

文章编号:1000-8055(2013)01-0112-08

高速车辆侧窗风振噪声仿真分析与控制

王 宁¹, 谷正气^{1,2}, 刘水长¹, 董光平², 刘龙贵¹(1. 湖南工业大学 机械工程学院, 湖南 株洲 412007;
2. 湖南大学 汽车车身先进设计制造国家重点实验室, 长沙 410012)

摘 要: 采用大涡模拟的计算方法, 对某轿车在不同侧窗开启工况下风振噪声特性进行了数值仿真. 揭示了侧窗风振噪声的产生机理, 分析了不同侧窗开启方式下驾驶员耳旁声压级存在差异的原因. 分析结果表明: 后窗附近湍流强度弱, 能量耗散少, 开启时风振噪声最大; 开启 2 个侧窗时, 由于气流导出效应, 可以有效地降低风振噪声. 提出了使用扰流装置抑制风振噪声的措施, 探讨了不同形状扰流装置对风振噪声影响. 仿真结果表明: 方形扰流装置的降噪效果最明显, 最大降幅可达 15 dB.

关 键 词: 风振噪声; 车辆; 计算流体力学 (CFD); 大涡模拟 (LES); 侧窗

中图分类号: U461.1

文献标志码: A

Wind buffeting noise analysis and control for high-speed vehicle side-windows

WANG Ning¹, GU Zheng-qi^{1,2}, LIU Shui-chang¹,
DONG Guang-ping², LIU Long-gui¹(1. School of Mechanical Engineering, Hunan University of Technology,
Zhuzhou Hunan 412007, China;
2. State Key Laboratory of Advanced Design and Manufacture for Vehicle Body,
Hunan University, Changsha 410012, China)

Abstract: By using large eddy simulation, numerical simulation of wind buffeting noise in a car when opening different side-windows was conducted. The mechanism of wind buffeting noise of side-windows was revealed, and the reason that the sound pressure level in the driver's ears exhibited differences in different cases was discussed. The results show that the turbulence intensity and the energy dissipation are relatively weak near the rear windows. When opening a rear window, wind buffeting noise is the maximum; when opening two, the air derived effect can effectively reduce it. A corresponding suppression measure which involved installing a kind of disturbed flow device was proposed, and the effects of wind buffeting noise under different shapes of devices were discussed. The simulation results show that the square device is the most evident, and the maximum degradation is 15 dB.

Key words: wind buffeting noise; vehicle; computational fluid dynamics (CFD); large eddy simulation (LES); side-windows

收稿日期: 2012-01-03

网络出版地址: http://www.cnki.net/kcms/detail/11.2297.V.20130114.1726.201301.112_016.html

基金项目: 国家自然科学基金(50975083); 湖南省科技厅科技计划(2009JT1014);
湖南省科技厅科研条件创新专项(2011TT2043)

作者简介: 王宁(1986—), 男, 河南南阳人, 硕士生, 主要从事汽车空气动力学气动噪声方向研究.

长时间在车内的驾驶员很容易因缺氧产生疲劳或困倦,而侧风窗的开启可以极大地改善车内空气流动,增加车内供氧量,可有效地缓解驾驶员的疲劳感。但是,开启侧窗时会引发风振噪声,这种频率在 20 Hz 左右、强度高达 100 dB 以上的噪声产生的脉动压力使驾驶员感到烦躁和疲倦,严重影响了驾驶的舒适性。从驾驶员和乘客的乘坐舒适性出发,在汽车设计阶段,必须考虑风振噪声的影响。因此,研究侧窗风振噪声的产生机理及控制方法有很重要的实际意义^[1]。

20 世纪 60 年代, Bodger 和 Jones^[2] 率先开展了客车后窗开启时的风振噪声研究。他们指出当侧窗开启时,整个车厢形如 Helmholtz 共振腔,当气流流经窗口时,产生涡的脱落,进而产生共振,并从理论上提出了 3 种解决风振噪声的办法; Karbon 等人^[3-5] 采用非结构化网格和基于有限元法的商用 CFD 软件对与实车非常接近的汽车模型进行了仿真分析,获得了与风洞试验结果较吻合的结果; Sovani 和 Hendriana^[6] 利用 CFD 软件对某乘用车的侧窗风振噪声进行了广泛的研究,得到的仿真结果与实验值差别很小; An 等人^[7-8] 利用 CFD 软件对某 SUV (sport utility vehicle) 的侧窗风振噪声进行了仿真分析,分析了若干变量对风振噪声的影响,并采取了一些措施来降低后窗的风振噪声; 湖南大学汪怡平^[9-11] 也对汽车风振噪声进行了深入的研究,推导出了弱可压缩湍流模型,用于预测车内风振噪声; 北京航空航天大学的康宁等人^[12-13] 对汽车天窗的风振噪声进行过研究。

目前,针对不同侧窗开启方式对风振噪声特性影响的研究较少。本文采用大涡模拟 (LES) 的计算方法,在不同侧窗开启方式工况下对某轿车侧窗风振噪声特性进行了数值模拟仿真,重点阐述了侧窗风振噪声的产生机理,讨论了不同侧窗开启方式对驾驶员耳旁声压级的影响。

1 大涡模拟的控制方程

将 Navier-Stokes (N-S) 方程在物理空间进行过滤,得到流体 LES 控制方程

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \bar{u}_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \bar{u}_i \bar{u}_j) = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \right) - \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \bar{u}_i) = 0 \quad (2)$$

式中 ρ 为流体密度; x_i, x_j 为坐标轴分量, $\bar{u}_i$ 和 $\bar{u}_j$ 为过滤后的速度分量; μ 为湍流黏度; τ_{ij} 为亚格子尺度应力。

为使控制方程封闭,当前,采用较多的亚格子模型是涡旋黏性模型

$$\tau_{ij} - \frac{1}{3} \tau_{kk} \delta_{ij} = -2\mu_t \bar{S}_{ij} \quad (3)$$

式中 δ_{ij} 为克罗内克系数; μ_t 为亚格子湍流黏度; $\bar{S}_{ij}$ 是求解尺度下的应力变化张量分量。

2 计算模型及计算方法

2.1 计算域及网格划分

本文所用的轿车模型见图 1,在不影响计算精度的情况下,对车身进行了简化处理,省略了车灯、门把手、天线等,并将轿车底部简化为平面。由于考虑的是侧窗开启的情况,所以需要建立内饰模型,图 2 给出了 2 个乘员时的内饰模型。模型长 L 为 4700 mm,宽 W 为 1740 mm,高 H 为 1470 mm。

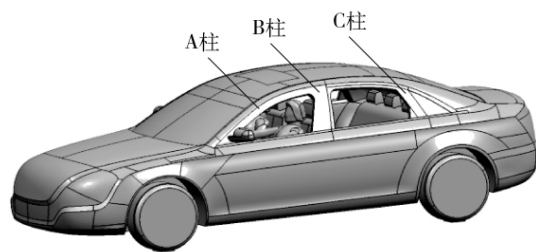


图 1 轿车模型

Fig. 1 Car body model

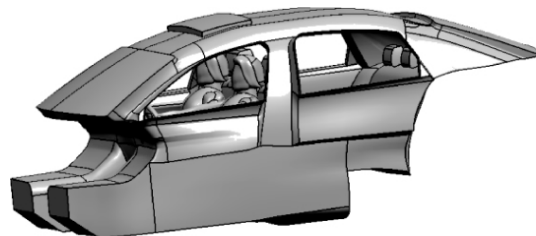


图 2 内饰模型

Fig. 2 Interior model

计算域为包围汽车模型的长方体 (见图 3), 长为 $11L$, 宽为 $5W$, 高约为 $4H$ 。图 4 为车身表面网格分布图, 车身处使用密度盒进行局部加密, 生成局部精细的网格。本文采用四面体网格, 网格数量 700 万左右, 为了模拟附面层效应, 在车身表面, 生成了 3 层精细的棱柱网格。

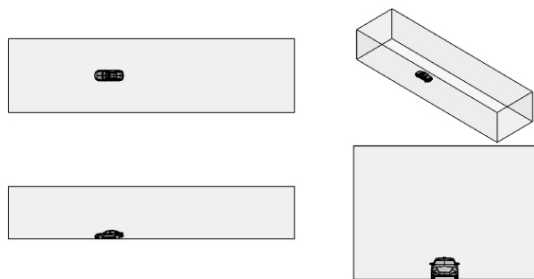


图 3 计算域模型

Fig. 3 Computational domain model

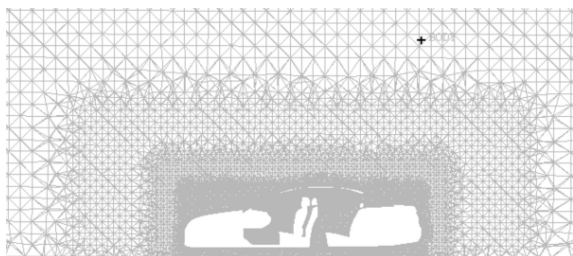


图 4 车身纵对称面上的网格分布图

Fig. 4 Grid distribution at the symmetric longitudinal cross section

2.2 边界条件

本文计算所用的边界条件如表 1.

表 1 边界条件

Table 1 Boundary conditions

计算域边界	边界条件描述
入口	速度入口 $v=30\text{ m/s}$
出口	压力出口 1 个标准大气压
侧面及顶部	静止壁面
地板	滑移地面 $v=30\text{ m/s}$
车身	无滑移壁面

2.3 计算方法

对于瞬态问题,一般先进行稳态仿真,然后将稳态结果作为瞬态的初始条件.稳态数值模拟求解器设置如表 2 所示.

表 2 稳态计算求解器设置

Table 2 Solver setting of steady

设置项	设置值
湍流模型	Realizable $k-\epsilon$ 湍流模型
压力速度耦合方式	SIMPLE 算法
空间离散格式	2 阶精度迎风格式

待稳态计算结果收敛后,作为瞬态求解的初始值.采用大涡模拟(LES)进行瞬态求解,监测点选择在驾驶员的左、右耳旁,其具体坐标为 $(1.586, -0.463, 0.804)$, $(1.586, -0.281, 0.804)$,单位为 m.采样时间设为 2 s,由于流场从开始计算到稳定需要一个过程,因此只记录 1~2 s 的时域信号;时间步长决定了能计算的最高频率,风振噪声主要集中在低频^[10],所以本次计算的最高频率设定在 250 Hz,为了便于观察,图形最高频率只显示到 100 Hz,时间步长为 0.002 s,因此总步数为 1000 步,每时间步迭代 20 次.

3 计算方法验证

为了验证计算方法的准确性,在侧窗全部关闭的情况下,在湖南大学的 HD-2 风洞中对这款轿车的阻力系数进行了风洞试验,如图 5 所示.



图 5 模型风洞试验图

Fig. 5 Model wind tunnel experiment

仿真计算的阻力系数为 0.248,风洞试验风速为 30 m/s,地面无抽吸,其结果为 0.256,两者的误差为 3.125%,说明了计算方法的准确性.造成这种误差的原因主要有以下 3 点:①风洞试验和数值仿真边界条件设定时存在的差异,如湍流模型;②风洞试验模型和计算机辅助设计(CAD)数字模型外形上有差别;③测量精度、温度、压强等环境因素的影响.

4 计算结果及分析

4.1 不同的侧窗开启方式

本文研究来流速度为 30 m/s,2 个乘员,不同侧窗开启时驾驶员耳旁的风振噪声.开启侧窗共有 15 种工况,汽车在高速行驶时,开启 3 个或 4

个侧窗的情况不常见,因此未予考虑,另外由于车体的对称性,侧窗一侧开启或交叉开启时分别有 2 种情况,为了便于计算和分析,只计算了各自的 1 种.本文选择了 8 种典型的工况,对其进行编号如表 3.

表 3 侧窗开启方式	
Table 3 Means of opening side-windows	
工况描述	编号
开左后窗	1
开右后窗	2
开左前窗	3
开右前窗	4
开左前窗左后窗	5
开左前窗右前窗	6
开左后窗右后窗	7
开左前窗右后窗	8

4.2 计算结果及分析

4.2.1 计算结果

表 4 为 8 种工况的仿真结果,侧窗开启数目不同,风振噪声的峰值也不同.

表 4 风振噪声共振频率及噪声值				
Table 4 Resonance frequency and sound pressure level of wind buffeting noise				
工况	频率(左)/ Hz	声压级 (左)/dB	频率(右)/ Hz	声压级 (右)/dB
1	17	129	17	129
2	17	127	17	127
3	20	115	20	115
4	22	113.5	22	113.5
5	29	113	29	113
6	29	109.5	29	109.5
7	30	125	30	125
8	31	117	31	117

由表 4 可知,在驾驶员左右耳旁处,后窗开启的风振噪声大于前窗开启时,工况 1 时风振噪声最大,声压级达到 129 dB,工况 4 时风振噪声只有 113.5 dB,两者相差 15.5 dB;侧窗单开时的风振噪声大于侧窗双开时,以工况 2 和工况 8 为例,风振噪声相差 10 dB. 因此,选择合理的开启方式也

能有效地控制风振噪声.

4.2.2 侧窗风振噪声产生机理分析

风振噪声是一种空腔噪声,当汽车侧窗或天窗打开时,车厢内就形同空腔.在开口的上游边缘(前缘)处存在着不稳定的剪切层,使得涡旋在这个位置脱落并随着气流一起向后流动.当它们撞击到开口的后缘时,涡旋破碎,产生一个向四面传播的压力波;传向行驶方向的压力波到达开口的前缘,将再次引发涡旋的脱落.这个过程每秒钟会重复很多次,并且引起剪切层产生一个特定的振动频率,如果这个频率与车厢的固有频率相同,将会发生共振^[1].

由文献[9]可知,涡旋的形成与脱落,是风振噪声的来源,为很好地观察涡的形成与脱落的过程,通过显示流体变量在一段时间内的变化来揭示侧窗处非稳态的固有特性.因为涡的产生和脱落是周期性的,本文选取了其中 1 种工况(工况 2)1 个周期 T 的几个不同时刻侧窗附近横截面的静压云图(图 6)来说明侧窗风振噪声产生的机理.

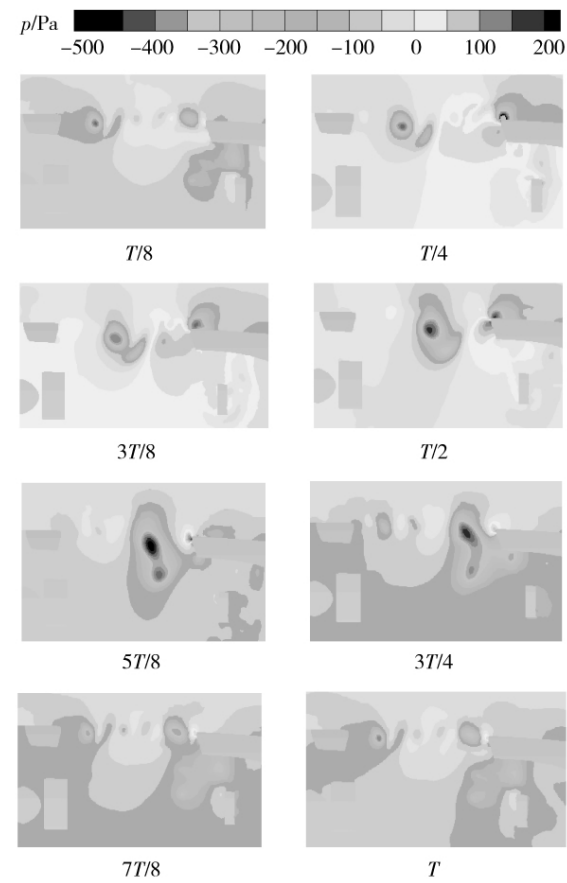


图 6 横截面不同时刻的静压云图
Fig. 6 Instantaneous pressure nephograms with different time located on vertical cut planes

由图6可知腔体形状接近于Helmholtz共鸣器, $T/8$ 时刻车内为负压区,B柱后缘区形成了一个内核压力较低的涡旋; $T/4$ 时涡旋前移,分裂为2个涡旋,车内压力开始升高; $3T/8$ 时涡旋继续前移,车内压力达到最大; $T/2$ 时前面的涡旋脱落,车内压力开始降低; $5T/8$ 时后面涡旋开始碰撞C柱前缘,分离为2个涡核; $3T/4$ 时涡旋开始脱落,车内压力降到最低; $7T/8$ 时在B柱后面形成一个新的涡旋,车内涡旋继续脱落; T 时涡旋完全耗散,流场回到 $T=0$ 时刻的状态开始,重复下一个周期。

4.2.3 侧窗前、后开时风振噪声对比分析

图7为工况2和工况4驾驶员左耳处声压级比较。由图可知,工况2时风振噪声声压级比工况4时高了13.5 dB。这是由于气流在后视镜的阻挡下产生分离,在前侧窗附近形成的湍流强度大于后窗附近的湍流强度,如图8所示,图8(a)为工况2,图8(b)为工况4,标示部分分别为侧窗开启部位附近的湍动能,它直接表示了气流湍流运动的强弱。由文献[14]可知:湍流边界层引起的声强度比层流边界层弱,在相同气动环境下,车外湍流强会降低车内气动噪声的强度,但对车身阻力会产生影响。经计算在工况2和工况4的情况下,汽车的风阻系数分别为0.281和0.286,比原车的风阻系数有所增加,这是由于侧窗的开启,增大了气流与汽车的接触面积,并且在汽车乘员舱内形成复杂的涡流,从而导致风阻系数的增大。

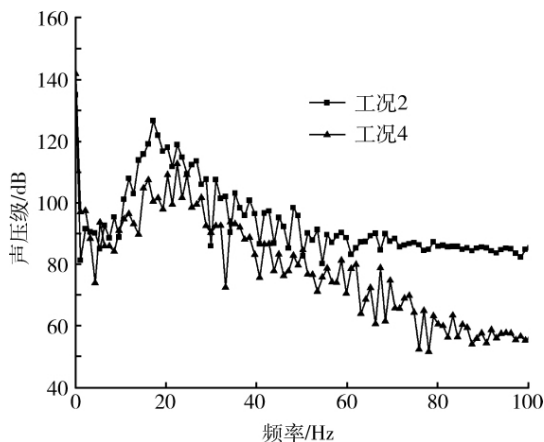
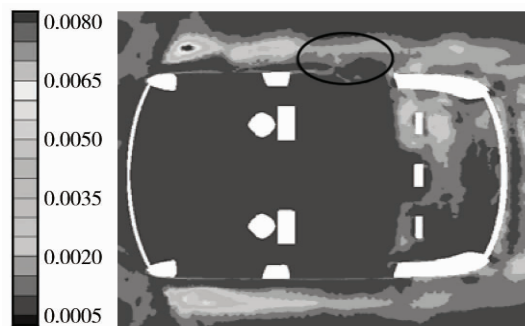


图7 工况2和工况4驾驶员左耳处声压级

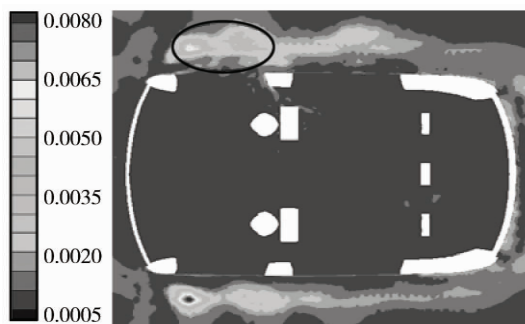
Fig. 7 Sound pressure level of case 2 and case 4 in the driver's left ear

4.2.4 侧窗单、双开时风振噪声对比分析

图9为工况1和工况5驾驶员耳旁声压级对



(a) 工况2



(b) 工况4

图8 工况2和工况4横截面上的湍动能云图
(单位:K)

Fig. 8 Turbulent kinetic energy contours on vertical cut planes of case 2 and case 4
(unit:K)

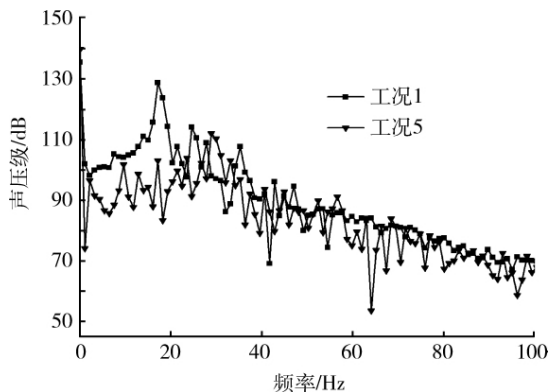


图9 工况1和工况5驾驶员左耳处声压级

Fig. 9 Sound pressure level of case 1 and case 5 in the driver's left ear

比,由图可知,双开时驾驶员耳旁的声压级比单开时有了明显的下降,工况5的声压级比工况1降低了16 dB。这是由于开启两侧窗时,涡旋从形成到脱落,引起车内压力变化时,会有一部分气流从前侧窗导出,降低了车内压力波动范围,减少了空腔振动的能量,使驾驶员耳旁声压级下降。

4.2.5 频率分析

由仿真结果可知,单开时的风振频率在 20 Hz 左右,双开时的风振频率在 30 Hz 左右,图 10 为 8 种工况的风振频率曲线。

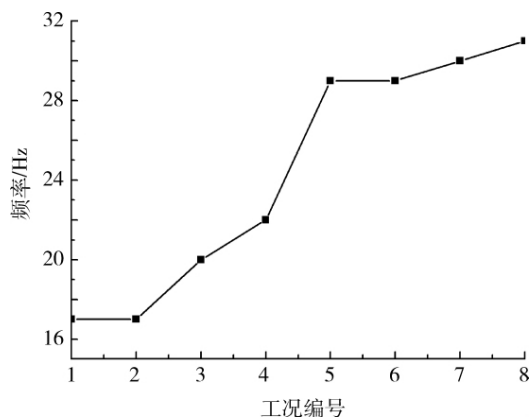


图 10 不同工况下的频率比较

Fig. 10 Frequency comparison under different working conditions

由图 10 可知:工况 1,2 的频率最小,工况 8 的频率最大。前窗开启时的风振频率大于后窗,这是由于前窗附近的气流的湍流强度比较大,涡旋从形成到撞击 B 柱后耗散用时较短;双开时的风振频率大于单开,这是因为侧窗双开时,空腔的开口面积增大,由文献[15]的经验公式可知,开口面积越大,风振频率越高,又由于双开时气流的在空腔内的相互干扰,加快了涡旋的脱落,因此双开时的风振频率大于单开。

5 风振噪声的控制

5.1 控制方案研究

由以上分析可知,后窗开启时,由于气流在后窗附近形成层流附面层,传入乘员舱的能量较多,此时的风振噪声较大,因此后窗是风振噪声优化的重点。针对此问题,本文选取风振噪声最大的工况 1 作为研究对象,通过在 B 柱上加装 1 排扰流装置(如图 11)来破坏后窗附近的层流附面层。对不同形状的扰流装置分别进行了数值模拟计算。图 12 所示为 3 种控制方案:方案 1,方形扰流装置;方案 2,圆形扰流装置;方案 3,流线型扰流装置。

加入扰流装置,会对车身的美学造型和气动阻力带来不利影响,因此在设计阶段考虑将其设计为内藏式,并有开启按钮可由驾驶员控制是否

开启此装置。

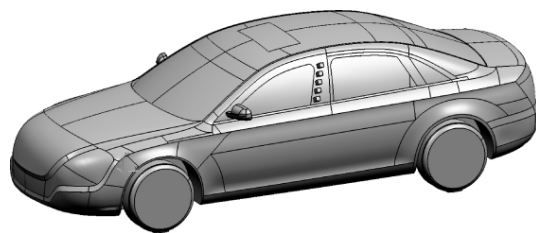


图 11 扰流装置在车体上的位置

Fig. 11 Position of the turbulent device on car body

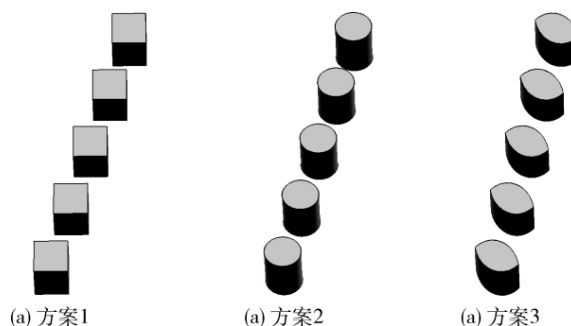


图 12 3 种不同的扰流方案

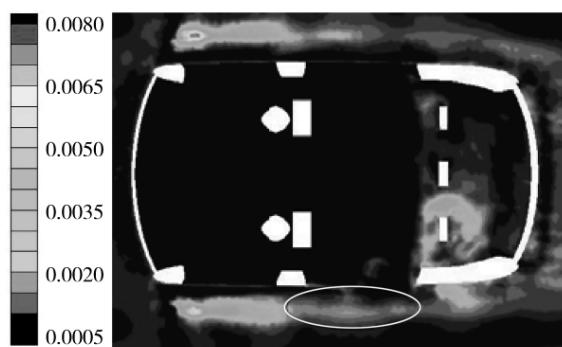
Fig. 12 Three different turbulent schemes

5.2 优化结果及分析

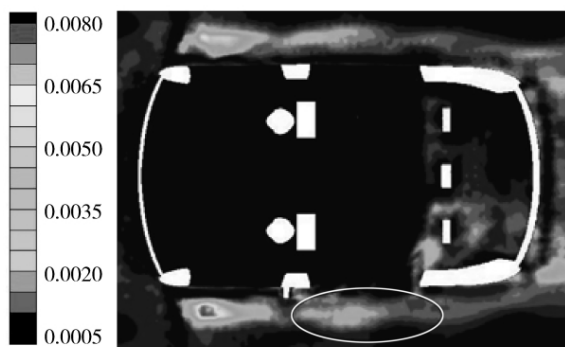
图 13 为 $z=0.804\text{ m}$ 截面上的湍动能云图,由图上可以看出,加装 3 种不同形状的扰流装置后,后窗附近的湍动能明显增加,见图中标识部分。湍流强度的增大,耗散掉了一部分湍流的能量,使进入乘员舱的能量减少。因此,3 种方案都能有效地降低风振噪声。

3 种装置的扰流效果不同,对后窗风振噪声的抑制也有差别,仿真计算结果见表 5。

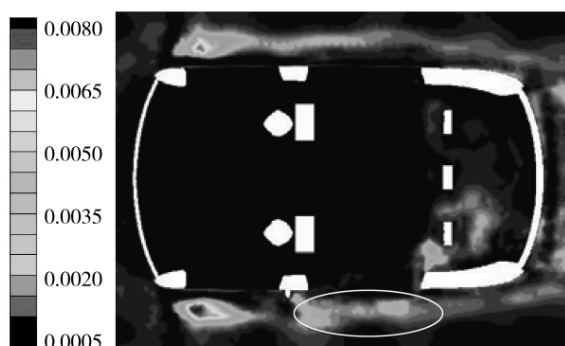
由表 5 可知,方案 1 的降噪效果最为明显,将风振噪声的峰值降低了 15 dB,方案 2 和方案 3 的降噪效果大体相当,分别将风振噪声的峰值降低了 6 dB 和 7 dB。



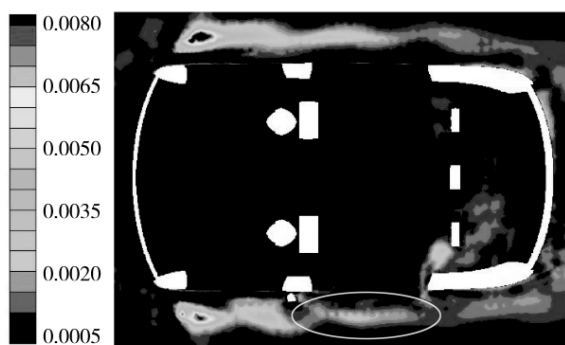
(a) 工况1



(b) 方案1



(c) 方案2



(d) 方案3

图 13 $z=0.804$ m 截面上的湍动能云图(单位:K)

Fig. 13 Turbulent kinetic energy contours on $z=0.804$ m vertical cut planes (unit:K)

表 5 优化后风振噪声共振频率和噪声值
Table 5 Resonance frequency and sound pressure level of wind buffeting noise after optimization

方案 编号	频率(左)/ Hz	声压级 (左)/dB	频率(右)/ Hz	声压级 (右)/dB
1	17	114	17	114
2	16	123	16	123
3	17	122	17	122

6 结 论

通过对不同侧窗开启方式的仿真计算和分析,得出以下结论:

1) 后窗附近的湍流强度弱,能量耗散少,风振噪声明显,开启 1 个后窗时,风振噪声峰值可达 129 dB(17 Hz).

2) 通过安装扰流装置可以有效地控制后窗附近的风振噪声,使其降低至 114 dB.

3) 开启 2 个侧窗时,由于气流的导出效应,也可以有效地降低风振噪声,工况 6 时风振噪声最小.

4) 风振噪声频率随着开窗数目的增多而增大,侧窗双开时比单开时高 10 Hz 左右.

本文提出的噪声控制方案,对侧窗风振噪声的控制有一定的指导意义,在今后的研究工作中,在考虑美学造型和气动阻力等因素的情况下,还将继续对扰流装置的高度、形状、个数等因素进行细节优化,以增加其实用性.

参考文献:

- [1] 谷正气,肖朕毅,莫志姣.汽车风振噪声的 CFD 仿真研究现状[J].噪声与振动控制,2007(4):65-68.
GU Zhengqi, XIAO Zhenyi, MO Zhijiao. Review of CFD simulation vehicle wind buffeting[J]. Noise and Vibration Control, 2007(4):65-68. (in Chinese)
- [2] Bodger W K, Jones C M. Aerodynamic wind throb in passenger cars[R]. SAE Technical Paper 640797, 1964.
- [3] Karbon K J, Kumarasamy S. Computational aero-acoustics applications in automotive design[R]. First MIT Conference on Computational Fluid and Solid Mechanics, 2001: 871-878.
- [4] Karbon K J, Kumarasamy S, Singh R. Applications and issues in automotive computational aeroacoustics[R]. Canada: Proceedings of the 10th Annual Conference of the CFD Society of Canada, Taylor & Francis, 2002.
- [5] Karbon K J, Singh R K. Simulation and design of automobile sunroof buffeting noise control[R]. Proceedings of the 8th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference & Exhibit, 2002.
- [6] Sovani S D, Hendriana D. Predicting passenger car window buffeting with transient external aero dynamics simulation [R]. Canada: Proceedings of the 10th Annual Conference of the CFD Society, 2002.
- [7] An C F, Alale S M, Sovani S D, et al. Side window buffeting characteristics of fan SUV[R]. SAE Technical Paper 2004-01-0230, 2004.
- [8] An C F, Mitchell M, Puskarz R, et al. Attempts for reduction of rear window buffeting using CFD[R]. SAE Technical Paper 2005-01-0603, 2005.

- [9] 汪怡平. 汽车风窗噪声与风振噪声的机理及控制方法研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2011.
WANG Yiping. Comprehensive study of generation mechanism and reduction methods of vehicle wind rush noise and buffeting noise[D]. Changsha: Hunnan University, 2011. (in Chinese)
- [10] 汪怡平. 汽车气动噪声分析与控制[D]. 长沙: 湖南大学, 2009.
WANG Yiping. The numerical analysis and controlment for the automotive eaerodynamic noise [D]. Changsha: Hunnan University, 2009. (in Chinese)
- [11] 汪怡平, 谷正气, 杨雪, 等. 微型客车后视镜气动噪声仿真分析与控制[J]. 航空动力学报, 2009, 24(7): 1577-1583.
WANG Yiping, GU Zhengqi, YANG Xue, et al. Aerodynamic noise analysis and control for mini-van car side view mirror[J]. Journal of Aerospace Power, 2009, 24(7): 1577-1583. (in Chinese)
- [12] 康宁, 王晓春. 天窗对车内部流场及气动噪声的影响[J]. 航空动力学报, 2010, 25(2): 354-358.
KANG Ning, WANG Xiaochun. Influence of sunroof on flowfield and aerodynamic noise inside the passenger compartment of the car[J]. Journal of Aerospace Power, 2010, 25(2): 354-358. (in Chinese)
- [13] 蓝天, 康宁, 郑昊. 直背轿车启动过程中气动现象研究[J]. 航空动力学报, 2007, 22(11): 1868-1873.
LAN Tian, KANG Ning, ZHENG Hao. Study of aerodynamic characteristics of fastback car in starting process [J]. Journal of Aerospace Power, 2007, 22(11): 1868-1873. (in Chinese)
- [14] Krishnamurty K. Acoustic radiation from two-dimensional rectangular cutouts in aerodynamic surface [R]. NACA TN-3487, 1955.
- [15] 汪怡平, 谷正气, 杨雪, 等. 汽车天窗风振噪声数值模拟与控制[J]. 中国公路学报, 2010, 23(6): 108-114.
WANG Yiping, GU Zhengqi, YANG Xue, et al. Numerical simulation and control automobile sunroof buffeting niose [J]. China Journal of Highway and Trasport, 2010, 23(6): 108-114. (in Chinese)