

队列行驶三辆汽车外流场的数值模拟

王靖宇¹, 刘畅¹, 李 胜², 胡兴军¹

(1. 吉林大学, 吉林 长春 130025; 2. 一汽解放青岛汽车厂, 山东 青岛 266043)

摘要:以智能车辆的 MIRA 简化模型作为研究对象, 在自动控制的前提下, 采用移动地面边界条件, 对单车和队列行驶状态下的汽车外流场进行了数值模拟研究. 分别获得了单车和各种行驶工况下的三辆汽车对称面的压力分布, 队列行驶三辆汽车的压力分布与单车的压力分布相似, 但是后两车前部的正压区明显减弱. 对于等间距和不等间距 2 种行驶情况, 改变车辆之间的距离来模拟多种状态. 气动阻力的对比分析说明: 队列行驶三辆汽车, 后两车的气动阻力都低于前车的气动阻力, 而且平均气动阻力与单车相比均有了一定程度的降低. 通过间距的改变分别进行数值模拟, 获得了间距对前后行驶三辆汽车气动阻力影响的规律, 为以后队列行驶的深入研究奠定了基础.

关键词:汽车空气动力学; 数值模拟; 队列行驶; 气动阻力

中图分类号:U461.1 **文献标识码:**A **文章编号:**1674-0696(2007)05-0138-04

Numerical Simulation of Flow Field around Three-Car Platoon

WANG Jing-yu¹, LIU Chang¹, LI Sheng², HU Xing-jun¹

(1. Jilin University, Jilin Changchun 130025, China; 2. FAN Jiefang Qingdao Auto Factory, Shandong Qingdao 266043, China)

Abstract: Based on auto-control, the MIRA simplified model was used as the object of Intelligent Vehicle System research, and the flow field around single car and three-car platoon were numerically simulated respectively, while the ground effect was simulated by the moving wall boundary condition. The pressure distributions in symmetry section are shown. Comparing with the distribution of a single car, the situations are similar, but the positive pressure area of the two back cars' front part is evidently weakened. There are two types of positions, the same space and different space. The analysis of aerodynamics resistances shows that the two back cars' resistances are smaller than the leading car's resistance and the average resistance falls a little contrasting with the single car's resistance. The numerical simulations of flow field around three-car platoon were carried out by changing the distance of cars. The rule of aerodynamics resistances of three cars platoon influenced by space is found. It establishes the base for the latter research.

Key words: vehicle aerodynamics; numerical simulation; driving platoon; aerodynamic resistance

汽车在道路上行驶,除了受到来自地面的摩擦力外,还受到了周围空气流场的作用,产生了阻力和升力等气动 6 分力,高速行驶时这些力和力矩对汽车的行驶状态有很大的影响^[1]. 智能车辆系统配备了必要的速度和位置传感器、电脑以及通信设备,能够自动制动、自动控制油门和自动转向,队列行驶智能车辆的纵向间距即使很小,车辆也可以在间距 < 1 倍车长的情况下进行高速行驶,使车辆行驶智能化,这是减少城市道路上交通堵塞的一种方法^[2-4]. 单—

车辆周围的流场已经非常复杂,队列行驶的车辆由于相互之间的干涉而更加复杂,随着车型、间距和车速的变化而改变^[5],笔者对队列行驶三辆汽车的外流场进行了数值模拟研究,并通过改变三辆汽车之间的距离来模拟多种状态,得出了三辆汽车队列行驶时,间距对气动阻力影响的规律,从而为汽车自动驾驶和智能交通系统的开发提供理论基础.

1 数值模拟的前处理

1.1 计算域的确定

收稿日期:2006-10-17;修订日期:2007-01-11

基金项目:国家自然科学基金项目(60222207);吉林大学“985 工程”汽车工程科技创新平台资助项目.

作者简介:王靖宇(1976-),男,辽宁辽阳市人,博士研究生,研究方向:车身工程. e-mail: wangjy@jlu.edu.cn. Tel: 13174461537.

研究对象为国际上普遍采用的 MIRA1:5 模型,在 CAD 软件 CATIA 中建立单车和三辆汽车前后排列的几何模型,然后导入 STAR-CD 软件,进行网格划分,对车轮附近和尾流区域的网格进行了加密.对单车,所取的计算区域为车身前方 2 倍车长、车身上方 3 倍车高、车身侧面 3 倍车宽、车身后方 8 倍车长;对三辆汽车,考虑到计算机的计算能力,车身后方约 5 倍车长.

1.2 边界条件的设定

远端来流方向的端面为入口边界,车身后远端端面为出口边界,地面设定为壁面边界,移动速度与入口边界速度相同,模拟车轮在地面上行驶.其余外表面为压力边界,车身表面没有加边界条件,STAR-CD 软件将其作为缺省的壁面条件.湍流模型采用广泛应用的 RNGk-ε 模型.来流速度 $v = 30 \text{ m/s}$,空气密度 $\rho = 1.205 \text{ kg/m}^3$,湍流动能 $k = 0.03375$,湍流耗散率 $\epsilon = 6.81927$.

1.3 数值模拟过程

分别模拟了单车和间距改变情况下三辆汽车队列行驶时的多种状态,MIRA 模型外形比较简单,生成的网格比较规整,不同间距情况下生成的网格数目大致相当,以便于进行对比研究.对于三辆汽车的排列情况,分为等间距和不等间距 2 种工况.

1.3.1 等间距

前车尾部与中车头部,中车尾部与后车头部之间的距离相等,即三辆车中相邻两车的间距相同,计算过程如表 1.

表 1 各种情况的计算过程

前两车纵向距离(L为车长)	网格数/万个	迭代次数/次
0.5L	120	228
0.75L	124	222
1L	132	222
1.25L	134	210
1.5L	144	220

1.3.2 前两车间距不变,后车位置改变

前车尾部距中车头部之间的距离为 0.5L 保持不变,改变第三辆车的位置,计算过程如表 2.

表 2 各种情况的计算过程

前两车纵向距离(L为车长)	网格数/万个	迭代次数/次
0.5L	116	221
0.75L	122	224
1L	124	232
1.25L	126	238
1.5L	130	258

2 数值模拟结果及分析

2.1 单车的数值模拟结果

对于单车,模拟获得了对称面的压力分布(图 1),并计算出气动阻力系数,与 1/5 MRA 模型风洞试验的结果进行对比^[6],本次模拟的阻力系数比风洞试验结果小 7.4%,此误差在 10% 以内,验证了数值模拟的正确性,模拟结果可以接受.

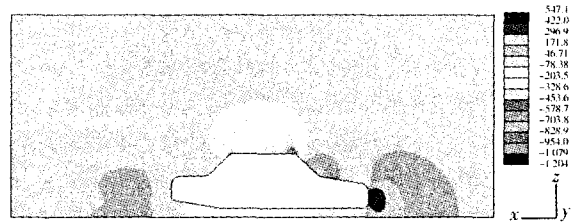


图 1 单车对称面压力分布

对于队列行驶的 2 种行驶工况,分别得出各种间距下的对称面压力分布,如图 2.

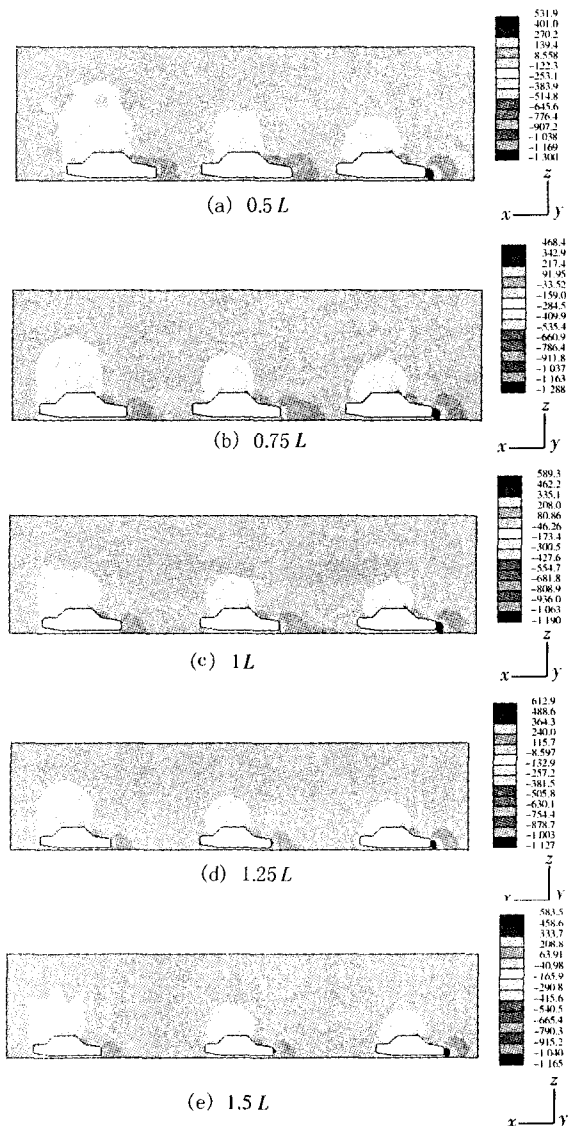


图 2 等间距情况下对称面压力分布

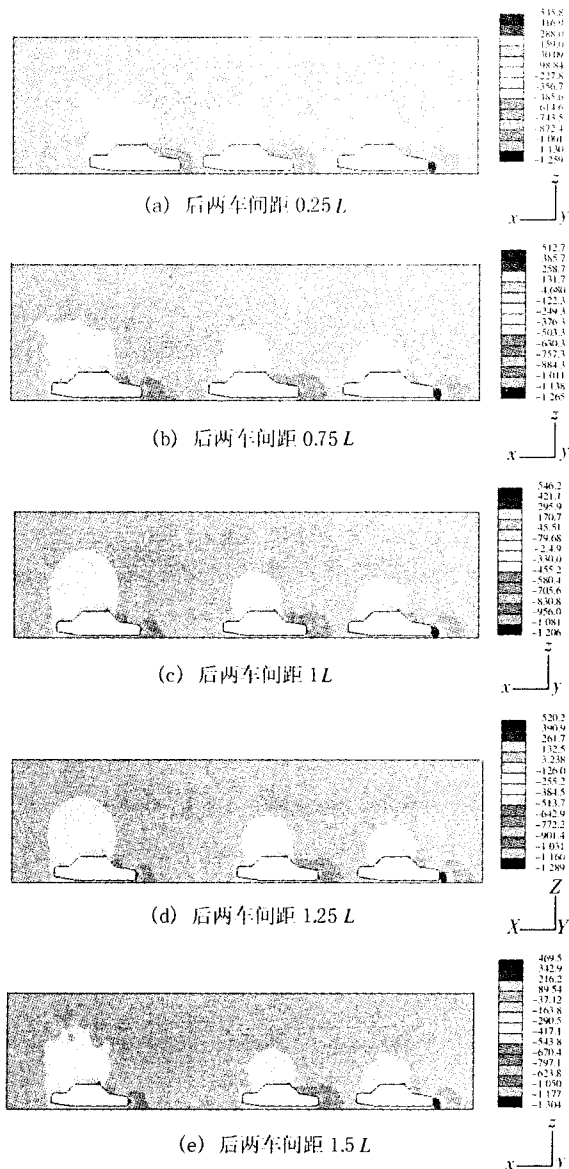


图3 不等间距情况下对称面压力分布

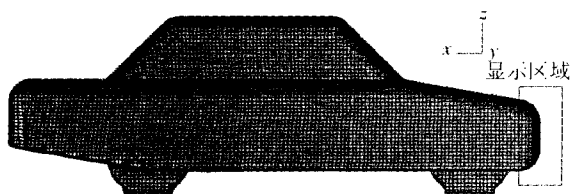


图4 显示区域

对于等间距形式,以前两车间距 $1L$ 为代表,输出了三辆汽车车头前部的压力分布曲线。

对于不等间距情况,以后两车间距 $1L$ 为代表,输出了三辆汽车车头前部的压力分布曲线。

从图2~图6的对称面压力分布和车头前部的压力分布曲线中可以看出,三辆汽车前后排列行驶时,远前方来流首先遇到前车的车身前部,气流受

阻,速度有了明显的降低,气流的动压转变为静压,车身头部出现正压区,然后,气流流向尾部。无论三辆汽车的相对位置如何,后面两辆汽车的压力分布都与前车的压力分布相似,仍然具有阶背式轿车的典型特征。同时,也可以清晰地看到,虽然后两车的前部仍然具有明显的正压区,但是与前车相比,正压区的压力值有了一定程度的降低,由此导致压差阻力的减小。压差阻力在汽车的气动阻力中占有很大的比例,从而导致后两车受到的气动阻力发生改变。

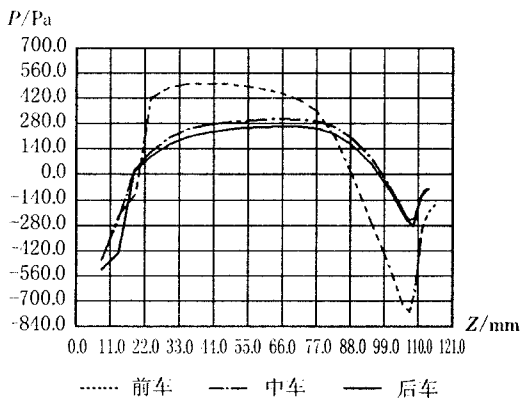


图5 压力分布曲线

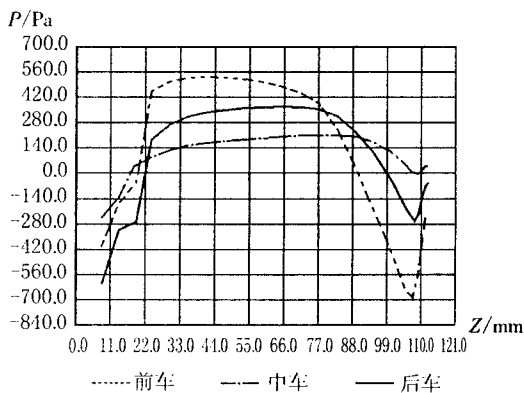


图6 压力分布曲线



图7 单车端流动能分布

从图7中可以看出,单车尾部的漩涡托拽出很长的距离,达到数倍车长,必将对跟随其后的车辆产生影响。后车处在前车的尾流场之中,前车的尾部拖拽涡撞击后车前部,这将对后车周围的流场产生很大的影响,导致后车的气动阻力发生改变。

2.2 气动阻力分析

表3与表4中 $\Delta C_{D \text{ leading}}$ 、 $\Delta C_{D \text{ middle}}$ 、 $\Delta C_{D \text{ trailing}}$ 分别为前车、中车和后车数值计算所得的气动阻力系数与单车数值计算值之差, $\Delta C_{D \text{ average}}$ 为三辆汽车的平均气动阻力系数与单车数值计算值之差,即:

$$\Delta C_{D \text{ average}} = (\Delta C_{D \text{ leading}} + \Delta C_{D \text{ middle}} + \Delta C_{D \text{ trailing}}) / 3$$

2.2.1 等间距工况

表3. 气动阻力系数

间距	0.5 L	0.75 L	1 L	1.25 L	1.5 L
$\Delta C_{D \text{ leading}}$	-0.014 1	-0.010 2	-0.001 2	-0.002 5	0.001 8
$\Delta C_{D \text{ middle}}$	-0.049 3	-0.047 9	-0.037 8	-0.036 1	-0.025 4
$\Delta C_{D \text{ trailing}}$	-0.034 9	-0.039 4	-0.029 7	-0.024 6	-0.021 6
$\Delta C_{D \text{ average}}$	-0.032 8	-0.032 5	-0.022 9	-0.021 1	-0.015 1

从表3中可以看出,在三辆汽车等间距行驶时,无论间距怎样变化,后两车的气动阻力总是小于前车的气动阻力,并且总是中间一辆汽车的气动阻力最小,而且,间距越小,中间车辆的气动阻力越低.从 $\Delta C_{D \text{ average}}$ 可以看出,三辆汽车在等间距行驶时,平均气动阻力与单车行驶时相比都有了一定程度的降低,气动阻力的降低对降低燃油消耗率和汽车排放都具有非常重要的意义^[7-8].

2.2.2 不等间距工况

表4 各种情况下车辆气动阻力与单车的差值

后两车距离	0.25 L	0.75 L	1 L	1.25 L	1.5 L
$\Delta C_{D \text{ leading}}$	-0.018 5	-0.020 9	-0.022 2	-0.016 5	-0.020 5
$\Delta C_{D \text{ middle}}$	-0.079 1	-0.044 3	-0.040 2	-0.032 9	-0.032 1
$\Delta C_{D \text{ trailing}}$	-0.044 4	-0.037 5	-0.040 6	-0.033 7	-0.033
$\Delta C_{D \text{ average}}$	-0.047 3	-0.034 2	-0.034 3	-0.027 7	-0.028 5

从表4中可以看出,在不等间距工况下,三车队列行驶,平均气动阻力仍有降低,而且后面两车的气动阻力总是小于前车的气动阻力.后车位置的改变对中间车辆的影响较大,对前车的影响较小,后车距中车越近,中车受到的影响越大.三车队列行驶时,第三车的位置变化对第一辆车的气动阻力影响较小,对与它相邻的中间车辆的影响较大^[9].

3 结论

1) 三辆汽车队列行驶时,各车的压力分布与单车行驶时相似,仍然具有阶背式轿车的典型特征.

2) 后车处于前车的尾流场当中,由于前车尾流涡流的影响,后车的气动阻力发生了改变.通过计算得知,三辆汽车队列行驶时,无论间距如何,平均气

动阻力都有了一定程度的降低,并且后面两车的气动阻力总是小于前车的气动阻力.

3) 在等间距行驶的情况下,总是中间一辆汽车所受到的气动阻力最小,车辆间距越近,中间车辆的气动阻力越小;在不等间距行驶的情况下,第三辆车的位置变化对第一辆车的气动阻力影响较小,对中间车辆的气动阻力影响较大.

4) 车辆队列行驶不仅提高了道路的通行能力,而且,由于气动阻力的降低,还可以减小燃料的消耗.

参考文献:

- [1] FU Li-min, WANG Hui-yong. Numerical Study of Separated Flow around After-body of Road Vehicle [C]//Seoul: FISITA World Automotive Congress, 2000.
- [2] Hong P, Marcu B, Browand F, et al. Drag Forces Experienced by Two. Full-Scale Vehicles at Close Spacing [C]. Detroit: SAE980396, 1998.
- [3] Tsuei L, Savas. A Wind Tunnel Investigation of the Transient Aerodynamic Effects on a Flour-Car Platoon during Passing Maneuvers [C]// Detroit: SAE2000-01-0875, 2000.
- [4] Hammache M, Michaelian M, Browand F. Aerodynamic Forces on Truck Models, Including Two Trucks in Tandem [C]// Detroit: SAE2002-01-0530, 2002.
- [5] Ahmed F, Azim A, Ahmed F, et al. A Flow Visualization Study of the Aerodynamic Interference Between Passenger Cars [C]// SAE2000-01-0355.
- [6] SAE RVA-OTWAT Standards Committee Aerodynamic Testing of Road Vehicles-open Throat Wind Tunnel Adjustment [R/CD]. Surface Vehicle Information Report, Detroit: SAE J2071, 1994.
- [7] Bonnet C, Fritz H. Fuel Consumption Reduction in a Platoon: Experimental Results with Two Electronically Coupled Trucks at Close Spacing [C]// Detroit: SAE2000-01-3056, 2000.
- [8] Browand F, Hammache M. The Limits of Drag Behavior for Two Bluff Bodies in Tandem [C]// Detroit: SAE2004-01-1145, 2004.
- [9] Marcu B, Browand F. Aerodynamic Forces experienced by a 3-Vehicle Platoon in a Crosswind [C]// Detroit: SAE1999-01-1324, 1999.