

# 汽车车型对三车队列行驶气动阻力的影响

杨志刚<sup>1,2,3</sup>, 郭 婷<sup>1,2</sup>, 夏 超<sup>1,2</sup>, 鄢功杰<sup>1,2</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:** 采用数值模拟方法研究 3 种 MIRA 汽车车型(方背车、快背车和阶背车)对三车队列在一倍车长间距下气动阻力的影响。通过对 27 种编队工况下的整体队列和单车各部位气动阻力以及车间流场进行详细分析, 结果表明: 头车受到中车阻塞造成其背部压力回升, 3 种车型作为头车, 自身均可实现减阻; 中车由于头尾车和自身车型的共同作用, 会受到背部压力回升, 前部正压以及前缘圆弧负压减弱的综合影响, 3 种车型的中车阻力有减有增; 尾车受中车和自身车型共同作用, 压力变化同中车类似, 阻力也有减有增。前车的低速尾流区会对后车起到庇护作用, 但也会造成后车前缘圆弧部位吸力减小, 不利于队列减阻, 甚至造成增阻。三车队列最佳编队是快背头车—方背中车—方背尾车, 减阻量可达 0.12 (120 counts)。

**关键词:** 汽车队列; 气动减阻; MIRA 模型; 尾流

**中图分类号:** U462.2

**文献标志码:** A

## Effects of Vehicle Types on Aerodynamics of Three Vehicle Platooning

YANG Zhigang<sup>1,2,3</sup>, GUO Ting<sup>1,2</sup>, XIA Chao<sup>1,2</sup>, YAN Gongjie<sup>1,2</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 and Technology Research Institute, Beijing 102211, China)

**Abstract:** The effects of three MIRA bodies, i. e., squareback, fastback, and notchback, on the aerodynamic resistance of three vehicles in platooning are numerically explored at one-vehicle spacing. A detailed analysis of the resistance of the whole vehicles and individual parts as well as inter-vehicle flow under 27 different platooning configurations shows that the back pressure of the head vehicle rises due to the blockage of the middle vehicle. All three types of head vehicle can achieve resistance reduction for themselves. The resistance of the middle vehicle will be affected by the

back pressure rebound, weakening of the front positive pressure and front edge arc negative pressure due to the combined effect of the head, middle, and trailing vehicles. Thus, some cases of the middle vehicle in platooning have a low resistance and some have a high resistance. The pressure and resistance changes of the trailing vehicle is similar to those of the middle vehicle in view of the combined effect of the middle and the trailing vehicle types. The low-speed wake region of the preceding vehicle is beneficial to the resistance reduction of the following vehicle, but it will also reduce the suction of the arc at the front edge of the following vehicle, which has a negative effect on the platooning drag reduction, and even increases the whole resistance. The best configuration of the three-vehicle platooning is the fastback head vehicle, squareback middle vehicle, and the notchback trailing vehicle with a resistance reduction of up to 0.12 (120 counts).

**Key words:** vehicles platooning; aerodynamic drag reduction, MIRA model; wake

随着 5G 通信技术和汽车自动驾驶技术的发展, 智能汽车队列行驶已成为可能, 研究结果表明汽车队列行驶具有大幅减少气动阻力的潜力。在实际情景中, 汽车队列由公路上行驶的汽车随机组成, 所以队列中的汽车可能属于不同车型, 具有不同的尾部流场形态, 而汽车的气动阻力则与尾部造型具有密切关系。

贺宝琴<sup>[1]</sup>采用数值模拟和风洞试验研究了车身外形、纵向间距和汽车数量等参数对汽车统编队列行驶气动特性的影响规律, 研究表明不同统编车型队列行驶的尾流结构各不相同, 但其减阻机理都是一致的。Pagliarella 等<sup>[2]</sup>对 25° 和 35° 背部倾角的 Ahmed 模型组成的两车统编和混编队列进行了风洞

收稿日期: 2022-10-22

基金项目: 上海市专业技术服务平台项目(19DZ2290400); 上海市重点实验室项目(18DZ2273300); 中央高校基本科研业务费专项资金

第一作者: 杨志刚(1961—), 男, 工学博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为车辆空气动力学。E-mail: zhigangyang@tongji.edu.cn

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

试验研究,结果表明,不同背部倾角会对队列阻力产生重要影响。Geoff 等<sup>[3-4]</sup>研究了由改型的MSM模型和 Windsor 模型组成的队列风洞试验,发现多种队列编组下均有单节车出现增阻现象;同时研究还指出由低阻汽车模型组成的两车到五车队列,队列各车均会增阻,而由高阻汽车模型组成的队列可以达到减阻的效果<sup>[4-5]</sup>。Frank 等<sup>[5]</sup>用3种不同前缘导角和不同尾部的GETS模型,通过数值模拟和风洞试验研究发现在最小间距为0.10倍车长时两车队列减阻最多,尾车的前缘倒角越小减阻越大。杨志发等<sup>[6]</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。王靖宇等<sup>[7]</sup>研究 MIRA 阶背模型三车队列,结果表明无论间距如何,平均气动阻力都有一定程度的降低。傅立敏等<sup>[8-9]</sup>研究发现,队列行驶模式下随跟车距离的减小,阻力值降低;在间距一定时,随着队列中车辆数目的增加,每辆车的阻力系数都降低。

综上可知,关于汽车队列行驶的空气动力学特性已引起了学者们的广泛关注,但目前的研究仍存在着一些不足,比如不同队列编组下某些车型会出

现增阻现象,但研究并没有给出具体增阻的原因;同时不同车型队列由于尾部形状差异带来的不同尾迹流场,继而引起的队列减阻效果的差别和原因也有待进一步阐明。这主要是由于先前研究重点关注队列各车的整车阻力或队列整体阻力,而针对队列中不同车型上具体部位阻力差异的研究以及车间流场的研究还不充分。为此,本文以MIRA汽车标准模型为研究对象,重点探究3种不同尾部形状车型(方背车、快背车和阶背车)对三车队列在1倍车长间距下气动阻力的影响。通过对27种编队工况下的队列整体阻力和各车各部位气动阻力、车间和尾部速度场进行精细分析,进一步阐明三车队列气动阻力变化的机制。

## 1 计算模型及设置

### 1.1 汽车模型

本文的研究对象为实车尺寸的MIRA方背、快背和阶背汽车标准模型<sup>[10-13]</sup>,尺寸为4 165×1 625×1 421(长 $L$ ×宽 $W$ ×高 $H$ ,单位:mm),3种模型除了尾部结构不同外,在外形几何上无其他不同,模型的三维效果图如图1所示。

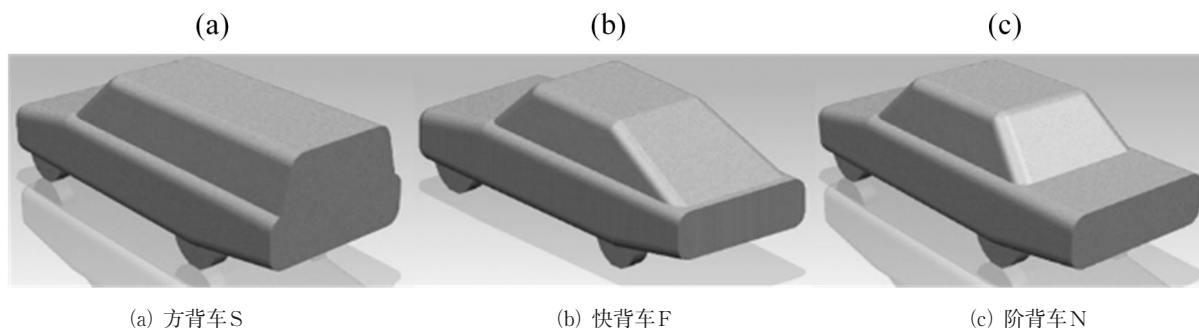


图1 MIRA模型组

Fig. 1 MIRA model group

### 1.2 数值计算设置

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。计算域如图2,尺寸为 $10L \times 10W \times 5H$ ,速度入口与汽车前脸距离为 $3L$ ,出口与车尾垂直背部距离为 $6L$ ,模型阻塞比为2.2%。边界条件指定如下:入口为速度入口( $U_\infty=120$  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。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 mm,第一层边界层 $30 < y^+ < 60$ ,到壁面的距离

为1 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

本文遵循以下队列命名规则:数字代表汽车在队列中的位置,1代表头车,2代表中车,3代表尾车;大写字母代表车型,S表示方背车,F表示快背车,N表示阶背车。为了探究不同网格数对每种车型的影响,选用含有3种车型的混编队列进行网格无关性研究更具有代表性,因此,本文采用S1-F2-N3的三车队列进行网格无关性研究。选取了网格数不同的3种网格方案,中截面网格分布如图3所示。

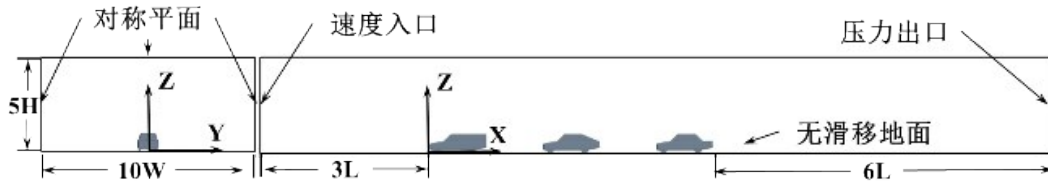
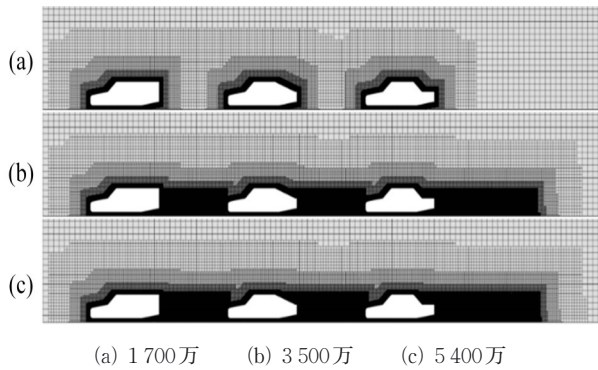


图2 队列计算域尺寸和边界条件

Fig. 2 Domain dimensions and boundary conditions of platooning



(a) 1 700 万 (b) 3 500 万 (c) 5 400 万

图3 汽车模型中截面网格分布

Fig. 3 Mesh schemes

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,如表1所示。气动阻力系数 $C_d$ 的定义如下:

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

式中: $F_d$ 是空气阻力,单位:N; $\rho_{\infty}$ 是空气密度,单位: $\text{kg}/\text{m}^3$ ; $U_{\infty}$ 是来流速度,单位: $\text{m}/\text{s}$ ;A为正向投影面积,单位: $\text{m}^2$ 。

从表1可以得到: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、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,最终选取网格总数为3 488万的网

格方案。

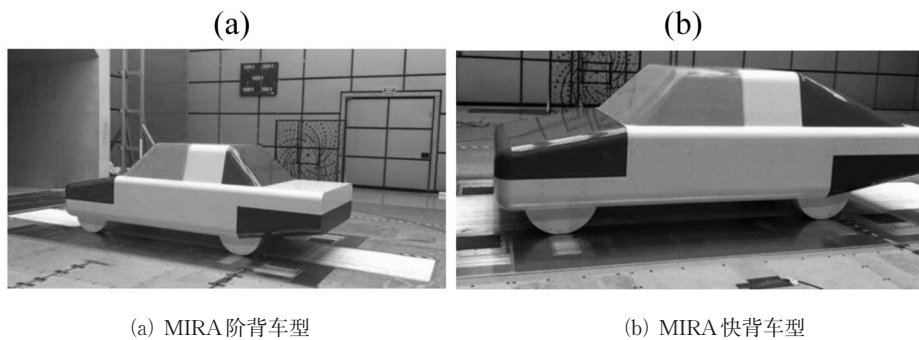
表1 三种体网格数下的各车 $C_d$

Tab.1  $C_d$  of each vehicle under the grid number of three types of bodies

体网格数/万	1 722	3 488	5 411
S1	0.309	0.300	0.301
F2	0.281	0.284	0.284
N3	0.287	0.284	0.292
队列整体	0.877	0.868	0.877

## 2 风洞实验验证

由于实验条件的限制,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得到的<sup>[14]</sup>,阶背车和快背车模型的气动实验<sup>[15]</sup>在上海地面交通工具风洞中心气动声学整车风洞完成,如图4所示。该风洞为3/4开口回流式风洞,试验段喷口面积 $27 \text{ m}^2$ ,试验段长度15 m。地板配置五带移动地面模拟系统,与六分量天平构成完整的气动力测试系统。试验段最高风速可达250 km/h,静压梯度小于 $0.001/\text{m}$ 。单车 $C_d$ 的数值计算结果与风洞实验结果进行对比,如表2所示。由表可以看出,方背、快背和阶背车型的数值计算误差分别为2%、1.2%和3%,由此验证了本文数值方法的可靠性。



(a) MIRA 阶背车型

(b) MIRA 快背车型

图4 上海地面交通工具风洞中心风洞实验

Fig. 4 Wind tunnel testing in Shanghai Automotive Wind Tunnel Center



表2 单车 $C_d$ 对比Tab. 2 Comparison of single vehicle  $C_d$ 

$C_d$	方背	快背	阶背
数值计算	0.343	0.257	0.289
风洞实验	0.350	0.254	0.298
误差	2%	1.2%	3%

### 3 结果分析

为了更全面的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5所示。方背车共分成包括前脸、围绕前脸四周的前缘倒角、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。

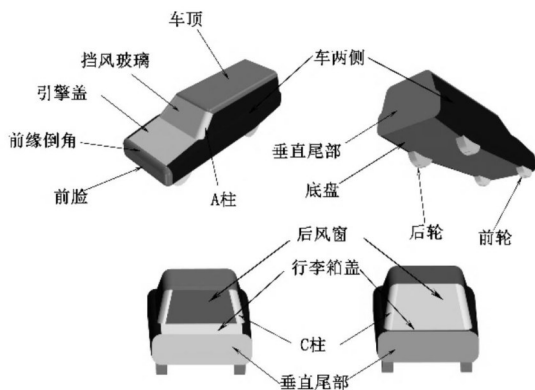


图5 MIRA模型部件图

Fig. 5 Components of MIRA models

#### 3.1 队列整车减阻分析

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:

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

图6展示了头车为方背车的三车队列中各车和队列整体相较于单车时的阻力系数变化。整体上看,各队列的总体阻力均可实现减阻,其中S1-F2-S3可实现最大减阻量,减阻量为0.036 (36 counts)。各队列中的方背头车S1的减阻量都维持在0.041左右,不受队列中车、尾车车型影响;方背中车S2减阻量为0.011左右,快背中车F2和阶背中车N2均出现增阻,增阻量分别为0.025和0.018,不同车型的中车阻力变化值基本维持定值,不受尾车车型的影响,只与中车自身车型有关;对于队列尾车,由图中纵列可以看出,当中车车型不同时,相同车型的尾车阻力变化是不同的;由横排来看,当中车车型相同时,不

同车型的尾车阻力变化也不相同,所以尾车阻力变化既受中车车型的影响,也受自身车型的影响;整体上看,不同队列尾车阻力变化差别较大,其中快背尾车F3均出现增阻,且当头车和中车都是方背车(S1-S2)时,不管尾车为何种车型,尾车均出现增阻。

图7展示了头车为快背车的三车队列阻力系数随车型的变化。同样从整体上看,各队列的总体阻力均可实现减阻,其中F1-S2-S3可实现最大减阻量,减阻量为0.118。从图中可以看出,快背头车F1的减阻量在各队列中维持在0.026左右,比方背头车S1的要少,其减阻效果不受中车和尾车车型的影响;方背中车S2减阻量为0.051左右,快背中车F2为0.011左右,阶背中车N2为0.012左右;快背头车队列其中车都是减阻的,不同车型减阻量不同,但也基本维持定值,不受尾车车型的影响,受自身车型的影响;而尾车大部分队列工况都是减阻的,但当头车和中车都为快背车(F1-F2)时,快背尾车F3和阶背尾车N3出现增阻,为0.020左右。头车为阶背车的三车队列阻力系数随车型的变化与快背头车队列相似,只是阻力变化值有微小差异,这里不再赘述。

#### 3.2 头车各部位减阻分析

由3.1节分析可知,头车阻力变化不受中车和尾车尾部形状的影响,但当头车车型尾部变化时,不同类型头车的阻力变化是不同的,即头车阻力变化受自身尾部车型的影响。图8展示了不同头车队列下头车各部位阻力变化,从图中可以看出:无论队列头车是何种车型,其前部如前脸、前缘倒角、前轮、引擎盖、挡风玻璃和A柱的阻力系数变化不大;减阻主要发生在底盘,垂直背部和后风窗等区域,其中垂直背部减阻量最大,尤其是方背车的垂直背部,其减阻量比快背车和阶背车的减阻量几乎大一倍,这也直接导致了方背头车队列(S1-S2-S3)的头车减阻量在三种队列中最大。

#### 3.3 中车各部位减阻分析

图9和图10分别展示了3种不同头车车型队列下(中车和尾车均为方背体)中车各部位阻力变化和中截面速度分布。从图中可以看出,不管是哪一种头车头型,由于中车在头车低速尾迹区的作用下,前方来流速度减小(如图10所示),各队列中车的前缘圆角、A柱和车顶的负压减弱,继而造成吸力减小,阻力增大;同时前方来流速度减小,也使得中车的前脸、前轮、后轮和底盘部位受到气流的冲击减弱,阻力减小;此外中车的垂直背部受到尾车的阻塞作用,导致其背压回升,阻力明显减小。

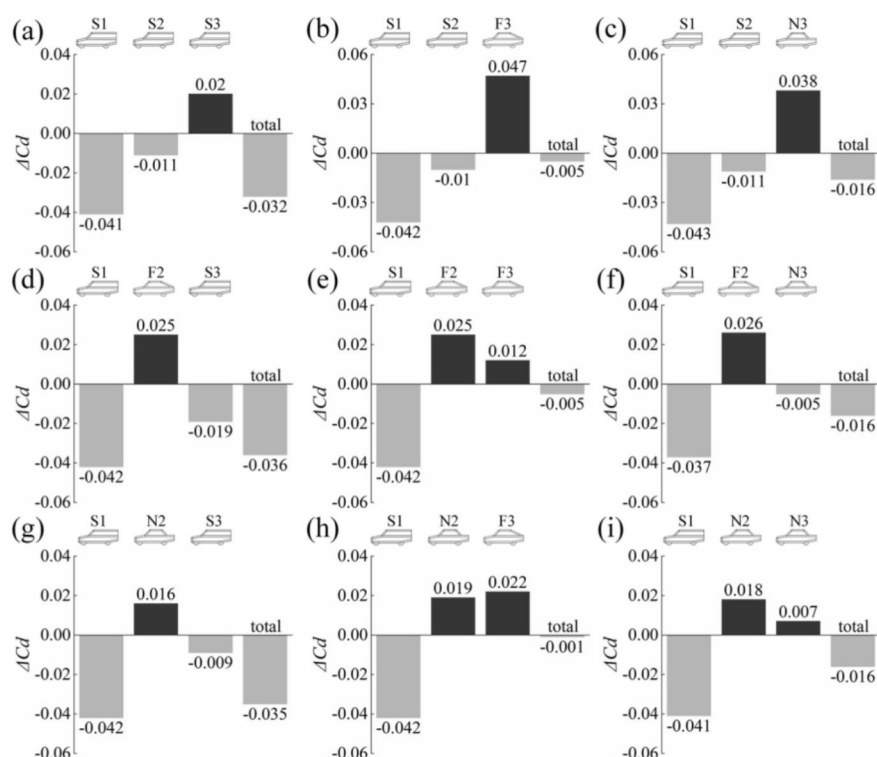


图6 头车为方背车的三车队列 $\Delta C_d$ 随队列车型的变化(灰色表示减阻,黑色表示增阻)

Fig. 6  $\Delta C_d$  of squareback head vehicle platooning of three vehicles (grey: reduction; black: increase)

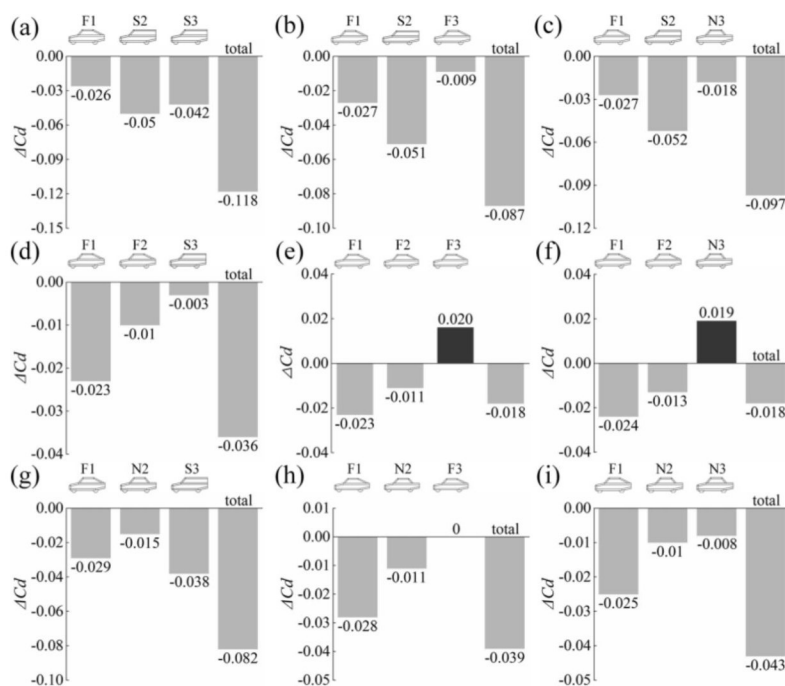


图7 头车为快背车的三车队列 $\Delta C_d$ 随队列车型的变化(灰色表示减阻,黑色表示增阻)

Fig. 7  $\Delta C_d$  of fastback head vehicle platooning of three vehicles (grey: reduction; black: increase)

由于3种不同头车的尾迹区存在较大的不同,方背体尾迹区呈现出更低速和气流上洗的特点,而快背和阶背的尾迹区则呈现出气流下洗的特征,继而导致三种不同头型下,中车的减阻效果各不相同。

综合来看,方背头车队列(S1-S2-S3)的中车减阻最少。

中车阻力变化还会受到自身车型的影响,图11展示了不同中车队列下中车(S2、F2或N2)各部位

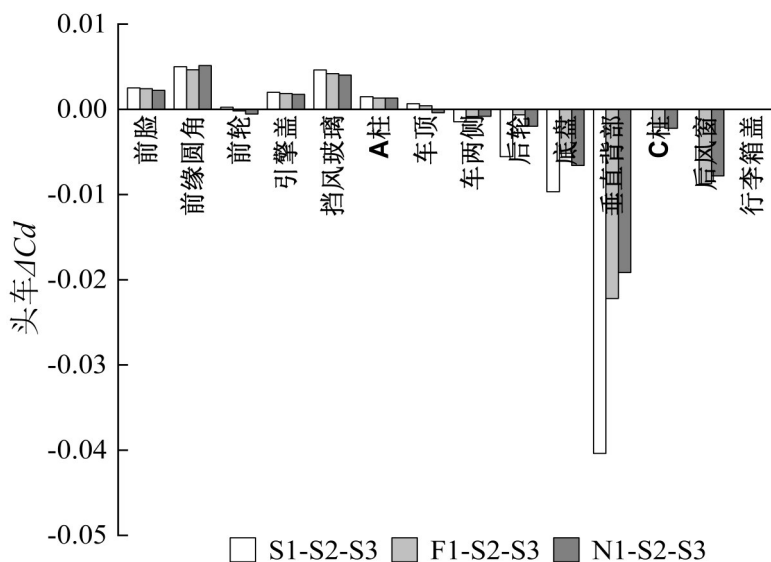


图8 不同头车队列下头车(S1、F1或N1)各部位阻力变化

Fig. 8 Variation in resistance in various parts of head vehicle (S1, F1 or N1) in different head vehicle platooning

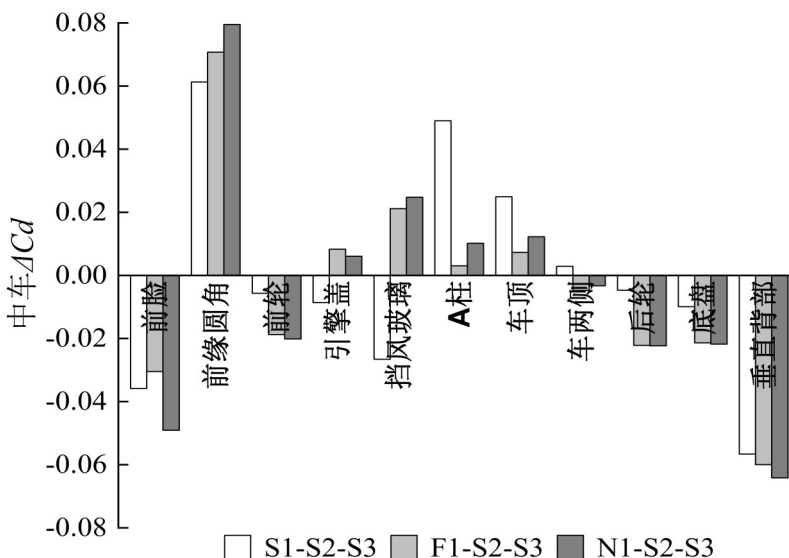


图9 不同头车队列下中车S2各部位阻力变化

Fig. 9 Variation in resistance of various parts of middle vehicle S2 in different head vehicle platooning

的阻力变化,从图中可以得到:中车车型不同时,各中车前部阻力变化几乎没有差异,只有尾部阻力变化差异明显,如后轮,底盘,垂直背部,后风窗部位,且方背型中车的垂直背部减阻量最多,所以队列中车位置是方背车时,中车的减阻效果最好。

### 3.4 尾车各部位减阻分析

由3.1节分析可知,尾车减阻效果会受头车车型的影响。图12展示了不同头车队列下尾车各部位阻力变化,从图中可以看出:相比于其他两种车型头车队列,方背头车队列(S1-S2-S3)中尾车的前脸、前轮、后轮、底盘和垂直背部的减阻程度要更小,虽

然其前缘圆角的增阻程度也更小,但综合分析下方背头车队列的尾车减阻效果最差。从图10不同头车队列的中截面速度场来看,由于尾车的来流主要来自方背中车的车底气流,而方背头车队列(图10第一排)的中车车底气流速度更高,尾车处在更高的来流速度中,继而导致该尾车各部位的减阻幅度相对更低。

此外,尾车的减阻效果还受中车车型尾部形状的影响。图13展示了不同中车队列下尾车S3各部位阻力变化,从图中可得到:相对于其他两种车型中车队列来说,方背中车队列(S1-S2-S3)中尾车的前

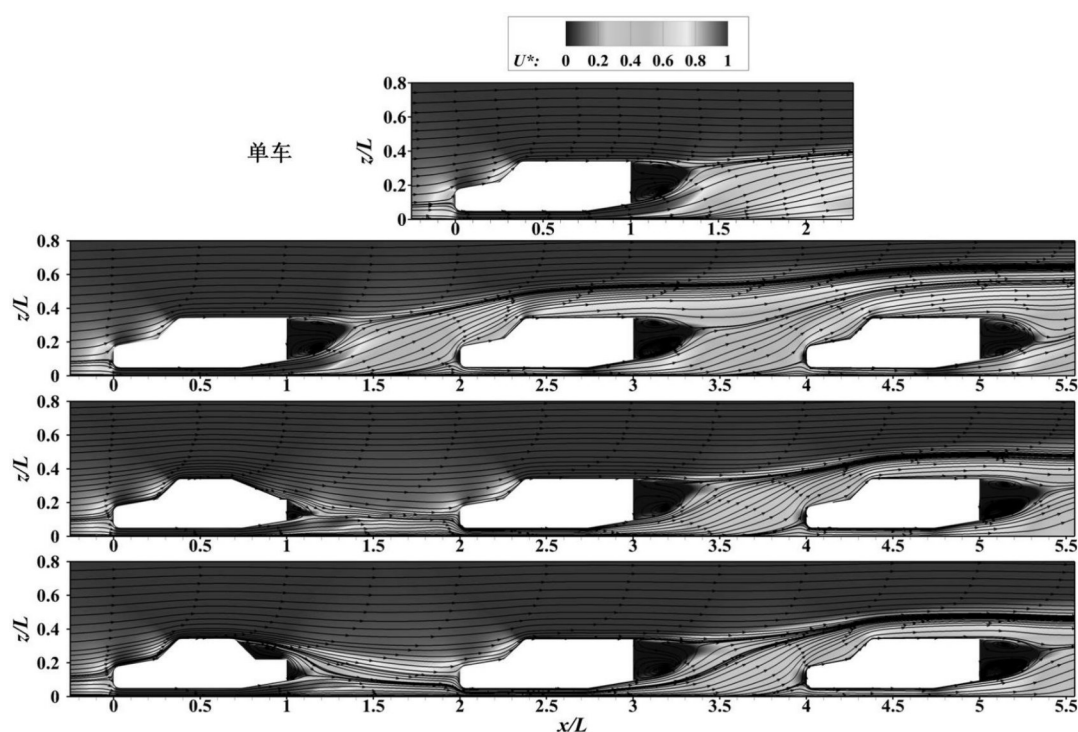


图 10 不同头车队列的中截面速度场

Fig. 10 Velocity field at middle section in different head vehicle platooning

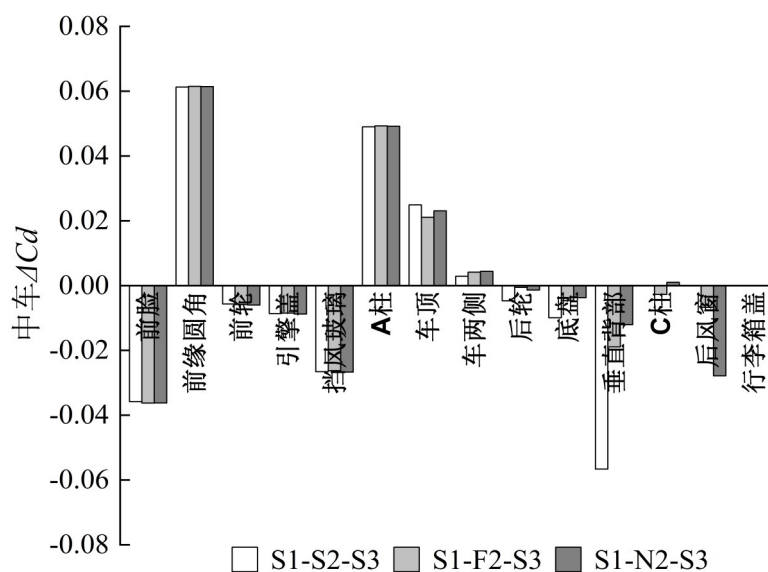


图 11 不同中车队列下中车(S2、F2或N2)各部位阻力变化

Fig. 11 Variation in resistance of various parts of middle vehicles (S2, F2 or N2) in different middle vehicle platooning

脸、后轮、底盘、垂直背部的减阻量更少,但是前缘圆角增阻量也更少,引擎盖和挡风玻璃的减阻量更多,因此综合来看,方背中车队列(S1-S2-S3)中的方背尾车有更优的减阻效果。

图 14 展示了不同中车队列的中截面速度场,从图中可以观察到:方背中车队列(图 14 中第一排)中

的方背尾车来流主要来自于方背中车车底的高速气流,而快背中车队列(图 14 中第二排)和阶背中车队列(图 14 中第三排)中的方背尾车来流来自于中车上部和下部交汇的低速气流,继而导致其尾车前脸和前后轮受到来流的冲击减弱压力减小,底盘和垂直背部的压力回升,继而减阻量相对于方背中车队



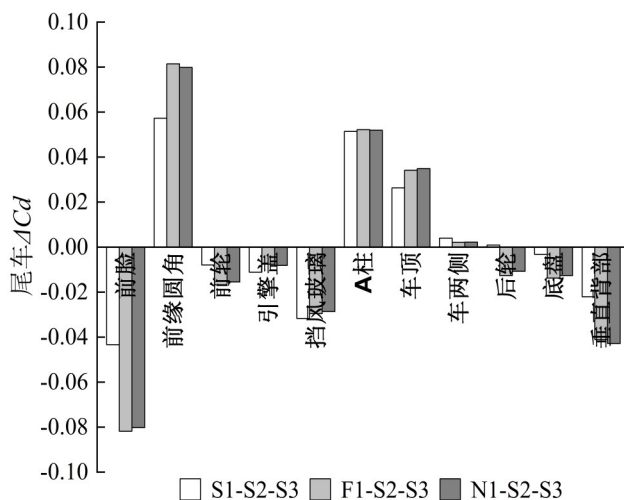


图12 不同头车队列下尾车S3各部位阻力变化

Fig. 12 Drag variation of tail vehicle S3 in different head vehicle platooning

列更多。但是,由于前方来流速度减小,快背中车队列和阶背中车队列的中车前缘圆角的负压减弱,而造成吸力减小,增阻量相对于方背中车队列

更多。

尾车减阻效果除了会受队列头车和中车车型的影响外,还受自身车型的影响。图15展示了不同尾车队列下尾车(S3、F3或N3)各部位阻力变化,从图中可以得到:当尾车车型不同时,垂直背部的阻力变化差异明显,前部阻力变化相差不大,如后轮、底盘、垂直背部和后风窗等部位。其中方背尾车S3垂直背部减阻最多,其车身整体减阻效果最好。

### 3.5 队列整体减阻汇总

图16展示了所有27种三车队列编队工况下的整体阻力变化汇总图,从图中可以观察到:快背车和阶背车作为队列的头车时,其队列普遍减阻较多,尤其是方背车作为队列的中车或尾车时,队列整体减阻效果较好,其中减阻量最大的队列组合为F1-S2-S3,减阻量可达0.12(120 counts);而方背车作为队列的头车时,其队列普遍减阻较少,虽然方背的低速尾迹会对后车起到庇护作用,但也会导致后车前缘圆角等圆弧部位吸力减小,不利于队列的整体减阻。

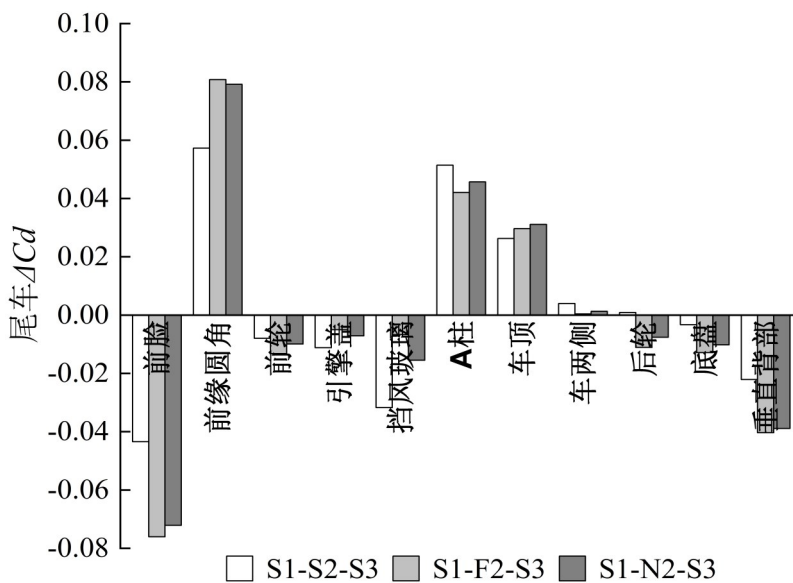


图13 不同中车队列下尾车S3各部位阻力变化

Fig. 13 Variation in resistance of various parts of tail vehicle S3 in different middle vehicle platooning

## 4 结论

本文采用数值模拟研究了27种三车队列编队在一倍车长间距下,不同车型(方背车S,快背车F和阶背车N)的尾部形状对汽车队列行驶气动阻力和车间流场的影响,得到的主要结论如下:

(1) 不同车型的尾迹对队列阻力影响较大,无

论队列头车为何种车型,头车自身均可实现减阻,与中车、尾车车型的尾部形状无关,只与自身车型相关,这主要是由于中车阻塞造成头车背部压力回升。

(2) 队列中车车型不同时,中车自身的整体阻力或增或减,主要归因于中车背部压力回升、前缘等部位正压减弱以及前缘圆角等部位吸力减小的综合影响。



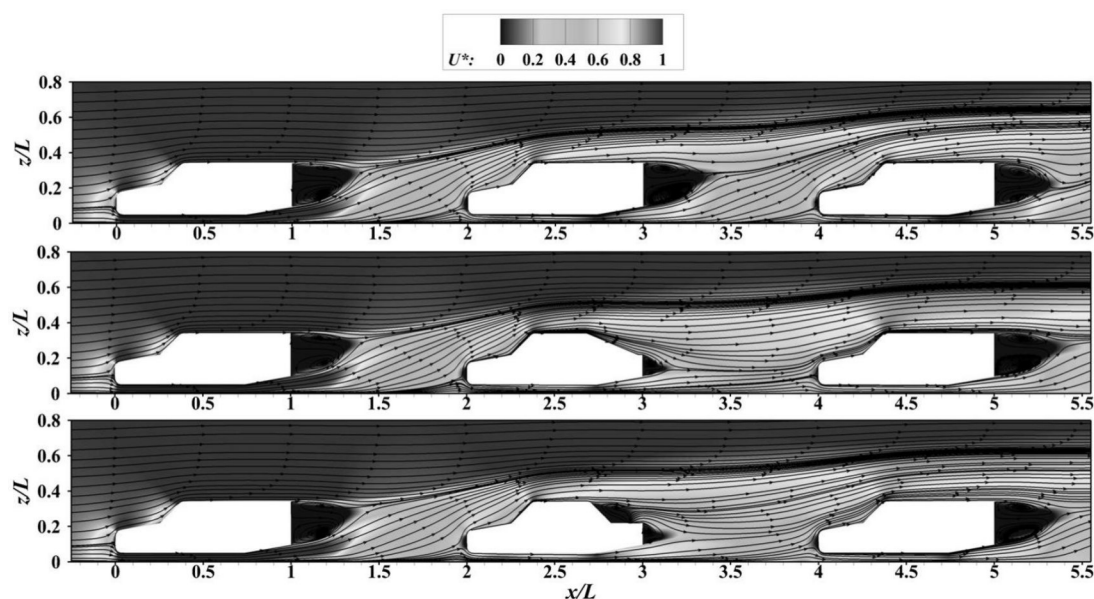


图 14 不同中车队列的中截面速度场

Fig. 14 Velocity field at middle section in different middle vehicle platooning

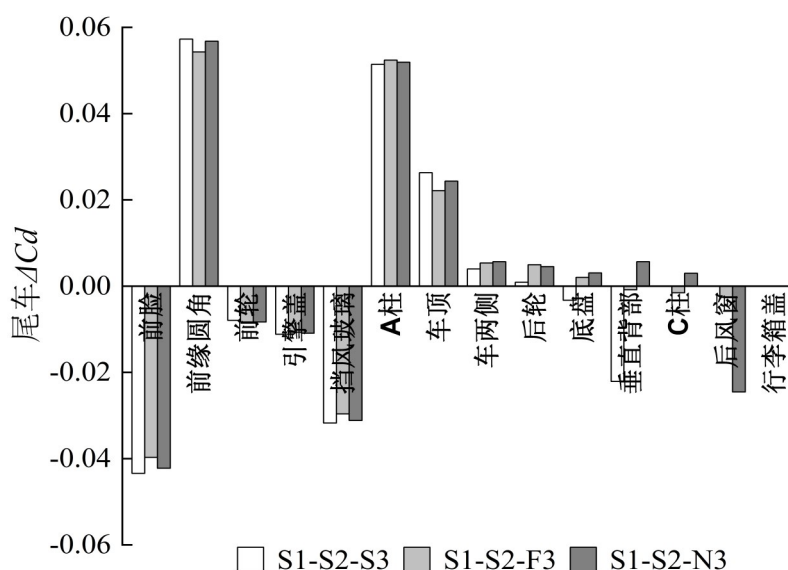


图 15 不同尾车队列下尾车(S3、F3 或 N3)各部位阻力变化

Fig. 15 Variation of resistance of tail vehicle (S3, F3 or N3) for different tail vehicle platooning

(3) 队列尾车阻力也有减有增, 主要来自于前车型和自身车型尾部形状的共同作用, 压力变化部位同中车类似。

(4) 前车(如方背车)的低速尾迹虽然会对后车起到底护作用, 但也会导致后车前缘圆角等圆弧部位吸力减小, 不利于队列的整体减阻, 甚至造成队列整体增阻; 27 种三车队列编队中, 整体减阻效果最好的是 F1-S2-S3, 减阻量可达 0.12(120 counts)。

#### 参考文献:

- [1] 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 Baoqing. Research on Automotive Aerodynamic Characteristics of Platoon [D]. Changchun: Jilin University, 2009.
- [2] PAGLIARELLA R M, WATKINS S, TEMPIA A. Aerodynamic performance of vehicles in platoons: the influence of backlight angles[C]// SAE World Congress & Exhibition. SAE Technical Paper 2007-01-1547. 2007. <https://doi.org/10.4271/2007-01-1547>.

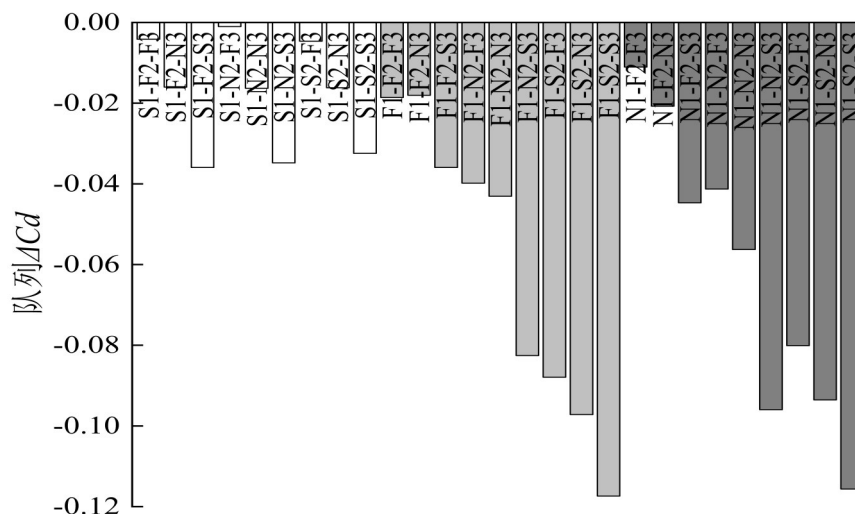


图16 27种三车队列工况下的整体阻力变化

Fig. 16 Variation of whole resistance of 27 platooning configurations of three vehicles

- [3] LE GOOD G, RESNICK M, BOARDMAN P, *et al.* Effects on the aerodynamic characteristics of vehicles in longitudinal proximity due to changes in style [C]// SAE Technical Paper 2018-37-0018, 2018.
- [4] LE GOOD G, BOARDMAN P, RESNICK M, *et al.* An investigation of aerodynamic characteristics of three bluff bodies in close longitudinal proximity [C]// SAE Technical Paper 2019-01-0659, 2019.
- [5] VAN TILBORG F, VAN RAEMDONCK G, SCIACCHITANO A, *et al.* Flow analysis between two bluff bodies in a close distance platooning configuration [J], SAE Int J Commer Veh, 2019, 12(3):179.
- [6] YANG Zhifa, LI Shuhong, LIU Aimin, *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.
- [7] 王靖宇, 刘畅, 李胜, 等. 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, 26(5):138.  
WANG Jingyu, LIU Chang, LI Sheng, *et al.* Numerical simulation of flow field around three-car platoon [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science), 2007, 26(5):138.
- [8] 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.
- [9] 傅立敏, 贺宝琴, 吴允柱, 等. 队列行驶车辆间距对气动特性的影响 [J]. 汽车工程. 2007, 29(5):365.  
FU Limin, HE Baoqin, WU Yunzhu, *et al.* The influence of inter-vehicle distance on aerodynamic characteristics of vehicle platoon [J]. Automotive Engineering. 2007, 29(5):365.
- [10] 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.
- [11] 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. Khon Kaen, Thailand: IET, 2014.
- [12] 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, 774/776: 428.
- [13] 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(11):67.
- [14] 张英朝. 基于仿真与实验的汽车风洞修正研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2010.  
ZHANG Yingchao. Automotive wind tunnel corrections based on numerical simulation and test [D]. Changchun: Jilin University, 2010.
- [15] 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.  
ZHOU Hua. Numerical simulation on aerodynamic characteristics of MIRA models with experimental validation [D]. Shanghai: Tongji University, 2019.