

# 纵向间距对汽车三车队列气动阻力的影响

王德华<sup>1,2</sup>, 夏超<sup>1,2</sup>, 贾青<sup>1,2</sup>, 鄢功杰<sup>1,2</sup>, 杨志刚<sup>1,2,3</sup>

(1. 同济大学汽车学院, 上海 201804; 2. 同济大学上海地面交通工具风洞中心, 上海 201804; 3. 北京民用飞机技术研究中心, 北京 102211)

**摘要:** 以MIRA标准车型组(方背车S、快背车F和阶背车N)为研究对象,采用数值模拟研究纵向间距(0.1 L~1.0 L)统编(队列各车为同种车型)三车队列气动阻力的影响,并通过各部位压差阻力和流场分析,探究队列阻力变化的原因。结果表明:对于3种统编队列,整个队列的减阻量均是随着间距增大而不断减小,其中头车减阻量最大,其次是中车和尾车;头车减阻基本都随着间距增大而不断减小,归因于垂直尾部和后风窗背压回升的不断减弱;中车的方背车减阻量随着间距增大而逐渐减小,其他两车型均是在0.1 L~0.2 L减阻量大幅减小,随后基本保持较低减阻量不变;尾车的方背车减阻量同样随着间距增大而逐渐减小,在0.5 L后出现增阻,其他两车型减阻量基本较低并保持不变或有所增阻。以上阻力变化主要归因于不同间距下的尾迹低速流场改变导致的背压回升,以及前脸正压减弱、前缘圆角和A柱吸力减弱等的综合作用所致。

**关键词:** 汽车队列行驶;气动减阻;MIRA车型组;尾迹

**中图分类号:** U461

**文献标志码:** A

## Effects of Longitudinal Spacing on 3-Vehicle Platooning Aerodynamic Drag

WANG Dehua<sup>1,2</sup>, XIA Chao<sup>1,2</sup>, JIA Qing<sup>1,2</sup>, YAN Gongjie<sup>1,2</sup>, YANG Zhigang<sup>1,2,3</sup>

(1. School of Automotive Studies, Tongji University, Shanghai, 201804, China; 2. Shanghai Automotive Wind Tunnel Center, Tongji University, Shanghai, 201804, China; 3. Beijing Aeronautical Science & Technology Research Institute, Beijing 102211, China)

**Abstract:** Based on the MIRA model group of full scale (squareback S, fastback F and notchback N), numerical simulations are done to investigate the effect of longitudinal spacing (0.1-1L) on the uniform (vehicles in the platoon are the same) and ununiform (vehicles in the platoon are varied) three car platoon aerodynamic drag. Analyses of drag variation are conducted by pressure drag

and flow field. The results indicate that the drag reduction of the three uniform platoons diminishes with increased spacing. The drag reduction of the head car dwindles basically with increased spacing, which is owing to the drop of backpressure recovery on the vertical base and rear window. The drag reduction of squareback middle car declines gradually with increased spacing, that of other two configurations plunge rapidly in the spacing of 0.1-0.2L, then keep a low drag reduction. The drag reduction of squareback tail car also declines gradually with increased spacing, and experiences drag increase at the spacing 0.5L, other two configurations basically keep a low drag reduction or increase. the drag reduction of the three ununiform platoons also diminishes with increased spacing. The drag variations above are mainly resulted from the comprehensive effects of backpressure recovery, the impairing of positive pressure on the front face and the crippling of negative pressure on the A-pillar and so on.

**Keywords:** vehicles platooning; aerodynamic drag reduction; MIRA model group; wake

随着5G快速通信技术和汽车自动驾驶技术的到来,汽车队列行驶已成为可能。之前的研究已表明汽车队列行驶具有大幅减少气动阻力的潜力。纵向间距对于汽车队列行驶是一个很重要的因素,当间距大于一定距离时,就等同于单车行驶时的状态。当安全条件满足的情况下,间距越小,后车越处于前车的尾流当中,前后车的流场相互作用更强,队列各车的阻力变化也是更复杂。

Pagliarella等<sup>[1][2]</sup>用Ahmed body组成两车队列进行间距研究,发现当间距超过2倍车长时,各车和单车的阻力是一样的,要取得车列净减阻较好的效

收稿日期: 2023-11-29

基金项目: 国家重点研发计划(2022YFE0208000);上海市地面交通工具空气动力与热环境模拟重点实验室(23DZ2229029);中央高校基本科研业务费专项资金资助

第一作者: 王德华(1999—),男,硕士研究生,主要研究方向为车辆空气动力学。E-mail: 2231583@tongji.edu.cn

通信作者: 夏超(1988—),男,硕士生导师,工学博士,主要研究方向为车辆空气动力学。E-mail: chao.xia@tongji.edu.cn

果,间距需在 0.5 倍车长以下。米珂<sup>[3]</sup>对 Ahmed body 组成的三车队列进行研究发现,在无侧风和有侧风工况中,纵向间距始终是影响阻力系数的最显著因素。Matthew 和 Raja 等<sup>[4]</sup>通过数值模拟研究发现,当间距从 9 m 减到 5 m 时,三车统编卡车车列减阻进一步增加,但同时后面两车的冷却气流也进一步减少,风扇工作时间也更长,有可能会抵消掉由于间距减少的燃油消耗。Kambiz 等<sup>[5]</sup>发现卡车队列发动机冷却气流会随着间距减小而减少,并且在三车队列时,前面两车之间的间距对第 3 车的影响不大,偏置对尾车几乎也没有影响。傅立敏等<sup>[6]</sup>用 SAE 阶梯背模型组成队列研究发现,队列的阻力值会随着间距的缩短而降低;在固定间距下,随着队列行驶车辆数目的增加,每辆车的阻力系数都降低。王靖宇等<sup>[7]</sup>通过数值模拟发现,队列行驶 3 辆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小。贺宝琴等<sup>[8-9]</sup>借助数值模拟研究不同汽车外形对汽车队列行驶的阻力影响,发现虽然不同队列的尾流结构不一样,但它们的减阻机理是一样的。仇健等<sup>[10]</sup>通过 PIV 测量发现,队列行驶的领航车辆行驶时阻力系数减小主要是由于车间距的减小导致尾部的流场在 X 方向上拖曳的距离逐渐变短,且尾部涡的强度也逐渐变小。杨志发等<sup>[11]</sup>用阶背、快背和直背式 DrivAer 模型数值模拟研究了 1 倍车长间距下的两车统编队列,发现队列综合减阻效果最好的是直背式两车队列,其次是阶背式队列和快背式队列。杨志刚等<sup>[12]</sup>用 3 种 MIRA 汽车车型(方背车、快背车和阶背车)在一倍车长间距下组成 27 种编队形式研究车型对减阻的影响,发现三车队列最佳编队形式是快背头车一方背中车一方背尾车,减阻量可达 0.12(120 counts)。Armagan 等<sup>[13]</sup>用 1:5 的 Fiat linea 模型进行研究,发现头车在 0、0.5、1.0

倍车长间距都能减阻,但尾车在 0 和 0.5 倍间距都是增阻,原因是前车行李箱的边界层分离导致了尾车前面更低的逆压梯度,使得边界层分离面积增大,从而增加了尾车的阻力。McAuliffe 等<sup>[14]</sup>研究了相邻车道接近车辆对阻力的影响,发现相邻车道接近车辆可以增加或减少车辆的阻力,当轻型车辆并排或重型车辆后端与另一辆车重合时,阻力增加的影响最为显著。

综上可知,汽车队列间距越小,队列整体减阻越多,但队列单车的阻力并非随间距减小而单调减小,有时甚至出现增阻。虽然关于汽车队列纵向间距的研究已有一定的结论,但间距对队列各车细分部位阻力的影响还鲜有研究;小间距下减阻量大,但由于车间流场较复杂,减阻机理还未明确,某些间距下出现增阻的原因尚不清楚;同时考虑车型和间距耦合影响的研究也还较少。针对上述不足,本文以快背(F)、阶背(N)和方背(S)这 3 种 MIRA 车型为研究对象,在之前 1 L 间距研究<sup>[12]</sup>的基础上,采用数值模拟进一步研究 10 种不同纵向间距(0.1 L~1.0 L)对三车统编队列整体气动阻力以及队列各车各个细分部位的气动阻力的影响,并通过流场详细分析其阻力变化原因。

## 1 计算模型及设置

### 1.1 汽车模型

本研究对象为 MIRA 1:1 阶背、快背和方背模型,尺寸(长  $L$ ×宽  $W$ ×高  $H$ )为 4 165 mm×1 625 mm×1 421 mm,3 种模型只是尾部的结构不同,其它部位都是相同的,模型的三维效果图如图 1 所示。这些模型被学者广泛用于汽车空气动力学研究<sup>[15-19]</sup>,并有可靠的实验数据用于数值计算方法的验证。

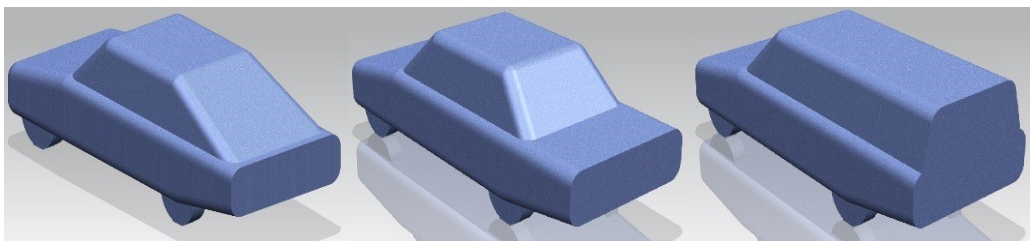


图1 MIRA 模型组(快背F,阶背N,方背S)

Fig.1 MIRA model group (fastback F, notchback N and squareback S)

### 1.2 数值模拟设置及单车结果

本文采用基于雷诺平均方法的不可压缩分离式求解器,模型选用 Realizable  $k-\epsilon$  (RKE)湍流模型,

单车计算域如图 2 所示,其尺寸为  $10 L \times 10 W \times 5 H$ ,速度入口与汽车前脸距离为  $3 L$ ,出口与车尾垂直背部距离为  $6 L$ ,模型阻塞比为 2.2%。队列计算

域与单车类似,即速度入口与前车前脸距离为  $3L$ ,出口与尾车垂直背部距离为  $6L$ ,计算域总长度随着队列间距的变化而变化。边界条件指定如下:入口为速度入口( $U_{\infty}=120\text{ km/h}$ ),出口为压力出口,地面和车体表面为无滑移壁面边界,其他边界为对称边界条件。

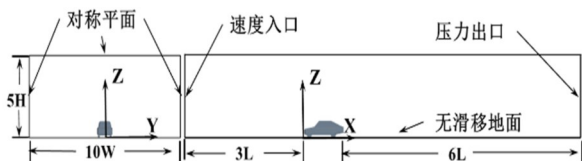


图2 单车计算域和边界条件

Fig.2 The computational domain and boundary conditions of a single vehicle

体网格采用切割体网格,保证核心区网格为六面体网格,边界层网格总共5层,总厚度为  $7.4\text{ mm}$ ,第一层边界层  $30 < y^+ < 60$ ,到壁面的距离为  $1\text{ mm}$ ,数值仿真的雷诺数为  $9.19 \times 10^6$  (基于入口速度和车长)。

### 1.3 网格无关性

前期对三车队列的网格无关性进行了研究<sup>[12]</sup>,选取了网格数分别为1 700万、3 500万和5 400万的3种网格方案。对3套网格模型进行仿真计算,得到队列各车的气动阻力系数  $C_d$ ,其定义如公式(1)所示:

$$C_d = \frac{F_d}{0.5 \rho_{\infty} U_{\infty}^2 A} \quad (1)$$

式中:  $F_d$  为空气阻力,单位 N;  $\rho_{\infty}$  为空气密度,单位  $\text{kg/m}^3$ ;  $U_{\infty}$  为来流速度,单位  $\text{m/s}$ ;  $A$  为正向投影面积,单位  $\text{m}^2$ 。计算结果表明:随体网格数的增多,队列中方背车和快背车的  $C_d$  值在网格数达到 3 488 万后基本保持不变,分别稳定在 0.300 和 0.284 左右;3 套体网格数下,阶背车的  $C_d$  值误差在 3% 以下;而队列整体的  $C_d$  值误差在 1% 左右。因此兼顾计算的经济性和结果的准确性,最终选取网格总数在 3 488 万的网格方案,如图 3 所示。

## 2 风洞实验验证

由于实验条件限制,全尺寸的三车队列实验目前无法在风洞中实现,所以本研究只进行了单车实验验证,单车数值计算设置与上文所述队列数值计算设置相同。方背车模型的实验数据沿用前人实验

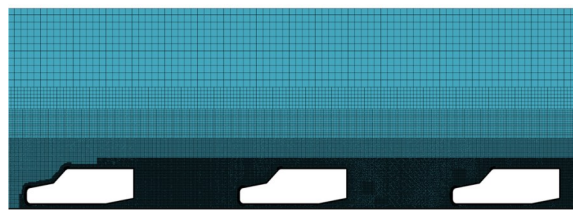


图3 队列中截面网格

Fig.3 The mesh in the middle cross-section of the platoon

得到的<sup>[20]</sup>,阶背车和快背车模型的气动实验<sup>[16]</sup>在上海地面交通工具风洞中心气动声学整车风洞完成。单车  $C_d$  计算结果与风洞实验对比显示,3种单车计算和实验误差均在 3% 以内(具体结果参见之前的研究<sup>[12]</sup>),验证了数值计算方法的可靠性。

## 3 统编队列气动结果分析

### 3.1 各车细分部位

为了更全面地分析队列中各车阻力系数的变化,将3种模型划分出不同的子部件以便观察各部位阻力的变化。3种模型除了尾部的划分方法不一样外,其它区域的结构划分都相同,如图 4 所示。方背车共分成包括前脸、围绕前脸四周的前缘圆角、引擎盖、挡风玻璃、A 柱、车顶、车两侧、前轮、后轮、底盘和垂直尾部等 11 个子部件,而快背车和阶背车还包括 C 柱、后风窗、行李箱盖,共分为 14 个子部件。

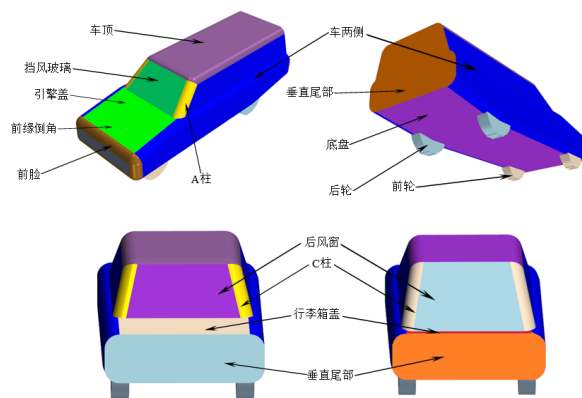


图4 MIRA 模型拆解部件

Fig.4 Division of the components of MIRA vehicle model

本文的气动阻力分析是基于单车或队列整体阻力系数的变化量  $\Delta C_d$  来进行的,其定义如下:

$$\Delta C_d = C_{d\text{队列各车}} - C_{d\text{单车}} \quad (2)$$



### 3.2 S1-S2-S3队列气动分析

图5展示了 $0.1L \sim 1L$ 间距内方背统编队列的阻力系数的变化量。从图中可以看到:随着间距的增大,头车S1的减阻量在 $0.1L \sim 1.0L$ 先增加,然后呈递减趋势;中车S2的减阻量在 $0.1L$ 时比头车要大,约为0.17,在 $0.2L \sim 1.0L$ 内的减阻量都比头车要小,且随着间距的增大,呈现递减趋势;而尾车S3在 $0.1L \sim 0.4L$ 都是减阻的,最大减阻量约为0.125,且减阻量随着间距的增大不断减少, $0.4L$ 以后都是增阻的;队列整体最大减阻量是0.43,且随着间距的增大不断减少。

图6展示了各车细分部件减阻量的结果。从图6(a)可以看到,头车S1上主要是后轮、底盘和垂直背部3个部分的阻力发生了明显的变化,最大减阻量分别为0.016、0.036、0.119。随着间距的增大,后轮、底盘的减阻量递减,而垂直背部在 $0.1L \sim 0.3L$ 间距内,减阻量递增,在 $0.3L \sim 1.0L$ 递减,垂直背部的变化趋势与图5中S1整体减阻量曲线相似,说明垂直背部是S1减阻中起主要作用的部件,S1的减阻

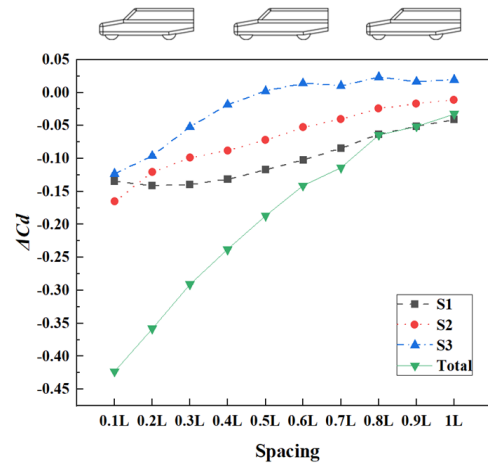


图5 间距对方背统编三车队列减阻的影响(负号表示相对单车为减阻,正号表示增阻)

Fig.5 The effect of inter-vehicle distance on the drag coefficient of the squareback 3-vehicle uniform platoons

主要依赖后车的阻塞作用引起的背压回升,间距对其的影响主要体现在后部。

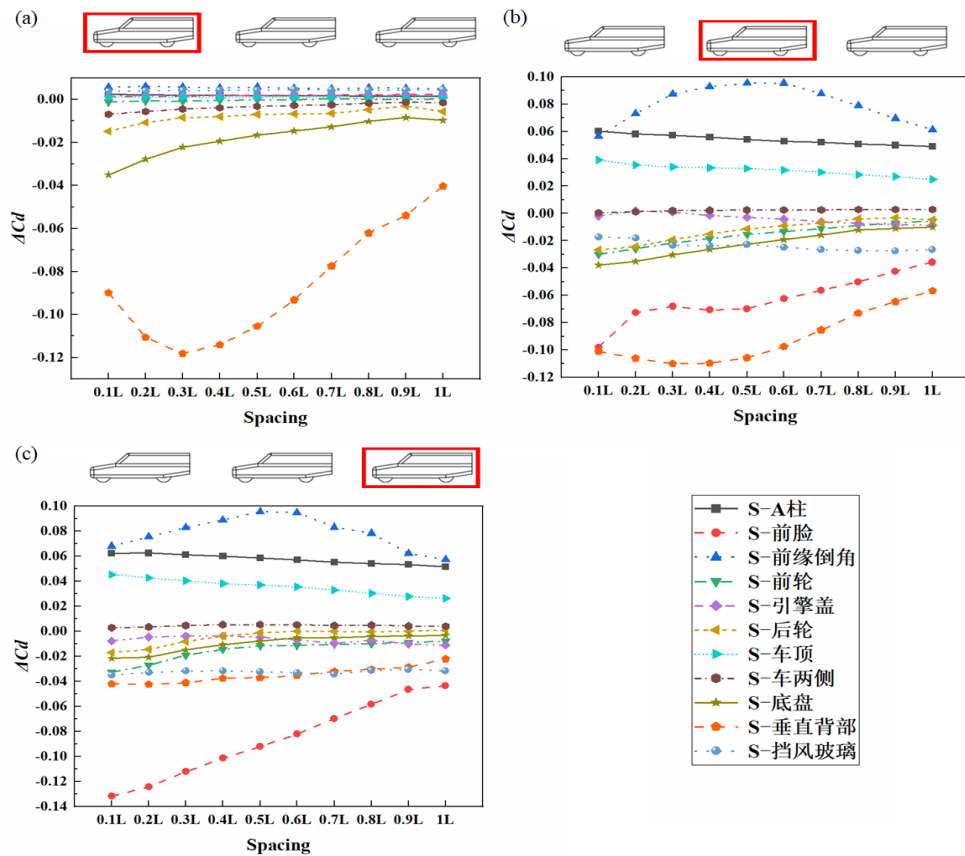


图6 间距对方背统编三车队列各车不同部位压差阻力系数的影响:(a)头车S1;(b)中车S2;(c)尾车S3

Fig.6 The effect of inter-vehicle distance on the the pressure  $C_a$  of different parts in each member of the squareback 3-vehicle uniform platoons: (a) leading vehicle S1; (b) middle vehicle S2; (c) trailing vehicle S3

从图6(b)可以看到,中车S2上各部件阻力有增有减。A柱、车顶和前缘圆角出现了增阻,随着间距的增大,A柱和车顶的增阻量缓慢减小,而前缘圆角的增阻量先增加后减少;减阻的部件有引擎盖、后轮、前轮、底盘、挡风玻璃、前脸和垂直尾部,随着间距增加,引擎盖、挡风玻璃的减阻量增加,前轮、后轮和底盘的减阻量缓慢减少;S2垂直背部减阻最多、减阻量最大,约为0.11,变化趋势与S1类似,即先增加后减少;前脸的减阻量也较多,最大值约为0.098,在 $0.1L\sim 0.2L$ 锐减,随后继续减少但趋势变缓。S2的阻力变化是各部件减阻与增阻相互抵消的结果,间距对其各部件都有影响。

从图6(c)可以看到,尾车S3的A柱、车顶和前缘圆角都是增阻的,变化趋势与S2相似;前轮、后轮和底盘的减阻量先缓慢减少,在 $0.5L$ 后趋于稳定;挡风玻璃和引擎盖的减阻量基本不随间距变化;垂直背部的减阻量比S1和S2少,且随着间距增加单调、缓慢递减;前脸减阻最多,减阻量最大约为0.131,随间距递减。间距对S3的影响主要体现在前部,对后部影响不大。值得注意的一点是,S3在 $0.5L$ 后增阻,这是因为此时大部分减阻部件的变化已经趋缓,而前脸减阻量不足以抵消A柱、车顶和前缘圆角的增阻。

图7展示了方背统编三车队列各车的前部和后部车身压力分布随间距的变化。从S1前部压力云图来看,随着间距的变化,各部分压力是不变的;从S1尾部压力云图可以看出, $0.1L\sim 0.3L$ 间距内,背压在不断升高,主要是上部高压区压力升高,面积增大,下部是低压区,但 $0.1L$ 间距时后轮压力明显较高。从图8中截面的速度场分布来看,上述现象的原因可能是 $0.1L$ 时间距太小,S1背部的大涡没有完全形成,背部四周的剪切层难以完全打在S1的中部而形成大回流区,相比 $0.2L$ 和 $0.3L$ 间距,压力回升更少,此外在较小间距下,由于S2的前缘圆角受S1车底的上洗气流影响,产生更大的加速区,影响到了S1的背部,故背压先升高,随着间距的进一步增加,背部的大涡能够完全发展,后车前缘圆角的影响减小,间距对背压回升的影响又占主导,故垂直背部的压力逐渐变小。

S2的背压与S1背压变化类似,原因也类似,只是由于头车的阻塞作用,中车的尾部气流速度降低,这种变化的趋势更小。从S2前部的压力云图来看,前缘圆角有一个压力升高再降低的过程,从图8的中截面速度场分布可看到,在 $0.1L\sim 0.5L$ 间距内,

S1底部的高速气流,有很大部分流经S2的前缘圆角,随着间距的增大,S2前缘圆角处于这种高速气流的区域变小,造成压力升高,而在 $0.5L\sim 1.0L$ 间距内,S2前缘圆角处于S1底部的高速气流范围之外,但是随着间距的增大,S1屏蔽作用减弱,流经S2前缘圆角的高速气流增加,造成压力降低。S3的前缘圆角也有类似的规律。S3的背压随着间距的增大越来越低,从图8可以看到,随着间距的增大,S2和S3底部气流的速度也在增大,这是因为间距增大,前后车的阻塞效应变小,气流可以更顺畅地流出车间流场。

### 3.3 F1-F2-F3队列气动分析

图9展示了 $0.1L\sim 1L$ 间距内快背统编队列的阻力系数的变化量。从图中可以看到:头车F1的减阻量随着间距的增大急剧减少,在 $0.1L$ 时的最大减阻量是0.182;中车F2在 $0.1L$ 和 $0.2L$ 时有较大的减阻量,在 $0.2L\sim 0.8L$ 之间,减阻量基本稳定在0.005左右,尾车先增阻后减阻,在 $0.6L$ 之后再次转变为增阻,阻力变化量较小;队列整体最大减阻量0.22,随间距增大不断减少。

图10展示了各车细分部件减阻量的结果,从图10(a)可以看到,头车F1上减阻的部件大部分位于后部,主要是后轮、底盘、后风窗、C柱和垂直背部,而行李箱盖基本无影响,这说明F1的减阻主要依赖后车的阻塞作用引起的背压回升,间距对F1的影响主要体现在后部。

从图10(b)可以看到,中车F2上行李箱盖、车两侧和C柱的阻力系数在不同间距下都与单车相差不大;增阻的有A柱、车顶、引擎盖、挡风玻璃和前缘圆角,前缘圆角增阻最多,增阻量最大约为0.125,随间距增加先增加,在 $0.2L$ 后不断减少,而挡风玻璃、引擎盖、A柱和车顶的增阻量缓慢减少;减阻的有后轮、后风窗、前轮、底盘、前脸和垂直背部,其中除后轮的减阻量随间距增大基本不变外,其余部件的减阻量均递减,前脸减阻最多,减阻量最大约为0.09。F2的阻力变化是前部与后部各部件减阻量与增阻量相互抵消的结果,间距对F2前部和背部的部件都有影响。

从图10(c)可以看到,对于尾车F3,其前缘圆角的趋势与中车F2的类似;挡风玻璃、引擎盖、车顶和A柱的增阻量随间距增大缓慢减小;行李箱盖、C柱和车两侧对F3的减阻贡献不大;垂直背部再 $0.1L\sim 0.3L$ 内减阻量约为0,在 $0.4L$ 后减阻量稳定在0.010左右;随着间距的增大,后轮和底盘的减阻量

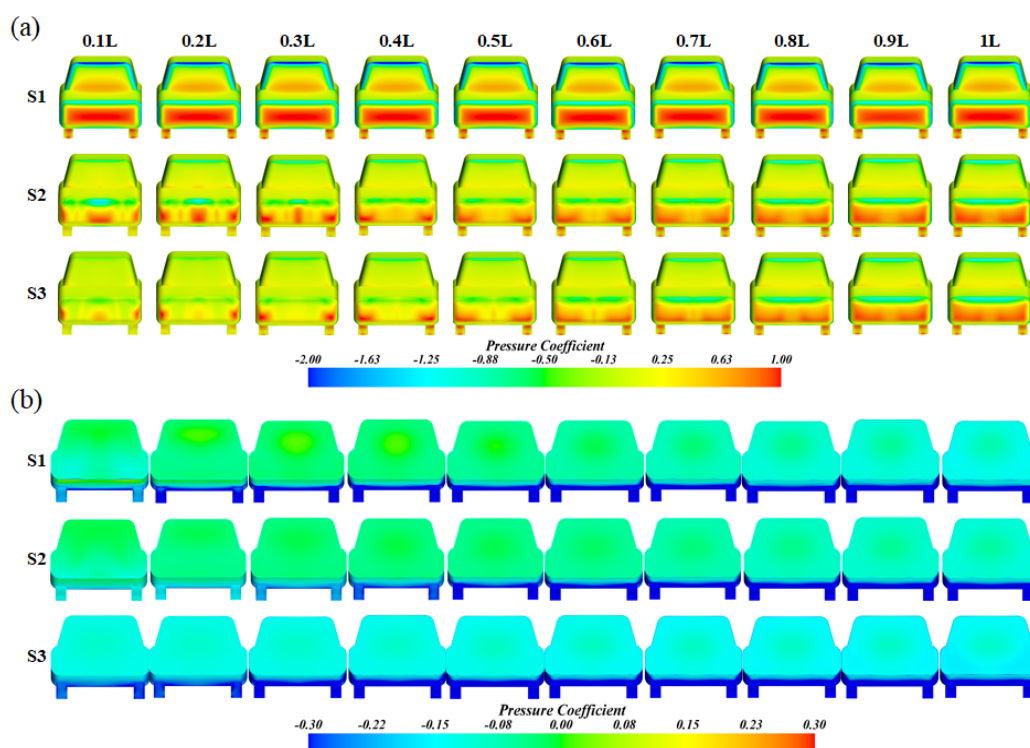


图7 间距对方背统编三车队列车身压力分布的影响:(a)前部;(b)尾部

Fig.7 The effect of inter-vehicle distance on the surface pressure distribution of the squareback 3-vehicle uniform platoons: (a) front; (b) rear

基本不变,而前脸和前轮的减阻量不断减少。这些说明,间距对尾车F3的影响主要是在于前部,对后部的部位影响不是很大。

从图11可以看出,随着间距的增加,F1头部压力几乎不受影响,而垂直背部、后风窗和后轮的压力明显降低。F2头部压力变化较为复杂,从图12的中截面速度场可以看到,0.1L时F1底部的一部分高速气流直接打在F2前脸的下部,来自后风窗的下洗气流直接打在了引擎盖上面;间距增加到0.2L时,更多的底部高速气流打在F2前脸的下部,而来自后风窗的下洗气流则直接打在了前缘圆角上面,从而导致前缘圆角在0.1L~0.2L出现一个压力的升高;间距增加到0.3L时,打在F2前脸下部的车底高速气流变少,而来自后风窗的下洗气流的落点则移到了前缘圆角的前缘,故前缘圆角上的速度加快,增益作用又变大;随着间距的继续增加,落点不断下移直到地面,前缘圆角的速度不断增加,故增阻也越来越少;挡风玻璃和引擎盖的压力也在降低,这是因为间距增大导致F1尾部的下洗气流打在上面的角度越来越小;A柱和车顶增阻量减少,这是因为间距增大后阻塞更小,流经的速度增大;前脸、前轮、垂直背部和底盘由于间距增大,车间流场速度变大,故减阻也

越来越少。从图11看F3的前脸压力变化与F2相似,由于没有尾车存在,背部压力也几乎没有变化。

### 3.4 N1-N2-N3队列气动分析

图13展示了0.1L~1.0L间距内阶背统编队列的阻力系数的变化量。可以看到,头车N1、中车N2以及队列整体减阻量的变化趋势与快背三车队列相似,所不同的只有尾车N3。N3所有间距下都减阻,且减阻量随间距变化不明显。

## 4 结论

本文采用数值模拟方法,研究了10种不同纵向间距(0.1L~1.0L)对3种统编队列(快背、阶背和方背)整体气动阻力以及队列各车各个细分部位的气动阻力的影响,并通过流场详细分析其阻力变化原因,得到的主要结论如下:

(1) 3种统编队列的减阻量均随间距增大不断减小,方背队列在0.1L间距下减阻量最大,约为0.43;

(2) 3种队列中头车减阻最大,其次是中,尾车,头车减阻基本都随间距增大不断减小,归因于背压回升的不断减弱;



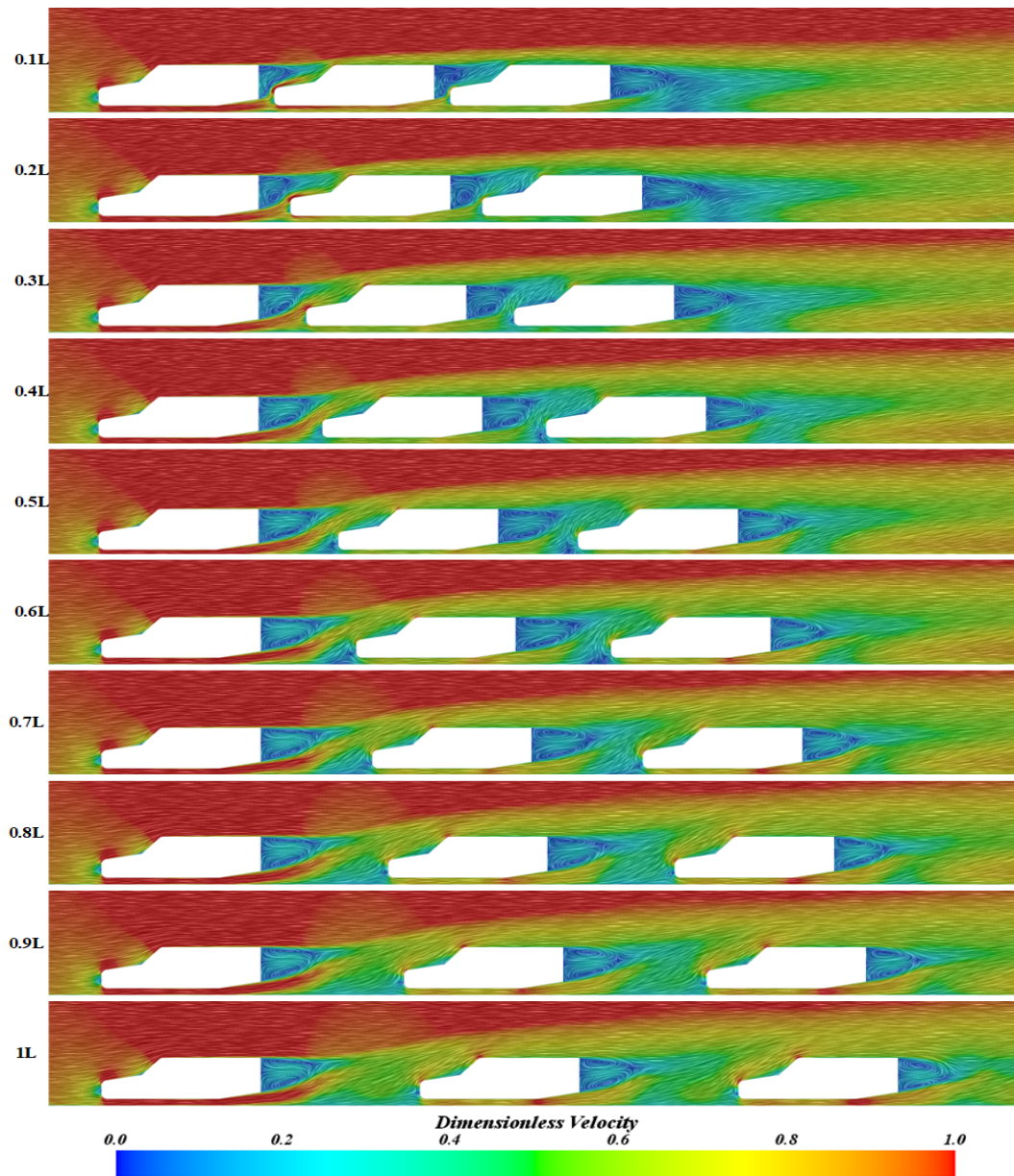


图8 间距对方背统编三车队中截面速度场的影响

Fig.8 The effect of inter-vehicle distance on the mid-section velocity field of the squareback 3-vehicle uniform platoons

(3) 方背统编队列的中车减阻量随间距增大逐渐减小,而快背和阶梯背统编队列的中车均在 $0.1L \sim 0.2L$ 减阻量大幅减小,随后保持较低减阻量不变;

(4) 方背统编队列的尾车减阻量同样随着间距增大逐渐减小,在 $0.5L$ 后出现增阻,其他两车型减阻量基本较低并保持不变或有所增阻;

(5) 以上阻力变化主要归因于不同间距下,尾迹低速流场改变导致的背压回升、前脸等正压减弱、前缘圆角等吸力减弱的综合作用;

(6) 方背车垂直背部的阻力变化转折,归因于

小间距下尾涡的发展不完全和后车前缘圆角的影响,3种车型前缘圆角不同的阻力变化转折,主要归因于前车尾迹的不同。

#### 参考文献:

- [1] PAGLIARELLA R M, WATKINS S, TEMPIA A. Aerodynamic performance of vehicles in platoons: the influence of backlight angles[C]// SAE Technical Paper 2007-01-1547, 2007.
- [2] WATKINS S, VINO G. The effect of vehicle spacing on the aerodynamics of a representative car shape[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2008, 96 (6/7): 1232.

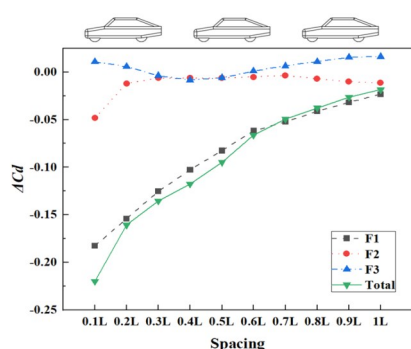


图9 间距对快背统编三车队列减阻的影响(负号表示相对单车是减阻的,正号表示增阻)

Fig.9 The effect of inter-vehicle distance on the drag reduction of the fastback 3-vehicle uniform platoons

[3] 米珂. 汽车队列行驶的气动特性及间距优化研究[D]. 柳州: 广西科技大学, 2022.

MI Ke. Research on aerodynamic characteristics and spacing optimization of vehicle platoon [D]. Liuzhou: Guangxi University of Science and Technology. 2022.

- [4] ELLIS M, GARGOLOFF J, SENGUPTA R. Aerodynamic drag and engine cooling effects on class 8 trucks in platooning configurations[J]. SAE Int J Commer Veh, 2015, 8(2): 732.
- [5] SALARI K, ORTEGA J. Experimental investigation of the aerodynamic benefits of truck platooning[C]// SAE Technical Paper, 2018-01-0732, 2018.
- [6] 傅立敏, 吴允柱, 贺宝琴. 队列行驶车辆的空气动力特性[J]. 吉林大学学报(工学版), 2006, 36(6):871.
- FU Limin, WU Yunzhu, HE Baoqin. Aerodynamic characteristics of vehicle platoon[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology), 2006, 36(6):871.
- [7] 王靖宇, 刘畅, 李胜. 队列行驶三辆汽车外流场的数值模拟[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2007(5):141.
- WANG Jingyu, LIU Chang, LI Sheng. Numerical simulation of flow field around three-car platoon[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Sciences), 2007(5):141.
- [8] 贺宝琴, 吴允柱, 傅立敏. 汽车外形对智能车辆队列行驶气动特性的影响[J]. 吉林大学学报(工学版), 2008, 38(1):7.
- HE Baoqin, WU Yunzhu, FU Limin. Influence of vehicle shape on the aerodynamic characteristics of intelligent vehicle platoon [J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology), 2008, 38(1):7.

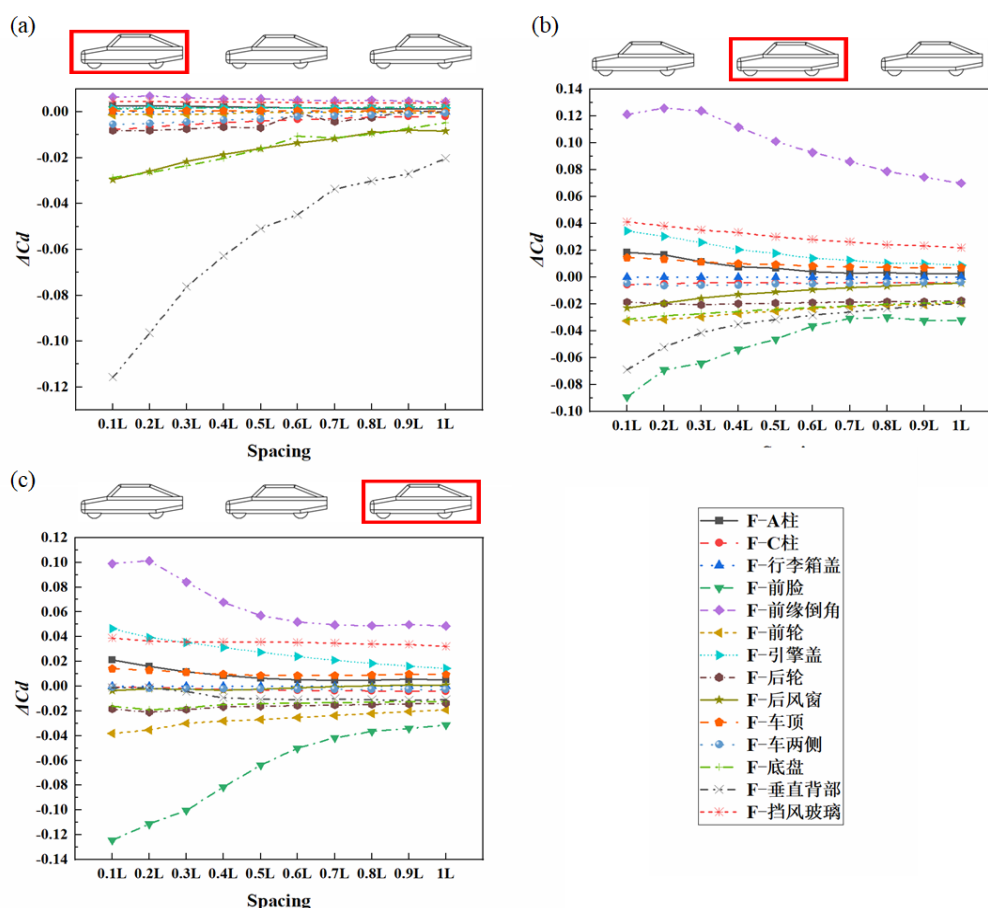


图10 间距对快背统编三车队列各车不同部位压差阻力系数的影响:(a)头车F1;(b)中车F2;(c)尾车F3

Fig.10 The effect of inter-vehicle distance on the the pressure Cd of different parts in each member of the fastback 3-vehicle uniform platoons: (a) leading vehicle F1; (b) middle vehicle F2; (c) trailing vehicle F3



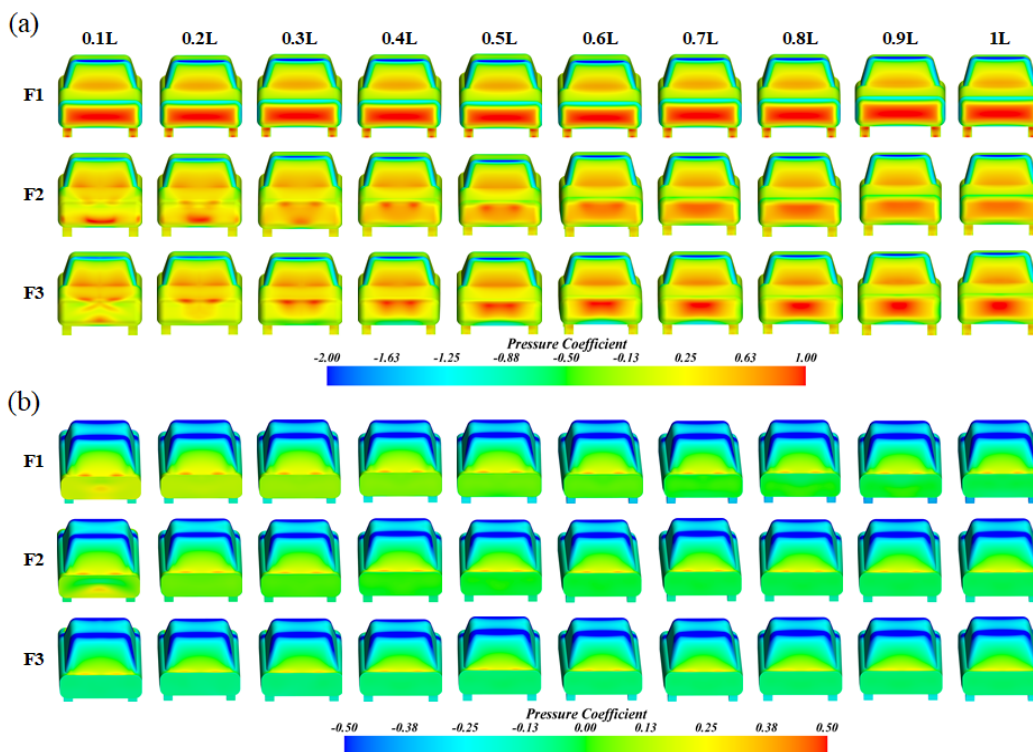


图 11 间距对快背统编三车队列车身压力分布的影响:(a)前部;(b)尾部

Fig.11 The effect of inter-vehicle distance on the surface pressure distribution of the fastback 3-vehicle uniform platoons: (a) front; (b) rear

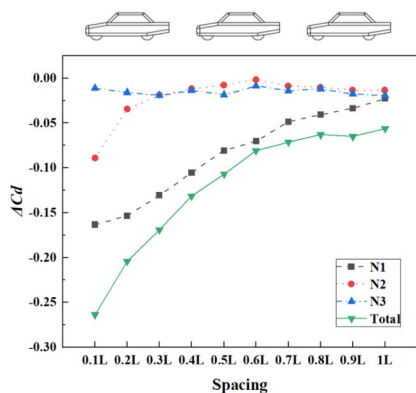


图 13 间距对阶背车统编队列减阻的影响(负号表示相对单车是减阻的,正号表示增阻)

Fig.13 The effect of inter-vehicle distance on the drag reduction of the notchback 3-vehicle uniform platoons (the negative value means drag reduction and the positive value means drag increase)

- [9] 贺宝琴. 汽车队列行驶的气动特性研究[D]. 长春:吉林大学, 2009.  
HE Baoqin. Research on automotive aerodynamic characteristics of platoon[D]. Changchun: Jilin University. 2009.
- [10] 仇健, 谷正气, 王师, 等. 队列行驶领航车辆尾流的粒子图像测速试验研究[J]. 汽车工程, 2011, 33(2):118.

QIU Jian, GU Zhengqi, WANG Shi, *et al.* An experimental study on the wake flow of leading vehicle in platoon driving with PIV Technology[J]. Automotive Engineering, 2011, 33 (2):118.

- [11] YANG Z F, LI S H, LIU A, *et al.* Simulation study on energy saving of passenger car platoons based on DrivAer model [J]. Energy Sources Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects, 2019, 41(24): 3076.
- [12] 杨志刚, 郭婷, 夏超, 等. 汽车车型对三车队行驶气动阻力的影响[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2023(已录用).  
YANG Zhigang, GUO Ting, XIA Chao, *et al.* The effects of vehicle types on three cars platooning aerodynamics[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2023 (accepted).
- [13] ALTINISIK A, YEMENICI O, UMUR H. Aerodynamic analysis of a passenger car at yaw angle and two-vehicle platoon [J]. Journal of Fluids Engineering, 2015, 137(12):121107.
- [14] MCAULIFFE B, BARBER H. Aerodynamic drag of road vehicles in close lateral proximity[C]// SAE Technical Paper 2023-01-0952, 2023.
- [15] 王师. MIRA 模型组气动特性模型风洞试验研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2011.  
WANG Shi. Experimental investigation on aerodynamic characteristics of MIRA model group in wind tunnel [D]. Changsha: Hunan University, 2011.
- [16] 周华. MIRA 车型组气动特性数值计算与试验研究[D]. 上海: 同济大学, 2019.

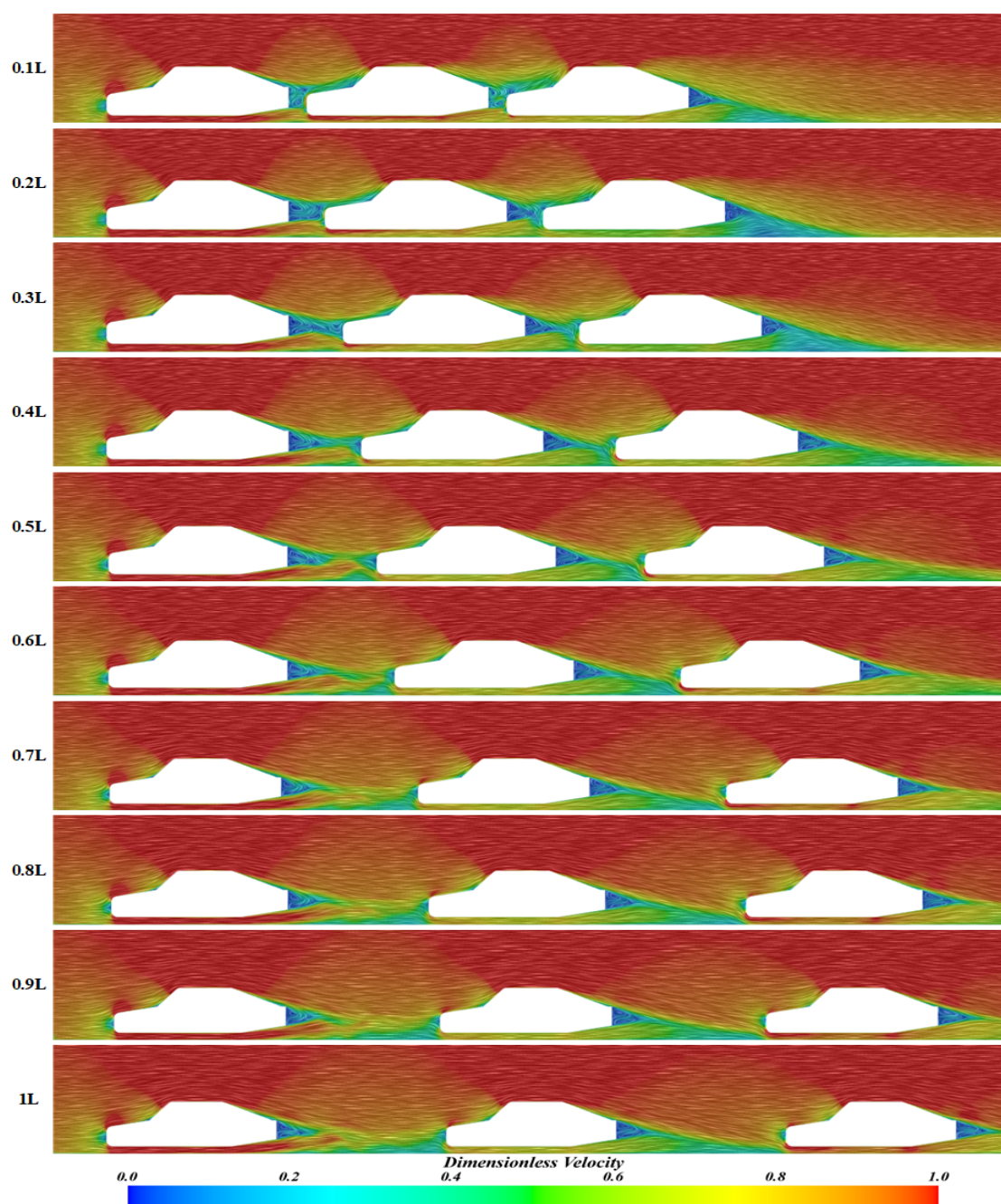


图 12 间距对快背统编三车车列中截面速度场的影响

Fig.12 The effect of inter-vehicle distance on the mid-section velocity field of the fastback 3-vehicle uniform platoon

- ZHOU Hua. Numerical simulation and wind tunnel test on aerodynamic characteristics of MIRA models [D]. Shanghai: Tongji University, 2019.
- [17] ZHU Hui, YANG Zhigang. Grid independence and scheme research for simulating aerodynamic drag of MIRA model[C]// Iet International Conference on Information Science & Control Engineering. IET, 2014.
- [18] DU Qianqian, HU Xingjun, LI Qifei, *et al.* Numerical optimization research on rear characteristic angles based on MIRA model for aerodynamic drag reduction [J]. Advanced Materials Research, 2013, 774:428.
- [19] GU Zhengqi, WANG Shi, QIU Jian, *et al.* Wind tunnel tests of MIRA model group for study of vehicle's rear shape [J]. Science & Technology Review, 2011, 29(8):67.