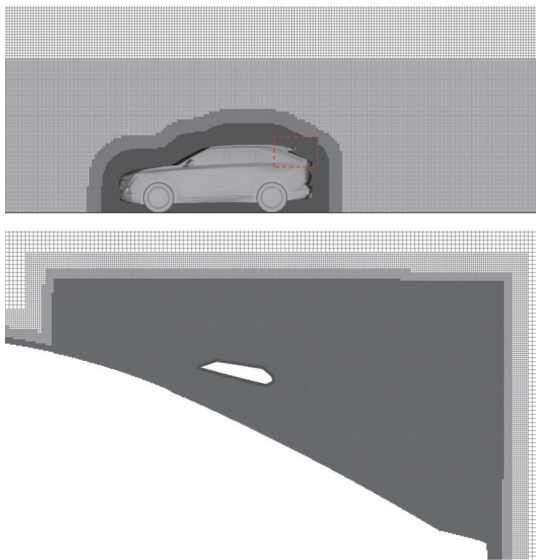


图 2 车身及扰流板周围网格模型，截面 $y=0.2\text{ m}$
Fig. 2 Grid distributions around the vehicle and spoiler at $y=0.2\text{ m}$

非稳态可压缩流计算，时间步长设置为 $2.673\times10^{-6}\text{ s}$ ，总物理计算时长为 1 s。考虑到计算的收敛，从 0.2 s 开始对玻璃面监测点进行压力数据采样，采样时长 0.8 s；从 0.5 s 开始对玻璃面的压力数据进行采样，采样时长 0.5 s。依据采样定理，采样数据足够支持分析本文所关心的最低频率和最高频率。

车内声场的计算采用统计能量分析法，本文关注的扰流板风噪声主要通过后风挡玻璃传入车内，因此计算模型只考虑后风挡玻璃面单一传递路径。后风挡为普通单层钢化玻璃。

2 结果分析与讨论

2.1 初步仿真计算结果

图 3 所示为车内后排左侧乘客头部空间的声压级响应频谱(仅计算后风挡玻璃面路径贡献)，采用三分之一倍频程显示。从图中可以看到，在低频段的 100~200 Hz，噪声能量较高，其中 200 Hz 中心频率点的窄带波峰更为明显；高频段 2000~5000 Hz 的频谱同样存在波峰，但相对表现为宽频特征。值得注意的是，玻璃的吻合频率为 3000 Hz 左右，至于高频段的波峰是由外部噪声源引起，还是仅仅由于玻璃在吻合频率段的隔声低谷所致，这一问题尚需通过试验做进一步的验证。

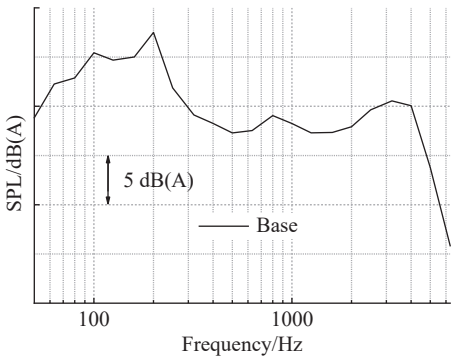


图 3 车内后排左侧声压级频谱
Fig. 3 Sound pressure level (SPL) spectrum at the rear left

2.2 风洞试验验证

扰流板风噪声验证试验在重庆中国汽车工程研究院风洞中心进行，如图 4 所示。为了减少其他噪声源的干扰，对全车密封附件进行了加强密封处理；同时，为了突显后风挡传递路径的噪声贡献，对侧门窗和前风挡玻璃进行了隔声加强处理。车内使用数字人工头进行噪声数据采集。

试验中，在扰流板前端进行封堵，以阻止气流流经扰流板镂空区域，从而消除镂空结构所带来的风噪声源。测试结果如图 5 所示。为了尽可能贴合仿真，



图4 扰流板风噪声验证试验

Fig. 4 Wind noise verification test for spoiler

选取了后排乘客内耳的测试数据。由图5可以看到,封堵扰流板后,频谱在200 Hz左右的声压级有较为明显的下降,降幅为1.6 dB(A);在高频段,2500 Hz以上均有显著改善,最高降幅达到3.5 dB(A)。试验结果说明,扰流板镂空结构带来的风噪声源对车内低频段和高频段噪声均有显著贡献。

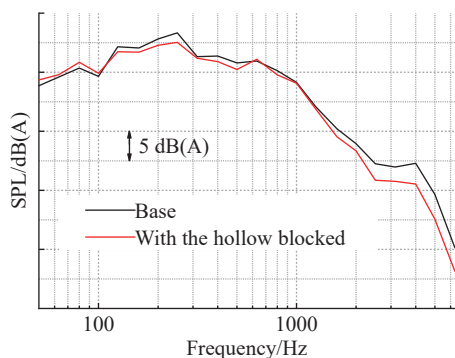


图5 左右排乘客内耳声压级频谱

Fig. 5 Sound pressure level spectra inside ears of the passenger seated at the rear left

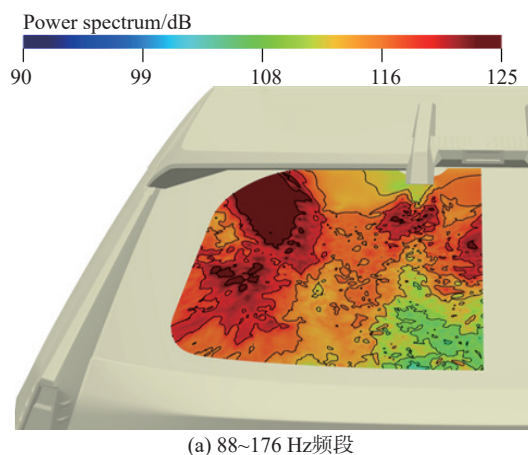
对比仿真和试验结果可以发现,仿真结果频谱曲线总体趋势和试验结果没有完全吻合,主要原因是仿真计算时为了突出扰流板对风噪声的贡献,同时简化计算模型提高计算效率,仅考虑了后风挡玻璃面这一单一传声路径,而忽略了后门窗、后侧围角窗等玻璃传声路径,以及底盘和车体钣金的传声路径。实际上,这些路径在实车环境中对车内后排噪声水平也有着显著的影响,不容忽视。

尽管如此,仿真结果中出现的波峰对应的频段与试验中封堵扰流板后频谱变化的频段相吻合,由此可以说明,仿真模型能在一定程度上准确捕捉扰流板镂空结构所引起的风噪声源。

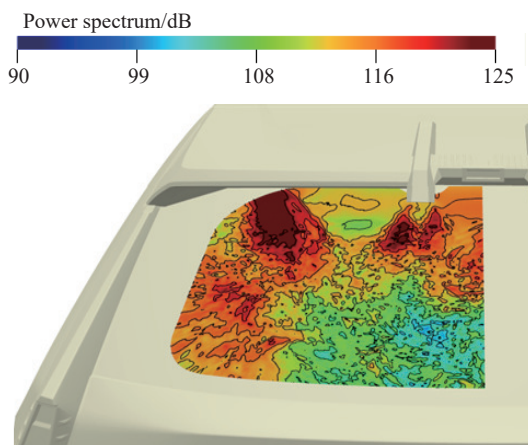
2.3 波数分解及测点结果分析

图6和图7分别是波数分解后得到的湍流压力和声压在玻璃面上的分布。分布云图采用倍频程的

叠加结果。图6显示,在88~176 Hz频段(中心频率为125 Hz),湍流压力最显著的区域位于扰流板两侧基座下方;在176~353 Hz频段(中心频率为250 Hz)也是如此。随着频率的增加,该区域的面积有所减小,但强度并未显著下降。结合图3的分析,可推断该区域是造成车内低频段波峰的噪声源位置。



(a) 88~176 Hz频段



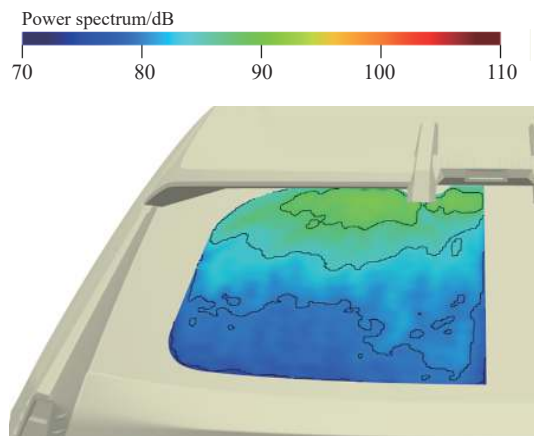
(b) 176~353 Hz频段

图6 玻璃面湍流压力分布

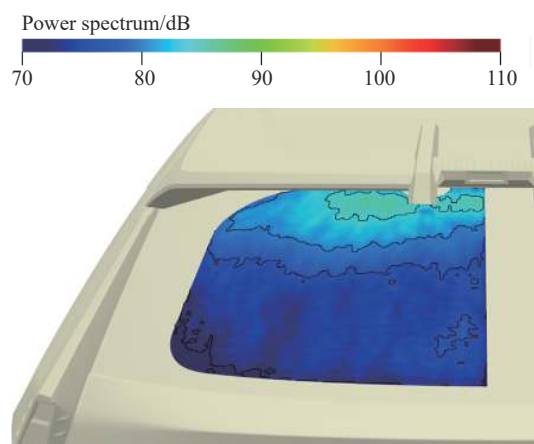
Fig. 6 Turbulent pressure distribution on the glass

图7所示为玻璃面上1414~5656 Hz频段(中心频率分别为2000、4000 Hz)的声压分布,可以发现,与湍流压力分布不同,声压最大值区域主要集中在扰流板悬空翼型段下方。虽然随着频率的增加,声压强度有所下降,但该区域位置没有较大改变。由此可推断,车内高频段噪声波峰的源头位于扰流板翼型段,但更为具体的原因还需要进一步分析。

另外,除了利用波数分解对玻璃面压力分布进行分析外,在计算中还设置了压力监测点(图8)。根据图9中监测点频谱结果,P2监测点在中低频段的幅值显著高于其他所有监测点,对比图6可以发现,P2监测点的位置恰好对应于湍流压力最高的区域。单独抽取P3、P4、P5和P13监测点的频谱,可以进一



(a) 1414~2828 Hz频段



(b) 2828~5656 Hz频段

图 7 玻璃面声压分布

Fig. 7 Sound pressure distribution on the glass

步看到, 在 1000 Hz 以下频段, 4 个监测点幅值大致相当; 然而, 在 1000 Hz 以上频段, P3、P4 和 P5 监测点的幅值明显高于 P13 监测点。结合图 7 进行分析, 发现 P3、P4 和 P5 测点位于声压较大的区域, 而 P13 测点的区域声压较小。这一观测结果表明, 尽管湍流压力在强度上远超声压, 但由于频率特性的不同, 在一些没有受到剧烈或周期性湍流影响的区域, 高频段的声压在量级上也会成为主导因素, 并在监测点的压力频谱中得以体现。

3 噪声源优化分析

3.1 高频噪声源优化分析

汽车上常见的气动噪声源主要有四极子声源和偶极子声源。根据 Lighthill^[20] 气动声学理论, 四极子声源声功率与气流特征速度的 8 次方成正比, 偶极子声源声功率与气流特征速度的 6 次方成正比。可见, 气流速度是决定气流噪声的关键因素。

根据前文分析, 玻璃面上的声压主要分布于扰流板悬空翼型段的下方。进一步分析翼型段 y 向截面

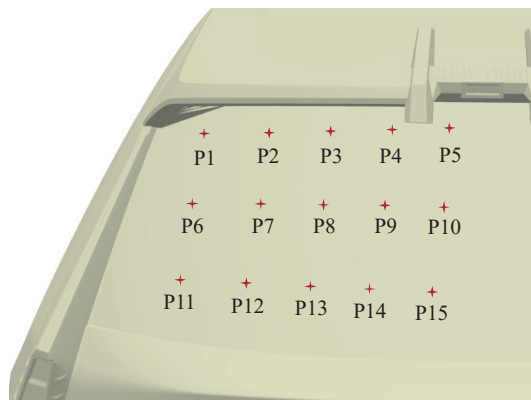


图 8 玻璃面压力监测点

Fig. 8 Pressure monitors on the glass

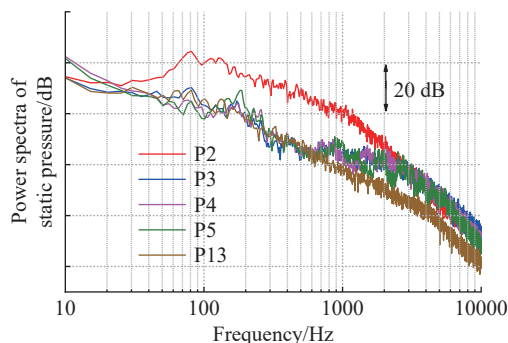


图 9 监测点静压功率谱

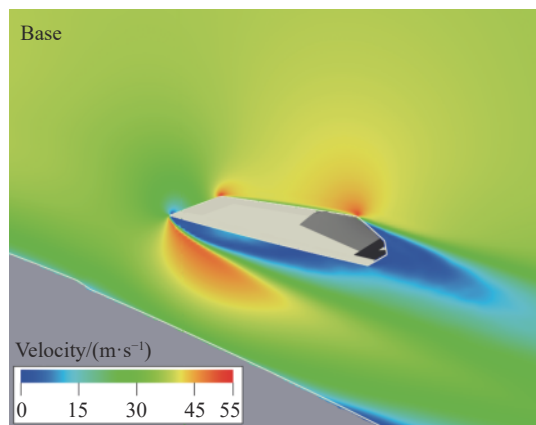
Fig. 9 Power spectra of measured static pressure

(即图 2 的 A-A 截面) 的速度云图。考虑到非稳态流场的无序性和前方车顶来流的不稳定性, 局部气流速度呈现波动, 因此, 采用一段时间内的平均流场进行分析, 如图 10 所示。分析结果表明, 在原始状态下扰流板中, 翼型前端下方气流分离严重, 导致气流速度快速升高, 局部气流速度最高达到 54 m/s。高速气流本身形成了四极子声源, 同时气流与扰流板相互作用形成了偶极子声源, 两者共同向玻璃面辐射噪声, 与前文玻璃面压力波数分解后得到的声压云图(图 7) 显示规律一致。由此可见, 此处的高速气流是引起车内噪声高频段波峰的根本原因。

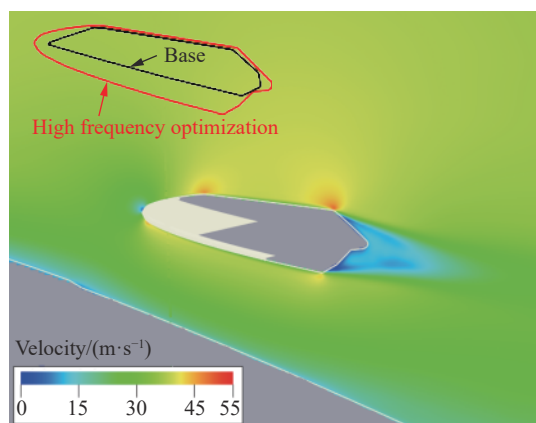
为了减轻该位置的气流分离并降低气流速度, 对扰流板翼型进行了优化。优化方案如图 10 所示。优化结果表明, 局部气流分离基本得到抑制, 翼型前下方的局部气流速度降低至最高 40 m/s, 且高速气流区域也明显缩小。图 11 展示了优化方案实施后的车内噪声仿真结果频谱。在高频段, 尤其是 3000~4000 Hz 范围内, 声压级降幅最大达到 14 dB(A)。同时, 低频段的波峰频率有所偏移, 可能是该区域的气流对扰流板两侧产生干扰所致, 但其幅值基本没有降低。

3.2 低频噪声源优化分析

与声压云图不同, 湍流压力云图能直观反映玻璃



(a) 原状态



(b) 高频优化方案

图 10 扰流板 A-A 截面速度云图

Fig. 10 Velocity contours in the A-A cross section

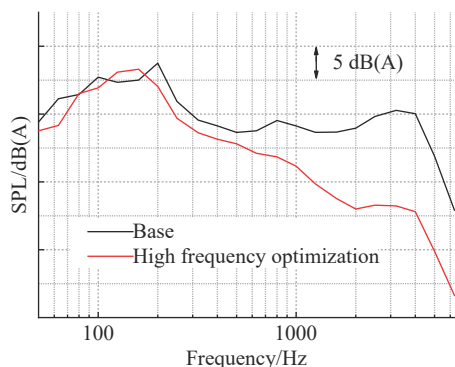


图 11 高频优化方案车内声压级仿真结果频谱

Fig. 11 Sound pressure level spectra of the high-frequency optimization case

面附近气流的流动情况。根据图 6 的观察, 气流在流经扰流板两侧基座后, 在后方形成了剧烈的涡流区。车内频谱在 200 Hz 处的窄带波峰也表明此处的涡流具有周期性。以破坏涡的周期性为出发点, 将流经此处的气流进行分层, 设置优化方案如图 12 所示。

选取 200 Hz 左右低频段湍流压力分布进行对比, 结果如图 13 所示, 优化方案实施后, 基座后方玻

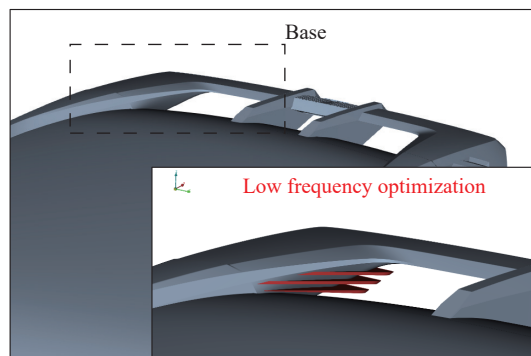
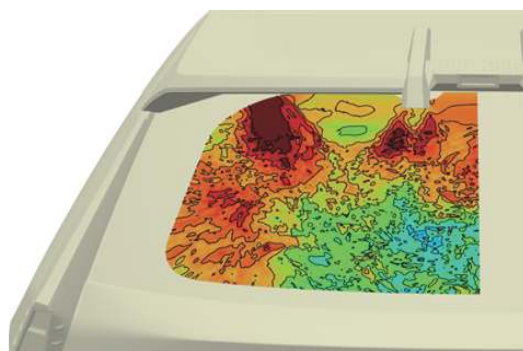
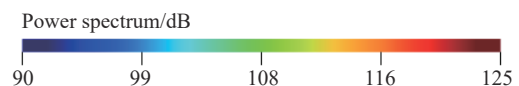


图 12 低频优化方案

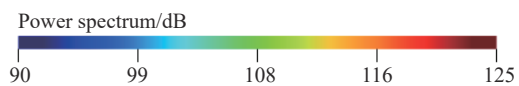
Fig. 12 Low-frequency optimization case

璃面的湍流压力强度大幅减弱。玻璃面监测点压力频谱(图 14)显示, P2 点在 60~500 Hz 范围内的压力级出现不同程度的降低, P1 监测点在 80 Hz 处的波峰在优化方案实施后消失。

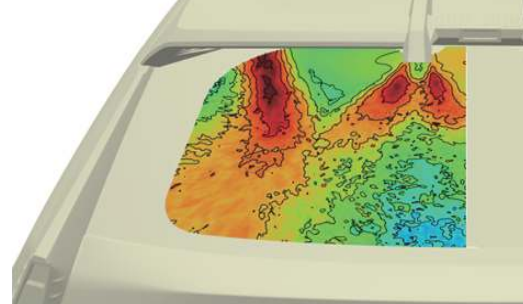
车内声压级仿真结果频谱对比如图 15 所示, 经过优化后, 200 Hz 波峰处声压级降低了 5.5 dB(A), 整个中低频段也得到了不同程度的改善; 2000 Hz 以上的高频段, 频谱趋势特征则基本和原状态一致。



(a) 原状态



(b) 低频优化方案



(b) 低频优化方案

图 13 玻璃面 176 ~ 353 Hz 频段湍流压力分布对比

Fig. 13 Turbulent pressure distributions on glass surface with frequency between 176 Hz and 353 Hz

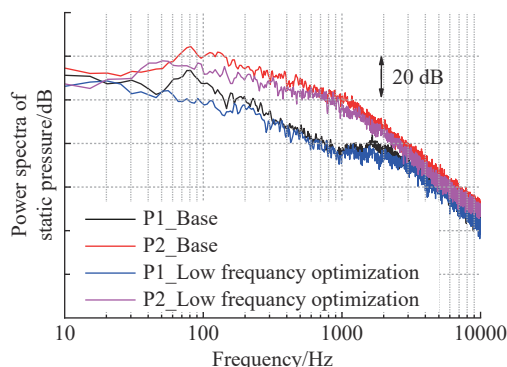


图 14 低频优化方案车外监测点频谱

Fig. 14 Power spectra of static pressure at monitors P1 and P2

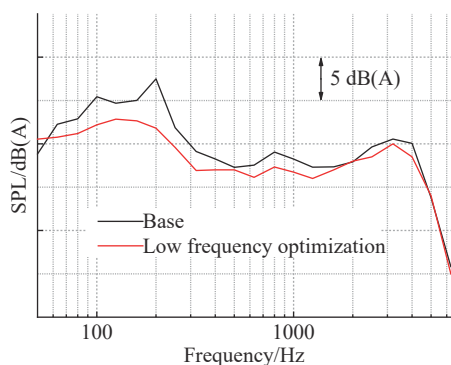


图 15 低频优化方案车内声压级仿真结果频谱

Fig. 15 Sound pressure level spectra of the low-frequency optimization case

4 结 论

本文结合 LBM 和统计能量分析法对后扰流板引起的车内风噪声进行了数值计算,重点利用波数分析方法对玻璃面上的压力进行分解,进而对噪声产生机理做了深入分析,并提出了针对性的优化方案以降低扰流板所引起的低频和高频风噪声。主要结论如下:

1) 波数分析方法能准确地分离玻璃面上的湍流压力载荷和声压载荷;

2) 镂空式后扰流板的低频风噪声主要是由周期性的脱落涡所引起的声压以及涡旋和玻璃面相互作用导致的湍流压力脉动所引起,而高频风噪声主要由高速气流辐射的声压源所导致;

3) 抑制周期性涡脱落(低频)和改善气流分离加速(高频)的优化方案,分别能够使车内噪声频谱对应频段的声压级降低 5.5 dB(A) 和 14 dB(A)。

参 考 文 献:

[1] 王元良,陈鑫,张英朝,等.基于直接 CAA 与 SEA 的汽车风噪预测与控制[J].汽车工程,2021,43(01): 86–93,112.
WANG Q L, CHEN X, ZHANG Y C, et al. Vehicle wind noise prediction and control based on direct CAA and SEA[J]. Automotive

Engineering, 2021, 43(01): 86–93, 112.(in Chinese).
[2] WILLIAMS J E F, HAWKINGS D L. Sound generation by turbulence and surfaces in arbitrary motion[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 1969, 264(3): 321–342.
doi: 10.1098/rsta.1969.0031
[3] GABRIEL C, MÜLLER S, ULLRICH F, et al. A new kind of sensor array for measuring spatial coherence of surface pressure on a car's side window[J]. Journal of Sound and Vibration, 2014, 333(3): 901–915.
doi: 10.1016/j.jsv.2013.09.045
[4] YUAN H D, YANG Z G, WANG Y G, et al. Experimental analysis of hydrodynamic and acoustic pressure on automotive front side window[J]. Journal of Sound and Vibration, 2020, 476: 115296.
doi: 10.1016/j.jsv.2020.115296
[5] 胡兴军,毛靖铭,张扬辉,等.标准模型的风噪声源及其特性分析[J].汽车工程,2022,44(8): 1262–1271.
HU X J, MAO J M, ZHANG Y H, et al. The wind noise source and its characteristic analysis of HSM standard model[J]. Automotive Engineering, 2022, 44(8): 1262–1271(in Chinese).
[6] ARGUILLAT B, RICOT D, ROBERT G, et al. Measurements of the wavenumber-frequency spectrum of wall pressure fluctuations under turbulent flows[C]// 11th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference, Monterey, California. Reston, Virginia: AIAA, 2005: 2855.
doi: 10.2514/6.2005-2855
[7] 沈哲,王毅刚,杨志刚.气体湍流压力与声压脉动的试验分离方法[J].汽车工程学报,2019,9(6): 408–412.
SHEN Z, WANG Y G, YANG Z G. Experimental method for separating turbulence pressure and acoustic pressure fluctuation[J]. Chinese Journal of Automotive Engineering, 2019, 9(6): 408–412(in Chinese).
[8] 卢清华,陈宝.基于 LES 方法的增压装置气动噪声特性分析[J].空气动力学学报,2016,34(4): 448–455.
LU Q H, CHEN B. Analysis of aeroacoustics characteristics of high lift device using LES method[J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2016, 34(4): 448–455(in Chinese).
doi: 10.7638/kqdlxb-2014.0140
[9] 余培汛,白俊强,杨海,等.耦合 RANS/LES 模型与 LEE 方程的气动噪声混合预测方法[J].西北工业大学学报,2017,35(6): 990–997.
YU P X, BAI J Q, YANG H, et al. Hybrid aero-acoustics prediction method coupled with RANS/LES model and LEE equation[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2017, 35(6): 990–997(in Chinese).
doi: 10.3969/j.issn.1000-2758.2017.06.009
[10] 赵成,张涛,侯国祥.基于声扰动方程的矩形柱绕流噪声数值模拟[J].华中科技大学学报(自然科学版),2021,49(10): 103–108.
ZHAO C, ZHANG T, HOU G X. Numerical study on flow noise of flow around rectangular cylinders based on acoustic perturbation equations[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2021, 49(10): 103–108(in Chinese).
[11] ZHONG L Y, LI Q L, WANG Y G, et al. Aerodynamic noise prediction of passenger vehicle with hybrid detached eddy simulation/acoustic perturbation equation method[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering, 2019, 233(10): 2390–2404.
doi: 10.1177/0954407018782856
[12] 张佳,吴海波,陈蓓,等.基于格子波尔兹曼方法的某乘用车空调系统气动噪声的直接模拟与优化[J].汽车工程,2020,42(8): 1103–1109.
ZHANG J, WU H B, CHEN Q, et al. Direct simulation and optimization of the aerodynamic noise in a car HVAC system based on lattice-

- boltzmann method[J]. *Automotive Engineering*, 2020, 42(8): 1103–1109(in Chinese).
- [13] ZHANG B Y, DU M T, ZHANG L, et al. Experiment study of spoiler-induced wind noise[C]// 27th International Congress on Sound and Vibration (ICSV27), 2021.
- [14] 秦玲, 杜小锦, 冯锦阳, 等. 某 SUV 镂空尾翼气动噪声特性的研究[J]. *汽车工程*, 2023, 45(5): 880–887, 894.
- QIN L, DU X J, FENG J Y, et al. Study on aerodynamic noise characteristics of SUV hollow roof spoiler[J]. *Automotive Engineering*, 2023, 45(5): 880–887, 894(in Chinese).
- [15] 张凤利, 张荣荣, 罗秋丽, 等. 某 SUV 镂空扰流板气动噪声机理分析及降噪研究[J]. *机械工程学报*, 2024, 60(6): 398–408.
- ZHANG F L, ZHANG R R, LUO Q L, et al. Research on the aerodynamic noise mechanism and noise reduction of SUV roof hollow spoiler[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2024, 60(6): 398–408(in Chinese).
- [16] VANHERPE F, BARESH D, LAFON P, et al. Wavenumber-frequency analysis of the wall pressure fluctuations in the wake of a car side mirror[C]// 17th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference (32nd AIAA Aeroacoustics Conference), Portland, Oregon. Reston, Virginia: AIAA, 2011: 2936.
- doi: [10.2514/6.2011-2936](https://doi.org/10.2514/6.2011-2936)
- [17] VAN HERPE F, VERGNE S, GAUDARD E. Wavenumber-frequency analysis of the wall pressure fluctuations in the wake of a rear view mirror using a lattice Boltzmann model[C]// *Acoustics 2012*, Nantes, France, 2012.
- [18] DRUAULT P, HEKMATI A, RICOT D. Discrimination of acoustic and turbulent components from aeroacoustic wall pressure field[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2013, 332(26): 7257–7278.
- doi: [10.1016/j.jsv.2013.07.019](https://doi.org/10.1016/j.jsv.2013.07.019)
- [19] HARTMANN M, OCKER J, LEMKE T, et al. Wind noise caused by the side-mirror and A-pillar of a generic vehicle model[C]// 18th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference (33rd AIAA Aeroacoustics Conference), Colorado Springs, CO. Reston, Virginia: AIAA, 2012: 2205.
- doi: [10.2514/6.2012-2205](https://doi.org/10.2514/6.2012-2205)
- [20] LIDTHILL M J. On Sound generated aerodynamically. Part I: General theory[J]. *Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 1952, 1107: 564–587.
- doi: [10.1098/rspa.1952.0060](https://doi.org/10.1098/rspa.1952.0060)

(本文责编: 张天航)