

后视镜罩边缘结构对流场和气动噪声的影响

陈 鑫, 王怀玉, 高长凤, 张 武, 谢 晨

(吉林大学 汽车工程学院 汽车仿真与控制国家重点实验室, 长春 130025)

摘 要: 采用大涡模拟(LES)的计算方法,对车外后视镜不同边缘结构引起的外部流场和镜后车身表面监测点处的气动噪声进行了数值仿真.研究表明:不同的镜罩边缘结构在较大程度上影响了流经后视镜罩的气流速度和流线方向,对后视镜后部流场和监测点处声压级产生较大影响.相较于原模型的光滑边缘结构,模型 1 后部流场涡团更远离车身表面,有利于降低气动噪声,某监测点 1/3 倍频程中心频率处声压级最大降幅接近 10 dB;模型 2 后部流场涡团产生分离,并更靠近车身表面,反而使气动噪声增大.模型 1 的镜罩边缘结构改进方案对车外后视镜-A 柱区域的流场和气动噪声都有较好的改善.

关 键 词: 后视镜; 大涡模拟 (LES); 气动噪声; 流场; 边缘结构

中图分类号: V211.3; U461.1

文献标志码: A

Effect of rearview mirror edge structure on flow field and aerodynamic noise

CHEN Xin, WANG Huai-yu, GAO Chang-feng,
ZHANG Wu, XIE Chen

(State Key Laboratory of Automotive Simulation and Control,
College of Automotive Engineering, Jilin University, Changchun 130025, China)

Abstract: Numerical simulation of exterior flow field and aerodynamic noise caused by different rearview mirror edge structures was conducted by the large eddy simulation (LES). The results show that various mirror cover edge structures have an effect on the air-flow velocity and direction, affecting greatly the rear flow field of rearview mirror and sound pressure level at monitoring point. Compared with the original model, the vortex flow behind model 1 is farther away from the body surface, helping to reduce aerodynamic noise. Sound pressure level drops by almost 10 dB in 1/3 octave center frequency at a monitoring point. The vortex flow behind model 2 is separated and located nearer to the body surface, leading to rise of aerodynamic noise. The mirror cover edge structure of model 1 improves the flow field and aerodynamic noise around the rearview mirror and A-pillar.

Key words: rearview mirror; large eddy simulation (LES); aerodynamic noise; flow field; edge structure

汽车在日常生活中扮演着重要的角色,随着人们对汽车行驶过程中舒适性的要求的提高,气动噪声问题成为近年来的研究热点.研究表明,主要的气动噪声来自于发动机盖、前车身底板、侧

窗和后窗等部位.其中,车身底板主要产生低频噪声,而在高频范围内,后视镜-A 柱区域是主要的噪声源^[1].汽车行驶过程中,气流在后视镜-A 柱区域发生分离并在后视镜后部形成较长的尾涡

流,造成侧窗表面剧烈的压力脉动,这是该区域产生气动噪声的根本原因.因此,合理设计后视镜罩外形,控制尾涡从而减小侧窗表面的压力脉动,是降低气动噪声的关键^[2].

对于后视镜产生气动噪声的机理及影响因素,国内外有一些相关研究.通用汽车公司^[3]在 GM Aerodynamics Lab(GMAL)风洞中对两种车型的后视镜进行气动噪声实验测量,并对 FLU-ENT 软件用于气动噪声预测的可行性进行了评估.同济大学李启良等^[4]以普通后视镜外形为基础模型,运用数值计算方法,探讨了不同后视镜参数对气动噪声的影响.由于后视镜完全突出于车身外,在高速气流中后视镜后部形成复杂的湍流结构,其镜罩边缘结构的改变必然引起流场的变化,从而影响后视镜-A 柱区域的噪声水平.在仿生非光滑表面研究领域,吉林大学任露泉等^[5-6]对非光滑表面的减阻脱附等性能做了相关研究,但目前对于降噪方面的研究还很少.本文以非光滑表面原理为参考,从普通轿车后视镜入手,对后视镜罩边缘结构进行改进,运用数值仿真方法,考察不同的后视镜罩边缘结构对流场和气动噪声的影响,旨在为后视镜优化设计提供参考.

1 气动噪声计算理论

目前一般采用声类比方法计算气动噪声,该方法需要经历 2 个阶段.首先使用大涡模拟方法对流场进行计算,得到流场数据;然后用声类比理论将流场数据转化为声源^[7].

1.1 大涡模拟理论

大涡模拟是介于雷诺平均法(RANS)和直接数值模拟(DNS)之间的一种湍流计算方法.其特点是通过过滤函数分离出大尺度涡和小尺度涡,大尺度涡运动由 N-S 方程直接数值计算得到,小尺度涡运动通过建立模型来模拟,其实质是解算空间平均 N-S 方程.这样不仅保证了计算精度的需要,而且大大减少了计算时间,现在广泛应用于工程实际中.

用滤波方程处理瞬态状态下的 N-S 方程及连续方程^[8],得到

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

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

式中带有上划线的量均为滤波后的场变量, $\bar{u}_i$ 和 $\bar{u}_j$ 是滤波后的速度分量, ρ 为流体密度, μ 为湍流黏度,其中

$$\tau_{ij} = \rho \overline{u_i u_j} - \rho \bar{u}_i \bar{u}_j \quad (3)$$

该变量被定义为亚格子尺度应力(subgrid-scale stress,SGS),体现了小尺度涡的运动对所求解运动方程的影响.由于 SGS 是未知量,为了求解上述方程组,需要用相关物理量来构造 SGS 的数学表达式,即亚格子尺度模型.

1.2 气动声学方程

福茨威廉姆斯和霍金斯从莱特希尔方程推导出著名的福茨威廉姆斯-霍金斯(FW-H)方程

$$\left(\frac{1}{a_0^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} - \frac{\partial^2}{\partial x_i^2} \right) p' = \frac{\partial^2}{\partial x_i \partial x_j} [T_{ij} H(f)] - \frac{\partial}{\partial x_i} [n_i p \delta(f) \Delta f] + \frac{\partial}{\partial t} [\rho v_n \delta(f) \Delta f] \quad (4)$$

式中 p' 为声压, T 为 Lighthill 张量, n_i 为表面法向量, v_n 为法向速度.方程右边第 1 项表示流体运动引起的四极子声源,第 2 项表示表面作用在流体上的力引起的偶极子声源,第 3 项表示容积移动效应的单极子声源.

四极子声源强度与偶极子声源强度之比正比于马赫数的平方,而汽车的行驶属于低马赫数情况,因此在后视镜气动噪声研究中,可以忽略四极子声源,主要考虑偶极子声源.

2 建立模型及确定计算域

为准确模拟后视镜附近的流场,本文以某国产轿车真实后视镜为基本模型,使用 CATIA 软件在后视镜罩边缘处开槽,具体位置和尺寸如图 1 所示.其中,模型 1 在整个后视镜边缘开有凹槽,模型 2 仅在外侧边缘有凹槽,凹槽截面形状为直径为 4 mm 的半圆形.

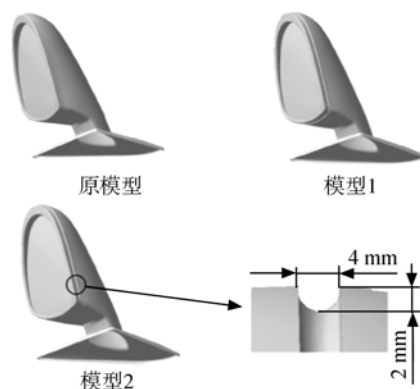


图 1 后视镜模型

Fig. 1 Rearview mirror models

后视镜被直接安装在长方体计算域内,计算域尺寸为 $10L \times 5L \times 5L$ (L 为后视镜长度),且距离入口为 $3L$,如图2所示。

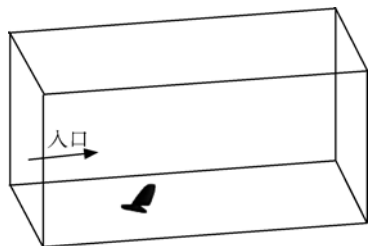


图2 计算域示意图

Fig. 2 Diagrammatic sketch of computational domain

3 划分网格及仿真计算

由于三角形网格具有良好的贴性^[9],后视镜表面和计算域边界上均采用三角形网格.为准确模拟凹槽处气流流动状态,在该区域采用细小网格,尺寸为 1 mm ,后视镜表面其余部位采用 2 mm 网格.划分体网格时,在支撑面和后视镜表面上拉伸出三棱柱单元,来模拟附面层效应,其中第1层网格厚度设为 0.1 mm ,在空间生成四面体单元^[10],计算域纵对称面上网格分布如图3所示.为保证仿真结果的准确性,3种模型的体网格总数均在230万左右。

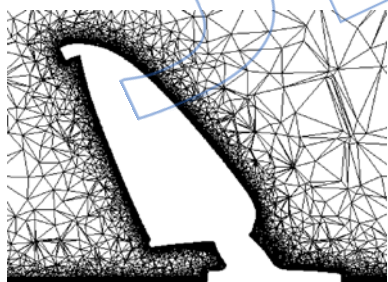


图3 计算域纵对称面上网格分布

Fig. 3 Grids distribution of longitudinal symmetric section in computational domain

采用声类比方法计算气动噪声,该方法将声音的产生和传播分开计算,与计算气动声学(CAA)方法相比,对计算格式和计算量的要求比较低.声类比方法在汽车远场气动噪声^[11]和发动机冷却风扇噪声^[12]等方面已经得到了应用.计算中采用 $k-\omega$ SST (shear stress transport) 模型,入口和出口分别设定为速度入口和压力出口,湍流强度为 0.5% .经过稳态计算得到流场的定常解

之后,以稳态计算结果为初始值,使用大涡模拟方法计算非定常流场.需要说明的是,计算时设定3种速度为 $80, 100, 120\text{ km/h}$,发现3种速度下流场的变化规律一致,因此下文中仅对 100 km/h 的情况进行讨论.在瞬态计算中,时间步长的设置很重要,不仅关系到库朗数(Courant number)和分析噪声的频域范围,而且对计算速度也有影响^[13].在实际计算中,先采用较大的时间步长 ($dt=1 \times 10^{-4}\text{ s}$),计算3000个时间步长后,将时间步长调整为 $dt=5 \times 10^{-5}\text{ s}$,继续计算1000个时间步长后采集测点数据,之后的3000个时间步长结果用于数据分析.监测点布置在后视镜支撑面上,监测点的编号及位置如图4所示。

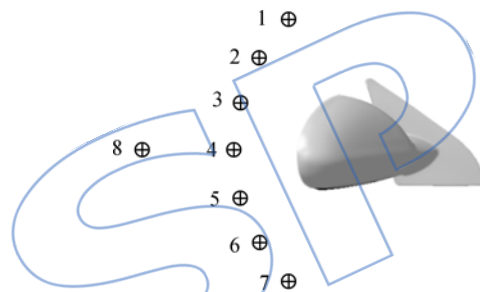


图4 监测点编号和位置示意图

Fig. 4 Diagrammatic sketch of number and location of monitoring points

4 仿真方法验证

测量后视镜气动噪声的实验在吉林大学风洞实验室进行,风洞实验布置如图5所示,将后视镜固定在圆盘上,再将圆盘固定在平板上,收集并分析监测点处信号.使用上述仿真方法计算后视镜气动噪声,对比仿真结果与实验结果,图6为某监测点仿真与实验结果对比图.可以看出,两条曲线趋势一致,且误差很小,说明该仿真方法是有效可行的。

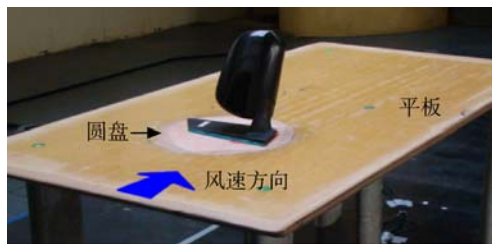


图5 风洞实验布置

Fig. 5 Arrangement of wind tunnel experiment

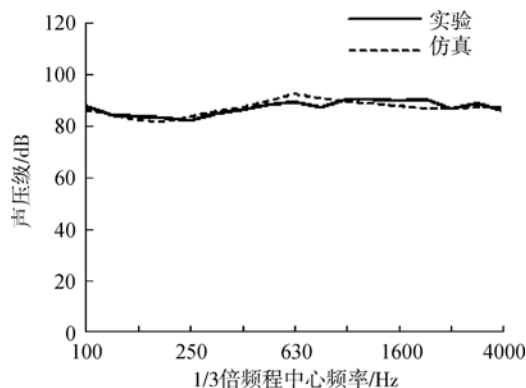


图 6 某监测点仿真与实验结果对比

Fig. 6 Comparison of experimental data and simulation result at a monitoring point

5 计算结果及分析

5.1 流场分析

对于后视镜-A 柱区域气动噪声,侧窗表面脉动压力是主要的噪声源,而后视镜后部的尾涡区则是产生脉动压力的根源^[14-15]. 经过稳态计算后,可以得到后视镜后部的流场,如图 7 所示作垂直于支撑面的截面,图 8、图 9 和图 10 分别是 3 个模型在该截面上的速度流线图.

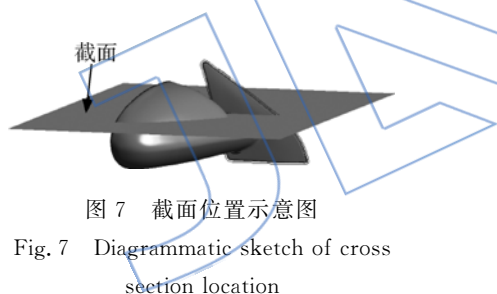


图 7 截面位置示意图

Fig. 7 Diagrammatic sketch of cross section location

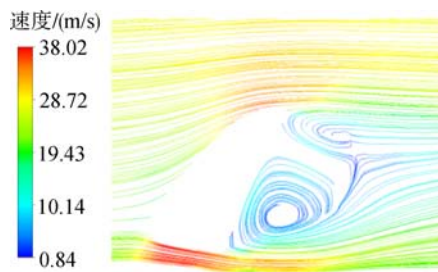


图 8 原模型截面上的流线图

Fig. 8 Streamlines map of cross section on origin model

分析比较以上 3 幅流线图,可以发现,3 款后视镜后方的流场形态各不相同.其中,原模型后部有上、下两个涡团,上部涡团较小;模型 1 后部只有一个涡团,位于正后方,涡团尺寸较大;模型 2

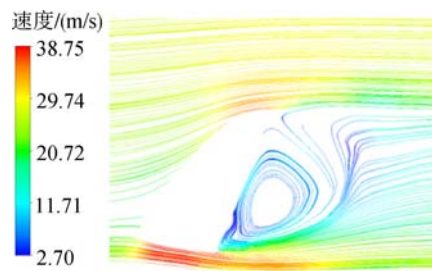


图 9 模型 1 截面上的流线图

Fig. 9 Streamlines map of cross section on model 1

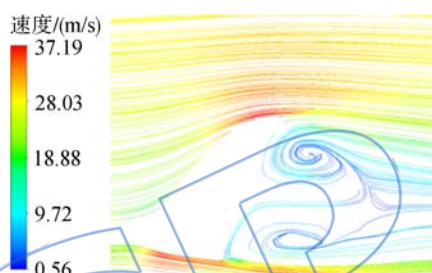


图 10 模型 2 截面上的流线图

Fig. 10 Streamlines map of cross section on model 2

后部流场涡团产生分离,形成两个明显的涡团,分布于上、下两侧. 3 款后视镜中,模型 2 产生的涡团距离支撑面最近,原模型其次,模型 1 最远. 3 种流线图有很大差异,原因是凹槽的存在影响了气流流经后视镜罩的速度流线方向. 从图中数据来看,对于流经后视镜支座附近的气流,模型 1 的速度最大,原模型其次,模型 2 速度最小,而且模型 2 中该区域流线更加平缓,与支撑面的夹角更小. 较大流速的气流具有更强的形成涡团的能力,因此模型 1 中涡团更加远离支撑面,而且向上发展破坏了上边涡团的形成. 综上所述,由于后视镜罩边缘结构的不同,影响了气流流经后视镜罩的速度和流线的角度,进而造成后视镜后部流场形态的差异.

为了更清楚地观察后视镜尾流在整个计算域中的位置,对计算结果进行后处理,得到 3 种模型同一截面上的湍流动能分布,如图 11 所示.

湍流动能是湍流强度的度量,湍流动能越大,表示该区域湍流程度越剧烈,压力脉动也越强烈. 图 11 中,模型 1 尾流区的湍流程度最弱,而且湍流区域距支撑面较远;原模型和模型 2 的尾流中均有强烈的湍流区域分布,而且模型 2 的湍流区域距离支撑面最近. 3 款后视镜尾流的湍流动能

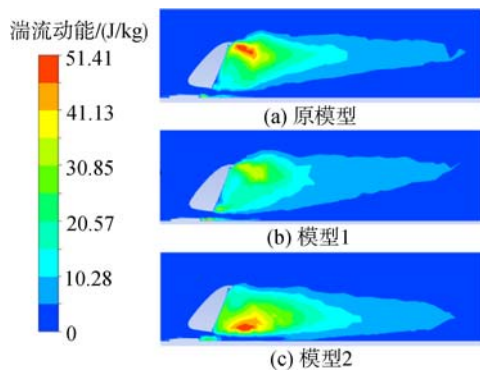


图11 湍流动能分布云图

Fig. 11 Distribution contours of turbulent kinetic energy

分布与速度流线图是相符合的。

5.2 气动噪声分析

在实际情况中,支撑面相当于车身表面,因此

有必要对支撑面上噪声源进行分析。在计算中引入宽频带噪声源模型(broadband noise source model),得到支撑面表面声功率级分布云图,如图12所示。

由图12可见,模型1所在支撑面上噪声辐射区域最小,相反,模型2所在支撑面上噪声辐射区域最大。由前文可知,3种后视镜模型不同的尾部流场形态影响了支撑面上压力脉动情况,从而导致表面声功率级的不同。

最后,将监测点处压力时域信号做快速傅里叶变换,并取1/3倍频程,得到各监测点在频域上的气动噪声声压级频谱。本文选取监测点1,4,8进行分析。由图4可知,点1,4,8与现实侧窗位置相对应,更具有分析价值。3个监测点的1/3倍频程中心频率处的声压级频谱如图13~图15所示。

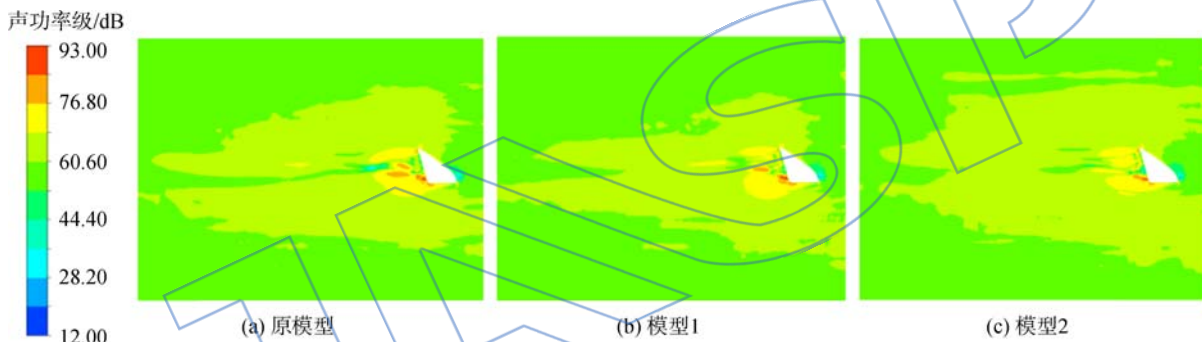


图12 支撑面表面声功率级分布云图

Fig. 12 Distribution contours of sound power level on bearing surface

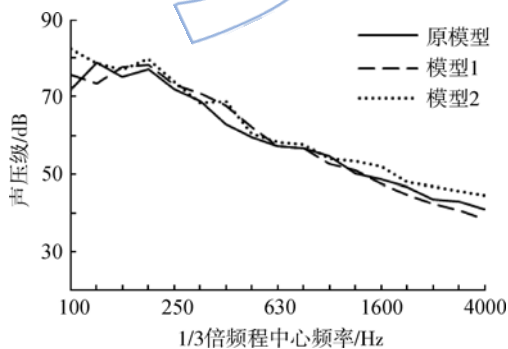


图13 监测点1声压级频谱

Fig. 13 Frequency spectrum of sound pressure level at monitoring point 1

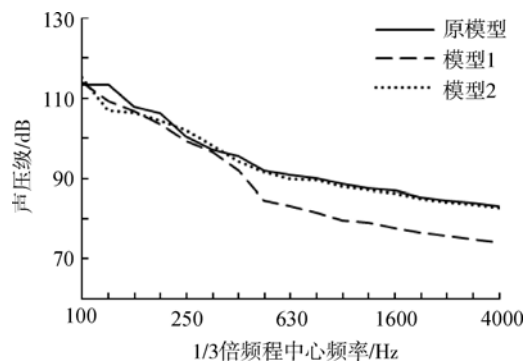


图14 监测点4声压级频谱

Fig. 14 Frequency spectrum of sound pressure level at monitoring point 4

整体来看,在低频范围内,3种模型在监测点处的声压级相差不大,而在中高频范围内有较大差异,这与后视镜产生的气动噪声主要是中高频噪声是相符的。模型1所做的结构改进能够有效

降低外部气动噪声,其中监测点4在高频范围内,1/3倍频程中心频率处声压级最大降幅接近10dB。相较于原模型,模型2所做的改型反而使声压级有所增加,不利于降低气动噪声。

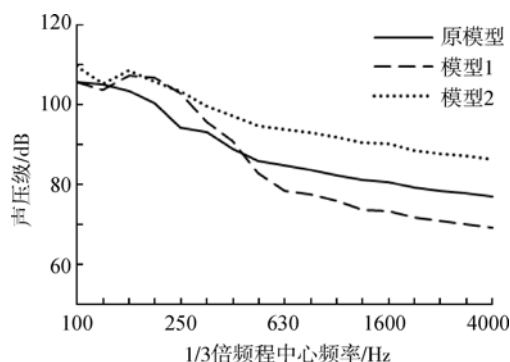


图15 监测点8声压级频谱

Fig. 15 Frequency spectrum of sound pressure level at monitoring point 8

6 结 论

1) 后视镜罩的造型与结构对车外气动噪声的产生有较大影响,后视镜罩边缘结构的局部改动会引起其后部流场的明显变化。

2) 流经后视镜罩的气流速度和流线方向对后视镜后部涡团的形状及位置有重要影响,较大流速的气流具有较强的形成涡团的能力。当后视镜尾流远离支撑面时,支撑面上各监测点噪声水平有所降低。

3) 计算结果表明,模型1所做的结构改进有利于流场和气动噪声的改善,其中监测点4在高频范围内,1/3倍频程中心频率处声压级最大降幅接近10 dB。

本文提出的后视镜罩边缘结构改进方案,对后视镜及侧窗区域气动噪声控制具有一定指导意义。在今后的研究工作中,还将继续对凹槽的位置、数量和尺寸等影响因素进一步优化,以期具有更好的实用性。

参考文献:

- [1] Ye L, Naohiko K, Hiroyuki T, et al. Evaluation of wind noise sources using experimental and computational methods[R]. SAE Technical Paper 2006-01-0343, 2006.
- [2] 王志亮,刘波,桑建兵,等.汽车风噪声产生机理研究[J].拖拉机与农用运输车,2008,35(6):35-40.
WANG Zhiliang, LIU Bo, SANG Jianbing, et al. Mechanism research of automobile wind noise generation[J]. Tractor and Farm Transporter, 2008, 35(6): 35-40. (in Chinese)
- [3] Chen K H, Johnson J, Dietschi U, et al. Automotive mirror wind noise simulations and wind tunnel measurements[C] // Proceedings of the 14th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference, Vancouver: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2008: 1-13.
- [4] 李启良,杨志刚,王毅刚.汽车后视镜气动噪声的影响参数[J].同济大学学报:自然科学版,2011,39(8):1204-1207.
LI Qiliang, YANG Zhigang, WANG Yigang. Influence parameters of aerodynamic noise for automotive rear view mirror[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2011, 39(8): 1204-1207. (in Chinese)
- [5] 任露泉,王再宙,韩志武.仿生非光滑表面滑动摩擦磨损试验研究[J].农业机械学报,2003,34(2):86-88.
REN Luquan, WANG Zaizhou, HAN Zhiwu. Experimental research on sliding wear of bionic nonsmoothed surface[J]. Journal of Agricultural Machinery, 2003, 34(2): 86-88. (in Chinese)
- [6] 田丽梅,任露泉,韩志武,等.仿生非光滑表面脱附与减阻技术在工程上的应用[J].农业机械学报,2005,36(3):138-142.
TIAN Limei, REN Luquan, HAN Zhiwu, et al. Applications of anti-adhesion and anti-resistance of biomimetic non-smooth surface in engineering[J]. Journal of Agricultural Machinery, 2005, 36(3): 138-142. (in Chinese)
- [7] 徐俊伟,吴亚锋,陈耿.气动噪声数值计算方法的比较与应用[J].噪声与振动控制,2012,32(4):6-10.
XU Junwei, WU Yafeng, CHEN Geng. Comparison and application on the aero-acoustics numerical computing methods[J]. Noise and Vibration Control, 2012, 32(4): 6-10. (in Chinese)
- [8] 王福军.计算流体动力学分析:CFD软件原理与应用[M].北京:清华大学出版社,2004.
- [9] GU Zhengqi, WANG Yiping, LI Weiping. Evaluation of aerodynamic noise generated in a miniature car using numerical simulation[R]. SAE Technical Paper 2009-01-0478, 2009.
- [10] 杨博,付立敏.轿车外流场网格生成策略及数值模拟[J].农业机械学报,2007,38(4):8-11.
YANG Bo, FU Limin. Mesh generation strategies of the external flow field around a sedan and the numerical simulation research[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery, 2007, 38(4): 8-11. (in Chinese)
- [11] Souliez F J, Long L N, Morri P J, et al. Landing gear aerodynamic noise prediction using unstructured grids[J]. International Journal of Aeroacoustics, 2002, 1(2): 115-135.
- [12] Jonghyun P. Aeroacoustics simulation of automotive front end module cooling fan[R]. Frankfurt, Germany: 2nd European Automotive CFD Conference, 2005.
- [13] 杨博.汽车外部空气动力噪声研究[D].长春:吉林大学,2008.
YANG Bo. Research on automobile exterior aerodynamic noise[D]. Changchun: Jilin University, 2008. (in Chinese)
- [14] Hoeld R, Brenneis A, Eberle A, et al. Numerical simulation of aeroacoustic sound generated by generic bodies placed on a plate: Part I prediction of aeroacoustic sources[R]. AIAA 99-1896, 1999.
- [15] 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)