

# 弯道会车的瞬态气动特性

王靖宇, 王保玉, 顾庆童, 胡兴军

(吉林大学 汽车仿真与控制国家重点实验室, 吉林 长春 130022)

**摘要:** 应用计算流体力学方法, 采用重叠网格的策略, 对两个简化 SAE 模型的弯道会车进行了数值模拟研究, 获得了两车气动六分力的变化规律. 在极短的会车过程中, 侧向力、侧倾力矩和横摆力矩都发生了方向的变化, 迅速达到各自的正负极值, 处在内侧弯道车辆 1 的侧向力、侧倾力矩和横摆力矩的值略大于外侧弯道车辆 2. 升力和纵倾力矩也发生了数值和方向的改变, 这些都会对车辆的行驶稳定性带来一定的影响, 为进一步研究弯道会车的瞬态气动特性提供了理论参考.

**关键词:** 弯道会车; 车辆工程; 瞬态气动特性; 重叠网格; 数值模拟

中图分类号: U461

文献标志码: A

## Vehicle Transient Aerodynamic Characteristics on Curve Crossing

WANG Jingyu, WANG Baoyu, GU Qingtong, HU Xingjun

(State Key Laboratory of Automotive Simulation and Control, Jilin University, Changchun 130022, China)

**Abstract:** The method of Computational Fluid Dynamics was applied to numerically simulation. Based on overlapping grid, the transient aerodynamic characteristics of the flow field around two vehicles were studied when simplified model were crossing each other in a curve. The change rules of six aerodynamic components were achieved. In the process of short meeting, side force and rolling moment as well as the yawing moment changed direction, quickly reached their positive and negative value. The side force, rolling moment and yawing moment of CAR 1 inside curve were slightly larger than those of CAR 2 outside curve. The lift force and pitching moment were changed on value and direction. All of these would bring some influence on vehicle driving stability. This study provided theoretical reference for the further study of curve crossing.

**Key words:** curve crossing; vehicle engineering; transient aerodynamic characteristics; overlapping grid; numerical simulation

汽车在道路上行驶, 经常出现超车、会车的情况, 因此有必要对行驶在道路上各种车辆之间的空气动力学问题进行研究, 进而研究在这种情况下的汽车操纵稳定性问题, 减少由于车辆间相互气动干扰对汽车安全产生的威胁<sup>[1-2]</sup>. 前期研究发现, 弯道行驶状态下的汽车安全性问题更为突出. 汽车在转弯行驶时, 周围的流场与直线行驶时有很大的差异, 转弯车辆会受到侧向力及横摆力矩的影响<sup>[3-4]</sup>, 因此, 采用传统的直线行驶状态下试验或模拟方法获得的气动载荷不能直接应用于弯道行驶状态下汽车的系统动力学计算和仿真, 否则会影响计算结果的准确性.

目前, 国内外汽车空气动力学研究主要集中在直线行驶工况下的气动特性研究, 对弯道行驶的研究主要集中在系统动力学、人机工程、交通安全及弯道会车的雷达设计和智能控制系统等方面<sup>[5-7]</sup>, 研究重点并不是车辆的空气动力特性. 本文采用重叠网格的方法, 对弯道会车的瞬态气动特性进行了数值模拟研究, 获得了气动六分力的变化规律, 为进一步的弯道会车研究提供了理论基础.

## 1 瞬态数值模拟

### 1.1 重叠网格方法

由于本文是研究运动物体的气动特性, 所以数值模拟中要采用动网格的方法. 目前的动网格方法中, 弹簧网格法对于处理位移不大的直线运动比较适用, 而层铺滑移网格方法适用于大位移的直线运

收稿日期: 2014-06-25

基金项目: 国家自然科学基金项目(11102070)

第一作者: 王靖宇(1976—), 男, 副教授, 博士. 研究方向为汽车空气动力学. Email: wangjy@jlu.edu.cn

通讯作者: 胡兴军(1976—), 男, 教授, 博士生导师. 研究方向为车身工程. Email: hxj@jlu.edu.cn

动;旋转滑移网格方法虽然可以解决一些旋转运动问题,但要求运动区域与静止区域的网格计算域外形为圆柱域,而且交界面边界要相对规则.这种要求不利于解决超车或会车等复杂工况的数值模拟,所以本文采用重叠网格方法来解决动网格的问题.

重叠网格是对任意相对位置,彼此重叠的计算域中的网格进行数值离散化处理的一种网格处理方法,广泛应用于运动物体以及优化计算的研究.通常不需要对初始生成的网格进行修改,这给标准化网格技术的应用带来了极大的方便.任何重叠网格都由包含整个计算域的主域和包含运动物体的从域组成.

应用重叠网格的方法,对直线行驶的单车进行了瞬态数值模拟研究,将气动六分力结果与风洞试验结果进行对比,误差在工程允许的范围内,同时车辆周围的速度场与压力场分布与试验结果也比较吻合,验证了应用重叠网格方法计算结果的准确性.

## 1.2 几何模型及计算域的设置

采用的计算模型为国际上通用的 SAE 阶背式 1:1 模型,尺寸如图 1 所示.图中: $F$  为前悬长,925 mm; $G$  为轴距,2 450 mm; $L$  为支腿直径,50 mm; $O$  为后扩散器长,630 mm; $P$  为后扩散器宽,65 mm; $R_1$  为小半径,200 mm; $A$  为总长,4 200 mm; $B$  为总宽,1 600 mm. SAE 模型是非常简单的汽车形体模型,仅对几个平面和棱角进行了倒角处理,底部尾端设置有扩散器,没有车轮,在汽车空气动力学的研究中获得了广泛的应用<sup>[7-8]</sup>.

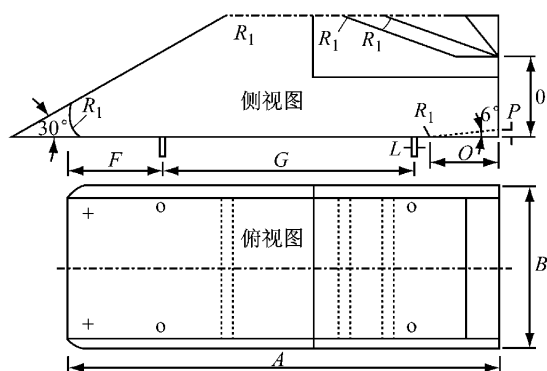


图1 SAE 尺寸

Fig.1 SAE model dimension

通过 CATIA 软件建立模型,模型的最大外边界尺寸为 4 200 mm×1 600 mm×1 200 mm,离地间隙为 200 mm. SAE 模型周围的长方体区域为从域,整个计算域为主域.从域的外边界尺寸为:8 500 mm×3 250 mm×3 250 mm,如图 2 所示.

参照公路路线设计规范 JTG D20—2006,选取

半径为 125 m 的二级公路双车道弯道进行双车会车模拟计算,车速选用  $60 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ . 计算域尺寸及两车初始相对位置如图 3 所示, $l$  表示车长, $w$  表示车宽.

计算域要足够大,以保证车辆周围的流场尤其是尾部流场充分发展,这样计算结果才能准确<sup>[9-10]</sup>.

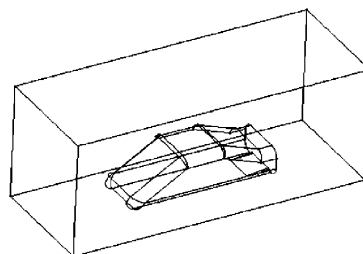


图2 SAE 模型

Fig.2 SAE model

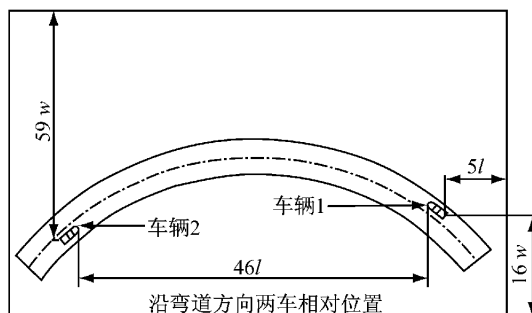


图3 计算域

Fig.3 Calculation field

## 1.3 网格方案

网格的划分对数值模拟结果有较大影响<sup>[11]</sup>,本文利用 STAR-CCM+ 进行 trim 网格的划分,对于 SAE 模型,底部扩散器特征线采用 7.812 5 mm 的网格尺度,模型其他部分的特征线使用 15.625 0 mm 的网格尺度,模型表面最大网格尺度为 31.2500 mm,边界层为 10 层,生成的网格如图 4 所示.

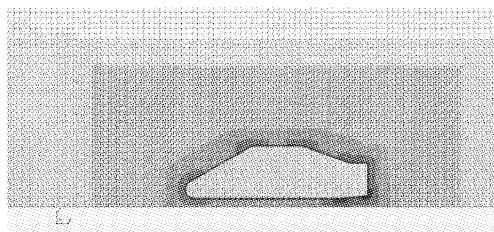


图4 网格

Fig.4 Grid

从域边界处网格尺度为 62.5 mm,从域网格增长速度为 8 层增长 1 倍,而且保证从域和主域重叠部分的网格应不少于 4 层.主计算域外边框采用 500 mm 的网格尺度,同时将车道部分网格进行加密,网

格尺度为 62.5 mm,增长速度为 10 层,增长 1 倍. 最终生成 1 000 万左右的网格.

#### 1.4 边界条件及湍流模型

对于主域,地面为滑移壁面,其余边界均为压力出口边界. 对于从域,顶壁和车身表面为无滑移壁面,其余边界为重叠域交界面.

简化模型外部流场的流动可以看作是恒定温度下的不可压缩流动,其流场的控制方程包括时均连续方程和 Reynolds 方程. 汽车为钝头体,周围的流动非常复杂,流线曲率变化比较大,需要很好地模拟车身表面的边界层流动. 计算采用可实现的  $k-\epsilon$  湍流模型<sup>[12]</sup>,它适合的流动类型比较广泛,包括有旋均匀剪切流,自由流,腔道流动和边界层流动,对以上的流动过程,包括对边界层的模拟结果都要比标准的  $k-\epsilon$  要好.

## 2 计算结果及分析

为了便于对会车过程中的车辆的气动特性进行分析,这里给出了会车过程表达的位置约定. 两车的间距指的是两车车头前缘之间沿弯道中心线的相对距离,记为  $x$ ,以车长  $l$  来标准化,两车沿各自车道中心线行驶,汽车间的横向间距在会车过程中始终保持不变.

如图 5 所示,图中  $S_1, S_2$  分别表示车辆 1, 车辆 2 的侧向力. 随着两车相对位置的改变,侧向力不仅数值发生了变化,方向也发生了改变,并且有极值出现,极大值和极小值具有明显的不对称性. 侧向力在  $x/l=0$  和  $x/l=2.25$  处分别达到极小值;在  $x/l=1.25$  处达到最大值.

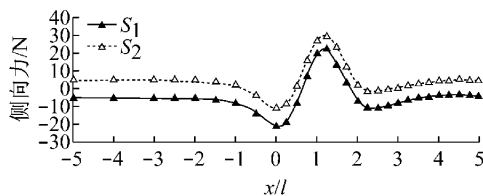


图 5 侧向力变化曲线

Fig.5 Curves of side force

如图 6 所示,图中  $RM_1, RM_2$  分别表示车辆 1, 车辆 2 的侧倾力矩. 气动侧倾力矩的数值和方向随着两车相对位置的变化而改变在  $x/l=0$  和  $x/l=2.25$  处分别达到极大值;在  $x/l=1.25$  处达到最小值.

如图 7 所示,图中  $YM_1, YM_2$  分别表示为车辆 1, 车辆 2 的横摆力矩. 气动横摆力矩的方向和数值

随着两车相对位置的改变而变化,气动横摆力矩在  $x/l=0$  和  $x/l=1.25$  处分别达到极大值;在  $x/l=0.75$  和  $x/l=2.25$  处分别达到极小值. 且内侧弯道行驶的车辆 1 的侧向力、侧倾力矩和横摆力矩值略大于外侧弯道行驶的车辆 2 的值.

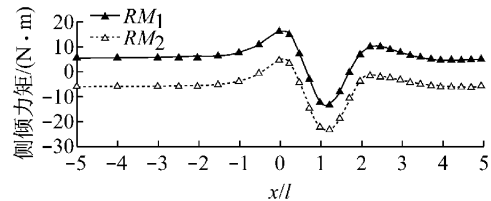


图 6 侧倾力矩变化曲线

Fig.6 Curves of rolling moment

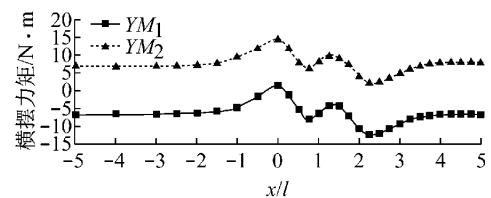


图 7 横摆力矩变化曲线

Fig.7 Curves of yawing moment

如图 8 所示,图中  $L_1, L_2$  分别表示车辆 1, 车辆 2 的升力. 气动升力的方向和数值随着两车相对位置的改变而变化,在  $x/l=0.25$  和  $x/l=1.25$  处分别达到最大值与最小值.

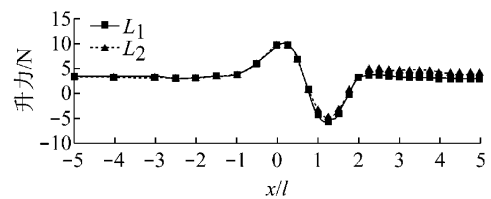


图 8 升力变化曲线

Fig.8 Lift curves

如图 9 所示,  $PM_1, PM_2$  分别表示车辆 1, 车辆 2 纵倾力矩. 气动纵倾力矩的数值和方向也随着相对位置的改变而发生变化,在  $x/l=0$  和  $x/l=1.5$  处分别达到极大值,在  $x/l=0.75$  处达到最小值. 对于升力和纵倾力矩来说,两车差别不大.

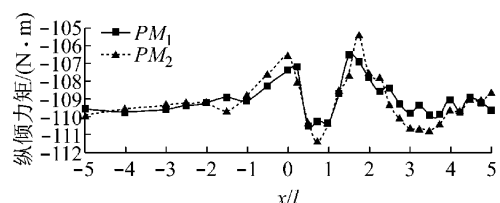


图 9 纵倾力矩变化曲线

Fig.9 Curves of pitching moment

在极短的会车过程中,两车受到的侧向力、侧倾力矩和横摆力矩不仅数值发生了改变,而且方向也发生了变化,这会对车辆的行驶稳定性带来影响,而且升力和纵倾力矩的改变会带来附着力的变化,这也会对车辆的操纵稳定性带来一定程度影响。

下面通过两车的速度及压力分布说明气动六分力发生变化的原因。

如图10所示,会车过程中随着两车相对位置不断接近,两车各自的速度场受对方来车的影响在逐步加强。在 $x/l=-1$ 时,表现为速度场仅仅略微受

到对方的“挤压影响”,但影响很小。在两车不断接近并进行交会的过程中,即两车运行从 $x/l=0$ 至 $x/l=2$ 的过程中,两车各自周围的速度场也在不断变化,整个过程中,两车速度场表现为被对方车头、车体所推动并排出的气流以及尾流所影响,进而不断被拉伸变化着。随着两车交会过程的结束,即当两车运行至 $x/l=3$ 时,两车逐渐脱离了对对方流场的影响,速度场的分布也逐渐恢复到会车前单车弯道行驶时的分布状态。

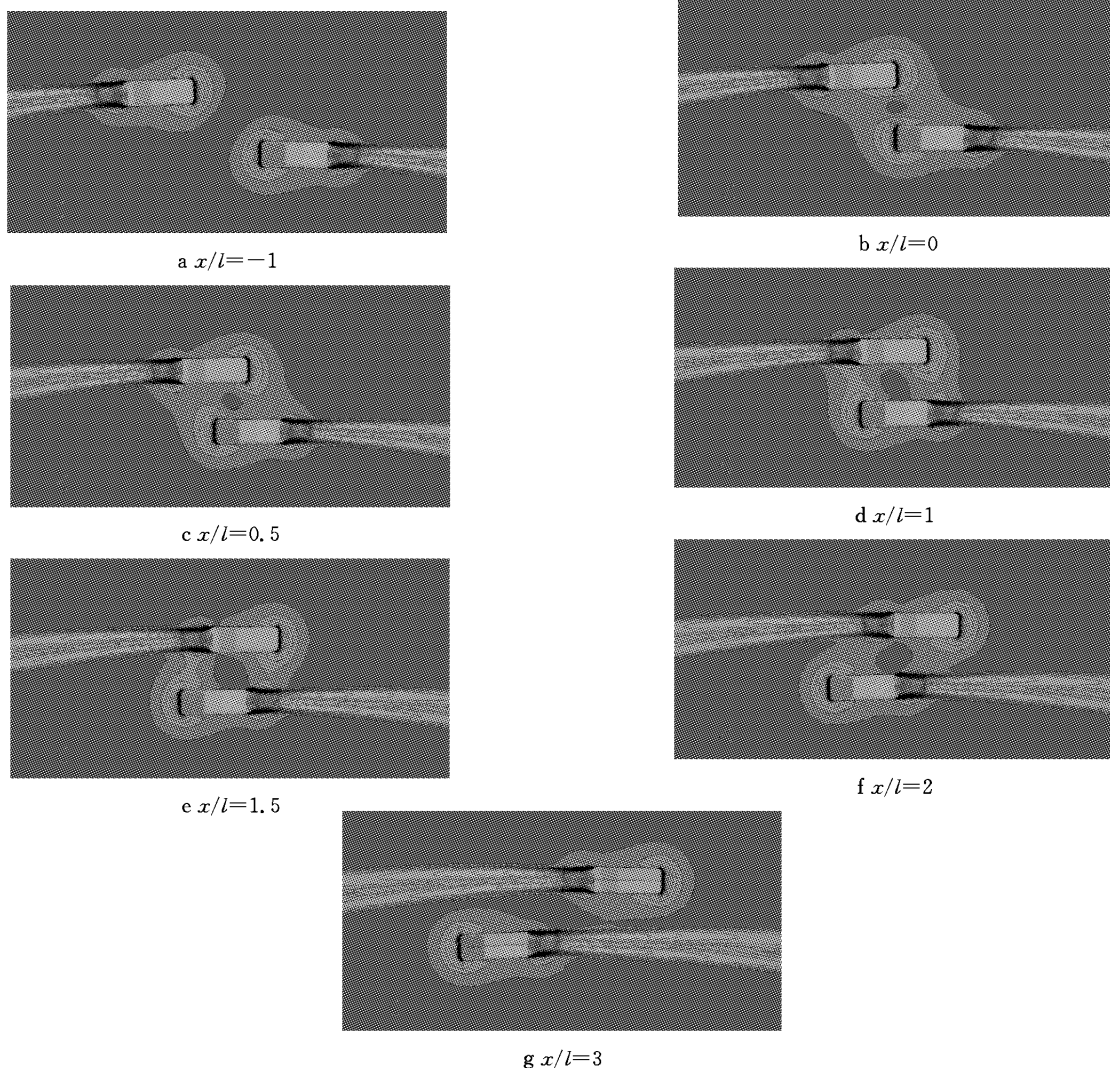


图10 速度分布( $z=0.4\text{ m}$ )

Fig.10 Velocity distribution( $z=0.4\text{ m}$ )

如图11所示,在 $x/l=-1$ 时,两车的压力场只是略微受到对方影响,但影响并不大。与各自单车弯道行驶时的压力场不对称分布相似。两车车体两侧所处的压力分布使得车体受到的侧向力都指向弯道的曲率方向。在侧向力的影响下,会产生相应的侧倾力矩和横摆力矩。

当两车运行至 $x/l=0$ 时,即车辆1和车辆2两车车头前缘相对齐平时,两车各自的压力场明显受到了对方的影响,相互产生了挤压。车辆1压力场受到车辆2压力场的影响,其不对称分布更加明显,从而导致受到的指向弯道曲率方向的侧向力增加,在此刻达到极值,车辆2压力场受到车辆1压力场的

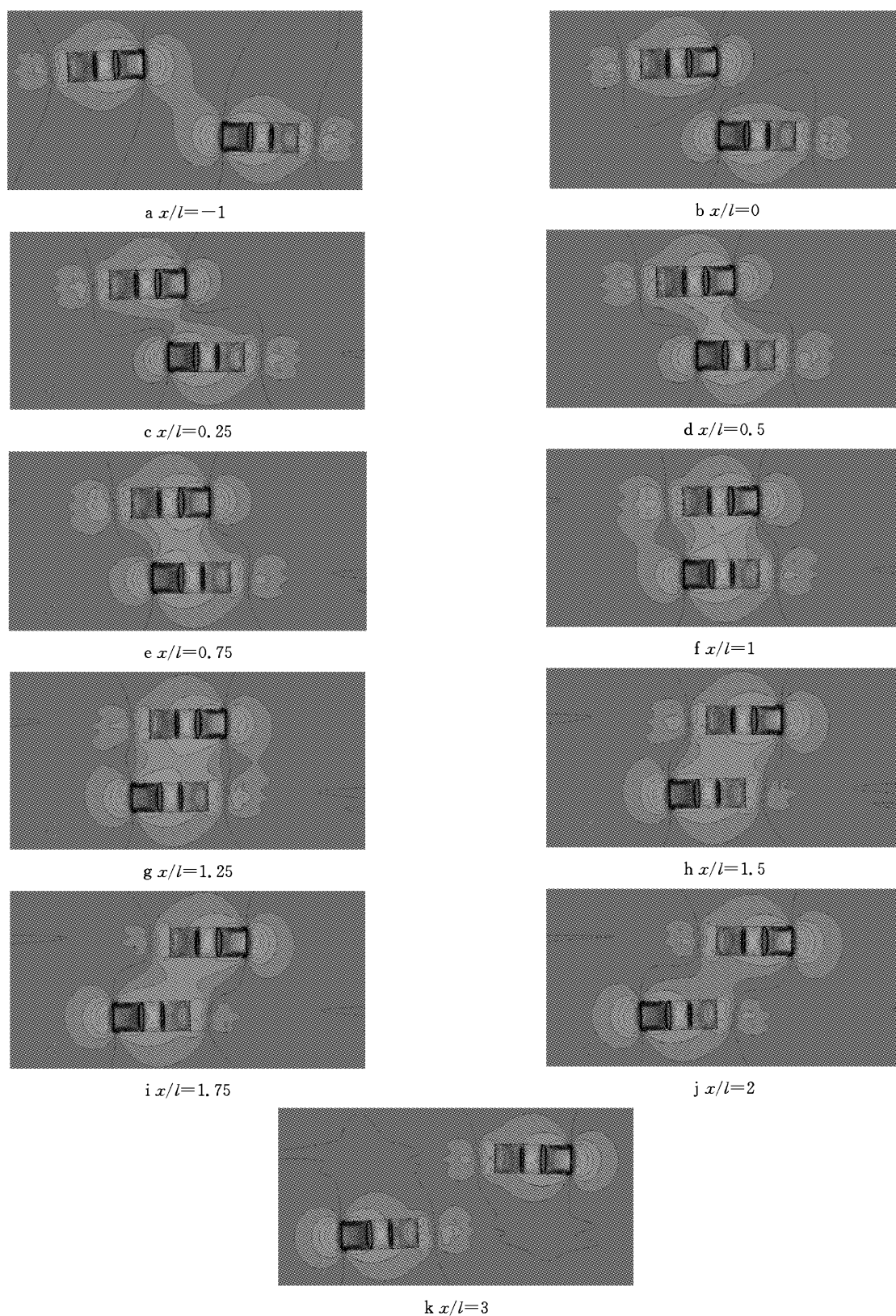


图 11 压力分布

Fig. 11 Pressure distribution

影响,其压力分布出现反向变化,导致车体受到的指向弯道曲率反方向的侧向力增加,达到极值。

随着会车过程的不断进行,两车周围的压力场

进一步的融合,这种融合导致压力场不断变化,并在两车之间形成一个低压区,从而引起两车侧向力发生反向变化,方向指向两车之间,即分别指向对方,

进而引起相应侧倾力矩的反向变化。

当两车运行至  $x/l = 1.25$  时,即两车首尾横向刚过平齐时,在两车形成融合后的压力场内,两车各自不对称的压力场变化最为明显。此刻,两车指向两车内侧的侧倾力增加并达到最大值;相应的气动侧倾力矩的大小也相应增至最大值。

随着会车过程的结束,两车逐渐脱离对方压力场的影响,当两车运行至  $x/l = 3$ ,即两车车尾相距  $l$  时,尽管仍存在各自尾流对对方的影响,但从压力图中可以看到这种影响已不是非常明显,可以说两车基本已脱离对方压力场影响,逐渐回复至单车弯道行驶时的压力场分布。

### 3 结论

采用重叠网格方法,对弯道会车的瞬态气动特性进行了数值模拟研究,得出了如下结论:

(1) 弯道交会的两车,都受到了侧向力、侧倾力矩和横摆力矩的影响,而且内侧弯道行驶的车辆数略大于外侧弯道车辆。

(2) 随着两车相对位置的变化,侧向力、侧倾力矩和横摆力矩的数值和方向都发生了改变,分别有极值出现,这将影响车辆的操纵稳定性。

(3) 升力和纵倾力矩的数值和方向也都随着相对位置的改变出现了变化,这对车辆的附着力会产生一定的影响,进而影响车辆的行驶稳定性。

### 参考文献:

- [1] 李杰,张英朝,张喆,等.轿车大客车会车时的气动特性[J].同济大学学报:自然科学版,2010,38(2):278.  
LI Jie, ZHANG Yingchao, ZHANG Zhe, *et al.* Aerodynamics characteristics of saloon and motor bus meeting [J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2010,38(2):278.
- [2] Kenji Okumura, Toshihiko Kuriyama. Transient aerodynamic simulation in cross wind and passing an automobile[C] // SAE World Congress & Exhibition. Detroit: SAE, 1997: 970404.
- [3] Yoshihiro Okada, Takahide Nouzawa, Satoshi Okamoto, *et al.* Unsteady vehicle aerodynamics during a dynamic steering action: 1st report, on-road analysis[C] // SAE World Congress & Exhibition. Detroit: SAE, 2012: 2012-01-0446.
- [4] Makoto Tsubokura, Yuki Ikawa. Unsteady vehicle aerodynamics during a dynamic steering action: 2nd report, numerical analysis[C] // SAE World Congress & Exhibition. Detroit: SAE, 2012: 2012-01-0448.
- [5] 赵伟,王志远,周志立.载重汽车连续下坡弯道路段制动稳定性仿真研究[J].中国机械工程,2010,21(16):2010.  
ZHAO Wei, WANG Zhiyuan, ZHOU Zhili. Simulation research on truck braking stability on turn of an continuous downgrade [J] China Mechanical Engineering, 2010,21(16):2010.
- [6] Brad Hopkins, Saied Taheri, Mehdi Ahmadian, *et al.* Yaw stability control and emergency roll control for vehicle rollover mitigation[C] // SAE World Congress & Exhibition. Detroit: SAE, 2010: 2010-01-1901.
- [7] Geoffrey M Le Good, Kevin P Garry. On the use of reference models in automotive aerodynamics[C] // SAE World Congress & Exhibition. Detroit: SAE, 2004: 2004-01-1308.
- [8] Tsuneaki Ishima, Yasushi Takahashi, Haruki Okado, *et al.* 3D-PIV measurement and visualization of streamlines around a standard SAE vehicle model[C] // SAE World Congress & Exhibition. Detroit: SAE, 2011: 2011-01-0161.
- [9] Kevin P Garry, Geoffrey M Le Good. An investigation of the sensitivity of rear wing orientation for saloon race Cars[C] // SAE World Congress & Exhibition. Detroit: SAE, 2005: 2005-01-1018.
- [10] David Schrock, Nils Widdecke, Jochen Wiedemann. The effect of high turbulence intensities on surface pressure fluctuations and wake structures of a vehicle model [C] // SAE World Congress & Exhibition. Detroit: SAE, 2009: 2009-01-0001.
- [11] Asya Gabbasa, Badih Ali Jawad. CFD-based shape optimization for optimal aerodynamic design[C] // SAE World Congress & Exhibition. Detroit: SAE, 2012: 2012-01-0507.
- [12] 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. The analysis of computational fluid dynamics [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004.