

隧道中车辆会车时非定常流的数值模拟*

Numerical Simulation of of Unsteady Flow around Two Vehicles Moving Oppositely in Tunnel

胡兴军

(吉林大学 汽车空气动力学研究所, 吉林 长春 130012)

摘 要：本文在STAR-CD下采用雷诺应力模型和动态网格方案对隧道中行驶的汽车会车时干扰流场进行了三维瞬态数值模拟。采用的动态网格方案包括移动网格、带滑动界面的任意滑移网格以及网格的动态添加与删除。然后从汽车干扰流场的速度、气动侧向力系数以及压力分布出发,分析了各个瞬时的计算结果,得出两车会车时流场变化以及气动侧向力变化的规律,模拟结果可为会车时驾驶员或智能驾驶车辆的合理操纵提供参考依据。

关键词：车辆会车；非定常流；动网格；STAR-CD

Abstract : In the commercial software of STAR-CD we used the Reynold Stress Model and the dynamic mesh strategy, including moving mesh, arbitrary sliding interface and dynamic cell removal and addition, to simulate the 3-dimensional transient flow caused by two identical automobiles moving oppositely and passing each other in a tunnel. We analyzed the numerical results for some certain seconds, such as the velocity magnitude, the aerodynamic side force coefficients and the pressure distribution and got the varying rule of the flow field and the side force, which could provide references for correcting the driver's steering manner of automobiles and Intelligent Transportation System, which was implemented without consideration of transient characteristics of interfered flow around automobiles passing each other.

Key words: Two vehicles moving oppositely, Unsteady flow, Moving mesh, STAR-CD

1 前言

汽车的高速行驶使汽车周围的空气产生强烈干扰^[1~3],当两相对行驶的汽车会车时,两车速度差较大,气动干扰将会加剧。随着我国交通汽车车速的提高,汽车会车时强烈的气动干扰将会严重影响汽车的行驶安全,因此,开展汽车会车时干扰流场特性的研究尤为重要。

目前国内汽车外流场的研究一般只针对单车,还没有进行两辆汽车外流场的试验和数值模拟。而国外进行多辆(包括两辆)汽车的外流场的研究也多限于超车、队列行驶等情况下稳态流场的数值模拟与风洞试验研究^[1,3,4],由于汽车风洞试验条件的限制,国外也很少进行车辆会车流场特性的研究。

随着数值计算和计算机技术的发展,计算流体力学(CFD)已成为汽车空气动力学研究的主要方法之一。它可以模拟真实条件,深入认识各种流动现象的机理。计算机硬件的突飞猛进和网格动态处理技术的出现,为研究汽车会车流场的数值模拟提供了重要工具。本文利用

*基金项目：国家自然科学基金课题项目(60222207)

作者简介：胡兴军(1976-),男,工学博士,从事车身设计、汽车空气动力学实验与仿真研究,E-mail: hxj@jlu.edu.cn。

大型计算流体动力学STAR-CD软件,采用滑移网格与网格的动态添加删除相结合的动态网格方案^[5],对汽车会车外流场进行了三维瞬态数值模拟,从流场压力、速度等参数等分析干扰流场的特性,得出了会车时汽车的气动力的变化规律,可对传统的驾驶员模型和智能交通系统提出修正,不仅具有理论价值,而且对汽车的行驶安全性也具有指导意义。

2 湍流模型

汽车会车时的流场是一种复杂的各项异性的湍流流场,它存在分离流动、大曲率的流动,对其进行模拟必须放弃在涡粘性假设基础上的 $k - \varepsilon$ 两方程模型,而直接求解雷诺应力的输运方程,基本的雷诺应力湍流模型(RSM)的形式如下:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \overline{u'_i u'_j}) + C_{ij} - D_{ij} = P_{ij} + \Phi_{ij} - \rho \varepsilon_{ij}$$

C_{ij} 、 D_{ij} 、 P_{ij} 、 Φ_{ij} 、 ε_{ij} 分别为对流项、为扩散项、产生项、再分配项(也称压力应变项)和耗散项^[5]。

RSM 模型中,再分配项 Φ_{ij} 是雷诺应力封闭中非常重要的一项,它的建模是整个模型成功的关键。其系数依赖于雷诺应力的变化和湍流动能的产生,而雷诺应力的变化和湍流产生的有和壁面作用密切相关,因此 RSM 模型体现了壁面对雷诺应力的影响。再分配项的方程式为:

$$\begin{aligned} \Phi_{ij} = p \left(\frac{\partial u'_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u'_j}{\partial x_i} \right) = & -(C_1 \varepsilon + C_1 * P_k) b_{ij} + C_2 \varepsilon (b_{ik} b_{kj} - \frac{1}{3} \delta_{ij} b_{kl} b_{kl}) \\ & + (C_3 - C_3 * \Pi_b) k S'_{ij} + C_4 k (b_{ik} S'_{jk} + b_{jk} S'_{ik} - \frac{2}{3} \delta_{ij} b_{kl} S'_{kl}) + C_5 k (b_{ik} W'_{jk} + b_{jk} W'_{ik}) \end{aligned}$$

方程中的每个系数以及详细情况请参考文献[6, 7]。

在以前单车外流场的稳态流动数值模拟中湍流的模拟都是采用 $k - \varepsilon$ 两方程模型,仅具有一阶精度的,因此本文拟采用具有二阶精度的雷诺应力模型汽车会车的干扰流场进行数值模拟,以期得到更精确的预测值。

3 数值模拟

3.1 模拟模型及工况

本文模拟时所采用的车辆几何模型为隧道中相对行驶并发生会车的两个相同Ahmed模型,该模型示意图如图1所示。本次模拟的道路工况为双行四车道的隧道,两车以30m/s的速度相对行驶会车并离开(如图2所示)。

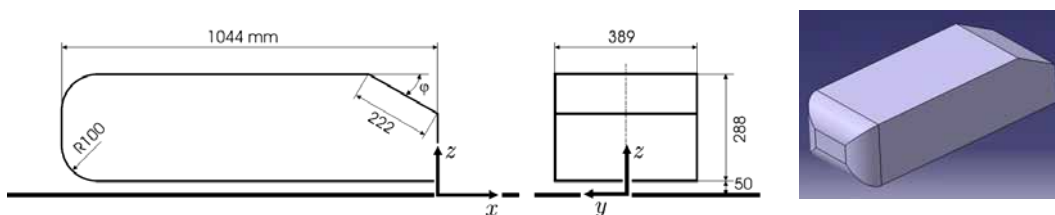


图1 Ahmed模型的示意图^{[8][9]}及其表面网格

3.2 网格方案

汽车会车时两车周围流场具有瞬态湍流流动特性,即会车过程中流场的速度、压力等流动参数随时间是在不断变化的,此时流场为非定常流动,因此,会车流场的数值研究时必须采用瞬态数值模拟的方法才能正确获得其干扰

流场的特性。为此,本文采用滑移网格中带有滑动界面的任意滑移网格类型(Arbitrary sliding mesh),并利用用户自定义子函数完成单元的动态移除和添加,进行湍流的瞬态模拟。

如图 3 所示,当车 1 和 2 相对行驶时,网格层必须从单元模块 1 和单元模块 2 的前端移走,并且加在另

一相反端,这么做是为了保持计算域的长度一定。同时需要在计算域的两端设定压力边界。

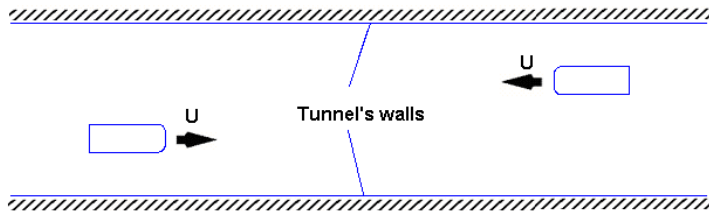


图2 模拟两车会车的工况

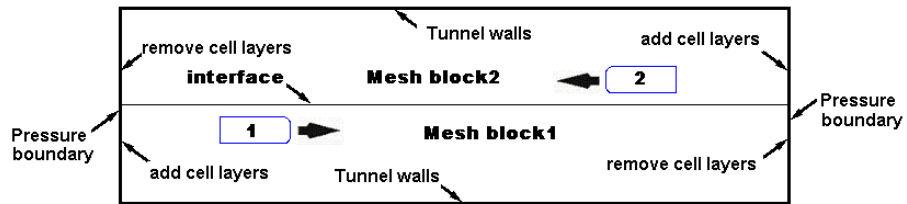


图3 块(Block)中的网格策略及其边界条件

3.3 时间控制和边界条件

本文中网格可以任意形式的滑移。因此,时间步可以选择不依赖网格形状的任何值。本文我们设置时间步长是 $t = 0.000833$ 秒,网格的运动形式如图4所示。为了模拟汽车会车的整个

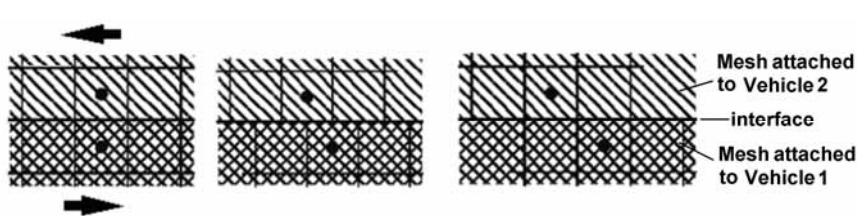


图4 有关网格运动的说明图

过程,注意,汽车要运动30m,需要1200个时间步来完成。

在设置边界条件时,除了图2所给出的边界条件外,汽车1表面

加30m/s的壁面边界条件,汽车2表面加-30m/s的壁面边界条件。同时,隧道的两侧、顶部以及路面都设置成固定壁面边界条件。

4 模拟结果及其分析

4.1 速度结果及其分析

本文分析时,选取典型的截面 $z=200\text{mm}$ 作为流场数据的获取平面,该面平行于路面,距路面200mm高处。参照图5和图6,比较图中速度大小,可以看出,两车相对行驶之初(如图5所示)其前方A区域气流的速度较高,而从0.025s(图6)时刻往后,随着两车距离的接近,其前方A区域气流速度有所下降。(注:图中上边界是隧道壁。)

在图5中,车前方(A区域)的空气受到车头的推动作用而获得一个高的速度,并且距车头越近作用越强。而从0.025s时刻(见图6)往后A区气流速度的下降则是因为该区空气的流动受到前方开来的另一辆车影响。这说明两车周围流场已经开始相互干扰,互相影响。(注:图7,8,9中等值线图的上下边界为隧道壁。)

从所有速度图来看,两车的后面均有一个流速较高的尾流区域,并且从 0.025s 时就开

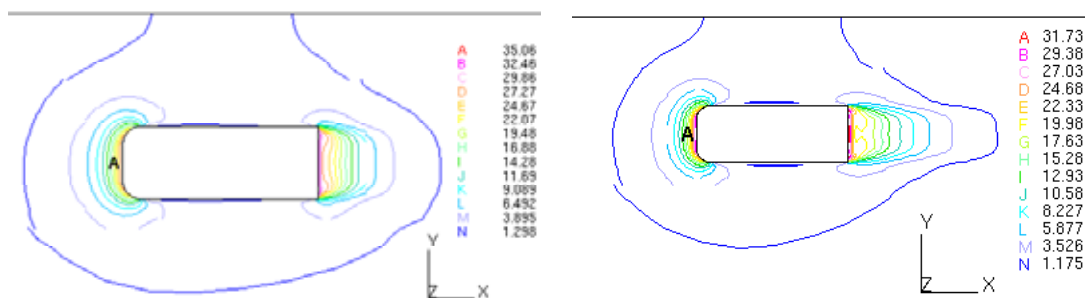


图6 0.025s时刻的速度等值线图

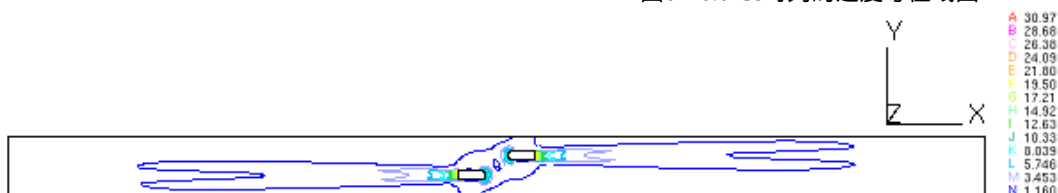


图 7 0.49s 时刻速度等值线图

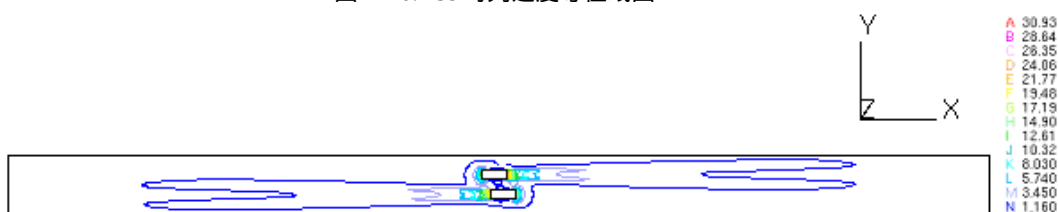


图 8 0.53s 时刻速度等值线图



图9 0.81s时刻速度等值线图

始,随着两车的接近、会车直至离去尾流在变的越来越长。从图 9 可以看出,尽管两车相互离去,其后面的高速气流区域仍然存在,并且尾流拖得很远。

4.2 侧向力系数

1) 侧向力系数的变化

图 10 为瞬态数值模拟得到的侧向力系数随时间变化的曲线图。据图可知,两车相向行驶,在距离较远处,大约在两车相距 3 倍车长 (0.45s 时刻) 之后,侧向力开始有一个缓慢的增加;在两车相距约 1 倍车长 (0.48s 时刻)

时侧向力随时间变化曲线的斜率增大,即侧向力的增加变快,两车流场的相互扰动作用加强;

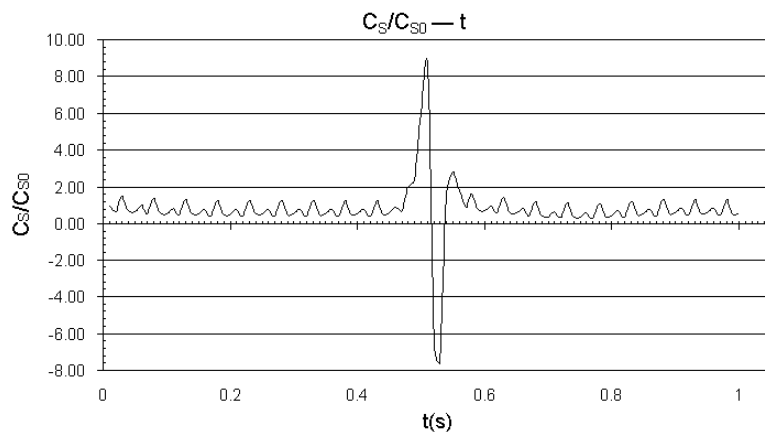


图10 侧向力系数的 C_s/C_{s0} 随时间 t 的变化曲线

在纵向车距为 0 (0.51s 时刻) 即两车会车时, 两车各自受到的侧向力均达最大值。

在后续的会车过程中, 侧向力则迅速降低, 此时侧向力的时间变化曲线的斜率比此前都大 (绝对值), 当一车车头驶过另一车的车尾时, 侧向力变为零, 并开始改变方向, 在两车车尾相距 0.5 倍车距 (0.53s 时刻) 时, 侧向力达最小值, 也即反向的侧向力达最大。

此后反方向的侧向力逐渐减少, 并变向恢复到原来的方向。大约在会车即将结束时, 即两车车尾脱离时, 侧向力随时间变化曲线出现局部峰值, 在此之后, 侧向力继续减小, 但变化速率减小, 侧向力逐渐恢复到会车前的独立行驶时的状态。

同时图 10 还表明, 侧向力系数除了有以上的总体变化规律外, 还存在以下特点: 会车前及会车后, 它随时间在脉动变化, 交替出现两个极大值, 一个较大, 一个较小。这是车辆交会和隧道洞壁效应共同作用所致。

2) 结果分析

车辆在隧道中行驶时, 起初隧道壁对行驶车辆的湍流流动的影响起主导作用, 所产生的气动侧向力有将车辆推向洞壁的效果; 而在即将会车的过程中, 两车湍流流动的干扰使两车在行驶过程中相互排斥, 车辆各自受到外推的侧向力, 其效果也是使车向隧道壁靠近; 而在会车过程中, 两车开始受到相互吸引的侧向力作用, 结果就是两车有相互靠近的趋势; 其后, 车辆各自受到的侧向力会缓慢恢复到会车前的状态。

4.3 压力分布结果

在不同时刻的压力分布能够直观地反映了汽车所受侧向力的变化。下面通过不同

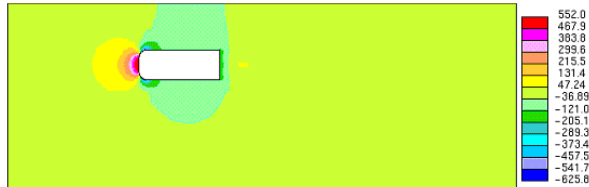


图11 0.21s时刻的压力分布图

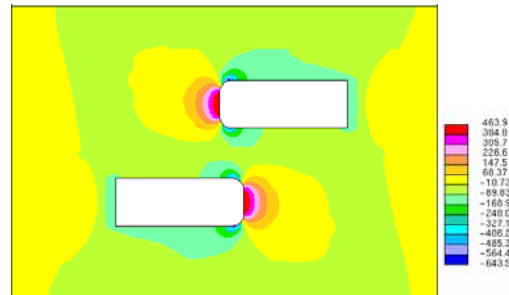


图12 0.51s时刻压力分布图

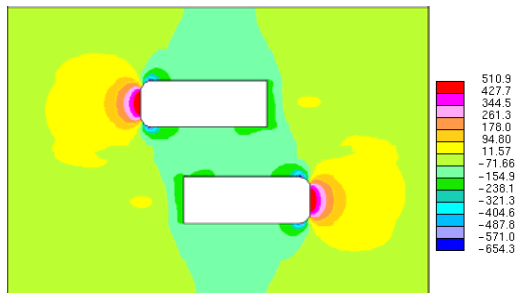


图13 0.53s时刻压力分布图

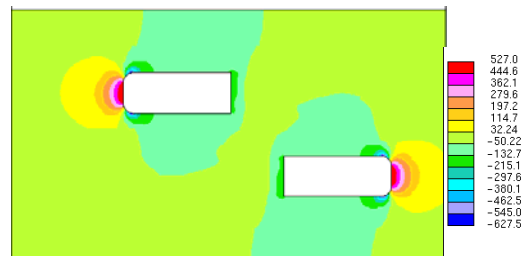


图14 0.55s时刻压力分布图

时刻压力分布的结果说明汽车所受到的侧向力的变化。由于两车相距较远, 对于会车前的结果, 图11只给出了车2在 $z=200\text{mm}$ 截面的压力分布, 车1与之相同。(注: 图11中的上边界、以及图12、13、14的上下边界均为隧道壁。)

从压力分布的瞬态结果可得出: 在两车会车过程的不同时刻, 流场压力在发生变化, 从而导致汽车产生的侧向力也在在不断地变化。

同时还可以看到, 当车身前部、中部、和后部的压力差不一样时, 在产生侧向力同时还

会产生横摆力矩。无论是侧向力还是横摆力矩,都将对汽车的行驶稳定性产生不良影响,引发碰撞,威胁交通安全。

5 结论

本文通过瞬态数值模拟的研究表明,汽车会车过程中干扰流场的参数包括压力、速度等都在随时间不断的变化。并由此导致汽车所受到的气动力也在不断的变化,其侧向气动力的变化规律:

- 1) 在纵向车距为 0 即两车会车时,两车各自受到的侧向力均达最大值;
- 2) 当两车完全并列时,侧向气动力变为零,此后开始改变方向;
- 3) 在两车车尾相距 0.5 倍车距时,侧向力达最小值,亦即反向的侧向力达最大。
- 4) 在隧道壁干扰和会车影响的共同作用下,侧向力除了具有以上规律外,还在不断脉动变化。

对于汽车会车过程中流场干扰特性以及气动侧向力的变化规律,我们将在不同车速下,继续通过两车会车流场的三维瞬态数值模拟以及道路试验进一步研究和验证。

6 参考文献

- [1] Ahmed F. Abdel Azim and Ahmed F. Abdel Gawad *et al.* A Flow Visualization Study of the Aerodynamic Interference Between Passenger Cars[C] //SAE 2000-01 -0355, 2000.
- [2] 夏雪瀚, 邓学莹. 工程分离流动力学[M], 北京: 北京航空航天大学出版社, 1991: pp219-273.
- [3] Patrick Gillieron, Christophe Noger *et al.* Contribution to the Analysis of Transient Aerodynamic Effects Acting on Vehicles[C] //SAE 2004-01-1311, 2000.
- [4] Kenji Okumura and Toshihiko Kuriyama *et al.* Transient Aerodynamic Simulation in Crosswind and Passing an Automobile[C] //SAE 970404, 1997.
- [5] CD Adapco, STAR-CD Methodology, Version 3.15, Computational Dynamics Limited, 2001.
- [6] Launder, B.E. and Sandham, N.D. (Eds.) *et al.* Closure Strategies for Turbulent and Transitional Flows[M], London: Cambridge University Press, 2002: pp.47-63.
- [7] Speziale, C.G., Sarkar. S., and Gatski T.B. *et al.* Modeling the pressure-strain correlation of turbulence: an invariant dynamical systems approach[J]// J. Fluid Mech., 227, 1991: pp245-272.
- [8] Ahmed, S.R., Ramm, G., Faltn, G.: Some Salient Features of the Time-Averaged Ground Vehicle Wake[C] // SAE840300, 1984.
- [9] Hermann Lienhart and Stefan Becker *et al.* Flow and Turbulence Structure in the Wake of a Simplified Car Model[C]// SAE2003-01-0656, 2003.