

汽车外形对智能车辆队列行驶气动特性的影响

贺宝琴, 吴允柱, 傅立敏

(吉林大学 汽车工程学院, 长春 130022)

摘要:为了研究智能交通系统中不同外形车辆在队列行驶时的空气动力特性,以及车辆纵向间距对队列行驶车辆气动特性的影响,采用数值模拟方法对阶背式、快背式和直背式轿车5车队列分别在6种纵向间距下的气动特性进行了研究。结果表明:三种车型队列的平均减阻率大约为10%~40%,节省燃油5%~20%。阶背式轿车队列的平均减阻率最大,直背式次之,快背式最小。随着纵向间距的减小,每辆车的升力都增大,稳定性都变差。

关键词:车辆工程;汽车空气动力学;数值模拟;队列行驶;汽车外形

中图分类号:U461.1 **文献标识码:**A **文章编号:**1671-5497(2008)01-0007-05

Influence of vehicle shape on the aerodynamic characteristics of intelligent vehicle platoon

He Bao-qin, Wu Yun-zhu, Fu Li-min

(College of Automotive Engineering, Jilin University, Changchun 130022, China)

Abstract: To study the aerodynamic characteristics of the platoon of vehicle with different shapes in the intelligent transport system and the influence of the longitudinal spacing between the vehicles on the aerodynamic characteristics of the vehicle platoon, the numerical simulation method was adopted to research the aerodynamic characteristics of the 5-car platoon with the notchback, fastback and squareback cars in 6 longitudinal spacings to provide a theoretical foundation for intelligent control of the vehicle shape and spacing in the platoon. The research results indicate that the average ratios of the drag reduction for the platoons composed of all three kinds of vehicle shape were in the range of 10%~40%, indicating that the platoon driving can save the fuel consumption obviously and decrease the exhaust emissions. The drag reduction of the notchback car platoon is the most, that of the squareback is the next, and the fastback is the least. With the decrease of the longitudinal spacing, the lift of vehicles increases, and their stability worsens.

Key words: vehicle engineering; automotive aerodynamics; numerical simulation; platoon driving; vehicle shape

我国将在“十一五”期间构建现代化智能交通系统(ITS),而在智能交通系统中采用队列行驶

模式可以大大提高运输效率,减少燃料消耗和废气排放并保障交通安全。车辆队列行驶时,由于

收稿日期:2006-09-29.

基金项目:国家自然科学基金项目(60222207);吉林大学“985工程”项目.

作者简介:贺宝琴(1981-),女,博士研究生.研究方向:汽车空气动力学. E-mail:hebq@jlu.edu.cn

通讯联系人:傅立敏(1942-),女,教授,博士生导师.研究方向:汽车空气动力学,车身设计. E-mail:iaa@jlu.edu.cn

车间距离缩短,后车进入了前车的尾流区,两辆车的流场发生相互干扰,使阻力和升力等气动特性参数发生变化,导致其燃料消耗特性和行驶特性的变化。国外采用风洞试验^[1,2]和道路试验^[3]研究了车间距离和队列尺寸对队列行驶车辆气动特性的影响;作者采用数值模拟方法研究了汽车外形对队列行驶气动特性的影响,揭示了不同外形的智能车辆队列行驶时的气动特性,为智能控制不同车型提供有效的理论依据。

1 数值模拟

1.1 基本控制方程

汽车外流场满足以下方程^[4]。

连续性方程

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0$$

动量方程

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \nu_{\text{eff}} \left[\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right] \right\}$$

能量方程

$$\frac{\partial(\rho u T)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v T)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w T)}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{k}{c_p} \frac{\partial T}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\frac{k}{c_p} \frac{\partial T}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\frac{k}{c_p} \frac{\partial T}{\partial z} \right] + S_T$$

式中: u 为流速; p 为压力; ν_{eff} 为湍流有效黏性系数; T 为温度; k 为流体的传热系数; c_p 为比热容, S_T 为黏性耗散项。

1.2 模型的建立

分别采用 SAE 推荐的三个标准汽车模型^[5]作为研究对象(如图 1 所示)。它们的头部、正投影面积等都相等,仅尾部不同。

计算方案分为三种:方案 A(阶背式)、方案 B(快背式)、方案 C(直背式)。

方案 A 首先研究了单辆阶背式轿车的气动特性,并将其模拟结果与风洞试验结果进行对比,以验证模拟的准确性。然后研究了 5 辆阶背式轿车组成的队列分别在 6 种(0.25L, 0.5L, 0.75L,

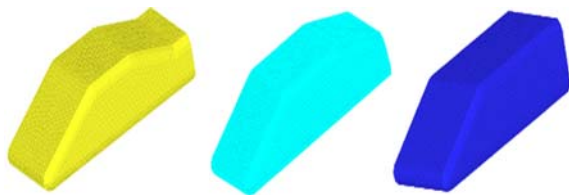


图 1 三个 SAE 模型

Fig. 1 Three SAE models

$L, 1.5L, 2L, L$ 为一倍车长)纵向间距下等距行驶时的气动特性。方案 B、C 与方案 A 一样,分别研究了快背式和直背式轿车的单车气动特性和 5 车队列的气动特性。利用 CAD 软件分别建立 21 种情况下的几何模型。采用的长方体计算域如下:入口至第一辆车前部为 2 倍车长,出口至最后一辆车尾部为 6 倍车长,侧面到车的两侧均为 3 倍车宽,顶部至车顶为 4 倍车高。

1.3 网格划分

先进行网格划分,再采用数值模拟方法求解得到的离散方程组。单车周围流场的网格划分采用“四面体+三棱柱+六面体”的混合网格方法,如图 2 所示。考虑到求解对象为多辆汽车组成的队列车,所以将单辆车的网格向前后作周期性变化,生成周期性网格^[6],如图 3 所示。混合网格技术和周期性网格的应用大大减少了网格划分时间,同时又能保证每辆车周围网格的一致性和质量,便于进行高效率的求解。

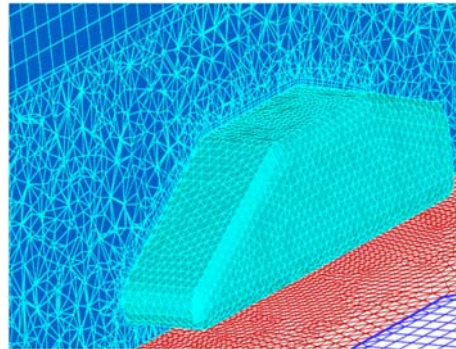


图 2 单车的网格划分

Fig. 2 Grid generation of single car

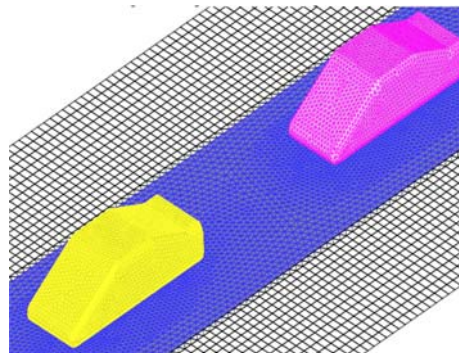


图 3 队列行驶车辆的网格划分

Fig. 3 Grid generation of platoon vehicles

1.4 计算边界条件的设置

计算区域的入口速度 $v = 25 \text{ m/s}$; 出口压力为标准大气压;地面采用移动壁面,壁面移动速度

为 $v=25\text{ m/s}$,以模拟地面效应;顶面和侧面采用静止壁面边界条件。

1.5 湍流模型及差分格式

选用 RNG $k-\epsilon$ 湍流模型,它使用壁面函数与高雷诺数组成的方程组,能够更精确地模拟车身表面的边界层。对流项的离散格式选用二阶迎风格式,流场计算方法选用了求解力强、计算耗时少的 SIMPLE 算法。

2 计算结果

2.1 模拟值与试验值的比较

先对单辆阶背式轿车的外流场进行数值模拟。阻力系数、升力系数、横摆力矩系数的模拟值分别为 0.2774、0.1625、 -0.0518 ;实验值分别为 0.269、0.156、 -0.055 ^[7]。可以看出,计算模拟出的阻力系数、升力系数和横摆力矩系数都与试验值基本吻合,相对误差都在 8% 以内,验证了该模拟方法的精度。

2.2 汽车外形对队列行驶车辆气动特性的影响

为了更好地描述队列行驶的节油特性,将队列的平均减阻率 D_R 定义如下

$$D_R = (C_{D\infty} - C_{D_{\text{average}}}) / C_{D\infty} = 1 - \frac{1}{n} \sum (C_{D_i} / C_{D\infty})$$

式中: $C_{D_{\text{average}}}$ 表示队列的平均阻力系数; $C_{D\infty}$ 表示相应单车的阻力系数; i 表示队列中的第 i 辆车; n 表示队列中车辆的数目。

图 4 给出了阶背式、快背式和直背式轿车 5 车队列的平均减阻率 D_R 与车辆之间纵向间距的关系。纵向间距 x 指的是从前一辆车的后缘到后一辆车的前缘之间的距离。图中横坐标表示车辆纵向间距 x 与车长 L 之间的比值,纵坐标表示队列的平均减阻率 D_R 。

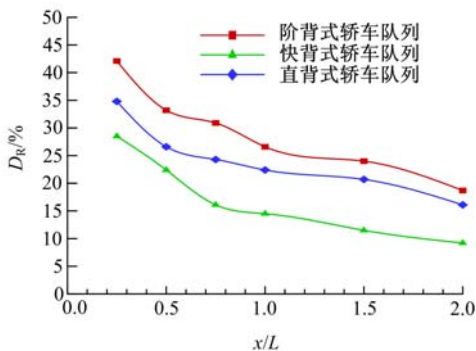


图 4 三种车型 5 车队列的减阻率比较

Fig. 4 Comparison of drag reduction ratio of three vehicle-shape 5-vehicle platoons

由图 4 可以看出:在 $0\sim 2L$ 的间距内,3 种车型队列的平均减阻率大约为 10%~40%。根据轿车气动阻力与燃油经济性的关系^[8],阻力系数降低 10%~40%,在混合循环工况下可节省燃油 5%~20%。可见队列行驶可以明显降低油耗,减少废气排放。很显然,阶背式轿车队列的平均减阻率最大,直背式次之,快背式最小。下面分别对这 3 种车型的队列行驶气动特性进行分析。

为了便于比较,将队列中每辆车的阻力系数进行标准化,即用每辆车的实际阻力系数 C_D 除以相应单车的阻力系数 $C_{D\infty}$,这里仍然简称阻力系数。图 5~图 7 分别给出了阶背式、快背式和

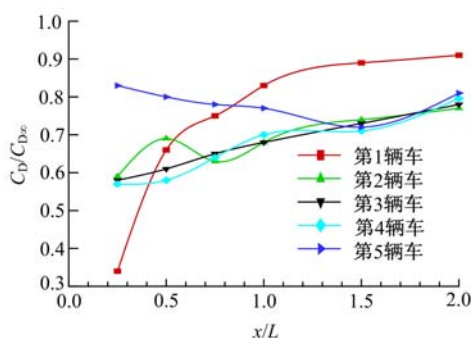


图 5 阶背式轿车 5 车队列的阻力系数

Fig. 5 Drag coefficient of notchback car 5-vehicle platoon

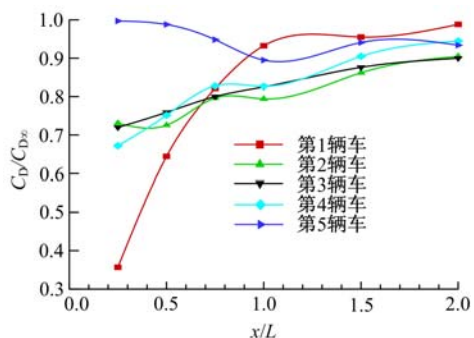


图 6 快背式轿车 5 车队列的阻力系数

Fig. 6 Drag coefficient of fastback car 5-vehicle platoon

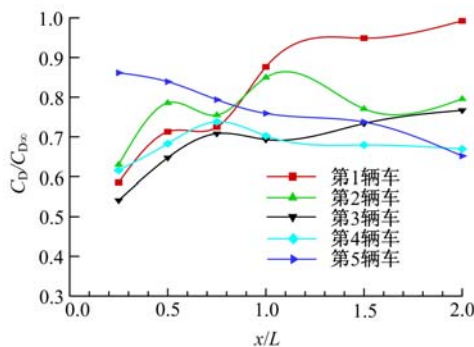


图 7 直背式轿车 5 车队列的阻力系数

Fig. 7 Drag coefficient of squareback car 5-vehicle platoon

直背式轿车 5 车队列中每辆车的阻力系数随纵向间距变化的情况。

由图 5~图 7 可以看出,这 3 种不同车型队列中每辆车的阻力系数与其在队列中的位置密切相关。在纵向间距为 0~2L 时,队列中第一辆车和中间车辆的阻力系数都随间距的减小而下降,第一辆车阻力系数下降最多,而队列中最后一辆车的阻力系数随着间距的减小而增大。由计算结果可以得出:在这 3 种不同车型的队列中,内部车辆在 0~2L 纵向间距下的阻力系数平均值都是最低的。阶背式轿车队列和直背式轿车队列中内部车辆的平均阻力系数能降低 30%左右,快背式轿车队列中内部车辆的平均阻力系数能降低 20%左右,相应地能比单车行驶节省燃油 15%~10%左右。这与前人对小型货车队列进行的风洞试验结果一致[1]。

图 8~图 10 分别给出了阶背式、快背式和直背式轿车 5 车队列的实际升力系数 C_L 随车辆纵向间距变化的情况。

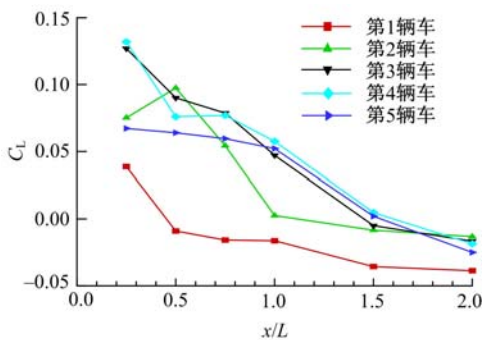


图 8 阶背式轿车 5 车队列的升力系数

Fig. 8 Lift coefficient of notchback car 5-vehicle platoon

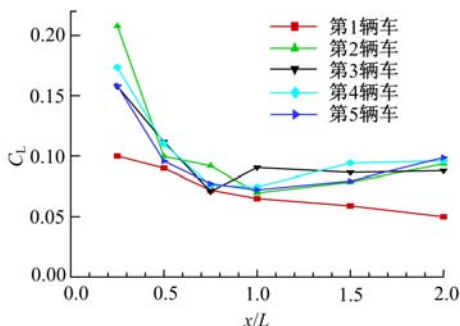


图 9 快背式轿车 5 车队列的升力系数

Fig. 9 Lift coefficient of fastback car 5-vehicle platoon

由图 8~图 10 可见,随着纵向间距的减小,这 3 种不同车型队列中,每辆车的升力系数都增大,稳定性都变差,尤其是在 0~L 间距内,随着间距的减小,升力系数急剧增大,车辆的附着性能

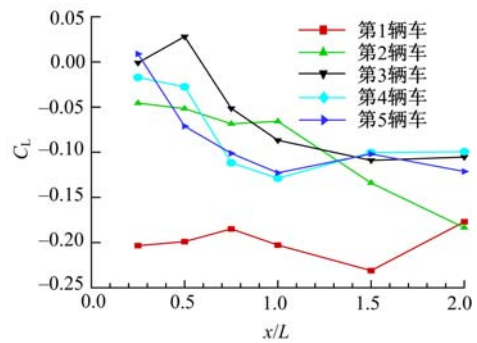


图 10 直背式轿车 5 车队列的升力系数

Fig. 10 Lift coefficient of squareback car 5-vehicle platoon

迅速下降,此时必须谨慎驾驶,以保证操纵稳定性。而队列中第一辆车的升力始终为最低值,可见其稳定性最好。另外,快背式轿车队列的升力系数始终为正值,而直背式轿车队列的升力系数基本为负值,可见直背式轿车队列的稳定性最好,阶背式队列次之,而快背式队列稳定性最差。

由以上分析可以发现,由于汽车形状不同,队列行驶的气动特性有很大差异。原因在于这 3 种车型的尾部结构不同。下面从这 3 种车型队列行驶时的压力分布和尾流结构图来进行解释。

以阶背式轿车为例,比较其单车的尾流结构(如图 11 所示)与队列中任意一辆车的尾流结构(如图 12 所示)来揭示队列行驶减阻的机理。因为汽车的尾涡是产生压差阻力的主要原因。由图 11 可以看出,阶背式轿车单车的尾流中包含两个上下反转涡对,下涡逆时针旋转,上涡顺时针旋转。由图 12 可以看出,阶背式轿车队列中车辆的两个尾涡合为一体,而且尾涡中央断面积大大减小,由于尾涡中央断面积的大小与气动阻力系数大小密切相关[8],故队列中车辆的气动阻力系数大大降低。

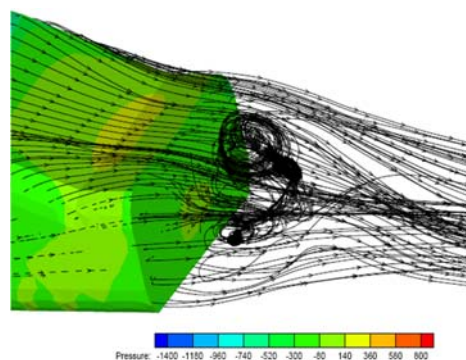


图 11 阶背式轿车单车的尾流结构

Fig. 11 Wake structure of notchback car

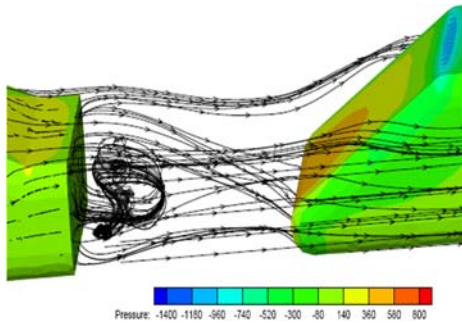


图 12 阶背式轿车队列的尾流结构

Fig. 12 Wake structure of notchback car platoon

比较图 12、13 和 14 可以看出,这 3 种车型的尾流结构各不相同。由图 13 可以看出,快背式车来自顶盖前端的气流与侧面气流混合,流向车身尾部,这股气流在后柱附近开始分离,形成了上下两个反转涡对,上涡的强度大,下涡的强度小。由图 14 可以看出,直背式车的尾流结构特点是其气流分离严重,尾流中有上下两个反转涡对,而且两个尾涡强度都较大,所以其实际阻力系数高于其他两种车型。

由以上分析可知,当车辆之间纵向间距较小

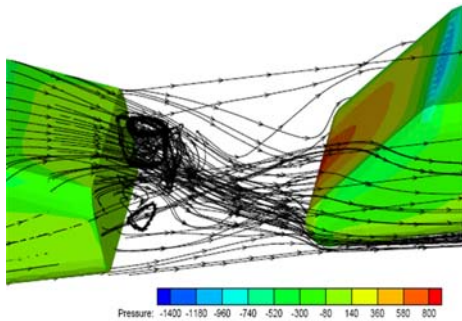


图 13 快背式轿车队列的尾流结构

Fig. 13 Wake structure of fastback car platoon

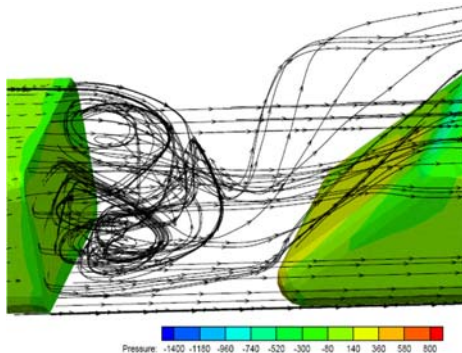


图 14 直背式轿车队列的尾流结构

Fig. 14 Wake structure of squareback car platoon

时,汽车外形在车辆减阻方面扮演着重要的角色。所以在智能控制不同外形的车队时,需要采用不同的控制策略,优化车间距离,以获得最小的燃油消耗和行驶安全性。

3 结 论

(1)智能交通系统中,在 $0 \sim 2L$ 的间距内,三种车型队列的平均减阻率大约为 $10\% \sim 40\%$,可节省燃油 $5\% \sim 20\%$,可见队列行驶可以明显降低油耗,减少废气排放。

(2)阶背式轿车队列的平均减阻率最大,直背式次之,快背式最小。在纵向间距为 $0 \sim 2L$ 时,队列中前四辆车的阻力系数都随间距的减小而下降,第一辆车阻力系数下降最多,而最后一辆车的阻力系数随着间距的减小而增大。

(3)随着纵向间距的减小,队列中每辆车的升力都增大,稳定性都变差。

参考文献:

- [1] Zabat Michael, Frascaroli Stefano, Browand F K. Drag measurements on 2, 3 and 4 car platoons[C]// SAE Paper 940421.
- [2] Zabat Michael, Stabile Nick, Frascaroli Stefano, et al. Drag forces experienced by 2, 3 and 4-vehicle platoons at close spacings[C]// SAE Paper 950632.
- [3] Michaelian Mark, Browand Fred. Quantifying platoon fuel savings: 1999 field experiments[C]// SAE Paper, 2001-01-1268.
- [4] 王福军. 计算流体动力学分析——CFD 软件原理与应用[M]. 北京:清华大学出版社,2004.
- [5] Road Vehicle Aerodynamics Forum Committee. Aerodynamic testing of road vehicles in open jet wind tunnels[S]. SAE Standards, J2071 (Open Throat Wind Tunnel Adjustments), 1997.
- [6] 傅立敏,吴允柱,贺宝琴. 队列行驶车辆的空气动力学特性[J]. 吉林大学学报:工学版,2006,36(6):871-875.
Fu Li-min, Wu Yun-zhu, He Bao-qin. Aerodynamic characteristics of vehicle platoon[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2006,36(6):871-875.
- [7] Cogotti Antonello. A parametric study on the ground effect of a simplified car model[C]// SAE Paper 980031.
- [8] 傅立敏. 汽车空气动力学[M]. 北京:机械工业出版社,1998.