

侧风作用下汽车外流场气动特性分析

张甫仁¹, 张金龙^{1,2}, 屈贤¹, 乐欢¹

1. 重庆交通大学机电与汽车工程学院, 重庆 400074
2. 重庆大学汽车工程学院, 重庆 400074

摘要 针对汽车行驶中受侧风的影响问题,通过数值模拟研究了侧风作用下汽车的气动特性。利用三维软件UG设定某实车模型参数,基于计算流体力学方法对实车模型进行数值模拟,研究侧风作用下车身外流场变化以及不同前车窗倾角对汽车气动特性的影响。结果表明,侧风中汽车外流场不对称,导致空气侧向力系数急剧增加达到0.927,空气阻力系数增加38.5%达到0.392,空气升力系数增加15.6%达到0.281;随着前车窗倾角的增大,车身底部气流在车尾的分离推迟,尾涡数量减少,车身表面正负压区域缩小,空气侧向力及空气升力系数变小,在前车窗倾角为35°时,汽车在侧风中的气动特性最优。

关键词 汽车;气动特性;车身外流场;前车窗倾角;侧风

中图分类号 U46

文献标志码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2015.15.012

Numerical study on the stability of different front window angle cars in crosswind

ZHANG Furen¹, ZHANG Jinlong^{1,2}, QU Xian¹, LE Huan¹

1. College of Mechanical and Automobile Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China
2. College of Automobile Engineering, Chongqing University, Chongqing 400074, China

Abstract The aerodynamic characteristics of cars driving in crosswind are studied by numerical simulation. A real car model is established and the front window angle is modified by the three-dimensional software of UG. Then numerical simulations for these models are taken using the computational fluid mechanics method. The characteristics of the body outflow field in crosswind are analyzed as well as the influences of different front window angles on the aerodynamic characteristics. As a result, the body outflow field becomes no longer symmetrical and this leads to aerodynamic side force coefficient up to 0.927, aerodynamic drag coefficient increased by 38.5% (up to 0.392) and aerodynamic lift coefficient increased by 15.6% (up to 0.281). Meanwhile, the airflow separation from the bottom at the rear is postponed and the number of vortexes is reduced since the front window angle becomes larger. The areas of positive and negative pressures are smaller. When the front window angle is 35°, there is the best aerodynamic characteristic in crosswind.

Keywords vehicle; aerodynamic characteristics; body flow field; front window angle; crosswind

随着现代车辆轻量化技术不断提升,汽车行驶中受各种侧风影响的空气动力学问题显得越来越突出^[1]。侧风已严重影响了高速行驶车辆的安全性,甚至导致严重交通事故^[2]。因此,研究侧风中车身外流场结构规律,对改善汽车的行驶

稳定性有重要意义。

针对车身外流场及汽车行驶稳定性的研究,国内外已取得较多成果。王夫亮^[3]研究了车速与侧风速度对汽车行驶稳定性的影响;杨啟梁等^[4]、谷正气等^[5]从侧风风压中心角度

收稿日期:2014-10-24;修回日期:2015-06-08

基金项目:国家自然科学基金项目(51305472)

作者简介:张甫仁,教授,研究方向为汽车空气动力学,电子信箱:Zh_feixue@163.com;张金龙(共同第一作者),硕士研究生,研究方向为汽车空气动力学,电子信箱:516685355@qq.com

引用格式:张甫仁,张金龙,屈贤,等.侧风作用下汽车外流场气动特性分析[J].科技导报,2015,33(15):76-81.

研究了汽车稳定性;傅立敏、杜子学等^[6,7]仿真分析了汽车外流场气流分离特点;Juhlin等^[8]对侧风条件下的客车参数进行了研究;Broodley等^[9]对低阻力车身的稳定性进行了研究。上述成果多从风压中心和质心角度研究侧风对汽车行驶稳定性的影响,还有一些研究通过对车轮的主动控制来改善侧风稳定性^[10-12],忽略了对侧风中汽车外流场的特点研究,也没有从车身的结构角度研究汽车外部气流的运动与分离,以及车身局部结构变化对汽车外部气流加速与气流分离的影响。

本研究利用三维软件UG设定某实车模型参数,运用计算流体力学(CFD)方法进行数值模拟,从汽车的气动造型出发,研究侧风作用下车身外部流场变化以及不同前车窗倾角对汽车气动特性的影响。

1 控制方程与湍流模型

1.1 控制方程

在流体力学中,流体可以被看做连续介质^[13]。在汽车的外流场中,可以认为空气是不可压缩的,且在模拟时不考虑车身外流场空气的温度变化。因此,可不考虑能量守恒定律,即汽车外流场空气的流动需要满足连续性方程及动量方程,即

$$\partial u_i / \partial x_i = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial \rho u_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \mu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_i \partial x_j} + \rho f_i \quad (2)$$

式中, $i=1,2,3;j=1,2,3;u_i,u_j$ 为流体微团的分速度; ρ 为空气密度; t 为时间; x_i,x_j 为流体微团的空间位置; μ 为空气动力黏度; f_i 为体积力系数。

1.2 湍流模型

求解控制流体的连续性方程与动量方程时,需要建立湍流模型,对方程组进行封闭。模拟采用的湍流模型为SST $k-\omega$ 模型^[14]。SST $k-\omega$ 模型集合了 $k-\omega$ 模型在近壁面区域计算精度高、稳定性好的优点,发挥了 $k-\varepsilon$ 模型在远离边界层的自由剪切层中与自由流值无关的优点,考虑了分子黏性与脉动的双重影响。SST $k-\omega$ 模型的控制方程为

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i k)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - Y_k \quad (3)$$

$$\frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i \omega)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\omega} \right) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + G_\omega - Y_\omega \quad (4)$$

式中, k 为湍动能; μ_t 为湍动黏度; ω 为湍动能耗散率; G_k,G_ω 与 Y_k,Y_ω 分别为湍动能 k 及湍动能耗散率 ω 的产生项和耗散项。

2 模型建立与网格划分

2.1 车身模型建立

仿照某款轿车外形,运用UG软件,建立了汽车车身模型。考虑到计算机性能与所研究问题性质,对模型做了简化:忽略车身外部突起物,如雨刷器、后视镜、门把手、车大灯、行李架等;将原本凸凹不平的车身底部设计成平滑的底部。简化后的车身二维模型和三维模型如图1所示。

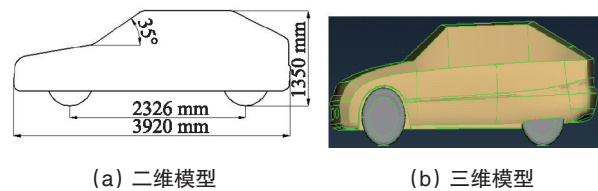


图1 简化车身模型

Fig. 1 Model of simplified body

2.2 网格划分

为减小计算量,缩短计算周期,在不影响分析流场特性的前提下尽量缩小计算域。无侧风时,车身两边对称,取半车身模型建立计算域,车前3倍车长,车后5倍车长,车上3倍车高,车身左侧3倍车宽;有侧风时,需考虑侧风造成的不对称,采用整体模型,在半车身计算域基础上,设置计算域右侧5.5倍车宽^[15]。考虑到实际车轮承载后会变形,将地面抬高15 mm。近车身区域网格需细致以真实模拟流场特性,计算机外围网格尺寸适当加大以减少网格数量,因此,将近车身区域网格尺寸设置为30~50 mm,计算外围网格尺寸设置为300~500 mm。无侧风时,半车模型的网格总数约为80万,车身的计算域网格如图2所示。

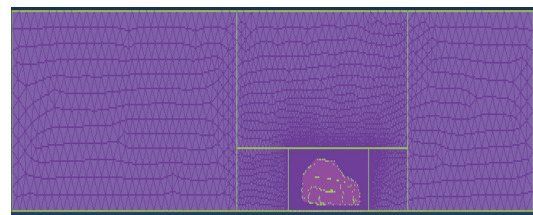


图2 无侧风时的车身计算域网格

Fig. 2 Computational domain and grids of body without crosswind

3 车身外流场数值模拟

3.1 边界条件及初始条件设定

无侧风时,设置汽车前方计算域边界为气流的速度入口,汽车后方计算域边界为气流压力出口^[16],半车身对称面计算域边界为对称面;为消除计算机模拟中的地面附面层影响,设置车身底部计算域为移动壁面边界,速度与风速相同^[17]。无侧风时计算模型的初始条件设置如表1所示。

表1 无侧风时的计算模型初始条件设置

Table 1 Initial settings with and without crosswind

初始条件	条件设定
速度入口	20 m/s
压力出口	零梯度出口边界
计算域顶面及侧面	滑移壁面
计算域底面	移动壁面, 20 m/s
半车身对称面边界	对称面
其他表面	非滑移壁面
松弛因子	0.7(速度), 0.1(压力)

有侧风作用时,在无侧风边界条件及初始条件设置的基础上,设定汽车左侧计算域边界为侧风速度入口,侧风速度为8 m/s,车身右侧计算域边界为零梯度侧风压力出口。

3.2 数值模拟结果与分析

空气动力系数是评价汽车气动特性的一个重要评价指标,理论上,它只与汽车外形形状有关,与形状大小及来流速度无关,其公式为

$$C = \frac{F_x}{(1/2)\rho v_x^2 S} \quad (5)$$

式中, F_x 为汽车所受的空气阻力,计算中软件将车身表面的压强值对车身表面积分求得; ρ 为空气密度; v_x 理论上为无穷远处风速,仿真时为侧风速与前方来流的合速度; S 为正投影面积,在软件中设置正投影方向后,软件将自动计算正投影面积。

将车速设为20 m/s进行模拟,有无侧风作用下汽车的空气动力系数如表2所示。无侧风时,由于车身外流场的对称性,汽车没有受到空气侧向力。有侧风时,空气侧向力急剧增加,空气侧向力系数 C_y 达到0.927;空气阻力系数 C_d 由0.283增加至0.392,增加了38.5%;空气升力系数 C_l 从0.243增加至0.281,增加了15.6%。因此,高速下侧风对汽车的气动特性影响是多方面的,对汽车行驶稳定性具有严重影响。

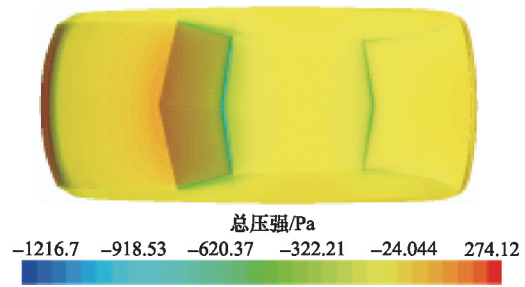
表2 有无侧风时的空气动力系数

Table 2 Aerodynamic coefficients with and without crosswind

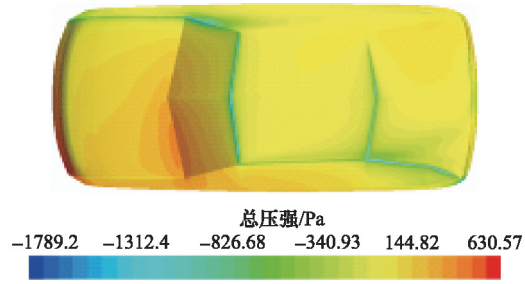
有无侧风	空气阻力系数	空气升力系数	空气侧向力系数
无侧风	0.283	0.243	0
有侧风	0.392	0.281	0.927

无侧风和侧风条件下的车身压力分布对比如图3所示。有侧风时,发动机盖与前车窗之间的正压中心向侧风入口方向偏移,且压力值变大,在该侧A柱上原负压区消失,而另一侧A柱位置的负压区则明显增大。在车身后部,车后缘处的负压带增大,且在侧风入口侧C柱上出现明显负压中心,另一侧C柱上则出现了正压区。从图3可以看出,在侧风作用下,会在车身上形成一个较大的横摆力矩,影响汽车的行驶稳定性。

无侧风时,车身对称面的气流速度矢量如图4所示。来流在车身栅格处受到阻挡,流出急剧下降,气流一部分沿发动机盖向上运动,一部分向下运动,从车底流向车尾。流向车身上部的气流,在流经发动机盖时,速度增加,经过发动机盖后部与前车窗交界处,流速减小,随后又沿着前车窗加速,在前车窗与车顶交界处,流速达到最高,并发生气流分流,当气流流到车顶与后窗交界处去,由于突然失去车身的约束,气流再次分离,与来自车底的分离流在车尾汇合,并形成了尾涡。



(a) 无侧风



(b) 有侧风

图3 有无侧风时的车身压力对比

Fig. 3 Pressure distribution charts of body in crosswind or not

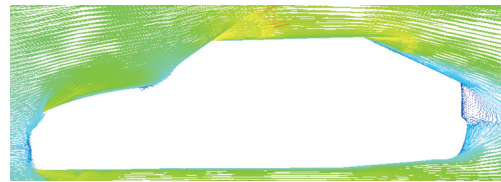


图4 无侧风时的车身对称面气流速度

Fig. 4 Vector diagram of symmetry plane without crosswind

有侧风时,车身顶部横截面气流速度矢量如图5所示。侧风破坏了无侧风时车身外流场的对称性,在迎风侧面近车身处气流速度较大,而在背风侧面则形成2个完整的涡流,一个在车窗位置,另一个在侧门位置,在车窗上部涡流呈逆时针,在侧门下部涡流呈顺时针。此外,在车底部轮胎的背风内侧形成小涡流。

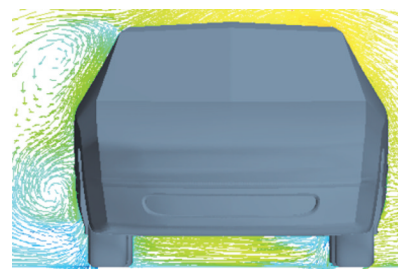
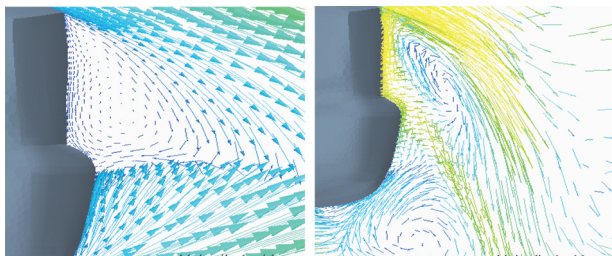


图5 有侧风时的车顶横截面气流速度

Fig. 5 Vector diagram of roof cross section with crosswind

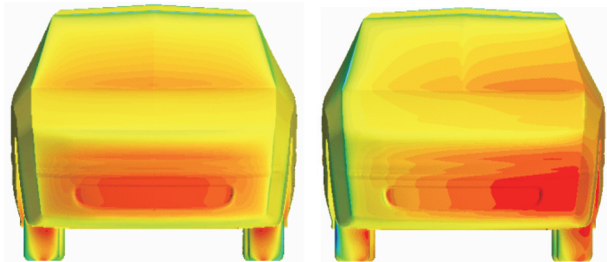
无侧风与有侧风时气流在车身尾部分离形成尾涡,尾涡速度矢量如图6所示。有侧风时车尾流场更为紊乱,顶部的分离气流速度相对大些,底部的分离气流发生位置相对提前,在车身底盘后缘处形成了1个很大的尾涡。由于侧风的存在,流经车身上下的两股气流相遇时存在很大不稳定性,尾涡的强度也更大些,带走更多能量。



(a) 无侧风 (b) 有侧风

图6 有无侧风时的车身尾涡速度矢量
Fig. 6 Vector diagrams of trailing vortex

无侧风与有侧风时的车身头部压力如图7所示。侧风破坏了原车身表面压力的对称分布特点,使得车身表面的正压中心位置向侧风迎风侧发生偏移,并在侧风背风侧形成了明显的负压中心,同时正负压数值增大,导致车身产生巨大的横摆力矩。



(a) 无侧风 (b) 有侧风

图7 有无侧风时的车身头部压力
Fig. 7 Pressure distribution charts of the head

4 前车窗倾角对气动特性的影响

为进一步考虑侧风中前车窗倾角对汽车气动特性的影响,根据制造生产及使用实际情况,把前车窗倾角的变化设定为20°、25°、30°、35°、40°,分别计算相应的汽车模型空气动力系数,结果如表3所示。

从表3可以看出,当前车窗倾角从20°到40°变化时,汽车的空气阻力系数变化不大,在0.4左右;随前车窗倾角变大,空气升力系数有一个波动的变化过程,最小空气升力系数为0.281,相对于最大空气升力系数0.294,减小了4.4%。空气侧向力系数经过一个增大—减小—再增大的过程,在前车窗倾

角为35°时,得到最小空气侧向力系数0.927,相对于最大的空气侧向力系数0.983,减小了5.7%。

表3 不同前车窗倾角时的空气动力系数
Table 3 Aerodynamic coefficients of bodies with different front window angles

前车窗倾角/(°)	空气阻力系数	空气升力系数	空气侧向力系数
20	0.401	0.294	0.953
25	0.400	0.286	0.983
30	0.403	0.290	0.961
35	0.392	0.281	0.927
40	0.405	0.288	0.956

为研究侧风中前车窗倾角对汽车气动特性的影响规律,分别对不同前车窗倾角时雨刮器截面及车身尾部的气流状态进行模拟分析。

侧风中不同前车窗倾角时雨刮器截面处气流速度矢量如图8所示。车身上半部分的气流在车身迎风侧受阻,在迎风侧上缘形成了1个低速中心,并随着前车窗倾角的增大,低速中心的区域变大;在背风侧,上部流经发动机盖的气流与下部流经底部的气流汇合,在翼子板和车轮处形成了2个涡流。

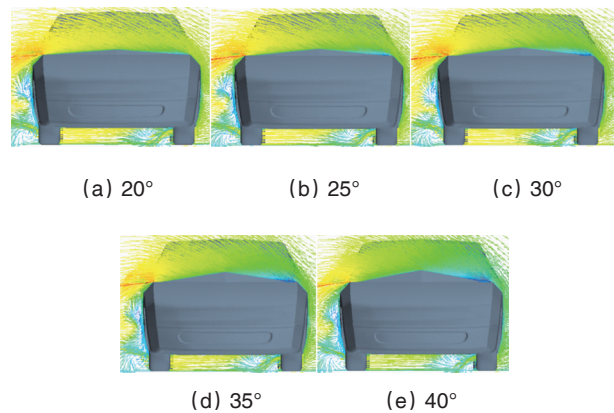


图8 侧风中不同前车窗倾角时雨刮器截面处气流速度
Fig. 8 Vector diagrams of wiper cross sections of different models in crosswind

侧风中不同前车窗倾角时车身尾部气流速度矢量如图9所示。在前车窗倾角为20°、25°、30°时,车尾尾部有4个涡流,1个涡流在车牌处,另外3个涡流在车尾底部,这是因为在车尾处气流流动突然失去车身的约束,沿着车身后盖方向吹来的分离气流向下压,遇到尾部上扬的分离气流而形成。位于车尾底部的3个涡流由不稳定逐渐趋于稳定,这是由于随前车窗倾角的增大,车身底部的气流分离推迟所致。当前车

窗倾角增大至35°、40°时,车身底部气流分离进一步推迟,车尾底部的涡流减少为1个稳定的涡流。

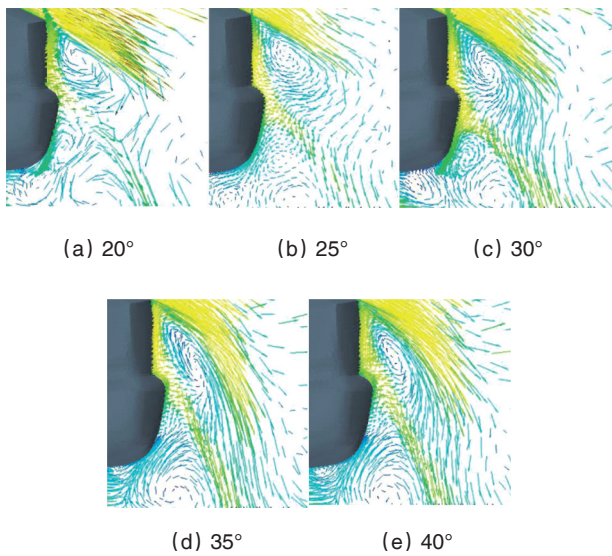


图9 侧风下不同前车窗倾角时车身尾涡速度

Fig. 9 Vector diagrams of trailing vortices of different bodies in crosswind

侧风中前车窗倾角分别为20°、25°、30°、35°、40°时,车身顶部和底部的压力状态如图10所示。在侧风入口侧前车窗与发动机盖交接处的正压中心区域随着前车窗倾角的增大而减小,位于右A柱和左C柱的负压带随着前车窗倾角的增加而减小,但最小负压经过一个增大—减小—再增大的过程,在前车窗倾角为20°时有最小压强约693.6 Pa,在前车窗倾角为35°时有次小压强约705.2 Pa,由于负压中心区域大小的影响,在前车窗倾角为35°时具有更好的空气侧向力系数。从底部看,车身底部的正压中心随着前车窗倾角的增大而减小,在侧风入口侧车轮处具有最大压强,当前车窗为35°时,车轮处有最小压差。从车身上下正负压强弱和正负压力中心区域大小的对比,可以得出随前车窗倾角的增大,车身上下的压差存在一个先减小后增大的趋势,在前车窗倾角为35°时,会出现最小空气升力。

综上所述,前车窗倾角为35°时,在8 m/s的侧风中行驶,具有更好的行驶稳定性。为进一步提升汽车的空气动力特性,针对侧风中前车窗倾角为35°时的车身剪切应力进行模拟分析,结果如图11所示。

图11中,蓝绿色表示剪切应力较小,红黄色表示剪切应力较大,即气流发生分离。当侧风从车身左侧吹向右侧时,气流在右侧A柱、前翼子板、左侧C柱、车顶分界及轮胎边缘处的剪切应力大,形成气流分离,降低了汽车的气动性能。通过对这些局部区域优化,减小汽车行驶阻力,可以提高汽车的行驶稳定性。

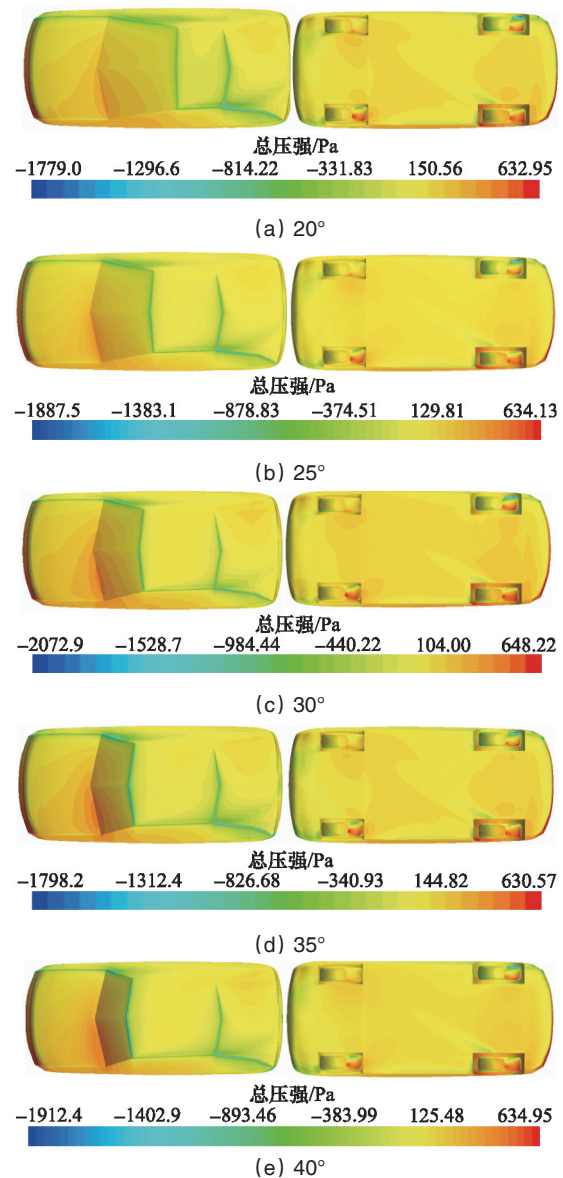


图10 侧风中不同前车窗倾角时车身压力

Fig. 10 Pressure distribution charts of bodies with different front window angles in crosswind

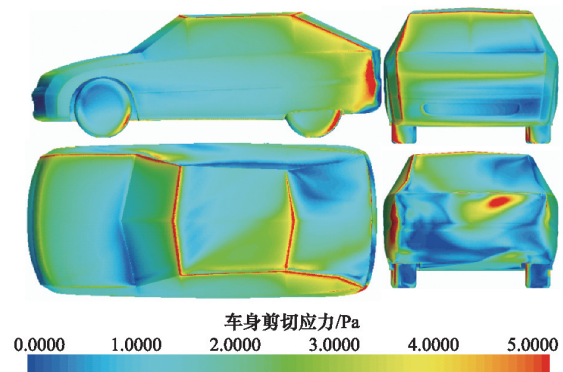


图11 侧风下前车窗倾角35°时的车身剪切应力

Fig. 11 Shear stresses of body with 35° front window in crosswind

5 结论

1) 在侧风条件下,汽车外流场变得不对称,造成气流在车身尾部的分离位置前移,气流的尾涡强度增加,气流扰动增强,表面负压中心偏移,汽车的空气侧向力系数、空气阻力系数及空气升力系数急剧增大,表明侧风对汽车的空气动力特性有严重影响。

2) 侧风中,前车窗倾角的变化对汽车的空气阻力系数影响不大,对汽车的空气侧向力系数与空气升力系数有一定影响,在前车窗倾角为 35° 时有最小值,汽车行驶的稳定性最好。

3) 随着前车窗倾角的增加,在车身尾部,由于底部气流分离的推迟,汽车的尾涡个数减少。在车身顶部和底部的负压中心区域逐渐减小,其中最大正压相差不大,而最大负压先增大后减小,在前车窗倾角为 35° 时达到最优值。

4) 侧风中,车身右侧A柱、左侧C柱以及车顶与前后窗的交界处是气流分离最大的地方,为进一步优化汽车的空气动力特性指明了研究方向。

参考文献(References)

- [1] 余志生. 汽车理论[M]. 北京: 清华大学出版社, 2011.
Yu Zhisheng. Automobile theory[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2011.
- [2] 孙露. 侧风作用下跑车的某跑车高速气动稳定性研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2011.
Sun Lu. Research on automotive aerodynamic characteristics and stability in crosswinds[D]. Changsha: Hunan University, 2011.
- [3] 王夫亮. 侧风作用下的汽车气动特性研究[D]. 长春: 吉林大学, 2008.
Wang Fuliang. Research on automotive aerodynamic characteristics in crosswind[D]. Changchun: Jilin University, 2008.
- [4] 杨啟梁, 钟东阶. 侧风对高速汽车行驶稳定性影响的仿真分析[J]. 汽车科技, 2005(4): 18-20.
Yang Qiliang, Zhong Dongjie. Simulation and analysis on effect of side wind on stabilization of vehicle with high speed[J]. Automotive Technology, 2005(4): 18-20.
- [5] 谷正气, 赵荣远, 杨易, 等. 汽车气动造型在侧风稳定性中的应用研究[J]. 湖南大学学报: 自然科学版, 2008, 35(9): 44-46.
Gu Zhengqi, Zhao Rongyuan, Yang Yi, et al. Research on impact of vehicle aerodynamic models on cross-wind stability[J]. Journal of Hunan University: Natural Sciences Edition, 2008, 35(9): 44-46.
- [6] 傅立敏, 王靖宇. 汽车三维分离流动特性的数值研究[J]. 汽车工程, 2000, 22(6): 361-364.
Fu Limin, Wang Jingyu. Numerical study of separated flow around after-body of road vehicle[J]. Automobile Engineering, 2000, 22(6): 361-364.
- [7] 杜子学. 微型面包车气动特性研究及气动造型优化设计方法探讨[D]. 成都: 西南交通大学, 2001.
Du Zixue. Research on mini-van aerodynamic characteristics and aerodynamic shape optimization design method[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2001.
- [8] Juhlin M, Eriksson P. A vehicle parameter study on crosswind sensitivity of buses[J]. SAE, 2004(10): 20-26.
- [9] Broadley I, Garry K. Improving the aerodynamic stability of a practical,

low drag, aero-stable vehicle[J]. SAE, 2000(4): 35-40.

- [10] 谷正气, 周宇奎, 海贵春, 等. 主动四轮转向系统对高速汽车侧风稳定性的控制研究[J]. 湖南大学学报: 自然科学版, 2006, 33(1): 51-54.
Gu Zhenqi, Zhou Yukui, Hai Guichun, et al. Control research on high-speed vehicle stability under side wind using active 4WS[J]. Journal of Hunan University: Natural Sciences Edition, 2006, 33(1): 51-54.
- [11] 张辉. 基于主动四轮转向系统的高速汽车侧风稳定性控制研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2014.
Zhang Hui. The research on stability control of high speed vehicle under crosswind based on active 4WS system[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014.
- [12] 张喆. 侧风作用下重型载货汽车气动特性与稳定性的联合研究[D]. 长春: 吉林大学, 2012.
Zhang Zhe. Joint research on heavy-duty truck aerodynamic characteristics and stability under crosswind effects[D]. Changchun: Jilin University, 2012.
- [13] 王福军. 计算流体动力学分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.
Wang Fujun. Computational fluid dynamics analysis[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004.
- [14] 乐欢. 前风窗角度对轿车空气动力学性能影响的研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2014.
Le Huan. Perspective on car windscreens research on the impact of aerodynamics[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2014.
- [15] 李明, 李明高. STAR-CCM+与流场计算[M]. 北京: 机械工业出版社, 2011.
Li Ming, Li Minggao. STAR-CCM+ and flow field calculation[M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 2011.
- [16] 柳叶. 侧风作用下发动机舱和底部细节的轿车气动特性模拟[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2013.
Liu Ye. The simulation on aerodynamic characteristics of a car with the under-hood and bottom details considered[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2013.
- [17] 杜子学, 张杰. 基于不同外形参数模型的汽车外流场仿真[J]. 重庆交通大学学报: 自然科学版, 2011, 30(4): 848-851.
Du Zixue, Zhang Jie. Simulation for external flow field around automobiles based on models of different parametric shape[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University: Natural Science, 2011, 30(4): 848-851.

(责任编辑 韩晓明)

《科技导报》“综述文章”栏目征稿

“综述文章”栏目发表对当前自然科学有关学科领域的研究热点、前沿分支发展现状及动向的评述性文章。要求在所属学科领域从事比较深入研究的一线科研人员在研读相当数量文献资料的基础上,全面、深入、系统地论述该领域的问题,并对所综述的内容进行归纳、分析、评价,以反映作者的观点和见解。在线投稿:www.kjdb.org。