

DOI:10.13364/j.issn.1672-6510.20220260

不同边界层对会车流场变化特性的影响

唐洪涛¹, 陈红林¹, 周能辉²

(1. 天津科技大学机械工程学院, 天津 300222; 2. 天津易鼎丰动力科技有限公司, 天津 300385)

摘要: 应用动网格技术和用户自定义函数(UDF)对不同边界层影响下的会车过程进行数值模拟,并通过统计不同入口气流速度比例系数时流场分布和气动力数据,分析会车时流场的变化规律.结果表明:在会车过程中,入口气流速度增大,两车气动力变化幅度增大;逆风车辆侧向力的增长幅度受车速变化的影响更明显.随着两车相对位置的变化,流场的变化使车辆受到的气动力不断变化,且会车前后的波动较大,导致车身发生波动,影响车辆行驶的稳定性和安全性.高速会车时车身抖动会更加剧烈,行驶稳定性大幅降低,且两车间距较小易引发交通事故.在实际会车过程中,驾驶员应注意降低车速和控制两车间距,以确保安全会车.

关键词: 边界层; 动网格; 会车; 气动力

中图分类号: U467.1

文献标志码: A

文章编号: 1672-6510(2023)03-0037-08

Influence of Different Boundary Layers on Variation Characteristics of Vehicle Crossing Flow Field

TANG Hongtao¹, CHEN Honglin¹, ZHOU Nenghui²

(1. College of Mechanical Engineering, Tianjin University of Science & Technology, Tianjin 300222, China;

2. Tianjin EV Powertrain Technology Co., Ltd., Tianjin 300385, China)

Abstract: In our study dynamic mesh technology and user-defined function (UDF) were used to simulate the crossing vehicle process affected by different boundary layers. The flow field distribution and aerodynamic data at different ratio coefficient of inlet airflow velocity were analyzed. The results showed that during the crossing process, the inlet airflow velocity increased, the magnitude of change in the aerodynamic forces of the vehicles increased. As the vehicle speed increased, the increase of lateral force of upwind vehicle was more obviously affected by the change of vehicle speed. With the change of the relative position of the vehicles, the change of flow field made the aerodynamic force of the vehicle constantly change and fluctuated greatly before and after the crossing, thus causing the body to swing and affecting the driving stability and safety of the vehicle. The body swaying will be more severe at high speed, driving stability will be greatly reduced, and the distance between vehicles will be small, which is likely to cause traffic accidents. Therefore, in the actual crossing process, the driver should pay attention to reducing the speed and controlling the distance between vehicles to ensure safe meeting.

Key words: boundary layer; dynamic mesh; crossing vehicles; aerodynamic force

汽车在道路行驶过程中经常遇到会车的情况,特别是在低等级的双向公路上,会车过程经常发生.在会车过程中,两辆车之间会相互干扰,使气动力发生变化^[1].汽车空气动力学特性与汽车性能有着密切相关性,对汽车安全行驶有极其重要的影响.降低汽车对侧风的敏感性,如何提高行驶稳定性是现今汽车

设计与开发的重要内容之一.此外,汽车轻量化的趋势在降低汽车油耗的同时也增大了汽车的侧风敏感性^[2].普遍存在的自然风与汽车复杂行驶工况的叠加耦合会严重影响汽车外流场的变化,导致车辆气动力的变化更加复杂.

国外有学者对汽车超车过程的空气动力特性(简

收稿日期: 2022-11-17; 修回日期: 2023-03-29

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51778416); 天津科技大学大学生创新创业训练计划项目(202210057084)

作者简介: 唐洪涛(1968—),男,黑龙江海林人,副教授, tanghongtao@tust.edu.cn

称气动特性)进行研究^[3],并提出超车过程汽车气动系数有类似正弦曲线的变化趋势.同时,提出会车过程也可能有与超车过程类似的气动力变化趋势,但并没有进行研究. Corin 等^[4]对超车过程进行稳态和瞬态数值模拟,研究结果表明瞬态流动特征对模拟结果影响很大,稳态模拟方法不能准确获取瞬态超车过程车辆气动特性的变化规律. Uystepuyst 等^[5]对超车过程中车辆的瞬态气动特性进行了大量数值模拟,并将模拟结果与现有实验数据进行对比,发现相对速度和横向间距的增加会使气动力系数显著减小,两车之间的相互干扰也会减弱.徐国英等^[6]对会车过程进行了数值模拟,结果表明侧向力和横摆力矩的变化趋势基本一致,且侧向力和横摆力矩的变化对汽车安全行驶影响很大.王靖宇等^[7]在研究会车过程中瞬态气动力变化对车辆操纵稳定性的影响时发现,瞬态气动力的变化会导致车辆产生侧向滑移角和横摆角速度,进而对车辆的操纵稳定性产生一定的影响.范鹏飞^[8]对不同工况和外界环境下厢式货车和客车的会车过程进行了研究,发现会车速度、侧风速度和侧风角度的增加都会加剧两车外流场的相互干扰作用,进而影响车辆行驶的稳定性.唐洪涛等^[9-10]对超车过程中多车辆的气动特性进行研究,结果表明:相对车速、两车间距和车型尺寸的变化会使车身所受侧向力呈现不稳定变化,影响车辆行驶的稳定性和安全性.

以往的研究主要集中在单一因素对会车过程的影响,汽车在实际行驶过程中难免会受到周围环境的影响.空气的流动受到边界层的影响,呈不均匀分布.车辆在高速行驶时,气流速度的变化也会使车辆的气动特性发生明显改变.在上述研究的基础上,本文对不同气流速度下会车过程的流场变化进行统计学分析,选取会车过程的不同位置作为研究对象,结合压力云图、速度矢量图和气动力变化曲线,重点分析会车过程中气动力变化和流场变化,从中得出相应结论,为驾驶员在会车时如何进行适当操作提供参考.

1 基本控制方程

本文选用汽车的最大行驶速度约为 30 m/s,马赫数约为 0.088,小于 0.4,可认为该风速范围内的流体为不可压缩流体^[11],所以流体密度(ρ)为常数,适用的连续性方程为

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

式中: u 、 v 、 w 分别为速度在 x 、 y 、 z 方向上的分量.

动量守恒方程

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] \quad (2)$$

式中: u_i 、 u_j 为速度分量, x_i 、 x_j 为坐标轴分量, p 为流体微元体上的压力, μ 为湍流黏性系数.

利用气动力系数描述汽车的气动力特性.式(3)为阻力系数计算公式^[1].

$$C_D = \frac{2D}{\rho v_\infty^2 A} \quad (3)$$

式中: C_D 为阻力系数, D 为车身纵向气动阻力(x 轴方向), v_∞ 为气流相对速度, A 为车身正投影面积.

2 数值模拟

2.1 模型选取和计算域设定

模型选用某款汽车,该车外形基本尺寸为:长 4 710 mm,宽 1 825 mm,高 1 665 mm.考虑到所研究问题的性质,对原车模型表面进行简化,忽略车身表面突起物,如后视镜、门把手等.车身长用 L 表示,宽用 W 表示,高用 H 表示.两车初始位置相距 $20L$,计算域尺寸设计为:长 $30L$,宽 $20W$,高 $5H$.计算域如图 1 所示.

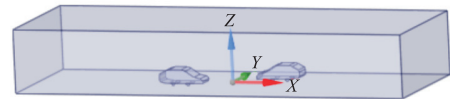


图 1 计算域

Fig. 1 Computational area of the model

2.2 网格划分

网格模型如图 2 所示.模型采用四面体非结构性网格,车身网格尺寸最大设为 0.1 m,计算域网格尺寸最大设为 0.5 m.车身附近区域的网格较为密集,远离车身区域的网格较为稀疏.

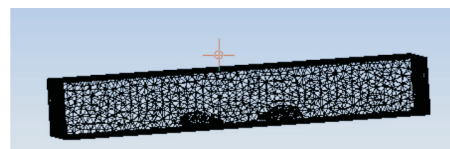


图 2 网格模型

Fig. 2 Mesh model

2.3 边界条件和初始条件设定

计算域左侧为速度入口,右侧为压力出口,车身为壁面.计算采用 Relizable k-epsilon 湍流模型,压力

为标准大气压. 动网格参数选用网格光顺 (Smoothing) 和网格重划分 (Remeshing), 弹性因子 (Spring Constant Factor) 设为 0.05.

速度入口的气流速度变化通过用户自定义函数 (UDF) 程序实现. 考虑到入口气流受到两侧边界的影响, 靠近边界的气流速度小, 中心位置速度大, 其截面速度变化曲线近似为抛物线. 本文以此规律变化的气流为研究对象, 其数学模型表达式为

$$v(x) = k(1 - x^2/r^2) + b \quad (4)$$

式中: $v(x)$ 为入口气流速度; k 为入口气流速度比例系数; b 为最小入口气流速度, 本文取值为 0.1 m/s; x 为入口截面不同位置坐标; r 为速度入口截面长度.

在计算域范围内, 入口气流方向垂直于计算域左侧速度入口截面.

2.4 会车方案设计

两车处于车道中央会车时, 两车间的横向间距约为 1.5 ~ 2.0 m, 两车起始位置相距 20L.

方案设计两车以相同速度相向行驶, 会车时入口气流速度变化规律如式 (4) 所示, 模拟时 k 取值为 0、

6、10、13; 当 k 为 0 时, 入口气流速度为恒定值 0.1 m/s. 会车方案见表 1.

表 1 会车方案

Tab. 1 Scheme of crossing vehicles

方案	车速/(m·s ⁻¹)	车间距/m
1	20	1.5
2	25	1.5
3	30	1.5

3 模拟结果分析

在会车过程中, 两车头之间的纵向距离记为 X , 车身长为 L , 用 X/L 表示两车的相对位置. 分析会车过程中两车外流场和气动力随两车相对位置 X/L 的变化. 侧向力方向沿 y 轴正方向为正向, 反之则为负向. 为便于后文的分析, 以两车相互靠近的一侧为车身内侧, 另一侧为外侧.

3.1 压力分布

以方案 2 为例, k 取值为 10, 两车在不同位置的压力云图如图 3 所示.

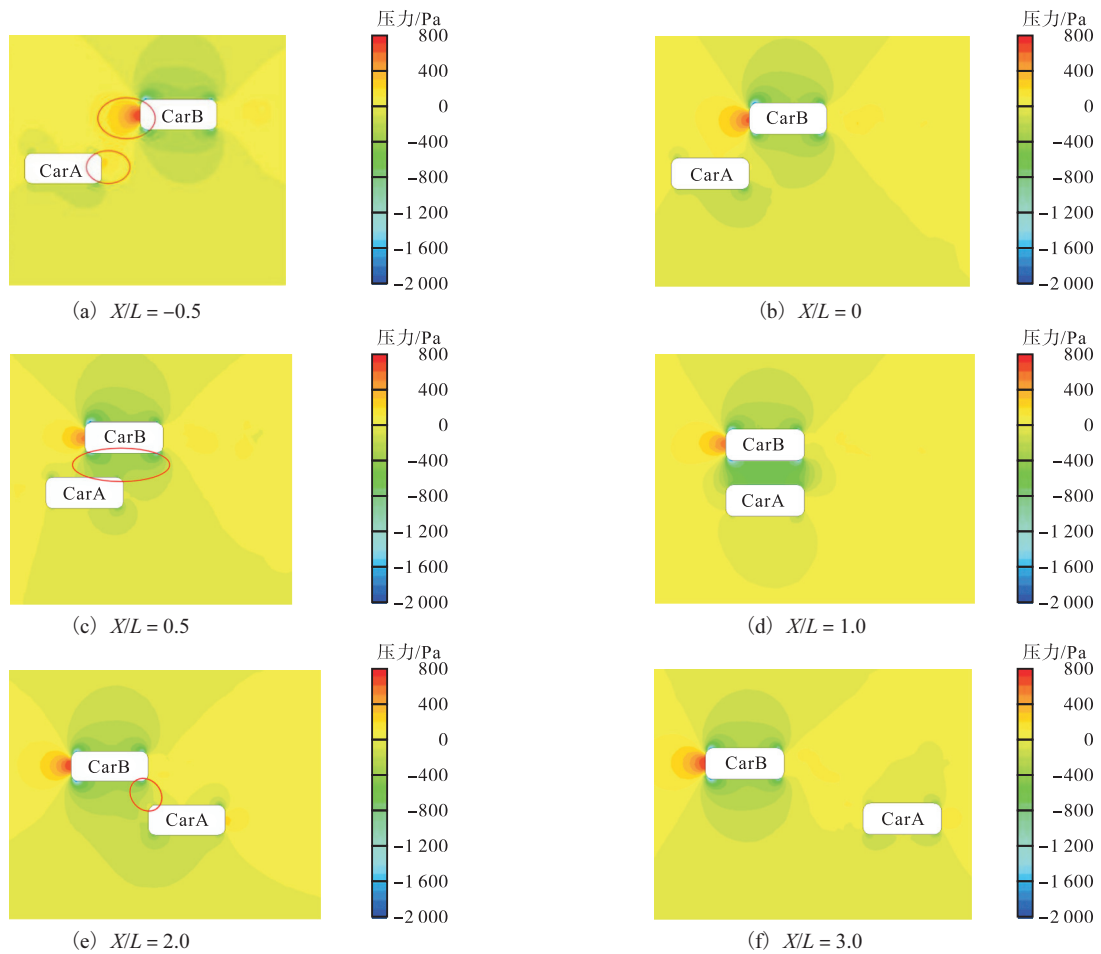


图 3 不同位置的压力云图

Fig. 3 Pressure contours of different positions

图 4 和图 5 分别是会车过程阻力、侧向力变化图. 结合图 3、图 4 和图 5 可知: 在会车过程中, 车身后侧压强比内侧压强小; 顺风车辆 CarB 车头压强明显高于顺风车辆 CarA, 车身受气流的影响更明显, 加之两车之间负压区的影响, 车辆行驶的稳定性和阻力降低.

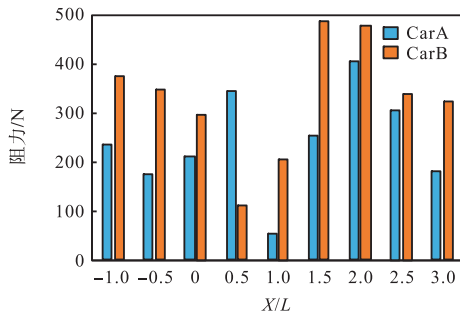


图 4 会车过程阻力变化图

Fig. 4 Drag force variation diagram during the crossing

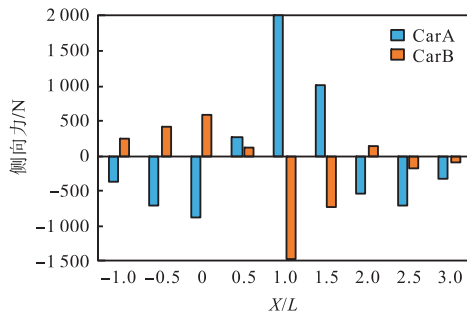


图 5 会车过程侧向力变化图

Fig. 5 Side force variation diagram during the crossing

两车开始相会前〔图 3(a)〕, 车头部正压区开始交汇, 互相产生干扰. 顺风车 CarA 车身后侧压强明显高于外侧, CarA 车头有远离 CarB 的趋势(垂直于车辆行驶方向). 顺风车 CarB 车头处高压区面积明显比 CarA 大, 受入口气流的阻碍作用明显, 车身后所受阻力大; 车身两侧均为负压区, 压差较小, 但压强分布明显不对称.

两车车头恰好齐平时〔图 3(b)〕, 受 CarB 车头正压区和侧面负压区的影响, CarA 车头正压区和侧面负压区面积明显减小, 此时 CarA 负向侧向力达到最大, 加剧 CarA 车头远离 CarB 的趋势(垂直于车辆行驶方向), 两车相互排斥. CarB 车头前方气流受 CarA 背风侧负压区的影响, 气流压强降低, 使得 CarB 车头与车尾的压强差减小, 车身后受到的阻力^[12]减小.

随着两车重叠面积的增加〔图 3(c)〕, 两车内侧气流的相互干扰增强, 压强迅速降低. CarA 左侧正压区变为负压区, 与右侧的负压区压差减小, 车

受到的负向侧向力减小, 远离 CarB 的趋势减弱, 相互排斥作用减弱.

当两车处于并列状态时〔图 3(d)〕, 两车内侧区域面积减小, 气流速度急速增大, 车内侧区域形成较大面积的负压区, 且外侧压强均高于内侧, 侧向力方向发生改变, 两车有相互吸引的趋势.

在车身刚好错开时〔图 3(e)〕, 两车逐渐进入对方的尾流区, 两车之间压强迅速增大但仍处于负压区域, 与外侧的压强差减小, 车身后受到的侧向力迅速减小, 相互吸引作用减小. 受到对方尾流的影响, 车身两侧压力分布不均衡, 车辆行驶的稳定性和阻力受到影响.

两车纵向距离增大时〔图 3(f)〕, 尾流的相互影响减弱, 车身两侧压强差减小, 车身后受到的侧向力减小, 逐渐趋于会车前的状态.

3.2 速度矢量分布

汽车在运动的过程中带动周围气流运动, 流场发生改变分布不均衡, 使车身后受力变化. 不同位置的速度矢量图如图 6 所示.

在会车前〔图 6(a)〕, 两车流场相互独立, 车身后两侧速度矢量分布均衡, 车辆行驶稳定. CarA 两侧近壁面回流与入口气流发生冲击, 速度降低; CarB 两侧近壁面回流与入口气流相互融合, 速度增加, 因此 CarA 两侧气流速度比 CarB 的低, 低速气流对车身的影晌作用小, 且此时 CarB 尾部出现一对尾涡.

两车恰好相遇时〔图 6(b)〕, CarB 车头前部气流与入口气流、CarA 内侧气流发生相互冲击作用, 速度矢量分布紊乱, 速度降低, 矢量分布密度增大. CarB 车头右侧出现局部高速矢量, 与左侧速度矢量分布不一致, 车头有远离 CarA 的趋势, 车辆行驶的稳定性和阻力降低. CarA 车身右侧气流速度高于左侧, 车身后两侧速度分布不平衡, 给车辆行驶的稳定性和阻力带来不利影晌.

如图 6(c)所示, CarA 与 CarB 车身后处于重叠状态时, 两车内侧气流相互干扰, CarA 内侧前车身气流速度明显增大, 后车身仍是低速矢量区; CarB 车头处气流与入口气流的冲击影晌范围减小. CarA 两侧速度矢量差异减小, 车身后受到的侧向力减小; 同时, CarB 车头右侧高速矢量区域面积减小, 车头远离 CarA 的趋势减弱.

两车处于并列行驶状态时〔图 6(d)〕, 两车内侧区域面积减小, 气流矢量密度增加, 速度增大, 且比外侧气流速度大, 两车有相互吸引的趋势. 车身后两侧速度分布不平衡, 车身后所受侧向力增大, 车辆行驶

的稳定性降低. 车前方部分气流汇入对方的尾流中, 尾流速度矢量分布变紊乱, 速度加快. CarB 尾涡的尺寸变大, 速度矢量密度降低, 且尾涡发生侧摆, 消耗周围流场能量, 车辆行驶的稳定性和受影响.

两车车身相互错开时〔图 6(e)〕, 相互影响作用减弱, CarA 内侧车身前部区域气流速度明显减小, 车身后部仍处于高速矢量区; 车身后部区域气流速度与外侧气流速度差异较大, 车尾有向内侧滑移的趋势. 该时刻 CarB 外侧车尾处出现局部高速矢量, 车身两侧速度矢量分布不平衡, 车辆行驶的稳定性和

影响, 且两车仍有一半车身处于重叠状态, 应注意调整两车横向间距, 以确保安全会车.

两车刚好完全错开时〔图 6(f)〕, 车身内侧交汇气流开始分离, 但尾流仍受到对方内侧气流的干扰, 向外侧偏移. 车身两侧速度矢量分布变得均匀, 速度梯度明显降低, 使得车身所受侧向力逐渐减小, 两车相互吸引作用减弱. CarB 尾涡向车后方运动, 速度降低, 尾涡的偏移程度增加, 尾涡的变化消耗流场中的能量, 车辆行驶的稳定性和

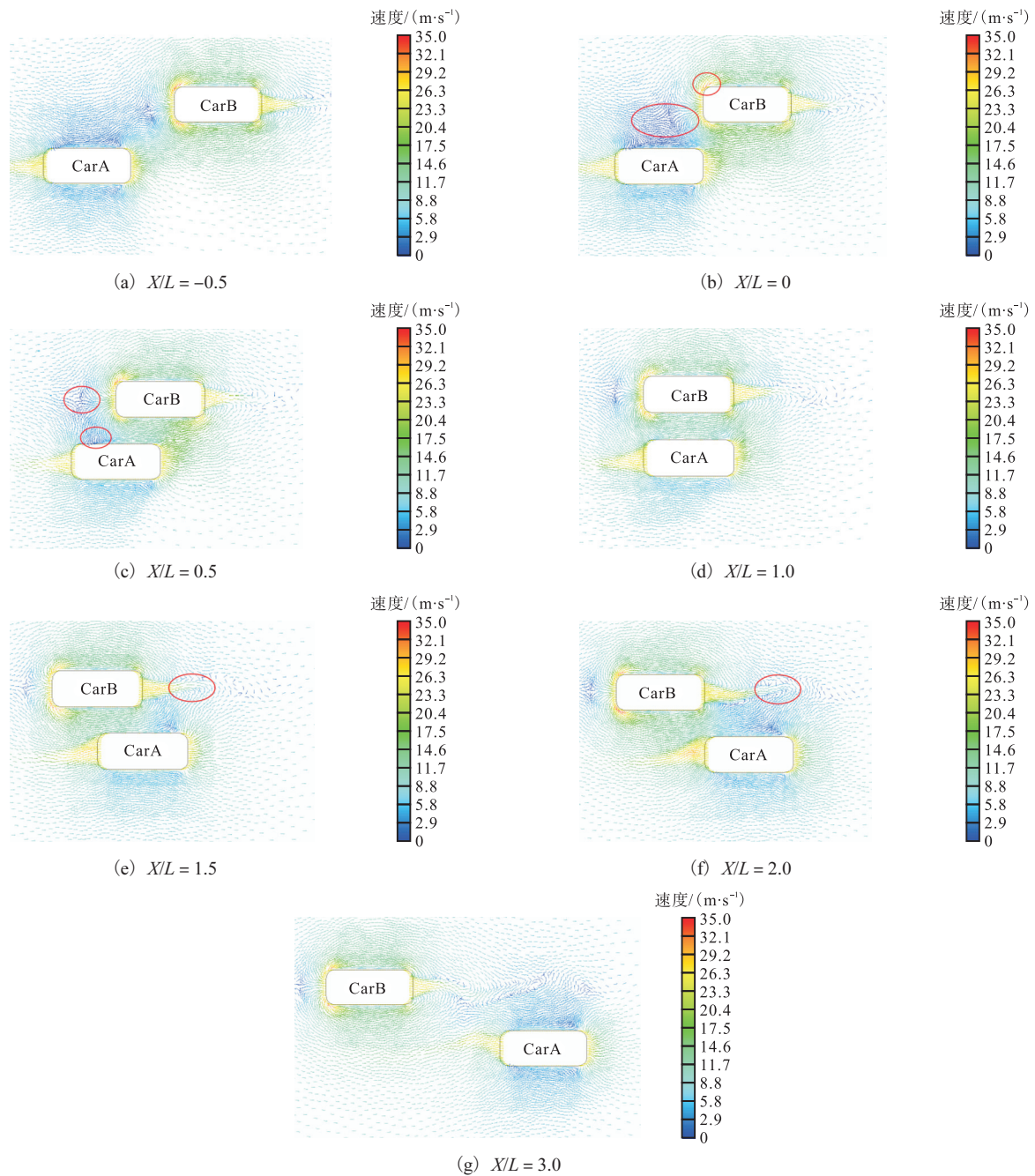


图 6 不同位置的速度矢量图

Fig. 6 Velocity vectors of different positions

对比图 6(a)和图 6(g)可知,会车前和会车后流场分布明显不同:会车后,两车受到的侧向力逐渐减小,车辆之间的相互影响也逐渐减弱,气动特性逐渐趋于会车前的状态. 但会车后汽车尾涡的作用会持续很长一段距离,CarB 尾涡发生脱落,逐渐向后方运动,且尾涡尺寸变大,车辆行驶的稳定性会受到影响,此时也应注意行车安全.

3.3 侧向力分析

在会车过程中,由于两车的相互干扰,汽车所受侧向力随两车相对位置的变化而变化. 当侧向力很大且变化幅度较大时,车辆的行驶方向会发生偏移,严重时可能会引发交通事故.

3.3.1 不同 k 值时侧向力分析

计算域入口气流速度 $v(x)$ 的大小取决于 k 的取值. 在两车速度均为 25 m/s 的情况下,不同 k 值时会车过程两车侧向力变化曲线如图 7 所示.

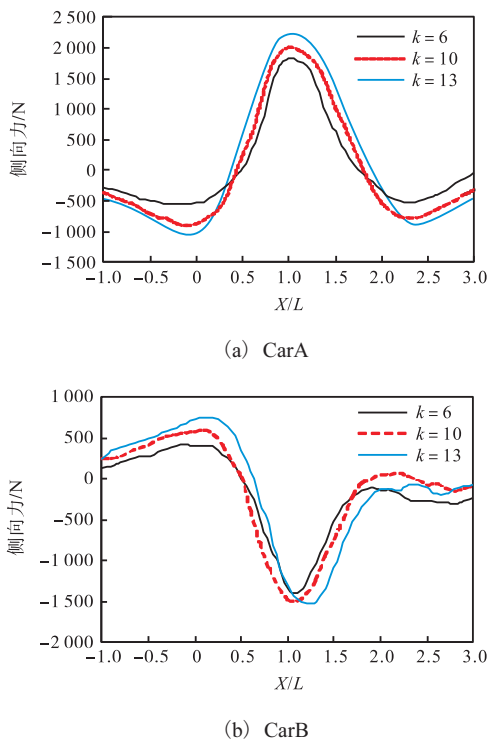


图 7 不同 k 值时侧向力变化曲线
Fig. 7 Curve of side force with different k values

由图 7 知:由于受到入口气流的影响,当两车相距较远时,车辆受到的侧向力也不为零;侧向力变化曲线类似正弦曲线, k 取值越大,侧向力变化的幅度越大.

在 $X/L = 0$ 至 $X/L = 1.0$ 的过程中,侧向力方向发生转变,且 CarA 侧向力的变化幅度比 CarB 大. 两车相遇时 ($X/L = 0$),侧向力达到第一个峰值;该位置两

车前部气流相互冲击,侧向力方向均指向车身外侧,两车相互排斥. 随着车身重叠面积的增加,相互干扰作用增大,侧向力逐渐减小. 当两车处于并列状态时 ($X/L = 1.0$),侧向力达到最大值,方向指向车身内侧,两车相互吸引;侧向力急剧增大,车身受力不平衡,发生横摆,且此时两车横向间距较小,易发生碰撞. 在 $X/L = 2.0$ 以后,侧向力逐渐减小且趋于平稳,两车的相互干扰减弱,逐渐趋于会车前的状态.

由图 7 比较分析可知:与 $k = 6$ 时相比,当 $k = 10$ 时,CarA 的最大侧向力增大 9.86%,CarB 的增大 6.65%;当 $k = 13$ 时,CarA 的最大侧向力增大 20.3%,CarB 的增大 8.95%. 以上数据表明入口气流速度变化对顺风车辆的影响大于逆风车辆,车身波动现象更为明显,对平稳驾驶有不利影响.

3.3.2 不同车速时侧向力分析

在 k 取值为 10 时,不同车速时两车侧向力变化曲线如图 8 所示. 由图 8 可知:车速变化时,CarA 和 CarB 所受侧向力的变化规律与不同 k 值时的相似. 随着车速的增大,侧向力变化幅度增大,侧向力极值增大;相对于 20 m/s 时极值点的横坐标,速度增大后极值点均提前出现. 与车速为 20 m/s 相比,在车速为 25 m/s 时,CarA 的最大侧向力增大 22.4%,CarB 的增大 64.4%;在车速为 30 m/s 时,CarA 的最大侧向力增大 41.1%,CarB 的增大 114.1%.

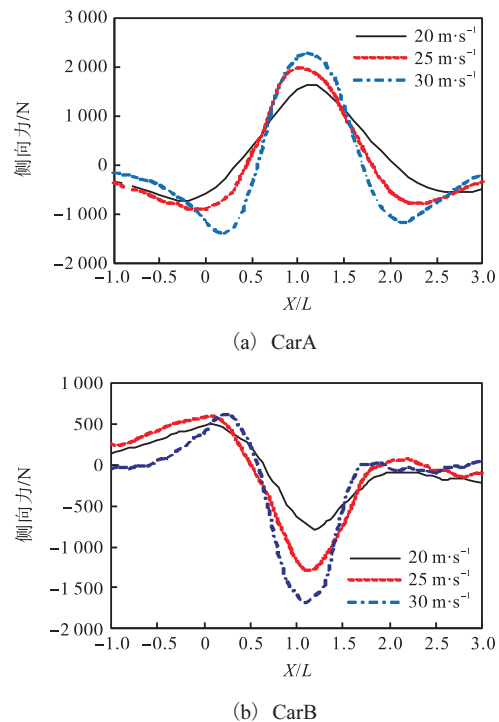


图 8 不同车速时侧向力变化曲线
Fig. 8 Curve of side force at different speeds

当车速为 20 m/s 时,逆风车辆 CarB 负向侧向力最大值为 784.99 N,车速为 25 m/s 时负向侧向力最大值为 1 290.76 N,车速为 30 m/s 时负向侧向力最大值为 1 681.29 N,分别增大约 0.64 倍和 1.14 倍. 以上数据表明会车时车速的变化对逆风车辆的影响大,高速会车过程中,车身波动更加剧烈,行驶的安全性大幅降低,且两车间距较小时易发生碰撞,对公共安全造成一定影响,因此驾驶员在行驶过程中应注意控制车速,以确保安全会车.

3.4 阻力系数分析

在相同会车速度下(25 m/s)、不同 k 值时,逆风车辆 CarB 阻力系数变化曲线如图 9 所示. 由图 9 可知:随着 k 值的增大,入口气流速度增大,车辆的阻力系数增大,但其变化趋势相同,都呈现先下降后上升最后趋于稳定的趋势. 在会车过程中(从 $X/L = 0$ 到 $X/L = 1.0$),车身重叠面积逐渐增大,气流相互干扰作用增强,曲线波动幅度增大;在 $X/L = 0.5$ 处, C_D 取得最小值. 在整个会车过程中,逆风车辆 CarB 阻力系数最大值出现的位置发生变化, k 值越大,该位置出现得越早. 当 $k = 6$ 时,在 $X/L = 1.5$ 附近, C_D 达到最大值,而当 $k = 13$ 时,该位置提前到 $X/L = 1.0$ 处. 这说明入口气流速度的变化直接影响了会车过程中两车周围流场的变化,从而使车辆受力发生了明显变化,而且入口气流速度越大,这种影响越明显. 会车完成后,两车相互干扰减小,阻力系数迅速减小逐渐趋于稳定,但仍受到对方尾流的影响,阻力系数比会车前的值略小.

与 $k = 6$ 时相比,当 $k = 10$ 时, C_D 最大值为 0.47,增幅为 31.4%;当 $k = 13$ 时, C_D 最大值为 0.56,增幅为 56.1%. 这说明车前方气流速度对气动阻力系数的影响较大,入口气流速度越大,阻力系数变化越大.

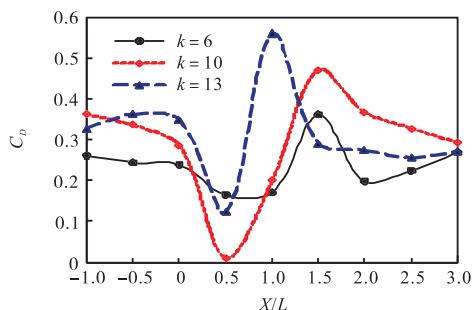


图 9 不同 k 值时 CarB 阻力系数变化曲线

Fig. 9 Curve of CarB drag coefficient at different k values

由图 7—图 9 可知:在不同车速和不同 k 值工况下,侧向力有相似的变化趋势. 随着车速和 k 值的不断增大,两车侧向力变化幅度不断增大,这将使车辆

行驶的安全性被破坏,对公共交通安全产生隐患.

4 结 论

应用动网格技术和用户自定义函数对不同边界层影响下的会车过程进行数值模拟,并通过统计不同入口气流速度比例系数(k)时流场分布和气动力数据,分析会车时流场的变化规律,主要结论如下:

(1) 受边界层的影响,气流速度分布不一致,会车过程中,两车流场分布和气动力变化不再具有对称性. 入口气流速度越大(k 取值越大),侧向力和阻力系数变化曲线振荡幅度越大,车身抖动越剧烈,车辆行驶的稳定性和安全性受到影响.

(2) 在会车过程中,压力场和速度场随两车相对位置的变化而不断变化,从而使侧向力和阻力不断发生变化,且侧向力和阻力在会车前后波动比较大,对平稳驾驶有不利影响.

(3) 在会车过程中,随着两车相对位置的改变,在 $X/L = 1.0$ 附近侧向力达到最大值,此时两车间距较小,车身横摆,容易引起交通事故,驾驶员应注意控制两车横向间距,确保安全会车.

(4) 会车时车速的变化对逆风车辆的影响比顺风车辆的影响大,侧向力和阻力系数变化曲线振荡幅度大,且在会车前后有不同程度的波动.

(5) 在等间距会车过程中,汽车高速行驶时车身摆动更加剧烈,车辆行驶的稳定性和安全性大幅度降低.

参考文献:

- [1] 傅立敏. 汽车空气动力学[M]. 北京:机械工业出版社,2006.
- [2] 谷正气,姜乐华,吴军,等. 汽车绕流的数值分析及计算机模拟[J]. 空气动力学学报,2000,18(2):188-193.
- [3] GILLIERON P, NOGER C. Contribution to the analysis of transient aerodynamic effects acting on vehicles[J]. SAE Transactions, 2004, 113: 893-900.
- [4] CORIN R J, HE L, DOMINY R G. A CFD investigation into the transient aerodynamic forces on overtaking road vehicle models[J]. Journal of wind engineering and industrial aerodynamics, 2008, 96(8/9): 1390-1411.
- [5] UYSTPRUYST D, KRAJNOVIĆ S. Numerical simulation of the transient aerodynamic phenomena induced by passing manoeuvres[J]. Journal of wind engineering and industrial aerodynamics, 2013, 114: 62-71.

- [6] 徐国英, 卢军, 薛劲鲁. 基于 CFD 的汽车迎面会车过程气动干扰特性仿真研究[J]. 测试技术学报, 2010, 24(6): 502-506.
- [7] 王靖宇, 惠政, 于旭涛, 等. 会车瞬态气动特性对操纵稳定性的影响[J]. 重庆理工大学学报(自然科学版), 2016, 30(11): 7-11.
- [8] 范鹏飞. 厢式货车与客车会车过程的气动特性研究[D]. 济南: 山东大学, 2018.
- [9] 唐洪涛, 陈广厚, 苗秀奇, 等. 基于 CFD 的超车过程车辆气动特性研究[J]. 天津科技大学学报, 2019, 34(3): 68-75.
- [10] 唐洪涛, 杨峻程, 张祥, 等. 基于 CFD 的双道超车过程气动特性分析[J]. 汽车工程学报, 2022, 12(3): 254-266.
- [11] 张英朝. 汽车空气动力学数值模拟技术[M]. 北京: 北京大学出版社, 2011.
- [12] 谷正气, 杨滨徽, 龚旭, 等. 会车瞬态气动特性分析与研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2010, 37(6): 27-31.

责任编辑: 周建军

(上接第 28 页)

- [41] CLARKE A, FRASER K P P. Why does metabolism scale with temperature?[J]. Functional ecology, 2004, 18(2): 243-251.
- [42] EVJEMO J O, COUTTEAU P, OLSEN Y, et al. The stability of docosahexaenoic acid in two *Artemia* species following enrichment and subsequent starvation[J]. Aquaculture, 1997, 155(1/2/3/4): 135-148.
- [43] ESTEVEZ A, MCEVOY L A, BELL J G, et al. Effects of temperature and starvation time on the pattern and rate of loss of essential fatty acids in *Artemia* nauplii previously enriched using arachidonic acid and eicosapentaenoic acid-rich emulsions[J]. Aquaculture, 1998, 165(3/4): 295-311.
- [44] ZUO R T, AI Q H, MAI K S, et al. Effects of dietary n-3 highly unsaturated fatty acids on growth, nonspecific immunity, expression of some immune related genes and disease resistance of large yellow croaker (*Larimichthys crocea*) following natural infestation of parasites (*Cryptocaryon irritans*) [J]. Fish & shellfish immunology, 2012, 32(2): 249-258.
- [45] JIN M, LU Y, YUAN Y, et al. Regulation of growth, antioxidant capacity, fatty acid profiles, hematological characteristics and expression of lipid related genes by different dietary n-3 highly unsaturated fatty acids in juvenile black seabream (*Acanthopagrus schlegelii*) [J]. Aquaculture, 2017, 471: 55-65.
- [46] 刘晓翠, 邓洪刚, 于学权, 等. 不同产地卤虫幼体对云龙石斑鱼幼苗生长和抗胁迫能力的影响[J]. 天津科技大学学报, 2022, 37(2): 18-23.

责任编辑: 周建军